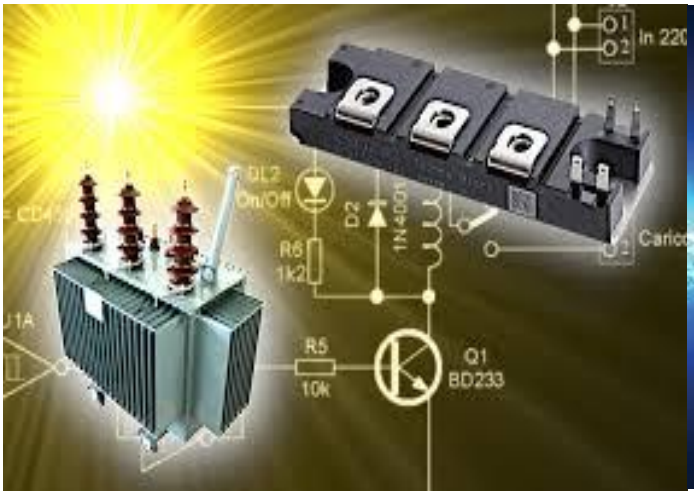
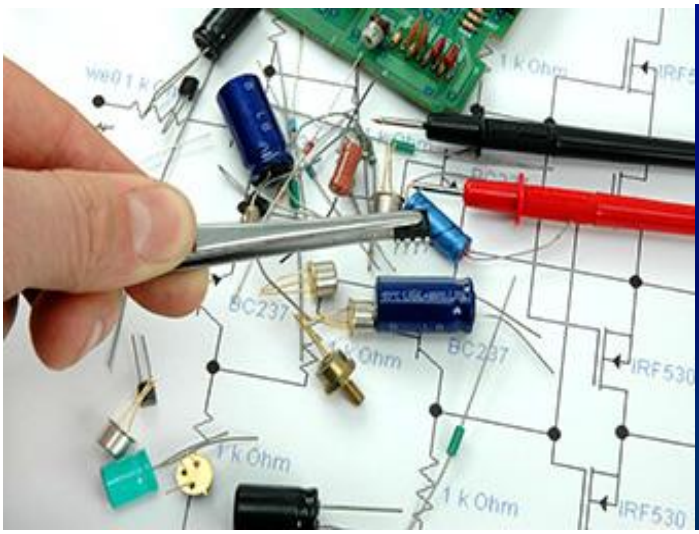
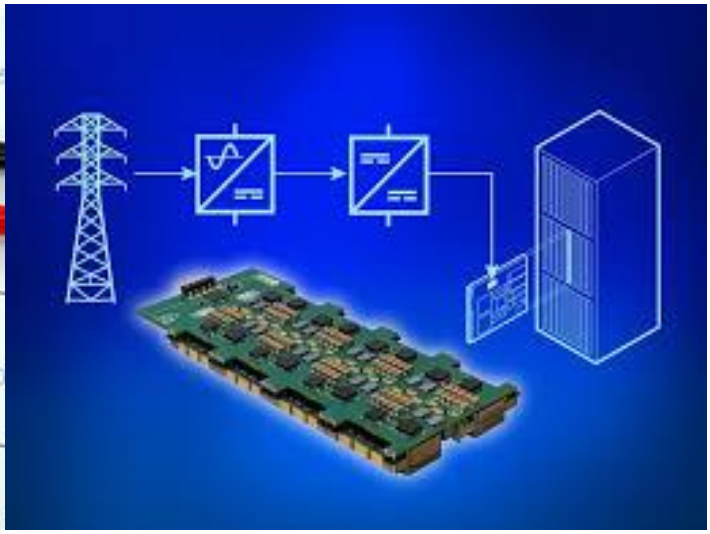
ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE (EPS)

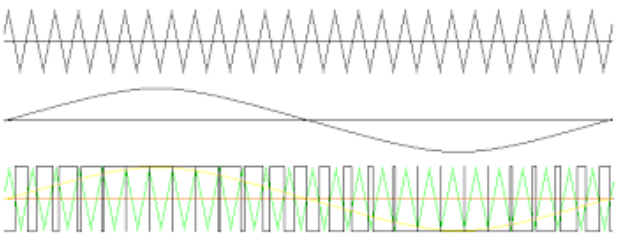
Visoka škola elektrotehike i računarstva strukovnih studija-VIŠER

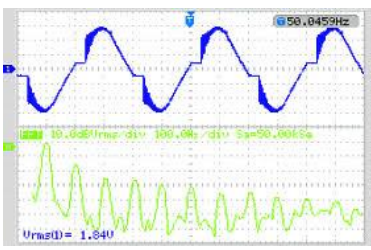
PREDAVANJA-Osnovne studije, modul NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE



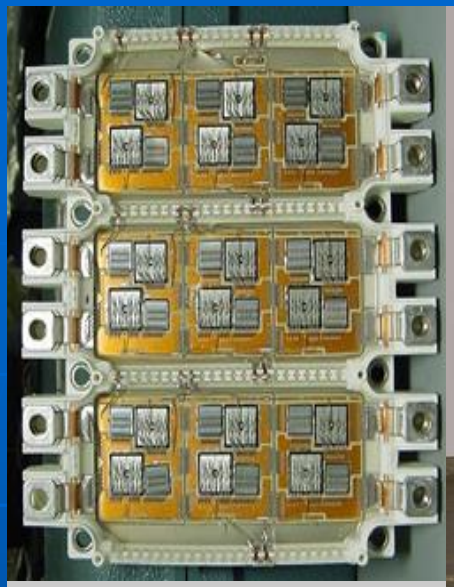


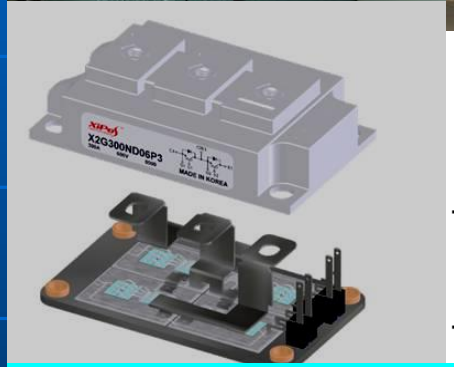


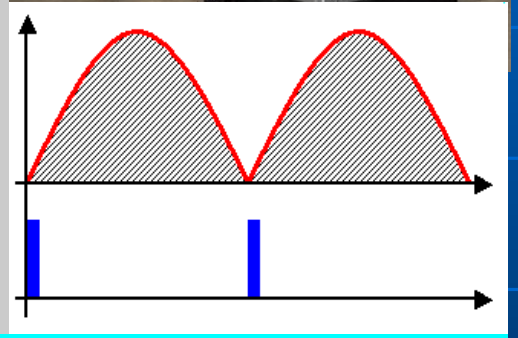


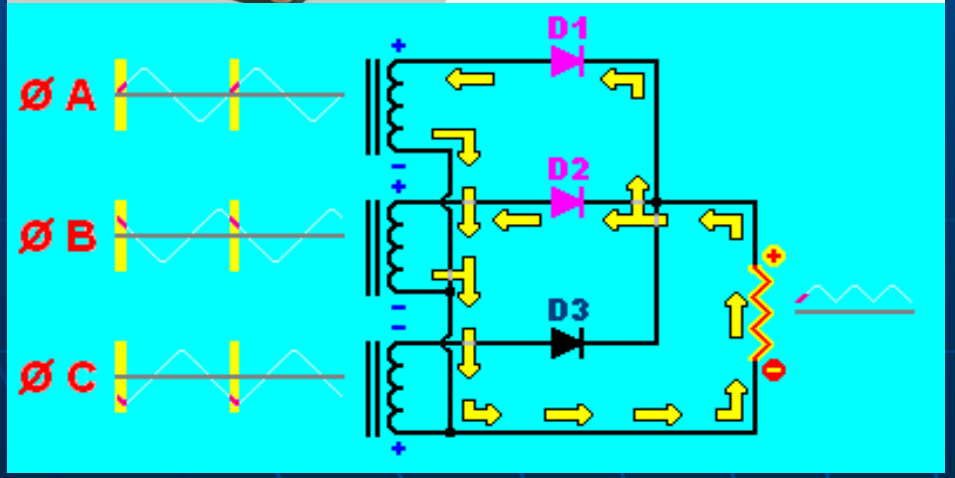


Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.









Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd

Električni pretvarači snage

Studijski program : NET

Status predmeta: izborni

Broj ESPB: 6

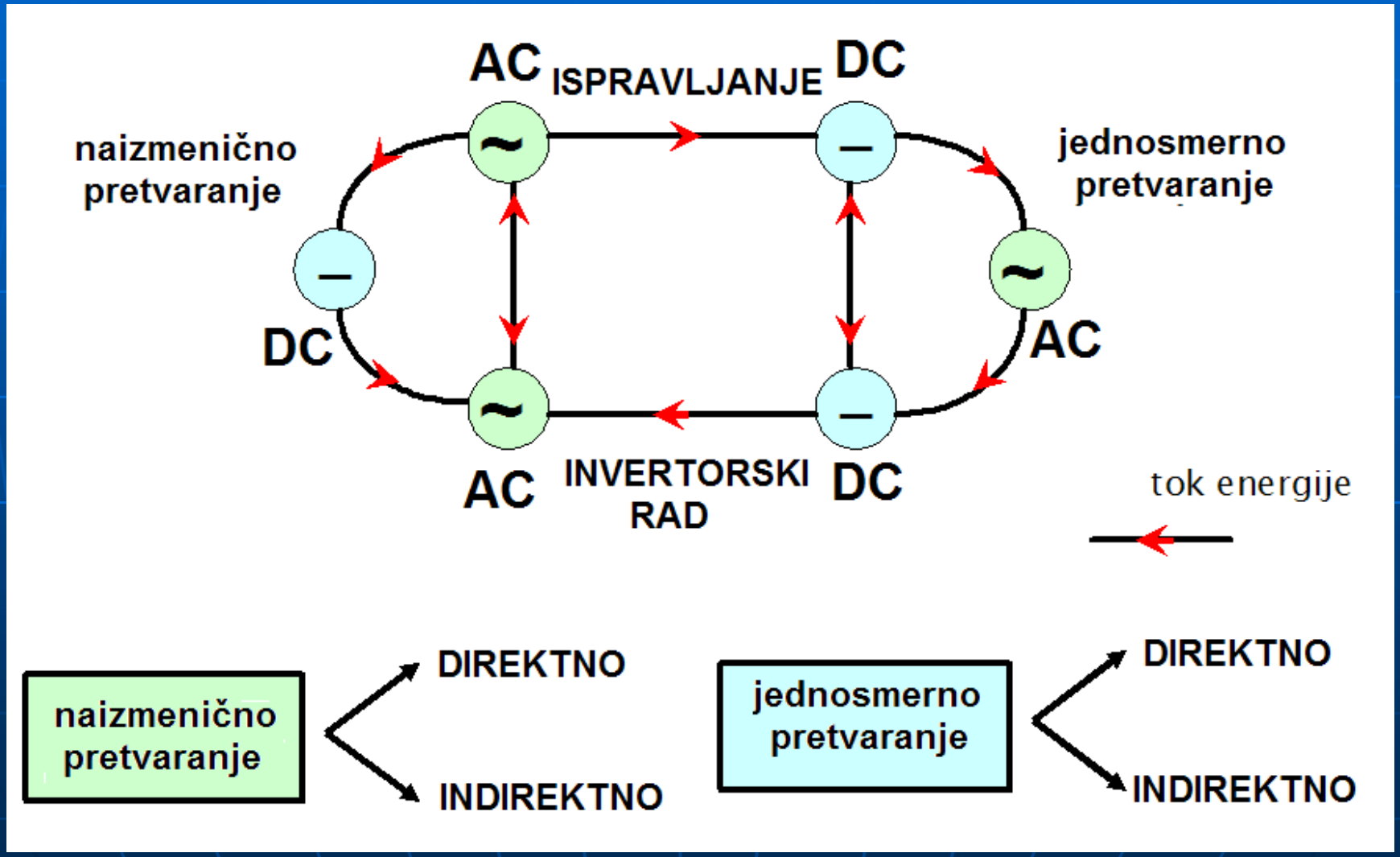
Fond časova: 3č predavanja +2č AUDITORNIH vežbi

USLOV: Osnovna predznanja iz predmeta Osnovi elektrotehnike i Osnova energetike

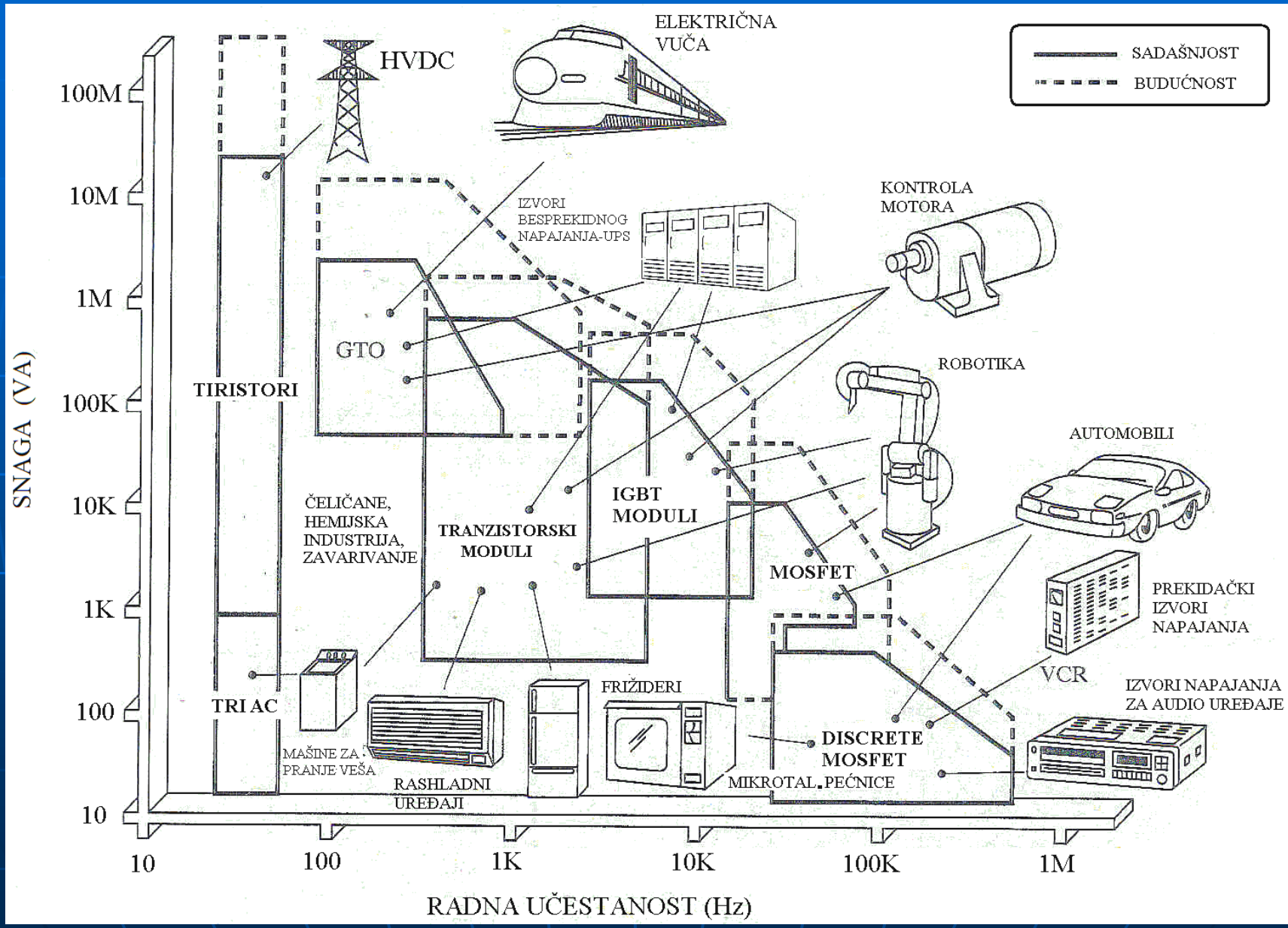
Asistent: Aleksa Arsić, dipl. struk.inž.

Predmetni profesor:
Dr Željko Despotović

ELEKTRIČNO PRETVARANJE ENERGIJE



OBLAST PRIMENE ELEKTRIČNIH PRETVARAČA SNAGE



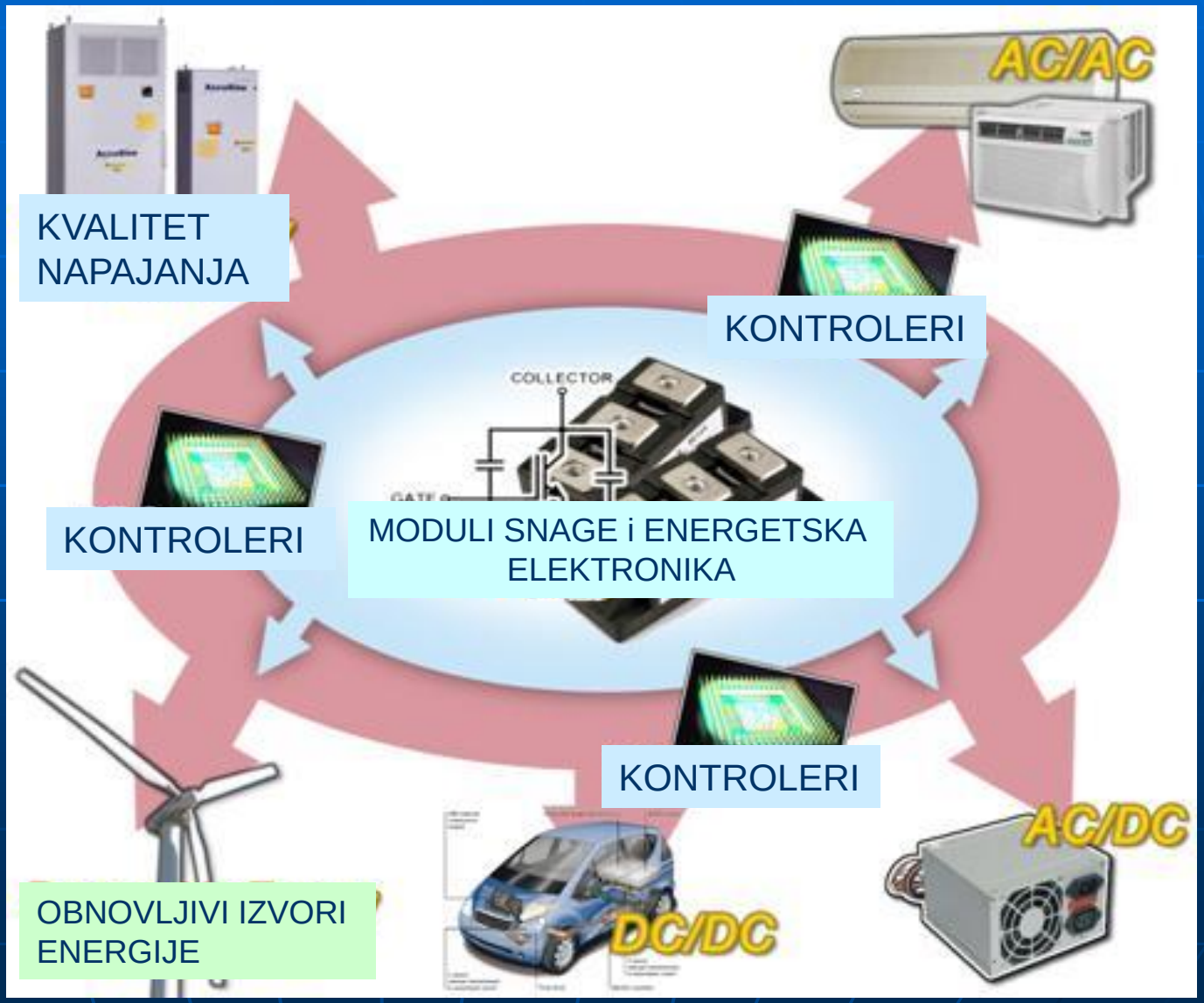
AKTUELNI TRENDOVI RAZVOJA PRETVARAČA SNAGE U OBLASTIMA

- SOLARNI SISTEMI
- ENERGIJA VETRA

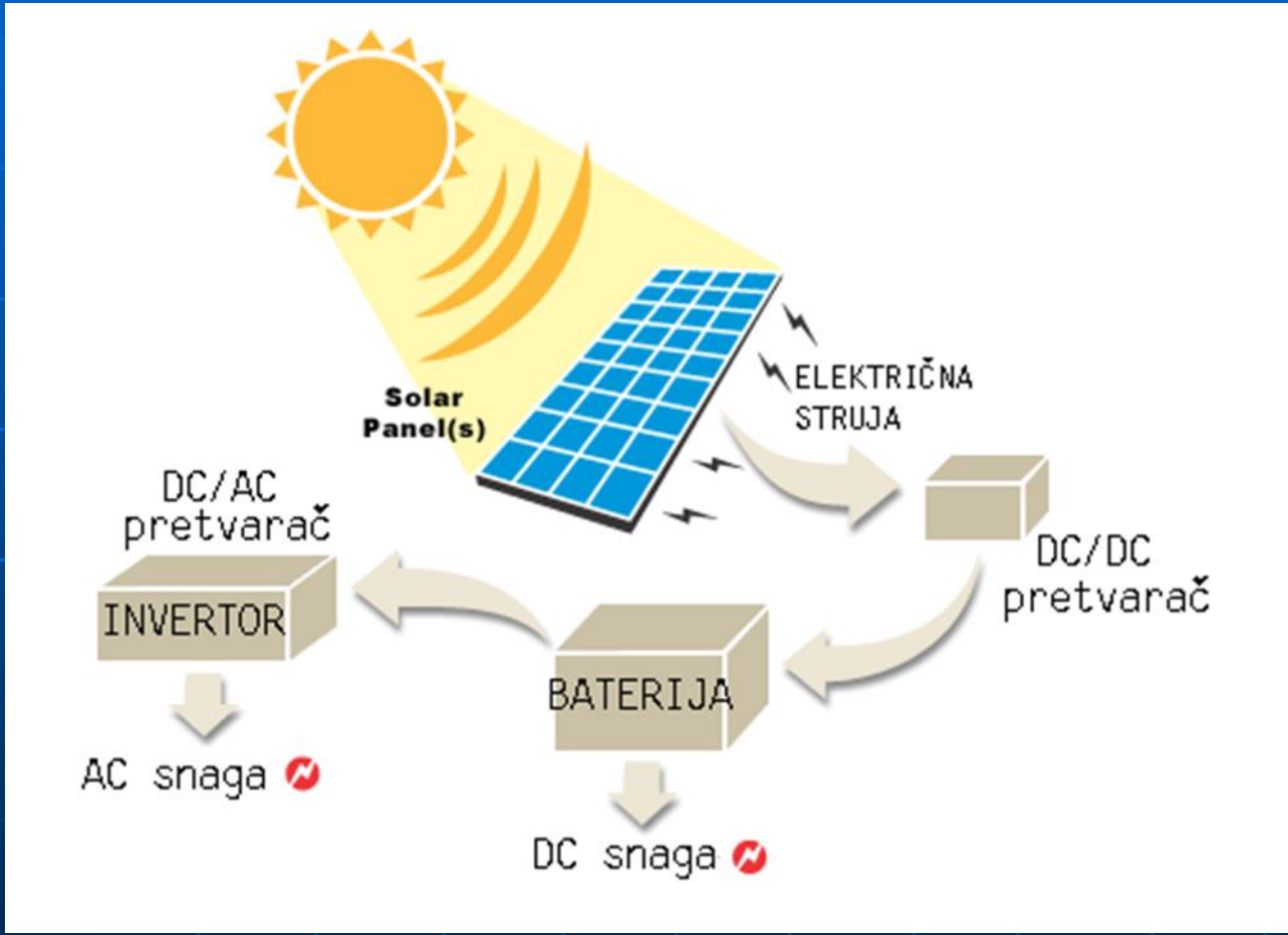
- AUTOMOBILI NA ELEKTRIČNI POGON
- ELEKTRIČNA VUČA (brzi vozovi)
- KOSMIČKI PROGRAM
- JEDNOSMERNI PRENOS ELEKTRIČNE ENERGIJE

  High Voltage Direct Current (HVDC)

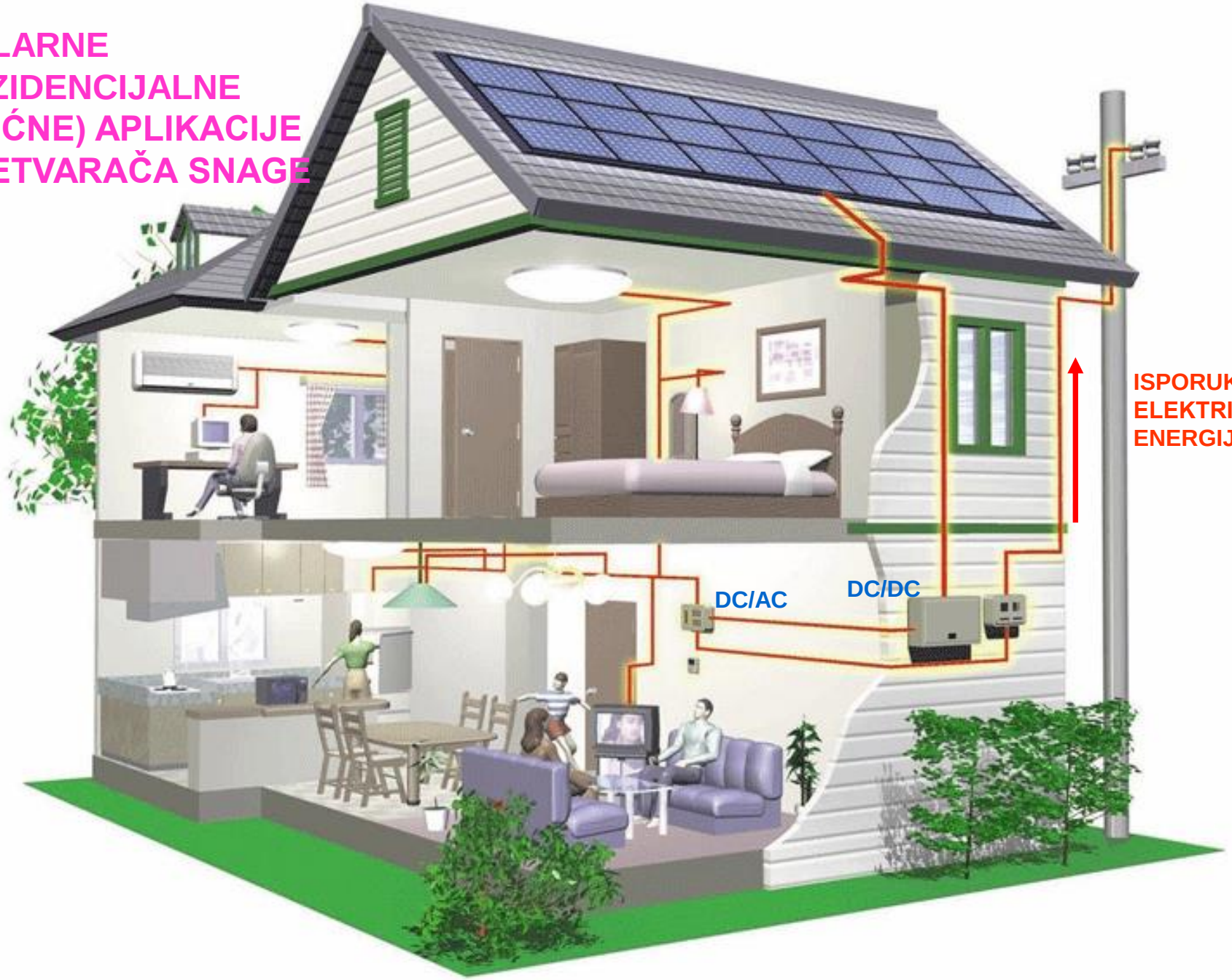
- MREŽNE APLIKACIJE
- KVALITET NAPAJANJA



ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE u SOLARNIM SISTEMIMA



SOLARNE REZIDENCIJALNE (KUĆNE) APLIKACIJE PRETVARAČA SNAGE



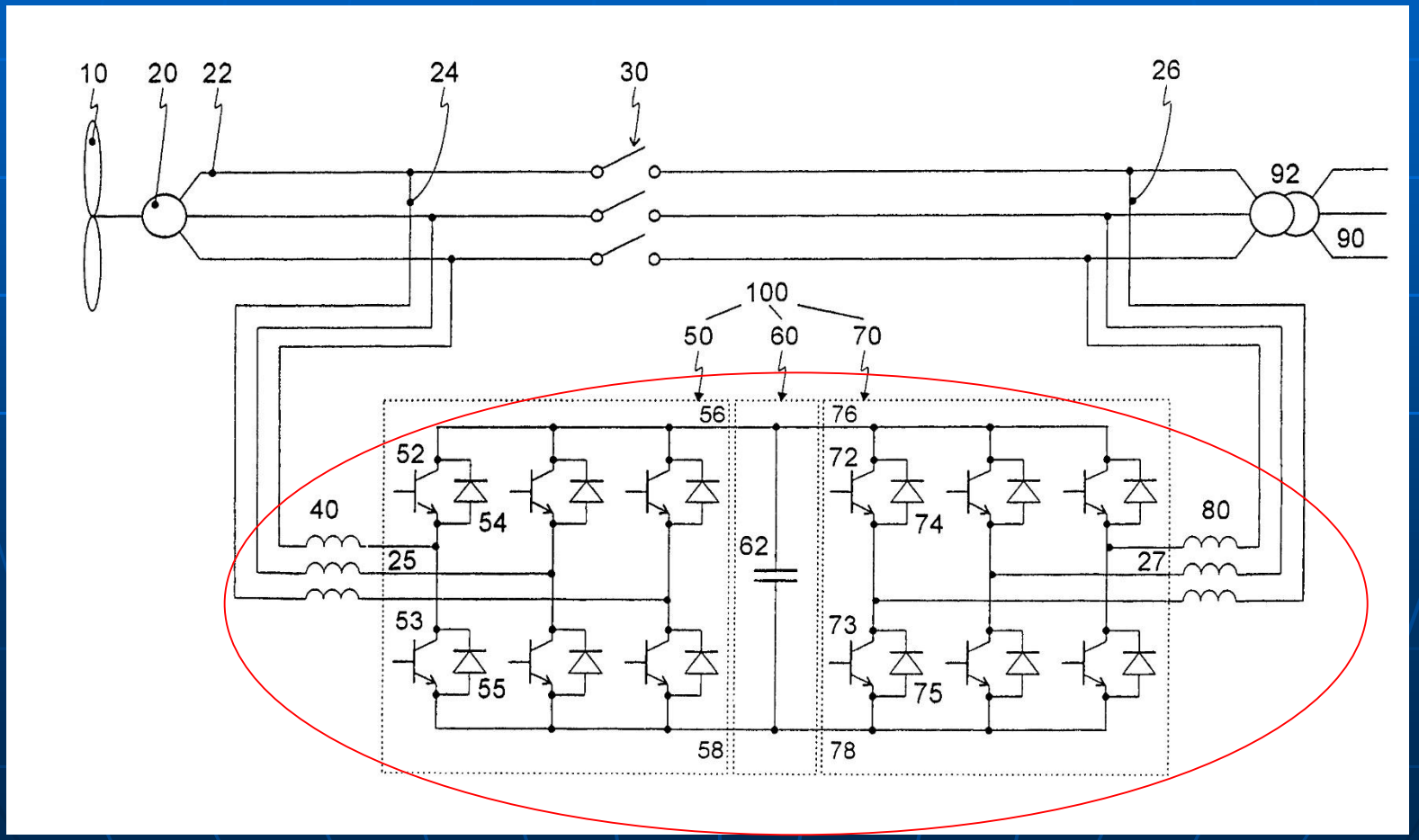
SOLARNI SISTEMI VELIKIH SNAGA- aplikacije električnih pretvarača snage

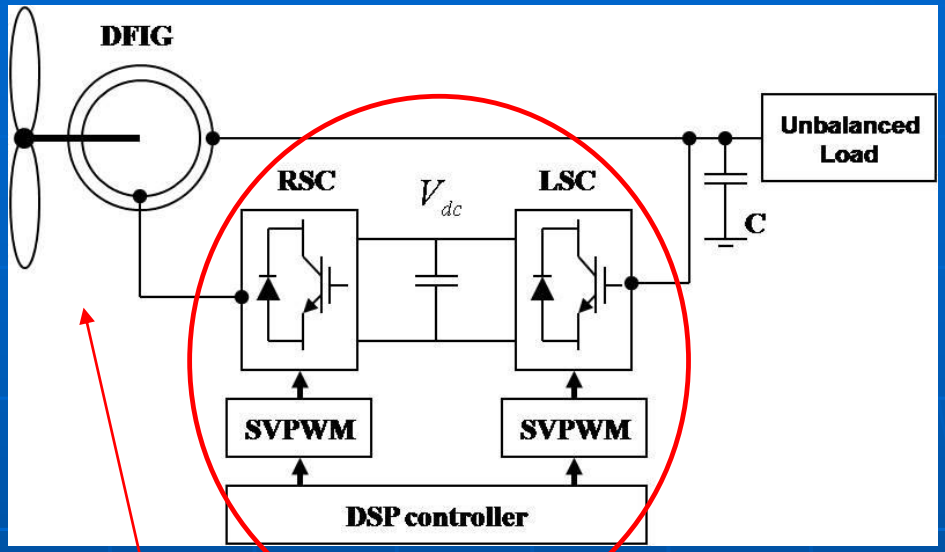
FOTONAPONSKE ELEKTRANE

AUTONOMNA
NAPAJANJA
GSM baznih stanica

SOLARNA RASVETA

ENERGETSKI PRETVARAČI U VETROGENERATORSKIM SISTEMIMA

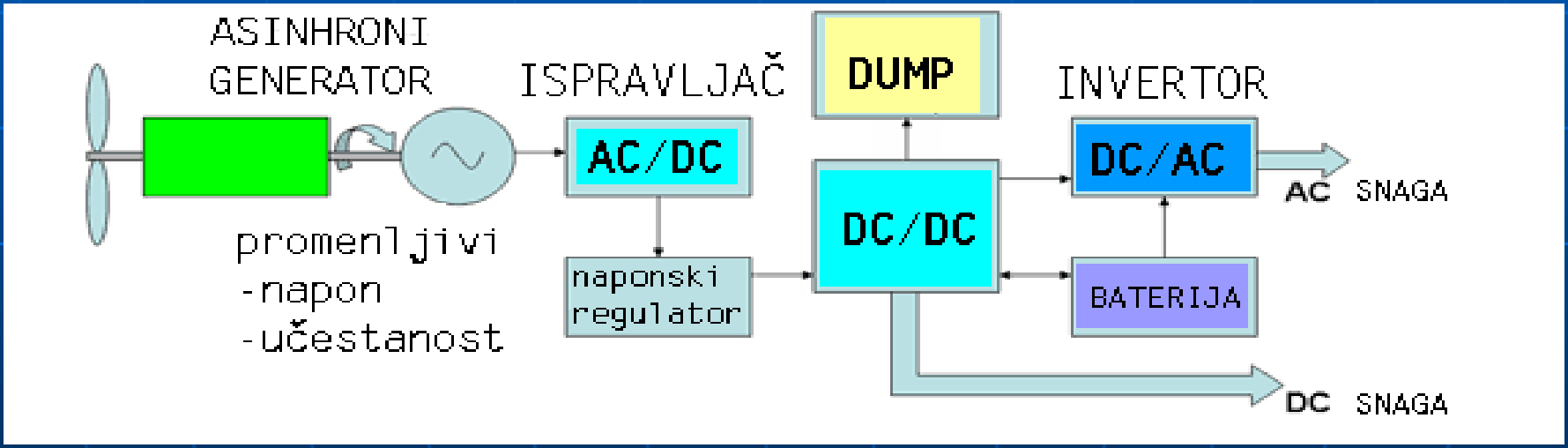




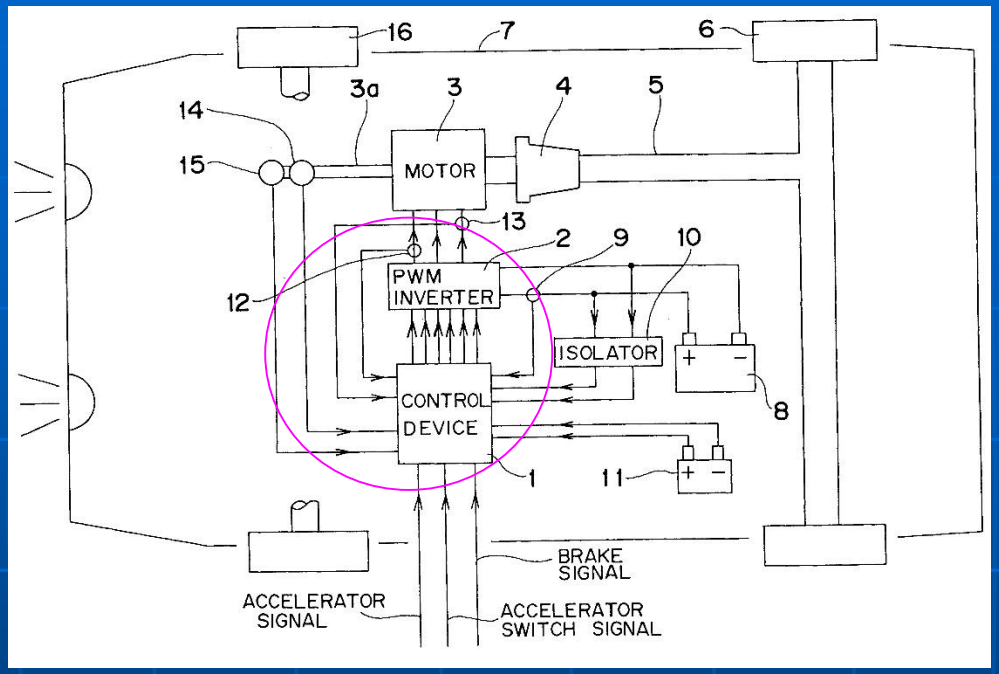
ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE KAO “BALANS IZMEĐU MREŽE I VETRA”

KONTROLISANI TRANZISTORSKI **ISPRAVLJAČI- AC/DC** I **INVERTORI-DC/AC**

VETROGENERATORSKI SISTEMI-KUĆNE APLIKACIJE ENERGETSKIH PRETVARAČA



ENERGETSKI PRETVARAČI U ELEKTRIČNIM VUČNIM POGONIMA-električnim vozilima

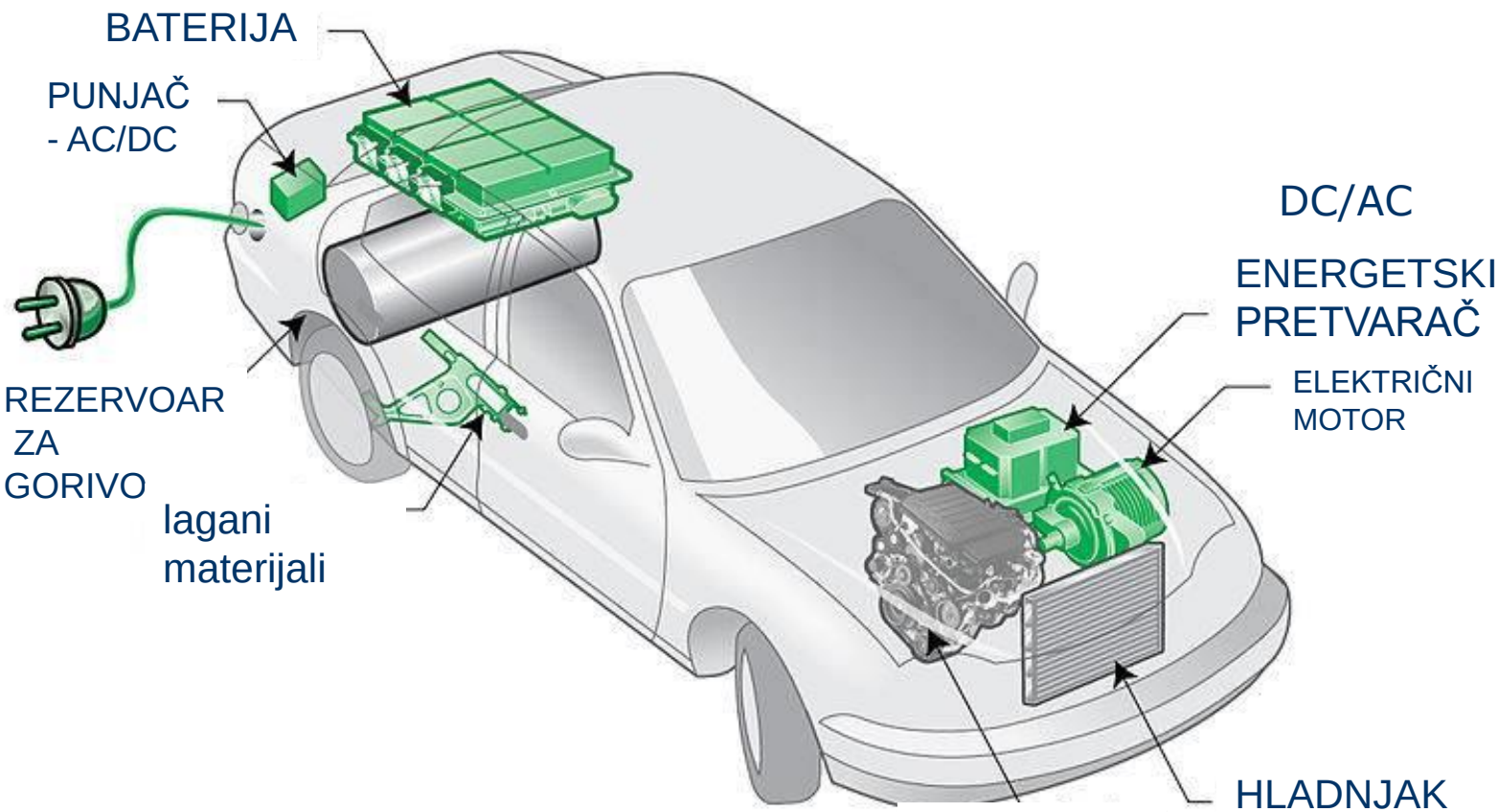


AC/DC PODSTANICA ZA PUNJENJE

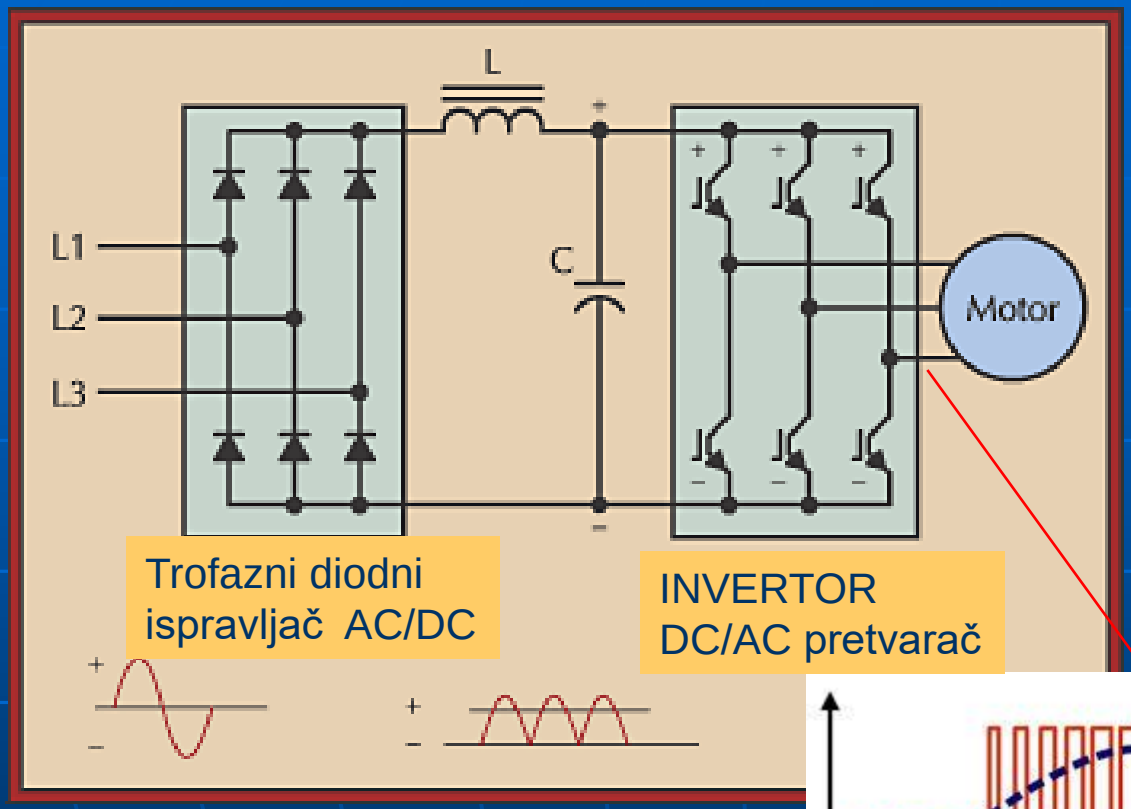
ELEKTRIČNI POGON

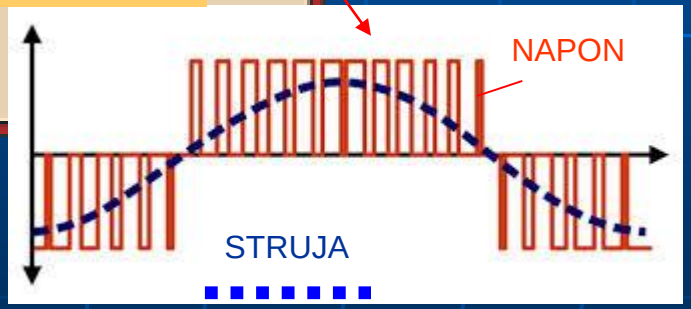
ELEKTRIČNI AUTOBUS

HIBRIDNI SISTEMI U ELEKTRIČNIM VOZILIMA



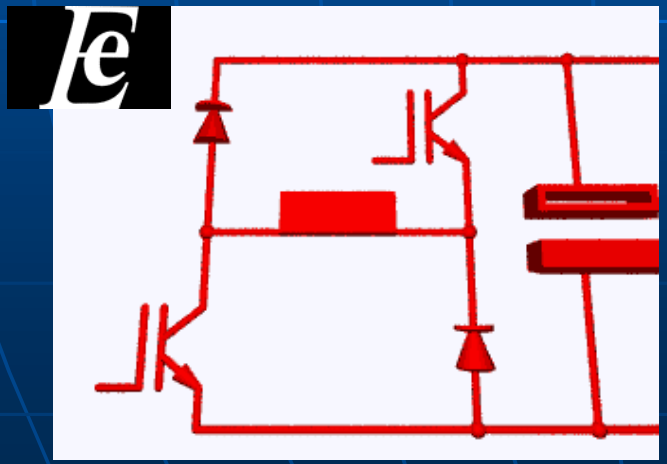
INDUSTRIJSKA PRIMENA-
REGULISANI ELEKTROMOTORNI POGONI



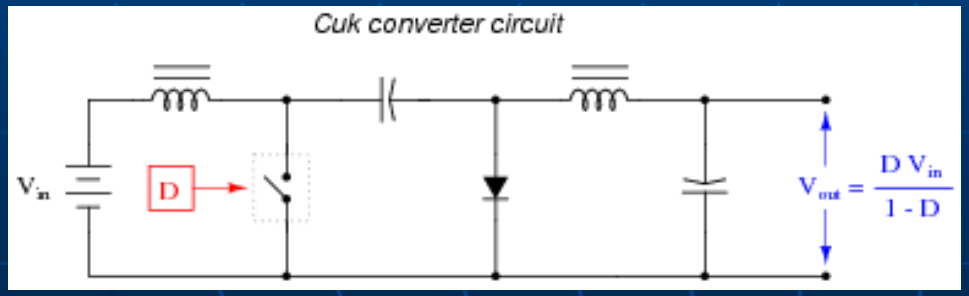


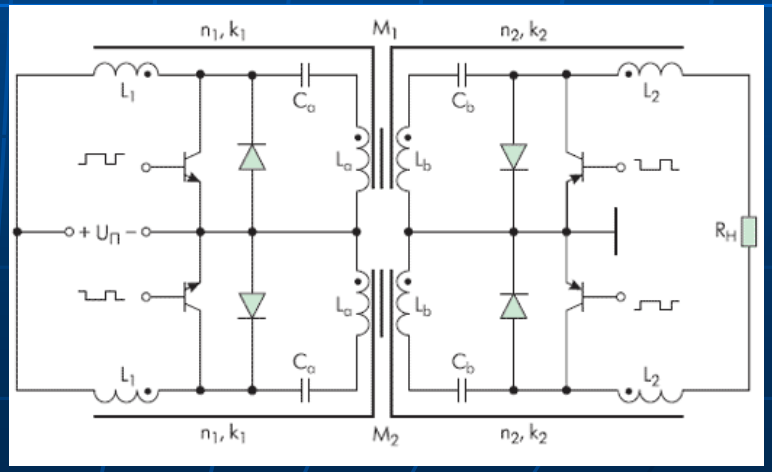
FREKVENTNI REGULATORI

PRIMENA ELEKTRIČNIH PRETVARAČA SNAGE U ELEKTRIČNOJ VUČI



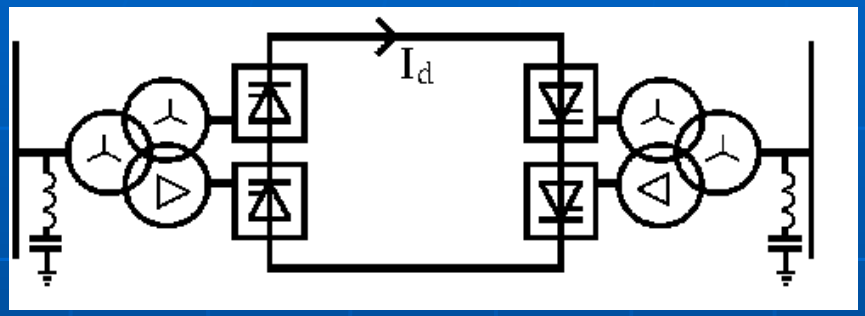
ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE U AERONAUTICI I KOSMIČKIM APLIKACIJAMA



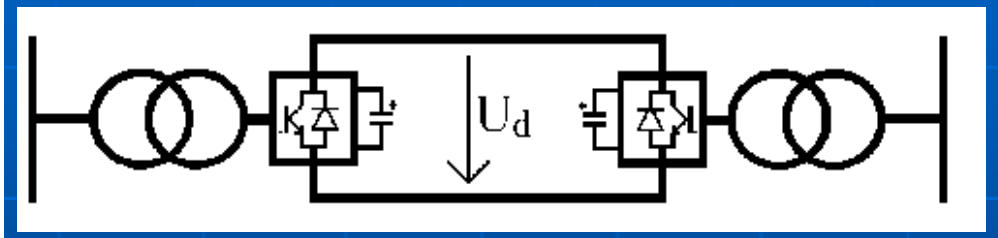


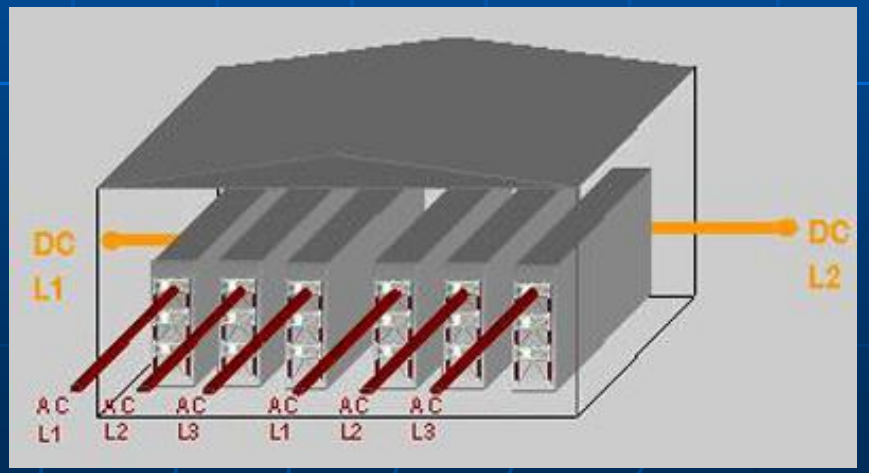
ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE U JEDNOSMERNOM PRENOSU ELEKTRIČNE ENERGIJE-HVDC

KLASIČNI TIRISTORSKI SISTEM

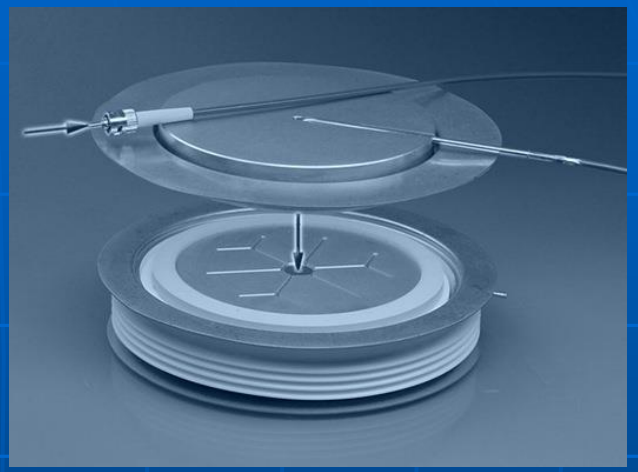


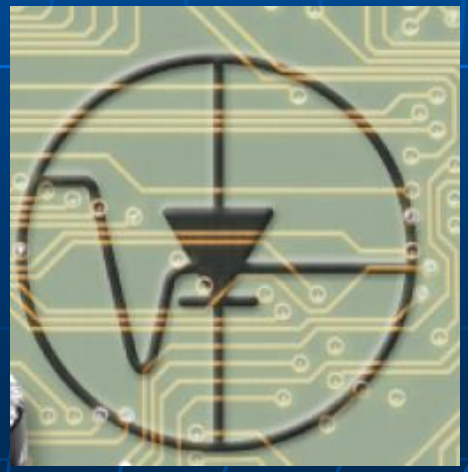
TRANZISTORSKI SISTEM PRETVARAČA





VISOKONAPONSKE TIRISTORSKE GRUPE





CILJ PREDMETA

Upoznavanje studenata sa:

- **principima rada poluprovodničkih prekidača snage**
- **osnovnim principima rada i konstrukcijom energetskih pretvarača snage**
- **eksploatacijom energetskih pretvarača snage**
- **sistemima energetskih pretvarača snage**

ISHOD PREDMETA

Studenti će biti osposobljeni da:

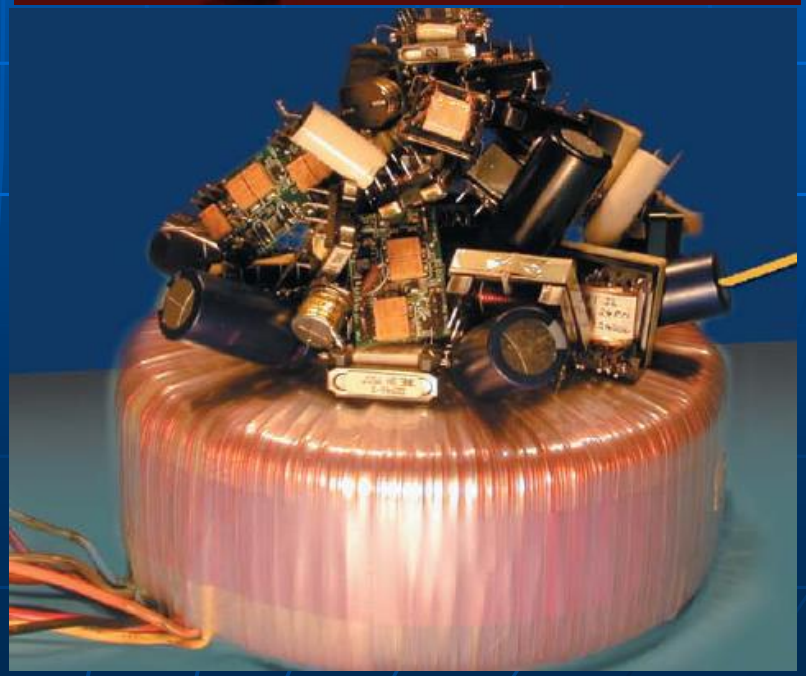
A) Koriste prekidače snage

-tiristore

-tranzistore (MOSFET, IGBT)

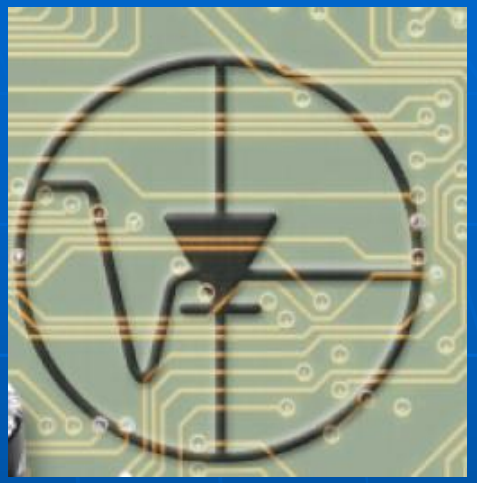
B) Eksploatišu:

- mrežom komutovane energetske pretvarače
- trofazne i monofazne invertore
-energetske pretvarače u prekidačkim režimima (AC/DC, DC/AC, DC/DC, AC/AC)
-sisteme energetskih pretvarača



SADRŽAJ PREDMETA

A) TEORIJSKA NASTAVA



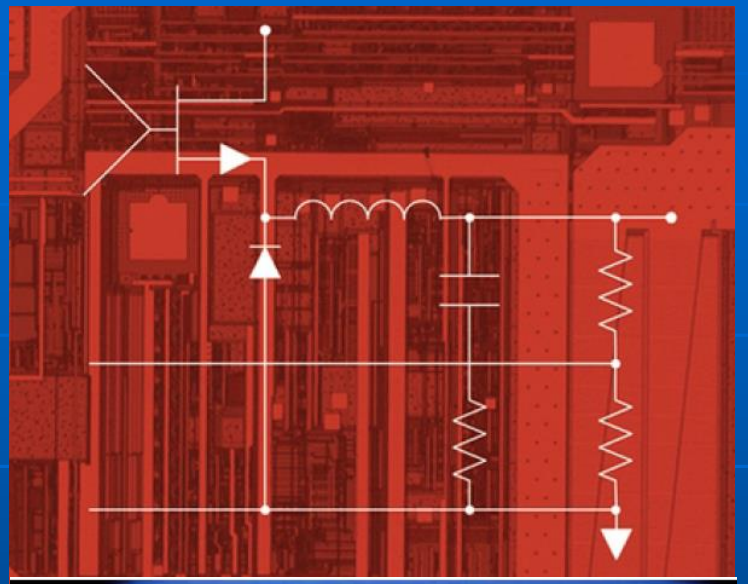
1. Uvodno predavanje (organizacija i sadržaj kursa).
2. Karakteristike snažnih poluprovodnika: diode, tiristori, tranzistori.
3. Naizmenično jednosmerni (AC/DC) pretvarači (ispravljači): Ispravljač sa jednim tiristorom, pojam zamajne diode, rad ispravljača sa prekidnom strujom. Prirodna komutacija struje između dva tiristora u polifaznom ispravljaču.
4. Ispravljači sa srednjom tačkom i u konfiguraciji mosta, monofazni i trofazni, osnovni proračuni i primene.
5. Generisanje upravljačkih signala: elektronska kola za sinhronizaciju i faznu kontrolu. Određivanje tipske snage ispravljačkog transformatora.
6. Uticaj ispravljača na napojnu mrežu. Ispravljač punjač akumulatorske baterije, tipične veze i karakteristike različitih tipova baterija.
7. Jednosmerno naizmenični DC/AC pretvarači (invertori): osnovna električna kola naponskih invertora
8. IGBT tranzistori i karakteristike. Kola za upravljanje i zaštitu. Elektrolitički kondenzatori. Osnovna električna kola strujnih invertora.
9. Jednosmerno jednosmerni pretvaarči DC/DC (čoperi): osnovna kola jednosmerno jednosmernih pretvarača. Izolovani jednosmerno jednosmerni pretvarači.
10. Ostale primene energetskih pretvarača.

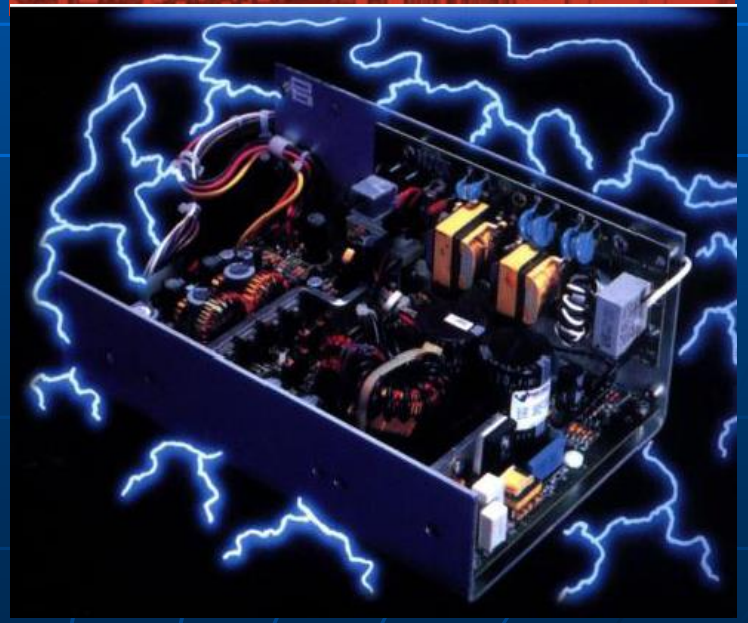
B) PRAKTIČNA NASTAVA:

Praktična nastava (auditorne i LAB vežbe) prate program predavanja

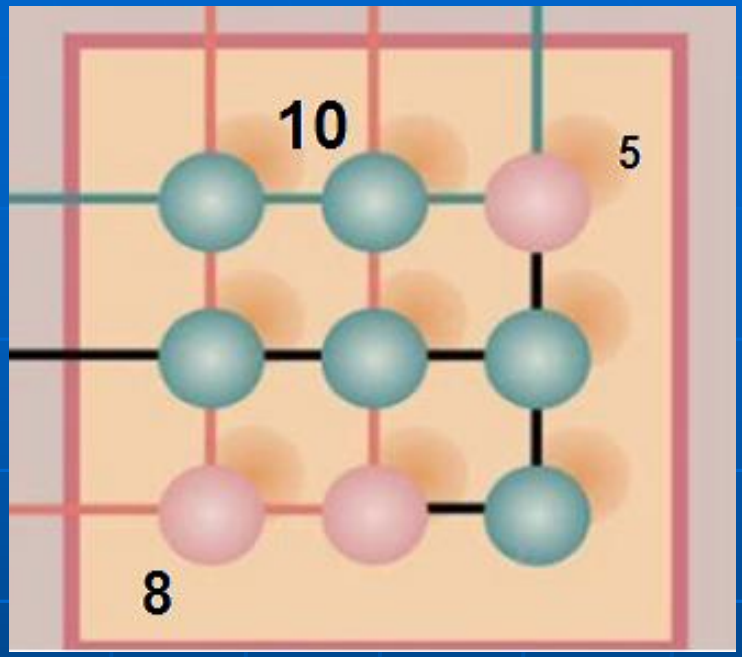
ЛИТЕРАТУРА

- Р. Радетић, **Транзисторски претварачи снаге**, Наука, Београд, 2002.
- Р. Радетић, **Тиристорски претварачи**, Наука, Београд, 2004.
- T.Brodić, **Energetska Elektronika**, Svjetlost, Sarajevo,1986.
- D.A.Bradely, **Power Electronics**, Van Nostrand Reinhold, 1987
- K.Thorborg, **Power Electronics**, Prentice Hall, 1988.
- M. H. Rashid, **Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**, Prentice Hall, 2004.
- N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, **Power Electronics: Converters, Applications, and Design**, John Wiley & Sons, 2002.





OCENA ZNANJA



A) PREDISPITNE OBAVEZE:

-seminarski rad 10p

-aktivnost u toku predavanja 10p

-domaći zadaci-LAB вvežbe:

prvi 10p
drugi 10p
treći 10p

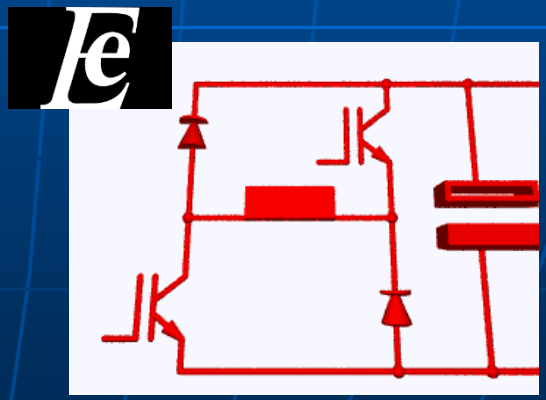
-kolokvijumi

prvi 25p (50% teorija 50% zadaci)
drugi 25p (50% teorija 50% zadaci)

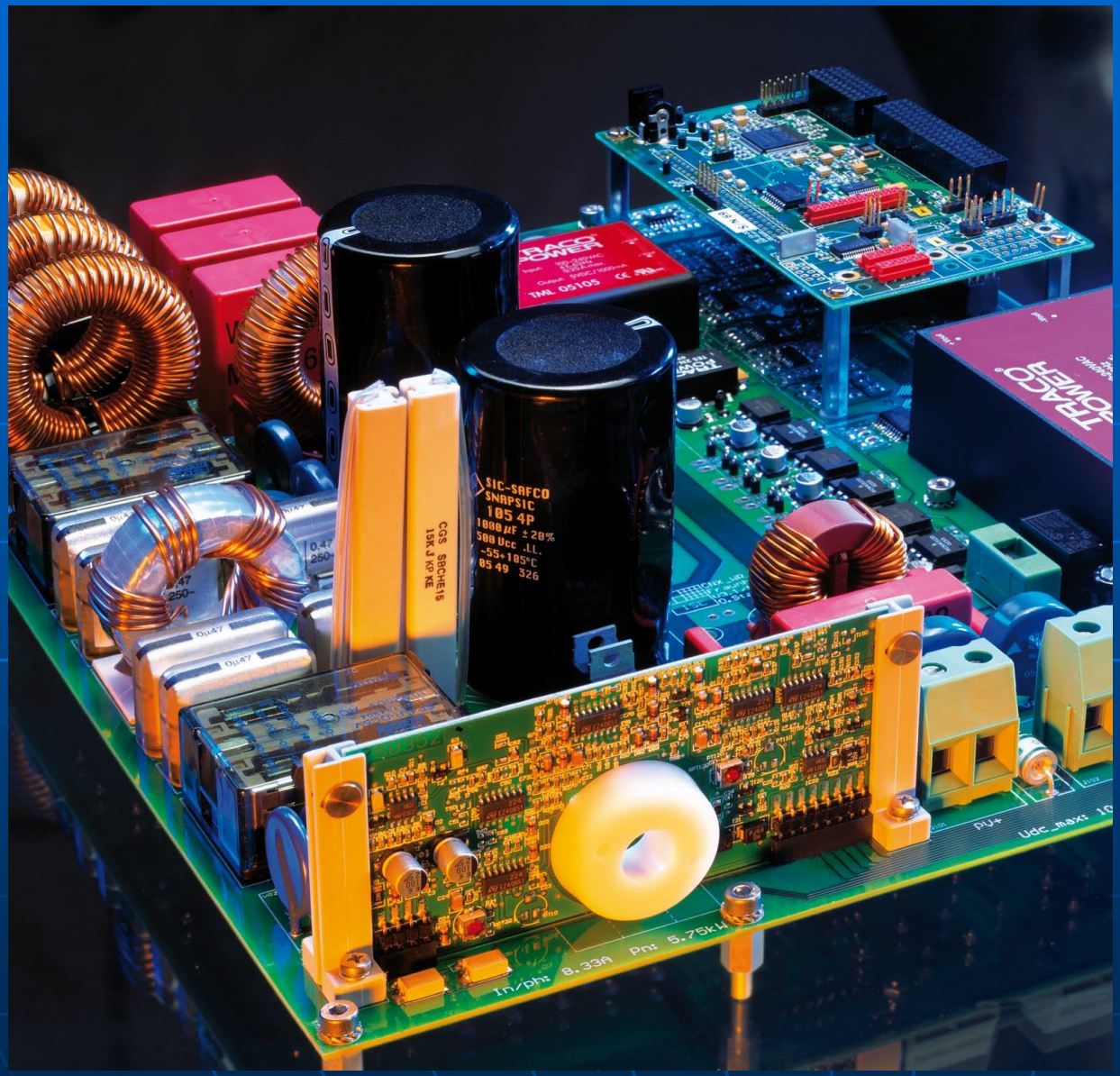
MOGUĆNOST POLAGANJA ISPITA UZ USLOV DA SU STUDENT ISPUNILI SVE PRED ISPITNE OBAVEZE!!!!

B) ZAVRŠNI ISPIT:

-za one koji ne ispune ili delimično ispune pred ispitne obaveze



HVALA NA PAŽNJI !!!!



PUNO USPEHA NA ISPITU!!!!

Predmetni profesor:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE (NET)

OSNOVNE STUDIJE

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

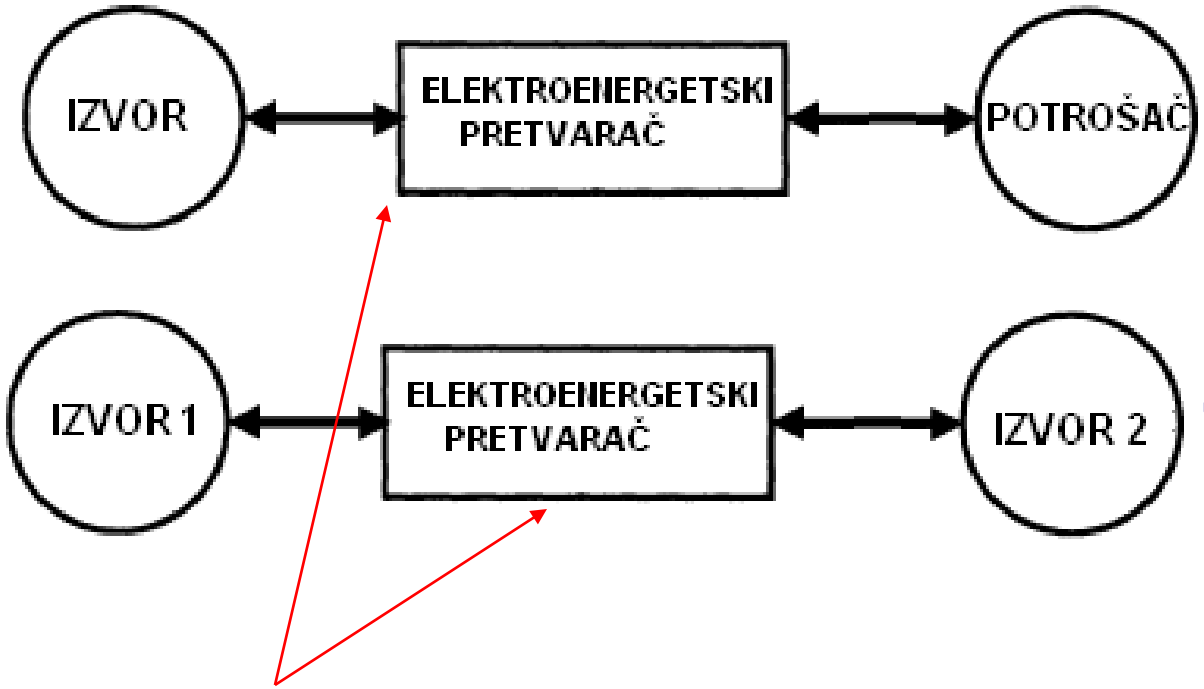
ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

UVODNO PREDAVANJE

PREDMETNI PROFESOR:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

ENERGETSKI PRETVARAČI

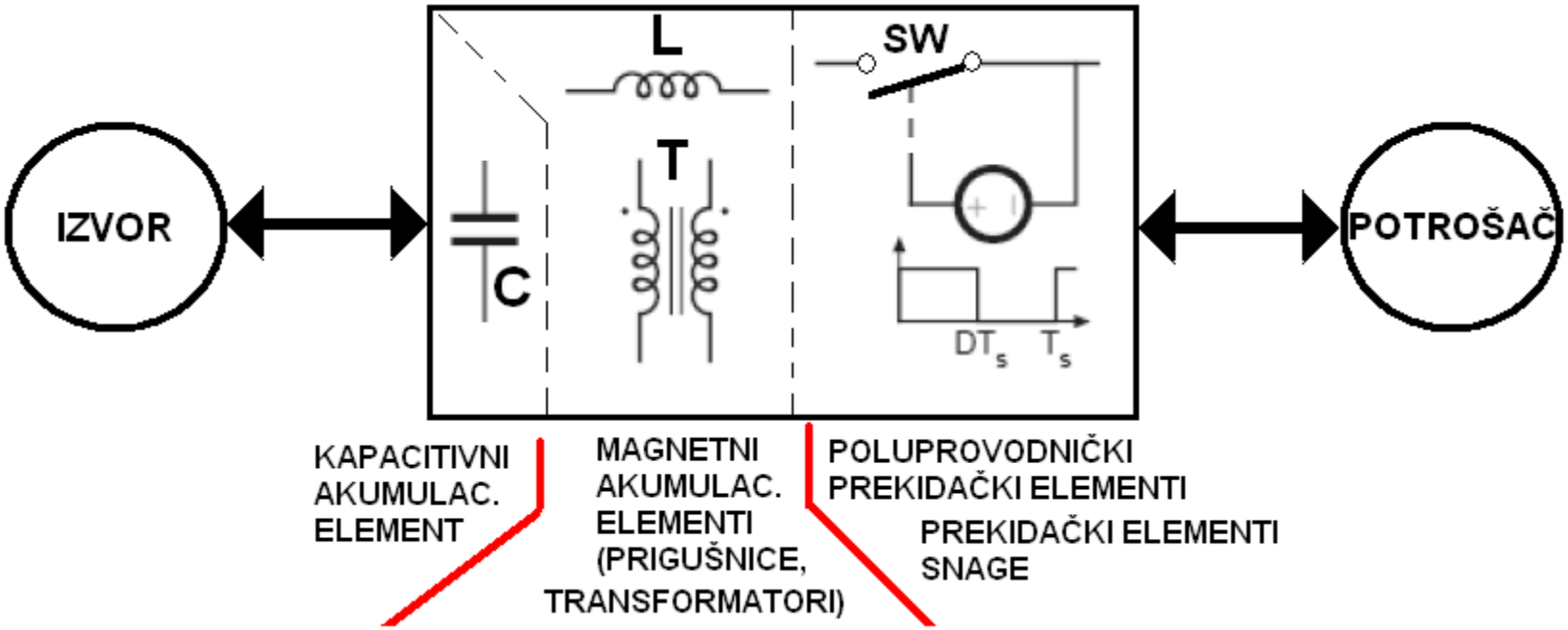
- Uređaji koji vrše PRETVARANJE (konverziju) električne energije od predajnika (generatora, izvora) ka prijemniku (potrošaču) ili između dva izvora



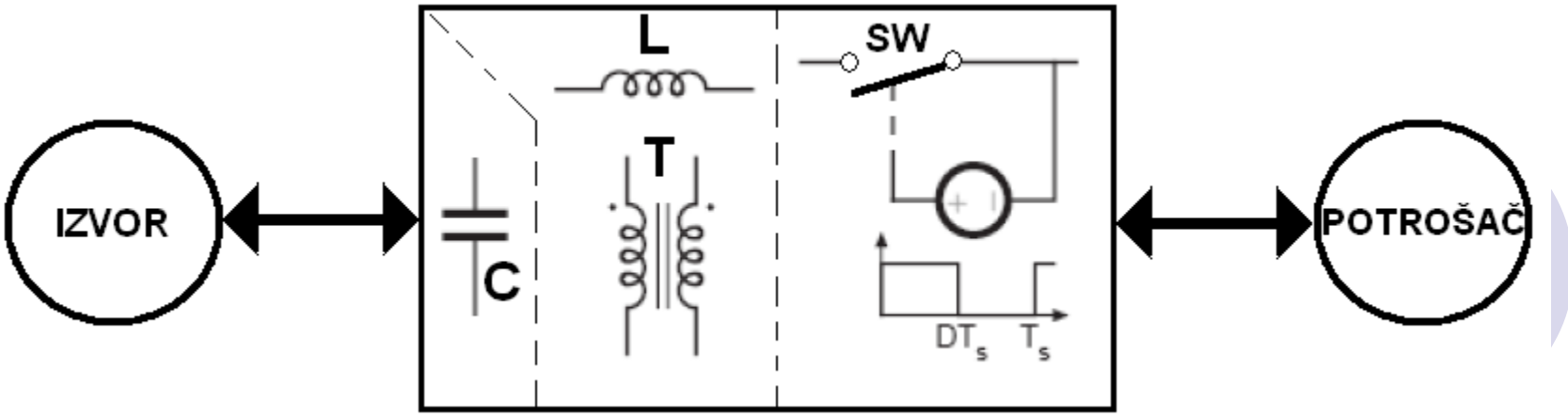
- **INTERFEJS** između izvora i potrošača ili između dva izvora

PRECIZNIJA DEFINICIJA ENERGETSKIH PRETVARAČA

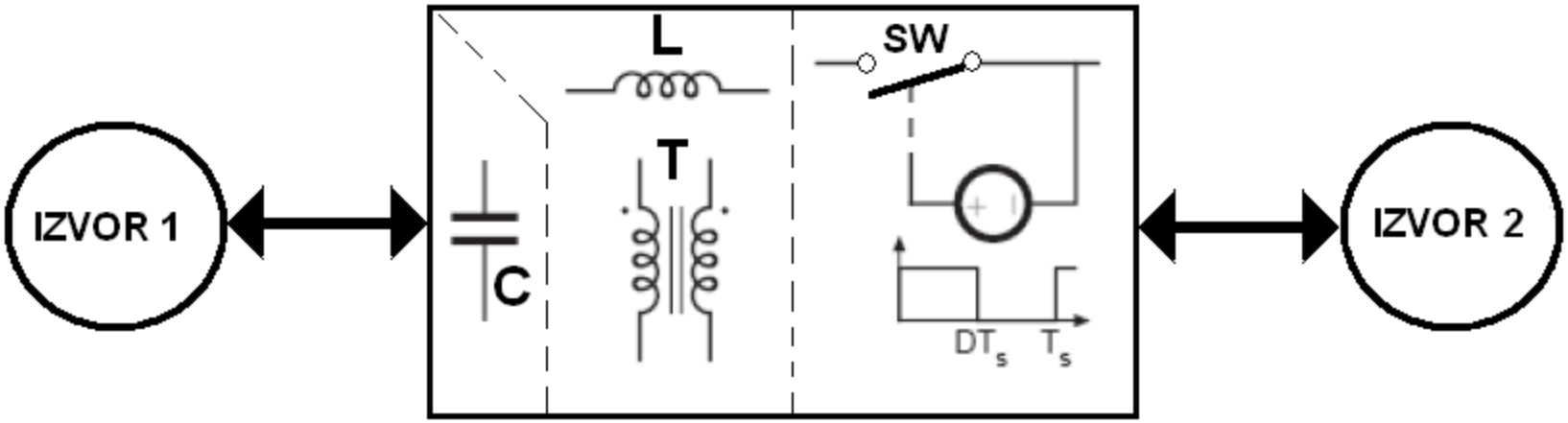
- Uređaji koji vrše PRETVARANJE (konverziju) električne energije uz pomoć energetskih poluprovodničkih komponenti i akumulacionih elemenata (induktivnosti, transformatora i kondenzatora) od predajnika (generatora, izvora) ka prijemniku (potrošaču) ili između dva izvora



TRANSFORMACIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZMEĐU PREDAJNIKA (IZVORA) I PRIJEMNIKA (POTROŠAČA)



TRANSFORMACIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZMEĐU DVA IZVORA KOJI MOGU MENJATI ULOGE PREDAJNIKA I PRIJEMNIKA



Energetski pretvarači električne energije su uređaji koji transformišu električnu energiju od predajnika (generator, izvor) ka prijemniku (potrošaču).

Električna energija može biti:

- jednosmerna (jednosmerna struja i napon) = → **DC-Direct Current**
- naizmenična (naizmenična struja i napon) ~ → **AC-Alternating Current**

Prema ovoj osnovnoj funkciji postoji podela na:

AC/DC pretvarače (pretvaraju naizmeničnu struju/napon u jednosmernu struju/napon) – **ISPRAVLJAČI**

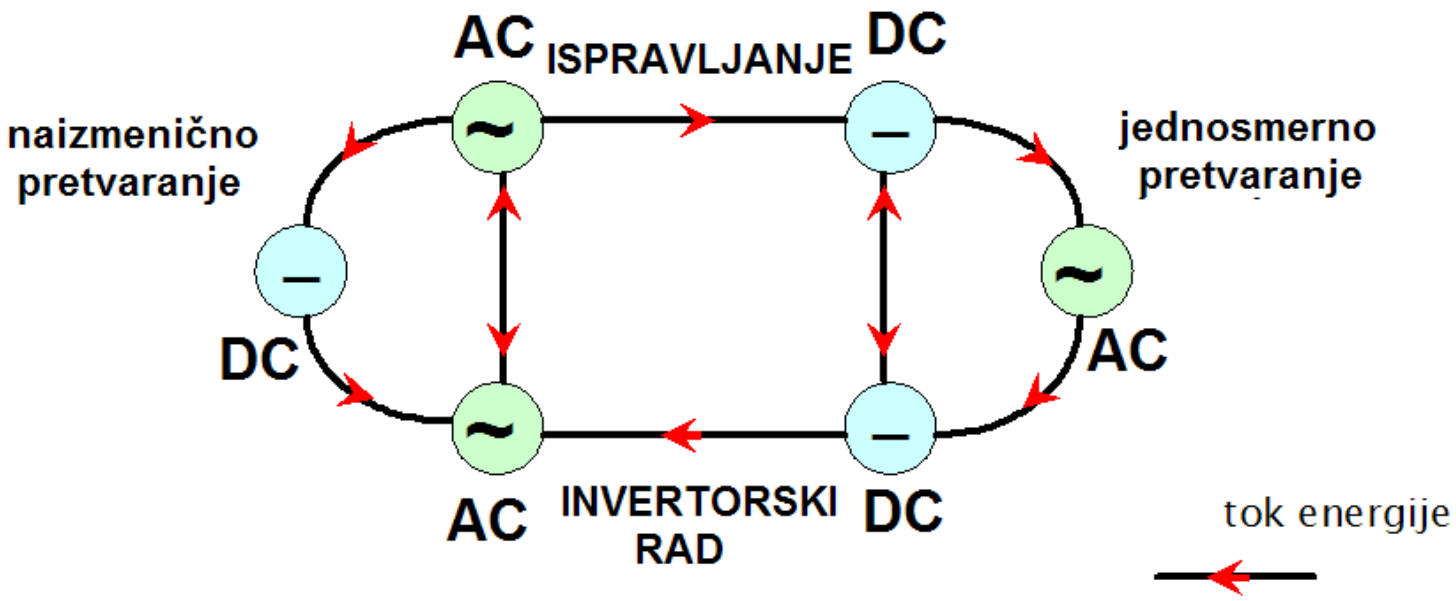
DC/AC pretvarače (pretvaraju jednosmernu struju/napon u naizmeničnu struju/napon) – **INVERTORI**

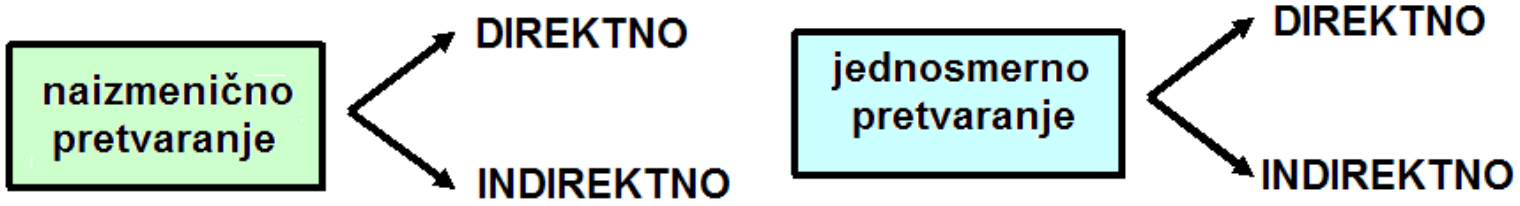
DC-DC pretvarače (pretvaraju jednosmernu struju jednog naponskog nivoa u jednosmernu struju drugog naponskog nivoa)-transformatori napona - **ČOPERI**
Mogu biti spuštači napona (*step-down*) ili podizači (*step-up*)

AC-AC pretvarače (pretvaraju naizmeničnu struju jednog naponskog nivoa u naizmeničnu struju drugog naponskog nivoa)

-podizači i spuštači naizmeničnog napona (PODEŠAVAČI NAPONA)
-pretvarači učestanosti (CIKLOKONVERTORI)

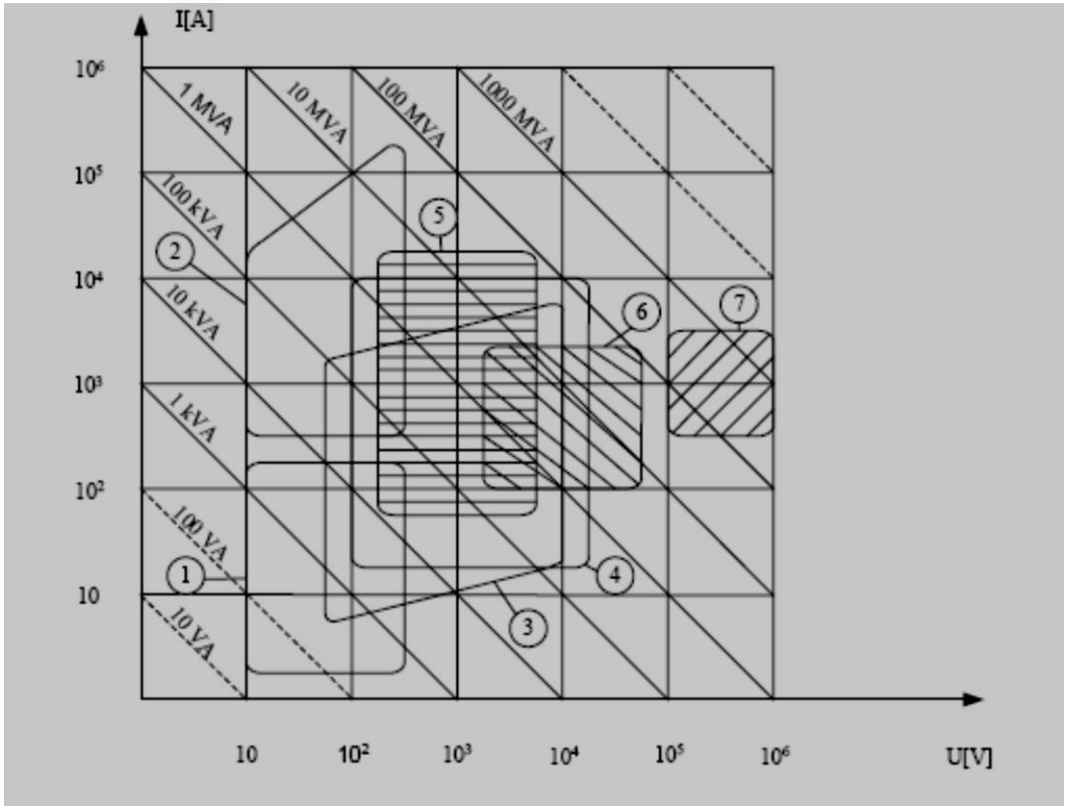
OSNOVNI VIDOVI PRETVARANJA ENERGIJE





Primena pretvarača je raznovrsna, a njihove snage mogu biti reda od 1W (npr. u kućnim uređajima, u elektronskim uređajima) do reda 100 MW.

Podela oblasti primene pretvarača, po snazi (naponu i struji).



(1) U ovoj oblasti snage pretvrača su u opsegu od npr. 10VA do 100VA i to su aparati široke potrošnje.

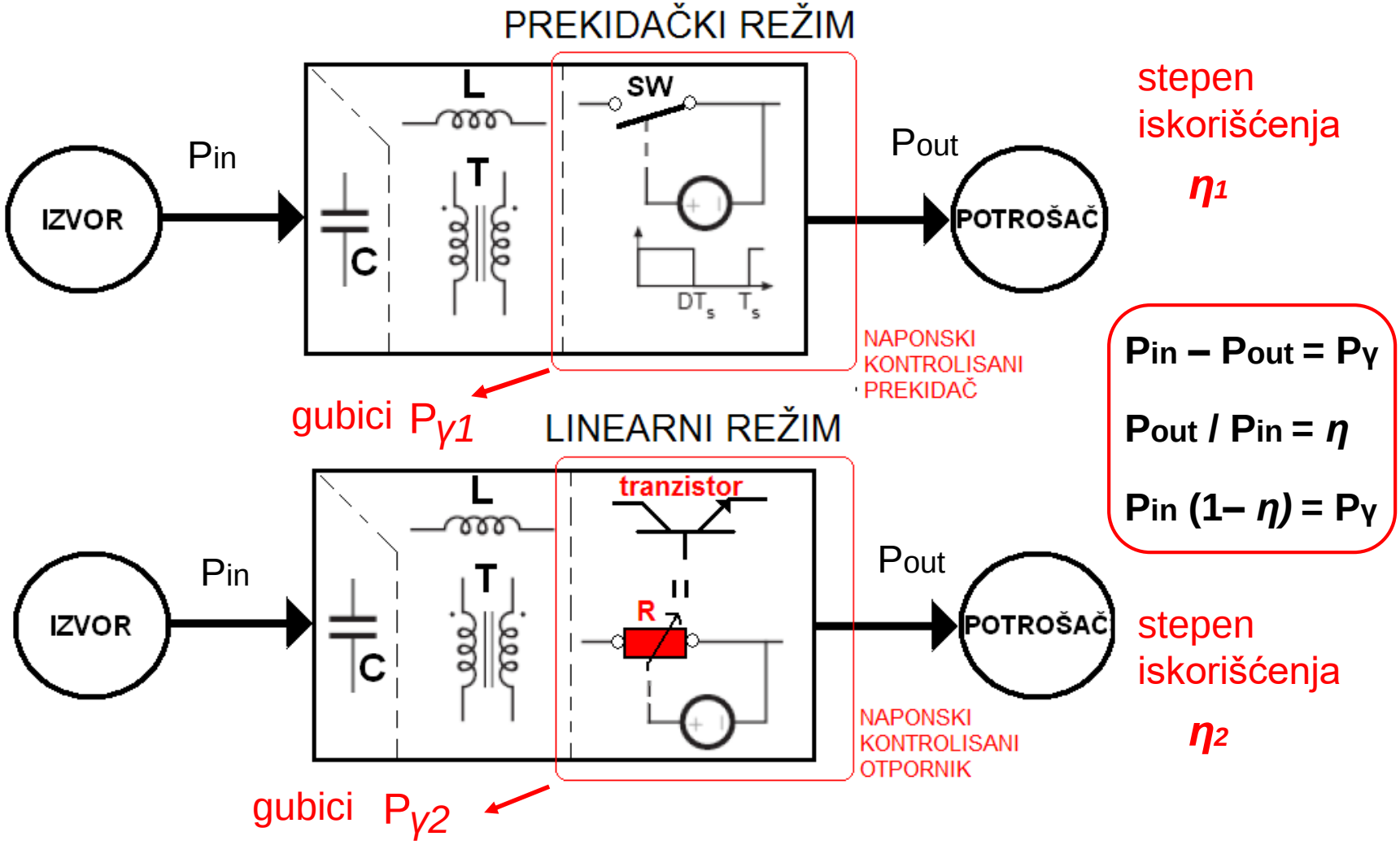
(2) Uređaji koji se koriste u hemijskoj industriji i metalurgiji npr. za elektrolizu; naponi su ovde relativno niski ali struje zato mogu imati veoma velike jačine.

(3),(4) Jednosmerni elektromotorni pogoni i naizmenični elektromotorni pogoni.

(5) VF (visokofrekventne) peći: ovde je napon reda 1kV, P∈(~ 10kW, ~ 1MW).

(6) Električna vuča

(7) Jednosmerni prenos električne energije



stepen iskorišćenja η_1

stepen iskorišćenja η_2

Pin – Pout = Pγ

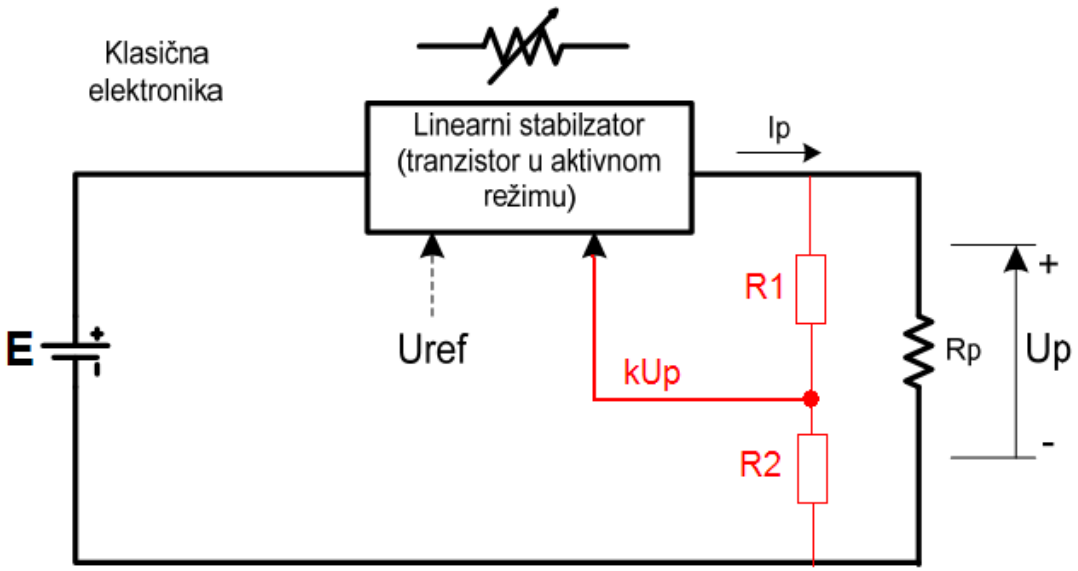
Pout / Pin = η

Pin (1– η) = Pγ

- Cilj je da se pretvaranje energije izvrši sa što manje gubitaka energije (sa što većim stepenom iskorišćenja)
- Prekidački režim je mnogo efikasniji od linearnog režima

$\eta_1 >> \eta_2$

PRIMER KOJI OBJAŠNJAVA PREDNOST PREKIDAČKOG PRETVARAČA U ODNOSU NA KLASIČNI (LINEARNI)



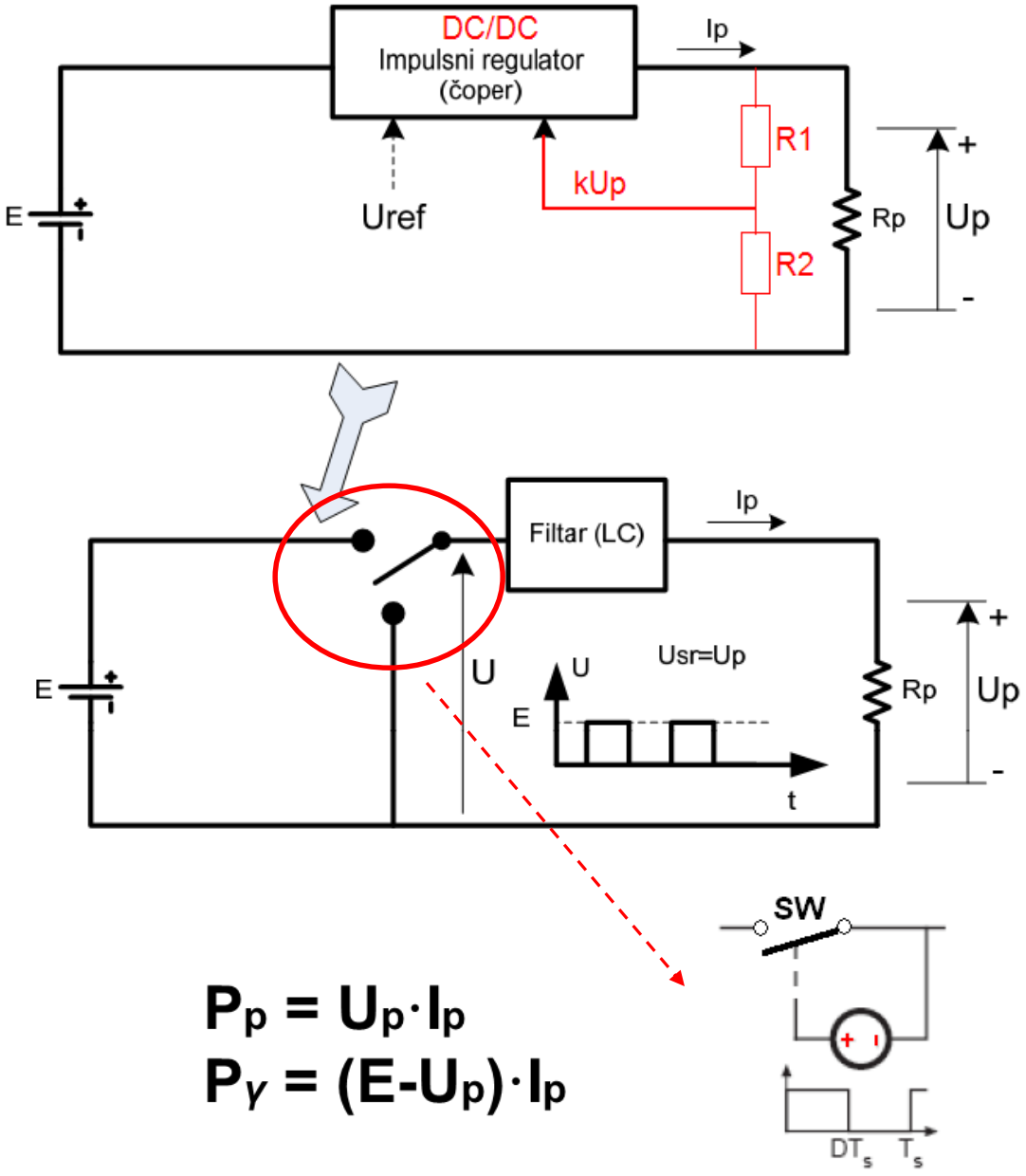
Neka je E=100V
i neka se zahteva Up=50V

Bilans snaga:

Ip (A)	Pp (W)	P_y (W)
0,1	5	5
1	50	50
10	500	500
100	5000	5000
1000	50000	50000

$$P_p = U_p \cdot I_p$$
$$P_\gamma = (E-U_p) \cdot I_p$$

Pp-snaga koja se predaje potrošaču
Pγ-snaga gubitaka u kolu



$$P_p = U_p \cdot I_p$$

$$P_\gamma = (E - U_p) \cdot I_p$$

Neka je E=100V
i neka se zahteva Up=50V

Bilans snaga:

Ip (A)	Pp (W)	P_γ (W)
0,1	5	≈ 0
1	50	≈ 0
10	500	≈ 0
100	5000	≈ 0
1000	50000	≈ 0

Kada su komponente filtra L, C ,
kao i sam prekidač idealni,
nema gubitaka tj. Pγ=0

ZAKLJUČAK IZ PRETHODNOG PRIMERA

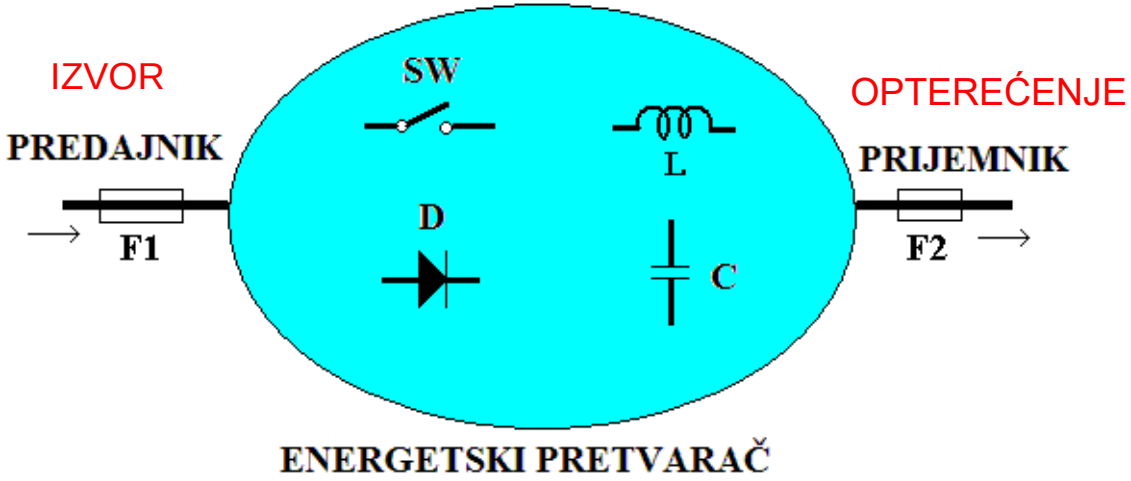
- Primena elektroenergetskih pretvarača u odnosu na klasične linearne stabilizatore, obezbeđuje:

  -*manji gubitak energije* (ovo je bitno i za male snage, u mobilnim uređajima povećava se autonomija vek trajanja baterije, smanjuje se grejanje itd.)

  -*manje gabarite uređaja* (hladnjaci,transformatori i filtri su manjih dimenzija)

  -*nižu cenu* izrade

POLUROVODNIČKE KOMPONENETE KOJE SE KORISTE U ELEKTROENERGETSKIM PRETVARAČIMA

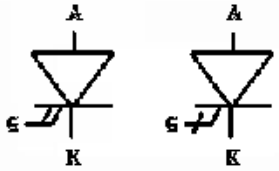
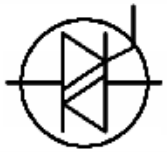
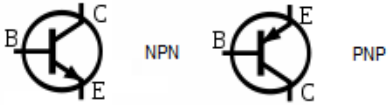


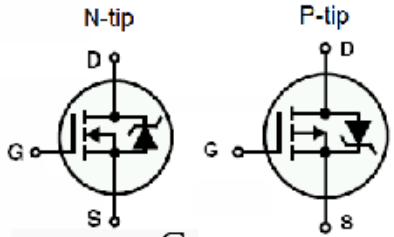
SW-kontrolisani prekidački element (tranzistor ili tiristor)
D-dioda
L-induktivnost
C-kapacitivnost
F1, F2-zaštitni elementi
(ultra brzi osigurači)

U linearnoj elektronici je najbitnije da li poluprovodnička komponenta verno prenosi ili održava ulazni signal, dok se ne isistira na koeficijentu korisnog dejstva.

U energetskoj elektronici situacija je potpuno obrnuta. Veoma je bitno da se pretvaranje energije ostvaruje sa što manjim gubicima. Najvažniji pokazatelj nekog energetskog pretvarača je njegov stepen korisnog dejstva.

Koje su to poluprovodničke komponente (pored diode) koje se koriste u elektroenergetskim pretvaračima??

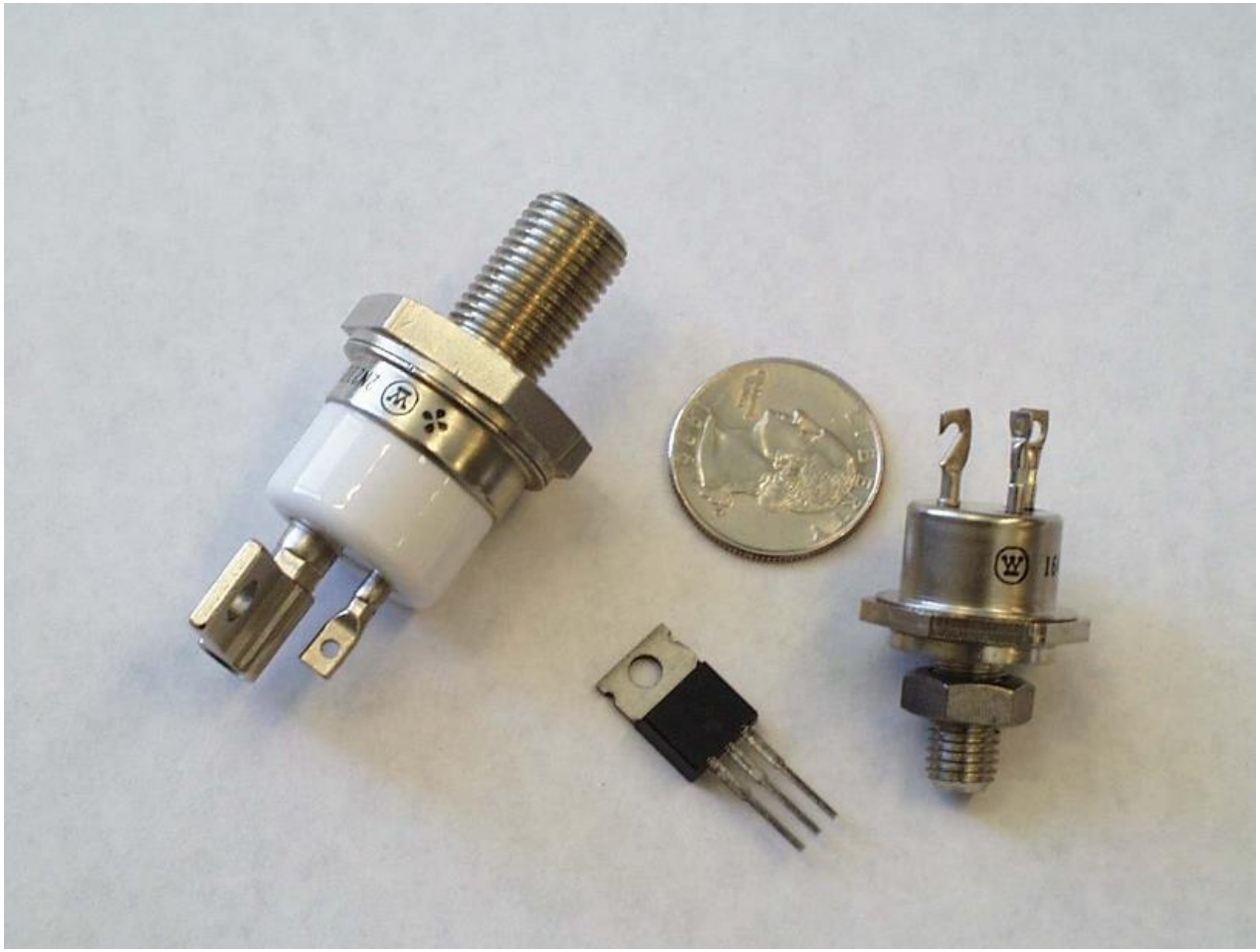
- Dioda
- Tiristor (eng. Thyristor) – SCR (Silicon Controlled Rectifier)
- GTO (Gate turn-off) tiristor, 
- Triak (Triac), 
- Bipolarni tranzistor, BJT (Bipolar Junction Transistor) 

- MOSFET (Metal Oxide Semicondustor Field Effect Transistor) 

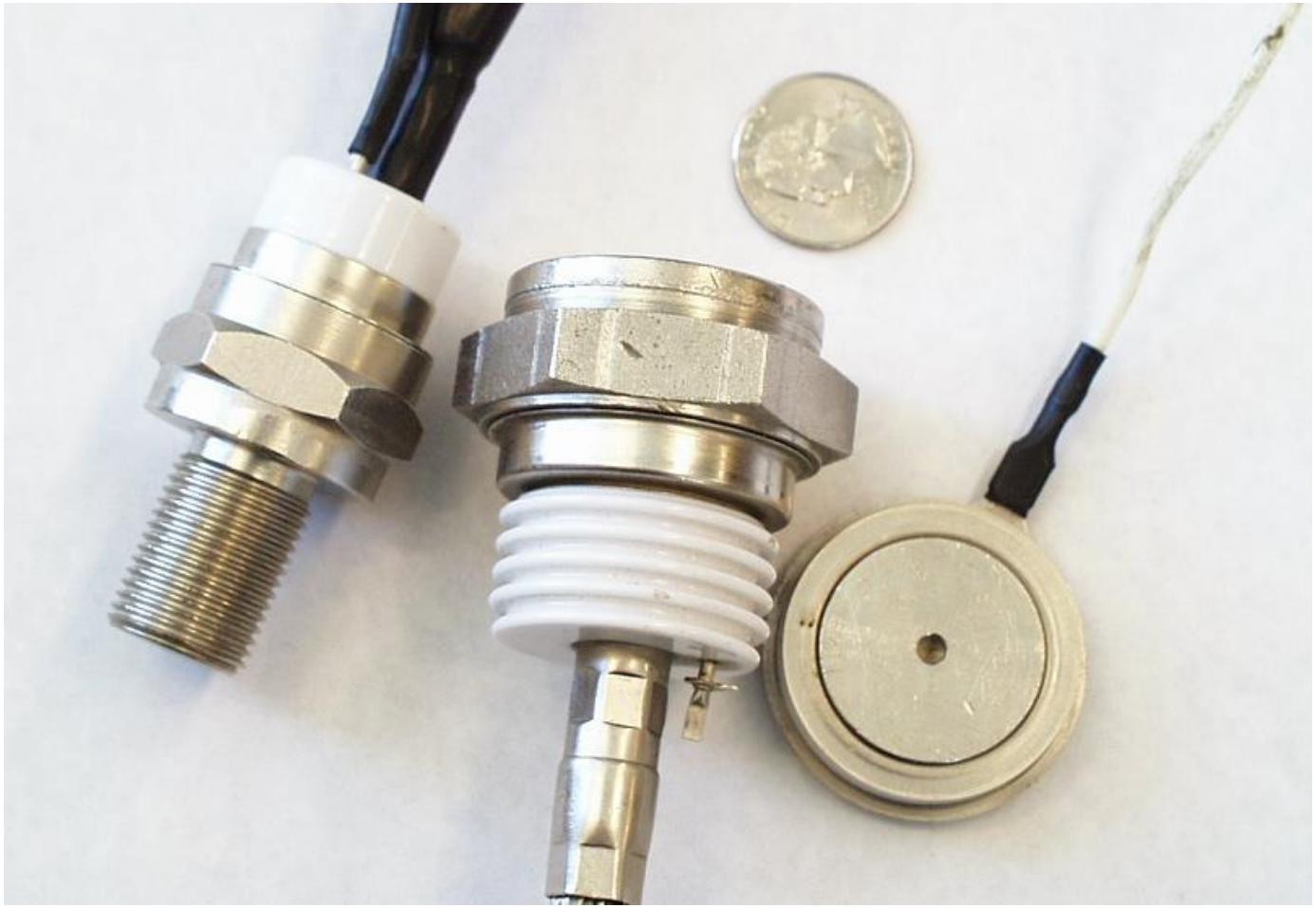
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – tranzistor sa izolovanim gejtom),

- SIT (Static Induction Transistor),
- SITH (Static Induction Thyristor),
- MCT (MOS-controlled thyristor),
- IGCT (Integrated gate commutated thyristor), itd.

TIRISTORI-SCR

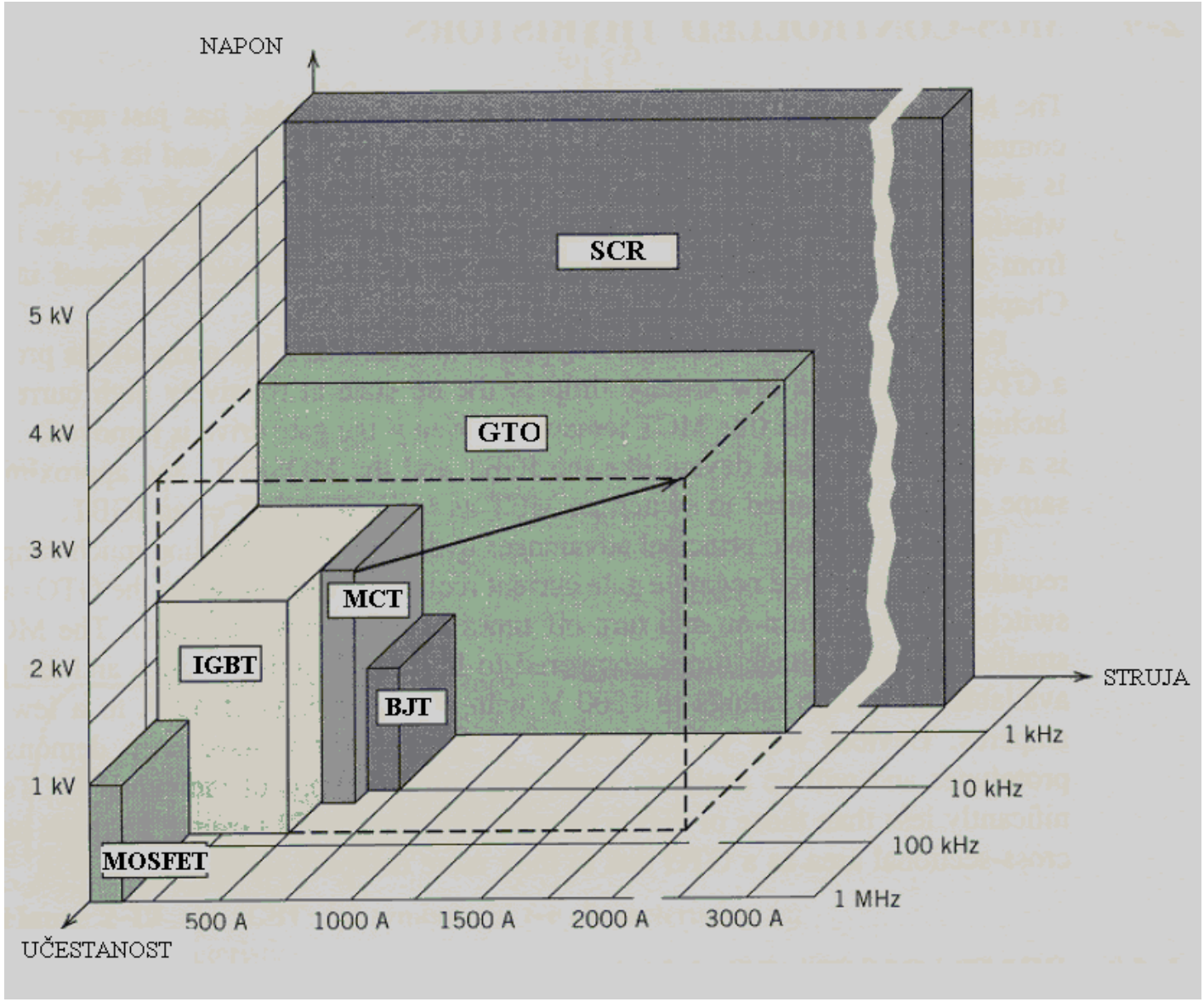


TIRISTORI ZA VELIKE SNAGE

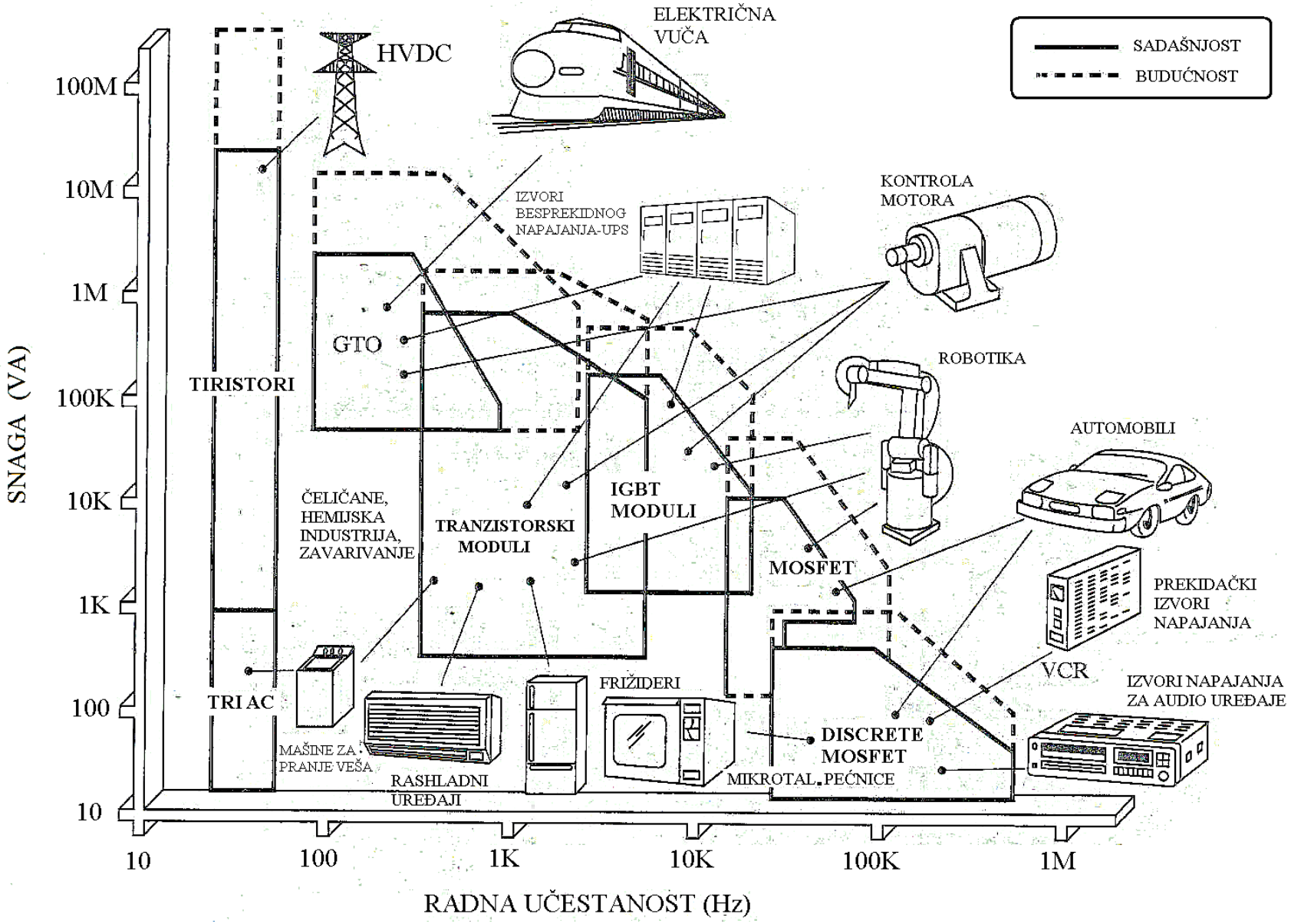


IGBT tranzistor 150A/600V(danas je to glavni poluprovodnički prekidač snage)

OPSEZI PRIMENE KONTROLISANIH PREKIDAČKIH ELEMENATA-SW



Podela oblasti primene energetskih prekidača po snazi i radnoj učestanosti



NEDOSTACI i OGRANIČENJA POLUPROVODNIČKIH PREKIDAČA

- Postojanje pada napona, odnosno gubitaka u stanju uključenosti (ON state)
- Proticanje struje kroz prekidač, odnosno gubici u isključenom stanju (OFF state)
- Ograničenja u pogledu maksimalno dozvoljenih napona i struja na prekidačima!!!
- Za upravljanje prekidačima (kontrolisanje uključenja i isključenja) potrebna relativno mala energija V (prednost)

  (*npr. kod tiristora je odnos snage koja se prenosi i kojom se upravlja reda* 10^5 *do* 10^8)
- Povećani prekidački gubici (povećana disipacija energije u trenucima uključenja i isključenja); ovi gubici zavise od prekidačke učestanosti!!!!!

OGRANIČENJA U POGLEDU MAKSIMALNIH NAPONA I STRUJA

Polupr. komponenta	Napon (V)	Struja (A)
Tiristor (SCR)	6000	3500 (5000)
GTO / IGCT	4500	3000 (4500)
Triak	800	40
Bipolarni tranzistor	1200	800
MOSFET	500 (1200)	140
IGBT	600 (3500)	50 (1200)
SIT	800	60
SITH	1200 (4000)	800 (2200)
MCT	600 (3000)	60

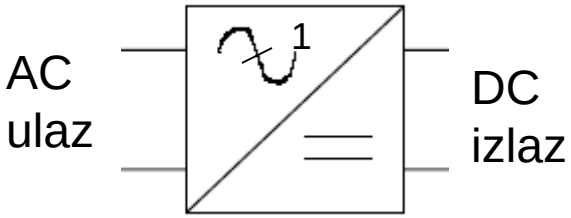
OSNOVNI TIPOVI ENERGETSKIH PRETVARAČA

- Prema tipu konverzije energetske pretvarače delimo na
- AC/DC (ispravljači; upravljivi i neupravljivi)
- DC/AC (invertori)
- DC/DC (čoperi)
- AC/AC (podešavači napona, ciklokonvertori…

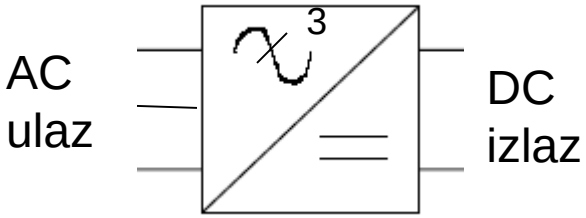
AC/DC pretvarači-ISPRAVLJAČI

AC ulaz: monofazni ili trofazni

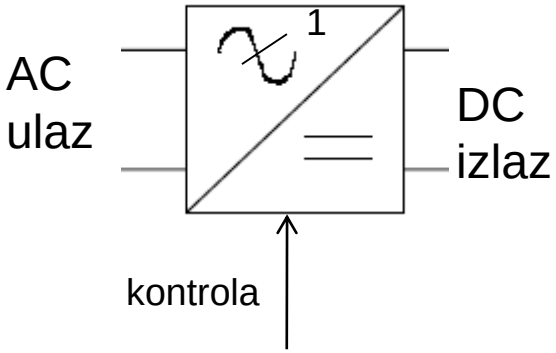
230V, 50/60Hz
3x400/230V, 50/60Hz

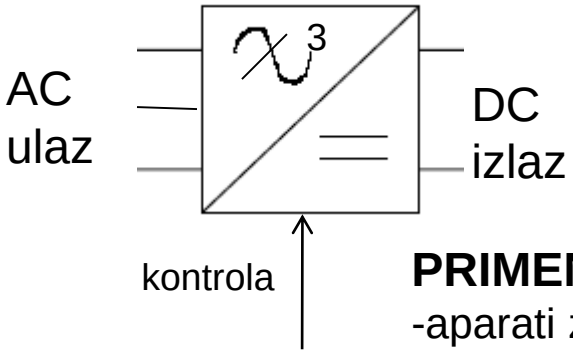


MONOFAZNI DIODNI ISPRAVLJAČI



TROFAZNI DIODNI ISPRAVLJAČI



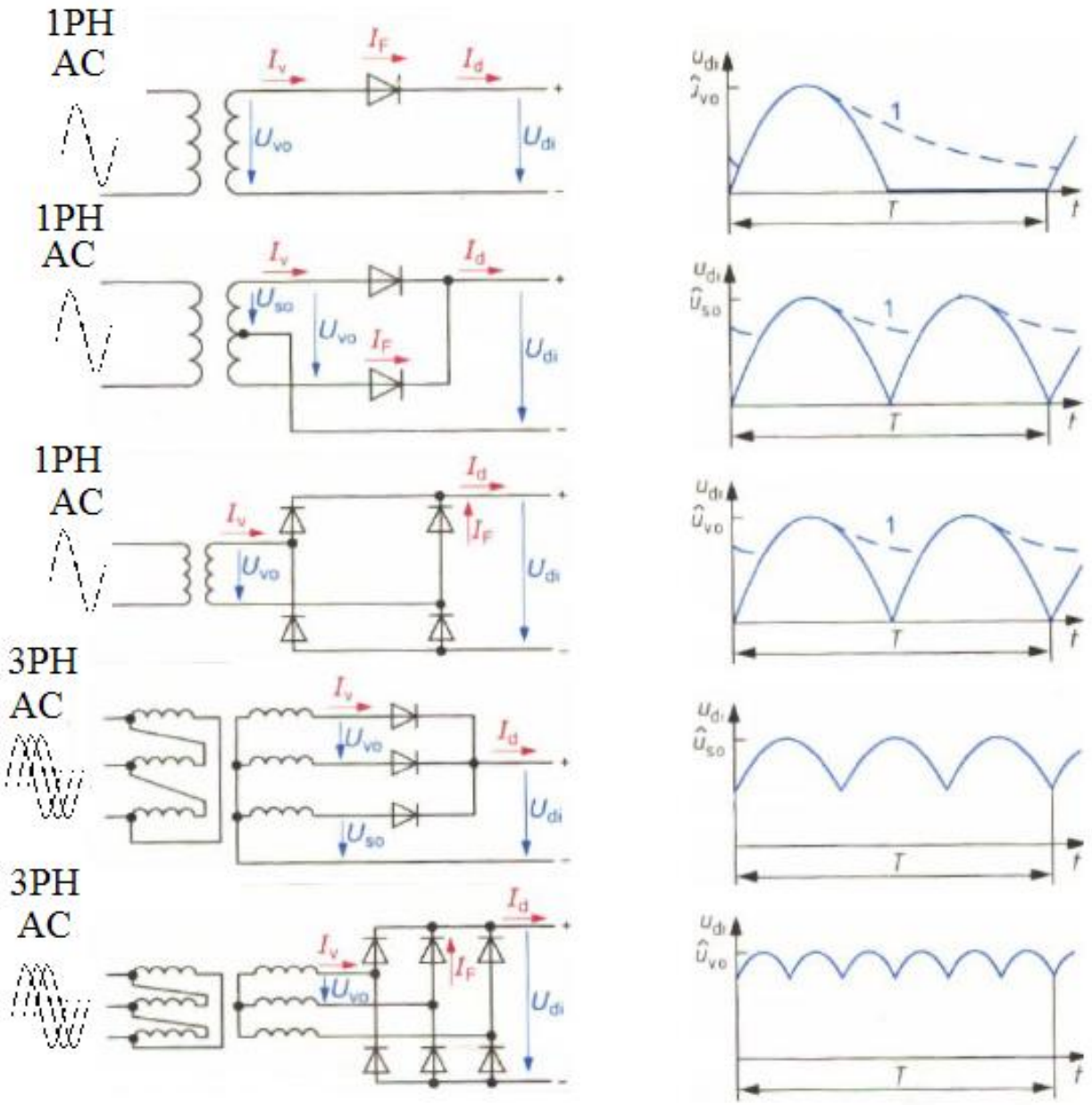


KONTROLISANI
TIRISTORSKI ili TRANZISTORSKI ISPRAVLJAČI
MONOFAZNI , TROFAZNI

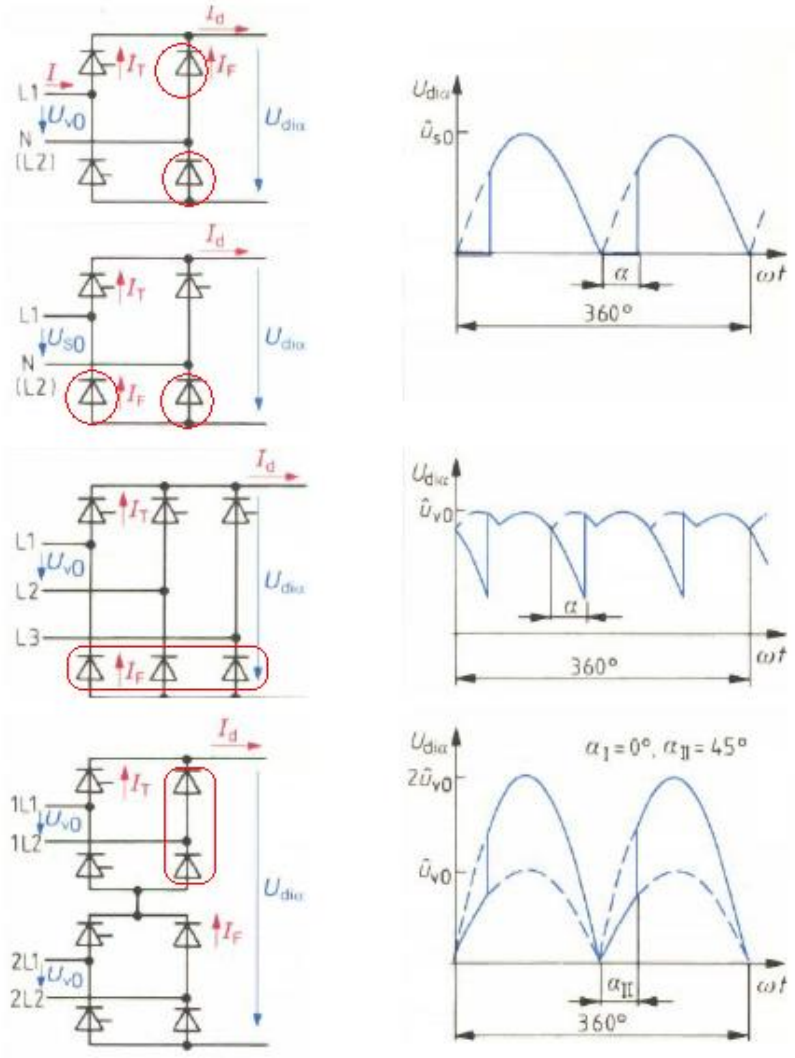
TIRISTORSKI: POLUUPRAVLJIVI I PUNOUPRAVLJIVI

PRIMENA:
-aparati za zavarivanje
-jednosmerni motorni pogoni
-punjači baterija
-jednosmerni izvori napajanja
-visokonaponske DC aplikacije
- DC transmisije dalekovodima

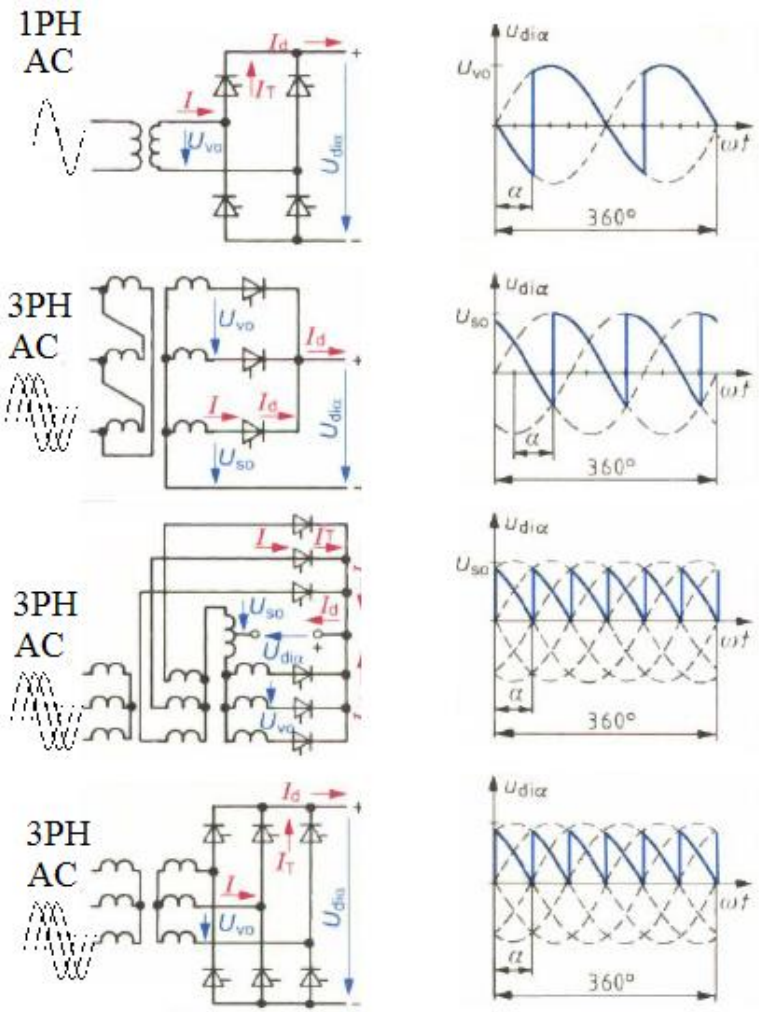
NEUPRAVLJIVI AC/DC PRETVARAČI DIODNI ISPRAVLJAČI



POLUUPRAVLJIVI i PUNOUPRAVLJIVI AC/DC PRETVARAČI-ISPRAVLJAČI

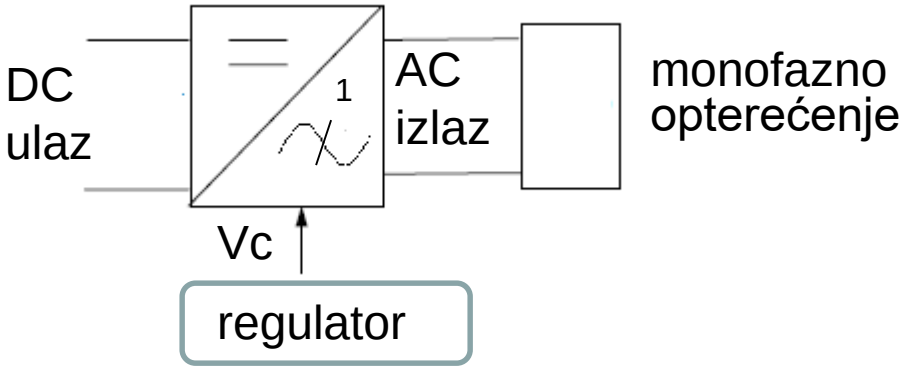


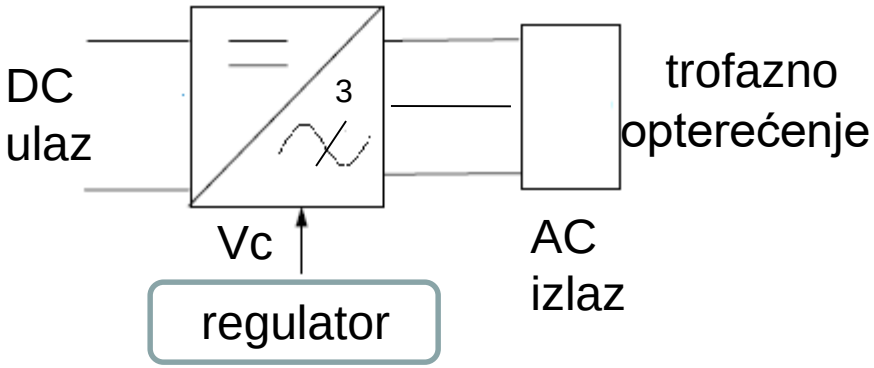
POLUUPRAVLJIVI



PUNOUPRAVLJIVI

DC/AC pretvarači-INVERTORI





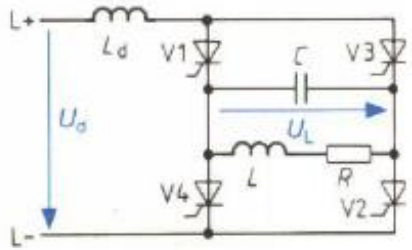
PRIMENA:
-regulisani motorni pogoni
-kućne aplikacije
-el.vuča
-DC transmisije

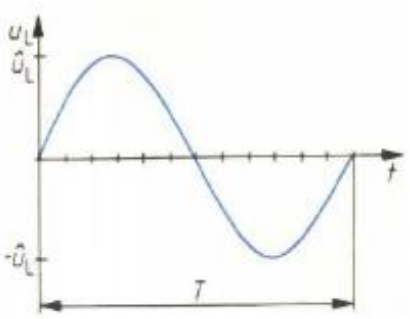
Vc-kontrolni napon

DC ulaz: jednosmerni izvori napajanja, izlaz ispravljačkih jedinica, solarne ćelije, DC vetrogeneratori , baterije, gorivne ćelije

Praktične reaalizacije DC/AC pretvarača-INVERTORA

Paralelno oscilatorno kolo (invertor vođen opterećenjem)

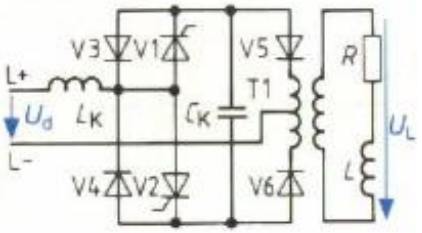


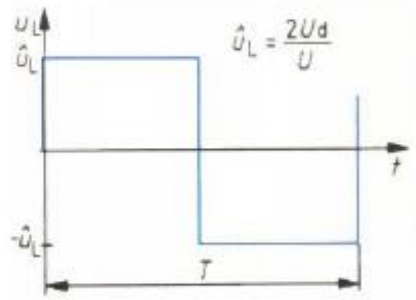


- Upotreba u području srednjih frekvencija kod peći za topljenje
- Izvedba sa opterećenjem kao: paralelno oscilatorno kolo sa sinusoidnim naponomi pravougaonom strujom ili redno oscilatorno kolo sa sinusoidnom strujom i pravougaonim naponom.

$$\frac{1}{T} = f_B \approx f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

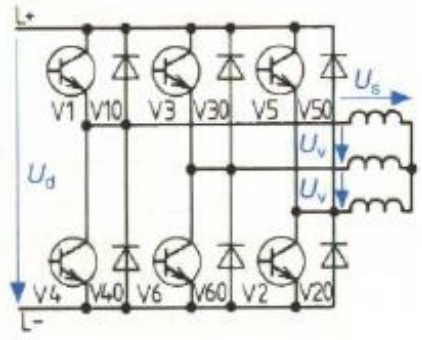
SAMOVODEĆI INVERTOR-1PH

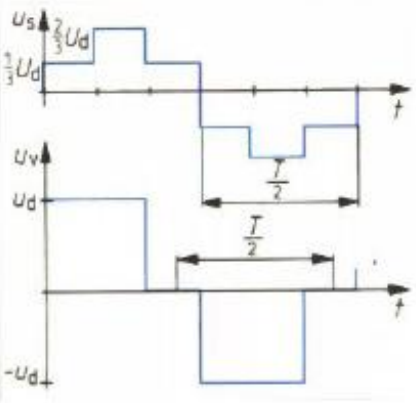




- Invertor u spoju sa srednjom tačkom napaja gotovo pravougaonim naizmeničnim naponom preko povratnih dioda V3 i V4 bilo koje opterećenje.
- Upotreba npr. kao nužno napajanje strujom postrojenja telekomunikacione tehnike.

SAMOVODEĆI INVERTOR-3PH

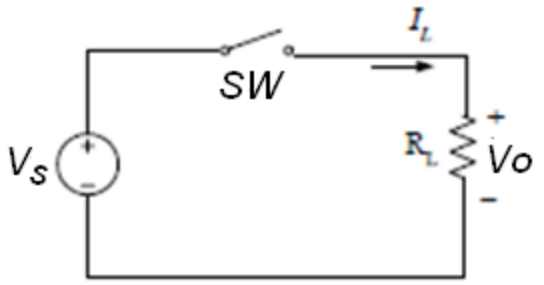


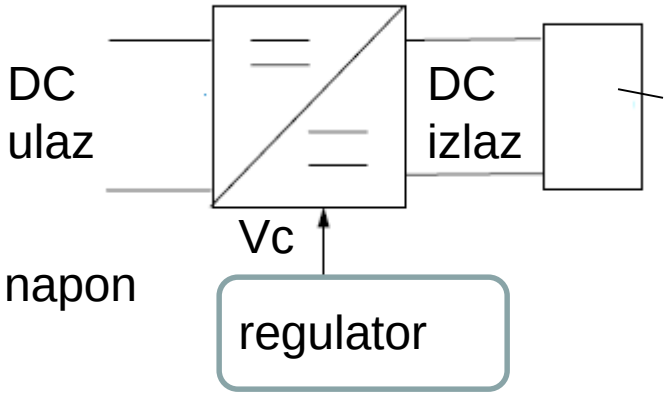


- Primena prvenstveno kod pogona trofaznih mašina sa regulisanim brojem obrtaja.
- Invertor za snage od 10 kW sa tiristorima i pojedinačnim kolima gašenja.
- Dijagram napona kod ugla vođenja struje ventila od $\Theta = 180^{O}$.

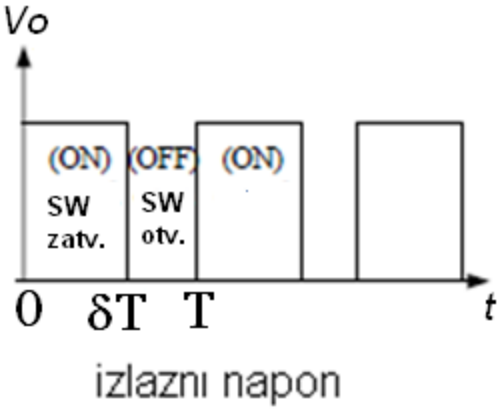
DC/DC pretvarači-ČOPERI

CHOPPER=sekač →





V_C-kontrolni napon



izlazni napon

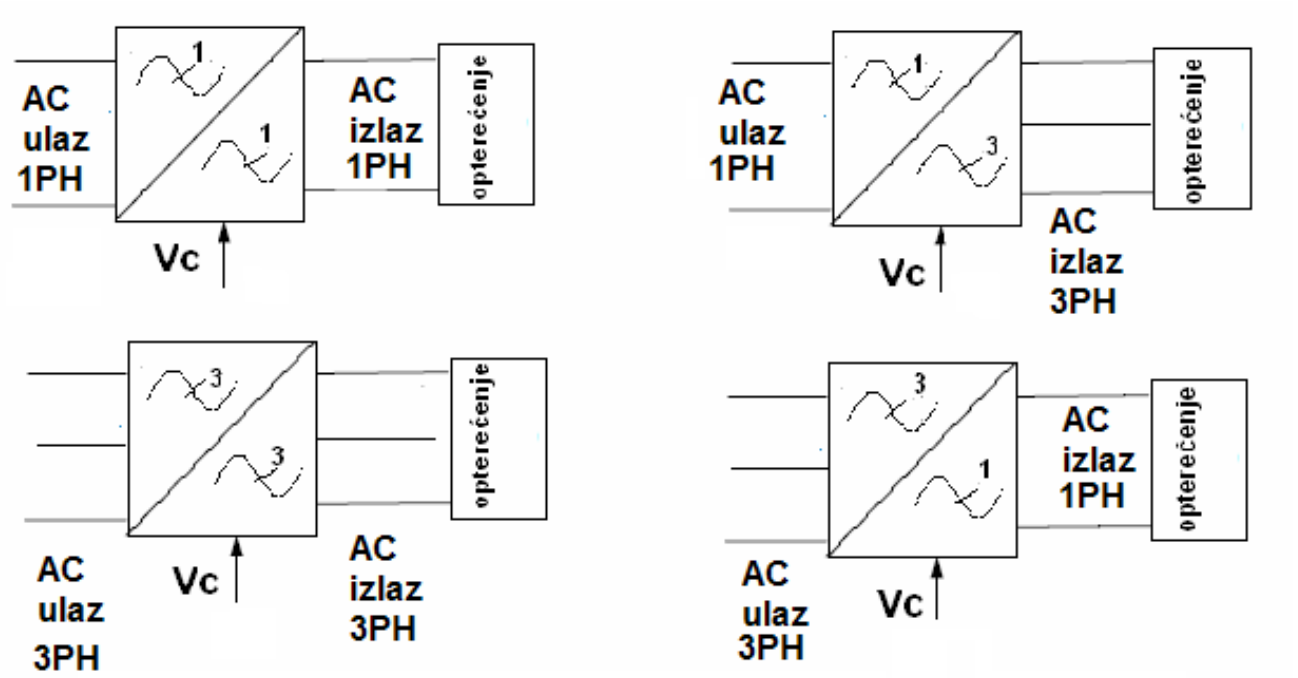
Pretvaraju nestabilisani DC ulazni napon u stabilisani DC izlazni napon zahtevanog nivoa

DC ulaz: jednosmerni izvori napajanja, izlaz ispravljačkih jedinica, solarne ćelije, DC vetrogeneratori , baterije, gorivne ćelije

PRIMENA: Prekidački izvori napajanja-Switch Mode Power Supply (SMPS), kontrola jednosmernih motora, punjači baterija

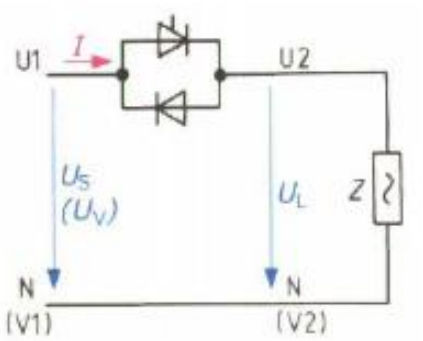
AC/AC pretvarači

PODEŠAVAČI NAPONA
PRETVARAČI UČESTANOSTI



PODEŠAVAČI NAPONA- Dvosmerni spojevi

MONOFAZNI



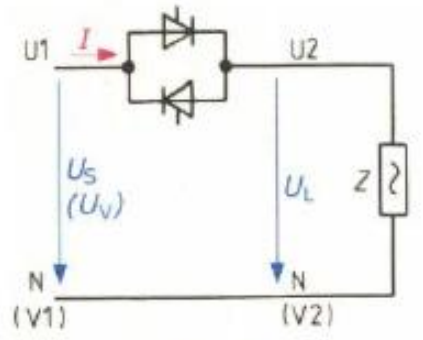
poluupravljivi

Osobine

- Nesimetrični napon opterećenja kod delimičnog upravljanja
- Jednosmerna komponenta u struji mreže pri $\alpha > 0^o$

Primene

- Naizmenični podešavač u opsegu snage od 50% ... 100%



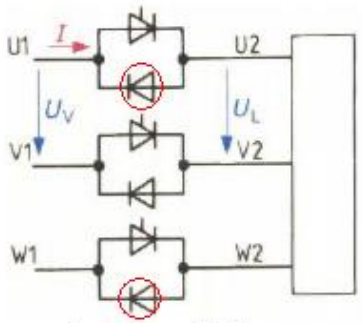
punoupravljivi

- Simetrični napon opterećenja
- Upravljačka reaktivna snaga u mreži pri $\alpha > 0^o$

- Naizmenični podešavač u opsegu snage od 0% ... 100%
- Sa trijakom kao potamnjivačem ili elektronskim relejem opterećenja

PODEŠAVAČI NAPONA- Dvosmerni spojevi

TROFAZNI



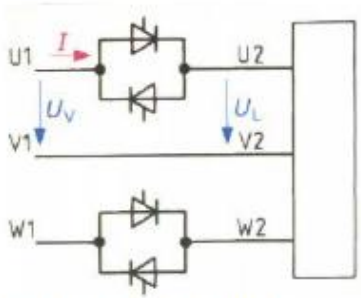
poluupravljivi

Osobine

- Nesimetrični napon opterećenja pri $\alpha > 0^o$ povećava nastajanje šuma kod motornog opterećenja.
- Neznatni utrošak pri ventilnog upravljanja

Primene

- Trofazni podešavač u opsegu snage od 0% ... 100% kod pogona sa neznatnim zahtevima kao npr. mali zaletni moment



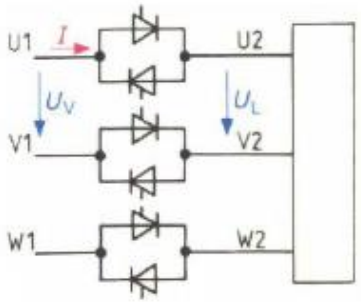
dvofazno upravljan

Osobine

- Stalna veza opterećenja sa mrežom
- Jednostavni uslovi paljenja
- Kod spoja opterećenja u zvezdu neutralni vod ne sme biti priključen.

Primene

- Trofazna sklopka (elektronski sklopnik) sa reduciranim utroškom ventila za upotrebu kod čestog uključivanja i isključivanja velikih struja.



punoupravljiv

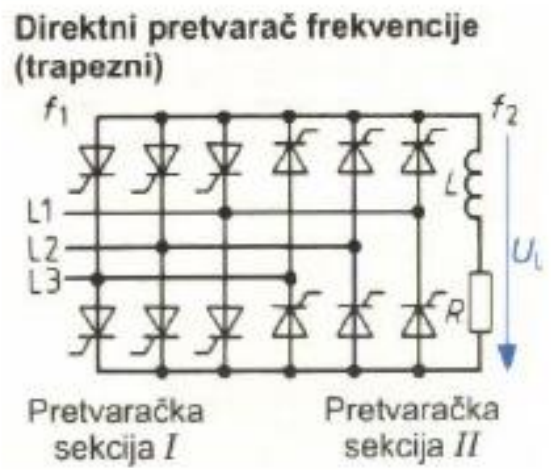
Osobine

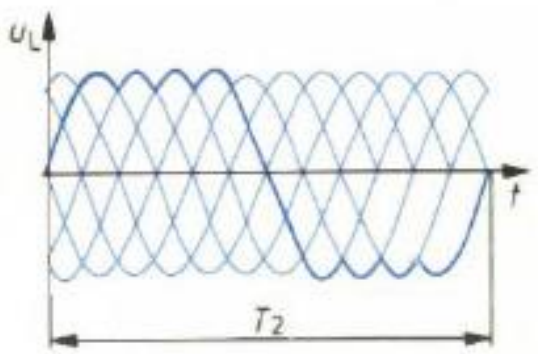
- Povećani gubitak za paljenje, jer se strujno kolo zatvara najmanje preko dva spoljna provodnika.

Primene

- Trofazni podešavač za pogone sa neznatnim zahtevima (npr. ventilator)
- U rasvetnim i grejnim postrojenjima spojenim u zvezdu sa neutralnim vodom kao 3W1C-podešivač

DIREKTNI AC/AC pretvarači-CIKLOKONVERTORI





- Antiparalelni spoj dve potpuno upravljane pretvaračke sekcije omogućava naizmenični napon sa $f_2 < f_1$.
- Kod trapeznog pretvarača izlazni napon se određuje iz broja vrhova mrežnog napona.
- Tri pretvarača (kao i ciklopretvarač) omogućavaju snabdevanje iz trofaznih pogonskih mehanizama.

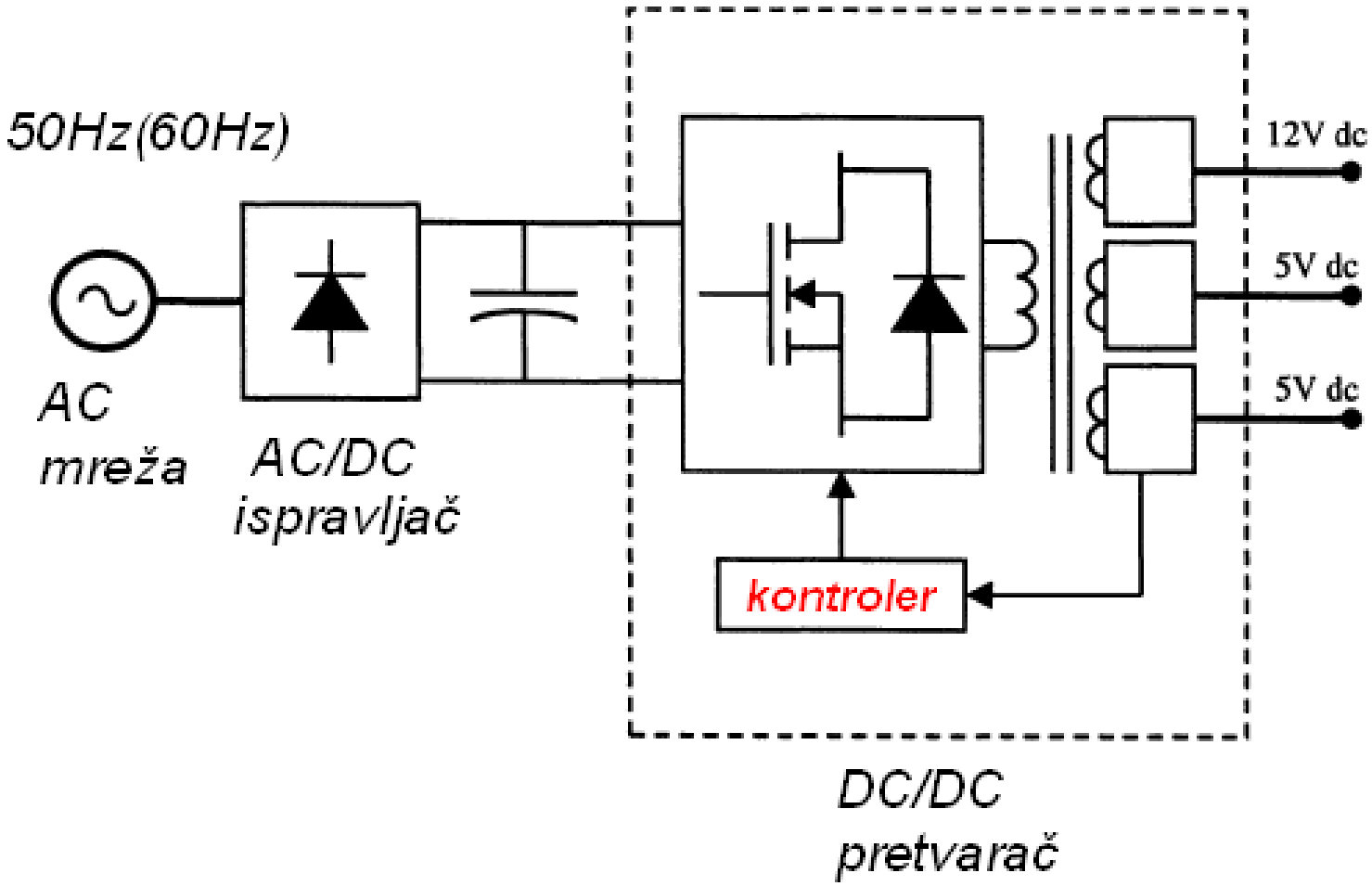
Ulazna učestanost je veća od izlazne f1>f2

PRIMENA: sporohodni motorni pogoni velikih snaga (>1MW)

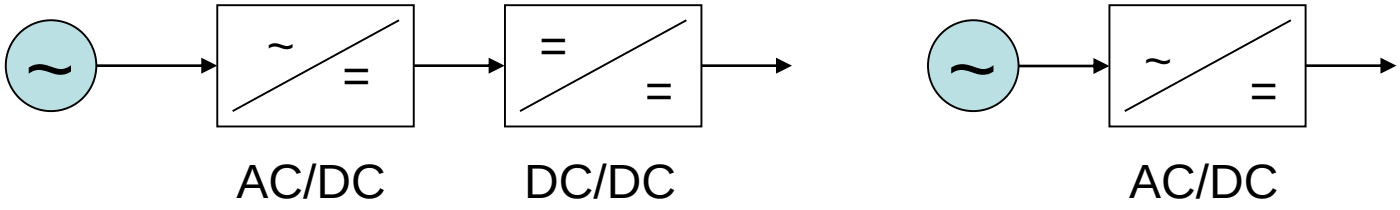
KOMBINOVANI AC/DC/AC i AC/DC/DC PRETVARAČI

- Najčešći tip koji se primenjuje u industriji i aparatima široke potrošnje (kućnim aparatima)
- Kombinacija AC/DC/AC se primenjuje u frekventno regulisanim elektromotornim pogonima
- Kombinacija AC/DC/DC=>AC/DC se primenjuje u uređajima široke potrošnje.
- Jedan od njih AC/DC pretvarač je veoma masovno korišćen. Koji?

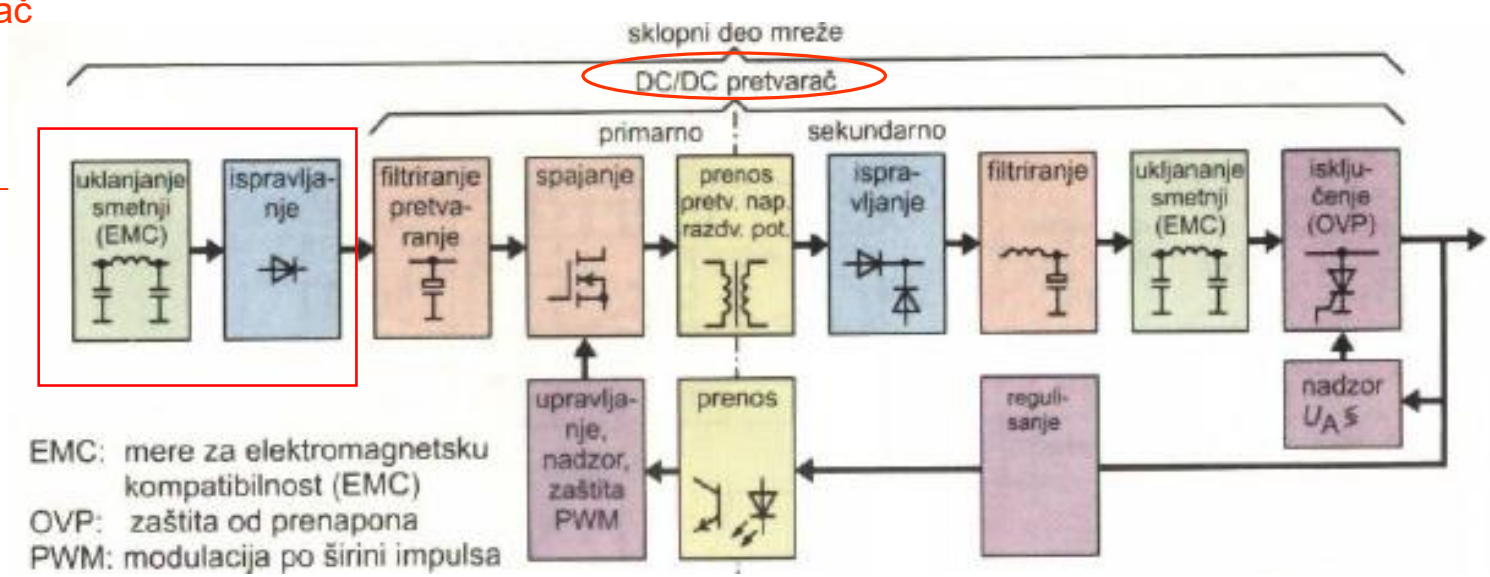
- PC napajanje (tipičan primer AC/DC/DC konverzije)



Kombinovani AC/DC i DC/DC pretvarač => AC/DC pretvarač (ispravljač)

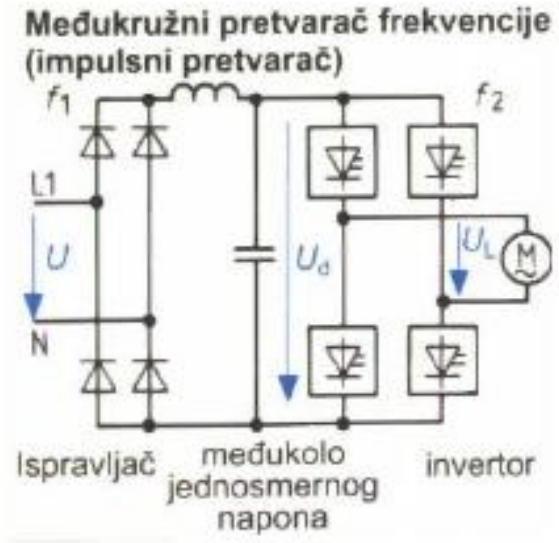


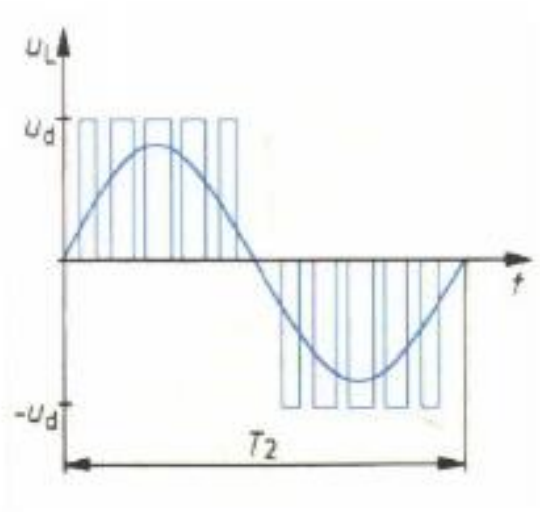
AC/DC pretvarač



INDIREKTNI PRETVARAČ UČESTANOSTI
PRETVARAČ 1PH/1PH

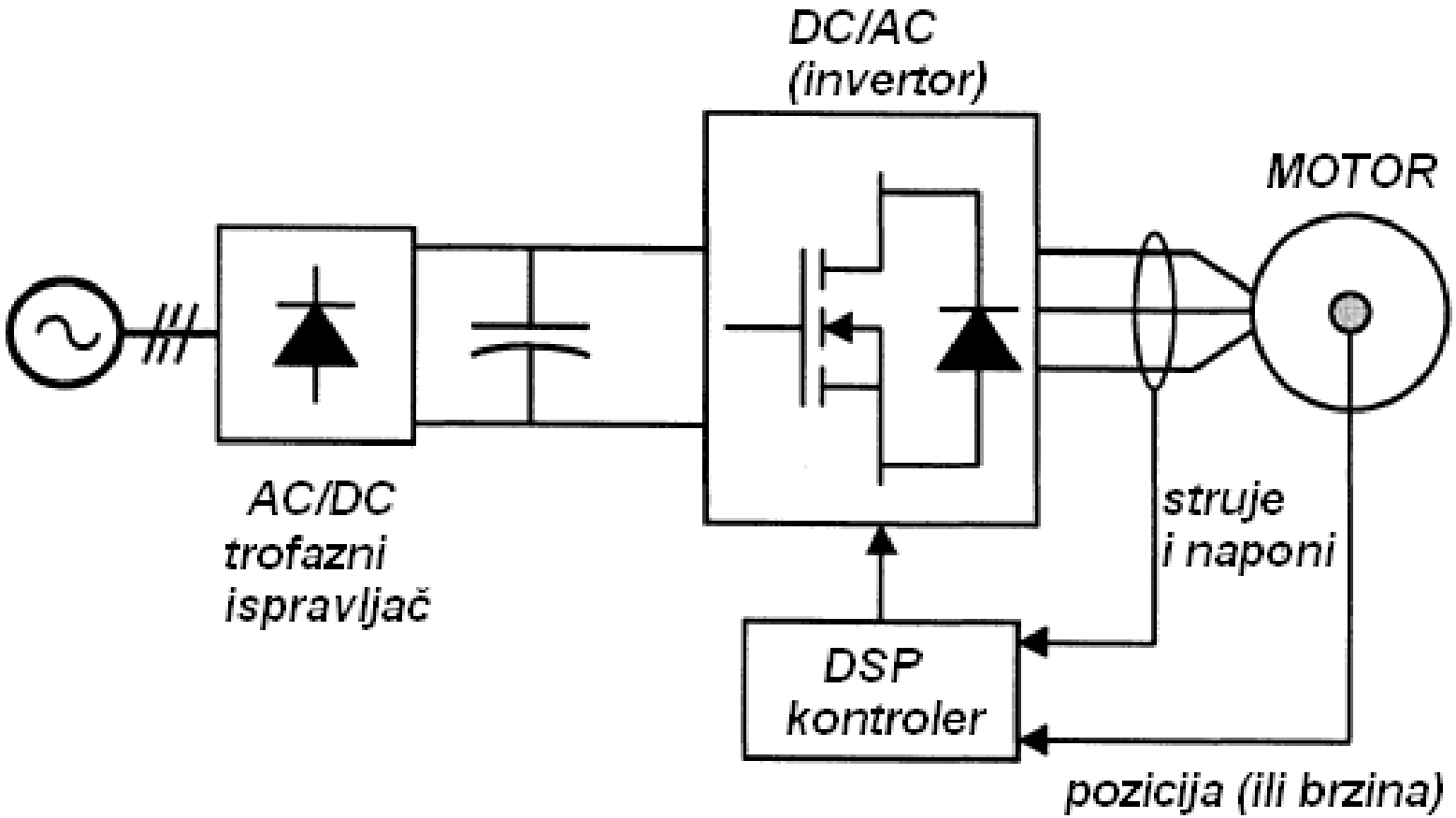
Dva pretvaranja energije
AC-DC i DC-AC što je ustvari AC-AC





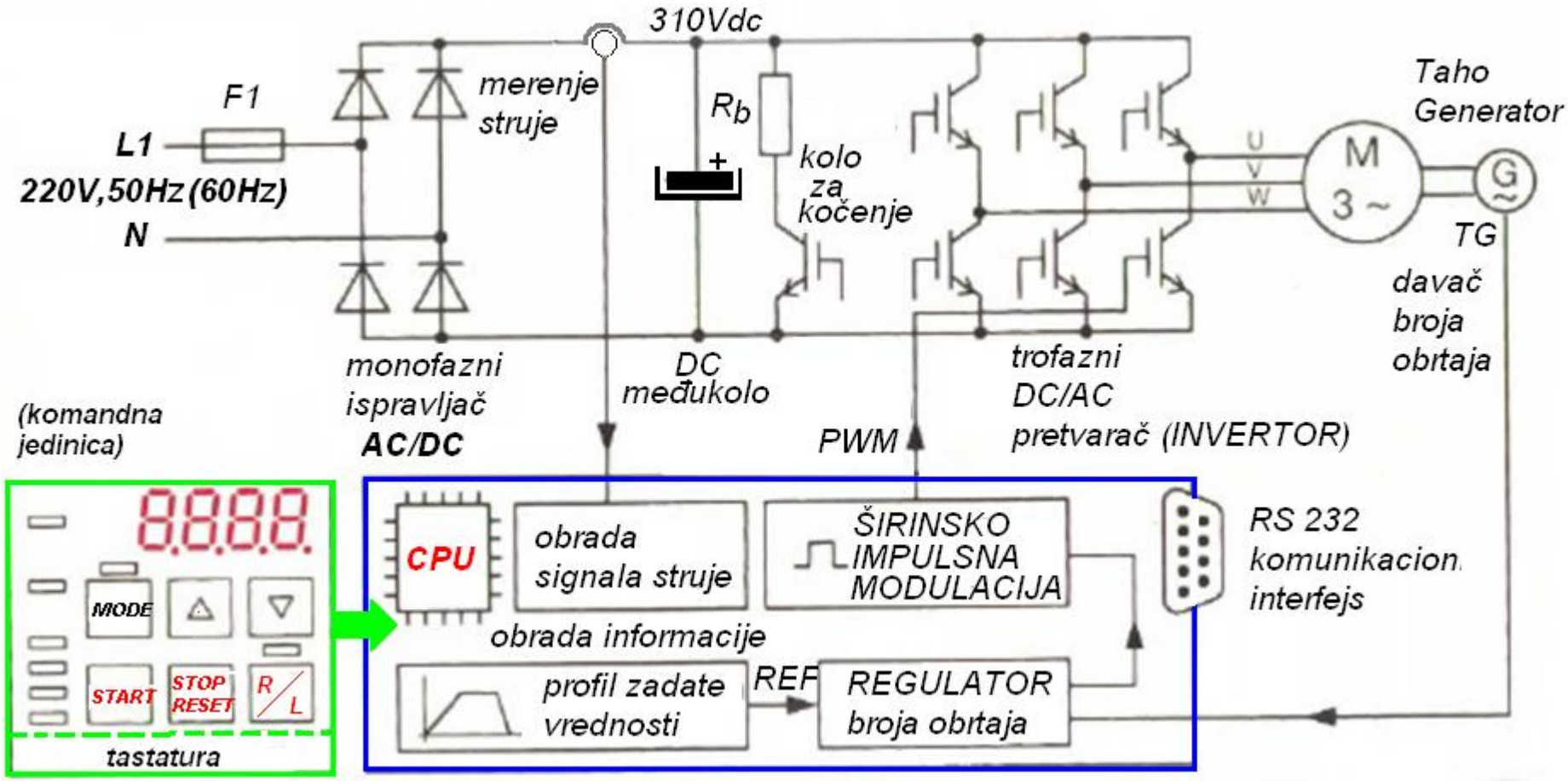
- Posebnim upravljanjem širine impulsa može se naizmenični napon menjati s obzirom na frekvenciju i amplitudu.
- Sinusoidna frekvencija osnovnog oscilovanja leži ispod frekvencije impulsa (podoscilatorni postupak).
- Simbol za ventil sa funkcijom gašenja.

INDIREKTNI PRETVARAČ UČESTANOSTI
PRETVARAČ 3PH/3PH (Frekventni Regulator)

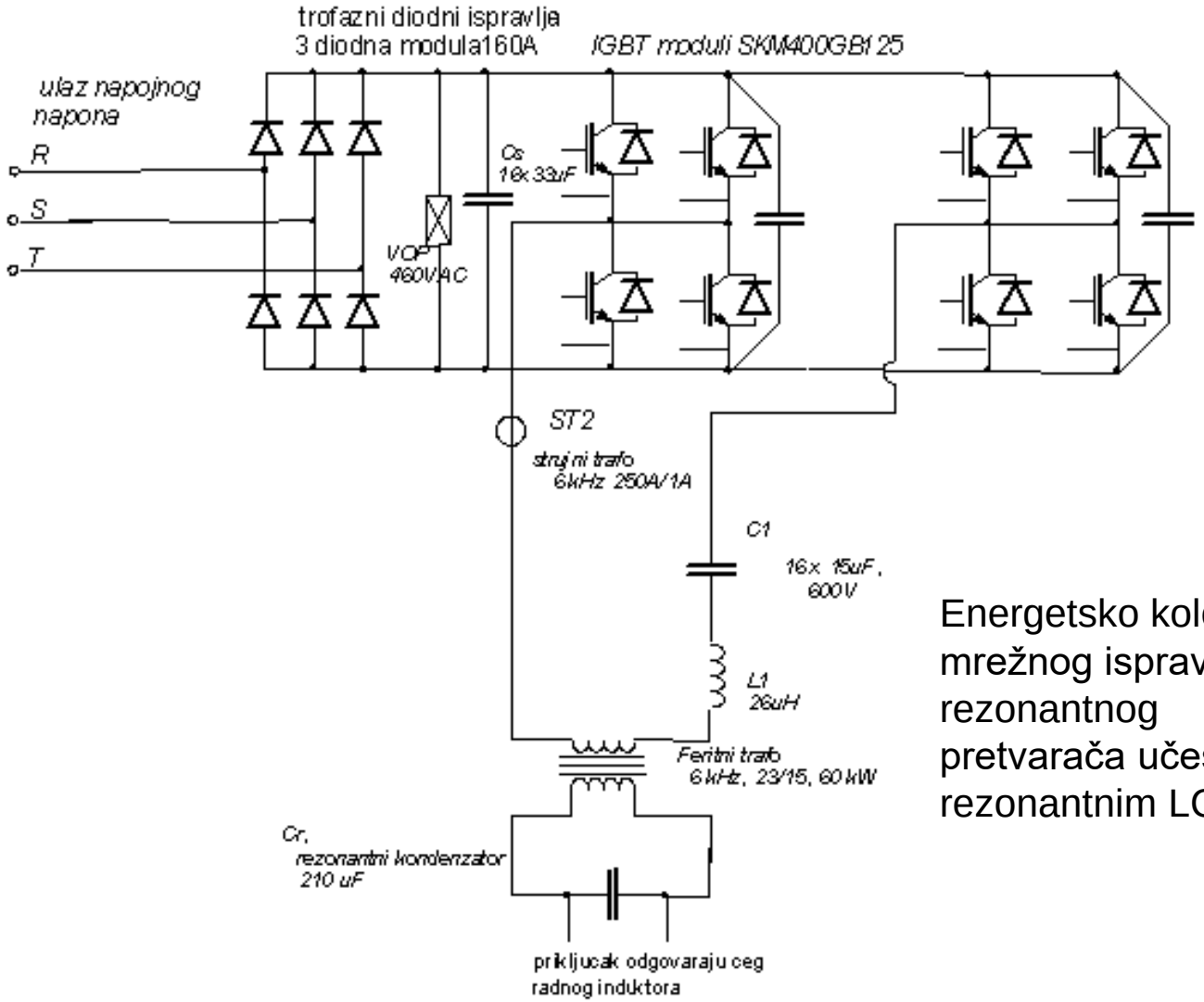


INDIREKTNI PRETVARAČ UČESTANOSTI
PRETVARAČ 1PH/3PH (Frekventni Regulator)

Dva pretvaranja energije: AC-DC i DC-AC što je ustvari AC-AC

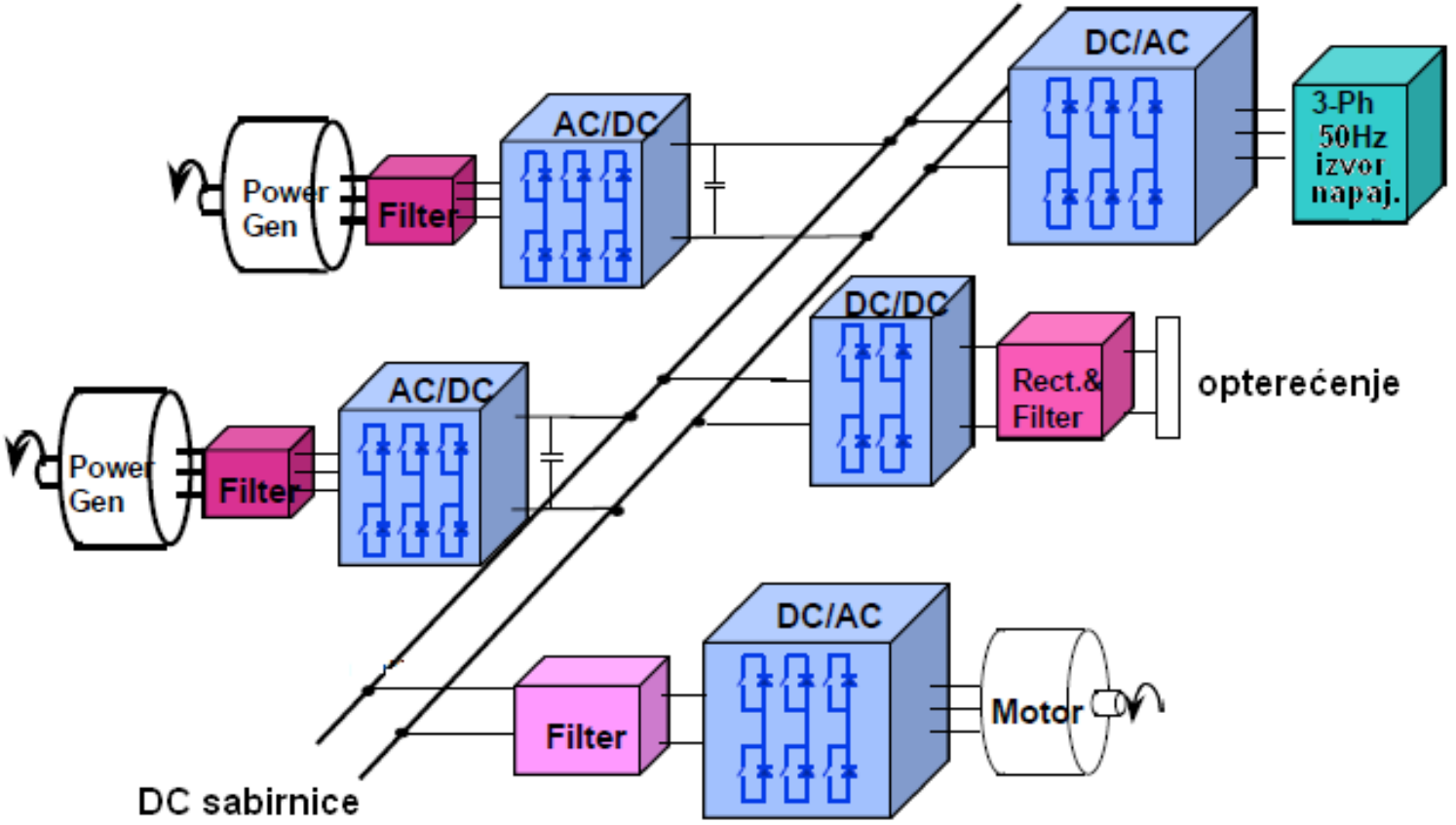


AC-DC-AC pretvarač: Rezonantni invertor za indukciono grejanje P=60kW, izlazne učestanosti 5kHz



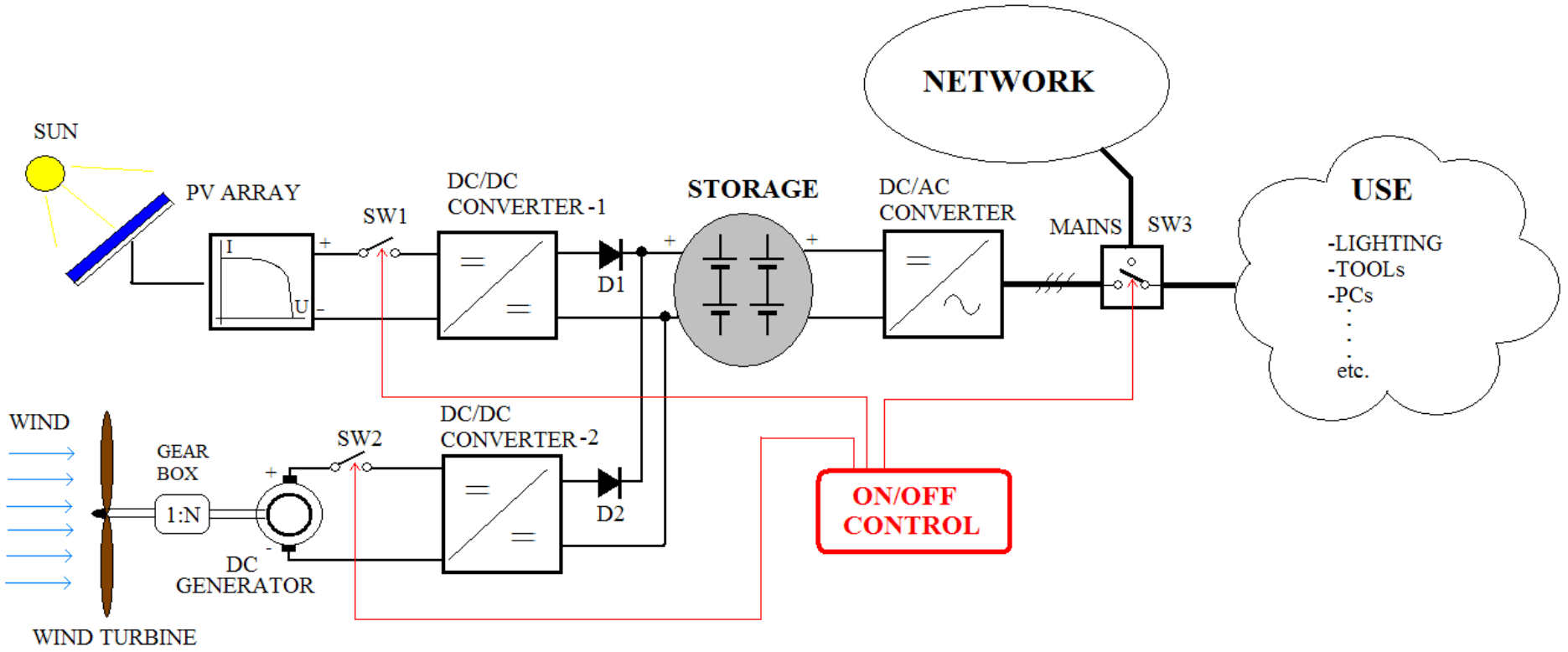
Energetsko kolo trofaznog mrežnog ispravljača i rezonantnog pretvarača učestanosti sa rezonantnim LC kolom

SISTEM ENERGETSKIH PRETVARAČA-Koncentrisani DC BUS sistem

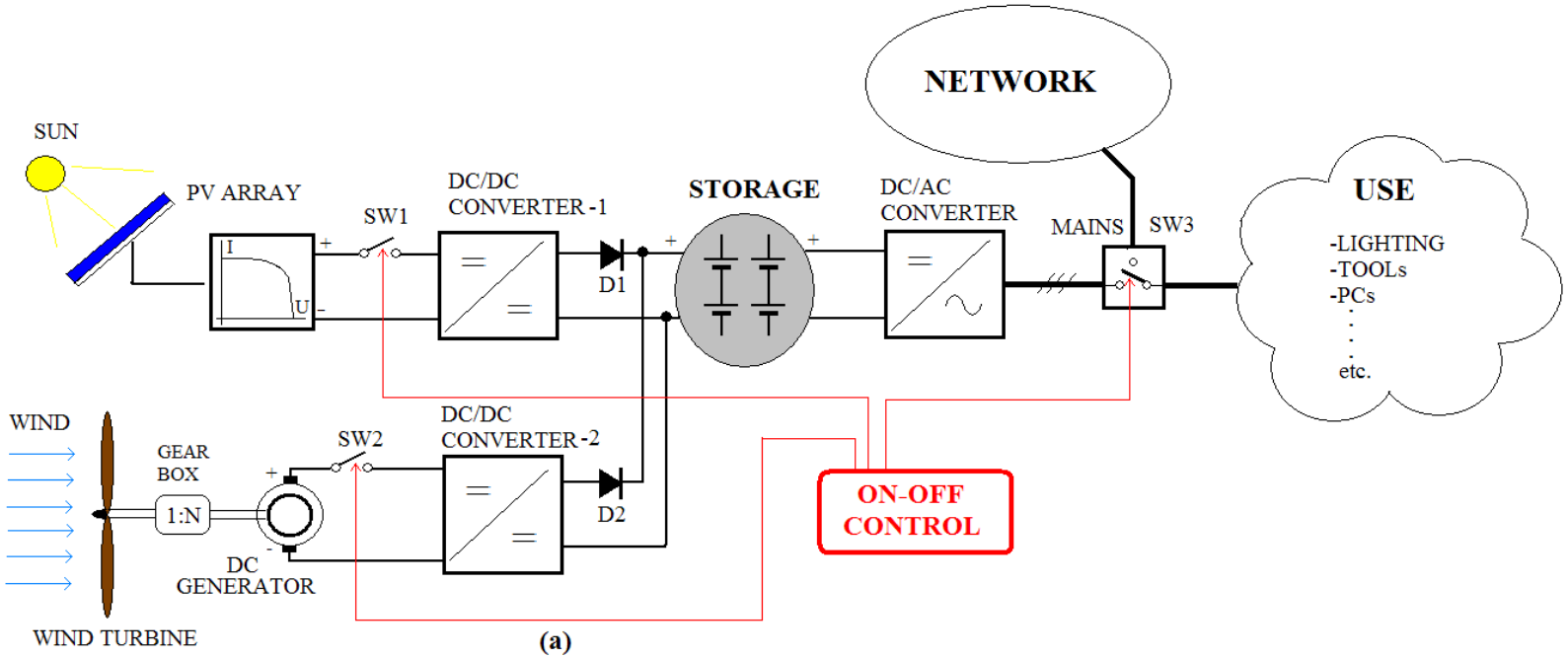


SISTEM ENERGETSKIH PRETVARAČA- Obnovljivi izvori

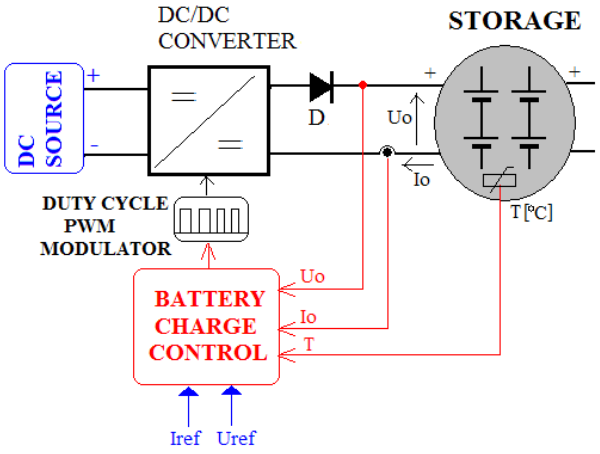
Solarne ćelije
Jednosmerni vetrogenerator



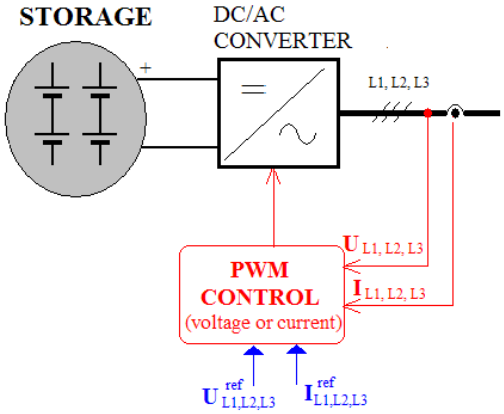
Kontrolisani DC-DC i DC-AC pretvarači u OIE



(a)



(b)

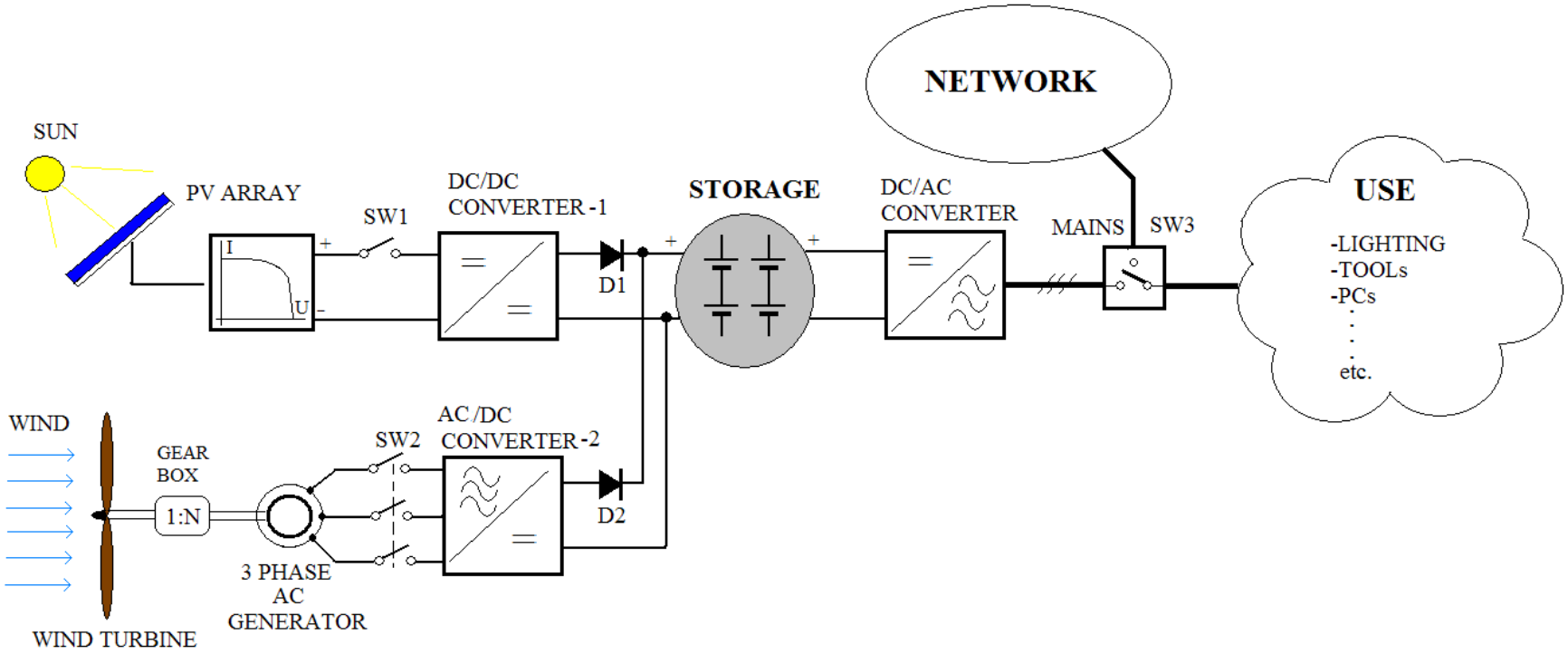


(c)

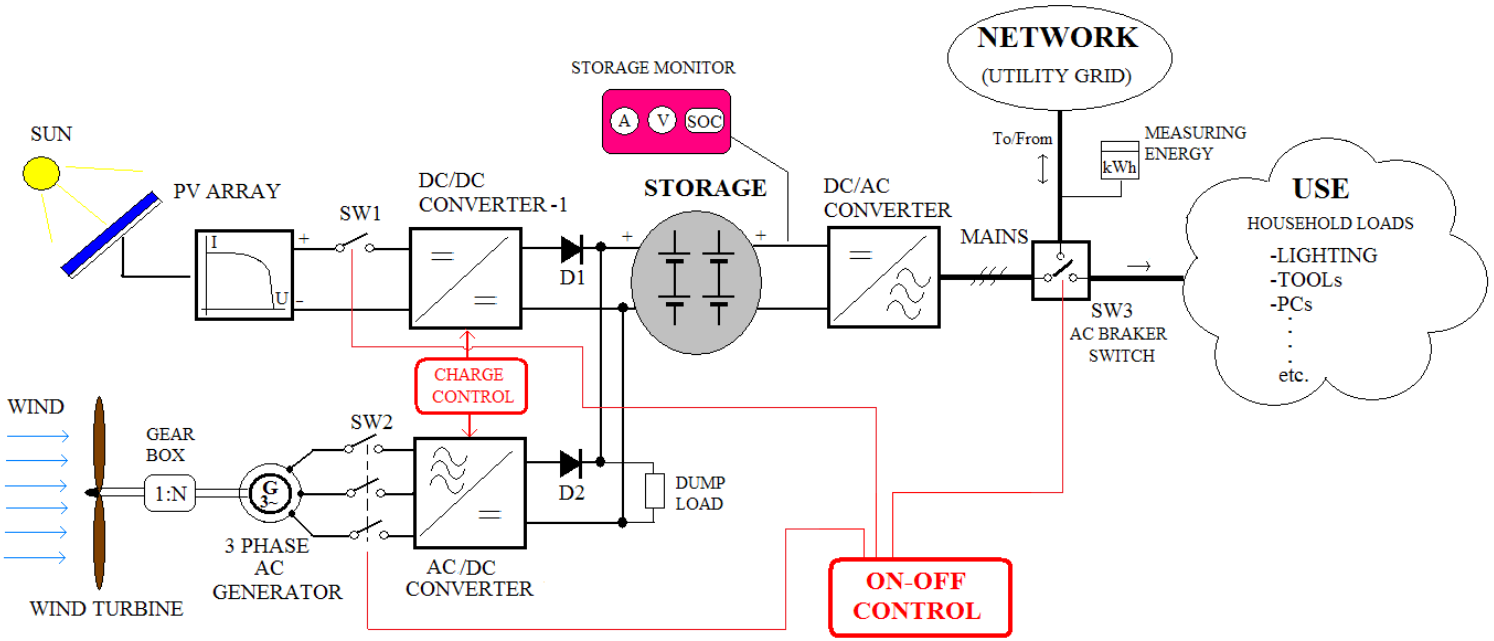
SISTEM ENERGETSKIH PRETVARAČA- OIE

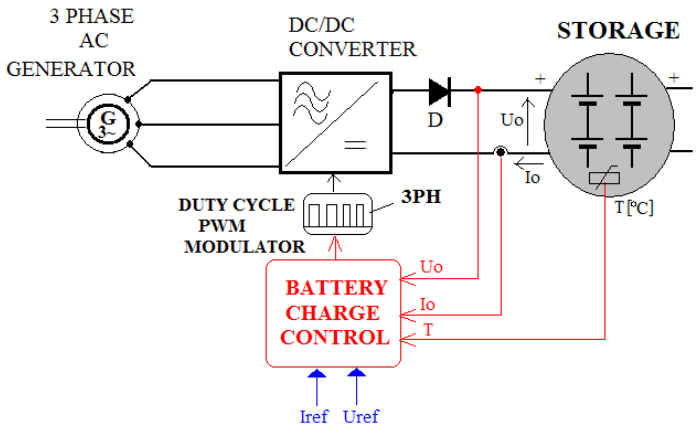
Solarne ćelije

Trofazni vetrogenerator

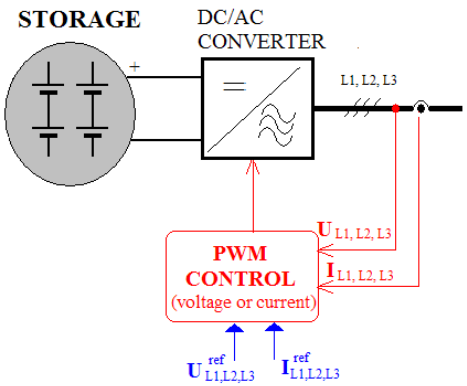


Kontrolisani AC-DC i DC-AC pretvarači- OIE



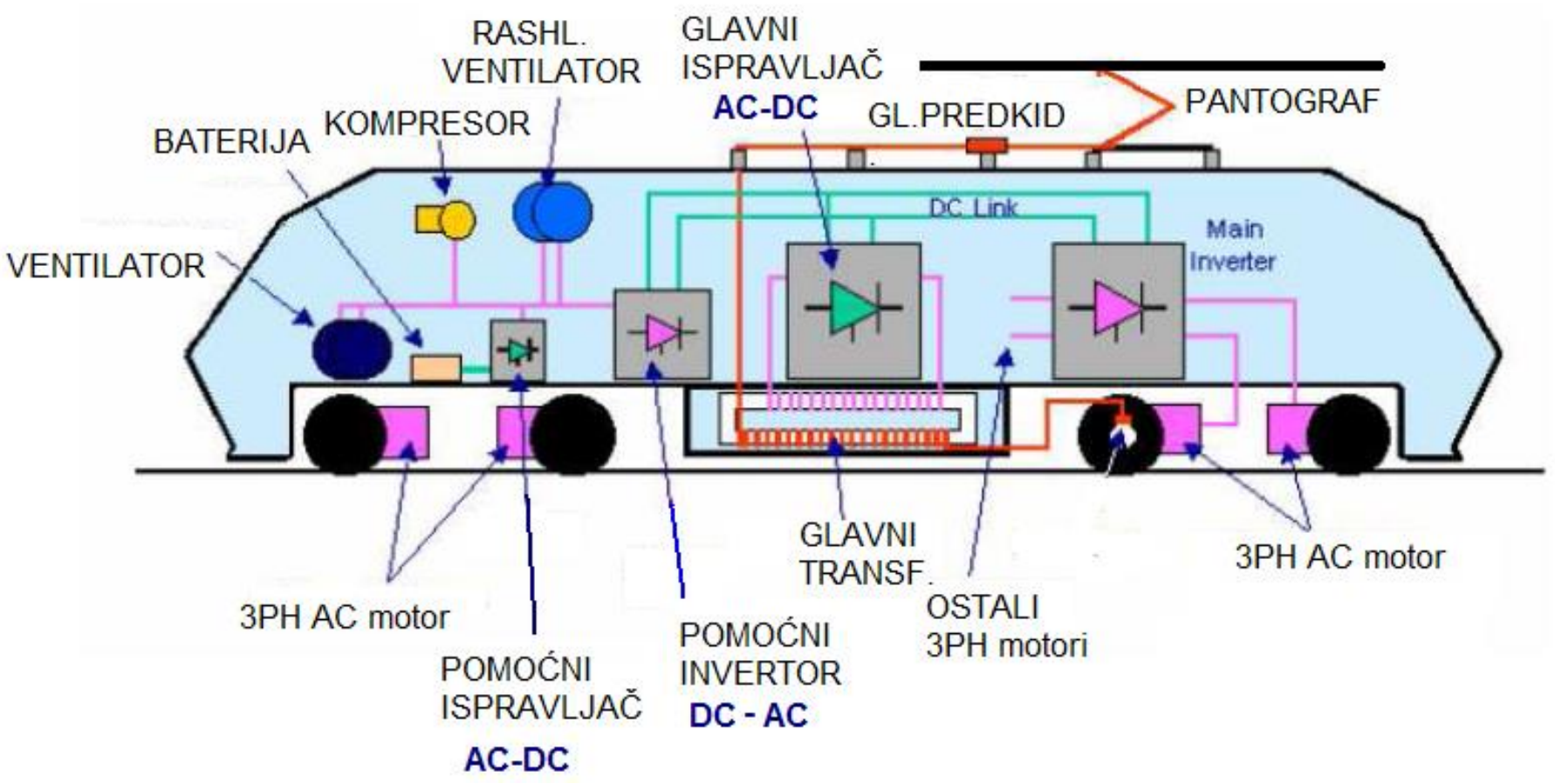


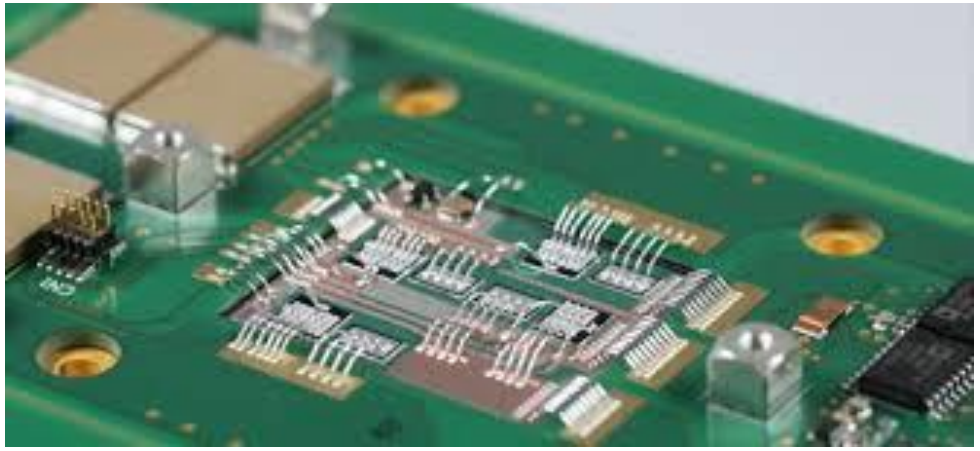
(b)



(c)

SISTEM ENERGETSKIH PRETVARAČA-ELEKTRIČNA VUČA





Hvala na PAŽNJI!!!

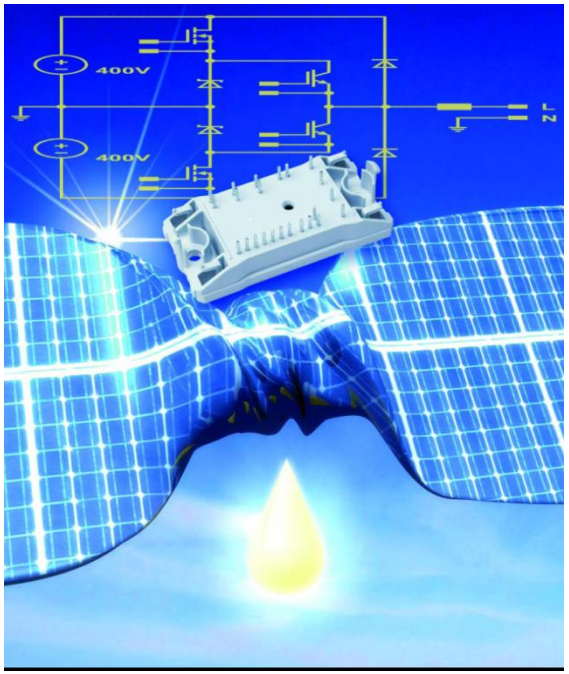
PITANJA??

ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

PREDAVANJE

POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

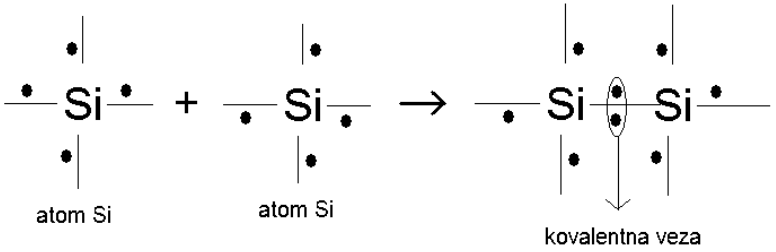
PREDAVAČ: Dr Željko Despotović

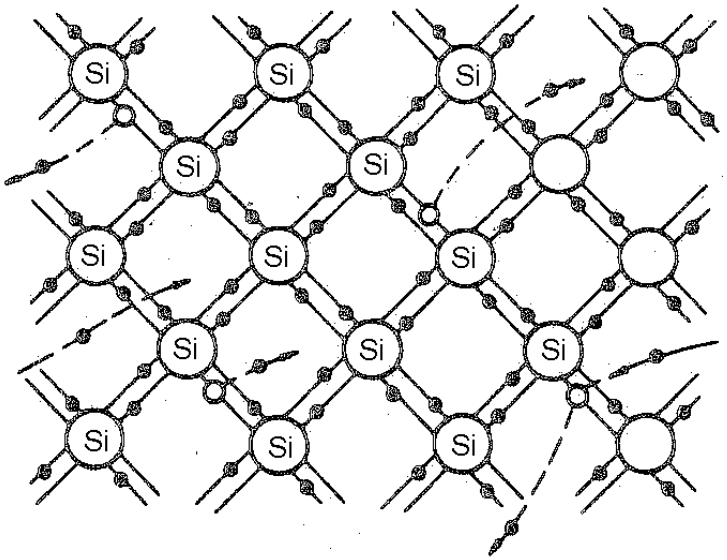


OSNOVA POLUPROVODNIKA- MONOKRISTAL SILICIJUMA

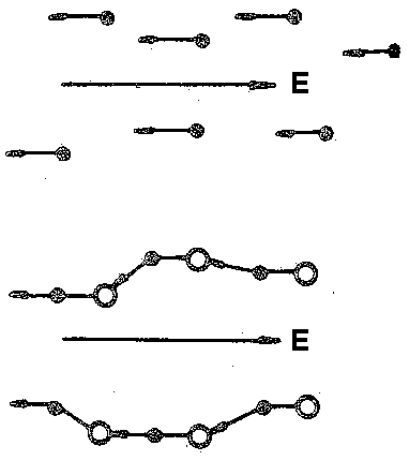
Si- četvorovalentan el. konfiguracija zadnjeg nivoa : ns^2np^2

KOVALENTNA VEZA-sparivanje elektrona





(a)



(b)

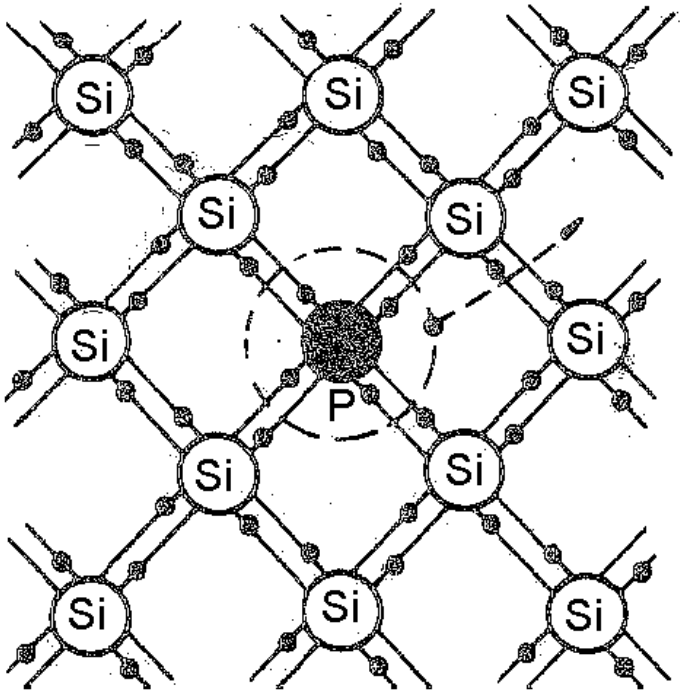
(a)-monokristal u odsustvu spoljnjeg električnog polja

(b)-Dejstvo spoljnjeg električnog polja

PRIMESNI POLUPROVODNICI

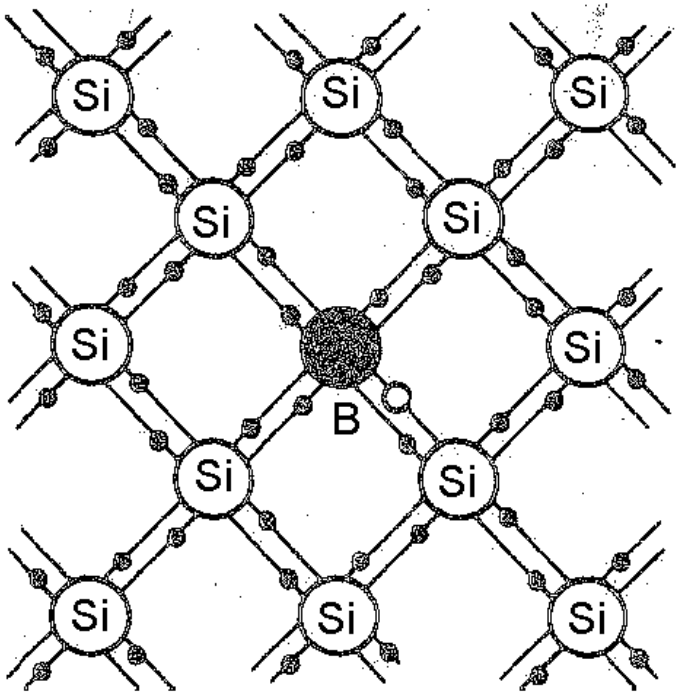
Fosfor-P petovalentan, el. kofiguracija ns^2np^3
Bor-B trovalentan, el. konfiguracija ns^2np1

N-tip poluprovodnika



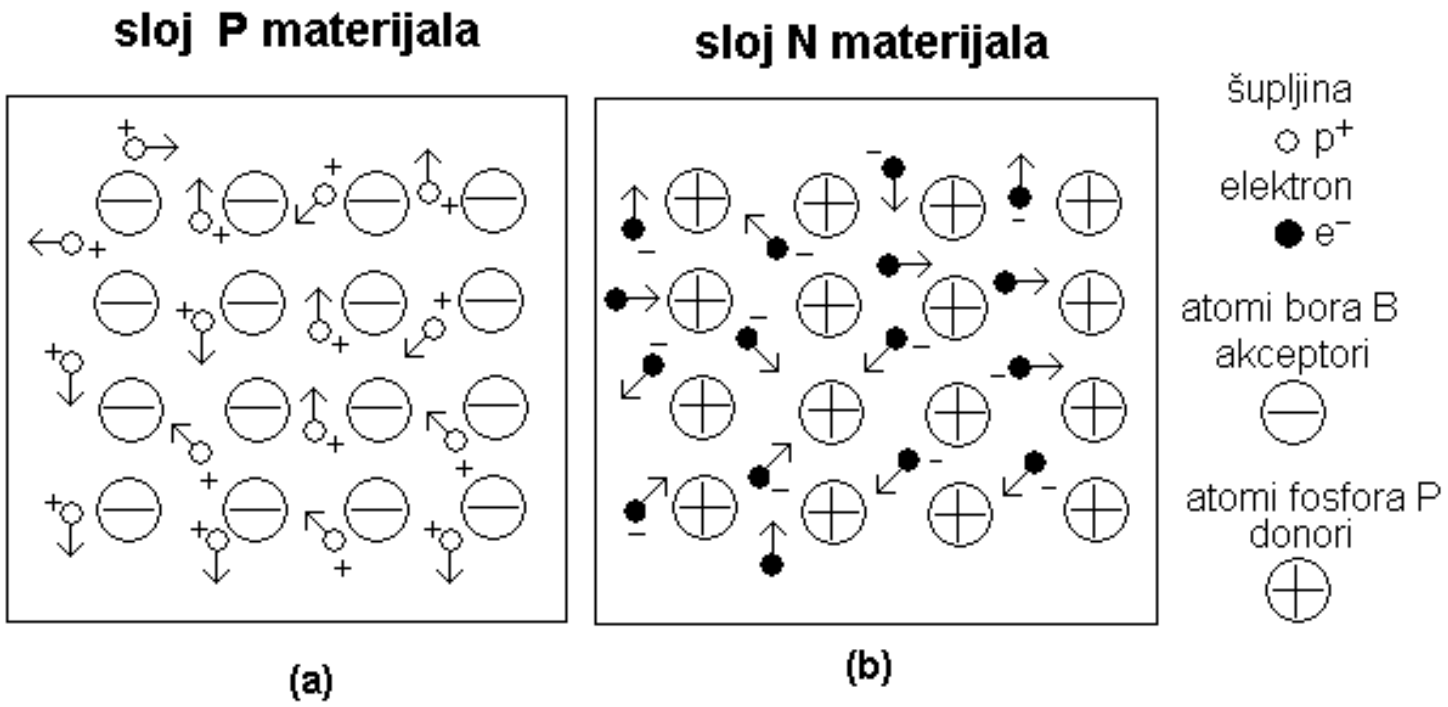
P-fosfor DONOR ⊕

P-tip poluprovodnika



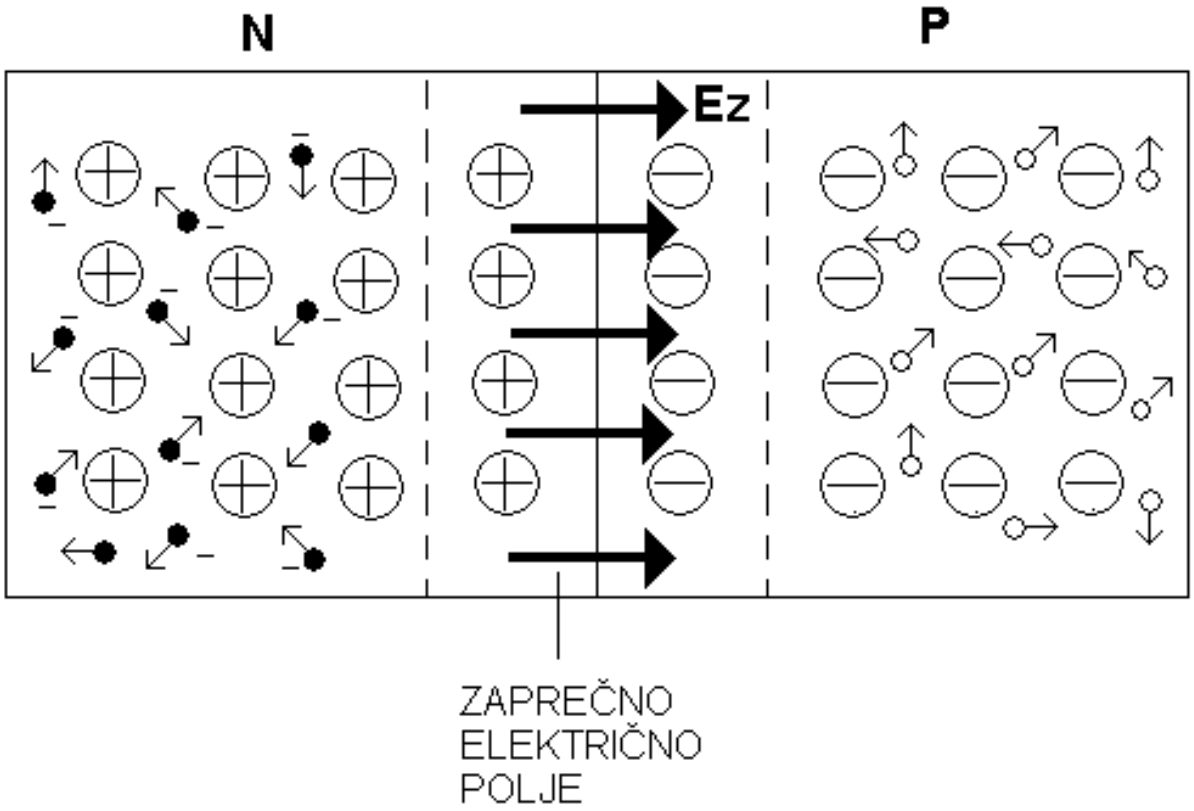
B-Bor AKCEPTOR ⊖

PREDSTAVE POLUPROVODNIKA P i N TIPA

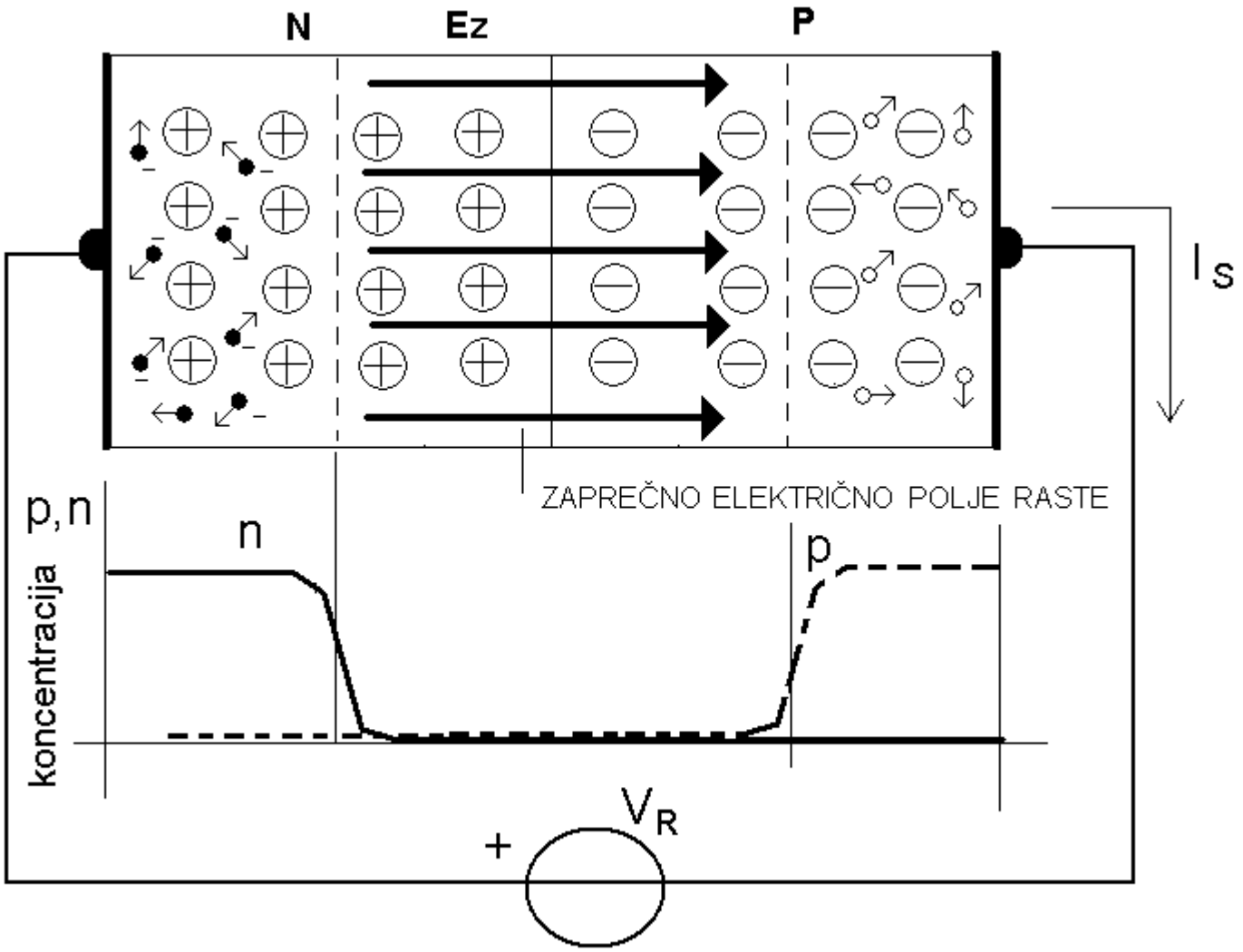


Predstave poluprovodnika, (a)- P tip materijala , (b)-N tip materijala

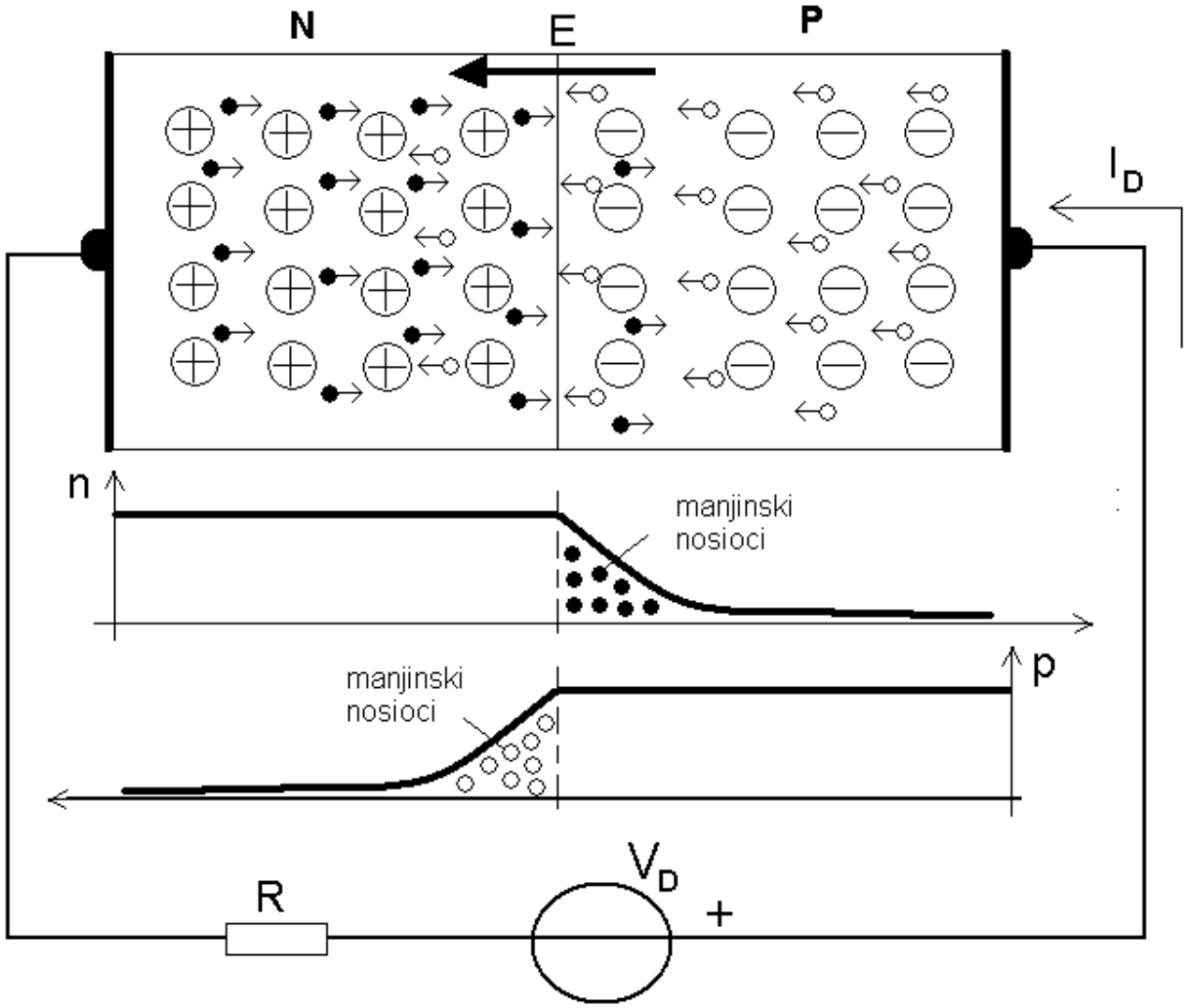
P-N spoj bez polarizacije



INVERZNO POLARISAN P-N SPOJ



DIREKTNO POLARISAN P-N SPOJ



MATEMATIČKE JEDNAČINE P-N SPOJA (DIODE)

$$V_D = \frac{\eta k T}{q} \cdot \ln\left[\frac{I_D}{I_S} + 1\right]$$

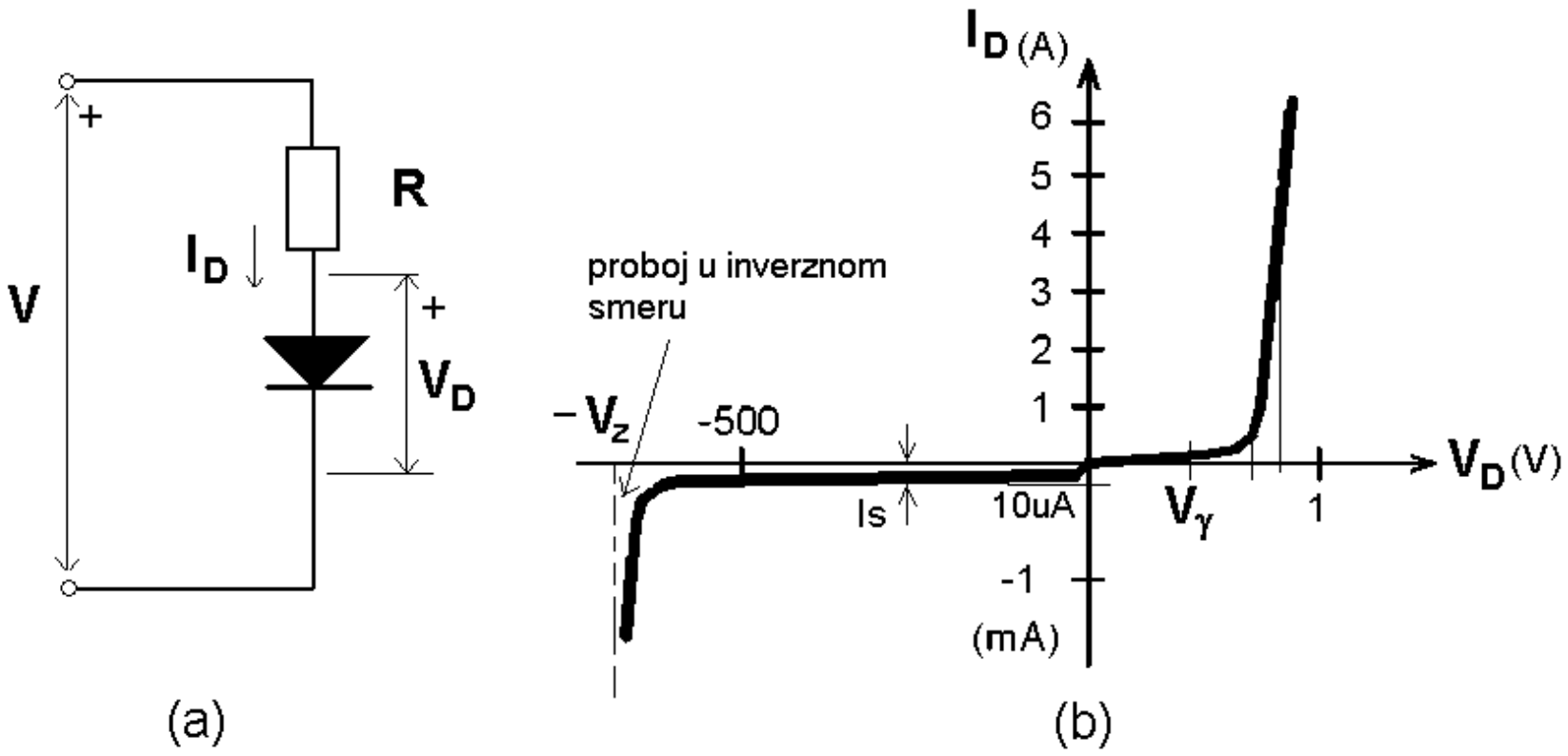
$$I_D = I_S \cdot \left[e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right] \qquad V_T = \frac{kT}{q} \qquad V_T = 26mV$$

V_D - napon diode (V)
I_D -struja diode (A)
I_S -inverzna struja zasićenja diode (A)
T - apsolutna temperature (K)
q -elementarno naelektrisanje ($1.602 \cdot 10^{-19} C$)
k -Bolcmanova konstanta ($1.38 \cdot 10^{-23} J/K$)
η - koeficijent koji zavisi od tipa diode (η=1 za Ge diode, η=2 za Si diode).

Inverzna struja zasićenja jako zavisi od temperature

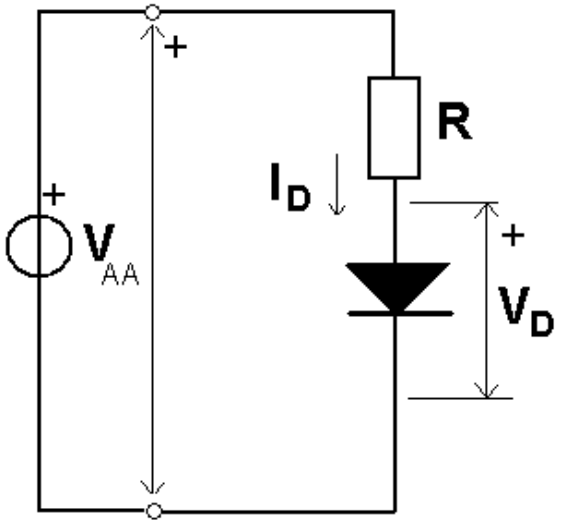
$$I_S(T) = I_S(T_1) \cdot 2^{\frac{T - T_1}{10}}$$

STRUJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA DIODE

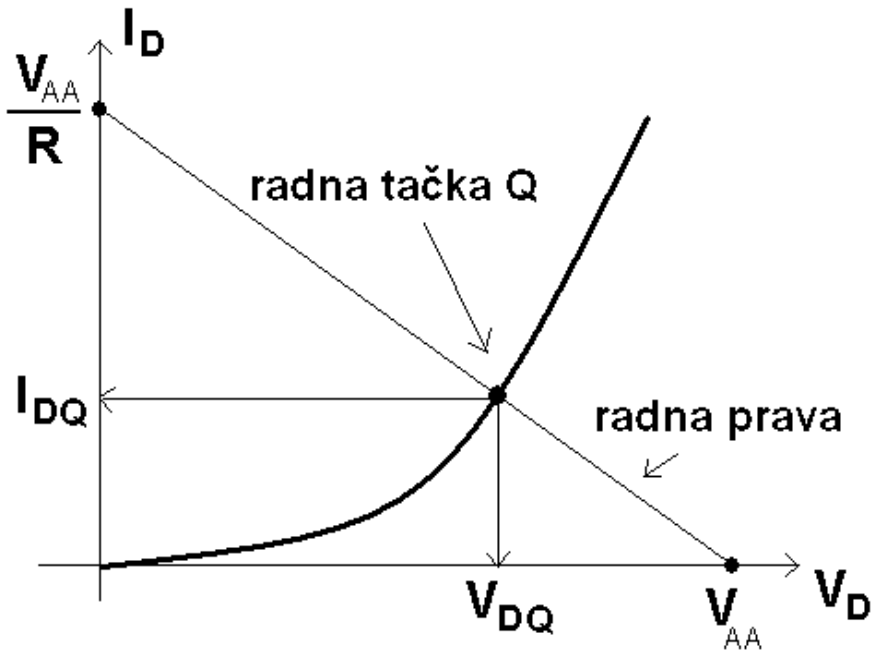


Karakteristike diode, (a)-simbol i vezivanje u električnom kolu, (b)-strujno naponska karakteristika

KONCEPT RADNE PRAVE



(a)



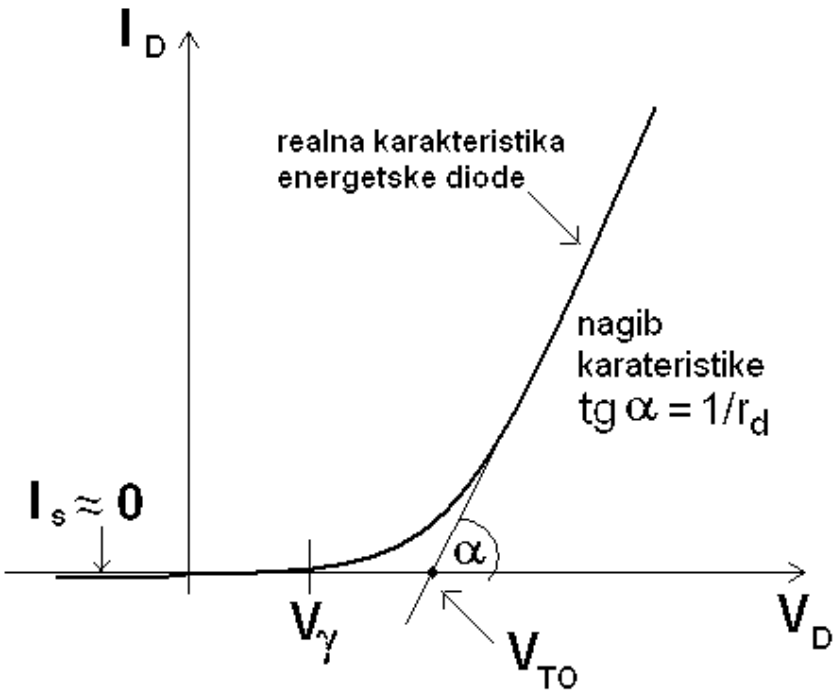
(b)

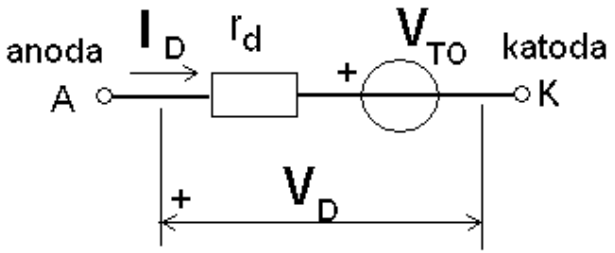
$$+V_{AA} - RI_D - V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_{AA} - V_D}{R}$$

Kako predstaviti diodu za velike signale, a da se ne koristi nepraktični eksponencijalni model volt-amperske karakteristike, ili grafički koncept radne prave?

MODEL DIODE ZA VELIKE SIGNALE-direktno polarisana dioda





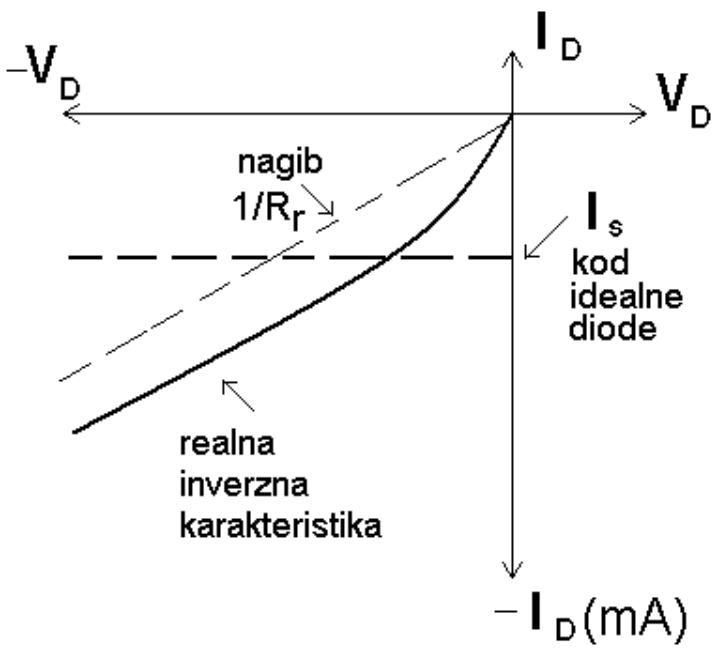
$V_D = V_{TO} + r_d I_D$

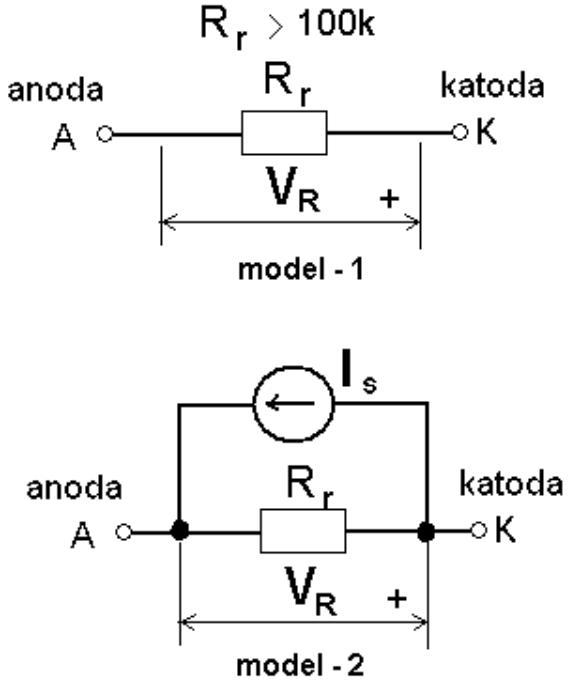
$V_\gamma \approx 0.6V$

$V_{TO} \approx 0.9V.$

$$V_D = V_{TO} + r_d \cdot I_D$$

MODEL INVERZNO POLARISANE DIODE





Model-1

$R_r \geq 100k\Omega$

Model-2: blagi porast inverzne struje sa povećanjem inverznog napona zbog sekundarnih efekata u diodi

Temperaturna zavisnost karakteristike diode

Parametri diode **prag provođenja** , odnosno **inverzna struja zasićenja** jako zavise od temperature.

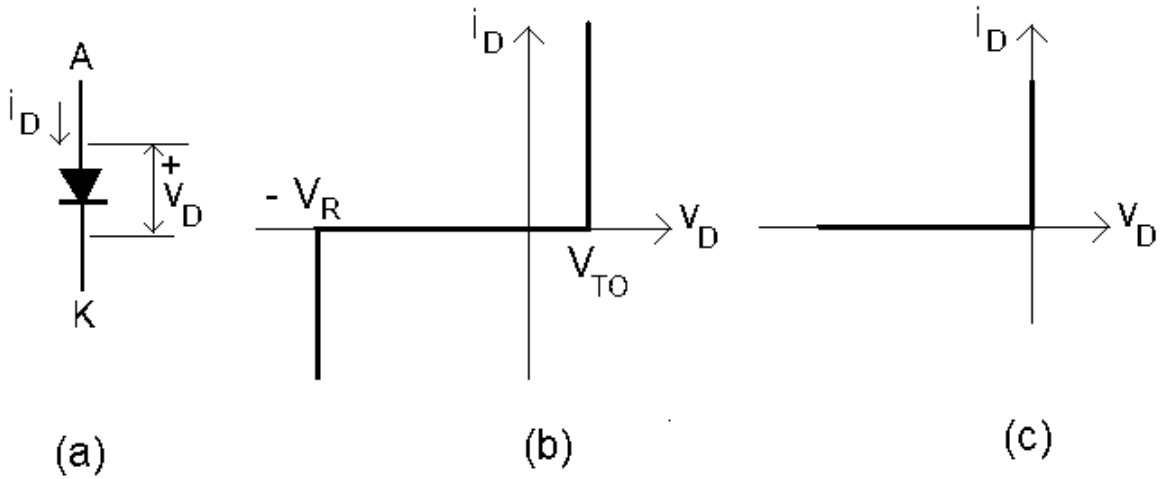
Teorijski **inverzna struja zasićenja** raste ako temperatura T raste za 8% / ºC (praktično 7% / ºC), **odnosno poraste dva puta za svakih 10 ºC**

Ako je struja diode konstanta, napon na direktno polarisanoj diodi-**prag opada sa porastom temperature**.

Pri tom je temperaturni gradijent napona za Si

$$\frac{dV_\gamma}{dT} \cong -2.2mV/^oC$$

IDEALIZOVANE KARAKTERISTIKE DIODA



Idealizovane karakteristike dioda, (a)-referntni smerovi, (b)-model 1, (c)-model 2

$$v_D \rangle V_{TO} \Rightarrow i_D \in (0,+\infty)$$
$$V_{TO} \geq v_D \geq -V_R \Rightarrow i_D = 0$$
$$v_D \langle -V_R \Rightarrow i_D \in (0,-\infty)$$

$$v_D = 0 \Rightarrow i_D \in (0,+\infty)$$
$$i_D = 0 \Rightarrow v_D \in (0,-\infty)$$

KATALOŠKI PARAMETRI ENERGETSKIH DIODA

INVERZNI NAPONI

V_{RSM} *Neponovljivi vršni inverzni napon* (može povremeno da se javi na diodi; ako se često javlja degradiraće karakteristike diode; često se u katalozima sreće i oznaka V_{DSM}

V_{RRM} *Ponovljivi vršni inverzni napon* (može se uzastopno primenjivati bez oštećenje diode; često se u katalozima sreće i oznaka V_{DRM}

$V_{(BR)R}$ *Probojni napon pri inverznoj polarizaciji*; dioda ulazi u proboj i može biti uništena; normalno se u eksploataciji energetske diode ova vrednost nikada ne postiže

KATALOŠKI PARAMETRI ENERGETSKIH DIODA

STRUJE

I_{FAV} *Nazivna srednja vrednost struje vođenja* $I_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_F(t) \cdot dt$

Ova jednačina važi za bilo koji talasni oblik struje. Ne sme da se prekorači ni pri najpovoljnijim uslovima hlađenja

Alternativne oznake I_{TAV}, I_{DAV}

I_{FRMS} *Nazivna efektivna vrednost struje vođenja* $I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2{}_F(t) \cdot dt}$

I_{SM} *Udarna struja u stanju vođenja*

maksimalna vršna vrednost jedne polovine sinusnog talasa udarne struje (pri kratkom spoju) u trajanju od 10ms

KATALOŠKI PARAMETRI ENERGETSKIH DIODA

TOPLOTNI IMPULS DIODE $I^2 \cdot t$

Ova veličina služi pri izboru odgovarajućih ultrabrzih osigurača (tip R) za zaštitu dioda od oštećenja usled prevelikih struja kratkih spojeva

$$(I^2 \cdot t)_{diode} = A_{diode} = \int_0^T i_D^2 \cdot dt$$

$$(I^2 \cdot t)_{diode} \geq (I^2 \cdot t)_{ultrabrzog-osig}$$

$$(I^2 \cdot t)_{diode} = 2(I^2 \cdot t)_{ultrabrzog-osig}$$

KAPACITIVNOSTI U DIODI

Dok se dioda nalazi u stanju vođenja, oko P-N spoja se nalazi nagomilano dodatno naelektrisanje.

Ubrizgani nosioci naelektrisanja se šire u prostor gde je njihova koncentracija manja

$Q_D = I_D \cdot \tau$ Difuziono naelektrisanje

I_D struja kroz P-N spoj

τ srednje vreme života nosilaca naelektrisanja dok se ne rekombinuju

Difuzioni kapacitet $C_D = \frac{dQ_D}{dV_D}$ $C_D = \frac{\tau \cdot I_D}{\eta V_T}$

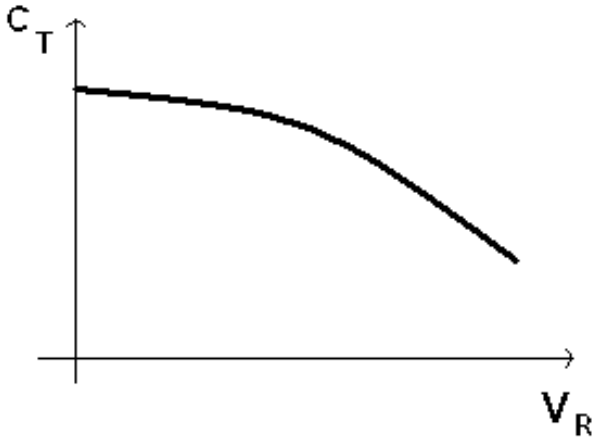
zaključak: *dok dioda (P-N spoj) vodi, u njoj se nalazi nagomilano neko naelektrisanje*

KAPACITIVNOSTI U DIODI

Inverzno polarisan P-N spoj

kapacitivnost prostornog tovara

$$C_T = \frac{C_{TO}}{\sqrt[3]{1+\frac{V_R}{\psi_o}}}$$



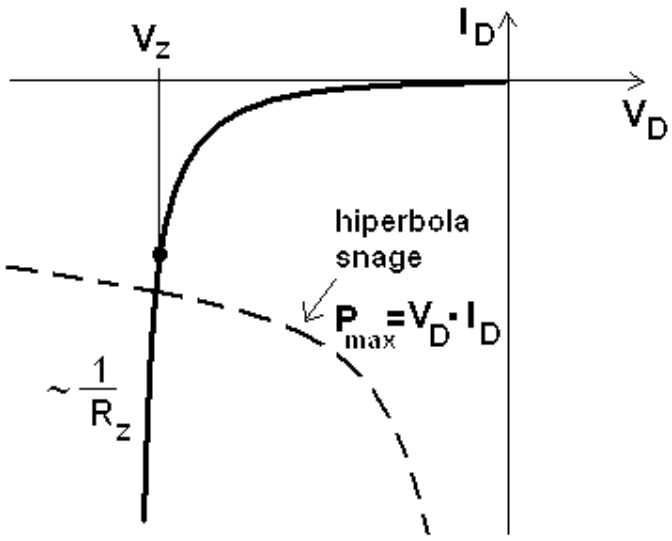
C_{TO} kapacitet pri naponu 0V

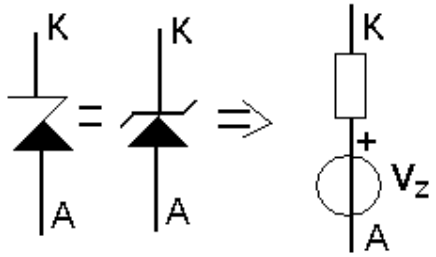
V_R napon inverzne polarizacije

ψ_o ugrađeni napon skokovitog P-N spoja (visina potencijalne barijere)

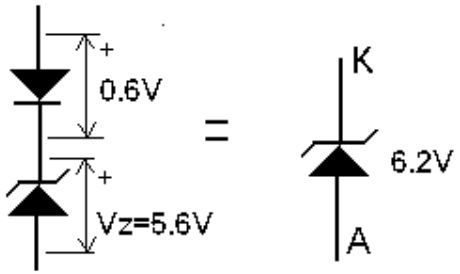
zaključak: *svaki inverzno polarisan P-N spoj poseduje neki kapacitet*

PROBOJNE DIODE – Zener diode





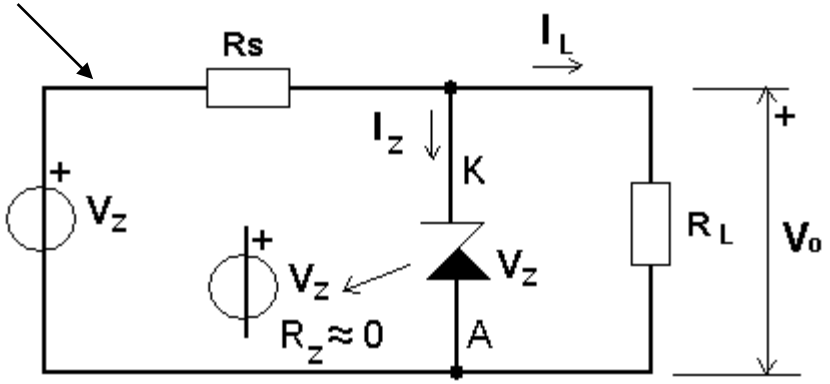
model Zener diode



izvor referentnog napona 6.2V

PROST STABILIZATOR NAPONA

$$I_S = \frac{V_S - V_o}{R_S} = \frac{V_o - V_Z}{R_S}$$



$$I_Z = I_S - I_L$$

$$I_L = \frac{V_o}{R_L}$$

$$I_Z \rangle I_{Z\min}$$

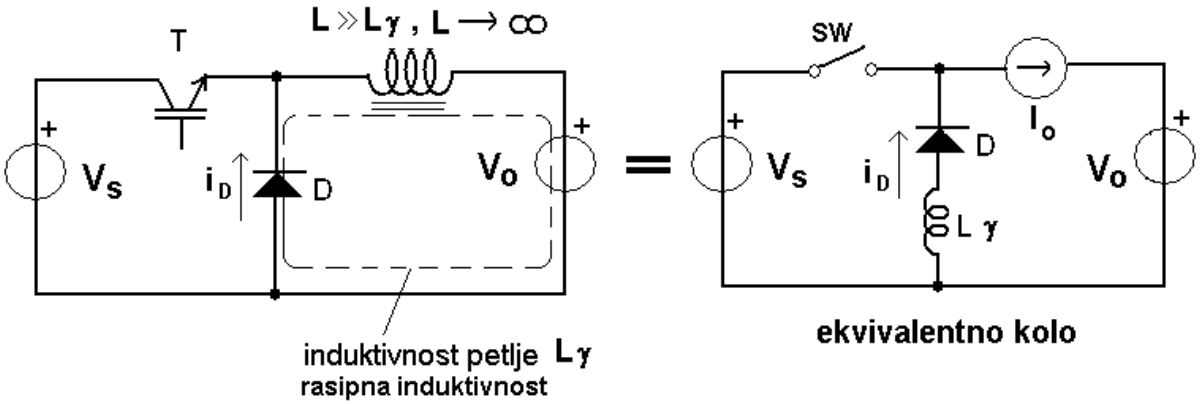
$$I_Z = \frac{V_S - V_Z}{R_S} - \frac{V_Z}{R_L}$$

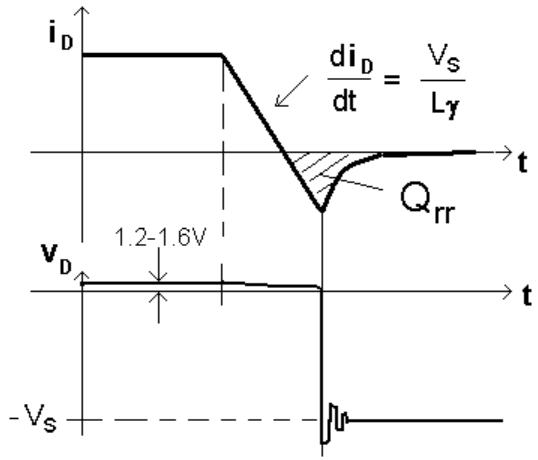
uslov da bi stabilizator napona radio:

$$\frac{V_S - V_Z}{R_S} - I_{Z\min} \rangle \frac{V_Z}{R_L}$$

BRZE DIODE

Ove diode se koriste kao zamajne diode u jednosmernim pretvaračima, kolima za prenaponsku zaštitu i sl. Glavna karakteristika im je da mogu veoma brzo da pređu iz provodnog u neprovodno stanje (kada se inverzno polarišu).





Brza dioda u kolu spuštača napona *Vs>Vo*

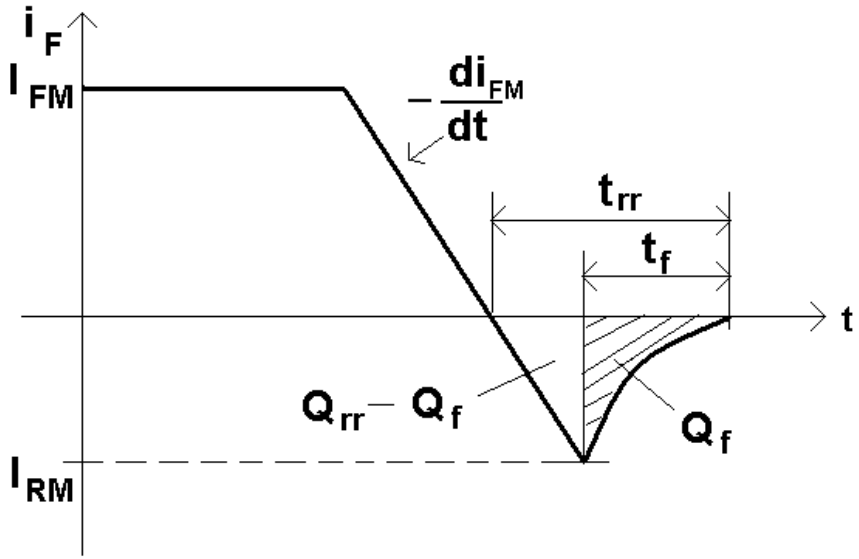
Inverzni oporavak brze diode

Povraćeno naelektrisanje Q_{rr}

Vreme trajanja oporavka diode t_{rr}

$$\frac{di_D}{dt} = \frac{V_S}{L_\gamma}$$

POVRAĆENO NAELEKTRISANJE



vreme oporavka t_{rr}

$$t_{rr} = g(I_{FM}, -\frac{di_F}{dt}, T)$$

$$Q_{rr} = f(I_{FM}, -\frac{di_F}{dt}, T)$$

$$t_{rr} = \frac{I_{RM}}{\left(-\frac{di_F}{dt}\right)} + t_f$$

$$I_{RM} \approx \frac{2Q_{rr}}{t_{rr}}$$

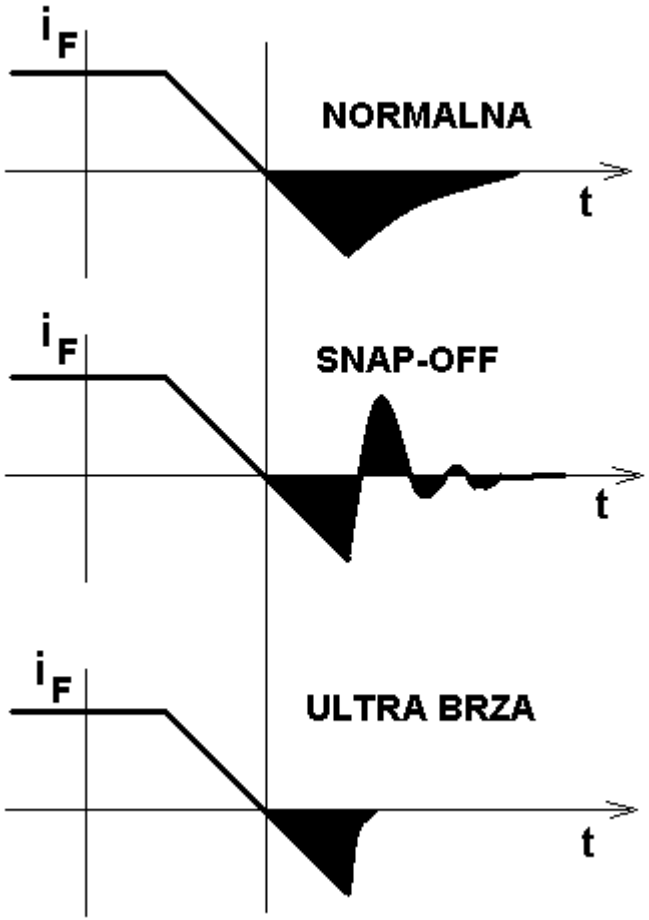
$$Q_f \approx \frac{I_{RM} t_f}{2}$$

$$t_{rr} = \frac{t_f}{2} + \sqrt{\frac{t_f^2}{4} + \frac{2Q_{rr}}{-\frac{di_F}{dt}}}$$

Disipirana energija u diodi u toku jednog gašenja

$$W_1 = Q_f \cdot V_R \approx (0.2....0.4) \cdot V_R \cdot Q_{rr}$$

Tipovi brzih dioda prema talasnim oblicima struje oporavka



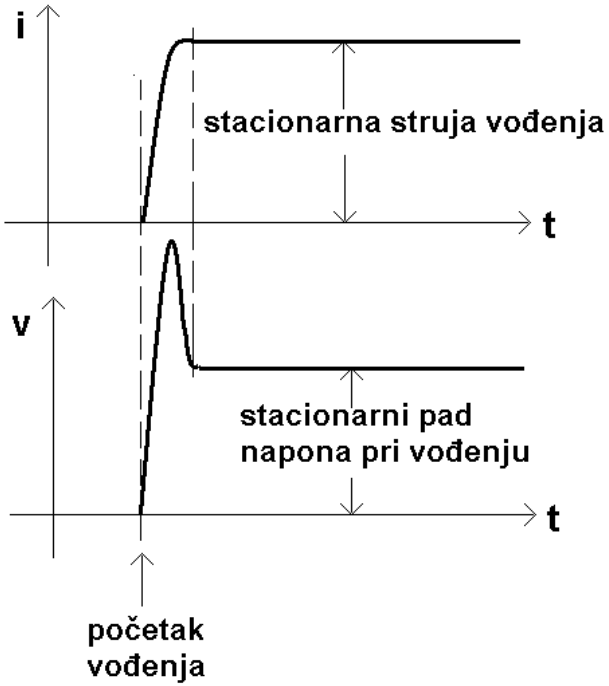
Dioda tipa *snap-off* je veoma brza dioda, ali zbog oscilatornog završetka procesa oporavka. Ova dioda se manje koristi u pretvaračima.

Ultrabrza dioda se preporučuje za korišćenje u visokofrekventnim pretvaračima

Postoje Šotki diode koje umesto P-N spoja imaju P-metal spoj. One u brže od najbržih dioda (pod uslovom da su od Si), imaju male probojne napone (50-100V) i mnogo velike inverzne struje zasićenja (2-10mA).

U poslednje vreme na tehnološkom tržištu poluprovodnika su se pojavile silicijum karbidne (SiC) diode koje rade na višim probojnim naponima.

Brze diode pri prelasku iz stanja blokiranja u stanje vođenja



U neprovodnom stanju centralno područje oko P-N spoja je siromašno nosiocima naelektrisanja.

Kada se naponu izvora promeni polaritet, potrebno je konačno vreme da nosioci naelektrisanja stignu iz visoko-dopiranih područja do centralnog i da ga preplave.

Zaključak:*otpor diode u početnim trenucima znatan, a pad napona na diodi je veći od stacionarnog*

Disipacija snage u brzim diodama

Ukupna snaga disipacije u energetskoj diodi

$$P_{TOT} = P_{FAV} + P_{RAV}$$

P_{FAV}: disipacije snage u provodnom stanju

P_{RAV}: disipacije snage u stanju inverzne polarizacije

PROVODNO STANJE:

Trenutna vrednost snage gubitaka usled vođenja $p_F = (V_{TO} + r_d \cdot i_F) \cdot i_F$

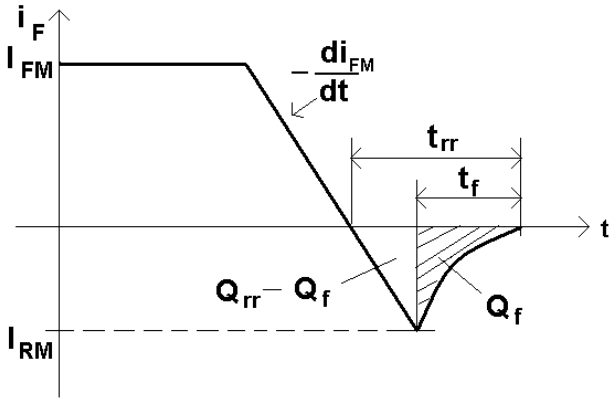
Srednja vrednost snage gubitaka usled vođenja

$$P_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_F(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_{0T} V_{TO} i_F \, dt + r_d \cdot \int_0^T i_F^2 \, dt \right]$$

$$\boxed{P_{FAV} = V_{TO} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot I_{FRMS}^2}$$

INVERZNA POLARIZACIJA

GUBITCI



$$P_{RAV} = f \cdot V_R \cdot (Q_f + I_{RO} \cdot t_R)$$

$$t_R = T - t_p$$

V_R-vršna vrednost inverznog napona pri oporavku diode

Q_f-povraćeno naelektrisanje tokom vremena t_f

I_{RO}-inverzna struja curenja (≈ 0, osim u slučaju Šotki dioda)

$f = 1/T$ - učestanost primenjenog inverznog napona na diodi

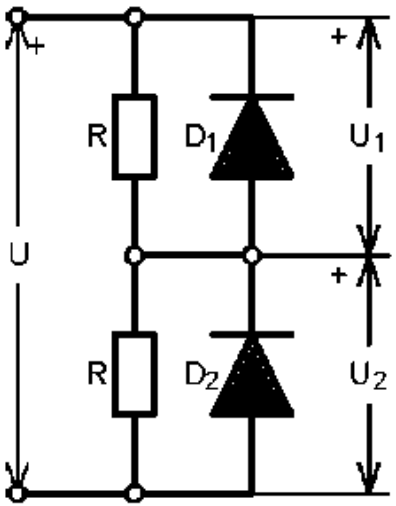
T-perioda rada

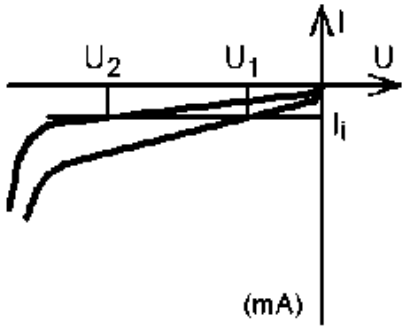
t_R-vreme trajanja primenjenog inverznog napona V_R u toku periode rada

t_p-vreme trajanja impulsa struje diode

$$Q_f = Q_{rr} - \frac{2Q_{rr}^2}{2(-\frac{di_F}{dt})} \approx (0.2....0.4) \cdot Q_{rr}$$

Redno vezivanje dioda



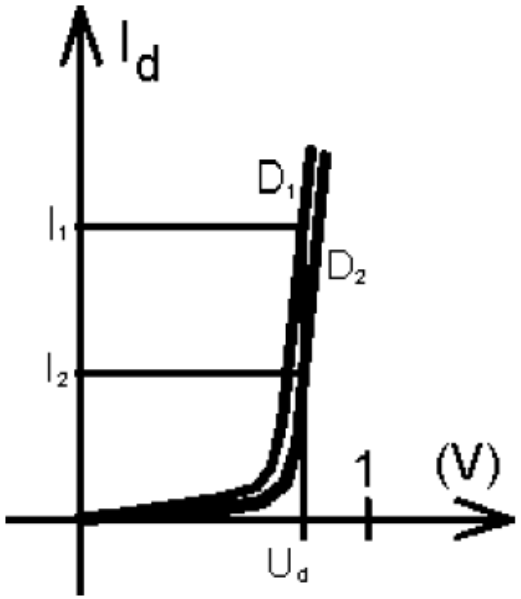


Diode se pri inverznoj polarizaciji ponašaju kao veoma velika otpornost (reda više MΩ). Zbog razlike u inverznih karakteristika dioda, ove otpornosti se mogu znatno razlikovati.

Ovaj problem se rešava paralelnim vezivanjem otpornika dovoljno visoke otpornosti da ne predstavlja problem njihovo zagrevanje, a opet i dovoljno niske, da se pravilno raspodele naponi na diodama

PARALELNO VEZIVANJE DIODA

Paralelnim vezivanjem dioda postiže se rad sa višim direktnim strujama



U paralelnoj vezi imamo zajednički napon na diodama.

Zbog razlike karakteristika raspodela struja može biti veoma različita

Problem bi se mogao rešiti vezivanjem malih otpornosti na red sa diodama, međutim zbog velikih gubitaka na otpornicima ta tehnika se samo delimično primenjuje

Rešenja:

-geometriji spojnih provodnika kojima se vezuju diode

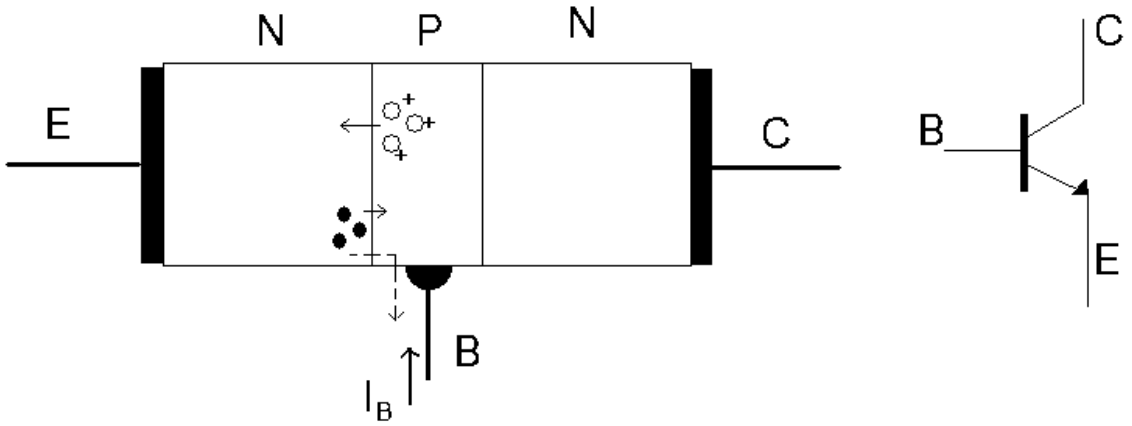
-reaktanse u obliku pogodno oblikovanih spojnih vodova

-feritnih prstenova oko provodnika

-klasiranjem dioda prema direktnom padu napona

Bipolrani tranzistori-BJT

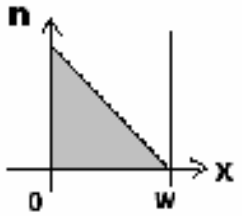
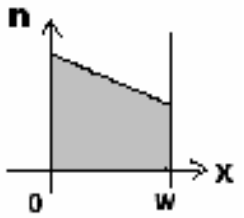
Bipolar Junction Transistor NPN ili PNP



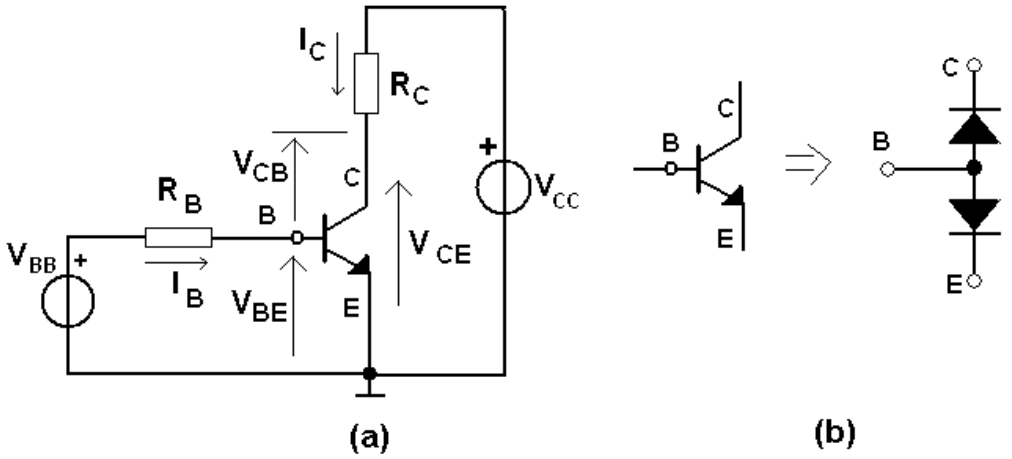
Tehnološki gledano, emitor je vrlo jako dopiran, baza nešto slabije, a kolektor dvojako - slabo u blizini BC spoja, a jače u blizini odvodne elektrode

Rad BJT-a zasniva se na injekciji naelektrisanja iz emitora u bazu

OSNOVNI REŽIMI RADA TRANZISTORA

REŽIM RADA	SPOJ E-B	SPOJ C-B	RASPODELA KONCENTRACIJE ELEKTRONA U SLOJU BAZE
AKTIVAN	DIREKTNO POLARISAN	INVERZNO POLARISAN	 W-širina baze
ZAKOČEN	INVERZNO POLARISAN	INVERZNO POLARISAN	
ZASIĆEN	DIREKTNO POLARISAN	DIREKTNO POLARISAN	
REVERZAN	INVERZNO POLARISAN	DIREKTNO POLARISAN	

BJT u režimu zasićenja



Osnovno kolo sa BJT, (a)-električna šema , (b)-električni simbol i njegov diodni ekvivalent

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - 0.7V}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

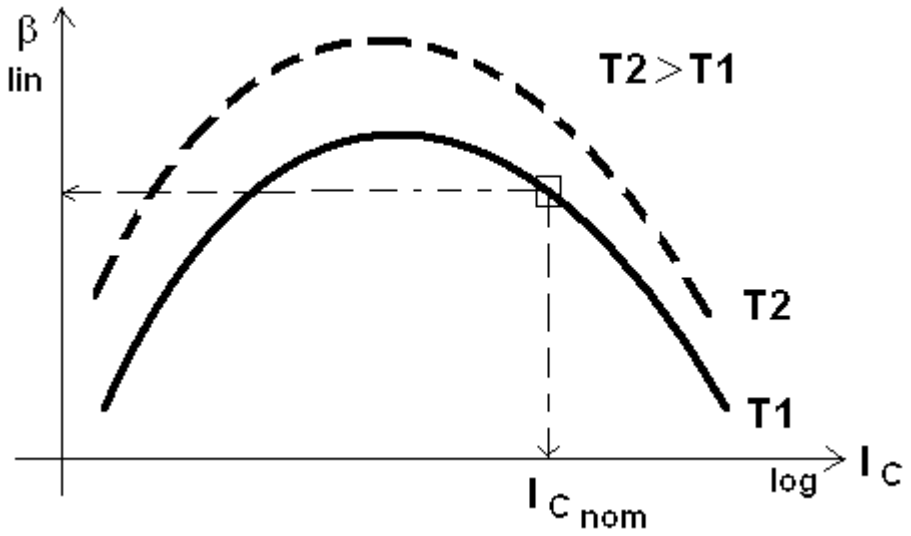
Sa porastom struje baze , raste i struja kolektora , tako da u jednom trenutku napon B-E postaje

$$V_{BE} \geq V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \cdot \beta \cdot I_B$$

U tom slučaju spoj C-B postaje direktno polarisan i tranzistor ulazi u zasićenje

Strujno pojačanje BJT

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

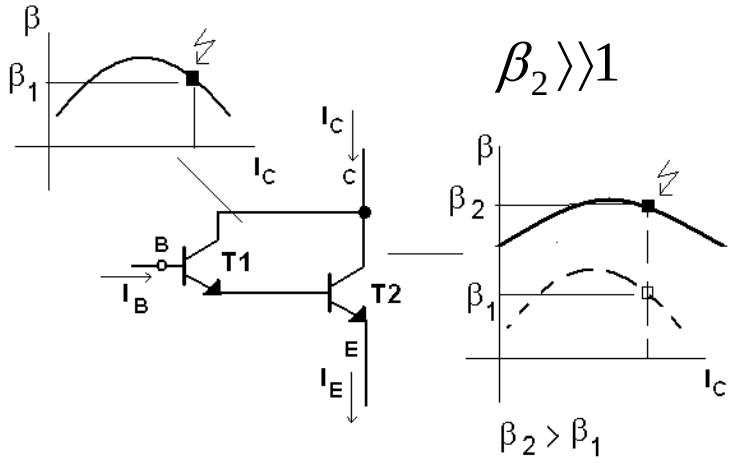


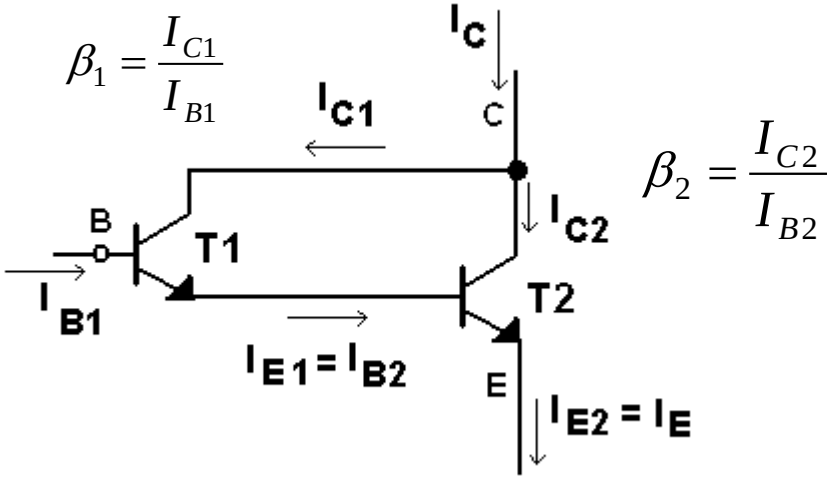
Kako postići veće strujno pojačanje pri većim strujama?

Jedan od načina je korišćenje tranzistora u tzv. Dralington spoju

Darlington spoj BJT

$\beta_1 \rangle\rangle 1$





$\beta_1 = \frac{I_{C1}}{I_{B1}}$ $\beta_2 = \frac{I_{C2}}{I_{B2}}$

$$I_{E1} = \beta_1 I_{B1} + I_{B1} = (\beta_1 + 1) \cdot I_{B1}$$

$$I_{E1} = I_{C1} + I_{B1}$$

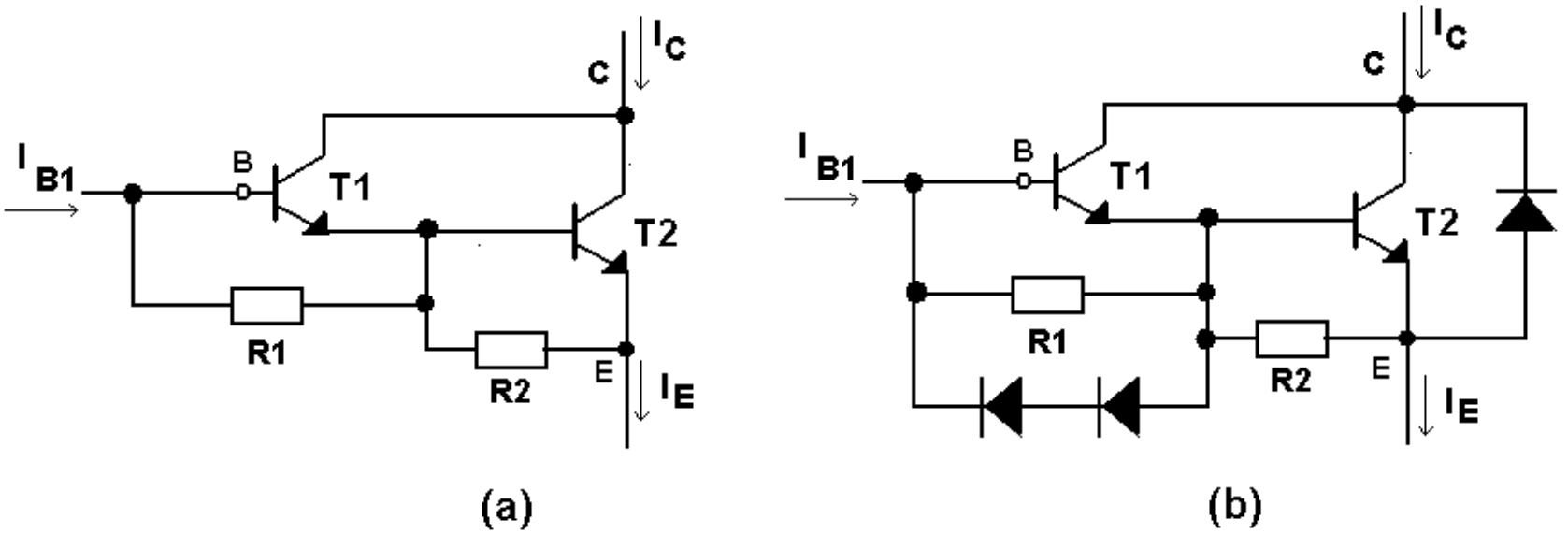
$$I_C = I_{C1} + I_{C2}$$

$$I_{E1} = I_{B2} \qquad I_{C2} = \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

$$I_C = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

$$\beta_D = \frac{I_C}{I_{B1}} \approx \beta_1 \beta_2$$

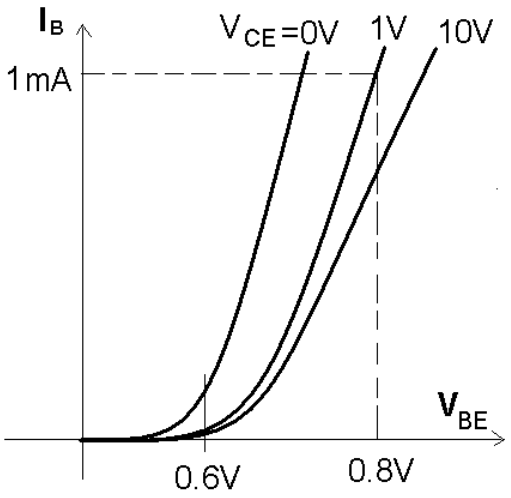
Praktična realizacija Darlington sprege



(a)-otpori za zatvaranje struja curenja, (b)-ubrzavanje gašenja.

Statičke karakteristike BJT

Ulazna statička karakteristika BJT



Ulazno kolo tranzistora (spoj B-E) je poluprovodnička dioda, pa su i statičke krive

$$I_B = I_B(V_{BE})$$

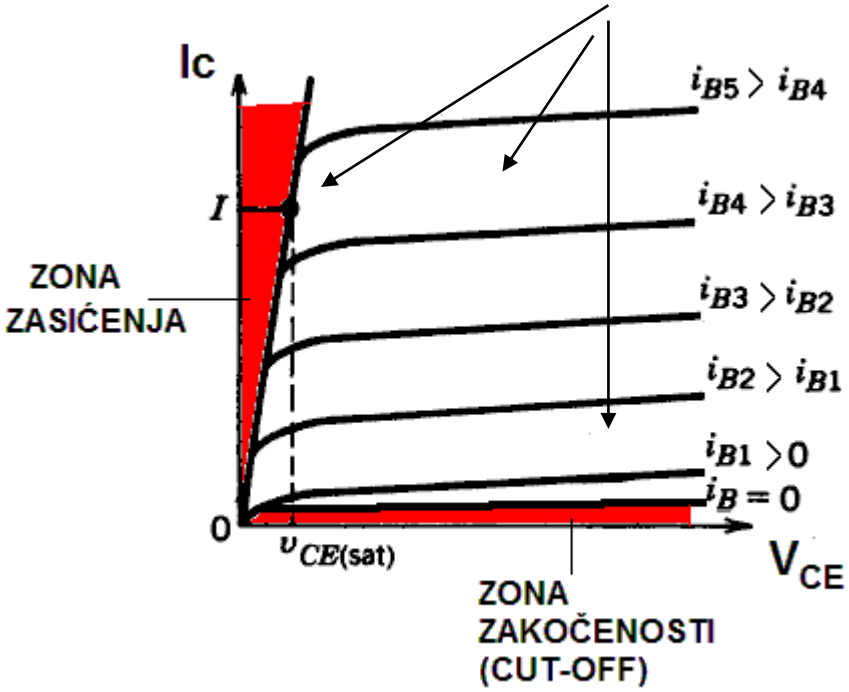
slične volt-amperskim krivama diode, ali je važan i uticaj parametra V_{CE}

$|V_{BE}| \rangle |V_{CE}|$ spoj BC je propusno je polarisan, što znači da i kolektor injektira naelektrisanje u bazu, te time dobijamo velike struje baze

$|V_{BE}| \langle |V_{CE}|$ spoj B-C polarisan je nepropusno, te $I_B = I_B(V_{BE})$ slabo zavisi od V_{CE}

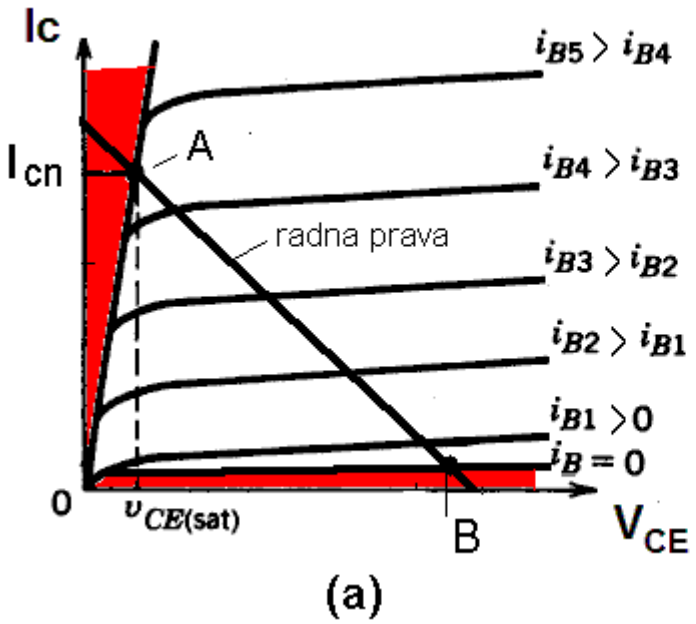
Izlazne karakteristike BJT

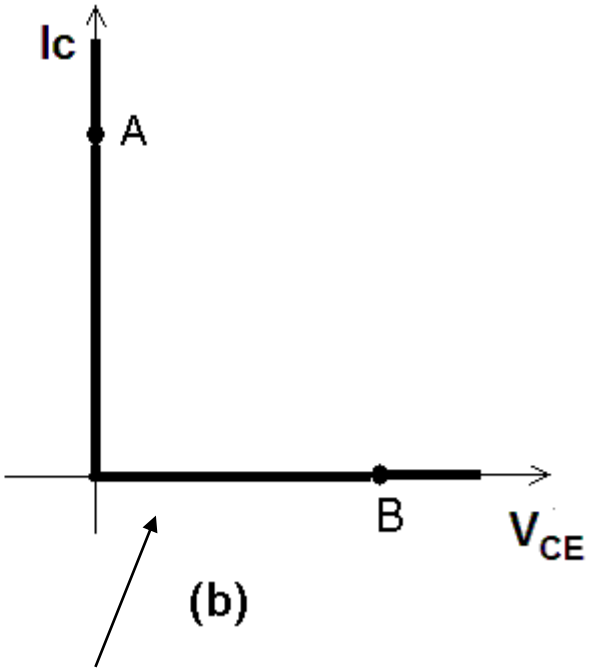
zona aktivnog režima rada.



Izlazna statička karakteristika BJT

PREKIDAČKA KARAKTERISTIKA BJT



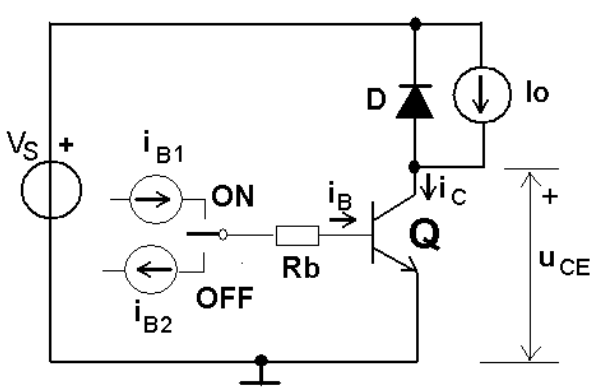


(a)-realna, (b)-idealna

$$I_C \rangle 0 \Rightarrow V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} \rangle 0 \Rightarrow I_C = 0$$

Analiza prekidačkog režima BJT (UKLJUČENJE)



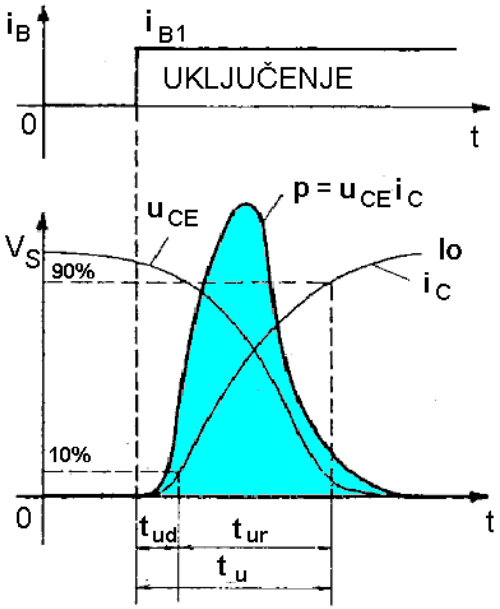
U STANJU VOĐENJA

$u_{CE} = u_{CE(SAT)}$

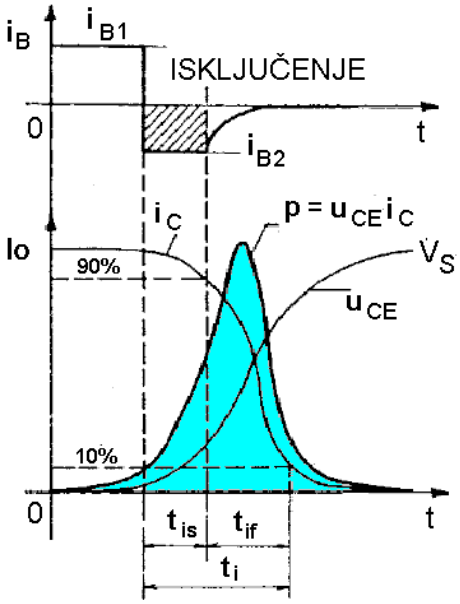
$i_C = Io$

$p = u_{CE} i_C = u_{CE(SAT)} \cdot Io$

(a)



(b)



(c)

(a)-prekidačko kolo, (b)-uključenje, (c)-isključenje

t_{ud} vreme kašnjenja (*delay time*)

U toku ovog vremena se puni kapacitet spoja B-E, pa je ovo vreme određeno strujom punjenja i veličinom datog kapaciteta C_{BE}

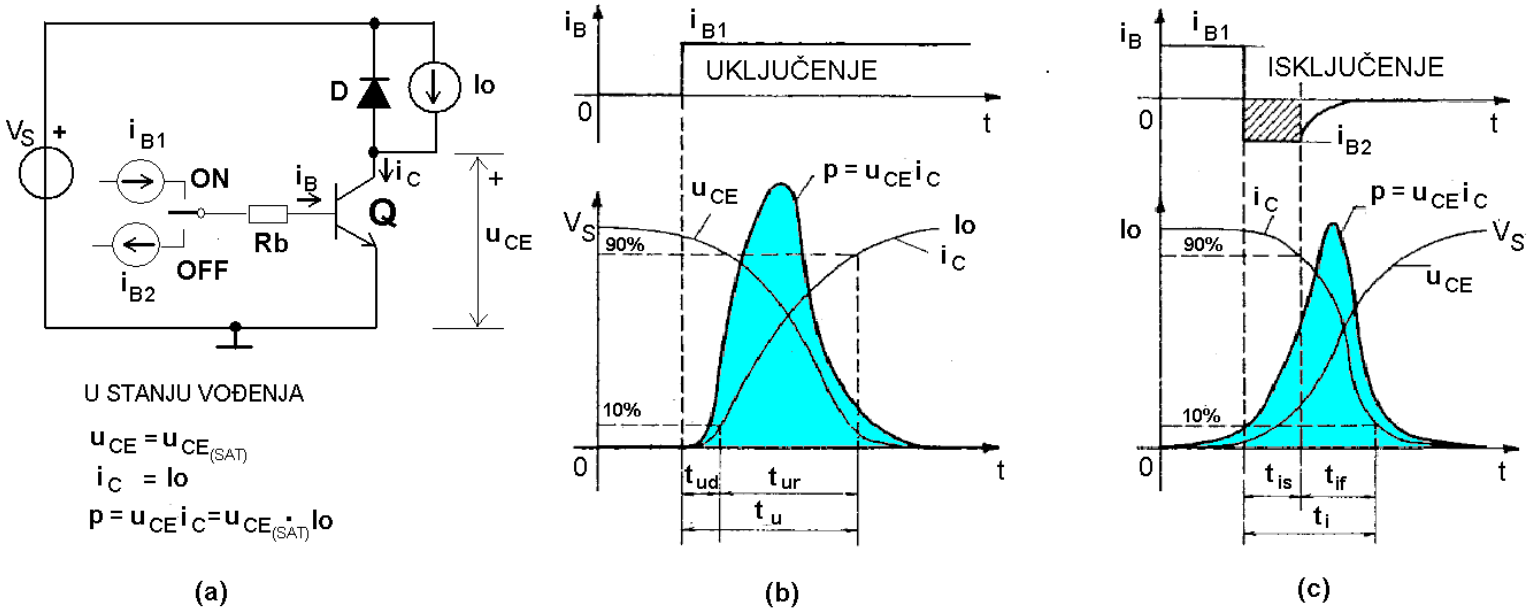
t_{ur} vreme porasta struje pri uključenju (*rising time*)

Ovo vreme je upravo potrebno da manjinski nosioci na putu kroz bazu stignu do kolektorskog spoja

U toku ovog vremena dakle dolazi do akumulacije manjinskih nosilaca u bazi i do porasta njihovog gradijenta koncentracije, pa tako i raste struja kolektora do svoje ustaljene vrednosti

t_u vreme uključenja $= t_{ud} + t_{ur}$

Analiza prekidačkog režima BJT (ISKLJUČENJE)



(a)-prekidačko kolo, (b)-uključenje, (c)-isključenje

t_{is} -vreme nagomilavanja (*storage time*)

U ovom intervalu dolazi do evakuacije nagomilanih akumulisanih naelektrisanja. Obično se u ovom intervalu vrši prvo rasterećenje baze odvođenjem viška nosilaca naelektrisanja.

t_{if} -vreme opadanja (*fall time*)

Nakon evakuacije viška nosilaca naelektrisanja se menja gradijent manjinskih nosilaca, odnosno sa njegovim padom opada i struja kolektora. Drugim rečima bazno područje se skuplja do svojih metalurških granica

t_i vreme isključenja = t_{is} + t_{if}

U režimu vođenja (*on-state*)

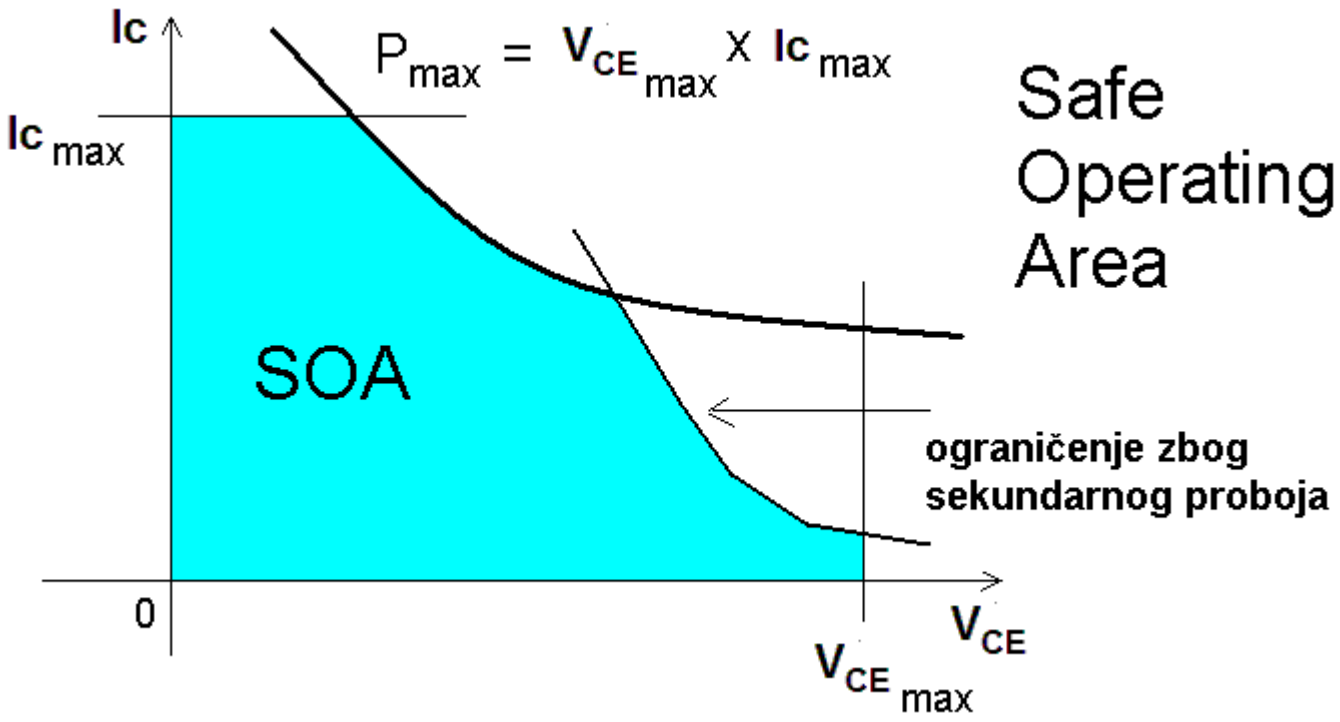
napon na spoju C-E je jednak $u_{CE(SAT)}$

struja kolektora $I_C = I_0$

Snaga gubitaka u ovom slučaju je jednaka

$$P_{ON} = u_{CE(SAT)} \cdot I_o$$

OBLAST SIGURNOG (BEZBEDNOG RADA TRANZISTORA)

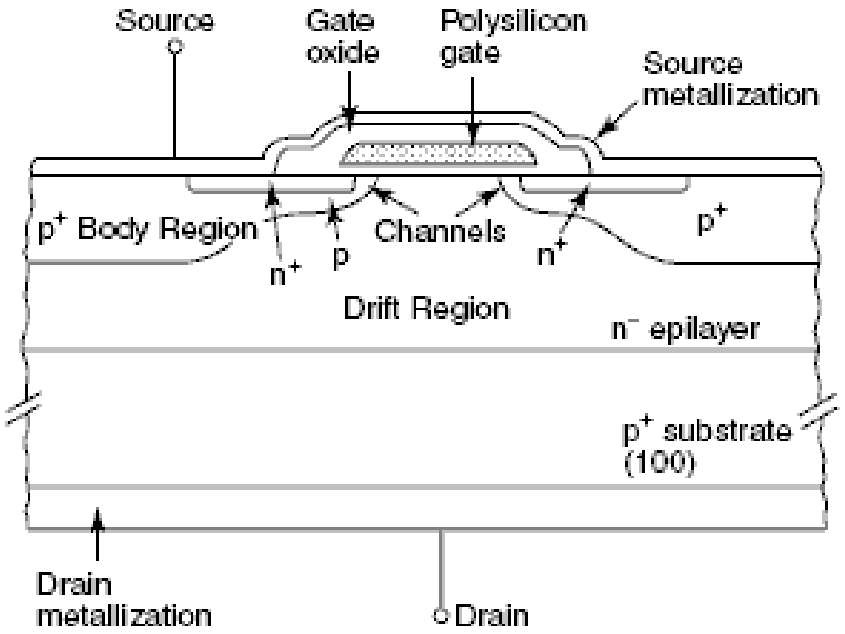


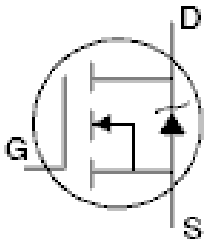
Oblast dozvoljenog rada BJT odnosno SOA (*Safe Operating Area*)

Ograničenja maksimalne snage disipacije

Ograničenje zbog sekundarnog proboja
(kada dolazi do lokalnog fokusiranja struje i uništenja kolektorskog spoja)

MOSFET- tranzistori

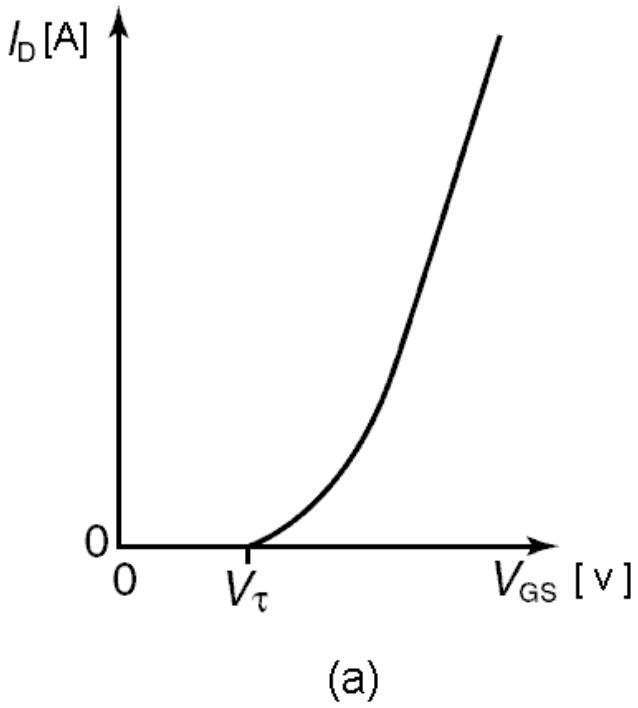


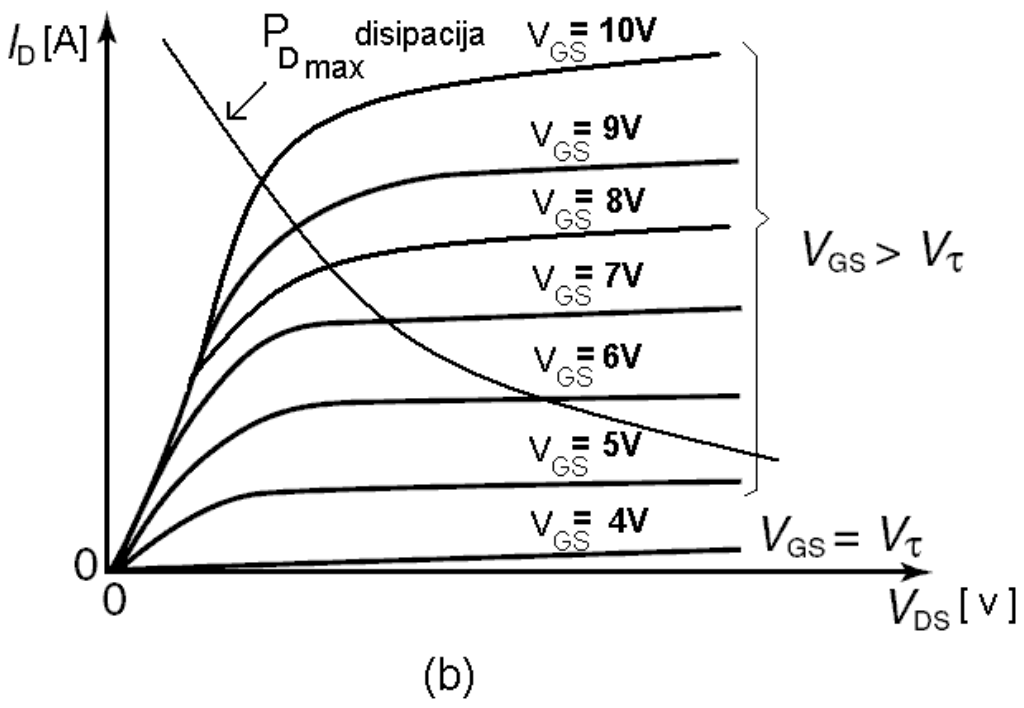


SIMBOL

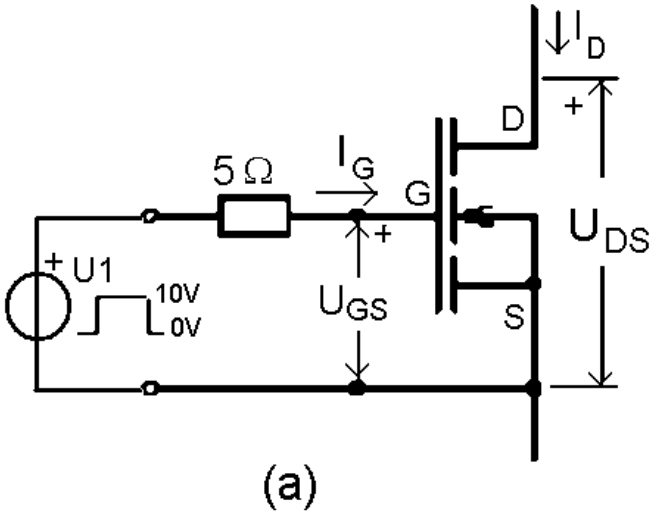
STRUKTURA N-KANALNOG MOSFET-a

KARAKTERISTIKE MOSFET-a

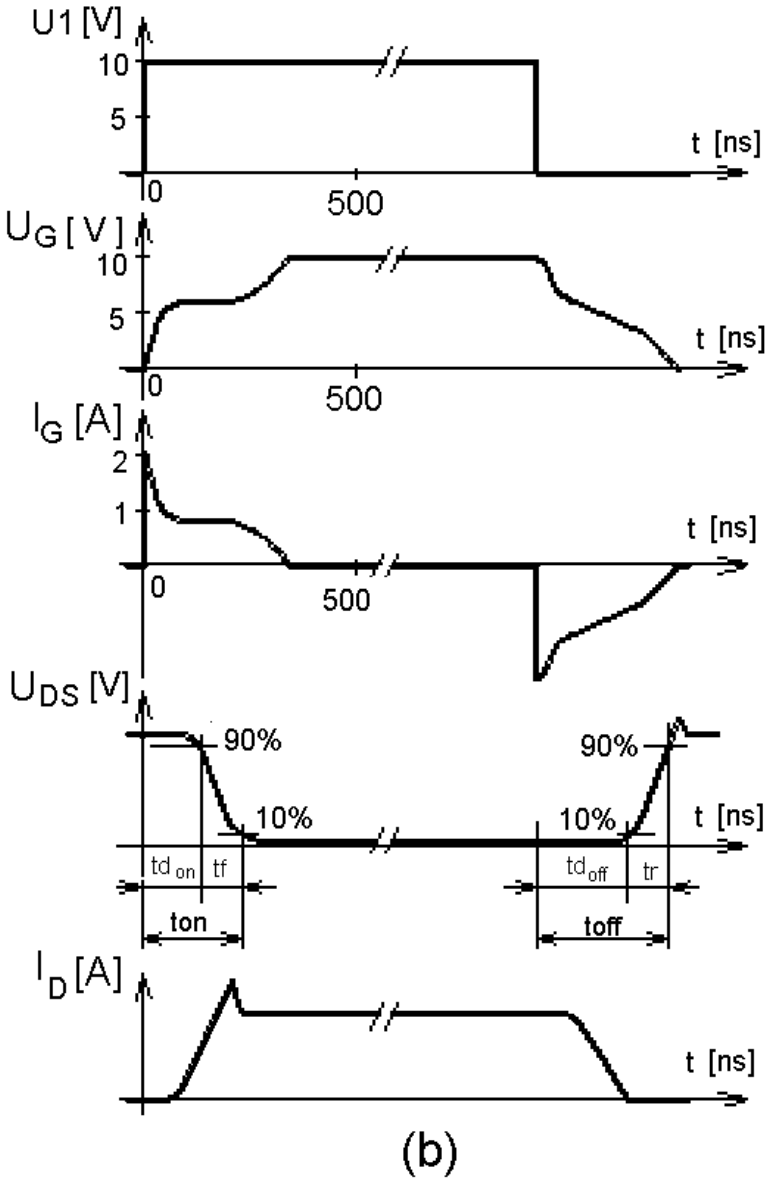




(a)-ulazna karakteristika, *b)-izlazna karakteristika*



(a)

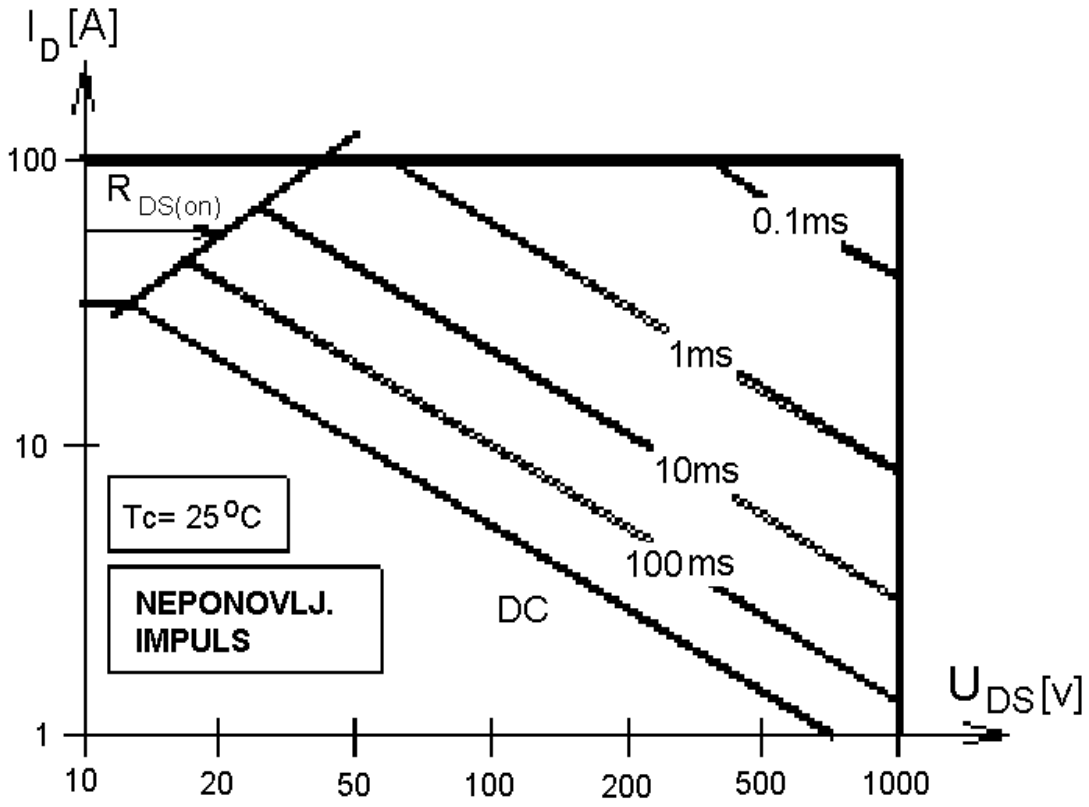


(b)

Osnovno prekidačko kolo sa MOSFET-ima

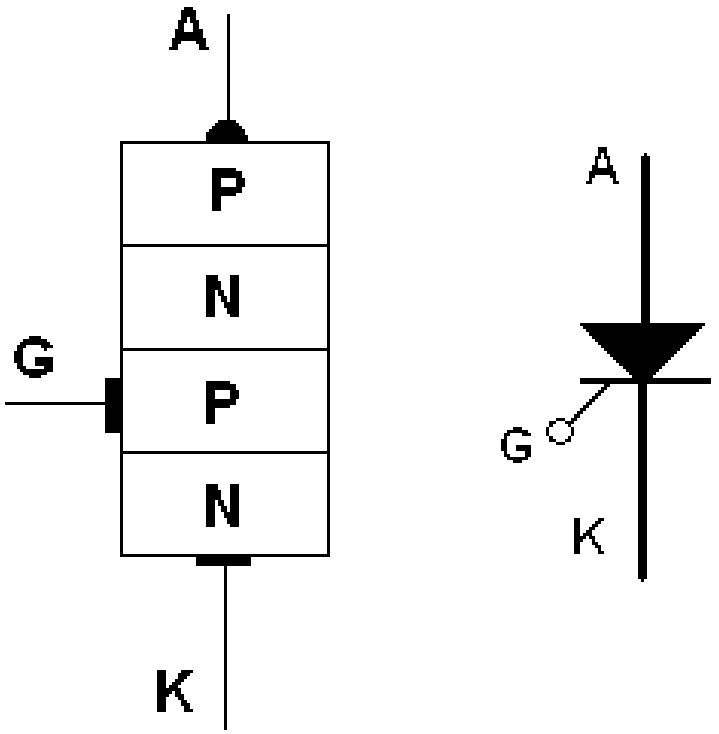
talasni oblici pri uključenju i isključenju

Oblast bezbedbog rada jednog tipičnog energetskog MOSFET-a



TIRISTOR– SCR (Silicon Controlled Recttifier)

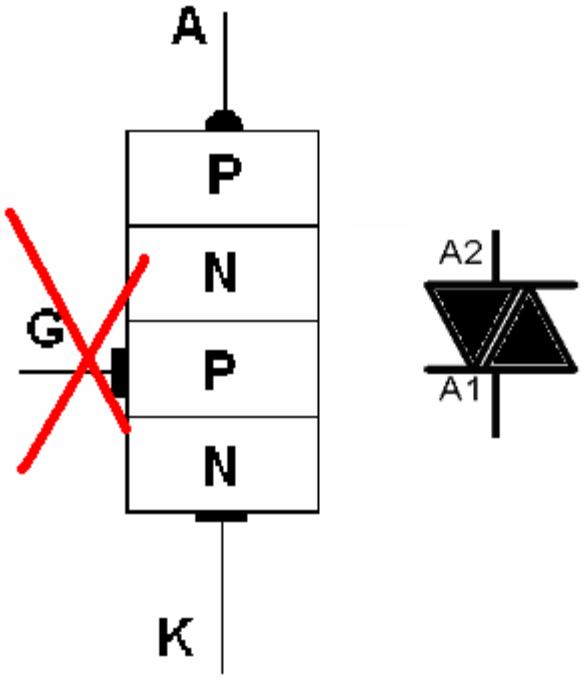
Tiristor je četvoroslojna poluprovodnička upravljiva komponenta sa izvedene tri elektrode : pored anode (A) i katode (K) postoji i upravljačka elektroda - gejt (G).



Osnovu predstavlja četvoroslojna P-N-P-N struktura

Pojava tiristora, krajem pedesetih godina (1956. Belove laboratorije), omogućila je izradu regulisanih ispravljača i drugih vrsta pretvarača, tako da su veoma brzo potisnuli do tada korišćene prekidače - *transduktore*

DIAC- DIode Alternating Current

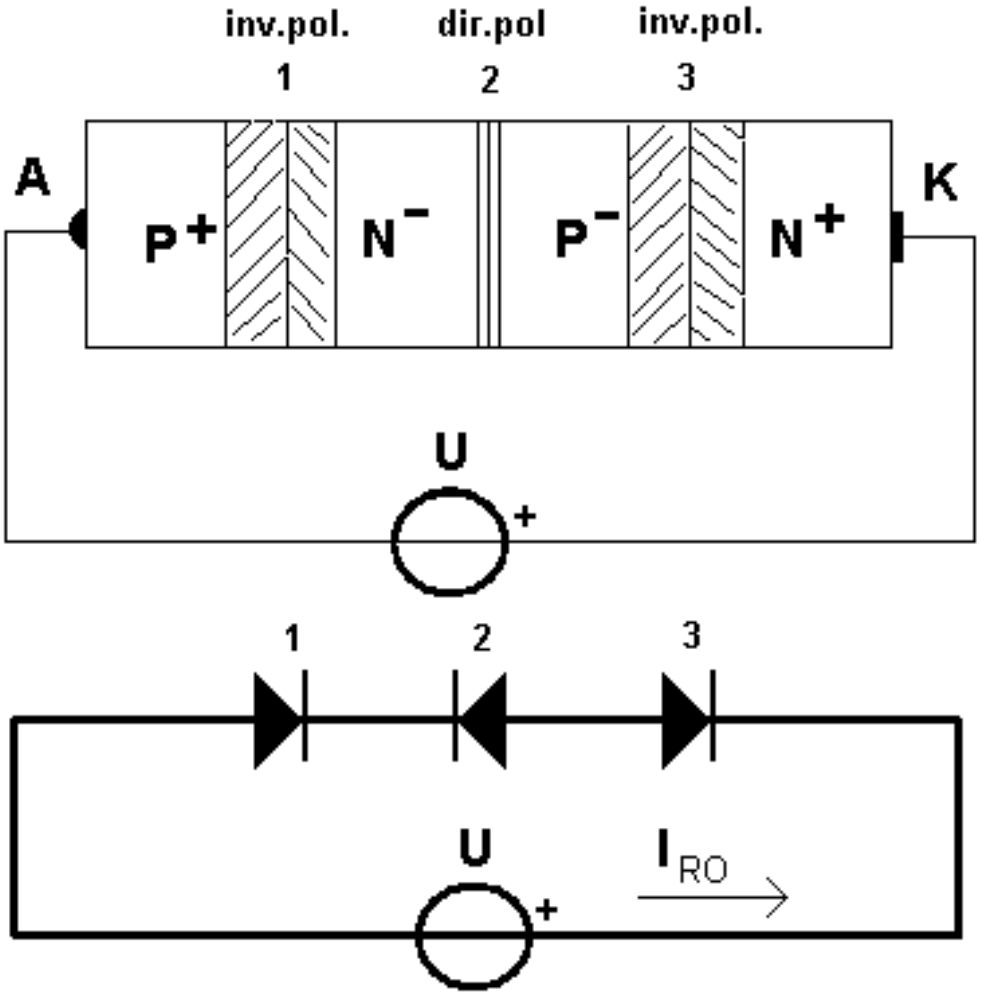


Dijak je petoslojna P-N-P-N poluprovodnička komponenta sa izvedene dve elektrode (A1 i A2).

Naponsko strujna karakteristika mu je takva da praktično ne provodi struju do probojnog napona (oko 30 V).

Probojni napon je približno jednak za oba polaritetanapona.

INVERZNO POLARISANA P-N-P-N STRUKTURA



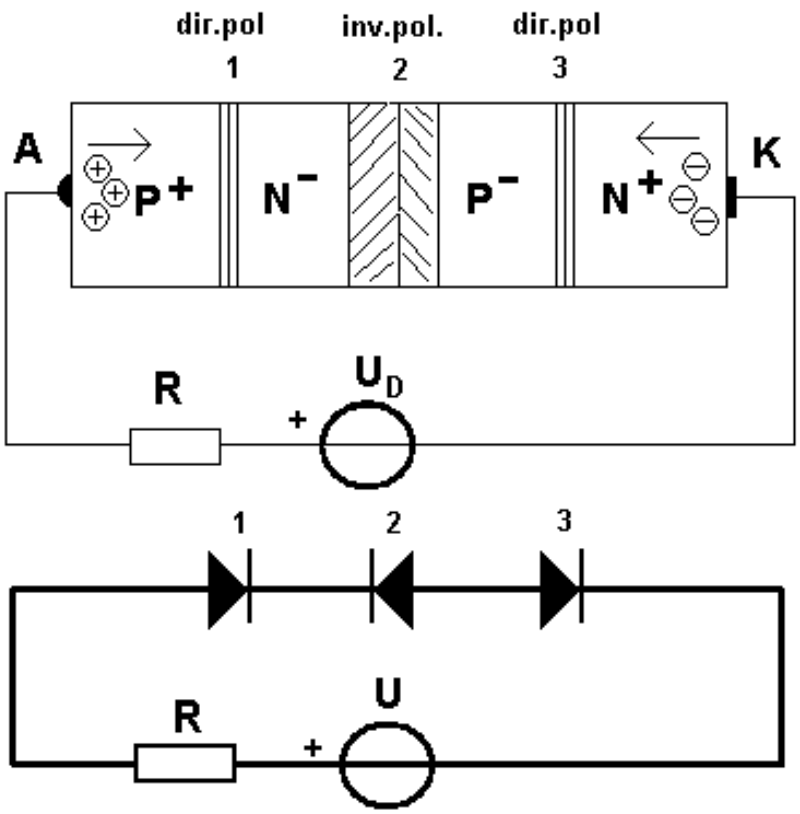
$$U_{AK} < 0$$

kroz strukturu teče veoma mala inverzna struja

$$I_{RO} \approx 0.$$

unutrašnji P-N spoj 2 je direktno polarisan, ali u na njemu nema nosioca naelektrisanja.

DIREKTNO POLARISANA P-N-P-N STRUKTURA



Direktno polarisani tiristor može da se nalazi u dva stabilna stanja: **provodnom i neprovodnom**

Ako napon U_D poraste do vrednosti probojnog napona u direktnom smeru

$$U_{D(BR)}$$

dolazi do lavinske multipilkacije parova elektron-šupljina u ispražnjenoj zoni oko centralnog P-N spoja.

Tiristor se prevodi u provodno stanje tako što se:

-direktno polariše
-dovede impuls struje na gejtu
-dok traje impuls struje na gejtu, struja tiristora mora da postane veća od struje hvatanja (*latching current*) → I_L

Tiristor ostaje u provodnom stanju sve dok je jegov struja veća od struje držanja (*holding current*) → I_H

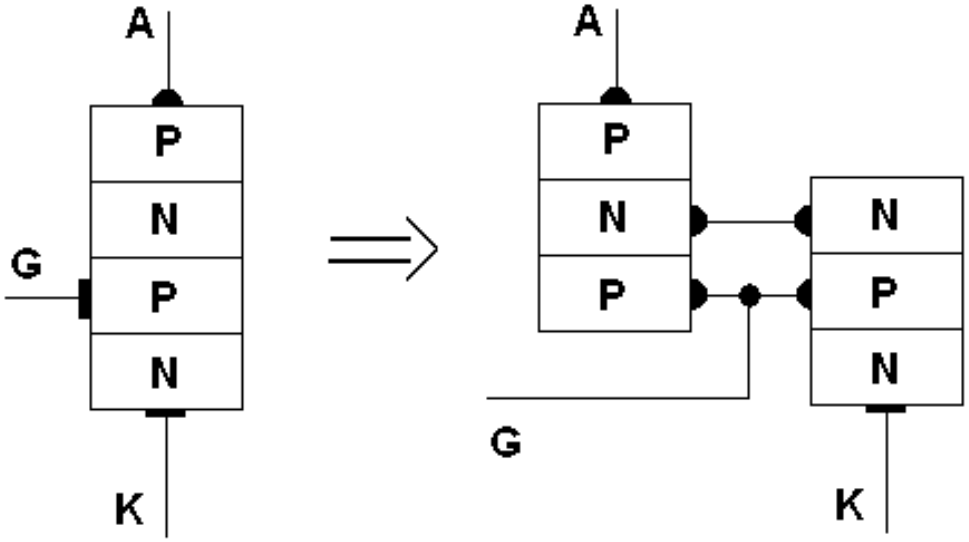
Dok tiristor vodi, oko centralnog P-N spoja postoji nagomilano neko naelektrisanje koji je jednako:

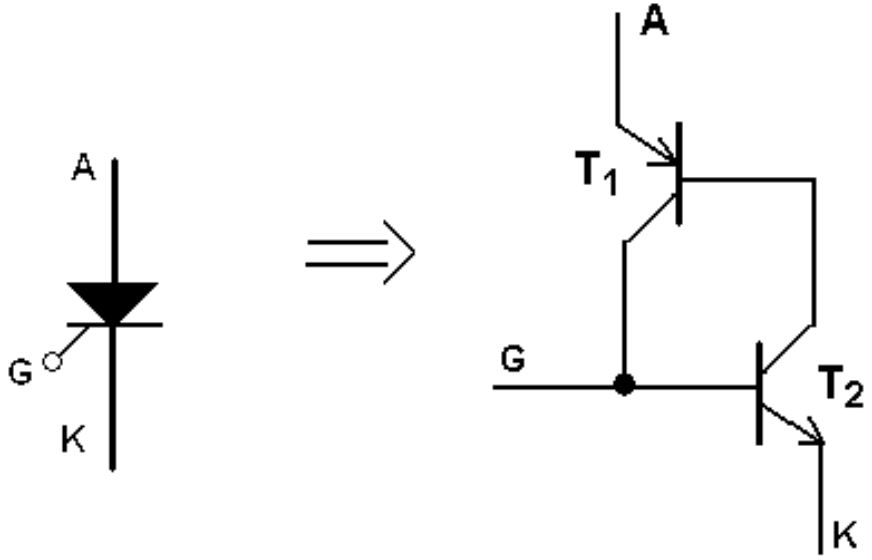
$$Q = Q_p + Q_n$$

tiristor može prevesti u provodno stanje i osvetljavanjem centralnog P-N,

Pravilan način prevođenja tiristora u provodno stanje je ubrizgavanjem struje u gejt

Tranzistorska analogija tiristora





$$\alpha = I_C / I_E$$

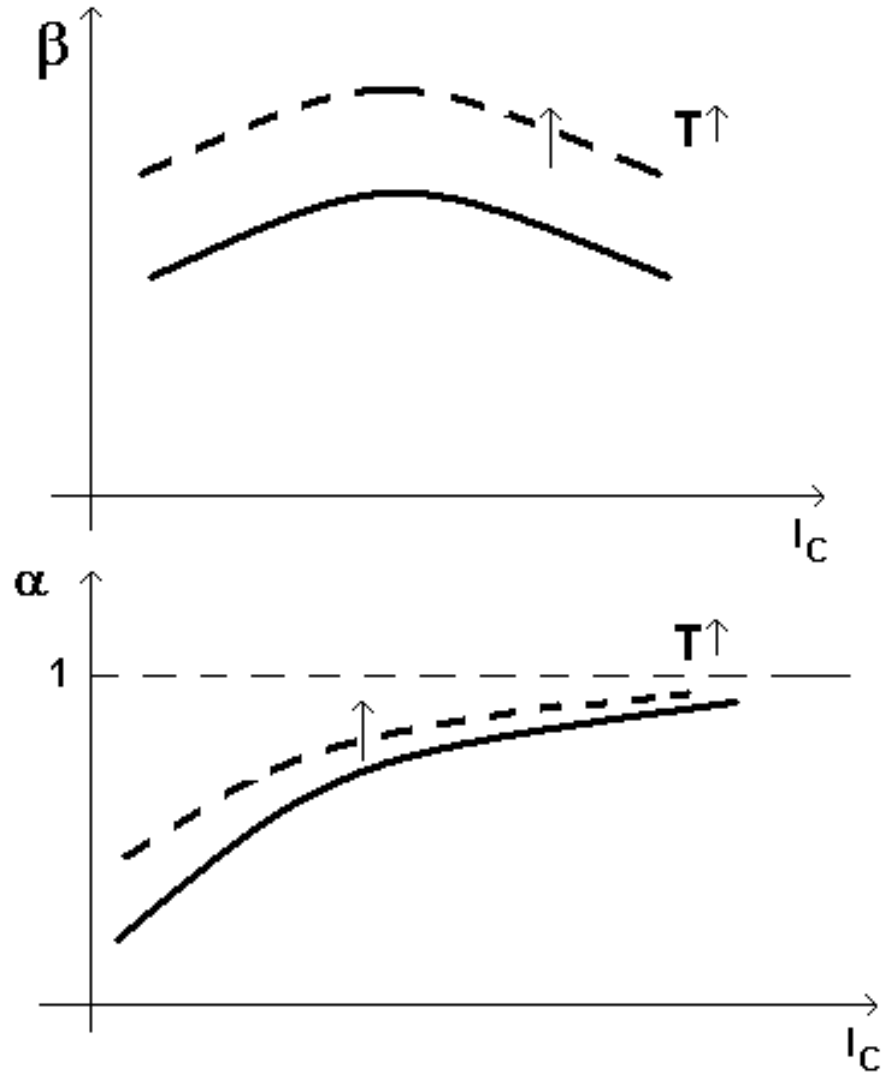
$$\beta = I_C / I_B$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{I_E}{I_C} = 1 + \frac{1}{\beta}$$

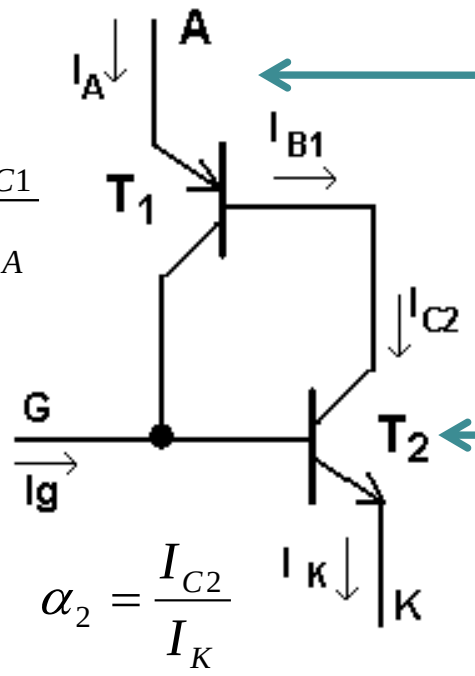
$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

Zavsinost strujnih pojačanja β *i* α *od temperature i struje kolektora*



$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

Tranzistorska analiza tiristora



$$\alpha_1 = \frac{I_{C1}}{I_A}$$

$$\alpha_2 = \frac{I_{C2}}{I_K}$$

$$I_A = I_{C1} + I_{B1} + I_{CBO1}$$

$$I_A = \alpha_1 I_A + I_{B1} + I_{CBO1}$$

$$I_A(1-\alpha_1) - I_{CBO1} = I_{B1} = I_{C2}$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}$$

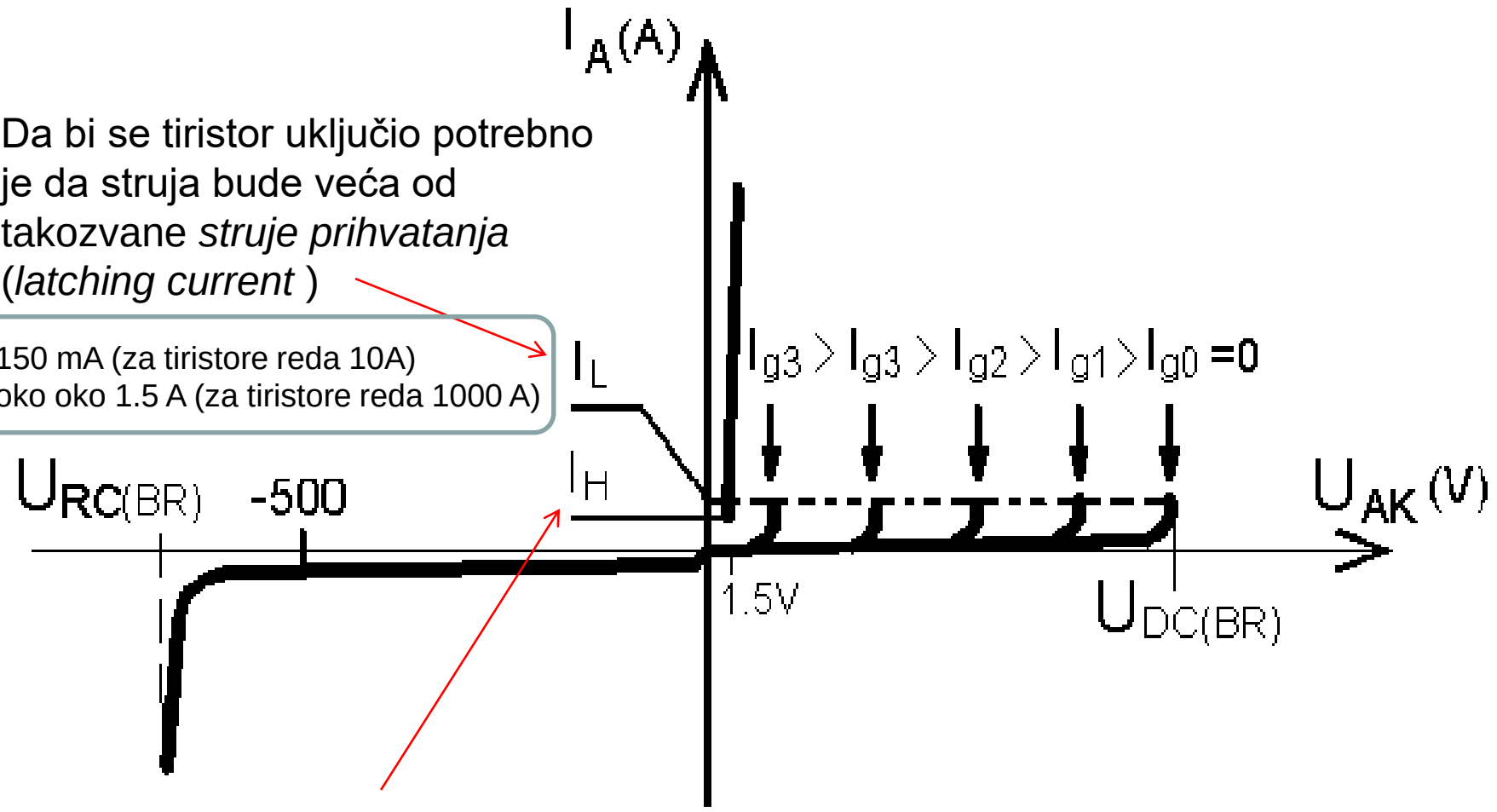
$$I_A(1-\alpha_1) - I_{CBO1} = I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2}$$

$$I_K = I_A + I_G$$

$$I_A(1-\alpha_1) = \alpha_2 I_A + \alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}$$

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO}}{1-\alpha_1-\alpha_2}$$

Volt-Amperska karakteristika tiristora



Da bi se tiristor uključio potrebno je da struja bude veća od takozvane *struje prihvatanja* (*latching current*)

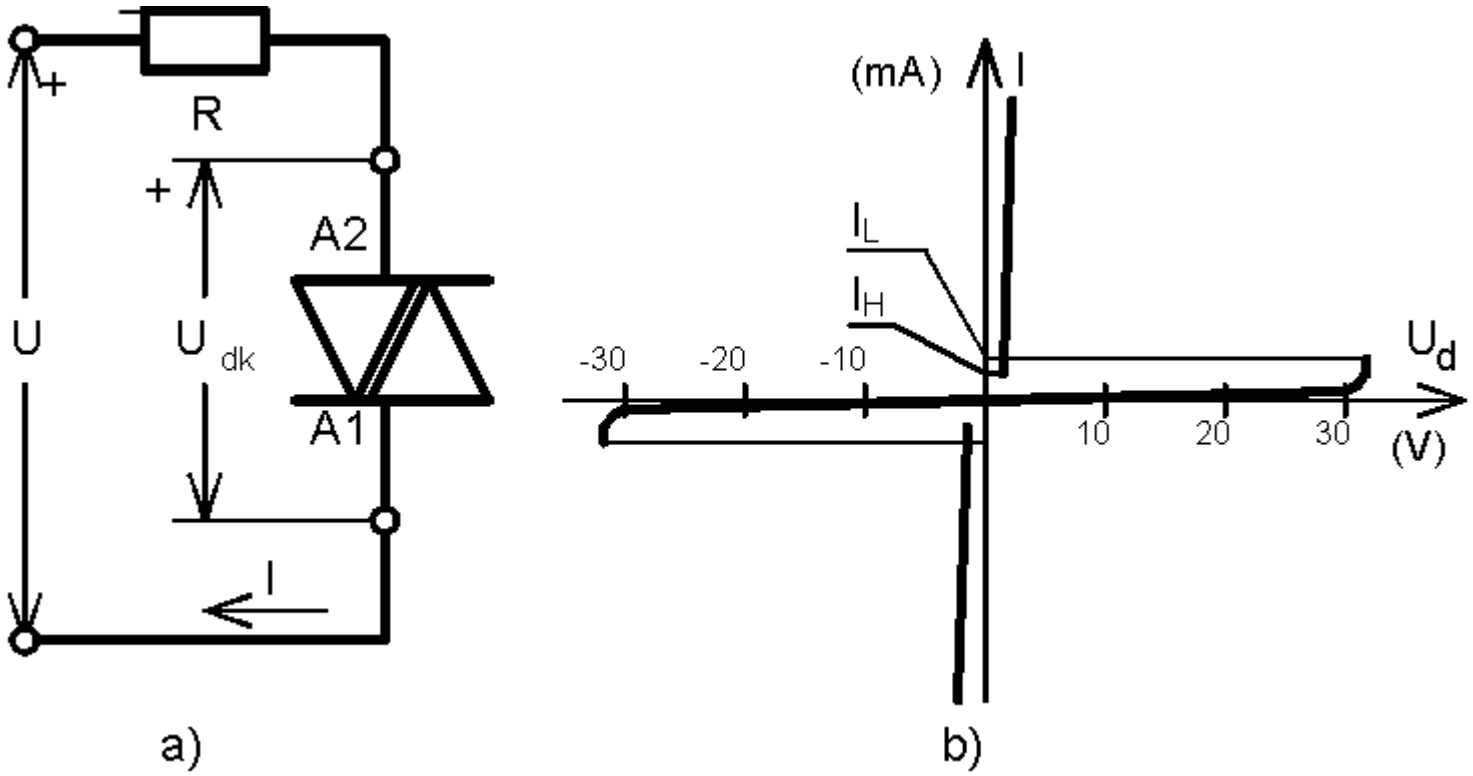
150 mA (za tiristore reda 10A)
oko oko 1.5 A (za tiristore reda 1000 A)

Pri smanjenju struje, u jednom trenutku tiristor ponovo postaje neprovodan. Ova minimalna struja naziva se i *struja držanja* (*holding current*)

80 mA (za tiristore reda 10 A) do oko oko 0.5 A (za tiristore reda 1000 A)

Volt-Amperska karakteristika DIAC-a

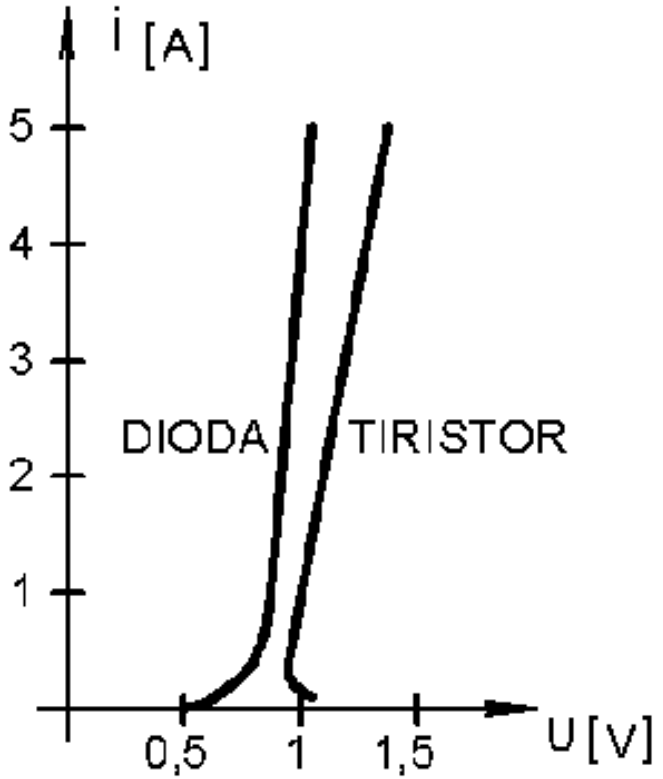
Probojni napon je približno jednak za oba polariteta napona.
Prestanak vođenja struje nastaje kad ona padne ispod struje držanja



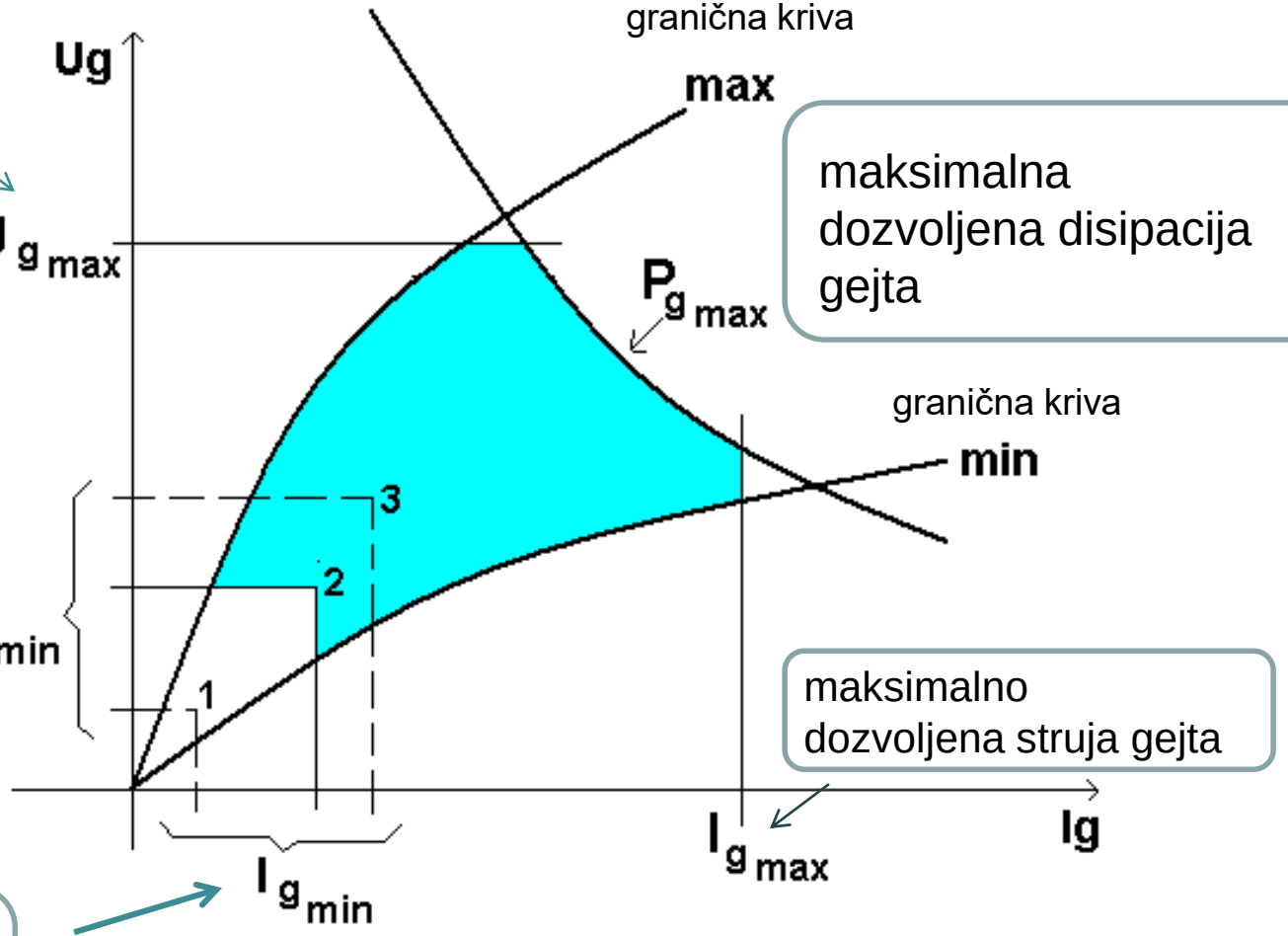
(a)-strujno kolo, (b)-strujno naponska karakteristika

Kada tiristor pređe u stanje vođenja, struja tiristora praktično zavisi od spoljnjeg kola (opterećenja).

U tom slučaju njegova volt-amperska karakteristika se može približno predstaviti pravom linijom (slično kao kod energetske diode ili DIAC-a).



Volt-Amperska karakteristika gejta



maksimalni dozvoljeni napon gejta

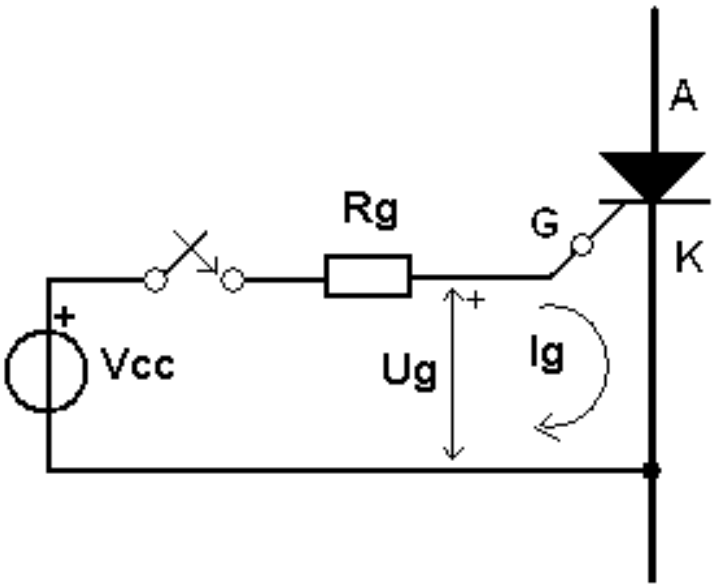
maksimalna dozvoljena disipacija gejta

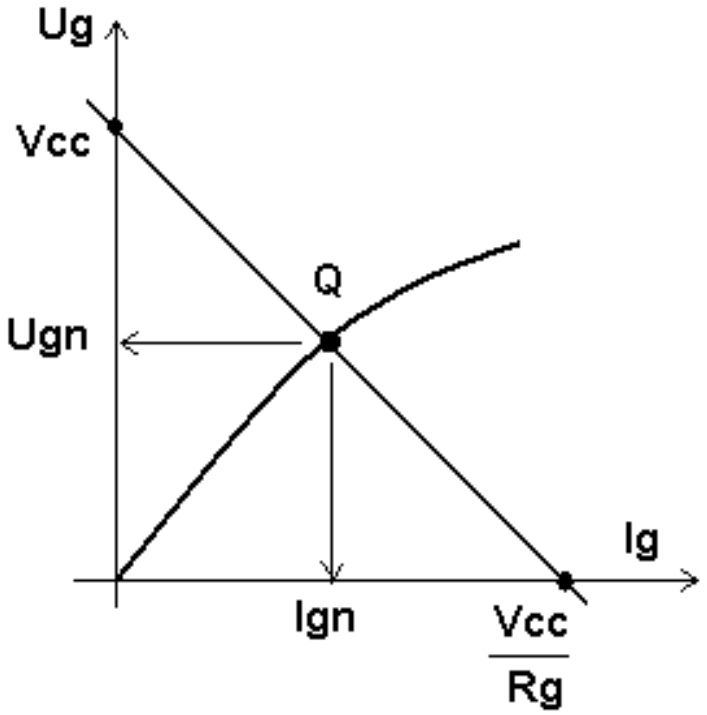
minimalni napon gejta pri kome se tiristor sigurno prevodi u provodno stanje

maksimalno dozvoljena struja gejta

minimalna struja gejta pri kojoj se tiristor prevodi u provodno stanje

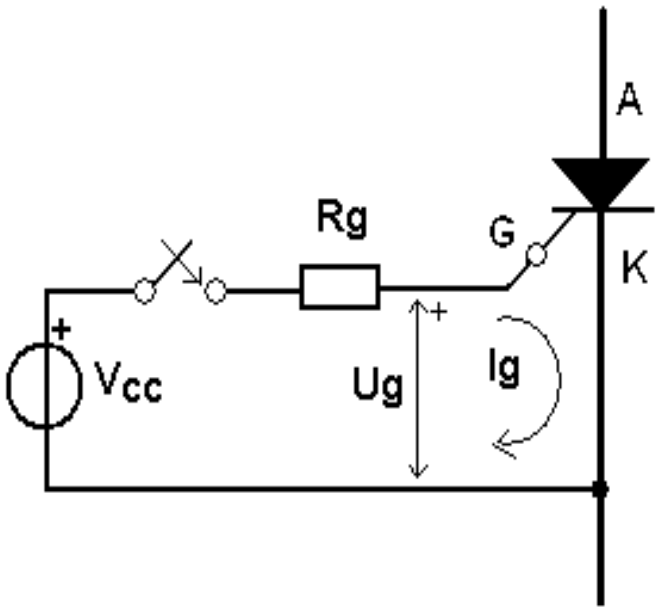
Koncept radne prave primenjen na kolo gejta tiristora

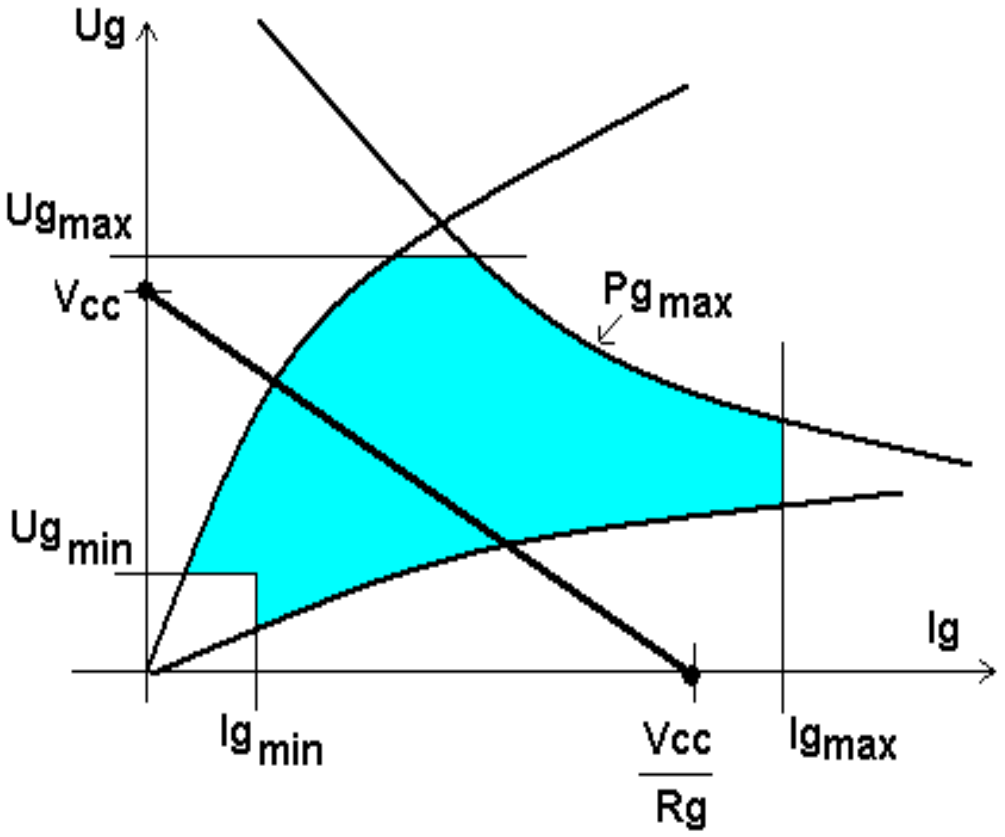




$$I_g = \frac{V_{CC} - V_g}{R_g}$$

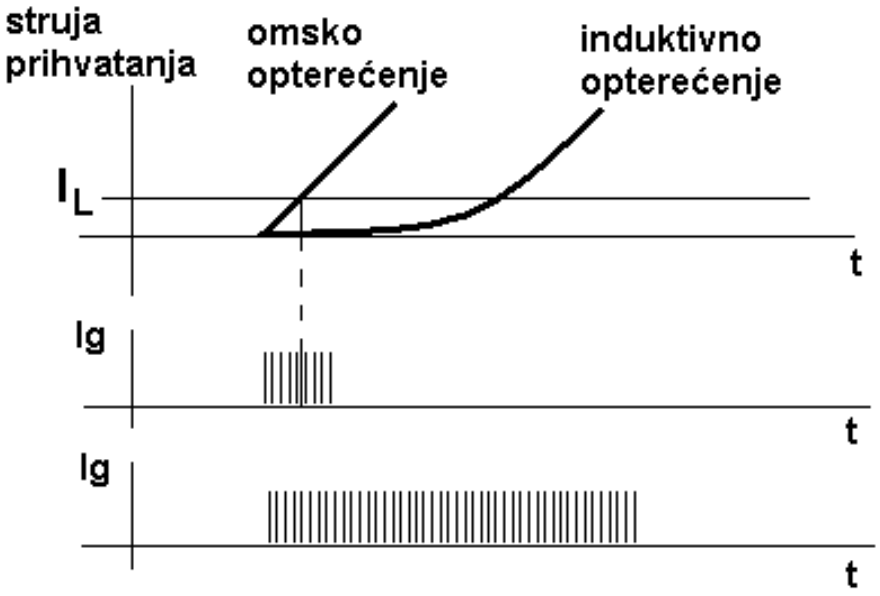
Radna prava u mogućoj radnoj oblasti gejta



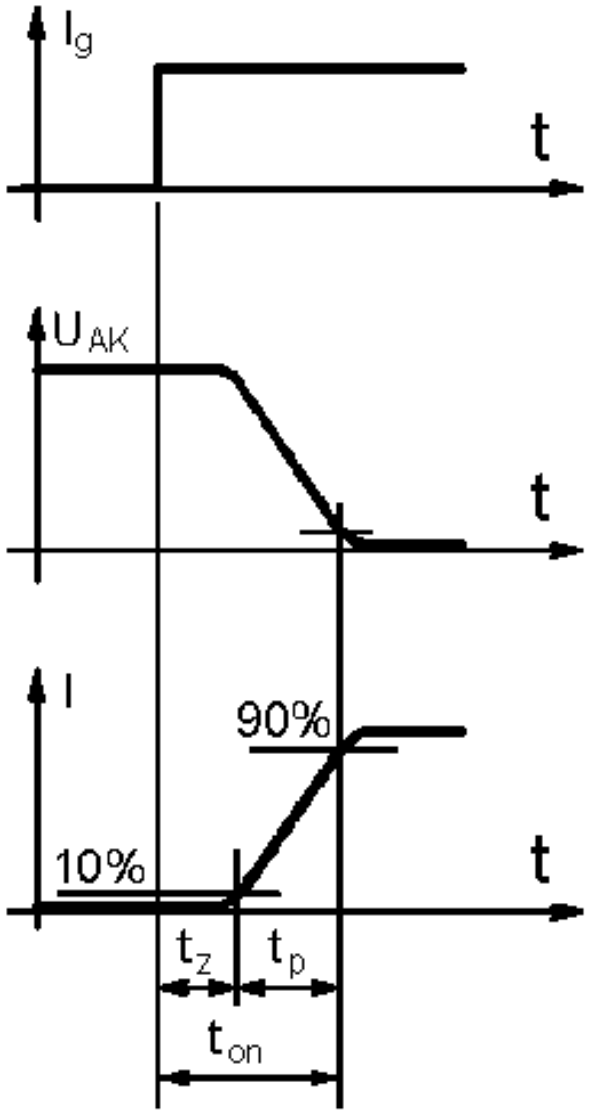


Potrebno vreme trajanja upravljačkog impulsa kod različitih strmina struje opterećenja

- Struja gejta, obično je reda 50 mA za male tiristore, dok je za velike tiristora 300-400mA.
- Trajanje impulsa treba da bude nekoliko desetima mikrosekundi.
- Kod uključenja omskog opterećenja trajanje impulsa na gejtu je znatno kraće nego u slučaju induktivnog opterećenja.
- U slučaju induktivnog tereta (struja se sporo uspostavlja), impuls treba da traje sve dok struja opterećenja ne premaši vrednost struje prihvatanja



Dinamičke karakteristike tiristora-uključenje



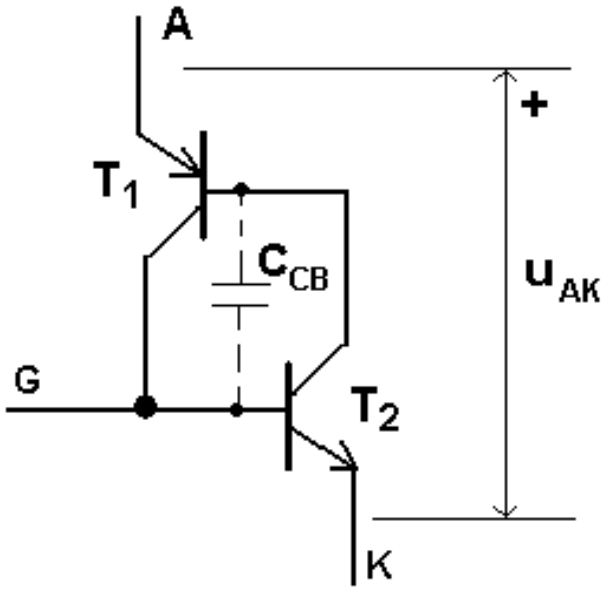
t_z vreme kašnjenja uključenja (reda 1us)

t_p vreme porasta struje (nekoliko us)

t_{on} vreme uključenja

Parazitna kapacitivna struja koja može uključiti tiristor

Tiristor u provodno stanje može da prevede i brzi porast napona u direktnom smeru



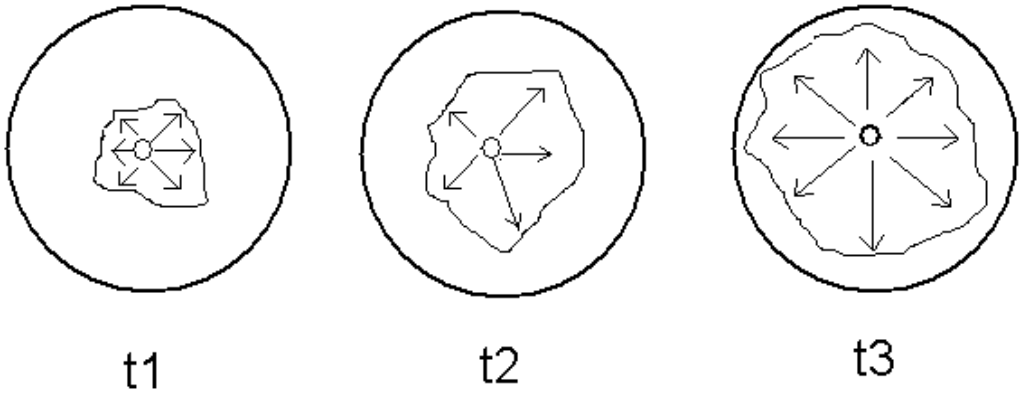
Ustvari kapacitet inverzno polarisanog sentralnog P-N spoja može da propusti struju čija je jačina

$$C_{CB}\frac{dU_{AK}}{dt}$$

Tipične vrednosti su u opsegu od 200 ... 1000 V/us

Prevelika brzina porasta struje *di/dt* može neželjeno uključiti tiristor

Impuls na gejtu aktivira određenu zonu na kristalu tiristora. Ova zona se vremenom širi na celu površinu

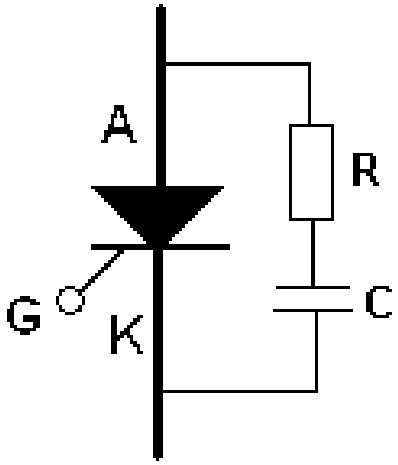


Tipične vrednosti su u opsegu od 200 ... 1000 V/μs

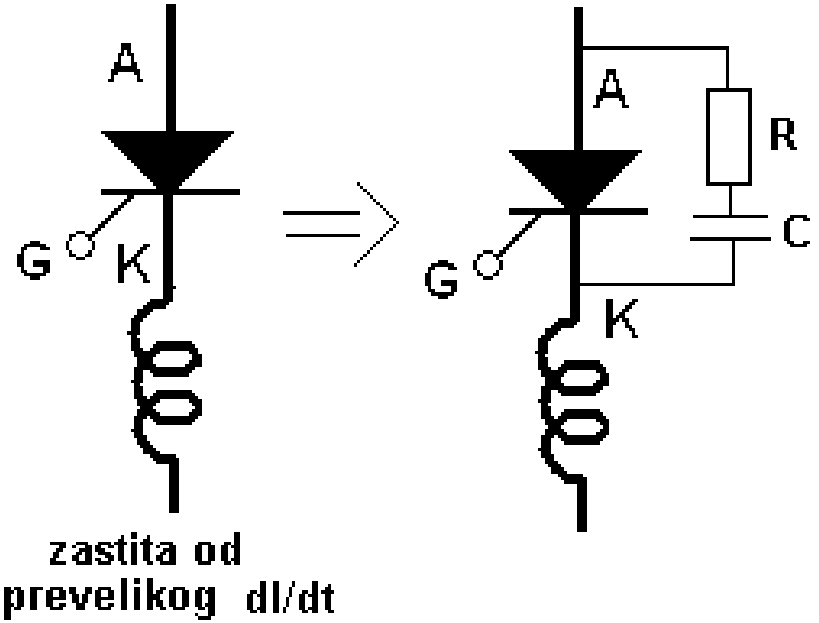
Potrebno je određeno vreme da se provodna zona proširi od kontakta gejta po celoj površini tiristora.

Ako je opterećenje čisto omsko ili kapacitivno, struja pri uključenju veoma brzo raste i njena gustina na aktiviranom delu površine može biti previsoka tako da može doći do razaranja tog dela kristala i trajnog oštećenja tiristora, zbog lokalnog pregrevanja

Zaštite protiv prevelikog porasta struje i napona na tiristoru



zastita od
prevelikog dU/dt



zastita od
prevelikog dI/dt

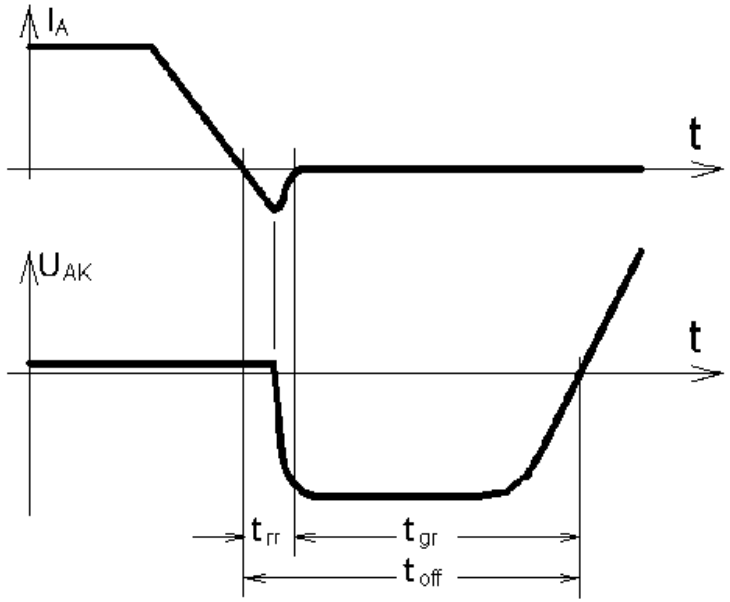
ISKLJUČENJE TIRISTORA

Najčešći način isključivanja tiristora je promena polariteta anodnog napona.

Pri tome treba sačekati određeno vreme koj se u stručnoj praksi naziva "vreme odmaranja", a obeležava se sa t_q

To je vreme koje je potrebno da se rekombinuju naelektrisanja u okolini centralnog P-N spoja tiristora, koji je bio u stanju vođenja

Ovo vreme se računa od trenutka prolaska struje tiristora kroz nulu, do trenutka kada može ponovo da primi direktan napon



$$t_q = t_{rr} + t_{off}$$

Kod brzih tiristora koji se koriste u invertorima i čoperima deklariše se *gornja granična vrednost* za i ona iznosi od 20μs....60μs.

Kod sporih tiristora koji se koriste u ispravljačima, za se daje tipična vrednost i obično iznosi 100μs....300μs.

TIRISTOR- kao idealan prekidač

Pretpostavke:

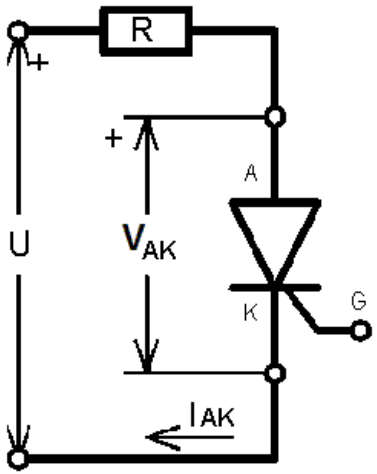
-U analizama rada pretvarača tiristor će biti posmatran kao bistabilni prekidački elemenat koji može biti u stanju uključenosti ili isključenosti

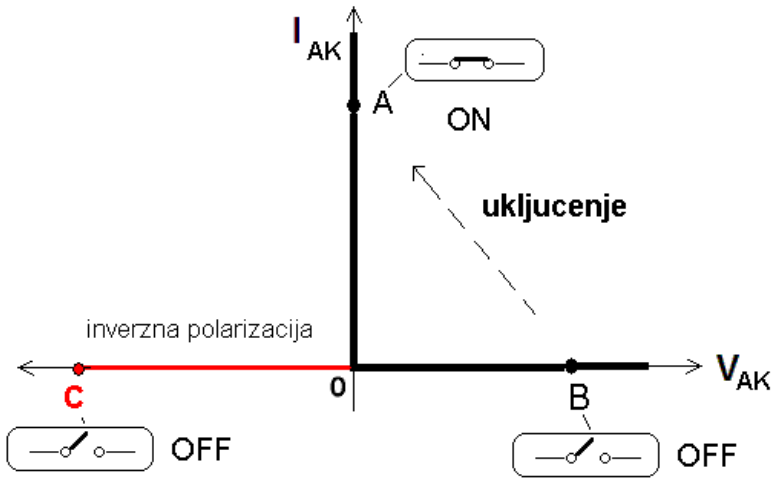
-Struja prihvatanja i struja držanja jednake nuli $I_L=0$ i $I_H=0$

-Inverzna struja i napon u provodnom stanju jednaki nuli

-Vremena uključenja i isključenja jednaka nuli

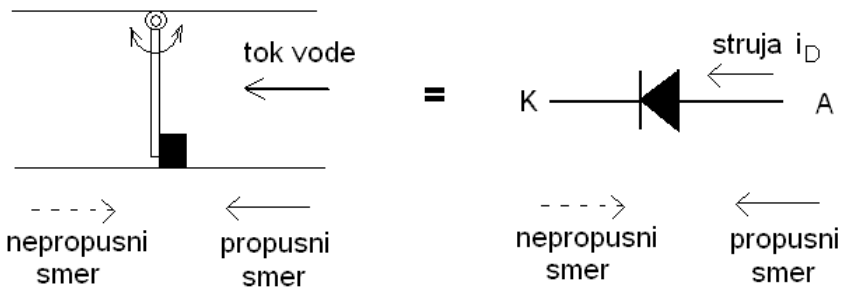
- Idealizovana karakteristika tiristora



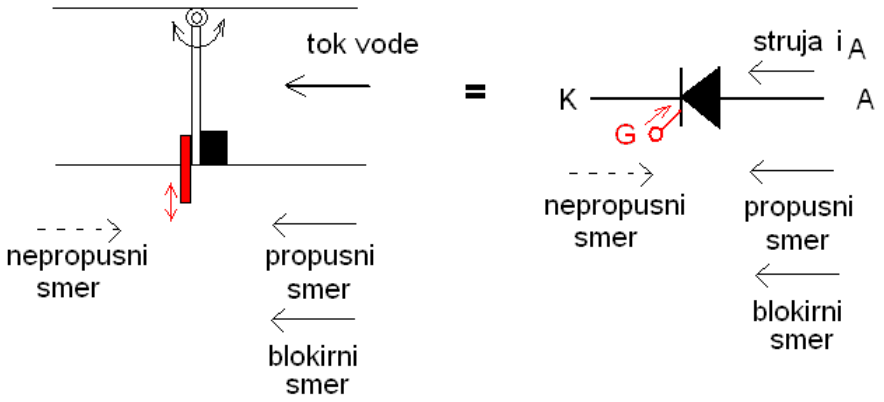


HIDRAULIČKE ANALOGIJE PREKIDAČKIH ELEMENTA
-dioda
-tiristor
-tranzistor

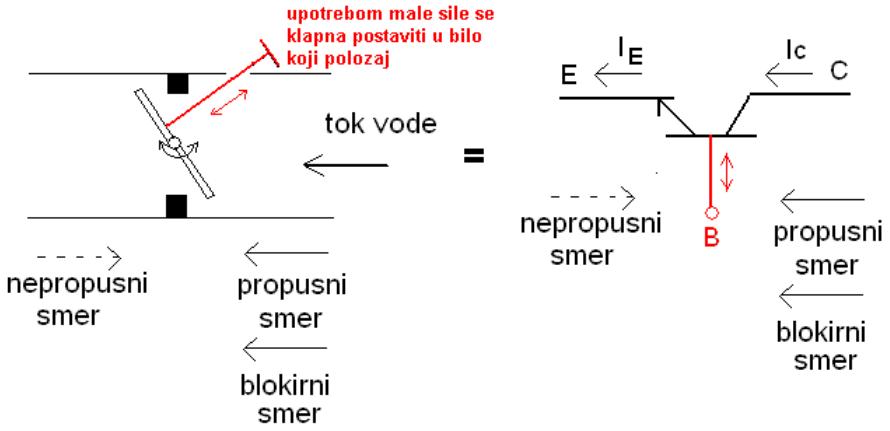
HIDRAULIKA ELEKTRONIKA



DIODA

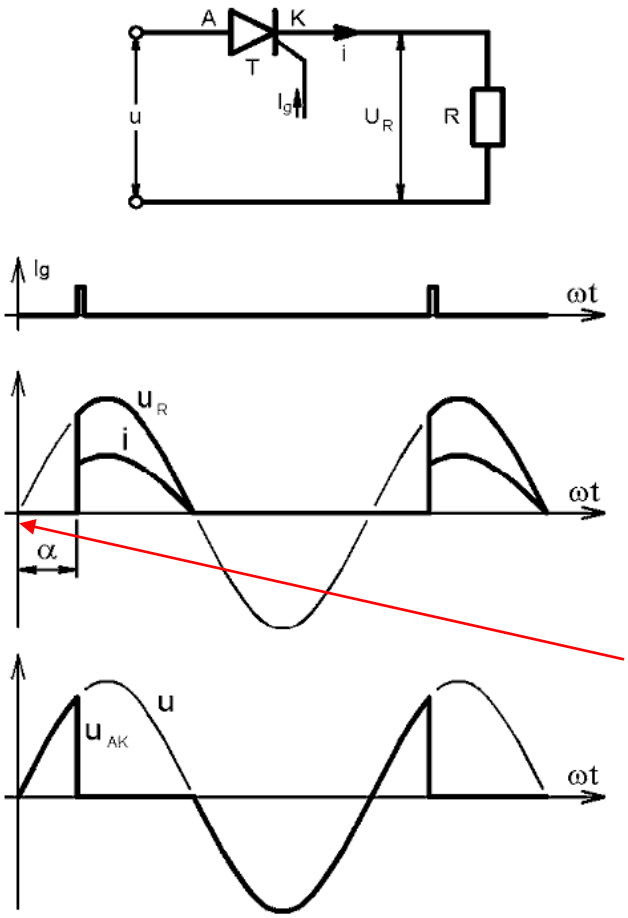


TIRISTOR



TRANZISTOR

Osnovno prekidačko kolo sa tiristorom



Okidni impulsi na gejtu i_g sinhronizovani su sa mrežnim naponom u

Kontrolna veličina je ugao uključenja

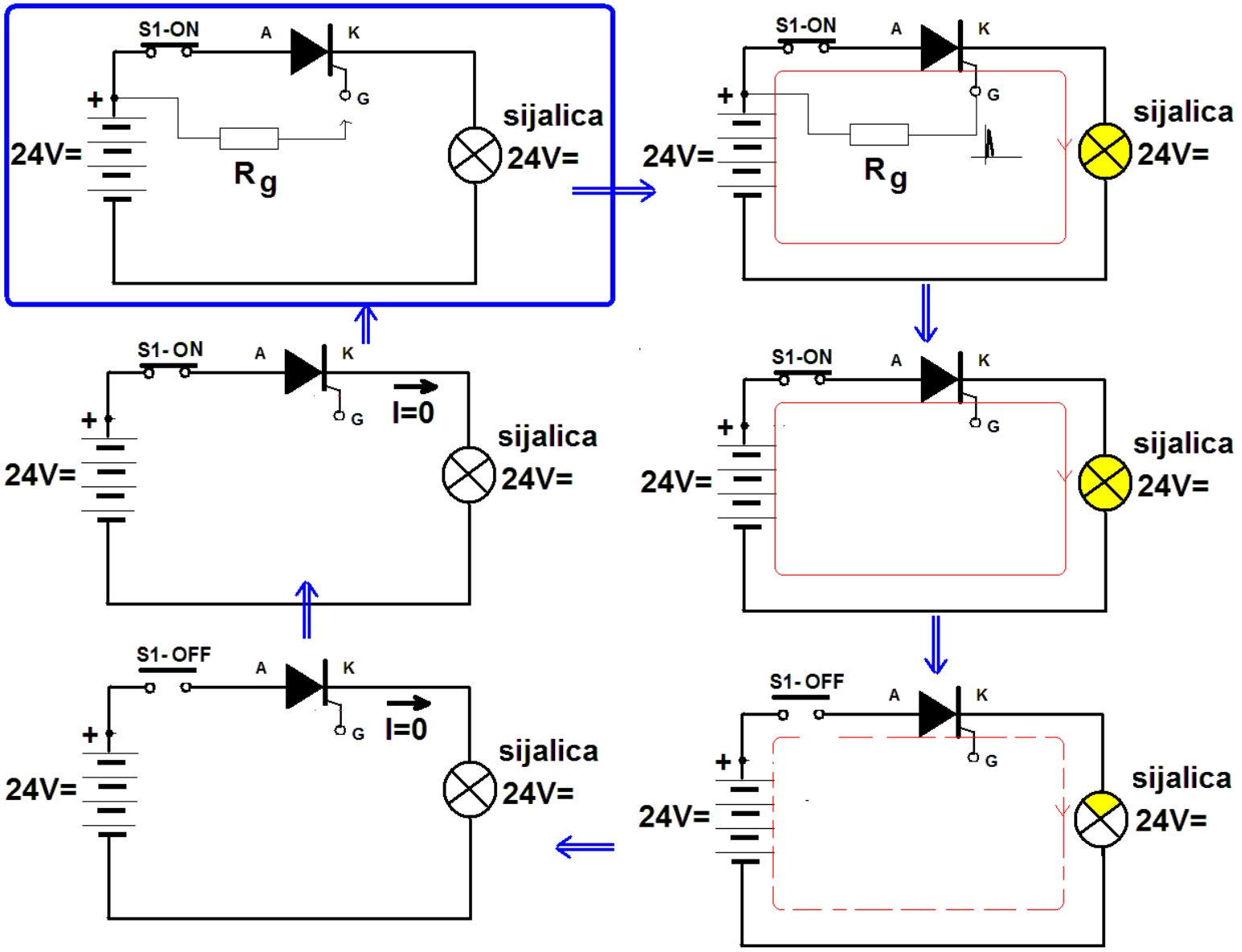
α

Ugao α se računa od trenutka

kada su se stekli uslovi da provede tiristor

a to je prolazak mrežnog napona kroz nulu

ISPITIVANJE TIRISTORA



VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE(NET)

OSNOVNE STUDIJE

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

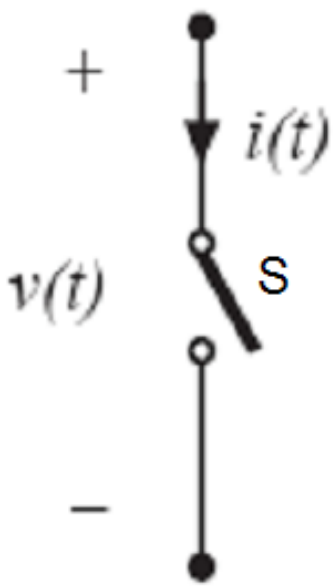
PREKIDAČ KAO ELEMENT ENERGETSKOG PRETVARAČA

PREDMETNI PROFESOR:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

- Korišćenje i efikasnost uređaja energetske elektronike (u koje spadaju i elektroenergetski pretvarači) mogu biti značajno poboljšani razumevanjem prekidačkih karakteristika elemenata energetske elektronike (dioda, tiristora, trijaka, tranzistora,.....)
- U ovom predavanju će biti razmatrane i proučavane **(I) prekidačke karakteristike idealnog prekidača**, kako bi se bolje razumele **(II) prekidačke karakteristike realnih prekidačkih elemenata** (dioda, tiristora, trijaka, tranzistora,...)
- Da bi upravljali elektroenergetskim pretvaračima, moramo poznavati prekidačke karakteristike poluprovodničkih snažnih prekidača
- Takođe moramo poznavati načine pouzdanog uključenja i isključenja snažnih prekidača

POJAM IDEALNOG PREKIDAČA



IDEALNI PREKIDAČ

S ⟶ ON $v(t) = 0$ (za bilo koju vrednost struje)

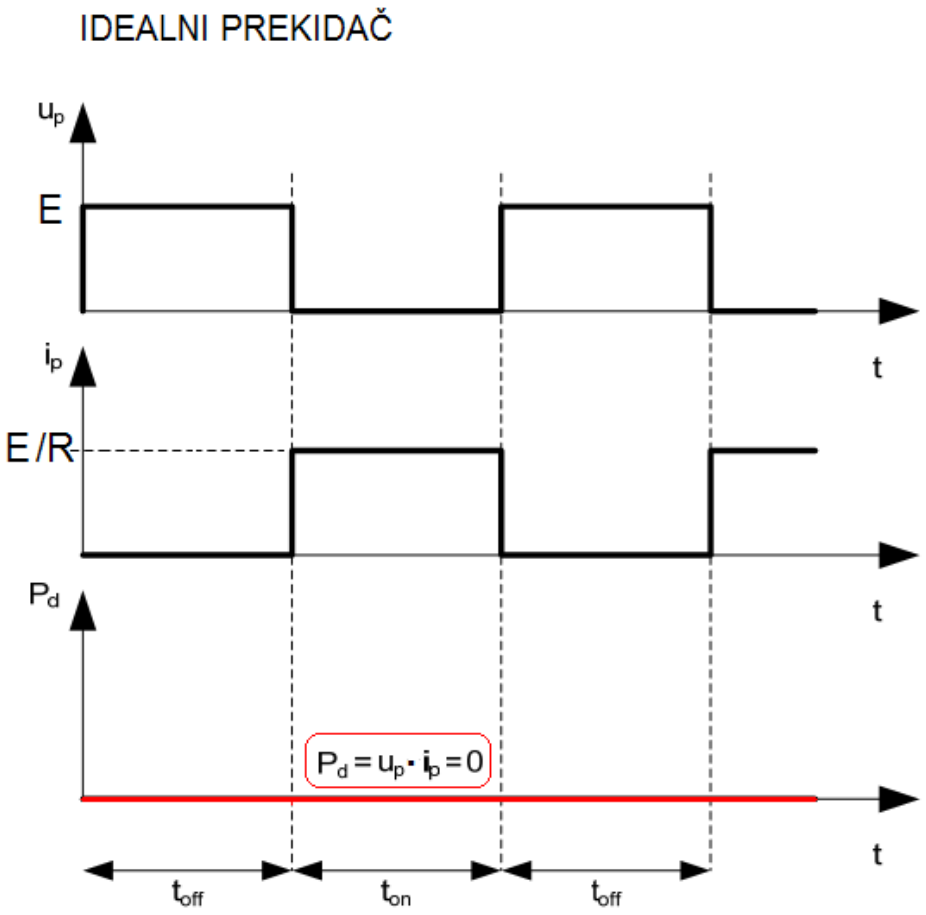
S ⟶ OFF $i(t) = 0$ (za bilo koju vrednost napona)

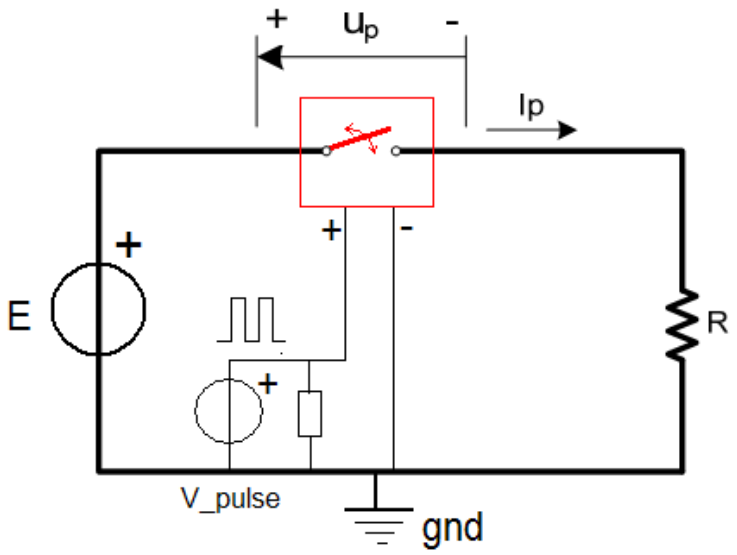
u oba slučaja snaga kojase razvija na prekidaču je:

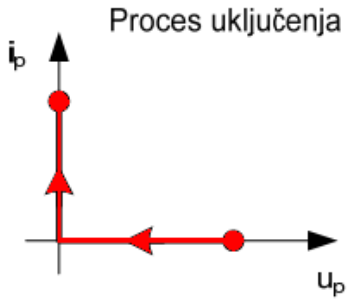
$$p(t) = v(t)\, i(t) = 0$$

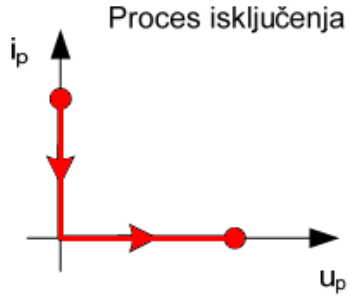
IDEALNI PREKIDAČ NE TROŠI NIKAKVU SNAGU!!!

UKLJUČENJE I ISKLJUČENJE OMSKOG OPTEREĆENJA

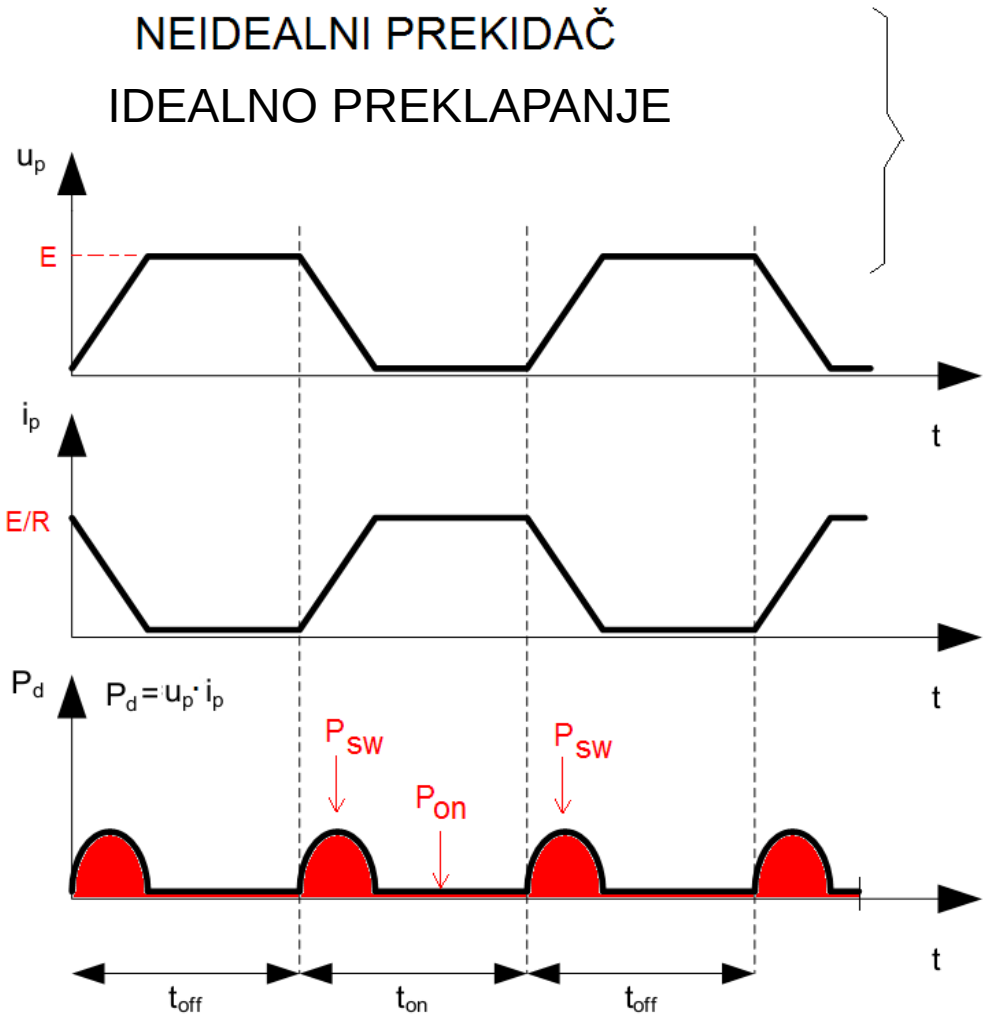




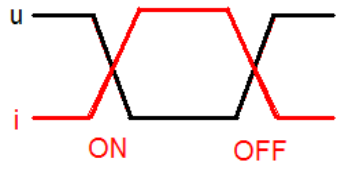




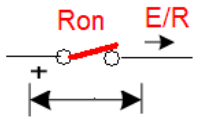
PREKIDANJE SA KONAČNIM VREMENOM UKLJUČENJA I ISKLJUČENJA



PREKIDAČ SA KONAČNIM VEMENOM ISKLJUČENJA I UKLJUČENJA

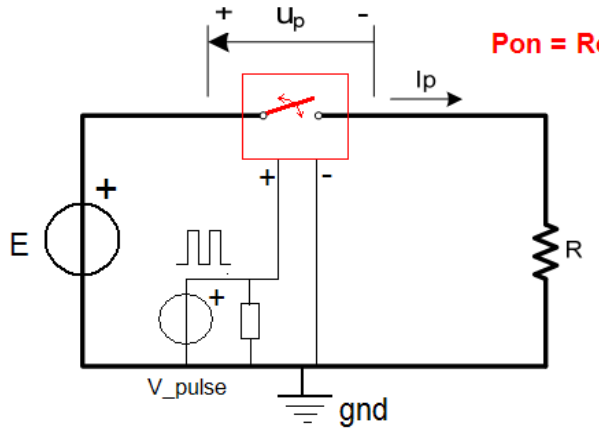


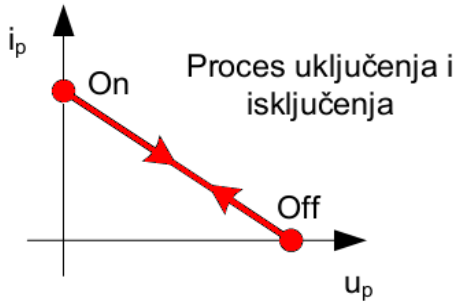
PREKIDAČ SA KONAČNOM IMPEDANSOM U STANJU VOĐENJA



$$Von = Ron \cdot \frac{E}{R}$$

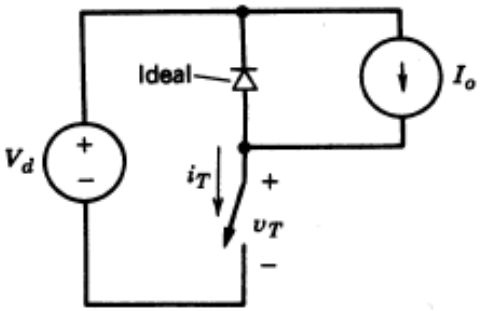
$$Pon = Ron \cdot \left[\frac{E}{R}\right]^2$$



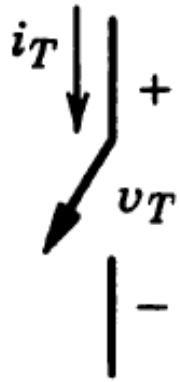


Proces uključenja i isključenja

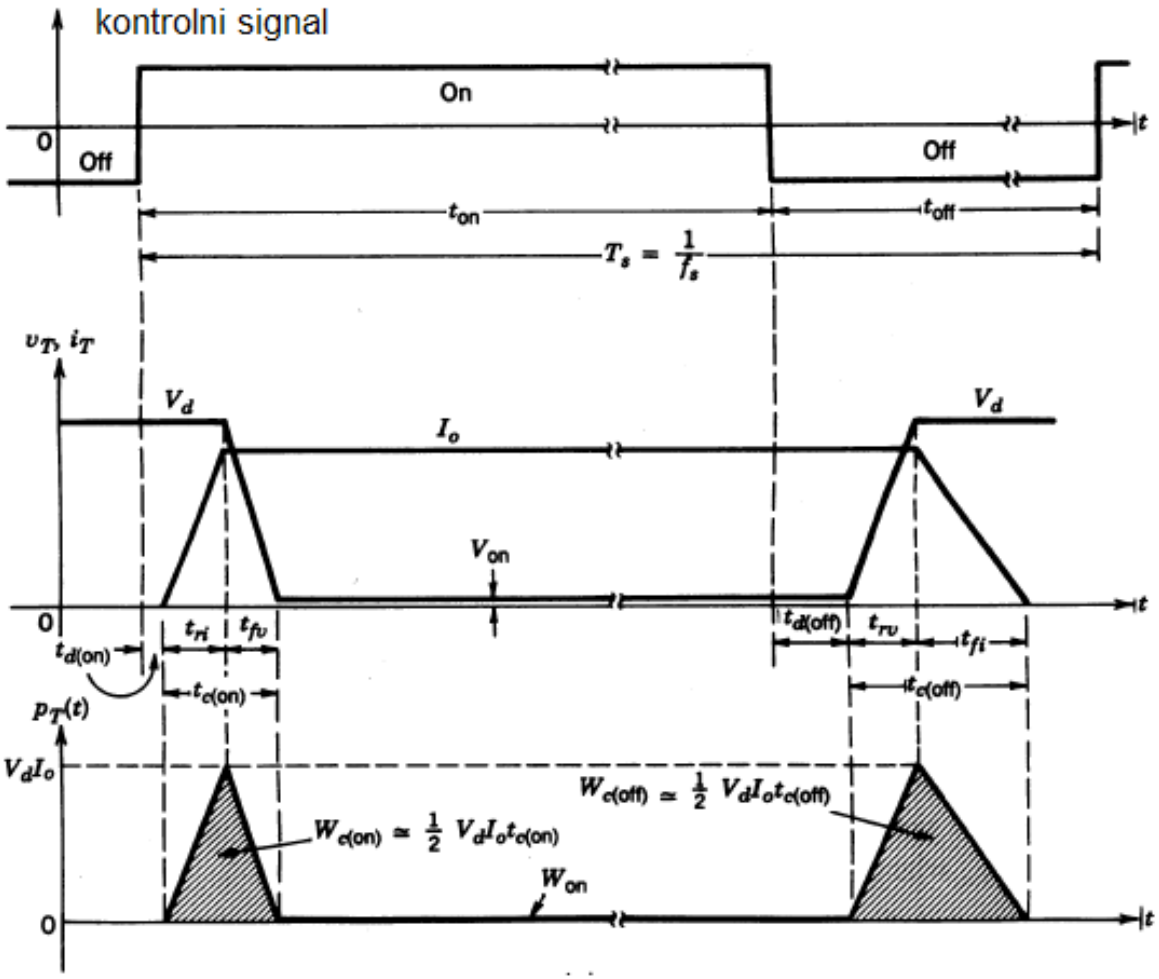
PREKIDAČ KAO OSNOVNI ELEMENAT ENERGETSKOG PRETVARAČA



osnovno prekidačko kolo



PREKIDAČ-SW



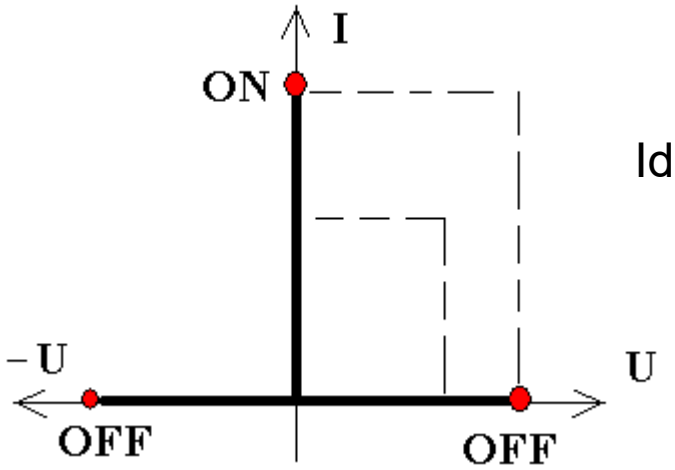
U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI JE OD MAKSIMALNE VAŽNOSTI SLEDEĆE :

Prekidački elemenat pa i dioda ili ima napon a nema struju ili obrnuto!
Sredine nema!

To ustvari znači ovo:

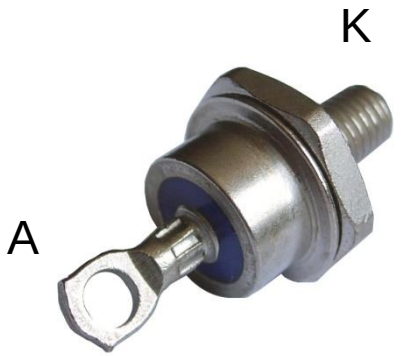
poluprovodnička komponenta ne sme biti u isto vreme izložena i spoljašnjem naponu i spoljašnjoj struji – u tom slučaju zbog prevelikog zagrevanja trenutno dolazi do proboja, tj. razaranja materijala.

Zato se kaže da u energetici poluprovodnički pretvarači rade u **ON – OFF** režimu (SW uključen ili isključen).

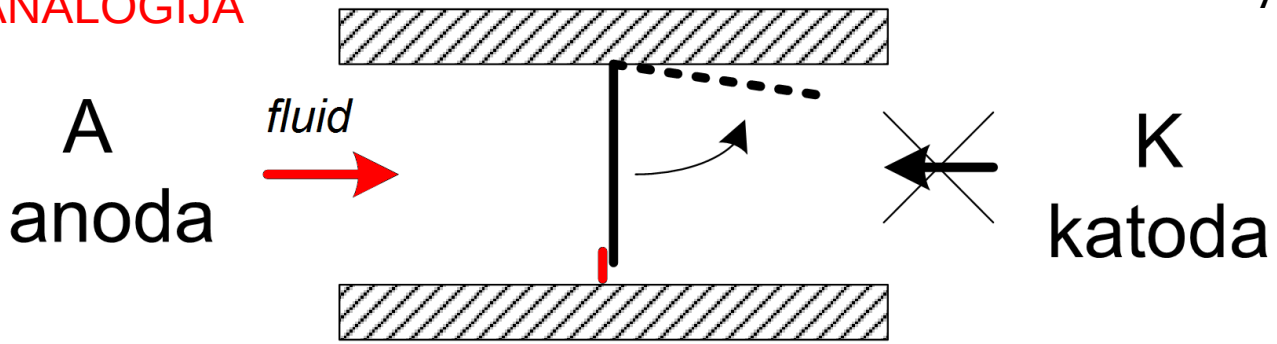


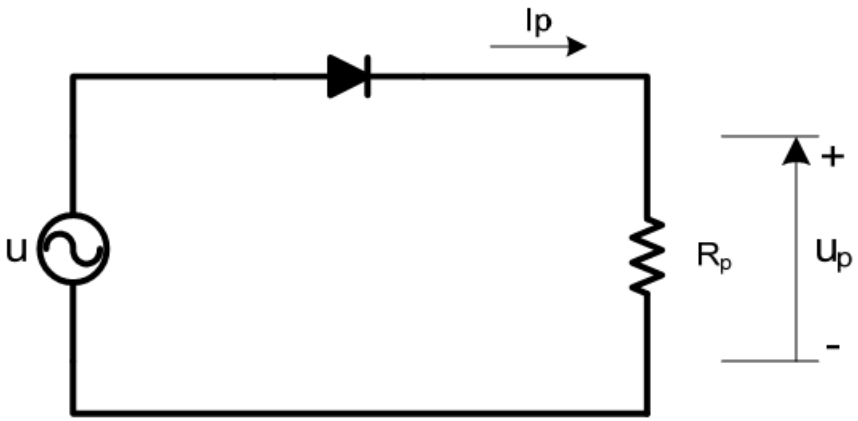
Idealna prekidačka karakteristika

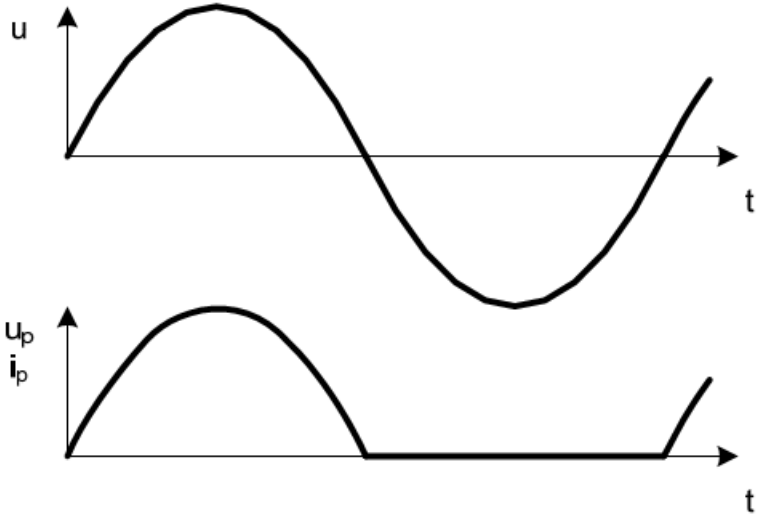
DIODA



ANALOGIJA







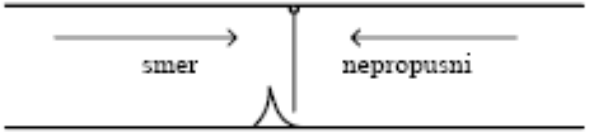
DIODA

Kada je polarizovana direktno, kroz diodu protiče relativno velika struja; pad napona na njoj je, međutim vrlo mali, pa je discipacija snage mala.

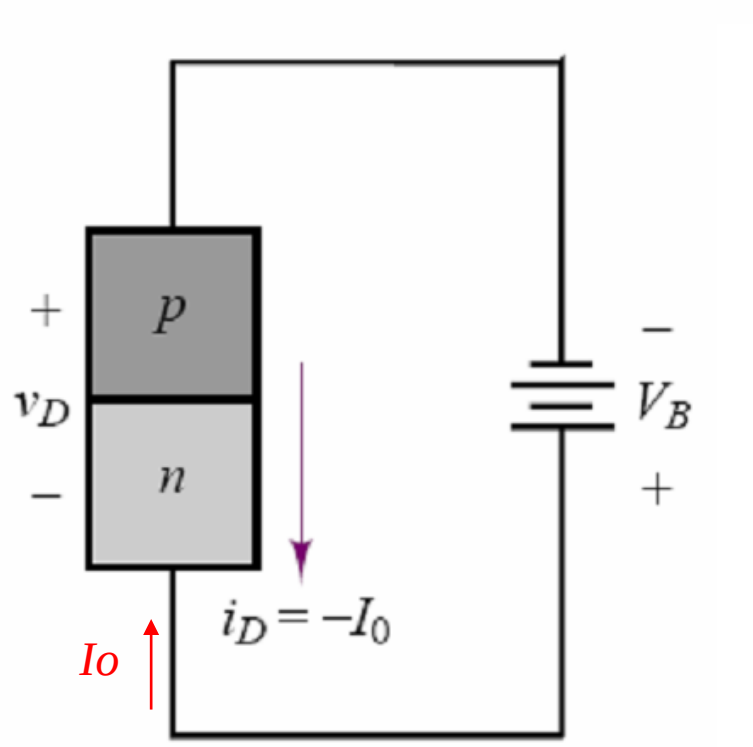
Na krajevima inverzno polarizovane diode javlja se veliki napon ali je inverzna struja dosta mala pa je i discipacija snage vrlo mala.

Proticanja tečnosti kroz cev je analogan slučaj (model) provođenju diode.

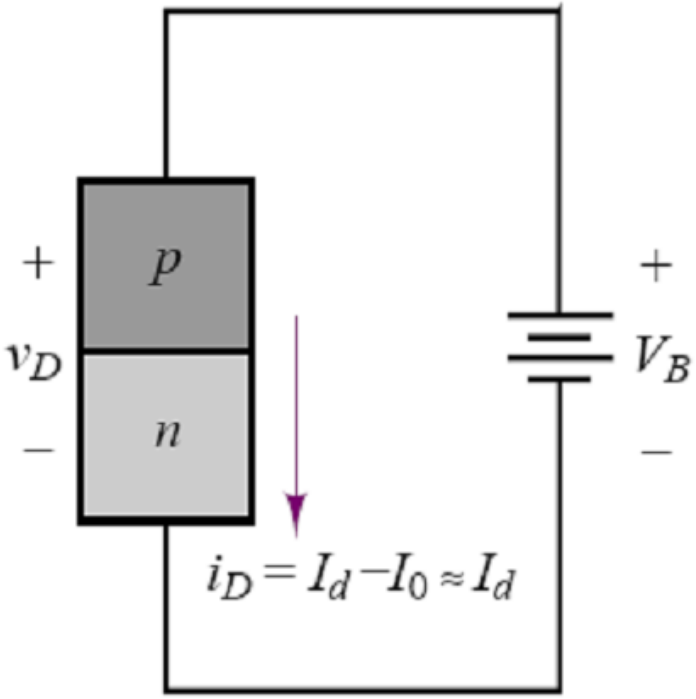
NEPOVRATNA KLAPNA U CEVOVODU



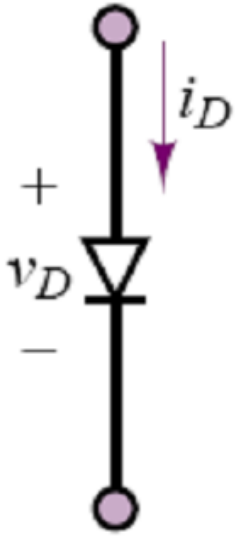
POLARIZACIJA P-N SPOJA



INVERZNO POLARISAN
“P-N” SPOJ
Kroz njega teče jedino
Inverzna struja zasićenja



DIREKTNO POLARISAN
“P-N” SPOJ
Kroz njega teče praktično
struja iz spoljašanjeg izvora
$I_d >> I_o$

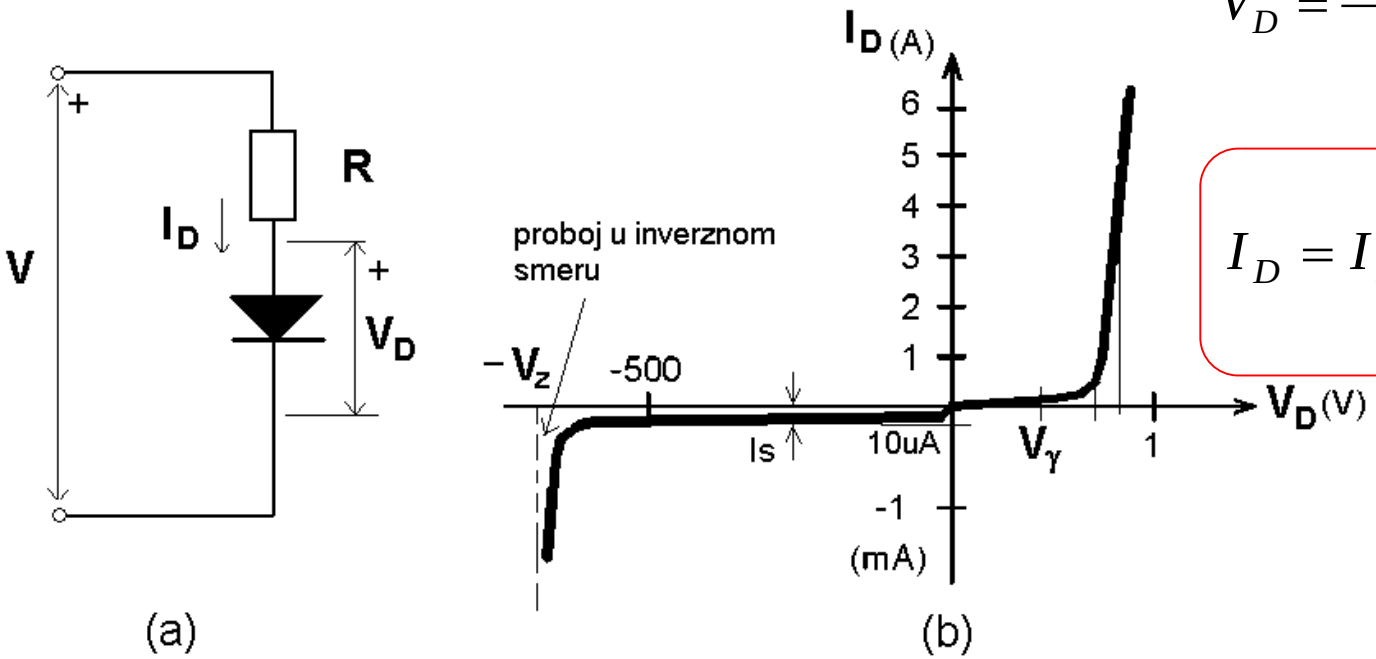


KARAKTERISTIKA REALNE DIODE

$$V_D = \frac{\eta k T}{q} \cdot \ln\left[\frac{I_D}{I_S} + 1\right]$$

ili

$$I_D = I_S \cdot \left[e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1\right]$$



Karakteristike diode, (a)-simbol i vezivanje u električnom kolu, (b)-strujno naponska karakteristika

V_D - napon diode (V)

I_D -struja diode (A)

I_S -inverzna struja zasiće

T

q -elementarno naelektrisanje ($1.602 \cdot 10^{-19} C$)

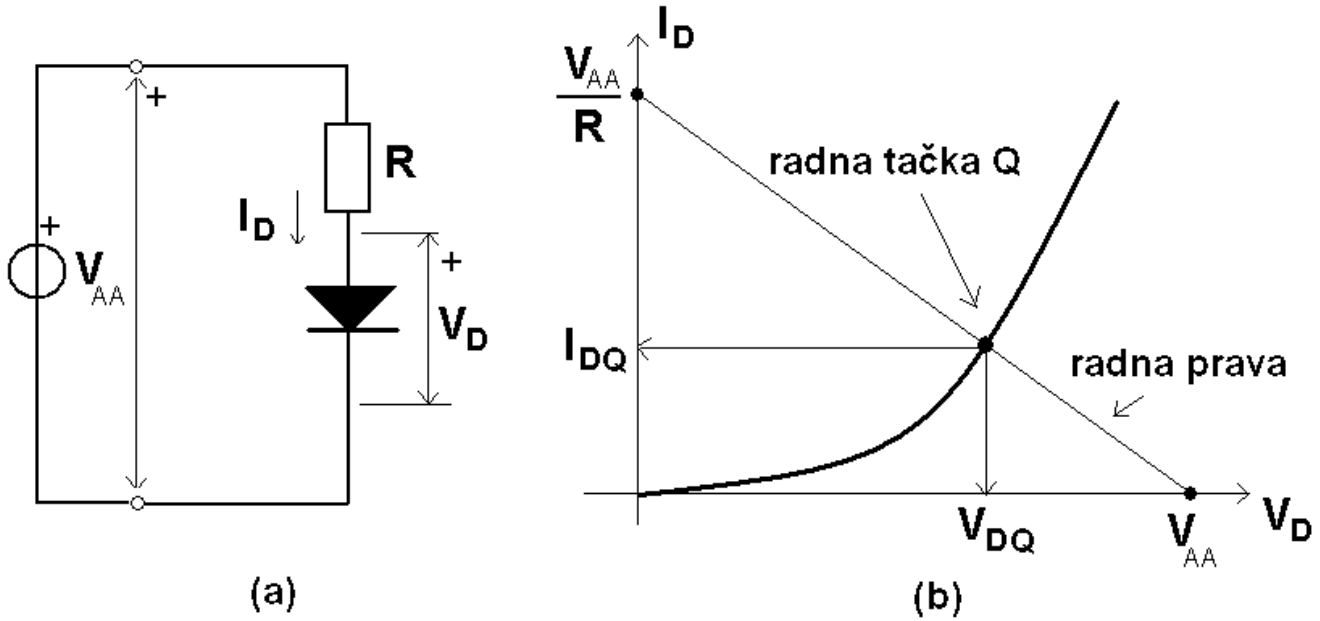
k -Bolcmanova konstanta ($1.38 \cdot 10^{-23} J/K$)

η - koeficijent koji zavisi od tipa diode (η =1 za Ge diode, η =2 za Si diode)

Na osnovu karakteristike se zaključuje da je realna dioda izrazito nelinearni element.

Postavlja se pitanje kako rešavati električna kola koja sadrže diodu?

Koncept radne prave



Koncept radne prave, (a) diodno kolo, (b) određivanje radne tačke

$$+V_{AA} - RI_D - V_D = 0$$

$$I_D = \frac{V_{AA} - V_D}{R}$$

Kako predstaviti diodu za velike signale, a da se ne koristi nepraktični eksponencijalni model volt-amperske karakteristike, ili grafički koncept radne prave?

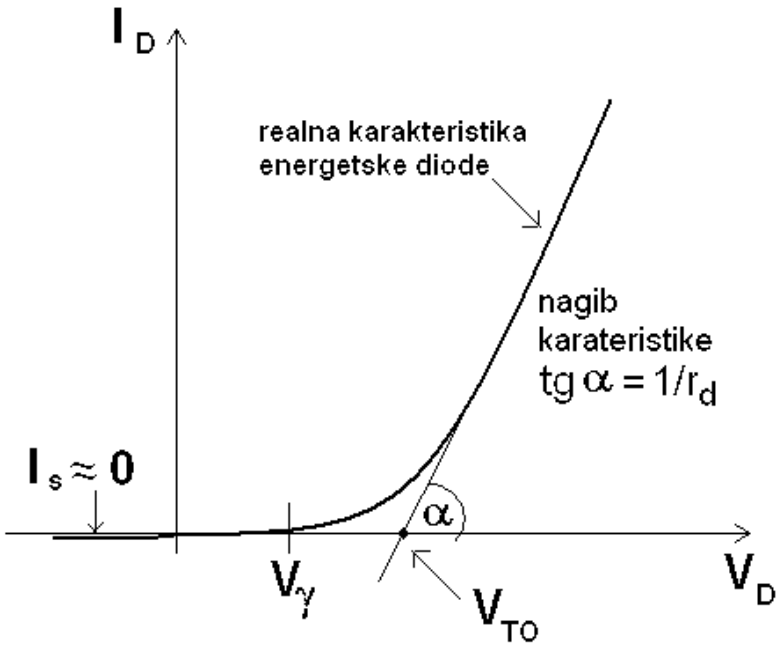
Jedan od mogućih načina je predstava diode pomoću kombinacije linearnih elemenata (idealnih). Tako se analiza može znatno uprostiti, ali se koriste različiti modeli za direktno i inverzno polarisano stanje.

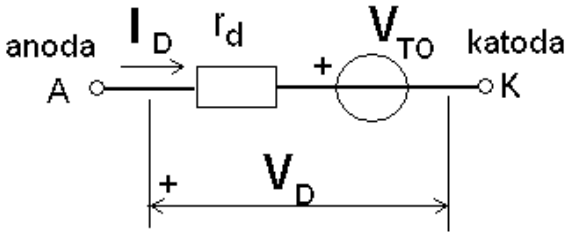
Model diode za velike signale

$$V_D = V_{TO} + r_d \cdot I_D$$

A) Direktno polarisana dioda

$$r_d = \frac{1}{tg\alpha}$$





$$V_D = V_{TO} + r_d I_D$$

napon praga provođenja V_γ $V_\gamma \approx 0.6V$

Povlačenjem tangente na realnu karakteristiku diode, u preseku sa V-osom dobija se tačka V_{TO} $V_{TO} \approx 0.9V$.

Vrednost dobijena na ovaj način predstavlja *napon koji karakteriše linearnu karakteristiku diode*. Ova vrednost nije fizička veličina, već procenjena sa grafika

Pad napona na diodi ima konstantni član i promenljivi član koji zavisi od struje diode i dinamičke otpornosti

$$V_D = V_{TO} + r_d \cdot I_D$$

$$r_d = \frac{1}{tg\alpha}$$

Za male Si diode ova vrednost se kreće u opsegu 5Ω....10Ω, dok je kod energetskih dioda ova vrednost 1mΩ.....10mΩ . U katalozima proizvođača ona se često obeležava i sa

$$r_T, R_f$$

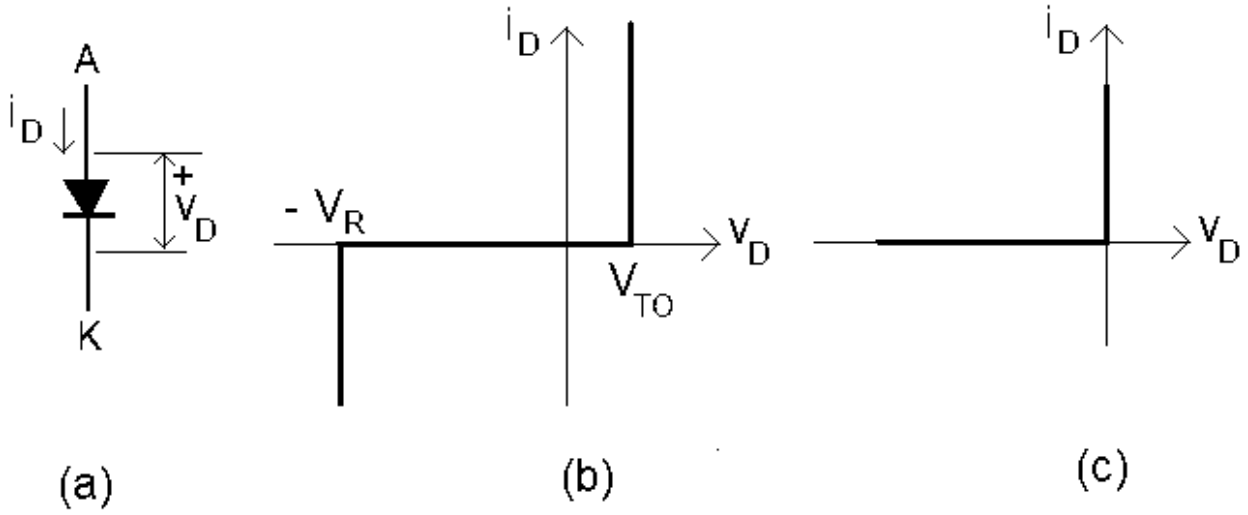
Jednačina koja opisuje energetsku diodu u provodnom stanju za velike signale:

$$V_D = V_{TO} + r_d \cdot I_D$$

Idealizovane statičke karakteristike dioda

- Pri analizi kola sa diodama uzimanje stvarne karakteristike i njihovih matematičkih izraza postaje komplikovano i u jednostavnim slučajevima, pa se takva analiza obično sprovodi grafički.
- U komplikovanijim slučajevima ni to nije izvodljivo pa se u praksi koriste idealizovane karakteristike diode.
- Idealizacija se sastoji u tome da se nelinearnost diode aproksimira linearnim segmentima.

IDEALIZOVANE KARAKTERISTIKE DIODE



Idealizovane karakteristike dioda, (a)-referntni smerovi, (b)-model 1, (c)-model 2

$$v_D \rangle V_{TO} \Rightarrow i_D \in (0,+\infty)$$
$$V_{TO} \geq v_D \geq -V_R \Rightarrow i_D = 0$$
$$v_D \langle -V_R \Rightarrow i_D \in (0,-\infty)$$

model 1

Ovde se smatra da je pad napona na diodi u provodnom smeru konstantan i nezavisan od struje. Obično se uzima da je njegova vrednost oko 0.7V (male struje) do 1 V (pri većim strujama). Probojni inverzni napon se uzima u obzir samo pri izboru diode a u analizama rada pretvarača se zanemaruje

$$v_D = 0 \Rightarrow i_D \in (0,+\infty)$$
$$i_D = 0 \Rightarrow v_D \in (0,-\infty)$$

model 2

Drugim rečima ovo znači da kada idealna dioda vodi ona ima na sebi pad napona 0V. Kad je inverzno polarisana, inverzna struja zasićenja je jednaka 0A

Karakteristični parametri diode

U ovom odeljku su dati karakteristični podaci za energetske diode koji su dati u katalozima proizvođača.

V_{RSM} - *Neponovljivi vršni inverzni napon* (može povremeno da se javi na diodi; ako se često javlja degradiraće karakteristike diode; često se u katalozima sreće i oznaka V_{DSM} .

V_{RRM} - *Ponovljivi vršni inverzni napon* (može se uzastopno primenjivati bez oštećenje diode; često se u katalozima sreće i oznaka V_{DRM} .

$V_{(BR)R}$ - *Probojni napon pri inverznoj polarizaciji*; dioda ulazi u proboj i može biti uništena; normalno se u eksploataciji energetske diode ova vrednost nikada ne postiže.

I_{FAV} - *Nazivna srednja vrednost struje vođenja* se definiše kao: $I_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_F(t) \cdot dt$

Ova vrednost je ustvari granična vrednost srednje vrednosti struje za trajni pogon koja je dopuštena s obzirom na električne i termičke karakteristike diode. Ova jednačina važi za bilo koji talasni oblik struje. Ne sme da se prekorači ni pri najpovoljnijim uslovima hlađenja. Alternativne oznake su I_{TAV} , I_{DAV} .

I_{FRMS} - *Nazivna efektivna vrednost struje vođenja* se definiše kao: $I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2{}_F(t) \cdot dt}$

Ova vrednost je ustvari granična vrednost efektivne vrednosti struje kroz diodu za trajni pogon koja je dopuštena s obzirom na električne i termičke karakteristike diode. Ova jednačina važi za bilo koji talasni oblik struje. Ne sme da se prekorači ni pri najpovoljnijim uslovima hlađenja.

I_{SM} - *Udarna struja u stanju vođenja*

Ova vrednost je ustvari maksimalna vršna vrednost jedne polovine sinusnog talasa udarne struje (pri kratkom spoju) u trajanju od 10ms. Nakon povremenih strujnih udara do ove granične vrednosti, diode su u stanju da podnesu određeni zaprečni napon.

TOPLOTNI IMPULS DIODE

$I^2 \cdot t$ - *Toplotni impuls diode*

$$(I^2 \cdot t)_{diode} = A_{diode} = \int_0^T i_D^2 \cdot dt$$

Toplotni impuls je ustvari granična vrednost integrala kvadrata struje u vremenu koji dioda mora da podnese a da ne bude uništena. Ova veličina služi pri izboru odgovarajućih ultrabrzih osigurača (tip R) za zaštitu dioda od oštećenja usled prevelikih struja kratkih spojeva. Vrednost toplotnog impulsa osigurača za predviđeni vremenski interval i korišćeni napon napajanja mora biti ispod vrednosti toplotnog impulsa koga dioda može da podnese. Obično se ultrabrzi osigurač bira tako da njegov toplotni impuls bude dva puta manji od diodnog.

$$(I^2 \cdot t)_{diode} \geq (I^2 \cdot t)_{ultrabrzog-osig}$$

$$(I^2 \cdot t)_{diode} = 2(I^2 \cdot t)_{ultrabrzog-osig}$$

Disipacija snage u diodi tokom provođenja

Ukupna snaga disipacije u energetskoj diodi se može predstaviti kao zbir disipacije snage u provodnom stanju- P_{FAV} i disipacije snage u stanju inverzne polarizacije- P_{RAV}

$$P_{TOT} = P_{FAV} + P_{RAV}$$

Disipacija toplote u diodi tokom vođenja struje je dominantna i ona se izračunava usrednjavanjem trenutne vrednosti snage gubitaka u stanju vođenja

$$p_F = u_F \cdot i_F = u_D \cdot i_D$$

$$p_F = (V_{TO} + r_d \cdot i_F) \cdot i_F$$

$$P_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_F(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_{0T} V_{TO} i_F \, dt + r_d \cdot \int_0^T i_F^2 \, dt \right]$$

$$I_{FAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_F(t) \cdot dt$$

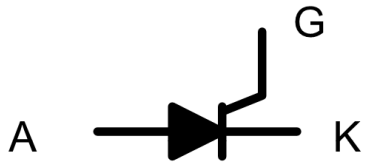
$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2{}_F(t) \cdot dt}$$

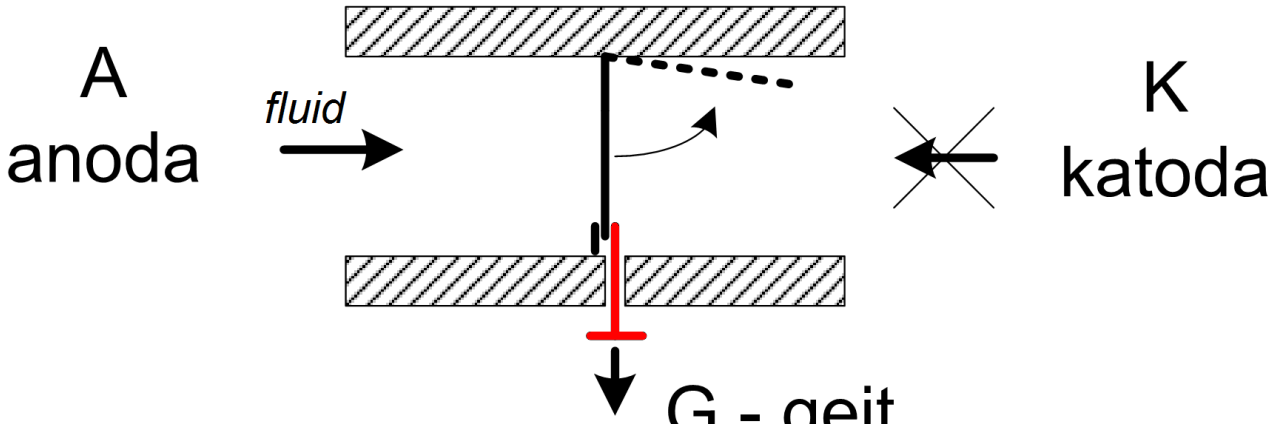
$$P_{FAV} = V_{TO} \cdot I_{FAV} + r_d \cdot I_{FRMS}^2$$

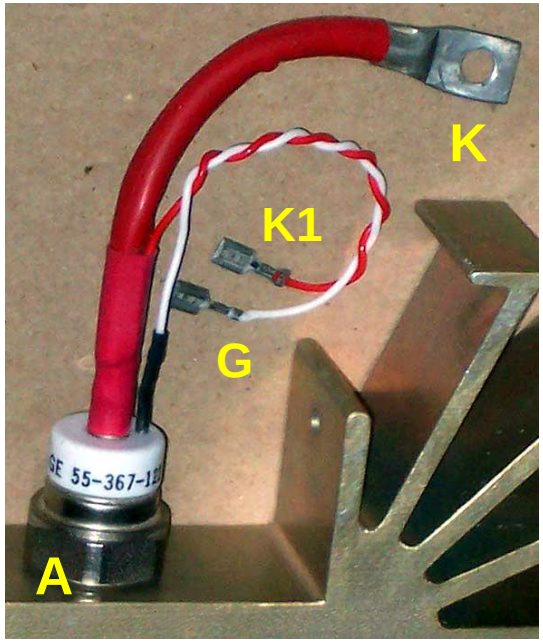
TIRISTOR

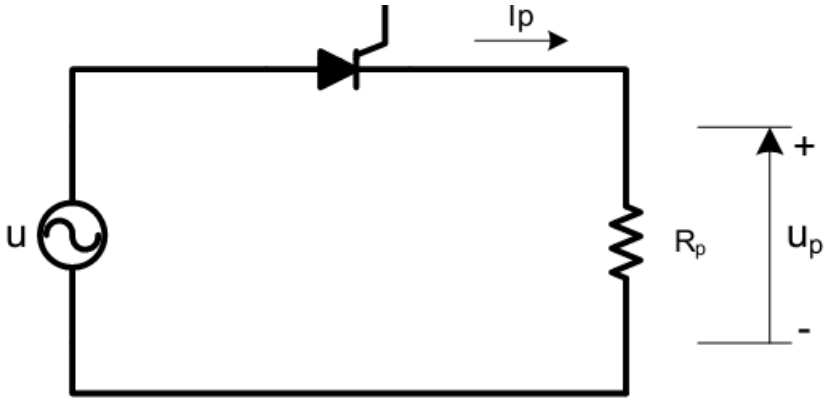
Engl. **SCR** (**S**ilicon **C**ontrolled **R**ectifier)

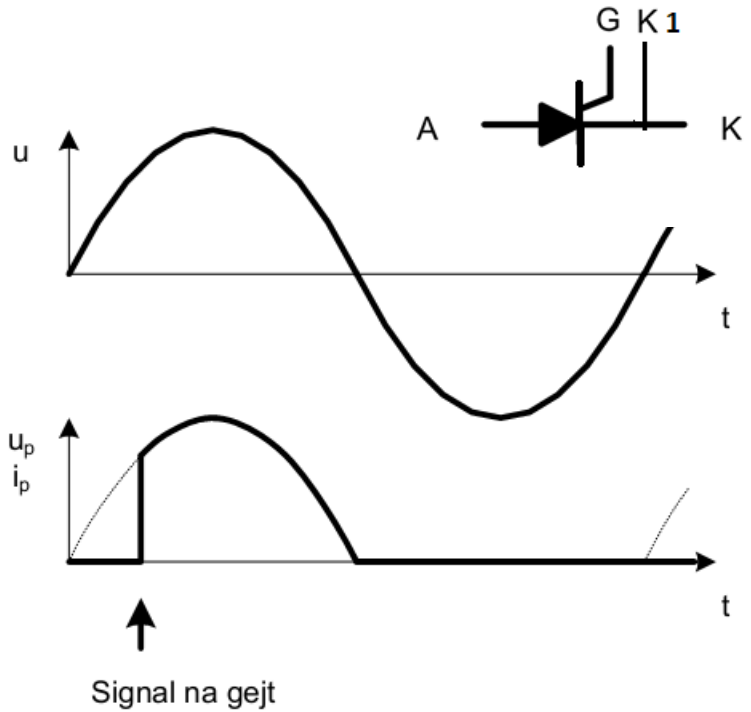
analogija





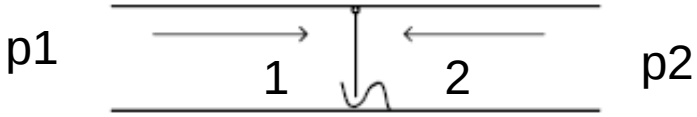






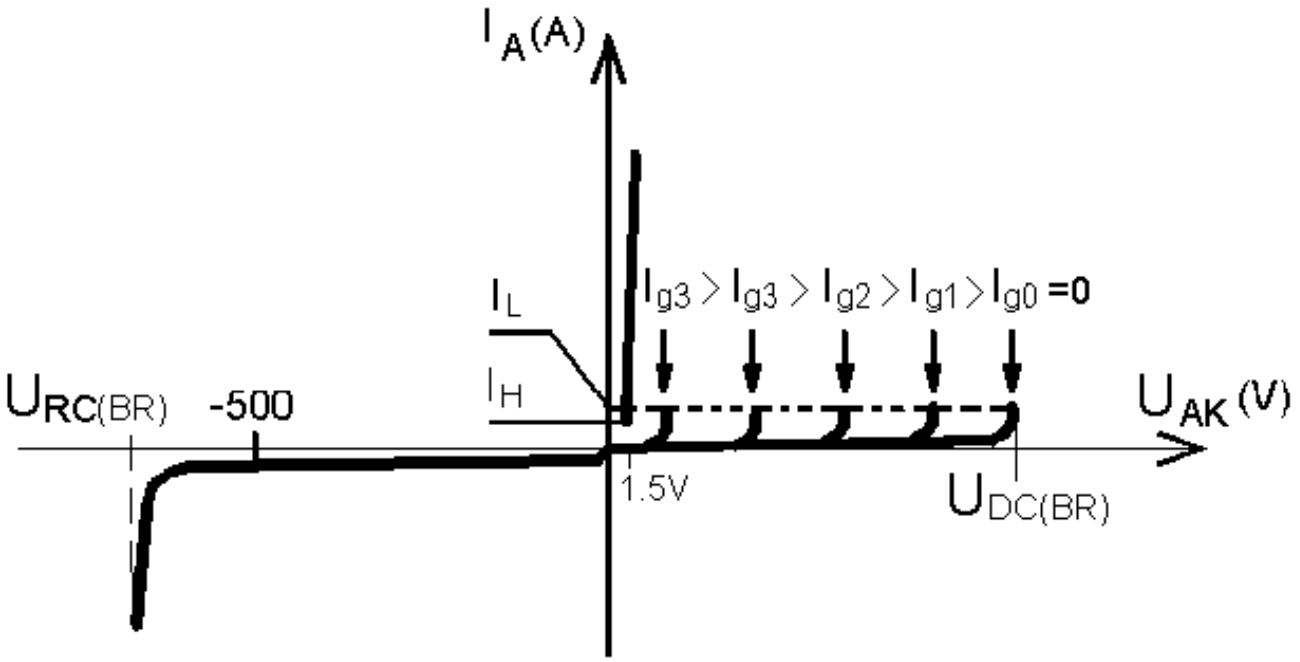
TIRISTOR - SCR

ANALOGNI MEHANIČKI MODEL



U smeru jedan (1) tečnost može da protiče jedino kada skinemo rezu, a pritsci su takvi da je p1 > *p2* .
Očigledno kada “ struja “ teče ne možemo ponovo da stavimo rezu, jedino ako se spolja ne promene uslovi .
To će se desiti na primer kada protekne struja suprotnog smera.

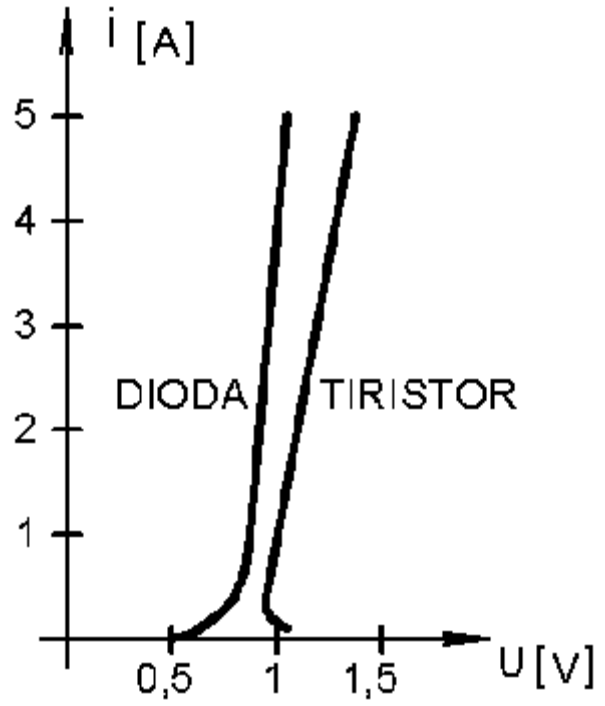
Volt-amperska karakteristika tiristora



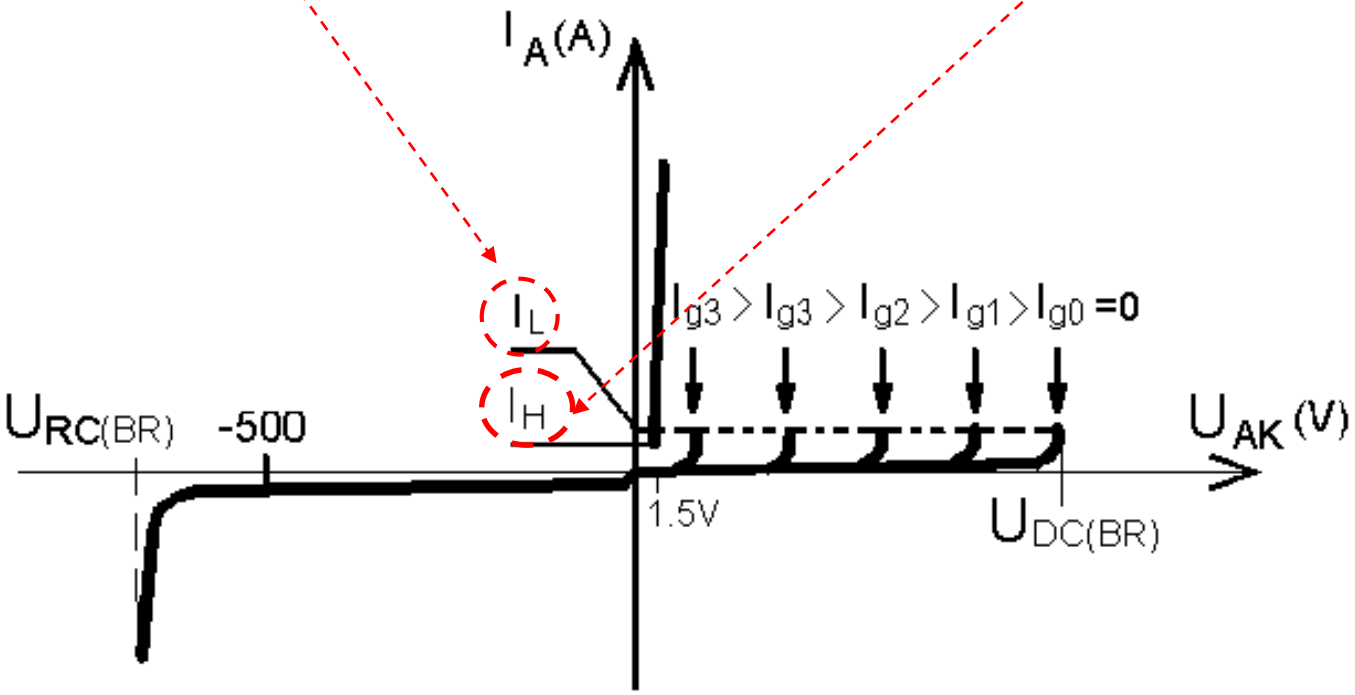
- Jedna tipična statička karakteristika tiristora je data na slici.
- Inverzni deo karakteristike je sličan diodi.
- Kod direktne polarizacije struja tiristora zavisi od napona ali i od struje upravljačke elektrode (gejta).
- Kako raste struja ubrizgana u gejt, tako pada probojni napon u direktnom smeru.
- Ako je impuls struje dovoljno veliki, tiristor će da veoma brzo preći u provodno stanje (za vreme reda veličine nekoliko desetina mikro sekundi).

Volt-amperska karakteristika tiristora u stanju vođenja

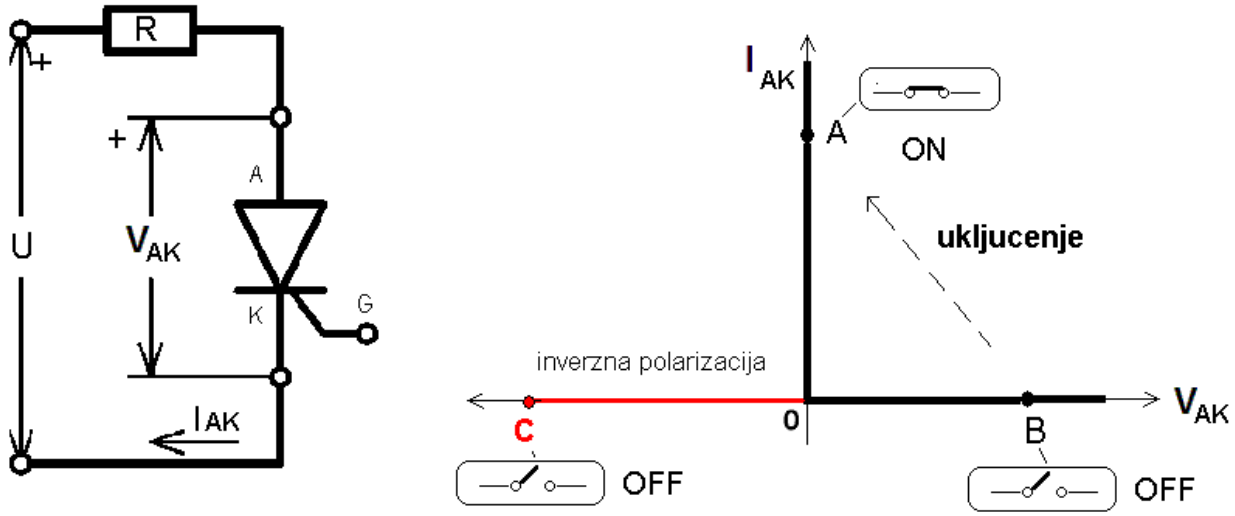
- Kada tiristor pređe u stanje vođenja, struja tiristora praktično zavisi od spoljnjeg kola (opterećenja)
- U tom slučaju njegova volt-amperska karakteristika se može približno predstaviti pravom linijom (slično kao kod energetske diode)
- Ustvari tada se tiristor ponaša slično diodi



Da bi se tiristor uključio potrebno je da struja bude veća od takozvane *struje prihvatanja* (*latching current*) - I_L. Veličina struje prihvatanja kreće se od oko 150 mA (za tiristore reda 10A) do oko oko 1.5 A (za tiristore reda 1000 A). Pri smanjenju struje, u jednom trenutku tiristor ponovo postaje neprovodan. Ova minimalna struja naziva se i *struja držanja* (*holding current*)- I_H. Ispod ove struje tiristor se blokira (isključuje). Veličina struje držanja kreće se od oko 80 mA (za tiristore reda 10 A) do oko oko 0.5 A (za tiristore reda 1000 A). Struja I_H je manja od struje prihvatanja. Odnos struja prihvatanja i držanja je oko 2 do 3, tako da između struja uključenja i isključenja postoji izvestan histerezis.

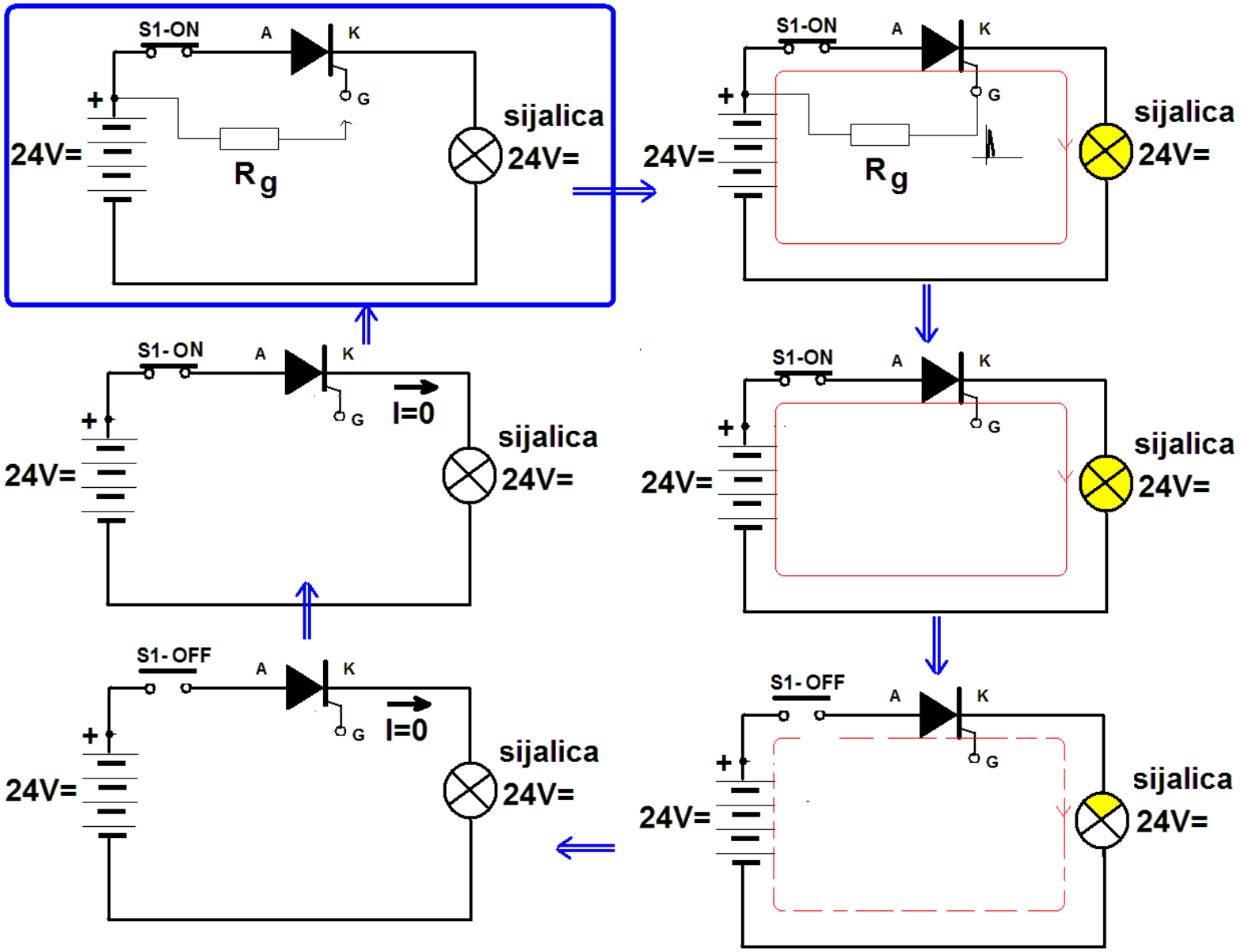


Pretpostavke i pojednostavljenja tiristora u analizi energetskih pretvarača



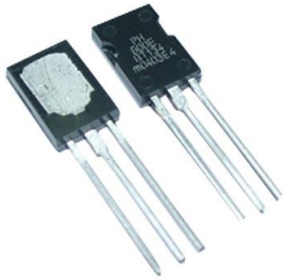
- U analizama rada pretvarača tiristor će biti posmatran kao bistabilni prekidački elemenat koji može biti u stanju uključenosti ili isključenosti.
- Dalje će biti uvedene pretpostavke da su struja prihvatanja I_L, struja držanja I_H, inverzna struja i napon u provodnom stanju jednaki nuli.
- I kod dinamičkih karakteristika će se smatrati da su vremena uključenja i isključenja jednaka nuli osim u slučajevima gde je to drugačije rečeno.
- Granične vrednosti napona i struja današnjih tiristora su reda 5000 V i 5000 A. Sa redno-paralelnim vezama, primenljivost se proširuje na još veće vrednosti tako da se sa njima postižu i najveće snage pretvarača. Ovi pretvarači se koriste u visokonaponskim DC transmisijama.

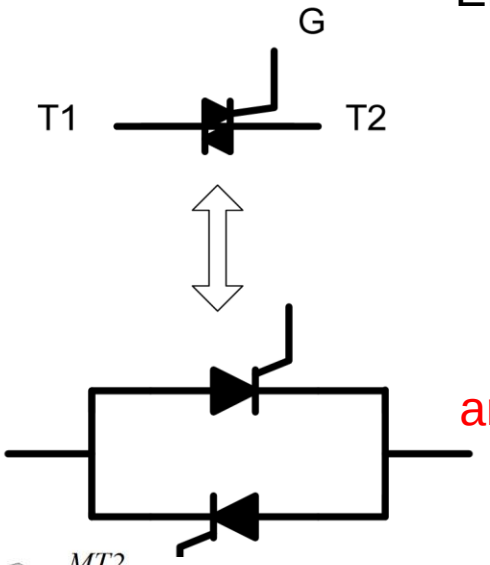
TEST TIRISTORA NA JEDNOSMERNOM NAPONU



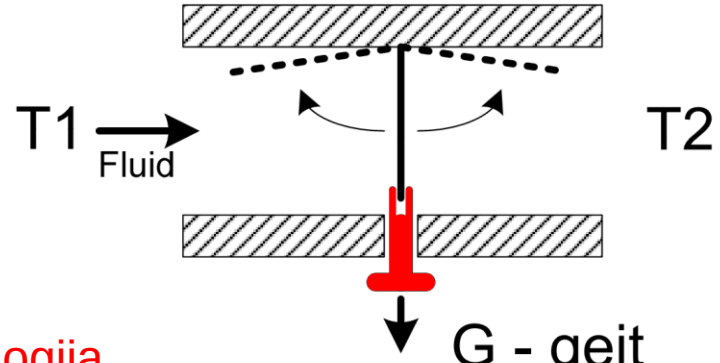
TRIJAK

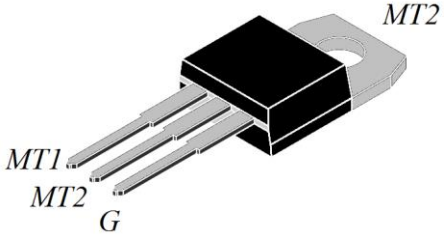
Engl. TRIAC (**TRI**ode for **AC**)

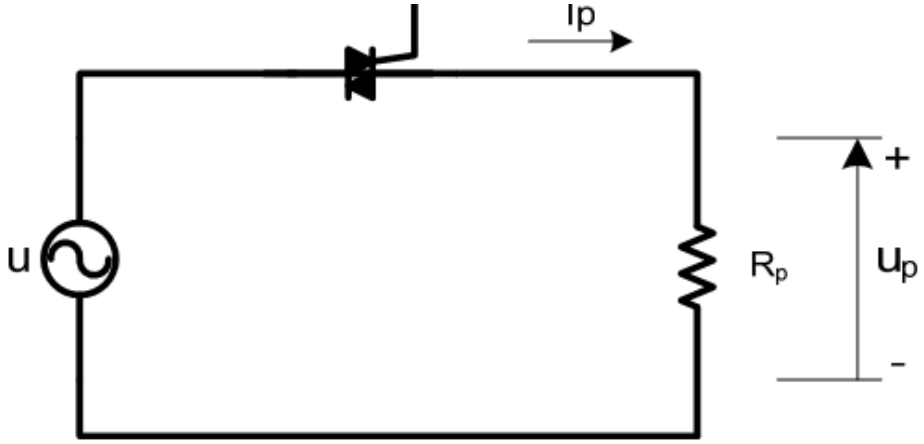


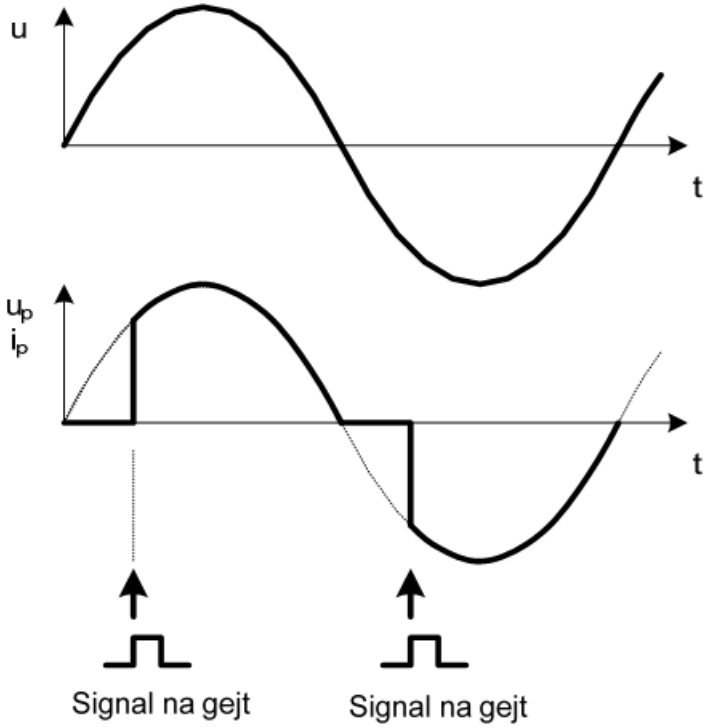


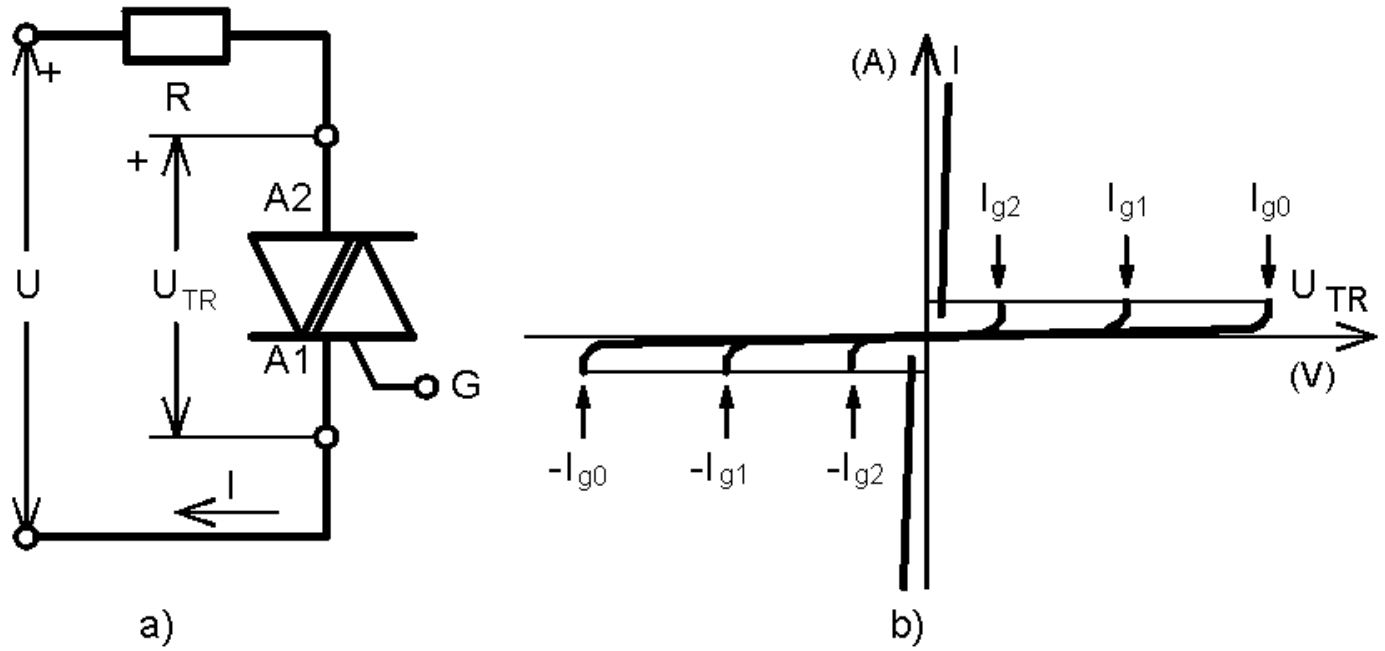
analogija











Trijak; (a)-strujno kolo, (b)-strujno naponska karakteristika

Trijak je petoslojna poluprovodnička komponenta sa izvedene tri elektrode (A1, A2 i G). Naponsko strujna karakteristika mu je donekle slična onoj kod tiristora. Za razliku od njega trijak ima simetričnu karakteristiku za oba polariteta napona. Po svojoj funkciji trijak je ekvivalentan antiparalelnoj sprezi dva tiristora, tako da svakim od njih može da se upravlja u svojoj poluperiodi.

PRIMENA TRIJAKA

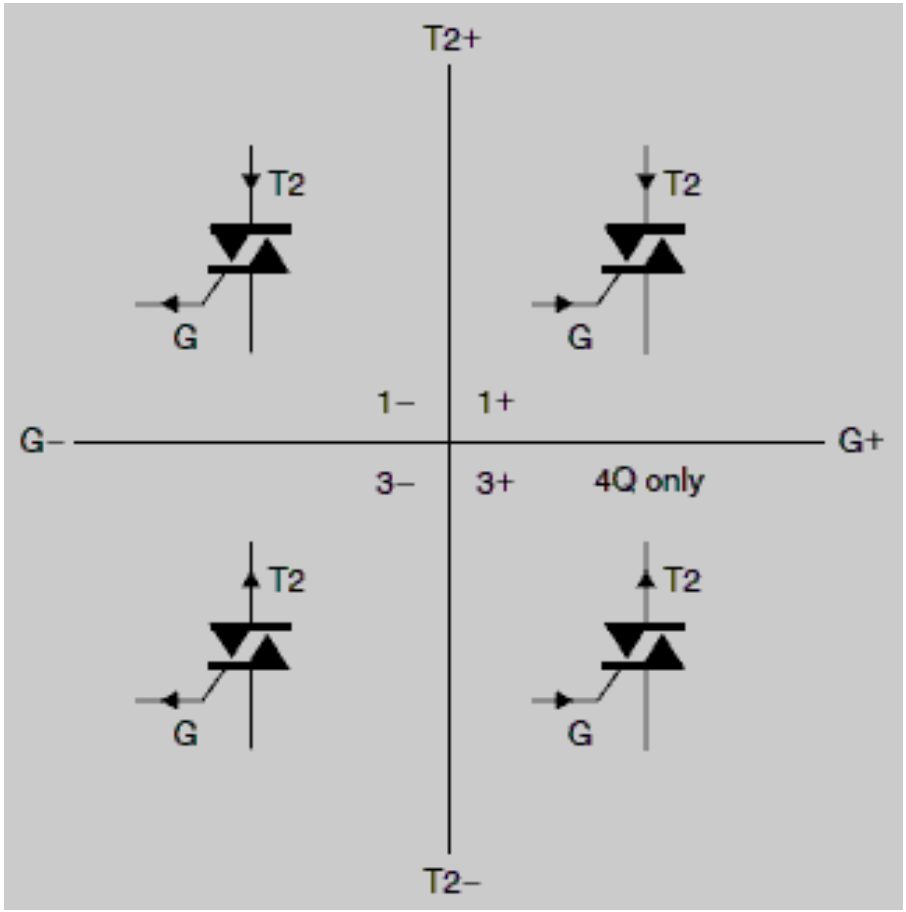
- Trijak se primenjuje za regulaciju naizmeničnog napona.
- Tipične primene su mu regulacija snage grejača, regulacija jačine svetla kod sijalica sa užarenim vlaknom, regulacija brzine obrtanja univerzalnog motora itd.
- Pri radu u kolu sa naizmeničnim naponom, pri prolasku struje kroz nulu, trijak se gasi ali napon odmah menja polaritet, tako da su uslovi za oporavak znatno nepovoljniji nego kod tiristora.
- Ovo je naročiti izraženo kod induktivnih opterećenja.
- Zato se trijak ne može primeniti na višim frekvencijama. Obično se primenjuje samo na mrežnoj frekvenciji.
- Najčešće se sreće za struje do nekoliko desetina ampera, ali postoje i jedinice od više stotina ampera.

UKLJUČENJE TRIJAKA

- Uključenje trijaka u obe poluperiode može se vršiti strujnim impulsima istog ili različitog polaritera.

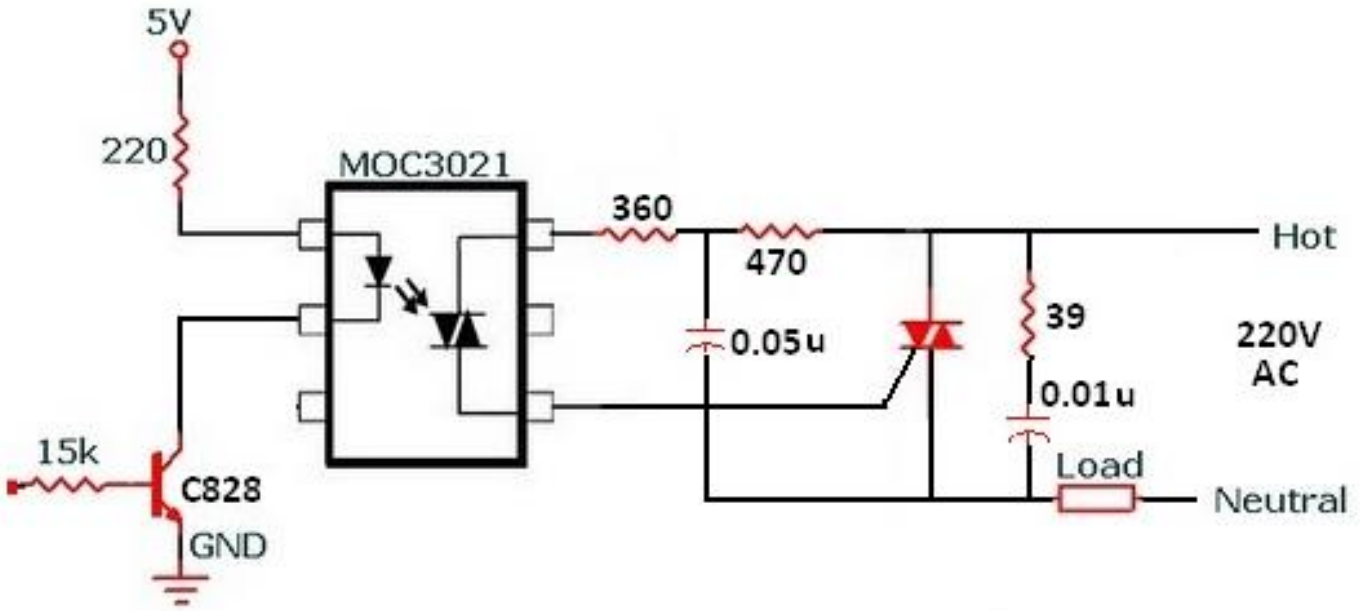
- Proizvođači daju vrednosti minimalne struje gejta za sve četiri moguće kombinacije polariteta napona na priključcima (A1 i A2) i smera struje gejta .

- Moguće kombinacije uključenja trijaka su dati na slici



UKLJUČENJE TRIJAKA (kolo sa optičkom galvanskom izolacijom)

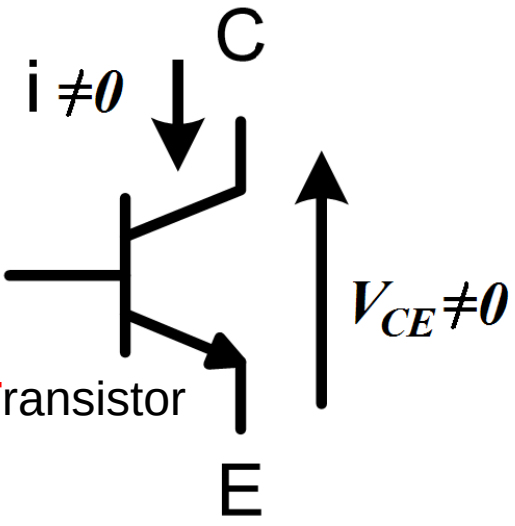
TRIAC kao sklopka
-aplikacije u PLC kontroli
-uP kontrola



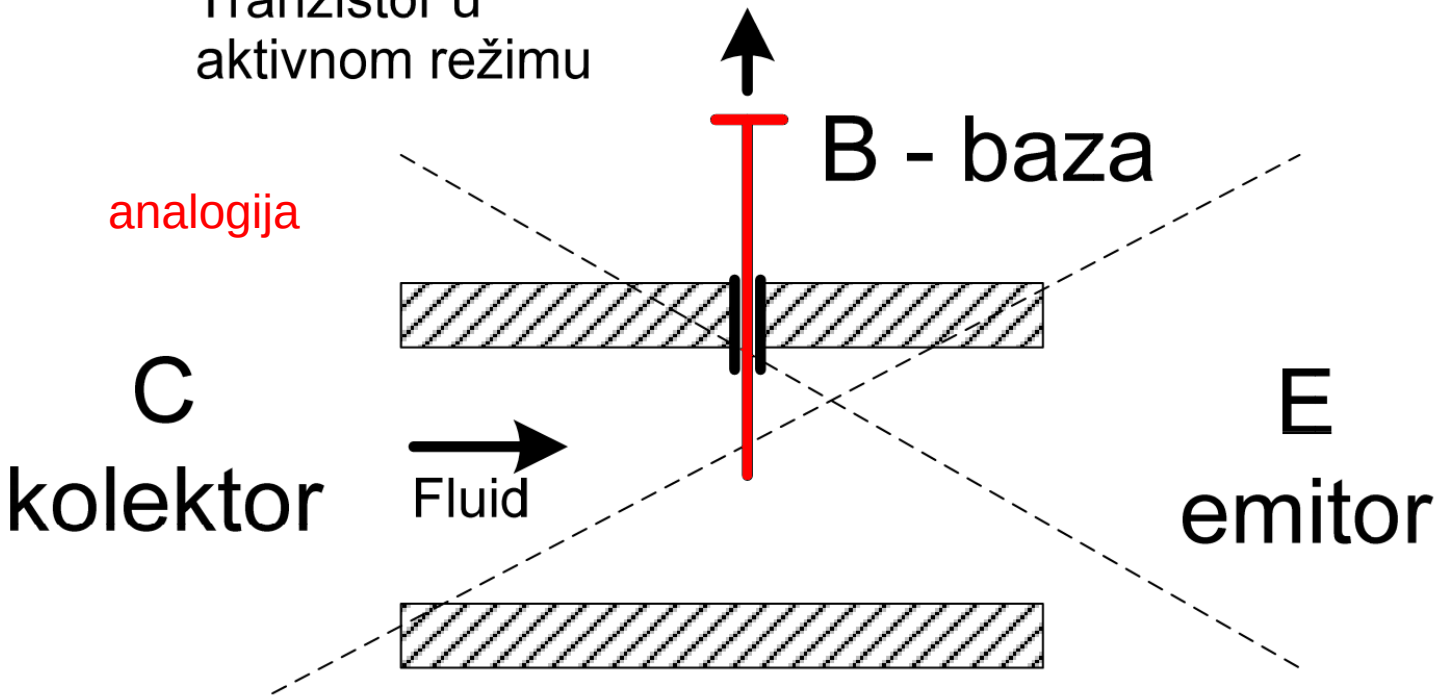
BIPOLARNI TRANZISTOR

BJT

Engl. **B**ipolar **J**unction **T**ransistor

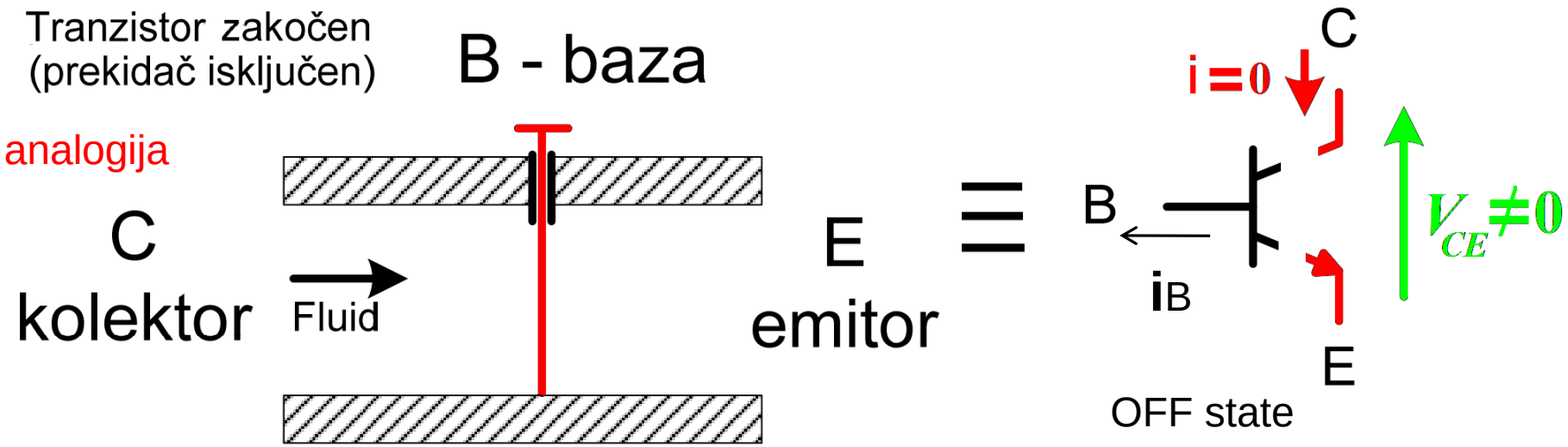


Tranzistor u aktivnom režimu



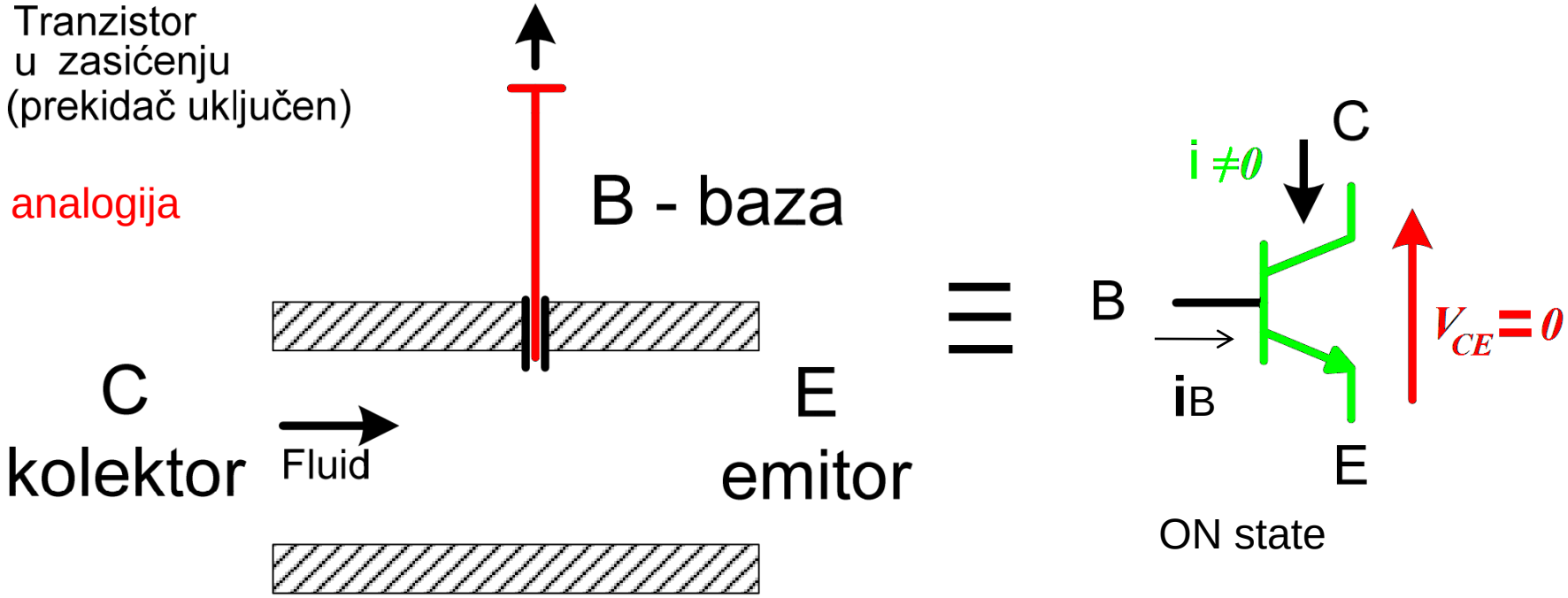
Tranzistor zakočen
(prekidač isključen)

analogija

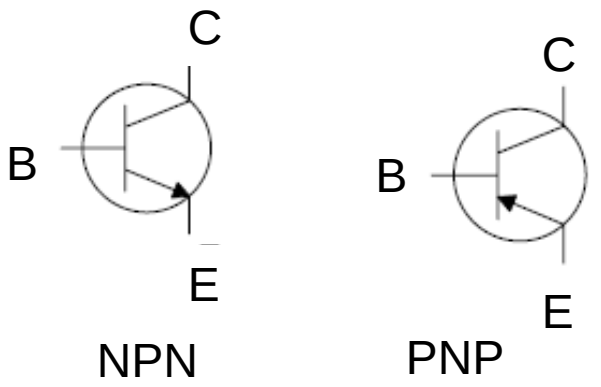


Tranzistor
u zasićenju
(prekidač uključen)

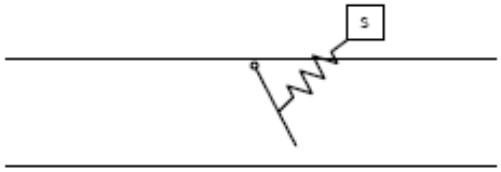
analogija



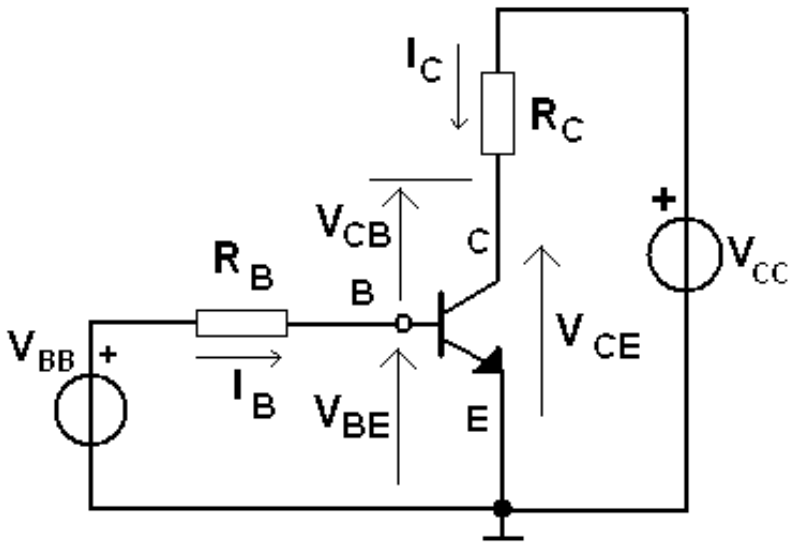
TRANZISTOR



ANALOGNI MEHANIČKI MODEL JE KONTROLISANA KLAPNA U CEVI U KOJOJ STRUJI FLUID



U energetskim pretvaračima je od velikog značaja režim zasićenja tranzistora. U ovom režimu je struja baze toliko velika da su oba spoja direktno polarisana i u sloju baze postoji višak naelektrisanja!!!!!



Pretpostavimo da se tranzistor nalazi u aktivnom režimu.
Dok je tranzistor u aktivnom režimu važi relacija:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

Pretpostavimo da je napon $V_{BE} \approx 0.7V$. Struja baze I_B tranzistora je određena jednačinom:

$$I_B = \frac{V_{BB} - 0.7V}{R_B}$$

Struja kolektora I_C je određena strujnim pojačanjem tranzistora β i strujom baze prema jednačini:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Sa porastom struje baze I_B, raste i struja kolektora I_C, tako da u jednom trenutku napon B-E postaje:

$$V_{BE} \geq V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \cdot \beta \cdot I_B$$

$$V_{CB} = -V_{BE} + V_{CE} \longrightarrow V_{CE} \langle V_{BE} \rightarrow V_{CB} \langle 0$$

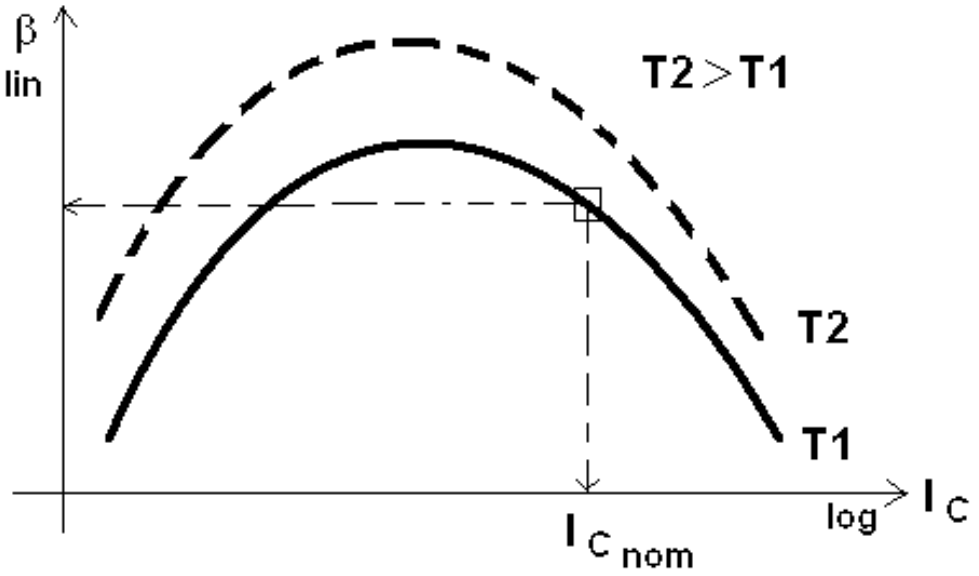
a to znači da je P-N spoj B-C postao direktno polarisan, odnosno da se tranzistor nalazi u zasićenju.

STRUJNO POJAČANJE

Strujno pojačanje BJT u spoju sa zajedničkim emiterom se definiše kao odnos struje kolektora i struje baze :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

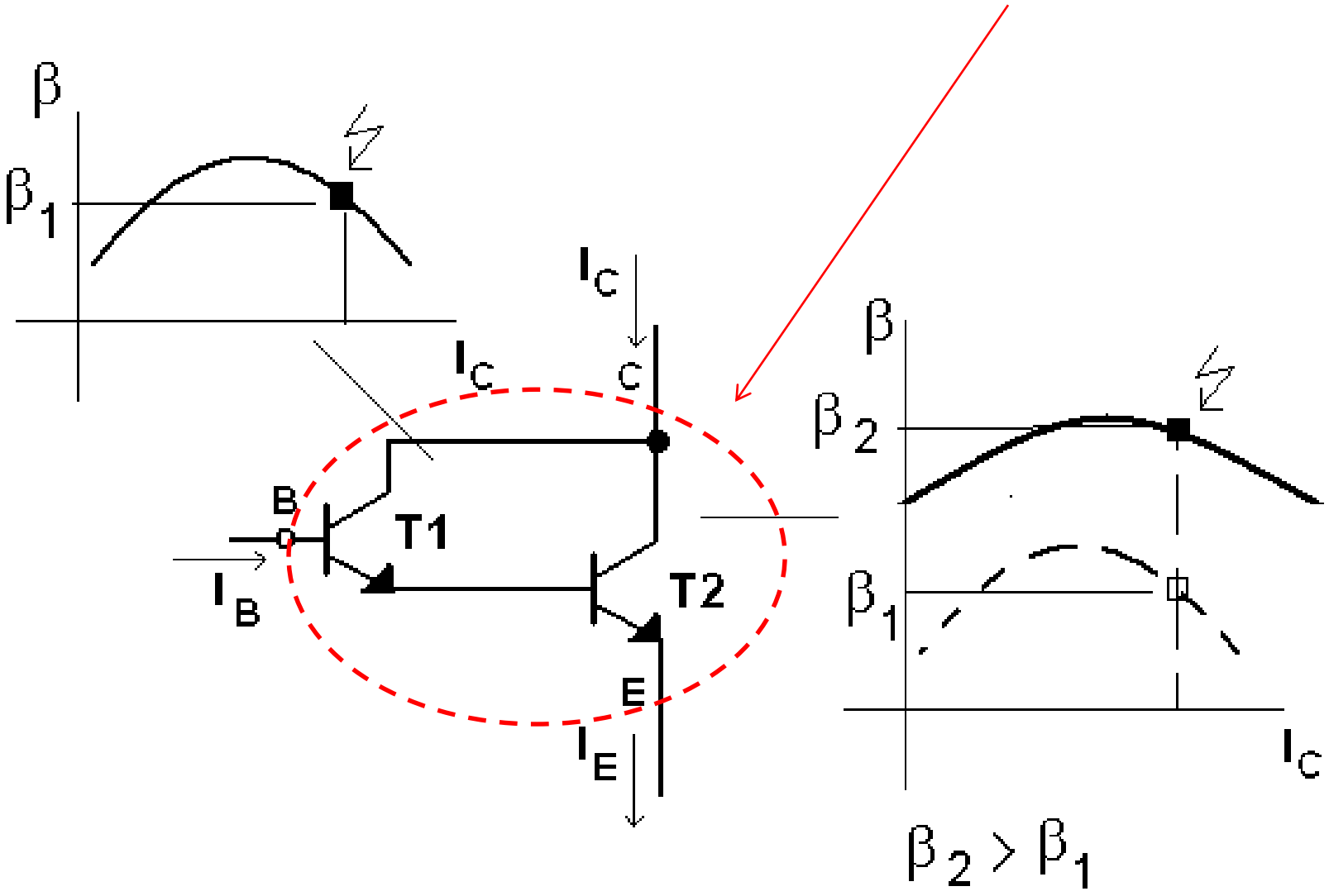
- Ovo pojačanje opada pri malim i veoma velikim strujama kolektora.
- Sa porastom temperature strujno pojačanje raste.
- Tipična karakteristika strujnog pojačanja za tranzistore snage je data na slici
- Obično je u katalozima proizvođača podela za β linearna, dok je podela za struju *Ic* logaritamska



Zavisnost strujnog pojačanja od struje kolektora za dve različite temperature T1 i T2

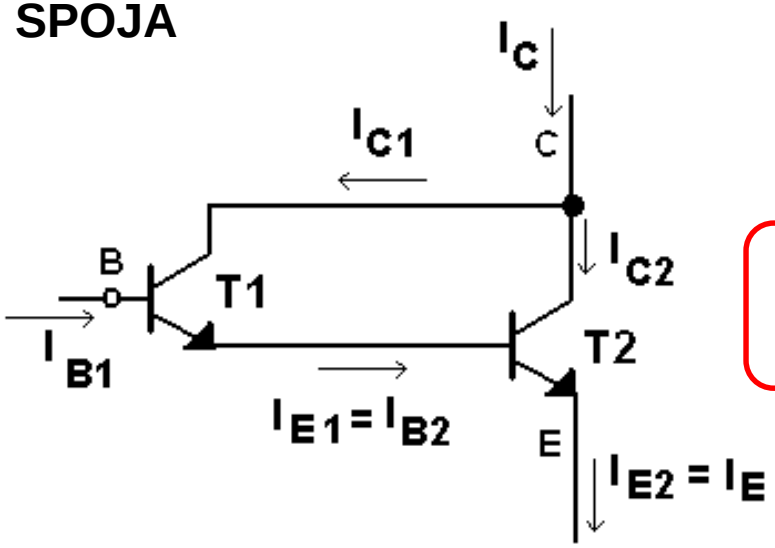
Kako postići veće strujno pojačanje pri većim strujama?

Jedan od načina je korišćenje tranzistora u tzv. Dralington spoju



SLEDI ANALIZA!!!!

ANALIZA POJAČANJA DARLINGTON SPOJA



$$\beta_1 = \frac{I_{C1}}{I_{B1}} \qquad \beta_2 = \frac{I_{C2}}{I_{B2}}$$

$$I_{E1} = I_{C1} + I_{B1}$$

$$I_{E1} = \beta_1 I_{B1} + I_{B1} = (\beta_1 + 1) \cdot I_{B1}$$

$$I_C = I_{C1} + I_{C2}$$

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} \qquad I_{E1} = I_{B2}$$

$$I_{C2} = \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

$$I_C = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 (\beta_1 + 1) I_{B1}$$

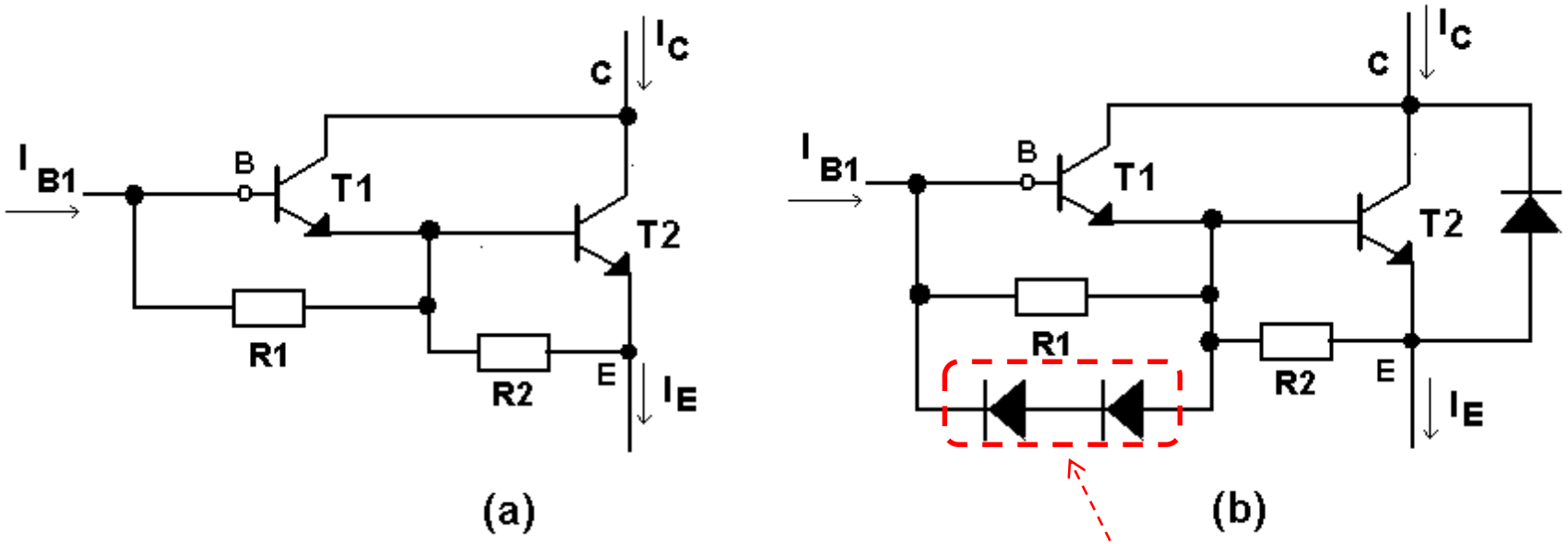
$$\beta_1 \rangle\rangle 1 \qquad I_C = (\beta_1 + \beta_2 \beta_1) I_{B1} = \beta_1 (\beta_2 + 1) I_{B1}$$

$$\beta_2 \rangle\rangle 1$$

REZULTUJUĆE POJAČNJE

$$\beta_D = \frac{I_C}{I_{B1}} \approx \beta_1 \beta_2$$

Praktična realizacija Darlington spoja je nešto drugačija od prethodne predstave. U praksi se između spojeva B-E pripadajućih tranzistora T1 i T2, stavljaju otpori R1 i R2.Ovi otpori služe da se inverzne struje zasićenja kolektorskih spojeva zatvore kroz njih i pri tome generišu vrlo male napone.



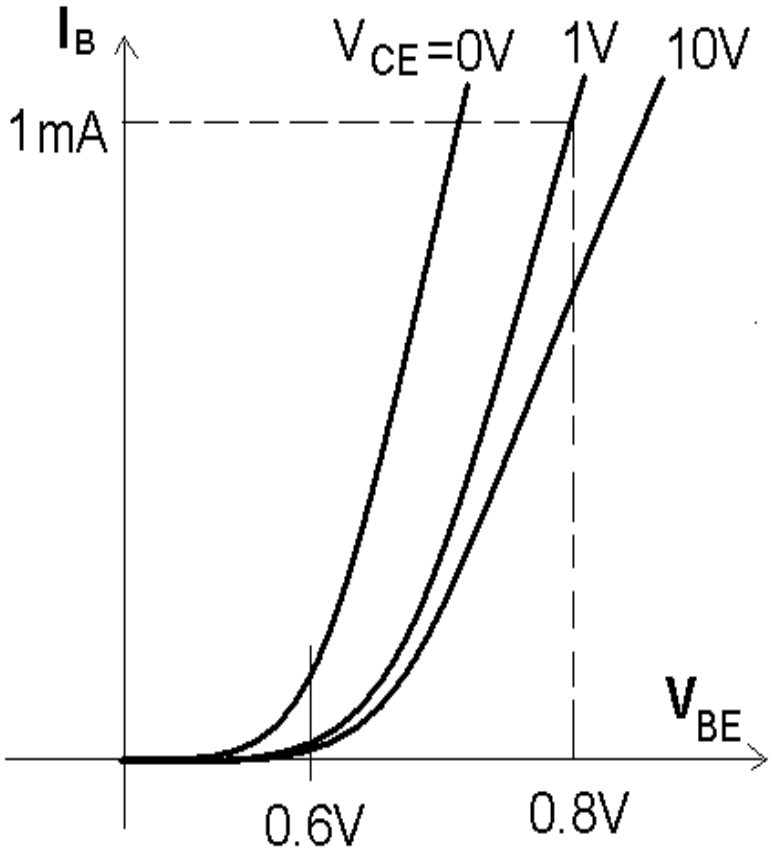
Praktična realizacija Darlington sprege, (a)-otpori za zatvaranje struja "curenja", (b)-ubrzavanje gašenja.

U realnim aplikacijama BJT u Darlington sprezi, tranzistor T2 se obično nalazi u dubokom zasićenju. Ovo značajno usporava njegovo isključenje. Za ubrzavanje isključenja T2, a stoga i celog Darlington spoja, se koriste tzv. *speed-up* diode koje se vezuju u emitorsko kolo tranzistora T1.

Statičke karakteristike BJT

- Statičke karakteristike koje se koriste u praktičnim primenama su:
  - ulazna (karakteristika spoja B-E)
  - izlazna karakteristika, odnosno zavisnost struje kolektora od napona C-E (volt-amperska karakteristika)

Ulazne karakteristike BJT



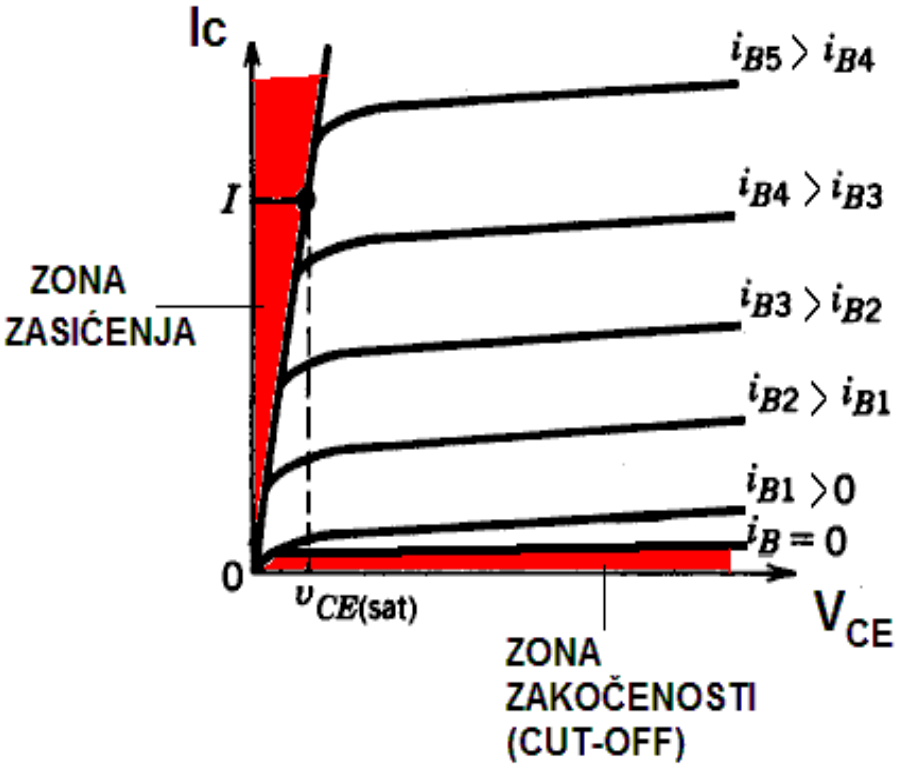
Ulazna statička karakteristika BJT

Ulazno kolo tranzistora (spoj B-E) je poluprovodnička dioda, pa su i statičke krive $I_B = I_B(V_{BE})$ slične I-V krivama diode, ali je važan i uticaj parametra V_{CE}

Za $|V_{BE}| \rangle |V_{CE}|$ spoj BC je propusno je polarisan, što znači da i kolektor injektira naelektrisanje u bazu, te time dobijamo velike struje baze I_B već i za male vrednosti V_{BE} .

Kada je $|V_{BE}| \langle |V_{CE}|$ spoj B-C je polarisan nepropusno, te $I_B = I_B(V_{BE})$ slabo zavisi od V_{CE}: smanjenjem I_B uz isti V_{BE} pri povećanom V_{CE} dovodi do suženja baze proširenjem područja osiromašenja spoja B-C, ali je taj učinak mali zbog slabog dopiranja kolektora uz spoj B-C.

Izlazne karakteristike BJT

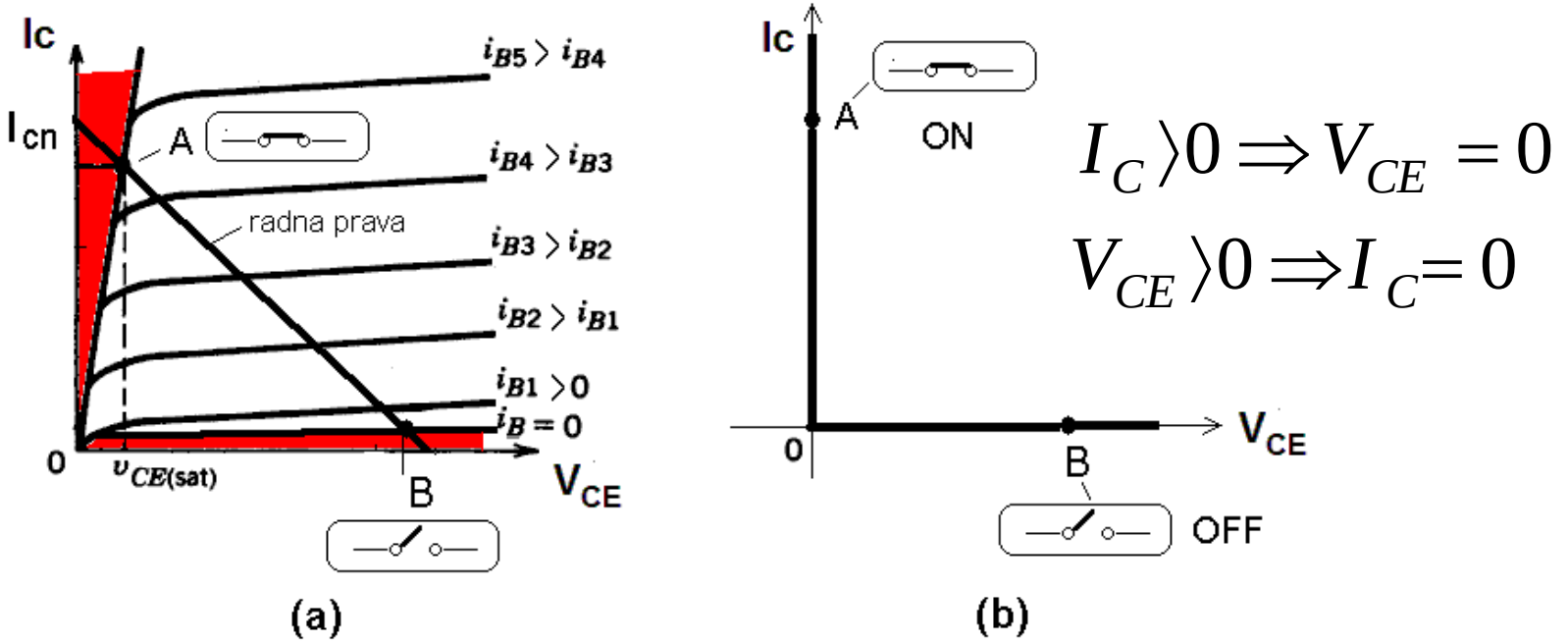


Izlazna karakteristika BJT tranzistora je ustvari zavisnost kolektorske struje I_C od napona spoja C-E, odnosno V_{CE} pri određenoj struji baze I_B.

Iz karakteristika $I_C = I_C(V_{CE})$ koje su date na slici se zaključuje da je BJT kontrolisan strujom baze.
U radnoj I-V oblasti se uočavaju tri zone. Zona zasićenja , zona zakočenosti (blokiranja) i zona aktivnog režima rada.

Zona zasićenja BJT koja se karakteriše značajnim strujama I_C i malim naponom $v_{CE(sat)}$. Zona blokiranja BJT (cut-off) se ima kada je struja baze $i_B = 0$. U ovoj zoni se imaju na BJT značajni naponi V_{CE} i kroz njih teče veoma mala struja I_C, koja predstavlja inverznu struju zasićenja kolektorskog spoja $I_C(i_B = 0) = I_{CBO}$.

BJT najčešće koristi u energetskim pretvaračima kao prekidački elemenat, tako da mu se radna tačka nalazi u jednoj od ove dve zone

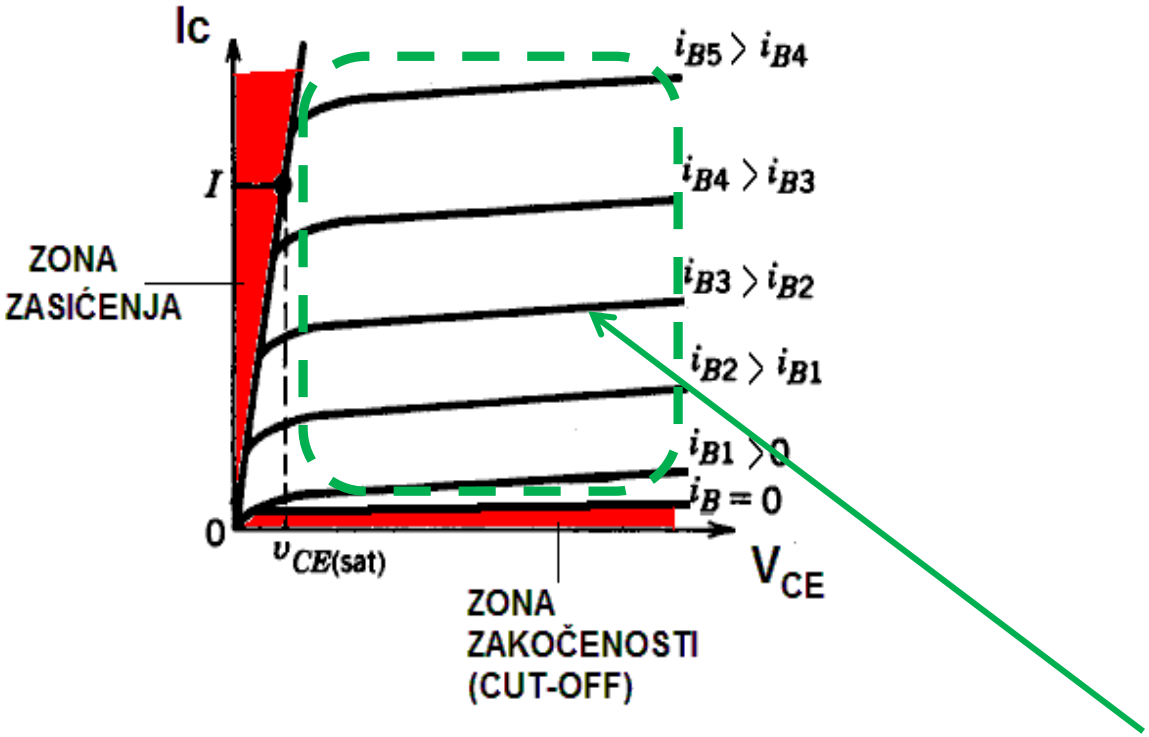


Prekidačka V-A karakteristika BJT, (a)-realna, (b)-idealna

Radna tačka tranzistora je određena presekom radne prave (karakteristika opterećenja) i V-A karakteristike tranzistora, za određenu struju baze i_B. Kada je struja baze značajna, na primer $i_B = i_{B5}$, tada je radna tačka A u oblasti zasićenja. U ovoj oblasti tranzistor je uključen, (stanje ON) i približno je ekvivalentan zatvorenom prekidaču. U stvarnosti on nije idealan prekidač već je na njegovim priključcima C-E , napon $v_{CE} = v_{CE(SAT)} \approx 1V$.

Kada je struja baze $i_B = 0$, tada je radna tačka B u oblasti blokiranja. U ovoj oblasti tranzistor je isključen (stanje *cut-off*) i ekvivalentan je otvorenom prekidaču. U stvarnosti kroz njega teče veoma mala struja I_C, koja predstavlja inverznu struju zasićenja kolektorskog spoja $I_C(i_B = 0) = I_{CBO}$.

OBLAST AKTIVNOG REŽIMA



Oblast između zone zasićenja i zone blokiranja se naziva **oblast *aktivnog režima*** *rada* (linearni režim).

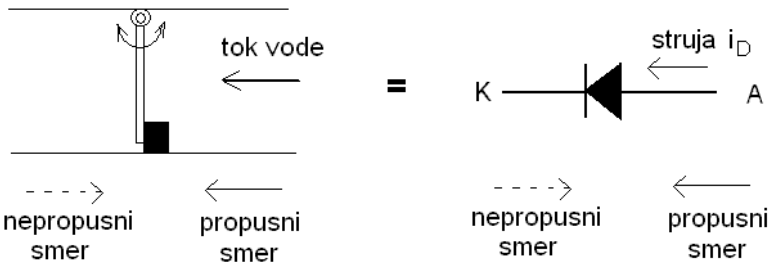
U ovoj zoni se imaju značajni disipacioni gubici.

U energetskim pretvaračima se BJT u ovoj zoni koristi samo u kratkotrajnim (prelaznim režimima) kao što su uključenje i isključenje.

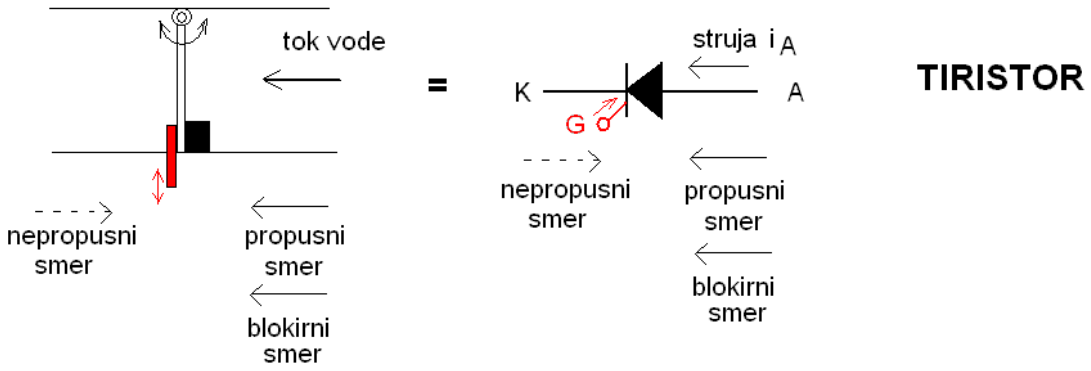
HIDRAULIČKE ANALOGIJE PREKIDAČKIH ELEMENTA

HIDRAULIKA

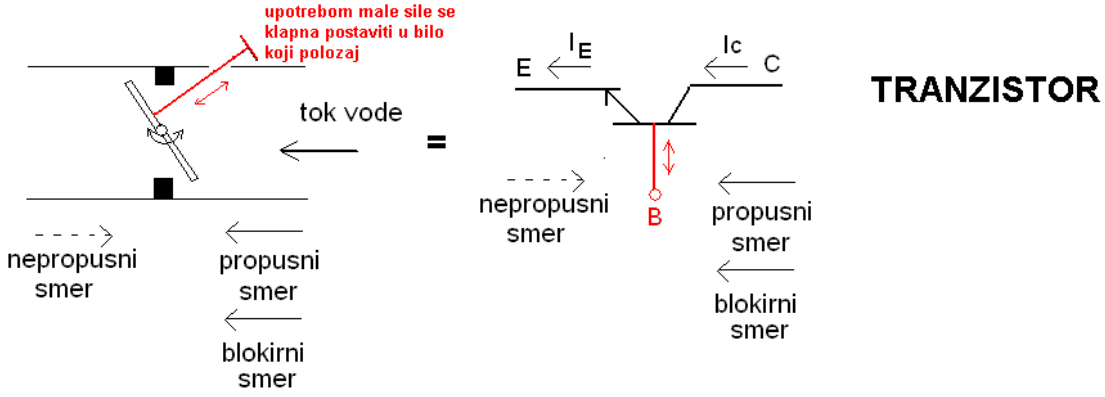
ELEKTRONIKA



DIODA

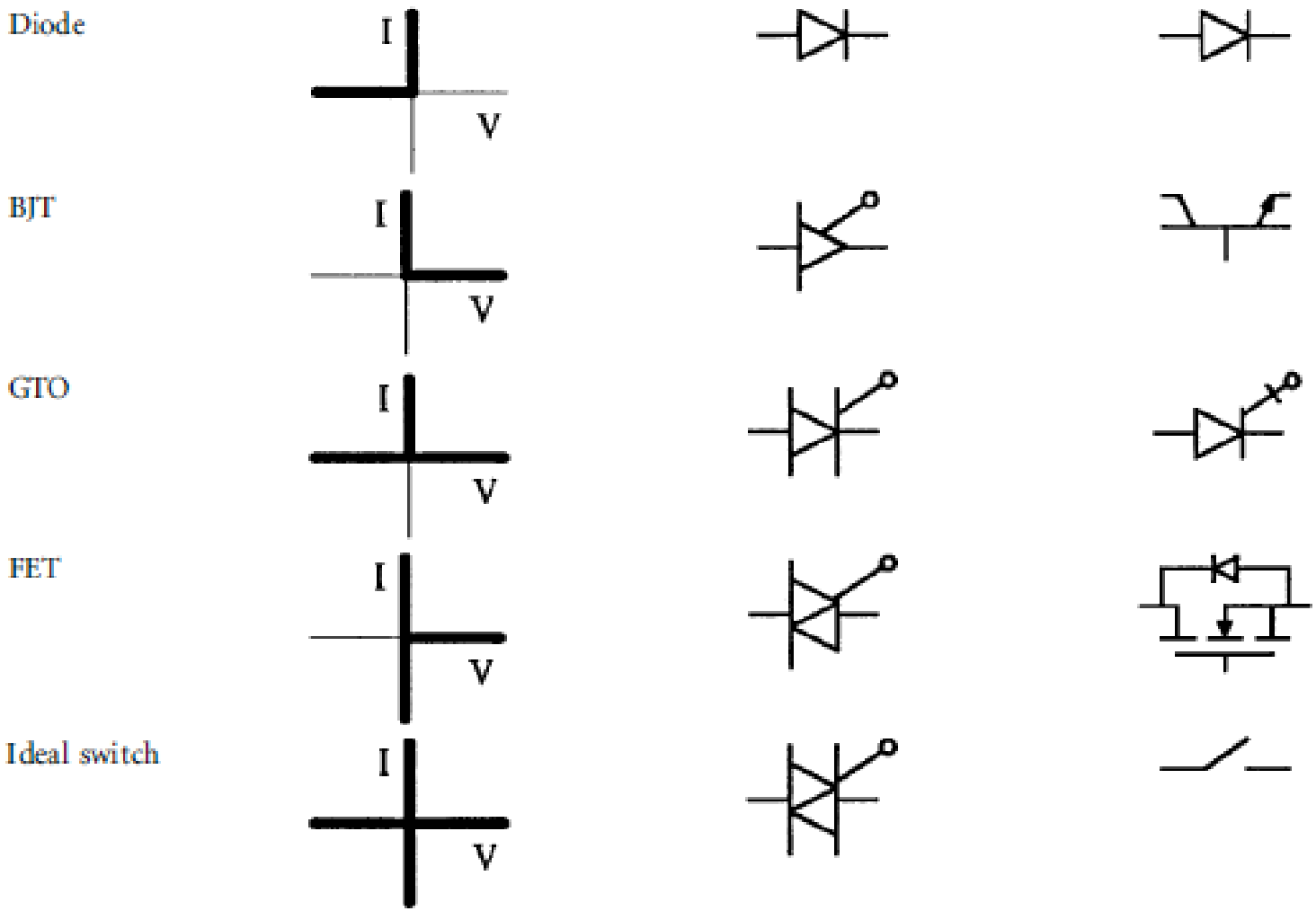


TIRISTOR



TRANZISTOR

IDEALNE KARAKTERISTIKE PREKIDAČKIH ELEMENATA



Ograničenja u pogledu maksimalnih napona i struja:

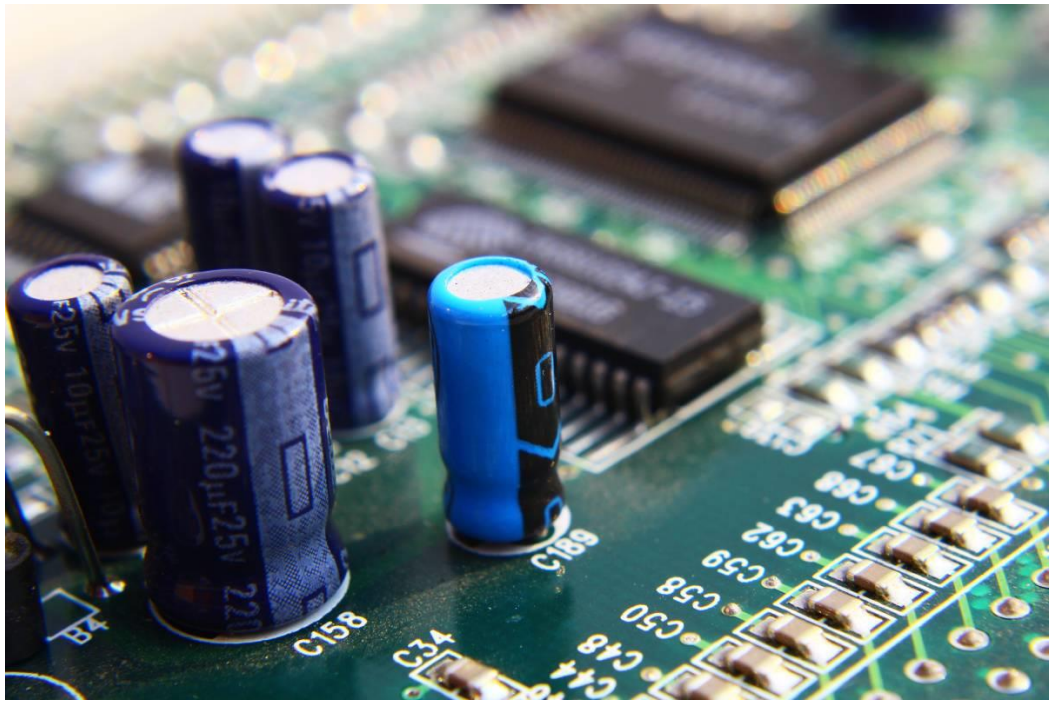
Polupr. komponenta	**Napon (V)**	**Struja (A)**
Tiristor (SCR)	6000	3500 (5000)
GTO / IGCT	4500	3000 (4500)
Triak	800	40
Bipolarni tranzistor	1200	800
MOSFET	500 (1200)	140
IGBT	600 (3500)	50 (1200)
SIT	800	60
SITH	1200 (4000)	800 (2200)
MCT	600 (3000)	60

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE (NET)

PREDMET: Električni Pretvarači Snage

AKUMULACIONI ELEMENTI U KOLIMA ENERGETSKIH PRETVARAČA



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.

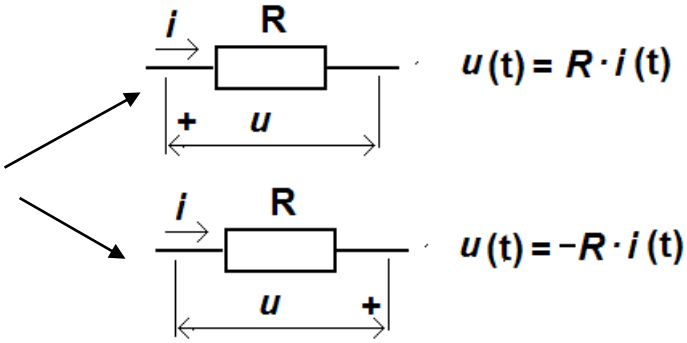
UVOD

- Korišćenje i efikasnost uređaja energetske elektronike (u koje spadaju i elektroenergetski pretvarači) mogu biti značajno poboljšani razumevanjem prekidačkih karakteristika elemenata energetske elektronike (dioda, tiristora, trijaka, tranzistora,.....)
- Pošto u procesu pretvaranja energije pored prekidačkih elemenata učestvuju i akumulacioni elementi (induktivnosti, transformatori, kondenzatori i sl.) biće izložene njihovi osnovni principi rada i karakteristike, kako bi se bolje razumele topologije, upravljačka kola elektroenergetskih pretvarača i principi električnog pretvaranja energije u njima.
- Dva najbitnija akumulaciona elementa su INDUKTIVNOST (prigušnica) i KAPACITIVNOST (kondenzator)
- U nastavku detaljnije o ovim elementima

OSNOVNI ZAKONI KOJI SU NAM POTREBNI

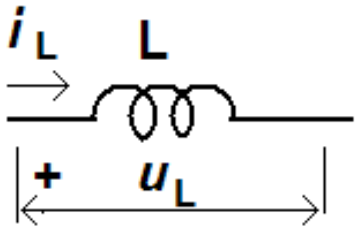
- **OMOV ZAKON**

$$i_R = \frac{1}{R} u_R$$



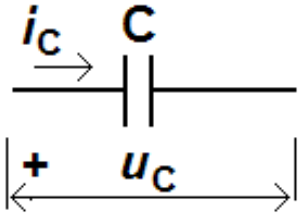
- **FARADEJEV ZAKON ELEKTROMAGNETNE INDUKCIJE**

$$L\frac{di_L}{dt} = u_L; \quad i_L = \frac{1}{L}\int u_L dt$$

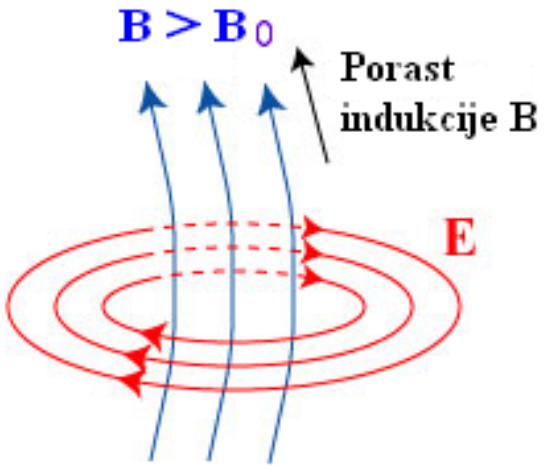


- **KULONOV ZAKON**

$$C\frac{du_C}{dt} = i_C; \quad u_C = \frac{1}{C}\int i_C dt$$



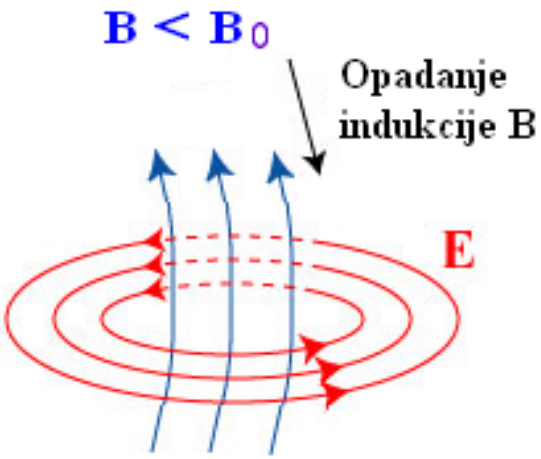
FARADEJEV ZAKON ELEKTROMAGNETNE INDUKCIJE (LENCOVO PRAVILO)



indukovana
elektro motorna sila
(EMS)

$$E \sim \left(- \frac{B - B_0}{t - t_0} \right)$$

E<0



indukovana
elektro motorna sila
(EMS)

$$E \sim \left(- \frac{B - B_0}{t - t_0} \right)$$

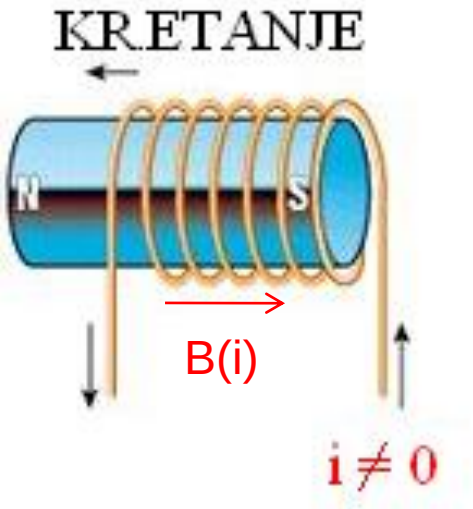
E>0

ZAKLJUČAK: Indukovana elektromotorna sila E, posledica izvornog magnetnog polja B prouzrokuje struju koja se svojim magnetnim poljem suprostavlja promeni izvornog magnetnog polja B.

USTVARI NEMOGUĆE JE NAGLO PROMENITI MAGNETNI FLUKS!!!! OSOBINA INERCIJE ("TROMOSTI“) FLUKSA

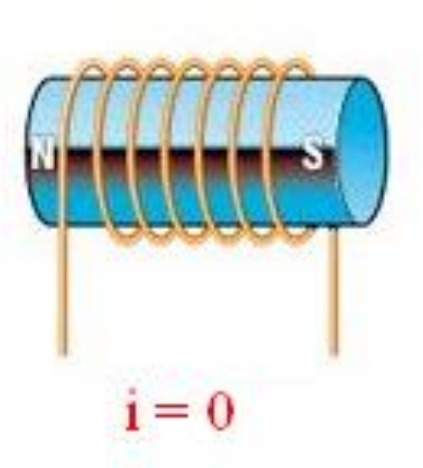
PRIMER: POMERANJE MAGNETA KROZ NAMOTAJE VAZDUŠNE PRIGUŠNICE

(A)



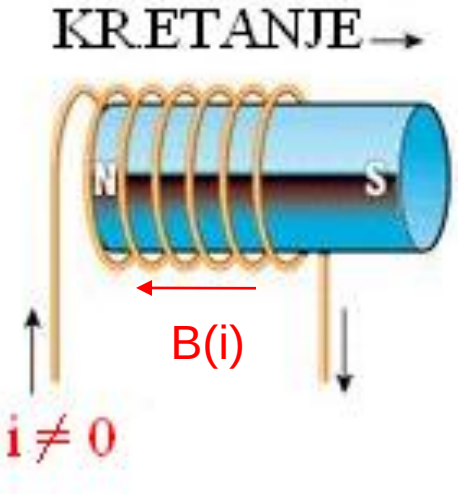
U ovom slučaju se indukovana struja suprostavlja promeni (smanjenju) magnetnog fluksa u induktivnosti stoga je indukovana struja različita od 0

(B)



Nema pomeranja magneta pa nema ni promene magnetnog fluksa kroz namotaje te je i indukovana struja jednaka 0

(C)



U ovom slučaju se indukovana struja suprostavlja promeni (povećanju) magnetnog fluksa u induktivnosti stoga je indukovana struja različita od 0, ali suprotnog smera u odnosu na slučaj (A)

INDUKTIVNOST KAO AKUMULACIONI ELEMENAT

•NEOBIČNO ZNAČAJAN AKUMULACIONI ELEMENAT U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI JE INDUKTIVNOST (PRIGUŠNICA).

•ZA RAZUMEVANJA RADA POJEDINIH TOPOLOGIJA ENERGETSKIH PRETVARAČA JAKO JE BITNO SHVATITI MAGNETNU INERCIJU (“TROMOST”) OVOG AKUMULACIONOG ELEMENTA

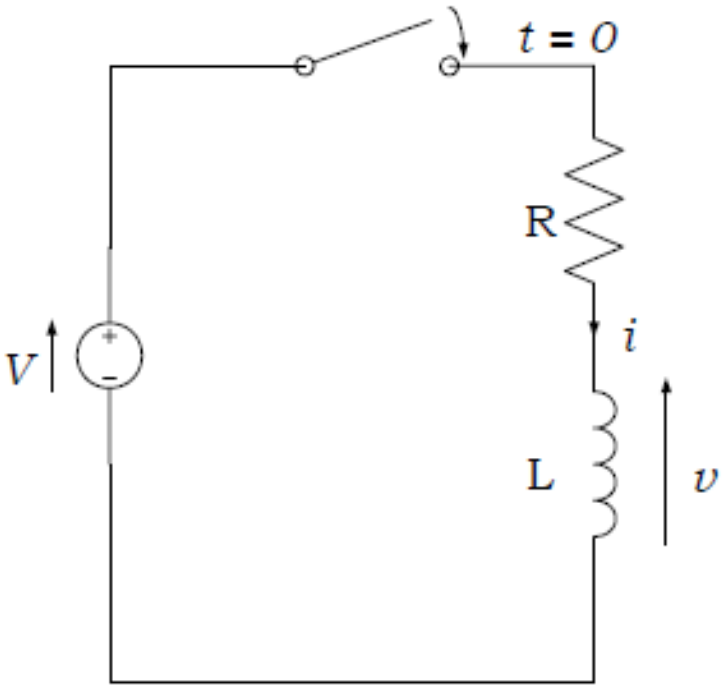
•U NASTAVKU ĆE BITI IZVRŠENA ANALIZA PONAŠANJA OVOG ELEMENTA

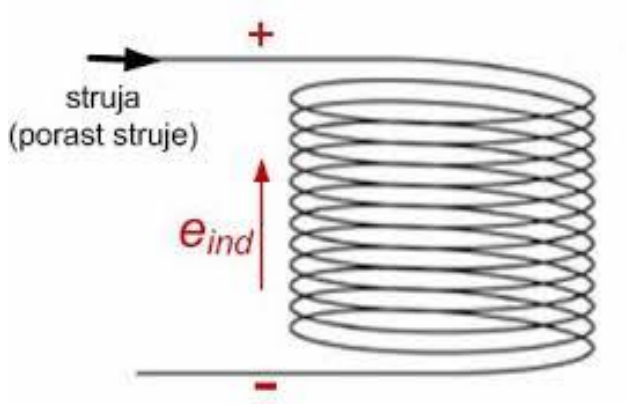
• IDEALNA INDUKTIVNOST (UNUTRAŠNJA OTPORNOST NULA)

•REALNA INDUKTIVNOST IMA NEKU KONAČNU VREDNOST OTPORNOSTI

• DAKLE PREDSTOJI DETALJNA ANALIZA ***R-L*** KOLA

POSMATRAJMO PRELAZNE POJAVE NA INDUKTIVNOSTI *L* KOJA IMA AKTIVNU OTPORNOST *R*



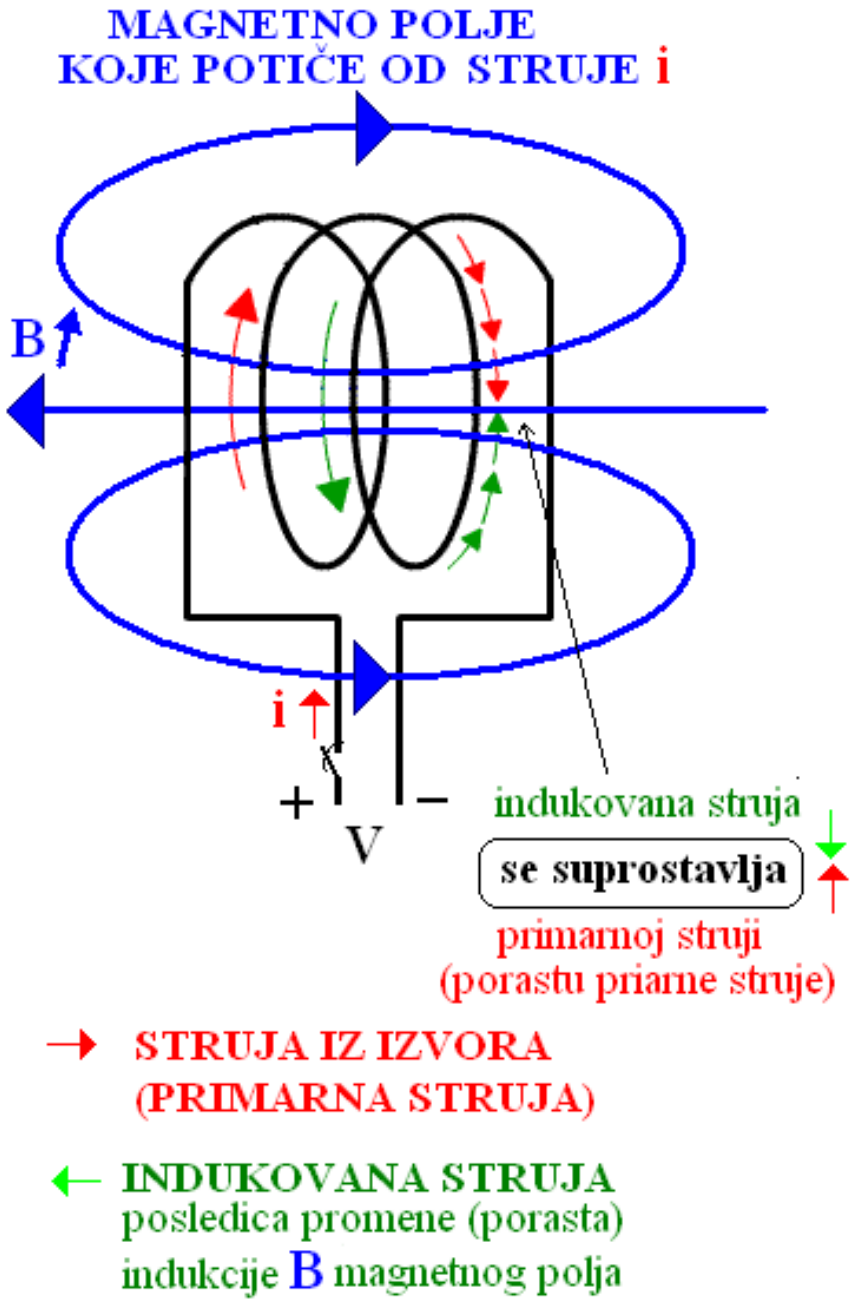


Svaka se realna indutivnost (prigušnica) može predstaviti kao redna veza aktivne otpornosti *R* i induktivnosti *L.*

Ako dovedemo napon u kolu u kojem je vezana realna induktivnost (uključenjem prekidača) struja će od početne vrednosti *i=0 do svoje stacionarne vrednosti i = V/R tokom vremena menjati svoju vrednosti.* *Koje su to vrednosti?*

Promena struje će indukovati napon samoindukcije, koji će se po *Lenzovom zakonu suprotstavljati promeni struje, tj. usporavće njen* porast.

Dakle *RL kolo* ima na početku uspostavljanja struje određenu magnetnu inerciju



ŠTA SE USTVARI DEŠAVA U PRIGUŠNICI UKLJUČENJEM PREKIDAČA ???

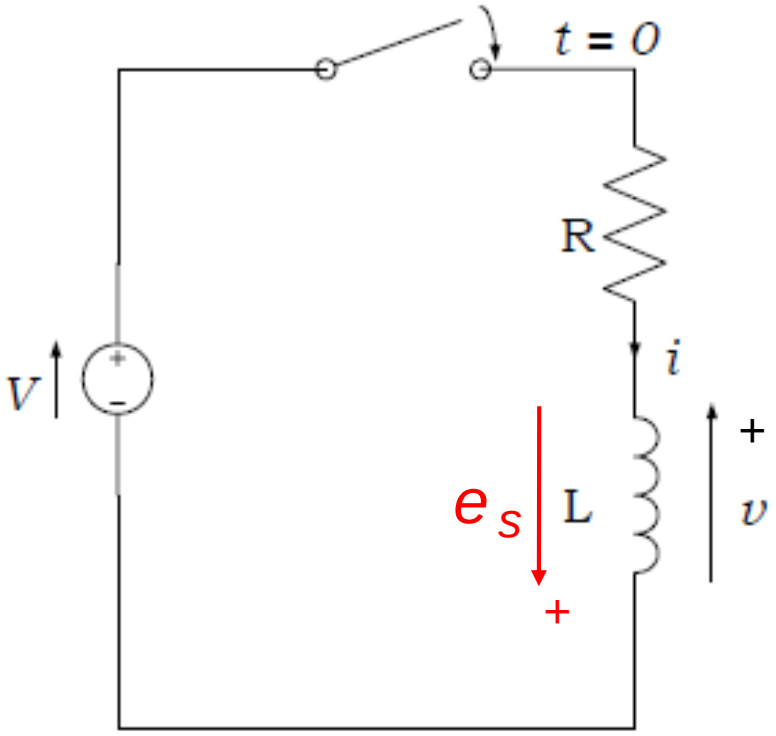
-SLUČAJ KADA SE USPOSTAVLJA MAGNETNI FLUKS, ODNOSNO MAGNETNA INDUKCIJA B

-USTVARI DOLAZI DO PORASTA INDUKCIJE tj. **B↑**

-INDUKOVANA STRUJA SE SUPROSTAVLJA PORASTU STRUJE IZ IZVORA (PRIMARNOJ STRUJI)

Promena struje će indukovati napon samoindukcije, koji će se po *Lenzovom zakonu suprotstavljati promeni struje, tj. usporavaće njen* porast.

ANALIZA *RL* KOLA



$e_s = - d\Phi/dt$

Φ- fluks u induktivnosti

Primenom II Kirhofovog zakona se dobija:

$$V + e_s = i \cdot R$$

$$V - L\frac{di}{dt} = i \cdot R$$

$$\frac{V}{R} - \frac{L}{R} \cdot \frac{di}{dt} = i$$

$$I - i = \tau \frac{di}{dt}$$

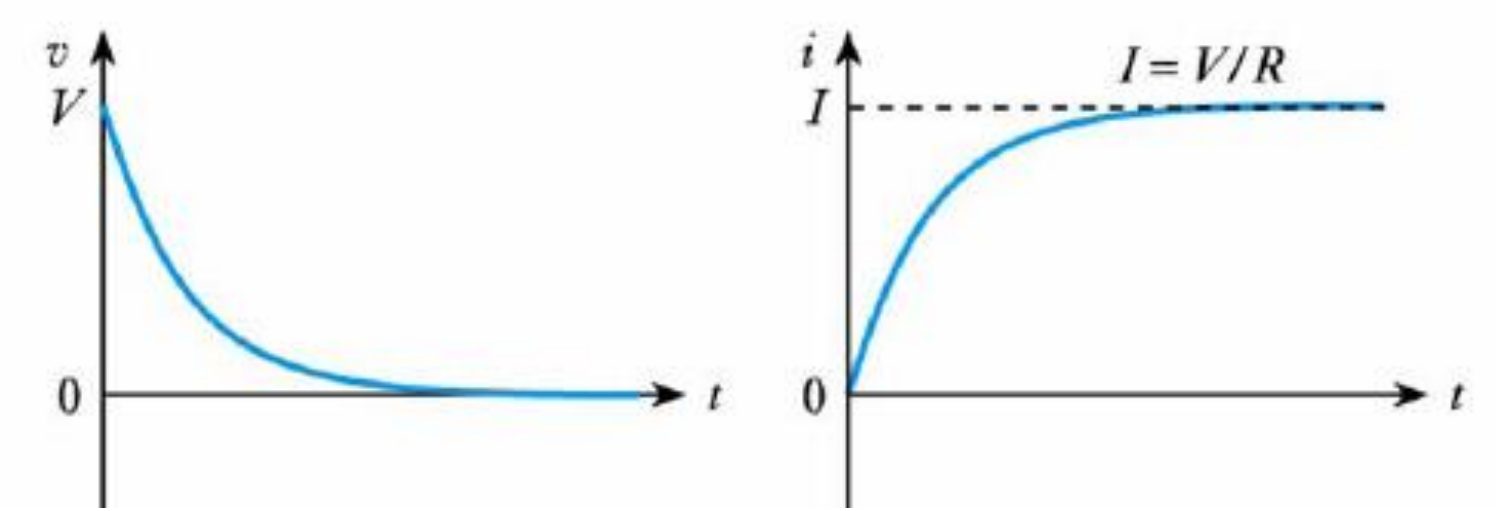
V/R je konačna (stacionarna) vrednost struje , a L/R je veličina koja ima dimenzije vremena, pa se zove vremenska konstanta kola i označava se τ

Rešenje diferencijalne jednačine

$$I - i = \tau \frac{di}{dt}$$

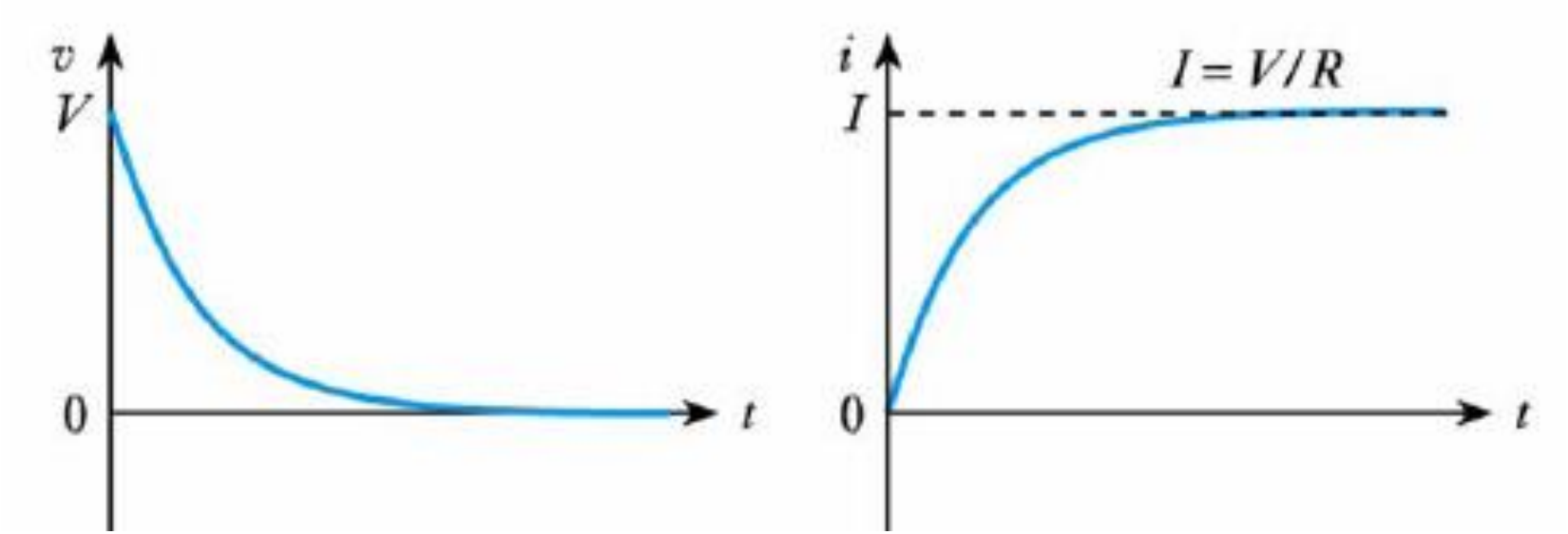
uz uslov i=0 za t=0, daje vrednost struje (inače se ona naziva promenljiva stanja):

$$i = I\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$



Napon i struja induktivnosti (prigušnice) nakon uključenja prekidača

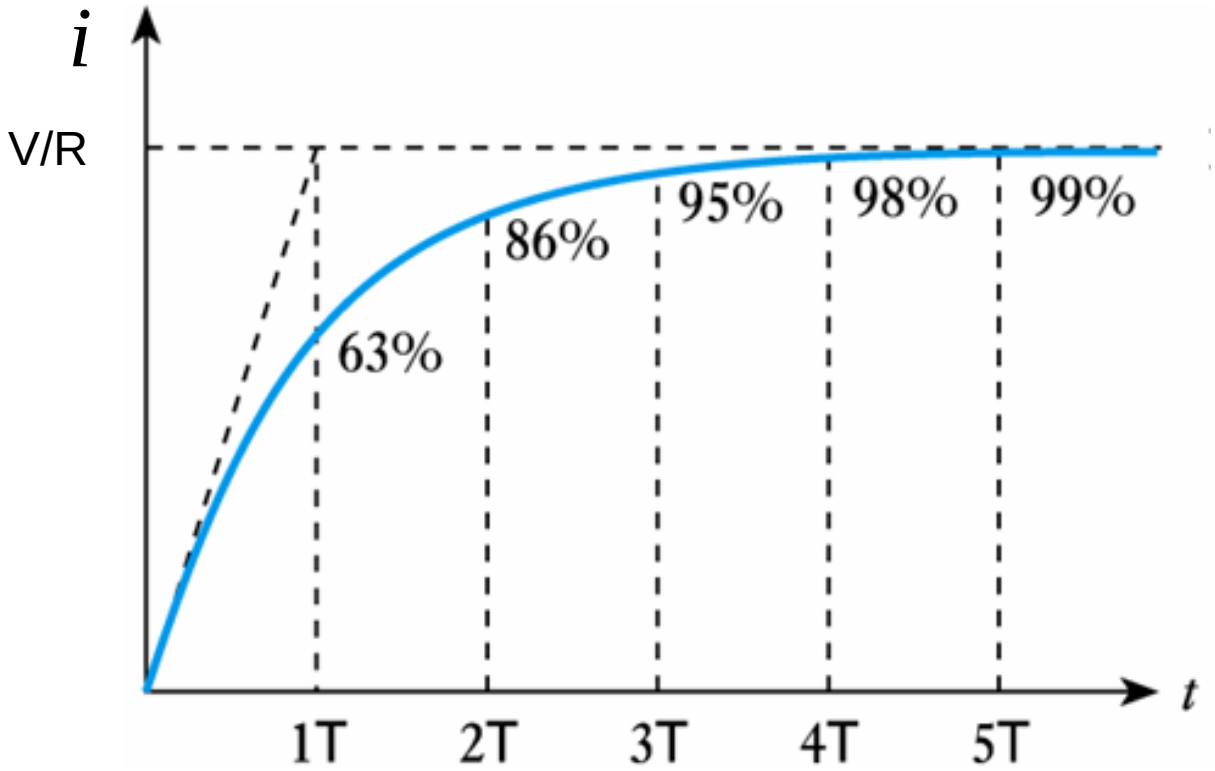
Istovremeno sa povećanjem struje u induktivnosti , dolazi do pada napon na njoj, od maksimalnog iznosa *V prema nuli, koju postiže u stacionarnom stanju, kad* kroz induktivnost teče konstantna struja *I=V/R*



ZAKLJUČAK: U ustaljenom stanju, kada je uspostavljena struja V/R kroz induktivnost , napon na njoj je jednak nuli:

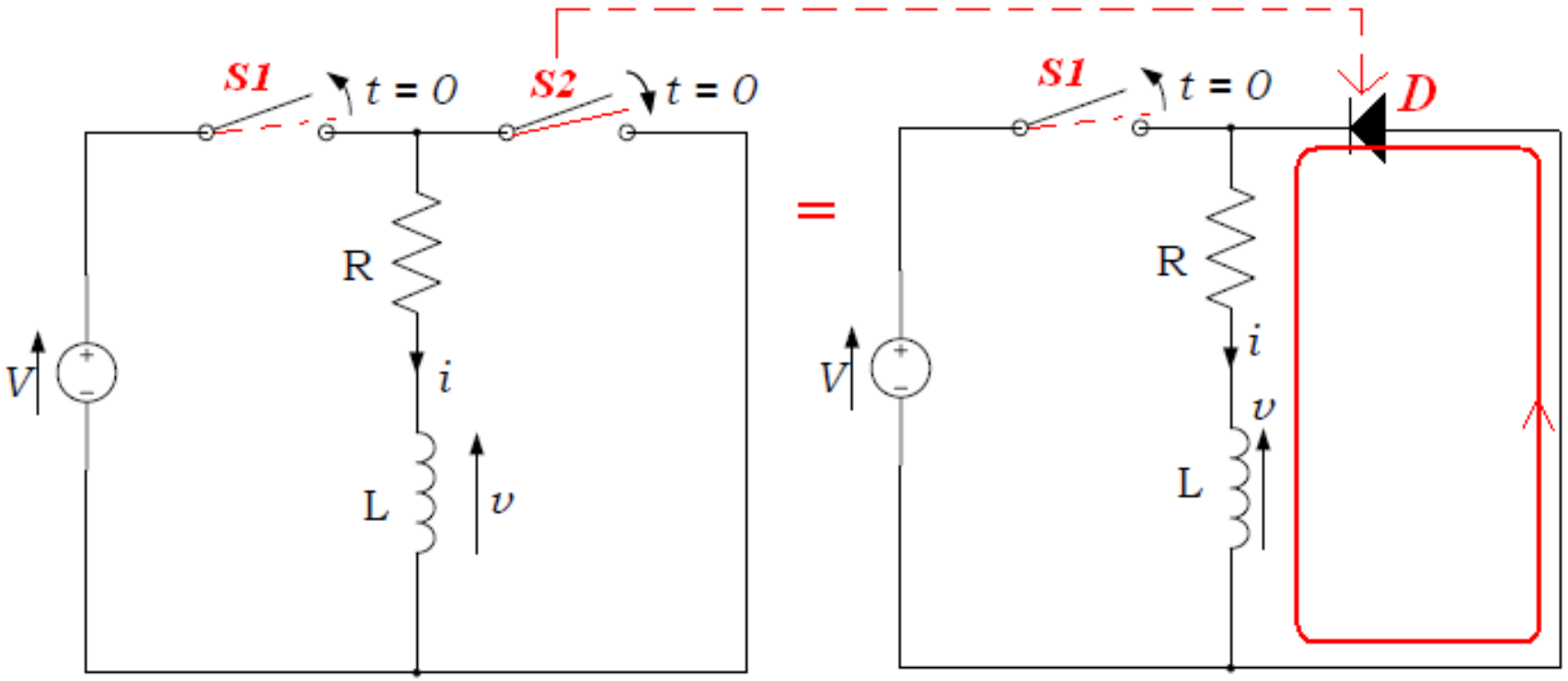
$$\frac{di_L}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad i_L = \text{const}$$

Jačina struje raste u induktivnosti po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante ($t=\tau$) *struja postigne 63% svoje konačne* vrednosti V/R. Ta vrednost stacionarnog stanja praktično se postiže već nakon vremena od 4 do 5 vremenskih konstanti.

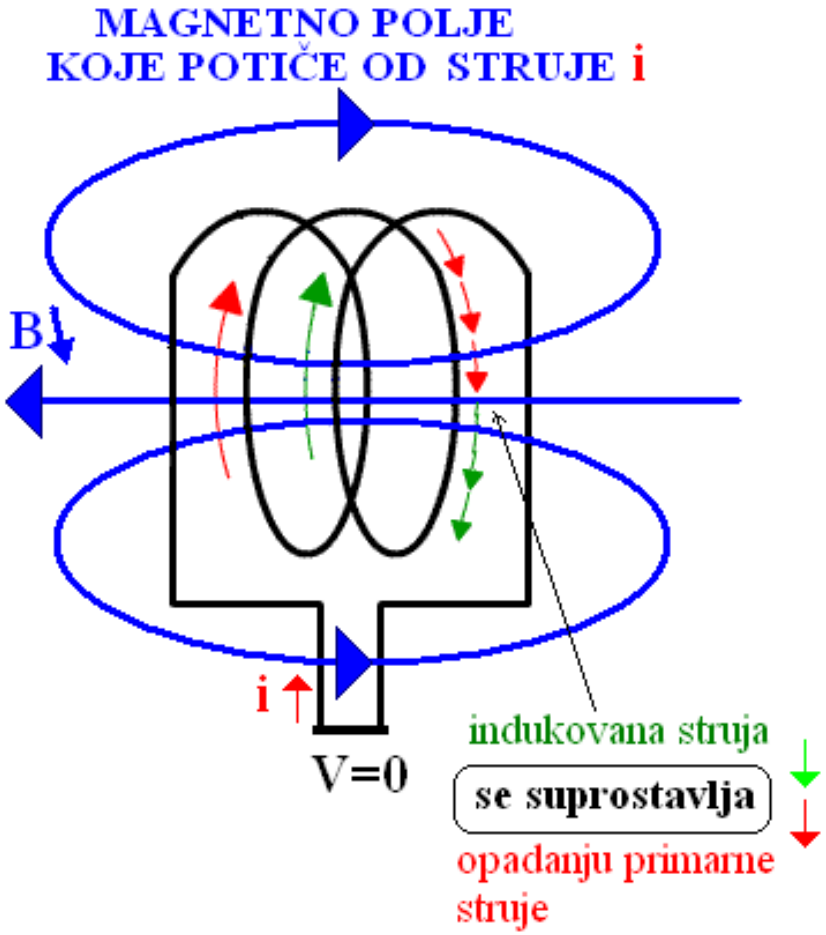


ŠTA ĆE SE DESITI KADA POKUŠAMO DA PREKINEMO USPOSTAVLJENU STACIONARNU VREDNOST STRUJE V / R?

Prekidanje stacionarne vrednosti struje I=V/R , otvaranjem prekidača S1 u kolu napajanja iz izvora V i zatvaranjem prekidača S2, odnosno kratkim spajanjem induktivnosti L , R.



Ekvivalentno kolo kojim je ovo moguće postići je kolo sa idealno diodom D. Idealna dioda (pad napona u stanju vođenja je jednak 0) u ovom kolu ima prekidačku ulogu. Otvaranjem prekidača S1, nagomilana elektromagnetna energija iz induktivnosti se prazni preko diode D kroz unutrašnju otpornost R.



→ STRUJA KOJA SE "ZALETELA" U INDUKTIVNOSTI

→ INDUKOVANA STRUJA posledica promene (opadanja) indukcije B magnetnog polja

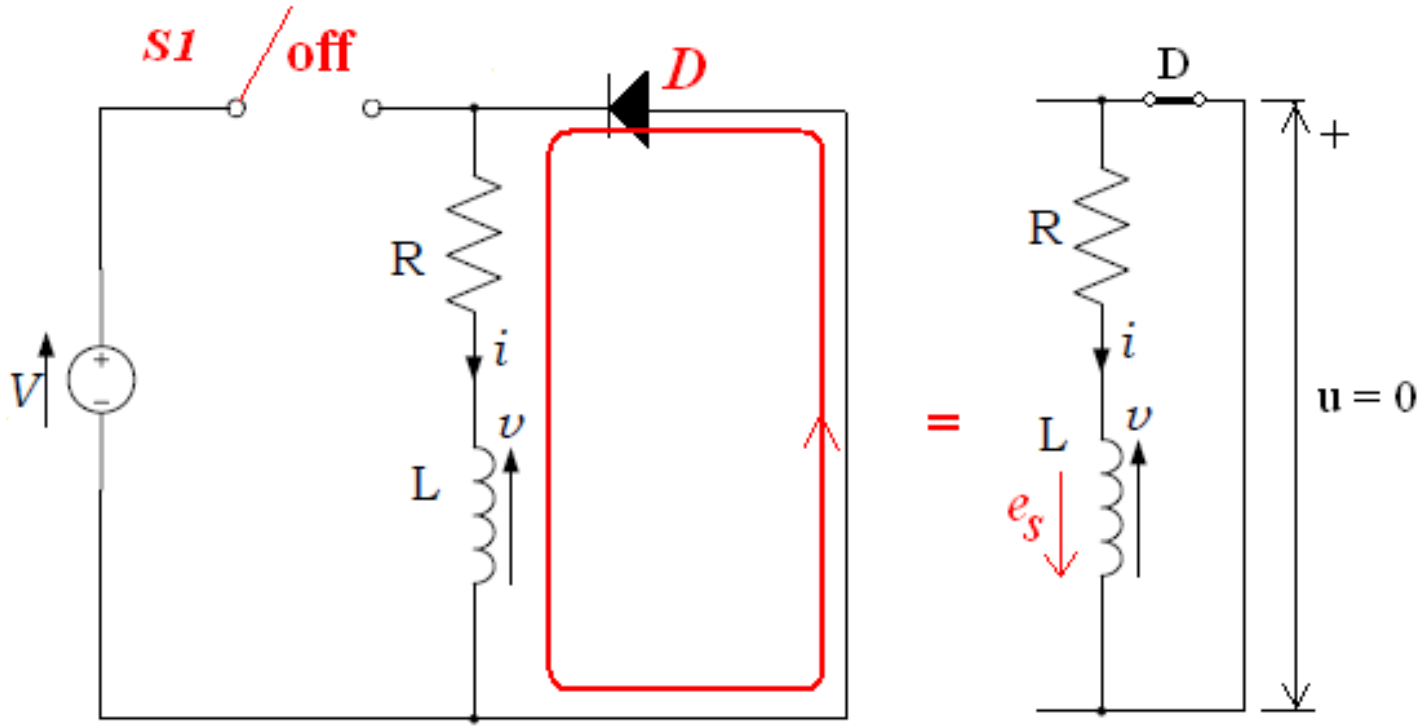
ŠTA SE USTVARI DEŠAVA U PRIGUŠNICI ISKLJUČNJEM PREKIDAČA S1 A UKLJUČENJEM PREKIDAČA S2 ???

-SLUČAJ KADA DOLAZI DO OPADANJA MAGNETNOG FLUKSA , ODNOSNO MAGNETNAE INDUKCIJE B

-USTVARI DOLAZI DO SMANJENJA INDUKCIJE tj. B↓

-INDUKOVANA STRUJA SE SUPROSTAVLJA OPADANJU STRUJE U INDUKTIVNOSTI (KOJA JE SADA PRIMARNA STRUJA)

Promena struje će indukovati napon samoindukcije, koji će se po *Lenzovom zakonu suprotstavljati promeni struje, tj. usporiće njeno opadanje*.



Zatvaranjem S2 (ili provođenjem diode) struja mora pasti na nulu. Promene struje neizbežne pri smanjivanju stacionarne vrednosti *I =V/R na stacionarnu vrednost i=0,* usled napona samoindukcije, čiji je smer po Lenzovom zakonu takav da se suprotstavlja promeni, tj. nastoji održati dotadašnju struju.

$$V + e_s = i \cdot R$$

$$V - L\frac{di}{dt} = i \cdot R$$

V=0 →

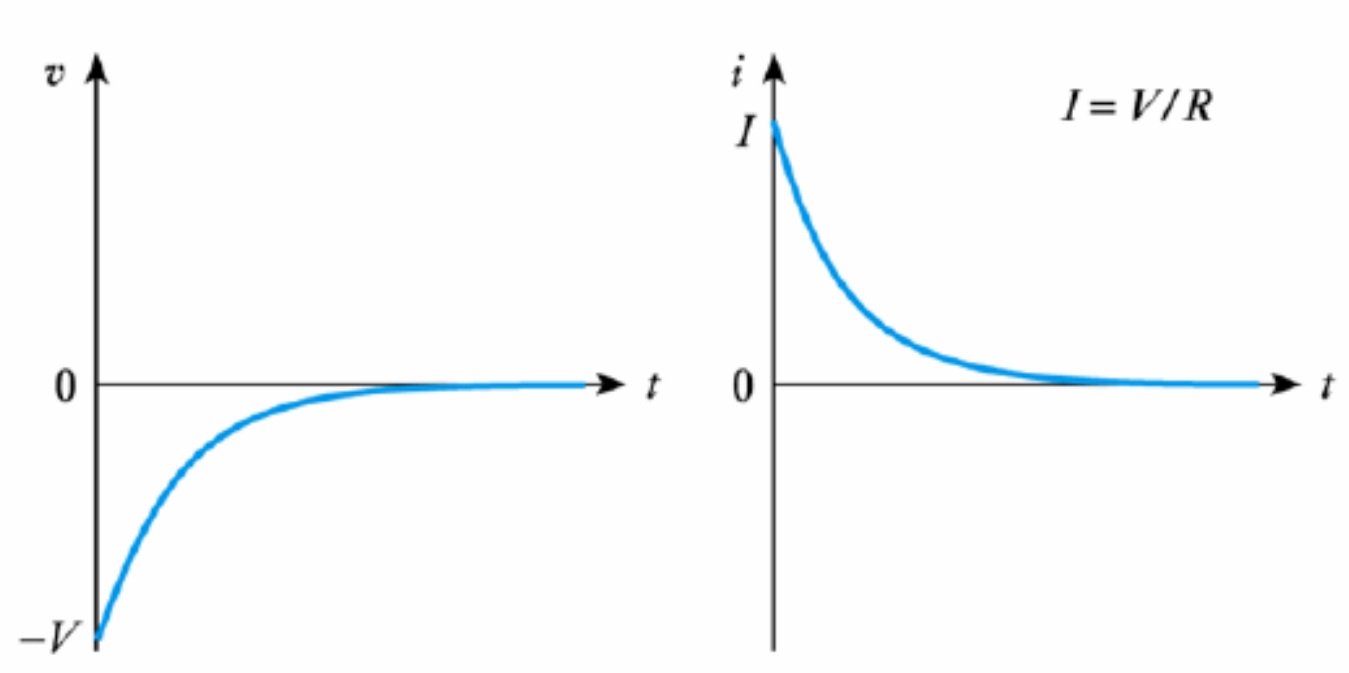
$$0 - L\frac{di}{dt} = i \cdot R$$

REŠAVANJE DIFERENCIJALNE JEDNAČINE

$$0 - L\frac{di}{dt} = i \quad R$$

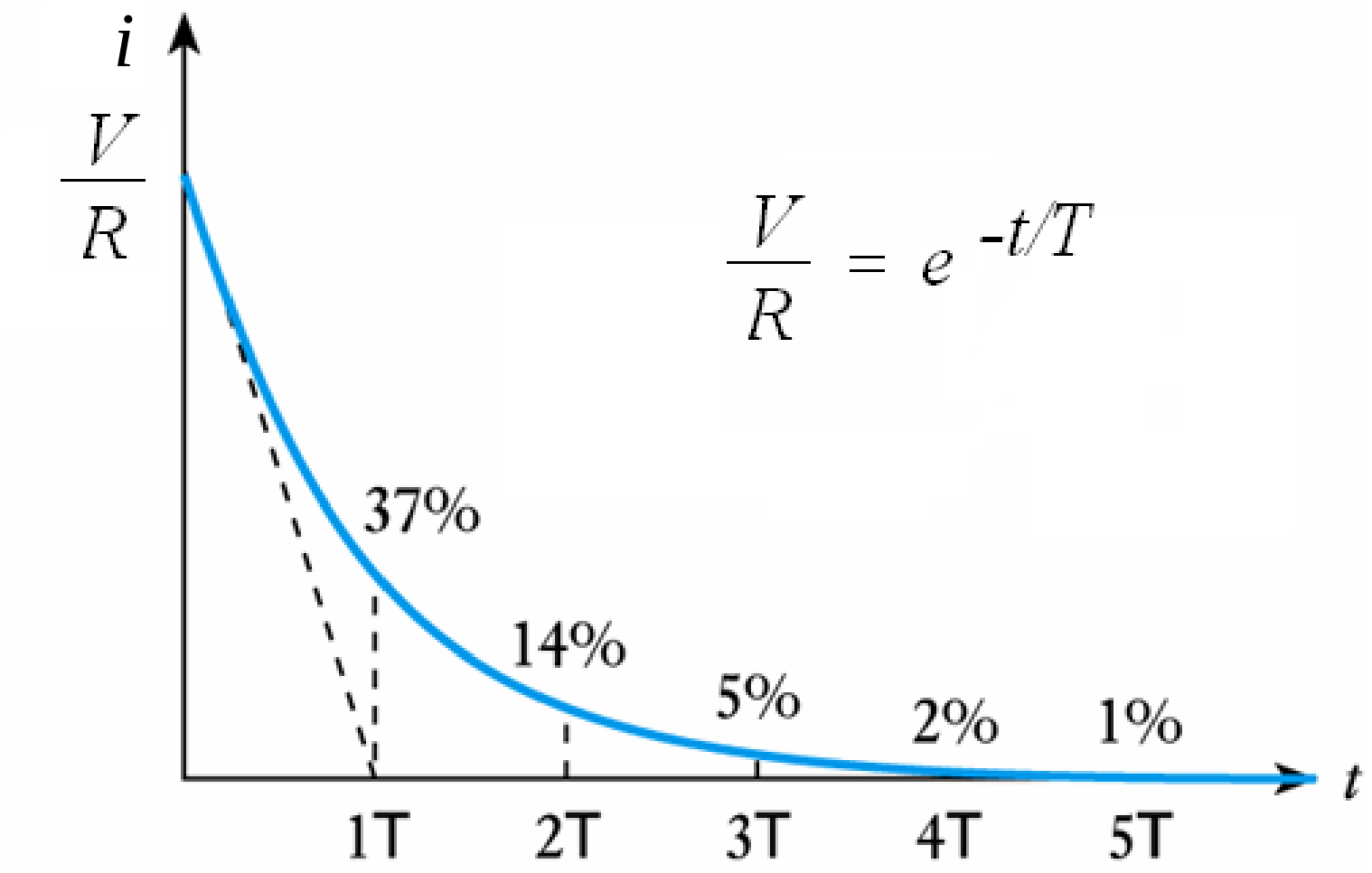
uz početne uslove: $t=0 \quad i=I$

$$i = I \quad e^{-t/\tau}$$



Struja dakle eksponencijalno opada do beskonačnosti (praktično nakon 4-5 **T**).

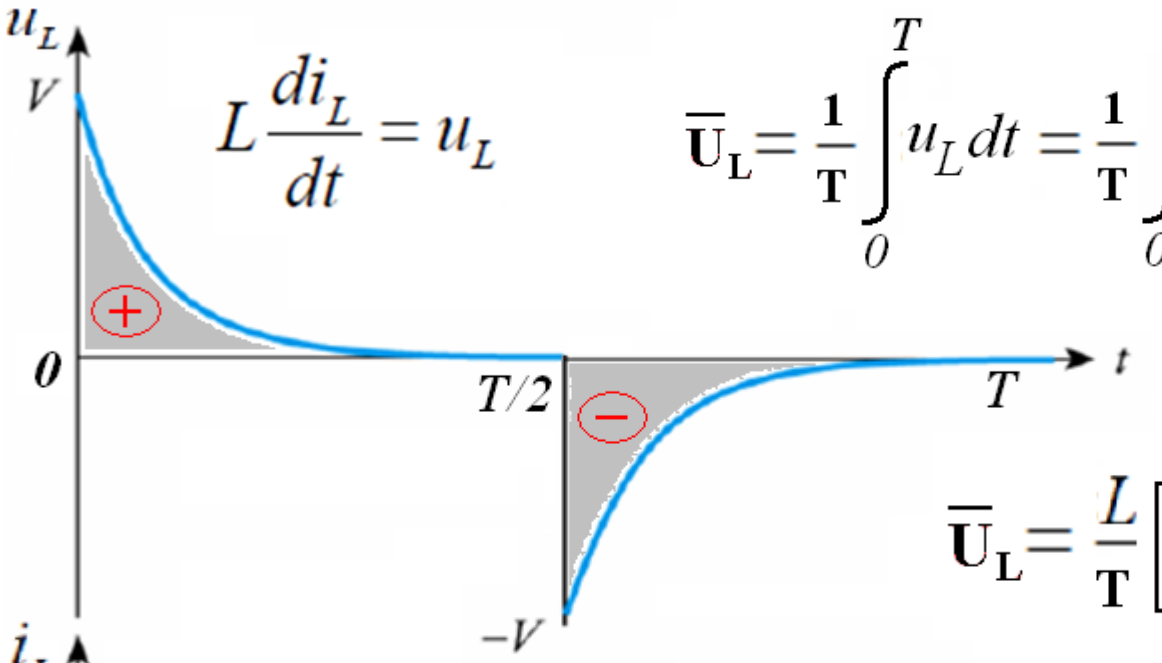
Brzina opadanja zavisi i u ovom slučaju od vremenske konstante **T**.



Jačina struje opada u induktivnosti po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante ($t=\tau=T$) *struja opadne na 37% svoje početne* vrednosti. Vrednost stacionarnog stanja (struja jednaka 0) praktično se postiže već nakon vremena od 4-5**T**.

VEOMA VAŽAN ZAKLJUČAK ZA NAPON NA INDUKTIVNOSTI!!!!

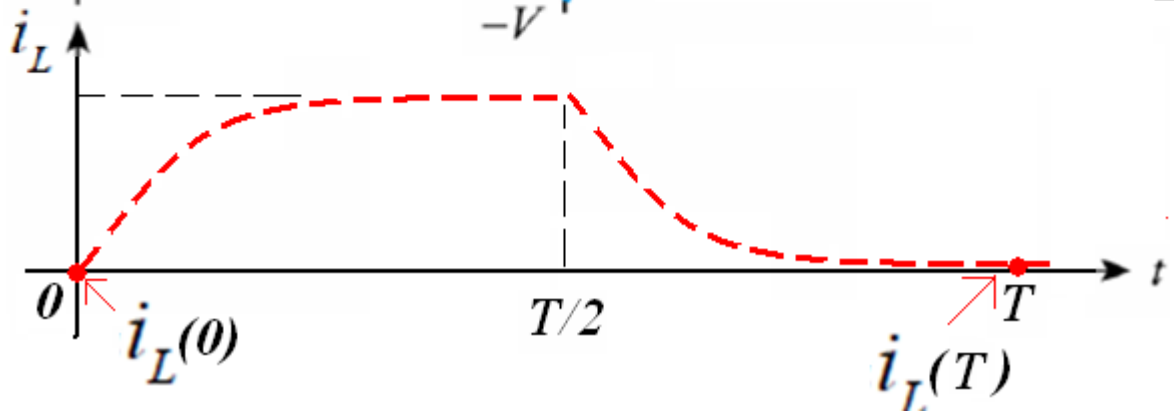
SREDNJA VREDNOST NAPONA NA INDUKTIVNOSTI JE JEDNAKA NULI!!!!



$$L\frac{di_L}{dt} = u_L$$

$$\overline{U}_L = \frac{1}{T}\int_0^T u_L\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T L\frac{di_L}{dt}\,dt = \frac{1}{T}\int_{i_L(0)}^{i_L(T)} L\,di_L$$

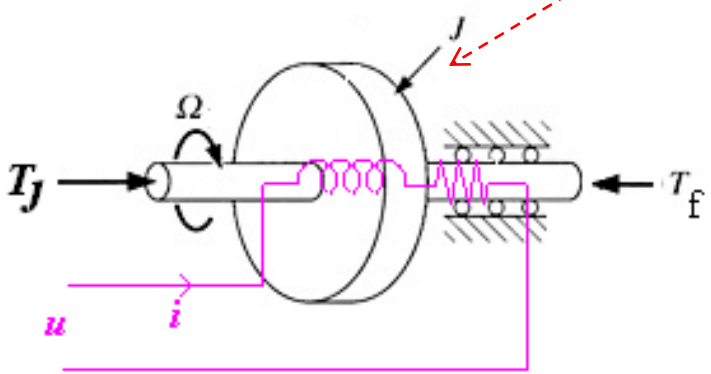
$$\overline{U}_L = \frac{L}{T}\left[\overset{0}{i_L(T)} - \overset{0}{i_L(0)}\right]$$



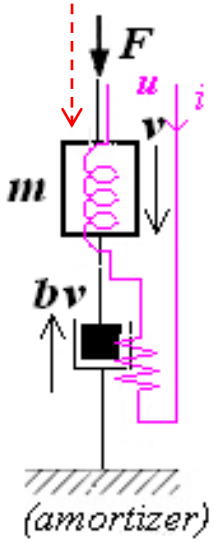
$$\overline{U}_L = 0$$

SLEDI DRUGI VEOMA VAŽAN ZAKLJUČAK ŠTO SE MAGNETNE INERCIJE INDUKT IVNOSTI TIČE:

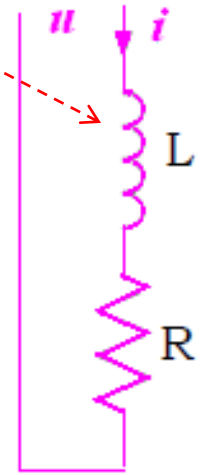
ZAKLJUČUJE SE DA ZBOG PRISUSTVA INDUKTIVNOSTI U STRUJNOM KOLU , SAMO STRUJNO KOLO POKAZUJE IZRAŽENU **INERCIJU ("TROMOST")** PRI SVAKOJ PROMENI STRUJE (I PRI PORASTU I PRI OPADANJU STRUJE). POMENUTA INERCIJA ODGOVARA MEHANIČKOJ.



(točak zamajac)



(amortizer)



(RL el. kolo)

$$T_J = J\frac{d\Omega}{dt} + K\Omega$$

$$E_k = \left(\frac{J}{2}\right)\Omega^2$$

vremenska konstanta $\tau = \frac{J}{K}$

$$F = m\frac{dv}{dt} + bv$$

$$E_k = \left(\frac{m}{2}\right)v^2$$

vremenska konstanta $\tau = \frac{m}{b}$

$$V = L\frac{di}{dt} + Ri$$

$$E_k = \left(\frac{L}{2}\right)i^2$$

vremenska konstanta $\tau = \frac{L}{R}$

INDUKTIVNOST KAO STRUJNI IZVOR (STRUJNI PONOR)

- Pod određenim uslovima induktivnost se može približno ponašati strujni izvor odnosno strujni ponor
- Ova osobina naročito dolazi do izražaja pri relativno velikiim vrednostima induktivnosti
- Na oblik struje kroz induktivnost utiču talasni oblik primenjenog napona i njegova učestanost
- Koje su to kritične vrednosti induktivnosti i učestanosti iznad kojih se induktivnost ponaša kao strujni izvor (strujni ponor)?
- Ova osobina induktivnosti ima veliki značaj, u shvatanju rada topologija energetskih pretvarača
- Veoma bitna osobina je neprekidnost struje kroz induktivnost (struja se ne može naglo menjati)
- Nagla promena je moguća samo primenom jako velikih vrednosti napona
- Vrednosti napona su određene ograničenjima (preskok varnice, proboj izolacije i sl….)

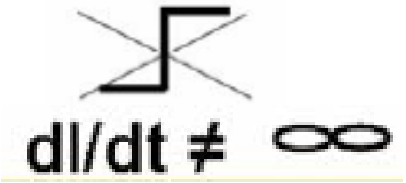
NEPREKIDNOST STRUJE INDUKTIVNOSTI

Osobina neprekidnosti struje kroz induktivnost

$$L\frac{di_L}{dt} = u_L$$

-Kada je na induktivnosti konačne vrednosti ***L*** primenjena konačna vrednost napona u_L tada **porast struje**

$\frac{di_L}{dt}$ **može biti samo konačan!!!!**



OVO USTVARI ZNAČI DA STRUJA NA INDUKTIVNOSTI NE MOŽE DA SE MENJA NAGLO (**NEPREKIDNOST STRUJE KROZ INDUKTIVNOST**)

Nagla promena struje bi se teoretski mogla postići primenom jako velikih vrednosti napona u_L , odnosno pri $u_L \longrightarrow \infty$. U realnosti to nije moguće ostvariti.

KAKO INDUKTIVNOST UTIČE NA PORAST STRUJE, ODNOSNO ŠTA ĆE SE DESITI SA PORASTOM STRUJE KADA JE INDUKTIVNOST BLISKA NULI, A ŠTA KADA ONA TEŽI VRLO VELIKOJ VREDNOSTI (TEORETSKI BESKONAČNOJ)??

DA BI ODGOVORILI NA OVO PITANJE MORAMO POSMATRATI ČLAN ***1/L***

I. SLUČAJ KADA SU VREDNOSTI INDUKTIVNOSTI MALE (TEORETSKI L→0)

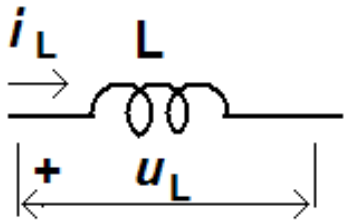
$$\frac{di_L}{dt} = \boxed{\frac{1}{L}} u_L$$

posmatrajmo ovaj član

Za konačnu proizvoljnu vrednost napona u_L

i pri jako maloj vrednosti induktivnosti L

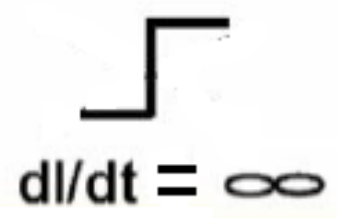
TEORETSKI $\boxed{L \to 0}$ ODNOSNO:



$$\frac{1}{L} \to \infty \Rightarrow \frac{di_L}{dt} \to \infty$$

$$\frac{di_L}{dt} \to \infty \Rightarrow i_L \neq \text{const}$$

DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST NAPONA NA KRAJEVIMA INDUKTIVNOSTI , STRUJA KOJA SE IMA KROZ NJU NIJE KONSTANTNA!!!! ODNOSNO ONA MOŽE DA SE NAGLO MENJA!!!



II. SLUČAJ KADA VREDNOSTI INDUKTIVNOSTI VELIKE (TEORETSKI $L \to \infty$)

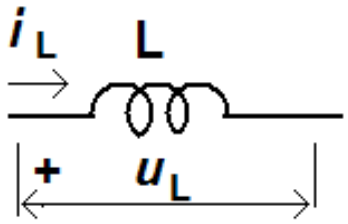
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} u_L$$

posmatrajmo ovaj član

Za konačnu proizvoljnu vrednost napona u_L

i pri jako velikoj vrednosti induktivnosti L

TEORETSKI $L \to \infty$ ODNOSNO:

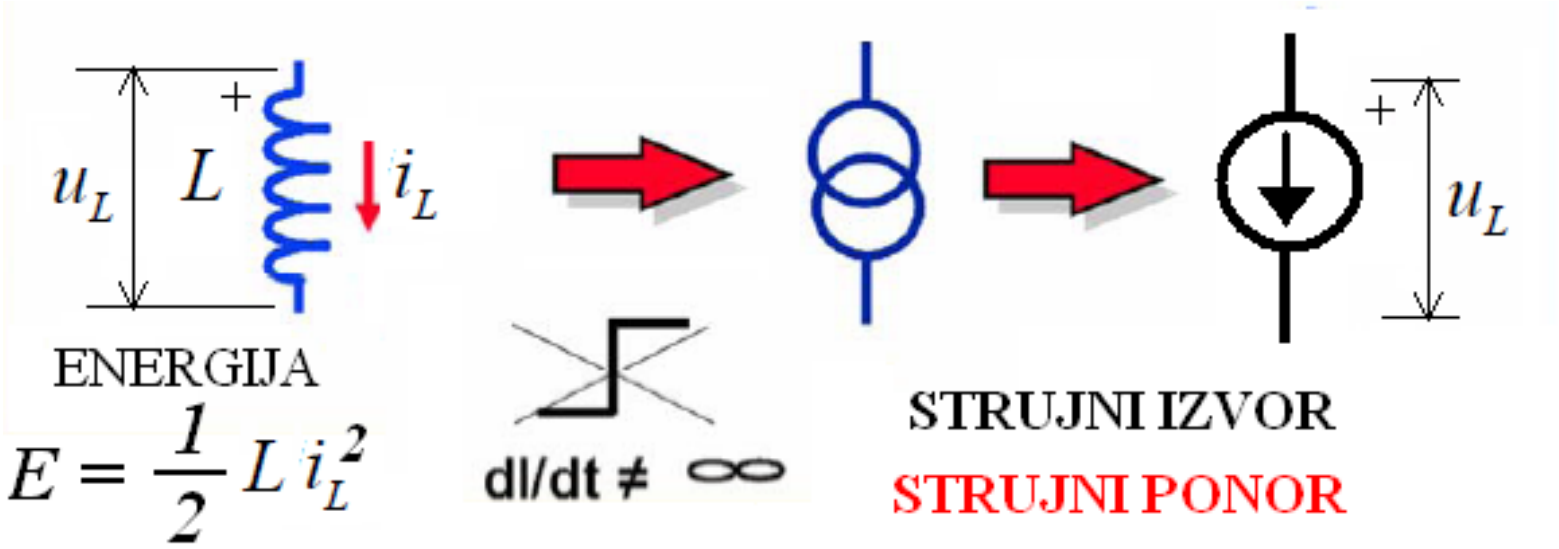


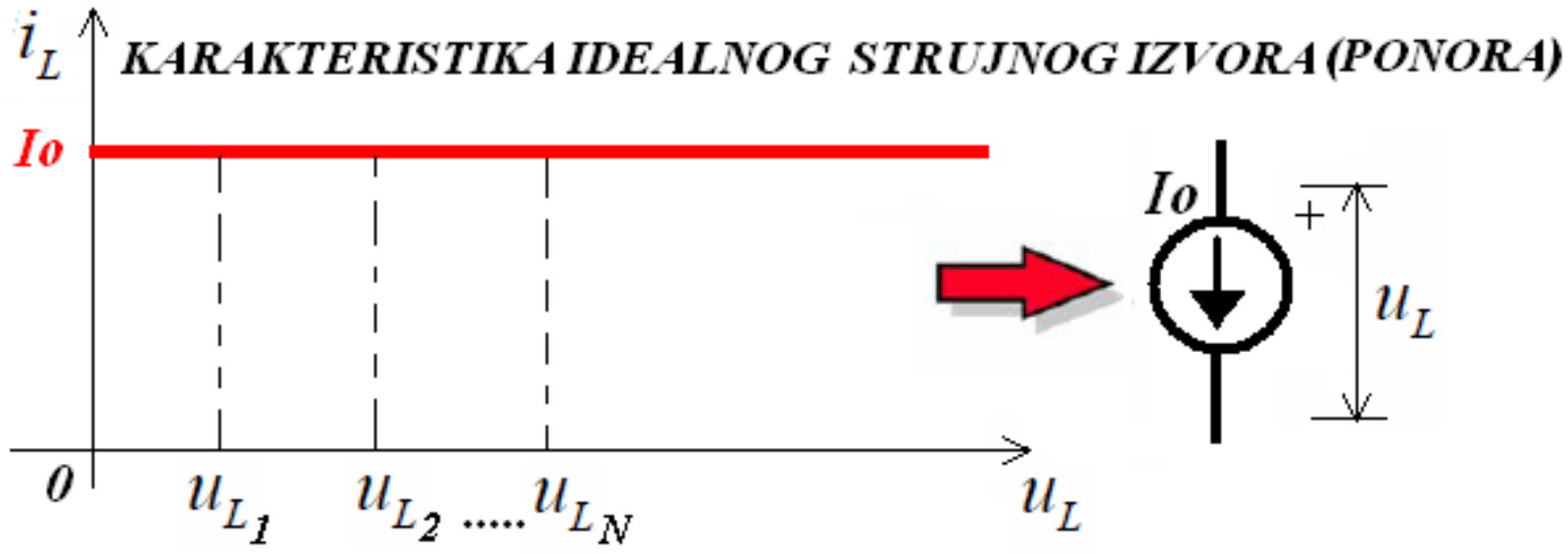
$$\frac{1}{L} \to 0 \Rightarrow \frac{di_L}{dt} \to 0$$

$$\frac{di_L}{dt} \to 0 \Rightarrow i_L = \text{const}$$

DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST NAPONA NA KRAJEVIMA INDUKTIVNOSTI , STRUJA KOJA SE IMA KROZ NJU JE KONSTANTNA!!!!

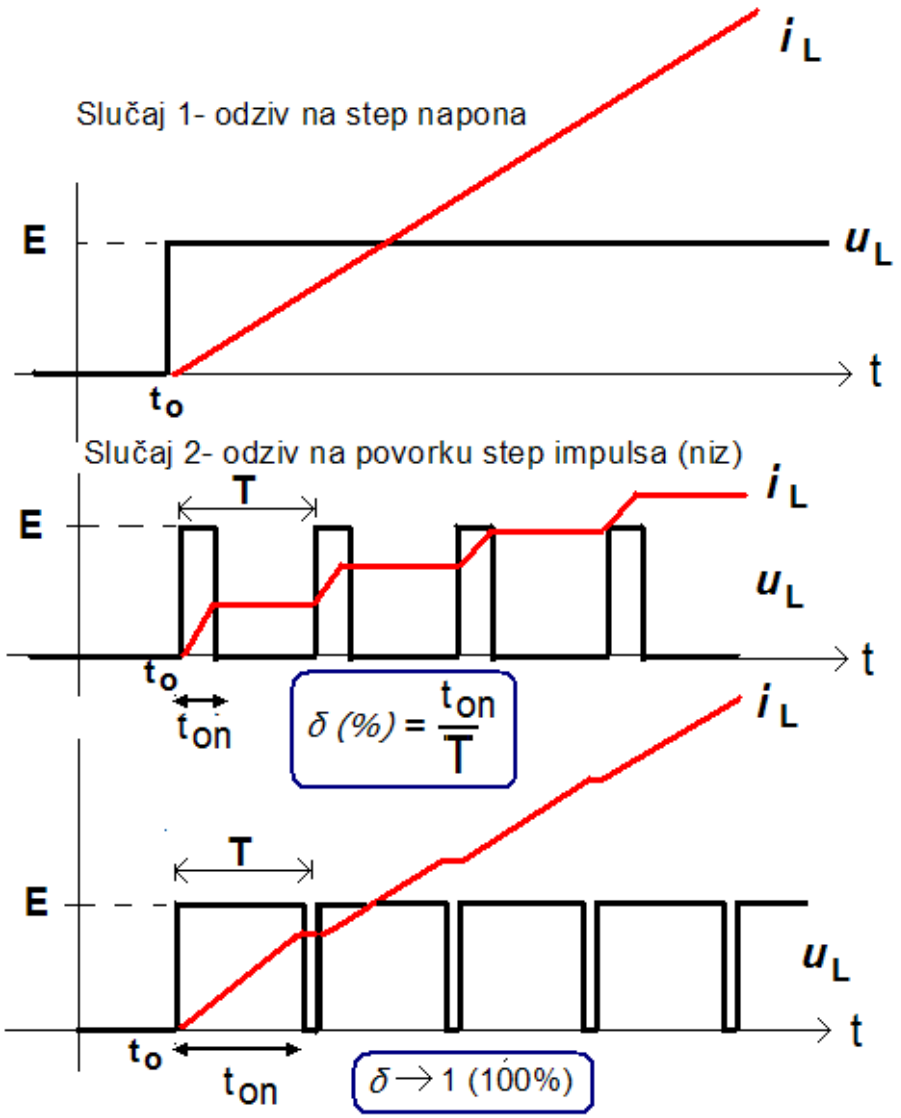
INDUKTIVNOST SE TADA **PONAŠA KAO** STRUJNI IZVOR, ODNOSNO PRIRODNIJE JE U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI (ELEKTROENERGETSKIM PRETVARAČIMA) REĆI KAO **“STRUJNI PONOR”.**





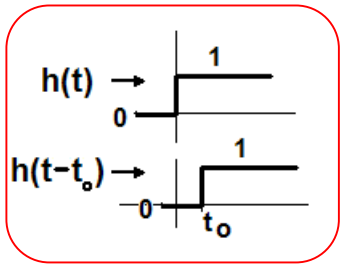
ZA PROIZVOLJNE ALI KONAČNE VREDNOSTI NAPONA , STRUJA KROZ L JE *KONSTANTNA* = > *INDUKTIVNOST L SE PONAŠA KAO STRUJNI IZVOR (STRUJNI PONOR)*

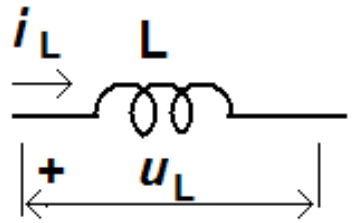
INDUKTIVNOST- kao integrator

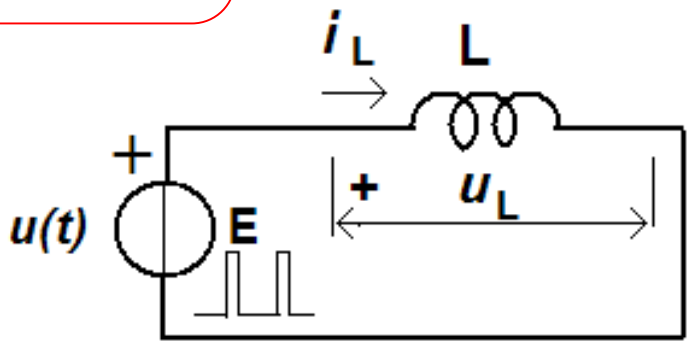


SLUČAJ koji → odzivu na step napona $\mathbf{E} \cdot h(t-t_o)$ (Slučaj 1)

ODSKOČNA (Hevisajdova) funkcija







Kada se na induktivnost primene odskočna (step) funkcija napona Eh(t-to) ili unipolarni niz impulsa amplitude E, kao odziv se dobija linearni, odnosno stepenasto linearni porast struje induktivnosti u vremenu

Kakav se odziv dobija ako se primene bipolarni impulsi (pozitivnog i negativnog polariteta napona?

ŠTA KAŽE MATEMATIKA??

U VREMENSKOM DOMENU

$$L\frac{di_L}{dt} = u_L$$

$$i_L = \frac{1}{L}\int_0^t u_L dt + Io$$

STRUJA JE PROPORCIONALNA INTEGRALU NAPONA

U "s" DOMENU (LAPLASOVA TRANSFORMACIJA)

PRIMENOM OPERATOR A $\frac{d(\ )}{dt} \longrightarrow s$ NA STRUJU

DOBIJAMO:

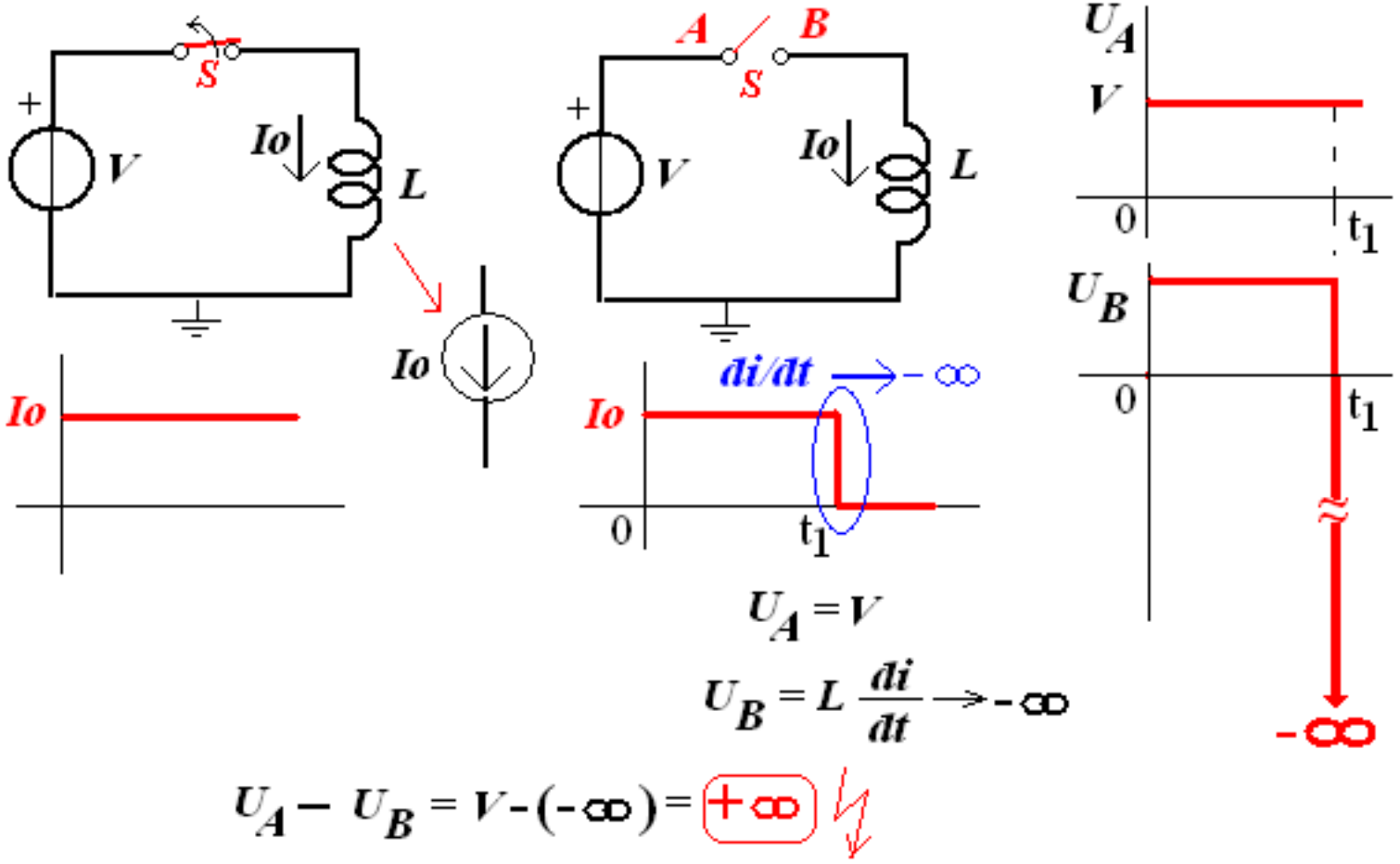
$$L\,sI_L(s) = \mathbf{U}_\mathbf{L}(s)$$

$$I_L(s) = \frac{1}{sL}\mathbf{U}_\mathbf{L}(s)$$

STRUJA JE JEDNAKA INTEGRALU NAPONA

INTEGRATOR U "s" DOMENU

ŠTA ĆE SE DESITI KADA SE NAGLO PREKINE STRUJNO KOLO U KOJEM JE USPOSTAVLJENA KONSTANTNA STRUJA (GRANA KOJA SE PONAŠA KAO STRUJNI PONOR)?



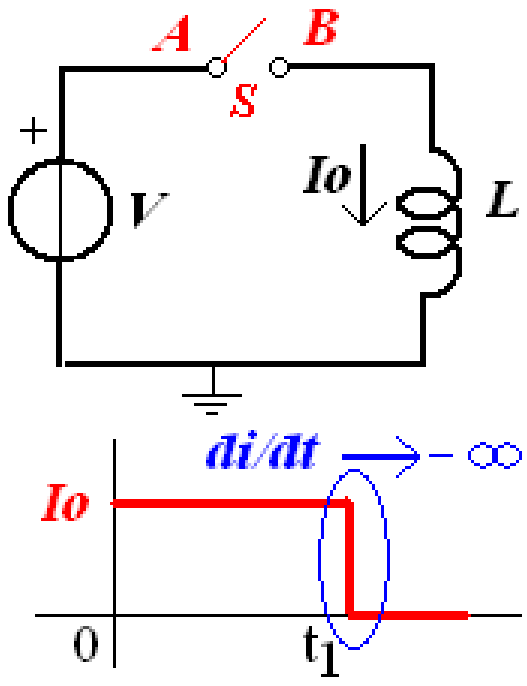
$$U_A = V$$

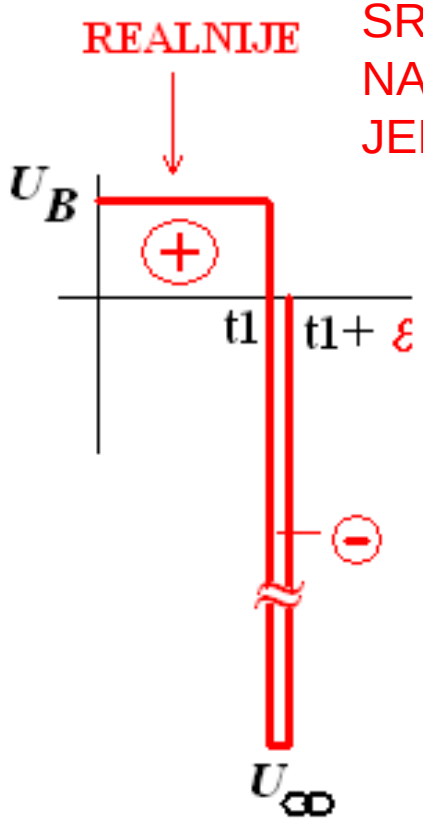
$$U_B = L\frac{di}{dt} \rightarrow -\infty$$

$$U_A - U_B = V - (-\infty) = +\infty$$

VELIKA VEROVATNOĆA DA ĆE DOĆI DO **PROBOJA** NA PREKIDAČU
ŠTO JE MANJI RAZMAK IZMEĐU PRIKLJUČAKA VEĆA JE VEROVATNOĆA!!!

U REALNIJEM SLUČAJU:





SREDNJA VREDNOST NAPONA NA INDUKTIVNOSTI JE JEDNAK NULI!!!!

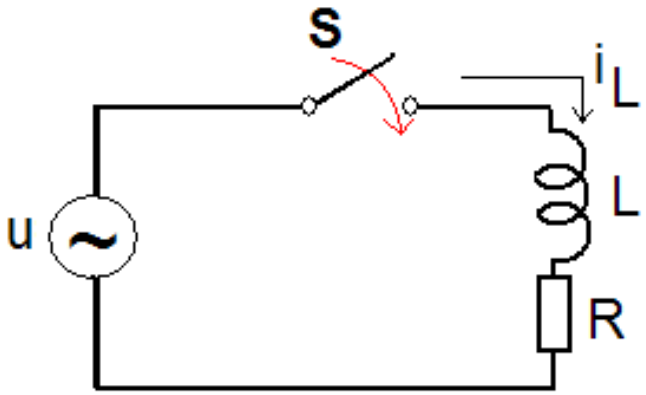
$$U_B \cdot t1 = U_\infty \cdot [t1 + \varepsilon - t1]$$

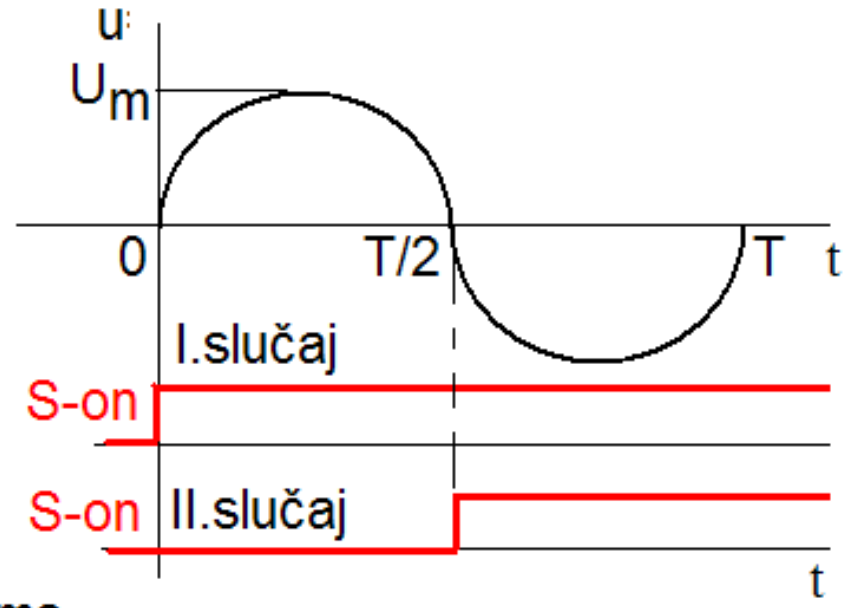
$$U_B \cdot t1 = U_\infty \cdot \varepsilon$$

$U_\infty \cdot \varepsilon =$ KONAČNA VELIČINA

$U_\infty \to \infty \qquad \varepsilon \to 0$ → **NAPONSKI PROBOJ NA PREKIDAČU S !!!**

INDUKTIVNOST U KOLU NAIZMENIČNE POBUDE





$u=U_m \sin \omega t$

$u=U_m \sin 314t$

$f=50Hz$

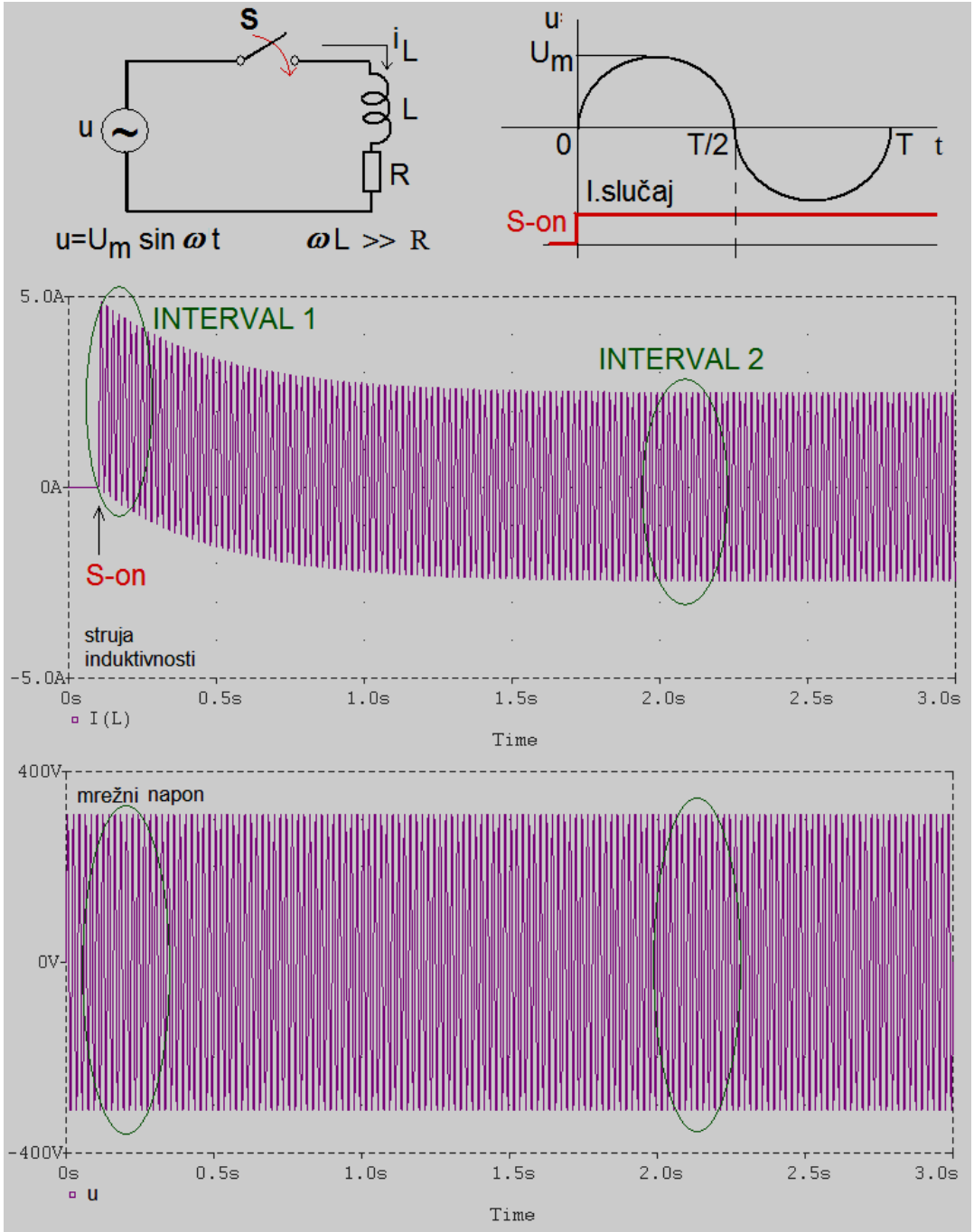
$\omega=2\pi f$

pretpostavka:

$\omega L >> R$

T=1/f=1/50Hz=20ms

- Razmotrićemo šta se dešava kada u prelaznom režimu uključenja induktivnosti na naizmenični izvor
- Pretpostavićemo da je u početnom trenutku prigušnica bila “prazna” odnosno da je u početnom trenutku nagomilana energija u njoj jednaka nuli
- Razmatramo dva slučaja: kada se prekidač S uključuje u trenutku t=0 i kada se prekidač uključuje u trenutku t=T/2 (nakon isteka poluperiode)



I. SLUČAJ

R=1Ω
L=400mH

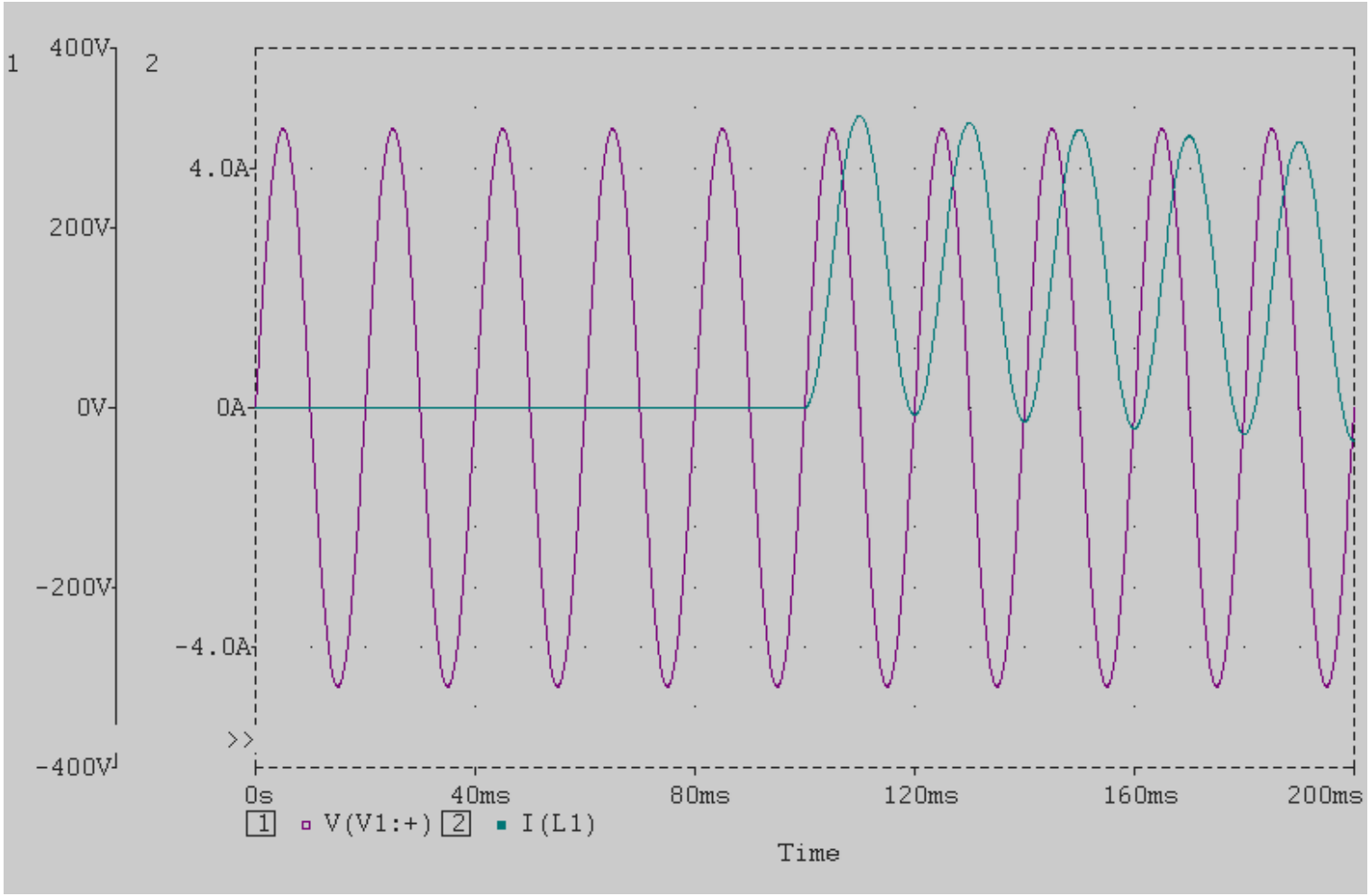
Prekidač S se uključuje u trenutku t=0

Posmatramo detaljno dva Intervala:
INTERVAL1- neposredno po uključenju prekidača (tranzijentni režim)

INTERVAL2- interval kada se struja ustalila (stacionarno stanje)

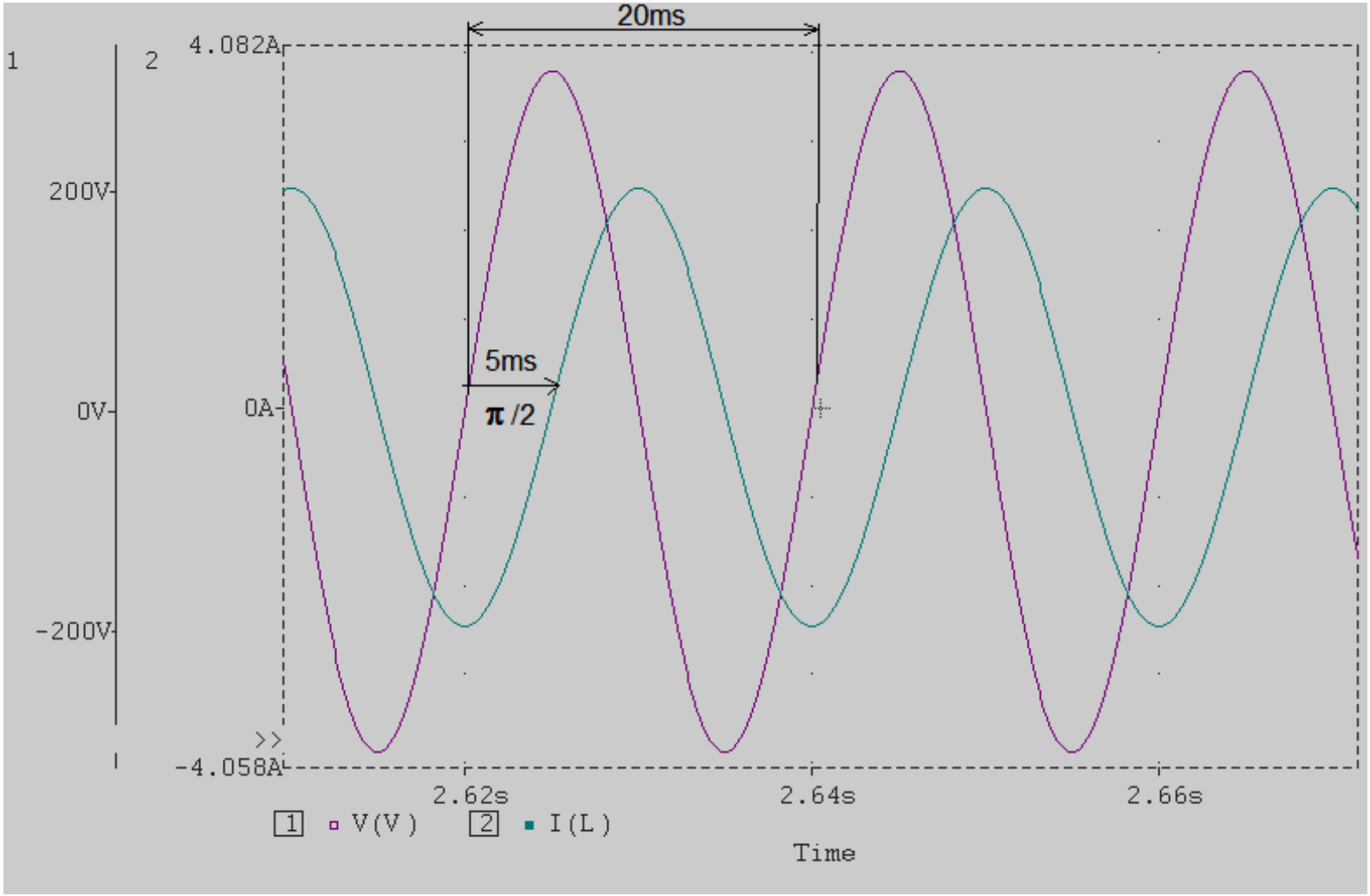
Uočavamo da pri uključenju postoji jednosmerna komponenta struje koja iščezava u ustaljenom režimu!!!!
VREMENSKA KONSTANTA SA KOJOM IŠČEZAVA JEDNOSMERNA KOMPONENTA je L/R= 400ms

INTERVAL- 1

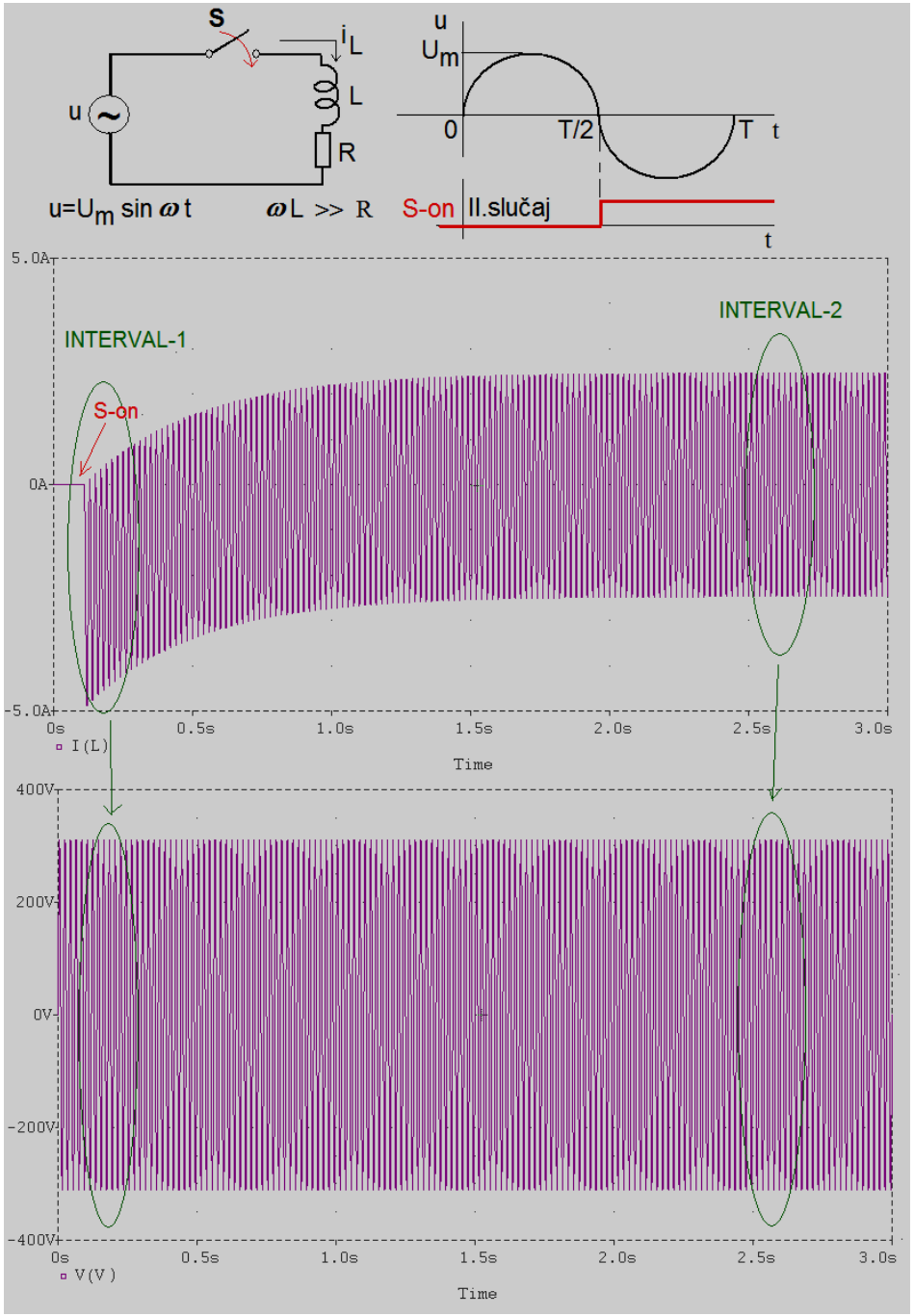


Pošto je fluks u početnom trenutku (t=0-) u prigušnici bio jednak 0, a on ne može naglo da se promeni, to znači da on mora ostati isti (jednak 0) i u trenutku t=0+ . On ostaje nepromenjen baž zahvaljujući jednosmernoj komponenti koja se suprostavlja njegovoj promeni

INTERVAL-2



USTALJENO STANJE – fazni pomeraj između struje i napona π/2



II. SLUČAJ

R=1Ω
L=400mH

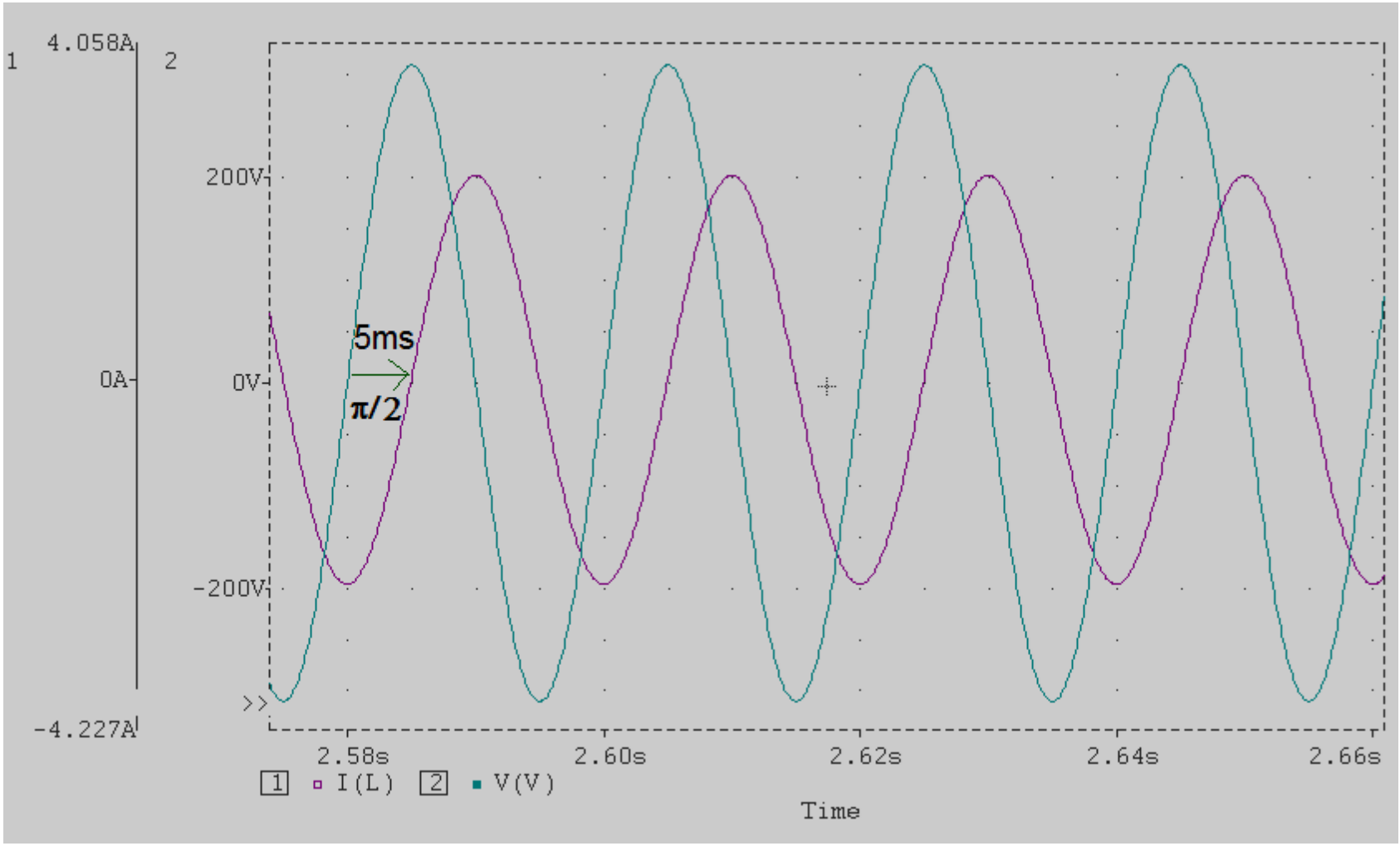
Prekidač S se uključuje u trenutku t=T/2

Posmatramo detaljno dva Intervala:
INTERVAL1- neposredno po uključenju prekidača (tranzijentni režim)

INTERVAL2- interval kada se struja ustalila (stacionarno stanje)

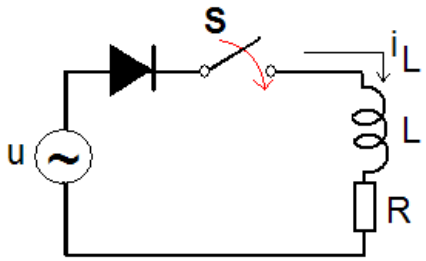
Uočavamo da pri uključenju postoji jednosmerna **NEGATIVNA** komponenta struje koja iščezava u ustaljenom režimu!!!!
VREMENSKA KONSTANTA SA KOJOM IŠČEZAVA JEDNOSMERNA KOMPONENTA je L/R= 400ms

INTERVAL-2

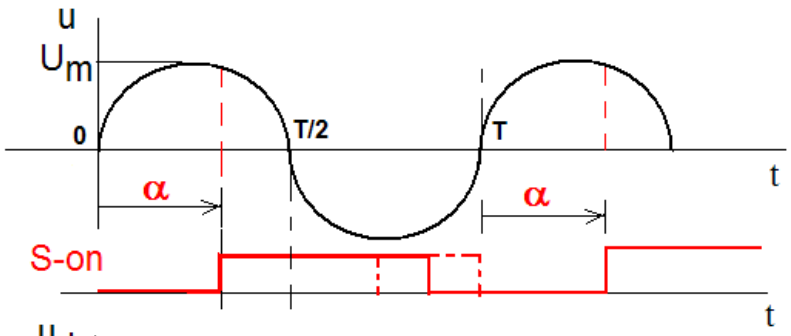


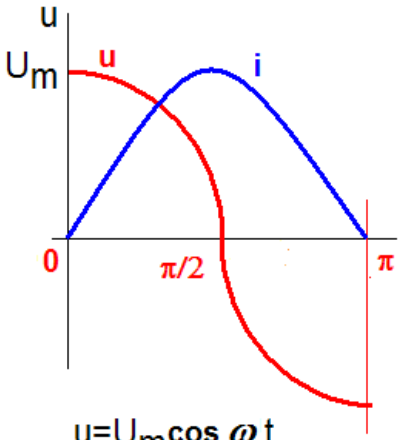
USTALJENO STANJE – fazni pomeraj između struje i napona i u ovom slučaju je π/2

INDUKTIVNO KOLO SA DIODOM:

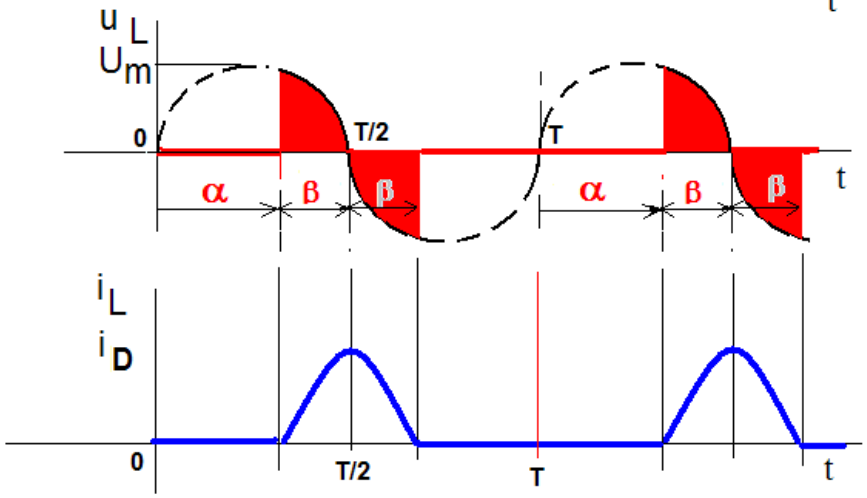


$u=U_m \sin \omega t$ $\omega L >> R$





$u=U_m \cos \omega t$

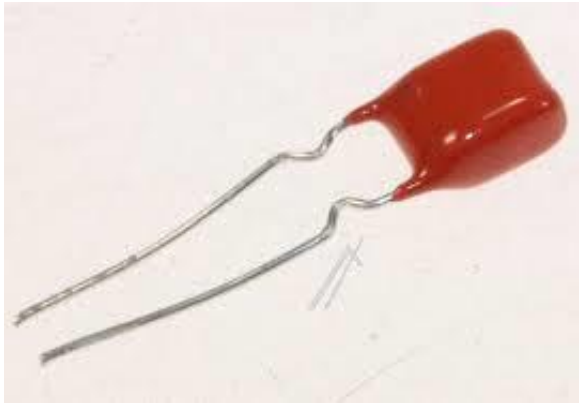


$$L\frac{di_L}{dt} = u_L \qquad u = \cancel{R\,i_L}^{\,0} + L\frac{di_L}{dt} \rightarrow U_m \cos \omega t = L\frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} U_m \cos \omega t$$

$$i_L = \frac{1}{L}\int_0^t u_L dt + Io \rightarrow \boxed{i_L = \frac{1}{\omega L} U_m \sin \omega t}$$

KAPACITIVNOST KAO AKUMULACIONI ELEMENAT



•NEOBIČNO ZNAČAJAN AKUMULACIONI ELEMENAT U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI JE I PORED INDUKTIVNOSTI I KAPACITIVNOST (KONDENZATOR).

•ZA RAZUMEVANJA RADA POJEDINIH TOPOLOGIJA ENERGETSKIH PRETVARAČA JAKO JE BITNO SHVATITI ELEKTRIČNU INERCIJU (“TROMOST”) OVOG AKUMULACIONOG ELEMENTA

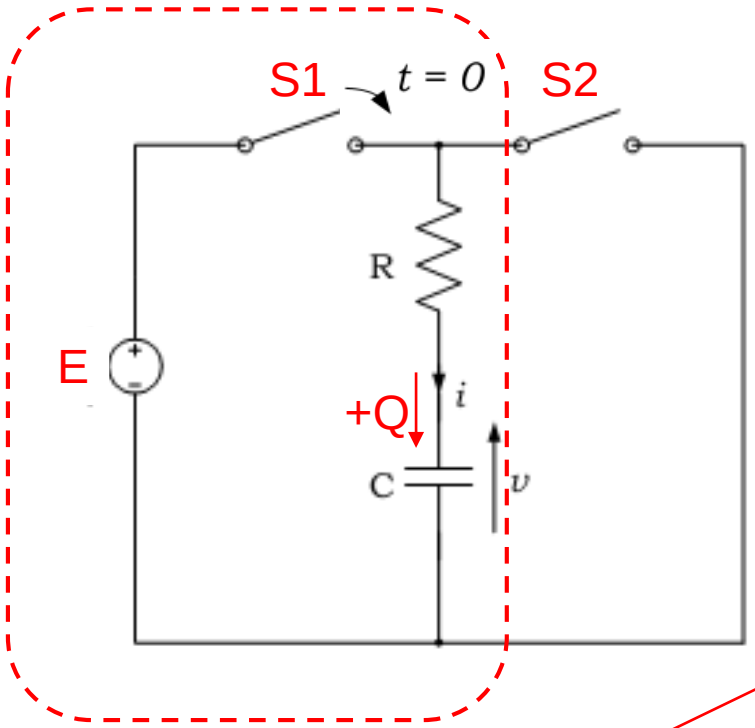
•U NASTAVKU ĆE BITI IZVRŠENA ANALIZA PONAŠANJA OVOG ELEMENTA

• IDEALNA KAPACITIVNOST (UNUTRAŠNJA OTOČNA OTPORNOST-ODVODNOST JAKO VELIKA)

•REALNA KAPACITIVNOST IMA NEKU KONAČNU VREDNOST OTOČNE OTPORNOSTI

PRELAZNE POJAVE U KONDENZATORU

Uključenjem kondenzatora u strujno kolo sa otporom R ostvaruje se prelazna pojava punjenja kondenzatora naelektrisanjem, dok mu napon ne postigne vrednost napona izvora. Struja punjenja kondenzatora je u početku velika, a kako naelektrisanje na pločama raste, tako njena vrednost opada (suprostavljanje dotoku naelektrisanja istog znaka).



II Kirhofov zakon za kolo kad je S1 uključen a S2 isključen:

$$E - v = i \cdot R$$

Jednačina struje kondenzatora:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C \cdot v)}{dt} = C\frac{dv}{dt}$$

$$E - v = C \cdot R \cdot \frac{dv}{dt}$$

vremenska konstanta

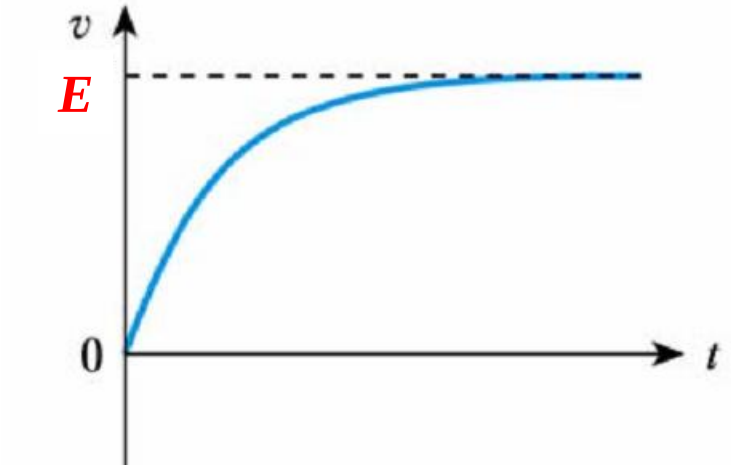
$$\tau = RC$$

Rešenje diferencijalne jednačine:

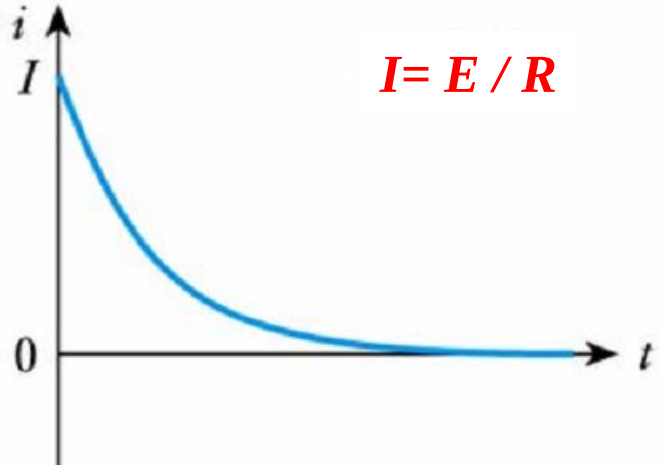
$$v = E\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

Što je ekvivalentno za prethodno opisani akumulacioni element PRIGUŠNICU

NAPON NA KONDENZATORU



STRUJA KONDENZATORA



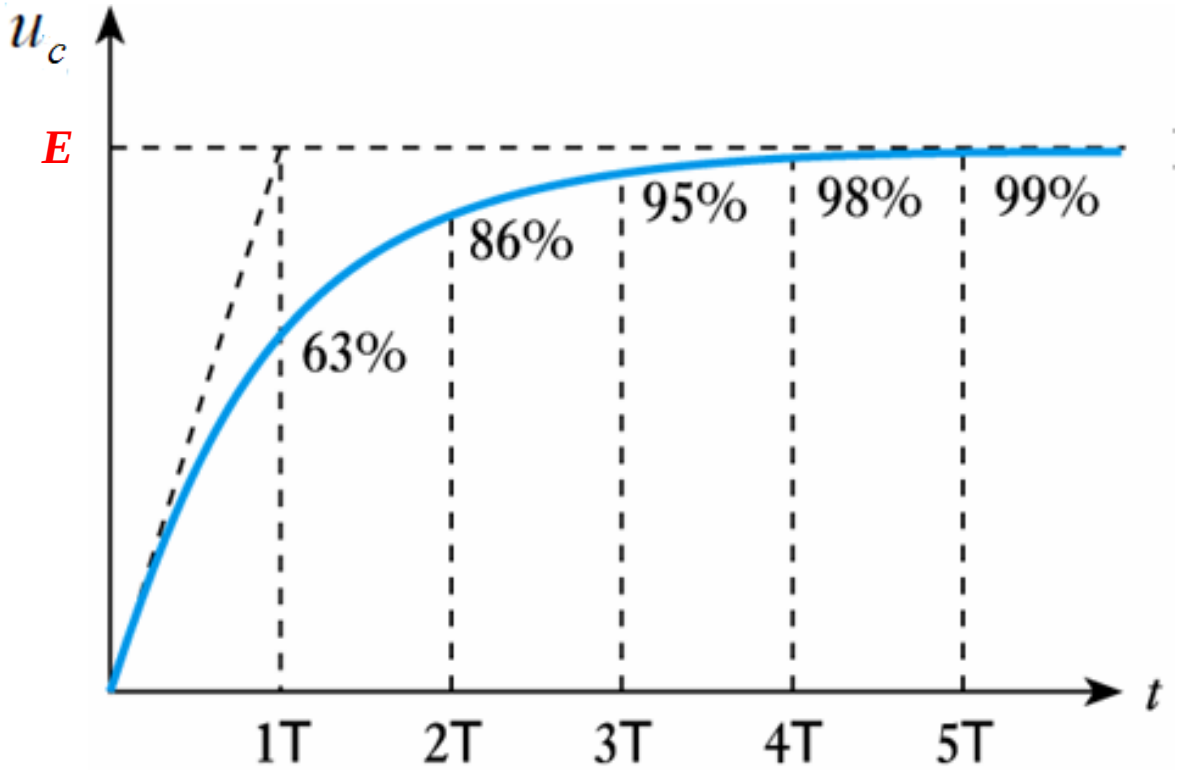
$I = E / R$

$$v = E\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

Nakon dovoljno dugo vremena (4-5T) napon na kondenzatoru postiže vrednost napona izvora V, dok struja kroz kondenzator postaje jednaka nuli.
Struja postoji samo u prelaznom režimu, odnosno najveća je neposredno po uključenju i ograničena je otpornošću R, tj. **$I_{max}=E/R$**.

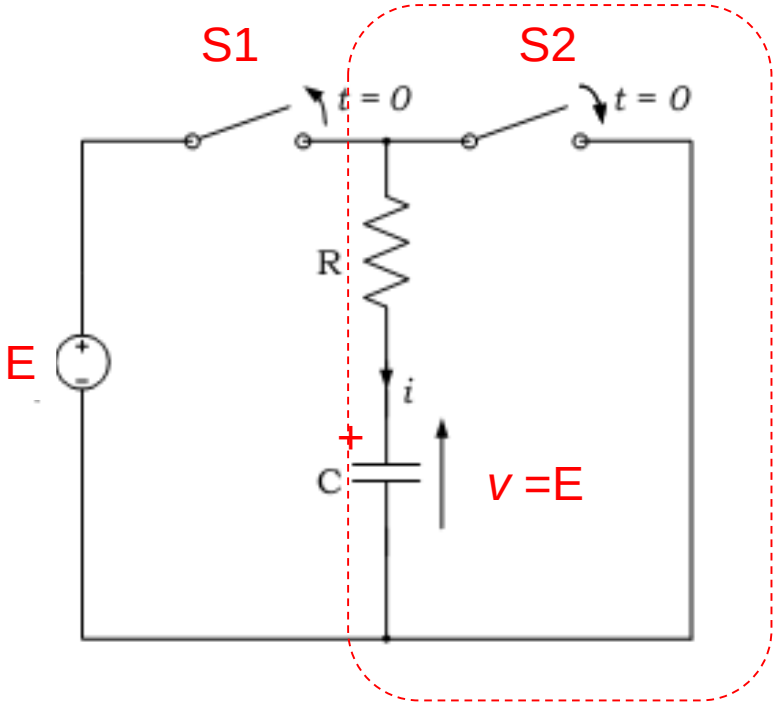
Zaključak: Kondenzator je u početnom trenutku t=0+ ustvari KRATAK SPOJ za izvor E

Napon na kondenzatoru po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante (*t*=τ=***T***) *struja postigne 63% svoje konačne* vrednosti E. Ta vrednost stacionarnog stanja praktično se postiže već nakon vremena od 4 do 5 vremenskih konstanti.



ŠTA ĆE SE DESITI KADA PRAZNIMO KONDENZATOR?

Isključenjem S1 a uključenjem S2 dolazi do pražnjenja prethodno napunjenog kondenzatora (napon na njemu je jednak E)



Pošto je sada napon na krajevima RC kola jednak 0, važi jednačina :

$$-v = i \cdot R$$

Jednačina struje kondenzatora:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C \cdot v)}{dt} = C\frac{dv}{dt}$$

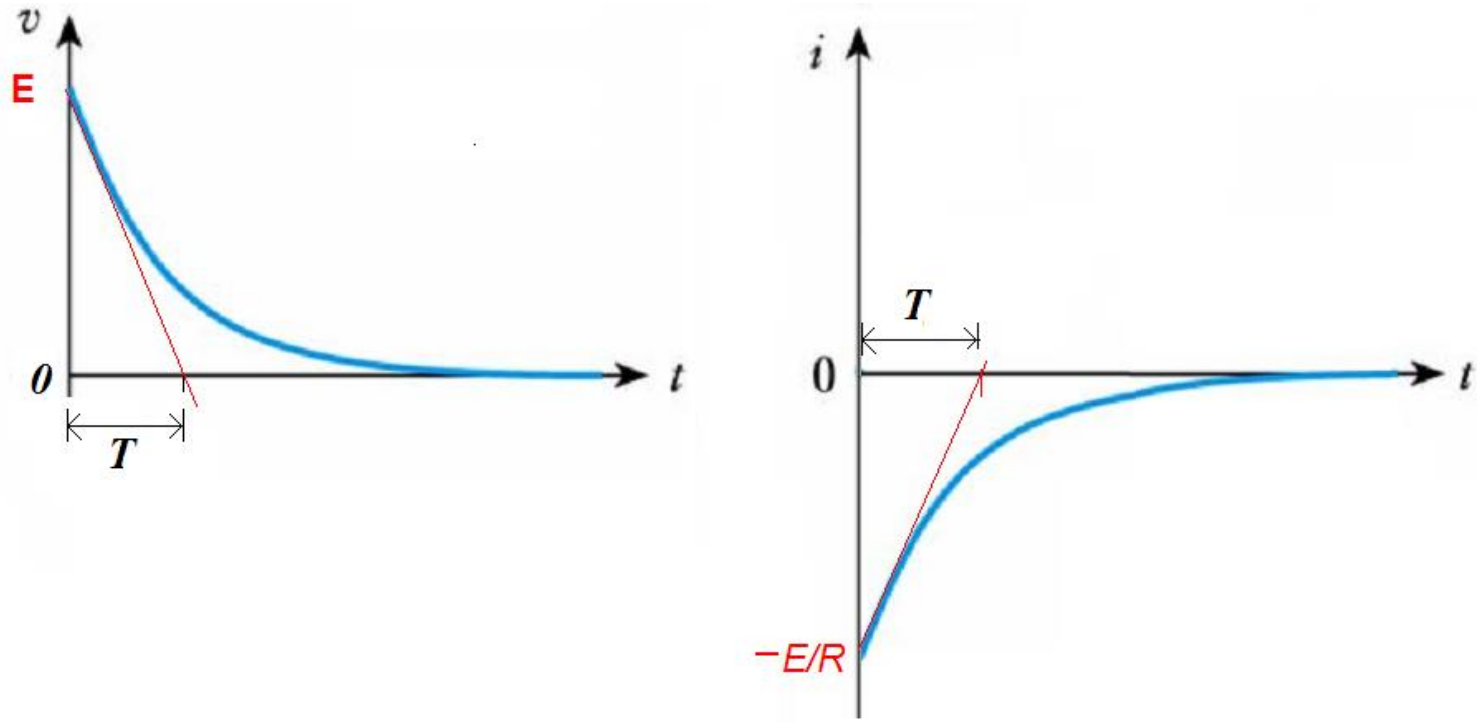
$$-v = C \cdot R \cdot \frac{dv}{dt}$$

Vremenska konstanta

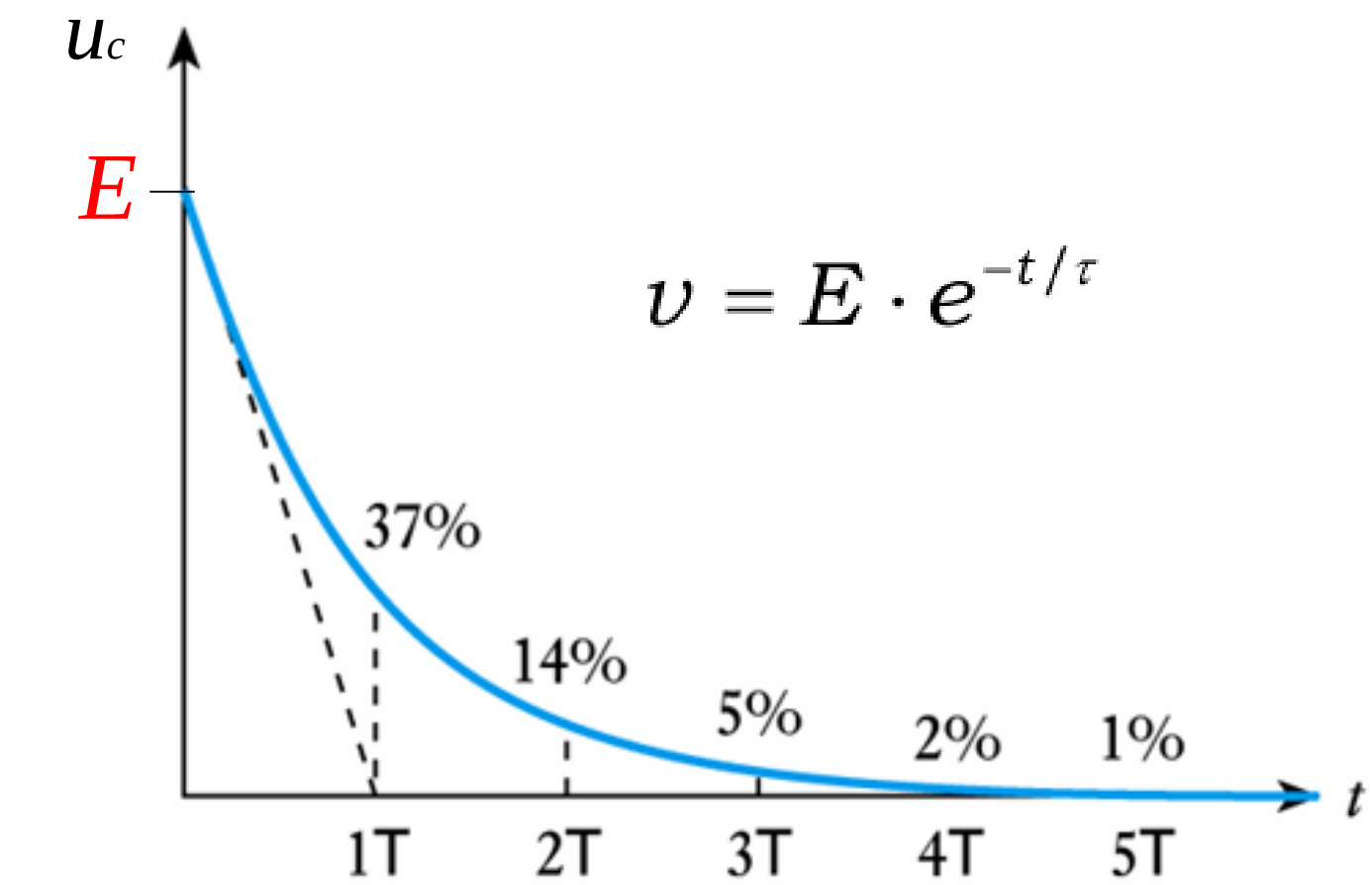
$$\tau = RC = T$$

Rešenje diferencijalne jednačine:

$$v = E \cdot e^{-t/\tau}$$



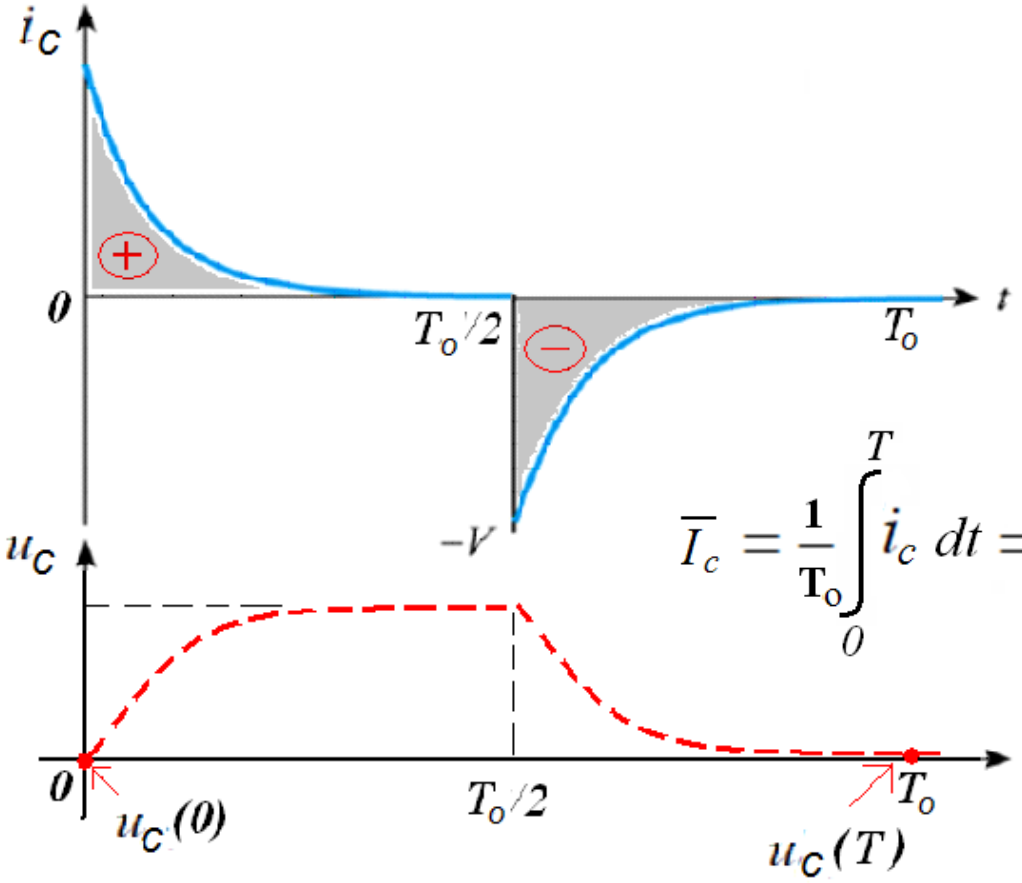
Struja kondenzatora je opet najveća u početnom trenutku i iznosi E/R, pošto napon na kondenzatoru ne može naglo da se promeni. Stoga napon na kondenzatoru opada do nule eksponencijalno (praktično nakon 4-5 **T**). Brzina opadanja zavisi i u ovom slučaju od vremenske konstante **T**.



Napon na kondenzatoru opada po eksponencijalnom zakonu. Za vreme jedne vremenske konstante ($t=\tau=T$) *napon opadne na 37% svoje početne* vrednosti. Vrednost stacionarnog stanja (napon jednak 0-prazan kondenzator) praktično se postiže već nakon vremena od 4-5**T**.

VEOMA VAŽAN ZAKLJUČAK ZA STRUJU KROZ KONDENZATOR!!!!

SREDNJA VREDNOST STRUJE KONDENZATORA JE JEDNAKA NULI!!!!



$$C\frac{du_c}{dt} = i_c$$

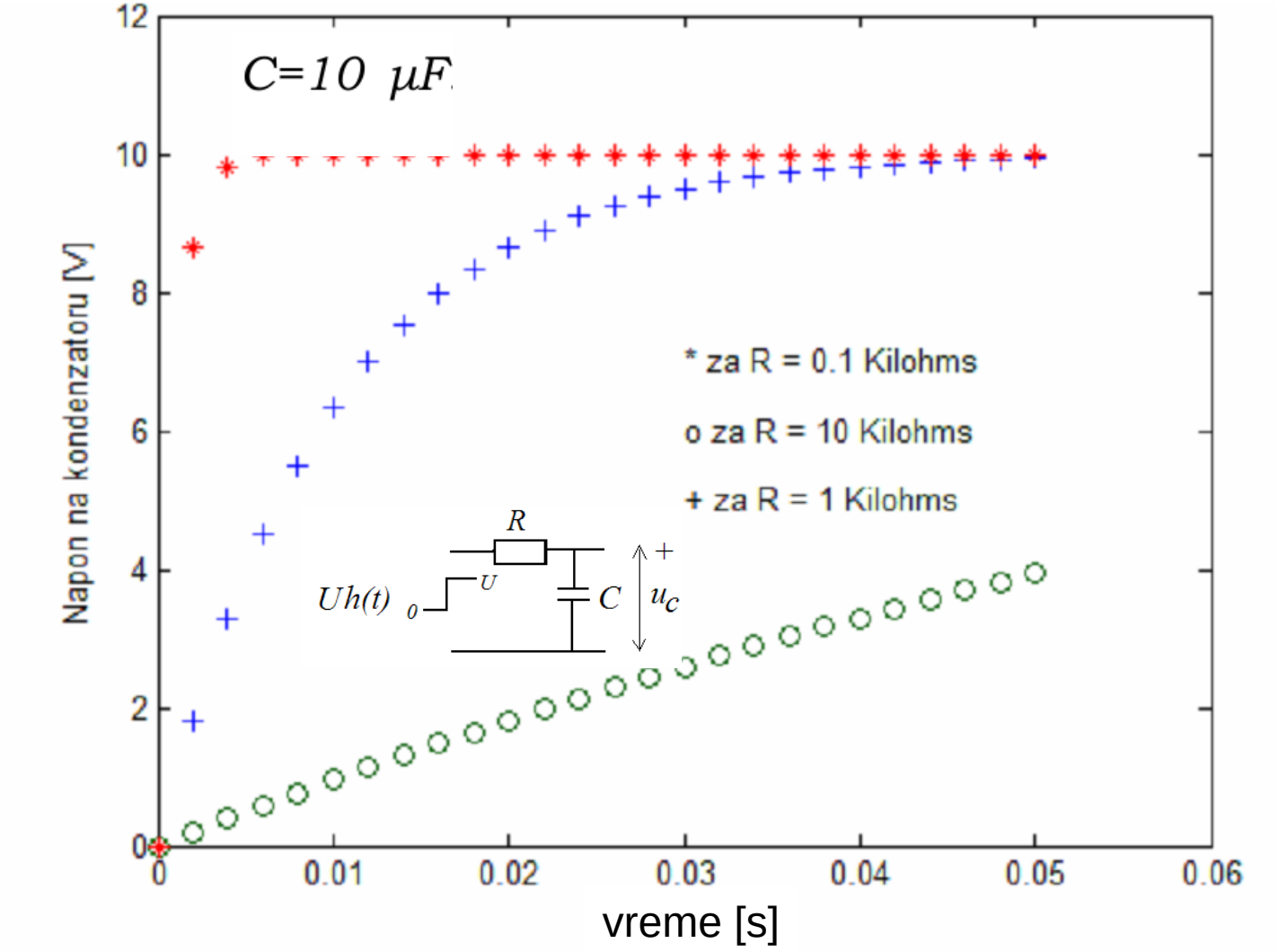
$$\overline{I}_c = \frac{1}{T_o}\int_0^T i_c\,dt = \frac{1}{T_o}\int_0^T C\frac{du_c}{dt}\,dt = \frac{1}{T_o}\int_{u_c(0)}^{u_c(T_o)} C\,du_c$$

$$\overline{I}_c = \frac{C}{T_o}\left[\overset{0}{\cancel{u_c(T_o)}} - \overset{0}{\cancel{u_c(0)}}\right]$$

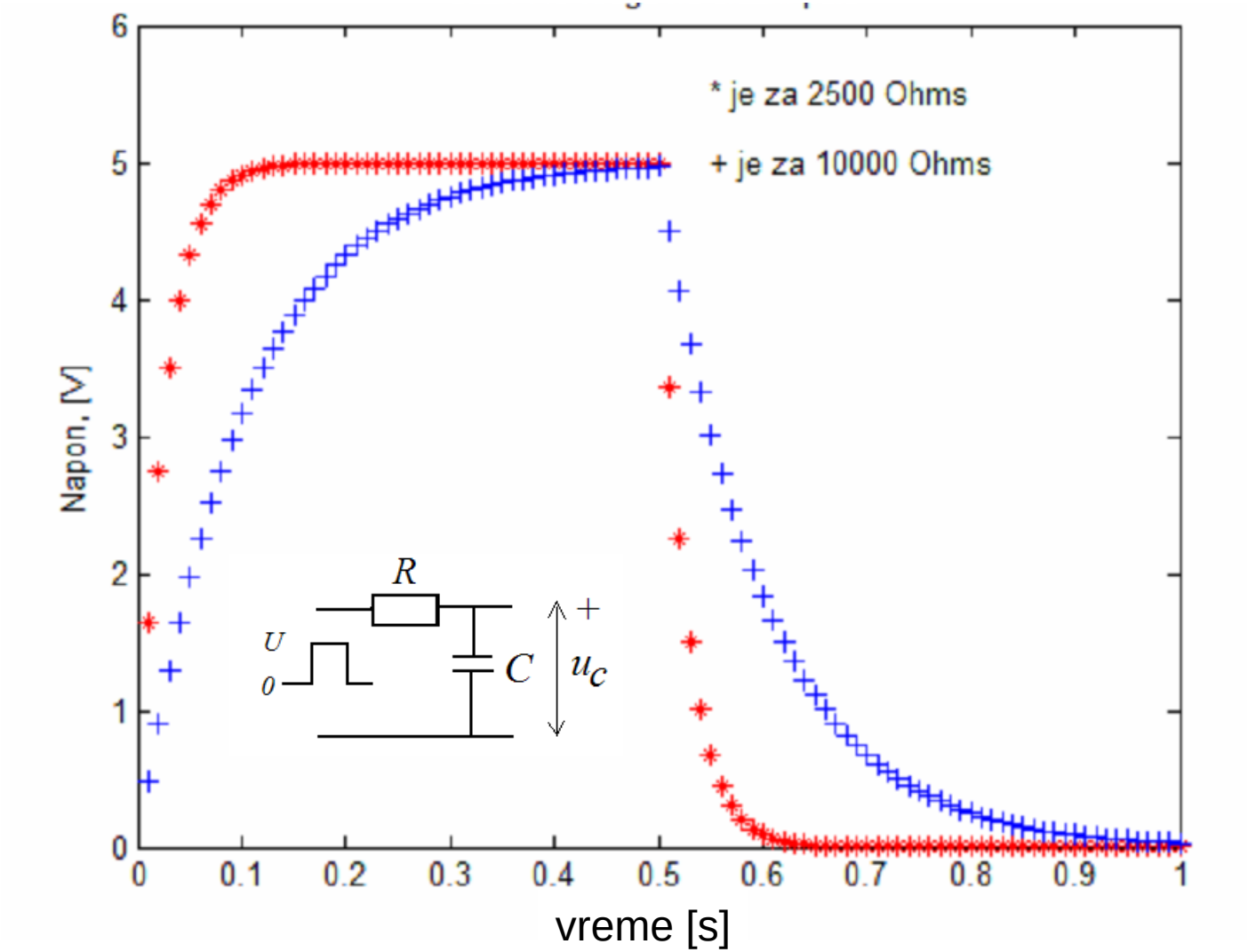
$$\boxed{\overline{I}_c = 0}$$

PRIMER: Odziv RC kola na odskočnu funkciju napona 5[V]·h(t)

za tri vrednosti otpornosti koje se razlikuju za red veličine



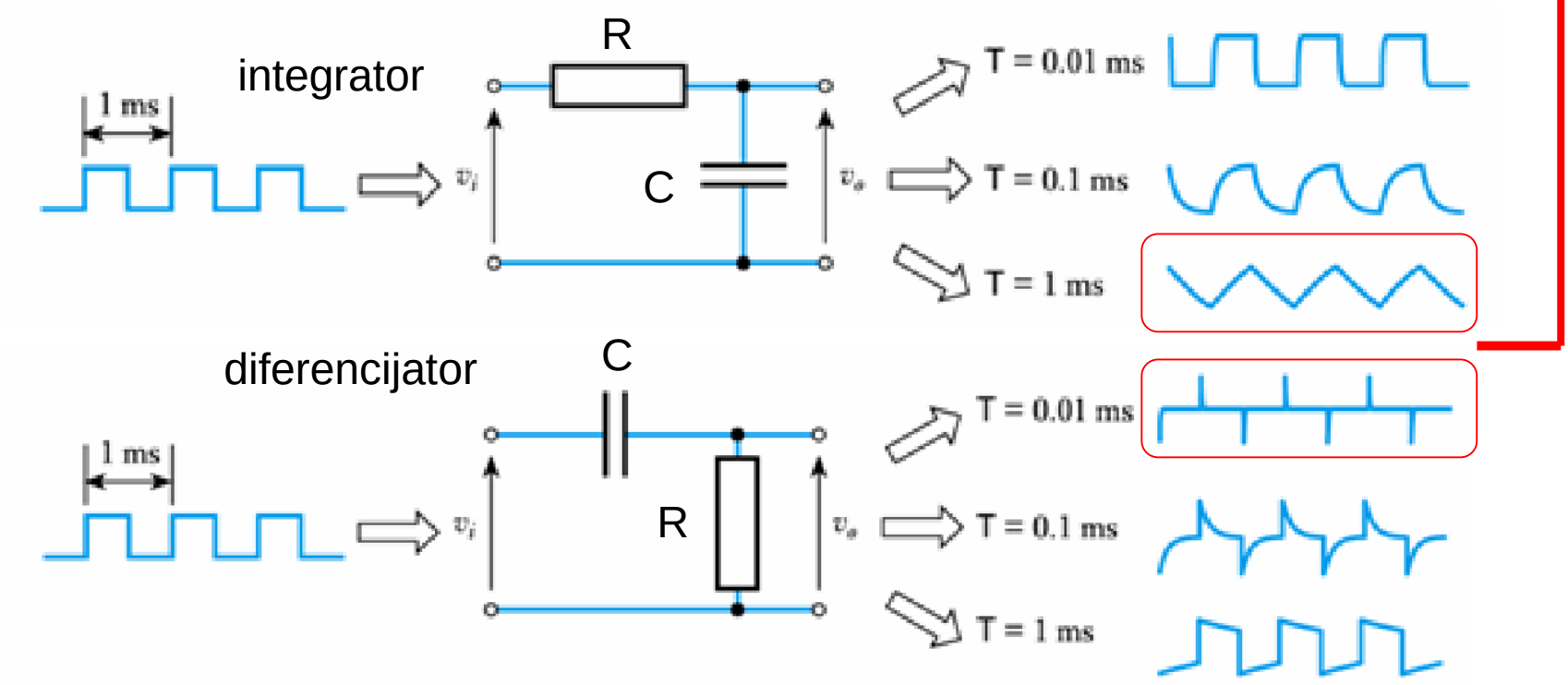
PRIMER: Odziv RC kola na pravougaoni impuls 5V/0.5s



POREĐENJE *RC* INTEGRATORA I DIFERENCIJATORA

Pobudna povorka pravougaonih impulsa ima učestanost 1kHz (To =1ms). Posmatraju se odzivi RC integratora i RC diferencijatora na ovu povorku, i to za tri vrednosti T=RC vremenske konstante: T=0.01ms, T=0.1ms i T=1ms

SLUČAJEVI NEOBIČNO ZNAČAJNI ZA UPRAVLJNJE ELEKTROENERGETSKIM PRETVARAČIMA



KONDENZATOR KAO NAPONSKI IZVOR

•Pod određenim uslovima kondenzator se može približno ponašati kao naponski izvor
•Ova osobina naročito dolazi do izražaja pri relativno velikiim vrednostima kapacitivnosti C
•Na oblik napona utiču talasni oblik primenjenog napona i njegova učestanost
•Koje su to kritične vrednosti kapacitivnosti i učestanosti iznad kojih se induktivnost ponaša kao naponski izvor?
•Ova osobina kondenzatora ima veliki značaj, u shvatanju rada topologija energetskih pretvarača
•Veoma bitna osobina je neprekidnost napona na kondenzatoru (napon na njemu se ne može naglo menjati)
•Nagla promena je moguća samo primenom jako velikih vrednosti struja punjenja
•Vrednosti tih struja su određene ograničenjima (potrebno je imati dovoljno jak strujni izvor, ovo je povezano sa grejanjem napojnih vodova, topljenjem izolacije provodnika i sl….)

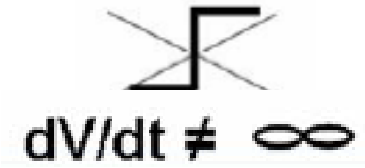
NEPREKIDNOST NAPONA NA KONDENZATORU

1. Osobina neprekidnosti napona na kondenzatoru

$$C\frac{du_C}{dt} = i_C$$

-Kada je na kondenzatoru konačne vrednosti kapaciteta ***C*** primenjena konačna vrednost struje i_C tada **porast napona**

$\frac{du_C}{dt}$ **može biti samo konačan!!!!**



OVO USTVARI ZNAČI DA NAPONA NA KONDENZATORU NE MOŽE DA SE MENJA NAGLO (**NEPREKIDNOST NAPONA NA KONDENZATORU**)

Nagla promena naona bi se teoretski mogla postići primenom jako velikih vrednosti struja i_C , odnosno pri $i_C \longrightarrow \infty$. U realnosti to nije moguće ostvariti.

KAKO KONDENZATOR UTIČE NA PORAST NAPONA , ODNOSNO ŠTA ĆE SE DESITI SA PORASTOM NAPONA KADA JE KAPACITET BLISKA NULI, A ŠTA KADA ONA TEŽI VRLO VELIKOJ VREDNOSTI (TEORETSKI BESKONAČNOJ)??

DA BI ODGOVORILI NA OVO PITANJE MORAMO POSMATRATI ČLAN ***1/C***

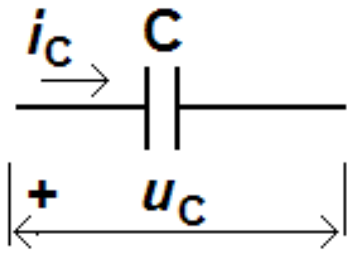
$$\frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C} i_C$$

posmatrajmo ovaj član

Za konačnu proizvoljnu vrednost struje i_C

i pri jako maloj vrednosti kapacitivnosti C

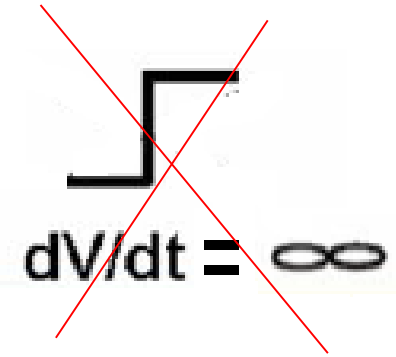
TEORETSKI $C \to 0$ ODNOSNO:



$$\frac{1}{C} \to \infty \Rightarrow \frac{du_C}{dt} \to \infty$$

$$\frac{du_C}{dt} \to \infty \Rightarrow u_C \neq \text{const}$$

DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST STRUJE KROZ KONDENZATOR , NAPON NA NJEMU NIJE KONSTANTAN!!!! ODNOSNO ON MOŽE DA SE NAGLO MENJA!!! ALI OVO NIJE REALAN SLUČAJ!!!



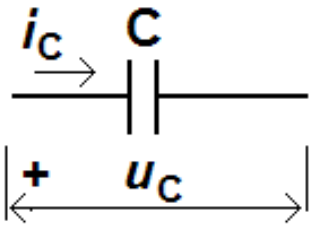
$$\frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C} i_C$$

posmatrajmo ovaj član

Za konačnu proizvoljnu vrednost struje i_C

i pri jako velikoj vrednosti kapacitivnosti C

TEORETSKI $C \to \infty$ ODNOSNO:

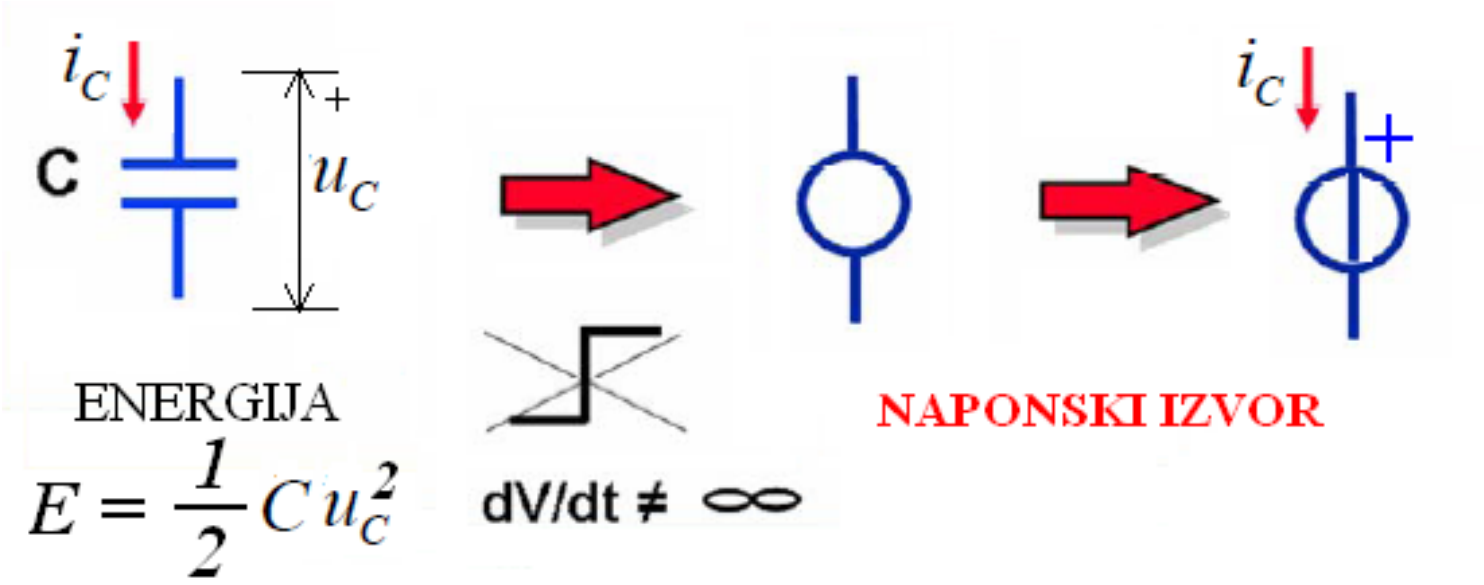


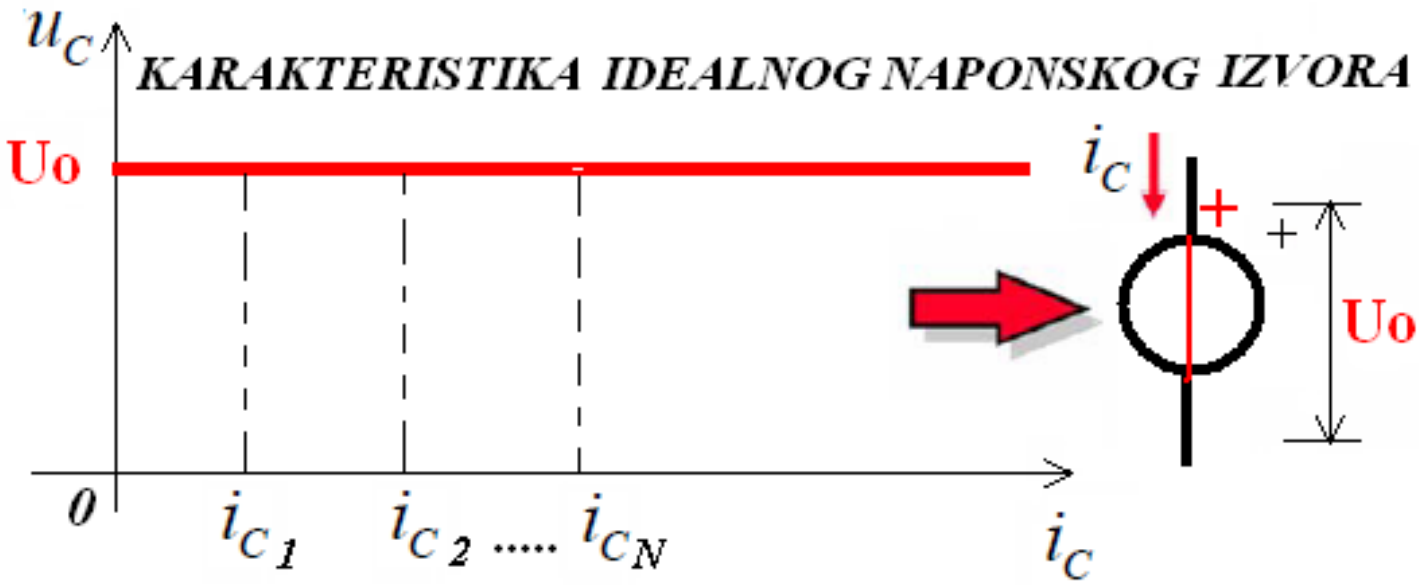
$$\frac{1}{C} \to 0 \Rightarrow \frac{du_C}{dt} \to 0$$

$$\frac{du_C}{dt} \to 0 \Rightarrow u_C = \text{const}$$

DRUGIM REČIMA ZA PROIZVOLJNU VREDNOST STRUJE KROZ KONDENZATOR NAPON KOJI SE IMA NA NJEMU JE KONSTANTAN!!!!

KONDENZATOR SE TADA **PONAŠA KAO NAPONSKI IZVOR**

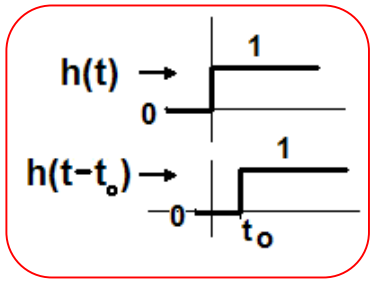


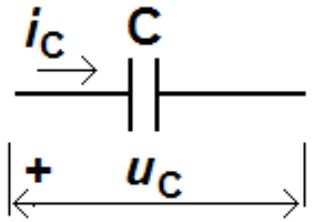


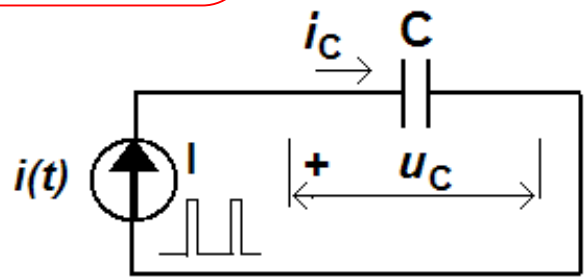
ZA PROIZVOLJNE ALI KONAČNE VREDNOSTI STRUJE NAPON NA C JE KONSTANTAN = >
KONDENZATOR SE PONAŠA KAO NAPONSKI IZVOR

KONDENZATOR- kao integrator

ODSKOČNA (Hevisajdova) funkcija



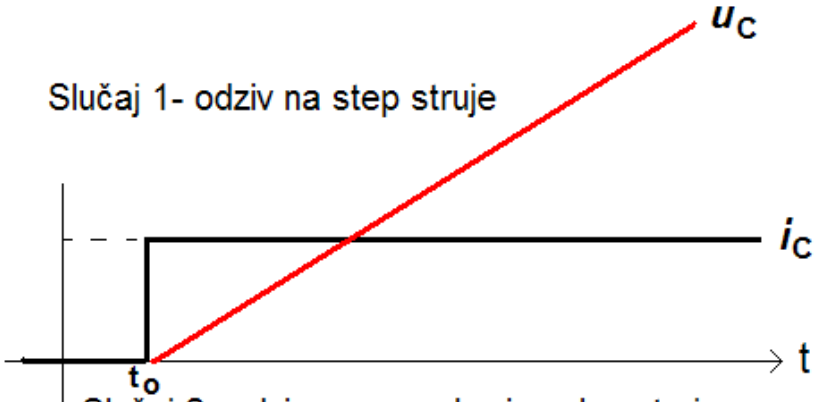




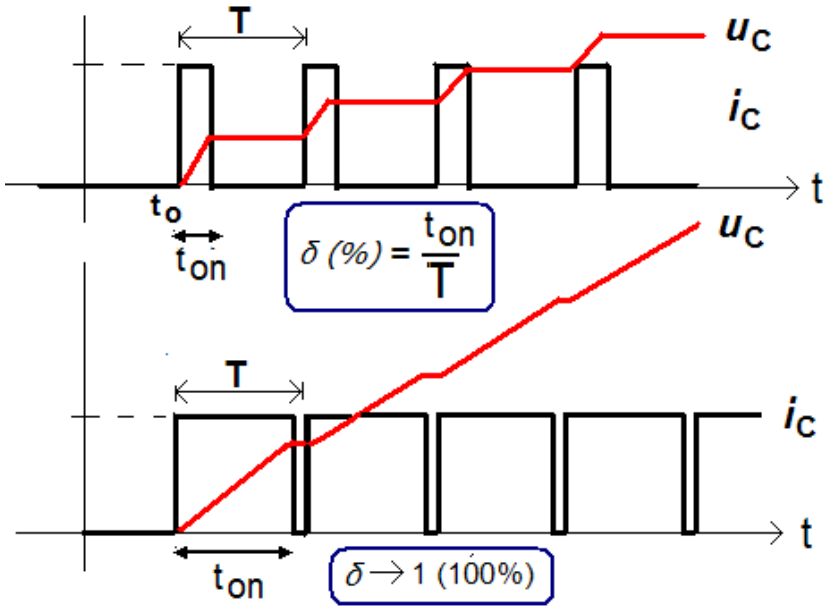
Kada se na kondenzator primene odskočna (step) funkcija struje I·h(t-to) ili unipolarni niz impulsa amplitude I, kao odziv se dobija linearni, odnosno stepenasto linearni porast napona na kondenzatoru u vremenu

Kakav se odziv dobija ako se primene bipolarni impulsi (pozitivnog i negativnog polariteta struje ?

Slučaj 1- odziv na step struje



Slučaj 2- odziv na povorku impulsa struje



SLUČAJ koji → odzivu na step napona **I**· h(t−t$_o$) (Slučaj 1)

ŠTA KAŽE MATEMATIKA??

U VREMENSKOM DOMENU

$$C\frac{du_c}{dt}=i_c$$

Napon na C je određen integralom struje

$$u_c=\frac{1}{C}\int_0^t i_c\,dt+U_o$$

U "s" DOMENU (LAPLASOVA TRANSFORMACIJA)

$$\frac{d(\ )}{dt}\longrightarrow s$$ NA STRUJU

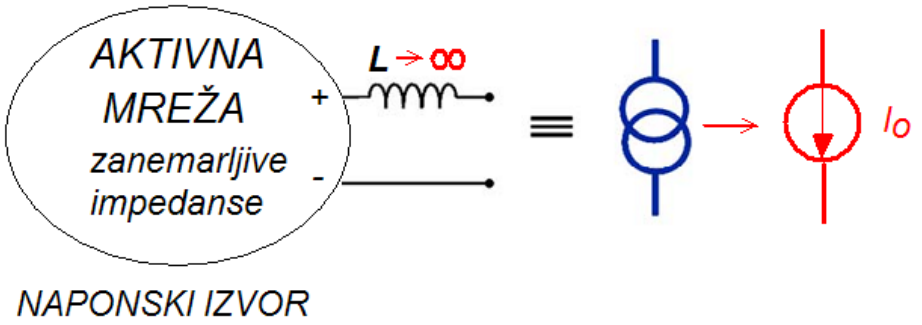
PRIMENOM OPERATOR A DOBIJAMO: $$sC\cdot \mathbf{U}_c(s)=I_c(s)$$

ODNOSNO: $$\mathbf{U}_c(s)=\frac{1}{sC}I_c(s)$$

$\frac{1}{sC}$ → integrator u "s" domenu

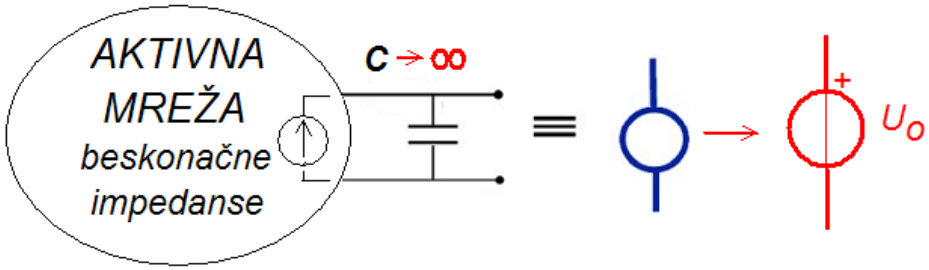
NAPON NA KONDENZATORU SE DOBIJA INTEGRACIJOM STRUJE

STRUJNI I NAPONSKI IZVOR U ISTOM KOLU?



NAPONSKI IZVOR

Vezivanjem veoma velike induktivnosti sa aktivnom mrežom koja se ponaša kao naponski izvor (*dipol* sa beskonačno malom unutrašnjom impedansom) dobijamo transformaciju naponskog u STRUJNI IZVOR

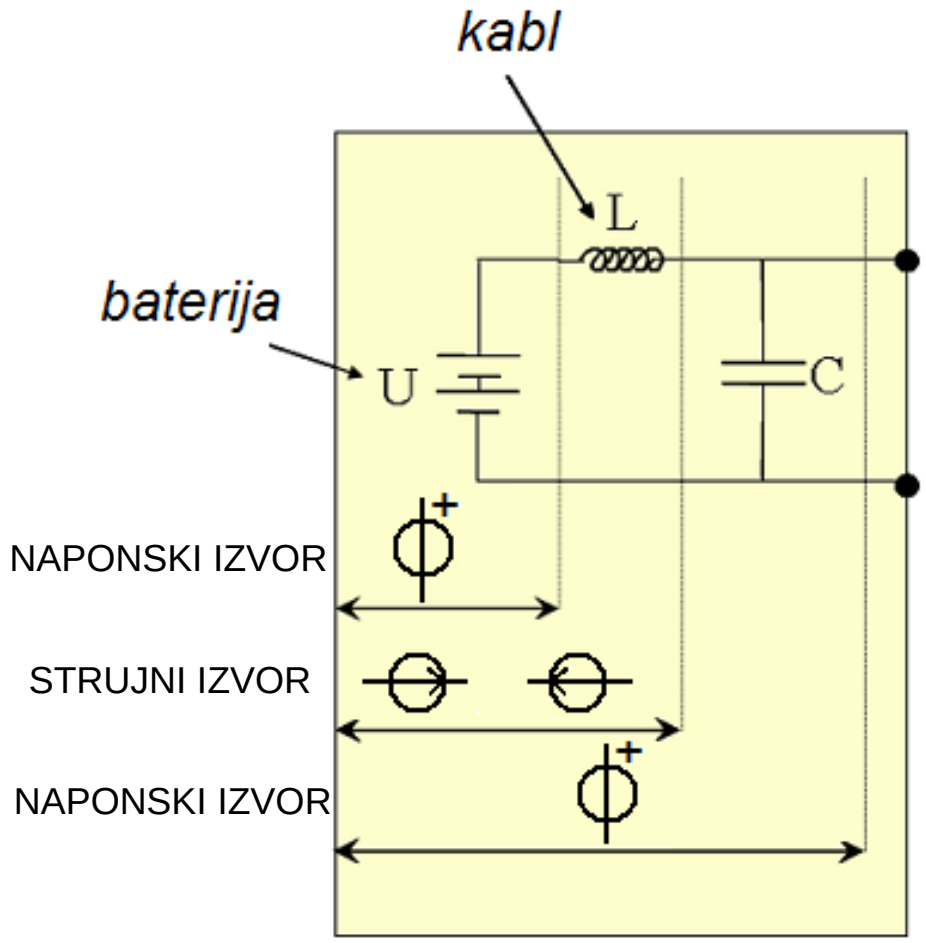


STRUJNI IZVOR

Vezivanjem veoma velike kapacitivnosti sa aktivnom mrežom koja se ponaša kao strujni izvor (*dipol* sa beskonačno velikom unutrašnjom impedansom) dobijamo transformaciju strujnog u NAPONSKI IZVOR

U praksi, identifikacija realnog generatora ili realnog opterećenja sa naponskim ili strujnim izvorom nije očigledna. Ovo je razlog zašto je priroda izvora često “pojačana” dodavanjem paralelnog kondenzatora (u slučaju naponskog izvora) ili redne Induktivnosti u slučaju strujnog izvora.

TIPIČAN PRIMER: Karakter izvora u jednom istom kolu može da se menja



Baterija napona U se ponaša kao generator tokom pražnjenja, a kao opterećenje tokom punjenja.

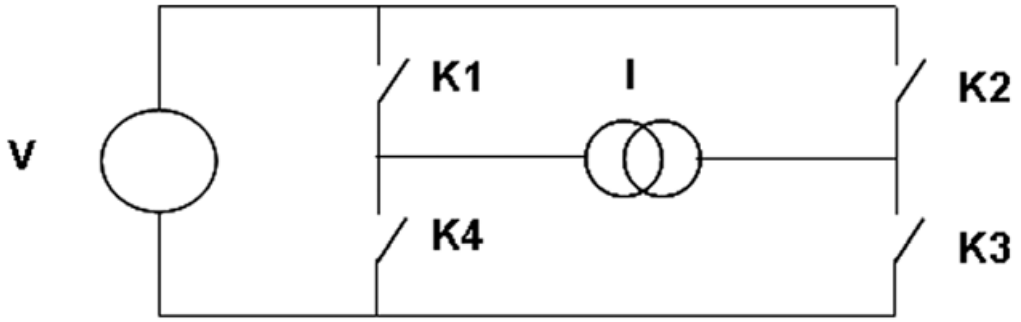
Ovaj u suštini naponski izvor DC napona je strujno reverzibilan ali ne i naponski

Ipak zbog induktivnosti L napojnih kablova ova baterija se može uzeti kao strujni izvor koji može biti trenutno naponski reverzibilan i trajno strujno reverzibilan.

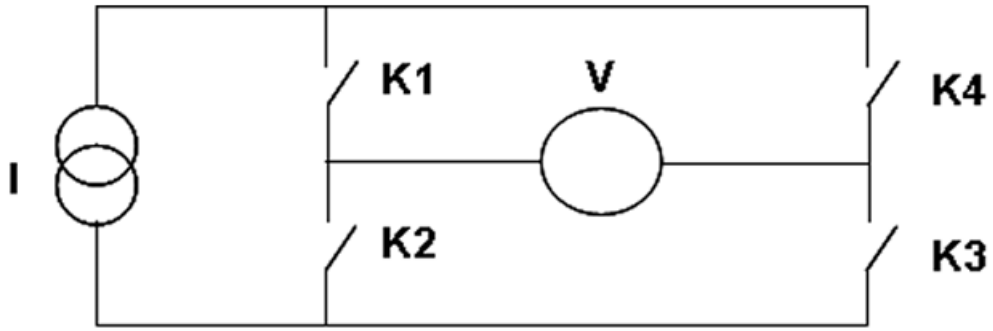
Ako se doda banka kondenzatora na kraju kabla ceo sistem ponovo postaje izvor napona.

OČIGLEDNO, STRUJNIO IZVOR DOBIJEN POVEZIVANJEM INDUKTIVNOSTI NA RED SA IZVOROM NAPONA DRŽI ISTU REVERZIBILNOST KAO IZVOR NAPONA

TOPOLOGIJE DIREKTNIH ENERGETSKIH PRETVARAČA



OSNOVNA KONFIGURACIJA DIREKTNOG
NAPONSKO-STRUJNOG KONVERTORA
(*NAPONSKI INVERTOR = VOLTAGE SOURCE INVERTER*)

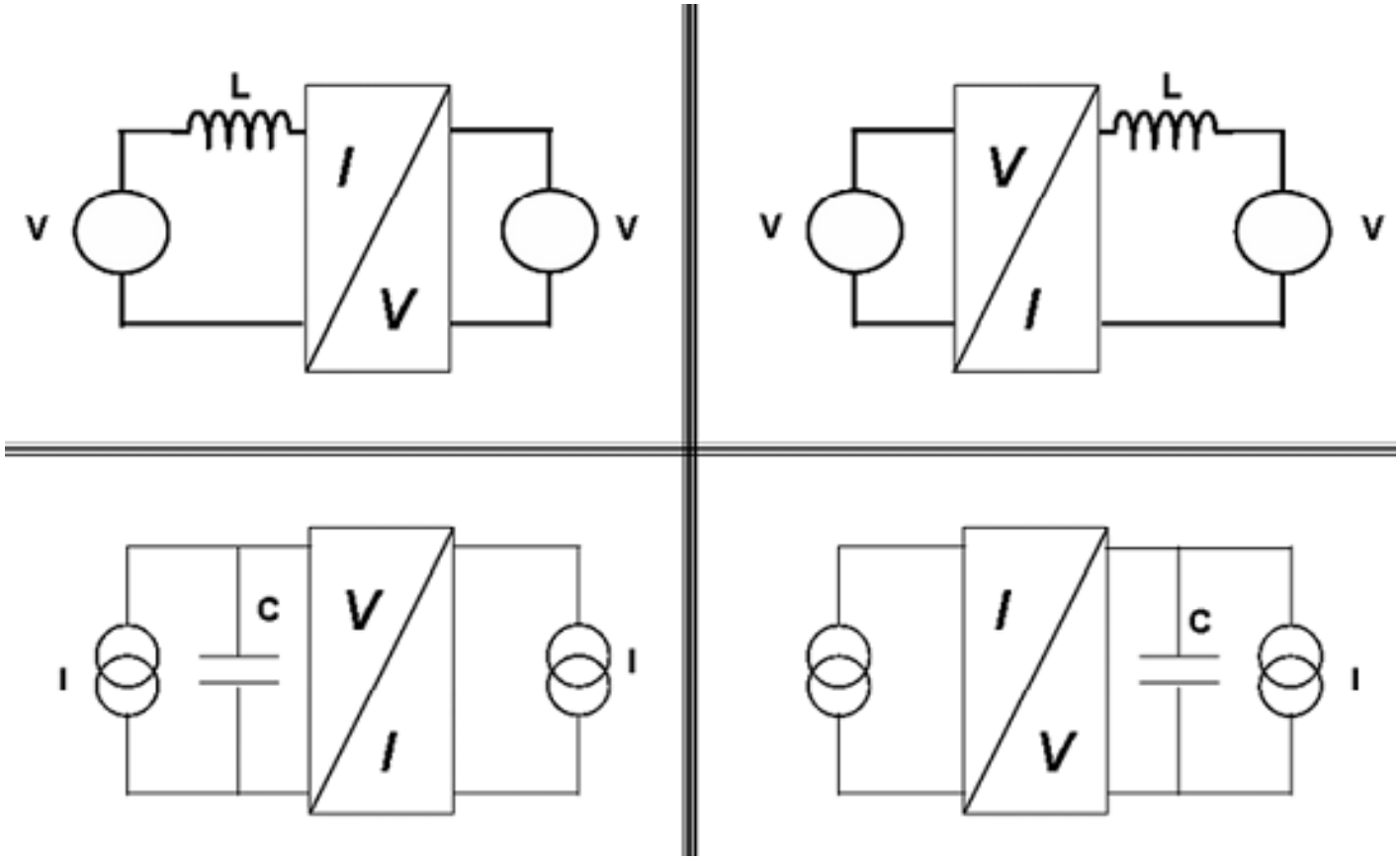


OSNOVNA KONFIGURACIJA DIREKTNOG
STRUNO - NAPONSKOG KONVERTORA
(*STRUJNI INVERTOR = CURRENT SOURCE INVERTER*)

TOPOLOGIJE INDIREKTNIH ENERGETSKIH PRETVARAČA

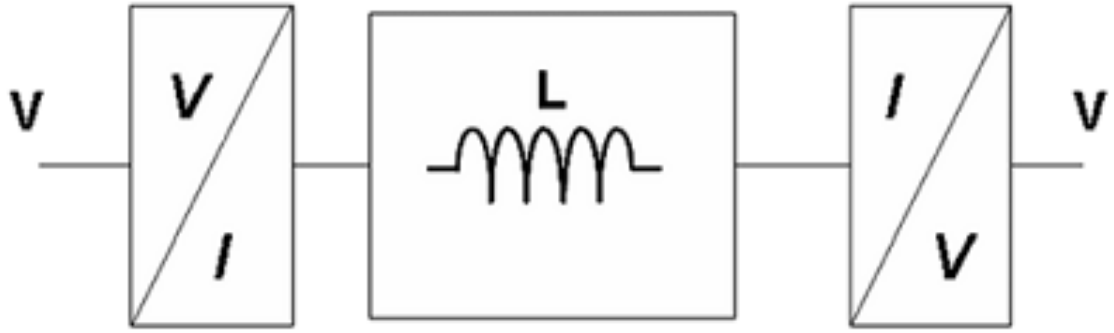
NAPONSKO-NAPONSKO PRETVARANJE

STRUJNO - STRUJNO PRETVARANJE



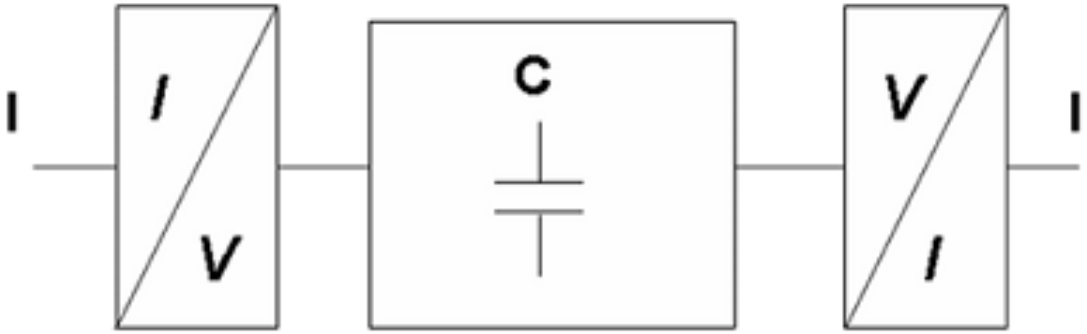
ULAZ IZLAZ ULAZ IZLAZ

NAPONSKO-NAPONSKO PRETVARANJE



INDUKTIVNOST U MEĐUKOLU

STRUJNO-STRUJNO PRETVARANJE

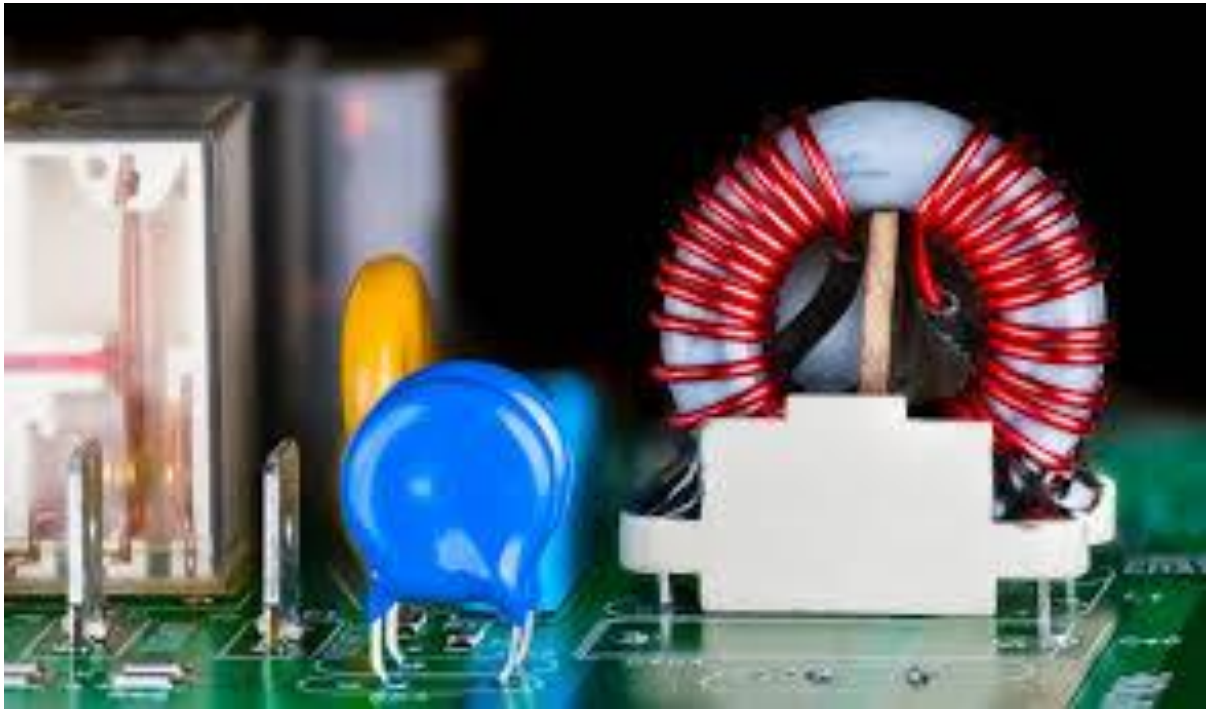


KAPACITIVNOST U MEĐUKOLU

INDUKTIVNOST ILI KAPACITIVNOST SE MOGU UPOTREBITI KAO BAFERSKO MEĐUKOLO IZMEĐU DVA DIREKTNA PRETVARAČA

HVALA NA PAŽNJI

PITANJA???



VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE

OSNOVNE STUDIJE

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

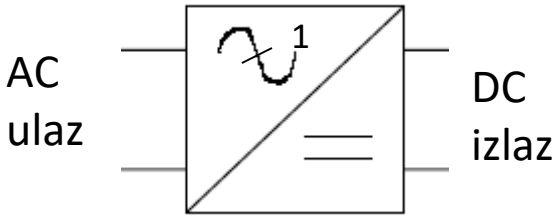
NEKONTROLISANI AC/DC ENERGETSKI PRETVARAČI (DIODNI ISPRAVLJAČI)

PREDMETNI PROFESOR:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

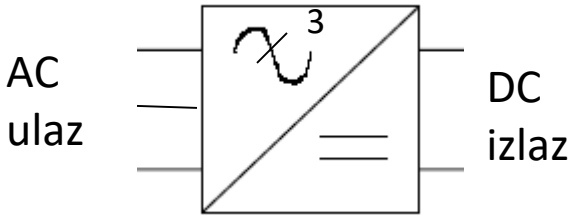
AC/DC pretvarači-ISPRAVLJAČI

AC ulaz: monofazni ili trofazni

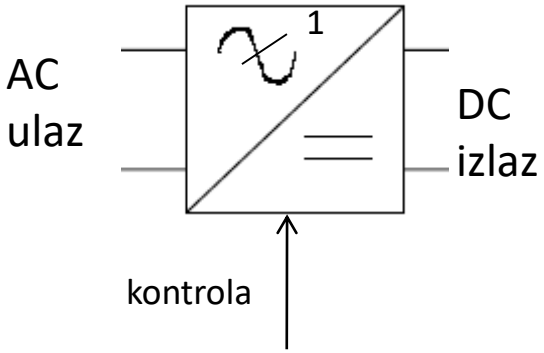
230V, 50/60Hz
3x400/230V, 50/60Hz

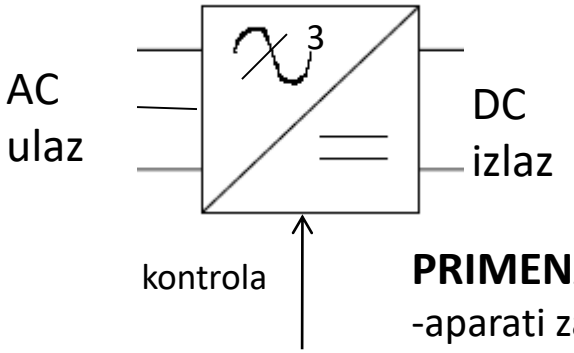


MONOFAZNI DIODNI ISPRAVLJAČI



TROFAZNI DIODNI ISPRAVLJAČI



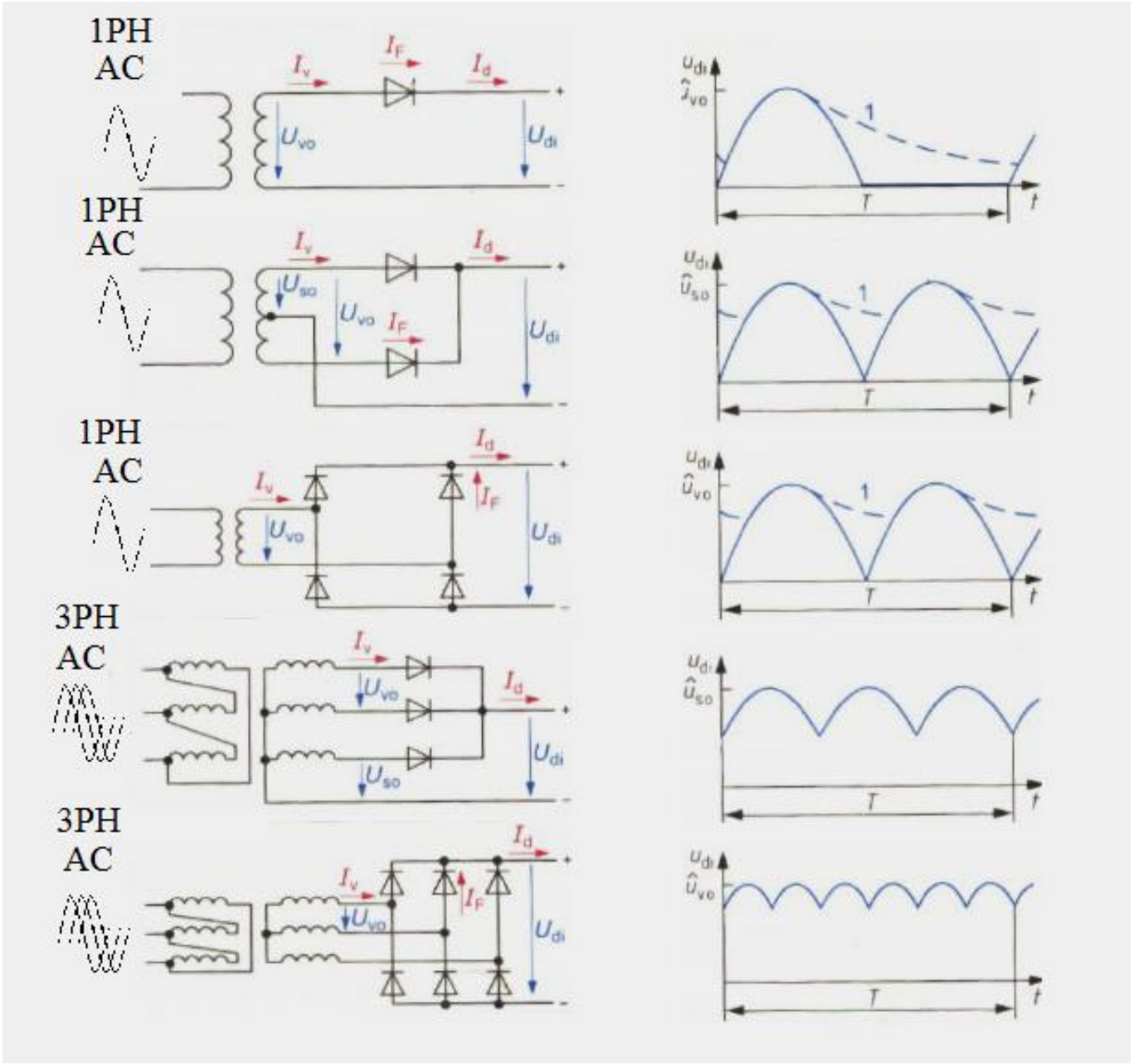


KONTROLISANI
TIRISTORSKI ili TRANZISTORSKI ISPRAVLJAČI
MONOFAZNI , TROFAZNI

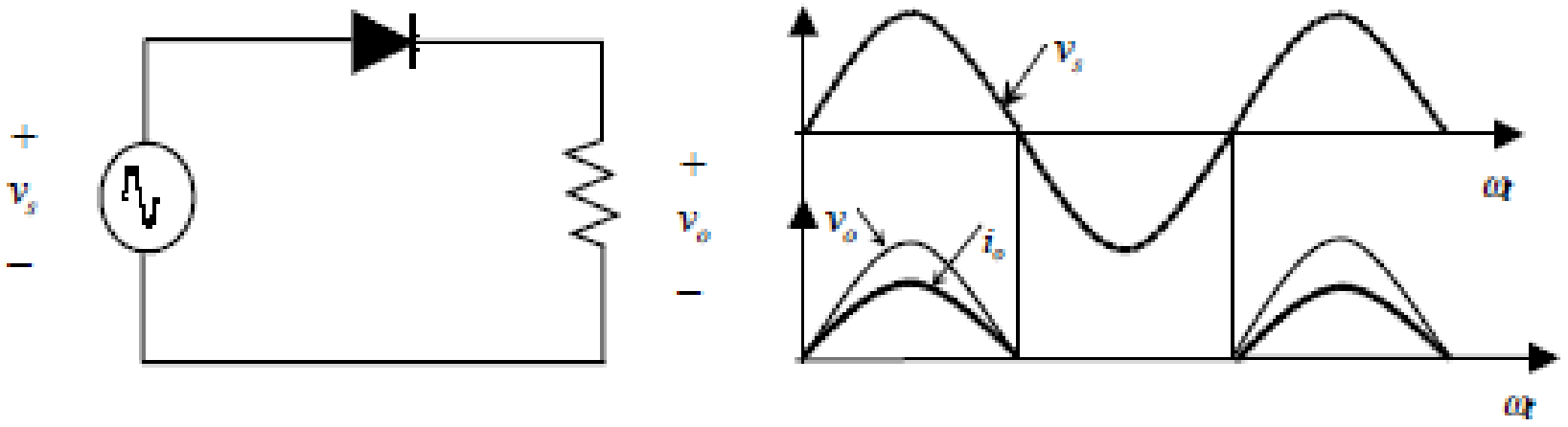
TIRISTORSKI: POLUUPRAVLJIVI I PUNOUPRAVLJIVI

PRIMENA:
-aparati za zavarivanje
-jednosmerni motorni pogoni
-punjači baterija
-jednosmerni izvori napajanja
-visokonaponske DC aplikacije
- DC transmisije dalekovodima

NEUPRAVLJIVI AC/DC PRETVARAČI DIODNI ISPRAVLJAČI



IDEALNI POLUTALASNI ISPRAVLJAČ: MONOFAZNI-OTPORNO OPTEREĆENJE



$$V_o = V_{avg} = V_{DC} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t)\, d\omega t$$

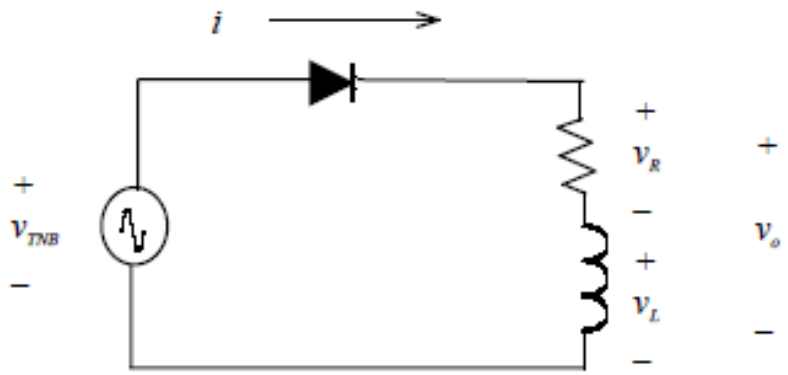
$$= \frac{V_m}{\pi} = 0.318 V_m$$

DC izlazni napon

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} (V_m \sin\omega t)^2\, d\omega t} = 0.5 V_m$$

RMS izlazni napon

IDEALNI POLUTALASNI ISPRAVLJAČ: MONOFAZNI, R-L OPTEREĆENJE



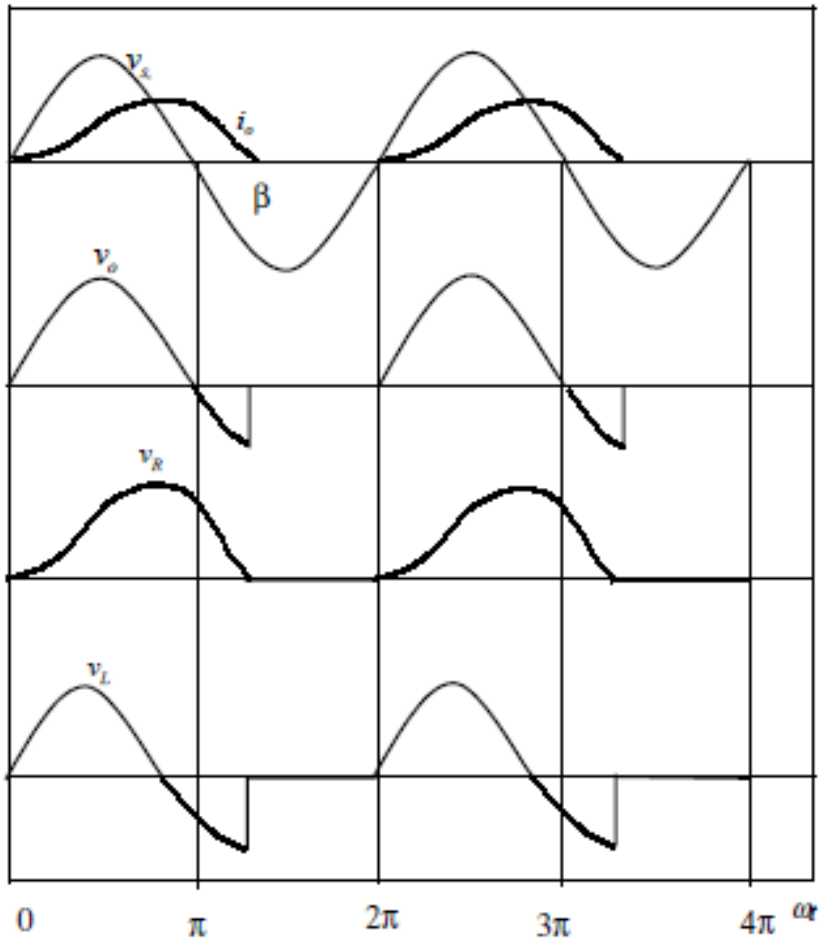
$$v_s = v_R + v_L$$

$$V_m \sin(\omega t) = i(t)R + L\frac{di(t)}{dt}$$

$$i(\omega t) = \begin{cases} \left(\frac{V_m}{Z}\right)\cdot\left[\sin(\omega t - \theta) + \sin(\theta)e^{-\omega t/\omega\tau}\right] & \text{za} \quad 0 \le \omega t \le \beta \\ 0 & \text{za} \quad 2\pi > \omega t > \beta \end{cases}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

$$\tau = L/R$$

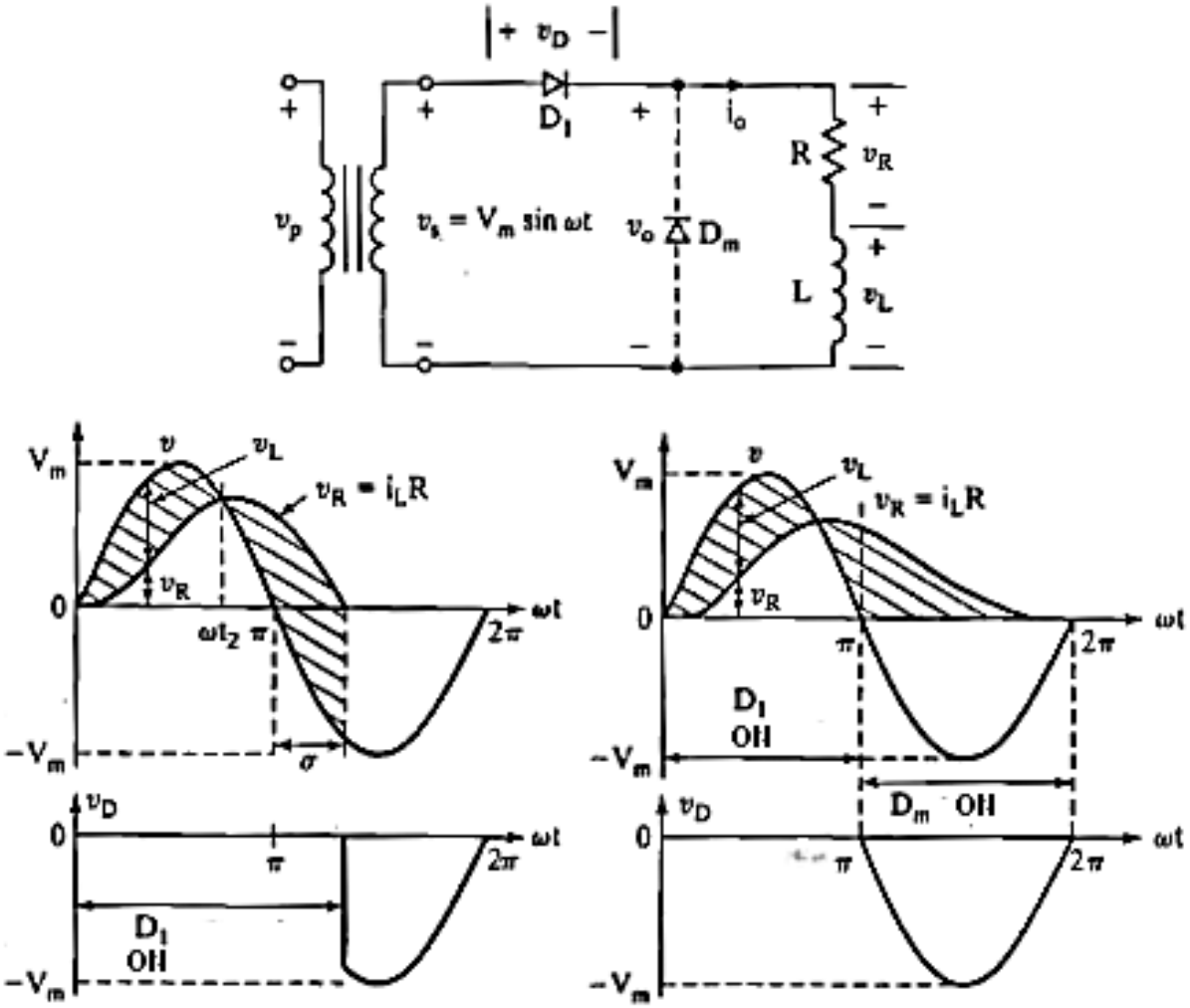


UGAO β ODREĐUJEMO IZ USLOVA:

$$i(\beta) = \left(\frac{V_m}{Z}\right)\cdot\left[\sin(\beta - \theta) + \sin(\theta)e^{-\beta/\omega\tau}\right] = 0$$

$$\sin(\beta - \theta) + \sin(\theta)e^{-\beta/\omega\tau} = 0$$

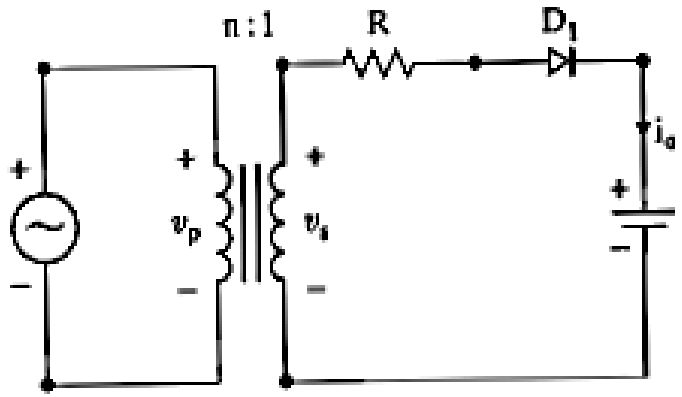
KORIŠĆENJE ZAMAJNE DIODE ZA ELIMINISANJE NEGATIVNOG IZLAZNOG NAPONA



$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi}\int_0^{\pi+\sigma} \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{V_m}{2\pi}[-\cos \omega t]_0^{\pi+\sigma}$$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{2\pi}[1 - \cos(\pi + \sigma)] \qquad I_{dc} = V_{dc}/R$$

IDEALNI POLUTALASNI ISPRAVLJAČ: MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: R-DC izvor
(PUNJAČ BATERIJE SA PREDOTPOROM)

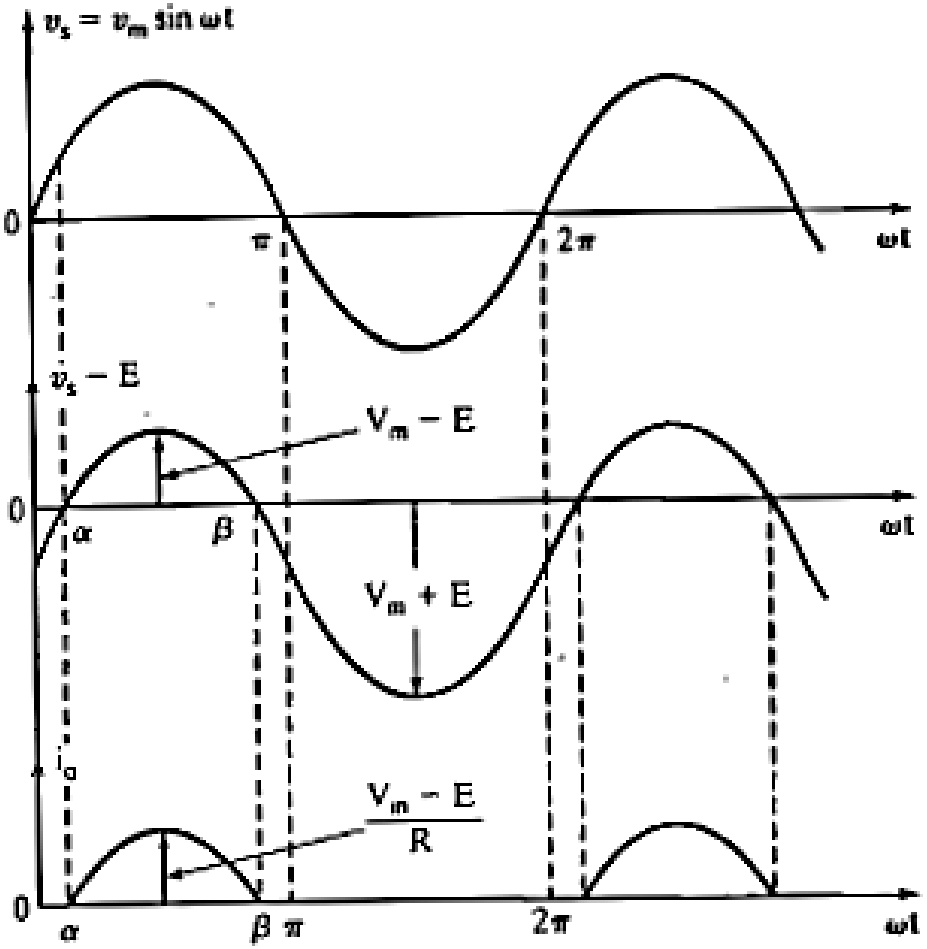


$$V_m \sin\alpha = E \qquad \alpha = \sin^{-1}\frac{E}{V_m}$$

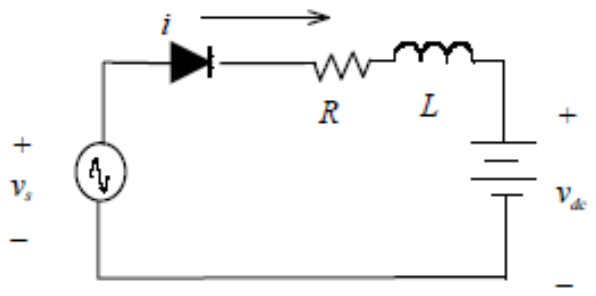
$$\beta = \pi - \alpha$$

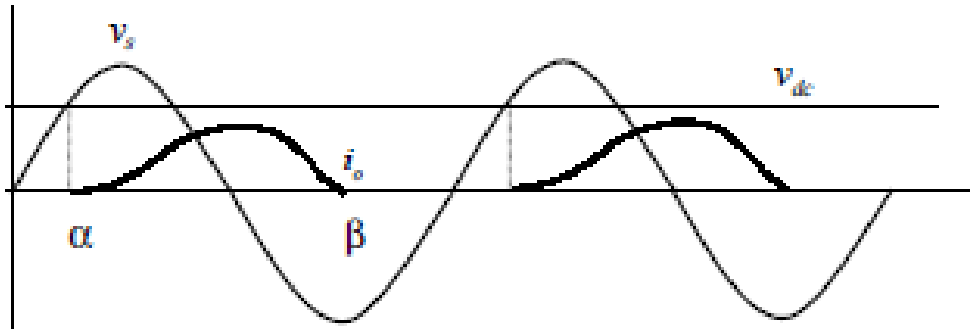
$$i_0 = \frac{v_s - E}{R} = \frac{V_m \sin\omega t - E}{R}$$

$$\alpha < \omega t < \beta$$



IDEALNI POLUTALASNI ISPRAVLJAČ: MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: R-L –DC izvor





Početak vođenja diode

$$V_m \sin\omega t = iR(t) + L\frac{di(t)}{dt} + V_{dc}$$

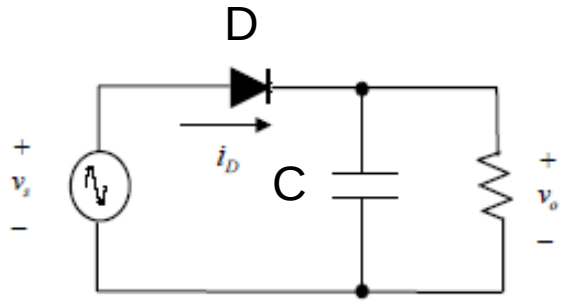
$$V_m \sin\alpha = V_{dc} \qquad \Rightarrow \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{V_{dc}}{V_m}\right)$$

$$V_m \sin\omega t = iR(t) + L\frac{di(t)}{dt} + V_{dc}$$

$$i(\omega t) = \begin{cases} \left(\frac{V_m}{Z}\right)\cdot\left[\sin(\omega t - \theta) - \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-\omega t/\omega\tau}\right] & \text{za } \alpha \leqslant \omega t \leqslant \beta \\ 0 & \text{za } 2\pi + \alpha > \omega t > \beta \end{cases}$$

$$A = \left(\frac{V_m}{Z}\sin(\alpha - \theta) + \frac{V_{dc}}{R}\right)e^{\alpha/\omega\tau}$$

IDEALNI POLUTALASNI ISPRAVLJAČ: MONOFAZNI,OPTEREĆENJE: R-C



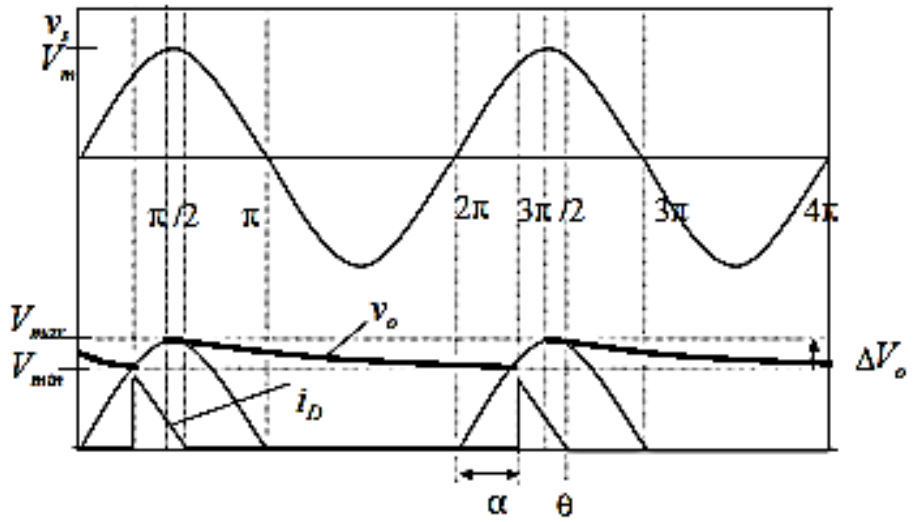
$$v_o = \begin{cases} V_m \sin(\omega t) & \longrightarrow \text{D on} \\ V_\theta \, e^{-(\omega t - \theta)/\omega RC} & \longrightarrow \text{D off} \end{cases}$$

$$V_\theta = V_m \sin\theta$$

$$V_\theta = V_m \qquad \theta = \pi/2 \qquad \alpha \approx \pi/2$$

$$\Delta V_o = V_{\max} - V_{\min} = V_m - V_m \sin(2\pi + \alpha) = V_m - V_m \sin\alpha$$

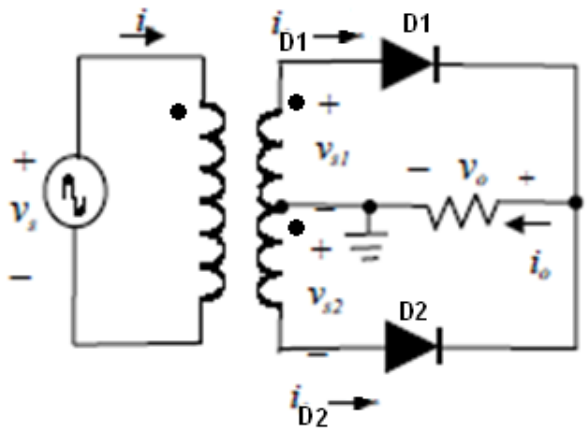
$$v_o(2\pi + \alpha) = V_m e^{-\left(\frac{2\pi + \pi/2 - \pi/2}{\omega RC}\right)} = V_m e^{-\left(\frac{2\pi}{\omega RC}\right)} \qquad \Delta V_o \approx V_m - V_m e^{-\left(\frac{2\pi}{\omega RC}\right)} = V_m \left(1 - e^{-\left(\frac{2\pi}{\omega RC}\right)}\right)$$

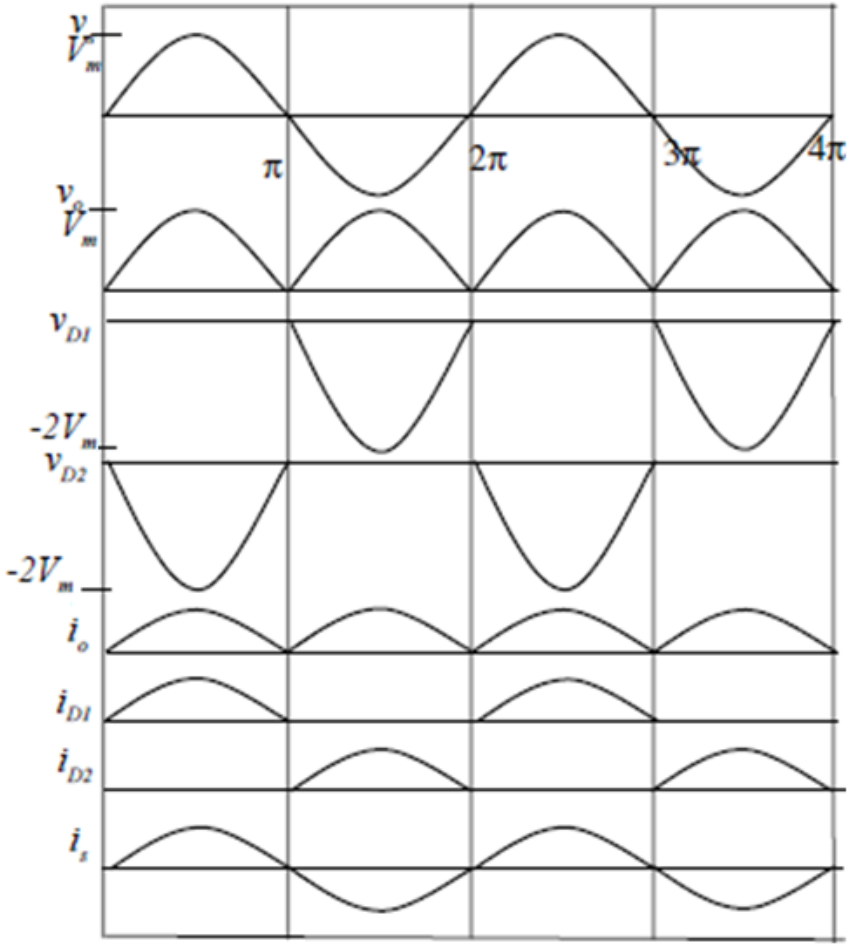


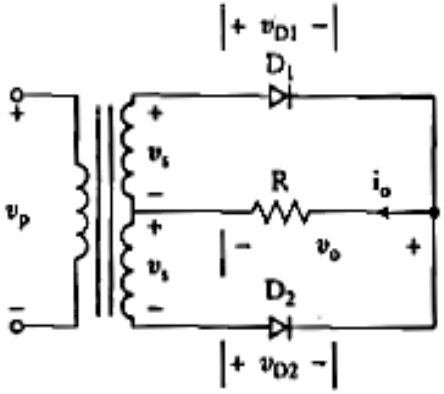
$$1 - e^{-\left(\frac{2\pi}{\omega RC}\right)} = 1 - \frac{2\pi}{\omega RC}$$

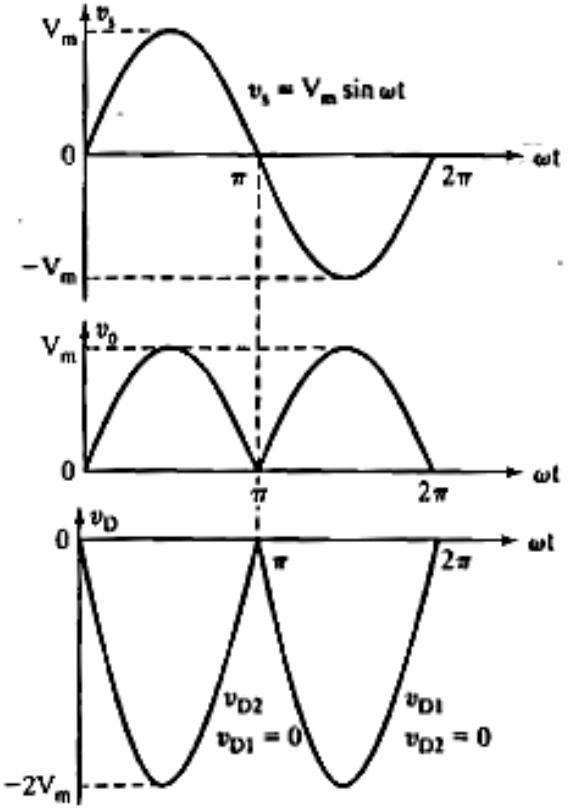
$$\Delta V_o = V_m \left(\frac{2\pi}{\omega RC}\right) = \frac{V_m}{fRC}$$

IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ : MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: R (TALASNI OBLICI)









$$V_{dc} = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} V_m \sin \omega t \, dt = \frac{2V_m}{\pi} = 0.6366V_m$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.6366V_m}{R} \qquad P_{dc} = (0.6366V_m)^2/R$$

$$V_{rms} = \left[\frac{2}{T}\int_0^{T/2} (V_m \sin \omega t)^2 \, dt\right]^{1/2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.707V_m}{R} \qquad P_{ac} = (0.707V_m)^2/R.$$

EFIKASNOST	$\eta = (0.6366V_m)^2/(0.707V_m)^2 = 81\%.$
FORM FACTOR (Faktor Oblika)	$FF = 0.707V_m/0.6366V_m = 1.11.$
RIPPLE FACTOR	$RF = \sqrt{1.11^2 - 1} = 0.482$ or 48.2%.
MAX INV. diode	$PIV = 2V_m$
POWER FACTOR (PF)-faktor snage	$PF = \frac{P_{ac}}{VA} = \frac{0.707^2}{2 \times 0.707 \times 0.5} = 0.707$

1/TUF = 1/0.5732 = 1.75

TRANSFORMATOR

$$V_s = V_m/\sqrt{2} = 0.707V_m.$$

$$I_s = 0.5V_m/R$$

$$VA = 2V_sI_s = 2 \times 0.707V_m \times 0.5V_m/R$$

$$TUF = \frac{P_{dc}}{VA} = \frac{0.6366^2}{2 \times 0.707 \times 0.5} = 0.5732 = 57.32\%$$

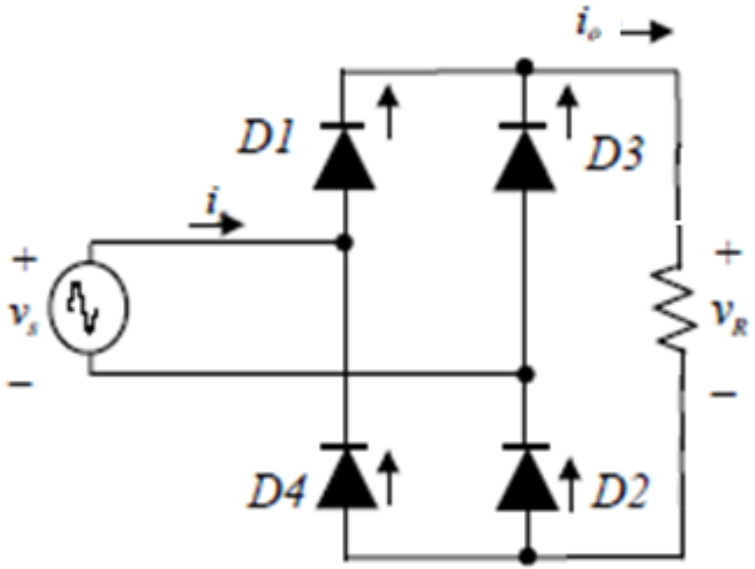
$$I_{s(peak)} = V_m/R$$

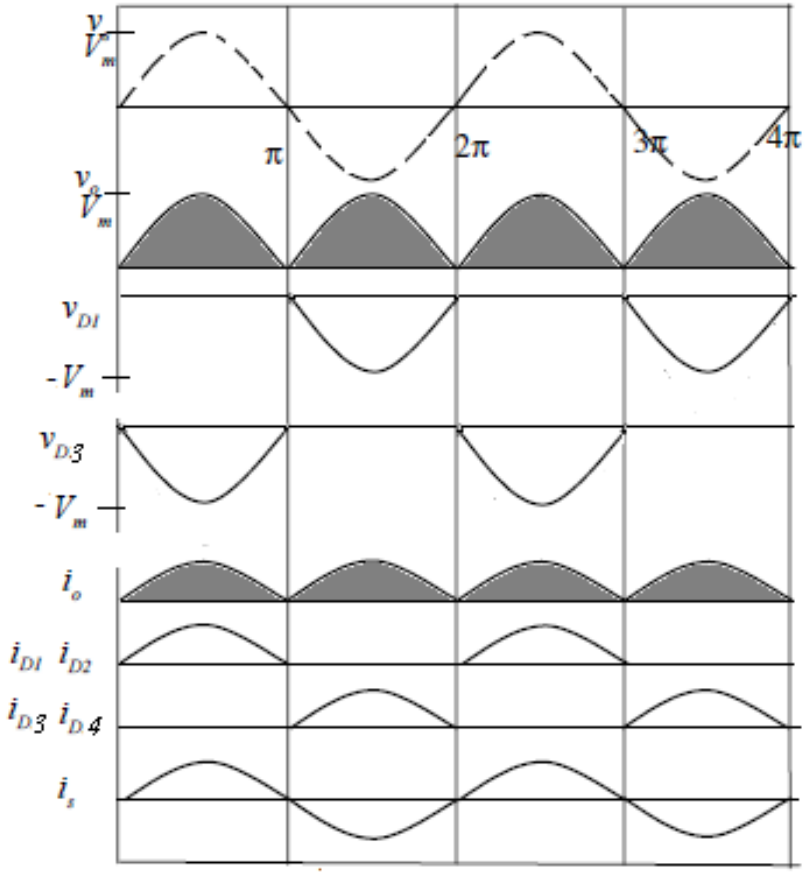
$$I_s = 0.707V_m/R.$$

$$CF = I_{s(peak)}/I_s = 1/0.707 = \sqrt{2}.$$

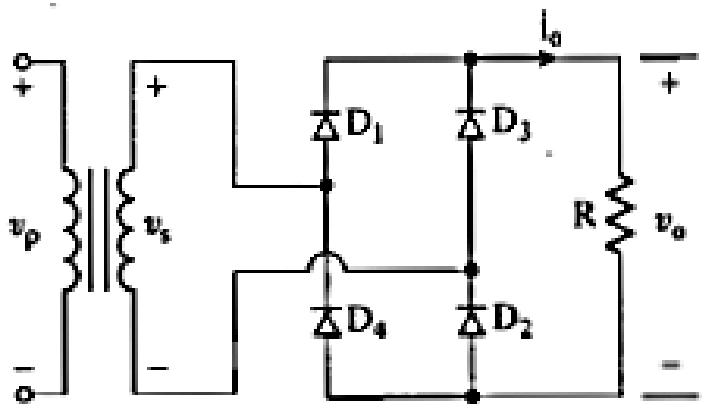
Ovaj transformator mora biti 1.75 puta predimenzionisan u odnosu na klasični sa AC ulazom i izlazom

IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ U GRECOVOM SPOJU: MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: R (TALASNI OBLICI)





IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ U GRECOVOM SPOJU: PRORAČUNI

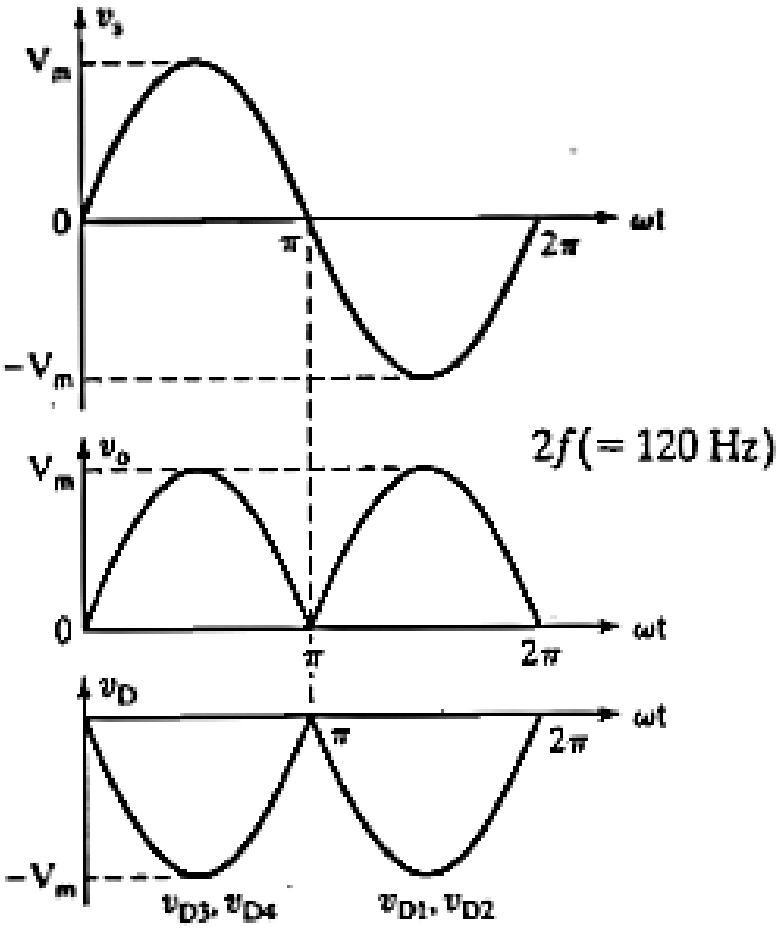


$$V_{dc} = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} V_m \sin \omega t \, dt = \frac{2V_m}{\pi} = 0.6366V_m$$

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.6366V_m}{R} \qquad P_{dc} = (0.6366V_m)^2/R$$

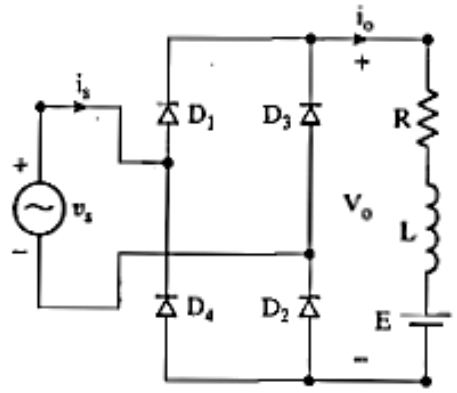
$$V_{rms} = \left[\frac{2}{T}\int_0^{T/2} (V_m \sin \omega t)^2 \, dt\right]^{1/2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.707V_m}{R} \qquad P_{ac} = (0.707V_m)^2/R.$$



IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ U GRECOVOM SPOJU: MONOFAZNI,

OPTEREĆENJE: R –L-DC izvor (tipična primena za punjače baterija)



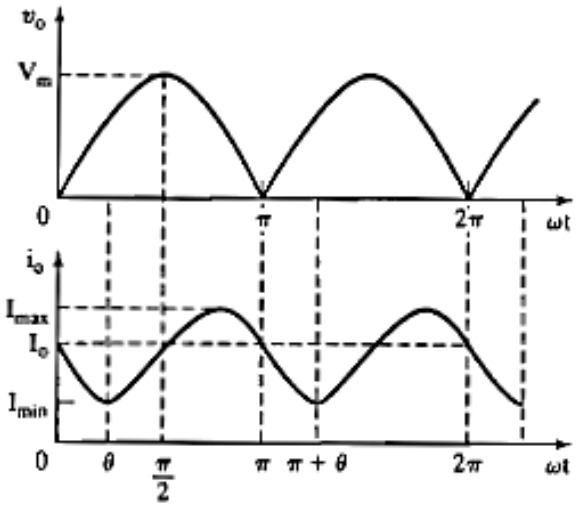
$$L\frac{di_0}{dt} + Ri_0 + E = \sqrt{2}\,V_s \sin \omega t$$

$$i_0 \geq 0$$

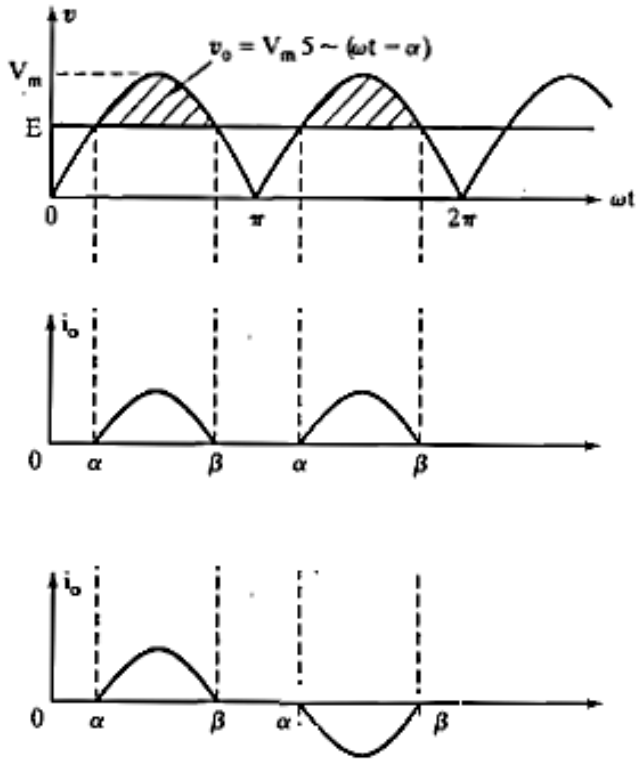
$$i_0 = \frac{\sqrt{2}V_s}{Z}\sin(\omega t - \theta) + A_1 e^{-(R/L)t} - \frac{E}{R}$$

$$Z = [R^2 + (\omega L)^2]^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$$



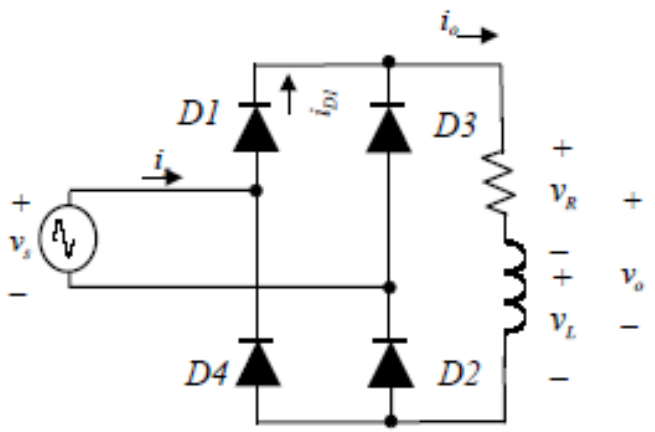
KONTINUALNI REZIM $\omega L/R >> 1$

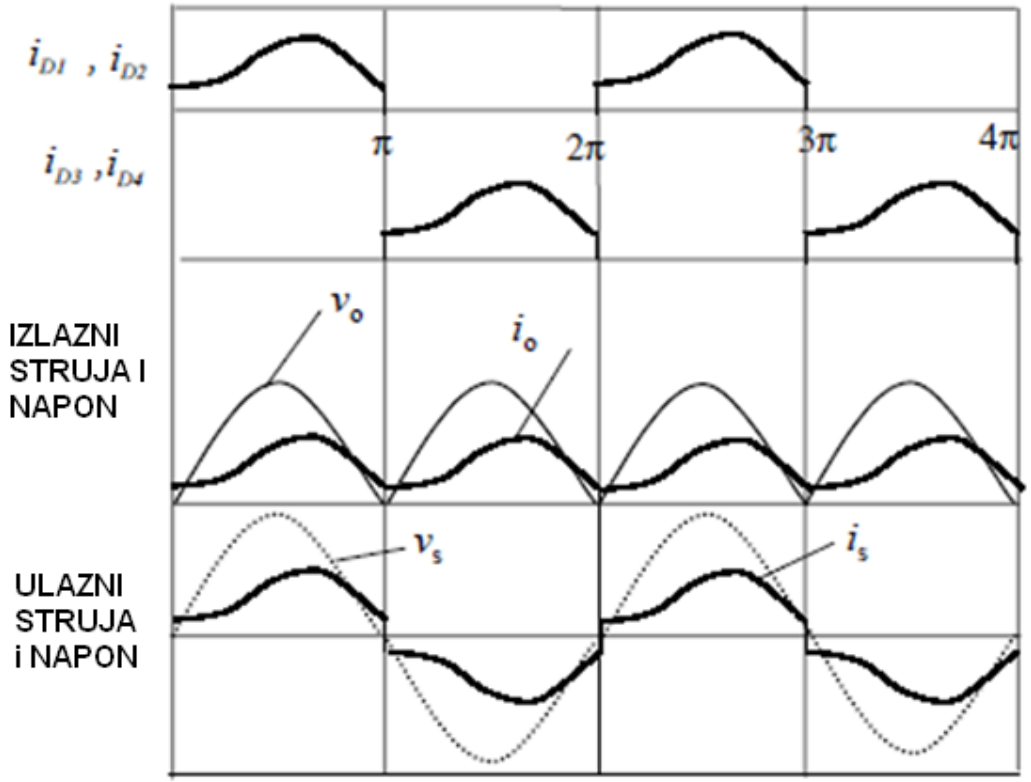


DISKONTINUALNI (PREKIDNI) REZIM

$\omega L/R \approx 1$

IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ: MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: R -L

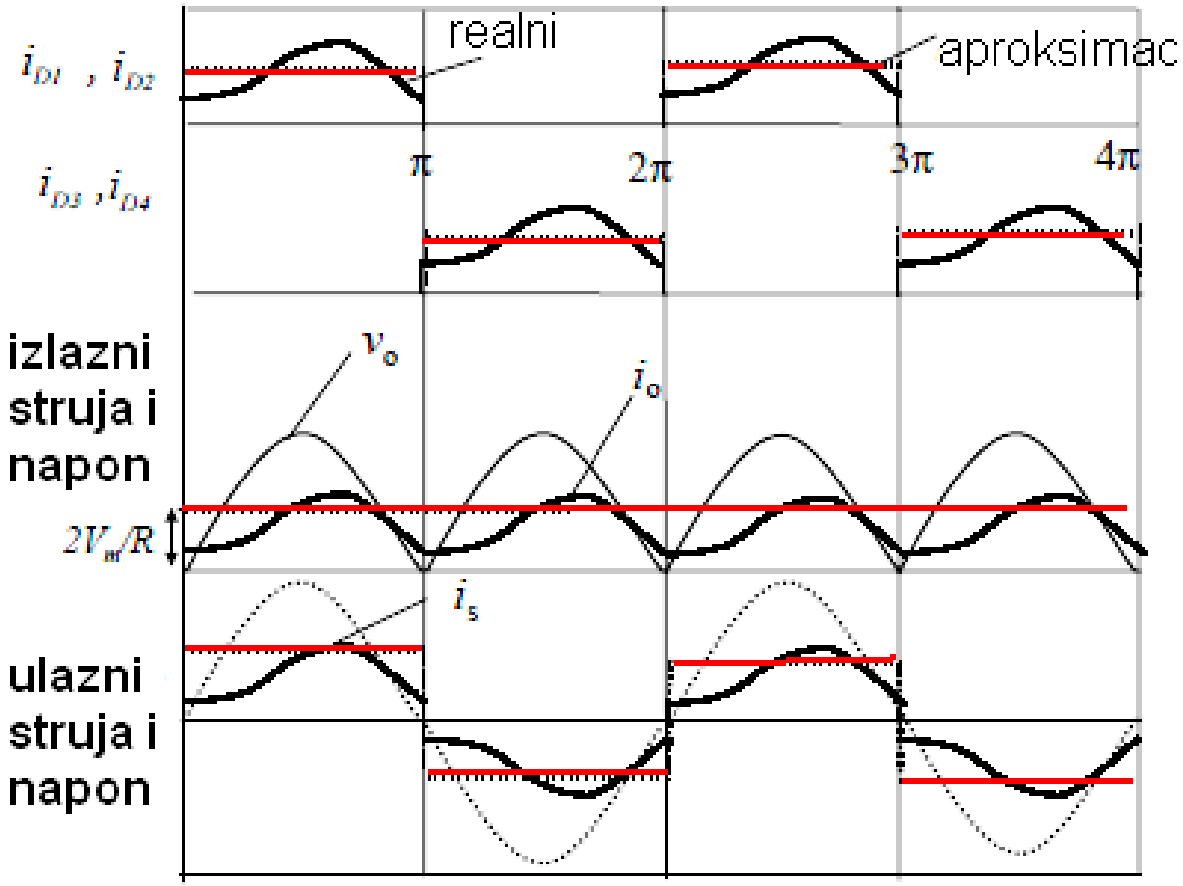




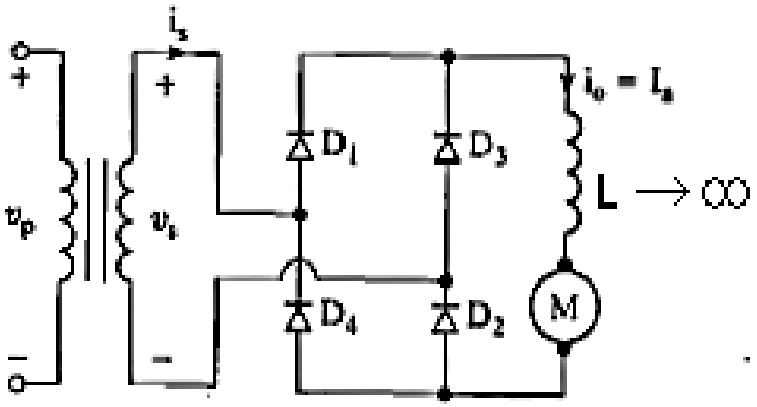
IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ: MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: JAKO INDUKTIVNO

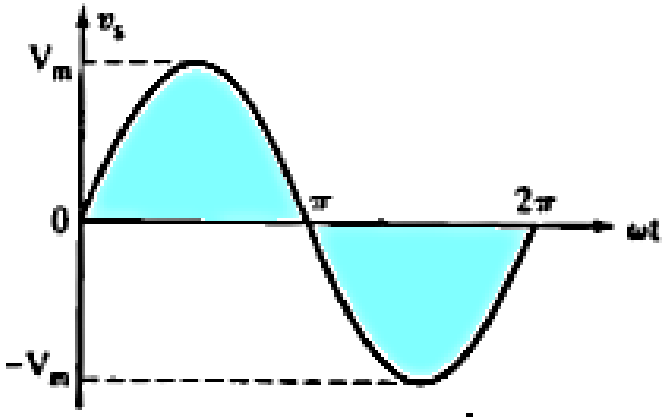
$$i(\omega t) \approx I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{2V_m}{R},$$

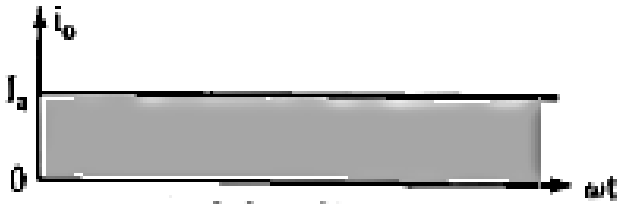
$$\omega L >> R,$$



IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ: MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: PRETEŽNO INDUKTIVNO (DC MOTOR SA VELIKOM REDNOM PRIGUŠNICOM)







$$i_s(t) = \frac{4I_a}{\pi}\left(\frac{\sin\omega t}{1} + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \cdots\right)$$

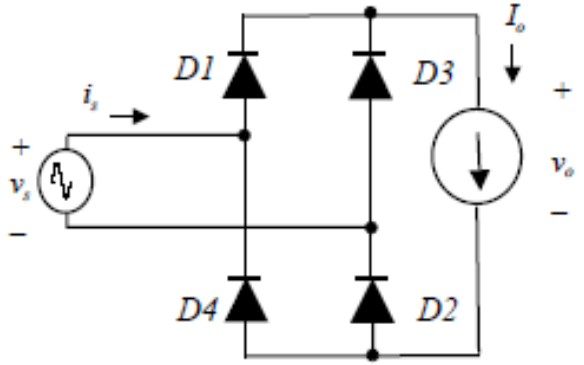
$$I_{s1} = \frac{4I_a}{\pi\sqrt{2}} = 0.90I_a$$

$$I_s = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} I_a\left[1 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{7}\right)^2 + \left(\frac{1}{9}\right)^2 + \cdots\right]^{1/2} = I_a$$

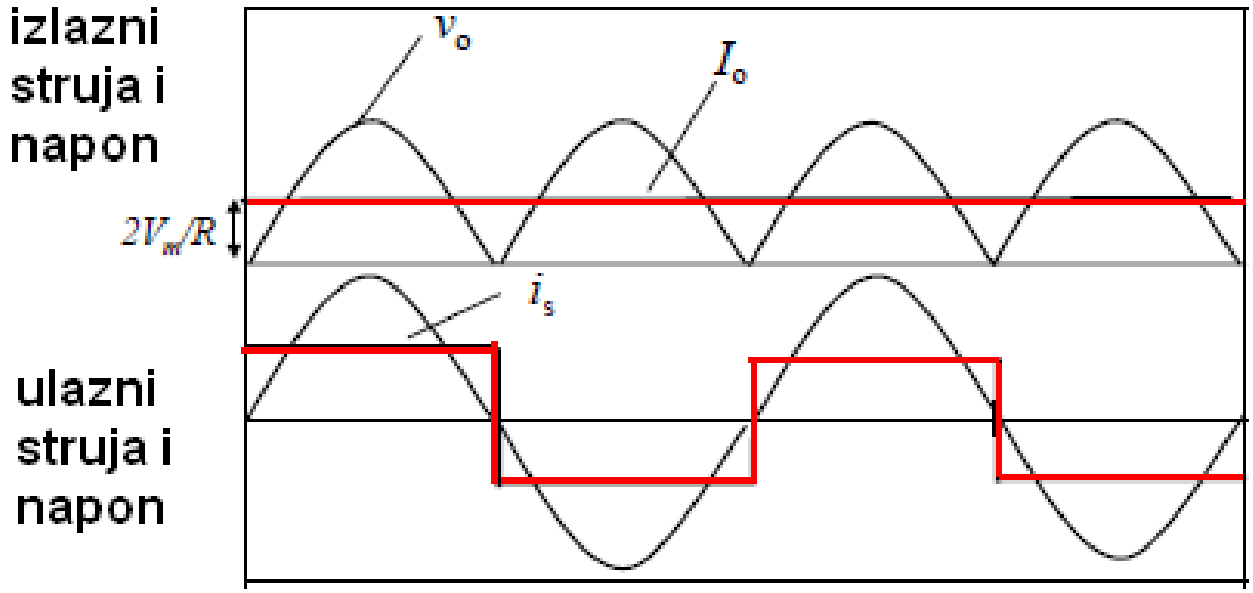
$$\text{PF} = (I_{s1}/I_s)\cos\phi = 0.90 \qquad \text{DF} = \cos\phi = 1$$

$$\text{HF} = \text{THD} = \left[\left(\frac{1}{0.90}\right)^2 - 1\right]^{1/2} = 0.4843$$

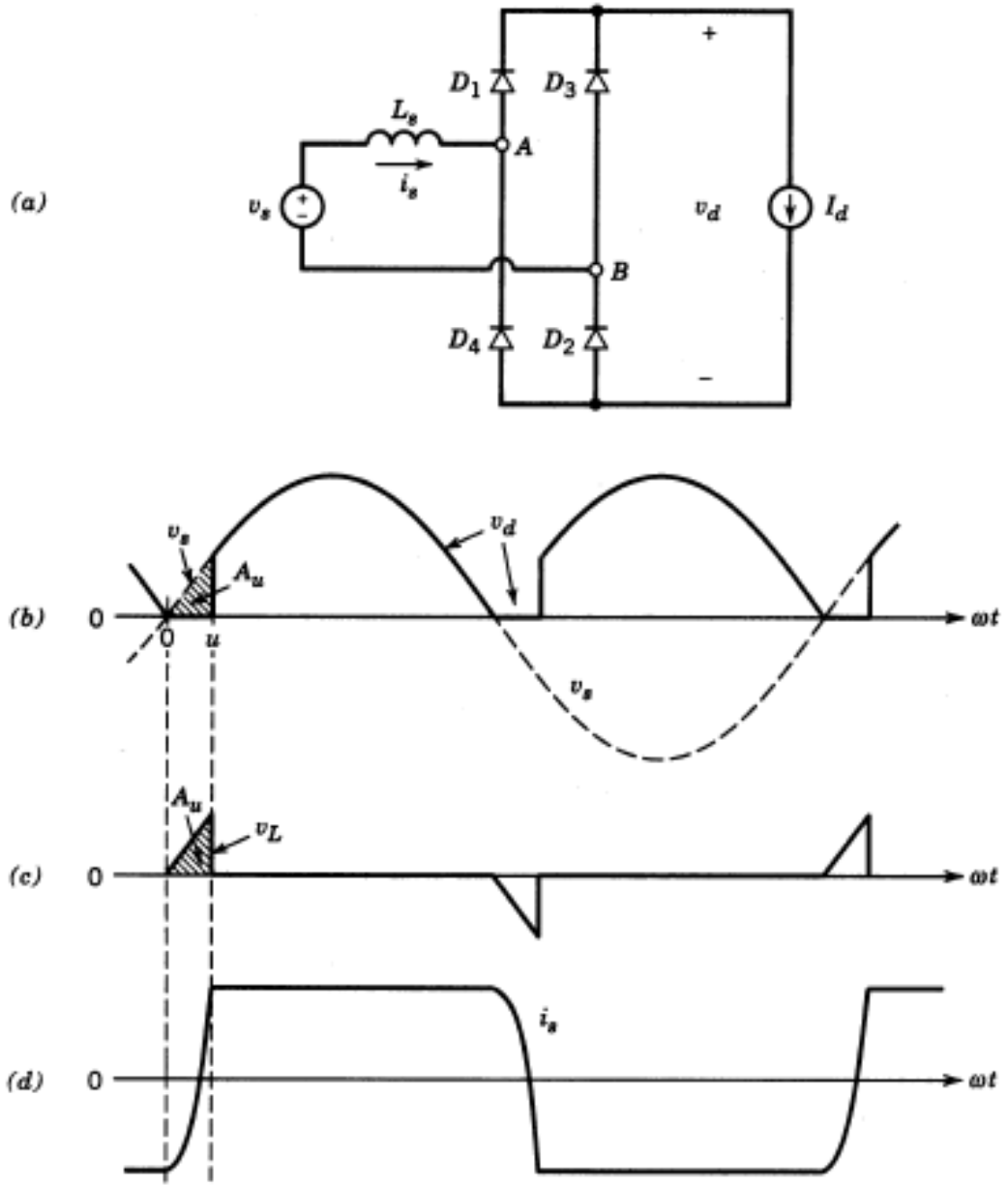
IDEALNI PUNOTALASNI SPRAVLJAČ: MONOFAZNI, OPTEREĆENJE: STRUJNI PONOR



L → ∞



EFEKAT RASIPNE INDUKTIVNOSTI L_s



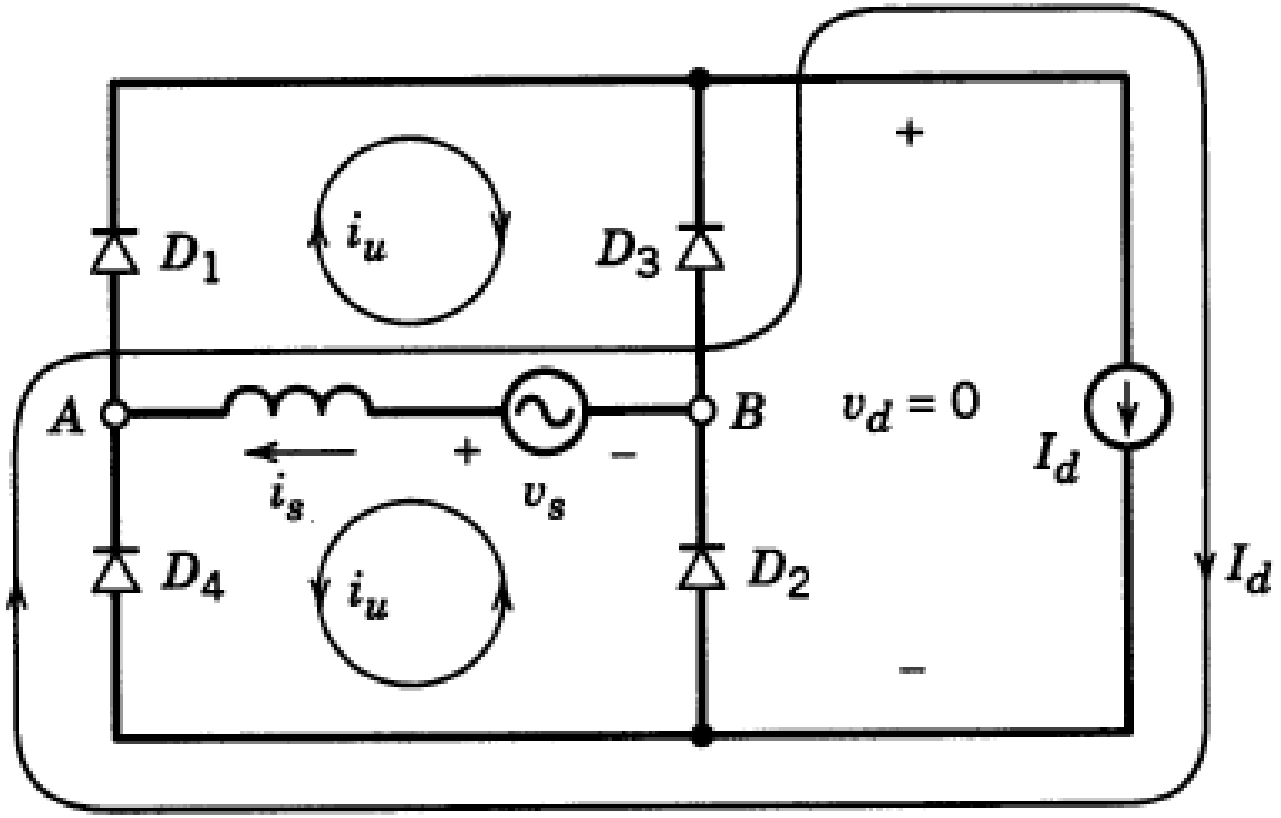
(a)-električna šema

(b)-izlazni napon

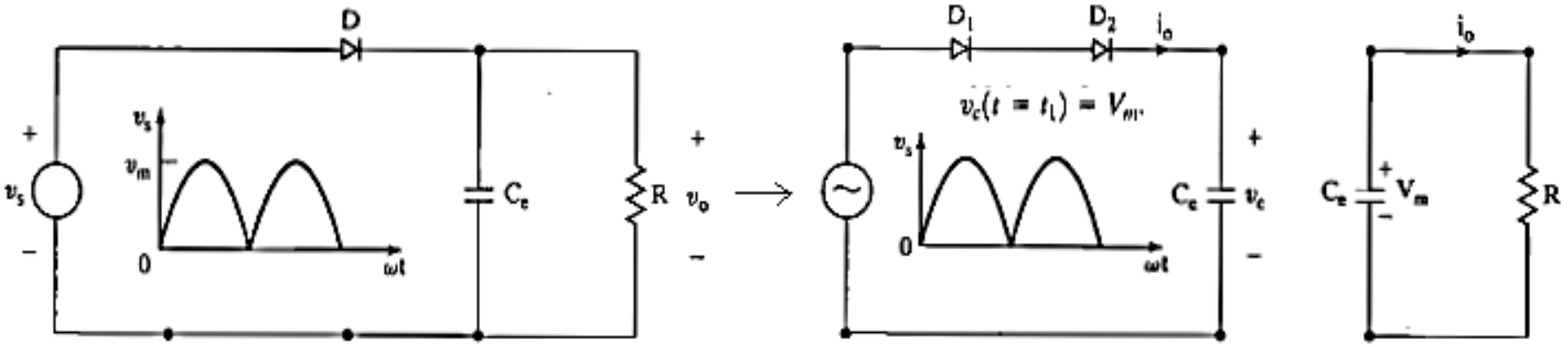
(c)- napon na *Ls*

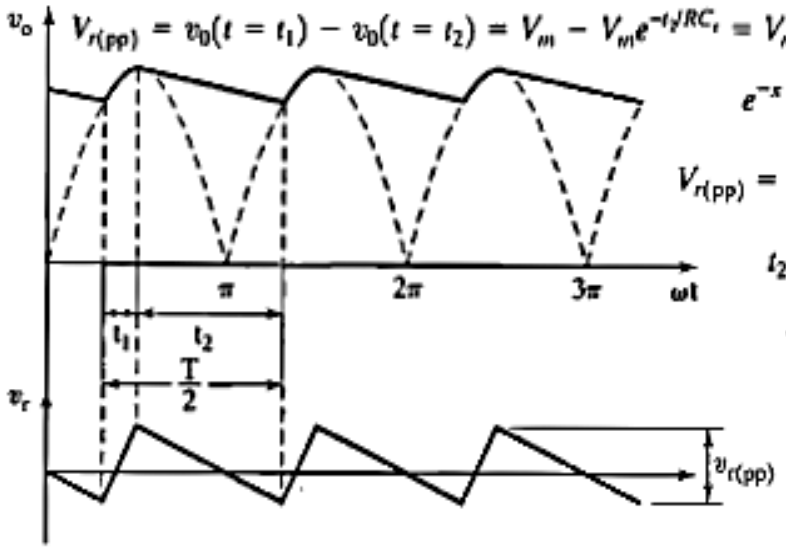
(d)- struja *Ls*

EFEKAT RASIPNE INDUKTIVNOSTI L_s - kolo za analizu



PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ SA KAPACITIVNIM FILTROM





$$V_{r(pp)} = v_0(t = t_1) - v_0(t = t_2) = V_m - V_m e^{-t_2/RC_e} = V_m(1 - e^{-t_2/RC_e})$$

$$e^{-x} \approx 1 - x$$

$$V_{r(pp)} = V_m\left(1 - 1 + \frac{t_2}{RC_e}\right) = \frac{V_m t_2}{RC_e} = \frac{V_m}{2fRC_e}$$

$$t_2 = 1/2\,f$$

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_{r(pp)}}{2} = V_m - \frac{V_m}{4fRC_e}$$

$$V_{ac} = \frac{V_{r(pp)}}{2\sqrt{2}} = \frac{V_m}{4\sqrt{2}\,fRC_e}$$

$$\frac{1}{C_e}\int i_0\,dt + v_c(t = 0) + Ri_0 = 0$$

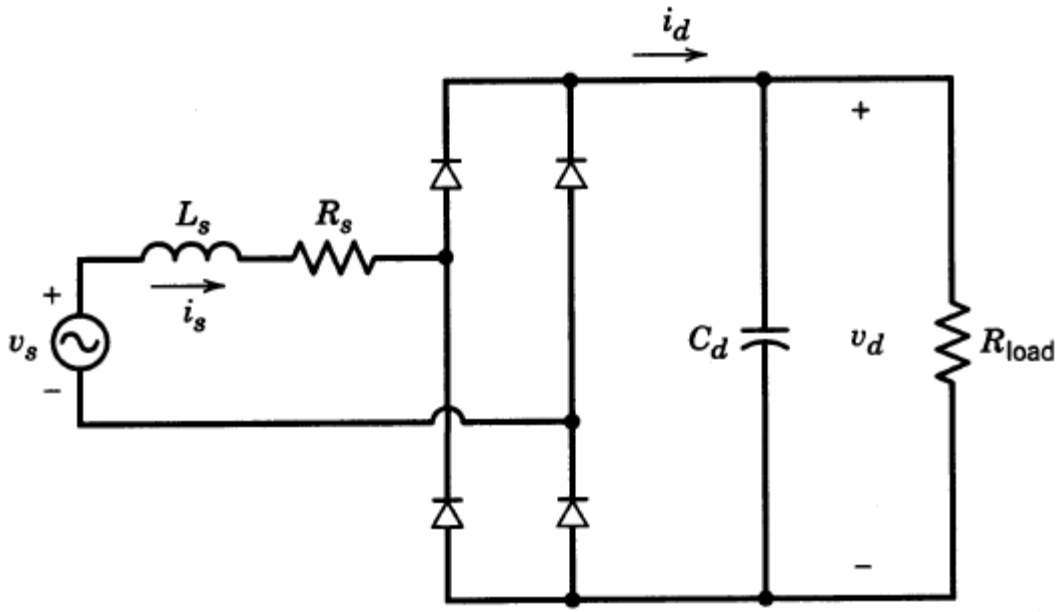
$$v_c(t = 0) = V_m$$

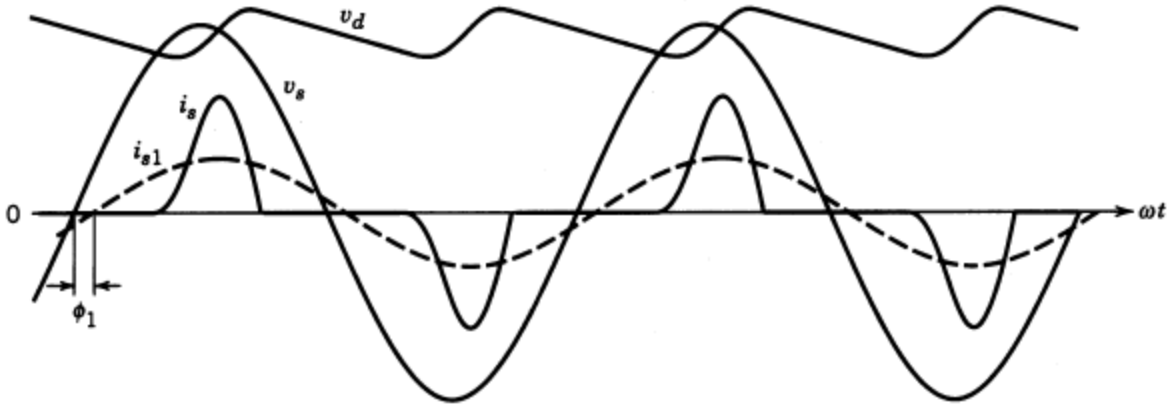
$$i_0 = \frac{V_m}{R}\,e^{-t/RC_e}$$

$$v_0(t) = Ri_0 = V_m e^{-t/RC_e}$$

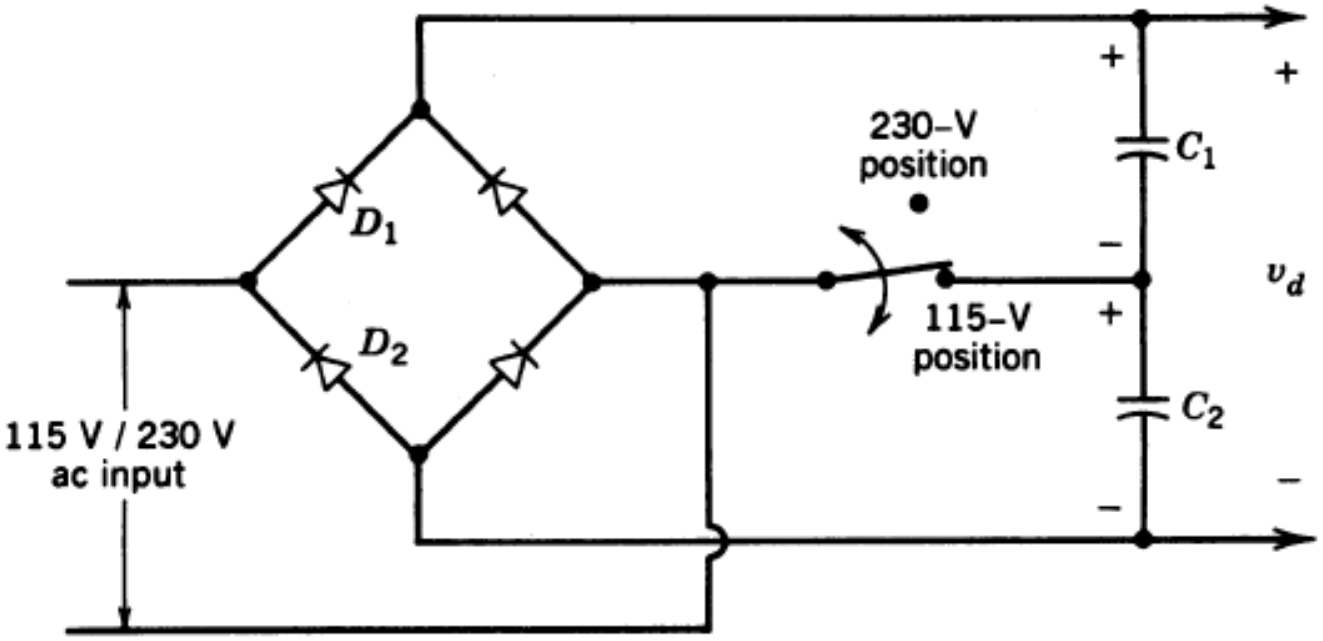
$$\mathrm{RF} = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{V_m}{4\sqrt{2}\,fRC_e}\,\frac{4fRC_e}{V_m(4fRC_e - 1)} = \frac{1}{\sqrt{2}\,(4fRC_e - 1)}$$

TALASNI OBLICI REALNOG DIODNOG ISPRAVLJAČA SA RC FILTROM



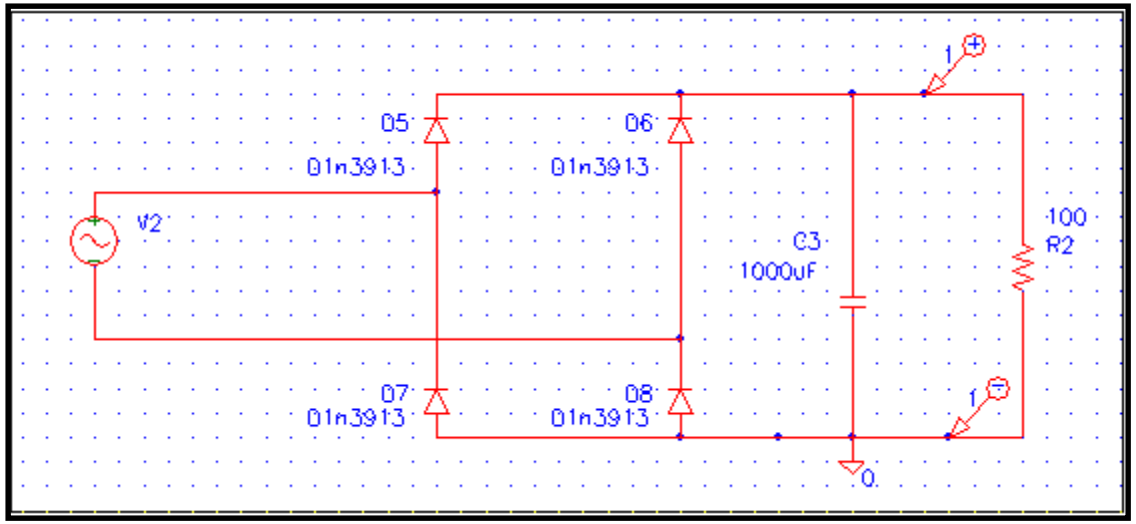


UNIVERZALNI ISPRAVLJAČ SA NAPAJANJEM 110/220V AC

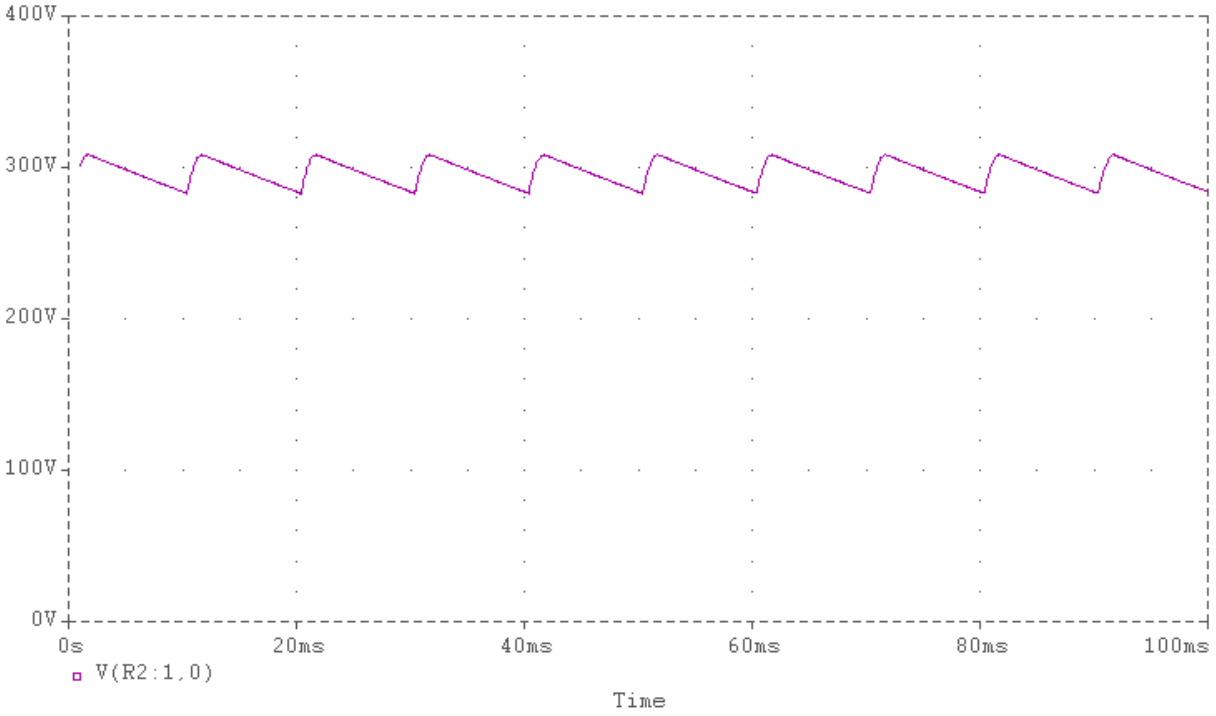


PRIEMENA U MREŽNIM NAPAJANJIMA – *ATX napajanje*

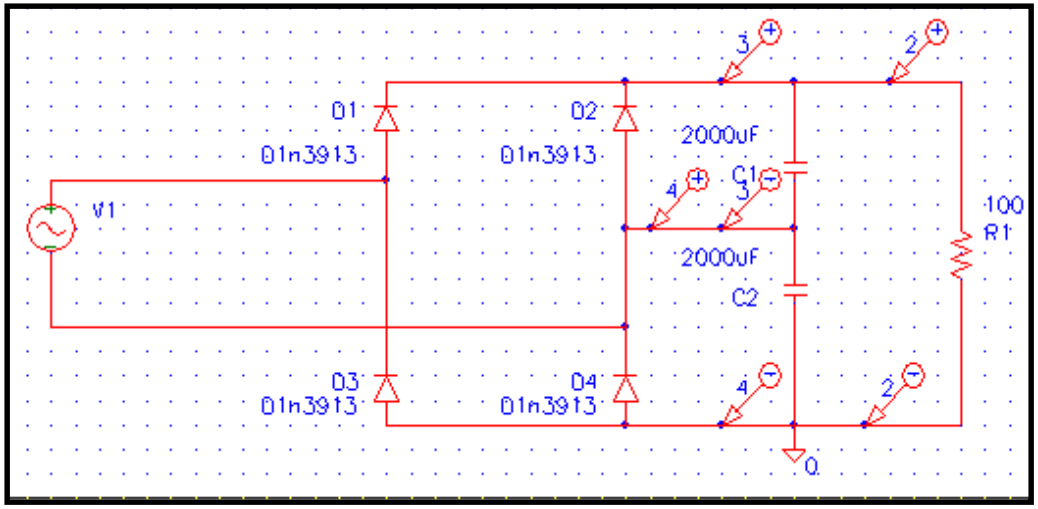
PUNOTALSNI ISPRAVLJAČ U GRECOVOM SPOJU: SIMULACIJA



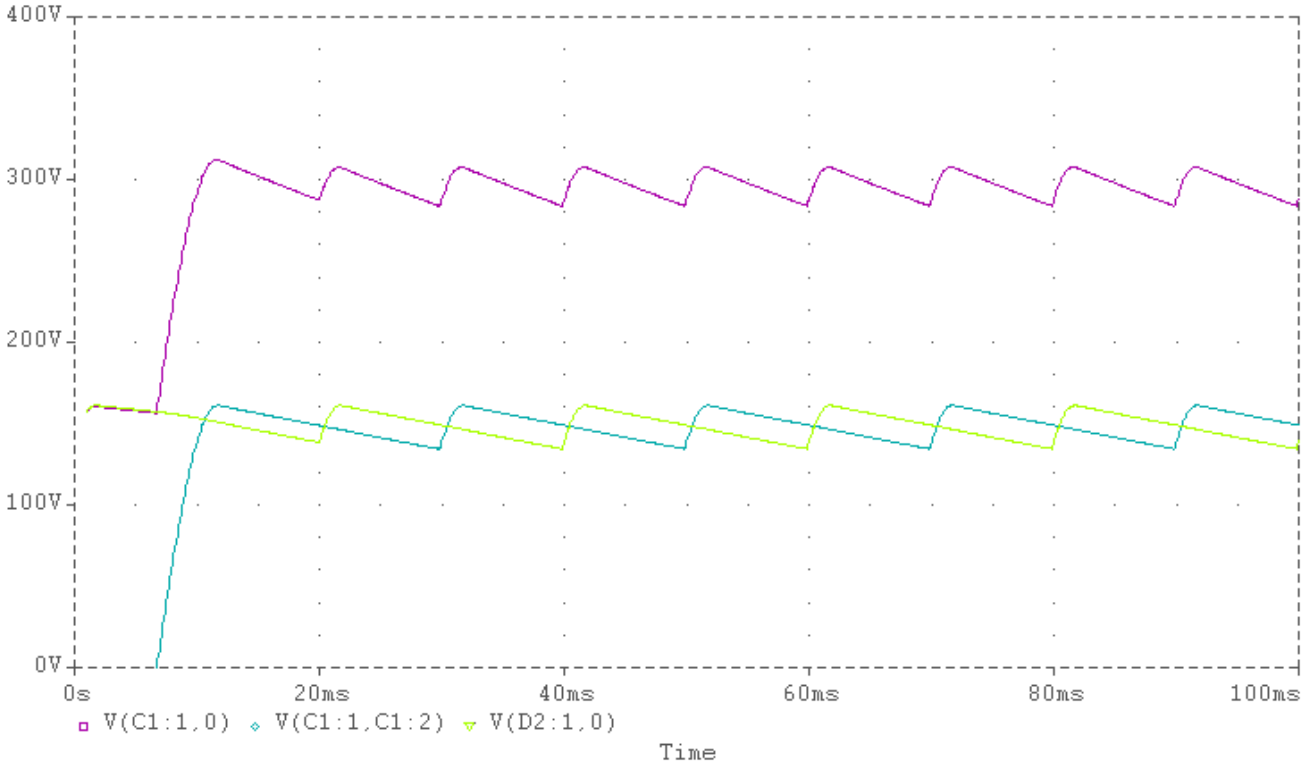
NAPAJANJE
220V,50Hz



PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ U GRECOVOM SPOJU: SIMULACIJA

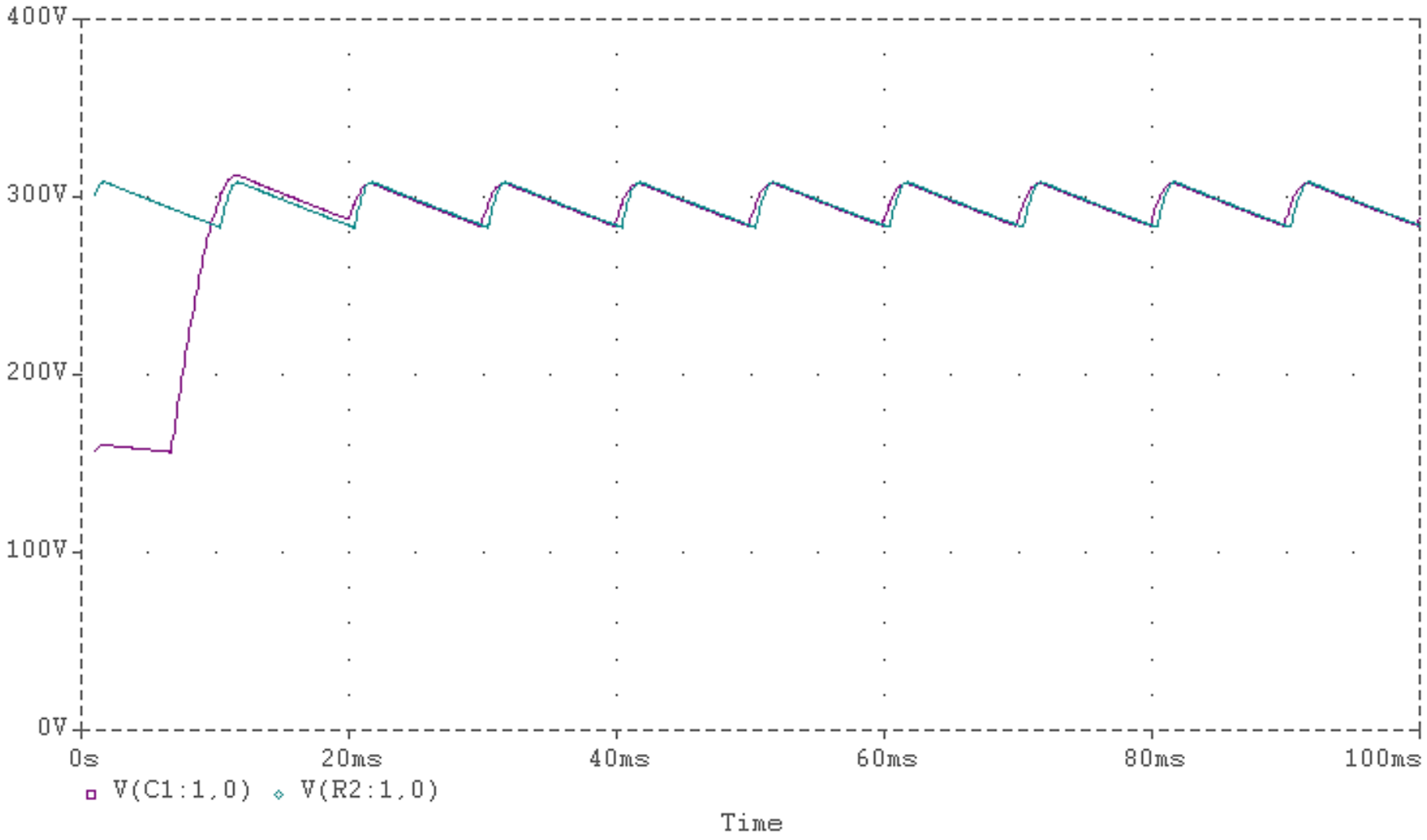


115V, 50Hz
NAPAJANJE



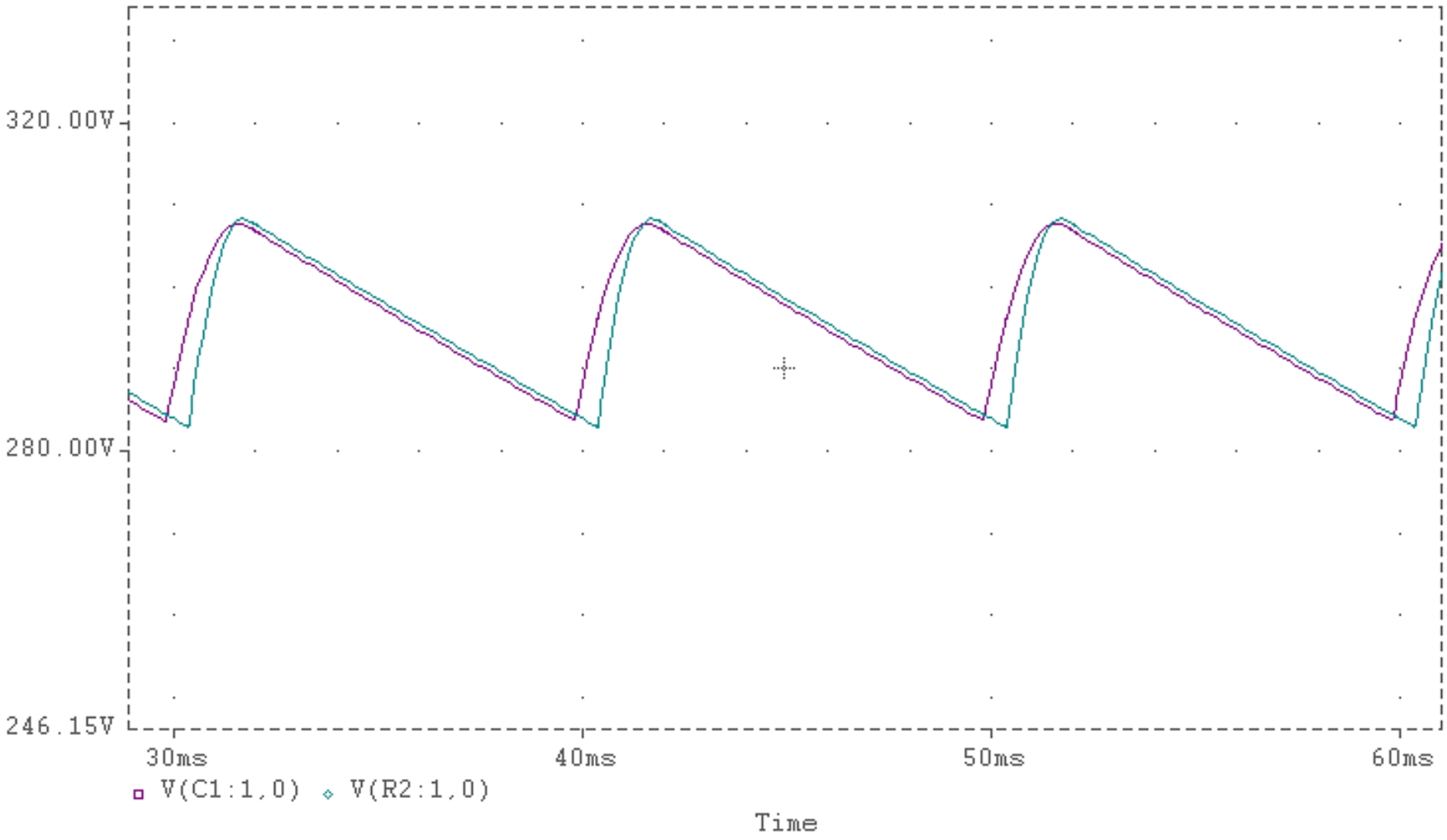
PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ U GRECOVOM SPOJU: SIMULACIJA

POREĐENJE IZLAZNOG NAPONA PRI **115V, 50Hz** **i** **230V,50Hz**

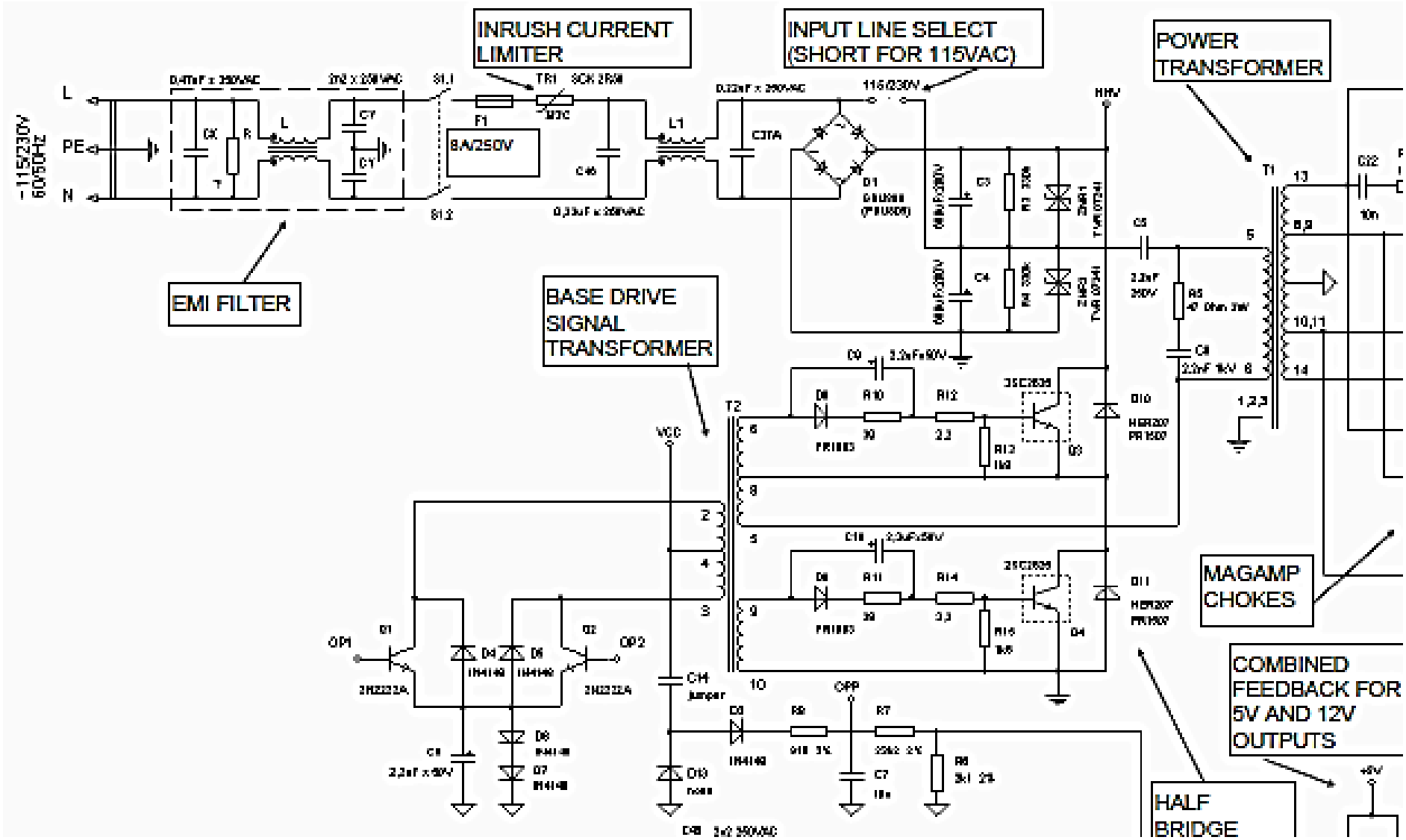


PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ U GRECOVOM SPOJU: SIMULACIJA

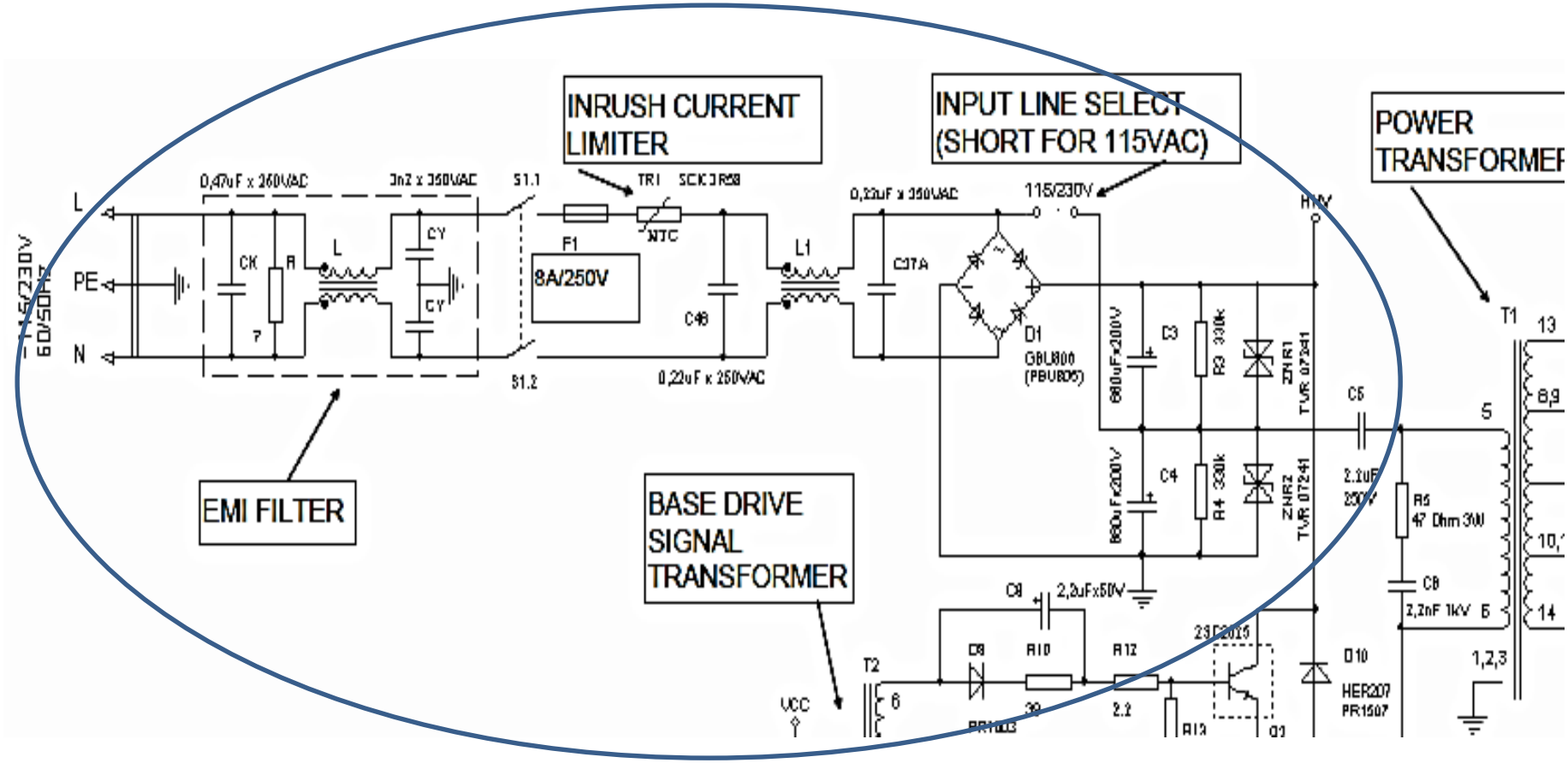
DETALJAN PRIKAZ IZLAZNOG NAPONA PRI **230V, 50Hz** i **115V,50Hz**



ELEKTRIČNA ŠEMA TIPIČNOG ATX-napajanja

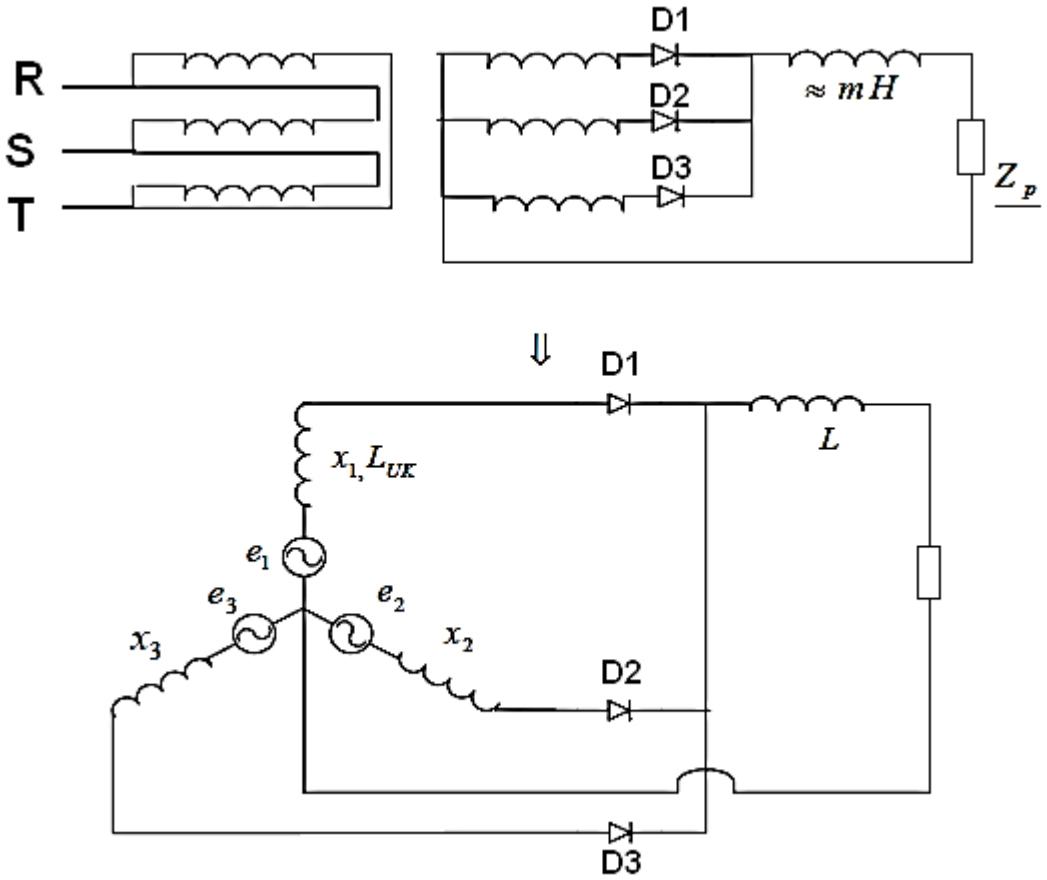


ATX napajanje-DETALJ ULAZNOG ISPRAVLJAČA

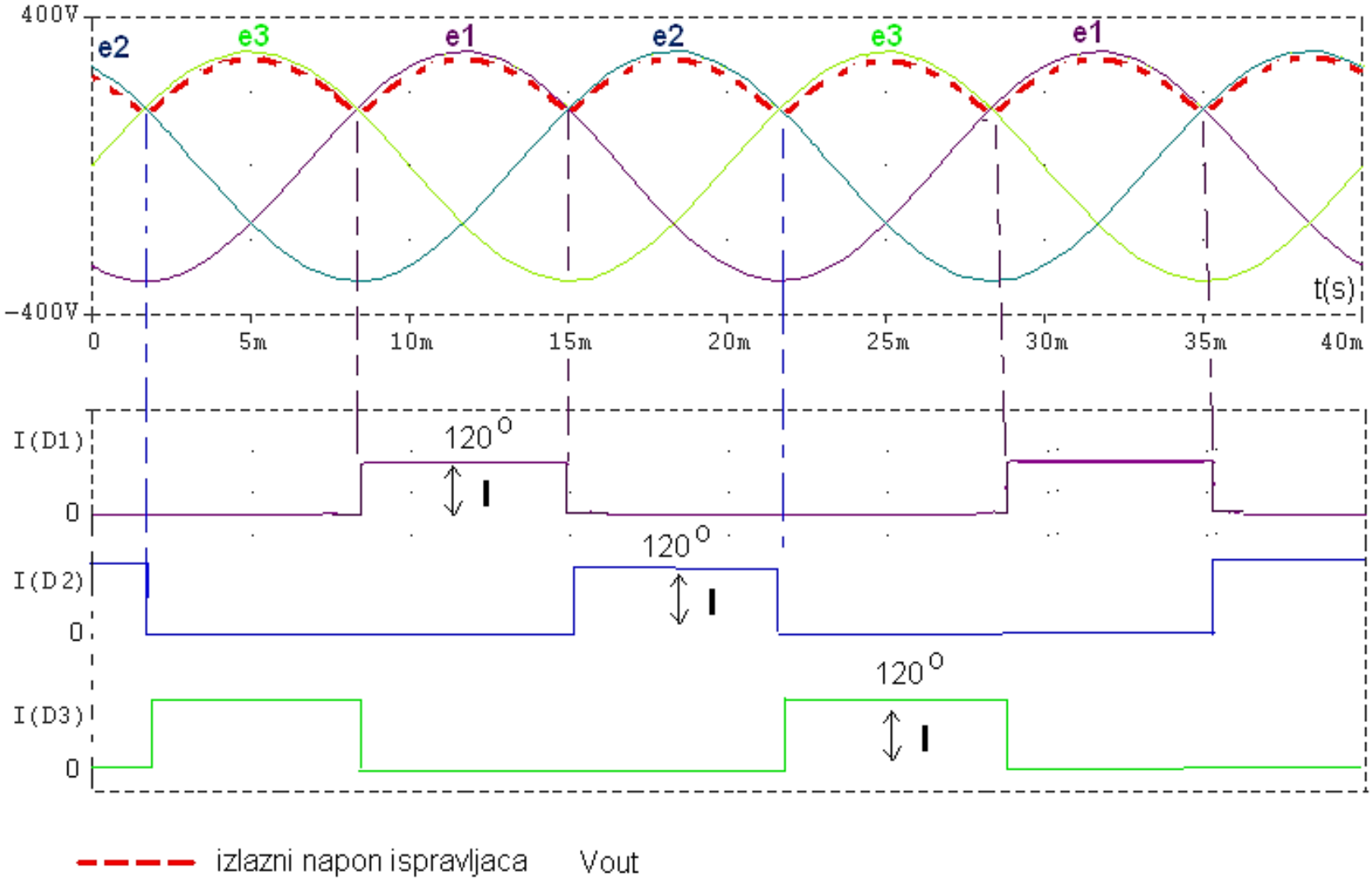


TROFAZNI AC-DC pretvarači (MREŽOM VOĐENI ISPRAVLJAČI)

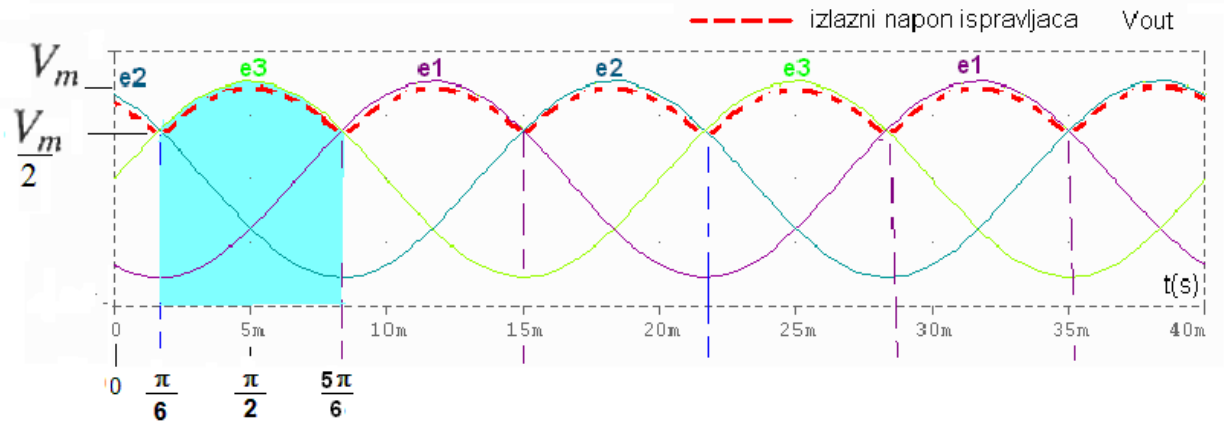
Trofazni ispravljač sa transformatorom sa srednjom tačkom



TROFAZNI ISPRAVLJAČ SA TRANSFORAMATOROM SA SREDNJOM TAČKOM- talasni oblici



TROFAZNI ISPRAVLJAČ SA TRANSFORAMATOROM SA SREDNJOM TAČKOM- proračuni



SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi/3}\int_0^{\pi/3} V_m \cos \omega t \, d(\omega t) = V_m \frac{3}{\pi} \sin\frac{\pi}{3}$$

$$V_{dc} = 0.827 V_m$$

TALASNOST

$$\Delta V = V_m - \frac{V_m}{2}$$

$$\Delta V = 0.5 V_m$$

EFEKTIVNA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA

$$V_{rms} = \left[\frac{2}{2\pi/3}\int_0^{\pi/q} V_m^2 \cos^2 \omega t \, d(\omega t)\right]^{1/2}$$

$$V_{rms} = V_m\left[\frac{3}{2\pi}\left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{2}\sin\frac{2\pi}{3}\right)\right]^{1/2}$$

$$V_{rms} = 0.5945 V_m$$

EFEKTIVNA VREDNOST STRUJE DIODE (SEKUNDARNE STRUJE TRANSFORMATORA)

$$I_m = V_m/R$$

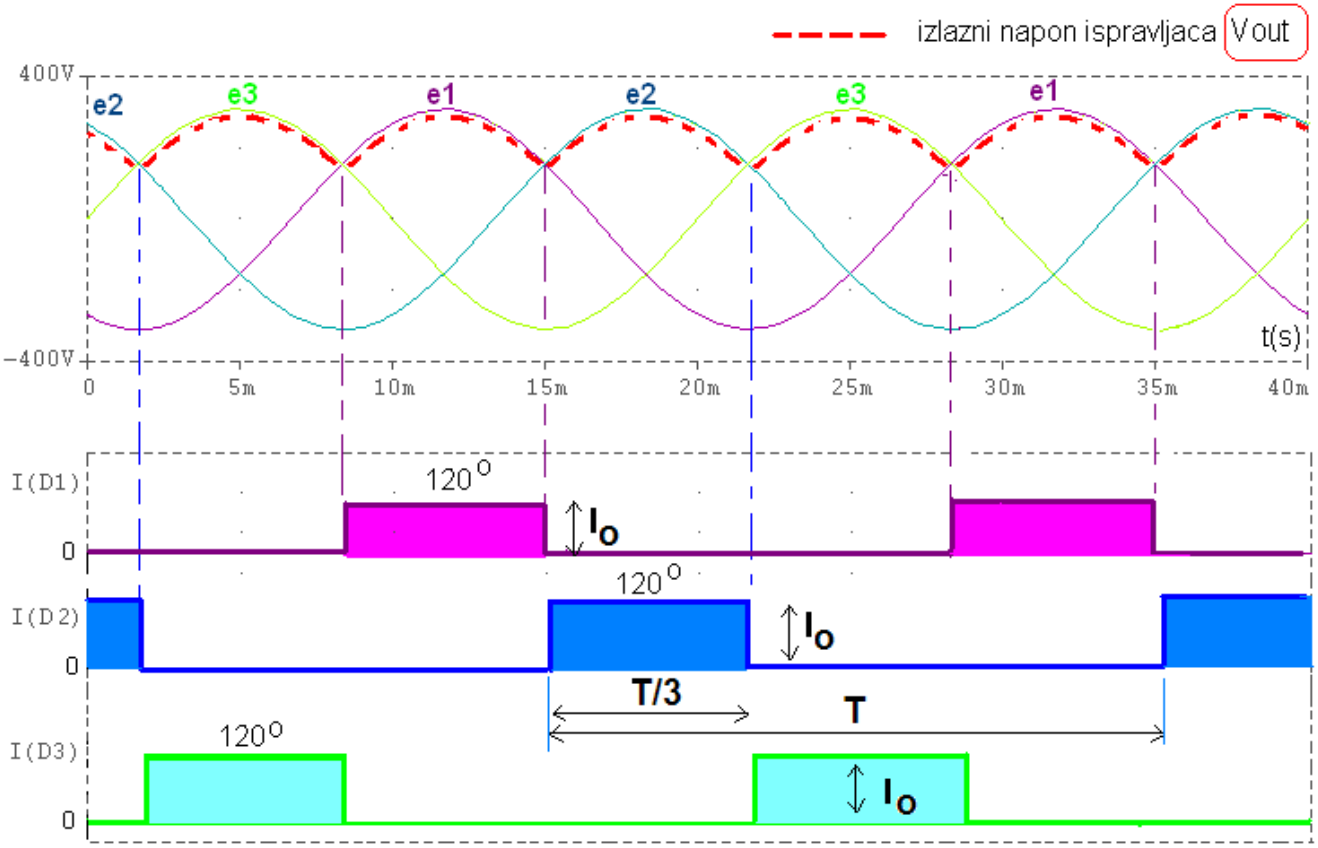
$$I_s = \left[\frac{2}{2\pi}\int_0^{\pi/q} I_m^2 \cos^2 \omega t \, d(\omega t)\right]^{1/2}$$

$$I_s = I_m\left[\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\pi}{q} + \frac{1}{2}\sin\frac{2\pi}{q}\right)\right]^{1/2} = \frac{V_{rms}}{R}$$

OTPORNO OPTEREĆENJE!!!!

ŠTA KAD JE OPTEREĆENJE STRUJNI PONOR???

TROFAZNI ISPRAVLJAČ SA TRANSFORAMATOROM SA SREDNJOM TAČKOM- proračuni kad je opterećenje strujni ponor



SREDNJA VREDNOST STRUJE DIODE (SEKUNDARA TRANSFORMATORA)

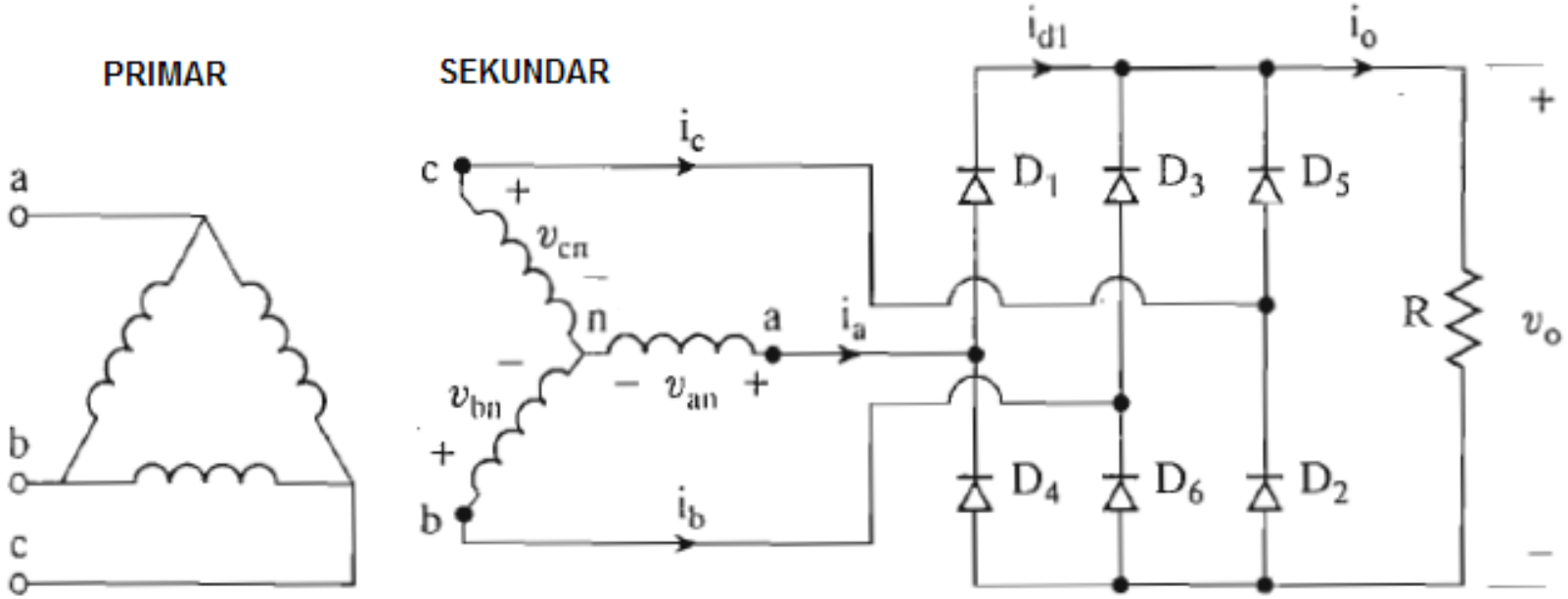
$$I_{avg} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,dt = I_o\frac{T/3}{T} = \frac{I_o}{3}$$

EFEKTIVNA VREDNOST STRUJE DIODE (SEKUNDARA TRANSFORMATORA)

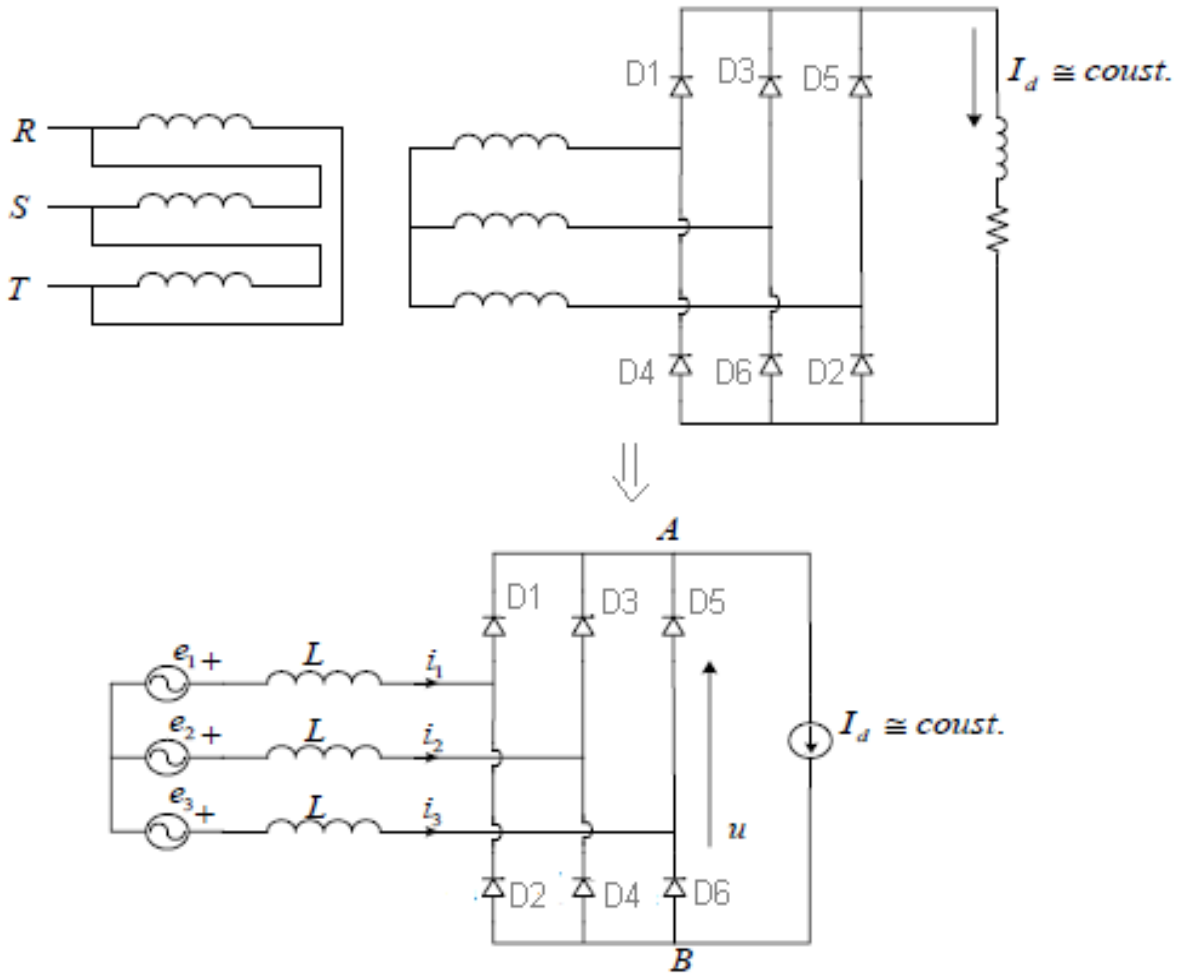
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)\,dt} = \sqrt{I_o^2\cdot\frac{T/3}{T}} = \frac{I_o}{\sqrt{3}}$$

TROFAZNI MOSNI ISPRAVLJAČ-otporno opterećenje

$$v_{an} = V_m \sin(\omega t) \quad v_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120°) \quad v_{cn} = V_m \sin(\omega t - 240°)$$

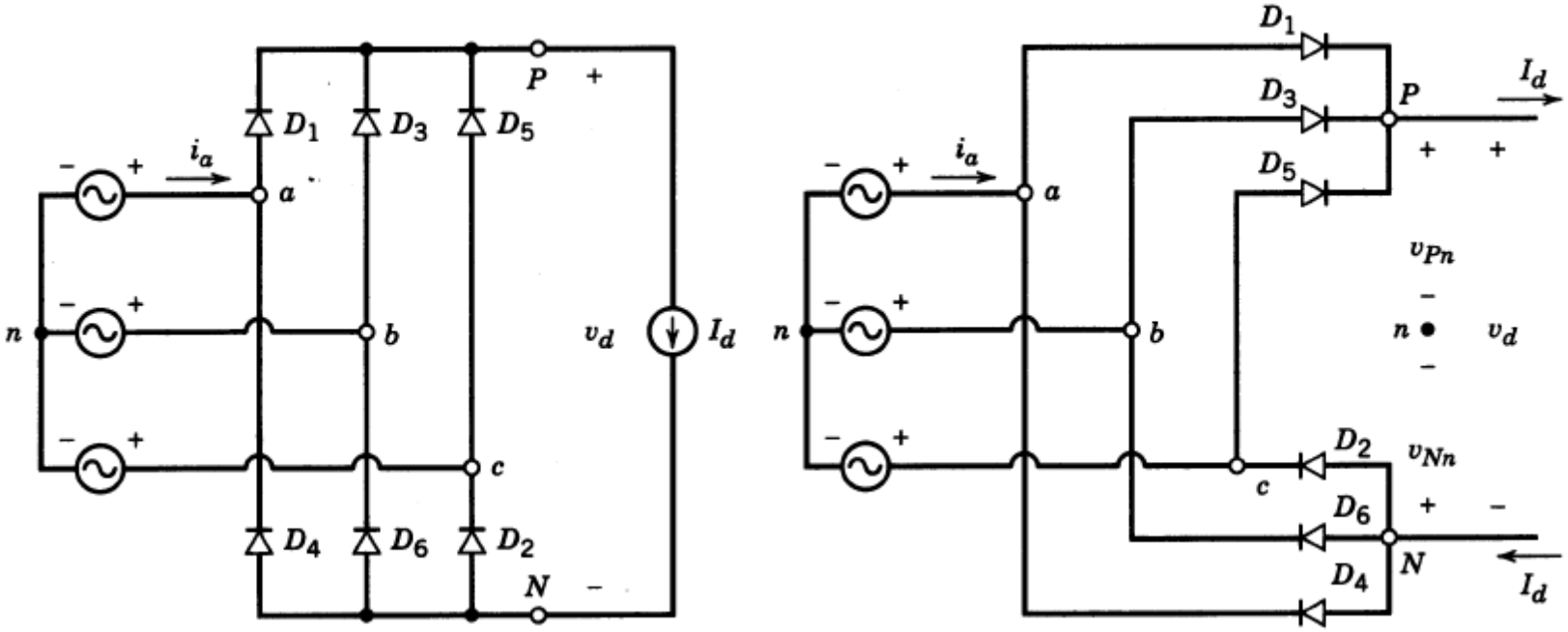


TROFAZNI MOSNI ISPRAVLJAČ-opterećenje strujni ponor Io

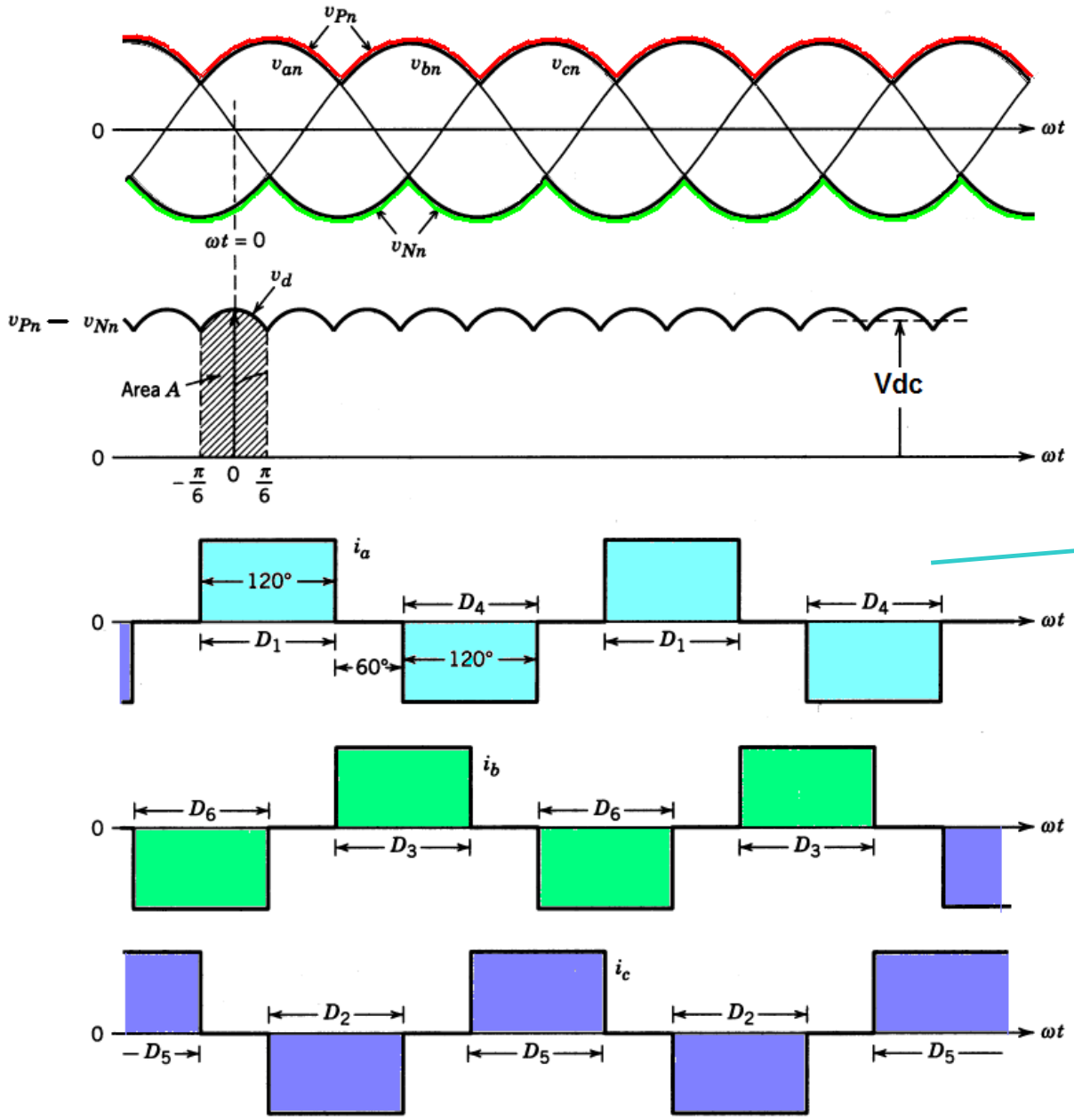


TROFAZNI MOSNI ISPRAVLJAČ

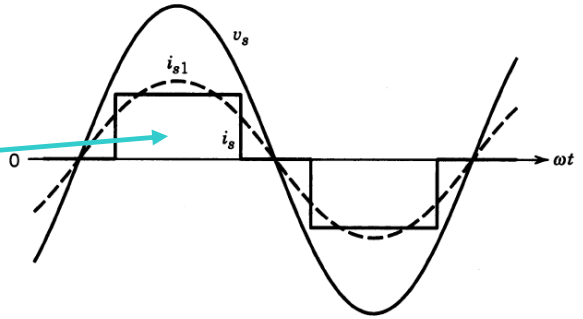
EKVIVALENCIJA SA DVA TROFAZNA POLUMOSNA ISPRAVLJAČA

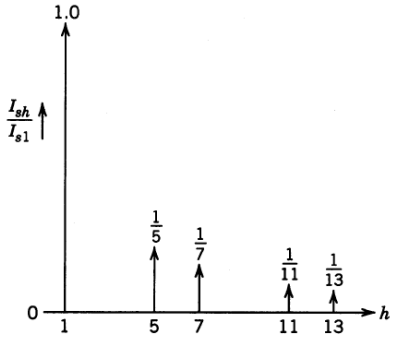


TROFAZNI MOSNI ISPRAVLJAČ-talasni oblici



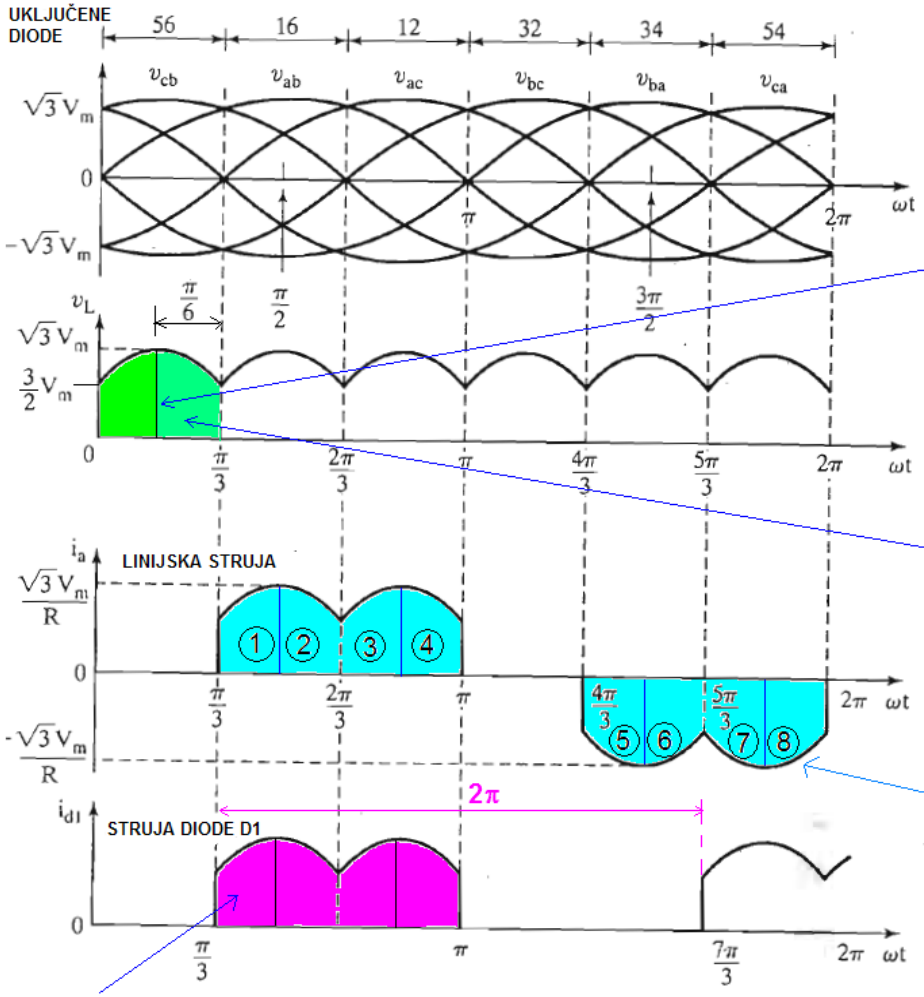
LINIJSKI NAPON i
LINIJSKA STRUJA





HARMONIJSKI SASTAV

TROFAZNI MOSNI ISPRAVLJAČ- izračunavanje srednjih i efektivnih vrednosti



$$v_{ab} = \sqrt{3}\,V_m \sin(\omega t + 30°) \quad v_{bc} = \sqrt{3}\,V_m \sin(\omega t - 90°)$$
$$v_{ca} = \sqrt{3}\,V_m \sin(\omega t - 210°)$$

SREDNJA VREDNOST NAPONA NA OPTEREĆENJU (IZLAZNI NAPON)

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi/6}\int_0^{\pi/6} \sqrt{3}\,V_m \cos\omega t\, d(\omega t)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}V_m = 1.654V_m$$

TALASNOST

$$\triangle V = \sqrt{3}V_m - \frac{3}{2}V_m = 0.23V_m$$

EFEKTIVNA VREDNOST NAPONA NA OPTEREĆENJU (IZLAZNI NAPON)

$$V_{rms} = \left[\frac{2}{2\pi/6}\int_0^{\pi/6} 3V_m^2 \cos^2\omega t\, d(\omega t)\right]^{1/2}$$

$$V_{rms} = \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}\right)^{1/2} V_m = 1.6554V_m$$

EFEKTIVNA VREDNOST LINIJSKE STRUJE

$$I_s = \left[\frac{8}{2\pi}\int_0^{\pi/6} I_m^2 \cos^2\omega t\, d(\omega t)\right]^{1/2}$$

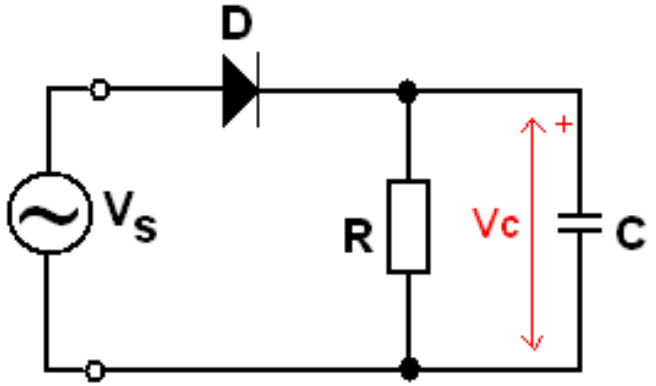
$$= I_m\left[\frac{2}{\pi}\left(\frac{\pi}{6} + \frac{1}{2}\sin\frac{2\pi}{6}\right)\right]^{1/2}$$

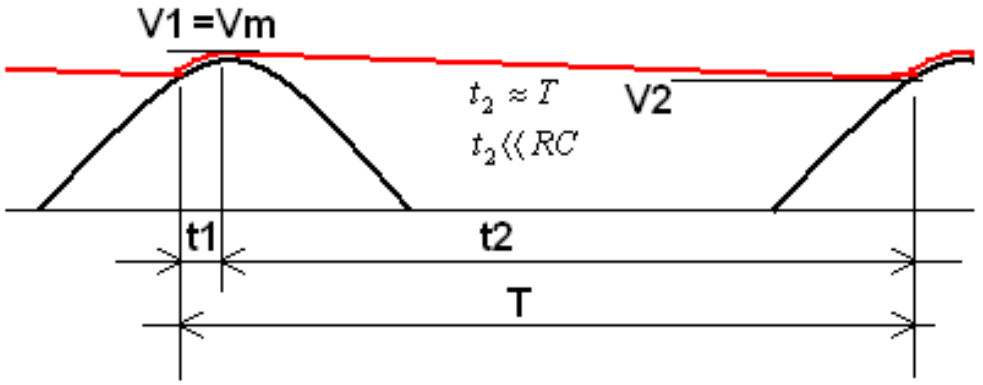
$$I_s = 0.7804I_m \qquad I_m = V_m/R$$

SREDNJA VREDNOST STRUJE DIODE

$$I_d = = \frac{4}{2\pi}\int_0^{\pi/6} I_m \cos\omega t\, d(\omega t) = I_m\frac{2}{\pi}\sin\frac{\pi}{6} = 0.3183I_m$$

MONOFAZNI ISPRAVLJAČI (IZBOR KAPACITIVNOG FILTRA) -*rekapitulacija*



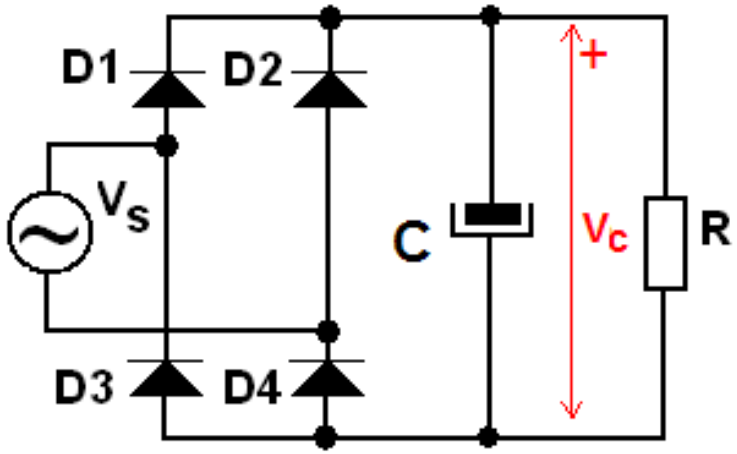


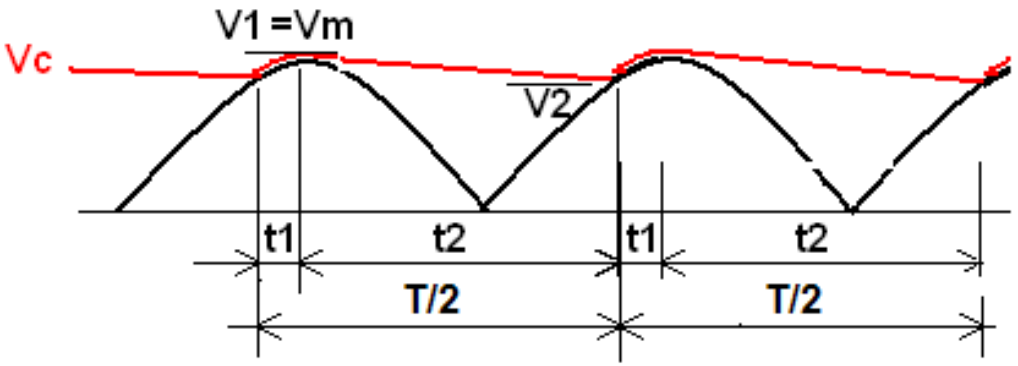
$$\Delta V = V_m \cdot \frac{t_2}{RC} = V_m \cdot \frac{T}{RC} = V_m \cdot \frac{1}{fRC}$$

$$V_{DC} = V_m - \frac{\Delta V}{2} = V_m - \frac{V_m}{2fRC} = V_m \cdot \frac{2fRC-1}{2fRC}$$

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} = 2 \cdot \frac{1}{2fRC-1}$$

$t_2 \approx T$





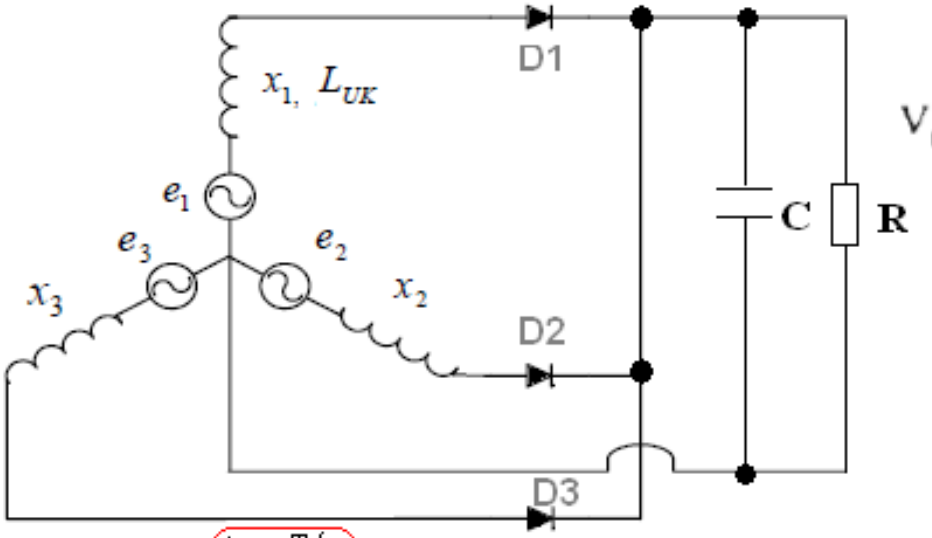
$$\Delta V = V_m \cdot \frac{t_2}{RC} \approx V_m \cdot \frac{T}{2RC} = V_m \cdot \frac{1}{2fRC}$$

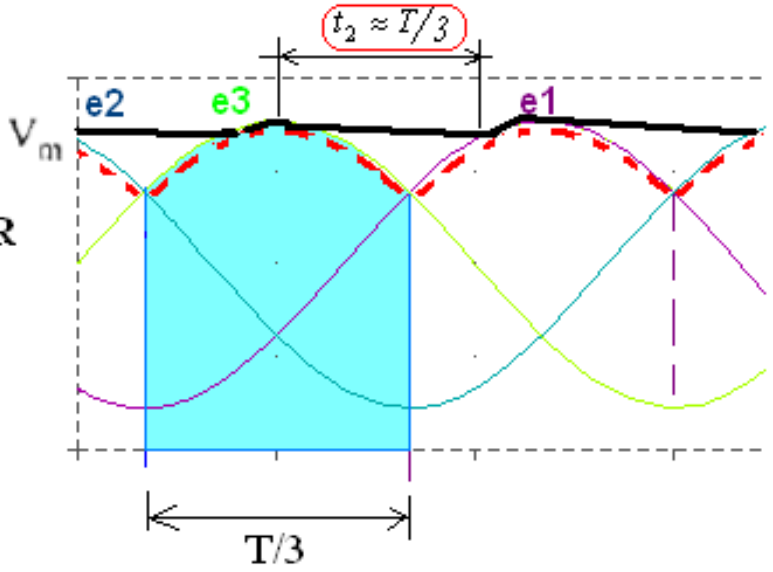
$$V_{DC} = V_m - \frac{\Delta V}{2} = V_m - \frac{V_m}{4fRC} = V_m \cdot \frac{4fRC-1}{4fRC}$$

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} = 2 \cdot \frac{1}{4fRC-1}$$

$$t_2 = \frac{T}{2}$$

TROFAZNI ISPRAVLJAČI (IZBOR KAPACITIVNOG FILTRA) - *rekapitulacija*

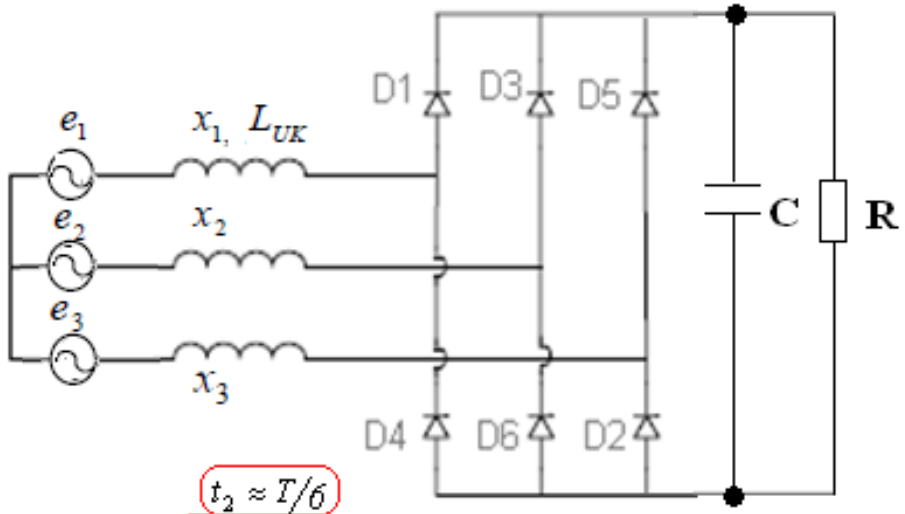


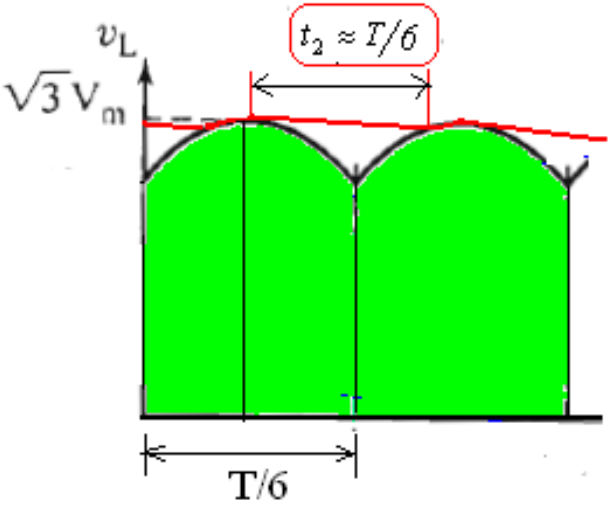


$$\Delta V = V_m \cdot \frac{t_2}{RC} \quad (t_2 \approx T/3) = V_m \cdot \frac{T}{3RC} = V_m \cdot \frac{1}{3fRC}$$

$$V_{DC} = V_m - \frac{\Delta V}{2} = V_m - \frac{V_m}{6fRC} = V_m \cdot \frac{6fRC-1}{6fRC}$$

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} = 2 \cdot \frac{1}{6fRC-1}$$

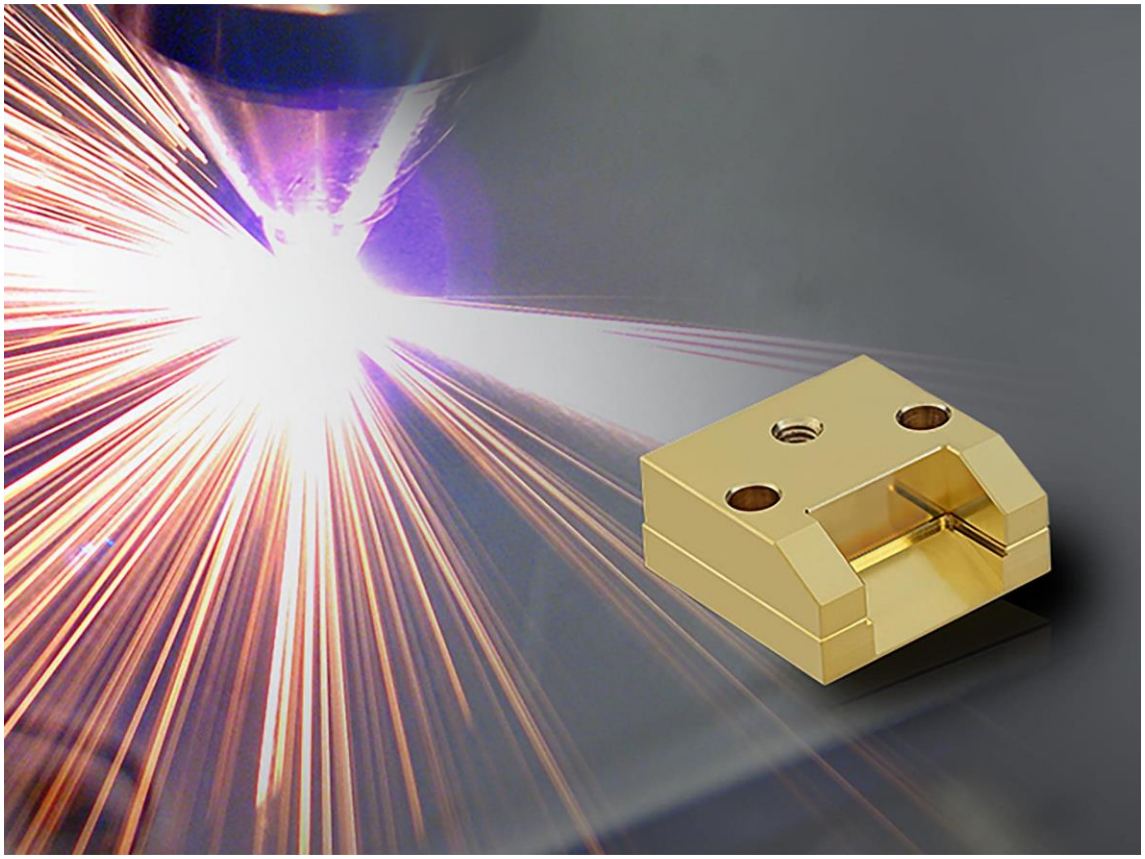




$$\Delta V = V_m \cdot \frac{t_2}{RC} \quad (t_2 \approx T/6) = V_m \cdot \frac{T}{6RC} = V_m \cdot \frac{1}{6fRC}$$

$$V_{DC} = V_m - \frac{\Delta V}{2} = V_m - \frac{V_m}{12fRC} = V_m \cdot \frac{12fRC-1}{12fRC}$$

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} = 2 \cdot \frac{1}{12\,fRC-1}$$

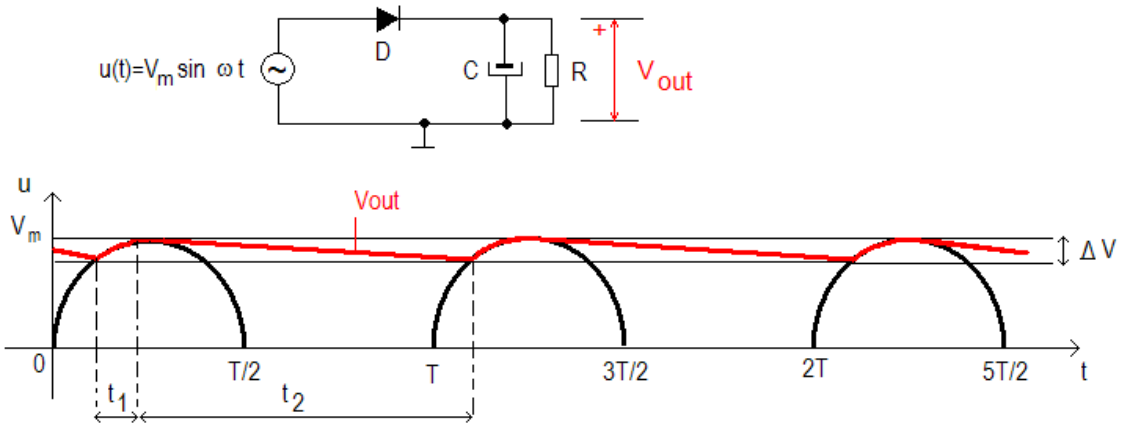


HVALA NA PAŽNJI

PITANJA???

PRORAČUN KAPACITIVNOG FILTRA U ISPRAVLJAČIMA

I-Kapacitivni filtar za polutalasni ispravljač



Slika1-Monofazni polutalasni ispravljač i talasni oblik izlaznog napona

Pretpostavka da je vremenska konstanta RC filtra mnogo veća od periode T i vremenskih intervala t_1 i t_2: $\tau = RC >> T > t_2 > t_1$; interval $t_2 = T - t_1$ dok je $T = 1/f$, $f = 50Hz$

Pražnjenje kondenzatora C u intervalu t_2 se ostvaruje eksponencijalnom vremenskom funkcijom:

$$u(t) = V_m e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (1)$$

Talasnost (*"ripple"*) izlaznog napona ΔV se dobija iz relacije:

$$\Delta V = V_m - V_m e^{-\frac{t_2}{\tau}} = V_m(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}) = V_m(1 - e^{-\frac{T-t_1}{\tau}}) \qquad (2)$$

Izraz dat jednačinom (2) se može uprostiti, obzirom na pretpostavku da je $t_1 << \tau$, odnosno da član $e^{-\frac{t_1}{T}} \to 1$

$$\Delta V = V_m(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \cdot e^{-\frac{t_1}{\tau}}) \approx V_m(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \qquad (3)$$

Obzirom da je $\tau = RC >> T$, možemo napisati da je $T/\tau << 1$, odnosno $T/\tau = \varepsilon$, pri čemu $\varepsilon \to 0$

Za eksponencijalnu funkciju važe razvoji : $e^{x} = 1 + x + \frac{x^2}{2} + ... \;,\; x \to 0$, $e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2} + ...,\; x \to 0$, stoga važe približne jednakosti : $e^{x} \approx 1 + x$, odnosno $e^{-x} \approx 1 - x$, stoga je izraz za talasnost dat jednačinom (3) moguće napisati u formi:

$$\Delta V \approx V_m(1-(1-\frac{T}{\tau})) = V_m \frac{T}{\tau} = V_m \frac{T}{RC} \tag{4}$$

Obzirom da je $T = 1/f$ izraz za talasnost izlaznog napona postaje:

$$\Delta V \approx V_m \frac{1}{f \cdot R \cdot C} \tag{5}$$

Jednosmerna vrednost izlaznog napona V_{DC} se može izraziti kao:

$$V_{DC} = V_m - \frac{\Delta V}{2} \tag{6}$$

Obzirom da je iz jednačine (5) $V_m = f \cdot R \cdot C \cdot \Delta V$, napon V_{DC} se može predstaviti kao:

$$V_{DC} = f \cdot R \cdot C \cdot \Delta V - \frac{\Delta V}{2} = (f \cdot R \cdot C - \frac{1}{2}) \cdot \Delta V \tag{7}$$

Relativna vrednost talasnosti napona se sada može predstaviti kao:

$$\boxed{\frac{\Delta V}{V_{DC}} = \frac{1}{fRC - \frac{1}{2}} = \frac{2}{2fRC - 1}} \tag{8}$$

Obzirom da je $2fRC >> 1$ izraz za relativnu vrednost talasnosti izlaznog napona se može približno predstaviti kao:

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} \approx \frac{1}{fRC} \tag{9}$$

Ako se pretpostavi da je $R = R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} = \frac{V_{DC}}{I_{opt}}$ izraz za relativnu talasnost se može predstaviti kao:

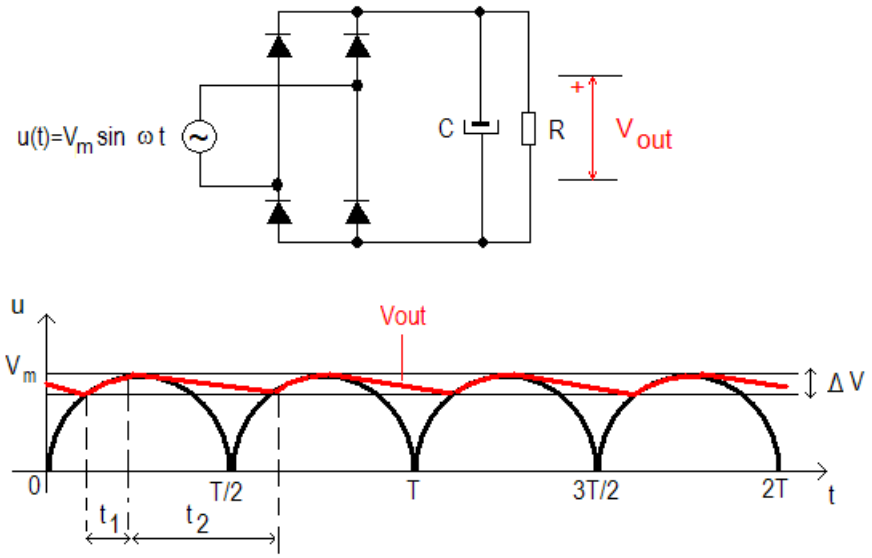
$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} \approx \frac{1}{f \cdot \frac{V_{DC}}{I_{opt}} \cdot C} = \frac{I_{opt}}{f \cdot V_{DC} \cdot C} \tag{10}$$

Apsolutna talasnost ΔV se u ovom slučaju može predstaviti kao:

$$\Delta V \approx \frac{I_{opt}}{f \cdot C} \tag{11}$$

Za učestanost $f = 50Hz$, struju opterećenja $I_{opt} = 1A$ i kapacitet $C = 1000\mu F$ se dobija apsolutna vrednost talasnosti od $\Delta V = 20V$ i relativna vrednost talasnosti $\Delta V / V_{DC} = 20V / 310V = 0.0645$ odnosno 6.45% (Pretpostavljeno je da je ulazno mrežno napajanje 230V, 50Hz).

II- kapacitivni filtar za monofazni punotalasni ispravljač



Slika2-Monofazni punotalasni ispravljač i talasni oblik izlaznog napona

Talasnost napona u ovom slučaju se može prikazati kao:

$$\Delta V \approx V_m(1-(1-\frac{T}{2\cdot\tau})) = V_m\frac{T}{2\tau} = V_m\frac{T}{2RC} \quad , \tag{12}$$

Odnosno imajući u vidu da je $T = 1/f$:

$$\Delta V \approx V_m\frac{1}{2\cdot f\cdot R\cdot C} \tag{13}$$

Jednosmerna komponenta izlaznog napona se može prikazati kao:

$$V_{DC} = 2\cdot f\cdot R\cdot C\cdot\Delta V - \frac{\Delta V}{2} = (2\cdot f\cdot R\cdot C-\frac{1}{2})\cdot\Delta V \tag{14}$$

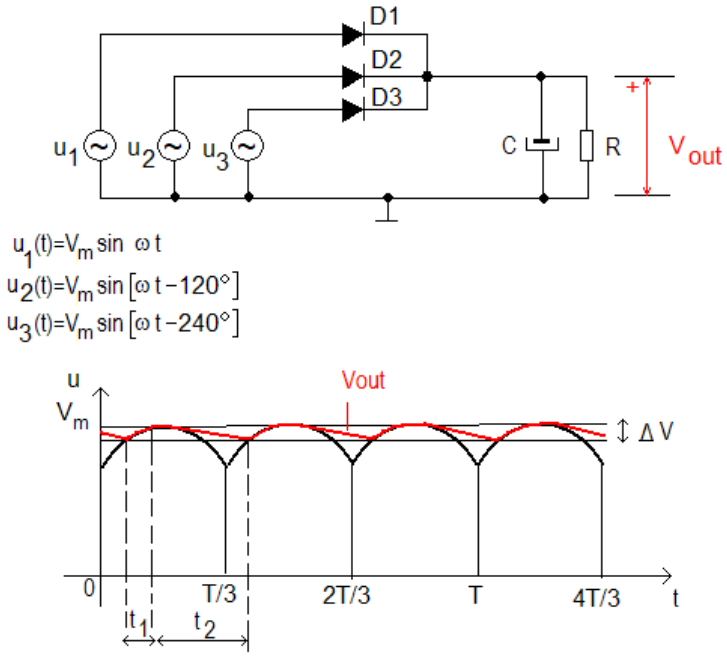
Relativna vrednost talasnosti izlaznog napona je data relacijom:

$$\boxed{\frac{\Delta V}{V_{DC}} = \frac{1}{2\,fRC-\frac{1}{2}} = \frac{2}{4\,fRC-1}} \tag{15}$$

Obzirom da je ispunjen uslov $4\,fRC >> 1$, relativna talasnost se može prikazati kao:

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} \approx \frac{1}{2\,fRC} \tag{16}$$

III-Kapacitivni filtar za trofazni (tro-pulsni) polutalasni ispravljač



Slika 3-Trofazni polutalasni ispravljač i talasni oblik izlaznog napona

Talasnost napona u ovom slučaju se može prikazati kao:

$$\Delta V \approx V_m(1-(1-\frac{T}{3\cdot\tau})) = V_m\frac{T}{3\tau} = V_m\frac{T}{3RC} \qquad (17)$$

Odnosno imajući u vidu da je $T = 1/f$:

$$\Delta V \approx V_m\frac{1}{3\cdot f\cdot R\cdot C} \qquad (18)$$

Jednosmerna komponenta izlaznog napona se može prikazati kao:

$$V_{DC} = 3\cdot f\cdot R\cdot C\cdot\Delta V - \frac{\Delta V}{2} = (3\cdot f\cdot R\cdot C - \frac{1}{2})\cdot\Delta V \qquad (19)$$

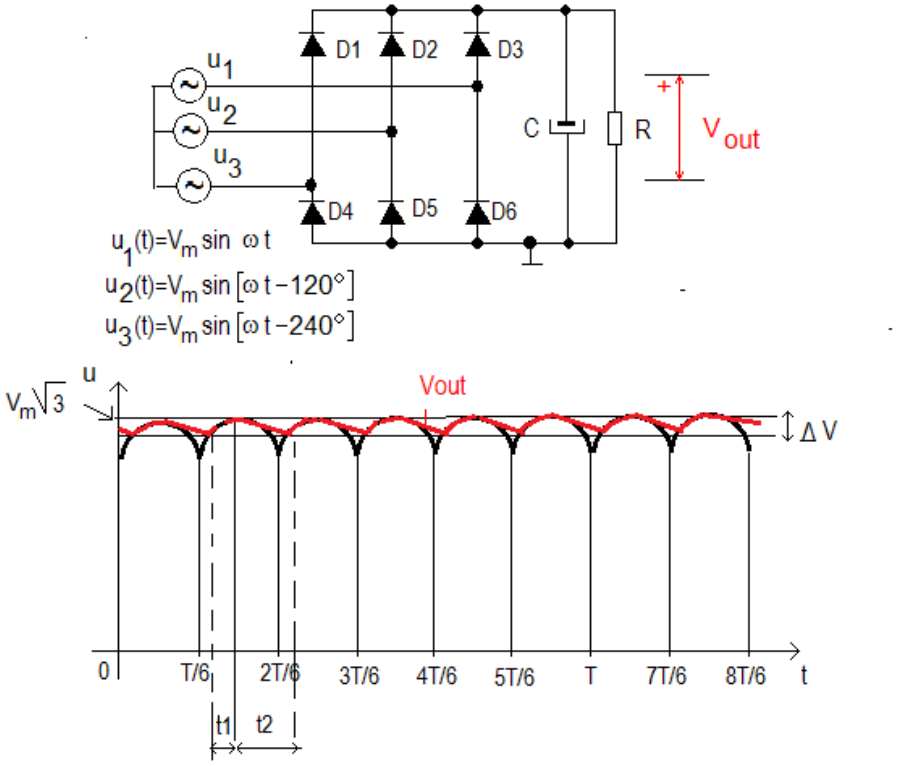
Relativna vrednost talasnosti izlaznog napona je data relacijom:

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} = \frac{1}{3fRC-\frac{1}{2}} = \frac{2}{6fRC-1} \qquad (20)$$

Obzirom da je ispunjen uslov $6fRC >> 1$, relativna talasnost se može prikazati kao:

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} \approx \frac{1}{3fRC} \tag{21}$$

IV-kapacitivni filtar za trofazni (šesto-pulsni) punotalasni ispravljač



Slika 4-Trofazni punotalasni (šesto-pulsni) ispravljač i talasni oblik izlaznog napona

Talasnost napona u ovom slučaju se može prikazati kao:

$$\Delta V \approx V^*_m(1-(1-\frac{T}{6\cdot\tau})) = V^*_m \frac{T}{6\tau} = V^*_m \frac{T}{6RC},\ V^*_m = V_m\sqrt{3} \tag{22}$$

odnosno imajući u vidu da je $T = 1/f$:

$$\Delta V \approx V^*_m \cdot \frac{1}{6\cdot f\cdot R\cdot C} \tag{23}$$

Jednosmerna komponenta izlaznog napona se može prikazati kao:

$$V_{DC} = 6\cdot f\cdot R\cdot C\cdot \Delta V - \frac{\Delta V}{2} = (6\cdot f\cdot R\cdot C - \frac{1}{2})\cdot \Delta V \tag{24}$$

Relativna vrednost talasnosti izlaznog napona je data relacijom:

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} = \frac{1}{6fRC - \frac{1}{2}} = \frac{2}{12fRC - 1} \tag{25}$$

Obzirom da je ispunjen uslov $12\,fRC >> 1$, relativna talasnost se može prikazati kao:

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} \approx \frac{1}{6\,fRC} \tag{26}$$

V- Uslov za izbor i dimenzionisanje kondenzatora C

Za sve slučajeve se obično zadaje maksimalna talasnost izlaznog napona $\delta_{\max} = \frac{\Delta V_{\max}}{V_{DC}}$, pri čemu mora biti ispunjen uslov da je :

$$\frac{\Delta V}{V_{DC}} \le \delta_{\max} \tag{27}$$

Ovo je osnovni kriterijum za izbor i dimenzionisanje kondenzatora za svaki od prethodno prikazanih slučajeva.

a) Monofazni polutalasni ispravljač

$$\boxed{\frac{\Delta V}{V_{DC}} \approx \frac{1}{fRC} \le \delta_{\max}} \tag{28}$$

Iz ove relacije se dobija uslov za izbor kondenzatora C:

$$\boxed{C \ge \frac{1}{fR\delta_{\max}} = \frac{I_{opt}}{f \cdot V_{DC} \cdot \delta_{\max}}} \tag{29}$$

b) Monofazni punotalasni ispravljač

Uslov za izbor kondenzatora C:

$$\boxed{C \ge \frac{1}{2\,fR\delta_{\max}} = \frac{I_{opt}}{2f \cdot V_{DC} \cdot \delta_{\max}}} \tag{30}$$

c) Trofazni polutalasni ispravljač:

Uslov za izbor kondenzatora C:

$$C \geq \frac{1}{3fR\delta_{\max}} = \frac{I_{opt}}{3f \cdot V_{DC} \cdot \delta_{\max}} \tag{31}$$

d) Trofazni punotalasni ispravljač:

Uslov za izbor kondenzatora C:

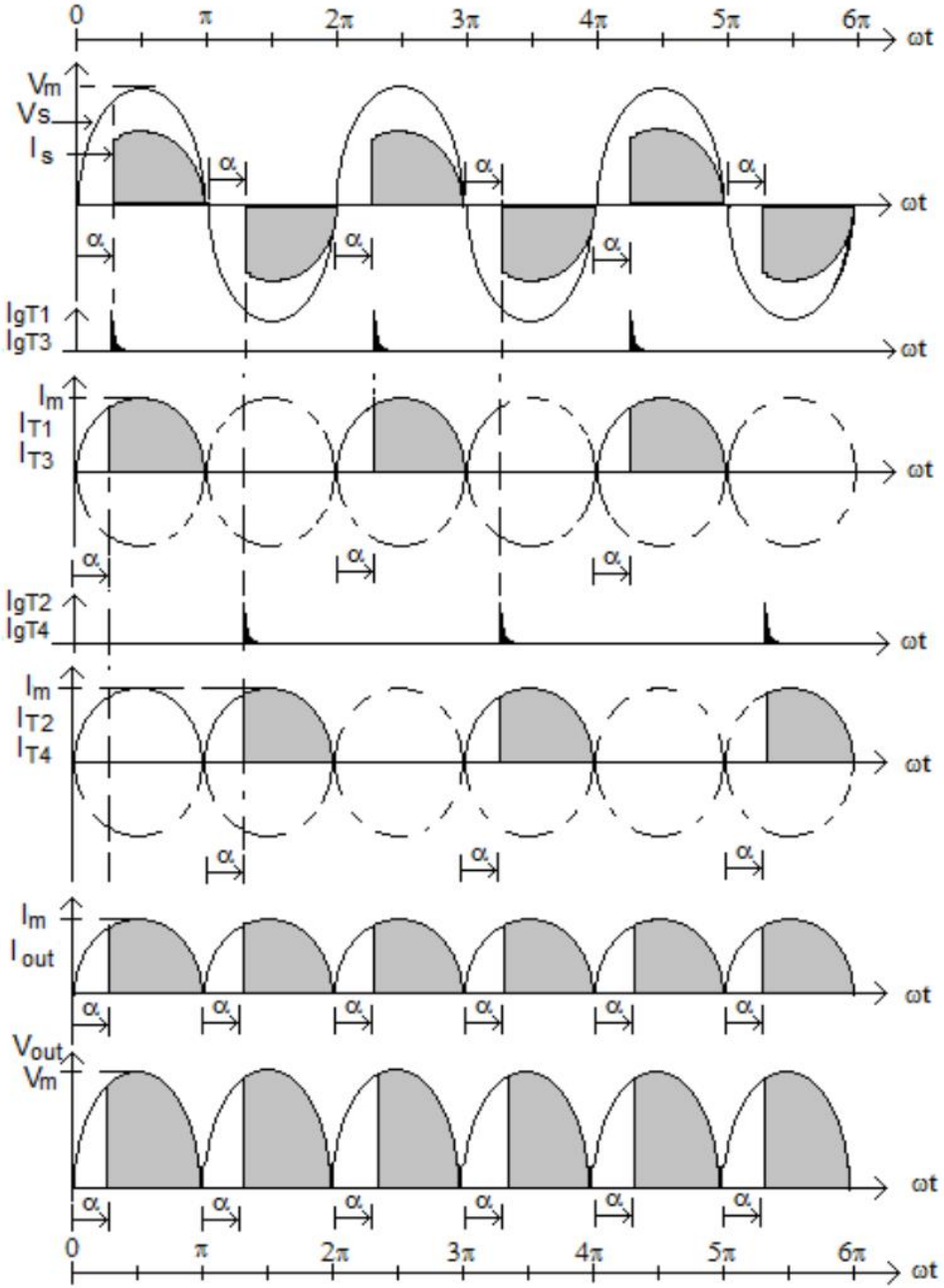
$$C \geq \frac{1}{6fR\delta_{\max}} = \frac{I_{opt}}{6f \cdot V_{DC} \cdot \delta_{\max}} \tag{32}$$

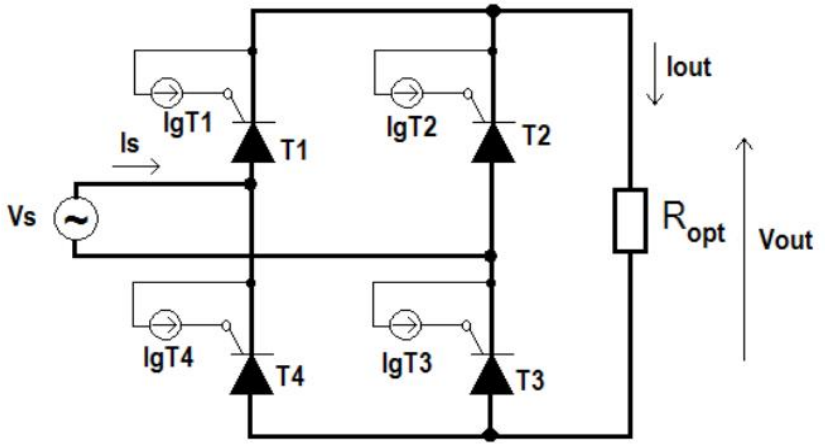
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD
STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE (NET)
OSNOVNE STUDIJE
PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI ZA MONOFAZNE TIRISTORSKE ISPRAVLJAČE

Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.

SCR regulisani ispravljač-puni most-omsko opterećenje





Srednja vrednost izlaznog napona: $V_{out_sr} = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$

Efektivna vrednost izlaznog napona: $V_{out_eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$

Srednja vrednost izlazne struje: $I_{out_sr} = V_{out_sr} / R_{opt} = \frac{V_m}{R_{opt} \cdot \pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$

Efektivna vrednost izlazne struje: $I_{out_eff} = V_{out_eff} / R_{opt}$

Srednja vrednost struje tiristora: $I_{T_sr} = \frac{I_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$

Efektivna vrednost struje tiristora: $I_{T_eff} = \frac{I_m}{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$

Srednja vrednost struje mreže: $I_{S_sr} = 0$

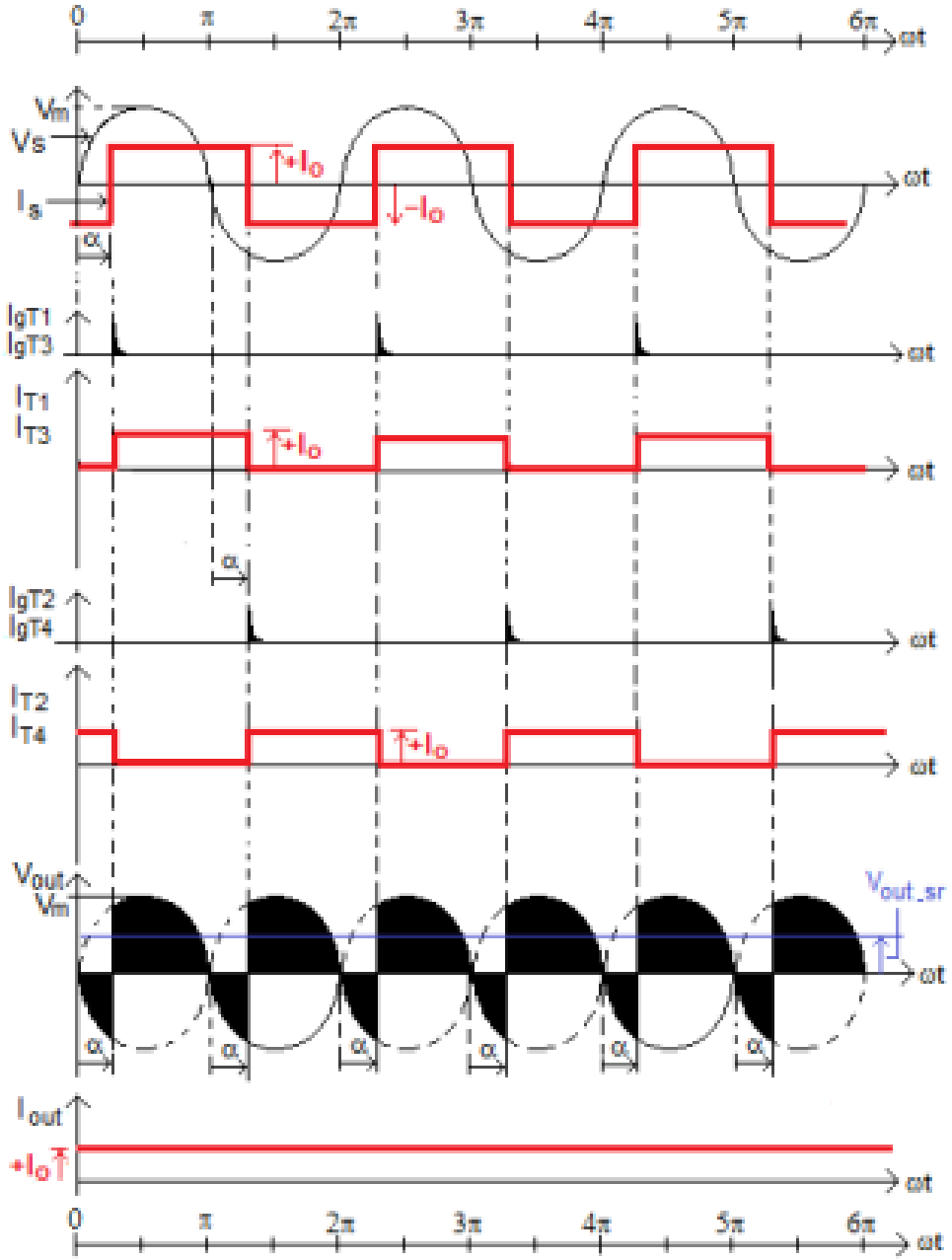
Efektivna vrednost struje mreže: $I_{S_eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$

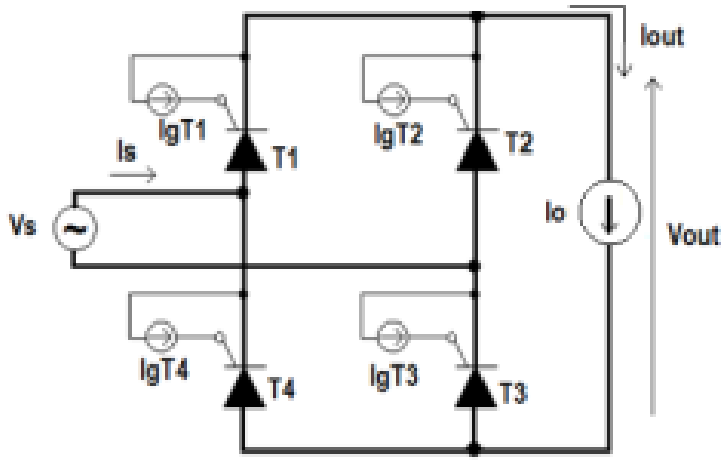
Vs- Efektivna vrednost mrežnog napona

Vm-Maksimalna vrednost mrežnog napona; $V_m = V_S \cdot \sqrt{2}$

ω=2πf, **f**-mrežna učestanost 50Hz

SCR regulisani ispravljač-puni most-opterećenje strujni ponor Io





$0 < \alpha < \pi/2; \quad V_{out_sr} > 0$

Trenutna vrednost ulaznog napona: $v_S = V_m \cdot \sin \omega t = V_S \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$

Vs- Efektivna vrednost mrežnog napona

Vm-Maksimalna vrednost mrežnog napona; $V_m = V_S \cdot \sqrt{2}$

Srednja vrednost izlaznog napona: $V_{OUT_sr} = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \cos \alpha$

Srednja vrednost izlazne struje: $I_{OUT_sr} = I_o$

Izlazna naga: $P_{out} = V_{out_sr} \cdot I_o$

Srednja vrednost struje tiristora: $I_{T_sr} = \frac{I_o}{2}$

Efektivna vrednost struje tiristora: $I_{T_eff} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

Srednja vrednost struje mreže: $I_{S_sr} = 0$

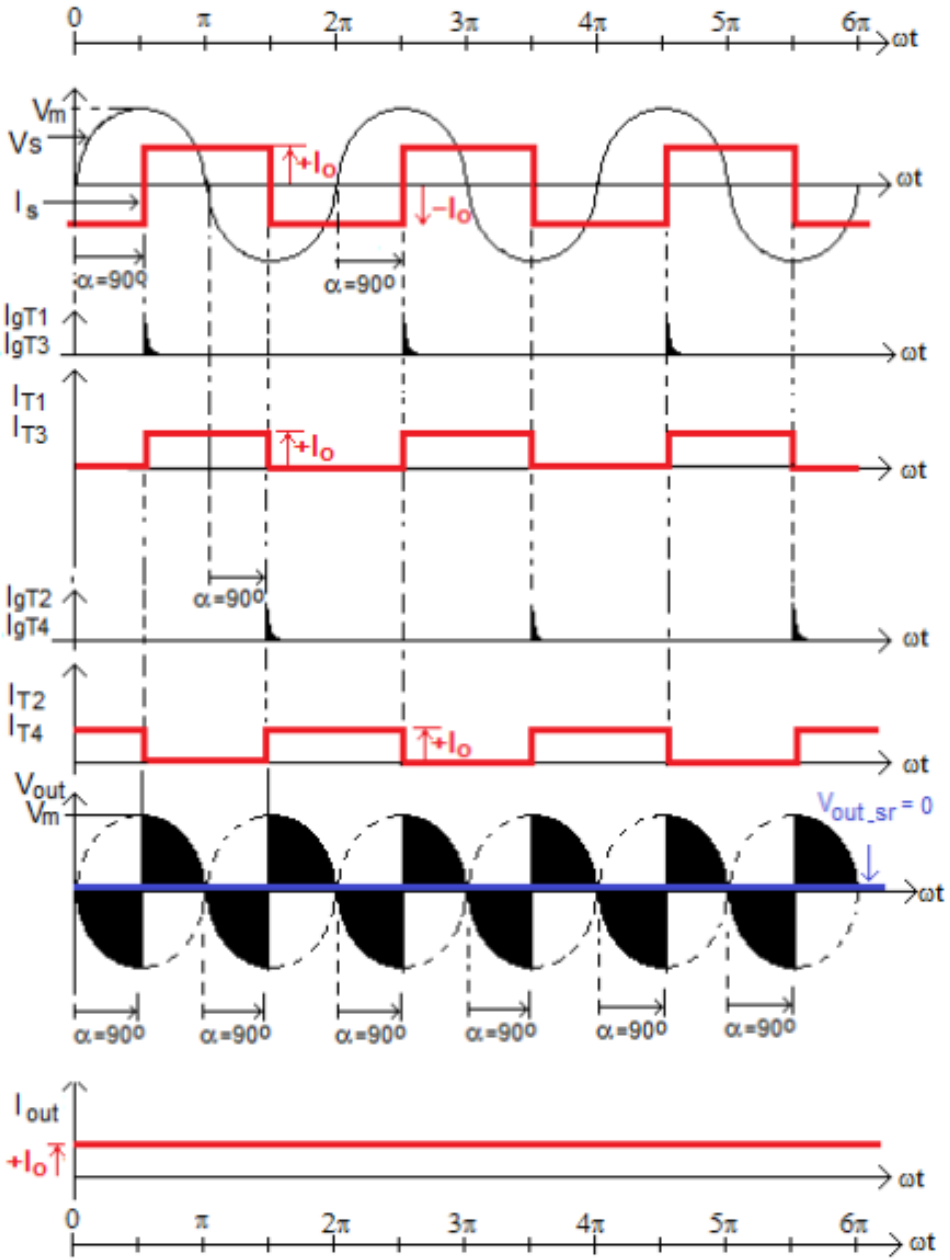
Efektivna vrednost struje mreže: $I_{S_eff} = I_o$

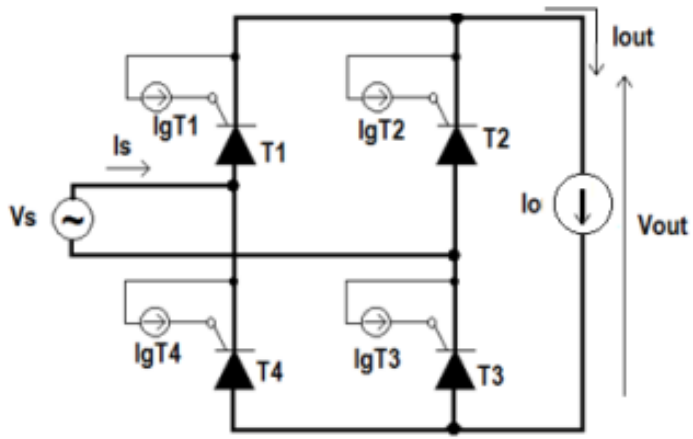
Ulazna prividna snaga: $S_{in} = V_S I_{S_eff} = V_s I_o$

Ulazni faktor snage prvog harmonika struje:

$\cos \varphi = \cos \alpha$

SCR regulisani ispravljač-puni most-opterećenje strujni ponor Io-ugao upravljanja 90°





$\alpha = \pi/2$; $V_{out_sr} = 0$

Trenutna vrednost ulaznog napona: $v_s = V_m \cdot \sin \omega t = V_S \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$

Vs*- *Efektivna vrednost mrežnog napona

***Vm*-Maksimalna vrednost mrežnog napona;** $V_m = V_S \cdot \sqrt{2}$

Srednja vrednost izlaznog napona:

$$V_{out_sr} = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \cos\alpha = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \cos 90^o = 0$$

Srednja vrednost izlazne struje: $I_{out_sr} = I_o$

Izlazna naga: $P_{out} = V_{out_sr} \cdot I_o = 0$

Srednja vrednost struje tiristora: $I_{T_sr} = \frac{I_o}{2}$

Efektivna vrednost struje tiristora: $I_{T_eff} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

Srednja vrednost struje mreže: $I_{S_sr} = 0$

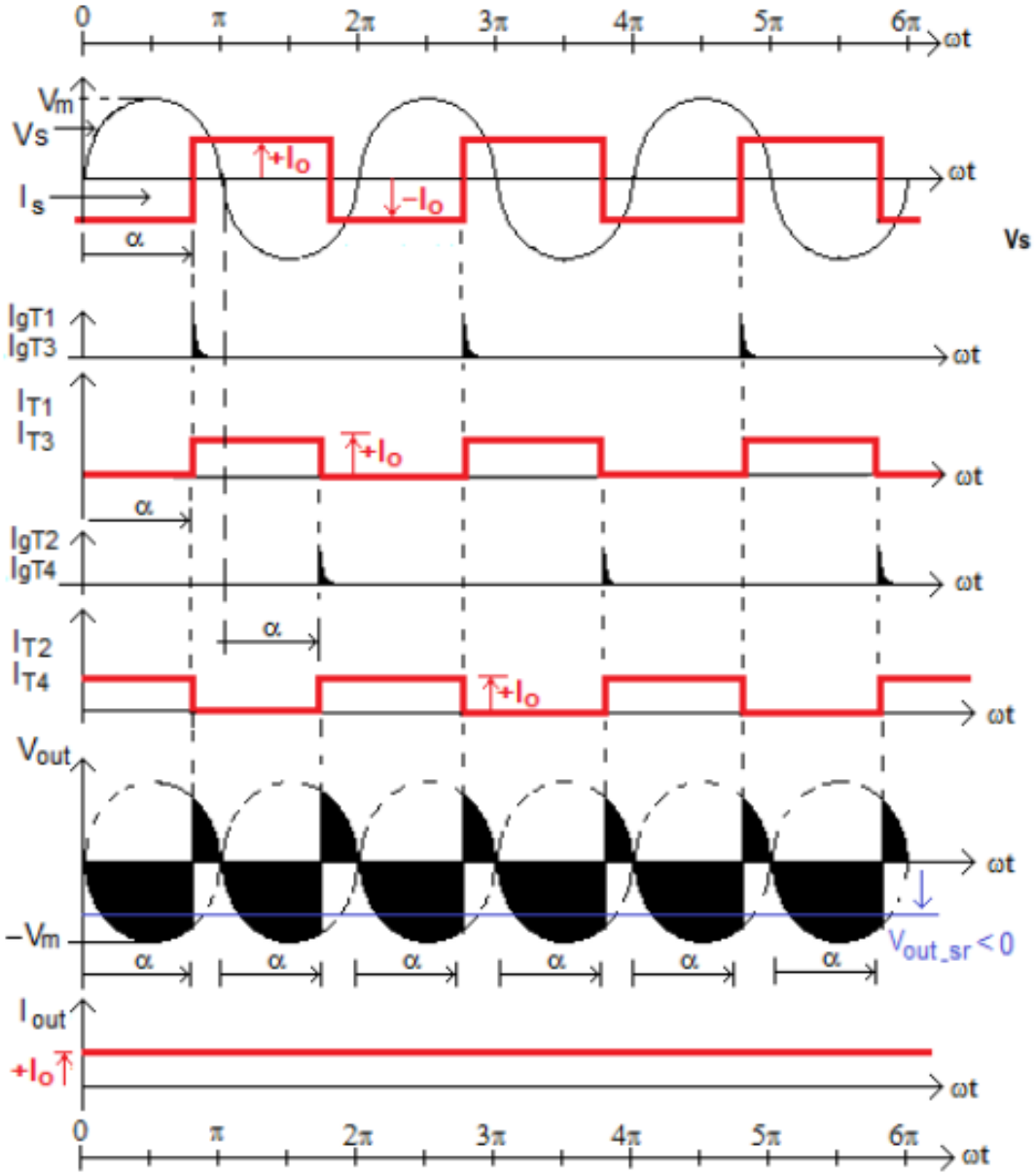
Efektivna vrednost struje mreže: $I_{S_eff} = I_o$

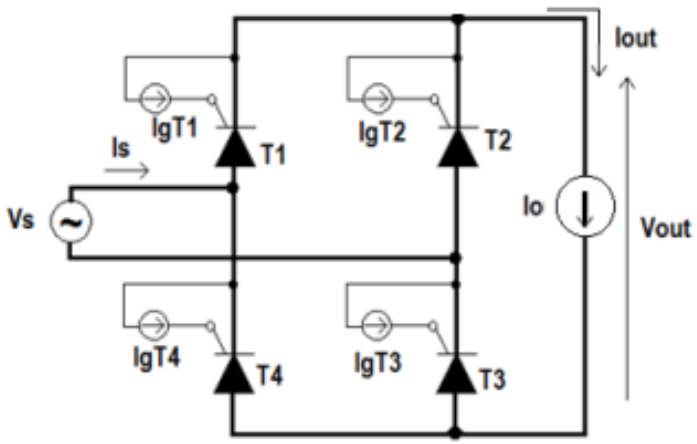
Ulazna prividna snaga: $S_{in} = V_S I_{S_eff} = V_S I_o$

Ulazni faktor snage prvog harmonika struje:

$\cos\varphi = \cos\alpha = 0$

SCR regulisani ispravljač-puni most-opterećenje strujni ponor Io- invertorski režim





$\pi/2 < \alpha < \pi$; $V_{out_sr} < 0$

Trenutna vrednost ulaznog napona:

$$v_s = V_m \cdot \sin \omega t = V_S \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$$

Vs- *Efektivna vrednost mrežnog napona*

Vm-**Maksimalna vrednost mrežnog napona;** $V_m = V_S \cdot \sqrt{2}$

Srednja vrednost izlaznog napona: $V_{out_sr} = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \cos\alpha < 0$

Srednja vrednost izlazne struje: $I_{out_sr} = I_o$

Izlazna naga: $P_{out} = V_{out_sr} \cdot I_o < 0$

Srednja vrednost struje tiristora: $I_{T_sr} = \frac{I_o}{2}$

Efektivna vrednost struje tiristora: $I_{T_eff} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

Srednja vrednost struje mreže: $I_{S_sr} = 0$

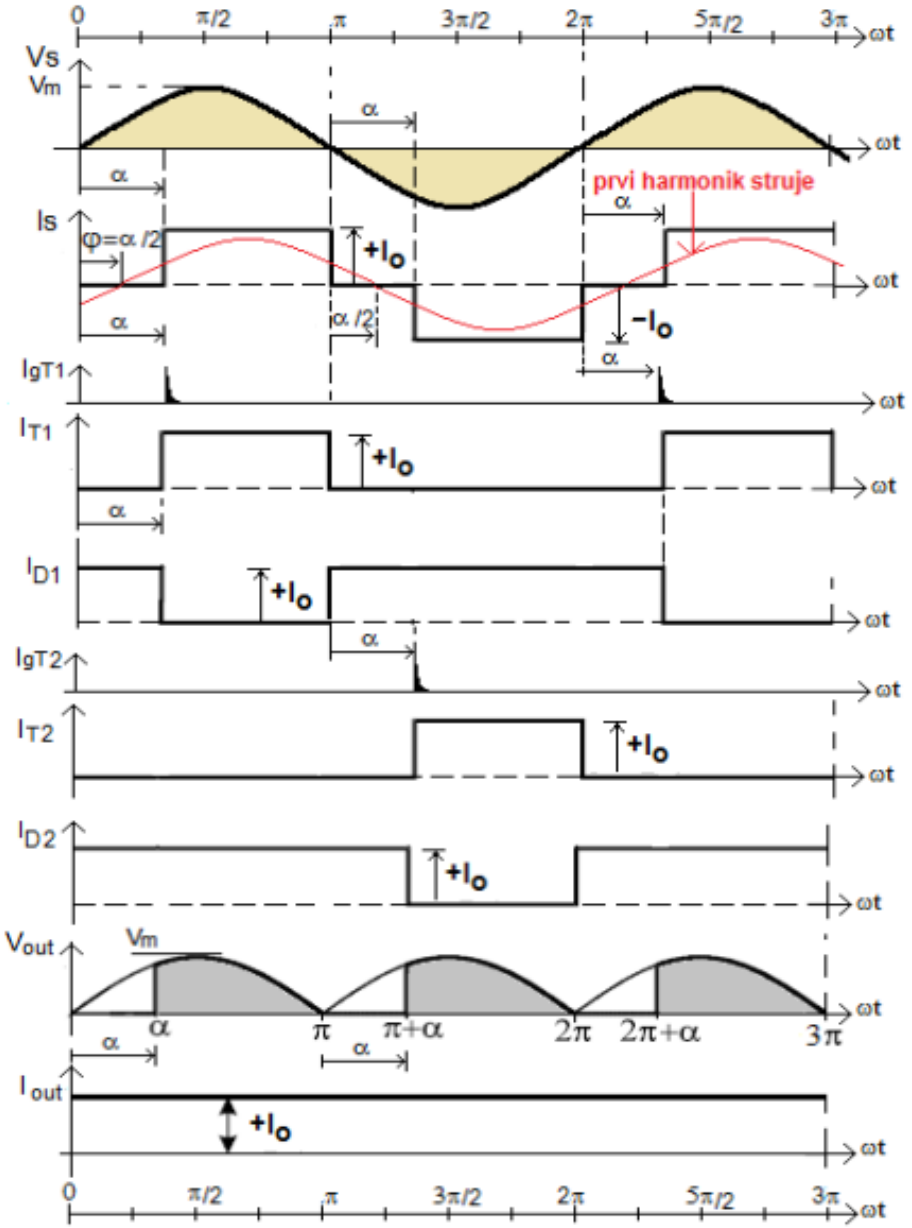
Efektivna vrednost struje mreže: $I_{S_eff} = I_o$

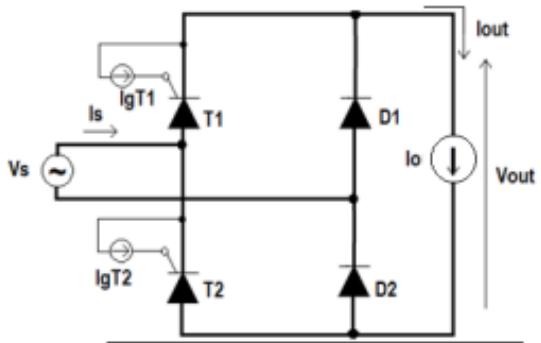
Ulazna prividna snaga: $S_{in} = V_S I_{S_eff} = V_S I_o$

Ulazni faktor snage prvog harmonika struje:

$\cos\varphi = \cos\alpha < 0$

SCR regulisani ispravljač-asimetrični polumost-opterećenje strujni ponor Io





0 < α <π ; Vout_sr > 0

Trenutna vrednost ulaznog napona: $v_s = V_m \cdot \sin \omega t = V_S \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$

Vs- Efektivna vrednost mrežnog napona

V_m-Maksimalna vrednost mrežnog napona; $V_m = V_S \cdot \sqrt{2}$

Srednja vrednost izlaznog napona: $V_{out_sr} = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$

Srednja vrednost izlazne struje: $I_{out_sr} = I_o$

Izlazna naga: $P_{out} = V_{out_sr} \cdot I_o$

Srednja vrednost struje tiristora: $I_{T_sr} = \frac{I_o}{2} \cdot \frac{(\pi - \alpha)}{\pi}$

Srednja vrednost struje diode: $I_{D_sr} = \frac{I_o}{2} \cdot \frac{(\pi + \alpha)}{\pi}$

Efektivna vrednost struje tiristora: $I_{T_eff} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$

Efektivna vrednost struje diode: $I_{D_eff} = \frac{I_o}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{\pi}}$

Srednja vrednost struje mreže: $I_{S_sr} = 0$

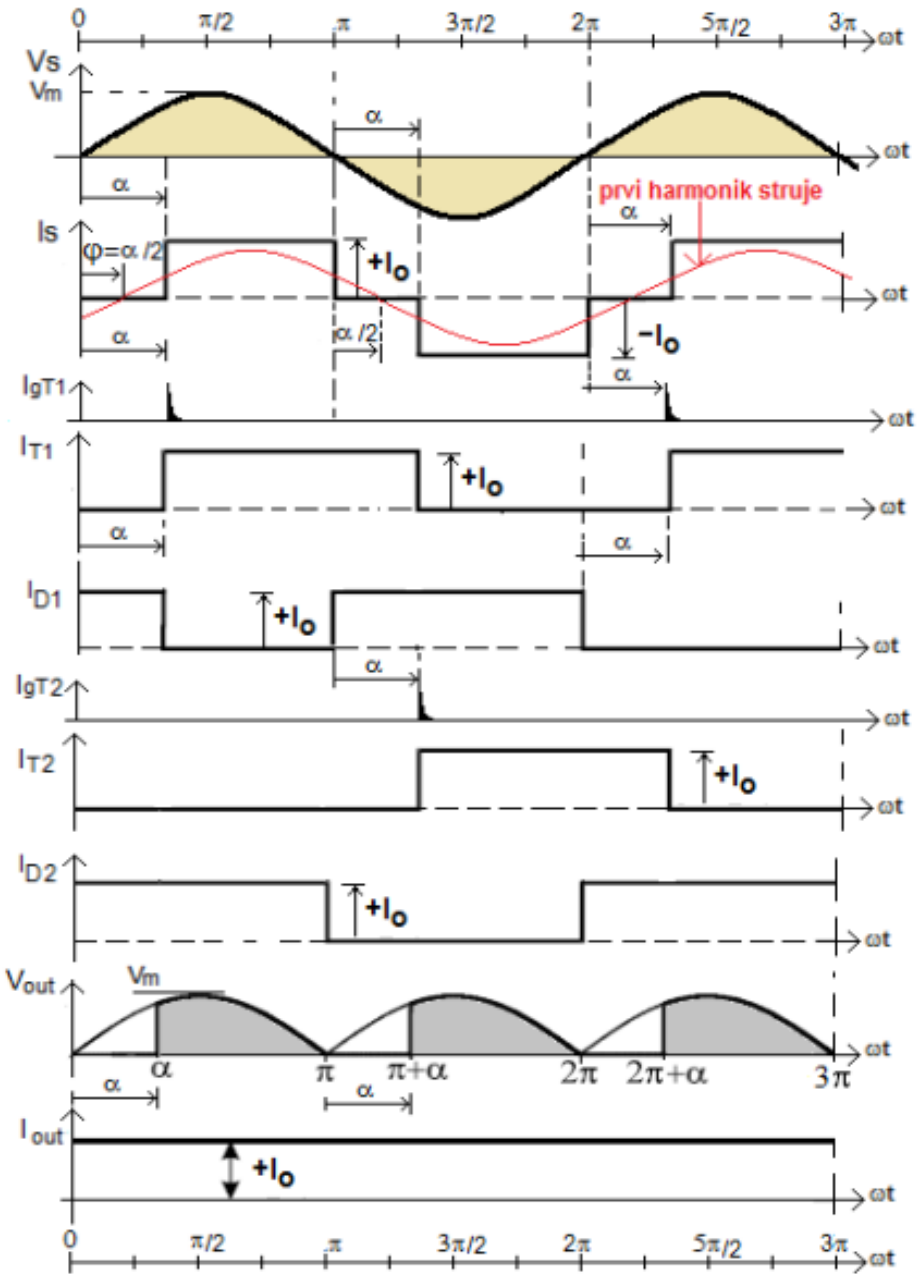
Efektivna vrednost struje mreže: $I_{S_eff} = I_o \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$

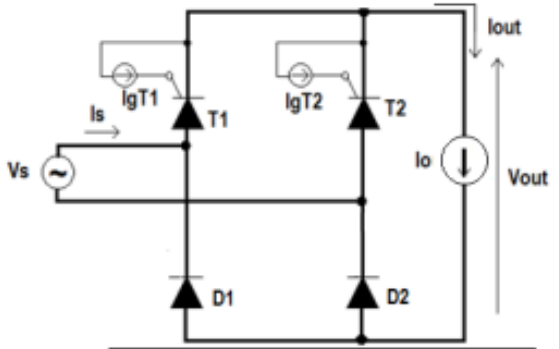
Ulazna prividna snaga: $S_{in} = V_S I_{S_eff} = V_s I_o$

Ulazni faktor snage prvog harmonika:

$\cos \varphi = \cos(\alpha / 2); \varphi = \alpha / 2$

SCR regulisani ispravljač-simetrični polumost-opterećenje strujni ponor Io





$0 < \alpha < \pi$; $V_{out_sr} > 0$

Trenutna vrednost ulaznog napona: $v_s = V_m \cdot \sin \omega t = V_S \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$

Vs- Efektivna vrednost mrežnog napona

***Vm*-Maksimalna vrednost mrežnog napona;** $V_m = V_S \cdot \sqrt{2}$

Srednja vrednost izlaznog napona: $V_{out_sr} = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$

Srednja vrednost izlazne struje: $I_{out_sr} = I_o$

Izlazna naga: $P_{out} = V_{out_sr} \cdot I_o$

Srednja vrednost struje tiristora: $I_{T_sr} = \frac{I_o}{2}$

Srednja vrednost struje diode: $I_{D_sr} = \frac{I_o}{2}$

Efektivna vrednost struje tiristora: $I_{T_eff} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

Efektivna vrednost struje diode: $I_{D_eff} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

Srednja vrednost struje mreže: $I_{S_sr} = 0$

Efektivna vrednost struje mreže: $I_{S_eff} = I_o \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$

Ulazna prividna snaga: $S_{in} = V_S I_{S_eff} = V_S I_o$

Ulazni faktor snage prvog harmonika:

$\cos \varphi = \cos(\alpha / 2); \varphi = \alpha / 2$

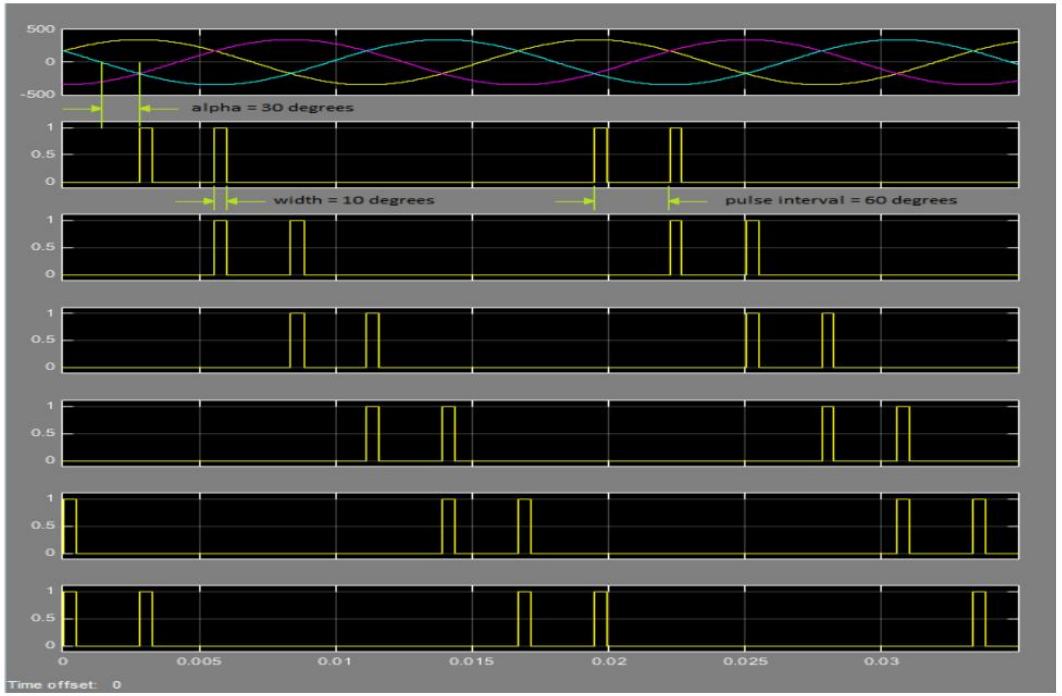
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE(NET)

OSNOVNE STUDIJE

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

KOMUTACIJA STRUJE U TIRISTORSKIM ISPRAVLJAČIMA



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.

UVOD

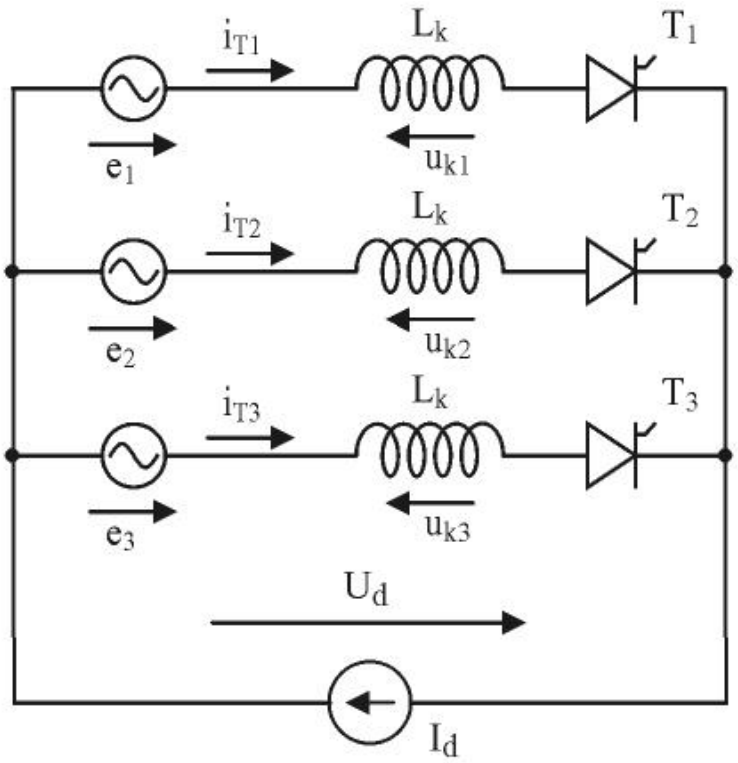
Pretvarači sa prirodnom komutacijom

Osnovne karakteristike:

- Struja sa jednog tiristora prelazi na drugi, zahvaljujući promenama faznih napona na ulazu
- Ulazni transformator je trofazni i njegov sekundar je obično spregnut u „zvezdu”
- Tipična primena ispravljača sa malim vrednostima izlaznog jednosmernog napona (obično do 50 ili 100V) i realtivnio velikim izlaznim strujama (par stotina ampere i više) su pogoni elektrolize, galvanizacije, punjenje trakcionih akumulator i sl.
- Povoljno je što struja uvek teče samo kroz jedan tiristor
- Na strani potrošača obično postoji velika induktivnost L koja smanjuje valovitost struje potrošača (ako ne postoji često se i dodaje),
- Ako je L toliko velika da je struja potrošača neprekidna i sa malom valovitošću, onda se grana sa induktivnošću L i potrošačem može predstaviti kao strujni ponor.
- Prethodna pretpostavka je veoma bitna za analizu procesa komutacije između tiristora u regulisanom ispravljaču

KOMUTACIJA STRUJE –pretpostavke

- struja potrošača je konstantna
- padovi napona na tiristorima koji komutuju su zanemarljivi
- padovi napona na spojevima su zanemarljivi
- Sprega sekundara transformatora je “zvezda”
- Ulazni fazni naponi e1-e3 sinusni i simetrični
- Lk je ekvivalentna rasipna induktivnost transformatora + reaktansa kratkog spoja mreže na tom priključnom mestu.

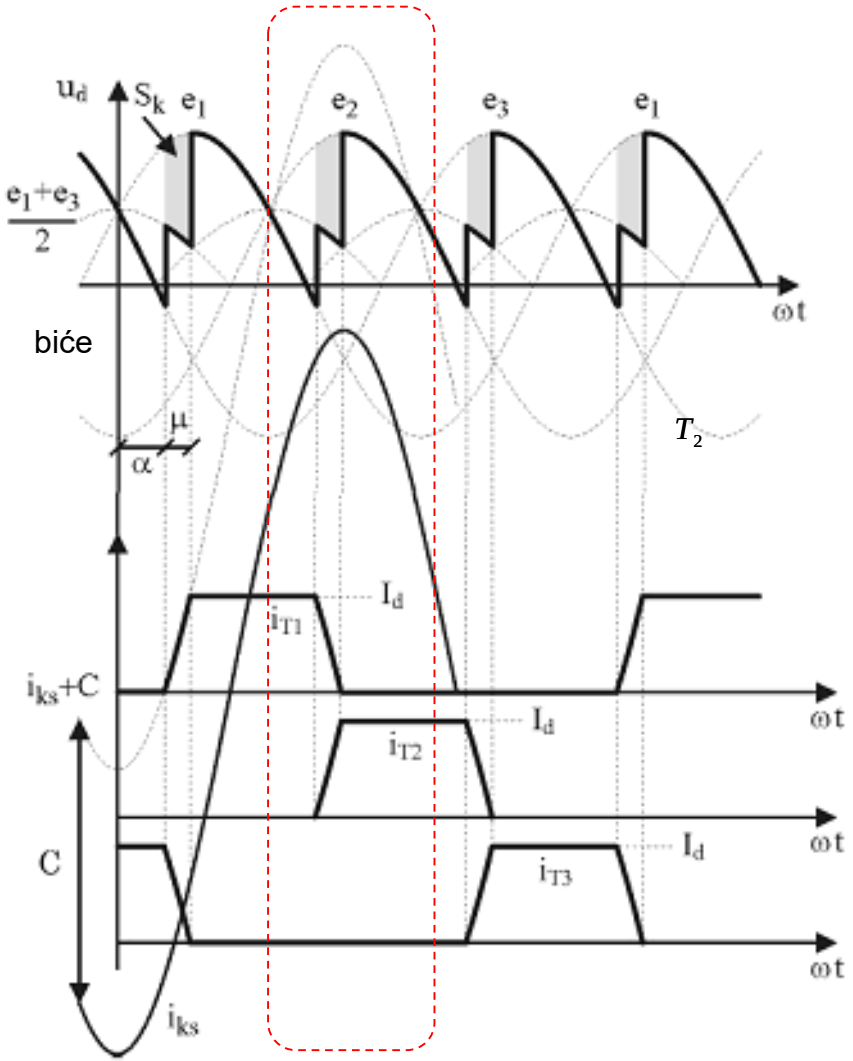


Ekvivalentna šema za proučavanje procesa komutacije

ANALIZA PROCESA KOMUTACIJE

Posmatrajmo prvu granu ovog ispravljača. Neposredno pre početka komutacije biće:

$$i_{1(0)} = I \qquad i_{2(0)} = 0$$



Tiristor T2 ne može da se upali sve dok je $e_2 < e_1$ (jer nije direktno polarisan)

Dok vodi T1 biće: $u_L = e_1$

$$I = \text{const} \quad \Rightarrow \quad L_k \frac{dI}{dt} = 0$$

Kada postane e1=e2 , stekli su se uslovi da T2 može da provede, pod uslovom da dobije pobudni impuls na gejt. Za to vreme još uvek vodi T1. Kada T2 dobije impuls na gejt on počinje da provodi, a T1 prestaje da vodi. U ovom intervalu komutacije vode oba tiristora i izvori e1 i e2 su kratko spojeni preko komutacionih induktivnosti Lk. Ove induktivnosti sprečavaju nagle promene struje.

α - ugao paljenja (regulacije)

μ - ugao komutacije

$$i_1 + i_2 = I$$ I. Kirhofov zakon

$$e_1 - L_k \frac{di_1}{dt} - u_L = 0$$ II. Kirhofov zakon

$$e_2 - L_k \frac{di_2}{dt} - u_L = 0$$ II. Kirhofov zakon

$$e_1 - L_k \frac{di_1}{dt} - u_L = 0$$

+

$$e_2 - L_k \frac{di_2}{dt} - u_L = 0$$

$$i_1 + i_2 = I = \text{const.}$$

$$u_L = \frac{e_1 + e_2}{2}$$

Znači za vreme trajanja komutacije izlazni napon ispravljača jednak je aritmetičkoj sredini faznih napona faza koje komutuju. To je posledica kratkog spoja komutujucih faza.

Koliko traje komutacija?

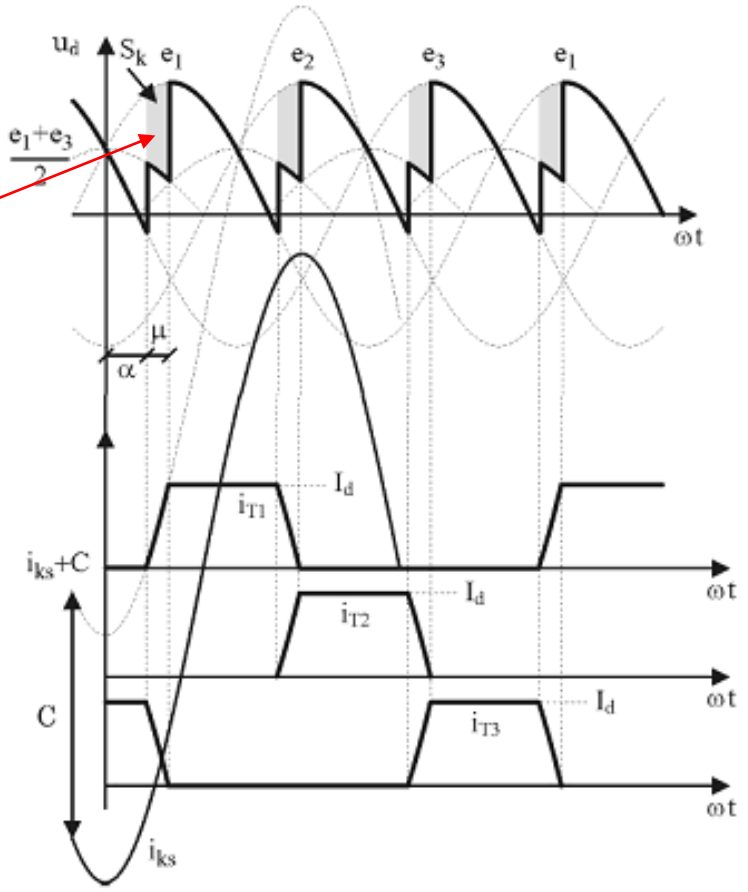
Pomoću sledećeg izraza se može odrediti koliko traje komutacija:

$$L_k I = \int_0^{\frac{\mu}{\omega}} \frac{e_2 - e_1}{2} dt$$

Pošto je: $e_2 - \frac{e_1 + e_2}{2} = \frac{e_2 - e_1}{2}$

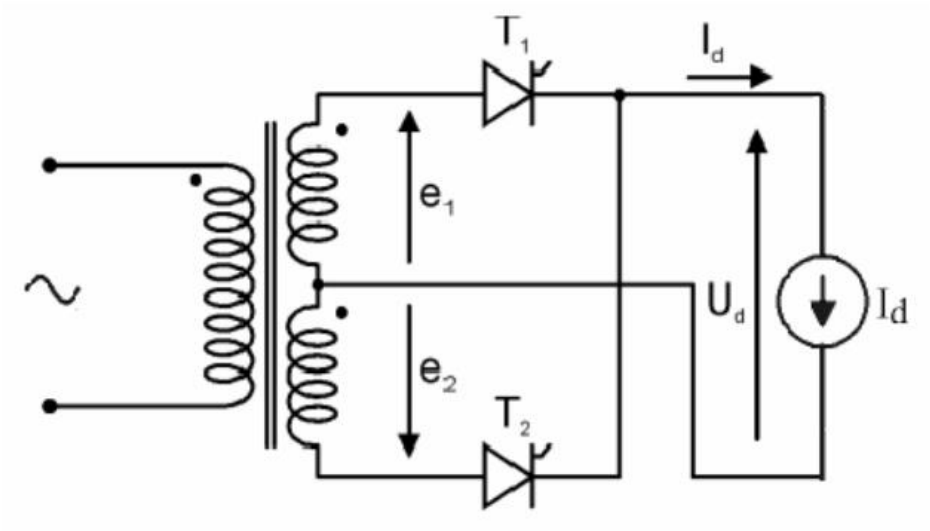
onda je osenčena površina Sk nedostajućeg napona iznad zuba na talasnom obliku napona jednaka:

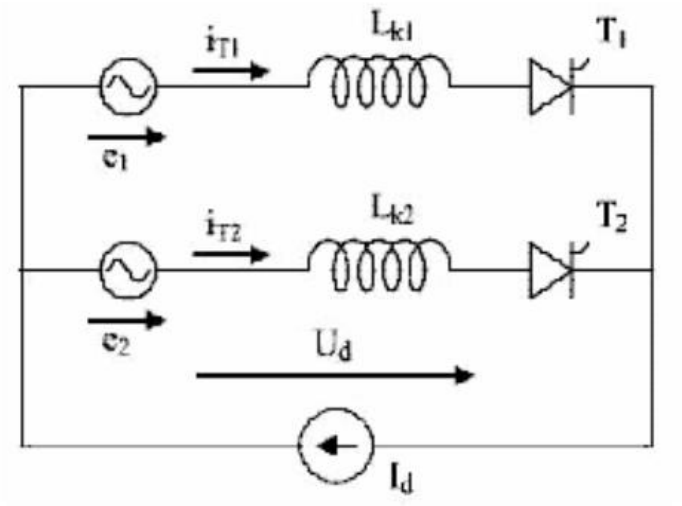
$$\int_0^{\frac{\mu}{\omega}} \frac{e_2 - e_1}{2} dt = L_k I$$



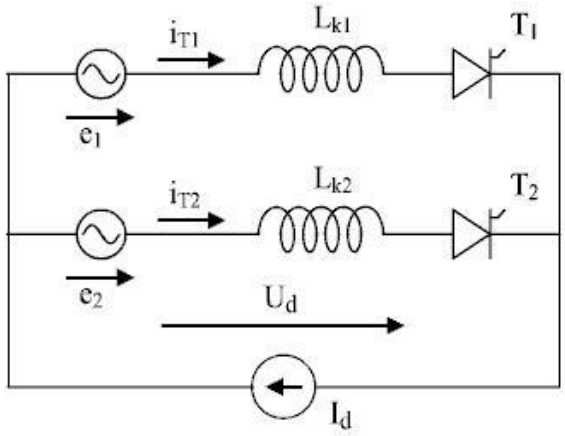
Iz ovoga sledi vrlo važan zaključak: “izgubljene” volt-sekunde gase struju kroz rasipnu induktivnost Lk !!!!

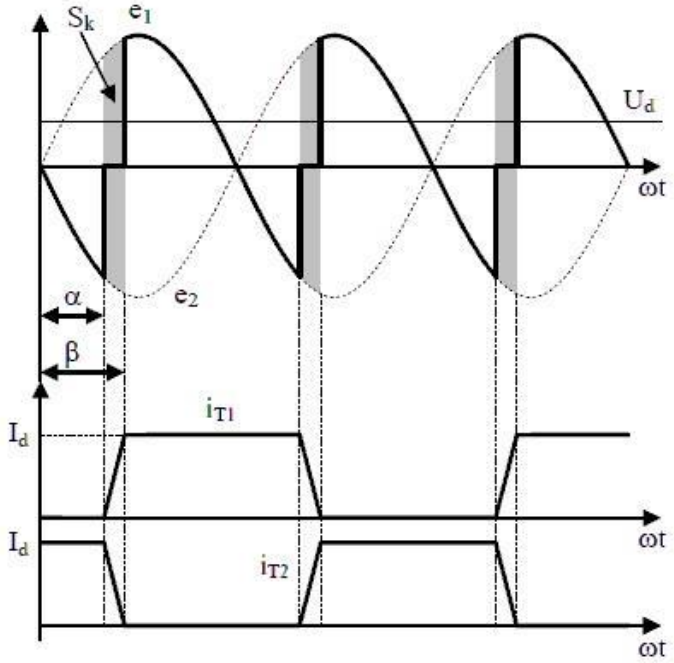
PRIMER 1: Monofazni ispravljač sa srednjom tačkom(spoj M2)





DETALJI: Monofazni ispravljač sa srednjom tačkom (spoj M2)





Ekvivalentna šema za analizu rada ispravljača u spoju M2 i karakteristični talasni oblici

$$u_L = \frac{e_1 + e_2}{2} = 0$$

Jer su naponi e1 i e2 iste amplitude, a fazno pomereni za 180º.

Srednja vrednost napona na opterećenju:

$$U_{AV} = \frac{1}{\frac{T}{2}} \left\{ \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{T}{2}+\frac{\alpha}{\omega}} \sqrt{2} E \sin \omega t dt - L_\gamma I \right\}$$

$$U_{LAV} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \cos\alpha - \frac{X_k}{\pi} I$$

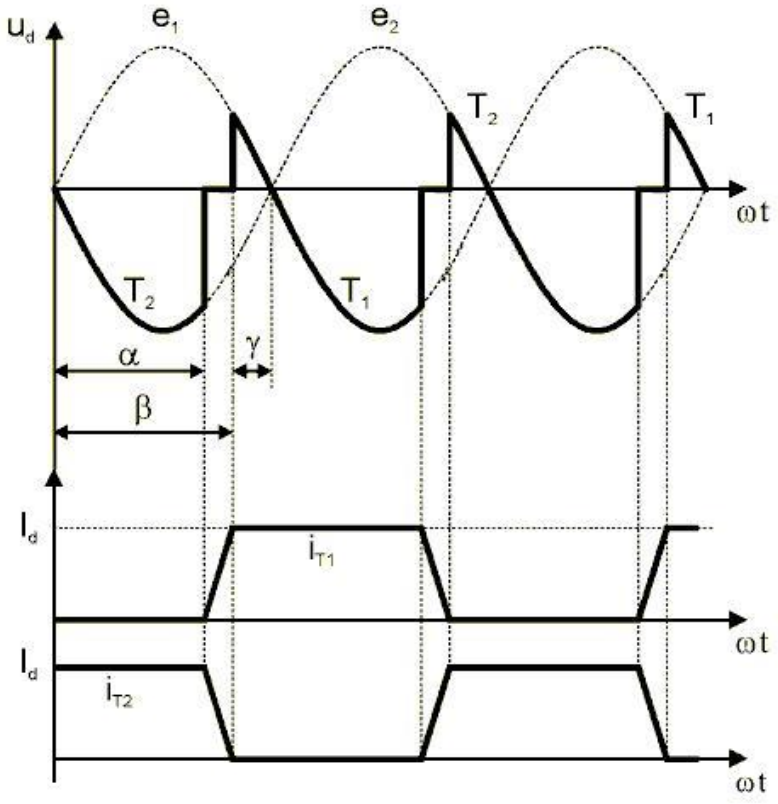
pad napona na ispravljaču

E- efektivna vrednost faznog napona

$X_k = \omega L_\gamma$ -reaktansa rasipanja

Invertorski limit?

$$90° < \alpha_{max} < 180°$$



- Pri uglovima paljenja većim od 90° (ako je potrošač strujni ponor) srednja vrednost napona U_{AV} biće negativna.
- To znači da mrežom komutovani pretvarač (u spoju M2) radi u invertorskom režimu rada i vraća energiju sa jednosmerne strane u napojnu mrežu.
- Pri tome postoji maksimalni ugao paljenja α_{max} koji se može primeniti u invetorskom režimu rada, a da pretvarač ne uđe u trajni kratak spoj:

t_o - vreme odmaranja tiristora $\omega t_o = \gamma$

t_2 – vreme nakon vođenja, dok tiristor ne primi opet direktnu polarizaciju

kataloški podatak za tiristor
vreme odmaranja tiristora

U ovom slučaju mora biti ispunjen uslov da je $t_o > t_q$

da ispravljač nebi ušao u ponovno nekontrolisano vođenje i kratak spoj.

Određivanje ugla komutacije (spoj M2)

$$\alpha_{\max} + \mu + \omega t < 180°$$

$$L_k I = \frac{\sqrt{2}E}{\omega}\left\{\cos\alpha - \cos\left(\alpha + \mu\right)\right\}$$

$$\frac{\omega \cdot L_k}{\sqrt{2}E} \cdot I = \cos\alpha - \cos\left(\alpha + \mu\right)$$

Efektivna vrednost struje transformatora (spoj M2)

Efektivna vrednost struje kroz fazni namotaj sekundara

$$I_{T1RMS} = I_{RMS}^{``} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot I_d^2 \cdot \frac{T}{2}} \Rightarrow \quad I_{RMS}^{``} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}$$

Tipska snaga transformatora

$$P_T = (P' + P'')/2 = P_d \pi \frac{1+\sqrt{2}}{4\sqrt{2}} \approx 1.34 \cdot E \cdot I_d = 1.34 P_d$$

Zaključuje se da je tipska snaga transformatora veća od jednosmerne snage na izlazu ispravljača!!!.

Iz ovog razloga su ispravljački transformatori u određenom procentu predimenzionisani

Pri tome su učinjene dve važne pretpostavke: struje opterećenja je konstantna, a da napon napajanja ima stalnu efektivnu vrednost

Reaktivna snaga uzeta iz mreže u vezi sa uglom regulacije (spoj M2)

- Naponski i strujni talas prolazi kroz 0 u istim tackama.
- Pošto je oblik strujnog talasa pravougaoni i simetričan, kažemo da su napon i struja u fazi (strogo govoreći, u fazi su napon i prvi harmonik struje).
- Pri uglu paljenja α=90º talasni oblik primarne struje kasni za 90° u odnosu na napon.
- Značci, pri tom režimu rada, ispravljač troši rektivnu snagu!!!

- Približno je fazni ugao prvog harmonika struje je jednak uglu regulacije:

$$\varphi_1 \approx \alpha$$

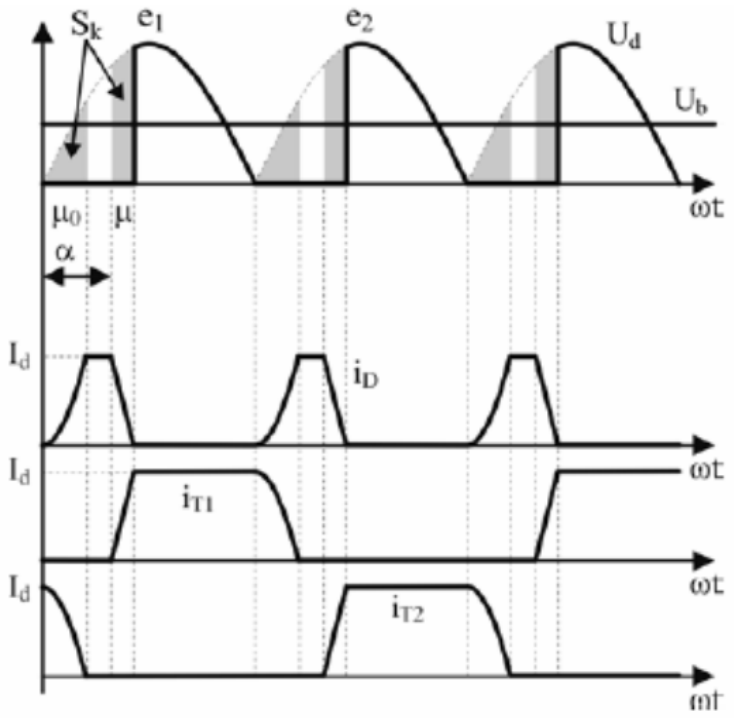
Izlazni napon ispravljača $\mathrm{U}_{AV}(\alpha) = U_{AV}(0)\cos\alpha$

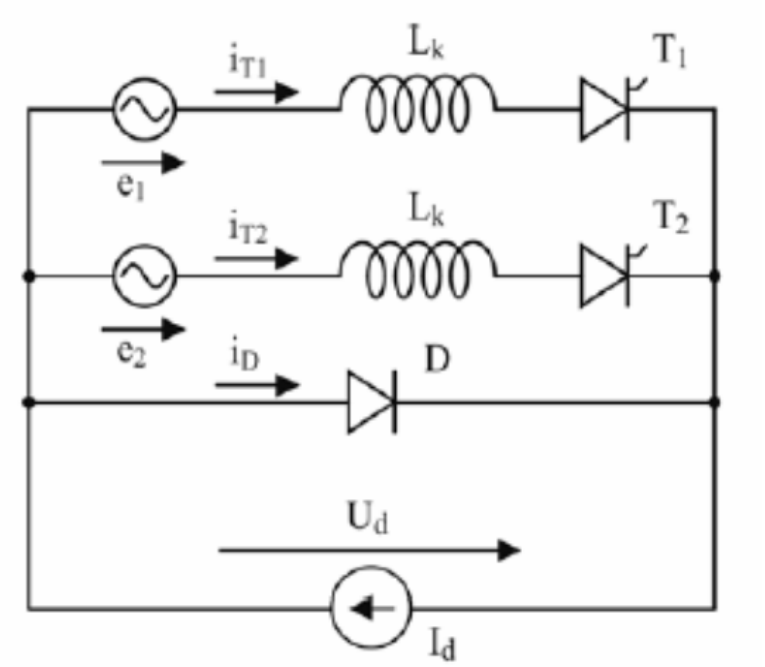
Izlazna snaga ispravljača $\mathrm{P}_{AV} = \mathrm{U}_{AV}(0)\,\mathrm{Id}\cos\alpha$

Prividna snaga ispravljača ne zavisi od ugla regulacije $S = U`Id(\frac{N``}{N`}) = U``Id$

Srednja vrednost izlaznog napona ispravljača (M2) sa dodatom zamajnom diodom biće jednaka:

$$U_{AV} = \frac{2}{T}\left\{\int_{\frac{\alpha}{\pi}}^{\frac{T}{2}} \sqrt{2}E\sin\omega t dt - L_k I\right\}$$

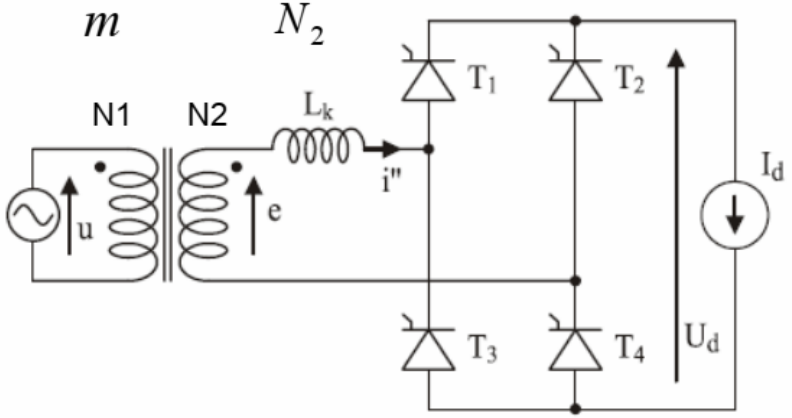




$$U_{AV} = \frac{\sqrt{2}E}{\pi}\left(1+\cos\alpha\right) - \frac{X_k}{\pi} I$$

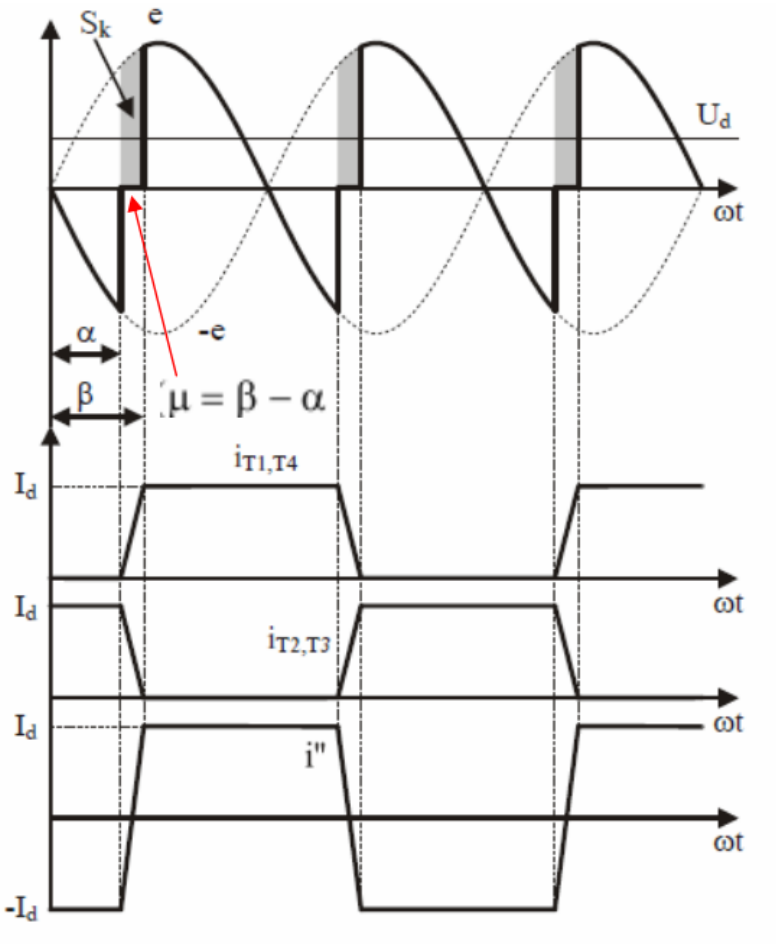
PRIMER 2: Monofazni punoupravljivi ispravljač (spoj B2C)

$$e = \frac{u}{m} \qquad m = \frac{N_1}{N_2}$$



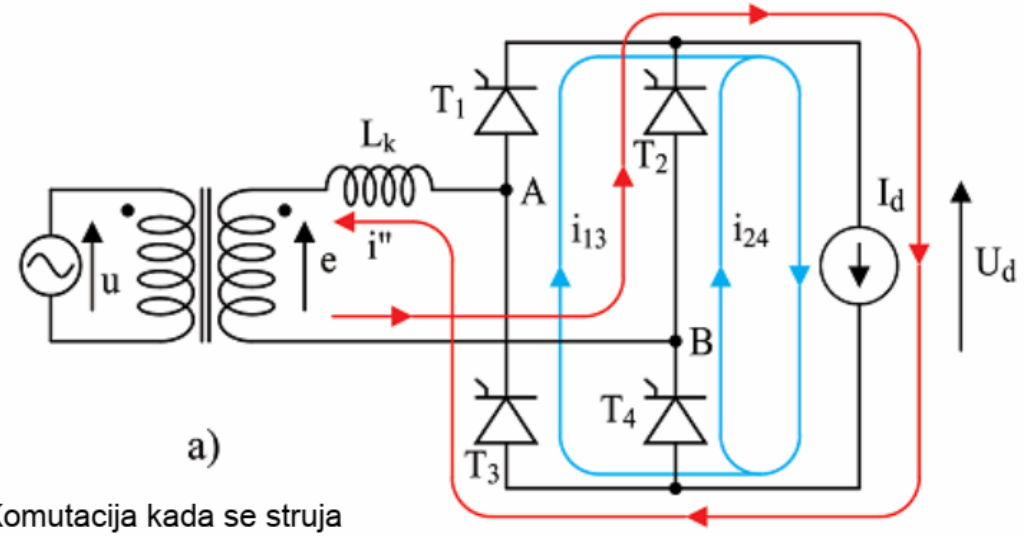
$$e = E\sqrt{2} \cdot \sin \omega t \qquad X_k = \omega \cdot L_k$$

$$S_k = 2 \cdot L_k \cdot I_d$$



SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA

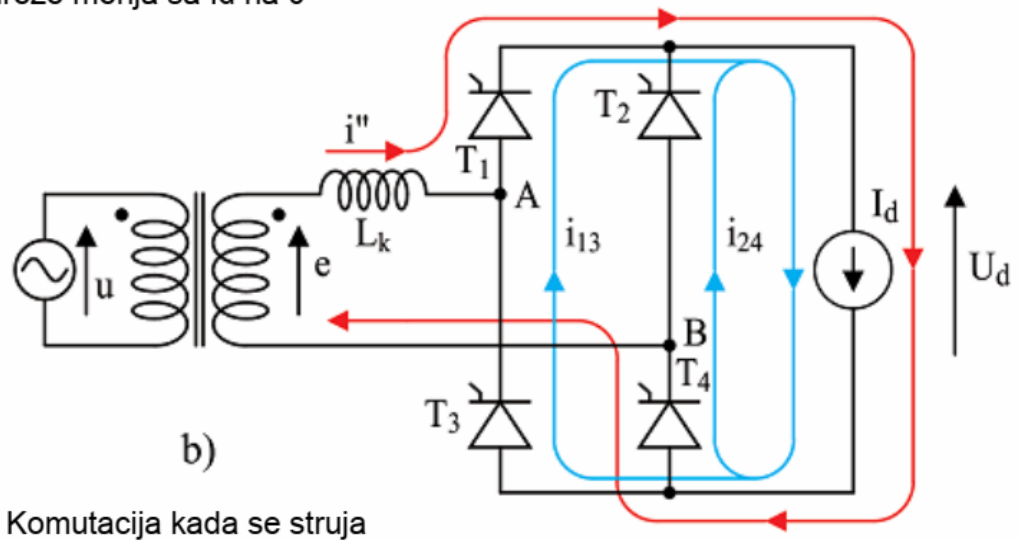
$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot E \cdot \cos\alpha - \frac{2}{\pi} \cdot X_k \cdot I_d$$



Komutacija kada se struja mreže menja sa Id na 0

$$i_1 = i_4 = i_{13} = i_{24} = \frac{I_d - i''}{2}$$

$$i_2 = i_3 = i'' + i_{24} = i'' + i_{13} = \frac{I_d + i''}{2}$$



Komutacija kada se struja mreže menja sa 0 na -Id

$$i_1 = i_4 = i'' + i_{13} = i'' + i_{24} = \frac{I_d + i''}{2}$$

$$i_2 = i_3 = i_{24} = i_{13} = \frac{I_d - i''}{2}$$

$$S_k = L_k \cdot 2I_d = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\beta}{\omega}} \sqrt{2}E \sin(\omega t)\, dt = \frac{\sqrt{2}E}{\omega}\left[\cos(\alpha) - \cos(\beta)\right]$$

$$\cos(\beta) = \cos(\alpha) - \frac{2X_k I_d}{\sqrt{2}E}$$

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi}\cos(\alpha) - \frac{2S_k}{T} = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi}\cos(\alpha) - \frac{4L_k I_d}{T}$$

$$T = 2\pi/\omega$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot E \cdot \cos\alpha - \frac{2}{\pi} \cdot X_k \cdot I_d$$

SNAGA DIMENZIONISANJA TRANSFORMATORA

$$S = S' = S'' = EI_d \qquad \mathrm{I}' = \mathrm{I_d}/\mathrm{m}$$

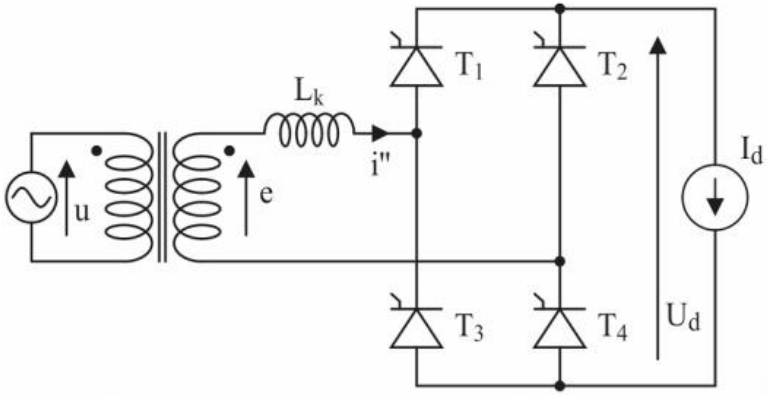
Maksimalna snaga se ima pri α=0

$$P_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot EI_d$$

$$\frac{S}{P_0} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11$$

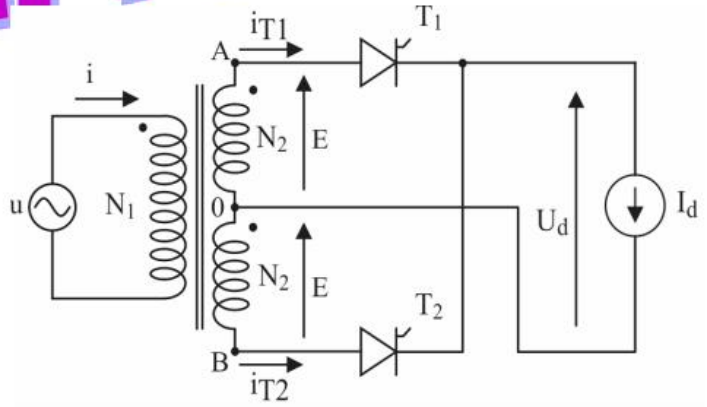
Iz ovog izraza se vidi da se transformator mora dimenzionisati na 11% veću snagu od maksimalne snage kojom se energija može prenosi ti opterećenju!!!

Upoređenjem ovog rezultata sa rezultatom dobijenim za dvofazni jednostrani ispravljač (tip M2) se vidi da je kod monofaznog mosnog ispravljača znatno bolje iskorišćenje transformatora.



HVALA NA PAŽNJI!!!

PITANJA????



VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NET

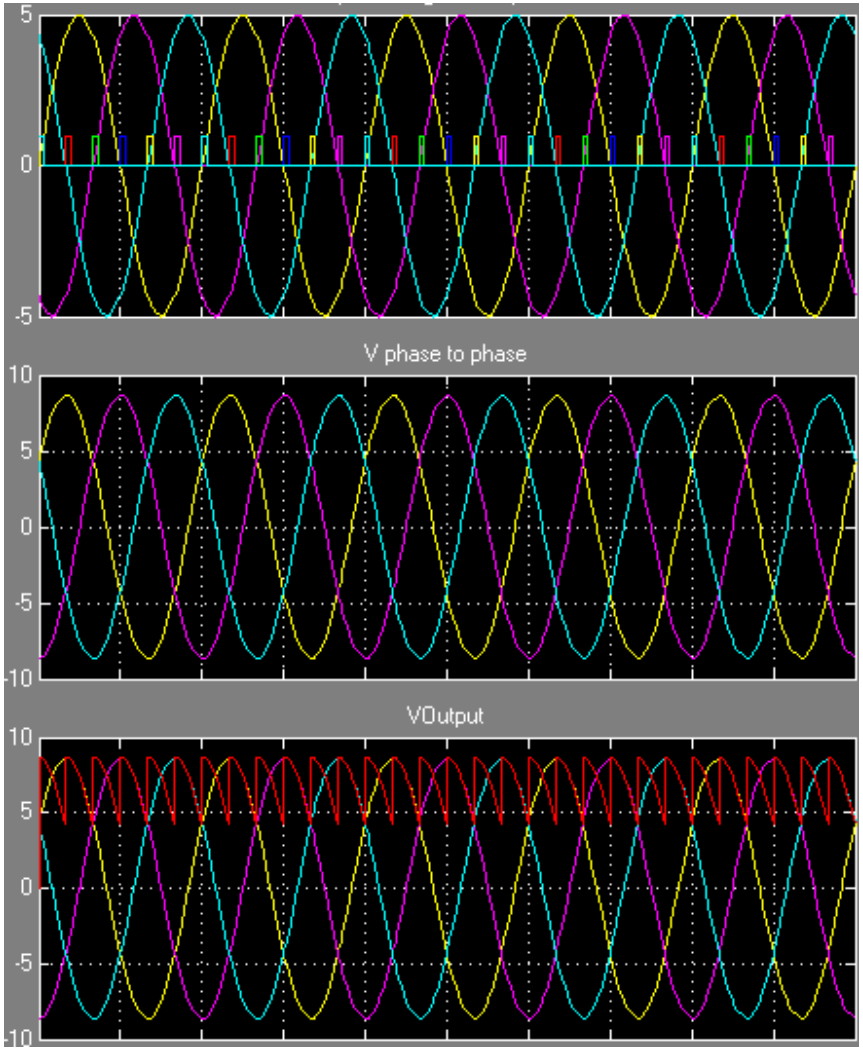
OSNOVNE STUDIJE

PREDMET : ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

TROFAZNI MOSNI ISPRAVLJAČI

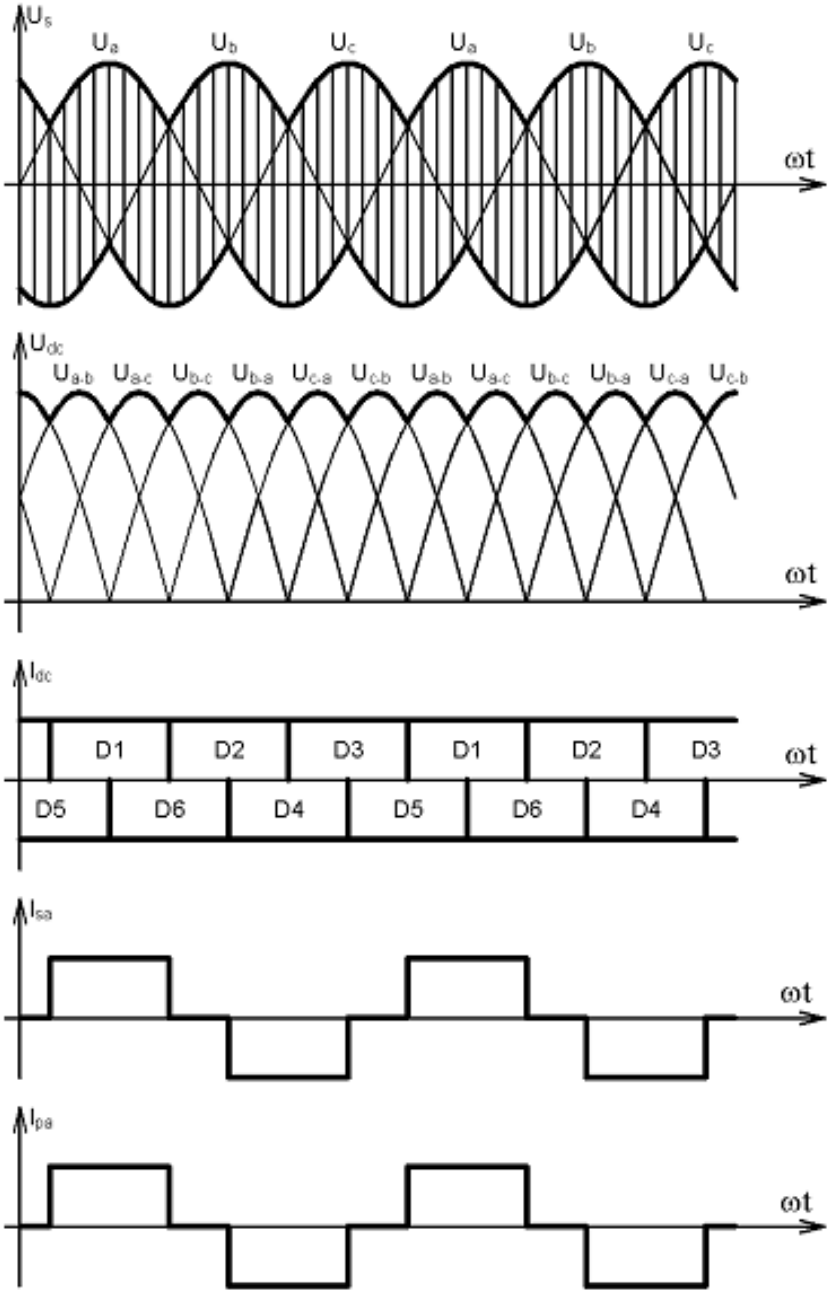
OPTEREĆENJE STRUJNI PONOR

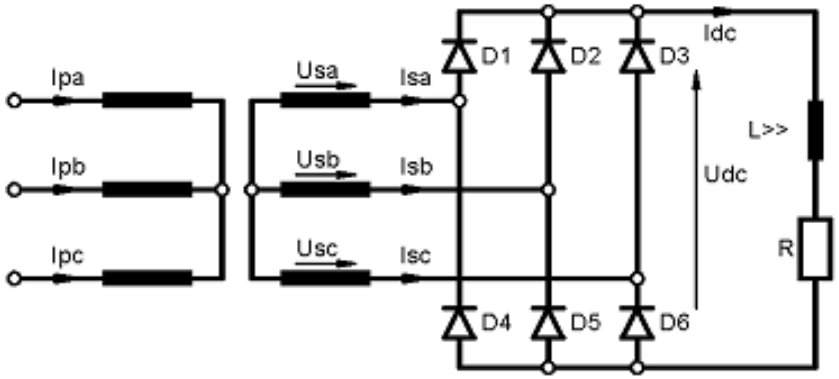
-KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI za diodni i punoupravljivi tiristorski ispravljač



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

Diodni Trofazni Neupravljivi Ispravljač



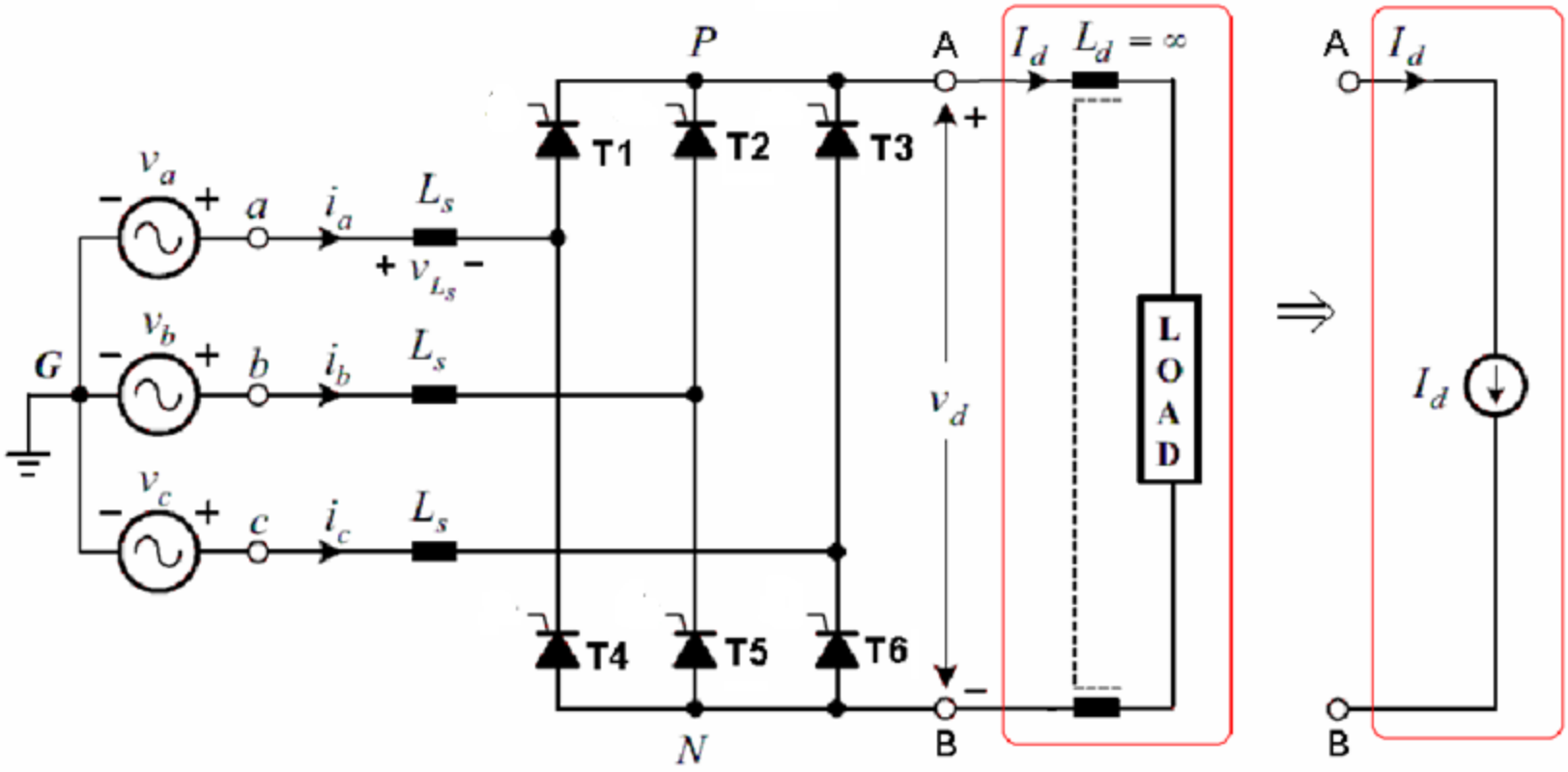


Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

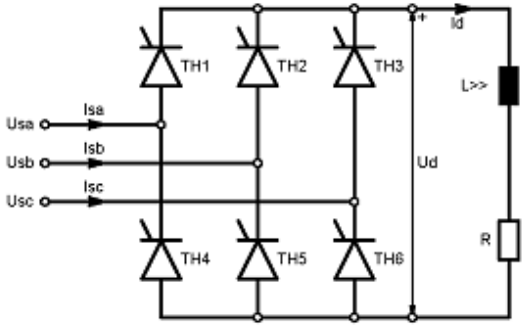
$U_{sr}=1.35U_s$

TROFAZNI MOSNI ISPRAVLJAČ (PUN MOST- 6 TIRISTORA)

TOPOLOGIJA

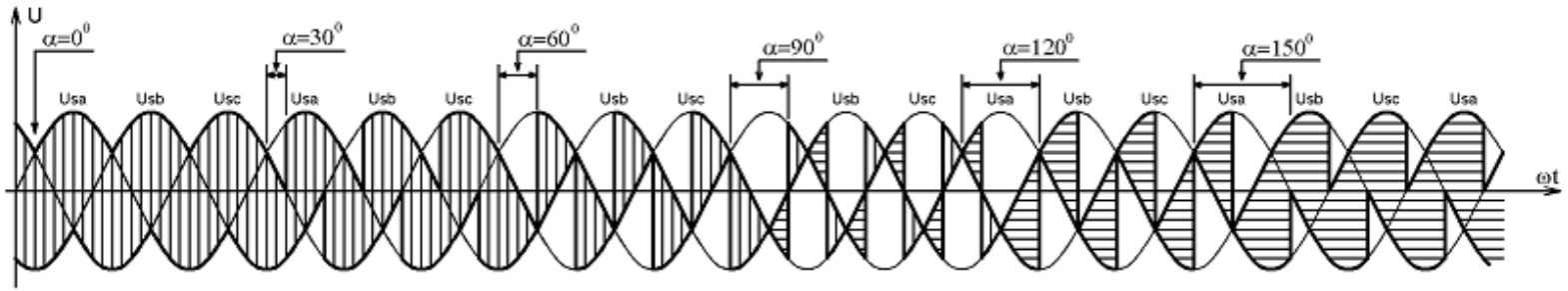


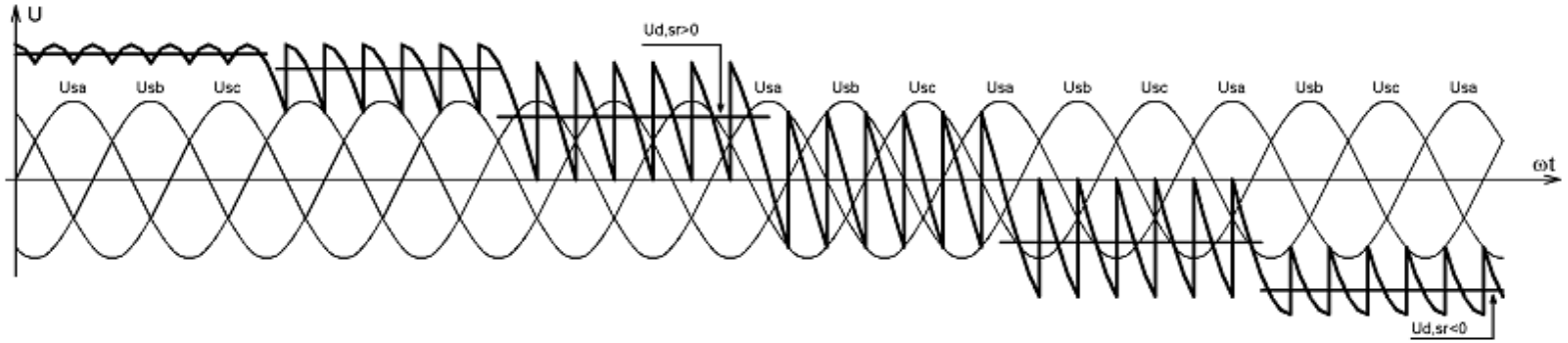
Tiristorski Trofazni Punoupravljivi Ispravljac

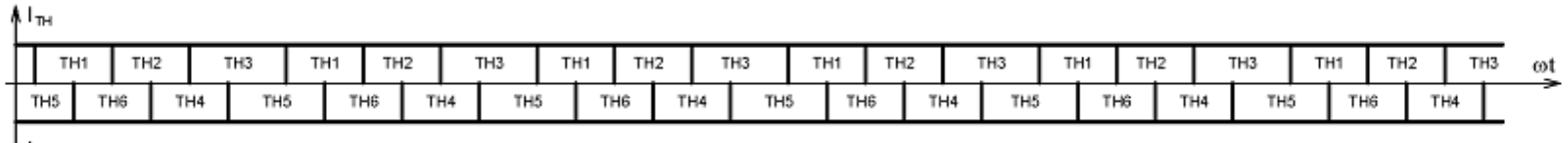


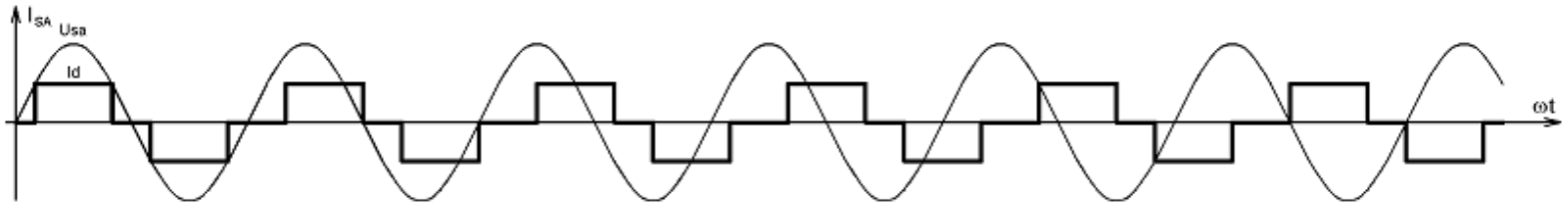
$$U_{SR} = U_{SR,0}\cos\alpha$$

$$U_{SR,0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_{S,f} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}\frac{U_S}{\sqrt{3}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_S = 1{,}35\cdot U_S$$

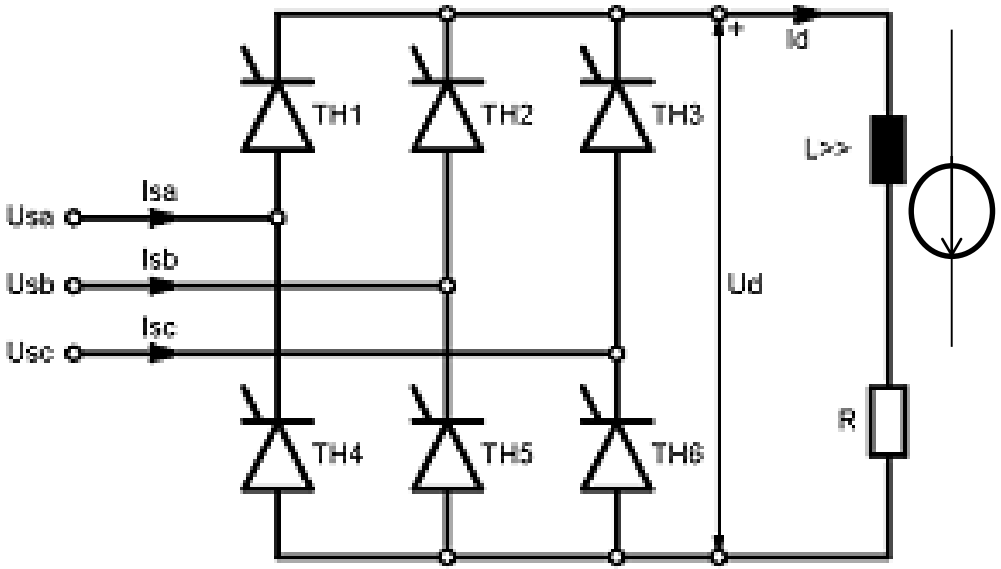








Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=0° (ugao vođenja tiristora 120°)

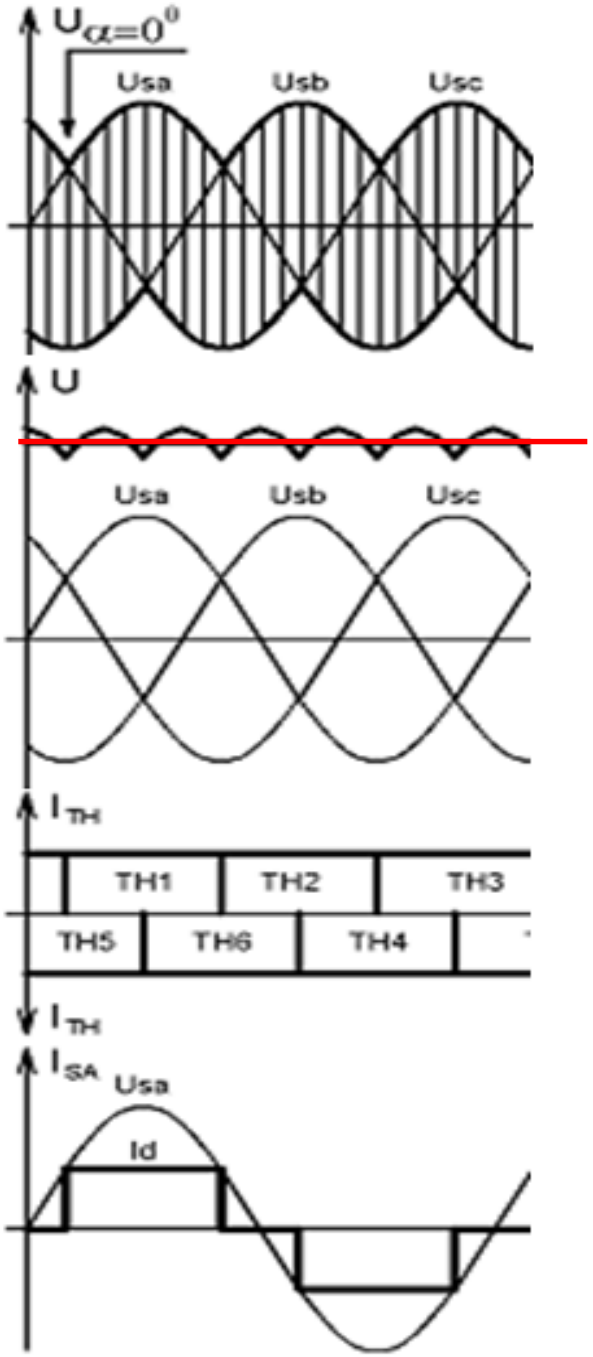


$$U_{SR} = U_{SR,0}\cos\alpha$$

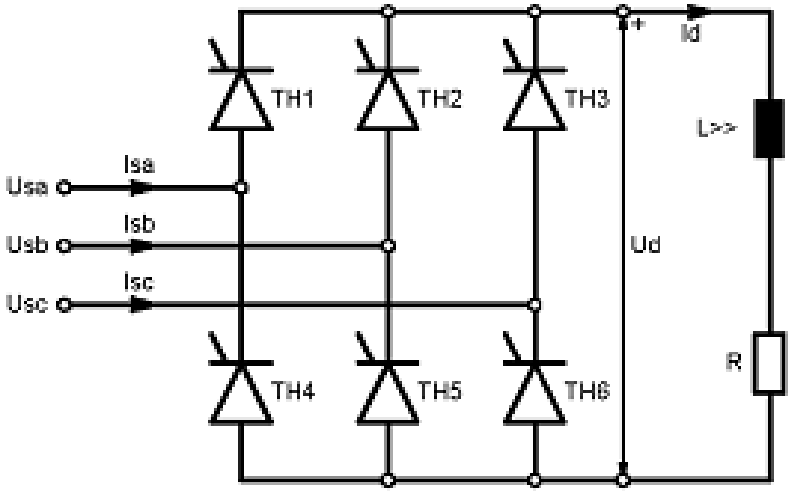
$$U_{SR,0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_{S,f} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}\frac{U_S}{\sqrt{3}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_S = 1{,}35\cdot U_S$$

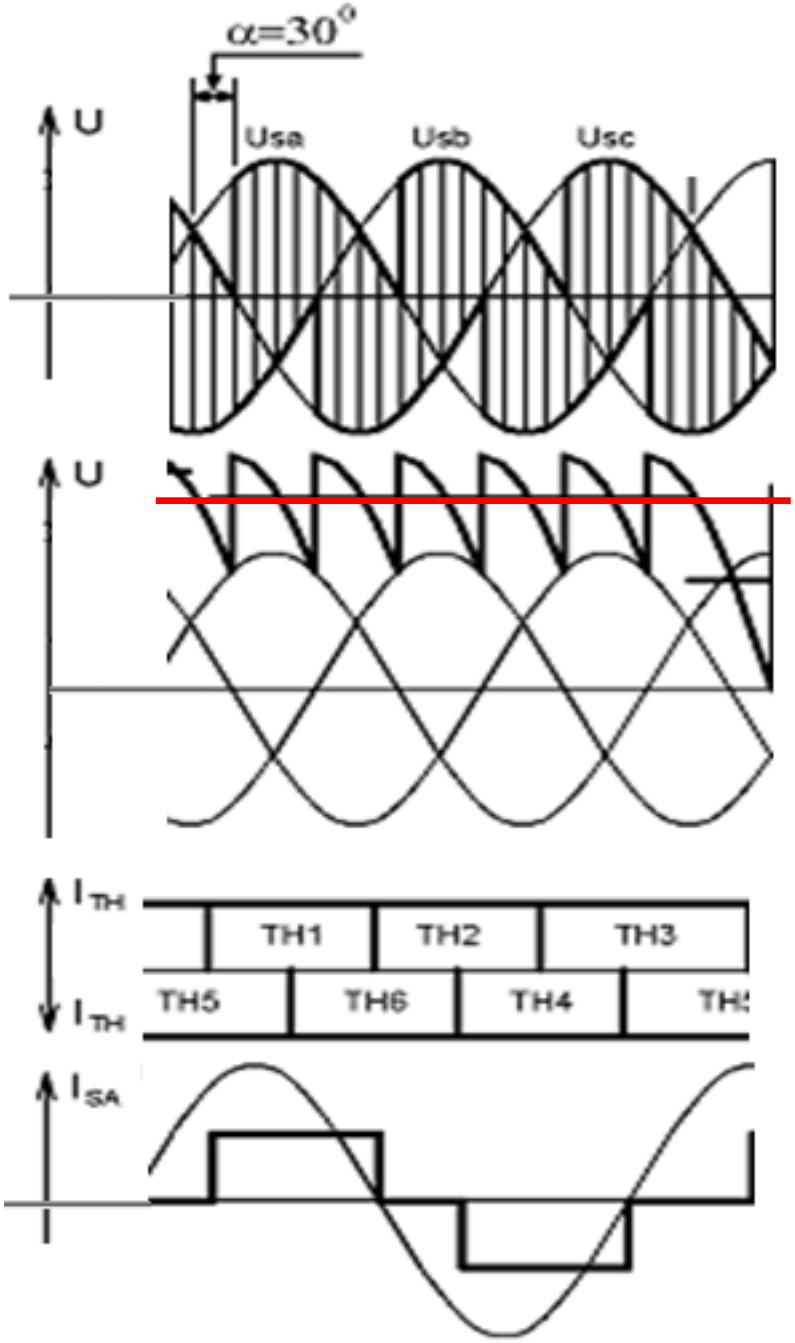
Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

U_{sr}=1.35U_s



Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=30° (ugao vođenja tiristora 120°)

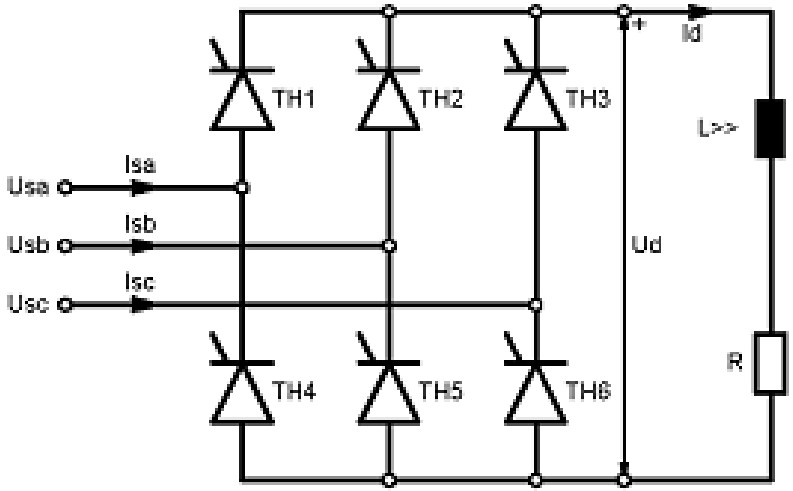


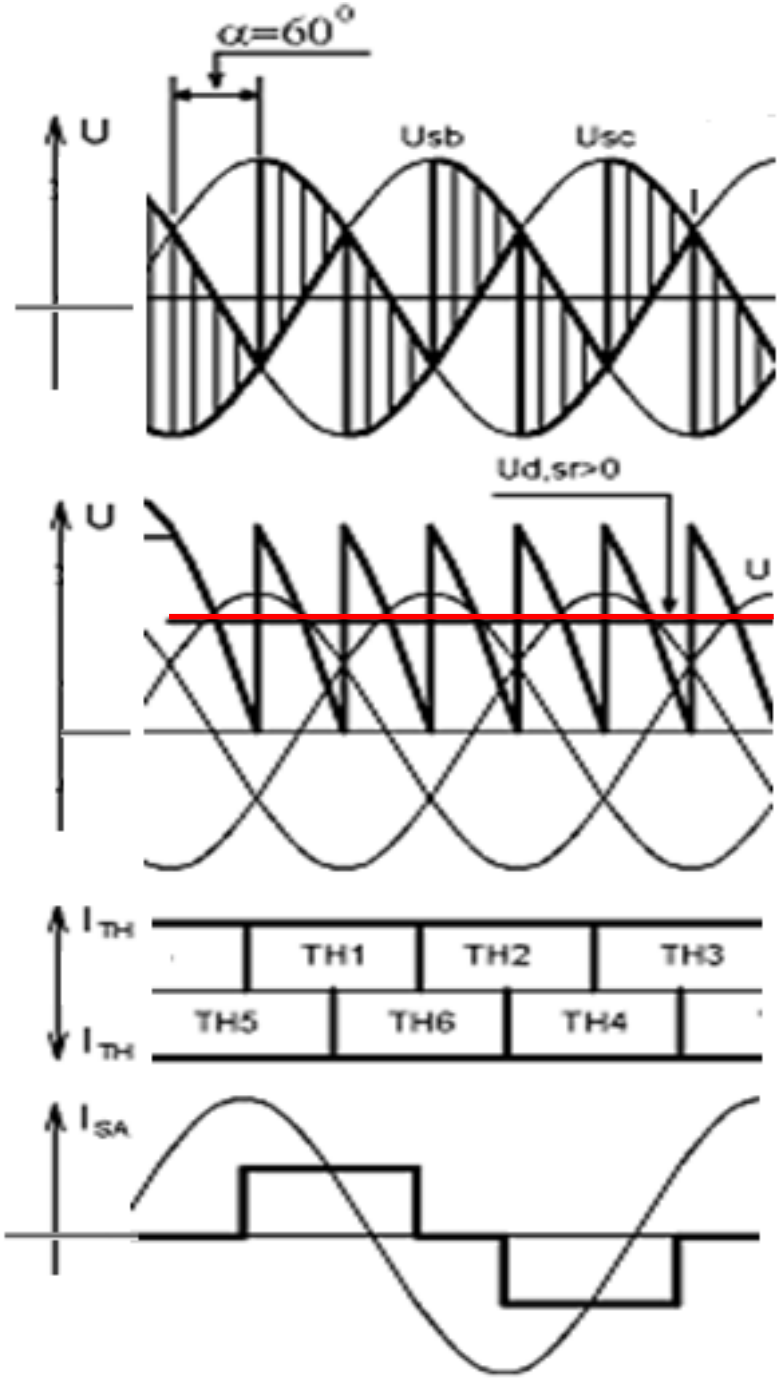


Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$$U_{sr} = 1.35\, U_s \cos 30° = 1.17 U_s$$

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=60° (ugao vođenja tiristora 120°)

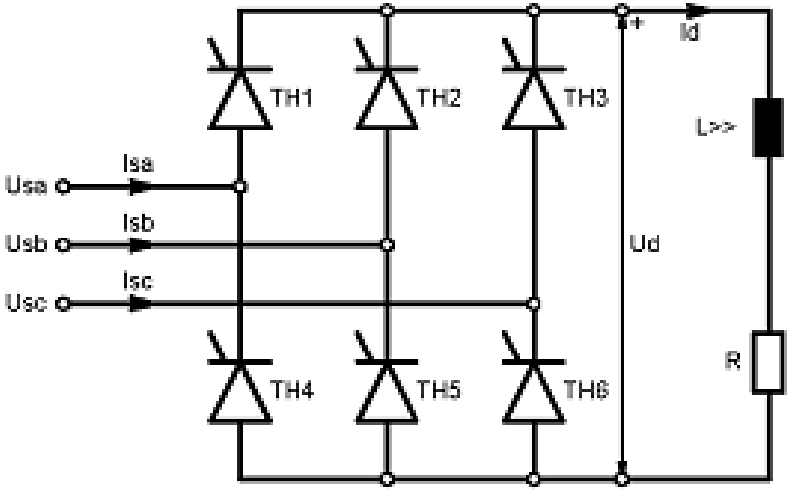


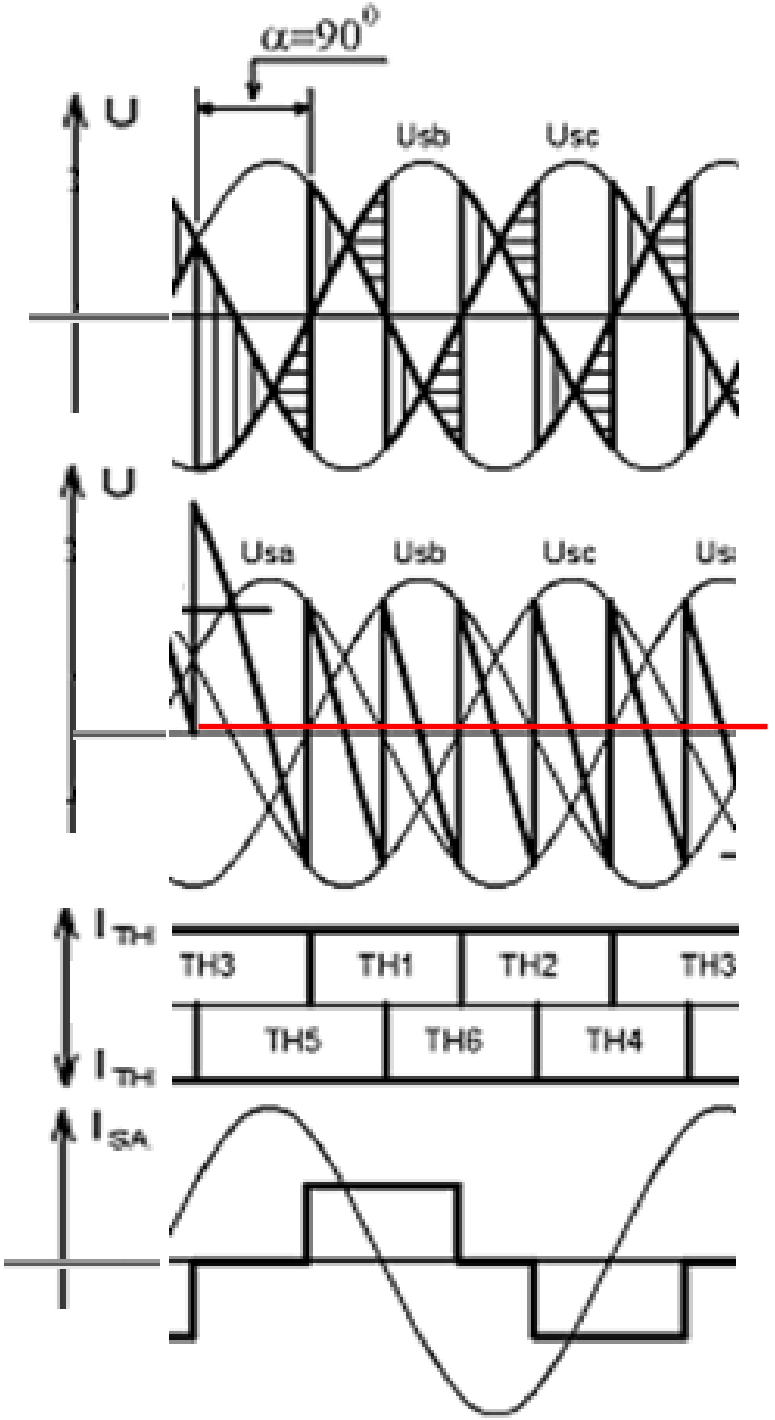


Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$$U_{sr} = 1.35\, U_s \cos 60° = 0.675\, U_s$$

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=90° (ugao vođenja tiristora 120°)

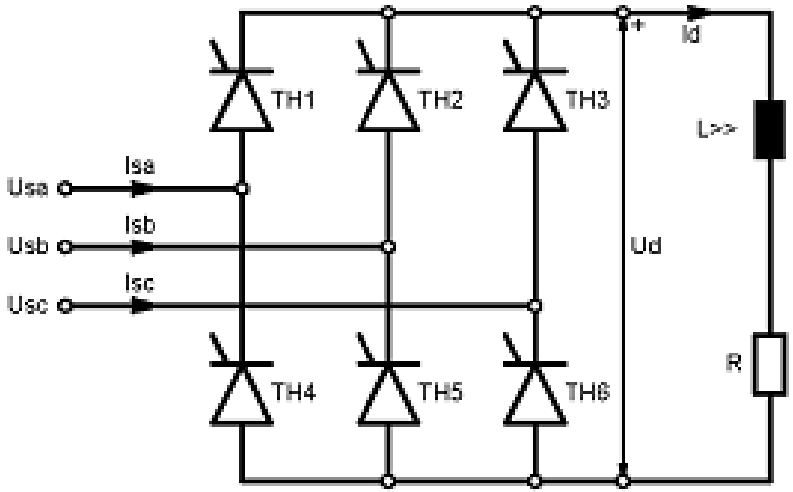


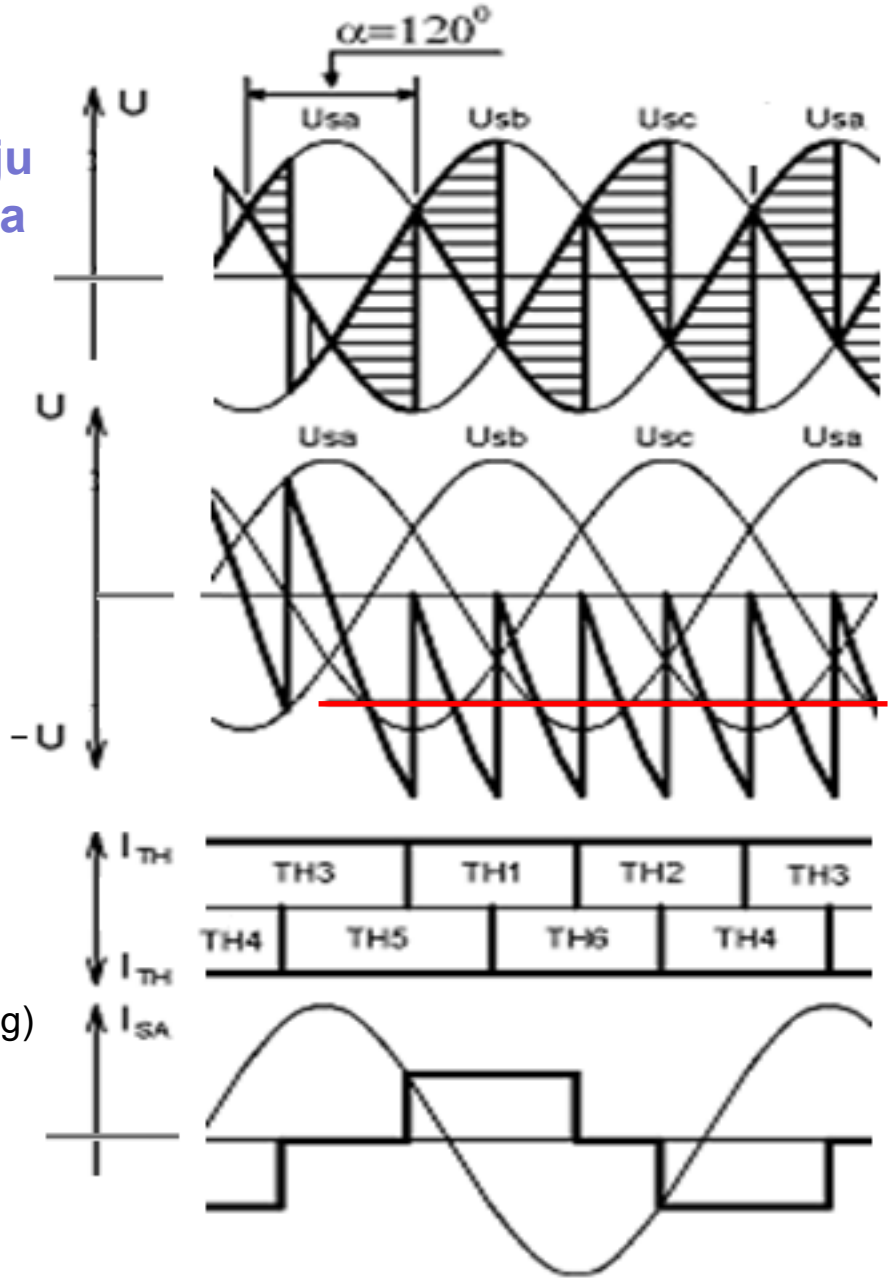


Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$$U_{sr} = 1.35\, U_s \cos 90° = 0$$

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=120° (ugao vođenja tiristora 120°)

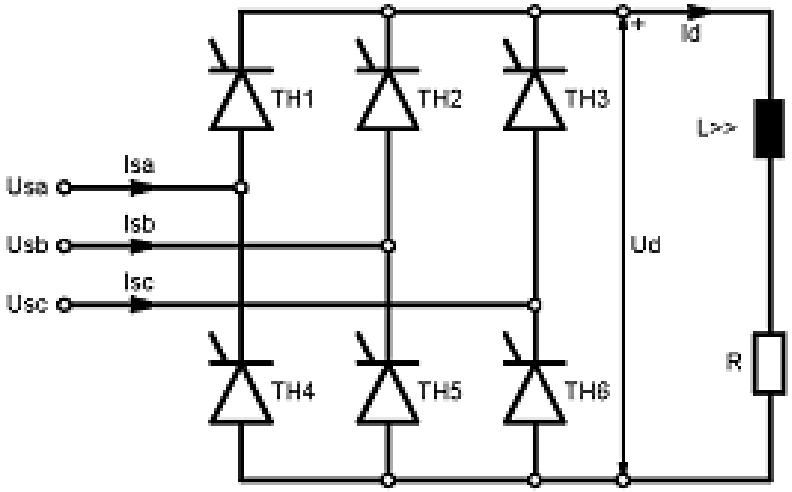


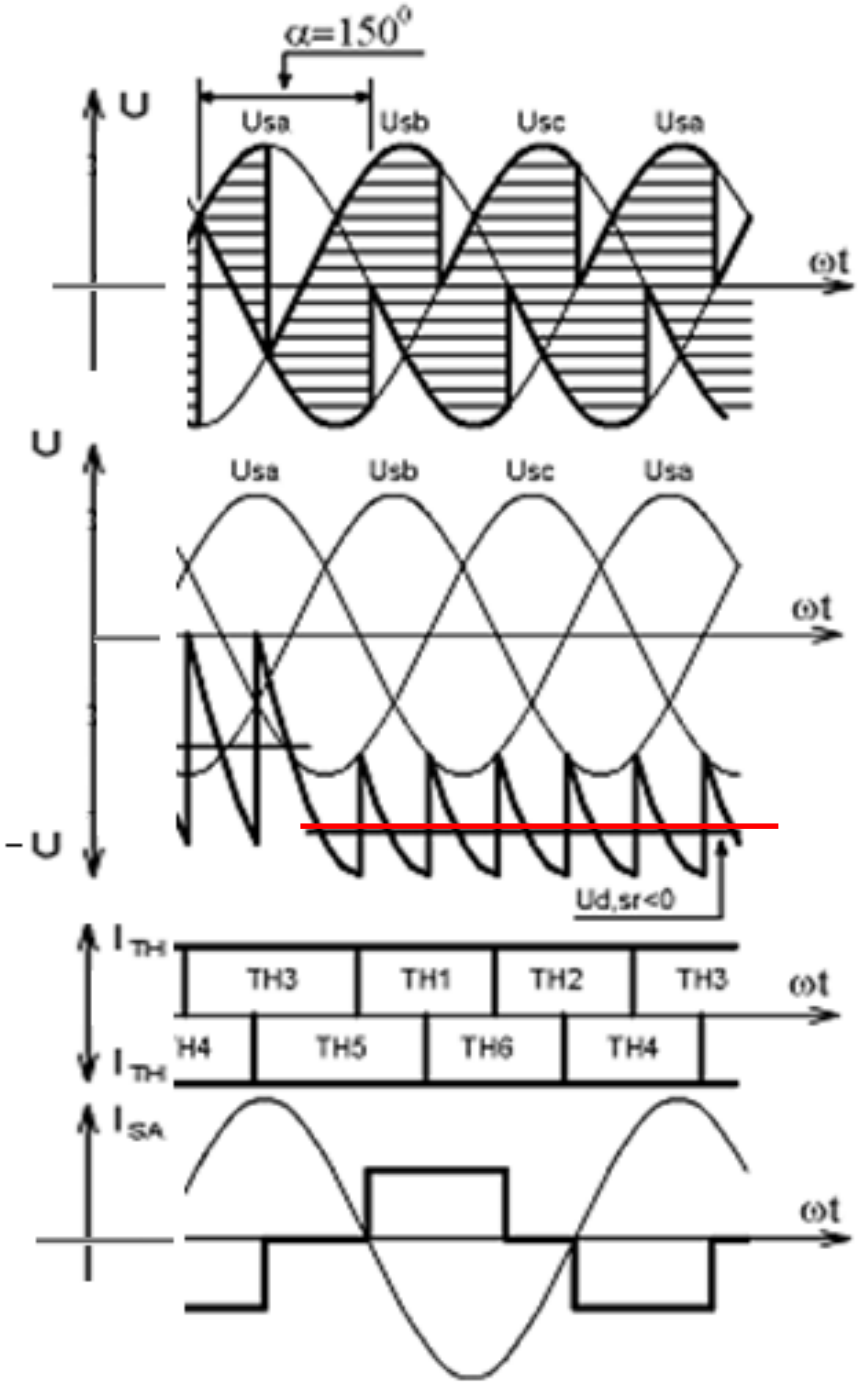


Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$U_{sr} = 1.35\, U_s \cos 120° = -0.675 U_s$

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=150° (ugao vođenja tiristora 120°)





Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$$U_{sr} = 1.35\, U_s \cos 150° = -0.1.17 U_s$$

Hvala na pažnji!!
Pitanja???

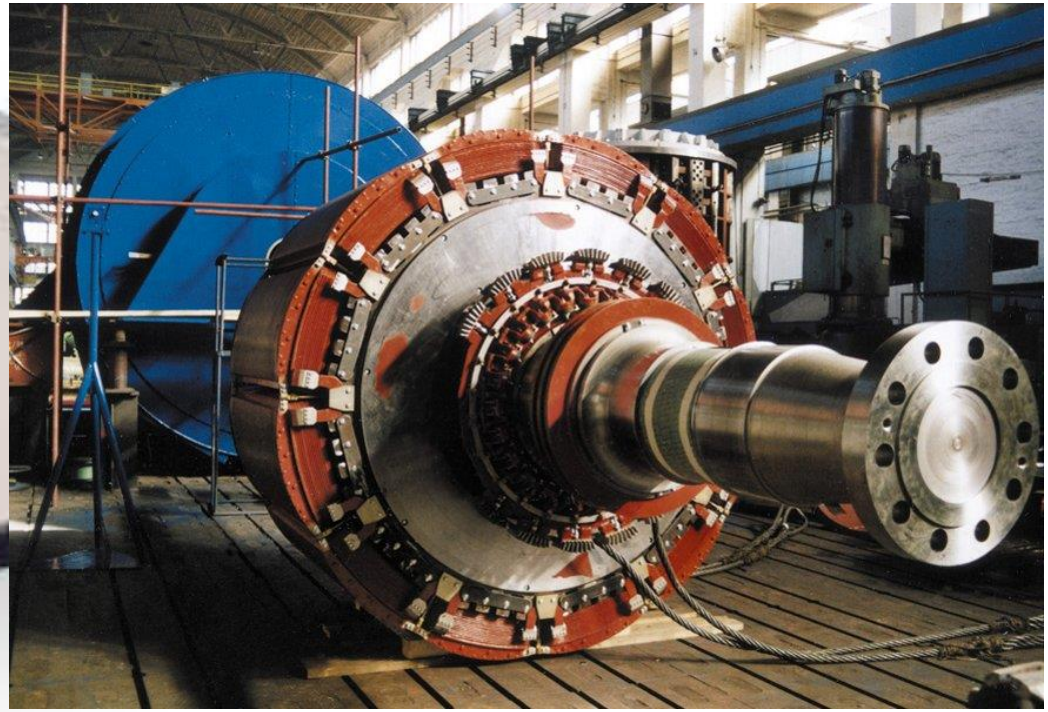
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NET

OSNOVNE STUDIJE 2020/2021

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

TIRISTORSKI REGULATORI POBUDE SINHRONIH GENERATORA



PREDMETNI PROFESOR: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

- U prezentaciji će biti predstavljeno jedno konkretno i prktično rešenje, odnosno primena trofaznog tiristorskog ispravljača 668Vdc/6950A (proizvodnje Institut „N.Tesla“), koji se koristi za regulaciju pobude sinhronog genaratora bloka B1-TENT snage S=727 MVA
- Analizirani su talasni oblici za karakterostične režime rada
- Opisani su postupci početnog pobuđivanja i brzog razbuđivanja sinhronog generatora
- Dat je prikaz kola prenaponske zaštite

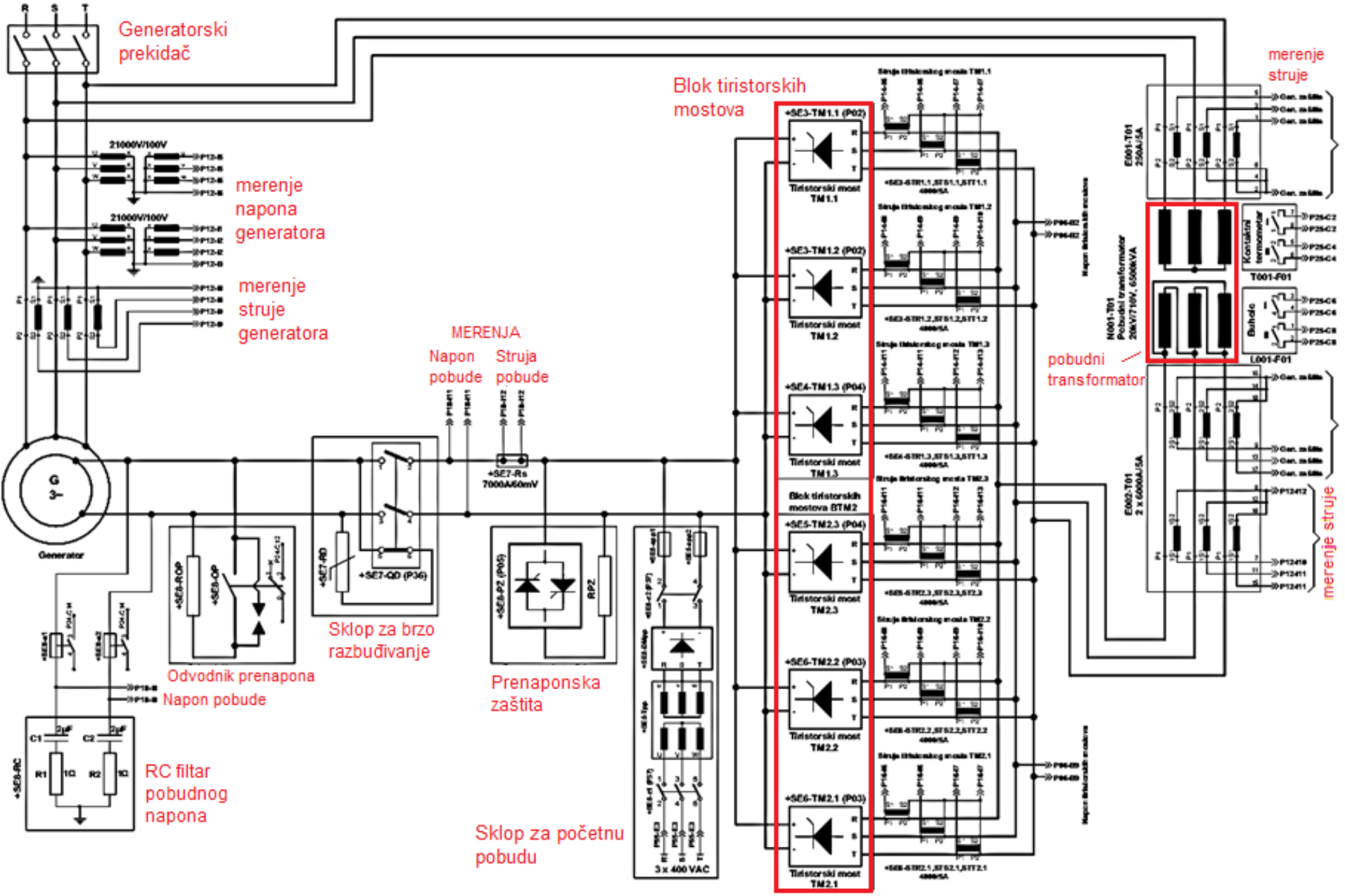
Sinhroni generator bloka B1 u TE "Nikola Tesla B" ima sledeće osnovne parametre:

· Proizvođač:	**BBC**
· Tip:	WT 23S-106AF3
· **Nominalna prividna snaga:**	**727.5 MVA**
· **Nominalna aktivna snaga:**	**618 MW**
· Nominalni faktor snage:	0,85
· Nominalni napon statora:	21 kV
· **Nominalna struja statora:**	**20 kA**
· Frekvencija:	50 Hz
· Broj obrtaja:	3000 obr/min

Osnovni parametri sistema pobude su sledeći:

• Nominalni napon napajanja tiristorskih mostova:	3x710 V
• Nominalna frekvencija napona napajanja tiristorskih mostova	50 Hz
• Maksimalno dozvoljena trajna struja:	6950 A
• Napon pri MAX dozvoljenoj trajnoj struji:	668 V
• Plafonska struja:	9400 A
• Dozvoljeno vreme trajanja plafonske struje:	10 s
• Plafonski napon pri nominalnom naponu napajanja:	958.5 V
• Ispitni napon energetske opreme:	3,5 kV
• Vreme odziva:	<0.1 s
• Opseg podešenja napona generatora:	90 % - 110 %
• Naponi pomoćnog napajanja iz jednosmernog razvoda elektrane:	24 V, 220 V
• Napon pomoćnog napajanja iz invertora:	220 V

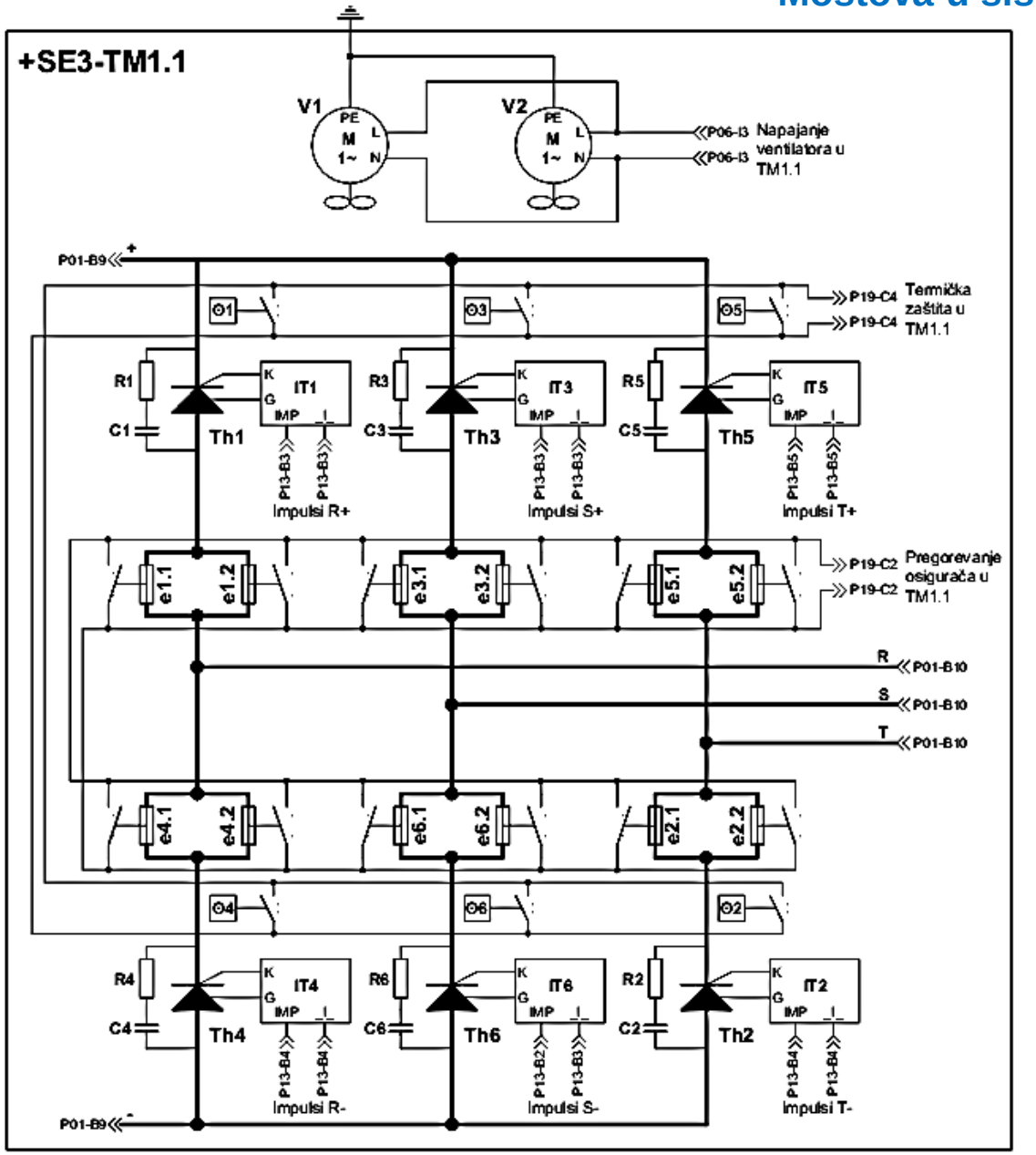
•Napon pomoćnog napajanja iz naizmeničnog razvoda elektrane: 3x380(220) V



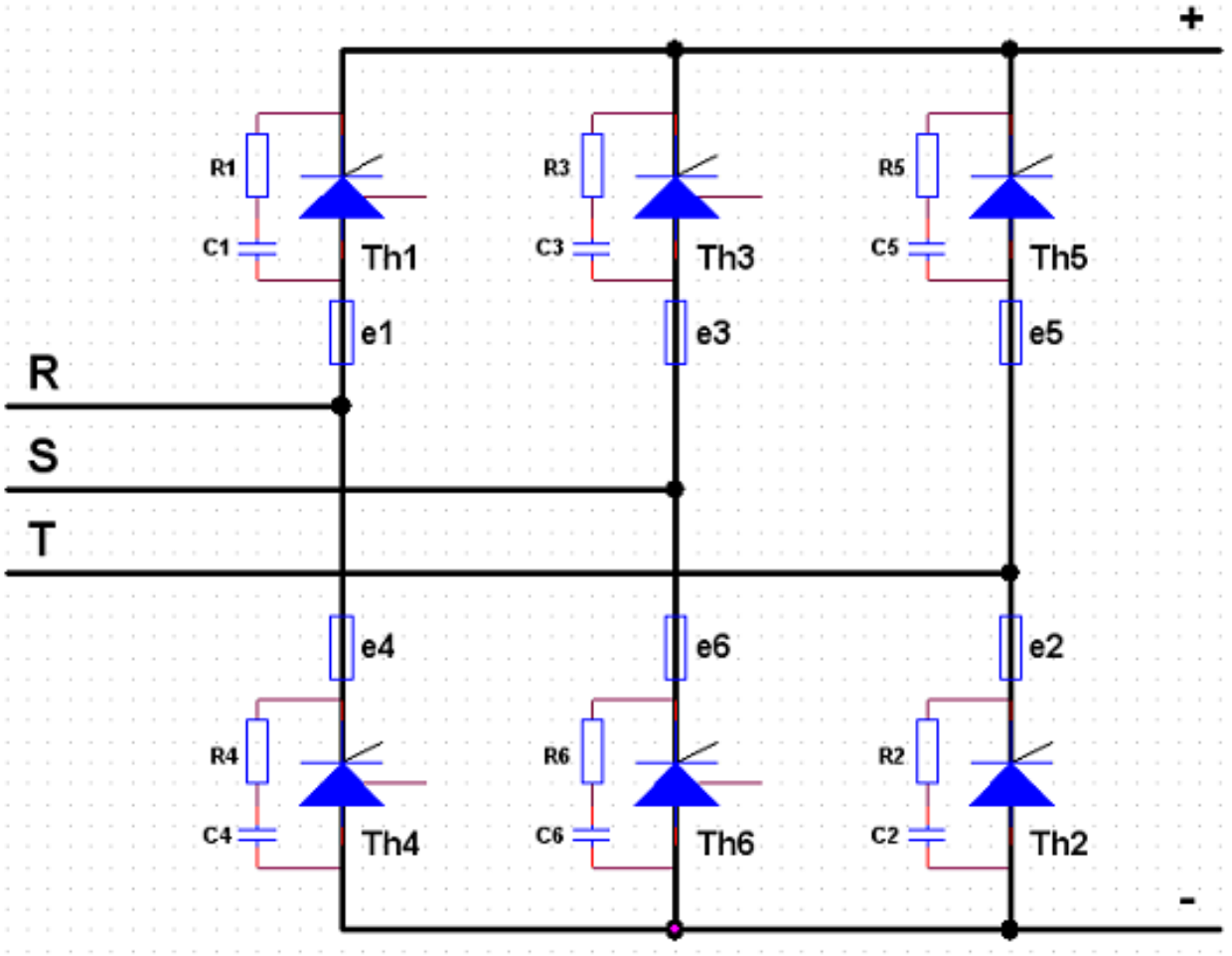
PRINCIPSKA ŠEMA SISTEMA REGULACIJE POBUDE

Tiristorski most TM1.1

Prikaz jednog od šest tiristorskih Mostova u sistemu regulacije pobude

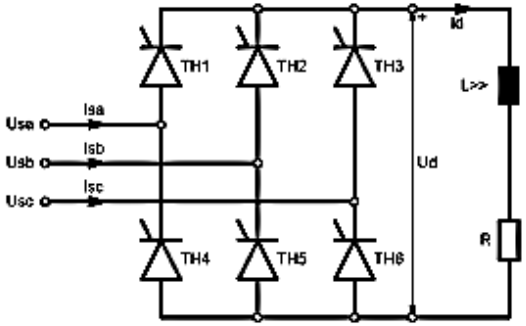


AC/DC tiristorski pretvarač- tiristorski trofazni punoupravljivi ispravljač



Tiristori su za struju /napon 3000A/2800V

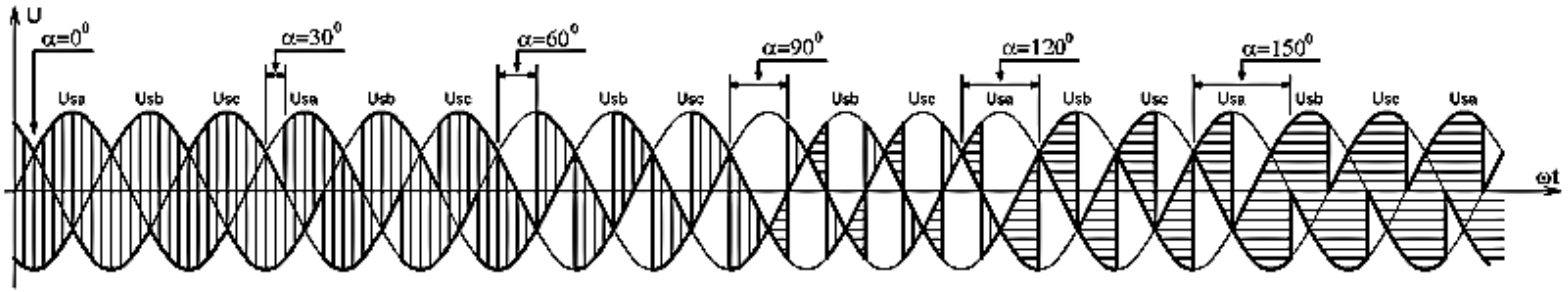
Tiristorski Trofazni Punoupravljivi Ispravljac

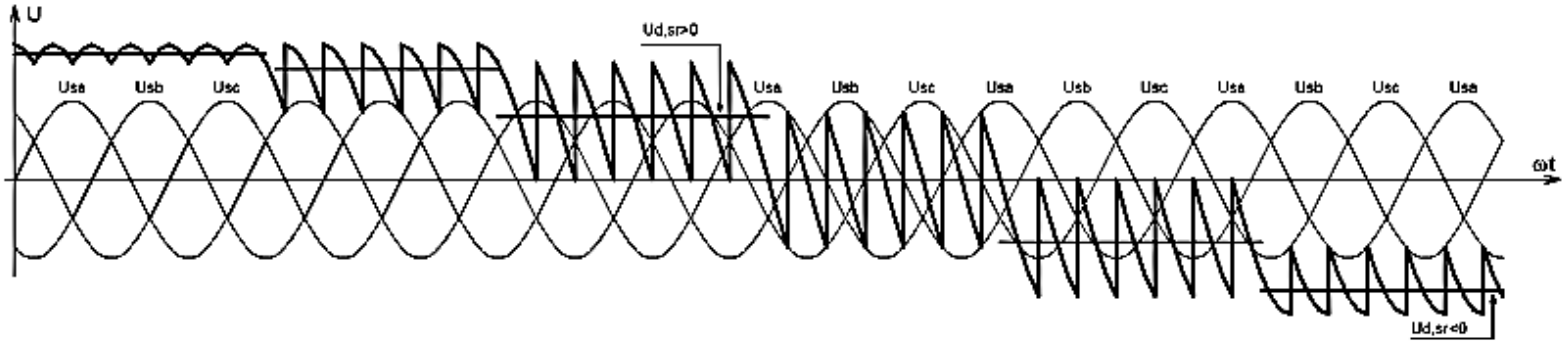


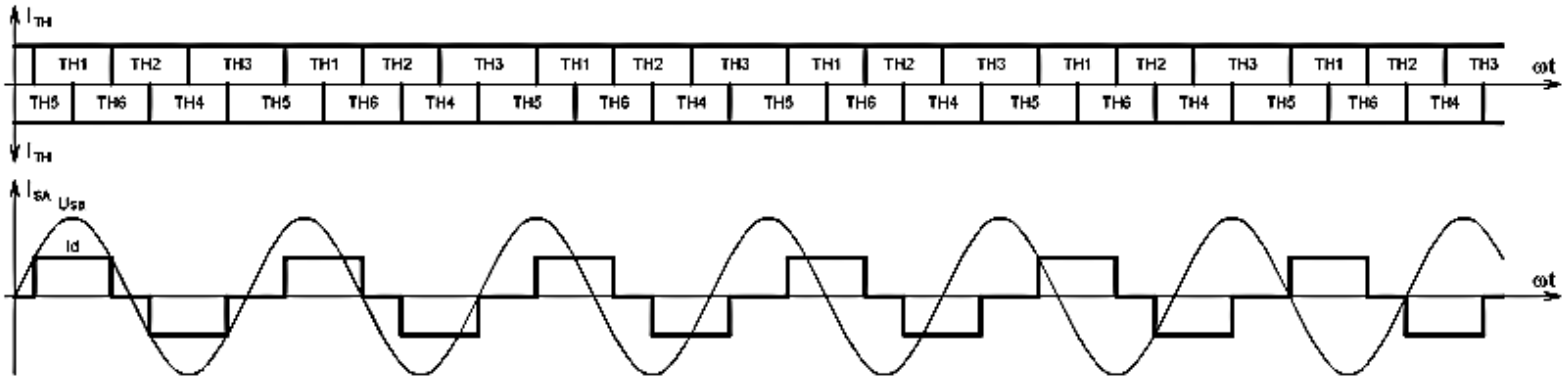
Srednja vrednost izlaznog napona

$$U_{SR} = U_{SR,0}\cos\alpha$$

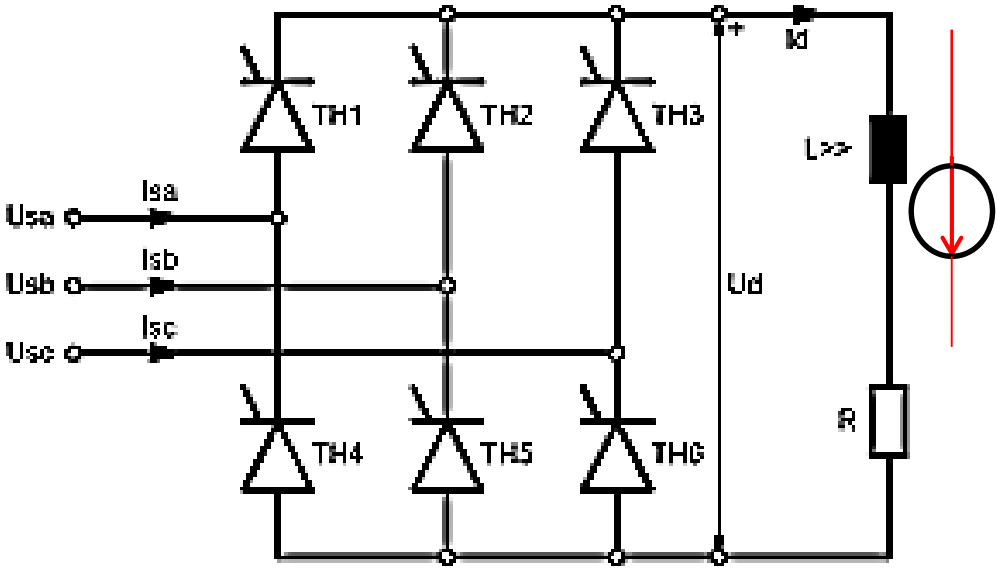
$$U_{SR,0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_{S,f} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}\frac{U_S}{\sqrt{3}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_S = 1{,}35\cdot U_S$$



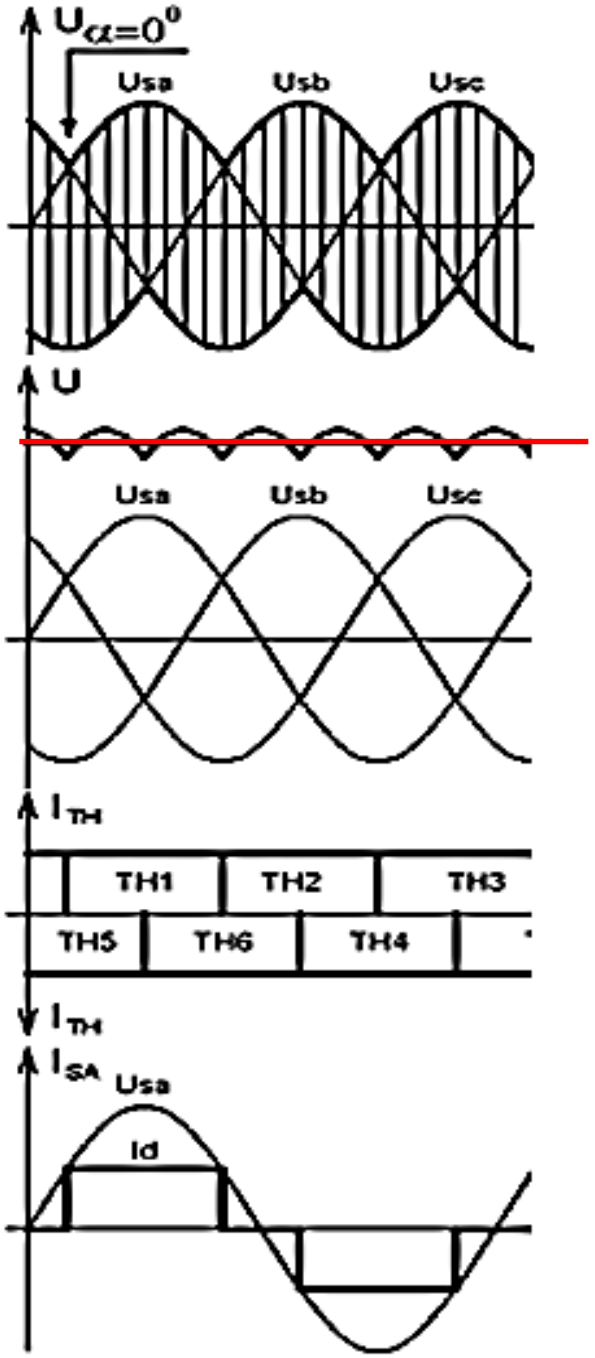




Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=0° (ugao vođenja tiristora 120°)



Iopt



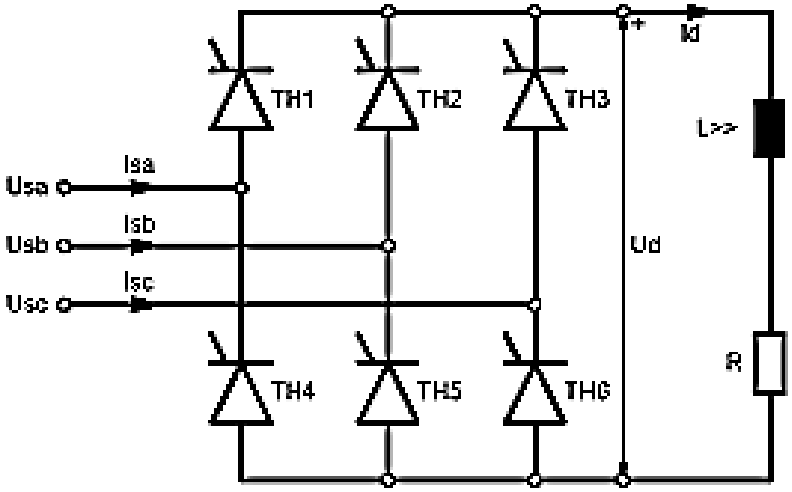
$$U_{SR} = U_{SR,0}\cos\alpha$$

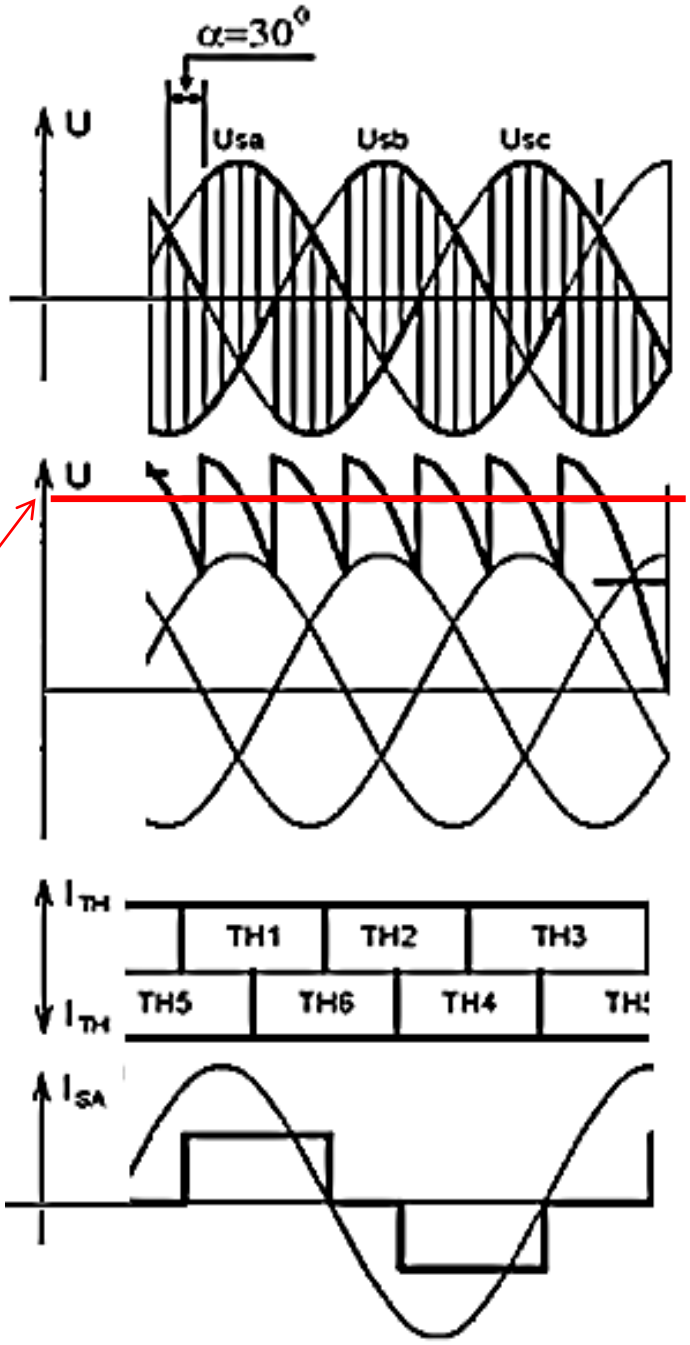
$$U_{SR,0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}U_{S,f} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}\frac{U_S}{\sqrt{3}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_S = 1{,}35\cdot U_S$$

U_S-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$U_{sr} = 1.35\cdot U_s$

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=30° (ugao vođenja tiristora 120°)

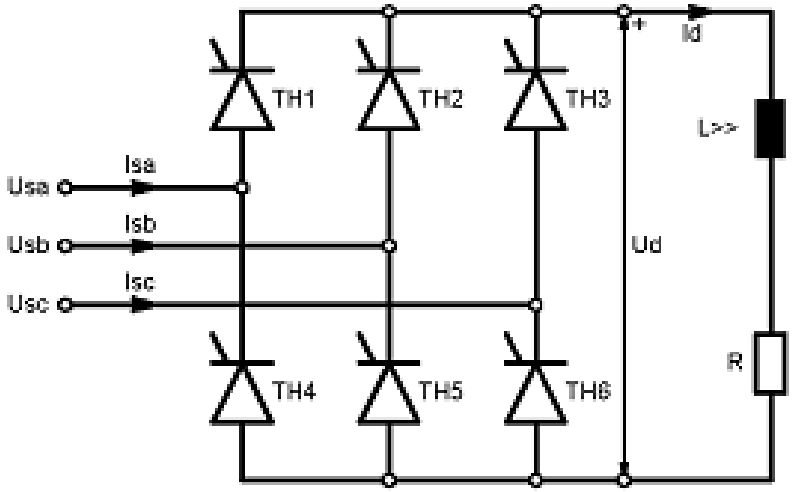


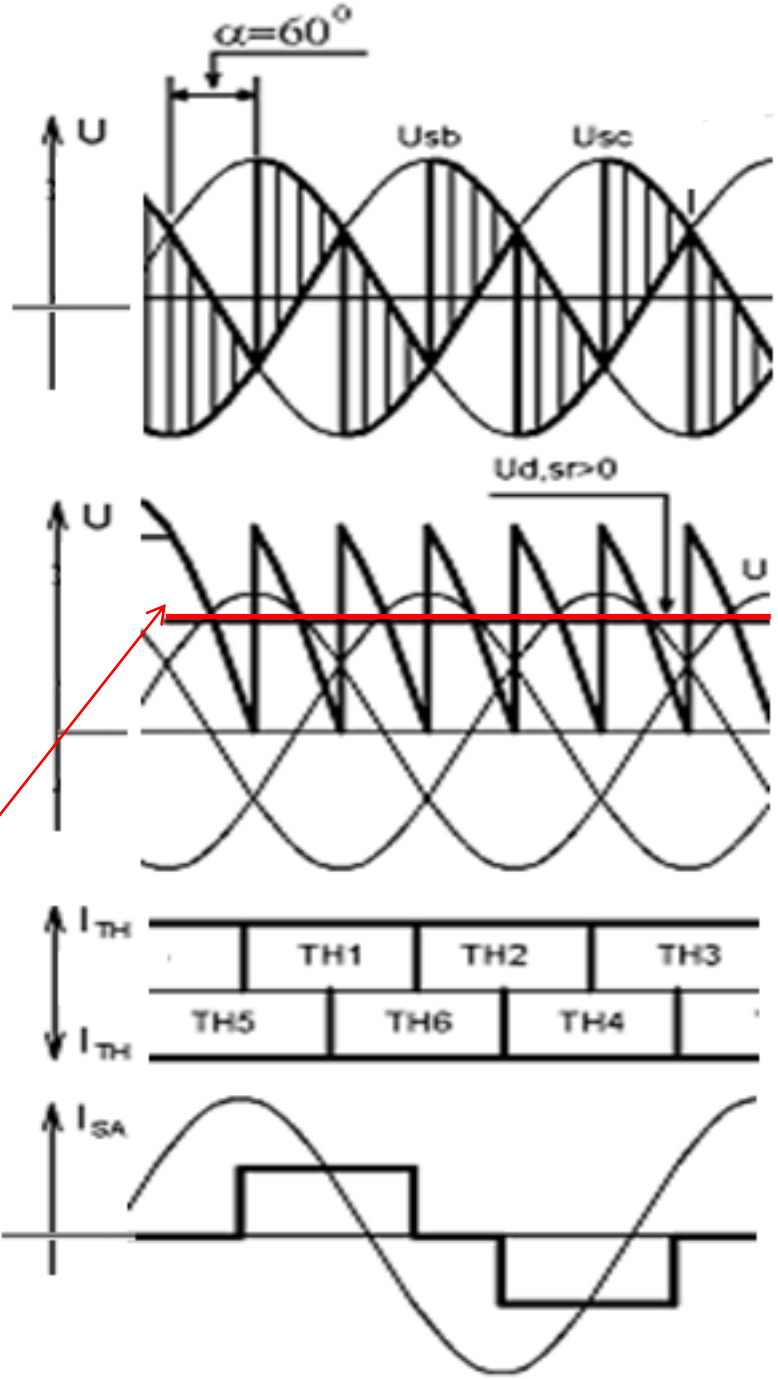


Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$$U_{sr} = 1.35\,U_s \cos 30° = 1.17 U_s$$

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=60° (ugao vođenja tiristora 120°)

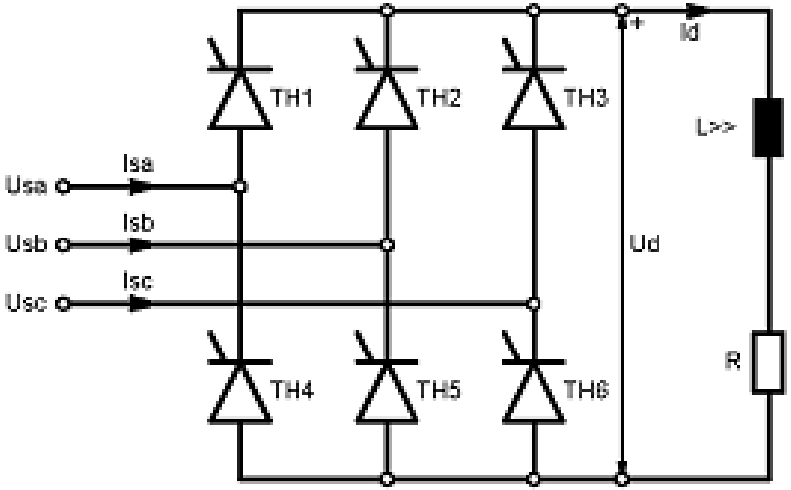




U_s-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

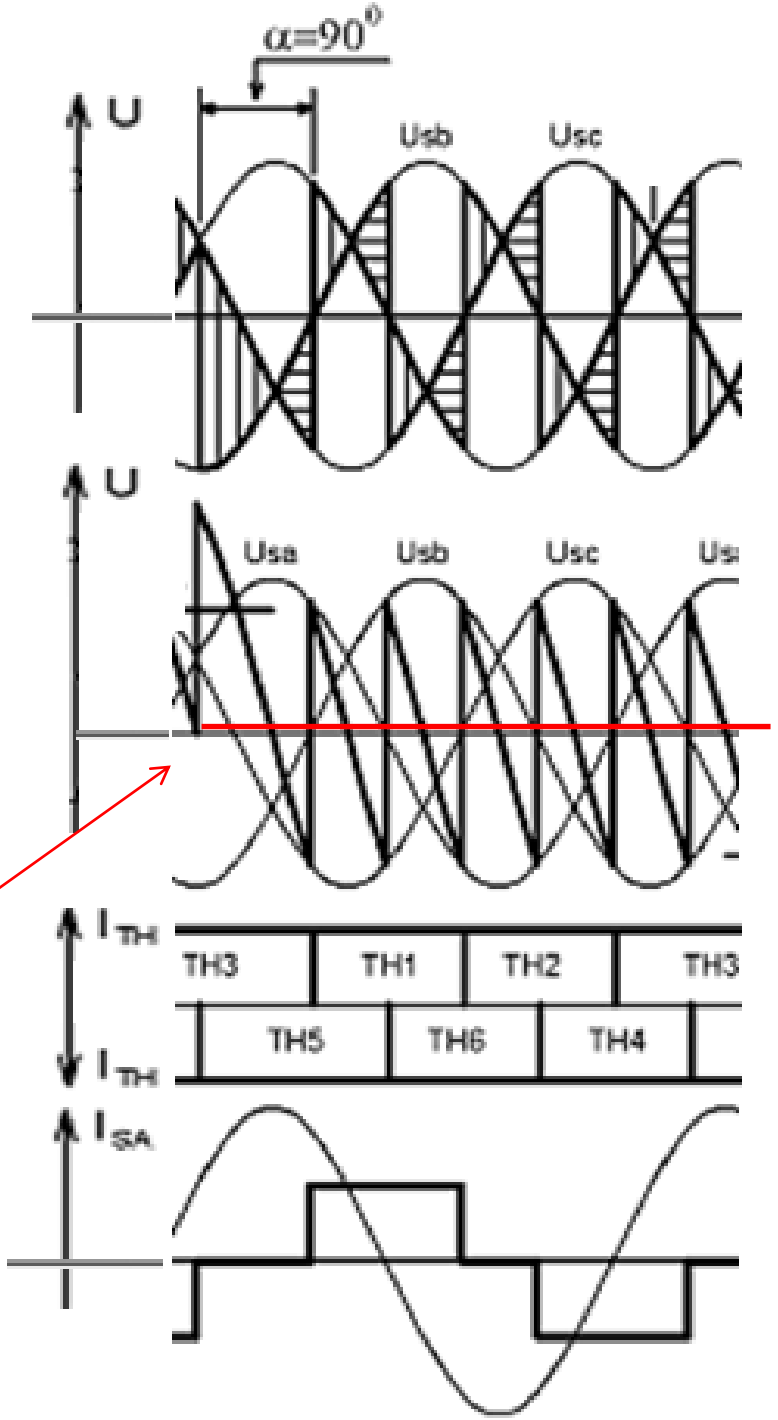
$U_{sr} = 1.35\ U_s \cos 60° = 0.675\ U_s$

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=90° (ugao vođenja tiristora 120°)

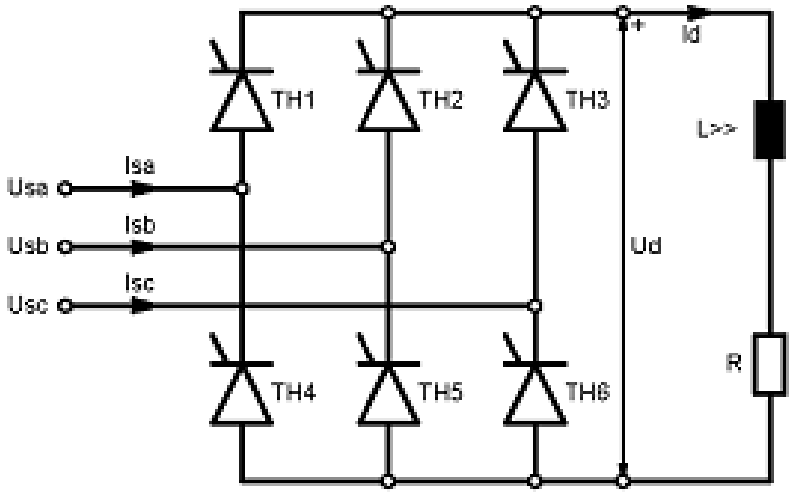


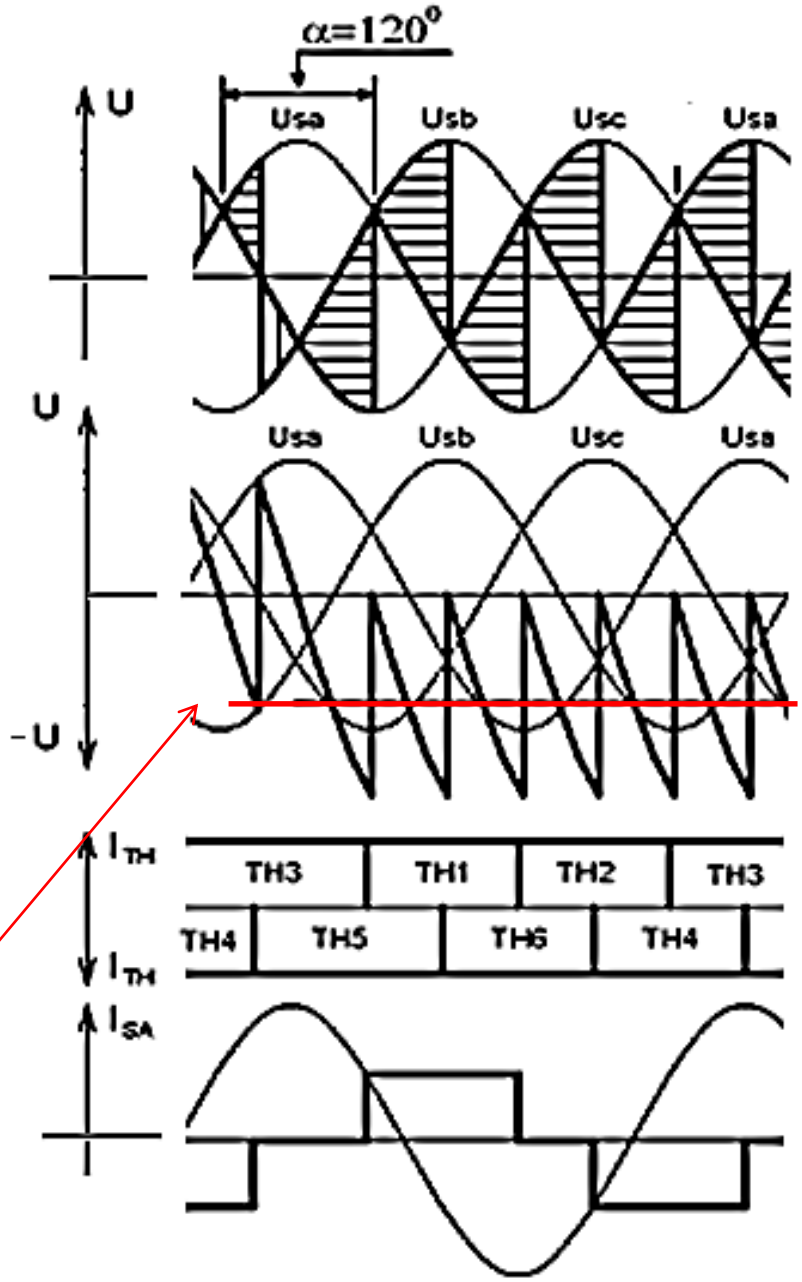
Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$U_{sr} = 1.35\ U_s \cos 90° = 0$



Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=120° (ugao vođenja tiristora 120°)

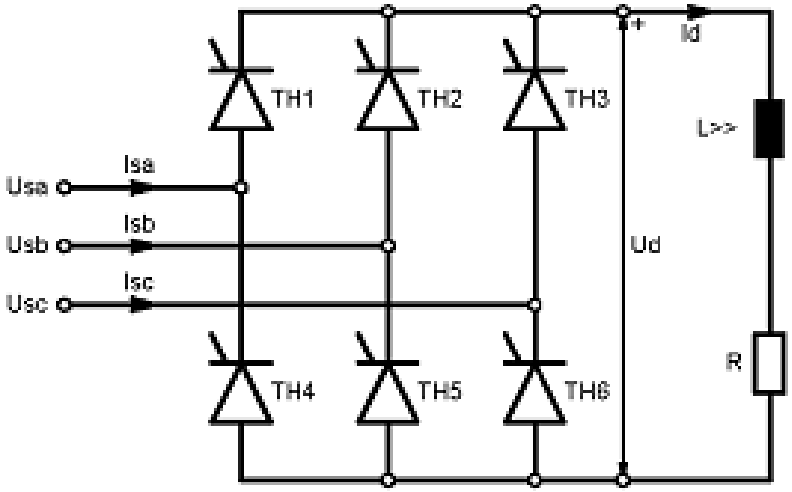


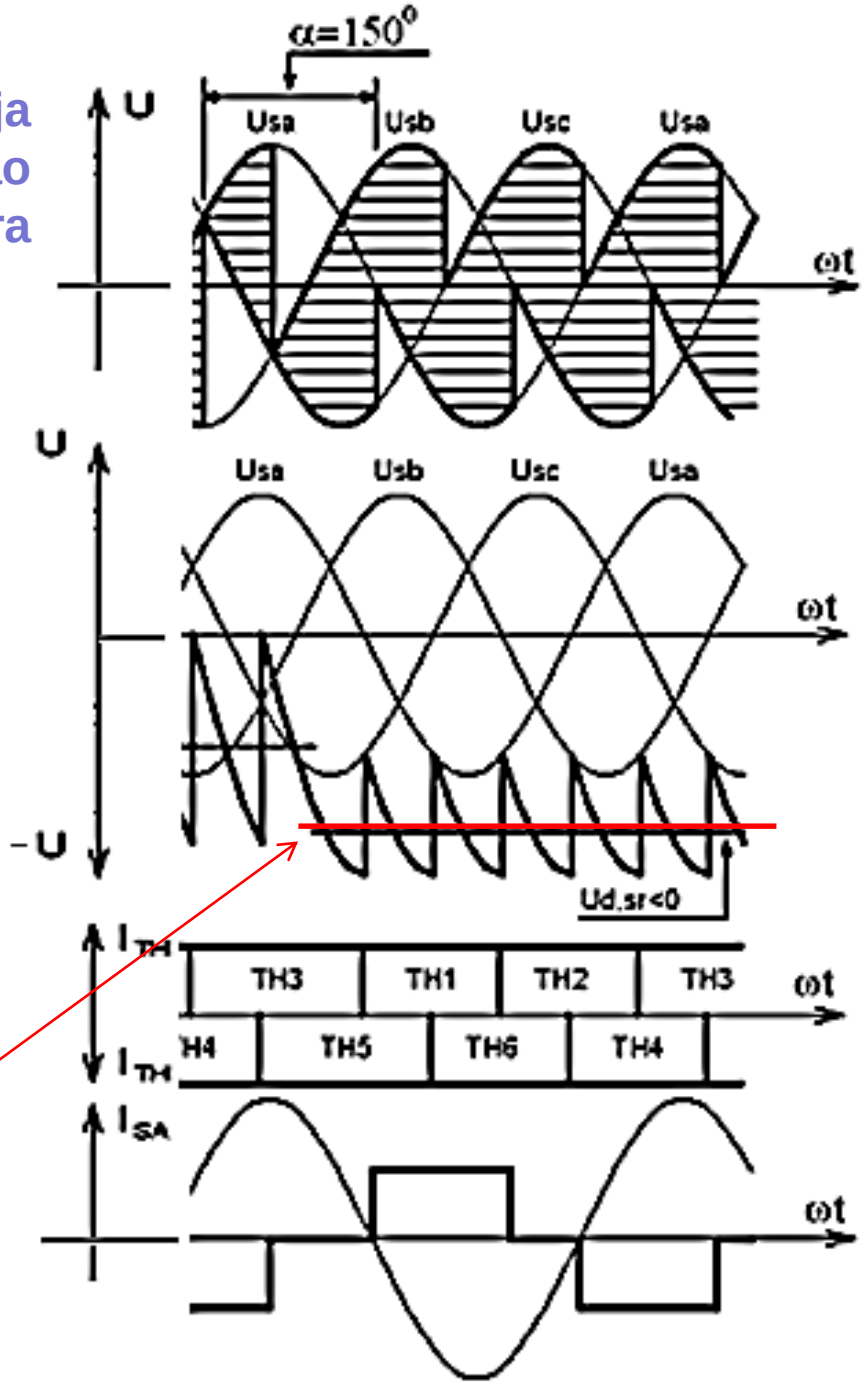


Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

U_{sr} =1.35 U_s cos 120° = - 0.675U_s

Karakteristični talasni oblici i srednja vrednost napona na opterećenju ugao upravljanja α=150° (ugao vođenja tiristora 120°)





Us-efektivna vrednost mrežnog linijskog (međufaznog) napona

$U_{sr} = 1.35\ U_s \cos 150° = -\ 0.1.17 U_s$

Izlazni napon ispravljača uzimajući u obzir komutacione efekte

$$U_{AVout} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_s \cos\alpha - \frac{3X_k}{\pi} I$$

Trofazni punoupravljivi ispravljač; Us-linijski napon

$$U_{AVout} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \cos\alpha - \frac{X_k}{\pi} I$$

E- efektivna vrednost faznog napona

$X_k=\omega L_k$ -reaktansa rasipanja

REŽIMI RADA TIRISTORSKIH MOSTOVA

•Tiristorski mostovi mogu da rade u ispravljačkom i invertorskom režimu.

•U ispravljačkom režimu ($\alpha<90°$) i napon i struja na izlazu iz tiristorskog mosta su pozitivni, dok je u invertorskom režimu napon negativan, a struja pozitivna.

• Za razliku od ispravljačkog, invertorski režim ($\alpha>90°$) ne može biti trajan.

•Tiristorski most može biti u ovom režimu samo dok struja mosta ne padne na nulu.

• Tiristorski upravljački sklopovi omogućavaju brz prelazak sa jednog na drugi blok tiristorskih mostova što pruža mogućnost redundanse.

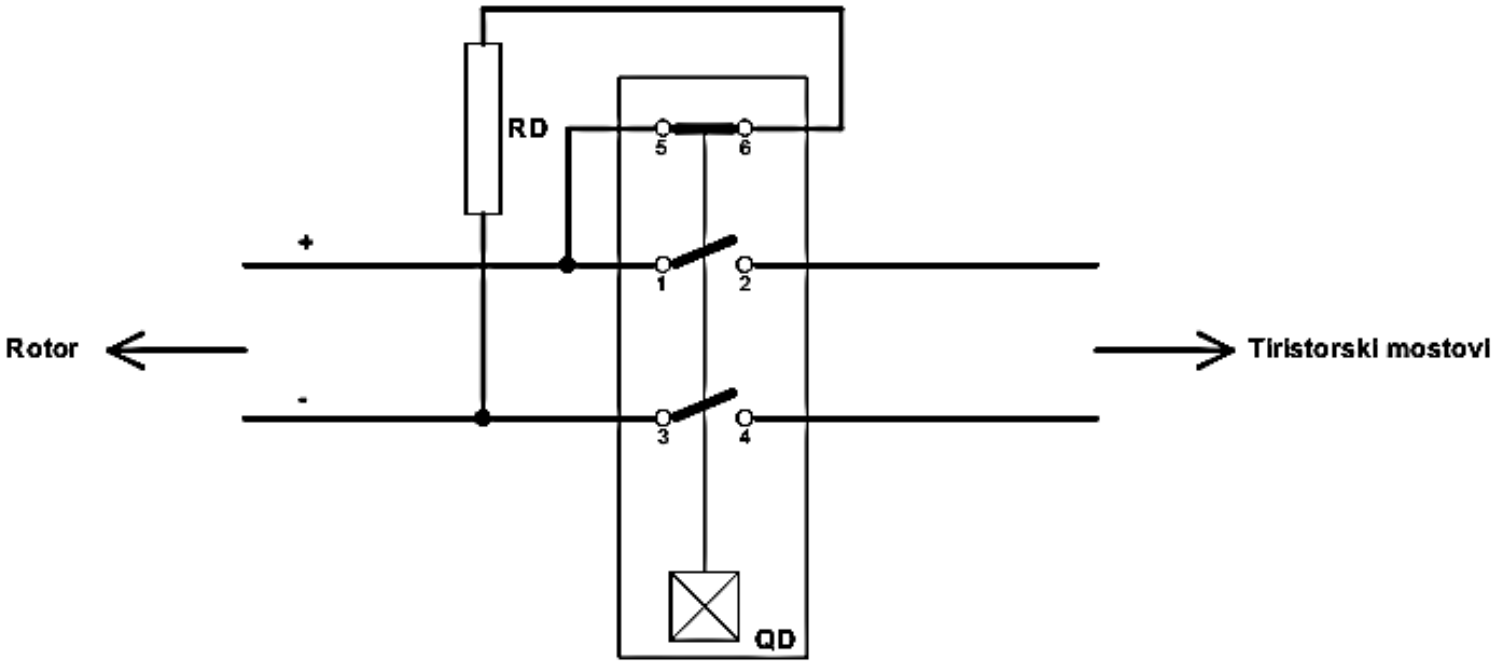
• Na nalog operatera ili zaštite, u bilo kom trenutku je moguće izvršiti prelazak sa jednog na drugi blok tiristorskih mostova, bez ometanja rada generatora.

•U slučaju kvara na bloku tiristorskih mostova koji je u radu dolazi do automatskog prelaska na rezervni blok tiristorskih mostova bez ispada agregata.

•Prelazak je realizovan blokadom neispravnog bloka tiristorskih mostova ukidanjem impulsa za paljenje tiristora koji se šalju na rezervni blok tiristorskih mostova koji preuzima struju pobude.

•Tiristorski mostovi su parametrirani tako da jedan blok tiristorskih mostova može da zadovolji sve režime rada, uključujući i forsiranje pobude pri havarijskim režimima sa predviđenim koeficijentom forsiranja.

SKLOP ZA BRZO RAZBUĐIVANJE



•Sklop za brzo razbuđivanje se sastoji iz prekidača za demagnetizaciju QD, koji ima dva radna i jedan mirni kontakt, i otpornika za demagnetizaciju RD.

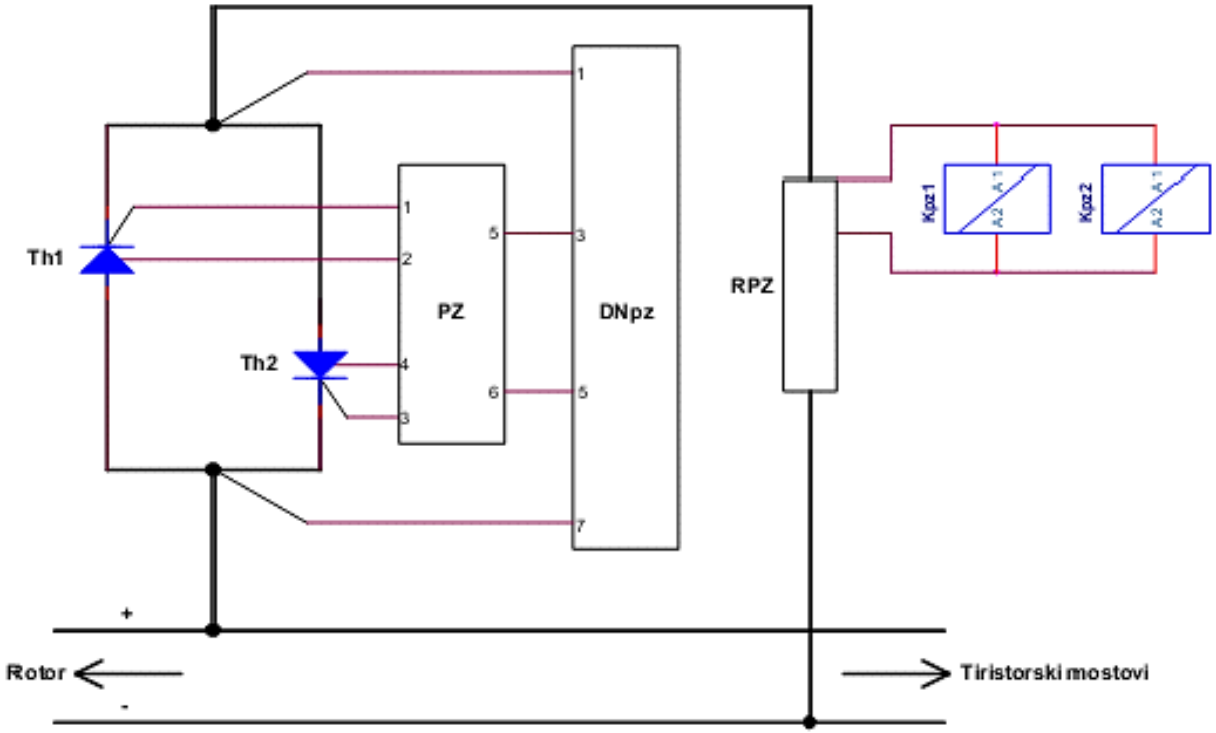
•Brzo razbuđivanje se ostvaruje tako što se najpre isključi generatorski ili mrežni prekidač, a zatim prekidač za demagnetizaciju.

•Prekidač za demagnetizaciju prvo svojim mirnim kontaktom paralelno pobudnom namotaju uključuje otpornik za demagnetizaciju preko koga se vrši disipacija magnetne energije, a zatim otvara svoja dva radna kontakta i odvaja rotor od sistema pobude.

•Sklop za brzo razbuđivanje je dimenzionisan tako da omogući razbuđivanje pri tropolnom kratkom spoju generatora kada je energija u rotoru najveća i spreči pojavu prenapona pri prekidanju pobudne struje.

•Razbuđivanje generatora u normalnim režimima rada nakon silaska generatora sa mreže se ostvaruje bez isključenja prekidača za demagnetizaciju prelaskom tiristorskih mostova u invertorski režim kada napon na izlazu iz mosta postaje negativan.

PRENAPONSKA ZAŠTITA



•Prenaponi se u pobudnom namotaju mogu javiti u slučaju kratkih spojeva na generatoru, ispadu generatora iz sinhronizma (asinhroni rad) ili pri prekidu kola pobude.

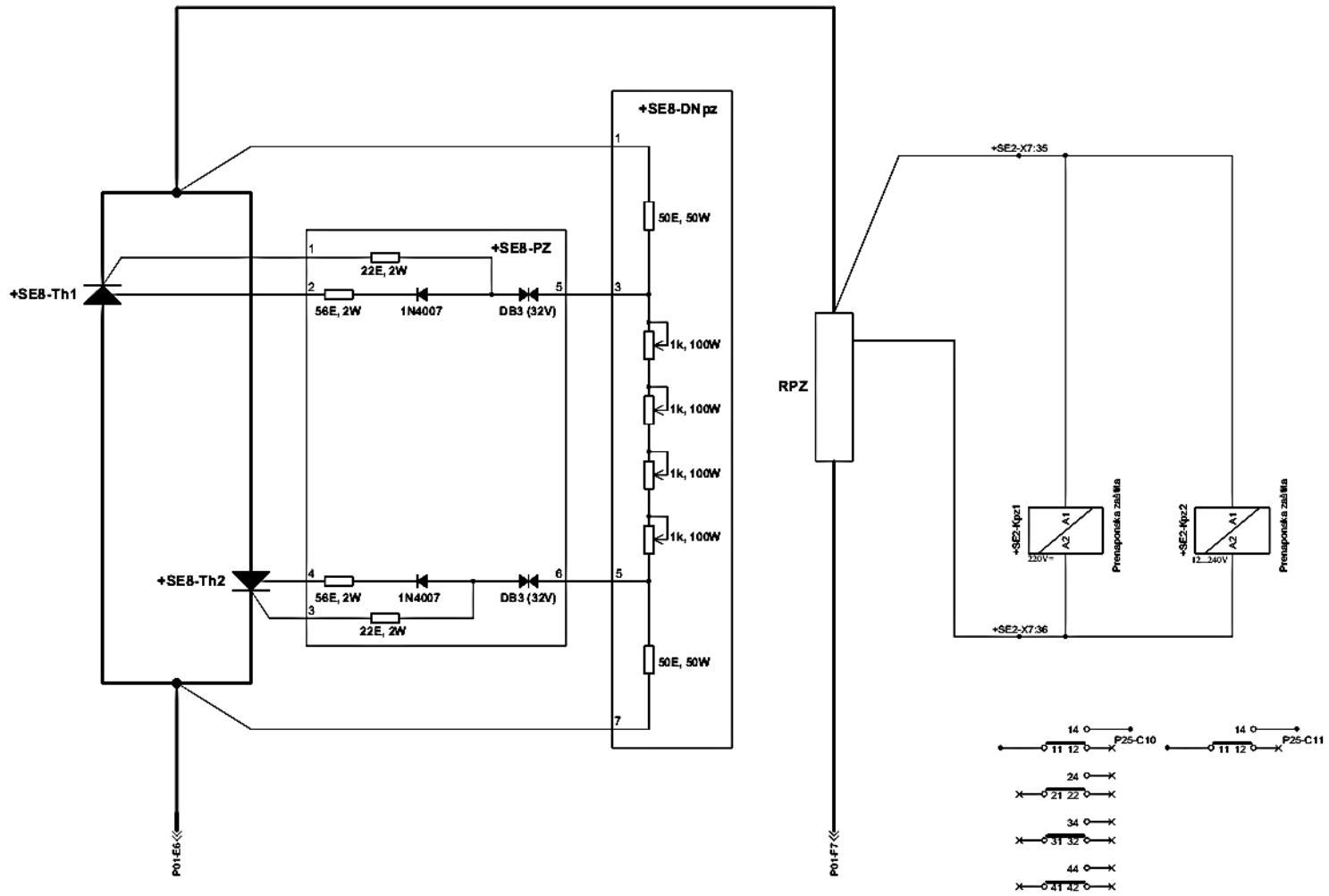
•Tiristorski sistem pobude i rotor generatora se od prenapona štite prenaponskom zaštitom i odvodnikom prenapona.

•Prenaponska zaštita sadrži dva antiparalelno vezana tiristora Th1 i Th2, otpornik RPZ i sklop za detekciju pojave prenapona PZ, koji generiše impulse za paljenje tiristora.

•Prilikom pojave napona na rotoru, koji je veći od podešene vrednosti prenaponske zaštite, jedan od dva tiristora dobija impuls za paljenje i paralelno sa rotorom vezuje otpornik R2 na kome se disipira energija rotora.

•Zaštita je dvosmerna, odnosno jedan tiristor se pali u slučaju pojave pozitivnog prenapona, dok se drugi pali u slučaju pojave negativnog prenapona.

•Prenaponska zaštita je dimenzionisana tako da omogući ograničenje prenapona pri asinhronom radu generatora kada dolazi do pojave najvećih prenapona usled promene smera struje kroz tiristorski most.

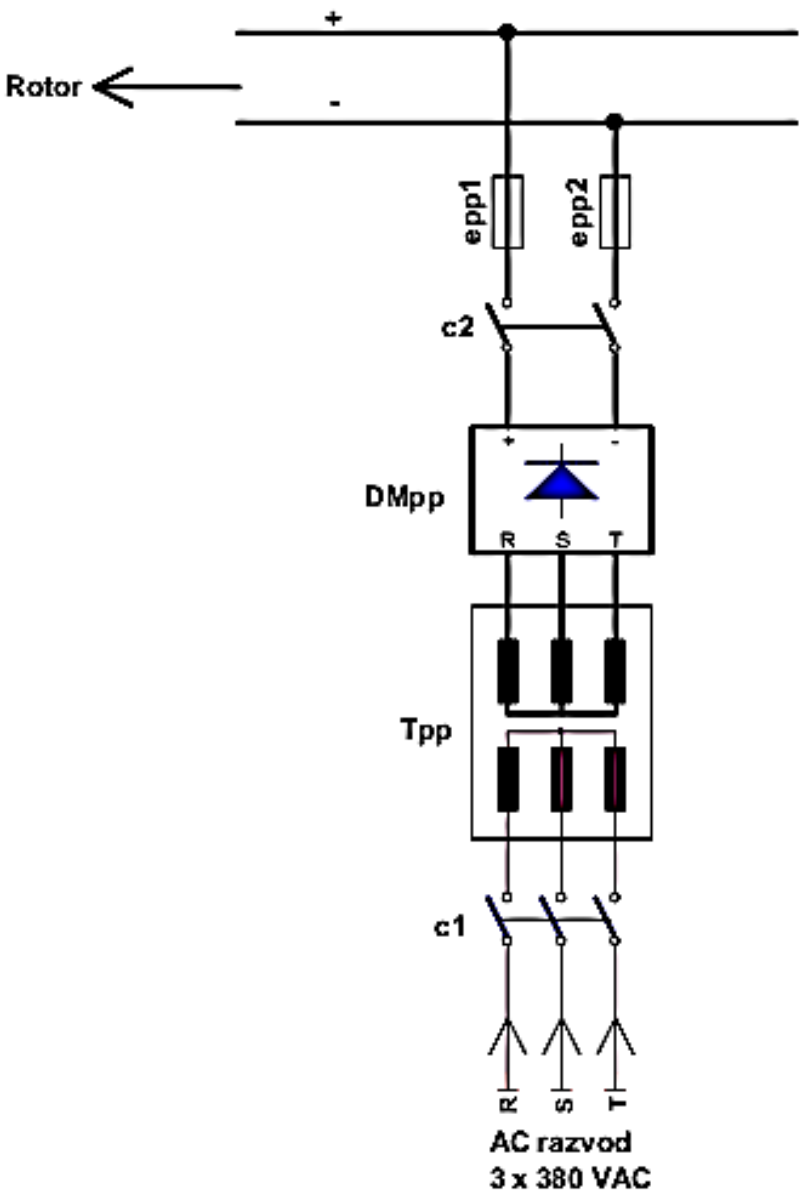


Prenaponska zaštita je dimenzionisana tako da omogući ograničenje prenapona pri asinhronom radu generatora kada dolazi do pojave najvećih prenapona usled promene smera struje kroz tiristorski most. Prorada zaštite se podešava prema relaciji:

$$U_{pz} = 0.8 \cdot V_{DSM} = 0.7 \cdot 2800V = 2240V \Rightarrow U_{pz} = 2200V$$

Odrada ove zaštite deluje na isključenje prekidača QD i dovodi do ispada sistema pobude i gregata. !!!

SKLOP ZA POČETNO POBUĐIVANJE



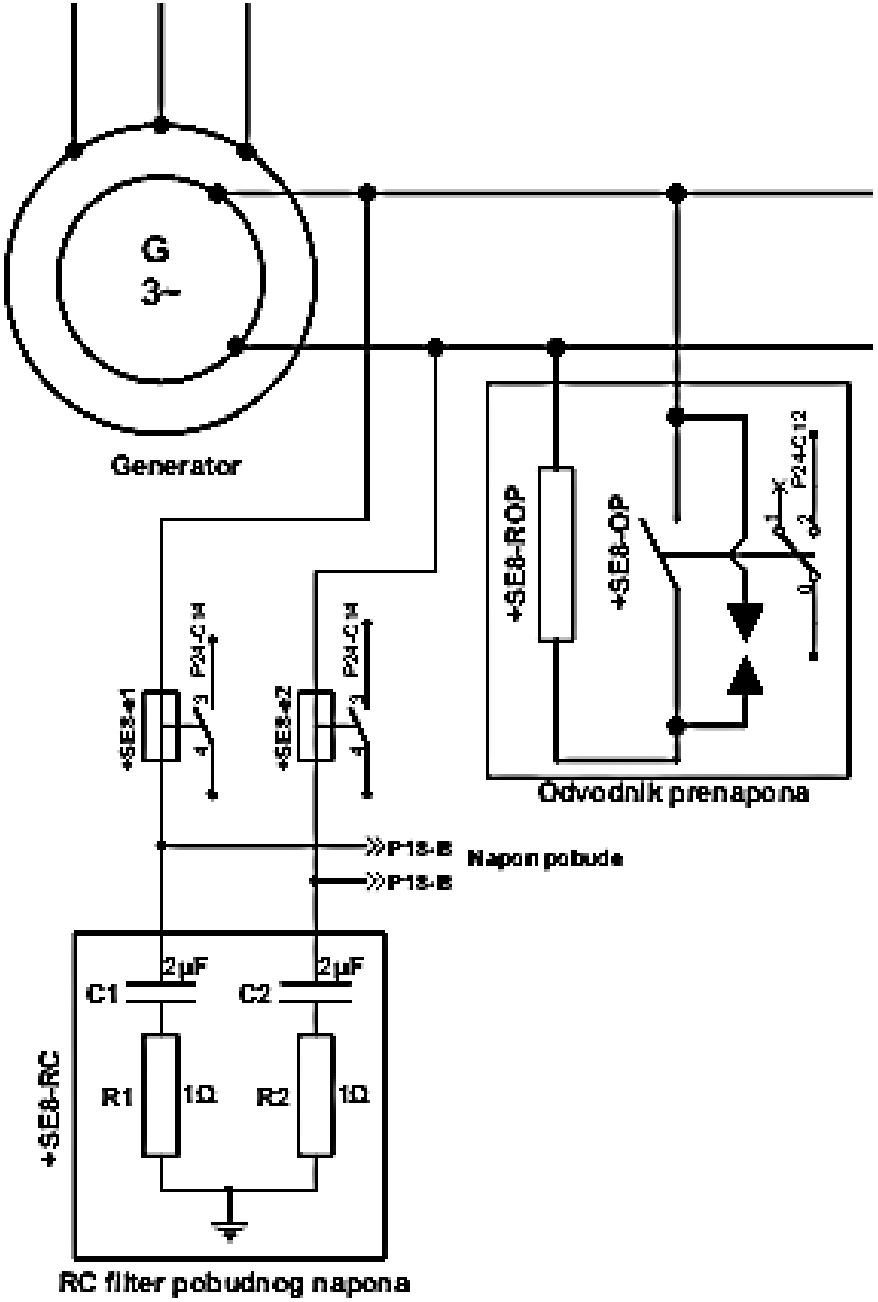
•Sklop za početno pobuđivanje omogućava da otpočne proces pobuđivanja generatora, jer pobudni transformator pri razbuđenom generatoru nije pod naponom.

•Na početku procesa pobuđivanja pobudni
namotaj generatora se napaja iz početne pobude dok napon ne postigne 10% nominalne vrednosti, a zatim napajanje pobudnog sistema postepeno preuzima generator.

•Početna pobuda se napaja iz naizmeničnog razvoda elektrane napona 0.4 kV.

•Nalog za uključenje početne pobude daje regulator pri pobuđivanju generatora.

•Početna pobuda se uključuje u trajanju do 5 sekundi.



R-C FILTER u kolu pobude

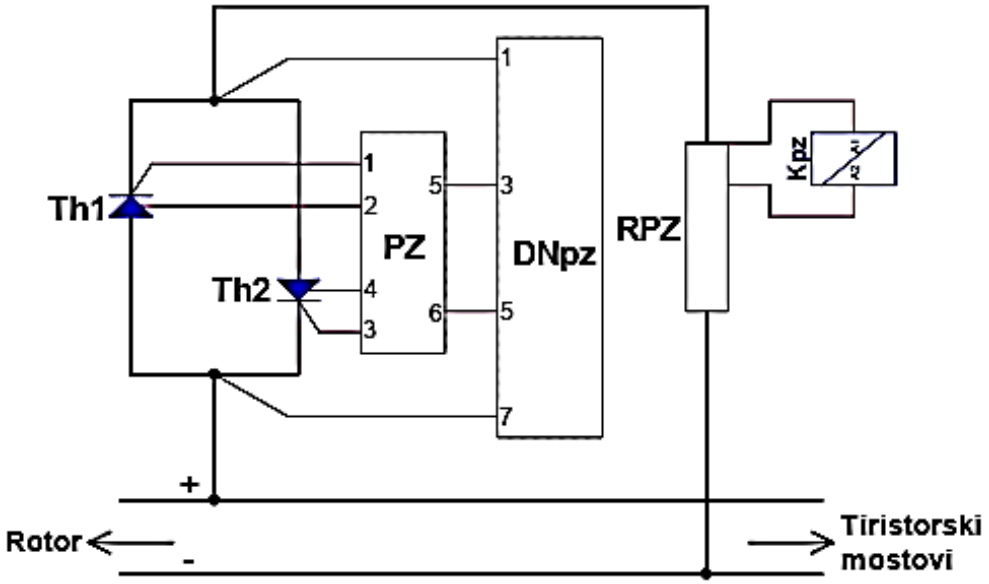
U prelaznim režimima i tranzijentnim uslovima, poput kratkog spoja ili komutacije, talasni oblici struje se izobličavaju. Stoga je primena pasivnih RC filtera uobičajen način za ublažavanje harmonjskih signala. RC filtri mogu sa paralelnim opterećenjem (namotaj pobude) da formiraju rezonantno kolo.

•RC filter je povezan na izlazu sistema pobude paralelno sa rotorskim namotajem i koristi se za filtriranje pikova napona pobude generatora, koji se javljaju usled komutacija tiristora.

•Filter se obično sastoji iz: dva kondenzatora od 2 µF, naponske klase 8 kV, dva otpornika R1 i R2 od 1 Ω snage disipacije od oko 200 W i dva brza osigurača za 20 A.

PRENAPONSKA ZAŠTITA

Tiristorski sistem pobude i rotor generatora se od prenapona štite prenaponskom zaštitom i odvodnikom prenapona. Prenaponi se u pobudnom namotaju mogu javiti u slučaju kratkih spojeva na generatoru, ispadu generatora iz sinhronizma (asinhroni rad) ili pri prekidu kola pobude



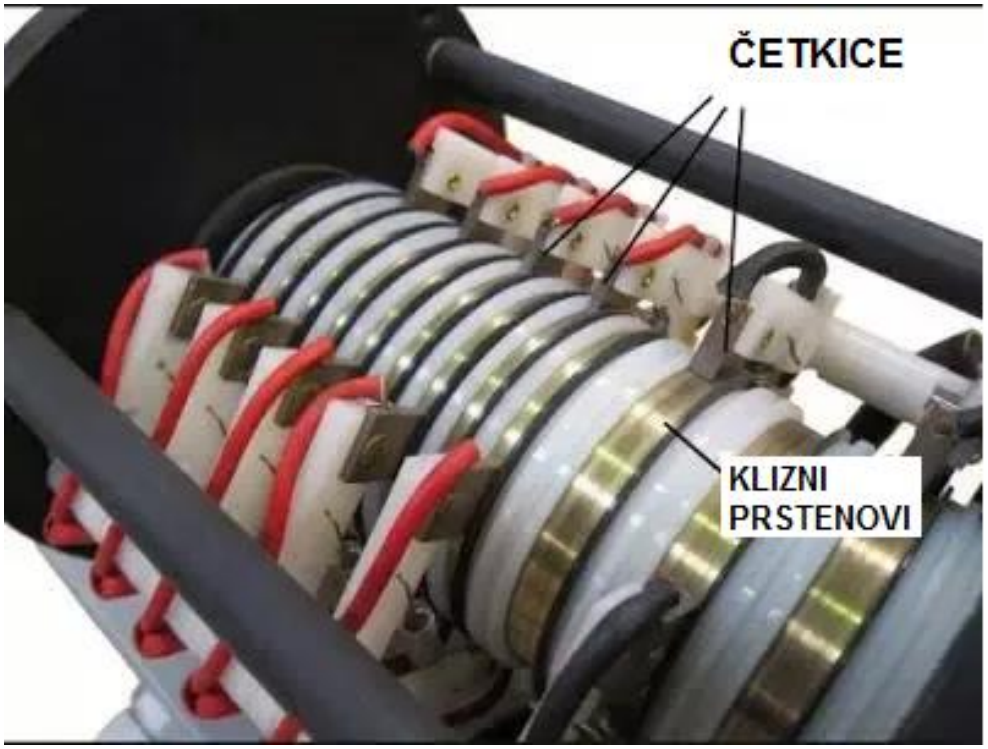
- Prenaponska zaštita sadrži dva antiparalelno vezana tiristora Th1 i Th2, otpornik RPZ i sklop za detekciju pojave prenapona DNpz i PZ, koji generiše impulse za paljenje tiristora.
- Prilikom pojave napona na rotoru, koji je veći od podešene vrednosti prenaponske zaštite, jedan od dva tiristora dobija impuls za paljenje i paralelno sa rotorom vezuje otpornik RPZ.
- Zaštita je dvosmerna, odnosno jedan tiristor se pali u slučaju pojave pozitivnog prenapona, dok se drugi pali u slučaju pojave negativnog prenapona.

- Prenaponska zaštita je dimenzionisana tako da omogući ograničenje prenapona pri asinhronom radu generatora kada dolazi do pojave najvećih prenapona usled promene smera struje kroz tiristorski most.
- Odrada prenaponske zaštite se detektuje pojavom struje kroz otpornik RPZ.
- Odrada ove zaštite deluje na isključenje prekidača QD i dovodi do ispada sistema pobude i agregata.

NAPOMENA: Pored tiristorske prenaponske zaštite zadržani su i postojeći odvodnik prenapona OP zajedno sa otpornikom ROP. Pri naponu pobude većem od 2800V prorađuje odvodnik prenapona OP i paralelno sa rotorom se povezuju odvodnik OP i otpornik ROP. Odrada odvodnika prenapona deluje na isključenje prekidača QD i dovodi do ispada sistema pobude i agregata

KONSTRUKCIJA ZA PROMENU POLARITETA NAPONA NA KLIZNIM PRSTENOVIMA

•Sistem pobude ima na svom izlazu, u sklopu ormara pobude, konstrukciono rešenje za jednostavnu promenu polariteta napona na kliznim prstenovima (npr. vijčanim prespajanjem delova sabirnica) kod stajanja proizvodne jedinice.



•Preporučuje se da se promena polariteta izvrši jednom godišnje, kako bi se klizni prstenovi ravnomerno trošili, jer se prstenovi vezani na pozitivan kraj napona pobude brže troše!!!!!.

HVALA NA PAŽNJI!!

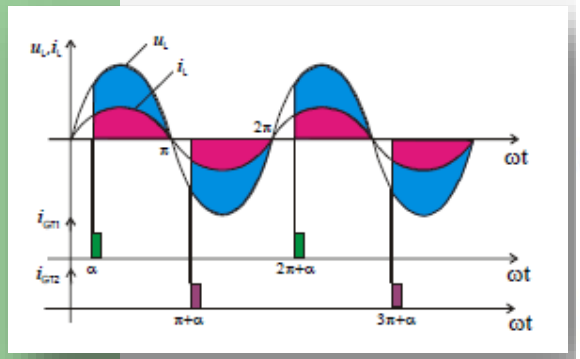
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

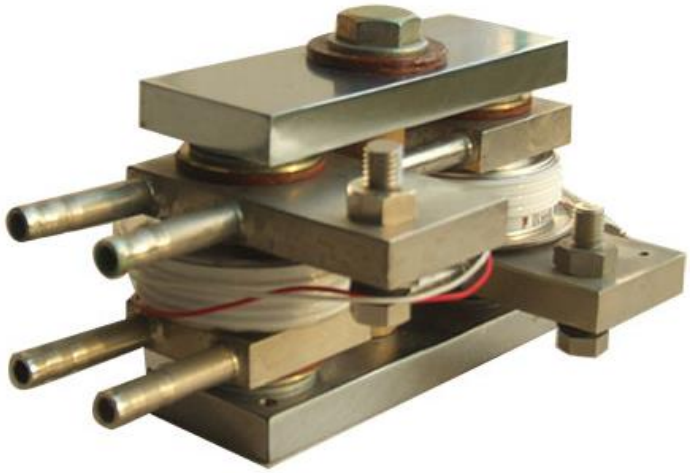
STUDIJSKI PROGRAM: NET

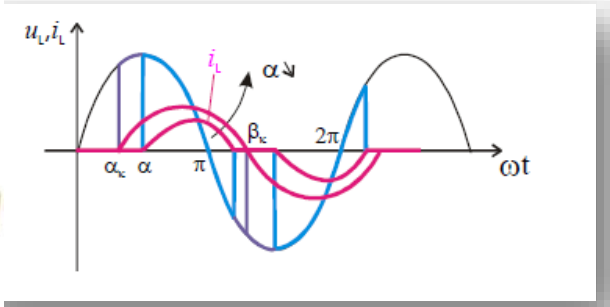
OSNOVNE STUDIJE 2020/2021

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

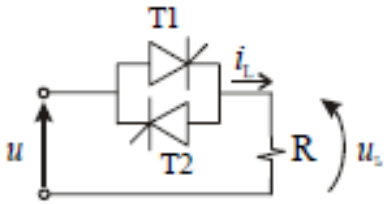
ENERGETSKI PRETVARAČI NAIZMENIČNOG NAPONA (AC/AC pretvarači)





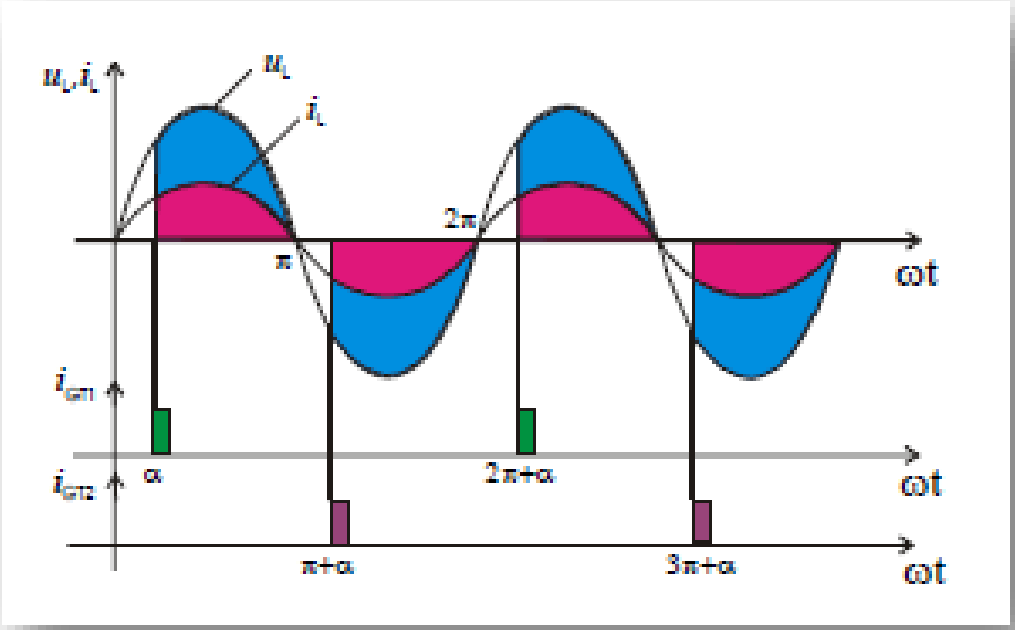


MONOFAZNI PUNOTALASNI NAIZMENIČNI (AC/AC) PRETVARAČ (omsko opterećenje)



$$u = U\sqrt{2} * \sin \omega t$$

α - kašnjenje paljenja od trenutka kada tiristor može da provede

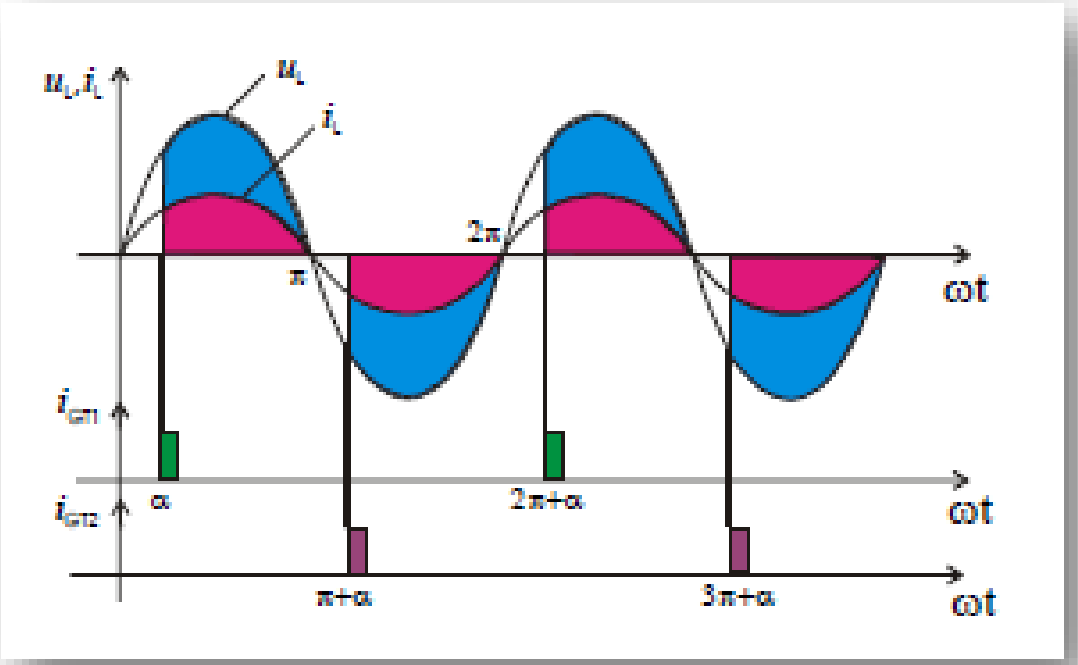


-Zbog prirode potrošača struja prati oblik napona na potrošaču.
-Pri prolasku napona izvora kroz nulu dolazi do gašenja tiristora jer struja potrošača pada na nulu.
-Za α=0, napon izvora se u celosti prenosi na potrošač.
-Kada α raste, napon na potrošaču se smanjuje.

1) Efektivna vrednost napona potrošača

Trenutna vrednost napona na potrošaču je:

$$uL = \begin{cases} 0, 0 < \omega t < \alpha \\ U\sqrt{2}\sin\omega t, \alpha < \omega t < \pi \end{cases}, \omega T = \pi$$



Efektivna vrednost napona potrošača je:

$$UL = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T uL^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} uL^2 dt}$$

$$UL = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} 2U^2 \sin^2\omega t dt} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} U^2(1-\cos 2\omega t)dt}$$

$$UL = U\sqrt{\frac{\omega}{\pi}\left(\frac{\pi}{\omega} - \frac{\alpha}{\omega} + \frac{1}{2\omega}\sin 2\alpha\right)} = U\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha}$$

za $\alpha=0$, $U_L = U$ - maksimalan

za $\alpha=\pi$, $U_L = 0$ - minimalan

za $\alpha=\pi/2$, napon potrošača je: $UL = \frac{U}{\sqrt{2}}$

2) Snaga na potrošaču je:

$$PL = \frac{UL^2}{R} = \frac{U^2}{R}\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha\right)$$

za

$\alpha=0$, $P_L = P_{Lmax} = U^2/R$

3) Srednja vrednost struje tiristora

$$I_{TAV} = \frac{1}{T}\int_0^T i\,dt = \frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} \frac{U\sqrt{2}\sin\omega t}{R}\,dt = \frac{\omega}{2\pi}\frac{U\sqrt{2}}{R}\frac{1}{\omega}(-\cos\omega t)\Big|_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega}$$

$$I_{TAV} = \frac{U}{R}\frac{1}{\pi\sqrt{2}}(1+\cos\alpha)$$

srednja struja tiristora je maksimalna za α=0 i iznosi: $I_{TAV} = \frac{U}{R}\frac{\sqrt{2}}{\pi}$

za $\alpha=\pi$ srednja vrednost je: $I_{TAV} = 0$

4) Efektivna vrednost struje tiristora

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T/2} (\frac{u}{R})^2 dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\pi/\omega} \frac{U^2}{R^2} 2\sin^2\omega t * dt}$$

$$I_{TRMS} = \frac{U}{R}\sqrt{\frac{\omega}{2\pi}(\frac{\pi}{\omega} - \frac{\alpha}{\omega} + \frac{1}{2\omega}\sin 2\alpha)}$$

$$I_{TRMS} = \frac{U}{R}\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha}$$

za α=0, efektivna vrednost struje tiristora je maksimalna i iznosi:

$$I_{TRMS} = \frac{U}{R}\frac{1}{\sqrt{2}}$$

5) Efektivna vrednost struje potrošača je:

$$I_L = \frac{U_L}{R} = \frac{U}{R}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha}$$

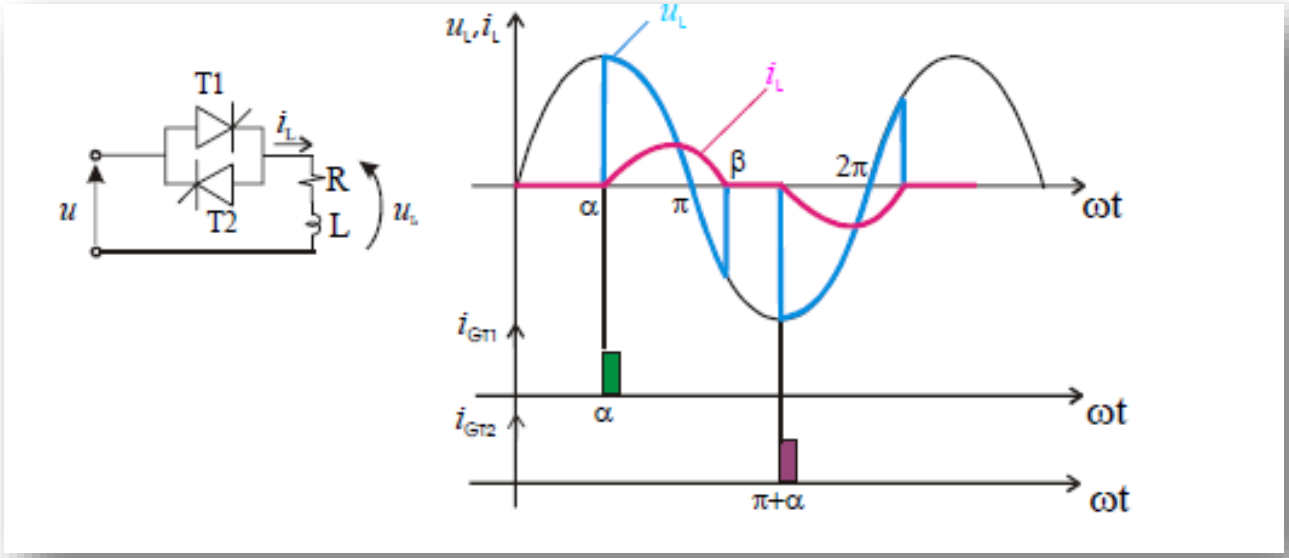
$$\Rightarrow I_{TRMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_L$$

Dakle, struja kroz svaki od tiristora je 1,41 puta manja od struje potrošača.

Za α=0 je odnos srednje i efektivne vrednosti struje tiristora:

$$\frac{I_{TAV}}{I_{TRMS}} = \frac{\frac{U}{R}\frac{2}{\pi\sqrt{2}}}{\frac{U}{R}\frac{1}{\sqrt{2}}} = \frac{2}{\pi}$$

MONOFAZNI PUNOTALASNI NAIZMENIČNI PRETVARAČ
(induktivno opterećenje)

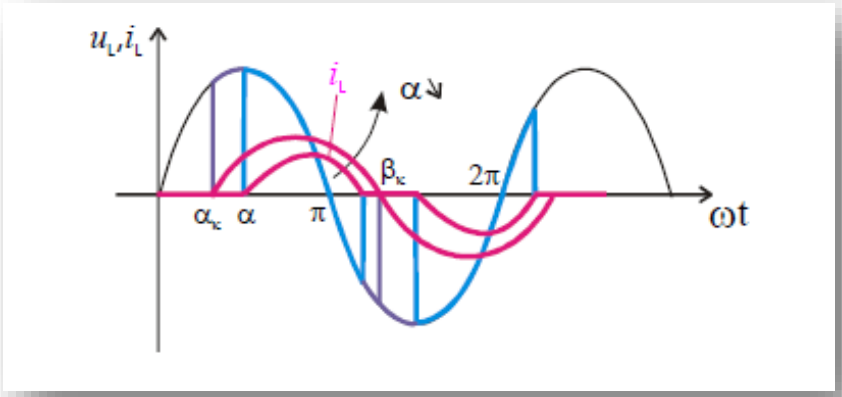


-Zbog prisustva induktivnosti u potrošaču, kada upalimo tiristor struja ne može trenutno promeniti vrednost, već počinje da raste od nule.
-Iz istog razloga se tiristor ne gasi pri prolasku napona potrošača kroz nulu jer struja nastavlja da teče.
-Za kolo možemo postaviti sledeću jednačinu:

$$u - Ri - L\frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow L\frac{di}{dt} + Ri = U\sqrt{2}\sin\omega t$$

Rešenje ove jednačine je izraz za struju:

$$i = \frac{U\sqrt{2}}{Z}\left[\sin(\omega t - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)}\sin(\alpha - \phi)\right]$$



Gde je:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \phi = arctg\frac{\omega L}{R}$$ ϕ - ugao impedanse

Interesuje nas ugao β pri kome struja kroz potrošač prestaje da teče i tiristor se gasi.
Taj ugao se nalazi rešavanjem jednačine:

$$i = 0 \Rightarrow \sin(\beta - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta - \alpha)}\sin(\alpha - \phi) = 0 \Rightarrow \sin(\beta - \phi) = e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta - \alpha)}\sin(\alpha - \phi)$$

-Ako upalimo tiristor u trenutku α, vidimo da će struja kroz potrošač teći za $\alpha<\omega t<\beta$.
-Zatim se tiristor gasi i struja počinje ponovo da teče kad se upali drugi tiristor.
-Postojaće neki ugao paljenja α_k za koji će struja potrošača biti neprekidna, odnosno za koji će se trenuci gašenja jednog i paljenja drugog tiristora poklapati.
To znači da je:

$$\beta_k = \pi + \alpha_k$$

Vrednost za α_k se nalazi gornjom smenom za β_k u izrazu za struju potrošača i rešavanjem jednačine:

$$i = 0 \Rightarrow \sin(\beta_k - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\beta_k - \alpha_k)} \sin(\alpha_k - \phi) = 0 \Rightarrow \sin(\pi + \alpha_k - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega L}(\pi + \alpha_k - \alpha_k)} \sin(\alpha_k - \phi) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin(\alpha_k - \phi)(1 + e^{-\frac{R}{\omega L}\pi}) = 0 \Rightarrow \sin(\alpha_k - \phi) = 0 \Rightarrow \alpha_k = \phi, \phi = arctg\frac{\omega L}{R}$$

Dakle za $\varphi < \alpha < \pi$, struja će biti prekidna.

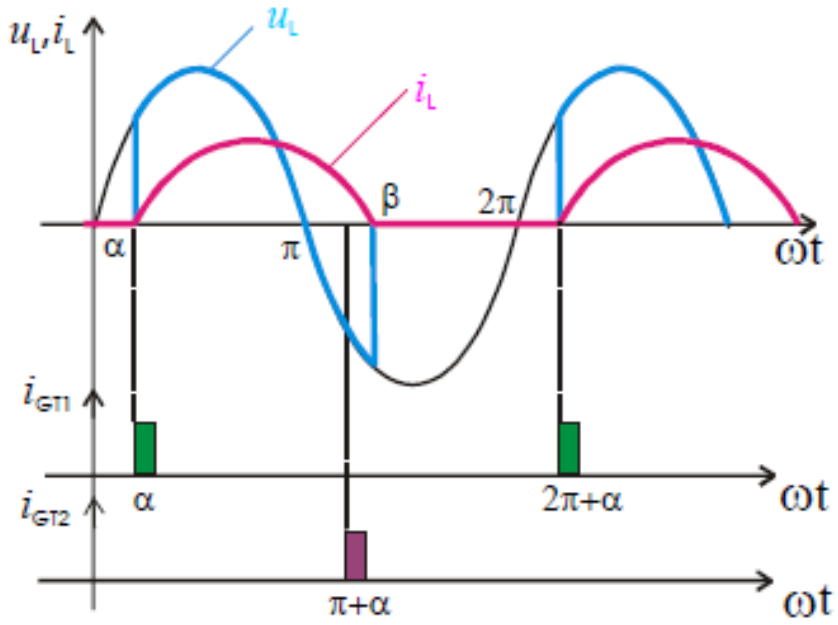
Za $\alpha = \varphi$ struja potrošača će biti neprekidna i sinusnog oblika datog izrazom:

$$i = \frac{U\sqrt{2}}{Z}\sin(\omega t - \phi), Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}, \phi = arctg\frac{\omega L}{R}$$

što znači da će struja potrošača kasniti za naponom izvora za ugao φ.

Šta će se desiti za $0 < \alpha < \varphi$?

Za 0 < α < φ će oblik struje potrošača zavisiti od načina na koji pobuđujemo tiristore.
Ako ih kao do sad palimo impulsom u gejtu, može se desiti da kad pobuđujemo gejt tiristora uslovi za njegovo provođenje ne postoje jer provodi onaj drugi, a kad se uslovi steknu impuls paljenja je prošao.
Tada se tiristor neće uopšte upaliti (kao što pokazuje slika).



Dakle, struja će teći samo u jednom smeru i imati neželjenu jednosmernu komponentu.

1) Efektivna vrednost napona na potrošaču

α - ugao paljenja tiristora, β - ugao gašenja tiristora

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_L^2\,dt} = \sqrt{\frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} u_L^2\,dt}$$

$$U_L = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} 2U^2\sin^2\omega t\,dt} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} U^2(1-\cos 2\omega t)\,dt}$$

$$U_L = U\sqrt{2}\sqrt{\frac{1}{2\pi}(\beta-\alpha)-\frac{1}{2}\sin 2\beta+\frac{1}{2}\sin 2\alpha}$$

Ova efektivna vrednost napona potrošača je veća nego u slučaju da je potrošač čista otpornost jer je β > π.

2) Efektivna vrednost struje tiristora

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2\,dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega}\left\{\frac{U\sqrt{2}}{Z}\left[\sin(\omega t-\phi)-e^{-\frac{R}{\omega t}(\omega t-\alpha)}\sin(\alpha-\phi)\right]\right\}^2 dt}$$

3) Srednja vrednost struje tiristora

$$I_{TAV} = \frac{1}{T}\int_0^T i\,dt = \frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} \frac{U\sqrt{2}}{Z}\left[\sin(\omega t - \phi) - e^{-\frac{R}{\omega t}(\omega t - \alpha)}\sin(\alpha - \phi)\right]dt$$

Struje tiristora su maksimalne za α = φ.

4) Faktor snage

Zbog prisustva induktivnosti u potrošaču postojaće i aktivna i reaktivna snaga.

Faktor snage se definiše kao odnos aktivne i prividne (ukupne) snage.

Za prostoperiodične režime, faktor snage je tesno povezan sa uglom impedanse - φ:

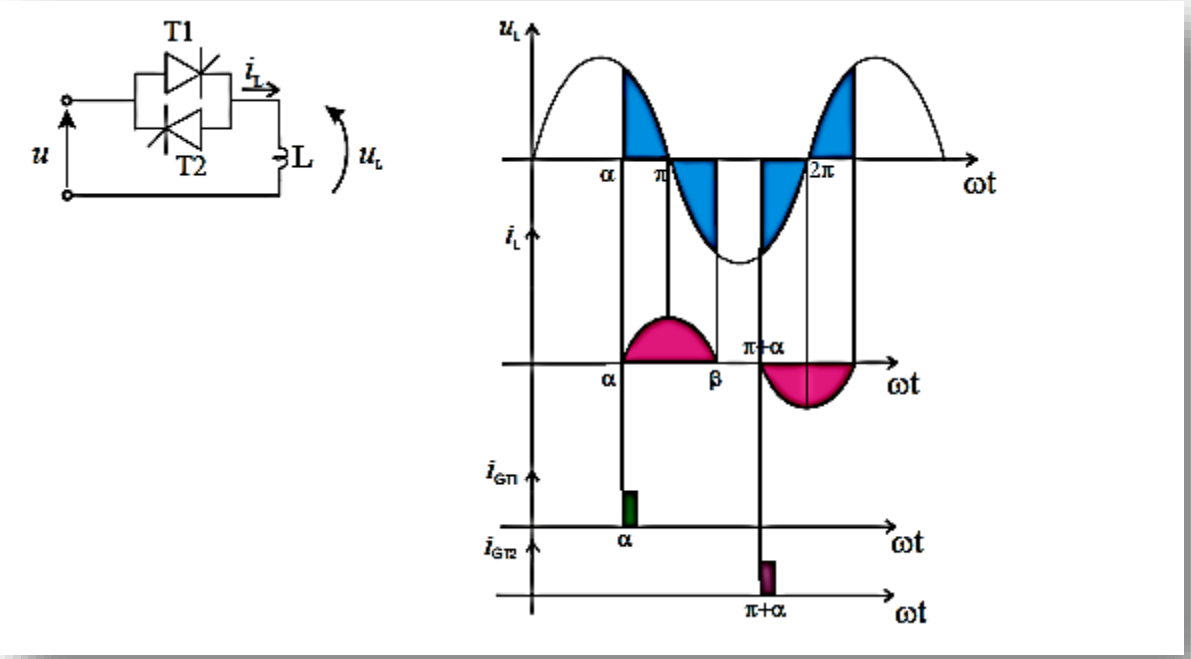
$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{UI\cos\phi}{UI} = \cos\phi$$

Za složenoperiodične režime (kad su signali prekidni) ova veza više ne važi i ugao impedanse se ne sme povezivati sa reaktivnom snagom.

Tada se faktor snage mora izračunavati po definiciji:

$$\lambda = \frac{P}{U_{RMS}\cdot I_{RMS}} = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T uidt}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2dt}\cdot\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2dt}}$$

MONOFAZNI PUNOTALASNI NAIZMENIČNI (AC/AC) PRETVARAČ
(potrošač čisto induktivno opterećenje)



-Kada tiristor upalimo u uglu α, struja kroz induktivnost se ne može trenutno promeniti kao što je to bio slučaj kod čisto otpornog potrošača.
-Struja raste od nulte vrednosti sve dok napon ima pozitivnu vrednost.

$$u = L\frac{di}{dt}, i = \frac{1}{L}\int_0^t u\,dt$$

-Kada napon na induktivnosti promeni znak, tiristor se ne gasi jer kroz njega još teče struja.
-Znači da tiristorom ne možemo upravljati nezavisno od prirode potrošača, kao što je to slučaj sa tranzistorom.
-Kada napon na induktivnosti postane negativan, struja počinje da opada.
-Interesuje nas ugao β pri kome će vrednost struje kroz induktivnost pasti na nulu.
-Zbog simetrije u odnosu na ugao π, vidi se da je:

$$\beta = \pi + (\pi - \alpha) = 2\pi - \alpha$$

Ovu tvrdnju možemo dokazati nalaženjem izraza za struju induktivnosti u zavisnosti od ugla paljenja α:

$$i = \frac{1}{L}\int_0^t u_L dt, u_L = \begin{cases} u, \alpha < \omega t < \beta \\ 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow i = \frac{1}{L}\int_{\alpha/\omega}^{t} U\sqrt{2}\sin\omega t dt = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L}\int_{\alpha}^{\omega t}\sin\omega t d(\omega t) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L}(-\cos\omega t)\Big|_{\alpha}^{\omega t} \Rightarrow i = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L}(\cos\alpha - \cos\omega t), \omega t \in [\alpha, \beta]$$

Postavljanjem uslova da je vrednost struje u uglu β jednaka nula, dobijamo:

$$i = 0 \Rightarrow \frac{U\sqrt{2}}{\omega t}(\cos\alpha - \cos\beta) = 0 \Rightarrow \cos\alpha = \cos\beta \Rightarrow \beta = 2\pi - \alpha$$

Da bi se drugi tiristor upalio mora se prvi ugasiti. Ugao gašenja prvog tiristora β mora biti manji od ugla $\pi+\alpha$, kad palimo drugi tiristor.

Znači, ako želimo simetrično paljenje tiristora ugao paljenja α možemo smanjivati samo do $\pi/2$.

1) Efektivna vrednost napona na potrošaču

$$U_L = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_L^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} u_L^2 dt}$$

$$U_L = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} 2U^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}\int_{\alpha/\omega}^{(2\pi-\alpha)/\omega} U^2(1-\cos 2\omega t)dt}$$

$$U_L = U\sqrt{2}\sqrt{\frac{\omega}{2\pi}\left(\frac{2\pi}{\omega} - \frac{2\alpha}{\omega} + \frac{1}{\omega}\sin 2\alpha\right)} = U\sqrt{2}\sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi}\sin 2\alpha}$$

2) Srednja vrednost struje tiristora

$$I_{TAV} = \frac{1}{T}\int_0^t i\,dt = \frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} \frac{U\sqrt{2}}{\omega L}(\cos\alpha - \cos\omega t)\,dt = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L}\frac{1}{2\pi}[(2\pi - 2\alpha)\cos\alpha + 2\sin\alpha]$$

3) Efektivna vrednost struje tiristora

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2\,dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi}\int_{\alpha/\omega}^{\beta/\omega} [\frac{U\sqrt{2}}{\omega L}(\cos\alpha - \cos\omega t)]^2\,dt} \Rightarrow \ldots$$

$$\Rightarrow I_{TRMS} = \frac{U}{\omega L}\sqrt{\frac{1}{2\pi}[(2 + \cos 2\alpha)(2\pi - 2\alpha) + 3\sin 2\alpha]}$$

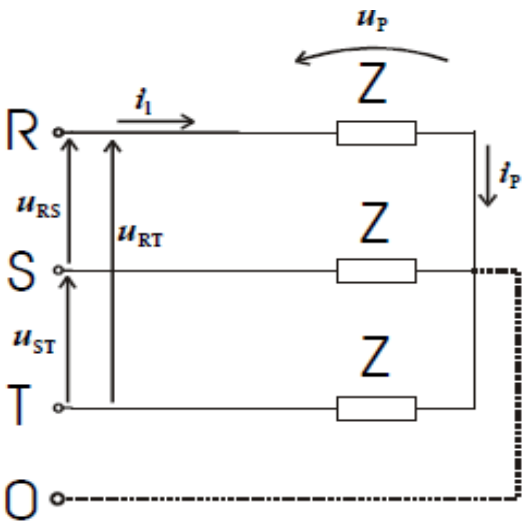
TROFAZNI PODEŠAVAČI NAIZMENIČNOG NAPONA

Trofazni sistem se zasniva na trofaznom generatoru koji generiše napone fazno pomerene za $3\pi/2$, tj. 120^o.

$$u_R = U\sqrt{2}\sin\omega t,\ u_S = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}),\ u_T = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})$$

Potrošač se može spregnuti u "zvezdu" ili "trougao".

Potrošač u sprezi "zvezda"



u_R, u_S, u_T - fazni naponi - u_f

u_{RS}, u_{ST}, u_{TR} - međufazni (linijski) naponi - u_l

$u_{RS} = u_R - u_R$, $u_{ST} = u_S - u_T$, $u_{RT} = u_R - u_T$

Kada se ovi naponi izračunaju preko fazorskog dijagrama dobija se:

$$U_l = 2U_f \cdot \cos 30^o = U_f\sqrt{3}$$

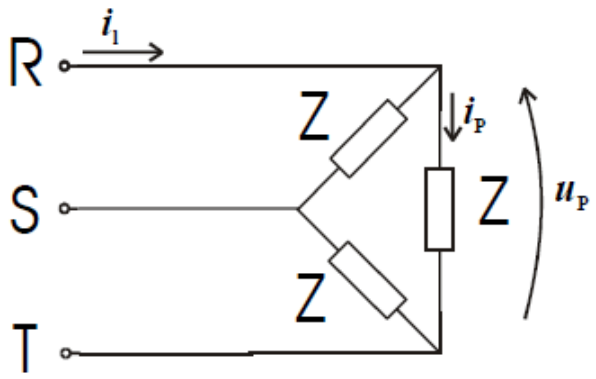
Interesuje nas struja i napon potrošača.

U trofaznim sistemima sve izražavamo preko linijskih napona i struja jer njih možemo da merimo. Imaćemo da je:

$$I_p = I_l,\ U_p = U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}$$

Snaga potrošača je: $$P = 3 \cdot U_p \cdot I_p \cos\phi = 3 \cdot \frac{U_l}{\sqrt{3}} \cdot I_l \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\phi$$

Potrošač u sprezi trougao"



Napon na svakom potrošaču je jednak linijskom naponu (međufaznom).

$$U_p = U_l$$

Struje kroz potrošače su fazno pomerene i primenom Kirhofovih pravila i fazorskog dijagrama se dobija

$$I_l = 2I_p \cos 30^o \Rightarrow I_l = I_p\sqrt{3} \Rightarrow I_p = \frac{I_l}{\sqrt{3}}$$

Snaga potrošača je:

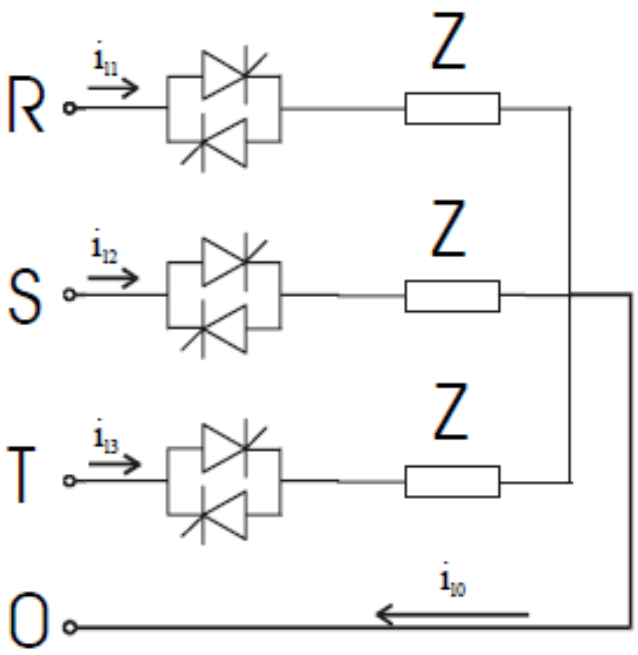
$$P = 3 \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos\phi = 3 \cdot U_l \cdot \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\phi$$

Dakle, bez obzira na spregu potrošača, zavisnost snage potrošača od linijskih struja i napona je ista.

To znači da merenjem linijskih napona i struja možemo steći utisak o snazi potrošača.

Trofazni punotalasni naizmenični pretvarač sa potrošačem u spoju "zvezda"

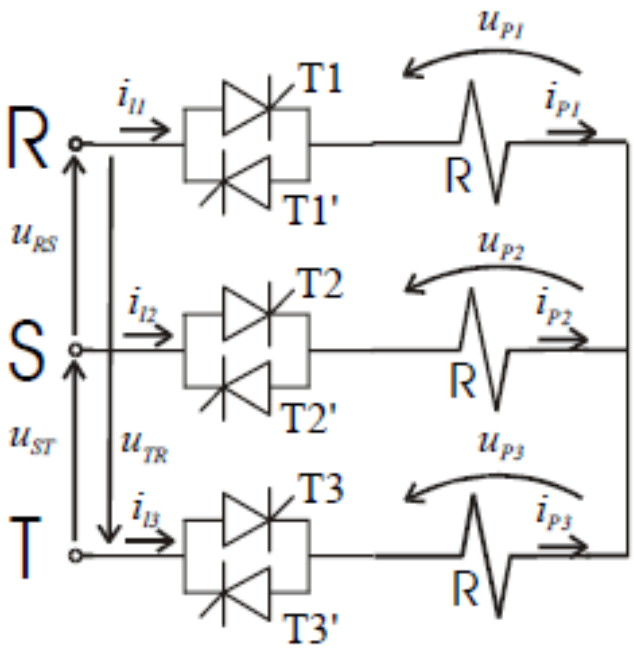
- sa nultim provodnikom



-Ovaj slučaj je identičan slučaju kad imamo tri posebna monofazna podešavača, pa ga tako i analiziramo.
-Da bi potekla bilo koja od linijskih struja iz faza potrebno je da je uključen barem 1 od ovih 6 tiristora.
-Ovo je moguće zbog postojanja nultog provodnika kuda struja može da se zatvori.
-Kad su sve tri grane provodne struja kroz nulti provodnik je:

$$i_{10} = i_{11} + i_{12} + i_{13} = 0$$

- bez nultog provodnika



-U ovom slučaju da bi protekla bilo kakva struja kroz potrošač moraju biti provodne najmanje 2 grane.

-Ako je provodna samo jedna grana (uključen samo jedan tiristor) struja kroz potrošač neće teći jer nema kuda da se zatvori (nema nultog provodnika).

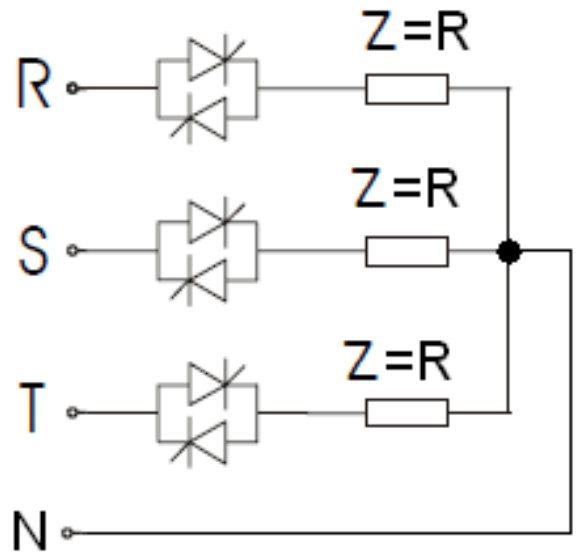
-Ako su provodne 2 grane tada će priključeni linijski (međufazni) napon napajati 2 grane potrošača, pa je na svakom potrošaču napon: $U_l/2$

Linijski naponi su:

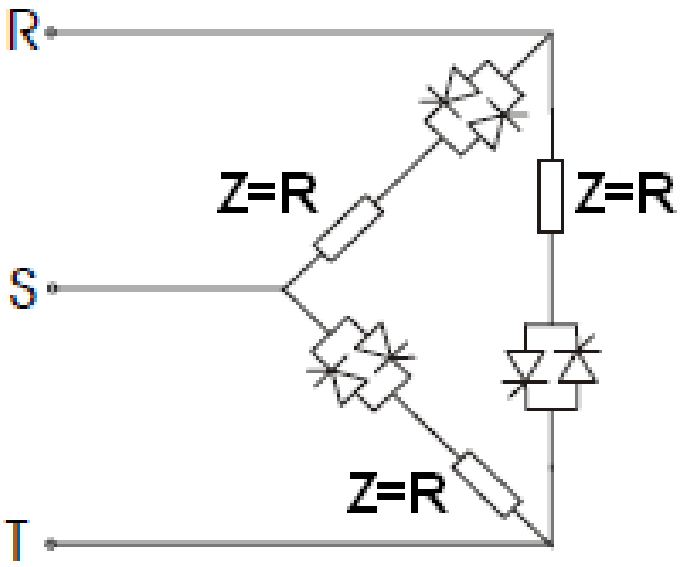
$$u_{RS} = Ul\sqrt{2}\sin\omega t,\ u_{ST} = Ul\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}),\ u_{TR} = Ul\sqrt{2}\sin(\omega t + \frac{4\pi}{3})$$

Ako su sve 3 grane provodne situacija je kao da imamo nulti provodnik, jer je napon zvezdišta nula. Tada su na svakom od potrošača fazni naponi u_R, u_S, u_T koji su u odnosu na međufazne napone u^{RS} , u^{ST}, u^{TR} fazno pomereni za $\pi/6$. Struje kroz potrošače su istovremeno i linijske i u fazi su sa faznim naponima u_R, u_S, u_T

PRIMERI TROFAZNIH SPREGA AC/AC PRETVARAČA



Pri vezi u “zvezdu” sa izvedenim zvezdištem trofazna sprega se svodi na tri monofazna podešavača napona sa antiparalelnim tiristorima.



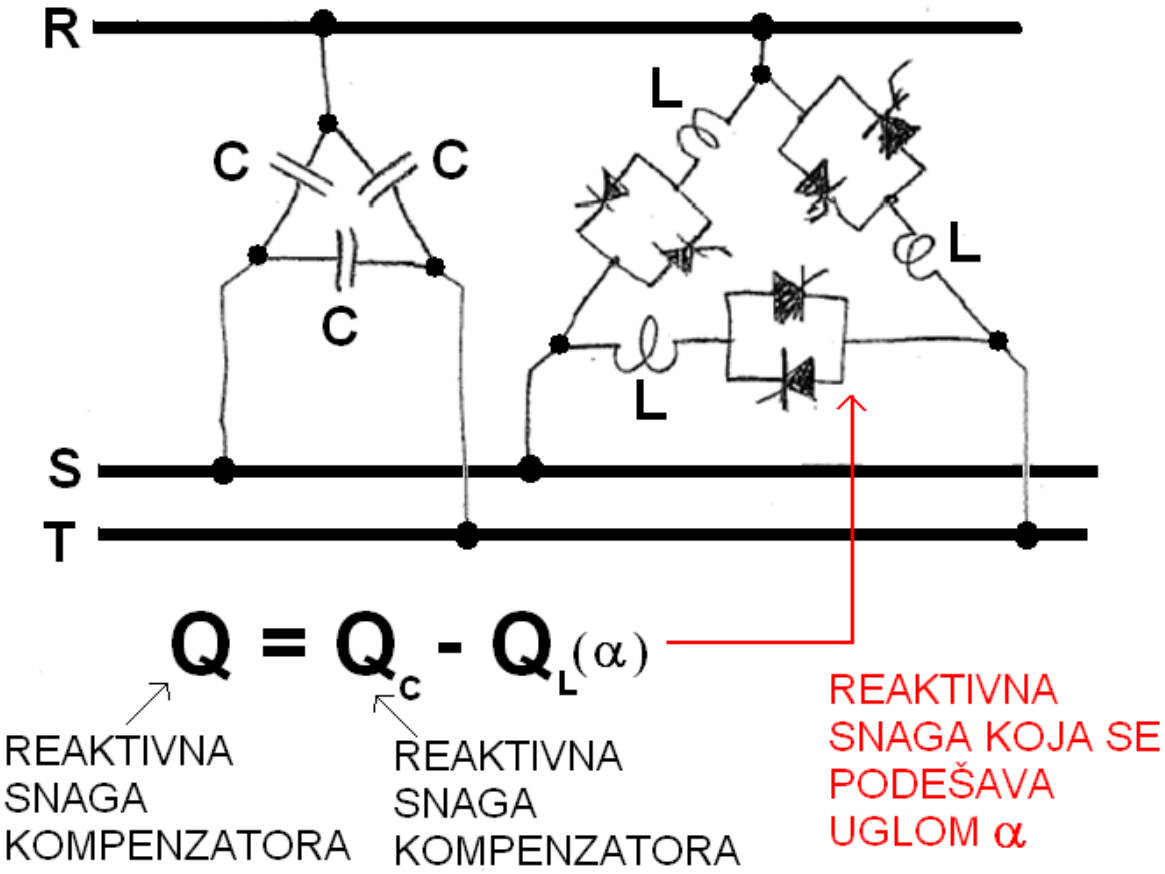
Kod većih snaga antiparalelni tiristori se vezuju u “trougao”

Pri sprezi antiparalelnih tiristora u “trouglu” manja je srednja i efektivna vrednost struje kroz jedan tiristor, u odnosu na spregu “zvezda”, i to 1.73 puta.

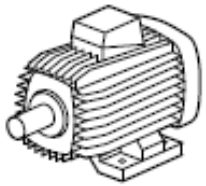
REGULACIJA REAKTIVNE SNAGE

Brza ili dinamička regulacija

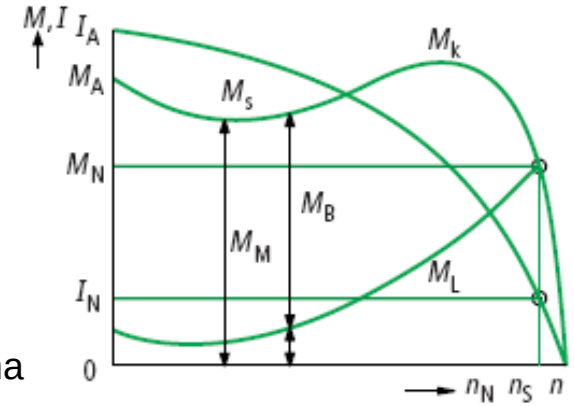
IZVODI SE NA SREDNJE NAPONSKOM NIVOU (6kV, 10kV i 35kV)



UREĐAJI ZA MEKANO UPUŠTANJE ASINHRONIH (kaveznih) MOTORA –"SOFT" STARTERI



$$n_s = \frac{f \times 60}{p}$$



Tipične karakteristike asinhronog motora u funkciji broja obrtaja **n**:

-momenat **M(n)**

-struja **I(n)**

Karakteristika opterećenja motora (radne mašine):

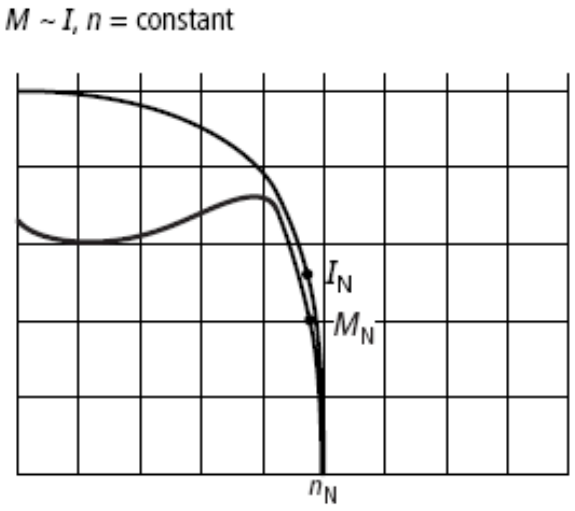
-momenat **M_L(n)**

n_S-sinhrona brzina

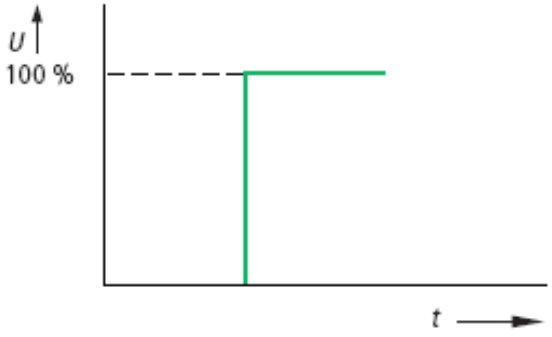
f-učestanost

p-broj pari polova

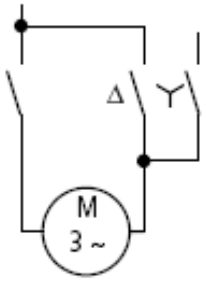
DIREKTNI UPUŠTAČ (ELEKTRO MEHANIČKI PREKIDAČ)

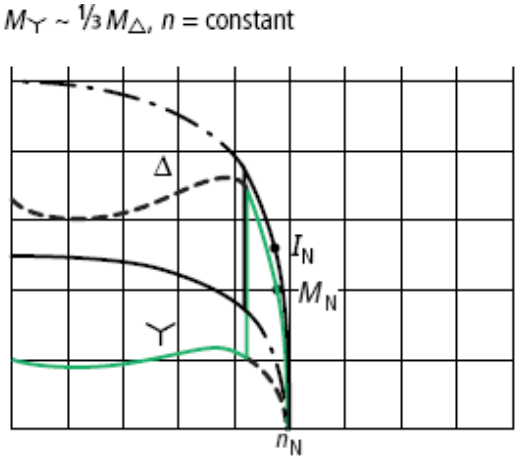


napon motora

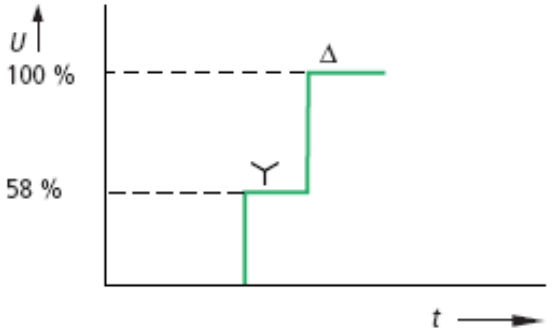


UPUŠTAČ “zvezda-trougao” (elektro mehanički)

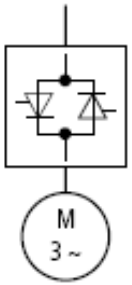


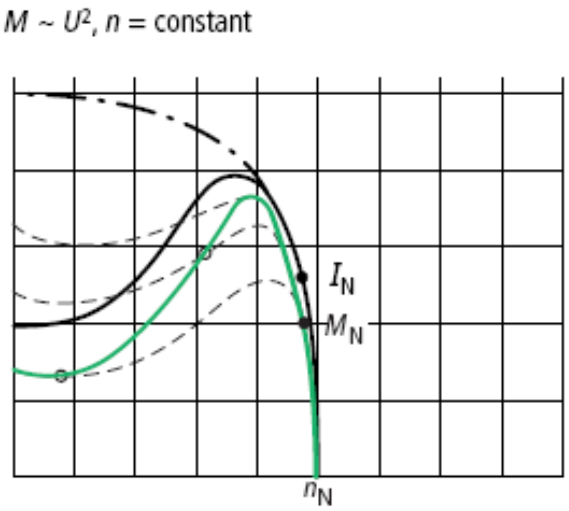


napon motora

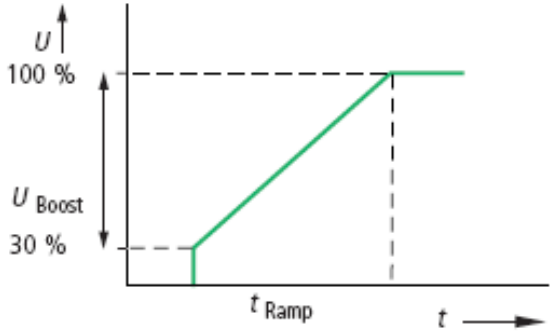


ELEKTRONSKI UPUŠTAČ (naizmenični podešavač napona-antiparalelna tiristorsk grupa)



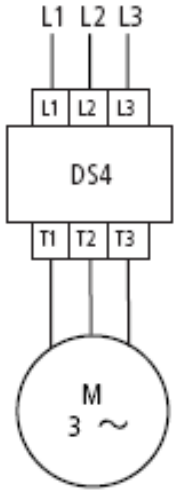


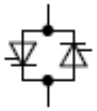
napon motora



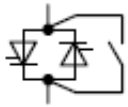
podešljivi su
napon starta U_{boost} i
vreme rampe t_{ramp}

TROFAZNE VARIJANTE TIRISTORSKIH UPUŠTAČA (JEDNOPOLNA ŠEMA)

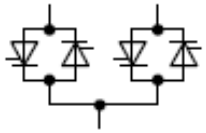




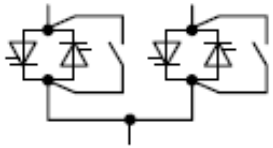
ANTIPARALELNA VEZA TIRISTORA U SVAKOJ FAZI



ANTIPARALELNA VEZA TIRISTORA U SVAKOJ FAZI,
SVAKA OD GRUPA IMA “BY-PASS” SA PREKIDAČEM
KAD SE ZAVRŠI STARTOVANJE PREKIDAČ PRESPAJA TIRISTORSKU GRUPU, TAKO DA SE SMANJUJU ZNAČAJNO DISIPACIONI GUBICI
OTPOR PREKIDAČA ~ 1m Ω -3mΩ
PAD NAPONA TIRISTORU 1V-2V

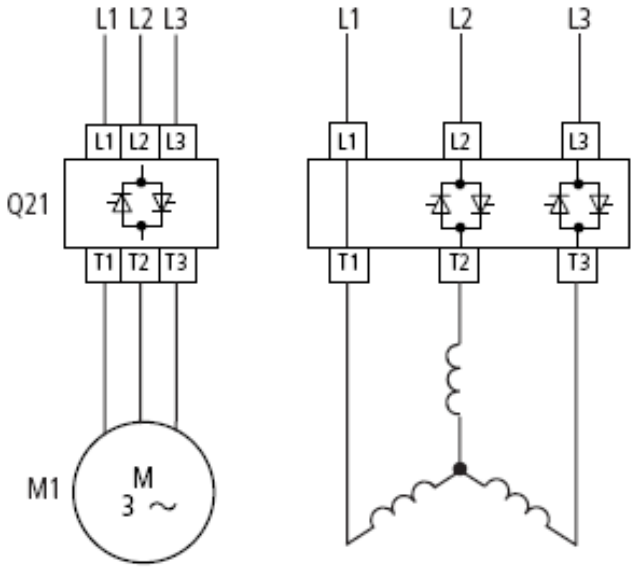


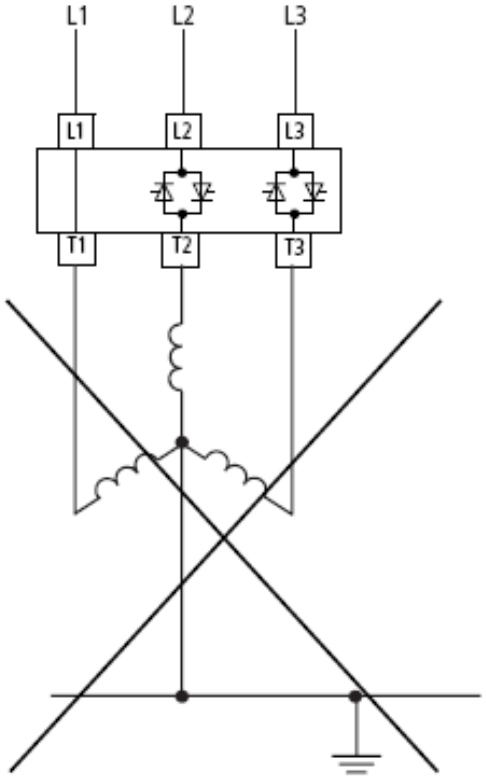
DVE ANTIPARALELNE VEZE TIRISTORA
ZA REVERZIRANJE MOTORA



DVE ANTIPARALELNE VEZE TIRISTORA
ZA REVERZIRANJE MOTORA, SVAKA OD
GRUPA IMA “BY-PASS” PREKIDAČ

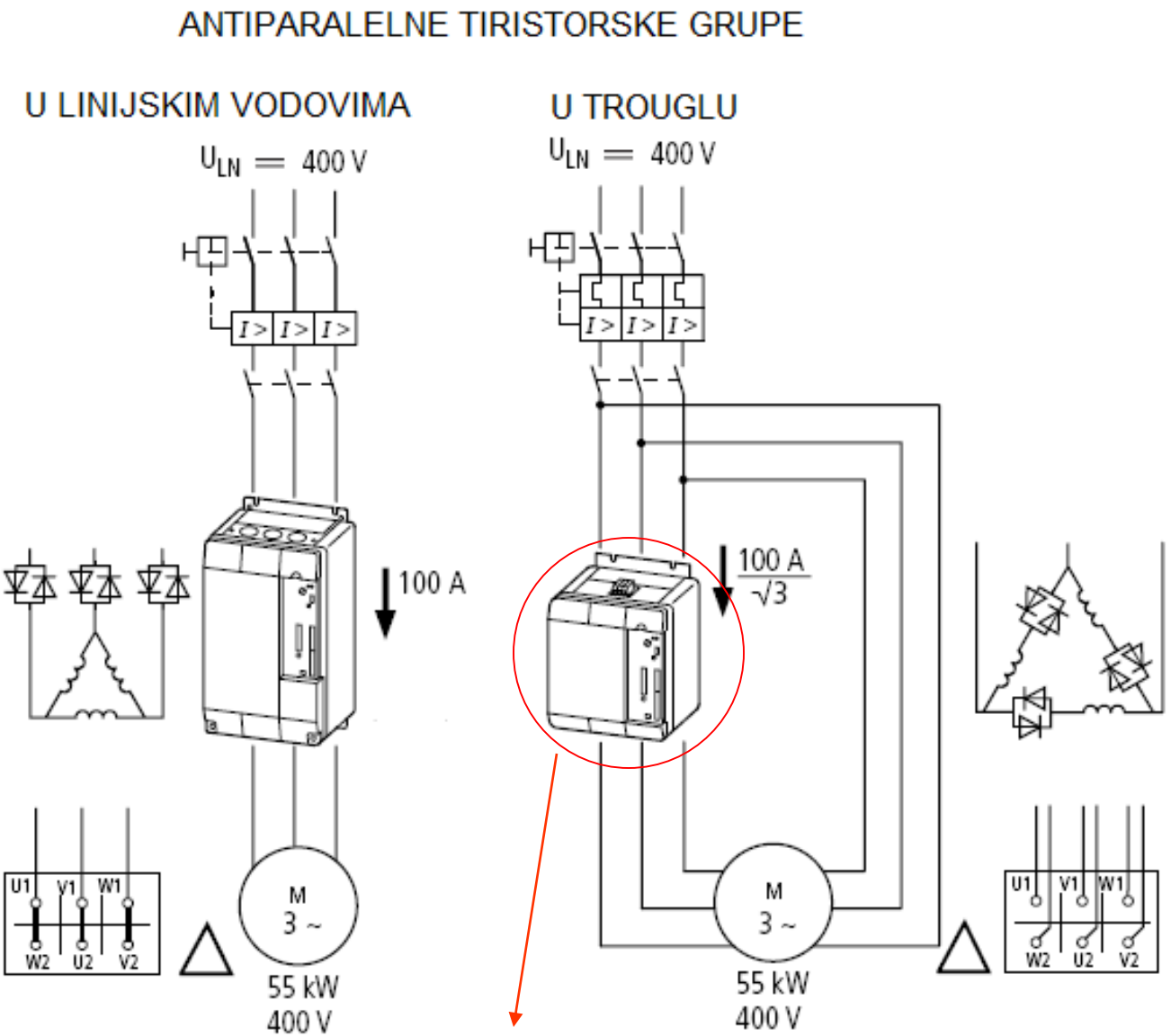
VARIJANTA TROFAZNOG UPUŠTAČA SA TIRISTORSKIM GRUPAMA U DVE FAZE





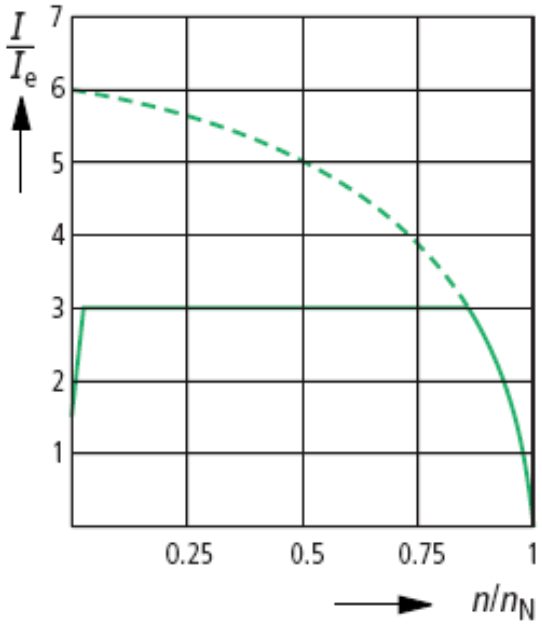
NIJE DOZVOLJENO!!!!!
ZAŠTO??????

VARIJANTA TROFAZNOG UPUŠTAČA SA TIRISTORSKIM GRUPAMA U SVE TRI FAZE



TIPIČNE KARAKTERISTIKE ASINHRONOG MOTORA PRI STARTU SA KORIŠĆENJEM TIRISTORSKOG "SOFT" STARTERA

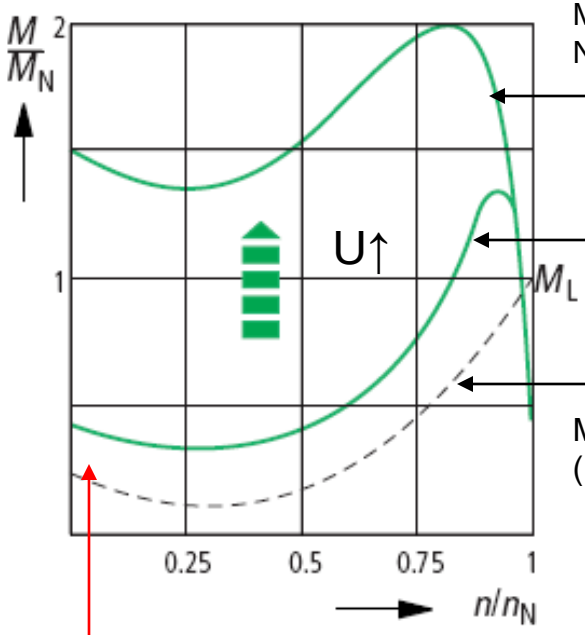
STRUJA



I/I_e: 1...5

OGRANIČENJE POLAZNE STRUJE

MOMENAT



M/M_N: 0.15...1

MOMENAT PRI PUNOM NAPONU

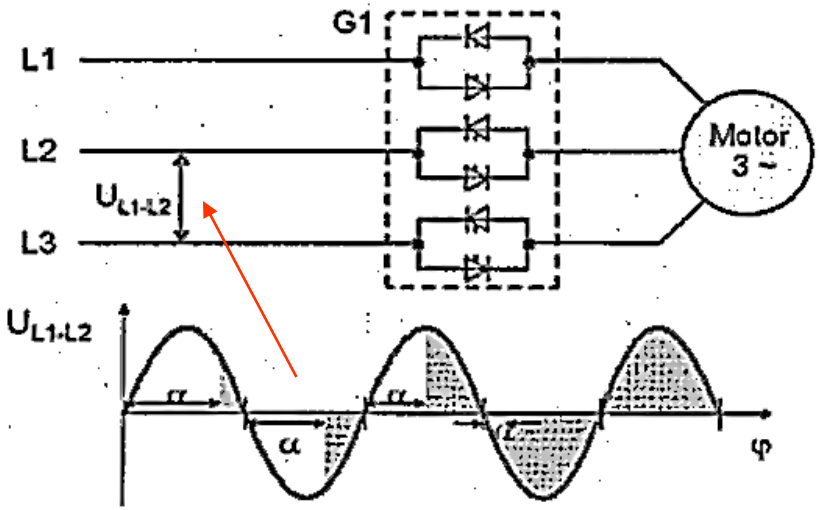
MOMENAT PRI SNIŽENOM NAPONU

MOMENAT OPTEREĆENJA (RADNE MAŠINE)

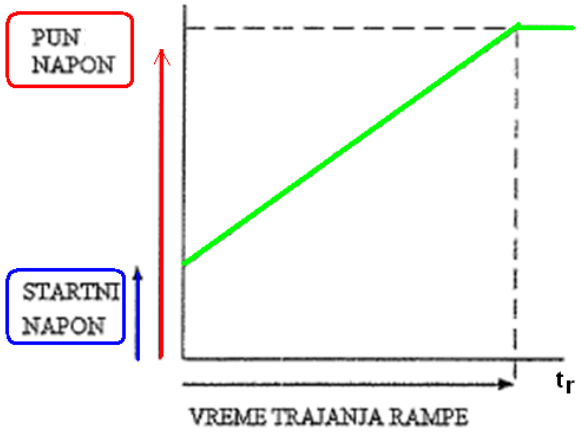
MOMENAT JE PROPORCIONALAN U^2

MANA: POLAZNI MOMENAT JE MALI

LINIJSKI NAPON I NJEGOVA ZAHTEVANA PROMENA

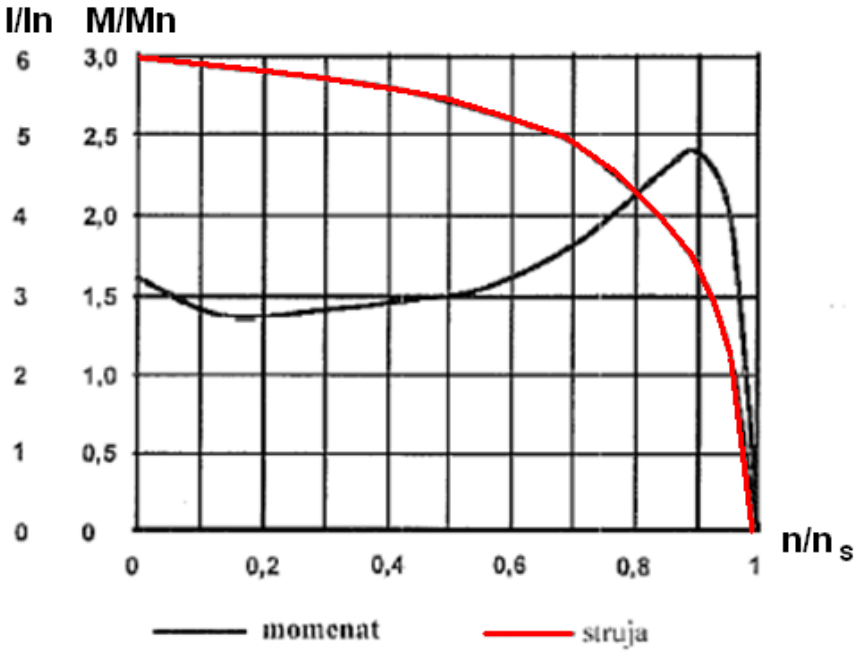


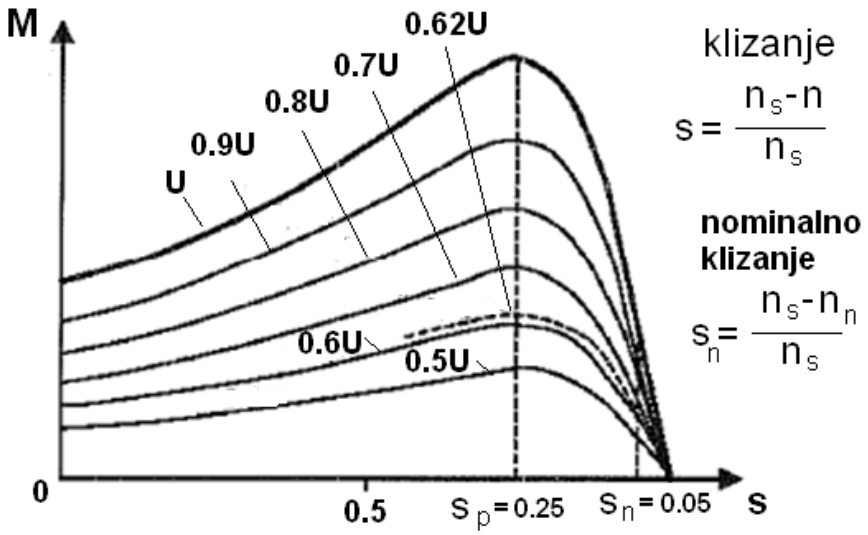
-Talasni oblik linijskog napona trofaznog asinhronog motora uz korišćenje regulacije napona.
-Promenom ugla regulacije menja se efektivna vrednost napona na priključcima motora



-Promena napona statora motora po unapred zadatoj vremenskoj rampi.
-Uvek postoji neki početni napon, da bi se ostvario polazni momenat.

NEKE TIPIČNE KARAKTERISTIKE POGONA "SOFT" STARTER +ASINHRONI MOTOR

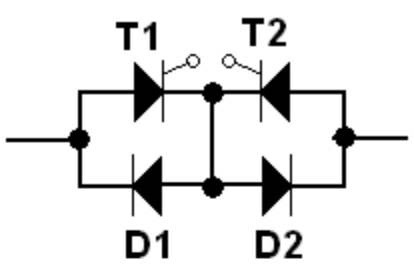




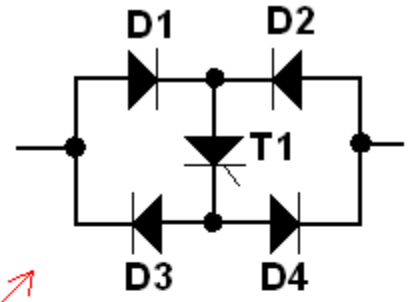
-Tipični grafik momenta i struje asinhronog motora u zavisnosti od broja obrtaja prilikom direktnog puštanja motora u praznom hodu.
-Polazna struja skoro 6 puta veća od nominalne.

-Grafik momenta motora u zavisnosti od vrednosti napona napajanja
-Uočava se uticaj promene efektivne vrednosti napona napajanja na momenat motora.
-Uticaj na struju motora, pri nekom zadatom klizanju, je direktno proporcionalan.

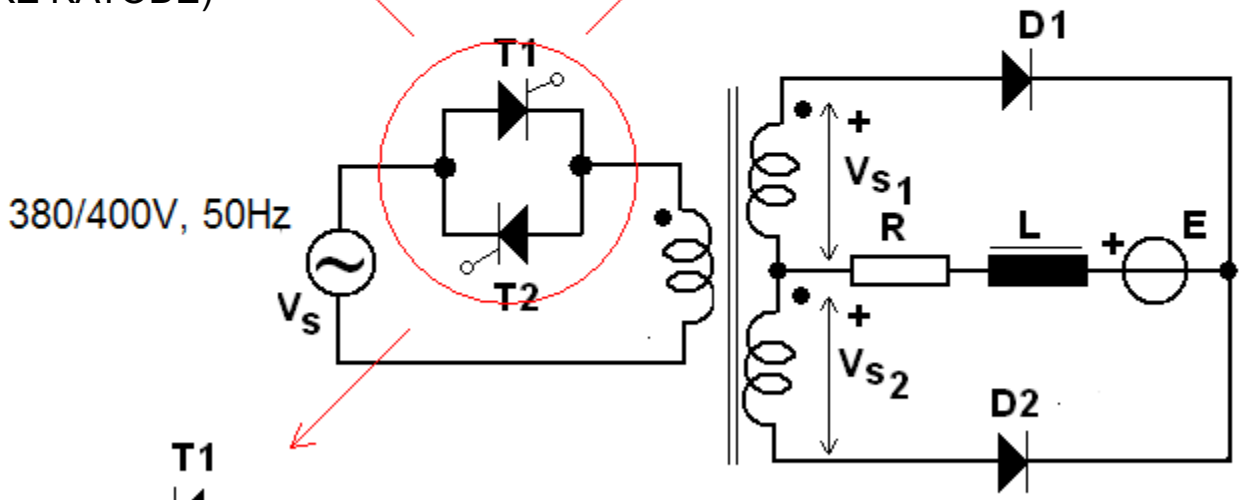
ISPRAVLJAČI ZA GALVANIZACIJU (OPCIJE TIRISTORSKE GRUPE)

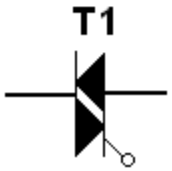


SA DVA
TIRISTORA
(ZAJEDNIČKE KATODE)



SA JEDNIM
TIRISTOROM



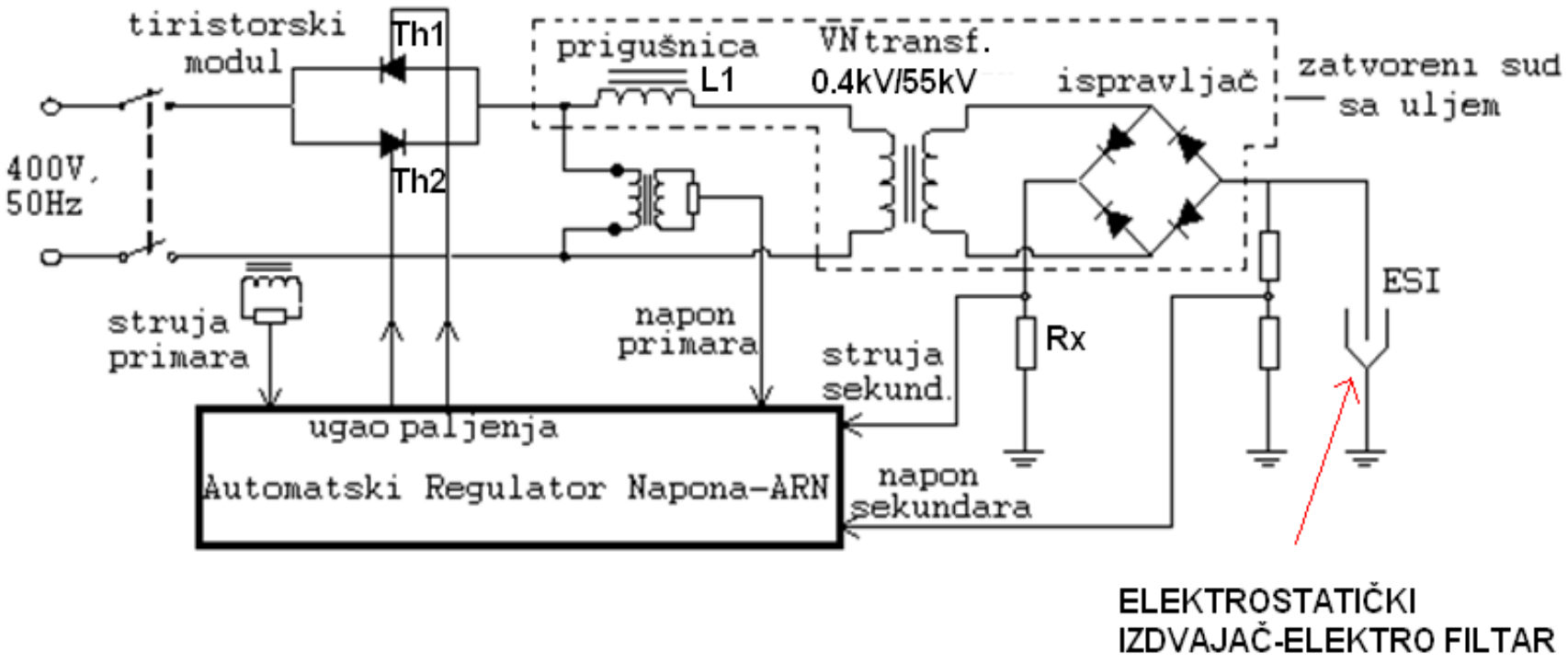


TRIAC
ZA MANJE
STRUJE DO 50A

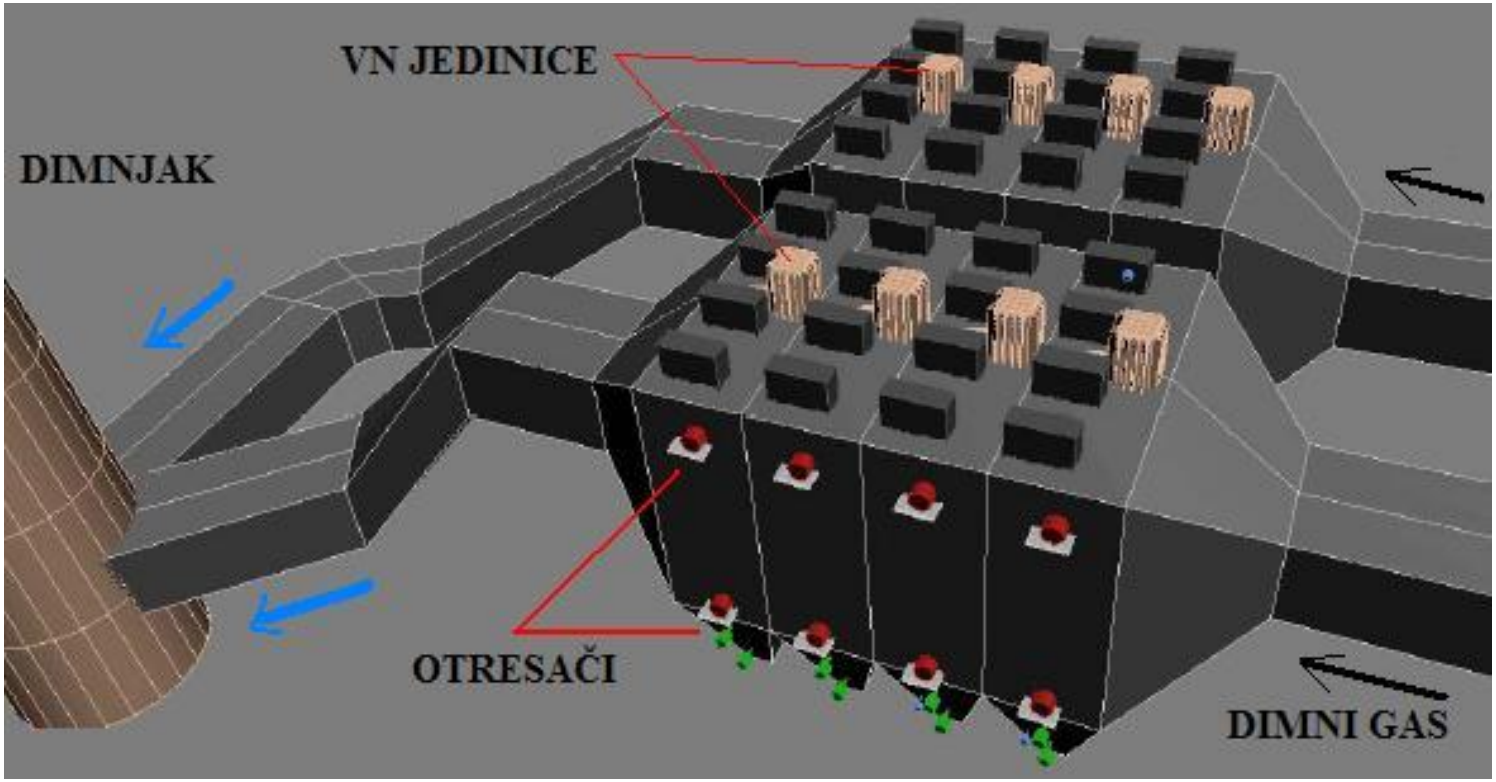
TIPIČNO: V_{s1}, V_{s2} = 10V,~

MOGU SE KORISTITI U TROFAZNIM ILI MONOFAZNIM VEZAMA

TIRISTORSKI PRETVARAČ za regulaciju napona elektrostatičkih filtara



•Napon napajanja je 0.4kV; Regulacija se vrši antiparalelnom vezom tiristora Th1 i Th2.
•Podešavanjem njihovog ugla paljenja α, visoki jednosmerni napon na elektrodama filtra se drži tik ispod proboja. Prigušnica L1 i otpornik Rx ograničavaju struju kratkog spoja (kad se desi proboj ili kvar).
•Diodni ispravljač je napravljen sa četiri grupe redno vezanih dioda (zajedno sa paralelnim elemantima za izjednačavanje potencijala duž lanaca dioda).
•Redno vezane diode , prigušnica L1 i VN transformator se nalaze u istom sudu sa uljem.

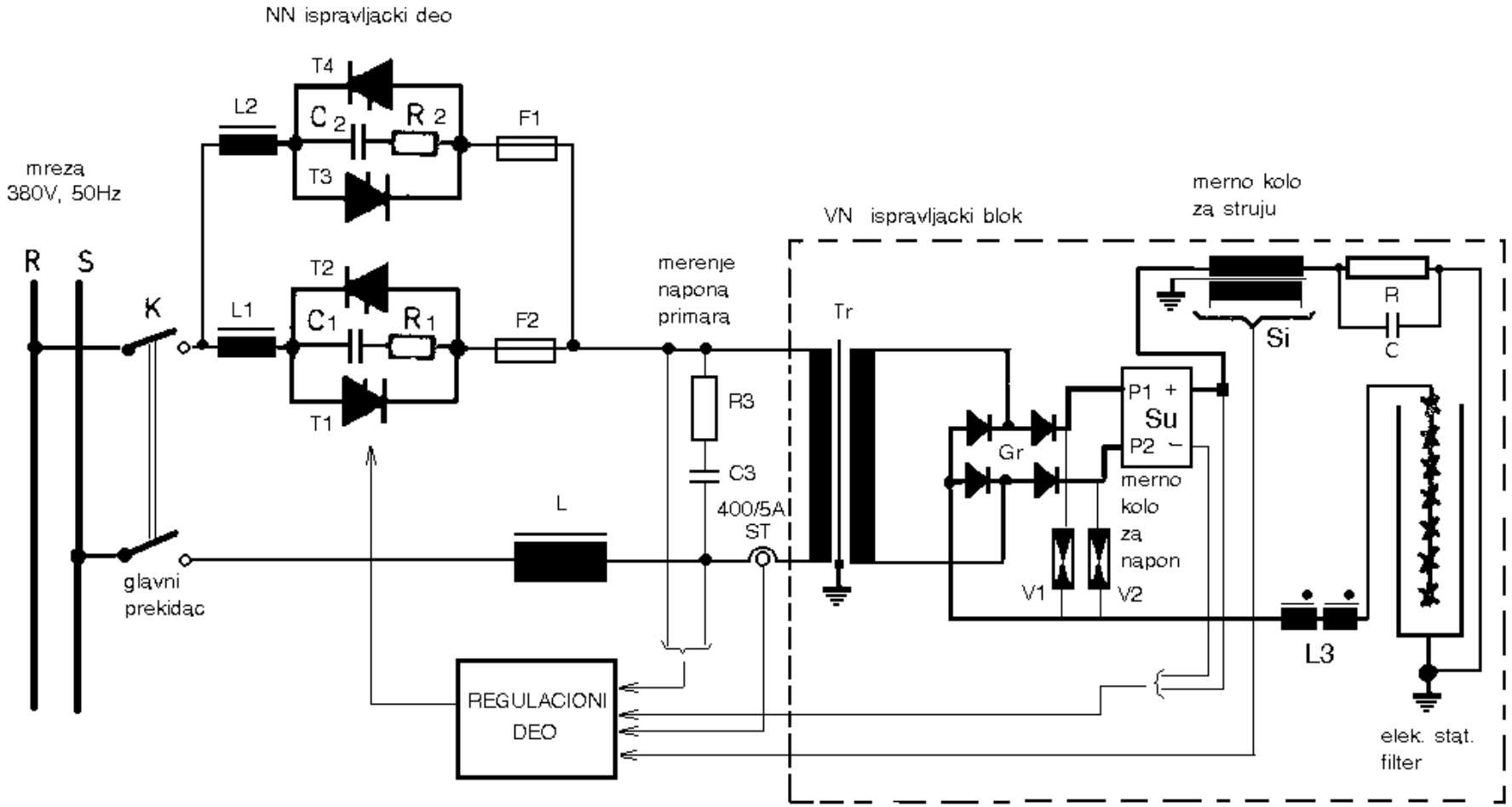


-Elektrostatički filteri su komore kroz koje prolazi dimni gas iz ložišta kotla i on je pun letećeg pepela

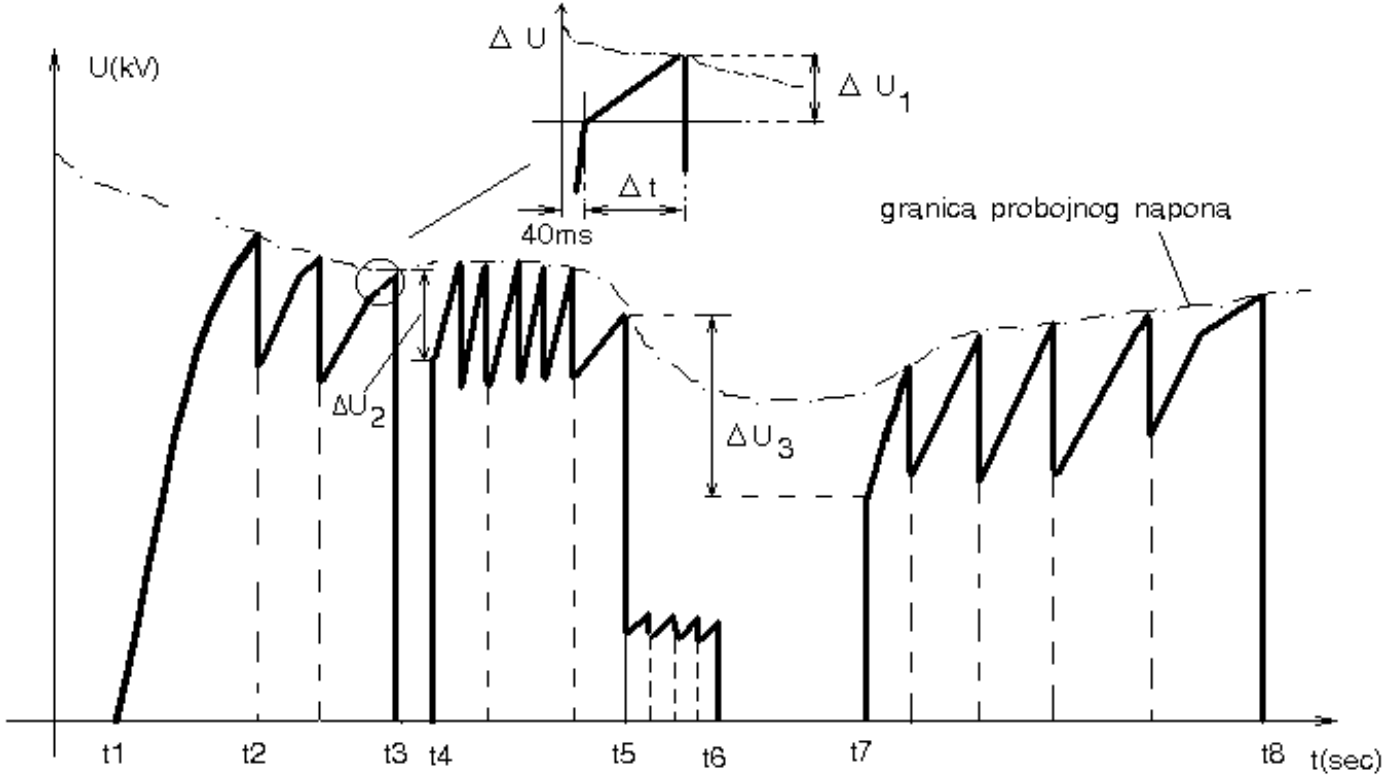
-Sadrže viskonaponske jedinice za izdvajanje čestica u dimnom gasu (oko 60% sastava dimnog gasa čine čestice, ostalo su oksidi sumpora, azota i sl.)

-Sadže otresače za otresanje izdvojenog pepela sa elektroda

PRAKTIČNA REALIZACIJA UPRAVLJAČKOG DELA ELEKTROSTATIČKIH FILTARA

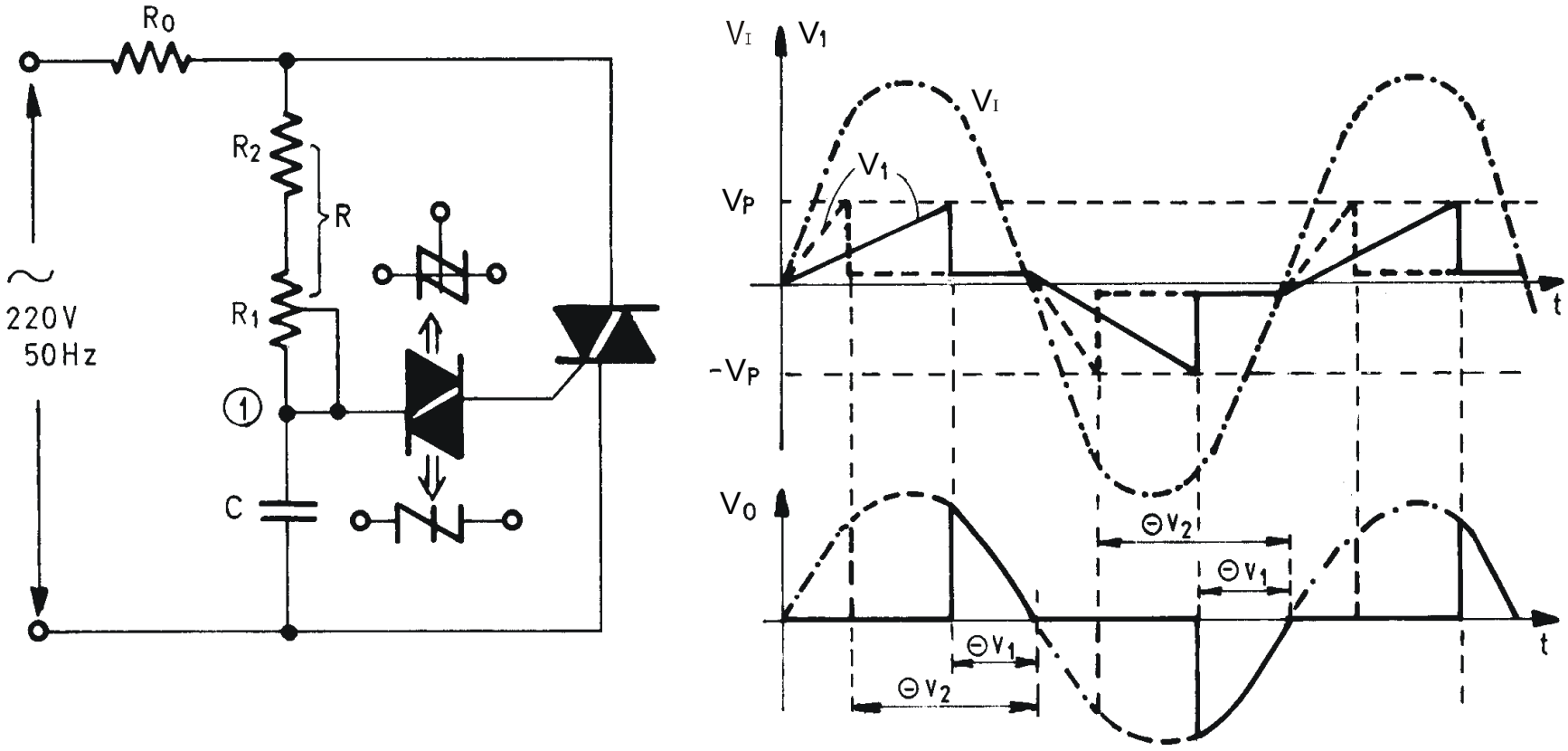


NAPONSKA REGULACIJA i DETEKCIJA KORONE



•Nakon uključenja ispravljača (*trenutak t1*) , napon vrlo brzo postiže granicu probojnog napona.
•U trenutku *t2* dolazi do preskoka, pa se izlazni napon spušta za regulisanu vrednost *(-dU/dt*).
•Vremenski interval *t2-t1* predstavlja vreme puštanja filtra u pogon.
• Nakon toga napon ponovo raste do granice proboja regulisanom brzinom (+*dU/dt*).
•Ako se desi da se granica probojnog napona smanji, regulisanim ispravljačem se osigurava rad u blizini probojnog napona.
• U trenutku *t3* dolazi do strujnog preopterećenja filtra,što se detektuje u struji na primarnoj strani (*I>1,2In*), kada dolazi do isključenja i trajanje prekida usled prekoračenja za oko 80ms (*interval t3-t4*) i redukcije napona u odnosu na to prekoračenje za *ΔU2*.
• U trenutku *t5* dolazi do formiranja električnog luka između filtarskih elektroda, koji se održava do trenutka *t6*. Ovo trajanje je reda veličine *200ms*. Nakon ovog vremenskog intervala, regulator obezbeđuje spuštanje izlaznog napona na nulu i vrši se deblokiranje rada ispravljača (interval *t7-t6*).
•U ovom intervalu se obezbeđuje gašenje električnog luka procesom dejonizacije. Nakon ovog intervala se ponovo podiže napon i uspostavlja normalni režim rada. Novouspostavljena vrednost napona je određena pomenutim uslovima u filtru i ona je niža od prethodne vrednosti tako da *ΔU3* predstavlja redukciju nakon gašenja električnog luka.

AC/AC FAZNO UPRAVLJANJE SA TRIJAKOM: Okidno kolo s dvosmernim regenerativnim prekidačem

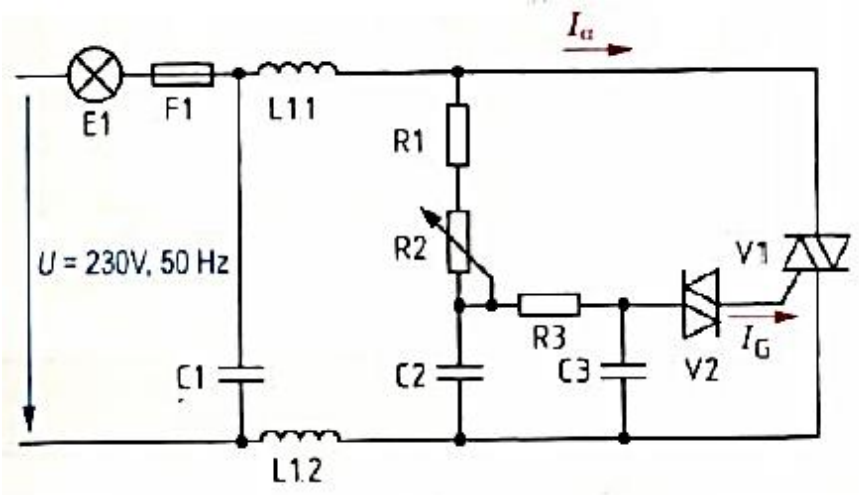


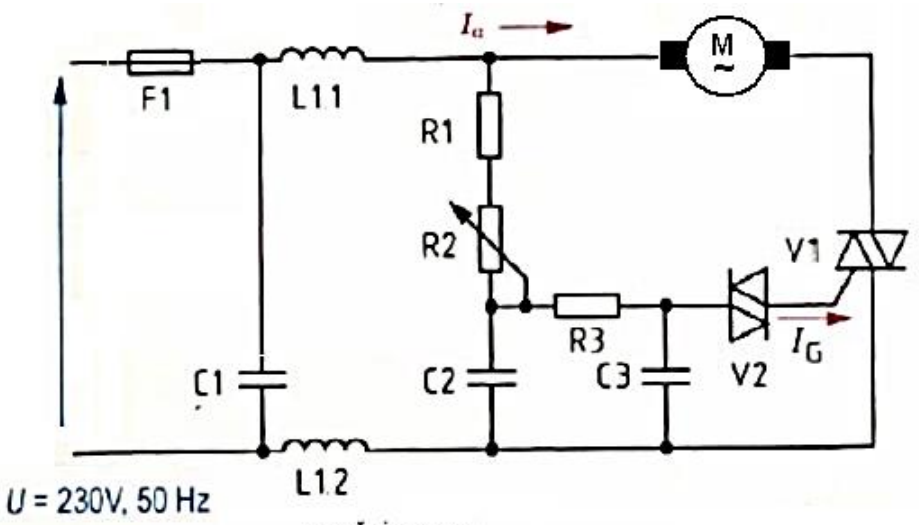
Talasni oblici napona na ulazu V_I, *opterećenju* V_o *i kondenzatoru* V_1.

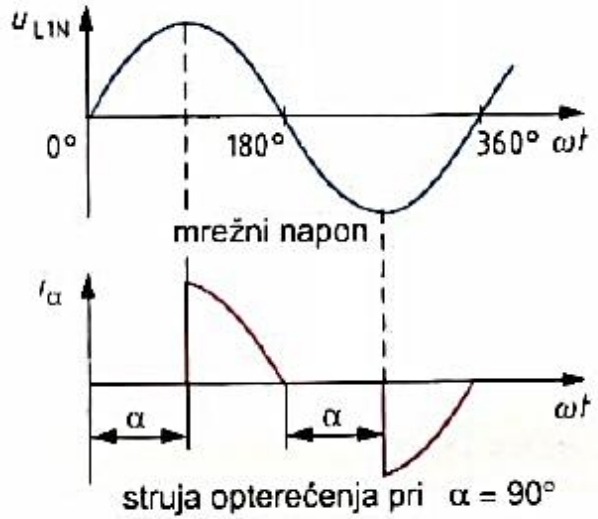
Faznim upravljanjem uključuje se napon na opterećenju pri određenim faznim uglovima. Tok snage se može podesiti između 0-100%. Potrošači iznad izvesnih graničnih snaga smeju biti u pogonu samo uz posebnu dozvolu, jer fazno upravljanje proizvodi povratna dejstva na mrežu –reaktivna snaga

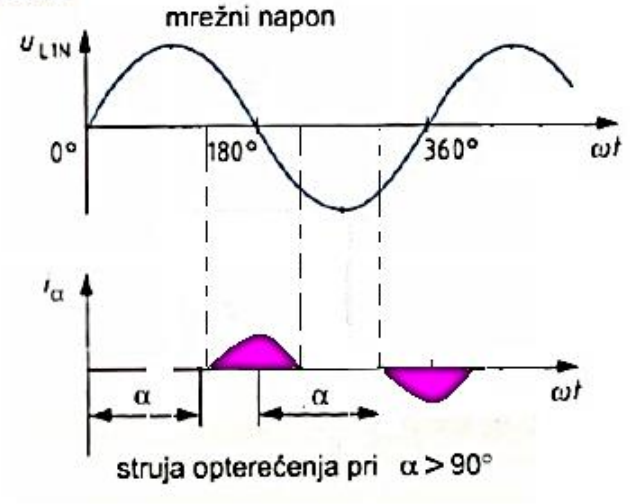
AC/AC FAZNO UPRAVLJANJE

OSVETLJENJEM I KOMUTATORNIM MOTOROM



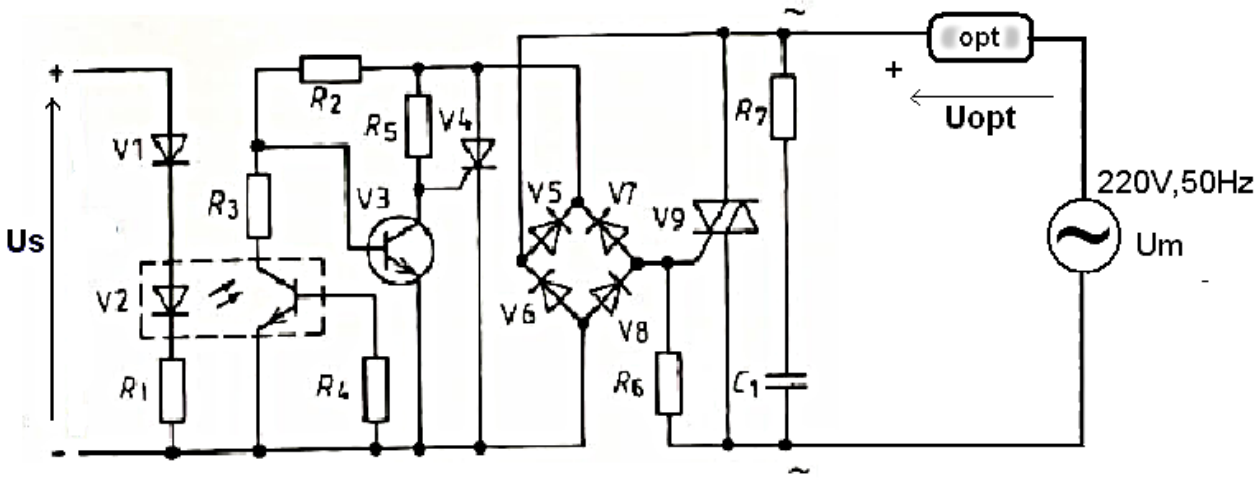


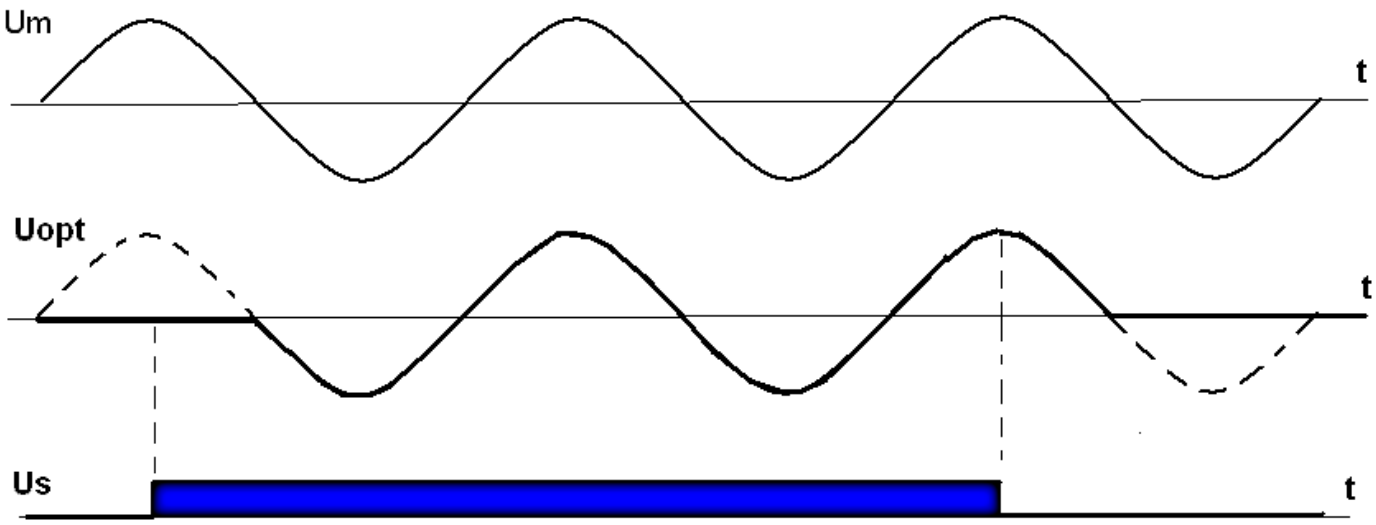




NULTA SKLOPKA

Uključuje opterećenje (OPT) pri prolasku napona kroz nulu
Upravljanje optokaplerom
Elektronski poluprovodni releji



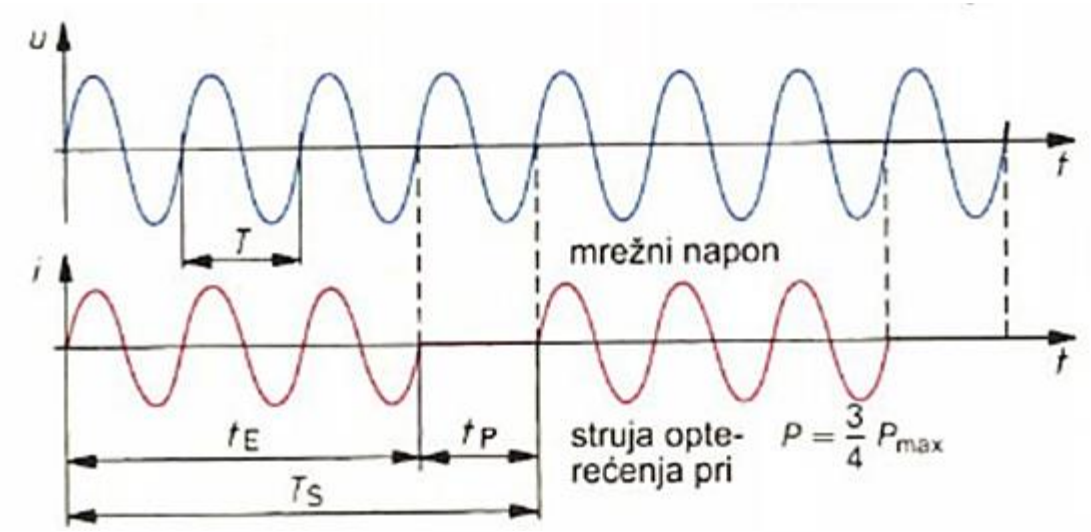


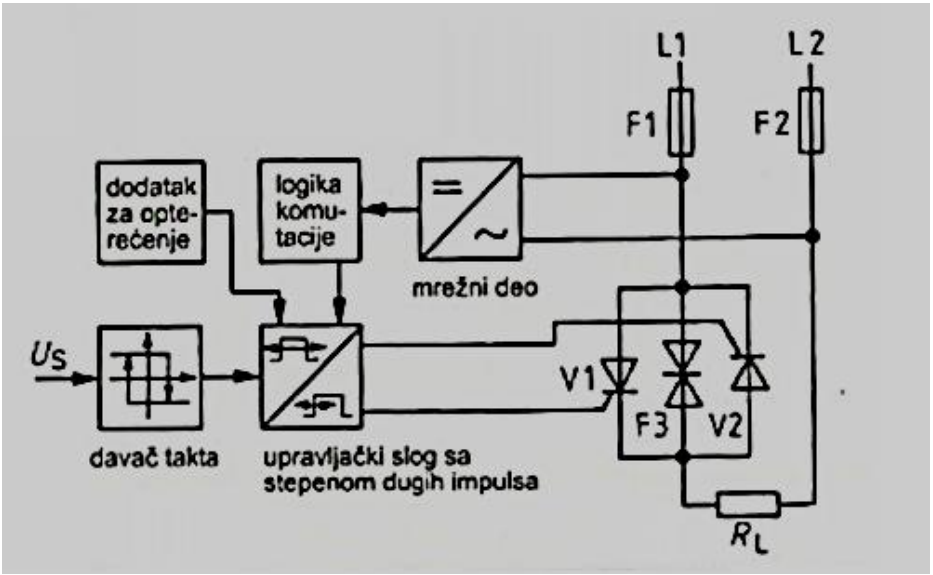
Prednosti:
-galvansko odvajanje upravljačkog kola i opterećenja
-uključivanje bez "odskakivanja"
-dug vek upotrebe
-neznatne radio smetnje
-velika brzina uključivanja

PRIMER:
Elektronski relej za AC struje 1-40A
Upravljački napon 3-30V DC

UPRAVLJANJE PAKETOM OSCILACIJA

Nulte sklopke koje uključuju opterećenje nakon podešenog broja perioda naizmeničnog napona deluju kao da su upravljane paketom oscilacija, odnosno kao puno-talasno upravljane.Srednja snaga opterećenja može se podešavati u opsegu 0-100%.





PREDNOSTI:

-nema izobličenja u mreži jer je struja sinusoidna

-nema reaktivne snage, te je faktor snage jednak 1

NEDOSTACI:

-nije prikladno za rasvetu zbog treperenja

-nije prikladno za pogone zbog trzanja

PRIMENA: regulacija grejanja I temperature

(peći za topljenje, sušionice, mašine za žarenje žice i odlivaka, mašine za obradu plastike)

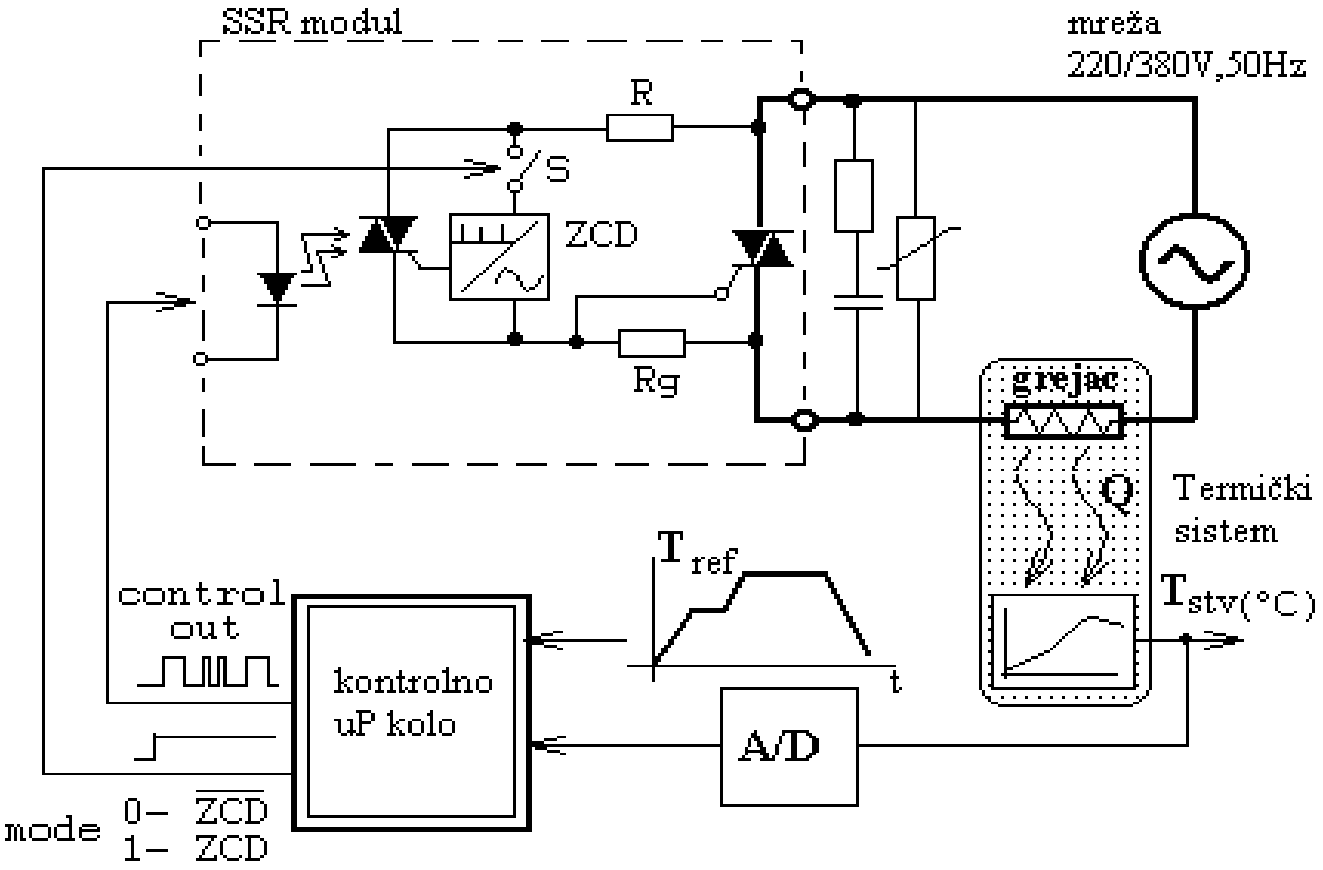
$T=1/f$

$T_S=t_E+t_P$

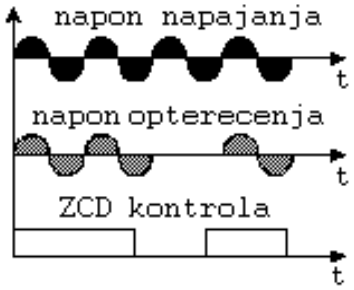
$P=(t_E/T_S)\cdot P_{max}$

$P_{max}=U^2/R$

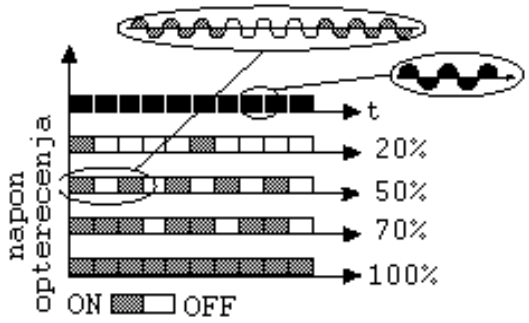
MIKROPROCESORSKA KONTROLA ELEKTRO-OTPORNOG ZAGREVANJA METALNIH DELOVA -principijelno električno kolo



MOGUĆI NAČINI KONTROLE ELEKTRO-OTPORNOG ZAGREVANJA



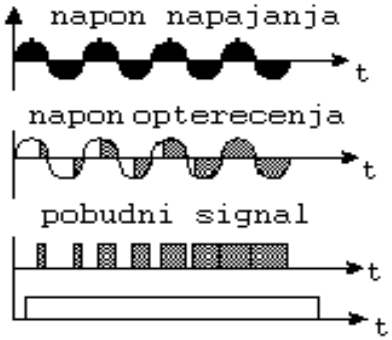
A) Nulto Prekidanje



B) ON-OFF kontrola

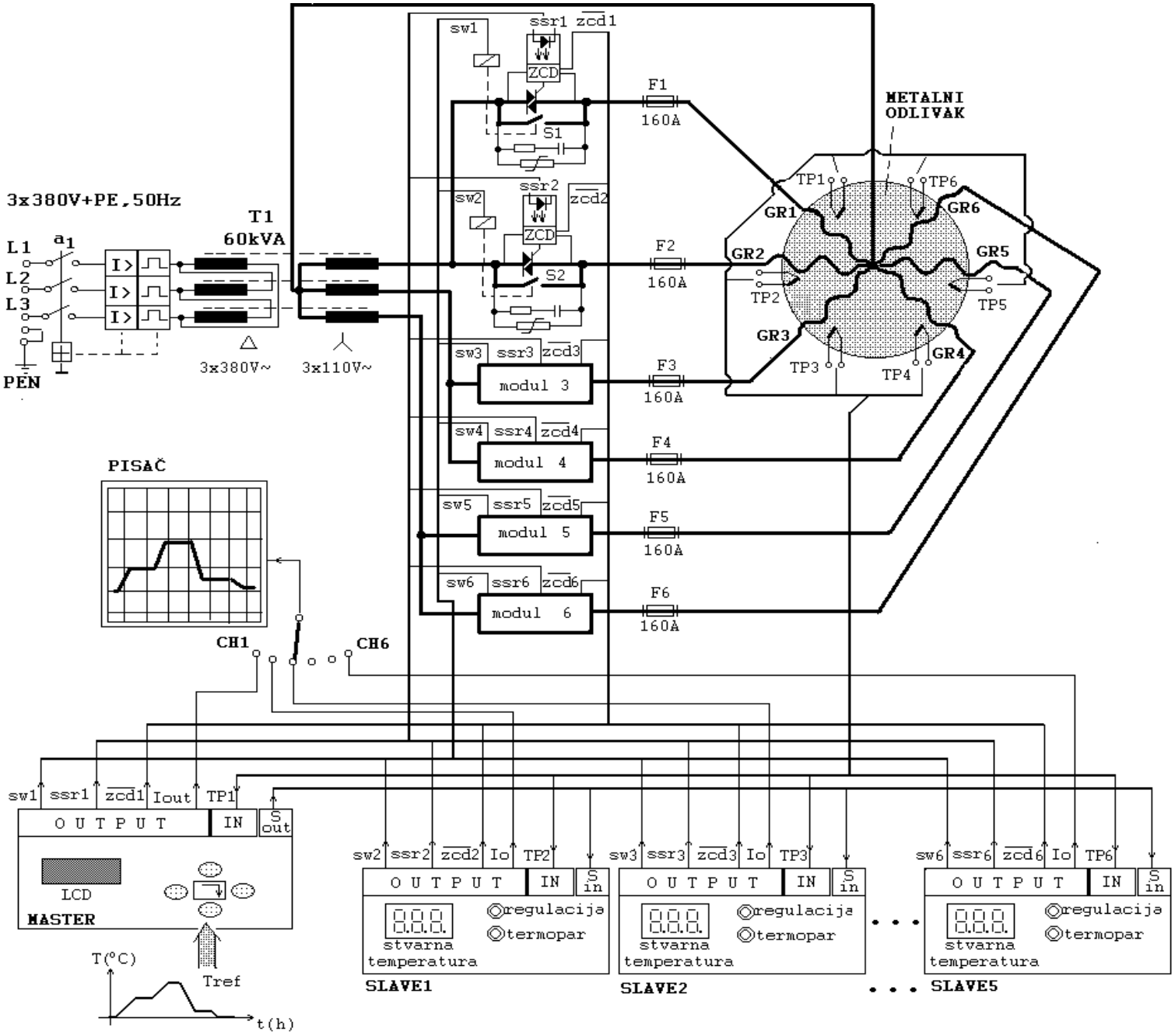
C) Jednocilusna kontrola

D) Fazna kontrola



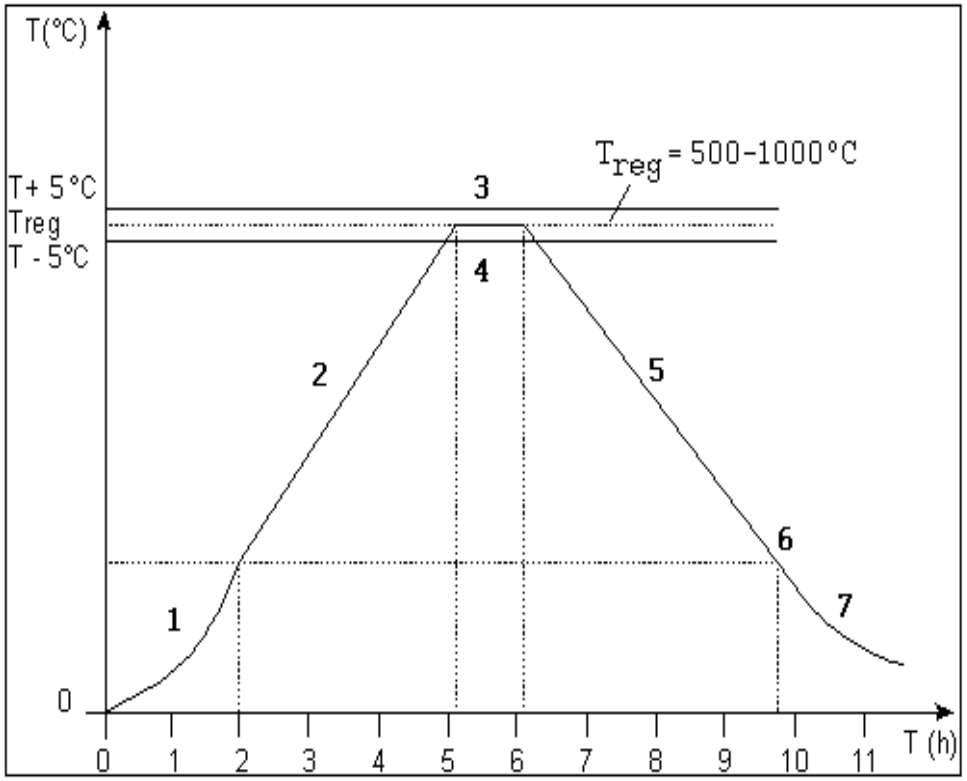
Soft Start+ ON-OFF kontrola

KONKRETNA REALIZACIJA



TIPIČNA KARAKTERISTIKA TERMIČKE OBRADE ŽARENJEM METALNIH ODLIVAKA (na pr. lopatica mlinova za ugalj na termoelektranama)

temperaturno-vremenski dijagram



1.Maksimalna temperatura zagrevanja bez regulacije

2.Brzina kontrolisanog zagrevanja (tipično je +100°C/h)

3.Maksimalna emperatura kontrolisanog zagrevanja (temperatura na kojoj se metalni deo žari zadato vreme)

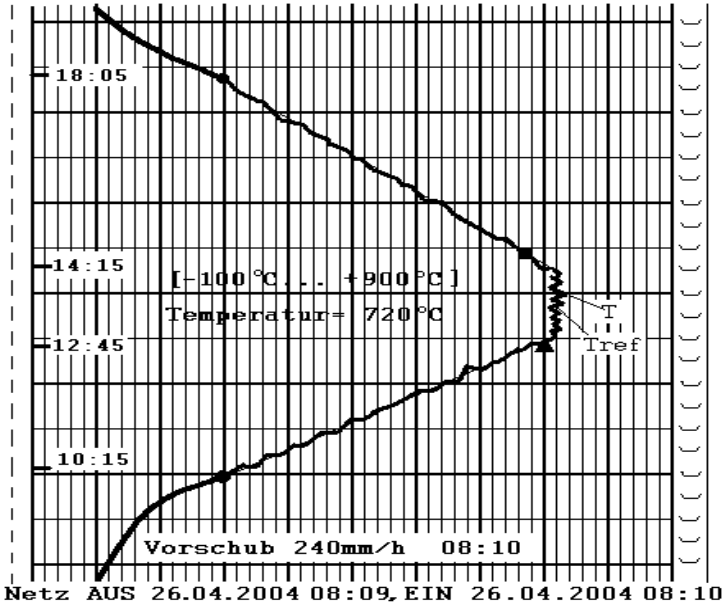
4.Vreme trajanja procesa žarenja

5.Brzina kontrolisanog hlađenja (tipično je -200°C/h)

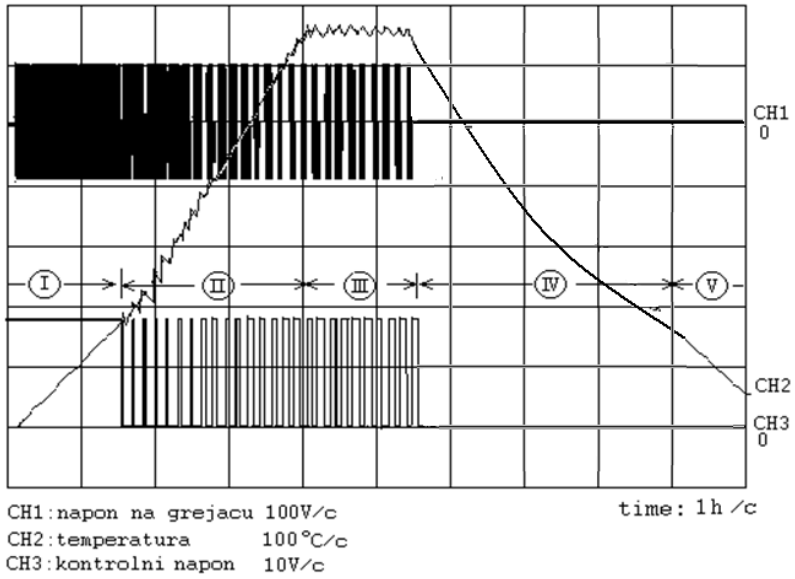
6. Minimalna temperatura kontrolisanog hlađenja

7. Slobodno hlađenje do sobne temperature

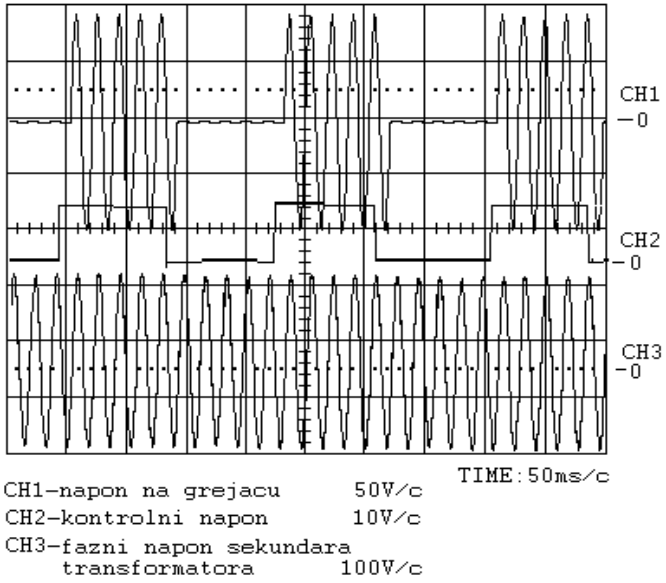
EKSPERIMENTALNI SNIMCI



Zapis temperaturnog profila zagrevanog uzorka na industrijskom pisaču

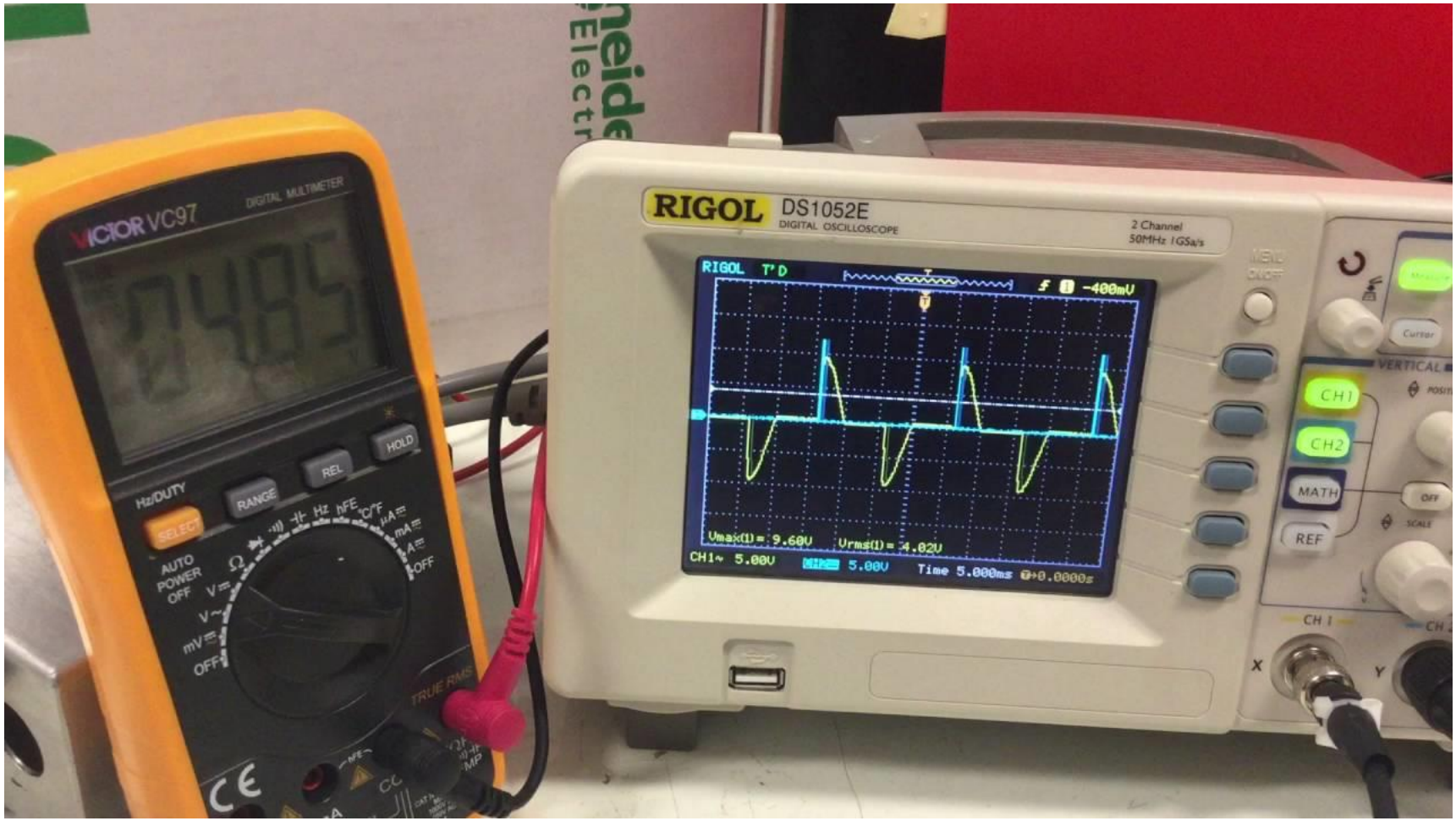


Zapis temperaturnog profila zagrevanog uzorka na X-Y pisaču



Osciloskopski snimak oblasti III (AC/AC kontrola paketa oscilacija)

HVALA NA PAŽNJI !!!



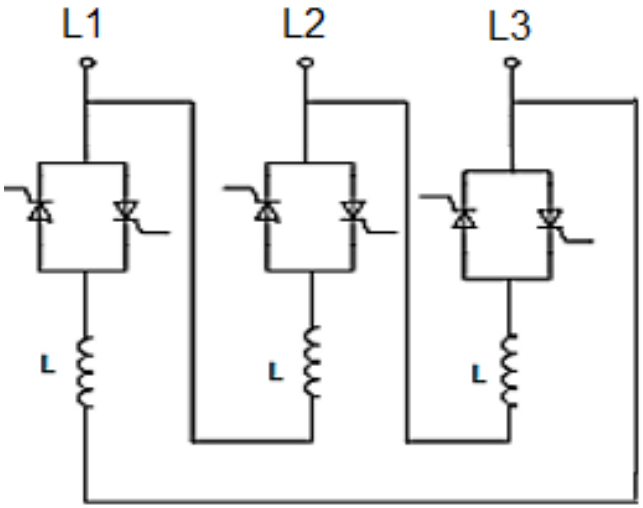
NOVEMBAR 2020

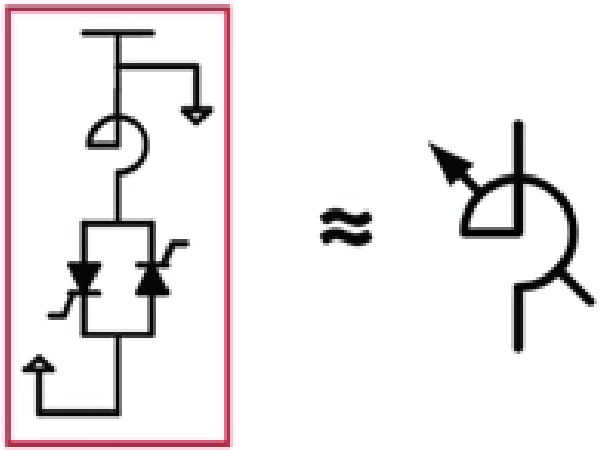
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NET 2020/2021

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

NAPAJANJE INDUKTIVNOG POTROŠAČA SA NAIZMENIČNIM (AC/AC) PODEŠAVAČEM NAPONA



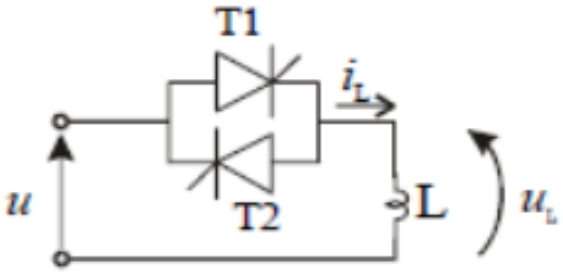


Predmetni profesor: Dr Željko Despotović

UVOD

- U ovom predavanju će biti reči o topologiji i nekim teorijskim razmatranjima AC/AC podešavača napona sa čisto induktivnim opterećenjem
- Ova topologija ima primenu u kontinualnim tiristorskim kompenzatorima reaktivne snage
- Pokazaće se da se ovom topologijom dobija ustvari kontinualno kontrolisana reaktansa
- U predavanju će biti date teorijske osnove za proračun jednog ovakvog tipa pretvarača
- Na kraju će biti dat konkretan praktični primer u formi zadatka

TEORIJSKE JEDNAČINE



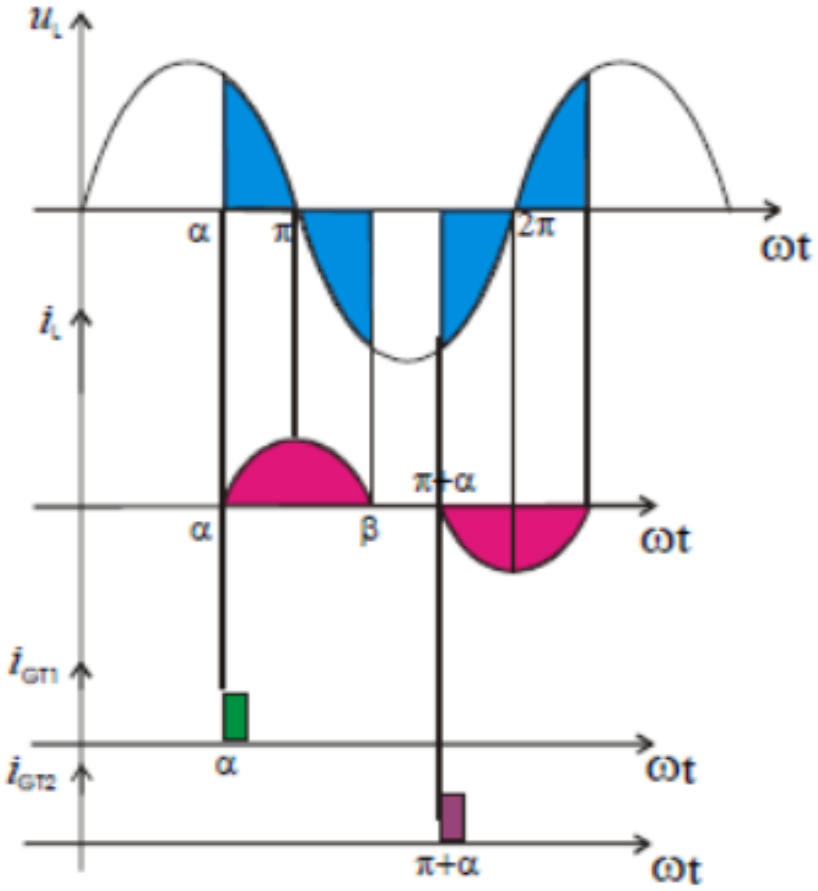
$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t$$

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

integracijom

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^{t} u_L(t) \cdot dt$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^{t} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \cdot dt$$



REŠAVANJE INTEGRALA

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^{t} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \cdot dt$$ uvodeći smenu $\omega t = x$

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \cdot \int_{\alpha}^{x} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin x \cdot dx$$

rešenje inegrala

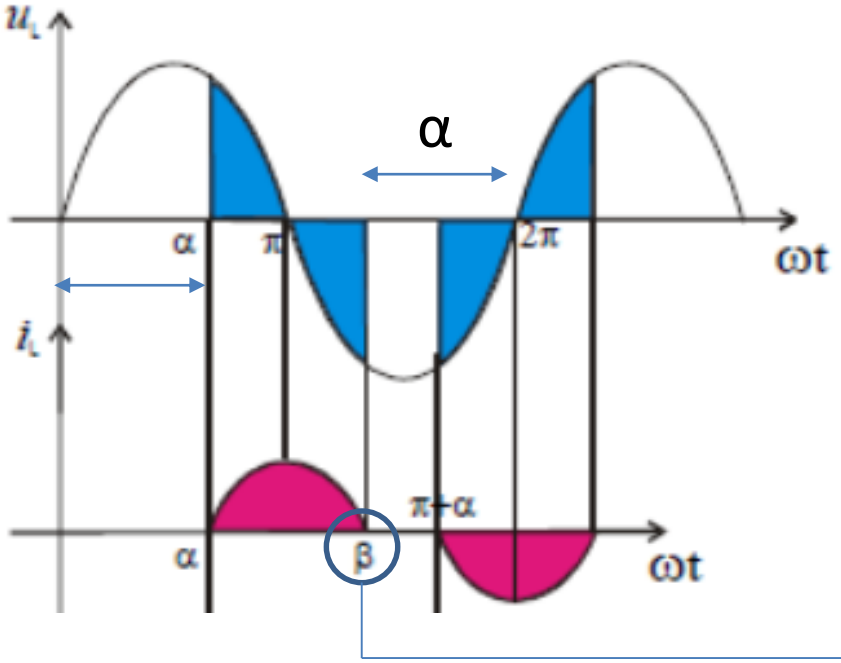
$$i_L = \frac{1}{\omega L} \cdot \int_{\alpha}^{x} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin x \cdot dx = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (-\cos x)_{\alpha}^{x} = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (\cos \alpha - \cos x)$$

Odnosno vremenska promena struje opterećenja je data jednačinom :

$$i_L(t) = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

pri uslovu:

$$2\pi - \alpha \geq \omega t \geq \alpha$$



$$i_L(t) = \frac{1}{\omega L}\sqrt{2}\cdot U\cdot(\cos\alpha - \cos\omega t)$$

$$2\pi - \alpha \geq \omega t \geq \alpha$$

β

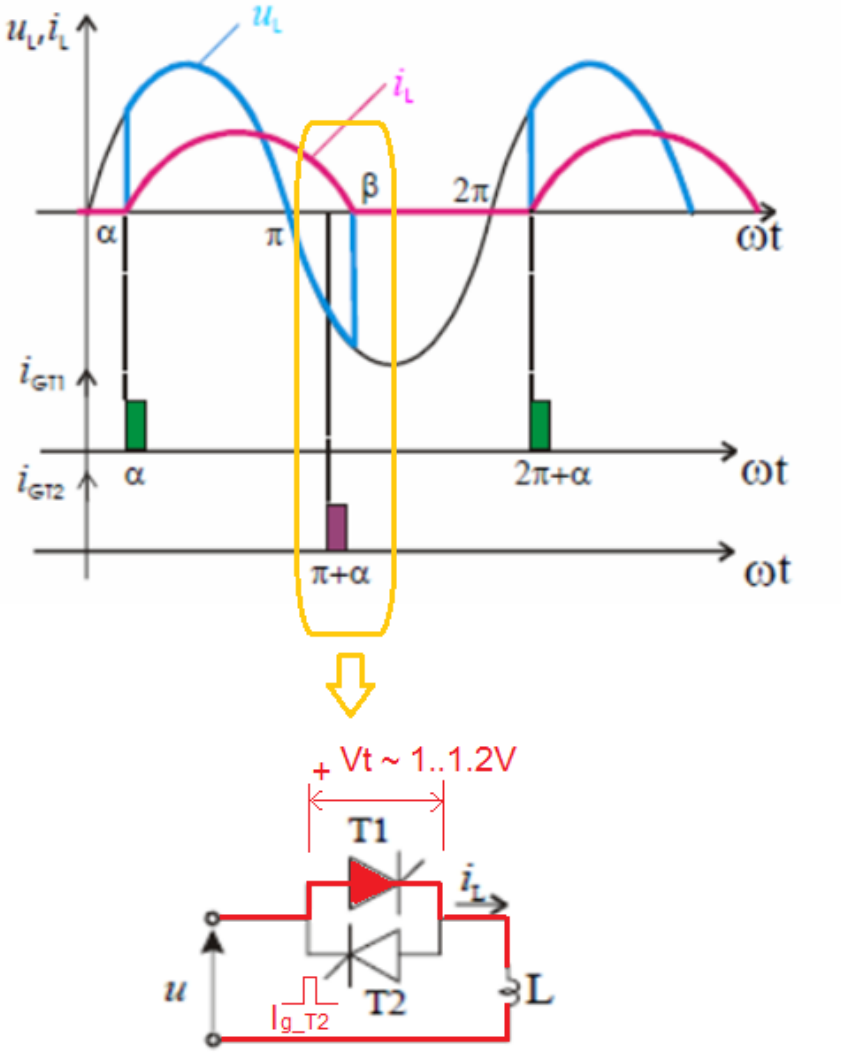
$\pi \geq \alpha \geq \pi/2$ Interval koji predstavlja upravljivu oblast pretvarača

$0 \leq \alpha \leq \pi/2$ U ovom intervalu nije moguće upravljati pretvaračem tako da se ovaj interval naziva neupravljiva oblast pretvarača

Ovo prethodno rečeno važi samo u slučaju induktivnog opterećenja!!!!

OBJAŠNJENJE (NE) UPRAVLJIVOSTI PRETVARAČA

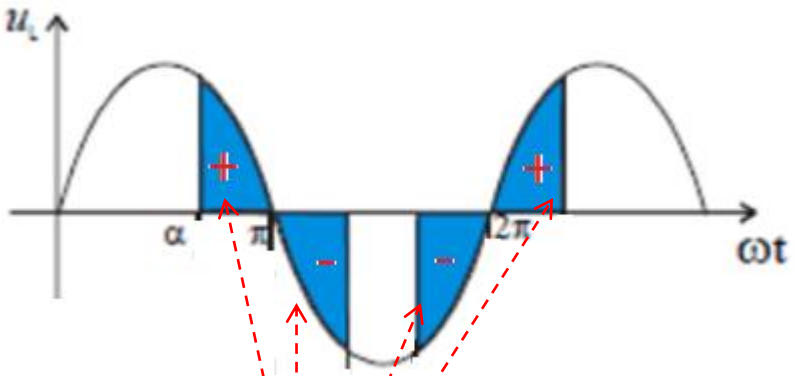
-Kod induktivnog opterećenja vremenski porast struje traje koliko i vremenski pad struje.
-Vreme punjenja induktivnosti energijom je jednako vremenu pražnjenja induktivnosti, kao što se vidi na slici.
-Pretpostavićemo da je ugao upravljanja manji od π/2=90°, kao i to da provodi tiristor T1.



Tiristor T1 je provodan i na njemu je pad napona ≈ +1V; Tiristor T2 dobija impuls na gejtu Ig_T2, ali obzirom da se ima „produženo“ ptovođenje T1 i obzirom da je napon U_{AK} na T2 negativan i jednak -1V, tiristor T2 neće nikada moći da provede. Dakle struju će provoditi samo T1, ona će imati POLUTALASNI karakter i na opterećenju će se imati JEDNOSMERNA KOMPONENTA STRUJE.

Ova pojava je nepoželjna i može se odraziti na to da magnetno kolo induktivnog potrošača ode u zasićenje. Odlazak u magnetno zasićenje predstavlja režim koji je veoma nepovoljan i koji teži kratkom spoju na opterećenju.
ZAŠTO?

SREDNJA VREDNOST NAPONA NA OPTEREĆENJU JE JEDNAKA NULI!!!!:



EFEKTIVNA VREDNOST NAPONA NA OPTEREĆENJU je ≠ 0

IZRAČUNAVANJE EFEKTIVNE VREDNOSTI:

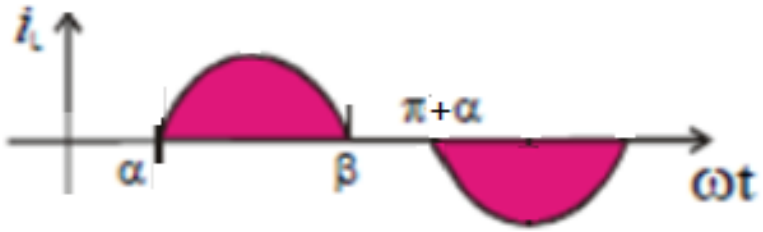
$$U_{LRMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\cdot\int_0^T u_L^2\cdot dt} = \sqrt{4\cdot\frac{1}{2\pi}\cdot\int_\alpha^\pi u_L^2\cdot dt} = \sqrt{4\cdot\frac{1}{2\pi}\cdot\int_\alpha^\pi u^2\cdot dt}$$

$$u = \sqrt{2}\cdot U\cdot\sin\omega t$$

REŠENJE INTEGRALA

$$U_{LRMS} = \sqrt{2}U\cdot\sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{1}{2\pi}\cdot\sin 2\alpha}$$

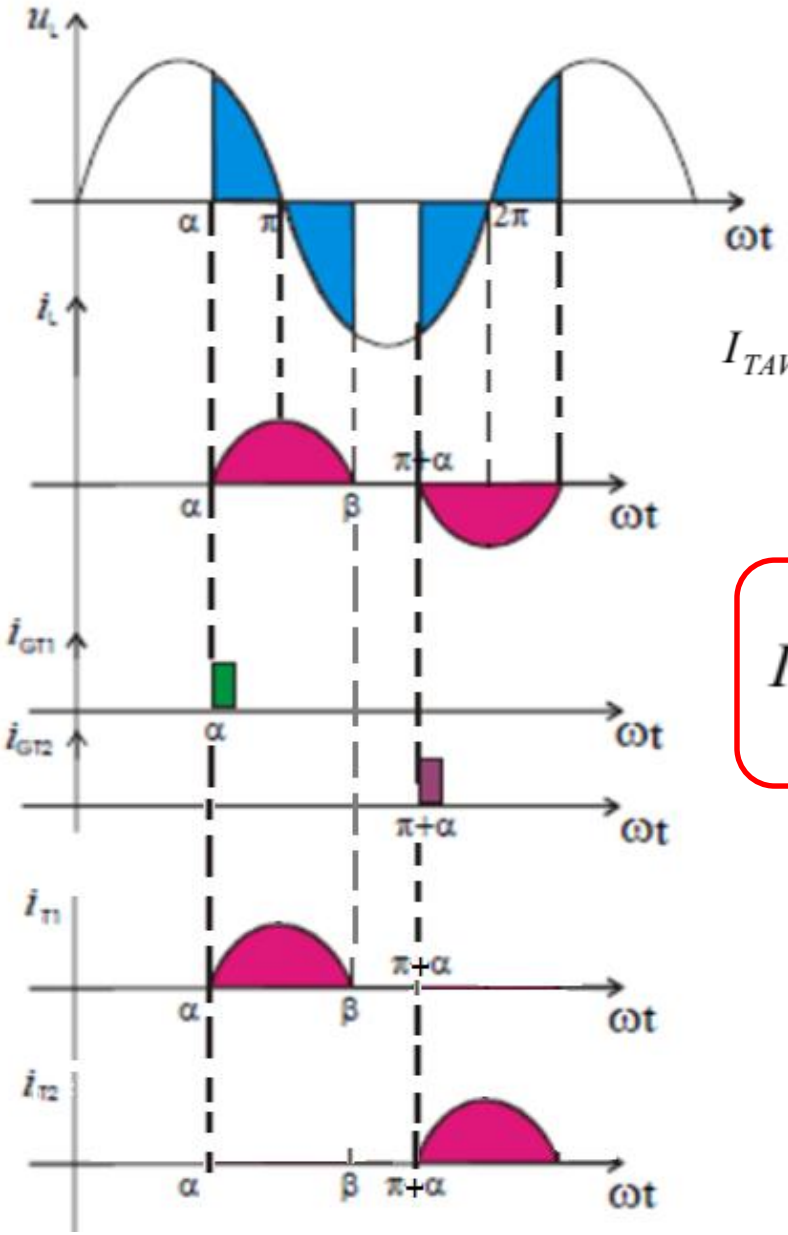
Izračunavanje efektivne vrednosti struje opterećenja



$$U_{LRMS} = \sqrt{2}U \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin 2\alpha}$$

$$I_{LRMS} = \frac{U_{LRMS}}{\omega L} = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin 2\alpha}$$

Izračunavanje srednje i efektivne vrednost struje tiristora

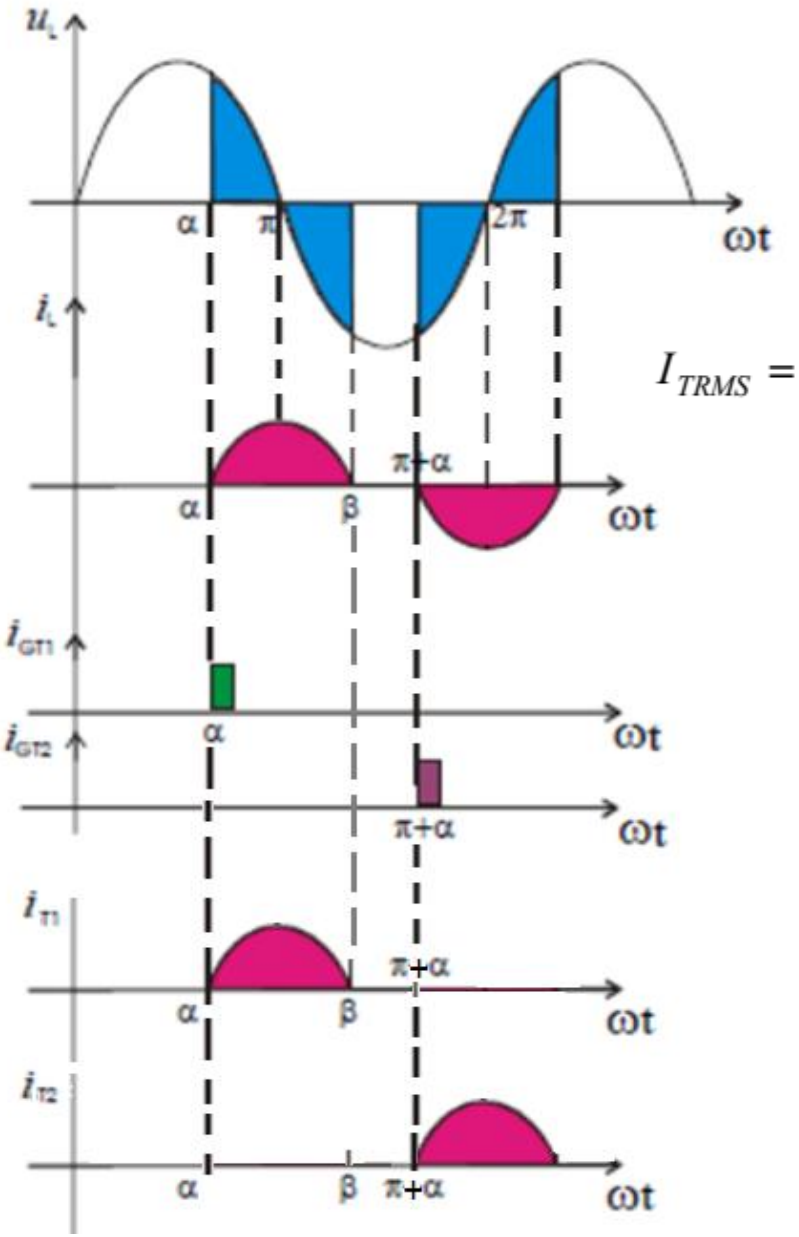


Srednja vrednost struje pojedinačnog tiristora je data relacijom:

$$I_{TAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_T(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \frac{\sqrt{2}}{\omega L} \cdot U \cdot (\cos\alpha - \cos x) \cdot dx$$

REŠENJE INTEGRALA

$$I_{TAV} = \frac{\sqrt{2}}{\omega L} \cdot U \cdot \left[(1 - \frac{\alpha}{\pi}) \cdot \cos\alpha + \frac{1}{\pi} \cdot \sin\alpha \right]$$



[Efektivna vrednost struje tiristora](#) je data relacijom:

$$I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\cdot\int_0^T i_T^2\cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\cdot\int_\alpha^{2\pi-\alpha}\frac{2}{\omega^2 L^2}\cdot U^2\cdot(\cos\alpha-\cos x)^2\cdot dx}$$

Rešavanje se svodi na rešavanje sledećeg integrala:

$$I = \int_\alpha^{2\pi-\alpha}(\cos\alpha-\cos x)^2\cdot dx$$

$$I = \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos\alpha - \cos x)^2 \cdot dx$$

$$I = \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos\alpha - \cos x)^2 \cdot dx = \cos\alpha \underbrace{\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} dx}_{I1} + 2\cos\alpha \underbrace{\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \cos x dx}_{I2} + \underbrace{\int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \cos^2 x dx}_{I3} = I1 + I2 + I3$$

Integrali *I1,I2* su tablični, dok za integral *I3* treba koristiti rešenje:

$$I3 = \int \cos^2 x dx = \frac{x + \cos x \sin x}{2}$$

Kada se reše integrali *I1,I2,I3* dobija se :

$$I = 2(\pi - \alpha)\cos^2\alpha + 3\cos\alpha\sin\alpha + (\pi - \alpha)$$

Uvrštavanjem u početnu jednačinu dobija se :

EFEKTIVNA VREDNOST STRUJE SVAKOG OD TIRISTORA

$$I_{TRMS} = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L} \cdot \sqrt{(1 - \frac{\alpha}{\pi}) \cdot (\frac{1}{2} + \cos^2\alpha) + \frac{3}{2\pi}\cos\alpha\sin\alpha}$$

Izračunavanje disipacije snage na tiristorima

Uzimaju se u obzir gubici na tiristorima kada oni provode struju. Gubici tokom inverzne polarizacije se zanemaruju (pretpostavlja se da su inverzne struje "curenja" tiristora zanemarljive).

Trenutna vrednost snage gubitaka (disipacije) usled vođenja tiristora je data jednačinom:

$$p_D = u_T \cdot i_T$$

$$u_T = (V_{TO} + r_{dT} \cdot i_T)$$

u_T napon na tiristoru u trenucima njegovog provođenja

$V_\gamma = V_{TO}$ napon praga provođenja tiristora

r_{dT} dinamička otpornost tiristora u stanju provođenja

i_T trenutna vrednost struje tiristora u stanju provođenja

TRENUTNA VREDNOST SNAGE DISIPACIJE NA TIRISTORU:

$$p_D = (V_{TO} + r_{dT} \cdot i_T) \cdot i_T$$

Srednja vrednost snage gubitaka (disipacije) na tiristoru će biti:

$$P_{DAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_D(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot \left[\int_0^T V_{TO} i_T dt + r_{dT} \cdot \int_0^T i_T^2 dt \right]$$

Pošto je po definiciji srednja vrednost struje data relacijom:

$$I_{TAV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_T(t) \cdot dt$$

Pošto je efektivna vrednost struje data relacijom: $I_{TRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_T^2(t) \cdot dt}$

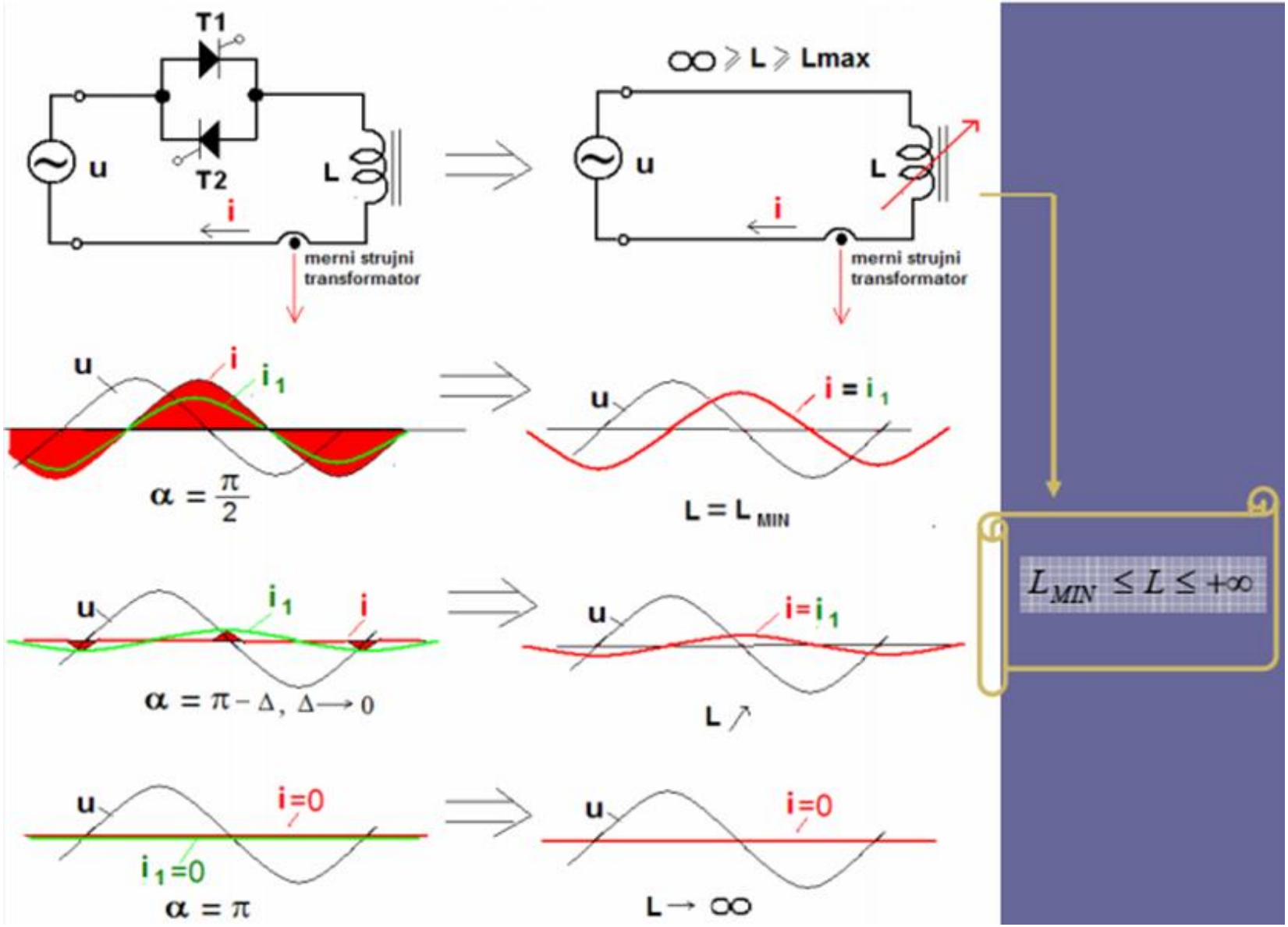
KONAČNA VREDNOST ZA DISIPACIJU SNAGE NA JEDNOM TIRISTORU:

$$P_{DAV} = V_{TO} \cdot I_{TAV} + r_{dT} \cdot I_{TRMS}^2$$

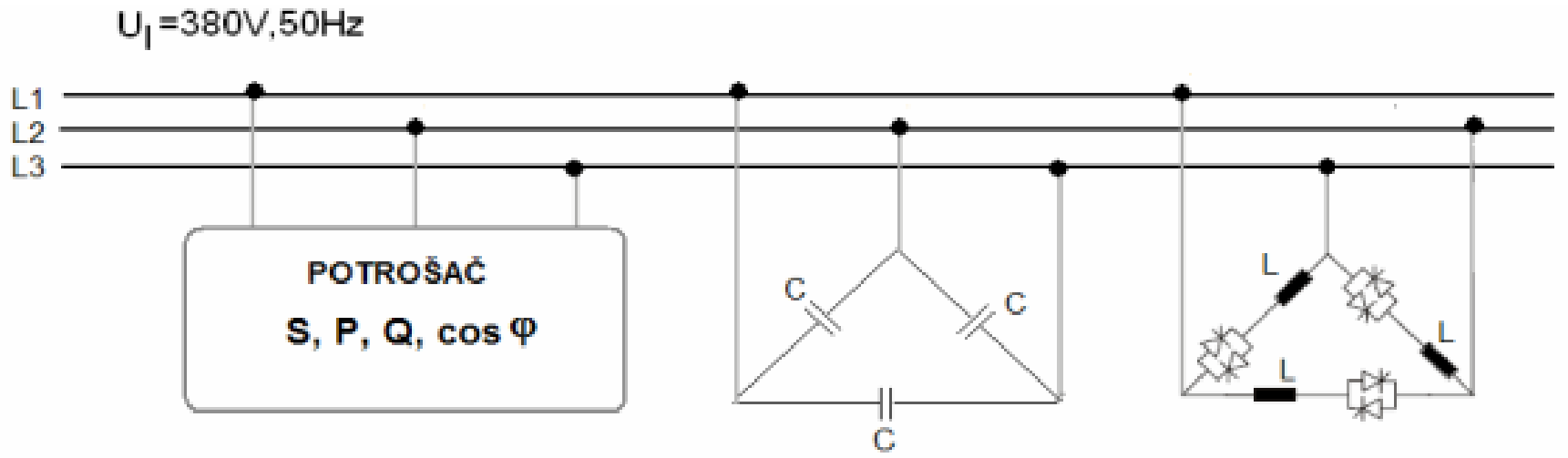
KONAČNA VREDNOST ZA DISIPACIJU SNAGE NA OBA TIRISTORA:

$$\sum P_{DAV} = 2 P_{DAV}$$

PRIMENA: Kontrolisana induktivnost (reaktansa) koja se koristi u kontinualnoj kompenzaciji reaktivne snage



TIRISTORSKI KONTINUALNI REGULATORI REAKTIVNE ENERGIJE (Thyristor Controlled Reactor-TCR)



- U slučaju da su dnevne promene induktivne komponente struje velike, paralelno opterećenju se može priključiti fiksna baterija kondenzatora dovoljno velike kapacitivnosti, tako da se potrošač zajedno sa baterijom kondenzatora prema mreži ponaša kao otporno-kapacitivno opterećenje.
- Zatim se paralelno sa baterijom kondenzatora vezuje induktivno opterećen fazni regulator pomoću koga se faktor snage podešava na maksimalnu vrednost.
- Prednost tiristorske regulacije je što se njome može postići kontinualna kompenzacija reaktivne snage (odnosno energije)

ZADATAK

Induktivno opterećenje L= 5mH napaja se preko anti-paralelnog tiristorskog podešavača napona , sa krute mreže 400V, 50Hz. AC/AC podešavač čine dva tiristora T1 i T2 čiji su parametri u stanju vođenja : napon praga provođenja V_{TO} =1.2V , dinamička otpornost r_{dT} = 2mΩ . Na osnovu ovih podataka potrebno je:

A) Naći izraze za struju opterećenja i izračunati efektivnu vrednost napona na opterećenju za uglove paljenja: 90°, 120° i 150°,

B) Izračunati srednju i efektivnu vrednost struje opterećenja za uglove paljenja: 90°, 120° i 150°,

C) Pri kojoj vrednosti ugla paljenja je struja opterećenja neprekidna?

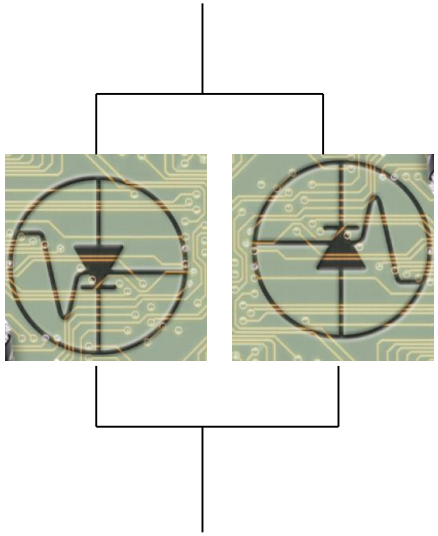
D) Naći izraze za srednju i efektivnu vrednost struje svakog pojedinačnog tiristora i izračunati njihove vrednosti za uglove paljenja: 90°, 120° i 150°.

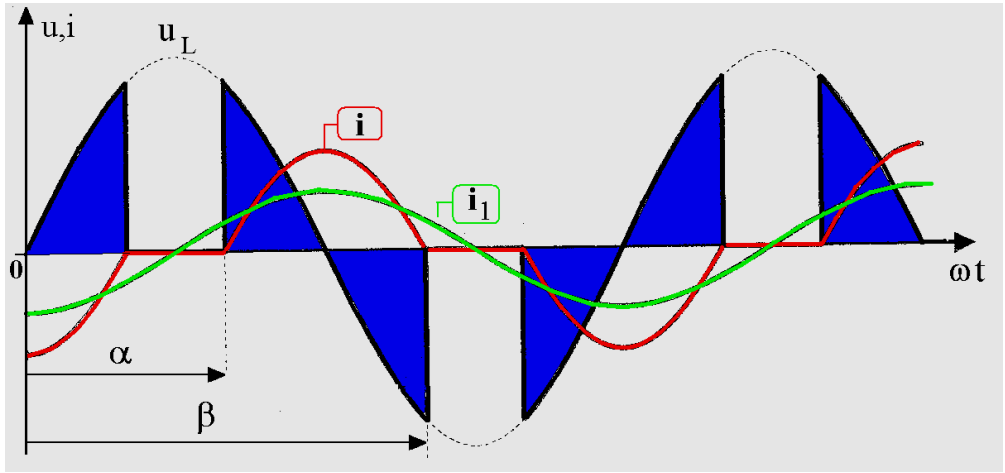
E) Naći izraz za srednju vrednost snage disipacije za svaki od tiristora i izračunati njenu vrednost za uglove paljenja: 90°, 120° i 150°.

F) Izračunati ukupnu snagu disipacije antiparalelne tiristorske grupe za vrednosti uglova paljenja: 90°, 120° i 150°.

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD
STUDIJSKI PROGRAM: NET
OSNOVNE STUDIJE 2018/2019
PREDMET : ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

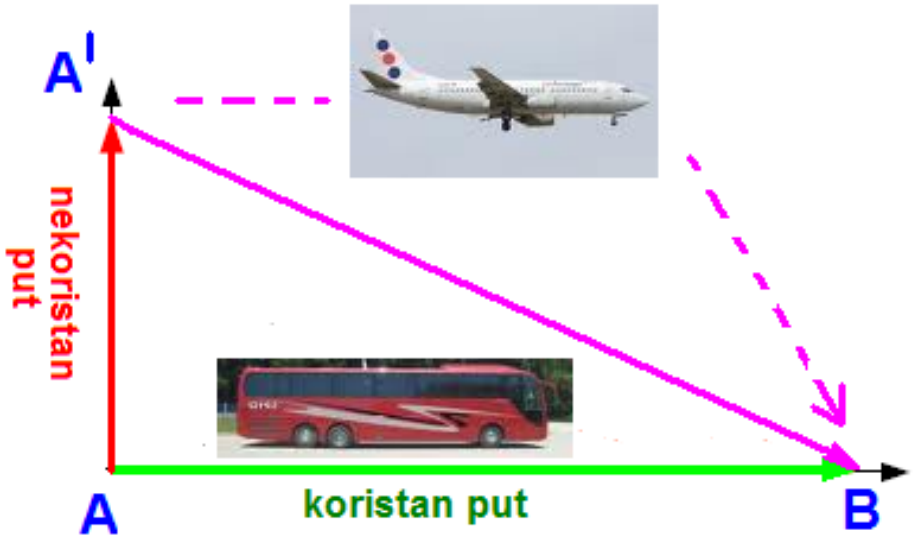
TIRISTORSKI ENERGETSKI PRETVARAČI ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE





predavač: Prof. dr Željko Despotović, dipl.el.inz

POJAM REAKTIVNE ENERGIJE



REAKTIVNA ENERGIJA JE DEO UTROŠENE ENERGIJE KOJI SE NE PRETVARA U KORISTAN RAD

AUTOBUS: KORISTAN PUT A-B
AVION: KORISTAN PUT A' - B

A-A' ČINJENICA SA KOJOM SE MIRIMO

REAKTIVNA ELEKTRIČNA ENERGIJA

- Reaktivna energija (ili u zapadnoj varijanti: jalova, što plastičnije opisuje njen karakter), sa stanovišta fizike je onaj deo ukupne isporučene električne energije koji se troši na uspostavljanje i održavanje magnetnog polja u električnim mašinama.
- Odavde je jasno da su najveći potrošači reaktivne energije elektromotori i transformatori.
- Svoje ime reaktivna energija je dobila zbog činjenice da njena potrošnja ne doprinosi aktivnoj odnosno korisnoj snazi, ali bez potrošnje reaktivne energije električna mašina ne bi ni mogla da radi.
- Strogo govoreći reaktivna energija je mnogo širi pojam i javlja se i kod potrošača kao što su: frekventni regulatori, soft starteri, jednosmerni pogoni, ispravljači, itd.

REAKTIVNA ENERGIJA-problemi

I) PRIMER: TIPIČAN cosφ=0.8 za ASINHRONE MOTORE, MOTOR SNAGE npr.10kW, svakog sata utroši 10kWh aktivne energije i 7.5kVArh reaktivne energije 10kW se pretvori u rad, dok se 7.5kVAr se utroši da bi se izvršila magnetizacija polova motora (krajnji potrošač nema nikakvu direktnu korist od ove energije a mora de je plati!!!!!!)

II) REAKTIVNA ENERGIJA MORA DA SE TRANSPORTUJE OD MESTA PROIZVODNJE (GENERATOR-TRANSFORMATOR-VOD-POTROŠAČ) I ZAUZIMA KAPACITET KABLA (Za pomenuti motor od 10kW struja koja potiče od aktivne energije iznosi oko 25A, a od reaktivne energije oko 19A, tako da ukupno kroz napojni vod protiče oko 45A i doprinosi povećanju otpornih gubitaka u vodu i njegovo grejanje). Posledice zagrevanja voda (kabla) su veći pad napona koji raste sa njegovom dužinom.

Prisustvo reaktivne komponente (crvena boja) je zauzela oko 40% potrebnog kapaciteta- cosφ=0.8

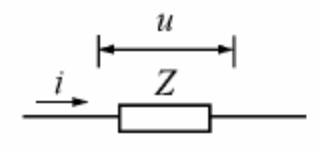
Potreban presek provodnika ako je potrošač u potpunosti kompenzovan- **cosφ=1**

SNAGA POTROŠAČA NAIZMENIČNE STRUJE

Neka su trenutne vrednosti struje i napona prijemnika impedanse Z dati sa

$$i(t) = I_{\mathrm{m}} \sin \omega t$$

$$u(t) = U_{\mathrm{m}} \sin(\omega t + \varphi)$$



$$U_{\mathrm{m}} = \sqrt{2}U$$

$$I_{\mathrm{m}} = \sqrt{2}I$$

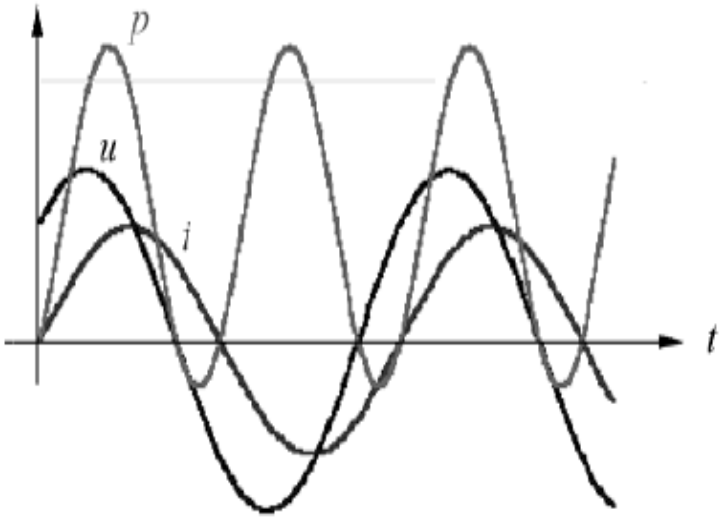
Trenutna snaga koju prima prijemnik jednaka je:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_{\mathrm{m}} I_{\mathrm{m}} \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$p(t) = 2 \cdot UI \cdot \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi)$$

Uvodeći trigonometrijsku transformaciju:

$$\sin\alpha \sin\beta = \frac{1}{2}\left[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)\right]$$



$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi)$$

AKTIVNA SNAGA

Aktivna (srednja) snaga definiše se kao:

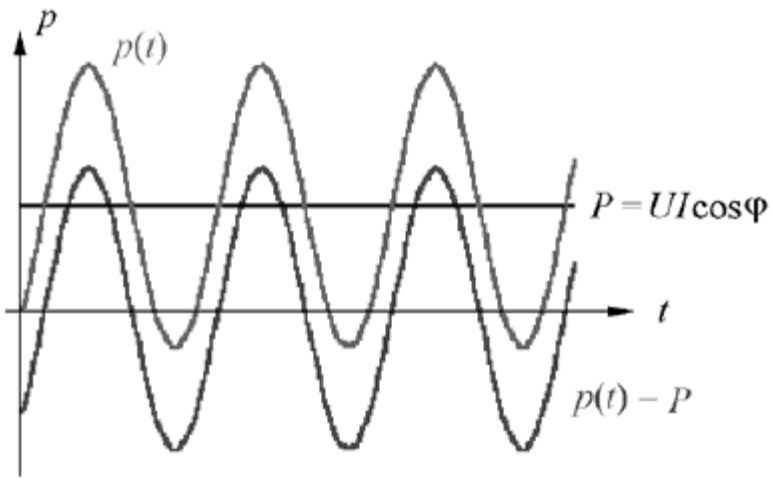
$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = \frac{1}{T}UI\left[\cos\varphi \cdot t - \frac{1}{2\omega}\sin(2\omega t + \varphi)\right]\Bigg|_0^T$$

$$P = \frac{1}{T}UI \cdot \left[\cos\varphi \cdot T - \frac{1}{2\omega}\sin(\frac{4\pi}{T}T + \varphi) + \frac{1}{2\omega}\sin(\frac{4\pi}{T}0 + \varphi)\right]$$

$$P = \frac{1}{T}UI \cdot \left[\cos\varphi \cdot T - \frac{1}{2\omega}\cos\varphi + \frac{1}{2\omega}\cos\varphi\right]$$

$$\boxed{P = U \cdot I \cdot \cos\varphi}$$

Jedinica za aktivnu snagu je vat [W].



REAKTIVNA SNAGA

Reaktivna snaga predstavlja maksimalnu snagu povratnih procesa.

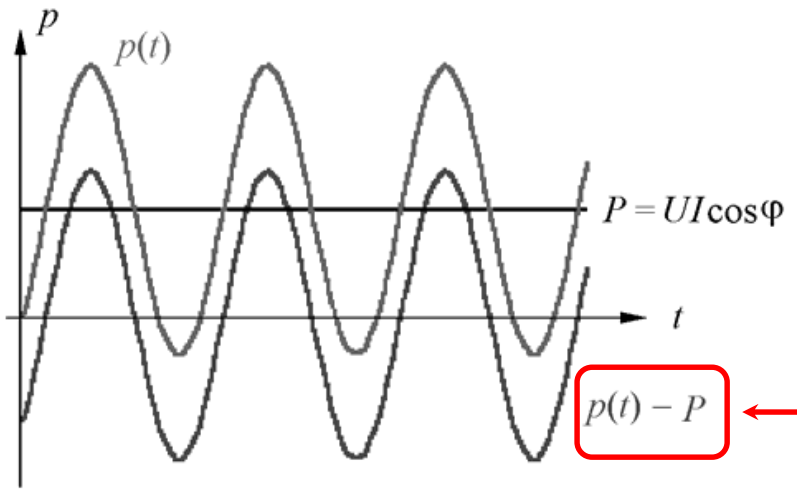
$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

Reaktivna snaga je pozitivna u slučaju pretežno induktivnog prijemnika ($\varphi > 0$), a negativna u slučaju pretežno kapacitivnog prijemnika ($\varphi < 0$).

Jedinica za reaktivnu snagu je volt amper reaktivni ili var [VAr] ili [var].

Deo energije koji se vraća izvoru je reaktivna energija. Srednja vrednost reaktivne energije je nula.

Reaktivna energija predstavlja nepovoljnu pojavu u kolima naizmenične struje. Prenos reaktivne energije u oba smera predstavlja rasipanje energije.



PRIVIDNA SNAGA

Prividna snaga prijemnika definiše se kao proizvod efektivne vrednosti napona i struje prijemnika i obeležava se sa S:

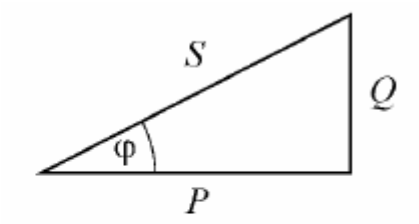
$$S = U \cdot I$$

Jedinica za prividnu snagu je volt amper [VA].

Prividna snaga jednaka je maksimalnoj snazi prijemnika (za maksimalni faktor snage $\cos\varphi = 1$) i ima veliki značaj.

Prividna snaga se obično daje kao karakteristika aparata i označava na njihovim pločicama.

Trougao snage. Slično trouglu impedanse moguće je nacrtati i trougao snage:



Iz trougla snage mogu se izvesti sledeći izrazi: $P = S \cdot \cos\varphi$

$$Q = S \cdot \sin\varphi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Faktor snage $\cos\varphi$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

IZRAZI ZA AKTIVNU I REAKTIVNU SNAGU

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$P = Z \cdot I^2 \cdot \cos\varphi$$

$$P = R \cdot I^2$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

$$Q = Z \cdot I^2 \cdot \sin\varphi$$

$$Q = X \cdot I^2$$

$$S = U \cdot I$$

$$S = Z \cdot I^2$$

KOMPENZACIJA REAKTIVNE ENERGIJE

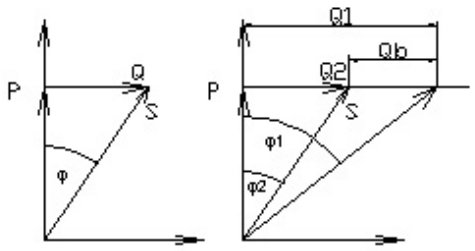
•Pod kompenzacijom reaktivne energije podrazumeva se instalacija opreme koja generiše reaktivnu energiju na mestu montaže i time *kompenzuje* potrošnju reaktivne energije u pogonu.
•Ovim se drastično smanjuje količina preuzete reaktivne energije iz mreže, a time i računi za utrošenu reaktivnu energiju.
•Troškovi za reaktivnu energiju tipično čine oko 15 % ukupnog računa za električnu energiju.
•Kompenzacijom reaktivne snage ova kompletna stavka bi trebalo da bude skoro potpuno eliminisana.
•Cene opreme za kompenzaciju su takve da se ova investicija isplati u roku od 6 meseci do 2 godine.

ZAŠTO JE POTREBNO IZVRŠITI KOMPENZACIJU REAKTIVNE ENERGIJE? ?

DOBIT ZA POTROŠAČA: Potrošači koji u svom računu imaju stavku za reaktivnu energiju imaju direktnu finansijsku dobit (nakon izvršene kompenzacije reaktivne energije iz računa se eliminiše stavka koja se odnosi na reaktivnu energiju ili se značajno umanjuje). Uloženi novac za kompenzaciju reaktivne energije se vraća u periodu eksploatacije od 10-30 puta.

DOBIT ZA EES: Kompenzacijom reaktivne energije se smanjuje ukupna struja u mreži za vrednost reaktivne struje, smanjuje se opterećenje transformatora, povećava se stabilnost elektroenergetskog sistema (EES), sigurnost snabdevanja potrošača i na kraju smanjenje tehničkih gubitaka aktivne energije u celom EES-u).

FAZORSKI DIJAGRAM OPTEREĆENJA



$$S^2 = P^2 + Q^2 \qquad \cos\varphi = \frac{P}{S}, \quad tg\varphi = \frac{Q}{P}$$

SNAGA KONDENZATORSKE BATERIJE POTREBNA ZA KOMPENZACIJU

$$Q_b = Q_1 - Q_2$$

$$Q_b = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$$

KOMPENZACIJA ZA SLUCAJ TROFAZNOG ASINHRONOG MOTORA

$$Q_b = Q_{m\cos\varphi 1} - Q_{m\cos\varphi 2}$$

$$Q_b = k \cdot \frac{P}{\eta} \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)$$

KOEFICIJENT OPTERECENJA MOTORA

STEPEN ISKORIŠĆENJA MOTORA

PRIMER: Odrediti snagu kondenzatora za popravku faktora snage motora od 110kW.Faktor opterećenja motora $\kappa = 0.9$, a stepen iskorištenja $\eta = 0.91$

REŠENJE:
Pri nazivnom opterećenju motor radi sa $\cos\varphi = 0.86$, a $\cos\varphi$ treba kompenzovati do 0.95.

POČETNI USLOVI: $\cos\varphi 1 = 0.86$, $\cos\varphi 2 = 0.95$

Za $\cos\varphi = 0.86$ $tg\varphi = 0.57$; $\cos\varphi = 0.95$ $tg\varphi = 0.35$

$$Q_b = 0.9 \cdot \frac{110}{0.91} \cdot (0.57 - 0.32) = 26.6 kVAr$$

$$C = \frac{Qb}{\omega U^2}$$

$\omega = 2\pi f = 314$ rad/s

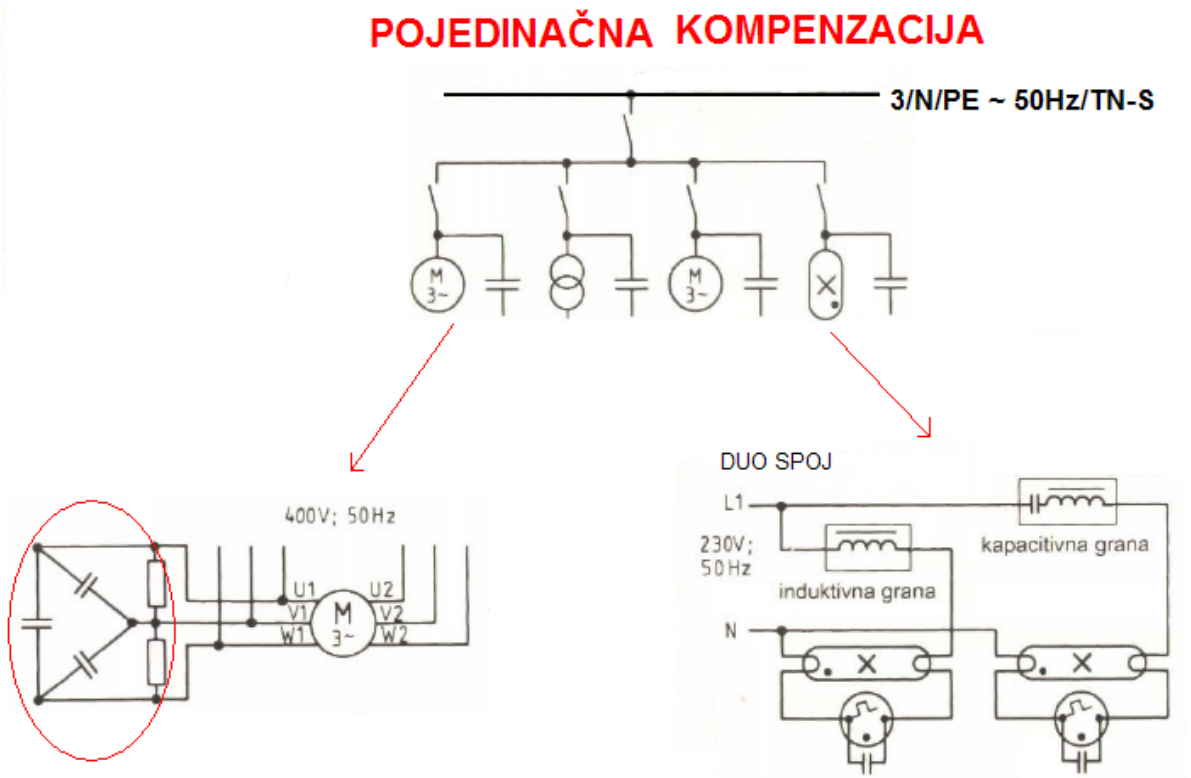
$U = 220V, 50Hz$ ili $380V, 50Hz$

(zavisno da li je potrošač trofazni ili monofazni)

$$C\,[\mu F] = 6.66 \cdot 10^{-3} \cdot Qb\ [VAr]$$

$$C\,[\mu F] = 60 \cdot 10^{-3} \cdot Qb\ [VAr]$$

TIPOVI KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE



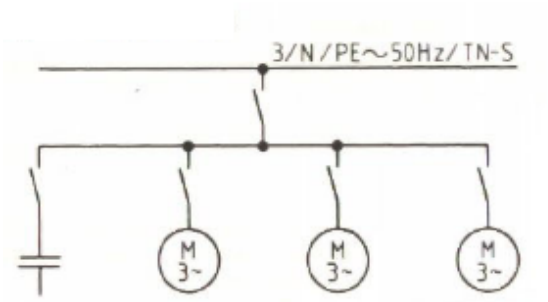
Potrošači reaktivne snage sa paralelno spojenim kondenzatorima

Kod trofaznih potrošača kondenzatorske baterije vezane u spoju "trougao"

PRIMENA: motori, fluorescentne svetiljke (duo spoj), transformatori

TIPOVI KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE

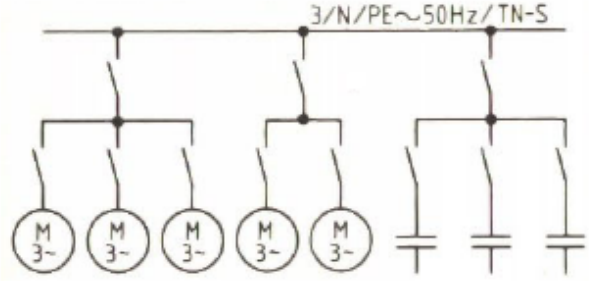
GRUPNA KOMPENZACIJA



POTROŠAČI REAKTIVNE SNAGE SA JEDNOM PARALELNO SPOJENOM KONDENZATORSKOM JEDINICOM

PRIMENA: manja postrojenja sa motorima i fluo svetiljkama

CENTRALNA KOMPENZACIJA



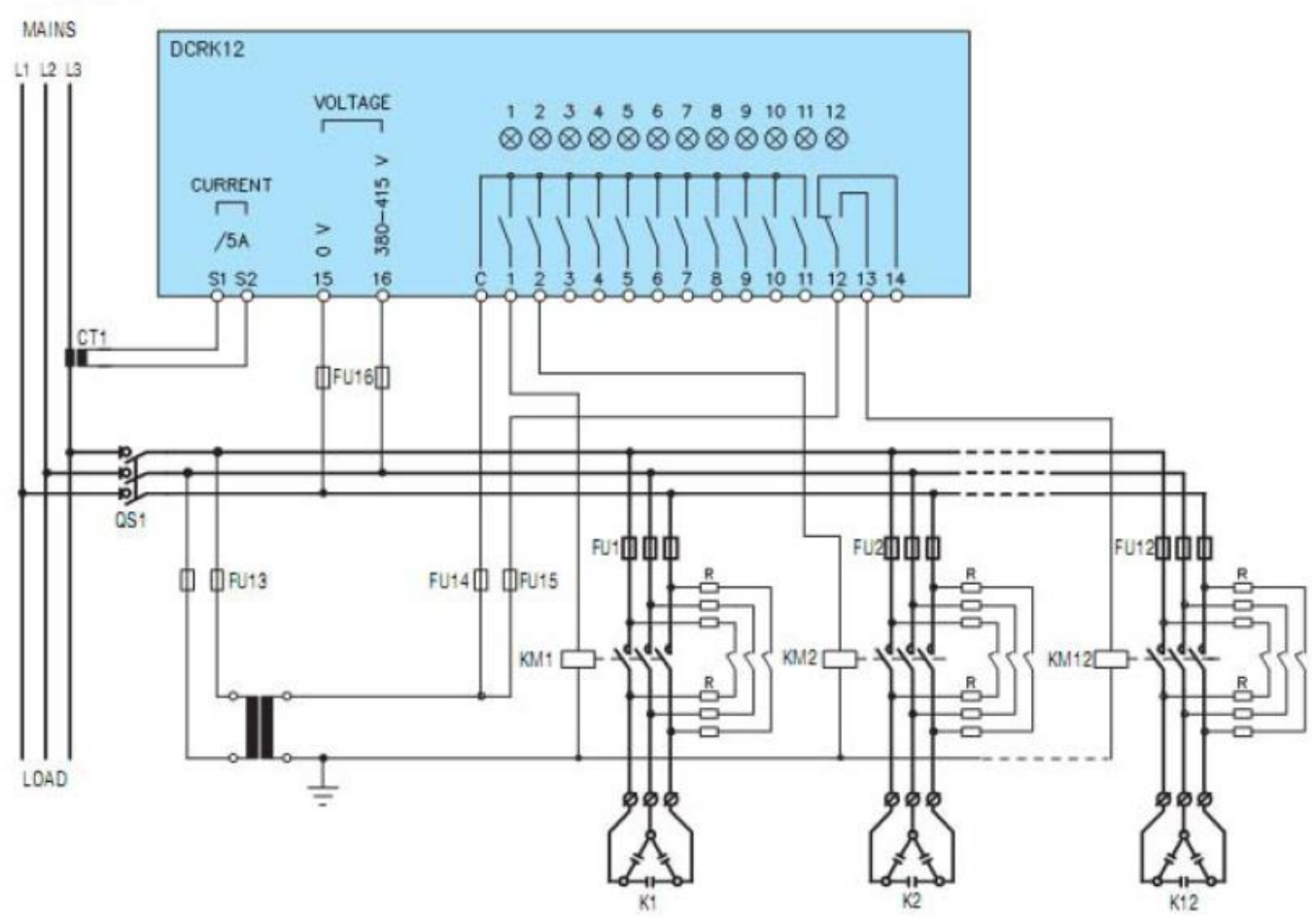
CENTRALNA KOMPENZACIJA UKUPNE REAKTIVNE SNAGE POTROŠAČKOG POSTROJENJA POMOĆU REGULACIONE KONDENZATORSKE JEDINICE

PRIMENA: zanatski i proizvodni pogoni, administrativne zgrade, radionice

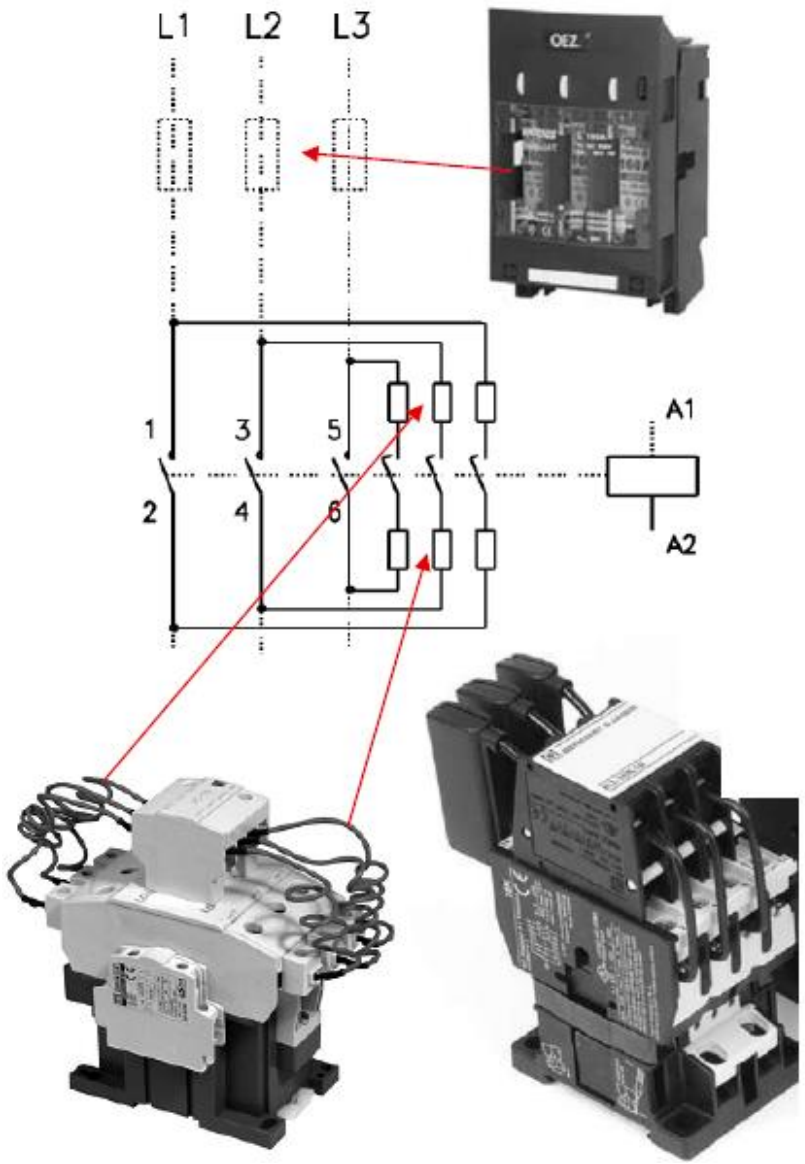
FAKTORI SNAGE ZA NEKE KARAKTERISTIČNE POTROŠAČE

Potrošač	Faktor snage
Elektromotor	0.85-0.93
Fluorescentne cevi	0.50-0.90
Ispravljači	0.70-0.90
Indukcione peći	0.60-0.80
Prese za plastiku	0.70-0.90

STEPENASTI REGULATORI REAKTIVNE ENERGIJE



KONDENZATORSKI KONTAKTORI

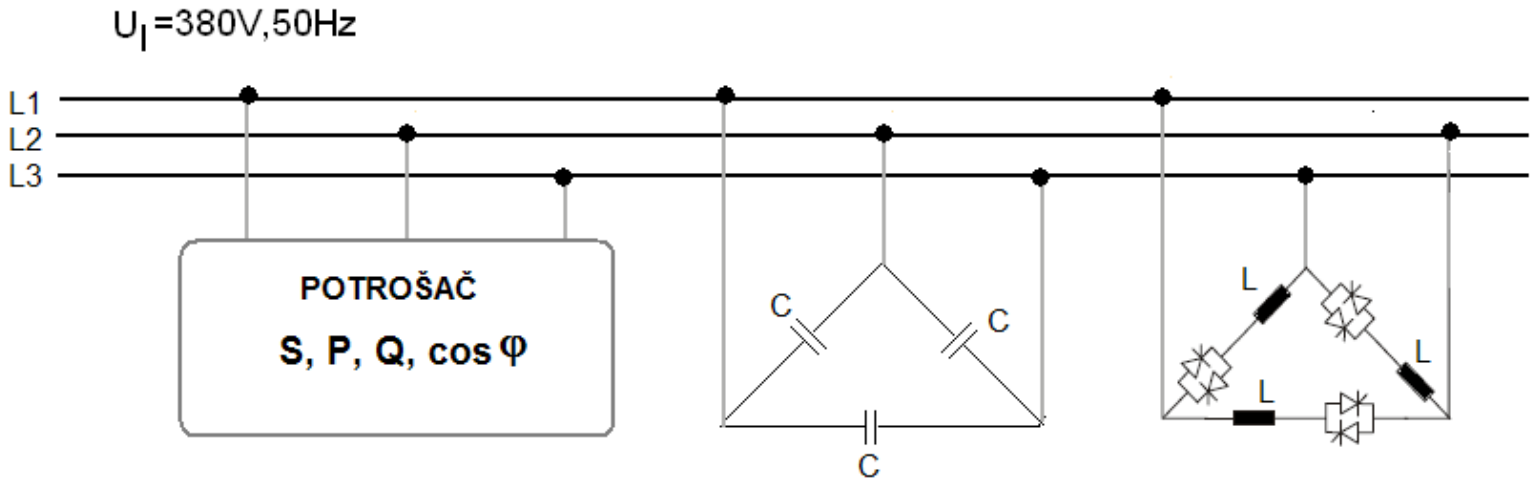


•Kondenzatorski kontaktori uključuju i isključuju kondenzatorske baterije koje imaju male induktivnosti i male gubitke

•PRIGUŠNI OTPORI se uključuju neposredno pre uključenja kondenzatorskih baterija, da bi se smanjile struje uključenja ispd 70In.

•OSIGURAČI za kondezatorske baterije su vrednosti 1.6In....2.5In

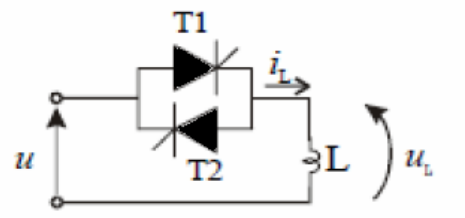
TIRISTORSKI REGULATORI REAKTIVNE ENERGIJE

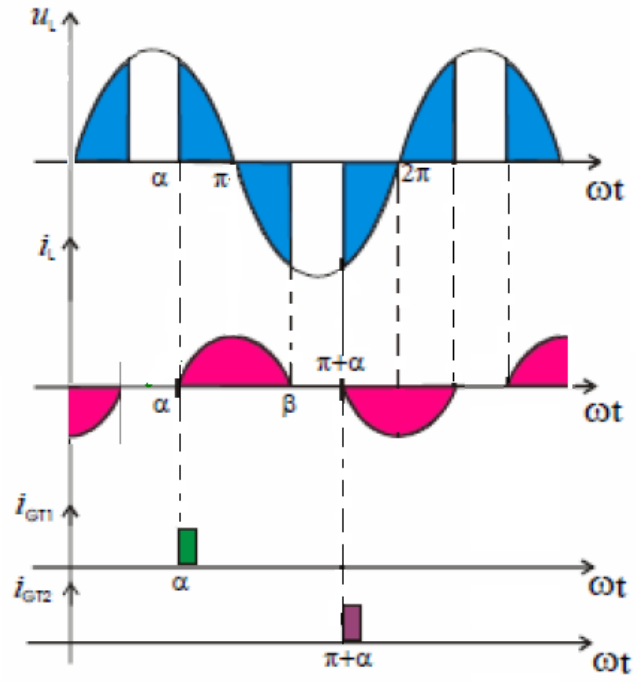


•U slučaju da su dnevne promene induktivne komponente struje velike, paralelno opterećenju se može priključiti fiksna baterija kondenzatora dovoljno velike kapacitivnosti, tako da se potrošač zajedno sa baterijom kondenzatora prema mreži ponaša kao otporno-kapacitivno opterećenje.

•Zatim se paralelno sa baterijom kondenzatora vezuje induktivno opterećen fazni regulator pomoću koga se faktor snage podešava na maksimalnu vrednost.

TIRISTORSKI FAZNI REGULATOR SA INDUKTIVNIM OPTEREĆENJEM



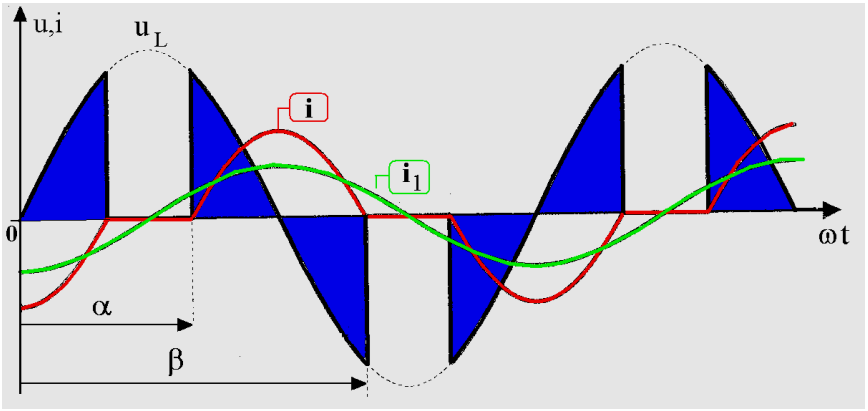


$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^{t} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \cdot \int_{\alpha}^{x} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin x \cdot dx = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (-\cos x)_{\alpha}^{x} = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (\cos \alpha - \cos x)$$

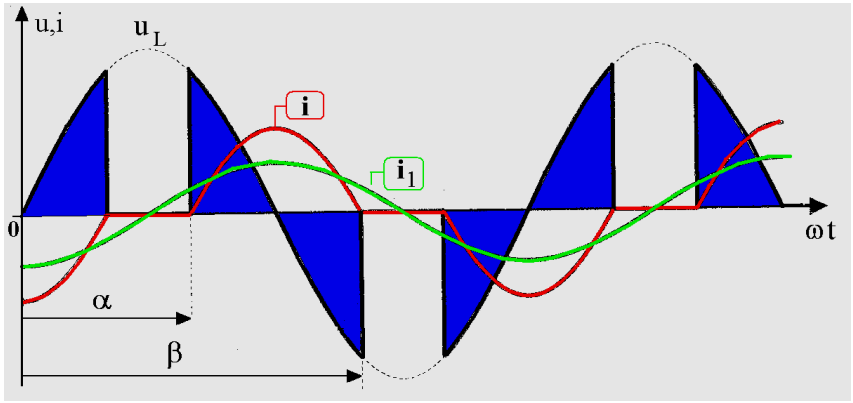
$$i_L(t) = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t) \qquad 2\pi - \alpha \geq \omega t \geq \alpha$$

$$\pi / 2 \leq \alpha \leq \pi$$



osnovni harmonik struje - i1

IZRAČUNAVANJE FEKTIVNE VREDNOST STRUJE PRVOG HARMONIKA



Amplituda osnovnog harmonika struje

$$A_1 = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i(x)\cdot\cos x dx = \frac{4}{\pi}\int_\alpha^{\pi}\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cdot\left[\cos\alpha - \cos x\right]\cdot\cos x dx$$

$$A_1 = -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\cdot\left[1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right]$$

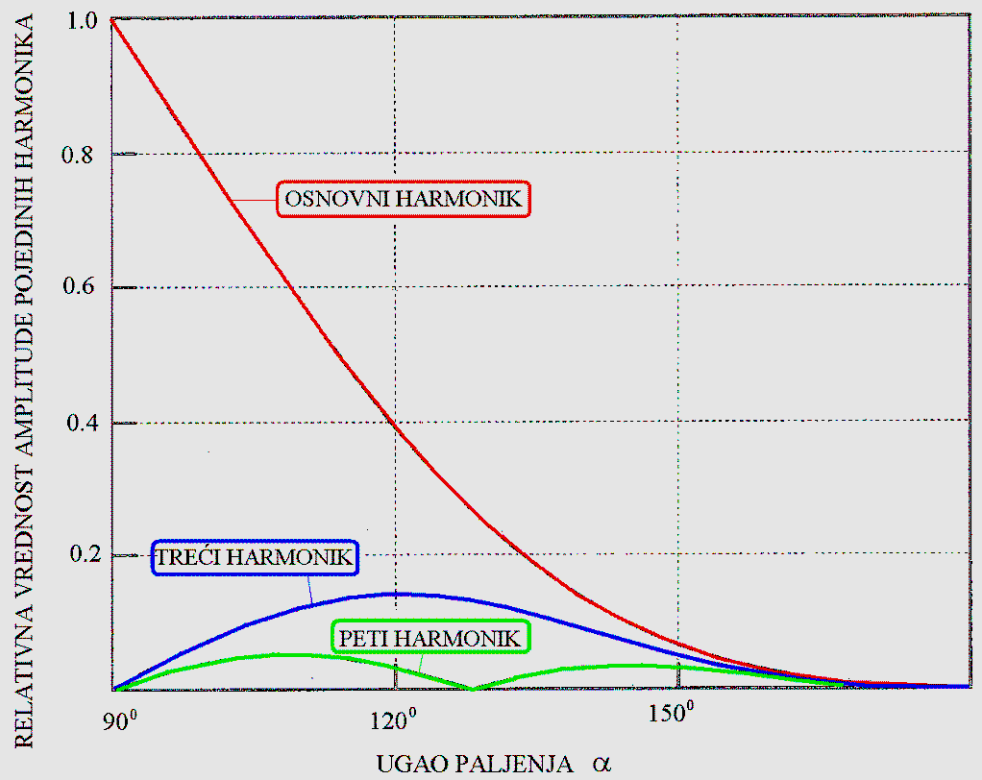
Efektivna vrednost struje prvog harmonika

$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L}\cdot\left[1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right]$$

ŠTA JE SAVIŠIM HARMONICIMA???

Amplitude struja viših harmonika

$$A_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i(x)\cos kx\,dx \qquad A_k = -\frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\cdot\frac{\sin k\alpha\cdot\cos\alpha - k\cdot\cos k\alpha\cdot\sin\alpha}{k\cdot(k^2-1)}$$



Neželjena harmonijska izobličenja potiču uglavnom od trećeg harmonika koji ima maksimalnu vrednost za

$$\alpha = 120^0$$

$$A_3 = A_{3MAX} = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cdot\frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138\cdot\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}$$

$$I_3 = \frac{A_{3MAX}}{\sqrt{2}} = \frac{U}{\omega L}\cdot\frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138\cdot\frac{U}{\omega L}$$

EFEKTIVNA VREDNOST TREĆEG HARMONIKA

Sadržaj harmonika u struji kod monofaznog tiristorskog regulatora sa induktivnim opterećenjem

TIRISTORSKI REGULATOR kao ekvivalent PROMENLJIVOJ PRIGUŠNICI

- Ako se posmatra osnovni harmonik struje, uočava se da se fazni tiristorski regulator sa čisto induktivnim opterećenjem ponaša prema mreži, kao prigušnica promenljive induktivnosti.
- Promenom faznog ugla α u opsegu $\pi/2 \le \alpha \le \pi$

  induktivnost prigušnice se može podešavati u opsegu od

  L_{MIN} do beskonačne vrednosti, odnosno $L_{MIN} \le L \le +\infty$

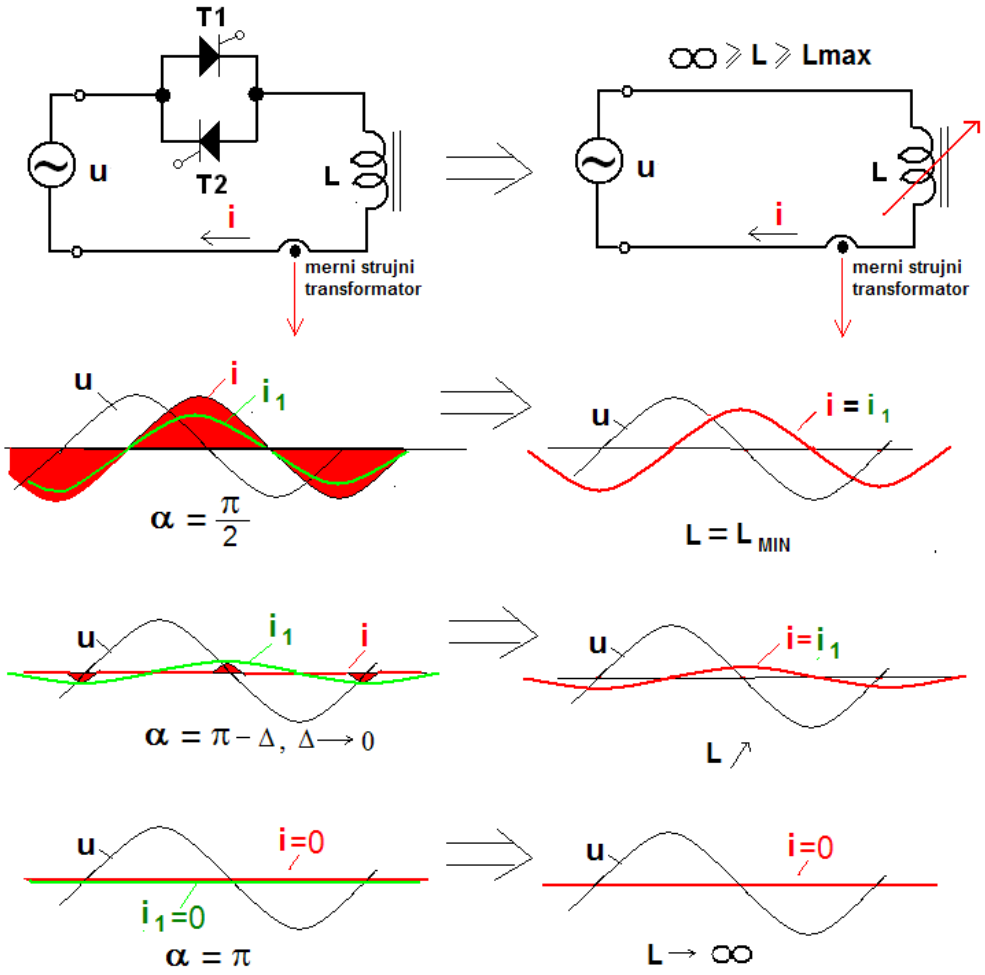
UKUPNA TROFAZNA SNAGA KOMPENZATORA je jednaka:

$$Q = 3U_f I_1 = 3U_l I_1 = \frac{6}{\omega L} \cdot U_l^{\,2} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right] \quad \pi/2 \le \alpha \le \pi$$

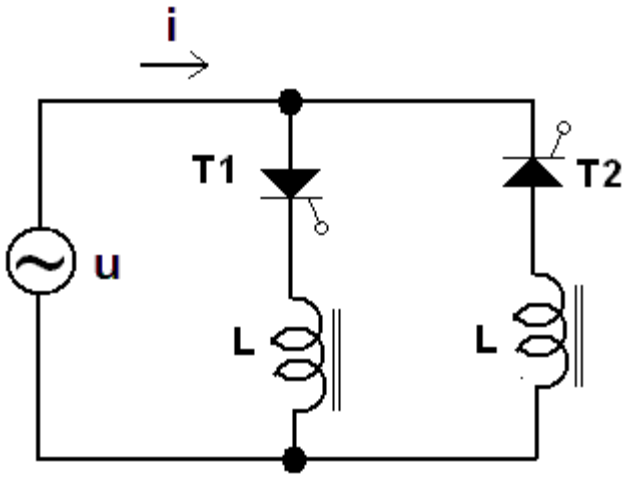
gde je za spregu tiristorskog regulatora u „trougao“ $U_f = U_l$

tj. efektivne vrednosti faznog i linijskog napona su jednake i iznose 380V(400V)

TIRISTORSKI REGULATOR kao ekvivalent PROMENLJIVOJ PRIGUŠNICI



TIRISTORSKI KOMPENZATOR SA PROŠIRENIM OPSEGOM UGLA PALJENJA



U slučaju ove konfiguracije faznog regulatora ugao paljenja tiristora se može menjati u punom opsegu:

$$0 \le \alpha \le \pi$$

Stoga je ova konfiguracija povoljnija u odnosu na konfiguraciju sa antiparalelnom vezom tiristora kod koje je opseg regulacije bio u intervalu:

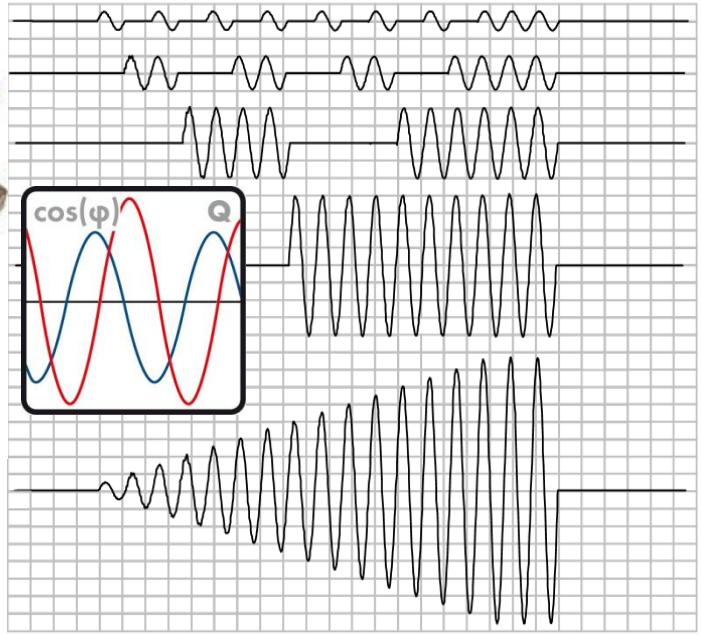
$$\pi / 2 \le \alpha \le \pi$$

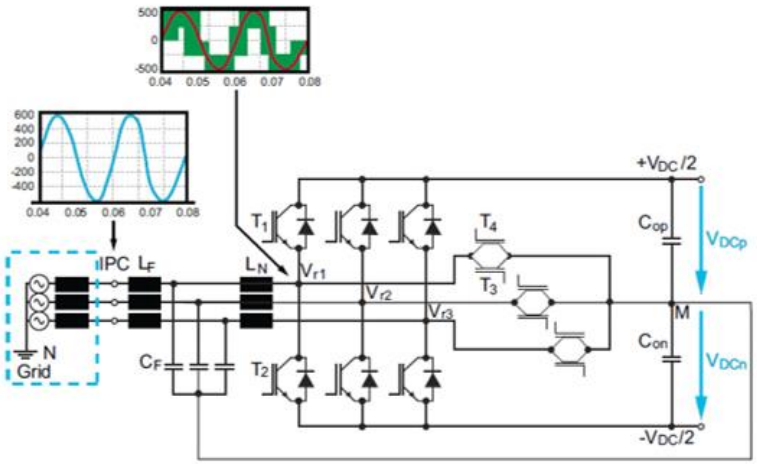
Efektivna vrednost struje osnovnog harmonika je ista ko i kod faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora:

$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] \qquad 0 \le \alpha \le \pi$$

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD
STUDIJSKI PROGRAM: NET
OSNOVNE STUDIJE 2018/2019
PREDMET : ELEKTRIČNI PRETARAČI SNAGE

ENERGETSKI PRETVARAČI ZA DINAMIČKU KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE



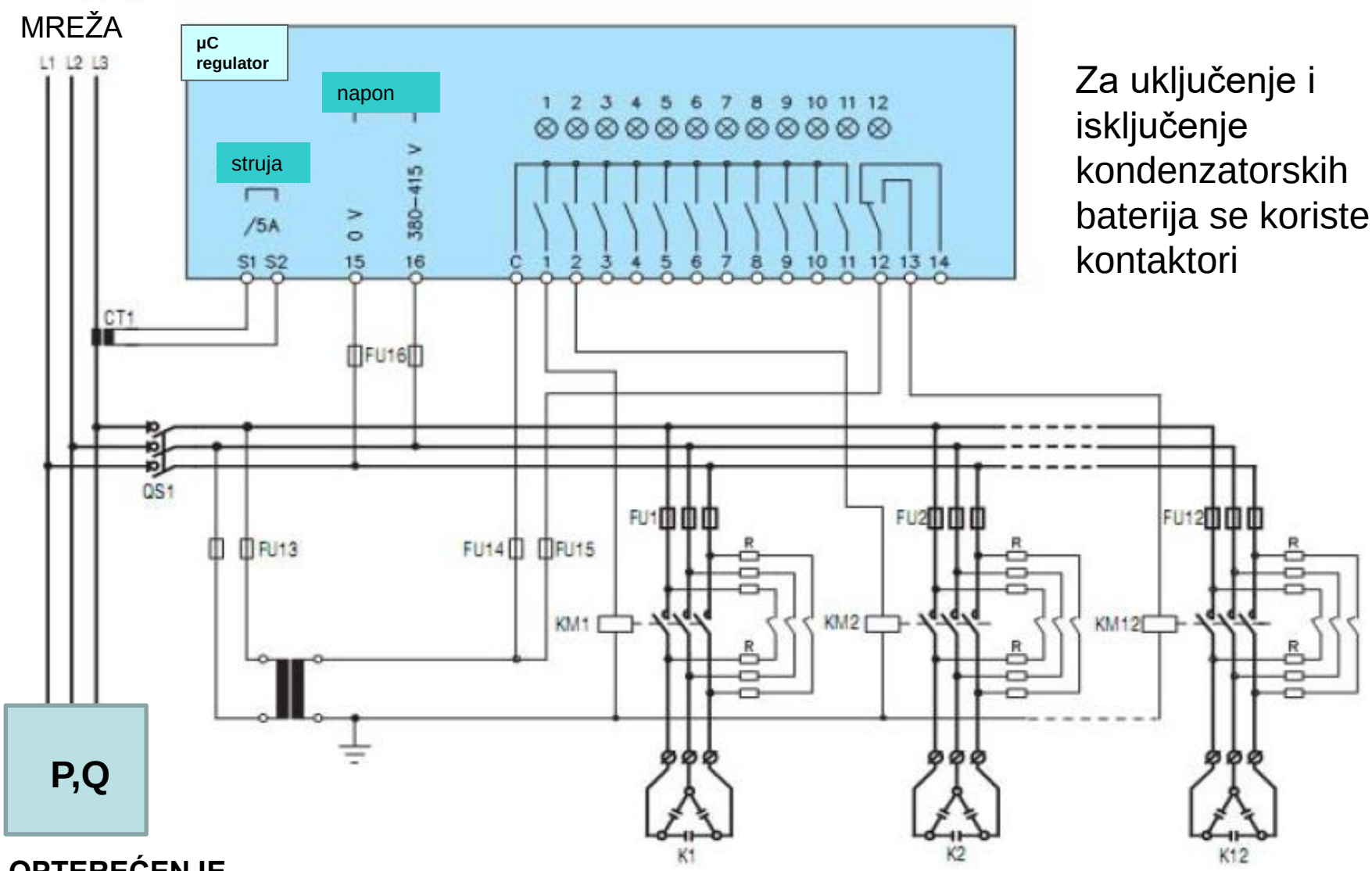


Predmetni profesor:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

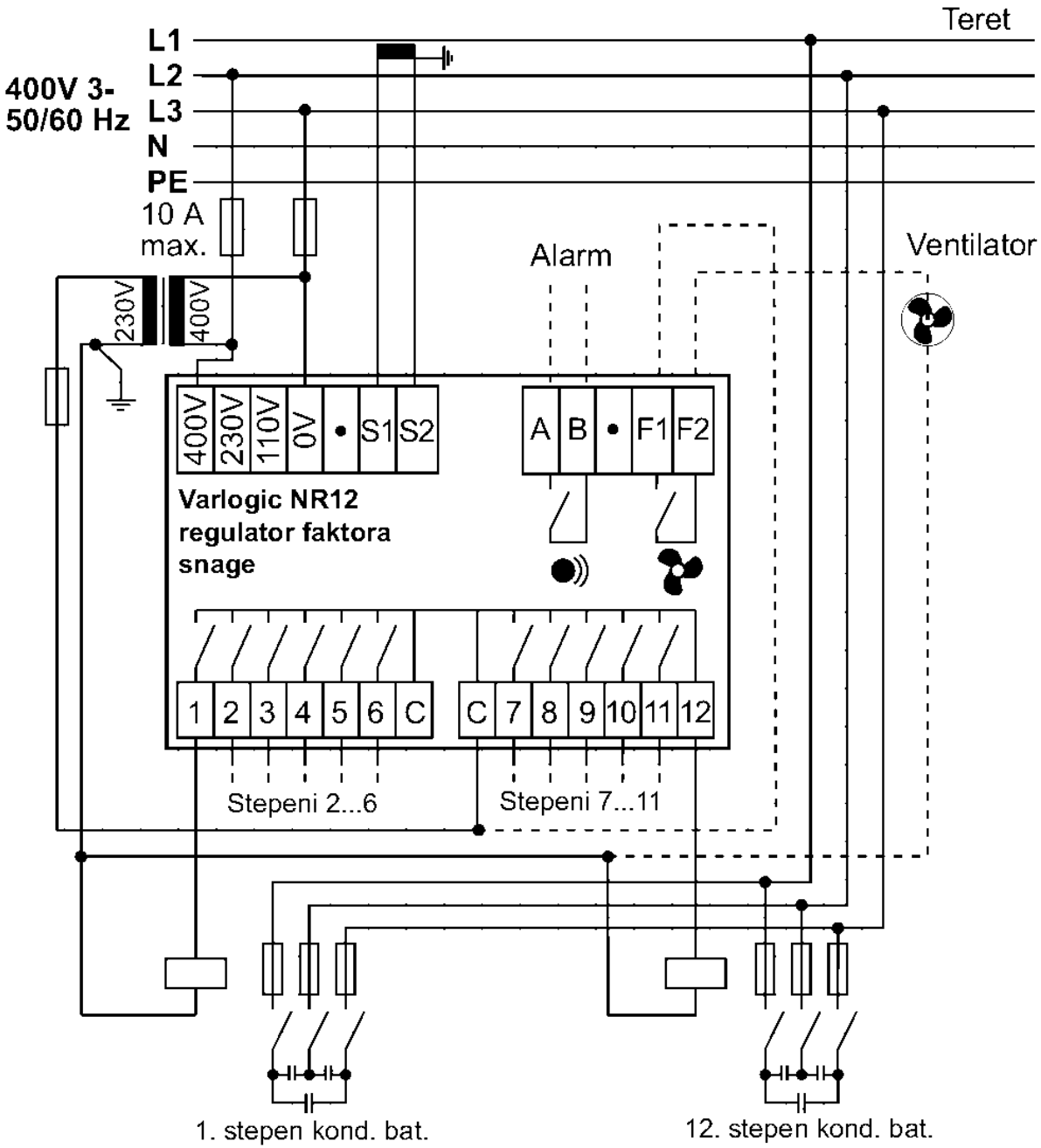
UVOD

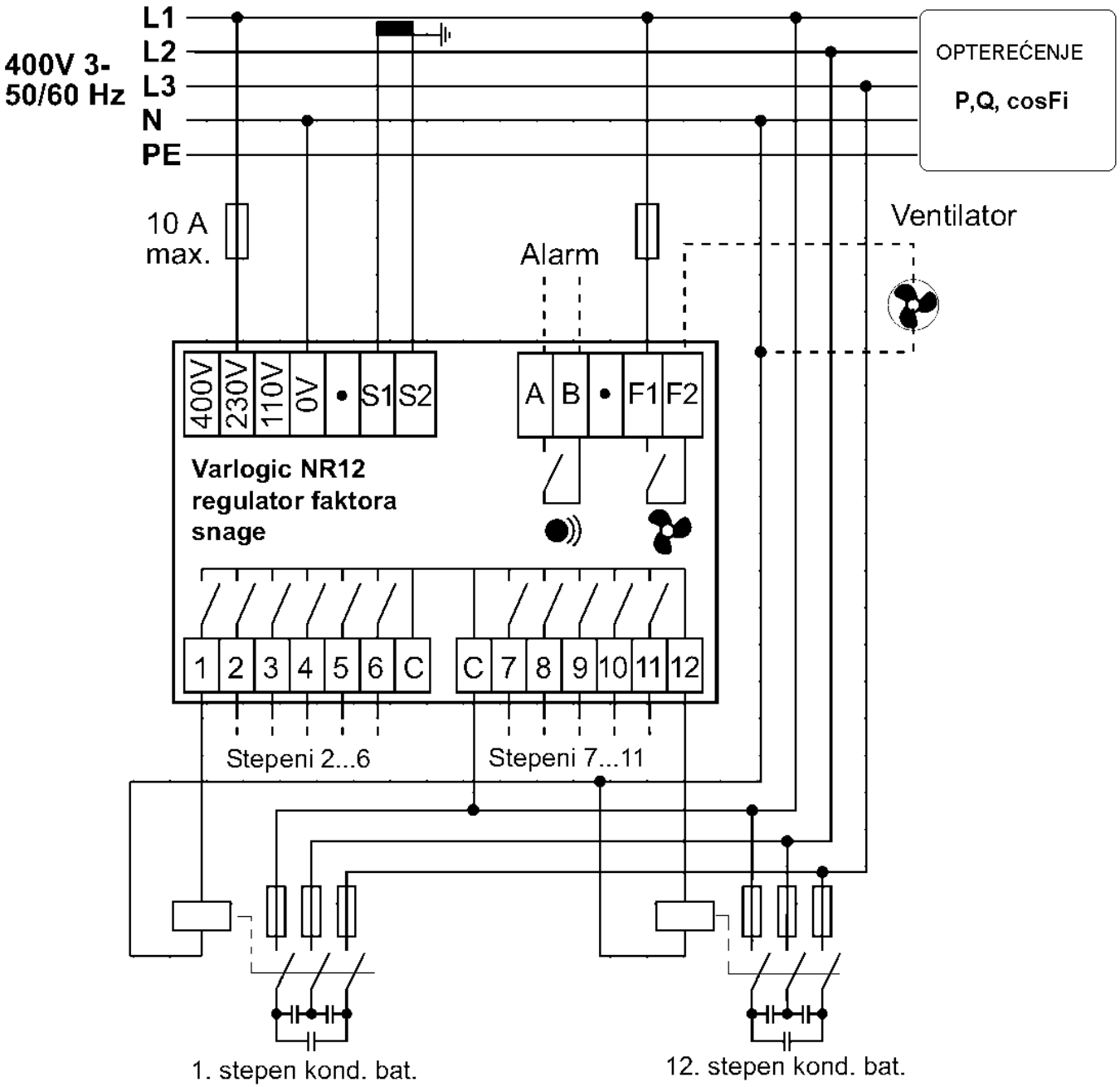
- Nedostatak centralne statičke kompenzacije je nemogućnost upravljanja faktorom snage u uslovima promenljivog opterećenja
- Da bi se faktor snage posmatranog postrojenja prema priključnoj mreži održavao na zahtevanoj vrednosti (tipično 0,95) pri različitim režimima rada i opterećenjima potrebno je vršiti dinamičku kompenzaciju
- Dinamička kompenzacija reaktivne snage može biti stepenasta ili kontinualna, u zavisnosti od konfiguracije statičkog kompenzatora.
- Stepenasta kompenzacija (o kojoj je bilo više reči u prošlom predavanju) se može realizovati sa kontaktorima, ali razvojem snažnih poluprovodnika, vrlo često se realizuje tiristorima.

STEPENASTI REGULATORI REAKTIVNE ENERGIJE (centralna kompenzacija)



Za uključenje i isključenje kondenzatorskih baterija se koriste kontaktori


Teret
L1
L2
L3
N
PE
400V 3-
50/60 Hz
10 A
max.
Alarm
Ventilator
230V
400V
400V
230V
110V
0V
S1
S2
A
B
F1
F2
Varlogic NR12
regulator faktora
snage
1
2
3
4
5
6
C
C
7
8
9
10
11
12
Stepeni 2...6
Stepeni 7...11
1. stepen kond. bat.
12. stepen kond. bat.


400V 3-
50/60 Hz
L1
L2
L3
N
PE
OPTEREĆENJE
P,Q, cosFi
10 A
max.
Alarm
Ventilator
400V
230V
110V
0V
S1
S2
A
B
F1
F2
Varlogic NR12
regulator faktora
snage
1
2
3
4
5
6
C
C
7
8
9
10
11
12
Stepeni 2...6
Stepeni 7...11
1. stepen kond. bat.
12. stepen kond. bat.

Regulator neprekidno meri reaktivnu snagu sistema i uključenjem i isključenjem kondenzatorskih kontaktora održava zahtevani faktor snage.
Regulator obično ima 10 zadatih kombinacija koraka za upravljanje kontaktorima kondenzatorskih baterija različitih snaga.

Kombinacije koraka

1.1.1.1.1.1	1.2.3.3.3.3
1.1.2.2.2.2	1.2.3.4.4.4
1.1.2.3.3.3	1.2.3.6.6.6
1.1.2.4.4.4	1.2.4.4.4.4
1.2.2.2.2.2	1.2.4.8.8.8

Q1 = Snaga prvog stepena
Q2 = Snaga drugog stepena
Q3 = Snaga trećeg stepena
Q4 = Snaga četvrtog stepena
itd.
Qn = Snaga n-tog stepena (maksimalno 12)

Primeri:

1.1.1.1.1.1 : Q2 = Q1, Q3 = Q1, …, Qn = Q1
1.1.2.2.2.2 : Q2 = Q1, Q3 = 2Q1, Q4 = 2Q1, …, Qn = 2Q1
1.2.3.4.4.4 : Q2 =2Q1, Q3 = 3Q1, Q4= 4Q1, …, Qn = 4Q1
1.2.4.8.8.8 : Q2 = 2Q1, Q3 = 4Q1, Q4= 8 Q1, …, Qn = 8 Q1

Proračun broja električnih stepeni

Broj električnih stepeni (npr. 13) zavisi od:
Broja iskorišćenih izlaza regulatora (npr. 7)

1. Odabrane kombinacije, obzirom na snage pojedinih stepeni

Broj električnih stepeni

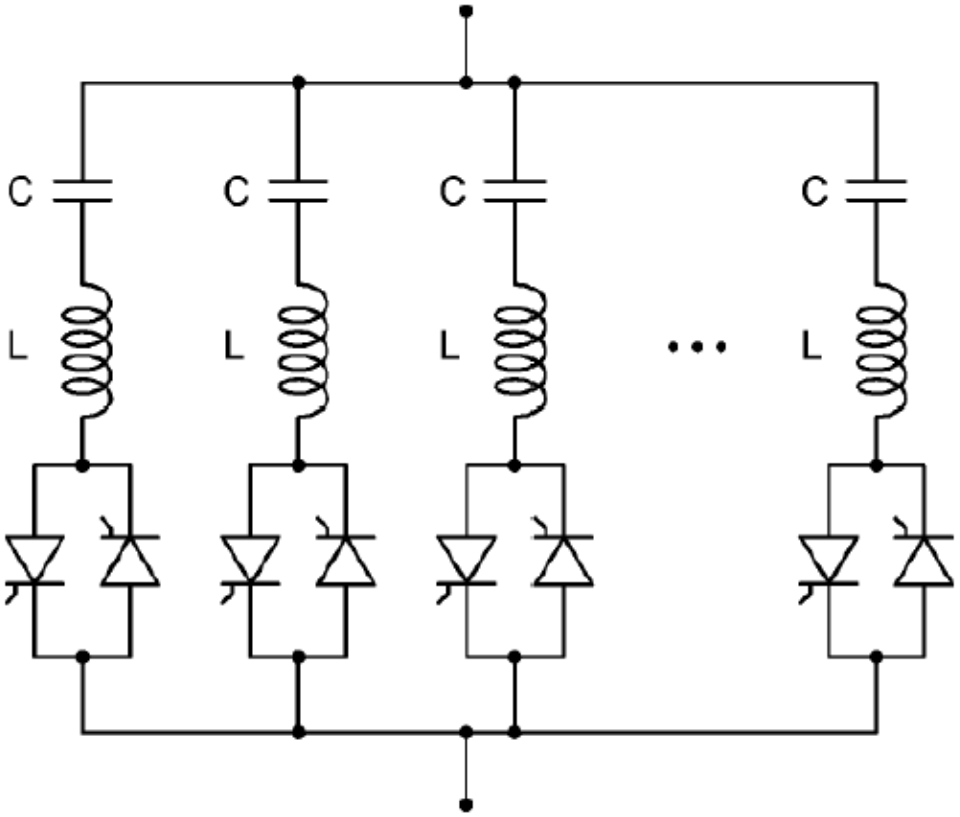
Kombinacije	Broj iskorišćenih izlaza regulatora											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.1.1.1.1.1…	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.1.2.2.2.2…	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
1.2.2.2.2.2…	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
1.1.2.3.3.3…	1	2	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31
1.2.3.3.3.3…	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
1.1.2.4.4.4…	1	2	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
1.2.3.4.4.4…	1	3	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42
1.2.4.4.4.4…	1	3	7	11	15	19	23	27	31	35	39	43
1.2.3.6.6.6…	1	3	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
1.2.4.8.8.8…	1	3	7	15	23	31	39	47	55	63	71	79

OGRANIČENJA U KORIŠĆENJU KONTAKTORA ZA UKLJUČENJE I ISKLJUČENJE BATERIJA KONDENZATORA

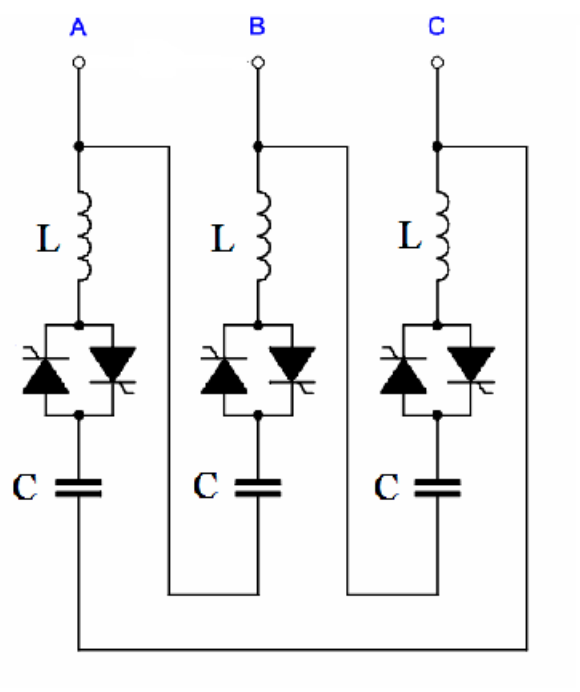
- Uključenje / isključenje kondenzatora se vrši kontaktorima
- Ako promene opterećenja nisu brze i ako se ne zahteva brzo uključivanje i isključivanje kondenzatora (minimalni period 20 do 90 sekundi
- Mehanička izdržljivost kontaktora je 5 do 10 miliona uključenja).
- Ako je potrebno brzo i često uključivanje stepena kondenzatorske baterije, treba koristiti poluprovodničke prekidače (vreme reakcije prekidača 1 do 20 milisekundi).

- **Najčešće korišćeni prekidači su tiristorski (koji rade u antiparalelnoj vezi kao tzv. NULTE SKLOPKE)!!!**

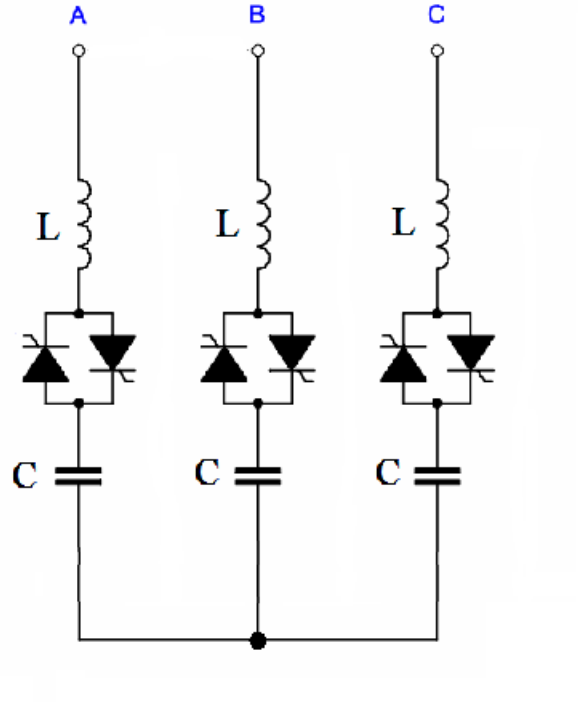
- Stepenasta dinamička kompenzacija reaktivne snage se najčešće realizuje pomoću tiristorski kontrolisane kondenzatorske baterije (**TSC–T**hyristor **S**witched **C**apacitor)



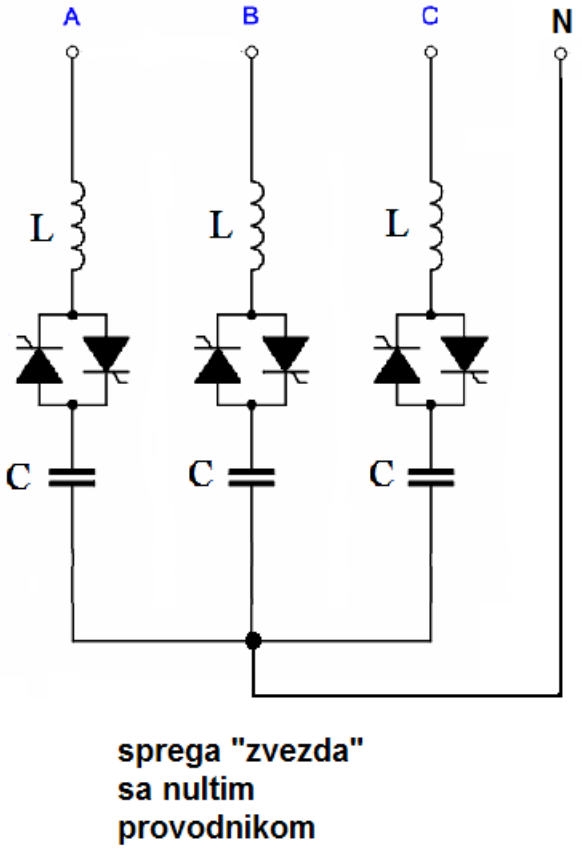
•Trofazni TSC (osnovni modul) se sastoji ustvari od tri pretvarača vezana najčešće u spregu “trougao” ili spregu “zvezda” (sa ili bez nultog provodnika)



sprega " trougao"

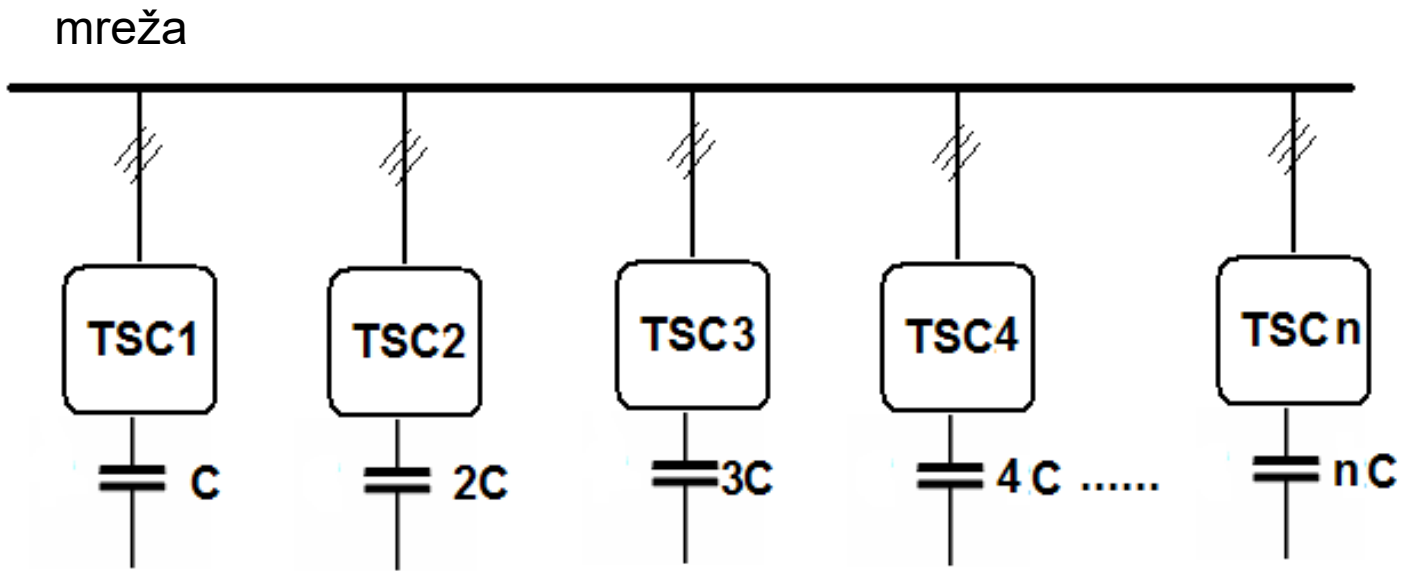


sprega "zvezda"
bez nultog
provodnika



sprega "zvezda"
sa nultim
provodnikom

•Broj baterija kondenzatora po fazi i njihov pojedinačni kapacitet (koji ne mora da bude isti za sve baterije) zavisi od željenog broja diskretnih stepena regulacije

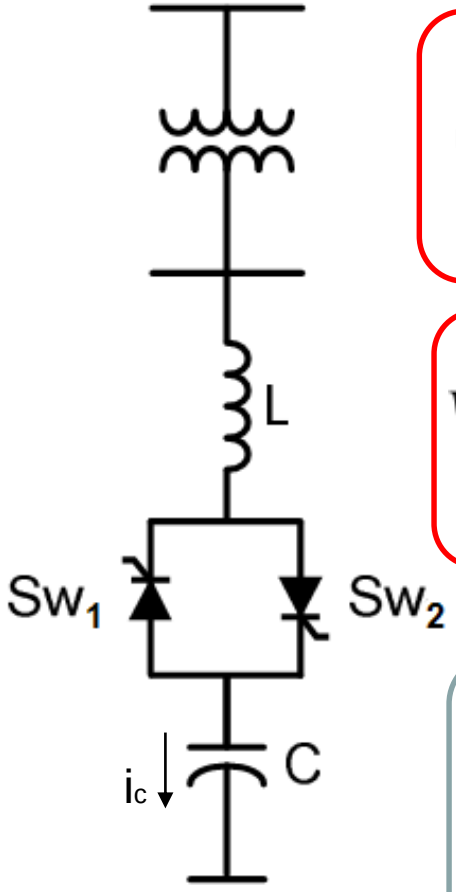


PREDNOSTI TIRISTORA U ODNOSU NA KONTAKTORE U KOMPENZACIONIM KOLIMA REAKTIVNE SNAGE

- Stepen kompenzacije, odnosno generisana reaktivna snaga, zavisi od broja kondenzatora koji su uključeni
- Baterija se isključuje tako što se tiristorima koji pripadaju njenoj grani ukinu impulsi za paljenje
- Na taj način, pri sledećem prolasku struje baterije kroz nulu, tiristor prestaje da provodi i isključuje se (jer postane inverzno polarisan)
- Ovakav način kompenzacije reaktivne snage ne unosi u mrežu neželjene više harmonike struje (pod pretpostavkom da smo zanemarili tranzijente prilikom uključenja baterija)
- Antiparalelno vezani tiristori imaju prednost nad kontaktorima, zbog toga što oni prekidaju struju u trenutku kada ona prirodno prolazi kroz nulu, što nije slučaj kod kontaktora
- Kod kontaktora se prekida struja koja je različita od nule, ali se prilikom otvaranja kontakata mogu javiti veliki napona na njima. Usled ovoga dolazi do naprezanja kontakata i disipacije u relativno kratkim vremenskim trenutcima
- Inače su kontakti kontaktora podložni habanju i njihov radni vek je relativno kratak za ovakve aplikacije

TSC KOMPENZATORI-osnovni principi

- Umesto kontaktora se mogu koristiti tiristorski prekidači sa antiparalelnom vezom tiristora
- Tiristori tada rade u režimu nulte sklopke
- Uključuju se pri nultom naponu
- Postrojenje za kompenzaciju sadrži pored tiristora, prigušnicu i kondenzator



Rezonantna učestanost

$$\omega_r = 1/\sqrt{LC}$$

V_{co} Napon na kondenzatoru u trenutku t=0+

α Fazni ugao pri kojem se uključuje kondenzator

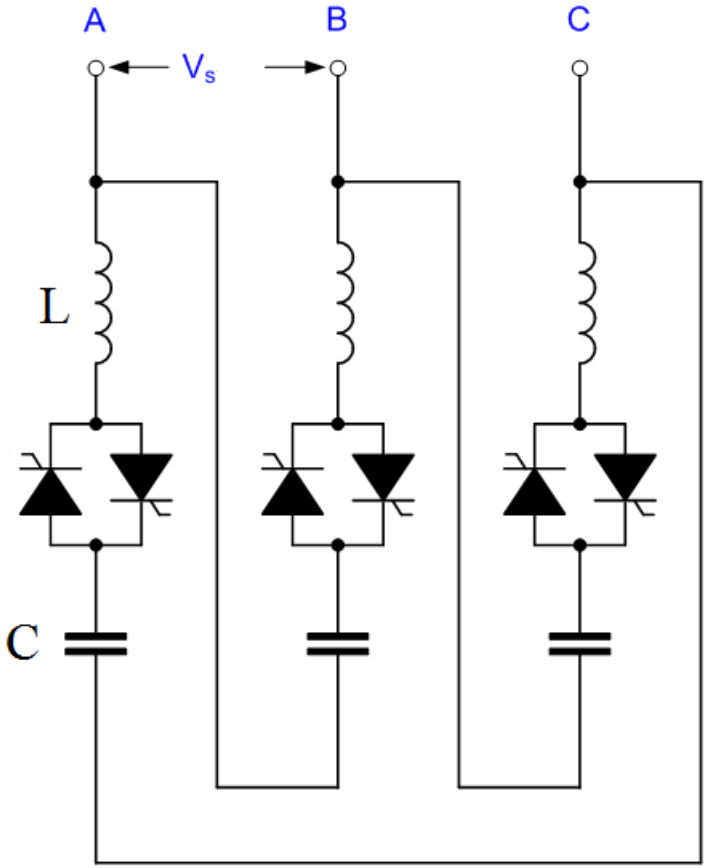
Struja kondenzatora je data relacijom:

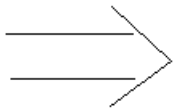
$$i(t) = \frac{V_m}{X_C - X_L}\cos(\omega t + \alpha) - \frac{V_m}{X_C - X_L}\cos(\alpha)\cos(\omega_r t) + \left[\frac{X_C V_m \sin(\alpha)}{\omega_r L(X_C - X_L)} - \frac{V_{CO}}{\omega_r L}\right]\sin(\omega_r t)$$

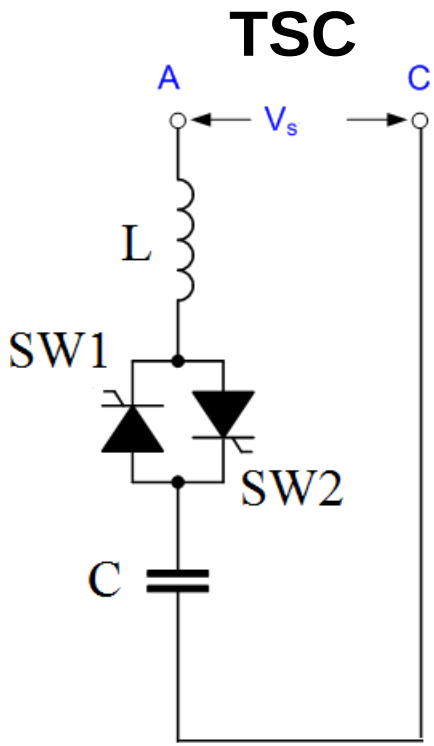
za t=0 struja *i(t)=0*

POSMATRAJMO JEDNU FAZU TROFAZNOG TIRISTORSKOG PREKIDAČKOG KAPACTIVNOG KOLA

(Thyristor Switched Capacitor Circuit - **TSCC**)





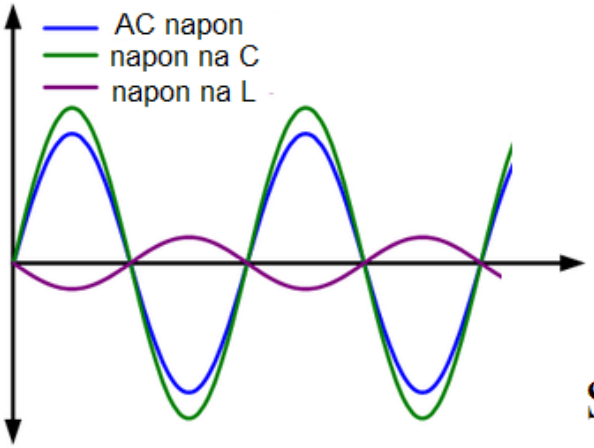


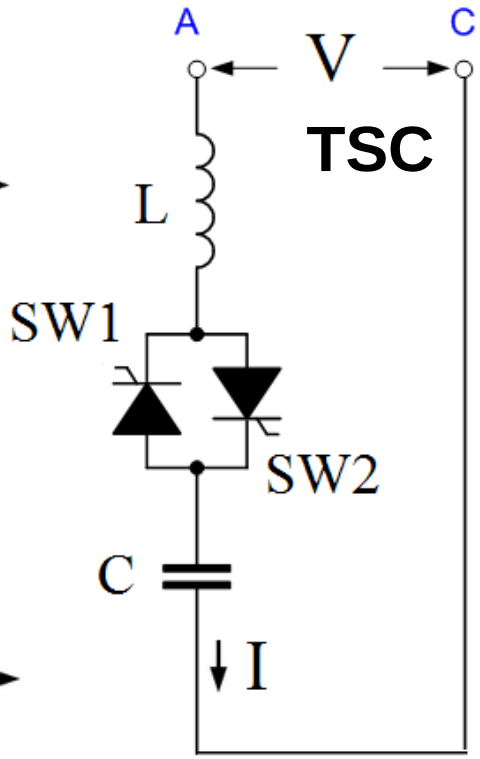
ANALIZU SPROVODIMO ZA JEDNOFAZNO KOLO

-Kolo radi u on-off režimu

-Ustvari razlikujemo tri karakteristična režima rada kola

USTALJENI REŽIM – tiristori SW1-SW2 uključeni





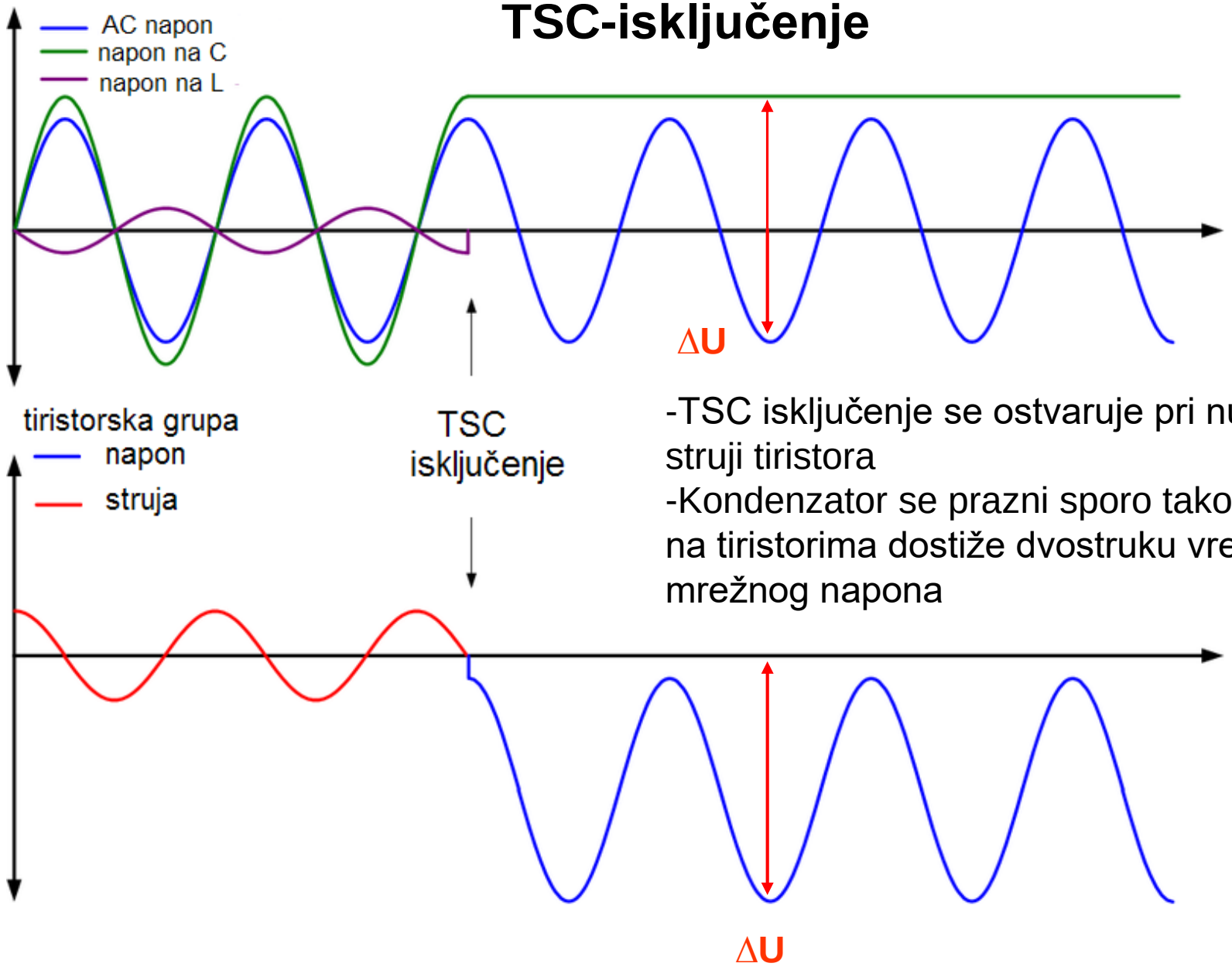
$$I = \frac{V}{X}$$

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{LC}$$

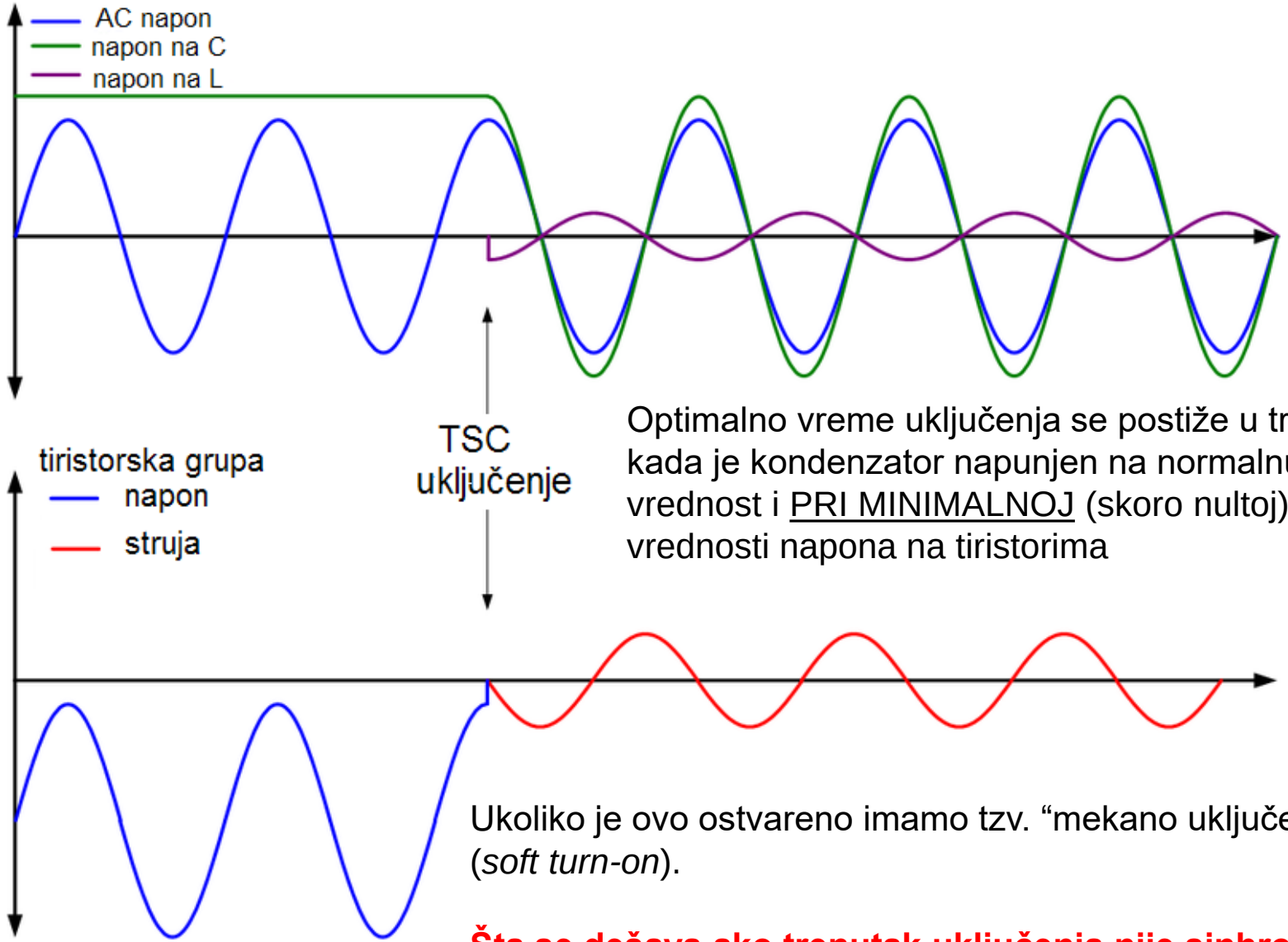
-Naponi na L i C su pomreni za π (ustvari u kontra fazi su)
-Struja u kolu je ograničena ukupnom impedansom X
-Rezonantna učestanost je fr = 150-250Hz
-Izbor prigušnice je kompromis između njene veličine i zahteva za zaštitom tiristorske grupe prilikom uključenja kondenzatora
-Uključenje kondenzatora je direktno (kolo je tada u KRATKOM SPOJU)

TSC-isključenje



-TSC isključenje se ostvaruje pri nultoj struji tiristora
-Kondenzator se prazni sporo tako da napon na tiristorima dostiže dvostruku vrednost mrežnog napona

TSC-uključenje

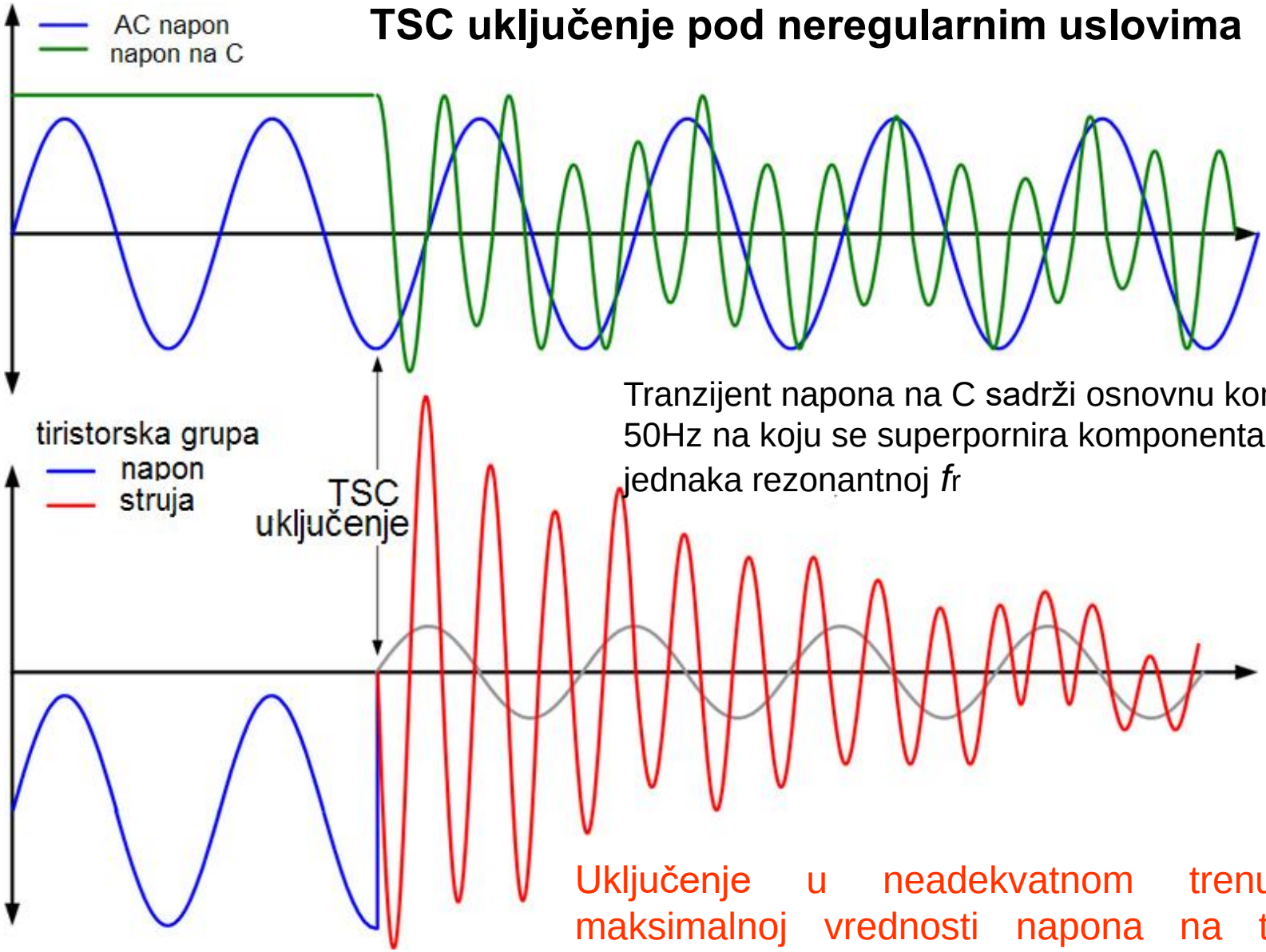


Optimalno vreme uključenja se postiže u trenutku kada je kondenzator napunjen na normalnu vršnu vrednost i PRI MINIMALNOJ (skoro nultoj) vrednosti napona na tiristorima

Ukoliko je ovo ostvareno imamo tzv. “mekano uključenje” (*soft turn-on*).

Šta se dešava ako trenutak uključenja nije sinhronizovan sa ovim naponima??

TSC uključenje pod neregularnim uslovima

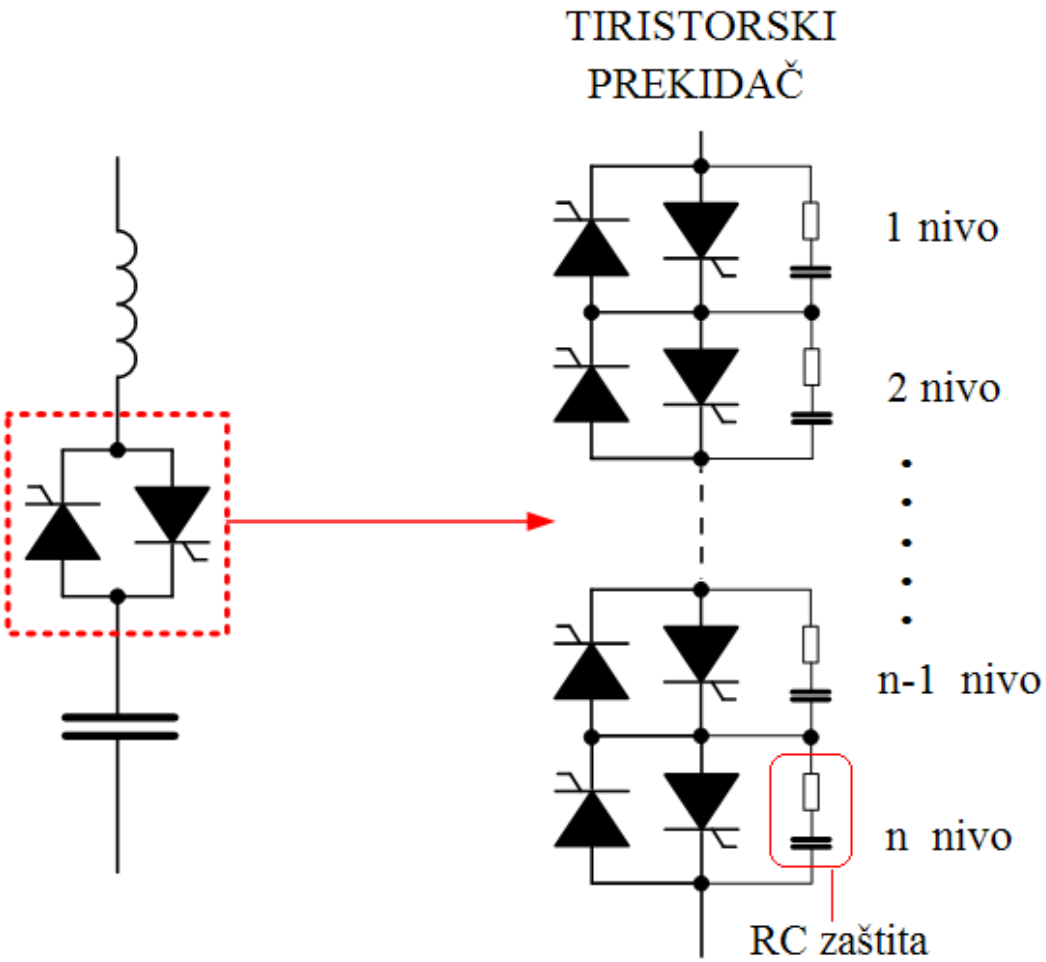


Tranzijent napona na C sadrži osnovnu komponentu 50Hz na koju se superpornira komponenta učestanosti jednaka rezonantnoj f_r

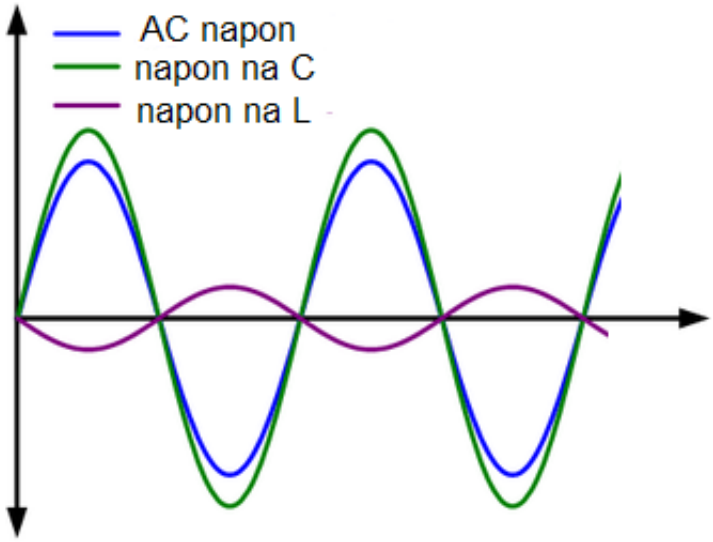
Uključenje u neadekvatnom trenutku (pri maksimalnoj vrednosti napona na tiristorima) dovodi do neželjenih tranzijenata u naponu kondenzatora i što je još nepovoljnije, u struji!!!!

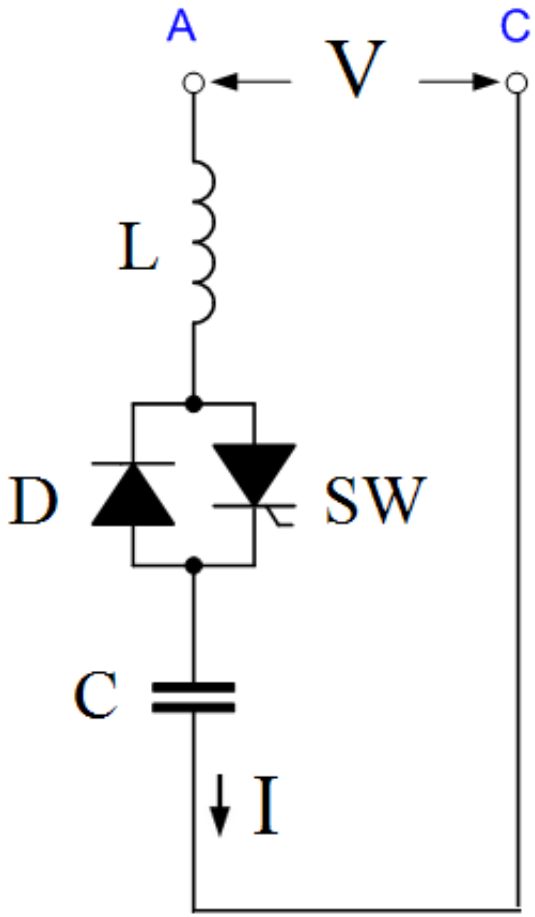
•ZBOG VIŠESTRUKO VEĆIH VREDNOSTI NAPONA OD MREŽNIH NA TIRISTORSKOJ GRUPI ČESTO SE KORISTI PREKIDAČ PRILAGOĐEN ZA VISOKONAPONSKI RAD .

•ON SE SASTOJI OD REDNE VEZE VIŠE ANTIPARALELNIH GRUPA TIRISTORA

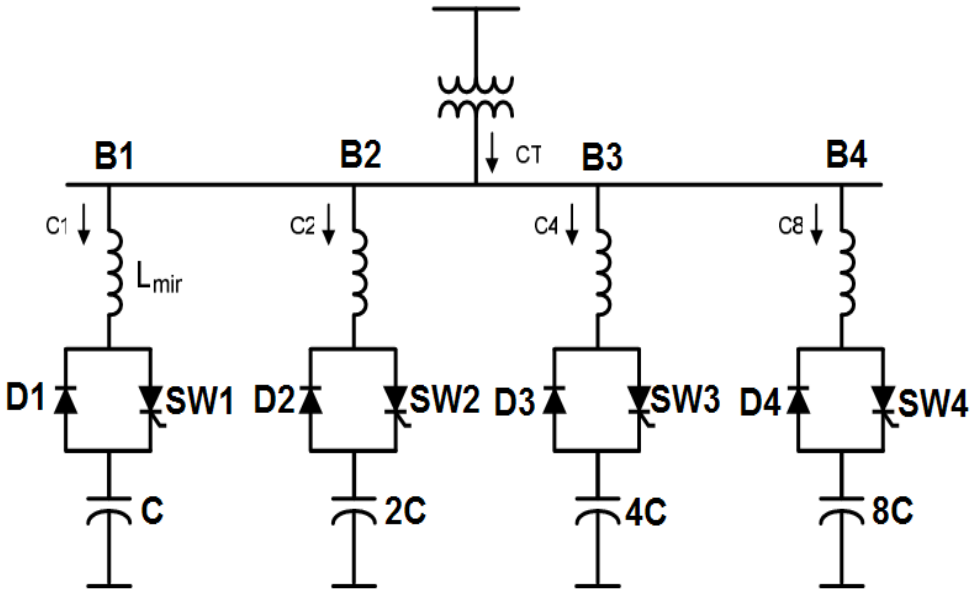


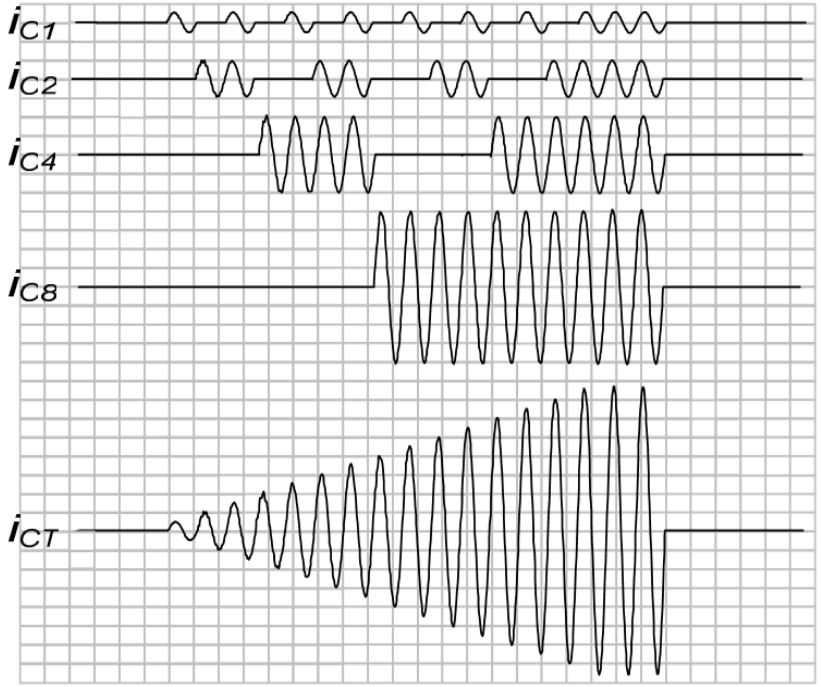
PRETHODNO POMENUTE FUNKCIJE “MEKANOG” TSC UKLJUČENJA I ISKLJUČENJA SE MOGU OSTVARITI SA **JEDNIM TIRISTOROM I JEDNOM DIODOM**





STEPENASTO UKLJUČENJE KONDENZATORA SA TIRISTORSKO-DIODNIM PREKIDAČKIM ELEMENTOM

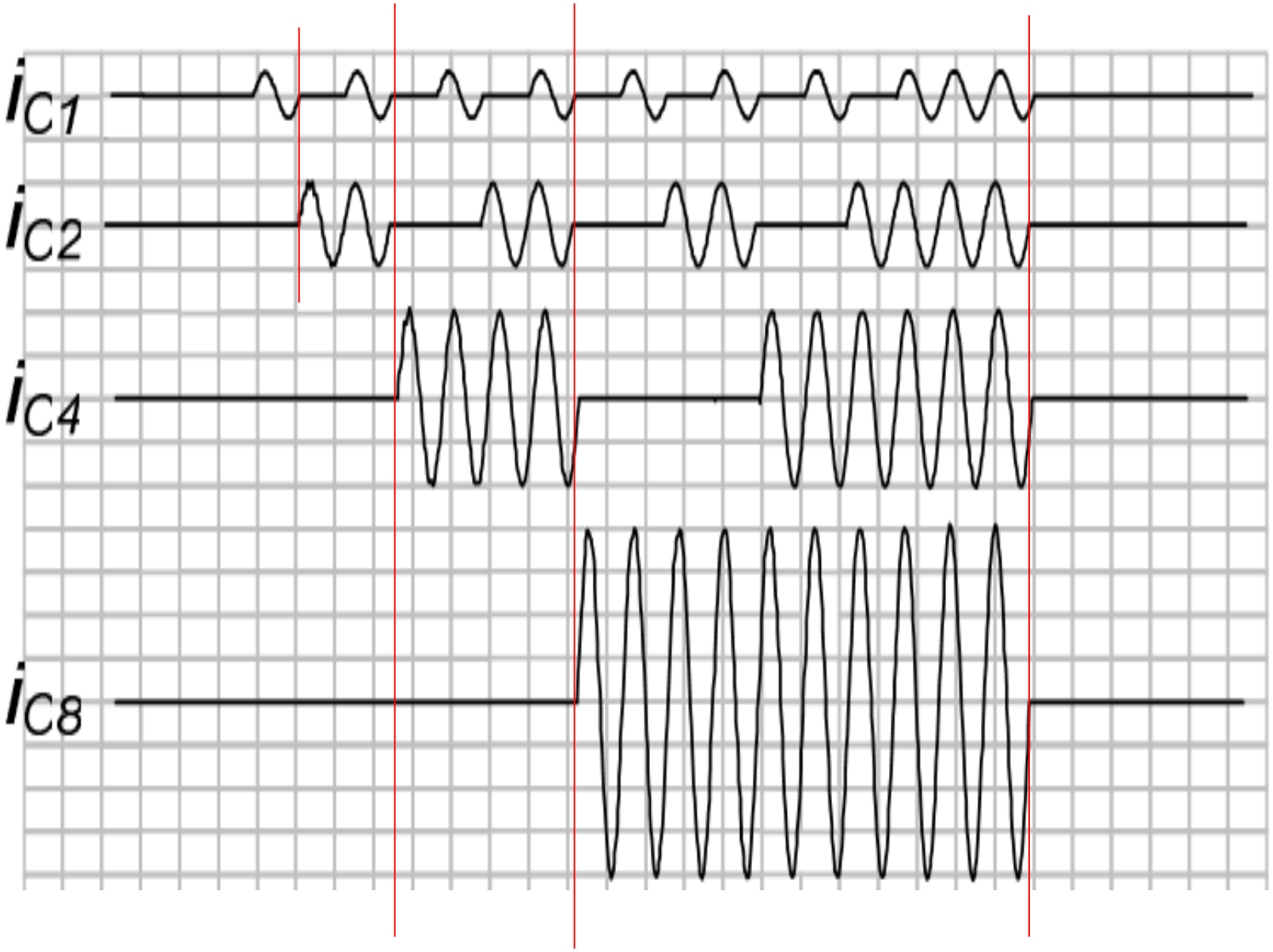




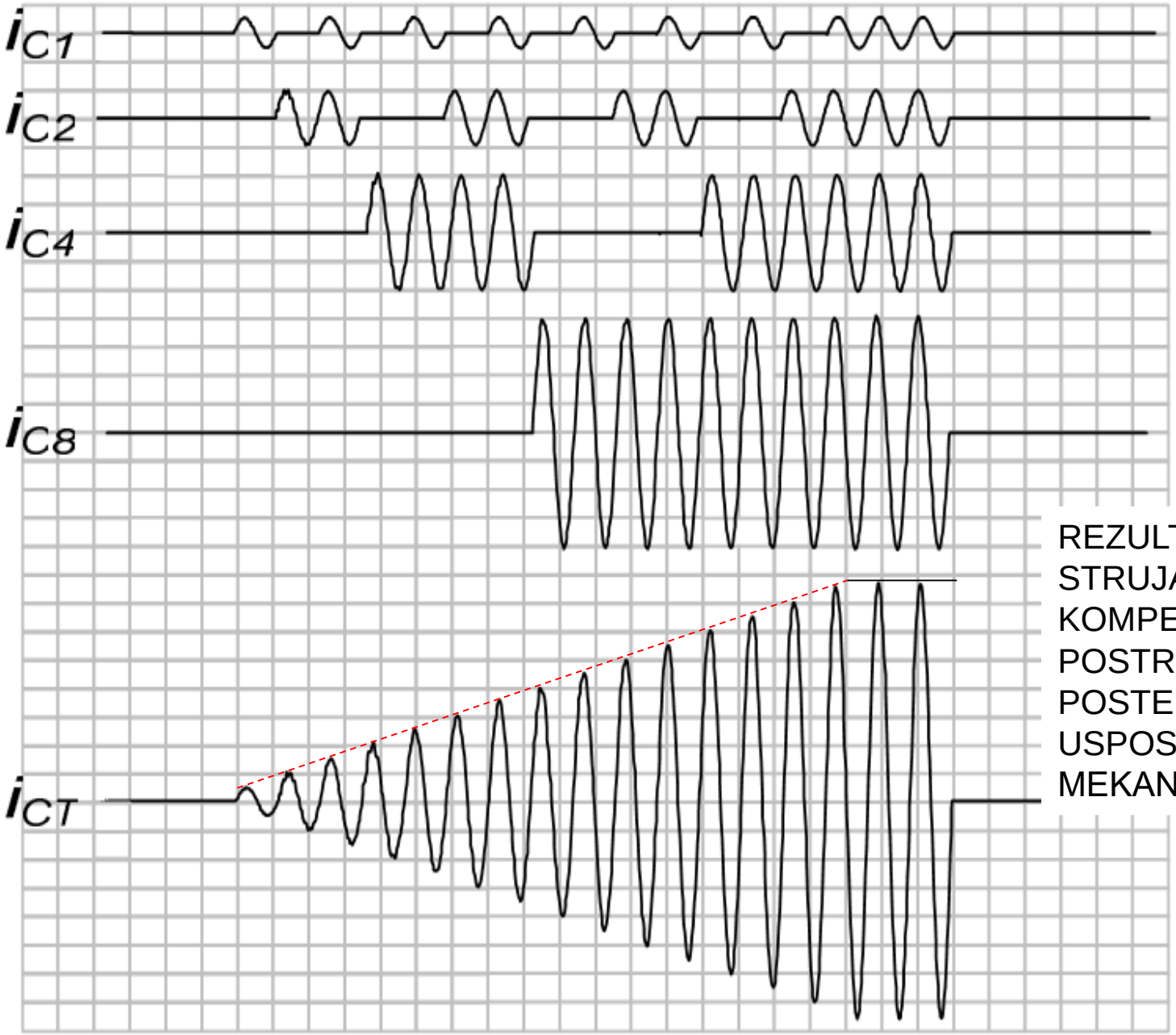
-Ovim načinom stepenaste regulacije postiže se kontinualna regulacija ukupne kapacitivne struje i_{CT}

-Obezbeđeno je “mekano” punjenje kondenzatora energijom zahvaljujući upotrebi BURST-ON regulacije (sada sprega “dioda-tiristor” radi kao nulta sklopka slično kao u slučaju antiparalelne veze tiristora)

TALASNI OBLICI STRUJA POJEDINIH STEPENI

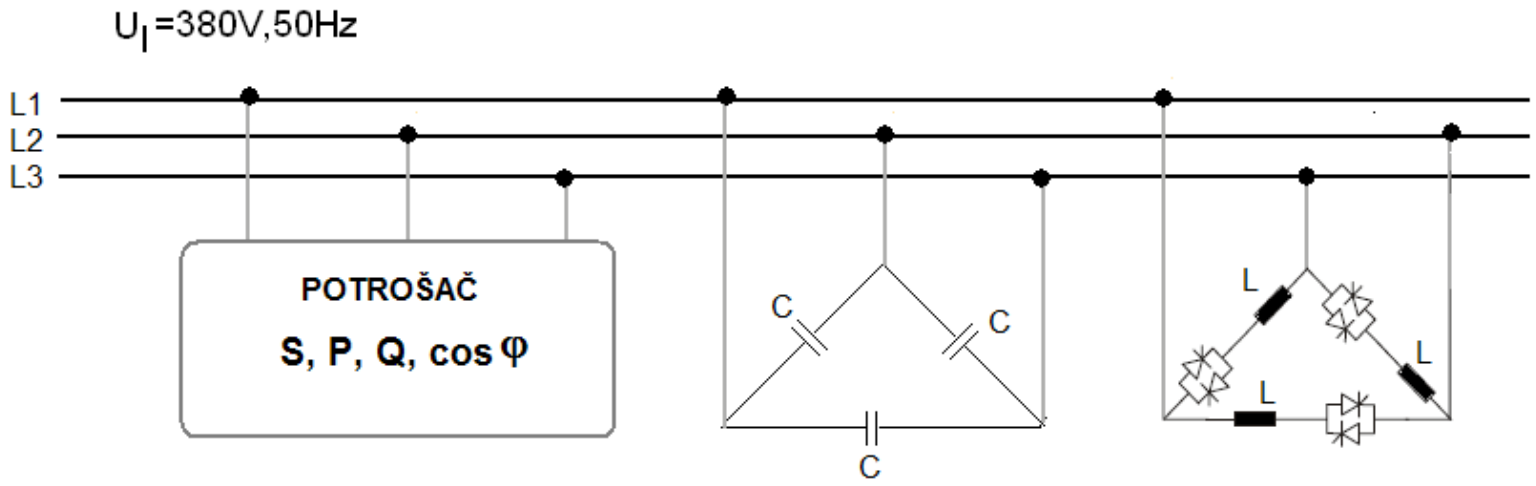


Kako izgleda ukupna struja koju troši postrojenje?



REZULTANTNA STRUJA KOMPENZACIONOG POSTROJENJA SE POSTEPENO USPOSTAVLJA-MEKANI “SOFT” START

TIRISTORSKI KONTINUALNI REGULATORI REAKTIVNE ENERGIJE (Thyristor Controlled Reactor-TCR)

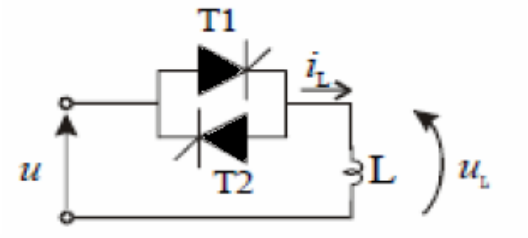


•U slučaju da su dnevne promene induktivne komponente struje velike, paralelno opterećenju se može priključiti fiksna baterija kondenzatora dovoljno velike kapacitivnosti, tako da se potrošač zajedno sa baterijom kondenzatora prema mreži ponaša kao otporno-kapacitivno opterećenje.

•Zatim se paralelno sa baterijom kondenzatora vezuje induktivno opterećen fazni regulator pomoću koga se faktor snage podešava na maksimalnu vrednost.

• Prednost ove tiristorske regulacije je što se njome može postići kontinualna kompenzacija reaktivne energije

OSNOVA KOMPENZATORA: TIRISTORSKI FAZNI REGULATOR SA INDUKTIVNIM OPTEREĆENJEM

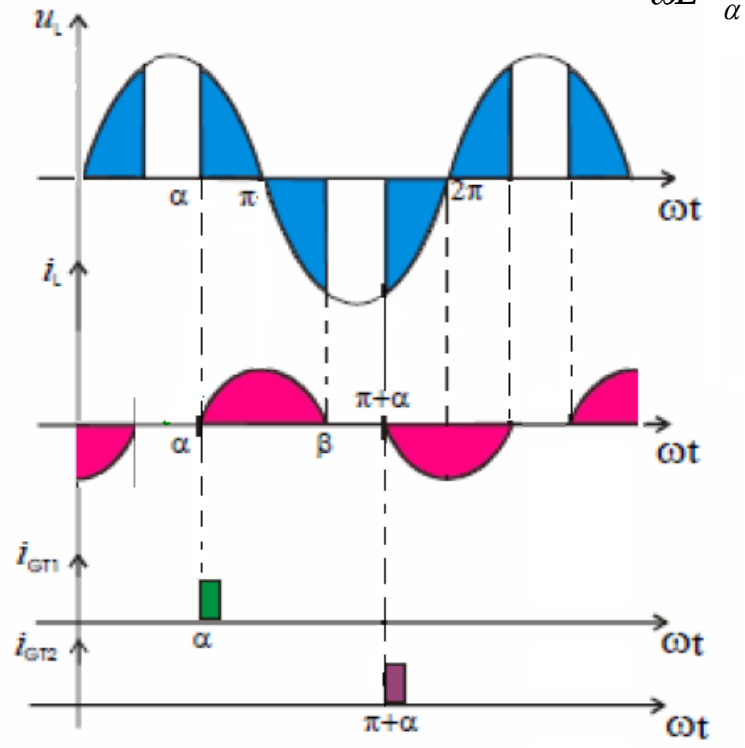


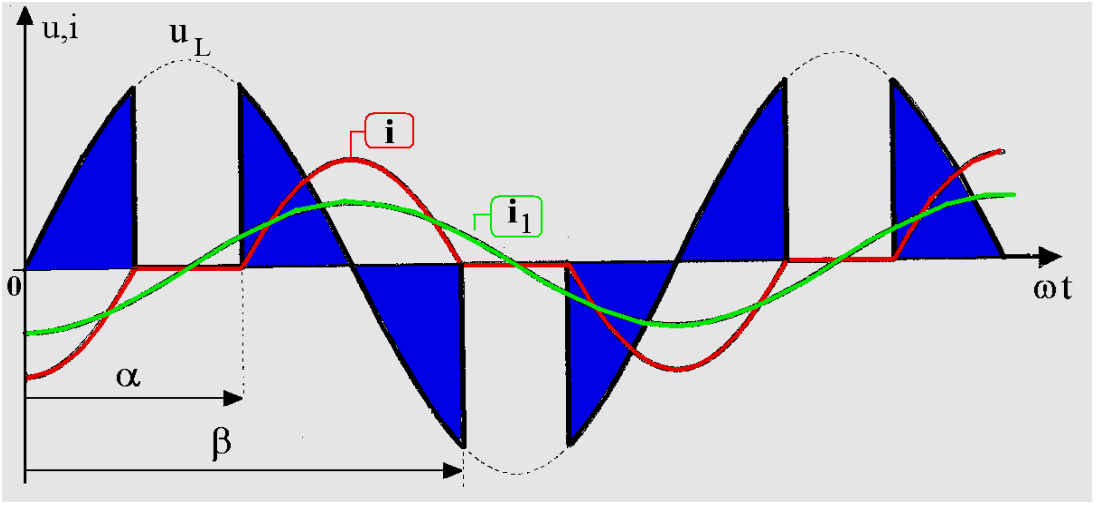
$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^{t} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \cdot \int_{\alpha}^{x} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin x \cdot dx = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (-\cos x)_{\alpha}^{x} = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (\cos \alpha - \cos x)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad 2\pi - \alpha \geq \omega t \geq \alpha$$

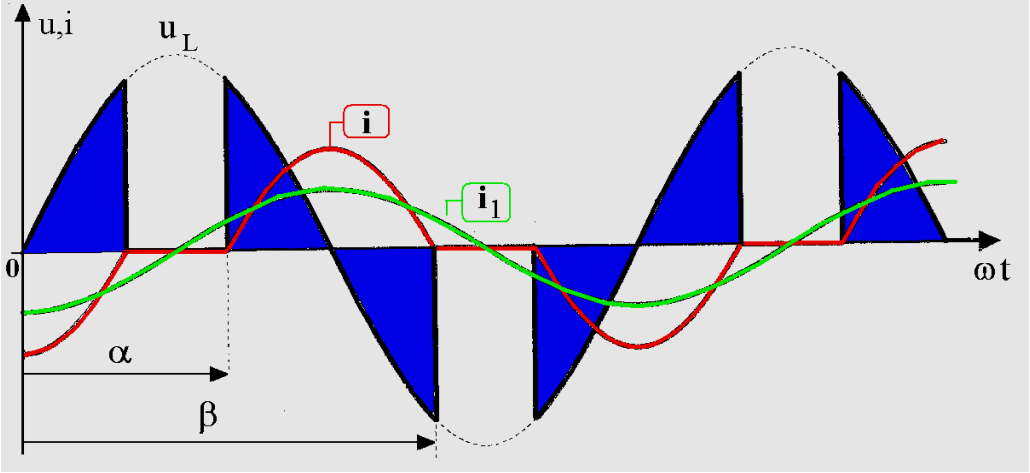
$$\pi / 2 \leq \alpha \leq \pi$$





osnovni harmonik struje - i1

IZRAČUNAVANJE EFEKTIVNE VREDNOSTI STRUJE PRVOG HARMONIKA



$$A_1 = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i(x)\cdot\cos x dx = \frac{4}{\pi}\int_\alpha^{\pi}\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cdot\left[\cos\alpha-\cos x\right]\cdot\cos x dx$$

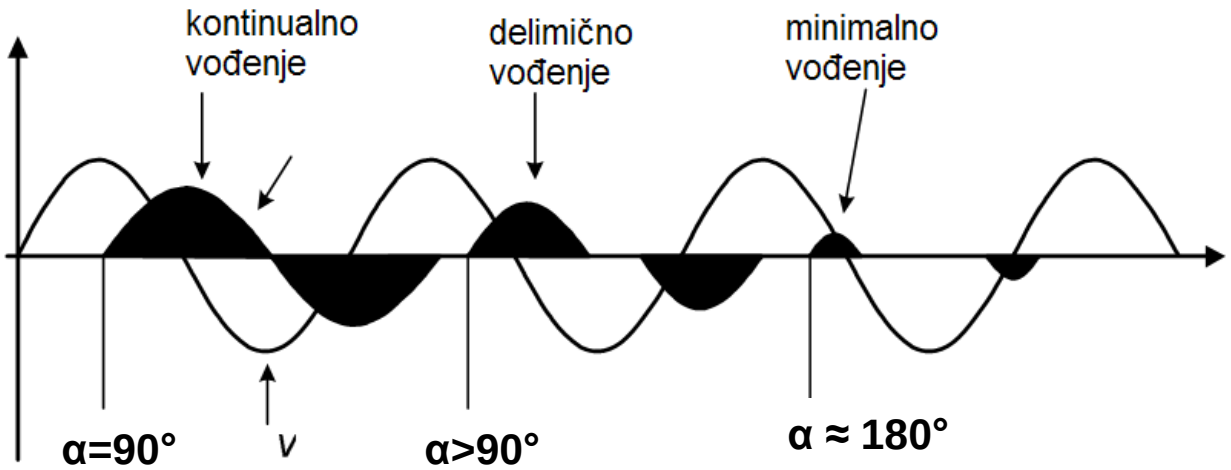
Amplituda osnovnog harmonika struje

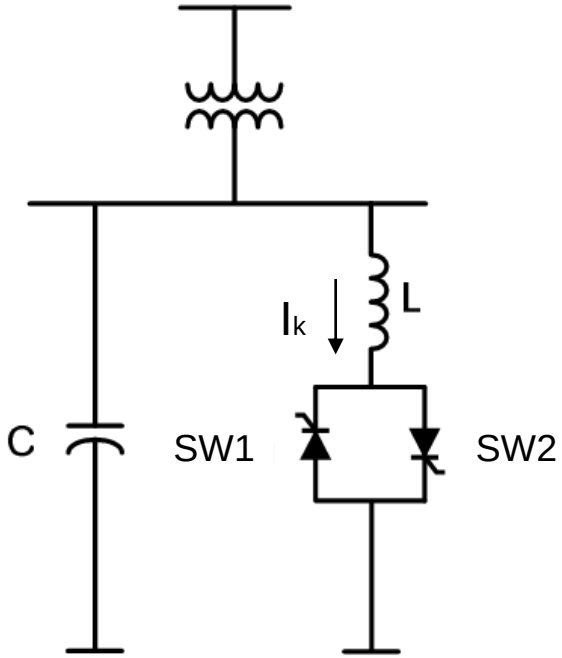
$$A_1 = -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L}\cdot\left[1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right]$$

Efektivna vrednost struje prvog harmonika

$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L}\cdot\left[1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right]$$

TIRISTORSKI FAZNI REGULATOR KAO KOMPENZATOR REAKTIVNE ENERGIJE: struja k-tog harmonika



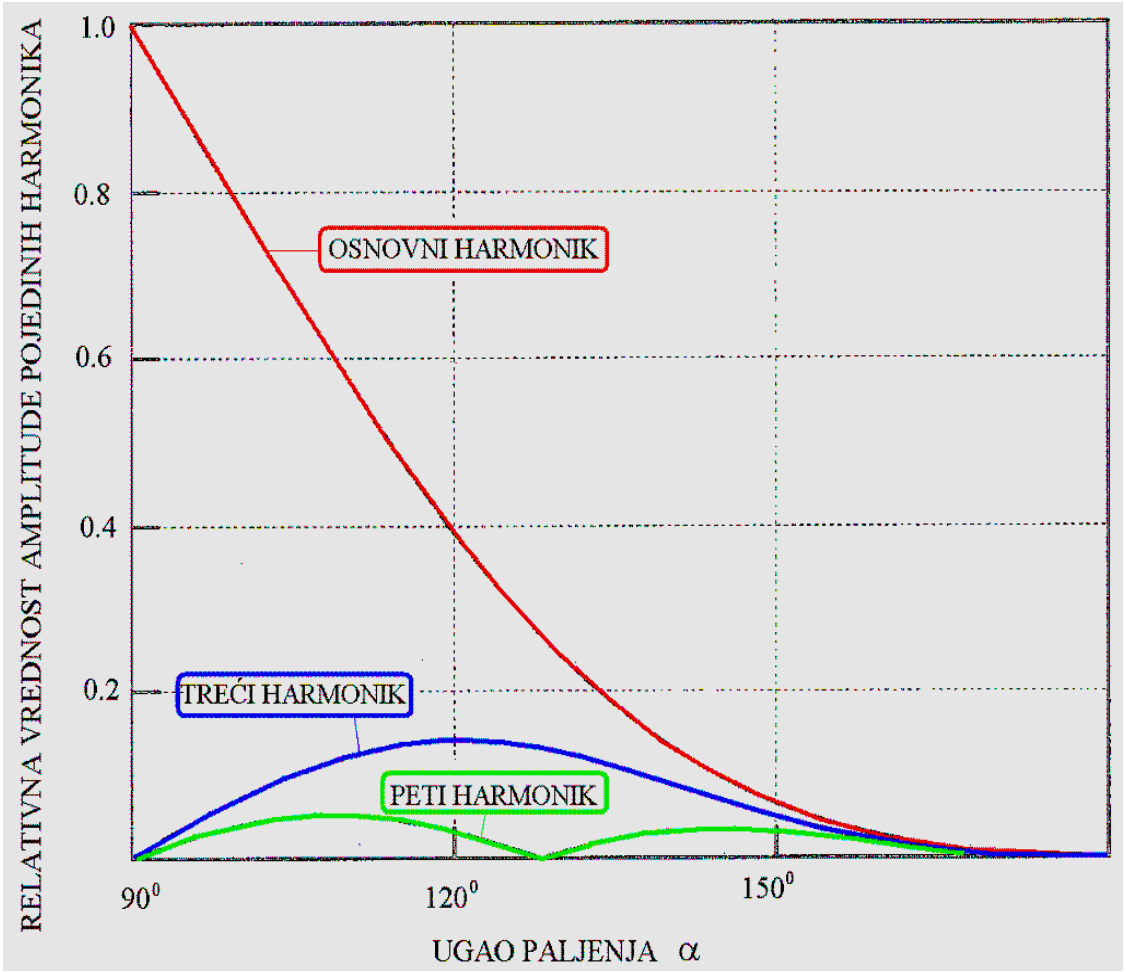


struja k-tog harmonika (uz uslov da je k>1)

$$I_k = \frac{4V_{rms}}{\pi X_L}\left[\frac{\sin(k+1)\alpha}{2(k+1)} + \frac{\sin(k-1)\alpha}{2(k-1)} - \cos(\alpha)\frac{\sin(k\alpha)}{k}\right]$$

AMLITUDE STRUJA VIŠIH HARMONIKA

$$A_k = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i(x)\cos kx\,dx \qquad A_k = -\frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L}\cdot\frac{\sin k\alpha\cdot\cos\alpha - k\cdot\cos k\alpha\cdot\sin\alpha}{k\cdot(k^2-1)}$$



uz uslov *k>1*

Neželjena harmonijska izobličenja potiču uglavnom od trećeg harmonika koji ima maksimalnu vrednost za

$$\alpha = 120^0$$

$$A_3 = A_{3MAX} = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}\cdot\frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138\cdot\frac{\sqrt{2}U}{\omega L}$$

$$I_3 = \frac{A_{3MAX}}{\sqrt{2}} = \frac{U}{\omega L}\cdot\frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138\cdot\frac{U}{\omega L}$$

EFEKTIVNA VREDNOST STRUJE TREĆEG HARMONIKA

Šta je sa petim harmonikom?

Sadržaj harmonika u struji kod monofaznog tiristorskog regulatora sa induktivnim opterećenjem

Za ugao upravljanja $\alpha = 120^0$

efektivne vrednosti harmonika su:

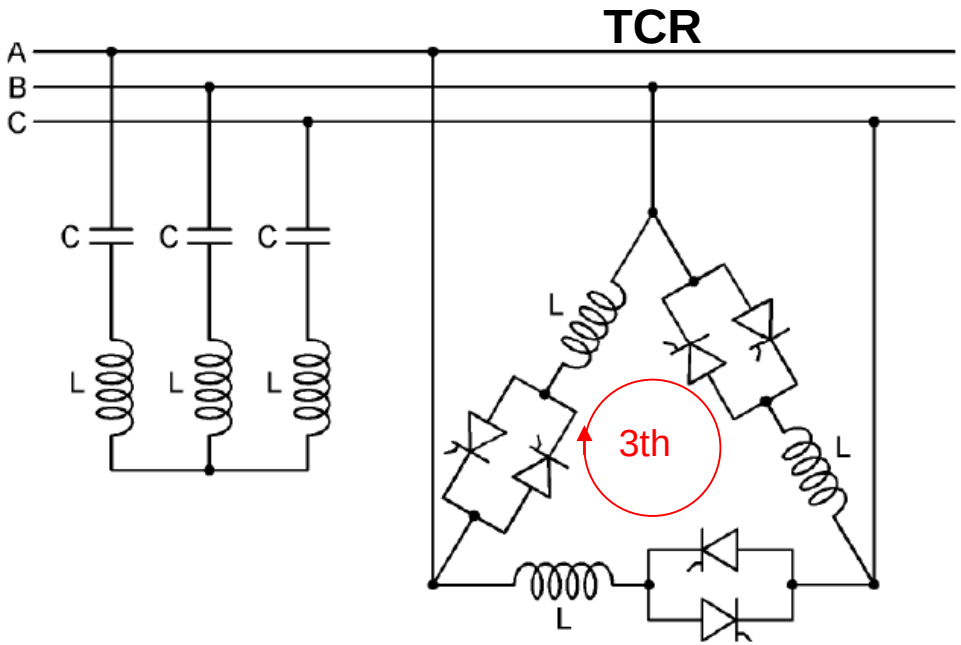
$$I_1 = \frac{A_{1MAX}}{\sqrt{2}} = 0.3900 \cdot \frac{U}{\omega L}$$

$$I_3 = \frac{A_{3MAX}}{\sqrt{2}} = 0.1380 \cdot \frac{U}{\omega L}$$

DOMINANTNI HARMONICI

$$I_5 = \frac{A_{5MAX}}{\sqrt{2}} = 0.007 \cdot \frac{U}{\omega L}$$

Praktično se peti harmonik može zanemariti!!!



•Promenom ugla paljenja tiristora menja se efektivna vrednost osnovnog harmonika struje kroz prigušnicu (ekvivalentno efektu promenljive induktivnosti).

• Baterija kondenzatora generiše konstantnu reaktivnu snagu (pri stalnom naponu).

•Reaktivna snaga koja se injektira u mrežu jednaka je razlici snaga koju proizvede kondenzatorska baterija i snage koju uzima tiristorski kontrolisana prigušnica.

Ovakav način regulacije reaktivne snage, zbog nelinearnosti faznog ragulatora, unosi više harmonike struje u mrežu. Ako su uglovi provođenja oba tiristora u antiparalelnoj vezi jednaki (što je po pravilu ispunjeno), tada se u mrežu unose samo neparni harmonici struje.

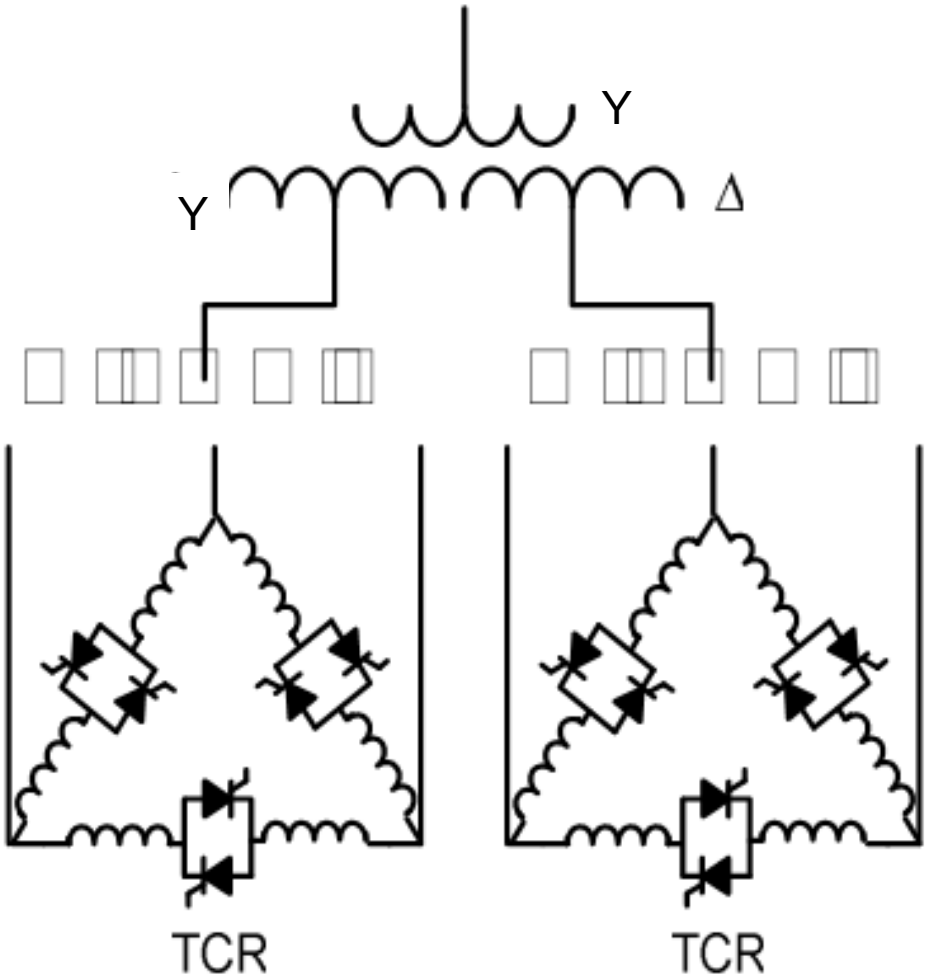
U protivnom, u mrežu se unose i parni harmonici, te stoga i jednosmerna komponenta struje.

Na red sa kondenzatorima se stoga dodaju prigušnice male induktivnosti čija je primarna funkcija da zajedno sa kondenzatorima čine filtar kojim se iz mrežne struje delom eliminišu viši harmonici.

Bateriju kondenzatora C moguće je podeliti na nekoliko baterija koje se prekidačima uključuju u kolo, a čije **prigušnice L** su odabrane tako da iz mrežne struje **eliminišu recimo peti i sedmi harmonik!!!**

Treći harmonik struje faznog regulatora se zatvara unutar trougla faznog regulatora i nema ga u mrežnoj struji!!!!!

12- pulsna kombinacija za ukljanjanje 5 i 7 hramonika



U ovom slučaju za eliminaciju 5 i 7 harmonika nisu potrebni nikakvi pasivni filtri kao u prethodnom slučaju.

Ovi harmonici se eliminišu korišćenjem faznog pomeraja uvođenjem transformatorske sprege i 12-pulsnog tiristorskog pretvarača kao na slici.

Treći harmonik je eliminisan prigušnicama u sprezi “trougao”

TIRISTORSKI KONTROLISANI REAKTOR (TCR) kao ekvivalent PROMENLJIVOJ PRIGUŠNICI

- Ako se posmatra osnovni harmonik struje, uočava se da se fazni tiristorski regulator sa čisto induktivnim opterećenjem ponaša prema mreži, kao prigušnica promenljive induktivnosti. Promenom faznog ugla α u opsegu $\pi/2 \le \alpha \le \pi$

induktivnost prigušnice se može podešavati u opsegu :

$$L_{MIN} \le L \le +\infty$$

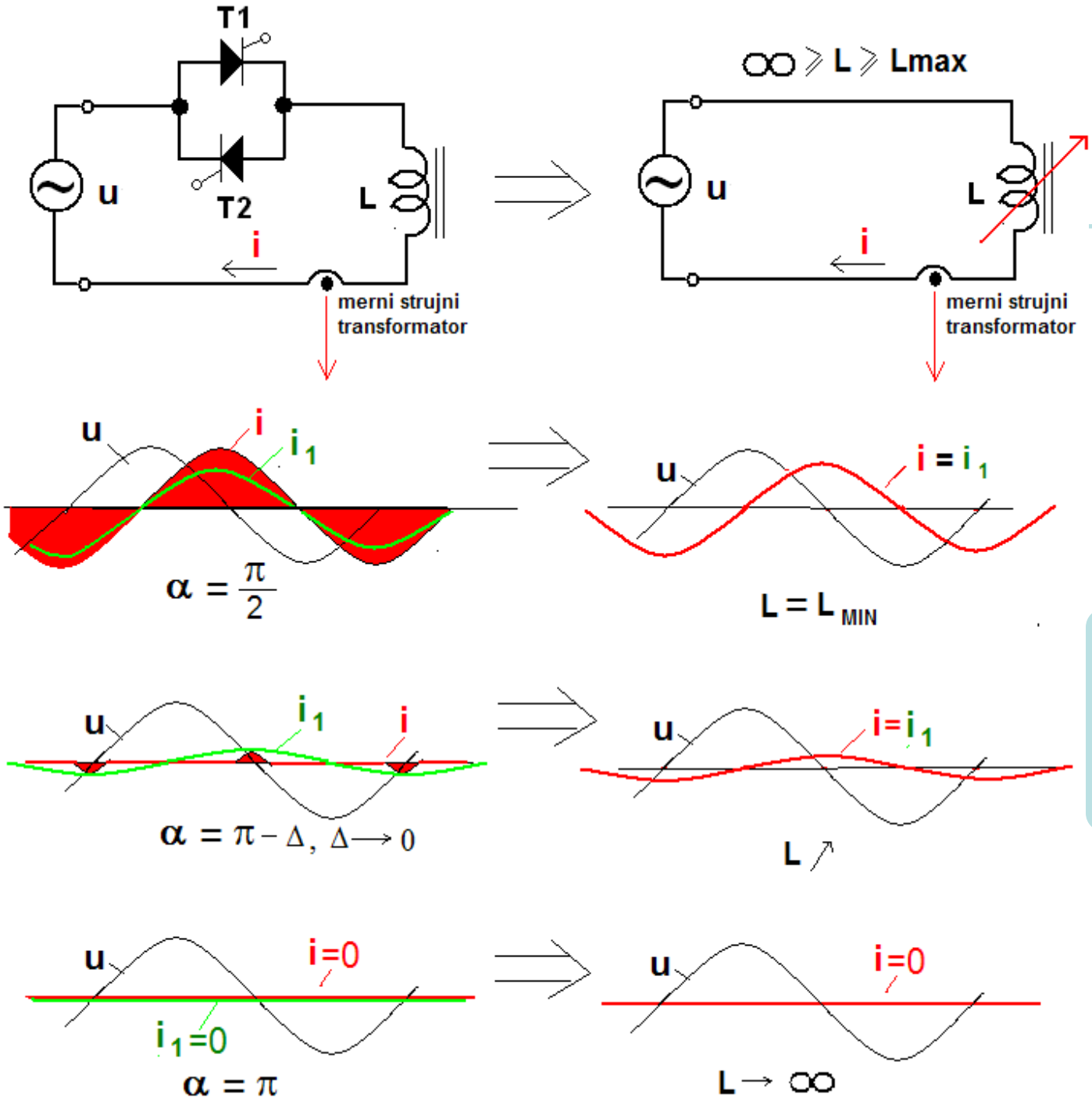
UKUPNA TROFAZNA SNAGA KOMPENZATORA je jednaka:

opseg ugla upravljanja

$$Q = 3U_f I_1 = 3U_l I_1 = \frac{6}{\omega L} \cdot U_l^{\,2} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right] \qquad \pi/2 \le \alpha \le \pi$$

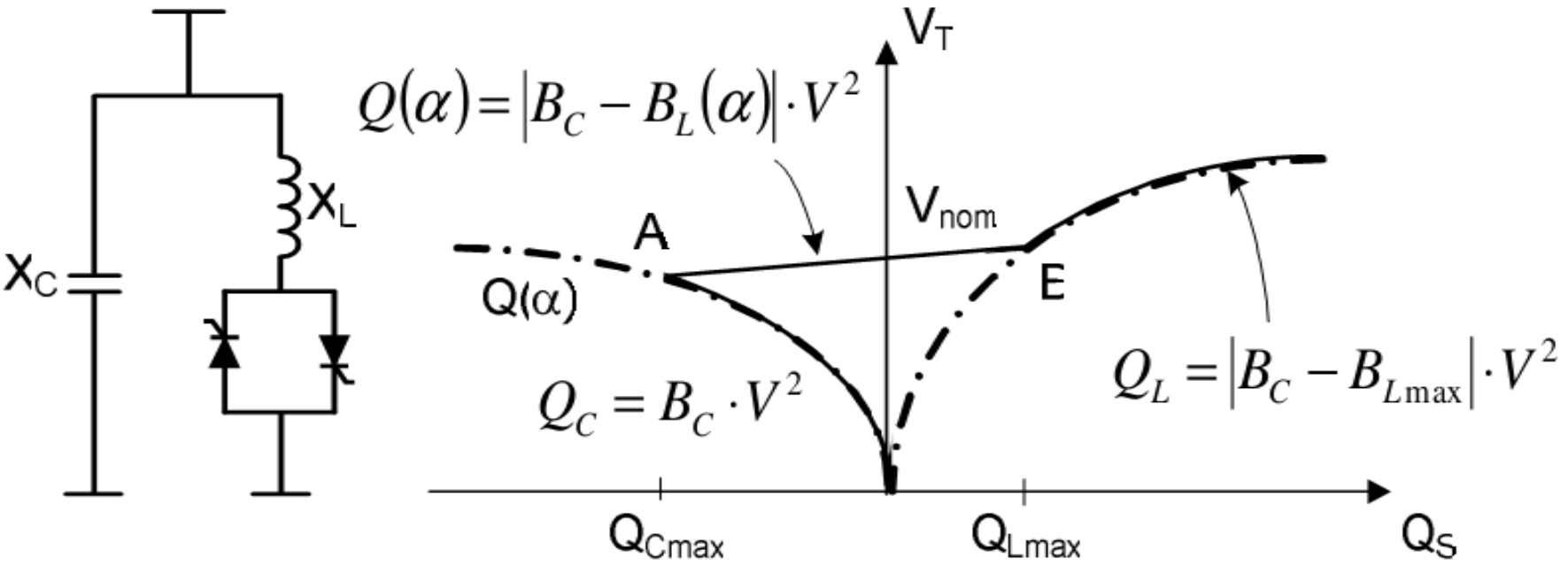
gde je za spregu tiristorskog regulatora u „trougao“ $U_f = U_l$

tj. efektivne vrednosti faznog i linijskog napona su jednake i iznose 380V(400V)



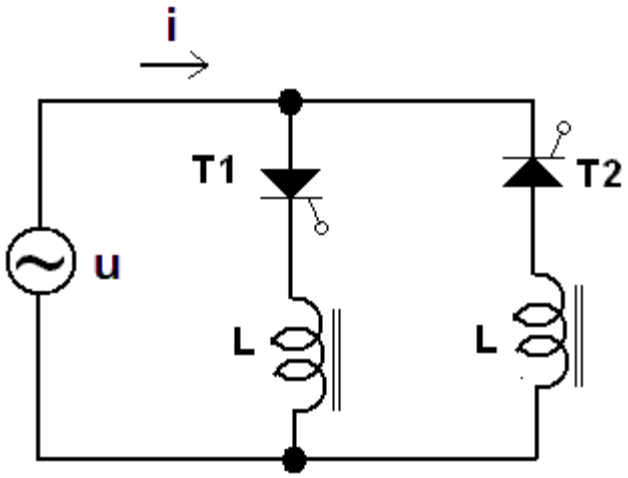
$$L_{MIN} \leq L \leq +\infty$$

V-Q karakteristika tiristorski kontrolisane prigušnice u kombinaciji sa kondenzatorom



-KARAKTERISTIKA *napon V-reaktivna snaga Q* za fazno kontrolisani kompenzator reaktivne energije
-Fiksna baterija kondenzatora
-Generisana reaktivna snaga je kompenzovana sa tiristorskim faznim regulatorom
-Pri nominalnom naponu *V-Q karakteristika* je linearna ali je ograničena snagom kondenzatora, odnosno prigušnice
-Ispod ovih ograničenja *V-Q karakteristika* je nelinearna (ovo je glavna mana ovih VAR kompenzatora)

TIRISTORSKI KOMPENZATOR SA PROŠIRENIM OPSEGOM UGLA PALJENJA



U slučaju ove konfiguracije faznog regulatora ugao paljenja tiristora se može menjati u punom opsegu:

$$0 \le \alpha \le \pi$$

Stoga je ova konfiguracija povoljnija u odnosu na konfiguraciju sa antiparalelnom vezom tiristora kod koje je opseg regulacije bio u intervalu:

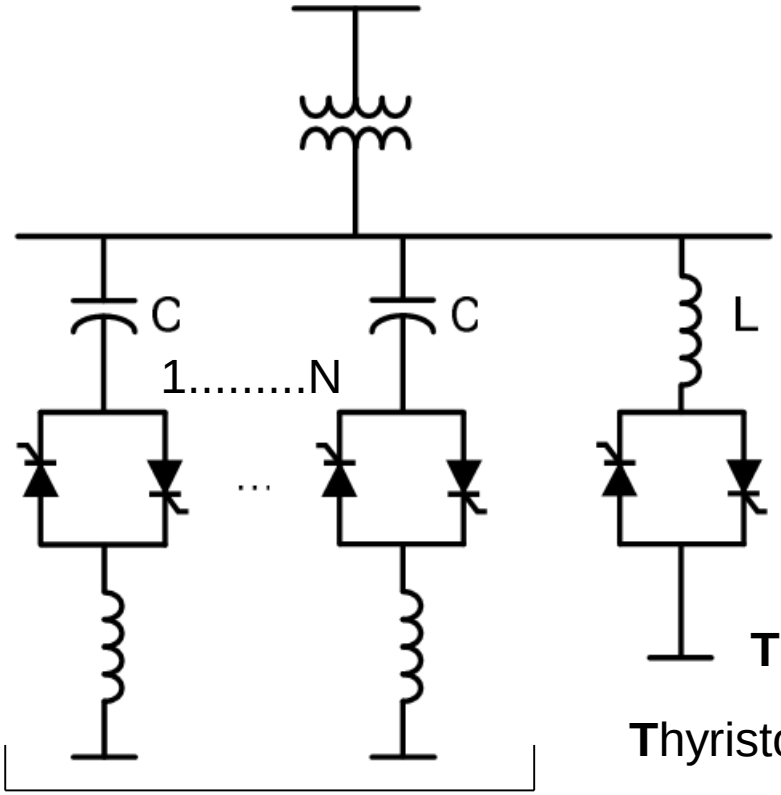
$$\pi/2 \le \alpha \le \pi$$

Efektivna vrednost struje osnovnog harmonika je ista kao i kod faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora:

$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] \qquad 0 \le \alpha \le \pi$$

MANA: dve prigušnice, više bakra i gvožđa, skuplje rešenje

KOMBINACIJA TIRISTORSKOG SERIJSKOG KOMPENZATORA I TIRISTORSKI KONTROLISANE PRIGUŠNICE (STEPLESS kontrola)

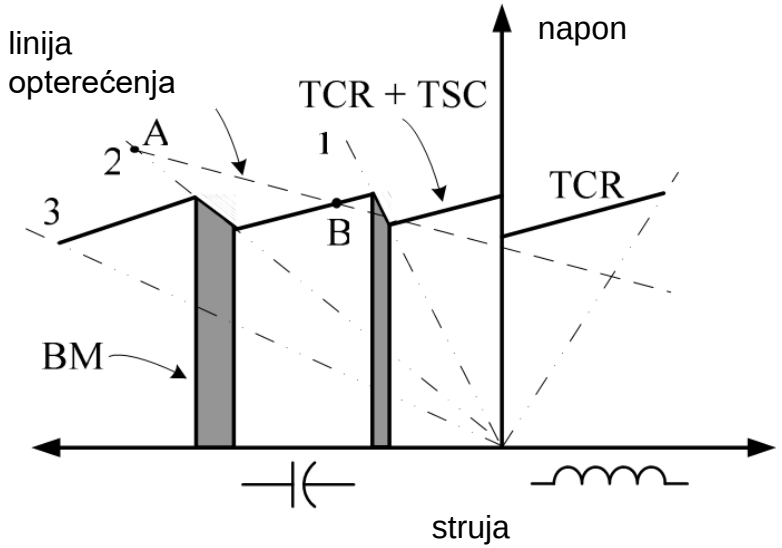


TSC

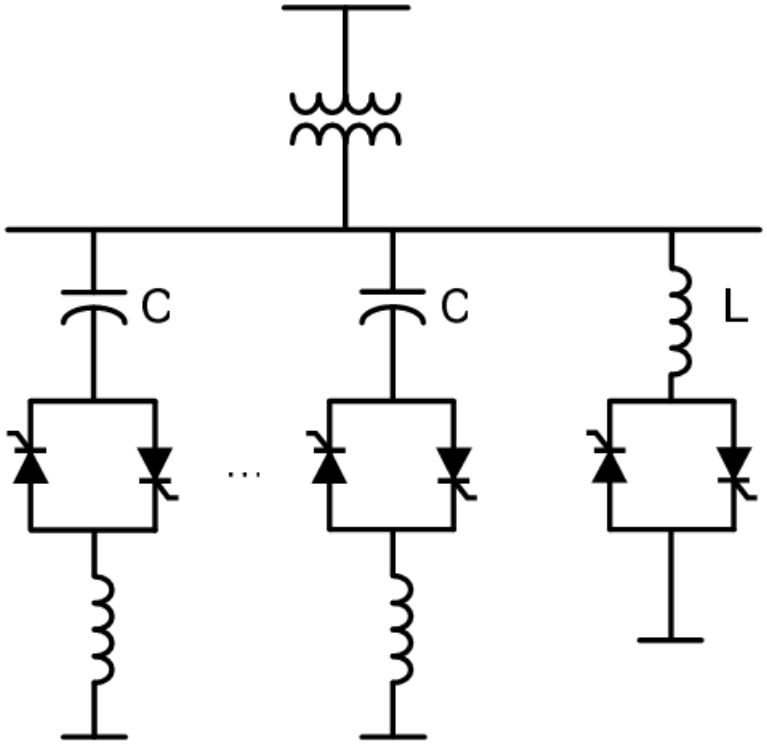
Thyristor **S**witched **C**apacitors

TCR

Thyristor **C**ontrolled **R**eactor



TSC i TCR kontrola (kombinacija)



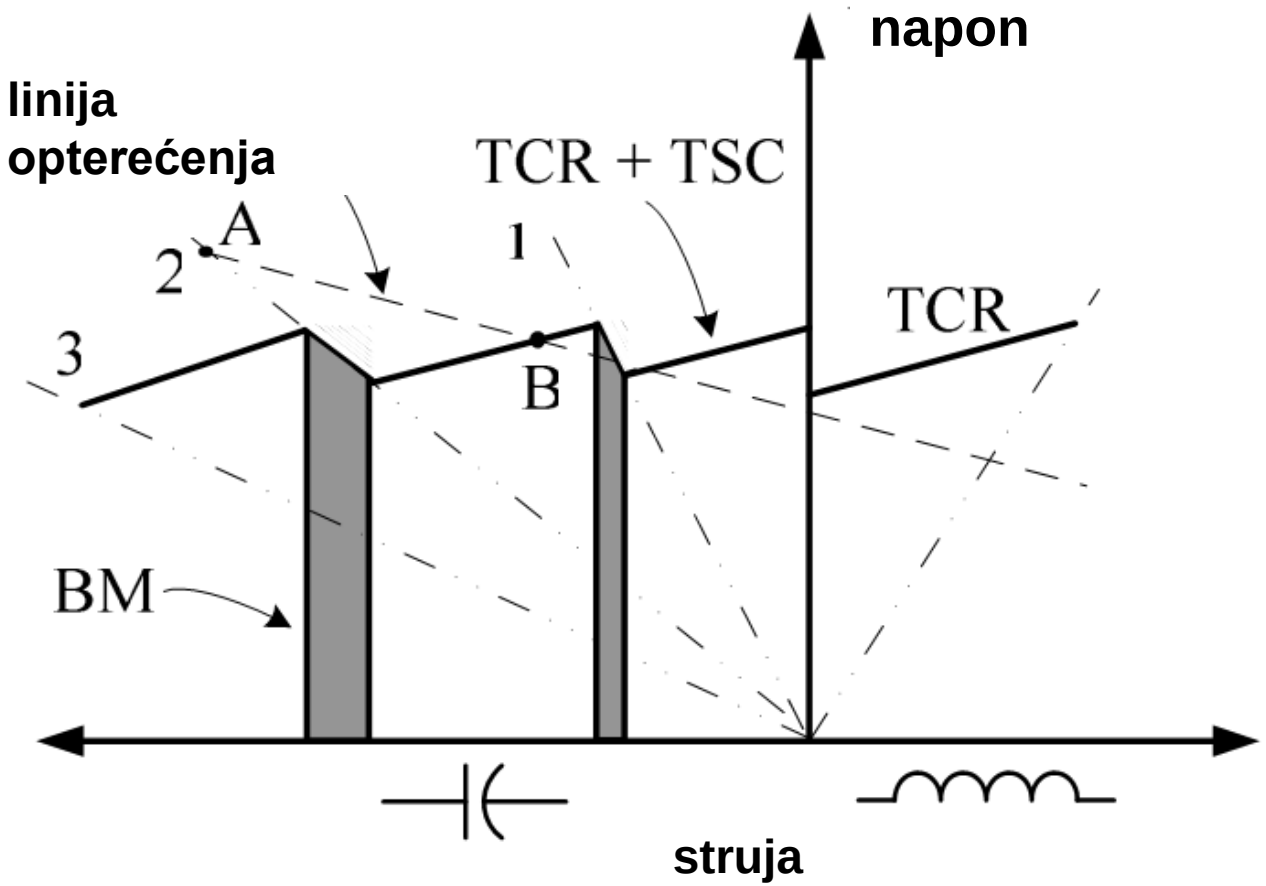
-Kombinacija stepenaste regulacije (ostvarene TSC konfiguracijom) i kontinualne regulacije (ostvarene TCR konfiguracijom).
-Ako je potrebno da se vrši apsorpcija reaktivne snage, baterija kondenzatora je isključena i kompletnu ulogu prijema reaktivne snage ima tiristorski kontrolisana prigušnica, odnosno TCR.
-Koordinacijom kontrole između prigušnice i kondenzatorskih stepeni moguće je dobiti kontinualnu tzv. STEPLESS kontrolu

-Ovi statički kompenzatori se karakterišu:

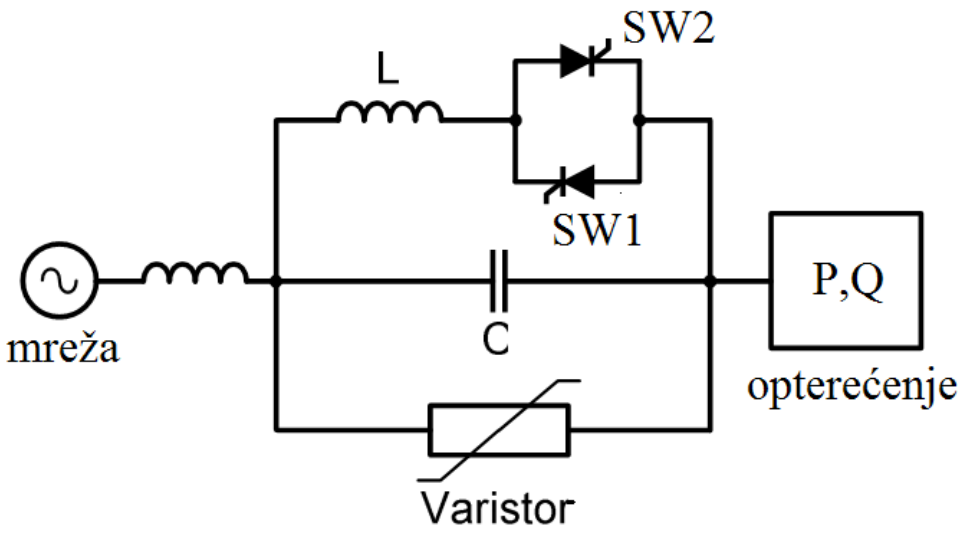
a) kontinualnom kontrolom, praktično bez tranzijenata
b) niskim generisanjem harmonika (pošto je reaktivna snaga kontrolisanog reaktora relativno mala
c) velikom fleksibilnošću rada i kontrole

GLAVNI NEDOSTATAK
-relativno visoka cena u odnosu na TSC i TCR pojedinačno

V-I karakteristika kombinovanog TCR –TSC kompenzatora



TIRISTORSKI KONTROLISANI SERIJSKI KOMPENZATORI
TCS (Thyristor Controlled Series) kompenzatori



-Ovi kompenzatori su jako korisni kada je potrebno uvesti i povećati prigušenja kod među-povezivanja velikih sistema (velikih interkonekcija)
-Nima se prevazilazi efekat Subsinhrone Rezonace (SSR)
-SSR je fenomen koji se odnosi na interakciju između velikog termobloka i redno kompenzovanog transmisionog sistema.
-Dva su koncepeta TCS sistema (**prvi koncept** *pruža elektromehaničko prigušenje između velikih električnih sistema promenom reaktansi za interkonekciju, odnosno TCS će obezbediti promenljivu kapacitivnu reaktansu*; **drugi koncept** *menja svoju prividnu impedansu za subsnhrone frekvencije*

PREKIDAČKI *VAR* KOMPENZATORI

•U NOVIJE VREME ZNAČAJAN NAPREDAK U PRIMENI NALAZE PREKIDAČKI PRETVARAČI ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE ENERGIJE.

•CILJ JE GENERISATI ILI APSORBOVATI REAKTIVNU SNAGU (ENERGIJU) BEZ UPOTREBE VELIKE(GLOMAZNE) I “ZAHTEVNE” BATERIJE KONDENZATORA

•OVIM SE ZNAČAJNO SMANJUJU TROŠKOVI NA PASIVNE KOMPONENTE (GLOMAZNE I SKUPE)

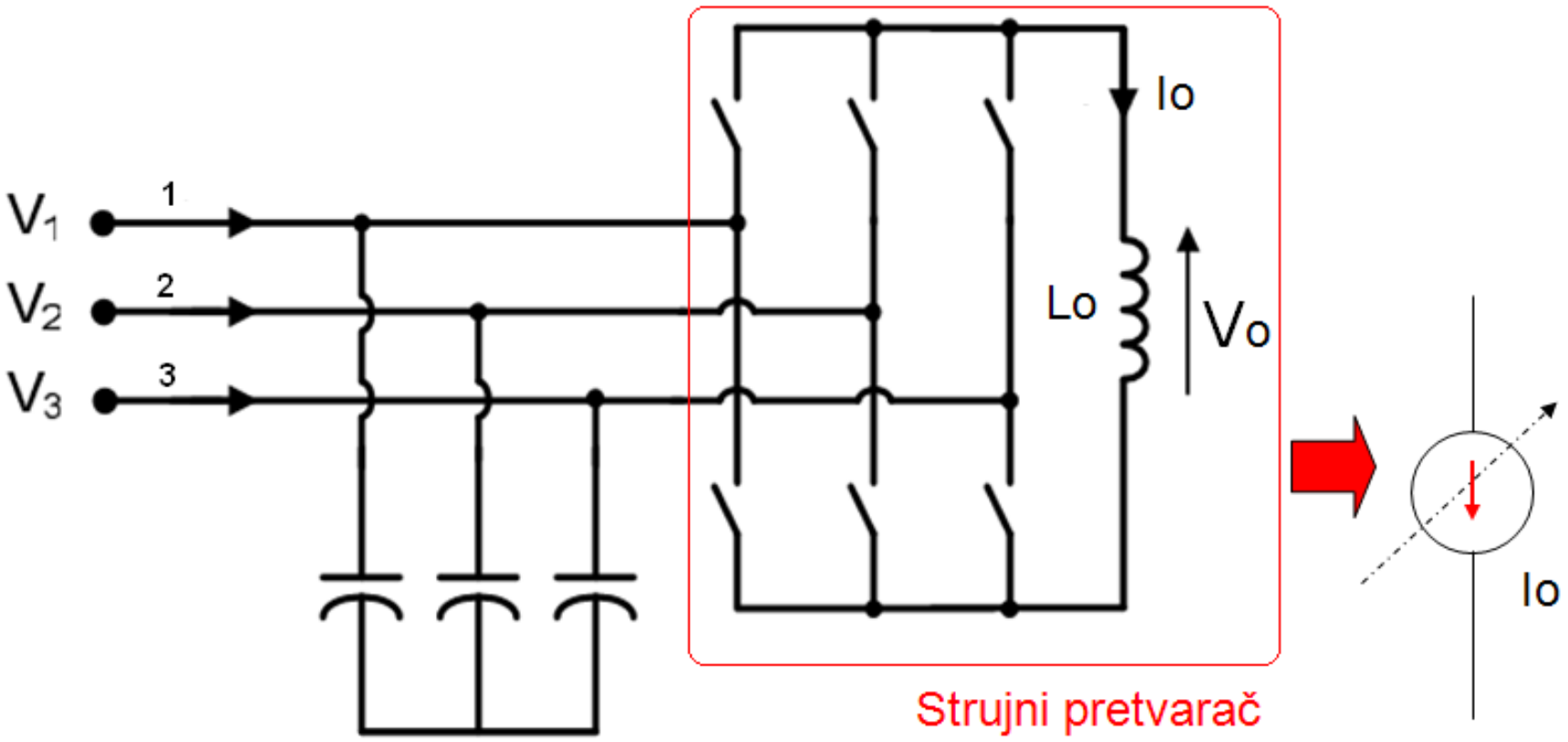
•CENE ELEKTRONIKE, ODNOSNO ENERGETSKIH PRETVARAČA SU U KONSTANTNOM PADU

•NEKOLIKO PRISTUPA OVIM PREKIDAČKIM PRETVARAČIMA SE IZDVAJA NA TEHNOLOŠKOM TRŽIŠTU.

•STANDARDNI NAČINI KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE PODRAZUMEVAJU KORIŠĆENJE DVE OSNOVNE TOPOLOGIJE *VAR* KOMPENZATORA, KOJE SU BAZIRANE NA PREKIDAČKIM PRETVARAČIMA:

- *TOPOLOGIJA sa STRUJNIM PREKIDAČKIM PRETVARAČIMA*
- *TOPOLOGIJA sa NAPONSKIM PREKIDAČKIM PRETVARAČIMA*

VAR kompenzator baziran na strujnom pretvaraču



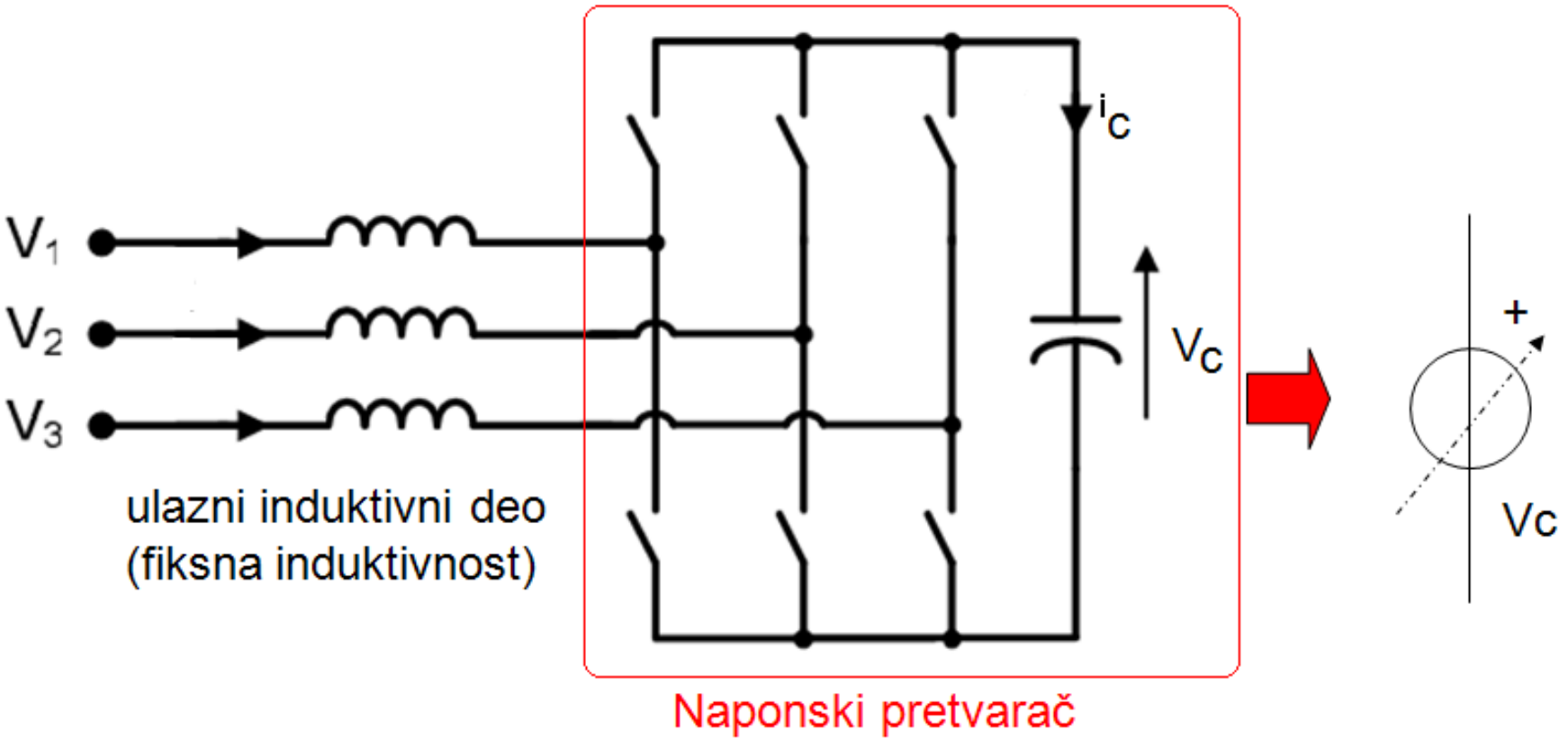
Strujni pretvarač

ulazni kapacitivni deo (fiksni kapacitet)

-prekidački regulisana prigušnica

-L_O je dimenzionisana tako da se cela grana ponaša kao strujni ponor

VAR kompenzator baziran na naponskom pretvaraču



-prekidački regulisan napon na Co
-Co je dimenzionisan tako da
se cela grana ponaša kao naponski
izvor

PRETHODNO POMENUTI KOMPENZATORI PRIPADAJU KLASI
tzv. **“SAMOKOMUTUJUĆIH” (Self Commutated)** PRETVARAČA

NJIMA JE MOGUĆE OBEZBEDITI :

-stabilizaciju prenosnog sistema

-poboljšanje naponske regulacije

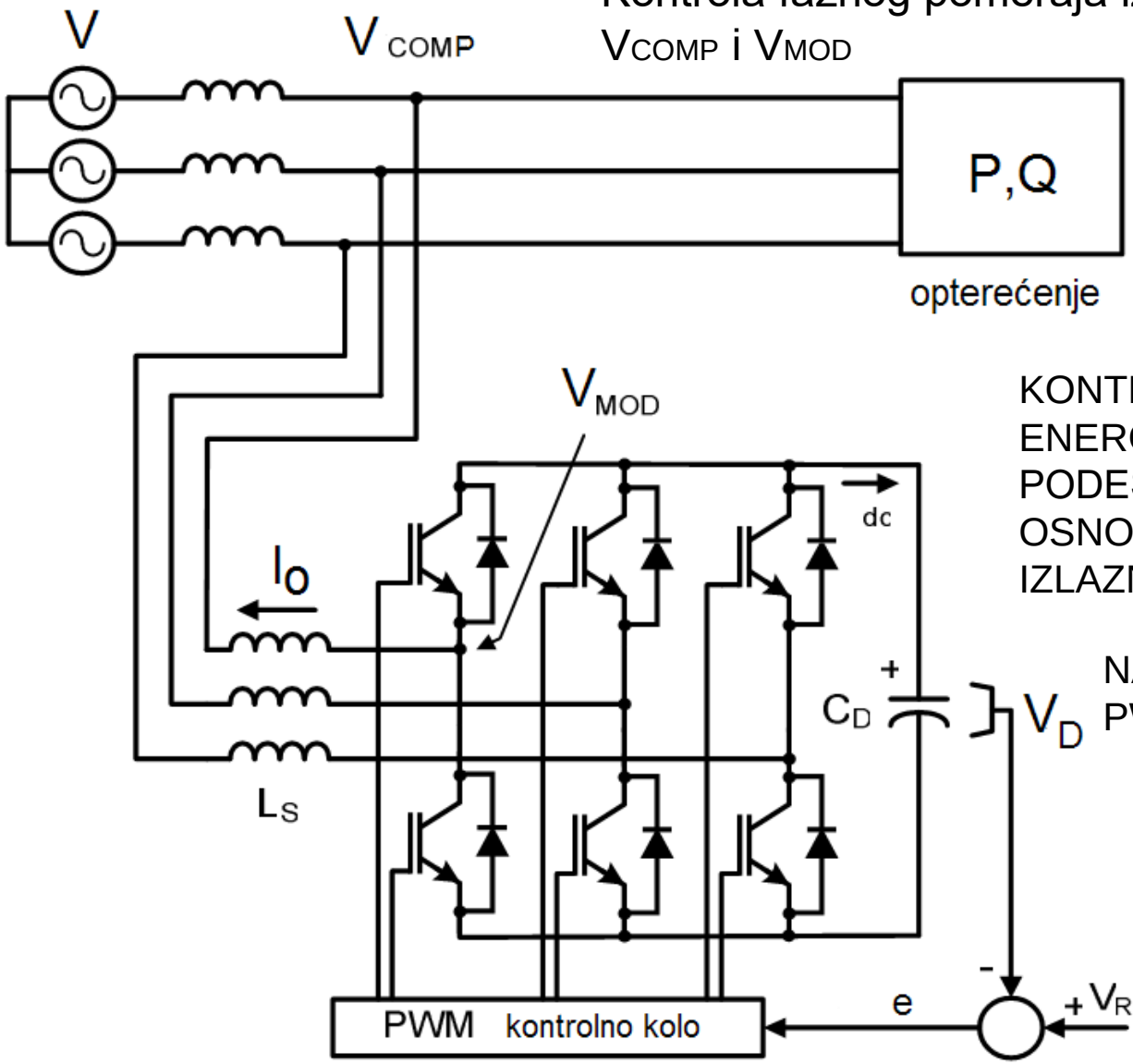
-popravku faktora snage

-korekciju i kompenzaciju debalansa opterećenja

-mogu se koristiti između ostalog kao šant i serijski kompenzatori

VAR kompenzator sa ugrađenim naponskim pretvaračem- podizačem napona (*boost*)

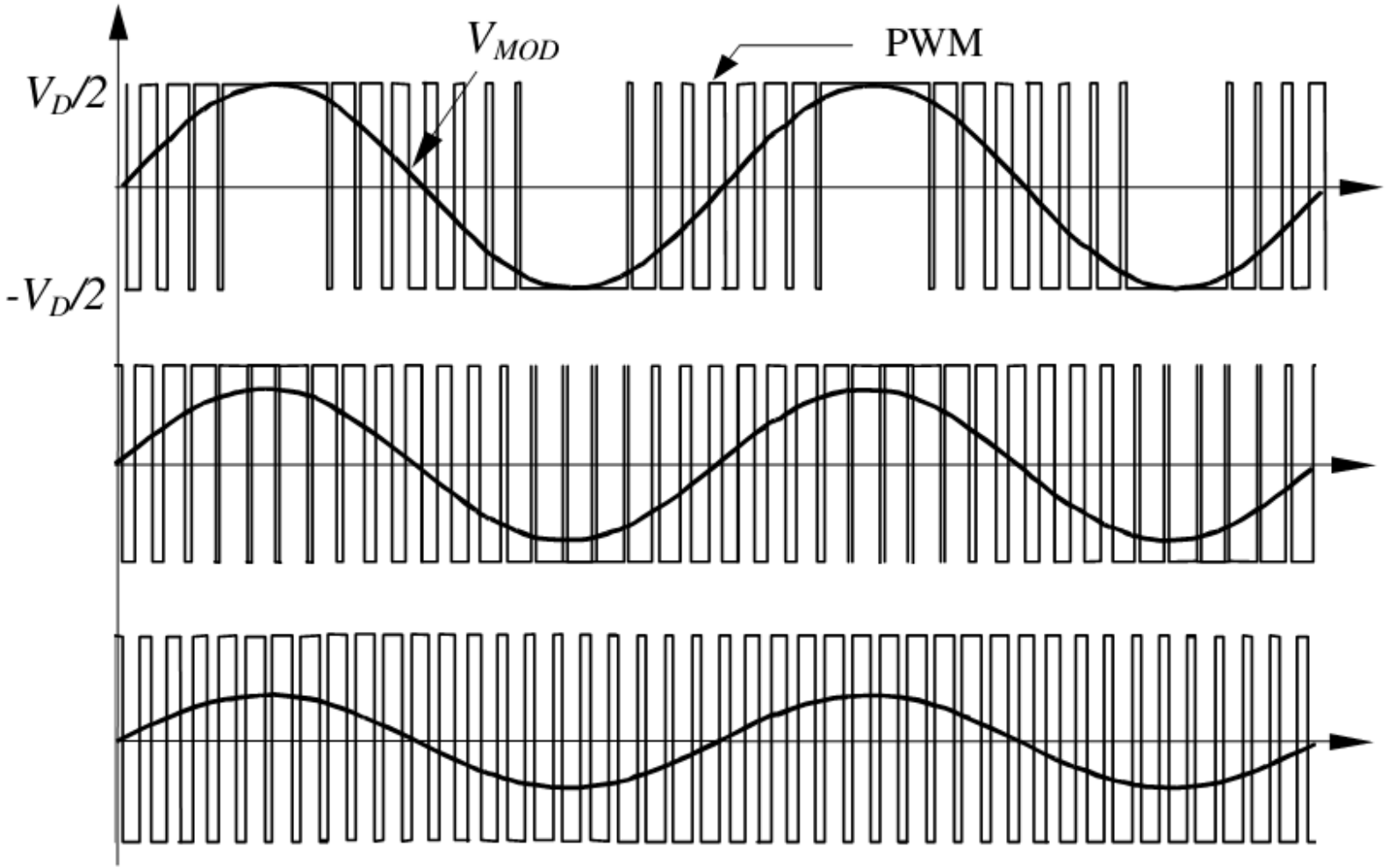
Kontrola faznog pomeraja između V_{COMP} i V_{MOD}



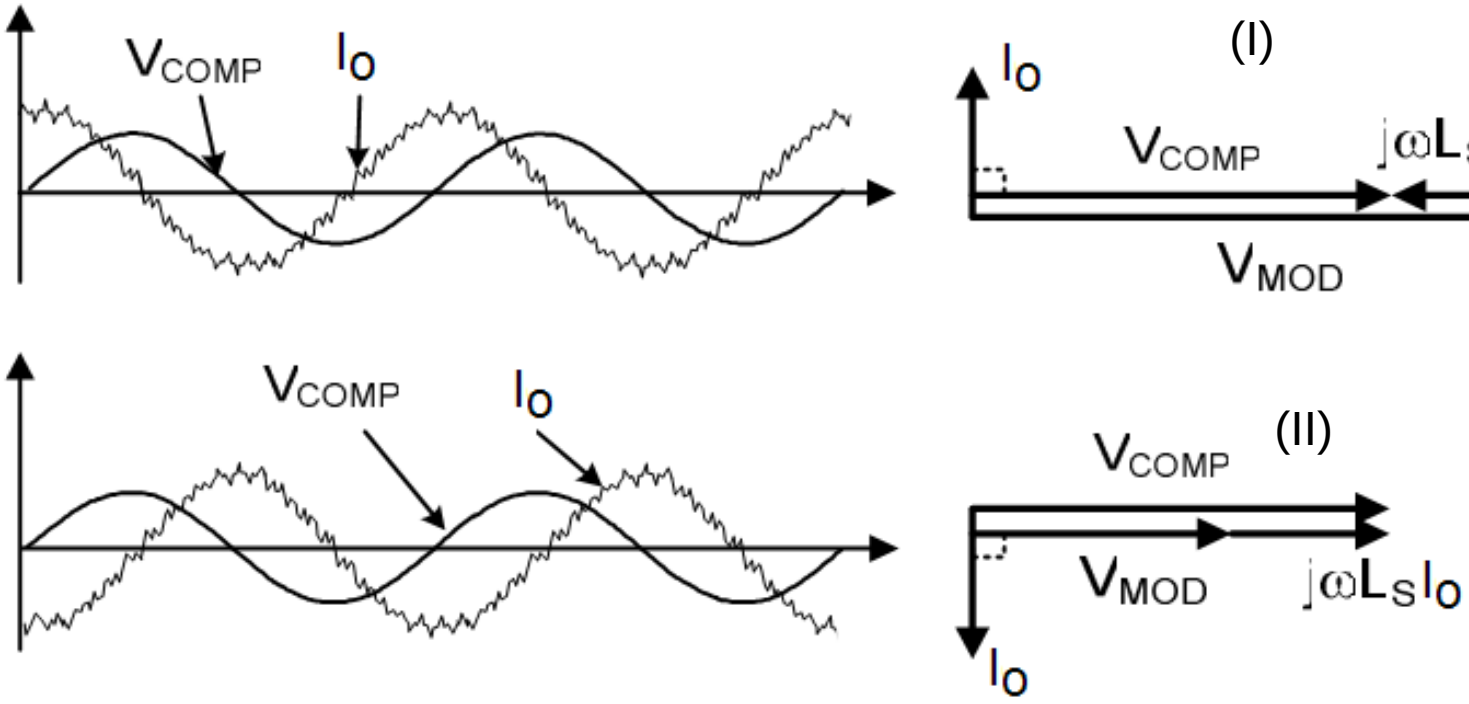
KONTROLA REAKTIVNE ENERGIJE SE OSTVARUJE PODEŠAVANJEM AMPLITUDE OSNOVNE KOMPONENTE IZLAZNOG NAPONA V_{MOD}

NAPON V_{MOD} JE DOBIJEN PWM ALGORITMOM!!!

KAKO IZGLEDAJU TALSNI OBLICI NAPONA V_{MOD}?



TALASNI OBLICI IZLAZNOG NAPONA KOMPENZATORA ZA RAZLIČITE VREDNOSTI MODULACIONOG INDEKSA
(amplitude napona osnovne komponente)



Slučaj I – Kada je $V_{MOD}>V_{COMP}$ prekidački VAR kompenzator generiše reaktivnu energiju (ekvivalentan je bateriji kondenzatora)

Slučaj II – Kada je $V_{MOD}<V_{COMP}$ prekidački VAR kompenzator absorbuje reaktivnu energiju (ekvivalentan je prigušnici)

DAKLE PRINCIP RADA JE SLIČAN SINHRONOJ MAŠINI, ODNOSNO PRETHODNO POMENUTOM SINHRONOM KOMPENZATORU
KOMPENZACIONA STRUJA ĆE PREDNJAČITI ILI KASNITI ZAVISNO OD ODNOSA V_{MOD} i V_{COMP}

Amplituda izlaznog napona kompenzatora (V_{MOD}) će biti kontrolisana promenom modulacionog indeksa ili promenom amplitude DC napona V_D.

Brz odziv je dobijen promenom modulacionog indeksa.

DC napon pretvarača se menja podešavanjem (u malim iznosima) aktivne snage apsorbovane od strane pretvarača

$$P = \frac{V_{COMP}.V_{MOD}}{X_S}\sin(\delta)$$

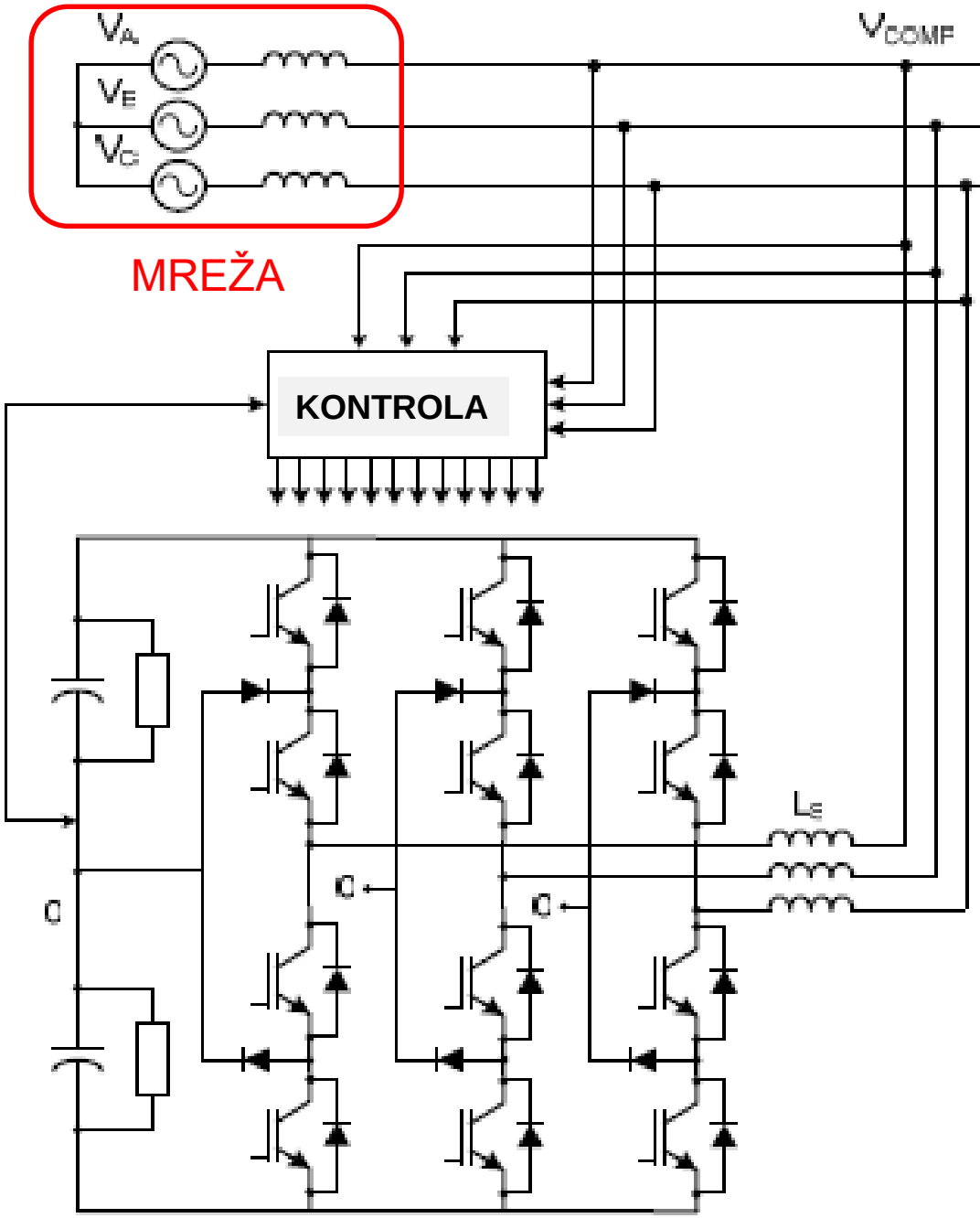
Xs - reaktansa sprežne prigušnice Ls
δ- fazni ugao između V_{MOD} *i* V_D.

JEDAN OD GLAVNIH PROBLEMA KOJI OGRANIČAVAJU PRIMENU PRETHODNO OPISANIH PRETVARAČA U VISOKONAPONSKIM SISTEMIMA JE OGRANIČAVAJUĆI KAPACITET POLUPROVODNIČKIH PREKIDAČA (IGBT ili IGCT) KOJI SU RASPOLOŽIVI NA TRŽIŠTU!!!!

REALNI POLUPROVODNIČKI PREKIDAČI SU DIMENZIONISANI ZA STRUJE OD NEKOLIKO HILJADA AMPERA I ZA NAPONE 6-10kV.

OVO NIJE DOVOLJNO ZA VISOKONAPONSKE APLIKACIJE!!!!!!

OVAJ PROBLEM MOŽE BITI REŠEN SOFISTICIRANIM TOPOLOGIJAMA PRETVARAČA , OD KOJIH JE NAJPOZNATIJA **VIŠENIVOISKA (MULTILEVEL) TOPOLOGIJA.**



-MULTILEVEL INVERTOR
-Invertora sa VIŠE NIVOA
-Invertor sa 3 NIVOA
- Sistem bez neutralnog provodnika
-Merenje mrežnih napona i napona na opterećenju Vcomp

U poređenju sa tiristorskim kompenzatorima, prekidački VAR kompenzatori imaju niz prednosti:

-Mogu proizvoditi aktivnu i reaktivnu snagu

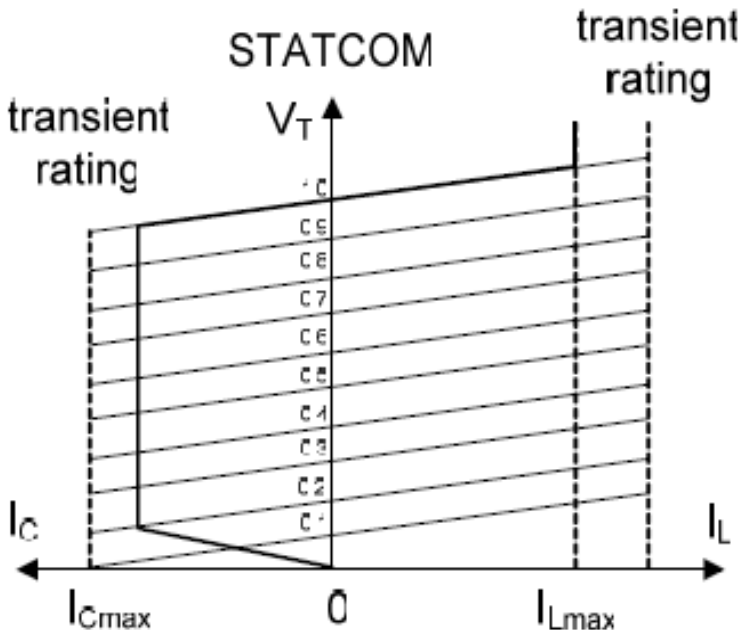
-Redukovana je mogućnost da se pojavi rezonanca

-Obzirom da imaju brz odziv, reaktivna snaga će biti kontrolisana kontinualno i sa relativno velikom brzinom (KVALITETNIJA DINAMIČKA KOMPENZACIJA!!!)

-Visokofrekventna modulacija rezultuje niskim harmonicima napojne struje

-Ovim se redukuje veličina komponenata filtera

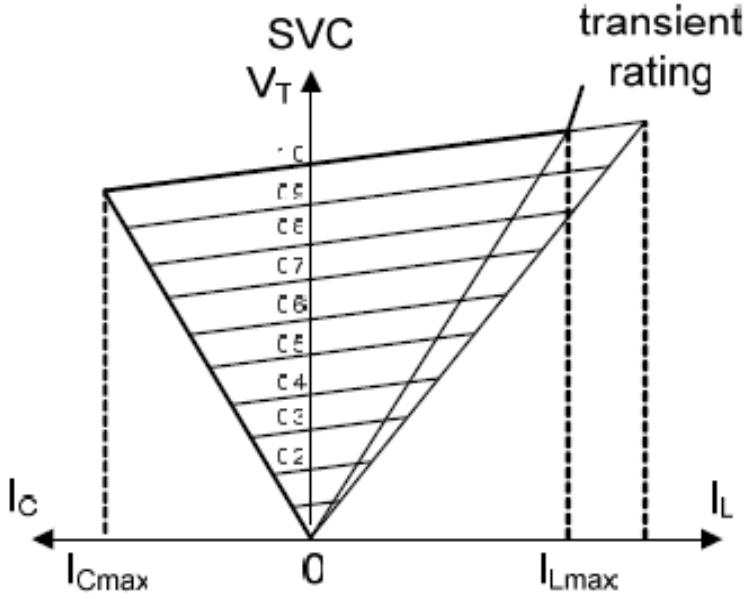
-Dinamičke performanse usled varijacija u mrežnom naponu, su značajno poboljšane



POREDJENJE V/I KARAKTERISTIKA kompenzatora:

V-I karakteristika kod prekidačkog VAR kompenzatora (prekidački izvor)

Mnogo širi opseg regulacije u odnosu na tiristorske VAR kompenzatore



V-I karakteristika kod tiristorskog VAR kompenzatora

ZAKLJUČAK

-U predavanju su dati osnovni principi **DINAMIČKE KOMPENZACIJE** reaktivne snage

-Obrađeni su stepenasti regulatori reaktivne snage i problemi u vezi sa njima

-Detaljno su predstavljeni tiristorski regulatori u kolima za kompenzaciju reaktivne snage (TSC i TCR topologije)

-Naglašene su prednosti TSC i TCR topologija u kontinualnoj kompenzaciji reaktivne snage

-Izloženi su osnovni principi prekidačkih VAR kompenzatora

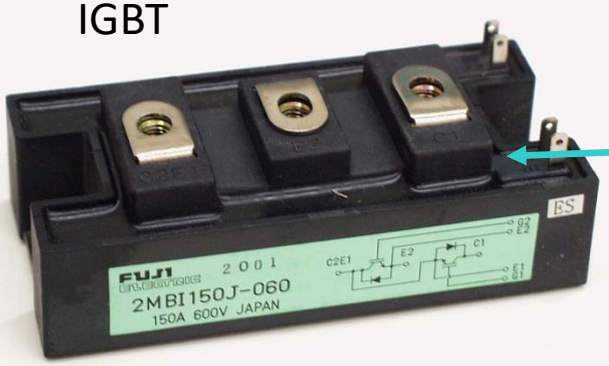
-Dati osnovni pojmovi o najsavremenijim VAR kompenzatorima baziranim na MULTILEVEL invertorima

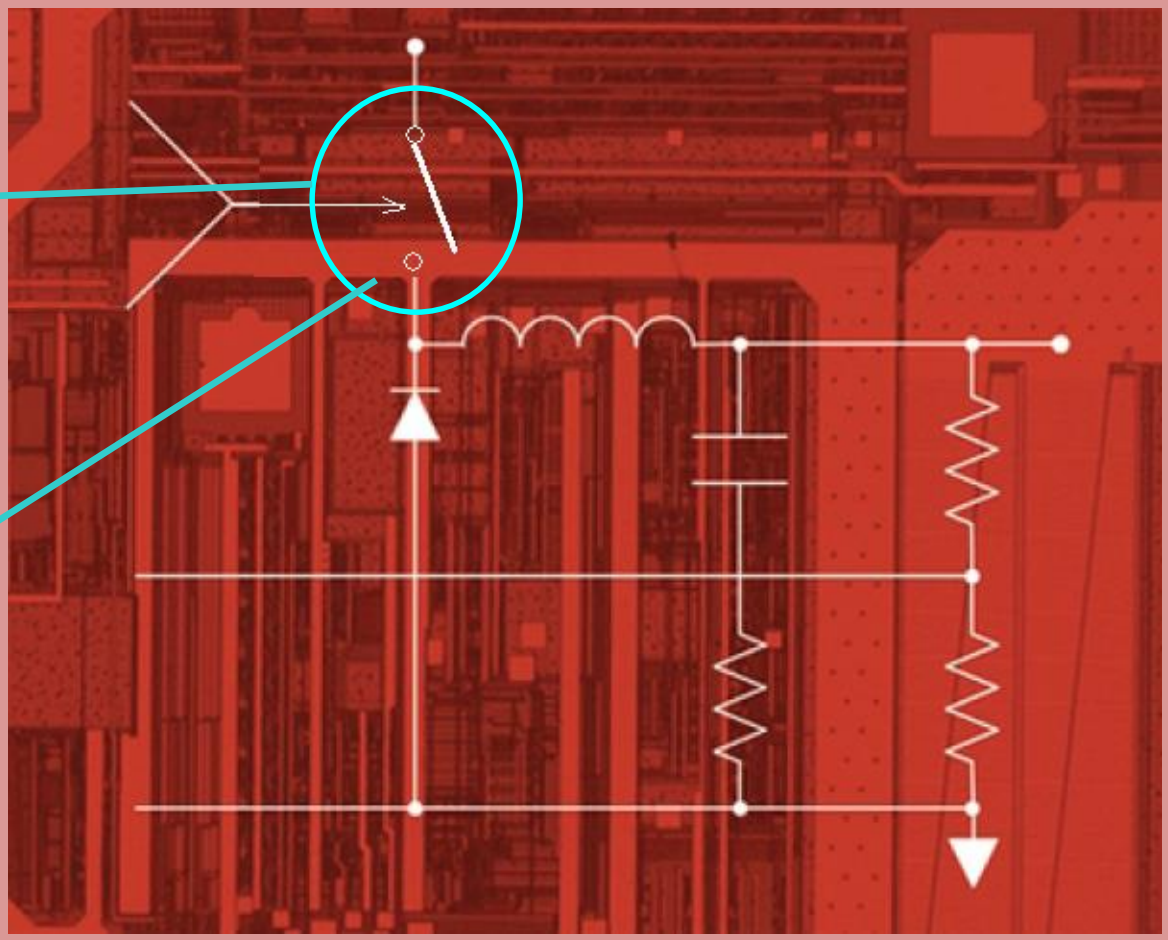
HVALA NA PAŽNJI!!!!

PITANJA????

DC/DC PRETVARAČI-ČOPERI

IGBT

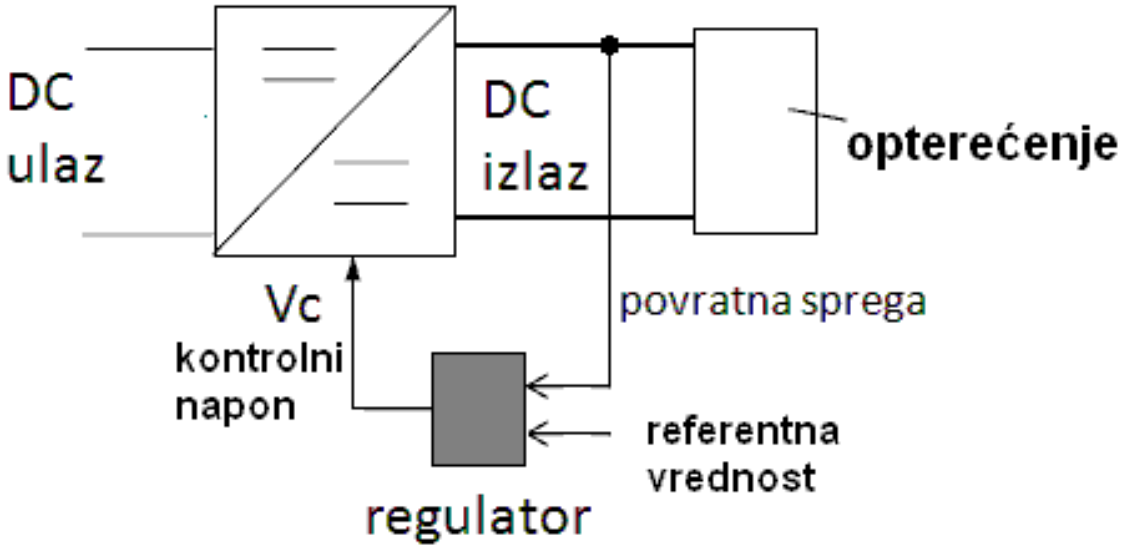




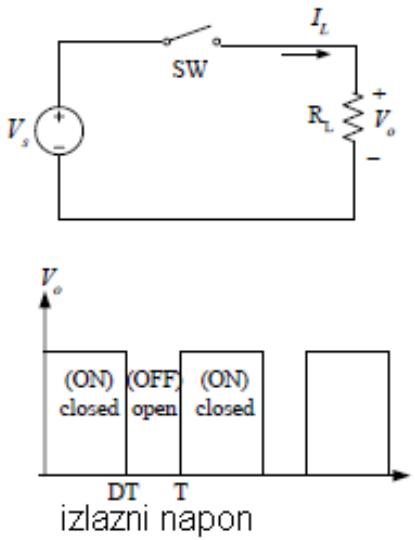
Predavač: Prof.dr Željko Despotović

OPŠTE DC/DC pretvarači-ČOPERI

Pretvaraju nestabilisani DC ulazni napon u stabilisani DC izlazni napon zahtevanog nivoa



CHOPPER=sekač

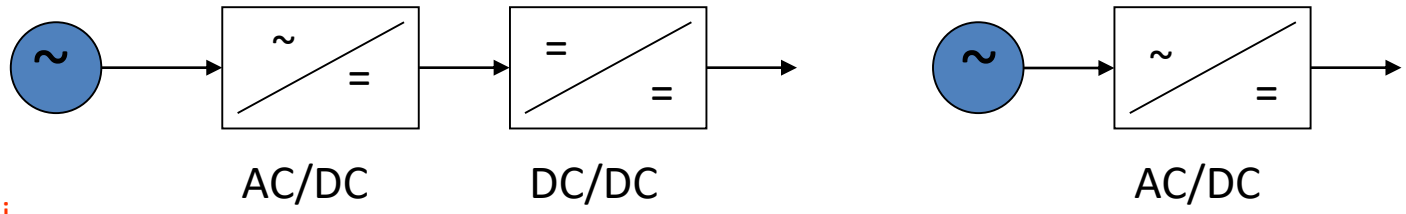


•Čoperi su DC/DC pretvarači koji pretvaraju jednosmernu struju jednog naponskog nivoa u jednosmernu struju drugog naponskog nivoa.
•Oni se često nazivaju i transformatori napona – ili ČOPERI (engl. CHOPPER=sekač).

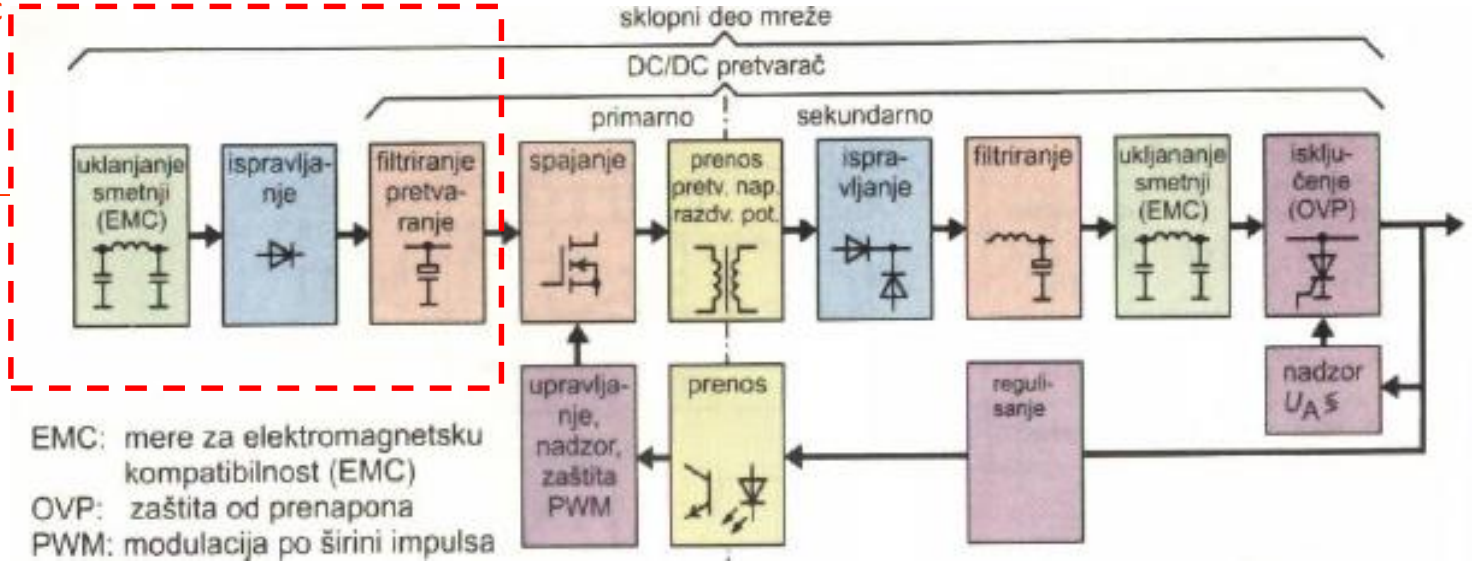
DC ulaz: jednosmerni izvori napajanja, izlaz ispravljačkih jedinica, solarne ćelije, DC vetrogeneratori , baterije, gorivne ćelije i sl.

PRIMENA: Prekidački izvori napajanja- *Switch Mode Power Supply* (SMPS), kontrola jednosmernih motora, punjači baterija, električna vozila, električna vuča i sl.

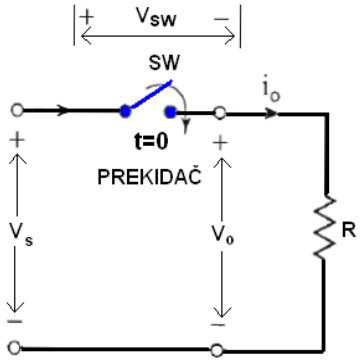
Kombinovani AC/DC i DC/DC pretvarači =AC/DC pretvarači (ispravljači)

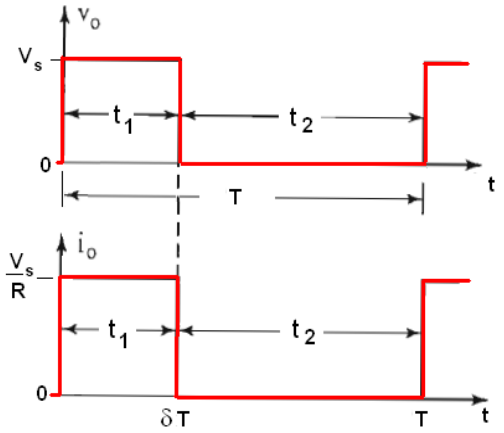


Ulazni AC/DC pretvarač



OSNOVNO ČOPERSKO KOLO BEZ AKUMULACIONIH ELEMENATA





Srednja vrednost izlaznog napona

$$V_{0SR} = \frac{1}{T}\cdot\int_0^T v_o\,dt = \frac{t_1}{T}\cdot V_S = f\cdot t_1\cdot\frac{1}{T}\cdot V_S = \delta\cdot V_S$$

Srednja vrednost izlazne struje

$$I_0 = \frac{V_{0SR}}{R} = \frac{\delta\cdot V_S}{R}$$

T-Perioda čopovanja
f-Učestanost čopovanja

Nekad se ***δ*** *označava i sa* ***D***

$\delta = D = \frac{t_1}{T}$ koeficijent radnog režima čopera (*duty-cycle*)

$0 \le \delta \le 1$ odnosno $0\% \le \delta \le 100\%$

EKVIVALENTNA ULAZNA OTPORNOST

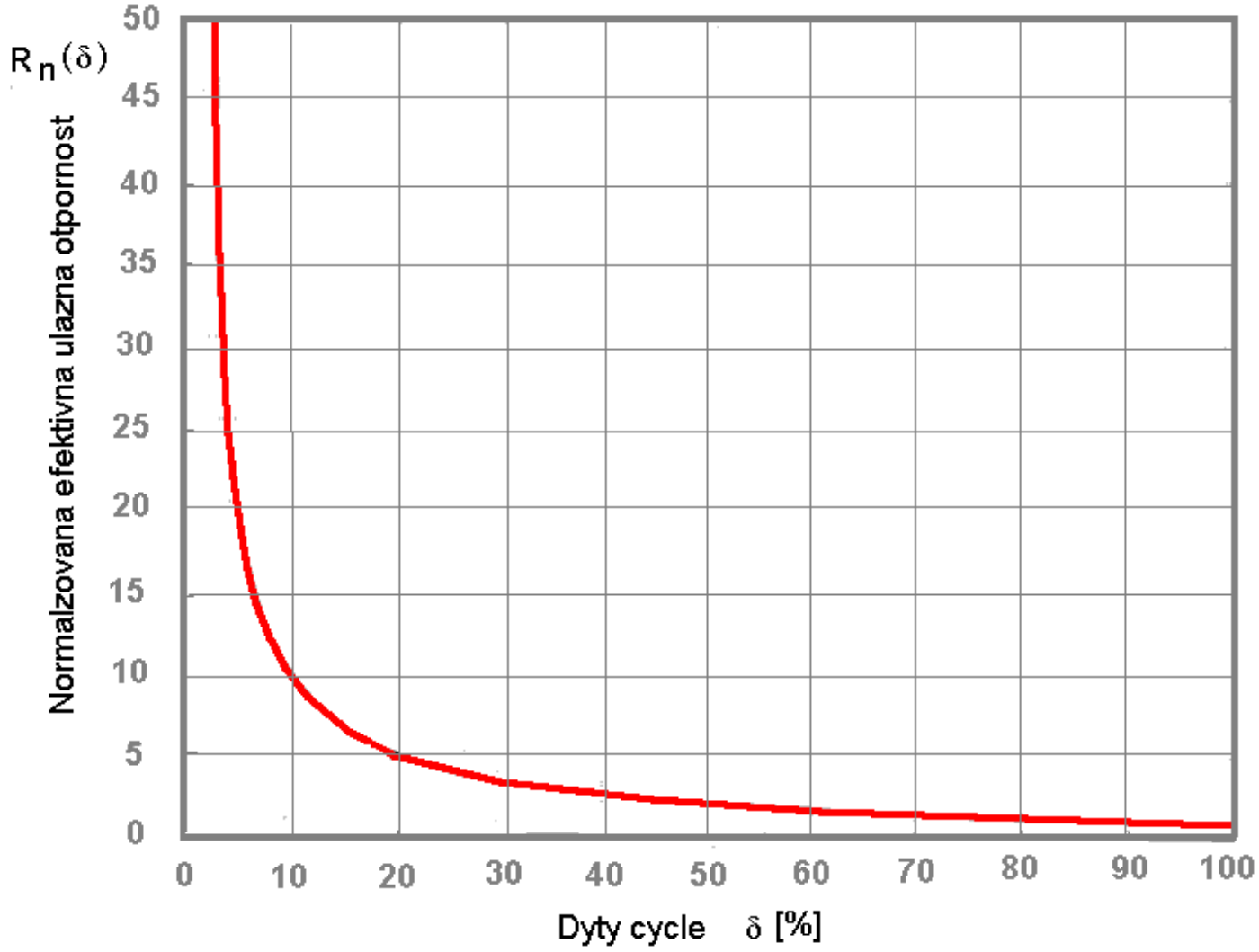
$$R_{in_ekv} = \frac{V_S}{I_0} = \frac{R}{\delta} = \frac{R}{D}$$

$\delta = 0 \qquad R_{in_ekv} = \infty$

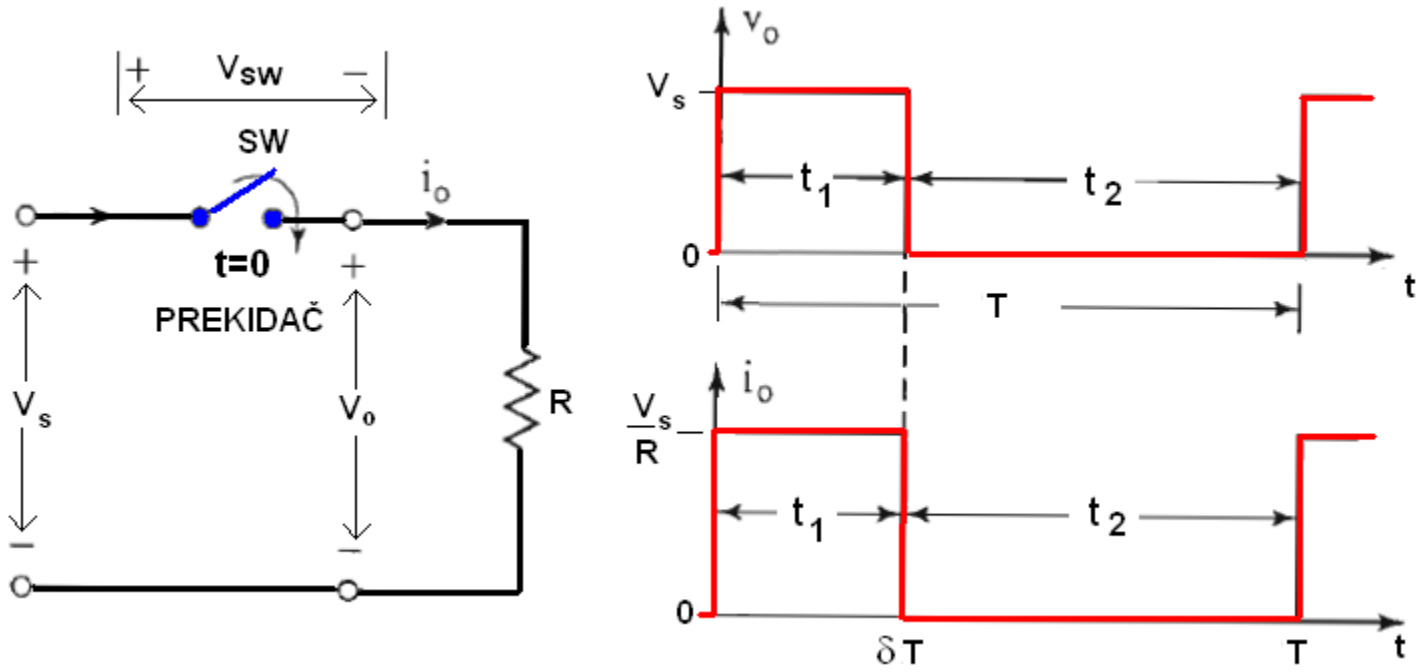
$\delta = 1 \qquad R_{in_ekv} = R$

ZAKLJUČAK: Čopersko kolo obezbeđuje kontinualnu promenu ulazne otpornosti.

PROMENA NORMALIZOVANE ULAZNE OTPORNOSTI ČOPERA BEZ AKUMULACIONIH ELEMENATA SA ČISTO OMSKIM OPTEREĆENJEM U ZAVISNOSTI OD KOEFICIJENTA RADNOG REŽIMA δ



IZRAČUNAVANJE EFEKTIVNE VREDNOSTI IZLAZNOG NAPONA I IZLAZNE SNAGE



$$V_{0eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v_0^2 dt} = \sqrt{\frac{t_1}{T}} \cdot V_S = \sqrt{\delta} \cdot V_S = \sqrt{D} \cdot V_S$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNE SNAGE

$$P_{iSR} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\delta \cdot T} v_o \cdot i \cdot dt = \frac{t_1}{T} \cdot V_S^2 \cdot \frac{1}{R} = \delta \cdot \frac{V_S^2}{R} = D \cdot \frac{V_S^2}{R}$$

OSNOVNE TOPOLOGIJE ČOPERA SA AKUMULACIONIM ELEMENTIMA I DIODOM

•Čoperi za sniženje napona
•(engl. *buck converters*)

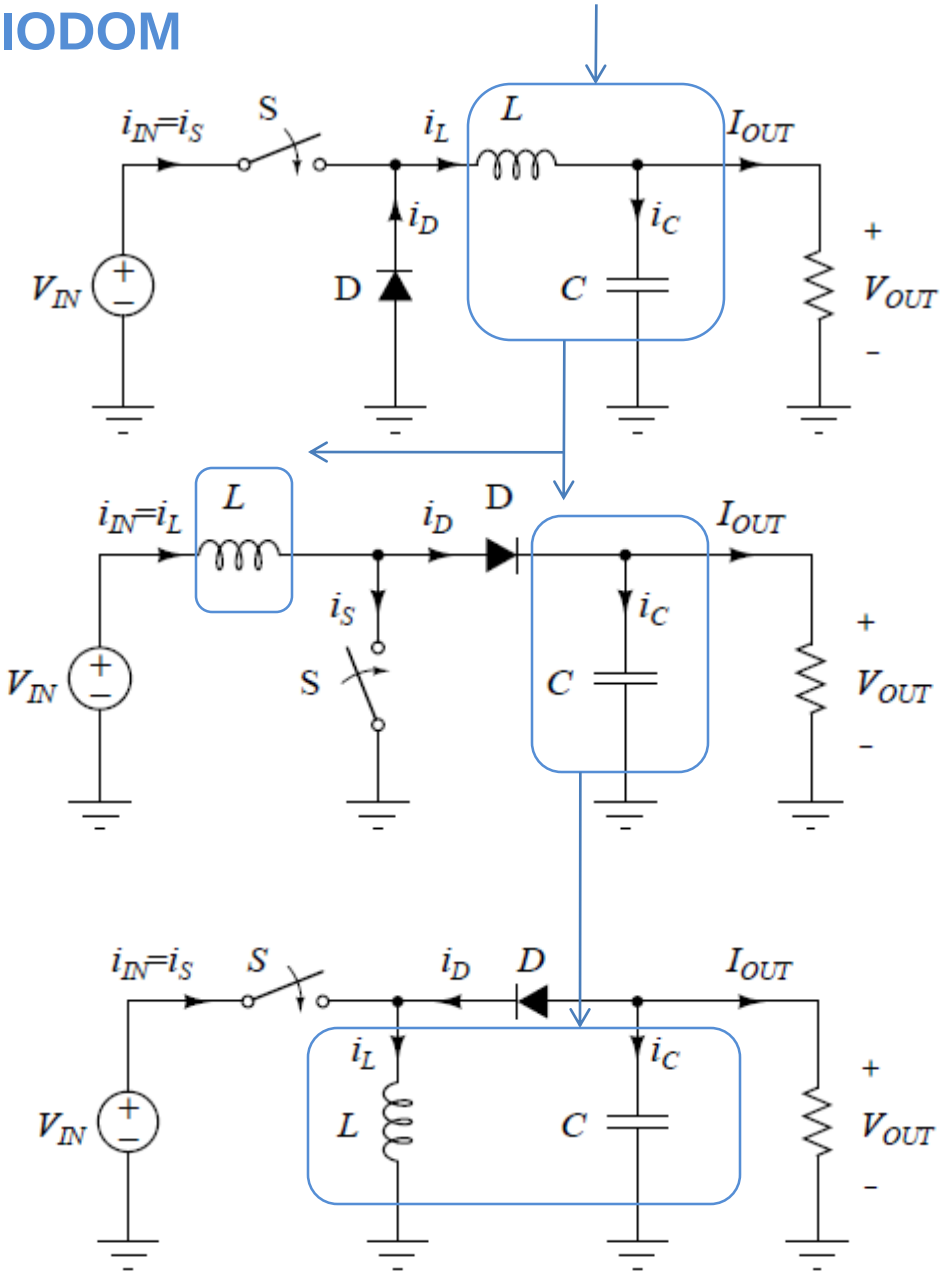
$V_{OUT} < V_{IN}$

•Čoperi za povećanje napona
•(engl. *boost converters*)

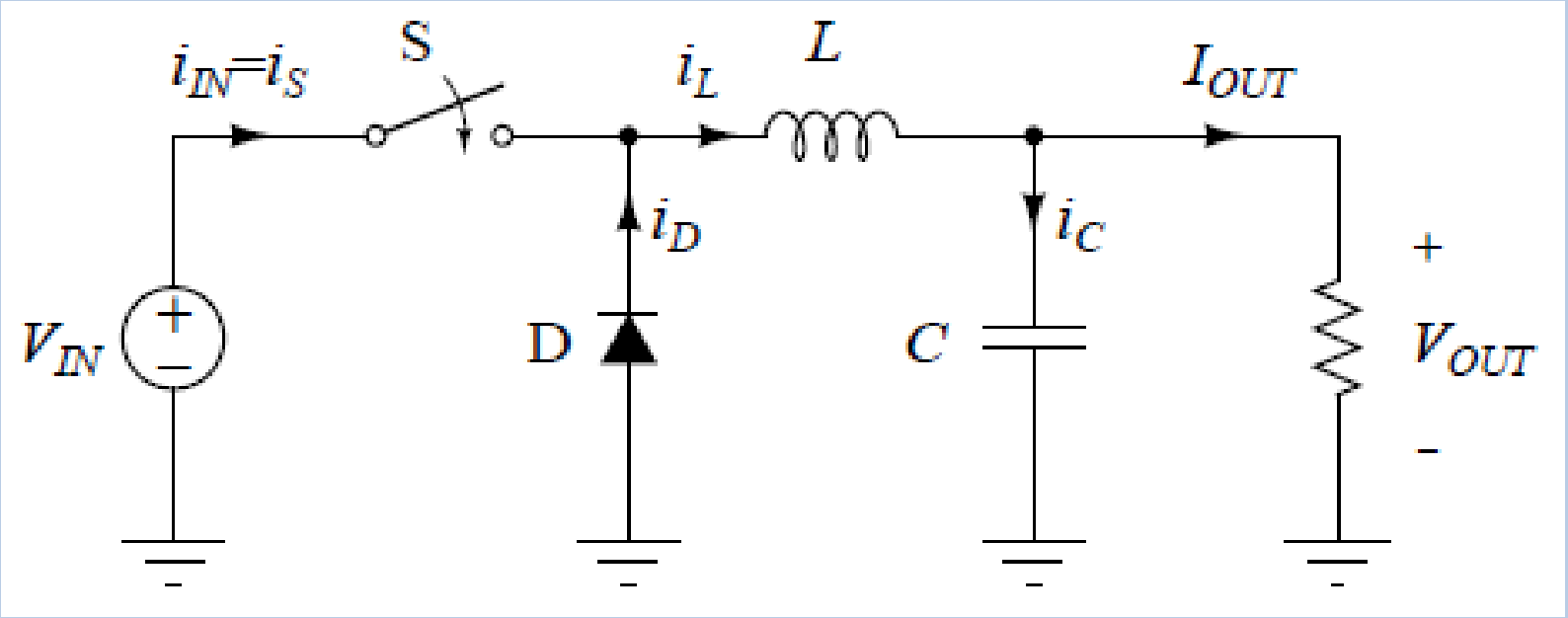
$V_{OUT} < V_{IN}$

•Čoperi za sniženje/povećanje napona (obrtači napona)
•(engl. *buck-boost converters*)

$V_{OUT} < V_{IN}$
$V_{OUT} > V_{IN}$



ČOPER SPUŠTAČ NAPONA – *BUCK* PRETVARAČ

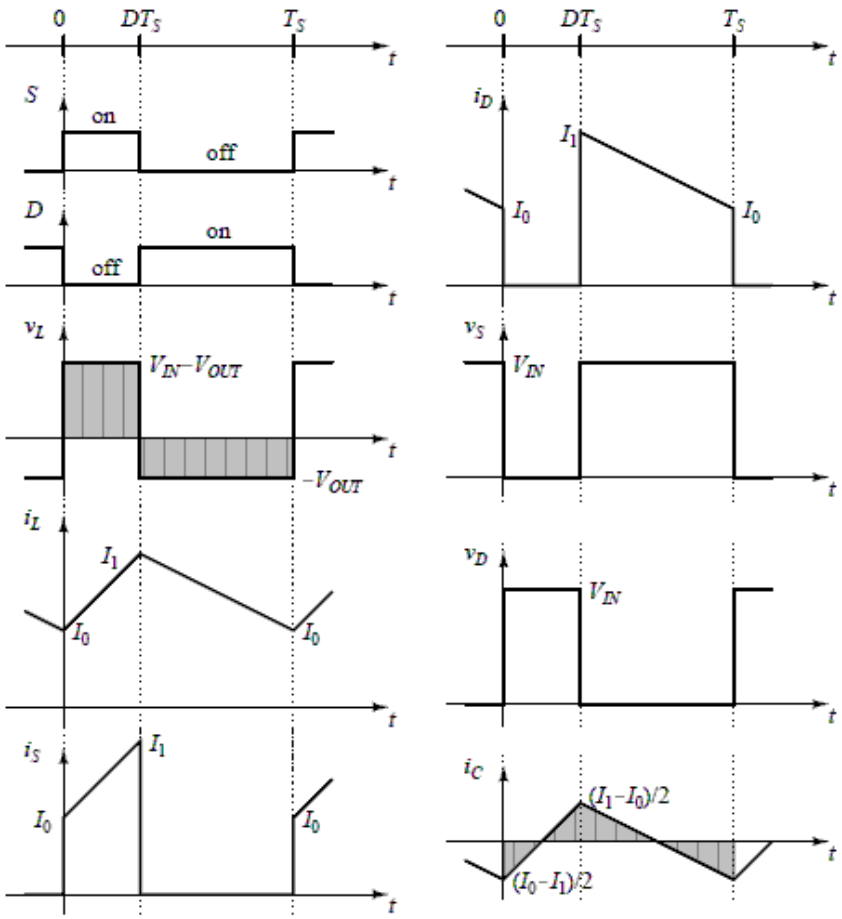


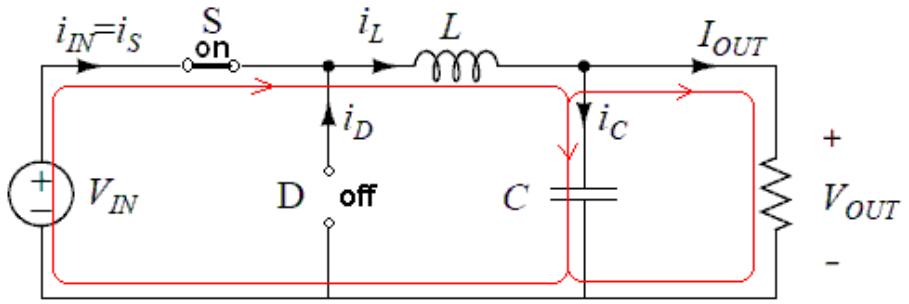
DVA MOGUĆA REŽIMA RADA:

-KONTINUALNI (NEPREKIDNI) REŽIM RADA

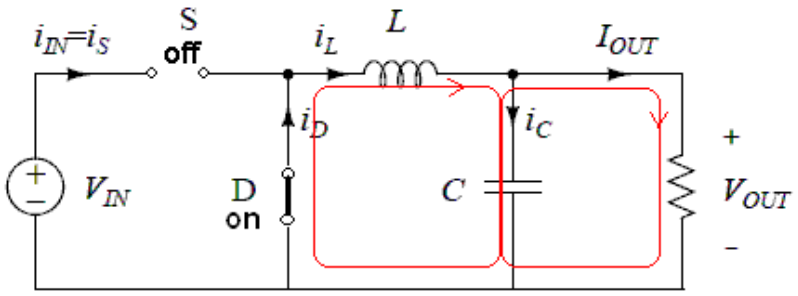
-DISKONTINUALNI (PREKIDNI) REŽIM RADA

TALASNI OBLICI I EKVIVALENTNO KOLO ZA ČOPER SPUŠTAČ NAPONA – *BUCK PRETVARAČ* u KONTINUALNOM REŽIMU



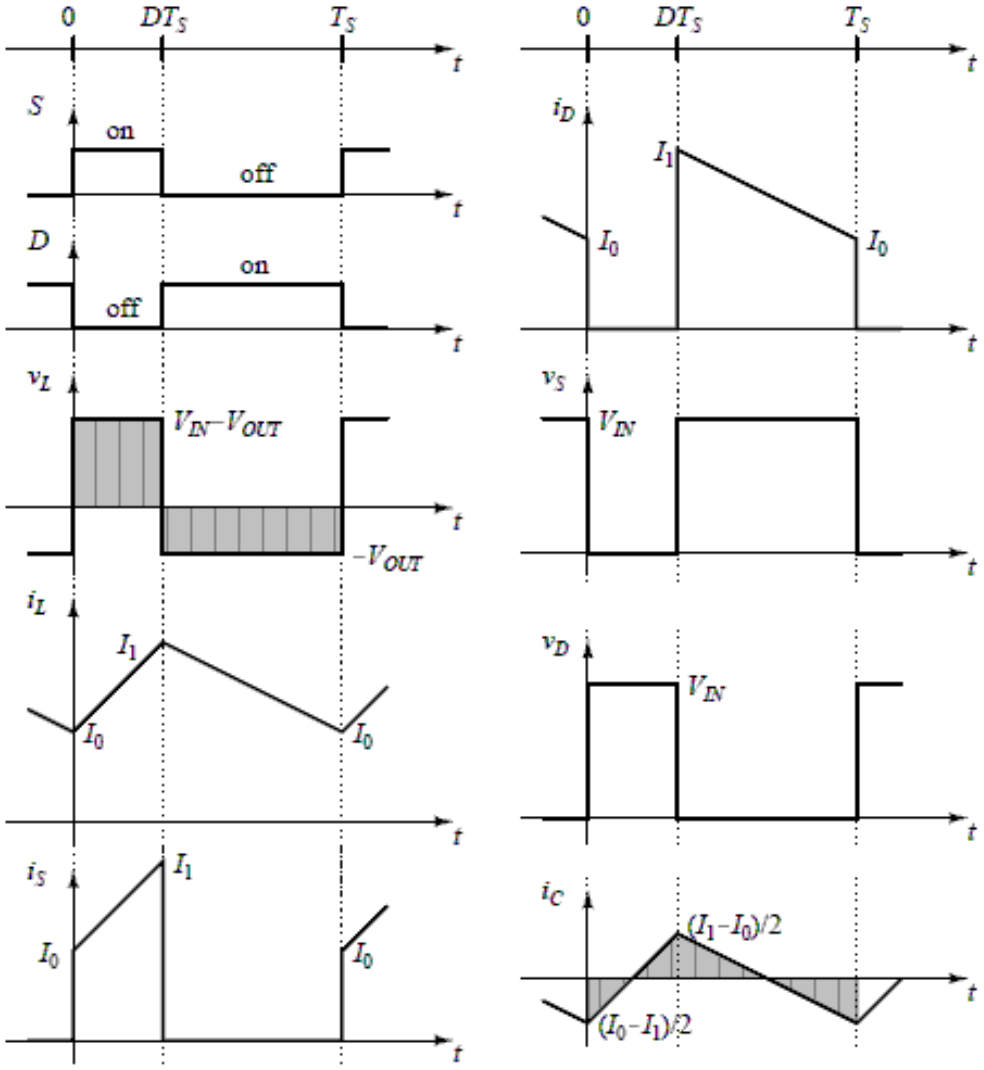


EKVIVALENTNO KOLO ČOPERA SPUŠTAČA NAPONA U INTERVALU ton KAD JE UKLJUČEN PREKIDAČ



EKVIVALENTNO KOLO ČOPERA SPUŠTAČA NAPONA U INTERVALU t_{off} KAD JE ISKLJUČEN PREKIDAČ (UKLJUČENA DIODA)

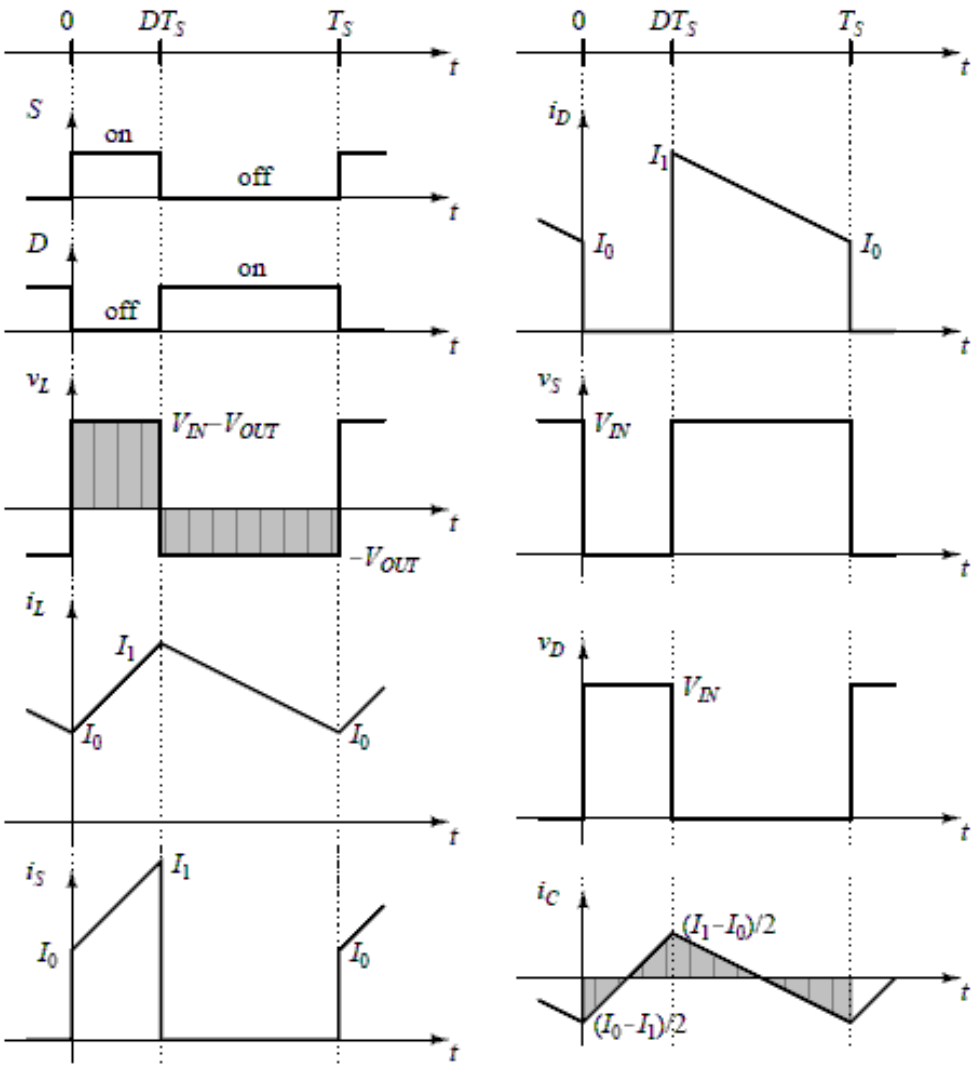
ČOPER SPUŠTAČ NAPONA-*BUCK* u KONTINUALNOM REŽIMU



NAPONI I STRUJE ČOPERA SPUŠTAČA U KONTINUALNOM REŽIMU $I_0 > 0$

t	$0 < t < DT_S$	$DT_S < t < T_S$
trajanje	DT_S	$D'T_S = (1-D)T_S$
v_L	$V_{IN} - V_{OUT}$	$-V_{OUT}$
i_L	$I_0 + \frac{v_L}{L}t$	$I_1 + \frac{v_L}{L}(t - DT_S)$
i_S	i_L	0
i_D	0	i_L
v_S	0	V_{IN}
v_D	V_{IN}	0
i_C	$i_L - I_{OUT}$	$i_L - I_{OUT}$

ČOPER SPUŠTAČ-*BUCK* u KONTINUALNOM REŽIMU



SREDNJA VREDNOST NAPONA NA INDUKTIVNOSTI L JE:

$$DT_S\ (V_{IN} - V_{OUT}) + D'T_S\ (-V_{OUT}) = 0$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA JE:

$$V_{OUT} = DV_{IN}.$$

SREDNJA VREDNOST STRUJE KALEMA JE:

$$I_L = \frac{I_0 + I_1}{2}$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNE STRUJE:

$$I_{OUT} = I_L$$

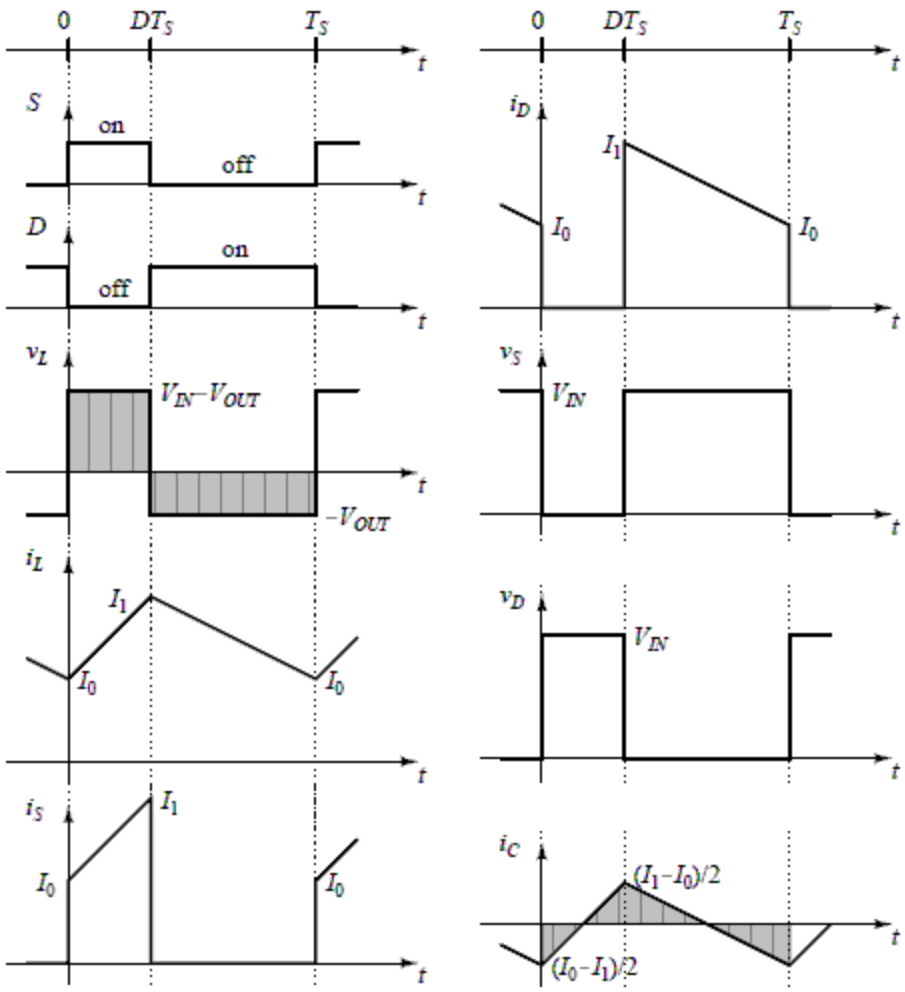
SREDNJA VREDNOST ULAZNE STRUJE:

$$I_{IN} = DI_{OUT}$$

PRENOSNI ODNOS PRETVARAČA:

$$M = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \qquad M\,(D) = D$$

ČOPER SPUŠTAČ NAPONA -*BUCK* u KONTINUALNOM REŽIMU



MAKSIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_1 = I_0 + \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} DT_S$$

$$I_1 - I_0 = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} DT_S$$

$$I_1 + I_0 = 2I_{OUT}$$

MINIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_0 = I_{OUT} - \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{2f_S L} D \qquad f_S = \frac{1}{T_S}$$

$$I_1 = I_{OUT} + \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{2f_S L} D$$

AMLITUDA TALASNOSTI STRUJE KALEMA:

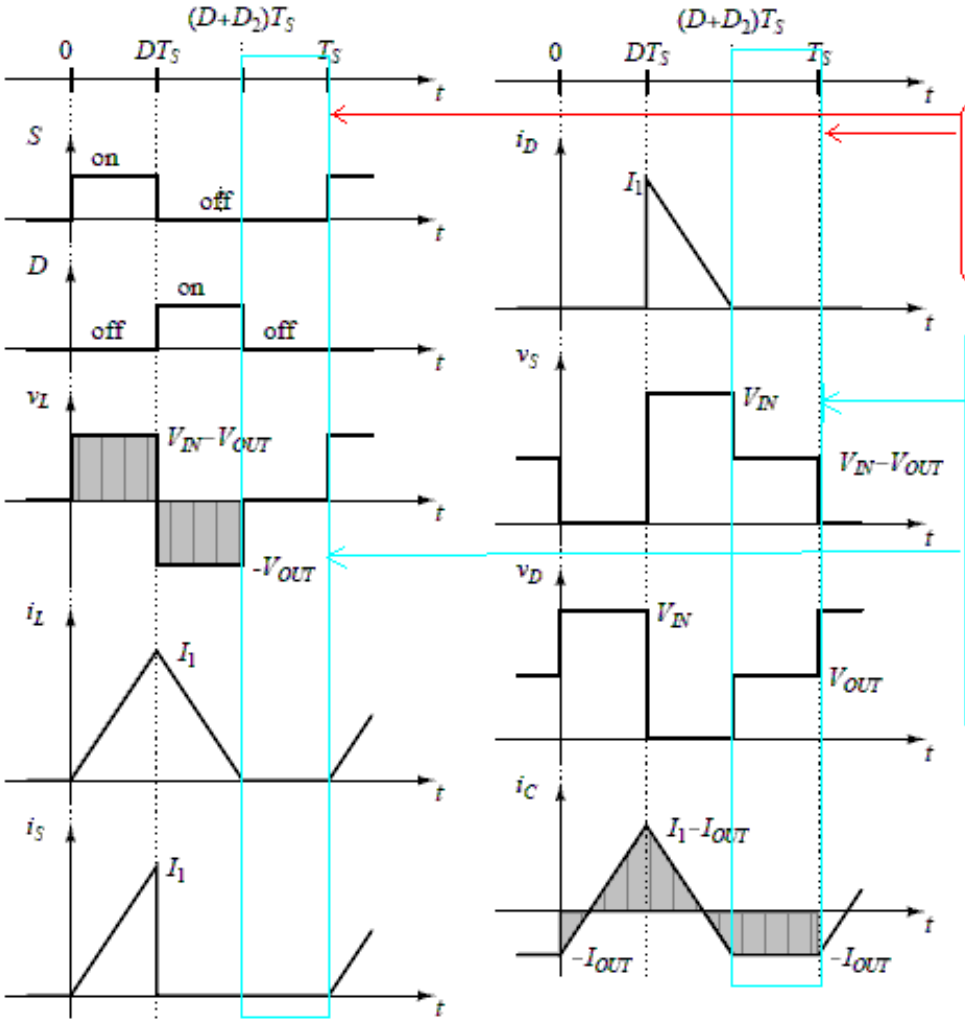
$$\Delta i_L = \frac{1}{2}(I_1 - I_0)$$

USLOV ZA KONTINUALNI REŽIM:

$$I_{OUT} > \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{2f_S L} D \qquad V_{OUT} = DV_{IN}$$

$$I_{OUT} > \frac{V_{IN}}{2f_S L} D(1 - D)$$

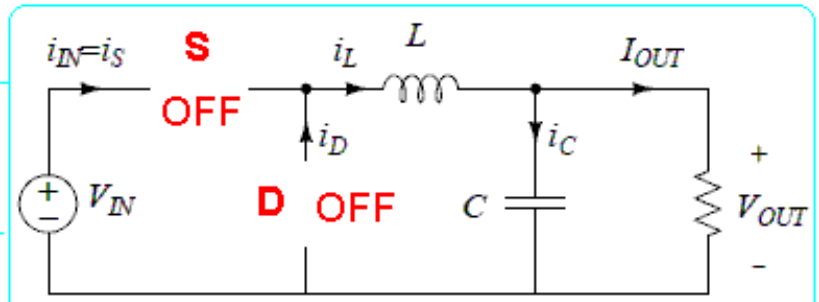
ČOPER SPUŠTAČ NAPONA -*BUCK* u DISKONTINUALNOM (PREKIDNOM)REŽIMU



ČOPER SPUŠTAČ NAPONA U DISKONTINUALNOM REŽIMU

$$I_{OUT} < \frac{V_{IN}}{2 f_S L} D(1-D) \qquad V_{OUT} \neq D V_{IN}$$

USLOVI $\qquad v_L = L\frac{di_L}{dt} = 0$



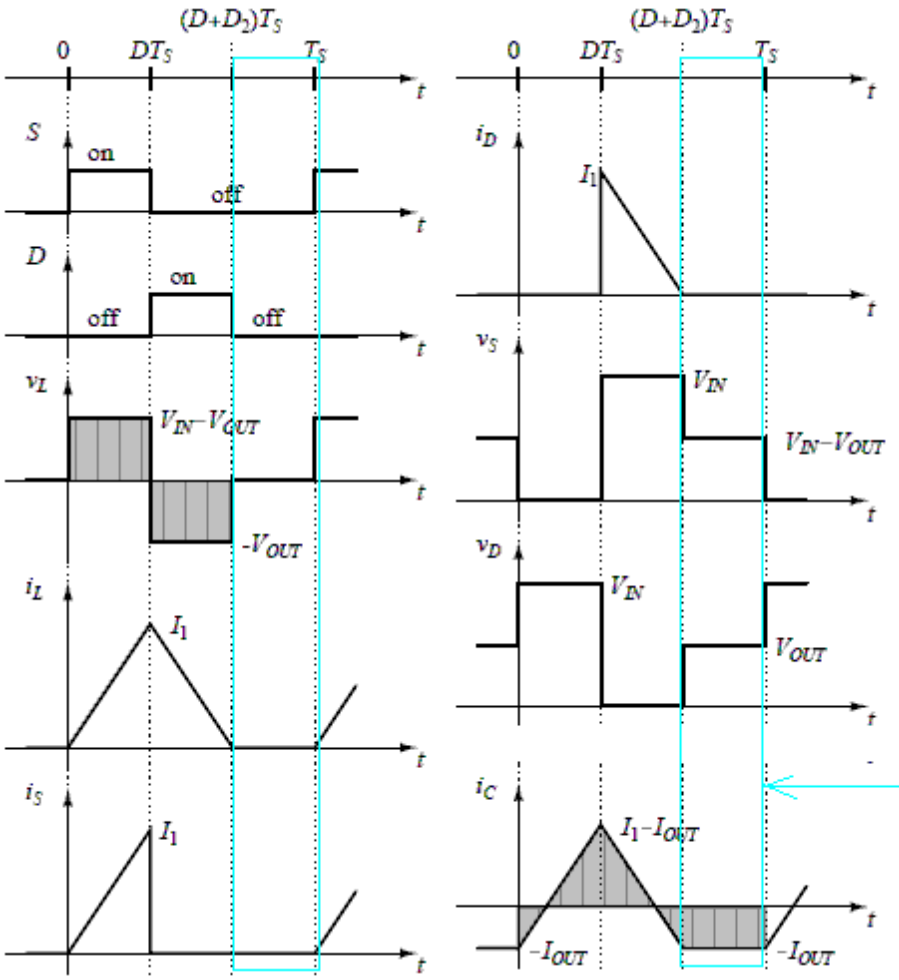
EKVIVALENTNO KOLO U INTERVALU

$$(D + D_2)T_S < t < T_S$$

MAKSIMALNA STRUJA KALEMA

$$I_1 = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} DT_S$$

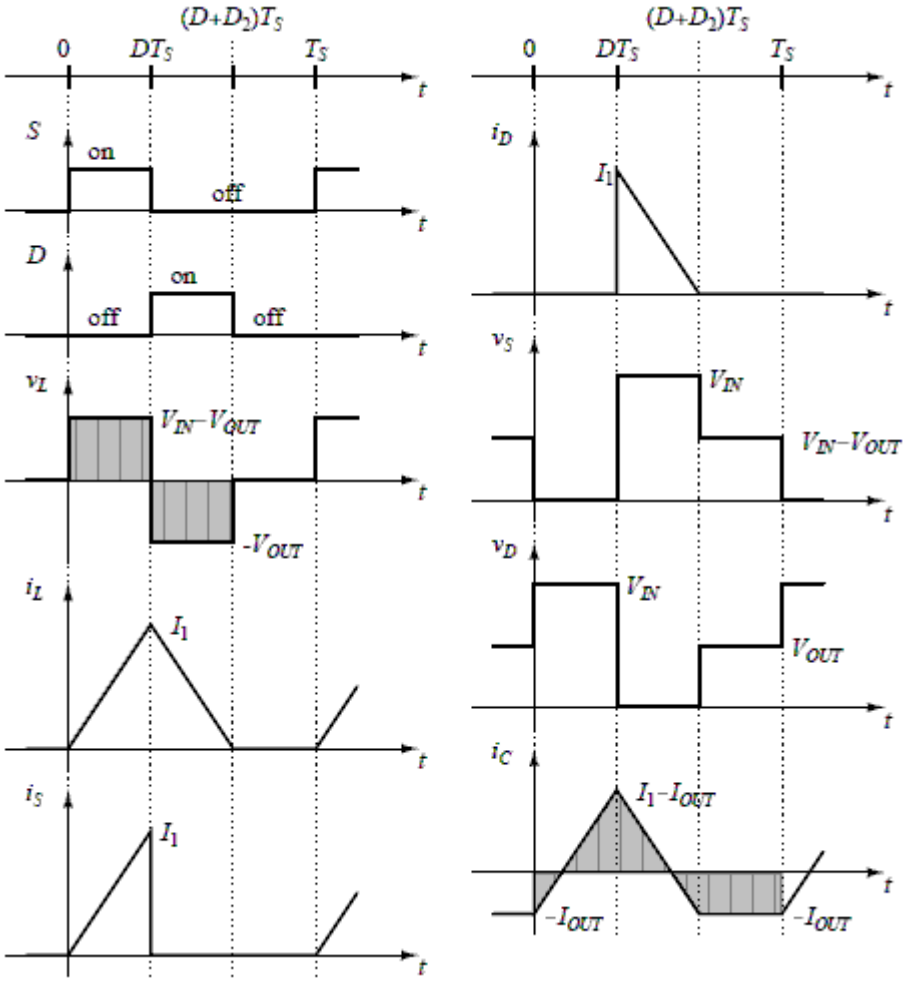
ČOPER SPUŠTAČ NAPONA -*BUCK* u DISKONTINUALNOM (PREKIDNOM)REŽIMU



NAPONI I STRUJE ČOPERA SPUŠTAČA NAPONA U DISKONTINUALNOM REŽIMU

t	$0 < t < DT_S$	$DT_S < t < (D+D_2)T_S$	$(D+D_2)T_S < t < T_S$
trajanje	DT_S	D_2T_S	$(1-D-D_2)T_S$
v_L	$V_{IN} - V_{OUT}$	$-V_{OUT}$	0
i_L	$\frac{v_L}{L}t$	$I_1 + \frac{v_L}{L}(t - DT_S)$	0
i_S	i_L	0	0
i_D	0	i_L	0
v_S	0	V_{IN}	$V_{IN} - V_{OUT}$
v_D	V_{IN}	0	V_{OUT}
i_C	$i_L - I_{OUT}$	$i_L - I_{OUT}$	$i_L - I_{OUT}$

ČOPER SPUŠTAČ NAPONA -*BUCK* u DISKONTINUALNOM (PREKIDNOM)REŽIMU



SREDNJA VREDNOST NAPONA KALEMA

$$DT_S\ (V_{IN} - V_{OUT}) + D_2 T_S\ (-V_{OUT}) = 0$$

$$D_2 = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{V_{OUT}} D$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNE STRUJE

$$I_{OUT} = \overline{i_L} = \langle i_L \rangle = \frac{1}{T_S}\,\frac{1}{2}\,(D + D_2)\,T_S\,I_1 = \frac{1}{2}\,(D + D_2)\,I_1$$

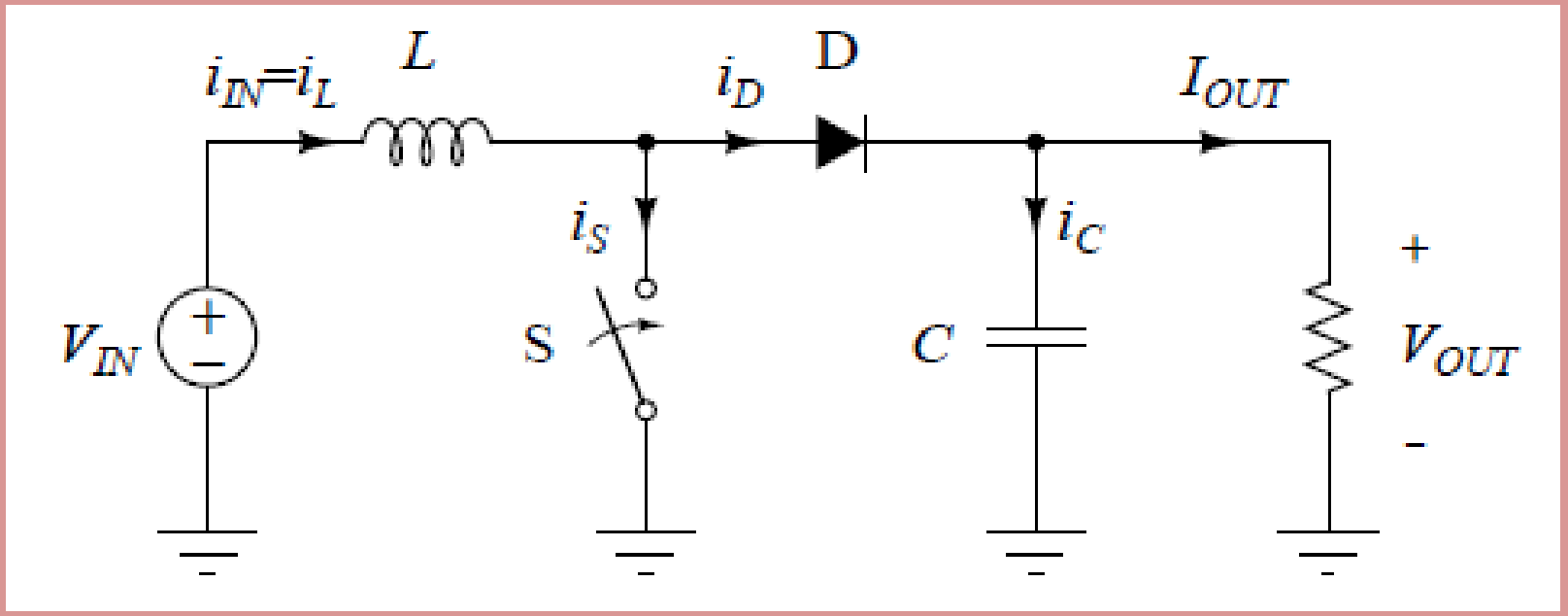
$$I_{OUT} = \frac{D^2}{2 f_S L} V_{IN} \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{V_{OUT}}$$

PRENOSNI ODNOS ČOPERA

$$M = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

$$M\,(D,k) = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \dfrac{4k}{D^2}}} \rightarrow k = \frac{2 f_S L}{R}$$

ČOPER PODIZAČ NAPONA – *BOOST* PRETVARAČ

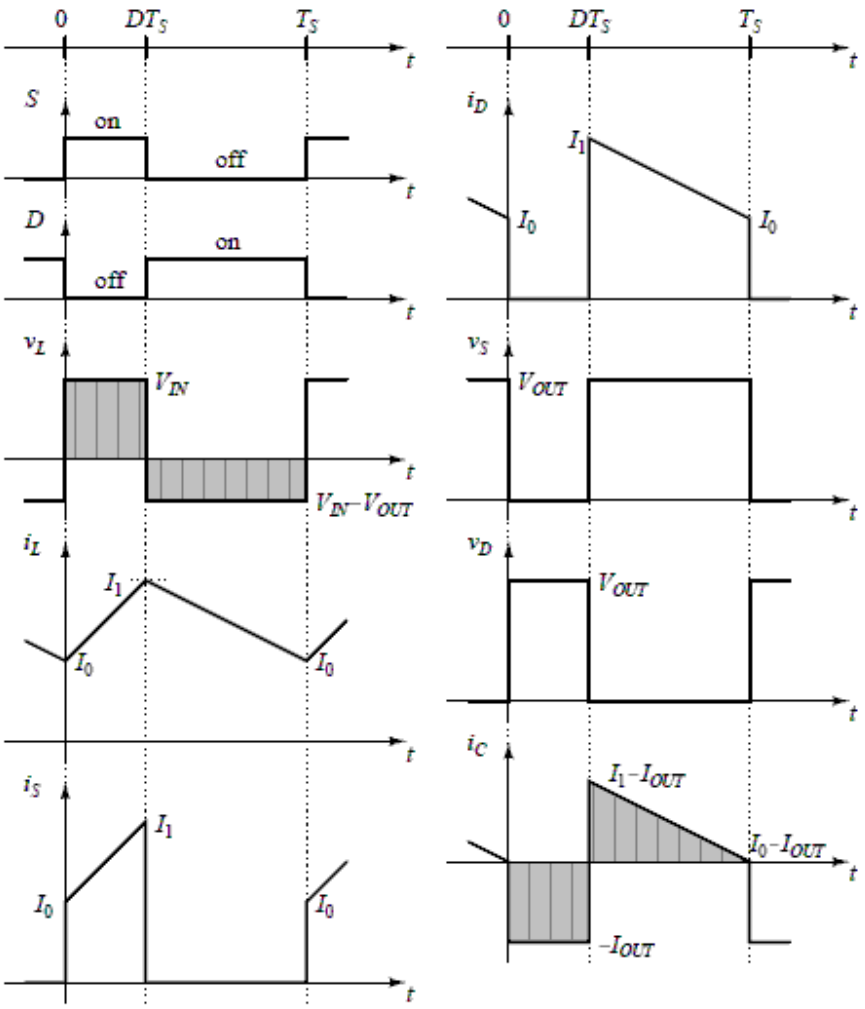


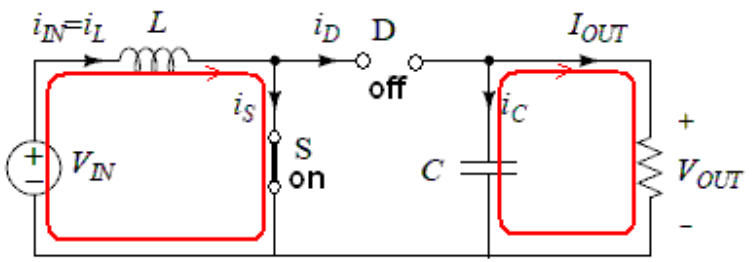
DVA MOGUĆA REŽIMA RADA:

-KONTINUALNI (NEPREKIDNI) REŽIM RADA

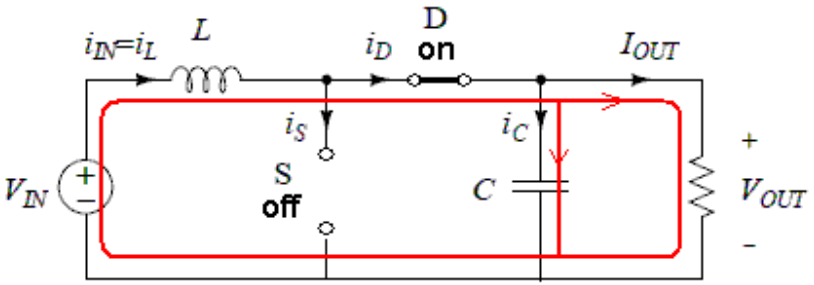
-DISKONTINUALNI (PREKIDNI) REŽIM RADA

TALASNI OBLICI I EKVIVALENTNO KOLO ZA ČOPER PODIZAČ NAPONA – *BOOST* PRETVARAČ u KONTINUALNOM REŽIMU



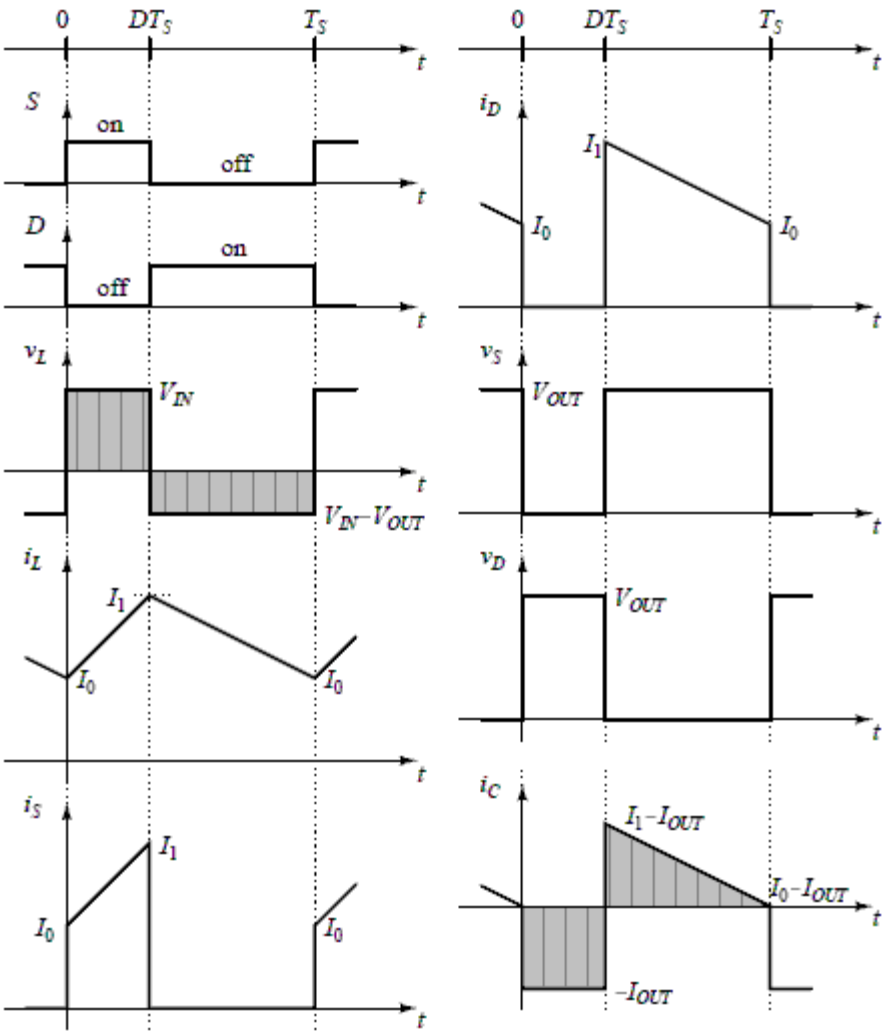


EKVIVALENTNO KOLO ČOPERA PODIZAČA NAPONA U INTERVALU ton KAD JE UKLJUČEN PREKIDAČ



EKVIVALENTNO KOLO ČOPERA PODIZAČA NAPONA U INTERVALU t_{off} KAD JE ISKLJUČEN PREKIDAČ (UKLJUČENA DIODA)

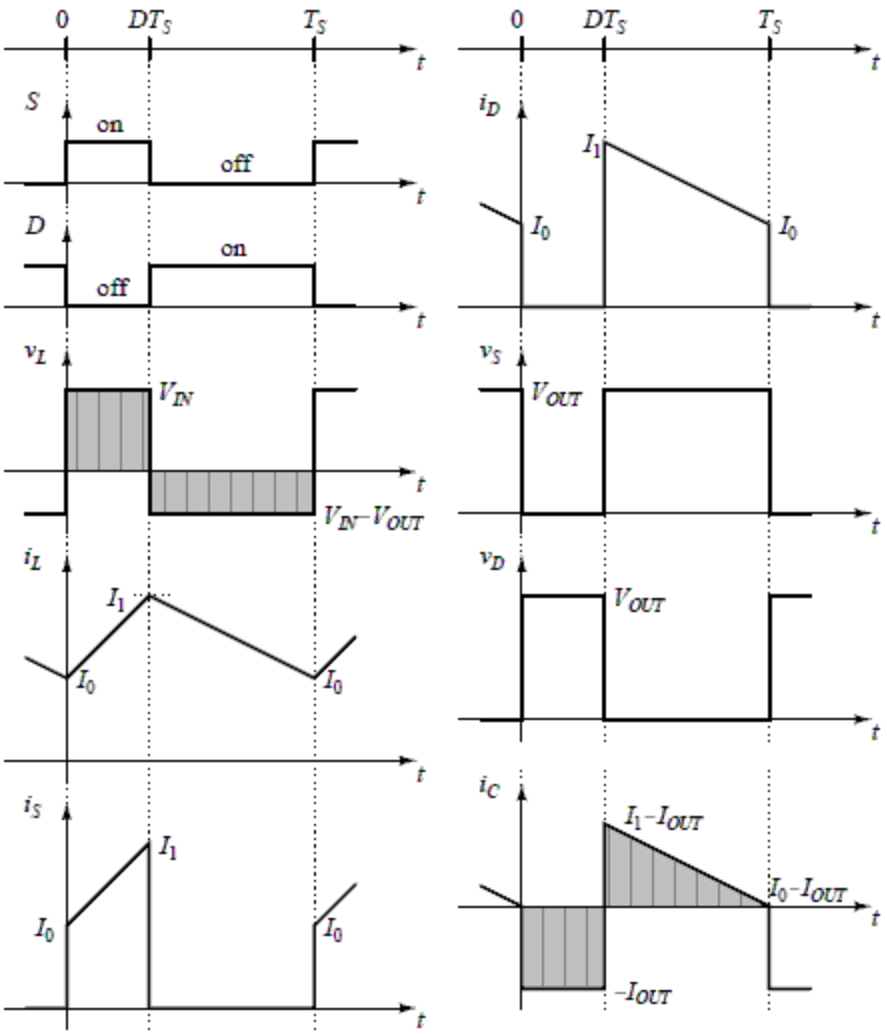
ČOPER PODIZAČ NAPONA-*BOOST* u KONTINUALNOM REŽIMU



NAPONI I STRUJE ČOPERA PODIZAČA U KONTINUALNOM REŽIMU $I_0 > 0$

t	$0 < t < DT_S$	$DT_S < t < T_S$
trajanje	DT_S	$D'T_S = (1-D)T_S$
v_L	V_{IN}	$V_{IN} - V_{OUT}$
i_L	$I_0 + \frac{v_L}{L}t$	$I_1 + \frac{v_L}{L}(t - DT_S)$
i_S	i_L	0
i_D	0	i_L
v_S	0	V_{OUT}
v_D	V_{OUT}	0
i_C	$i_D - I_{OUT}$	$i_D - I_{OUT}$

ČOPER PODIZAČ NAPONA-*BOOST* u KONTINUALNOM REŽIMU



SREDNJA VREDNOST NAPONA NA INDUKTIVNOSTI L JE:

$$DT_S\, V_{IN} + D'T_S\,(V_{IN} - V_{OUT}) = 0$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA JE:

$$V_{OUT} = \frac{1}{1-D}\, V_{IN}$$

SREDNJA VREDNOST STRUJE KALEMA JE:

$$I_L = \frac{I_0 + I_1}{2} \qquad I_{IN} = I_L$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNE STRUJE:

$$I_{OUT} = \frac{1}{T_S}\, D'T_S\, \frac{I_1 + I_0}{2} = D'\, I_L$$

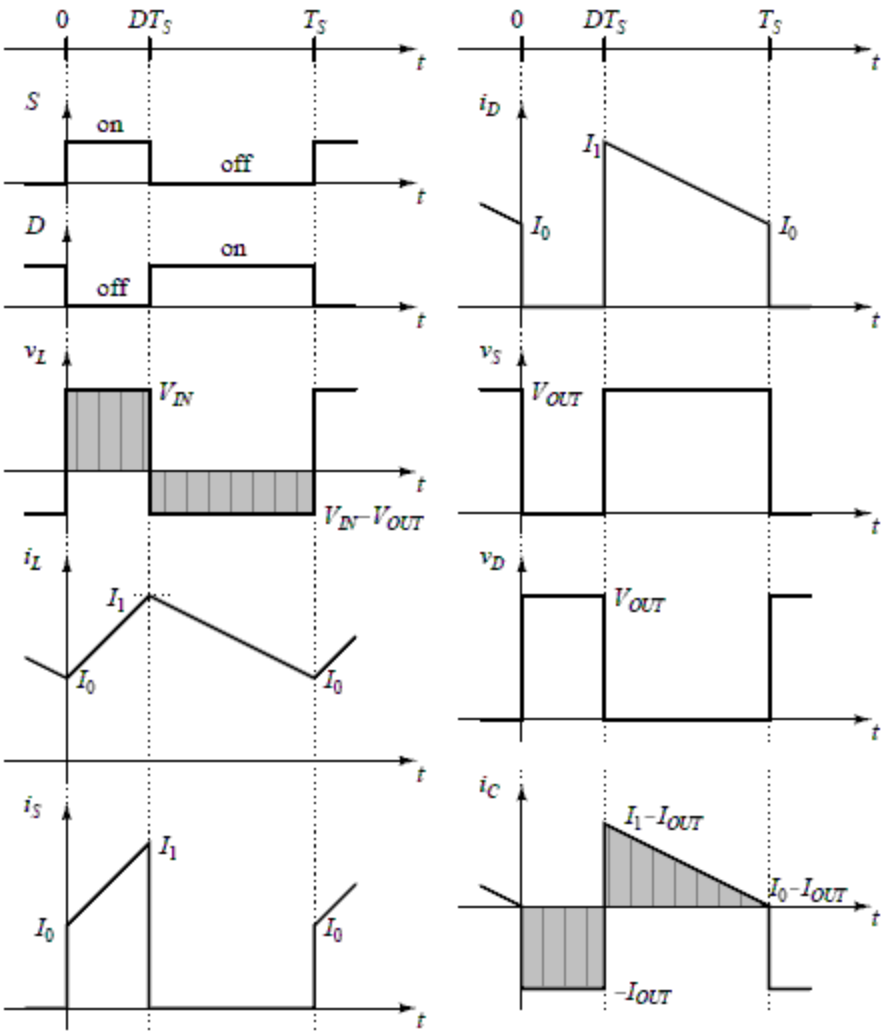
$$I_{OUT} = (1-D)\, I_{IN}$$

PRENOSNI ODNOS PRETVARAČA:

$$M = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

$$M\,(D) = \frac{1}{1-D}$$

ČOPER PODIZAČ NAPONA-*BOOST* u KONTINUALNOM REŽIMU



MAKSIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_1 = I_0 + \frac{V_{IN}}{L} DT_S$$

$$I_1 - I_0 = \frac{V_{IN}}{L} DT_S \qquad I_1 + I_0 = 2I_{IN}$$

MINIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_0 = I_{IN} - \frac{V_{IN}}{2f_S L} D = \frac{I_{OUT}}{1-D} - \frac{V_{IN}}{2f_S L} D$$

MAKSIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_1 = I_{IN} + \frac{V_{IN}}{2f_S L} D = \frac{I_{OUT}}{1-D} + \frac{V_{IN}}{2f_S L} D$$

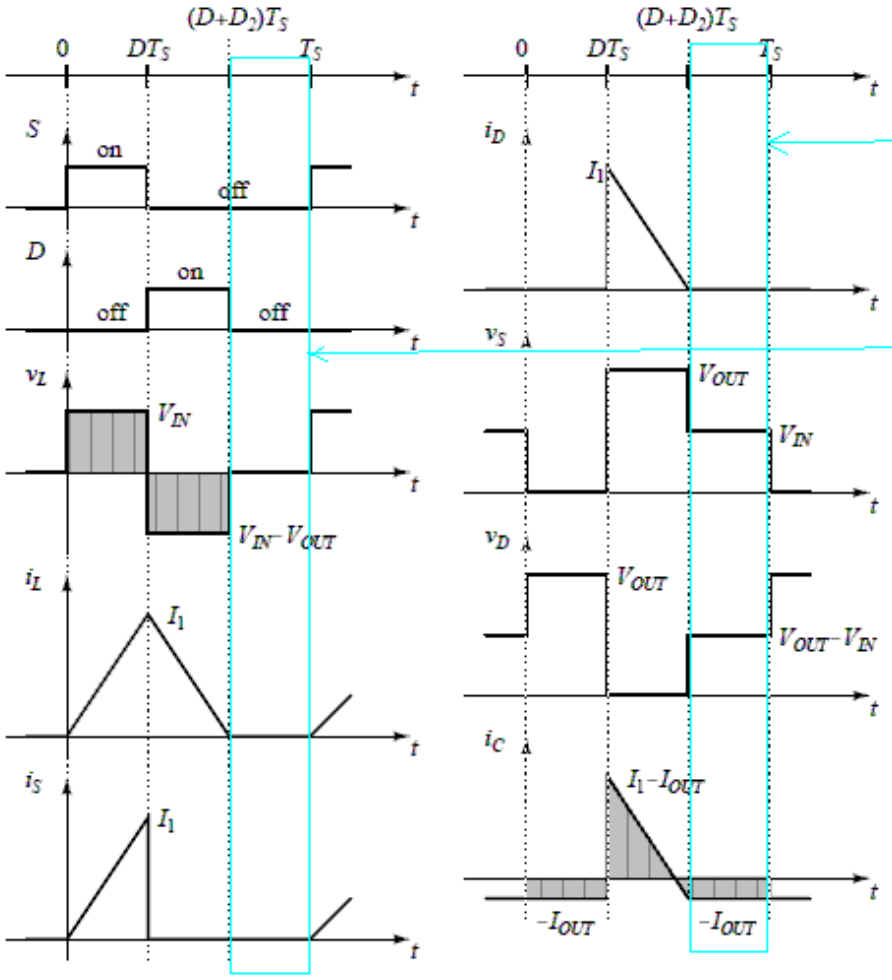
USLOV ZA KONTINUALNI REŽIM:

$$I_0 > 0 \quad \text{tj.} \quad I_{IN} > \frac{V_{IN}}{2f_S L} D$$

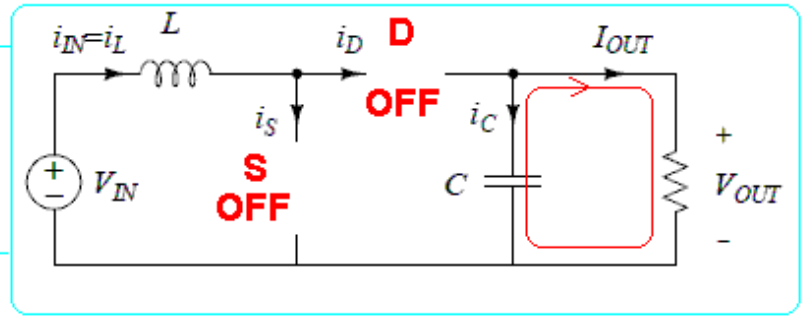
$$\Downarrow$$

$$I_{OUT} > \frac{V_{IN}}{2f_S L} D(1-D)$$

ČOPER PODIZAČ NAPONA -*BOOST* u DISKONTINUALNOM (PREKIDNOM)REŽIMU



ČOPER PODIZAČ NAPONA U DISKONTINUALNOM REŽIMU



EKVIVALENTNO KOLO U INTERVALU

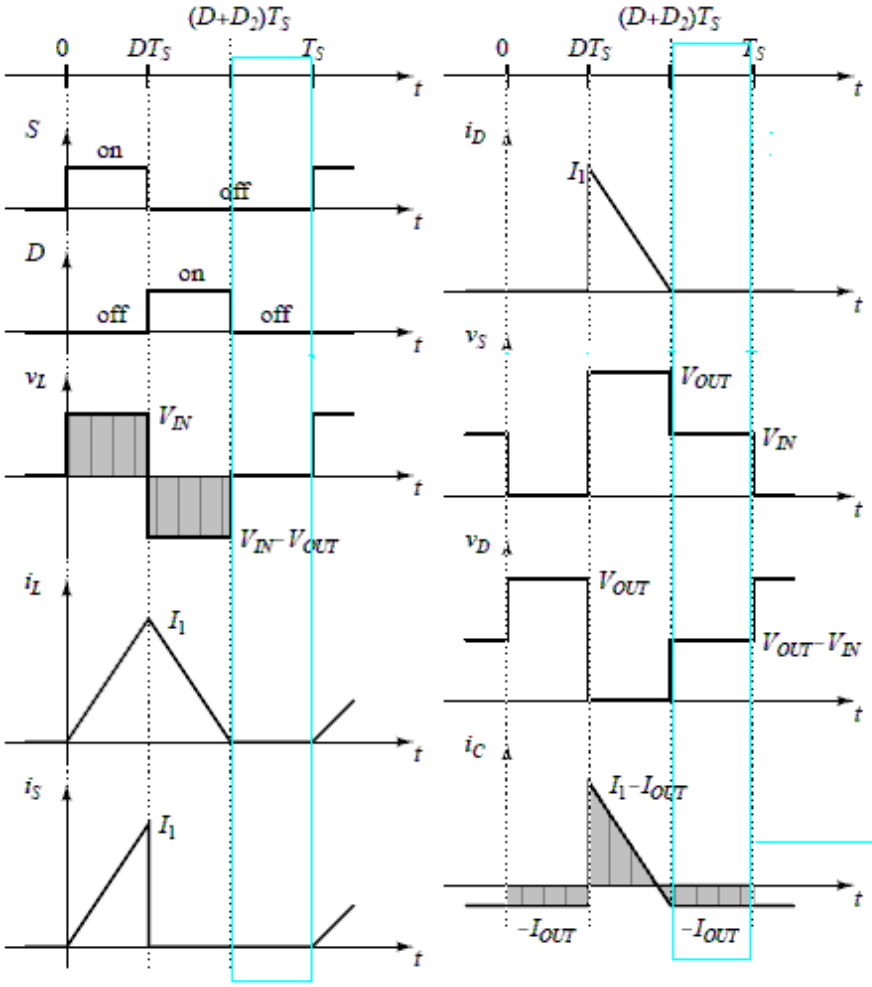
$$(D + D_2)T_S < t < T_S$$

$$I_{OUT} < \frac{V_{IN}}{2f_S L} D\,(1 - D)$$

$$V_{OUT} \neq \frac{V_{IN}}{1 - D} \qquad v_L = L\frac{di_L}{dt} = 0$$

USLOVI

ČOPER PODIZAČ NAPONA -*BOOST* u DISKONTINUALNOM (PREKIDNOM)REŽIMU



NAPONI I STRUJE ČOPERA PODIZAČA NAPONA U DISKONTINUALNOM REŽIMU

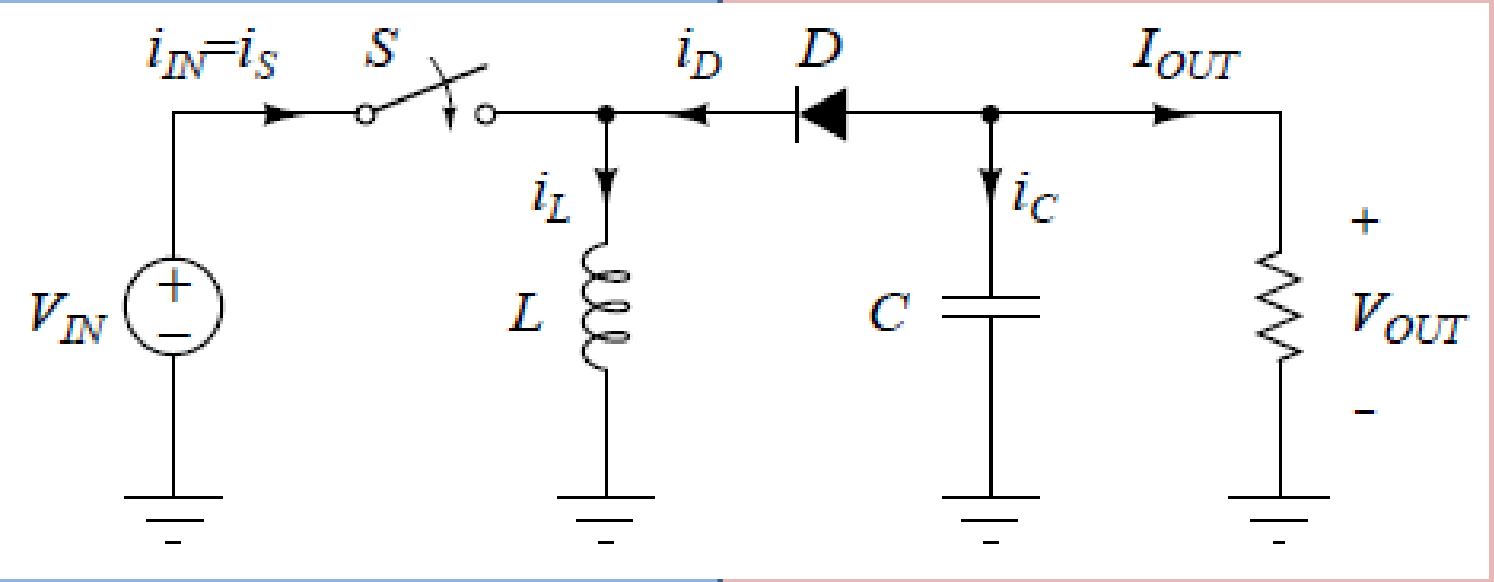
t	$0 < t < DT_S$	$DT_S < t < (D+D_2)T_S$	$(D+D_2)T_S < t < T_S$
trajanje	DT_S	D_2T_S	$(1-D-D_2)T_S$
v_L	V_{IN}	$V_{IN}-V_{OUT}$	0
i_L	$\frac{v_L}{L}t$	$I_1+\frac{v_L}{L}(t-DT_S)$	0
i_S	i_L	0	0
i_D	0	i_L	0
v_S	0	V_{OUT}	V_{IN}
v_D	V_{OUT}	0	$V_{OUT}-V_{IN}$
i_C	i_D-I_{OUT}	i_D-I_{OUT}	i_D-I_{OUT}

$$M=\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \qquad M(D,k)=\frac{1}{2}\left(1+\sqrt{1+\frac{4D^2}{k}}\right) \qquad k=\frac{2f_SL}{R}$$

ČOPER OBRTAČ NAPONA

BUCK ⟷ *BOOST*

PRETVARAČ



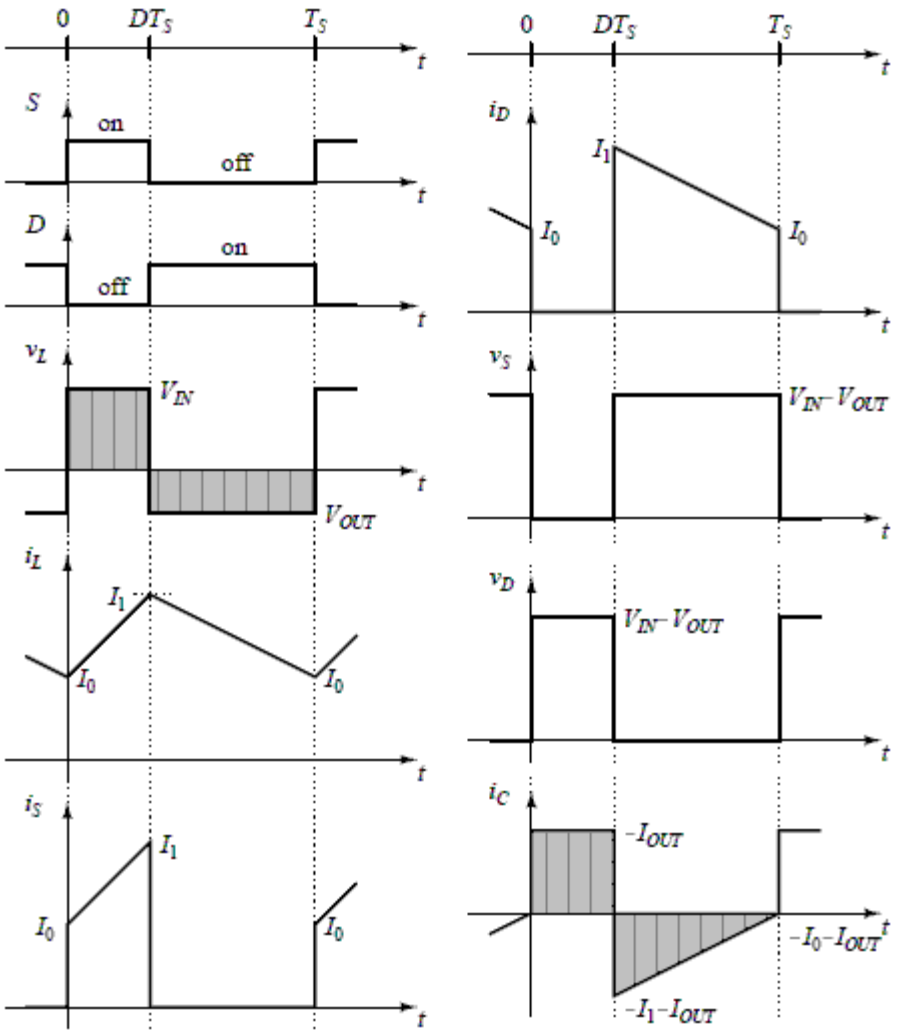
DVA MOGUĆA REŽIMA RADA:

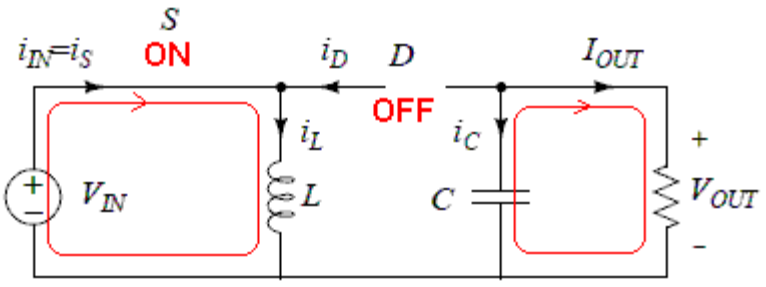
-KONTINUALNI (NEPREKIDNI) REŽIM RADA

-DISKONTINUALNI (PREKIDNI) REŽIM RADA

TALASNI OBLICI I EKVIVALENTNO KOLO ZA ČOPER OBRTAČ NAPONA

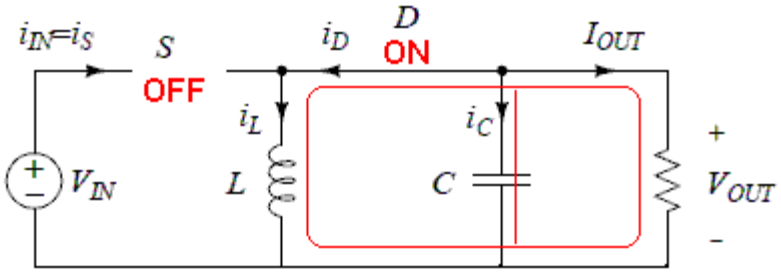
BUCK - BOOST PRETVARAČ u KONTINUALNOM REŽIMU





buck-bost

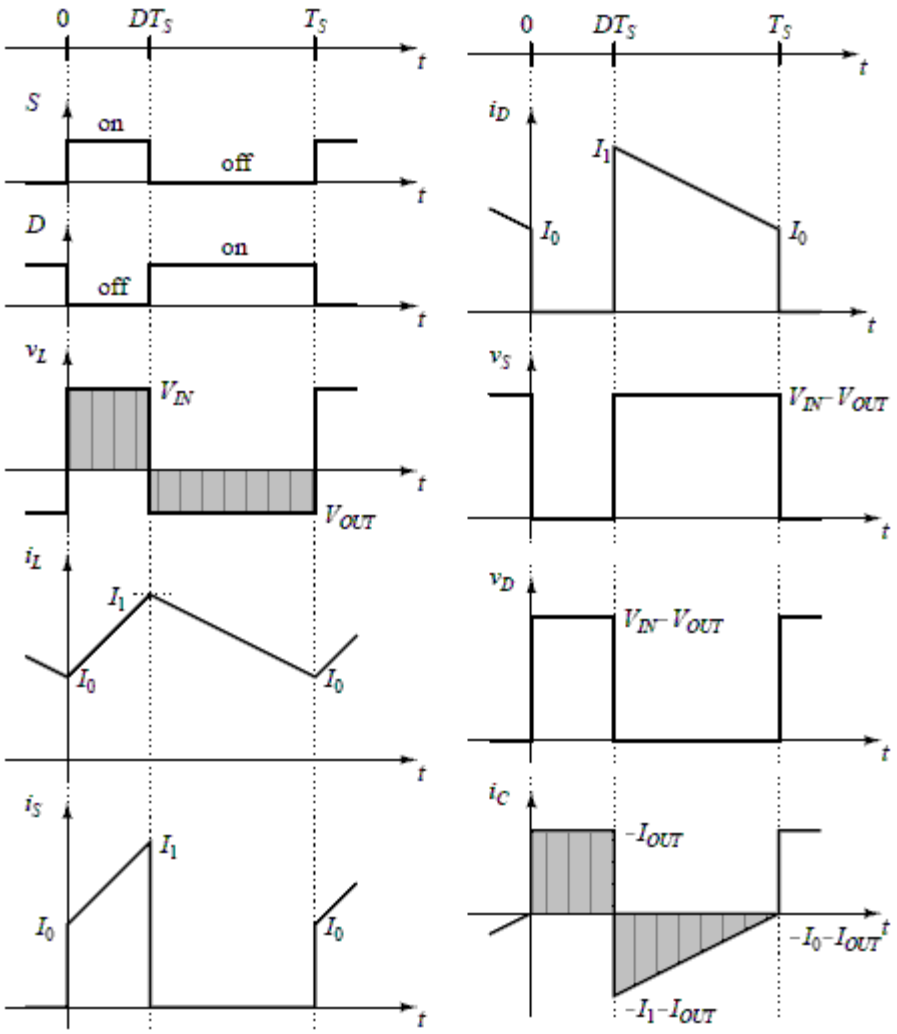
EKVIVALENTNO KOLO ČOPERA OBRTAČA NAPONA U INTERVALU ton KAD JE UKLJUČEN PREKIDAČ



buck-bost

EKVIVALENTNO KOLO ČOPERA OBRTAČA NAPONA U INTERVALU t_{off} KAD JE ISKLJUČEN PREKIDAČ (UKLJUČENA DIODA)

ČOPER OBRTAČ NAPONA *BUCK - BOOST PRETVARAČ* u KONTINUALNOM REŽIMU



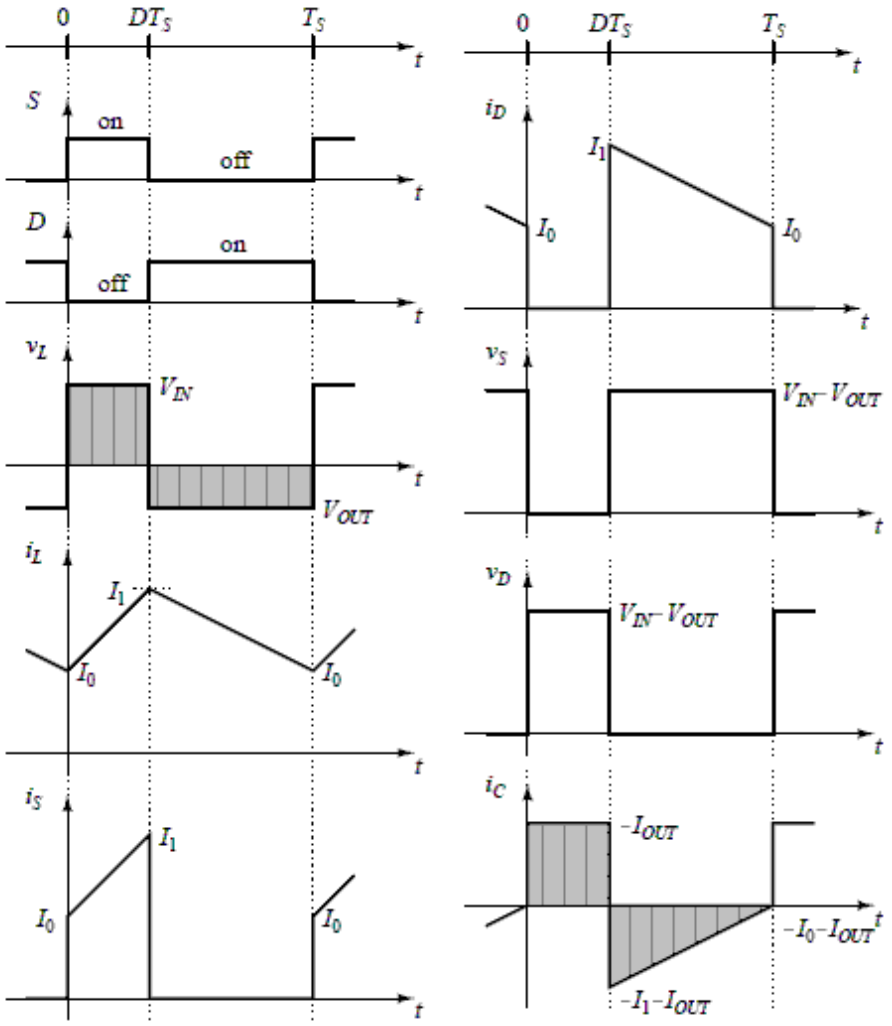
buck-boost

NAPONI I STRUJE ČOPERA PODIZAČA OBRTAČA NAPONA

U KONTINUALNOM REŽIMU $I_0 > 0$

t	$0 < t < DT_S$	$DT_S < t < T_S$
trajanje	DT_S	$D'T_S = (1-D)T_S$
v_L	V_{IN}	V_{OUT}
i_L	$I_0 + \frac{v_L}{L}t$	$I_1 + \frac{v_L}{L}(t - DT_S)$
i_S	i_L	0
i_D	0	i_L
v_S	0	$V_{IN} - V_{OUT}$
v_D	$V_{IN} - V_{OUT}$	0
i_C	$-i_D - I_{OUT}$	$-i_D - I_{OUT}$

ČOPER OBRTAČ NAPONA *BUCK - BOOST PRETVARAČ* u KONTINUALNOM REŽIMU



SREDNJA VREDNOST NAPONA NA INDUKTIVNOSTI L JE:

$$DT_S\,V_{IN} + D'T_S\,V_{OUT} = 0$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNOG NAPONA JE:

$$V_{OUT} = -\frac{D}{1-D}\,V_{IN}$$

SREDNJA VREDNOST STRUJE KALEMA JE:

$$I_L = \frac{I_0 + I_1}{2}$$

SREDNJA VREDNOST IZLAZNE STRUJE:

$$I_{OUT} = -\frac{1}{T_S}\,D'T_S\,\frac{I_1 + I_0}{2} = -D'\,I_L$$

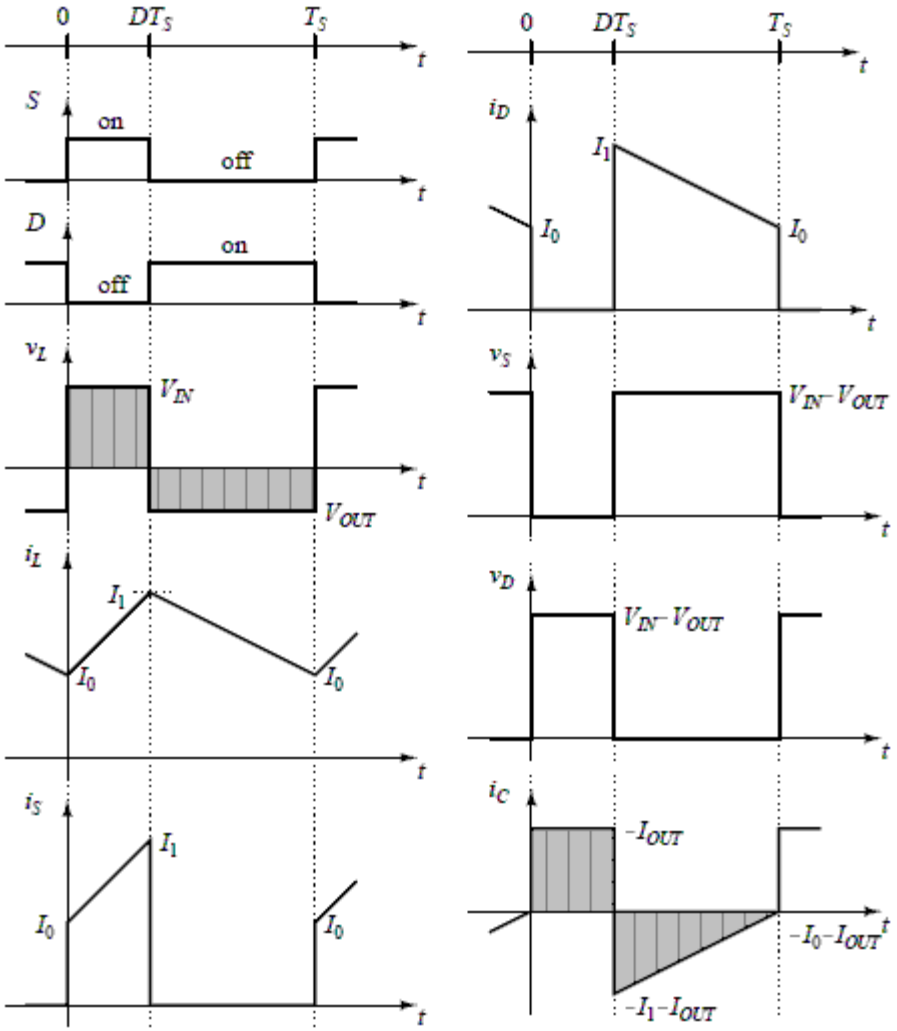
$$I_{OUT} = -\frac{1-D}{D}I_{IN}$$

PRENOSNI ODNOS PRETVARAČA:

$$M = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$$

$$M\,(D) = -\frac{D}{1-D}$$

ČOPER OBRTAČ NAPONA *BUCK - BOOST PRETVARAČ* u KONTINUALNOM REŽIMU



MAKSIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_1 = I_0 + \frac{V_{IN}}{L} DT_S$$

$$I_1 - I_0 = \frac{V_{IN}}{L} DT_S \qquad I_1 + I_0 = 2I_L$$

MINIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_0 = I_{IN} - \frac{V_{IN}}{2f_S L} D = \frac{I_{OUT}}{1-D} - \frac{V_{IN}}{2f_S L} D$$

MAKSIMALNA VREDNOST STRUJE KALEMA:

$$I_1 = I_L + \frac{V_{IN}}{2f_S L} D = -\frac{I_{OUT}}{1-D} + \frac{V_{IN}}{2f_S L} D$$

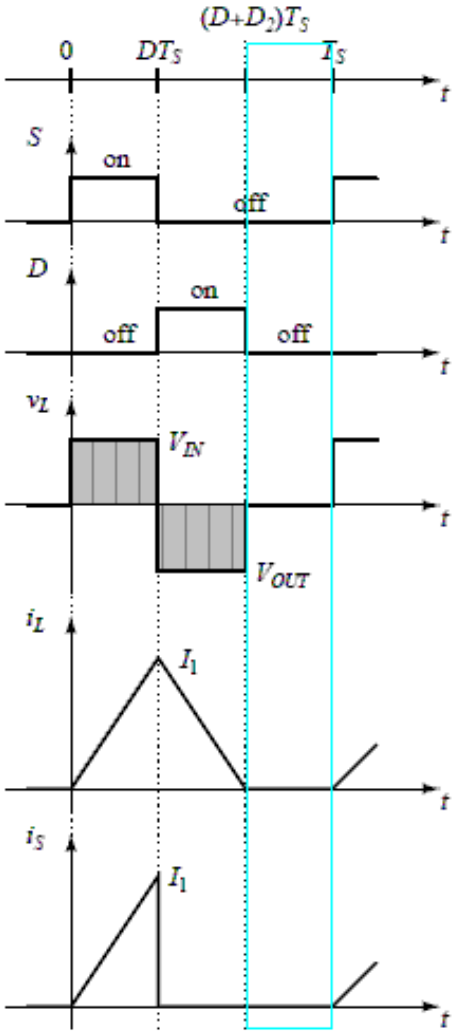
USLOV ZA KONTINUALNI REŽIM:

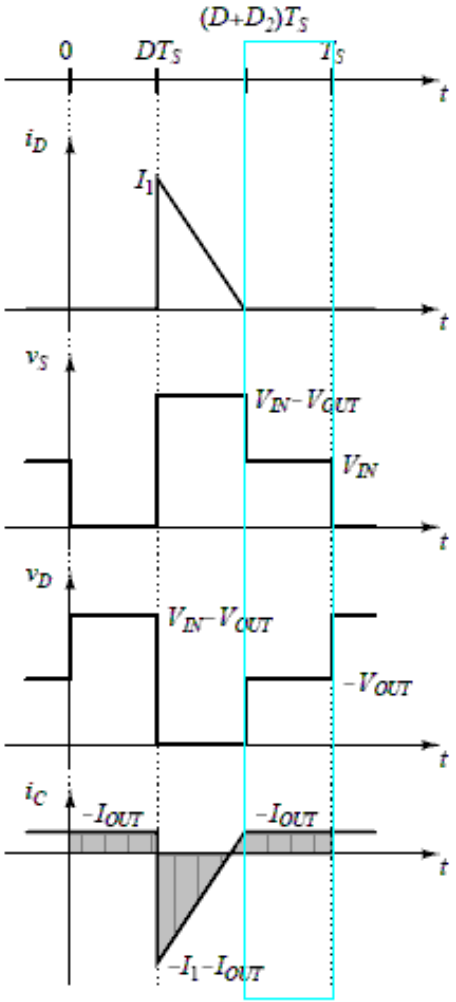
$$I_0 > 0 \quad \text{tj.} \quad I_{IN} > \frac{V_{IN}}{2f_S L} D$$

$$\Downarrow$$

$$I_{OUT} < -\frac{V_{IN}}{2f_S L} D\,(1-D)$$

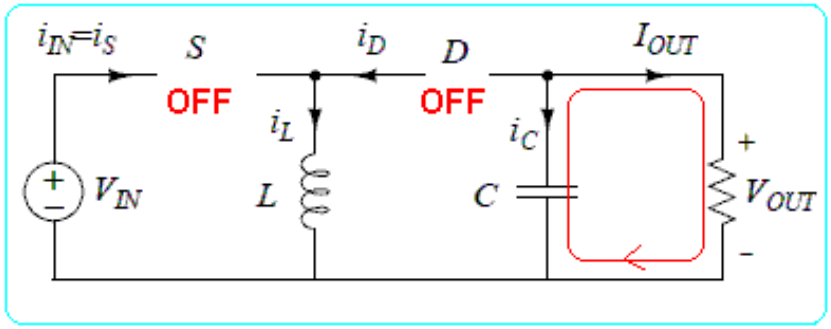
ČOPER OBRTAČ NAPONA *BUCK - BOOST PRETVARAČ* u PREKIDNOM (DISKONTINUALNOM) REŽIMU





buck-boost

ČOPER OBRTAČ NAPONA U DISKONTINUALNOM REŽIMU



EKVIVALENTNO KOLO U INTERVALU

$$(D + D_2)T_S < t < T_S$$

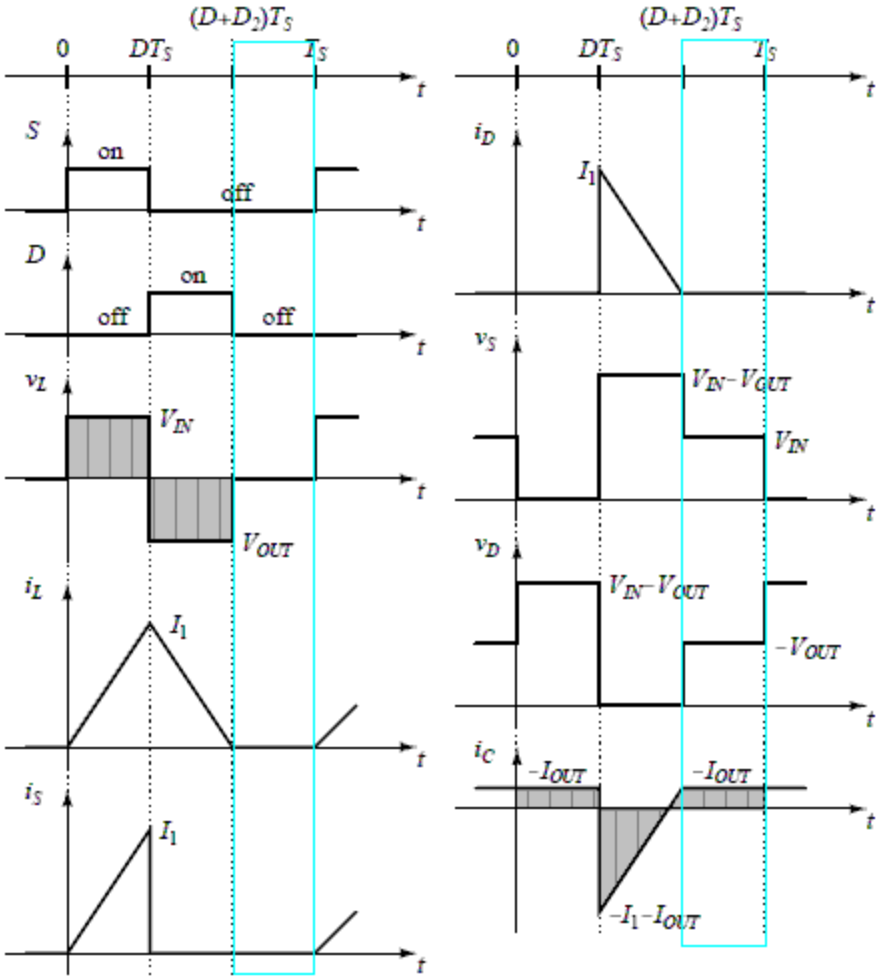
$$|I_{OUT}| < \frac{V_{IN}}{2f_S L} D\,(1 - D)$$

$$V_{OUT} \neq -\frac{D}{1 - D} V_{IN}$$

$$v_L = L\frac{di_L}{dt} = 0$$

USLOVI

ČOPER OBRTAČ NAPONA *BUCK - BOOST PRETVARAČ* u PREKIDNOM (DISKONTINUALNOM) REŽIMU



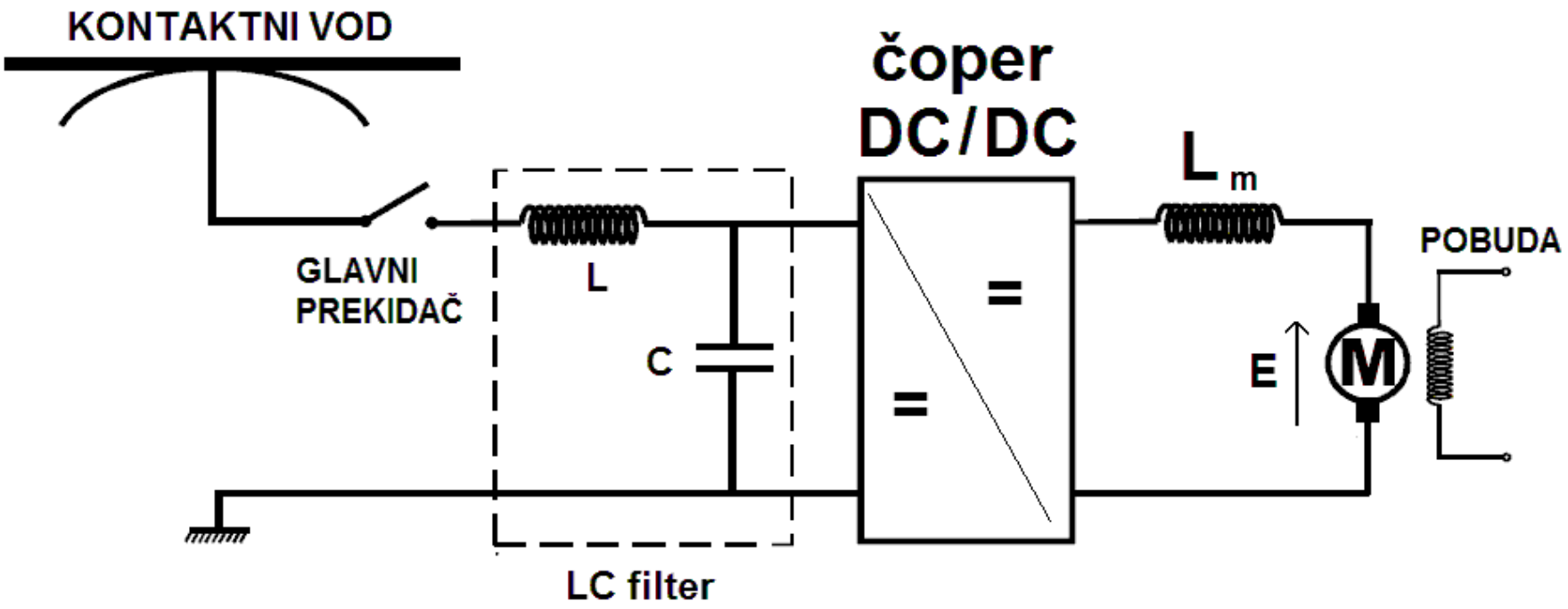
buck-boost

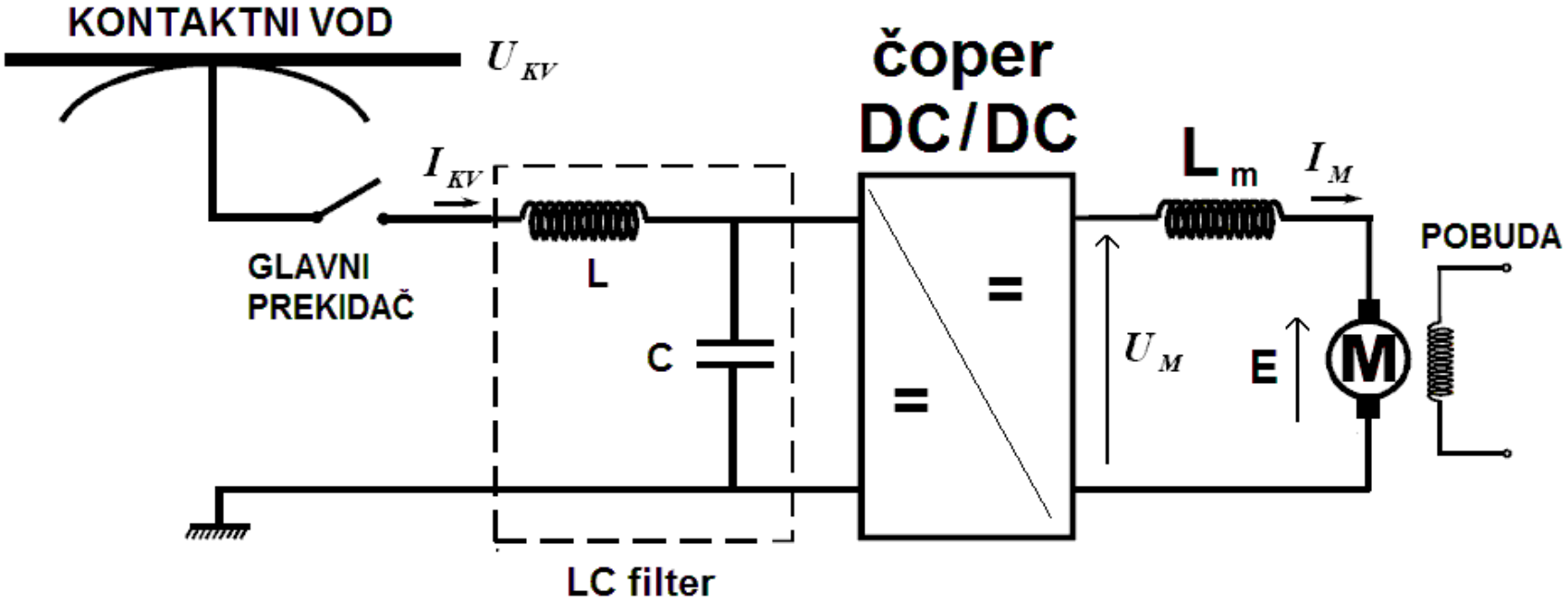
NAPONI I STRUJE ČOPERA OBRTAČA NAPONA U DISKONTINUALNOM REŽIMU

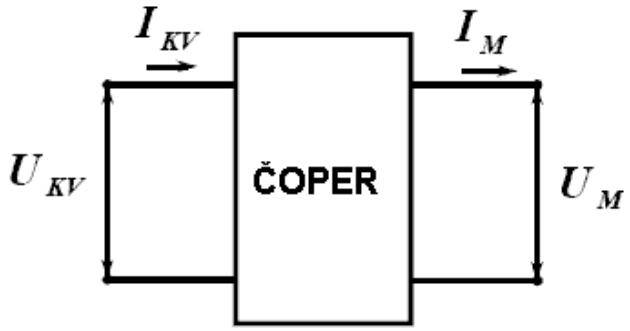
t	$0 < t < DT_S$	$DT_S < t < (D + D_2)T_S$	$(D + D_2)T_S < t < T_S$
trajanje	DT_S	D_2T_S	$(1 - D - D_2)T_S$
v_L	V_{IN}	V_{OUT}	0
i_L	$\frac{v_L}{L}t$	$I_1 + \frac{v_L}{L}(t - DT_S)$	0
i_S	i_L	0	0
i_D	0	i_L	0
v_S	0	$V_{IN} - V_{OUT}$	V_{IN}
v_D	$V_{IN} - V_{OUT}$	0	$-V_{OUT}$
i_C	$-i_D - I_{OUT}$	$-i_D - I_{OUT}$	$-i_D - I_{OUT}$

$$M = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \qquad M(D,k) = -\frac{D}{\sqrt{k}} \qquad k = \frac{2f_S L}{R}$$

PRIMENA ČOPERA : REGULACIJA MOMENTA (VUČNE SILE) I BRZINE JEDNOSMERNIH MOTORA SA NEZAVISNOM POBUDOM







$\eta \to 1$ **(zanemarujemo gubitke u čoperu)** $\Rightarrow P_{\mathrm{M}} = P_{\mathrm{KV}}$

pri tome je klučna osobina čopera podešavanje napona bez gubitaka snage: $U \in [0, U_{\mathrm{KV}}]$

ČOPER
Spuštač napona "BUCK"

Pošto je $L \to \infty$ struju možemo smatrati konstantnom!

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

D - indeks modulacije

I_L - struja prigušnice

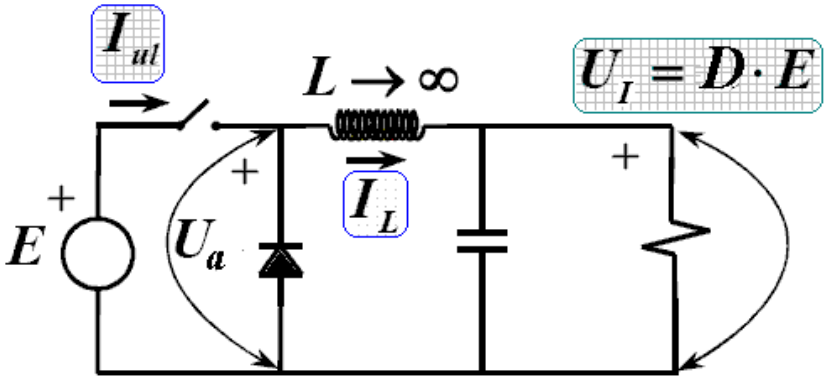
$$I_{ul_{sr}} = D \cdot I_L$$

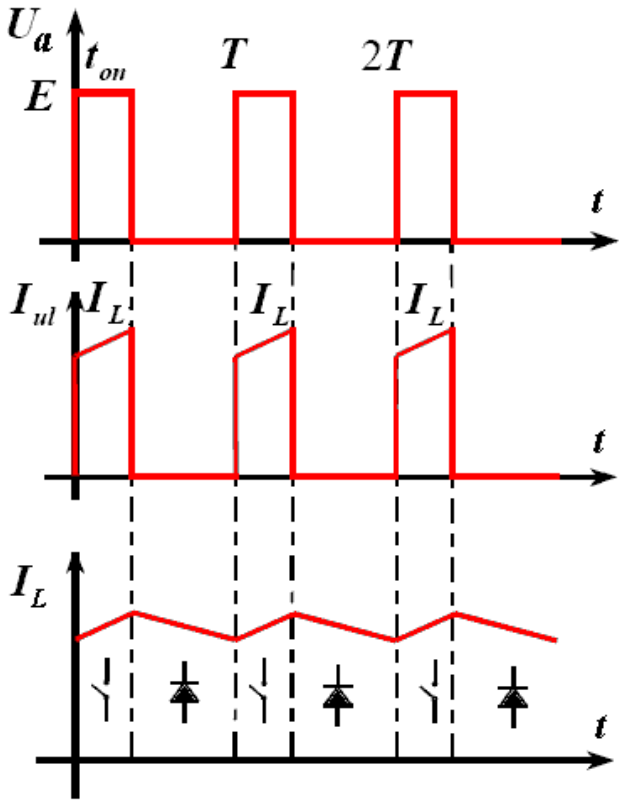
KONTINUALNO PODEŠAVANJE IZLAZNOG NAPONA

od 0 do E

ULAZNA SNAGA

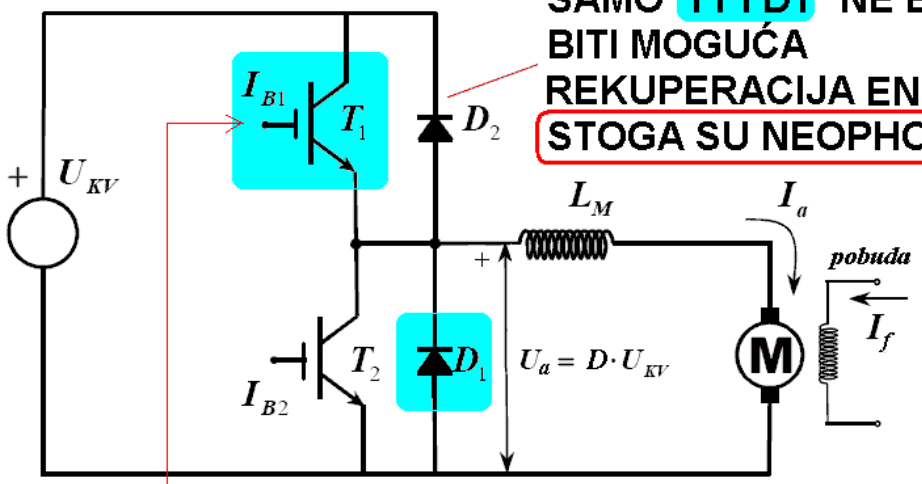
$$P = E \cdot D \cdot I_L$$

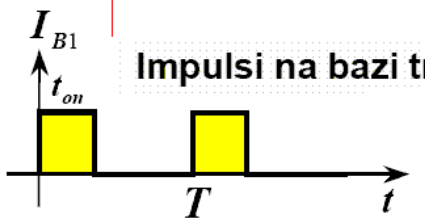




Čoper spuštač napona sa rekuperacijom

UKOLIKO BI POSTOJALI SAMO **T1 i D1** NE BI MOGLA BITI MOGUĆA REKUPERACIJA ENERGIJE.
STOGA SU NEOPHODNI T2 i D2.





Impulsi na bazi tranzistora

$$t_{on} = D \cdot T$$

Promenom t_{on} može se podešavati kontinualno brzina i vučna sila

napon

$$U_a = D \cdot U_{kv} = K_e \cdot \Phi \cdot \omega + R_a \cdot I_a \Rightarrow \omega = \frac{D \cdot U_{kv} - R_a \cdot I_a}{K_e \cdot \Phi}$$

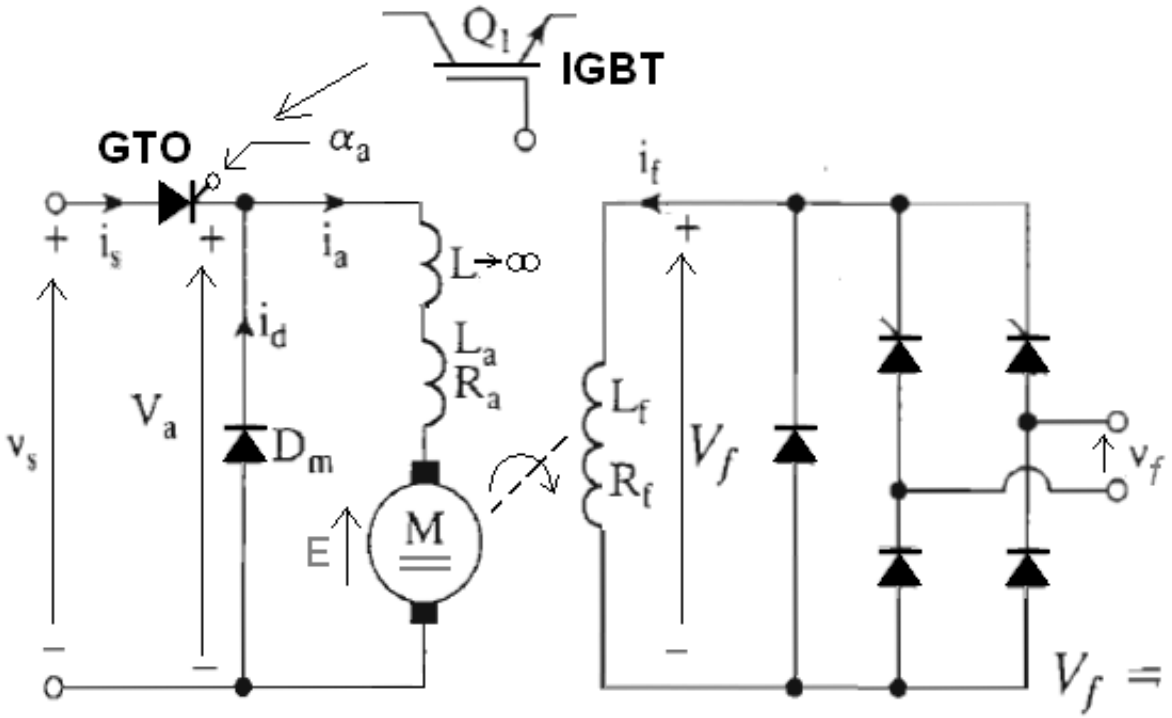
vučna sila ~ momenat ~ struja motora

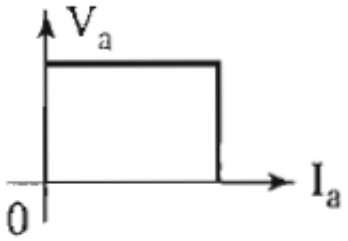
$$F_v \sim M_{em} \sim I_a = \frac{D \cdot U_{kv} - K_e \cdot \Phi \cdot \omega}{R_a^*}$$

$$R_a^* = R_a + R_L$$

Omski otpor prigušnice

ČOPERSKO KOLO ZA POBUDU DC MOTORA SA TIRISTORSKI KONTROLISANOM NEZAVISNOM POBUDOM



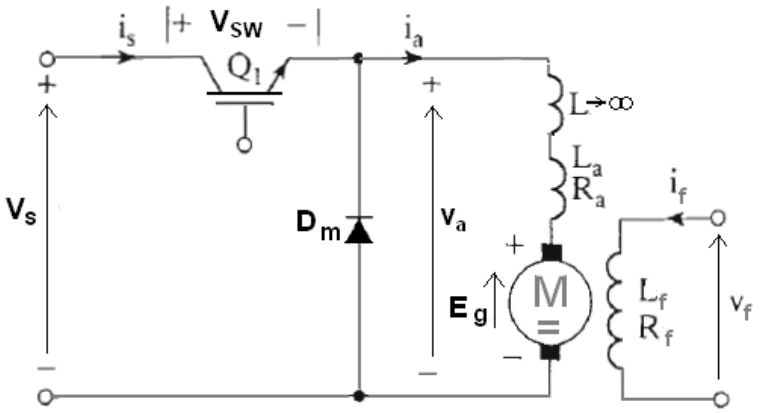


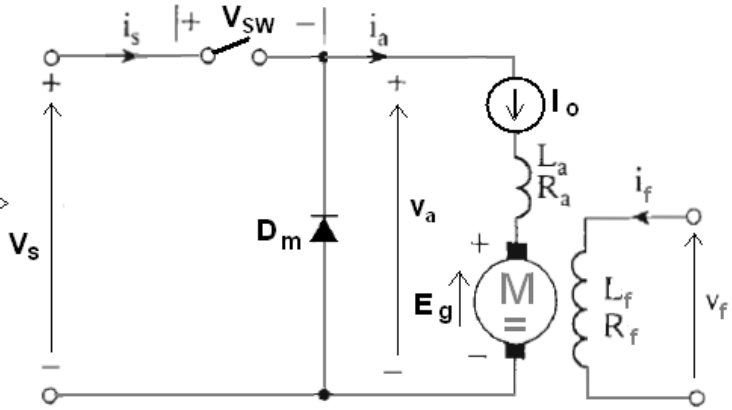
OBLAST RADA
I-kvadrant

$$V_f = \frac{V_m}{\pi}(1 + \cos\alpha_f)$$

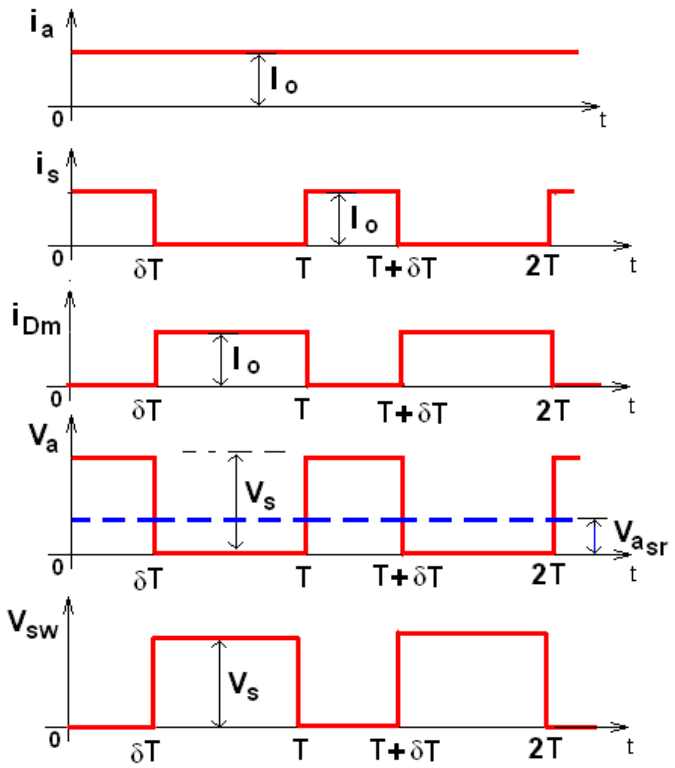
$$0 \le \alpha_f \le \pi$$

OSNOVNO ČOPERSKO KOLO ZA POBUDU DC MOTORA SA NEZAVISNOM POBUDOM-ANALIZA RADA





EKVIVALENTNO KOLO



STACIONARNI REŽIM:

NAPONSKA JEDNAČINA MOTORA

$$V_{asr} = R_a I_o + E_g$$

$$V_{asr} = \delta V_s$$

KEMS ELEKTROMOTORA

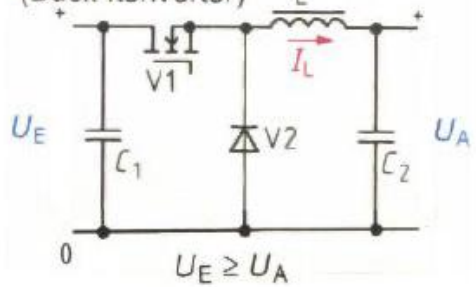
$$E_g = k I_f n$$

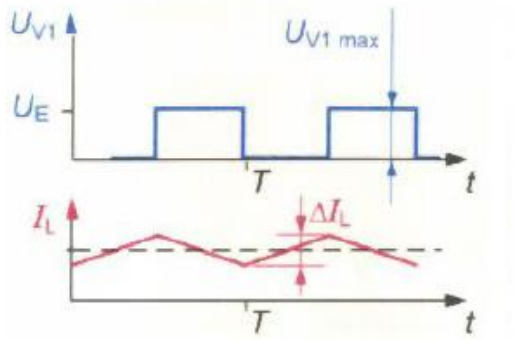
ULAZNA SNAGA MOTORA

$$P_{IN} = E_g I_o$$

OSNOVNI TIPOVI ČOPERA: REKAPITULACIJA

Regulator smanjenja napona
(Buck-konvertor)





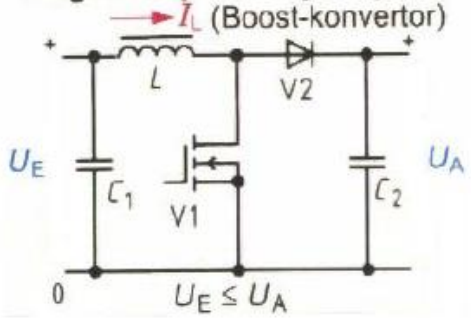
$$U_A = g \cdot U_E$$

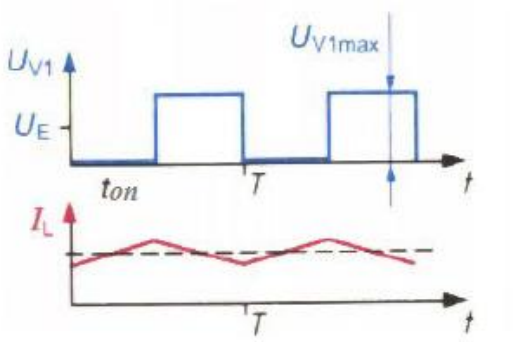
$$L = \frac{(U_E - U_A) \cdot U_A}{\Delta I_L \cdot f \cdot U_E}$$

$$I_L = I_A$$

$$U_{V1max} = U_E$$

Regulator povećanja napona
I_L (Boost-konvertor)





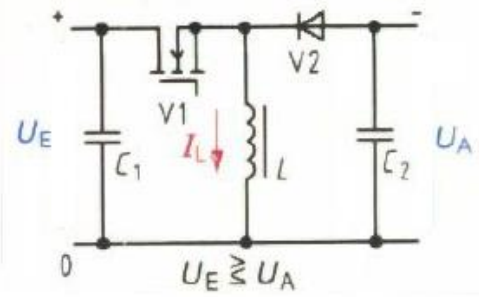
$$U_A = \frac{1}{1-g} \cdot U_E$$

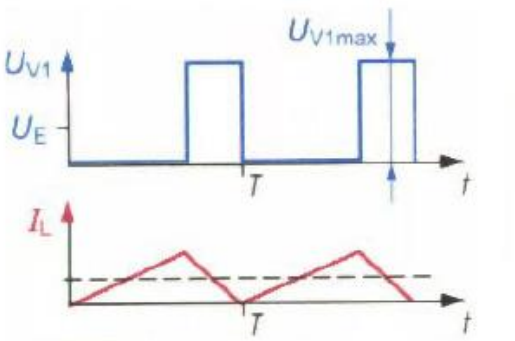
$$L = \frac{(U_A - U_E) \cdot U_E}{\Delta I_L \cdot f \cdot U_A}$$

$$I_L = \frac{1}{1-g} \cdot I_A$$

$$U_{V1max} = 2 \cdot U_E$$

Invertor (Flyback-konvertor)





$$U_A = \frac{1}{1-g} \cdot U_E$$

$$L = \frac{U_A \cdot U_E}{\Delta I_L \cdot f \cdot (U_A + U_E)}$$

$$I_L = \frac{1}{1-g} \cdot I_A$$

$$U_{V1max} = 2 \cdot U_E$$

Faktor režima $g = \frac{t_{on}}{T}$; $g = \frac{\text{trajanje uključenja}}{\text{trajanje periode}}$

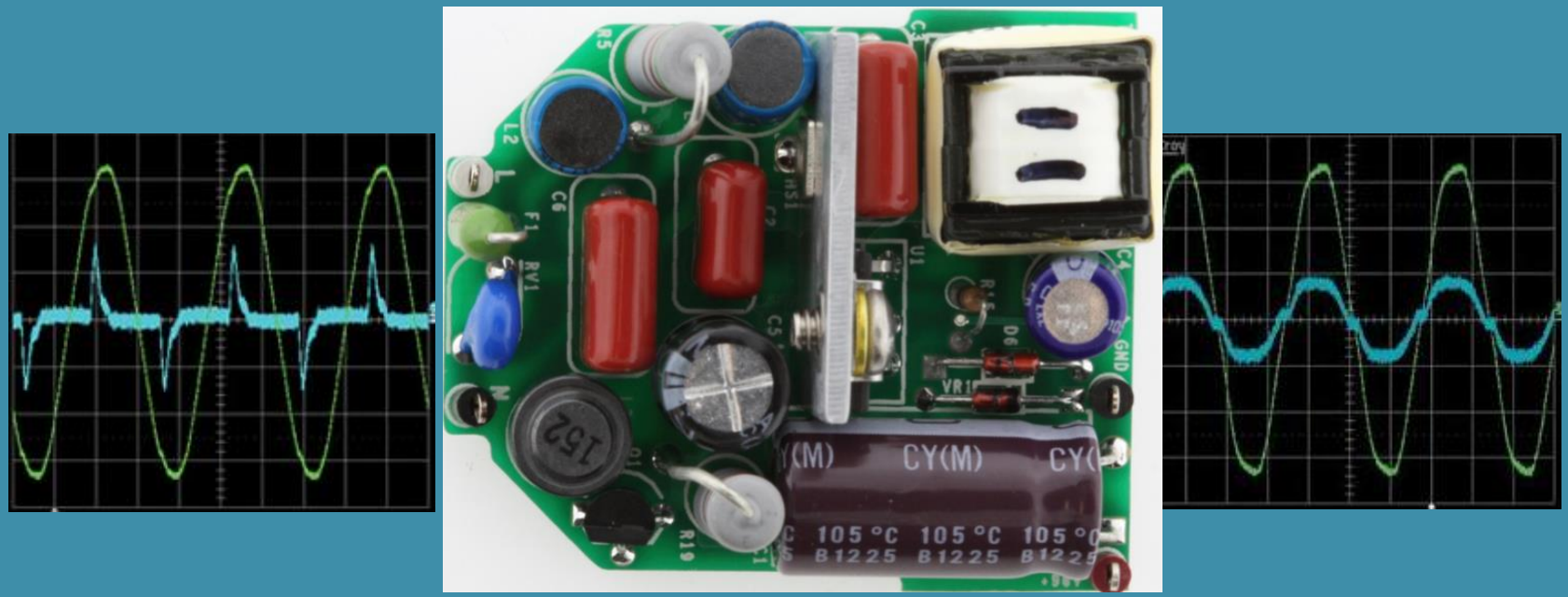
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NET

OSNOVNE

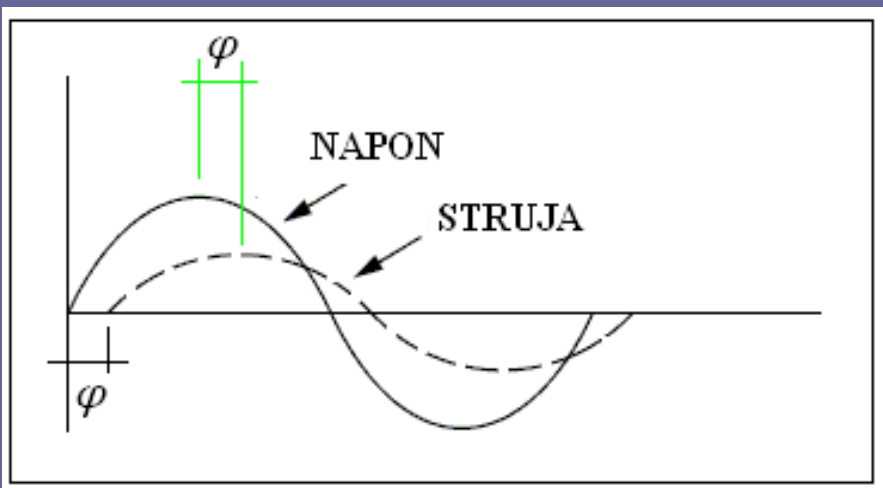
PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

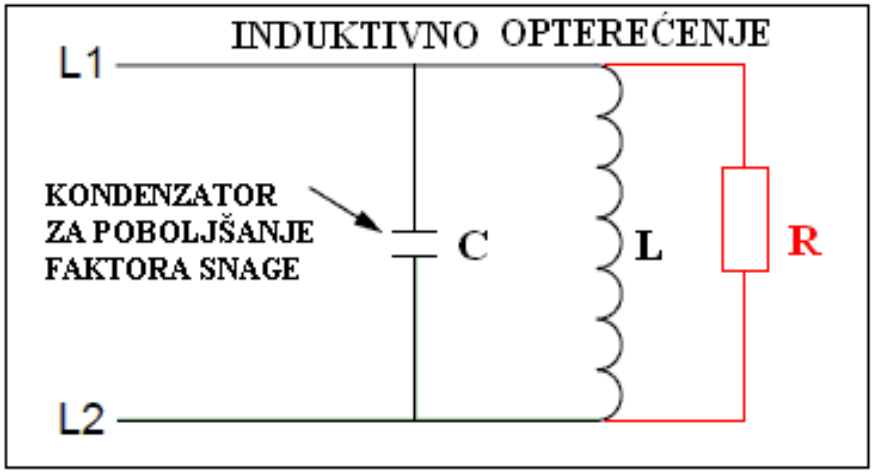
DC-DC PODIZAČ NAPONA I NJEGOVA PRIMENA U KOLIMA ZA KOREKCIJU FAKTORA SNAGE



PREDAVAČ: Prof. dr Željko Despotović, dipl.el.inž

ŠTA JE FAKTOR SNAGE???





Prividna snaga $S=UI$

Aktivna snaga $P=S\cos\varphi$

Reaktivna snaga $Q=S\sin\varphi$

FAKTOR SNAGE λ

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \longrightarrow$$

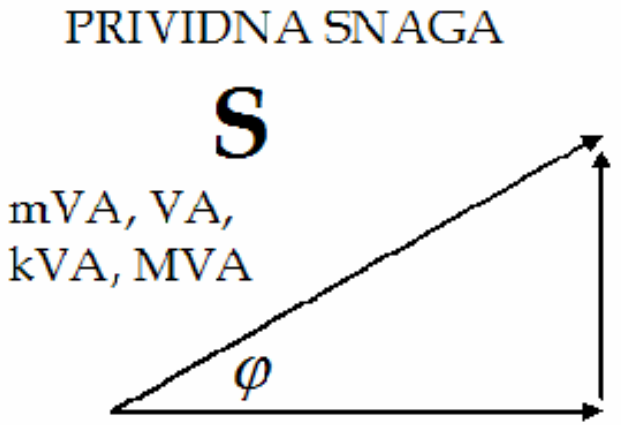
L1-L2
IMPEDANSA
$\underline{Z} = R$

$$\frac{P=UI_1\cos\varphi}{S=UI} \longrightarrow \lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I}\cos\varphi \qquad \frac{I_1}{I}=1 \longrightarrow \lambda = \cos\varphi$$

Power Factor Correction (PFC)

KOREKCIJA FAKTORA SNAGE?

TROUGAO SNAGA (važi samo u slučaju kada nema distorzije talsnih oblika struja i (ili) napona!!!)



$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

CILJ je OSTVARITI

$$Q = 0 \longrightarrow \begin{cases} P = S \\ \cos \varphi = 1 \end{cases}$$

A AKO IMAMO DISTORZIJU TALASNIH OBLIKA?
Čemu je jednaka prividna snaga S=?

UOBIČAJENE OZNAKE ZA FAKTOR SNAGE

$$PF = \frac{P_{opt}}{S}$$

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S}$$

FAKTOR DISTORZIJE ZA SINUSNE TALASNE OBLIKE

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = g \cdot \cos\varphi_1 \,, \quad g = DF = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

KADA NEMA DISTORZIJE TALASNOG OBLIKA $I_1 = I_{eff}$

$$\varphi = \varphi_1$$

$$g = DF = 1$$

I TADA JE FAKTOR SNAGE:

$$\lambda = \cos\varphi$$

REAKTIVNA ELEKTRIČNA ENERGIJA

- Reaktivna energija (ili u zapadnoj varijanti: jalova, što plastičnije opisuje njen karakter), sa stanovišta fizike je onaj deo ukupne isporučene električne energije koji se troši na uspostavljanje i održavanje magnetnog polja u električnim mašinama.
- Iz prethodne tvrdnje sledi da su najveći potrošači reaktivne energije elektromotori i transformatori.
- Ostali potrošači reaktivne energije (elektrolučne i indukcione peći, elektrovučna postrojenja, fluorescentna rasveta….)
- Svoje ime reaktivna energija je dobila zbog činjenice da njena potrošnja ne doprinosi aktivnoj odnosno korisnoj snazi, ali bez potrošnje reaktivne energije električna mašina ne bi ni mogla da radi.
- Strogo govoreći reaktivna energija je mnogo širi pojam i javlja se i kod potrošača kao što su: frekventni regulatori, soft starteri, jednosmerni pogoni, ispravljači, itd.

POTROŠAČI REAKTIVNE ENERGIJE

-Asinhroni motori
-Transformatori
-Elektrolučne peći
-Indukcione peći
-Elektrovučne podstanice
-Rasveta (fluorescentna)

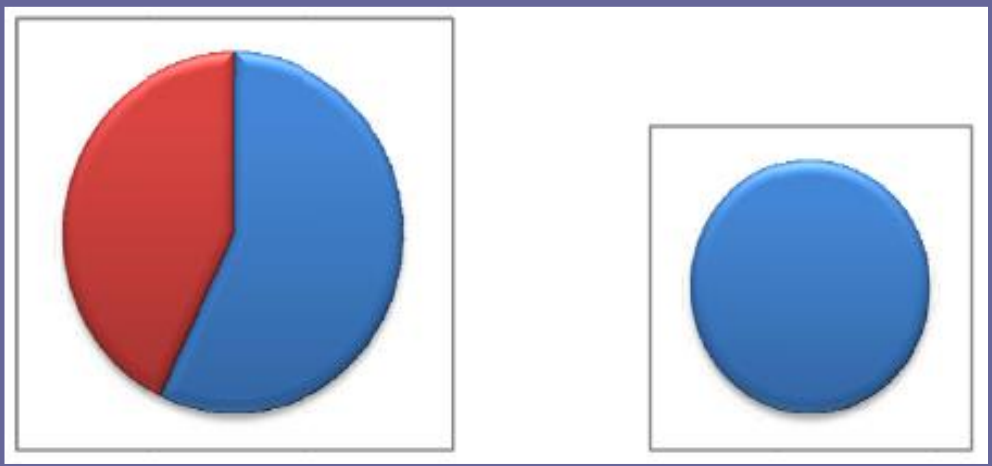
PROIZVOĐAČI / POTROŠAČI REAKTIVNE ENERGIJE

-Sinhroni generatori
-Sinhroni kompenzatori
-Nadzemni vodovi i kablovi (usled postojanja otočnih kapacitivnosti!!!)
-Kondenzatorske baterije
-Prigušnice

REAKTIVNA ENERGIJA-Problemi!!!

I) PRIMER: TIPIČAN cosφ=0.8 za ASINHRONE MOTORE, MOTOR SNAGE npr.10kW, svakog sata utroši 10kWh aktivne energije i 7.5kVArh reaktivne energije, 10kW se pretvori u rad, dok se 7.5kVAr se utroši da bi se izvršila magnetizacija polova motora (krajnji potrošač nema nikakvu direktnu korist od ove energije a mora je plati!!!!!!)

II) REAKTIVNA ENERGIJA MORA DA SE TRANSPORTUJE OD MESTA PROIZVODNJE (GENERATOR-TRANSFORMATOR-VOD-POTROŠAČ) I ZAUZIMA KAPACITET KABLA (Za pomenuti motor od 10kW struja koja potiče od aktivne energije iznosi oko 25A, a od reaktivne energije oko 19A, tako da ukupno kroz napojni vod protiče oko 45A i doprinosi povećanju otpornih gubitaka u vodu i njegovo grejanje). Posledice zagrevanja voda (kabla) su veći pad napona koji raste sa njegovom dužinom.



Prisustvo reaktivne komponente (crvena boja) je zauzela oko 40% potrebnog kapaciteta- cosφ=0.8

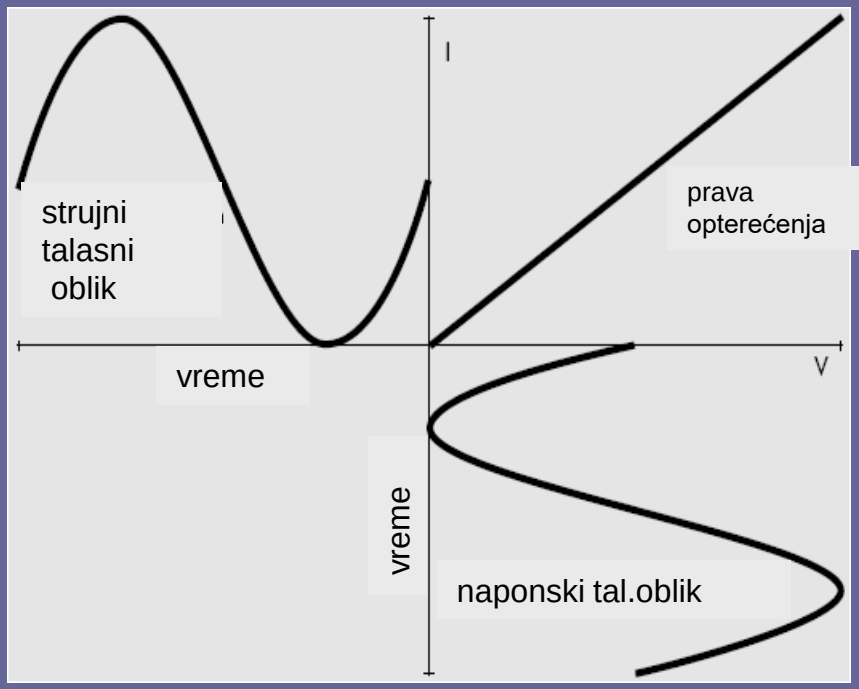
Potreban presek provodnika ako je potrošač u potpunosti kompenzovan - **cosφ=1**

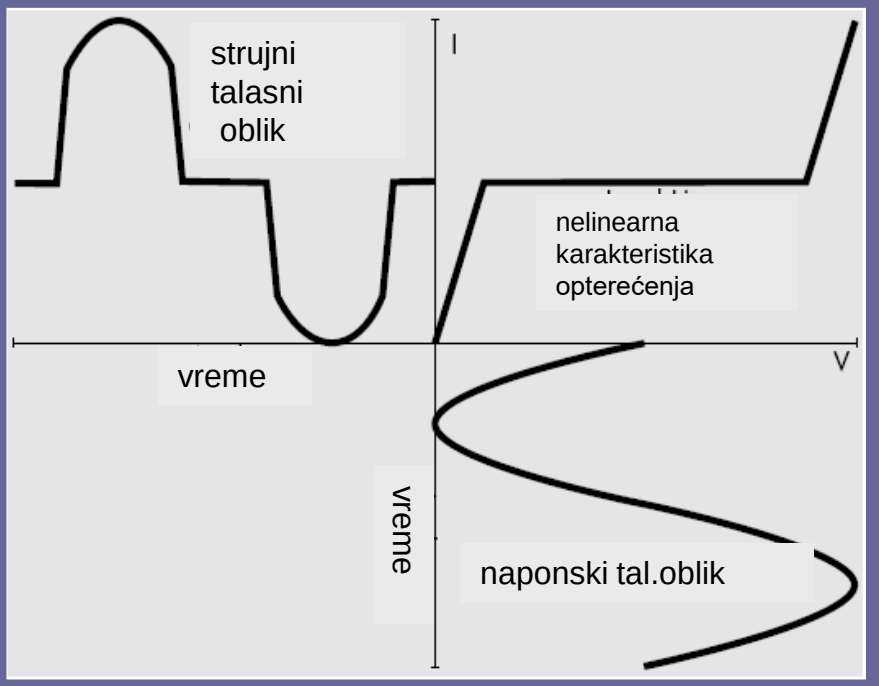
NELINEARNI PRIJEMNICI ?

Postoji još jedna vrsta prijemnika koja izaziva “reaktivne struje” – struje koje protiču kroz mrežu, a ne prenose energiju do prijemnika.
Radi se o prijemnicima koji **i pri prostoperiodičnom (sinusnom) naponu uzimaju iz mreže složeno-periodičnu struju**.

Ovakvi prijemnici se nazivaju NELINEARNIM

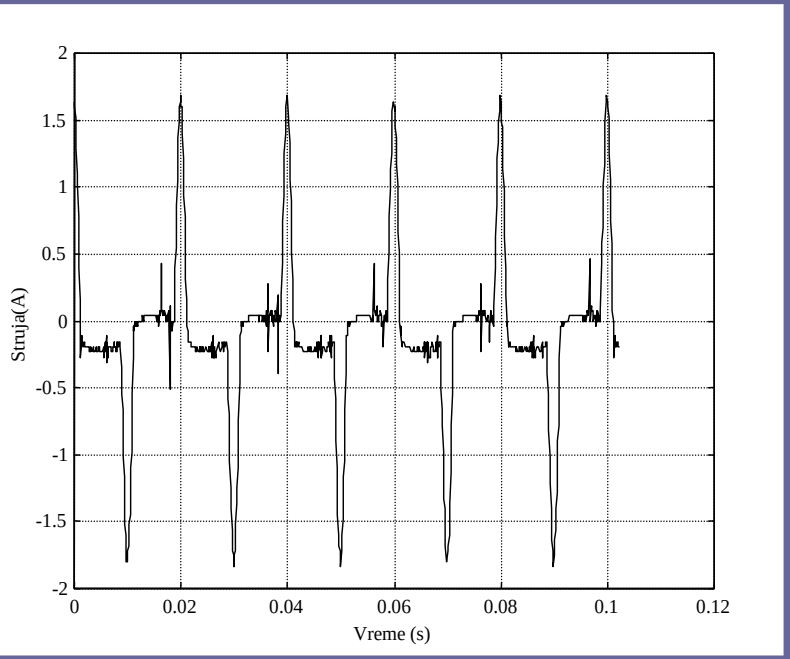
Usled nelinearnih opterećenja ustvari nastaju viši harmonici struje?



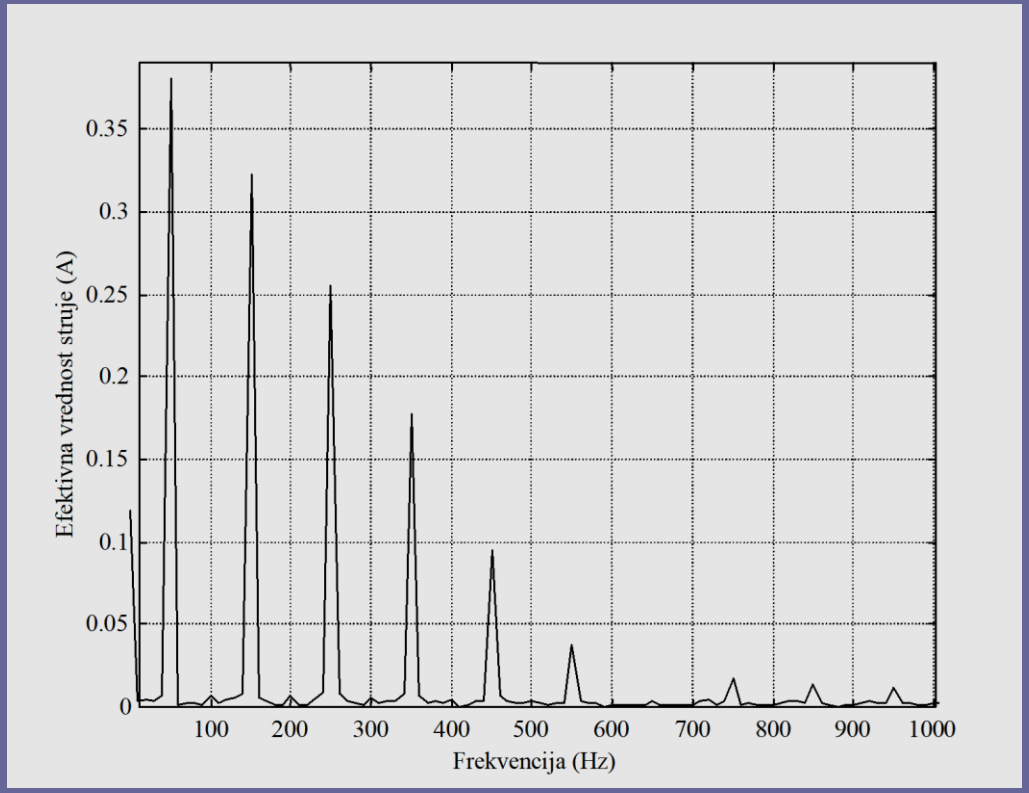


- Ako je opterećenje linearno (npr. termički potrošači) a napon prostoperiodičan, onda je i struja prostoperiodična.
- Ako je opterećenje nelinearno (npr. diodni ispravljač, zasićeno magnetsko kolo, ...) struja je izobličena i ako je napon prostoperiodičan

PC računar kao nelinearno opterećenje

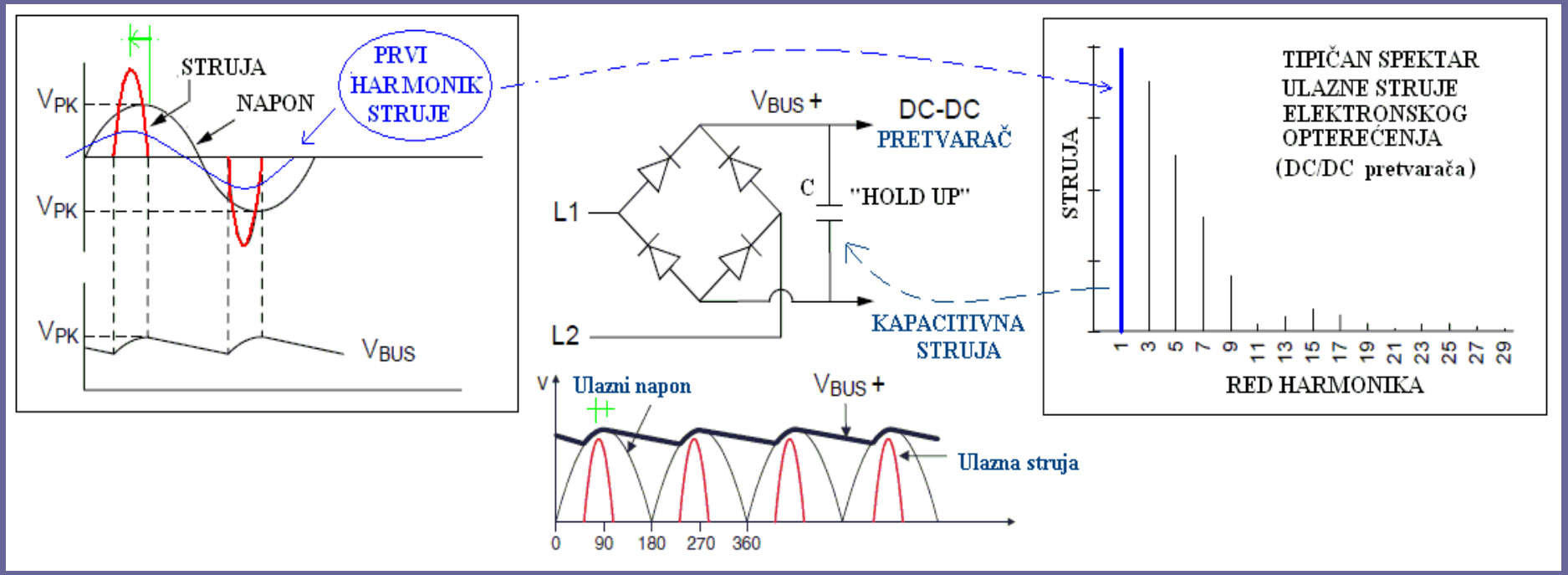


Talasni oblik struje PC računara



Spektralni sastav struje PC računara

UTICAJ DIODNOG ISPRAVLJAČA NA MREŽU ☹☹



- OŠTRI IMPULSI STRUJE
- TRAJANJE IMPULSA 1ms-2ms
- KAPACITIVNA STRUJA
- VIŠI HARMONICI

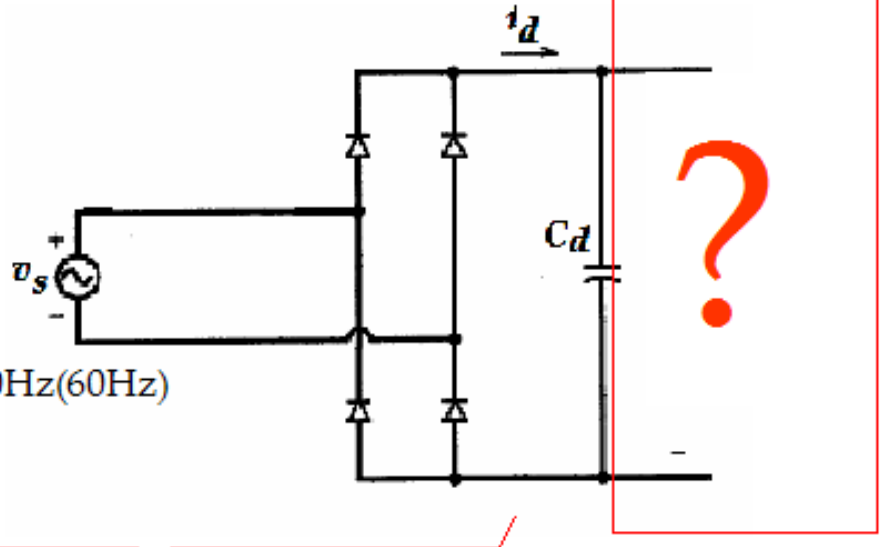
NEPOVOLJNI EFEKTI KOJI SU POSLEDICA VIŠIH HARMONIKA

- Smetnje u upravljačkim kolima elektronskih uređaja
- Smetnje u komunikacionim i signalnim kolima
- Greške u merenju indukcionih vatmetara
- Smetnje kod uređaja kontrolisanih signalima viših učestanosti
- Vibracije kod obrtnih električnih mašina
- Vibracije i buka kod transformatora i prigušnica

NEPOVOLJNI EFEKTI KOJI PRATE POJAVU VIŠIH HARMONIKA DUŽEG TRAJANJA (zagrevanje!!!)

- Zagrevanje kondenzatora. Snaga zagrevanja koja potiče od svakog od harmonika je srazmerna efektivnoj vrednosti tog harmonika i njegovoj učestanosti.
- Zagrevanje usled dodatnih gubitaka u mašinama i transformatorima.
- U namotajima statora, kod mašina, odnosno primara i sekundara kod transformatora, javljaju se dodatni Džulovi gubici; takođe, povećavaju se gubici u gvožđu.
- Kod obrtnih naizmeničnih mašina dolazi i do pojave gubitaka u gvožđu rotora.
- Zagrevanje električnih vodova (kablova i vazdušnih vodova) usled dodatnih Džulovih gubitaka.
- Pored toga, povećavaju se dielektrični gubici u izolaciji, i gubici zbog rasutog fluksa, naročito kod harmonika reda deljivih sa tri. Tada je naročito termički ugrožen i nulti provodnik.

DIODNI ISPRAVLJAČ NAPAJAN SA MREŽE



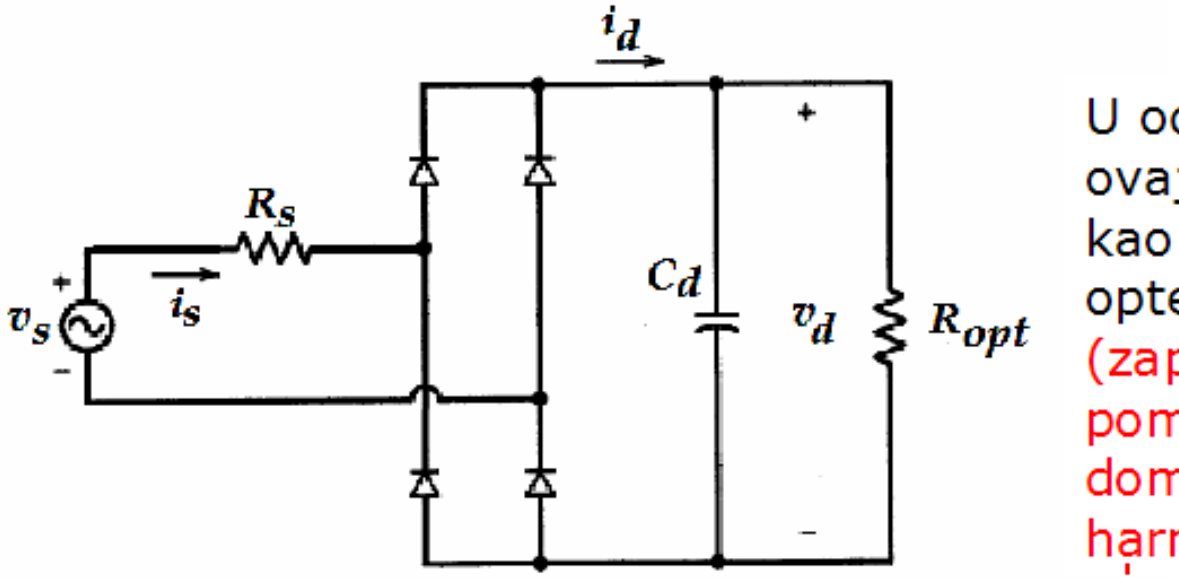
POTROŠAČ:
-PC NAPAJANJE
-TELEVIZOR
-ŠTAMPAČ
-TELEFAX
-FREKVENTNI REGULATOR
.....
.....

U ODNOSU NA MREŽU OVAJ DEO SE U PRINCIPU PONAŠA KAO KAPACITIVNO OPTEREĆENJE

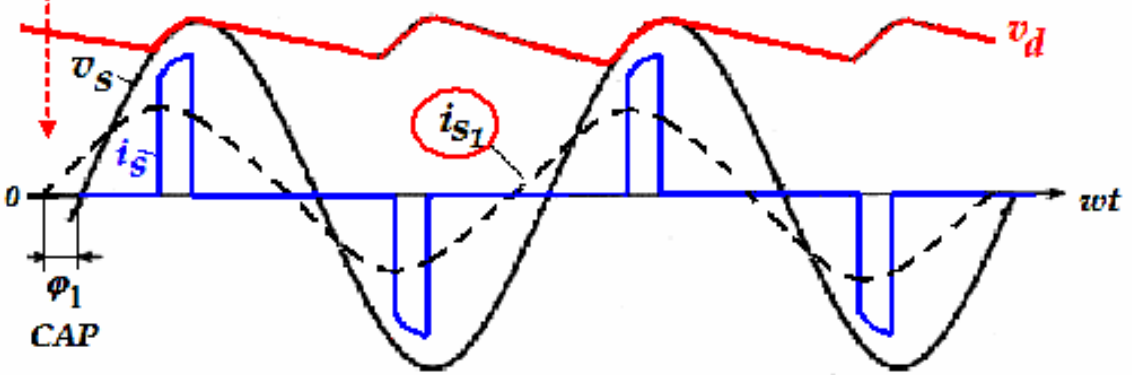
KAKO SE U ODNOSU NA MREŽU PONAŠA OVAJ SKLOP???

KAKO SE ODREĐUJE FAKTOR SNAGE U OVOM SLUČAJU???

DIODNI PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ SA R-C FILTROM KAO OPTEREĆENJEM



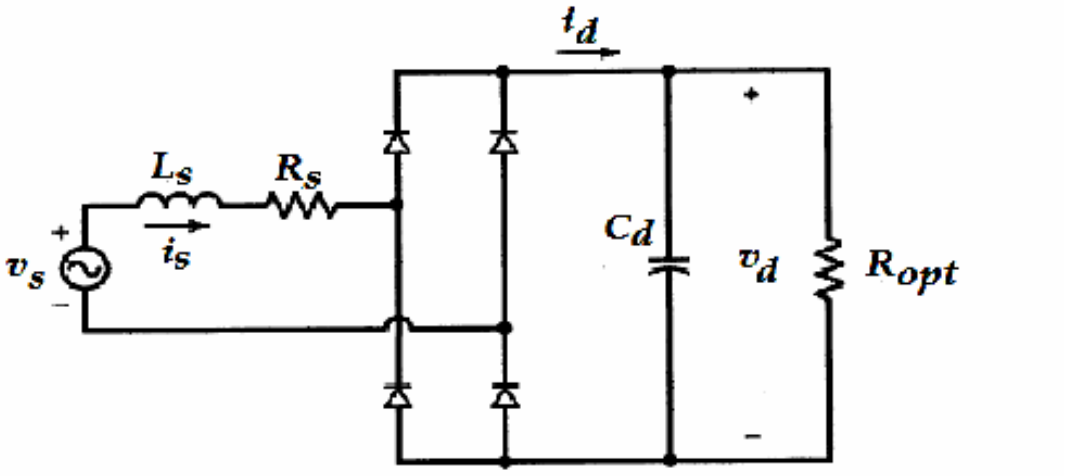
U odnosu na mrežu ovaj sklop se ponaša kao kapacitivno opterećenje (zapaziti fazni pomeraj dominantnog prvog harmonika!!!)



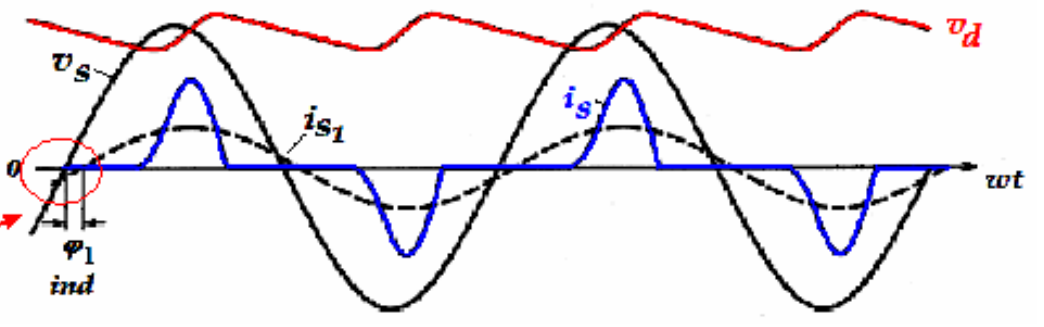
Dominatan je osnovni (prvi) harmonik ulazne struje - - - - -

ŠTA U OVOM SLUČAJU PREDSTAVLJA FAKTOR SNAGE???

DIODNI PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ SA R-C FILTROM KAO OPTEREĆENJEM I ULAZNOM PRIGUŠNICOM



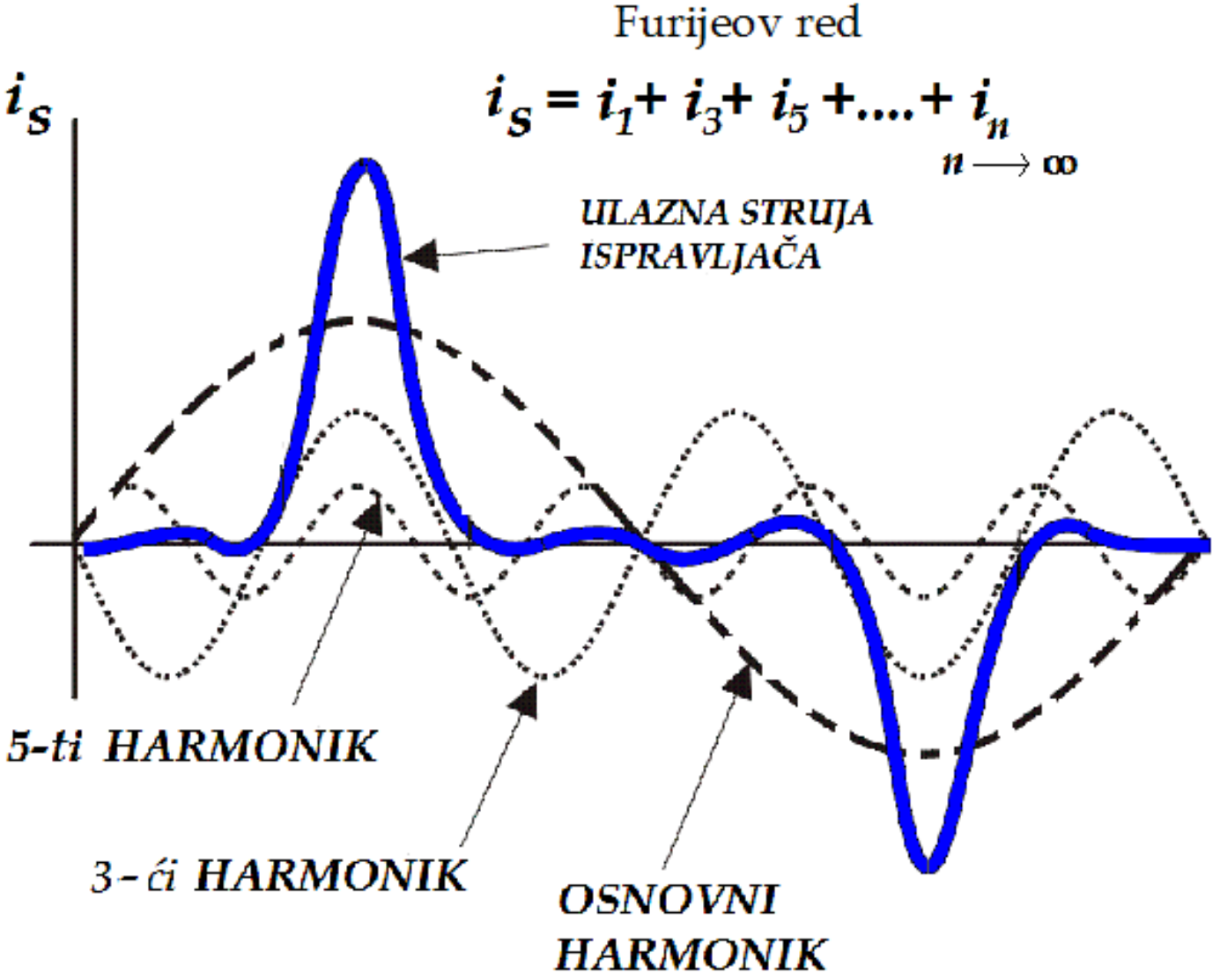
Dominatan je osnovni (prvi) harmonik ulazne struje



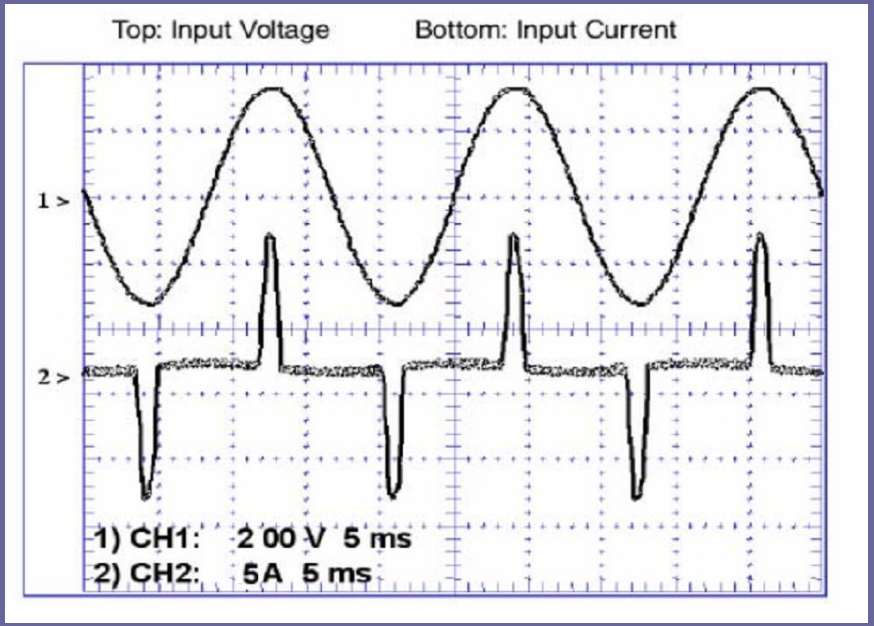
Zapaziti induktivni fazni pomeraj osnovnog (dominantnog) Harmonika!!!!

ŠTA U OVOM SLUČAJU PREDSATVLJA FAKTOR SNAGE???

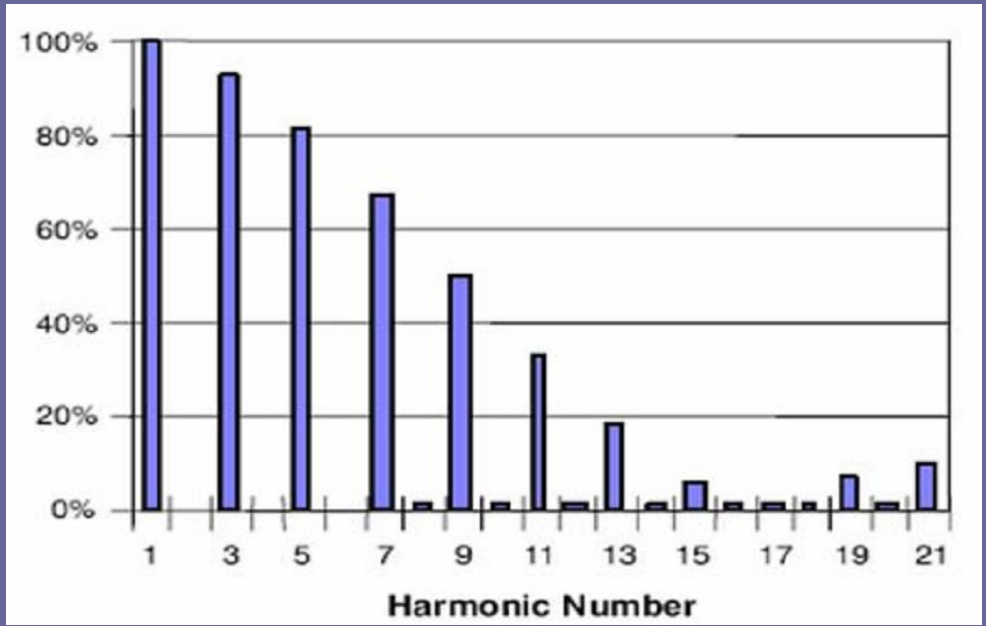
HARMONIJSKI SASTAV ULAZNE STRUJE DIODNOG GRECOVOG ISPRAVLJAČA



REALAN SNIMAK ULAZNOG NAPONA I ULAZNE STRUJE JEDNOG PC NAPAJANJA 220W (220V/1A)



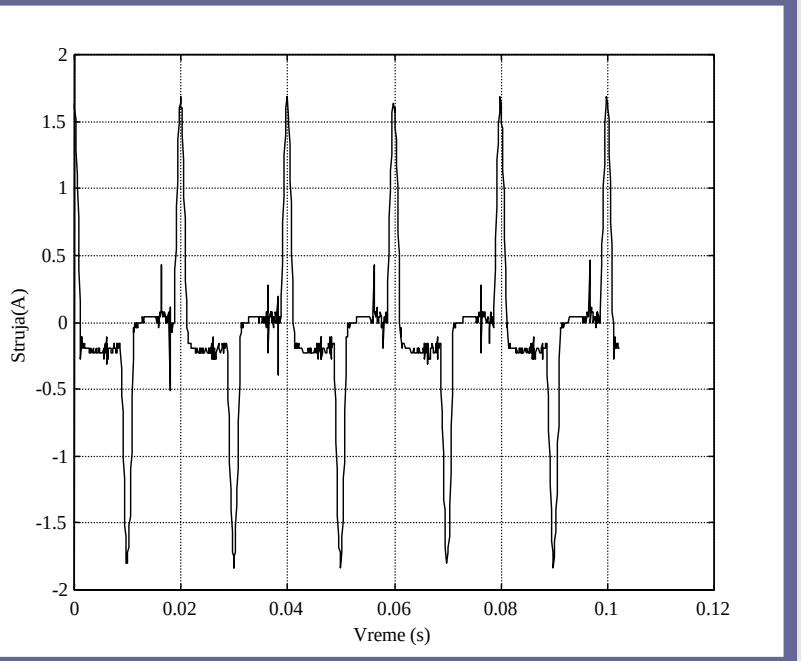
OCILOSKOPSKI SNIMAK



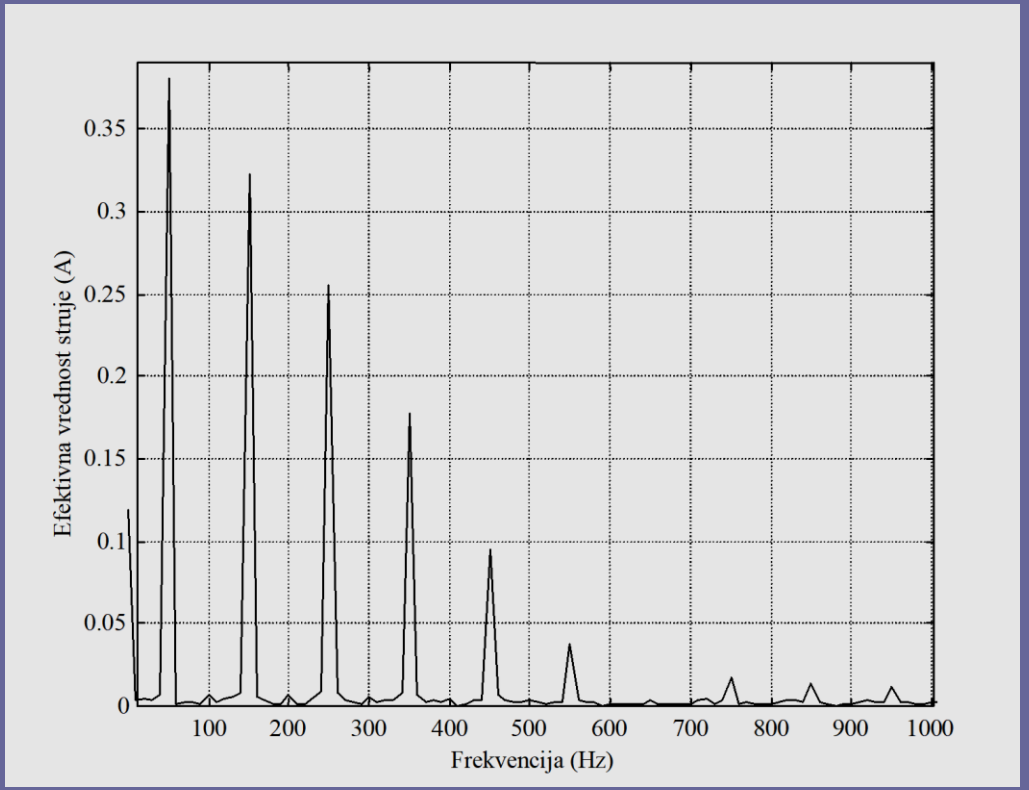
SADRŽAJ HARMONIKA

VRŠNA VREDNOST ULAZNE STRUJE 10A
TRAJANJE STRUJNOG PIKA OKO 1ms

PC računar kao nelinearno opterećenje

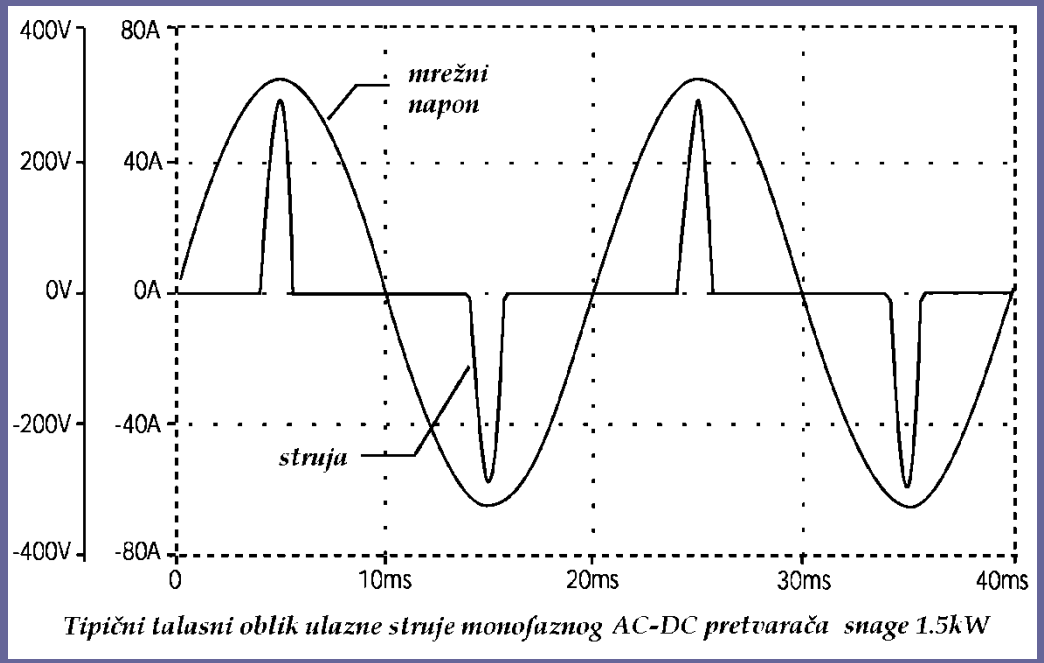


Talasni oblik struje
PC računara

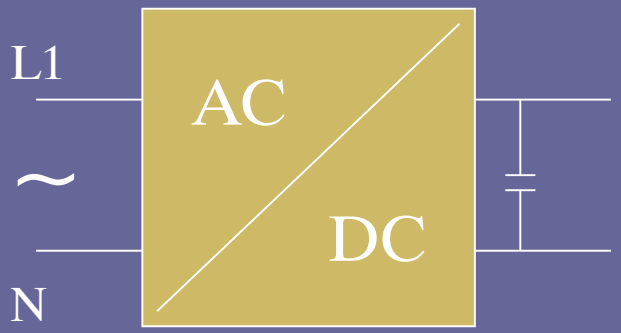


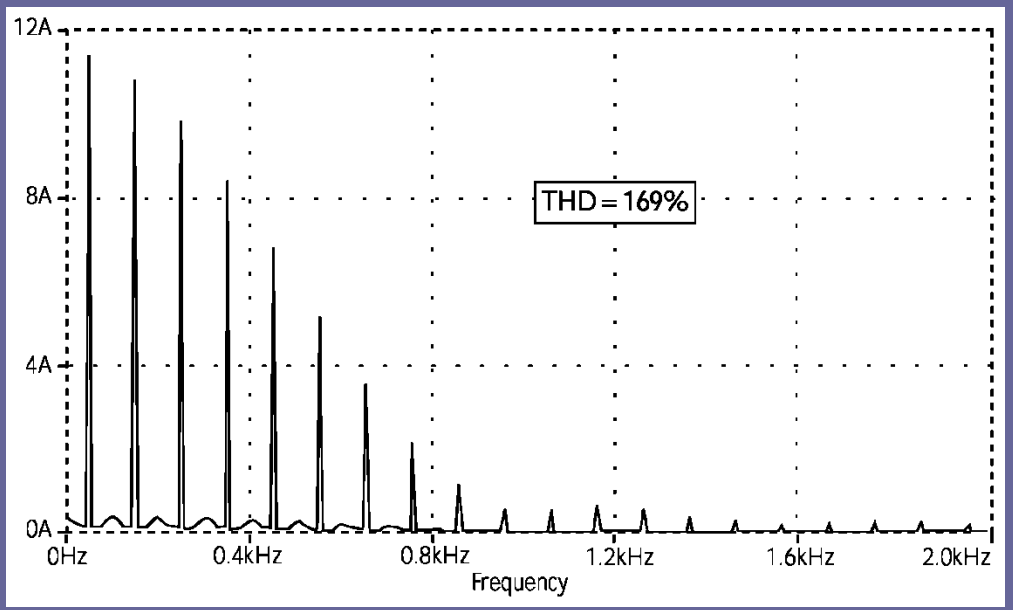
Spektralni sastav struje PC računara

HARMONICI-monofazni nelinearni prijemnik

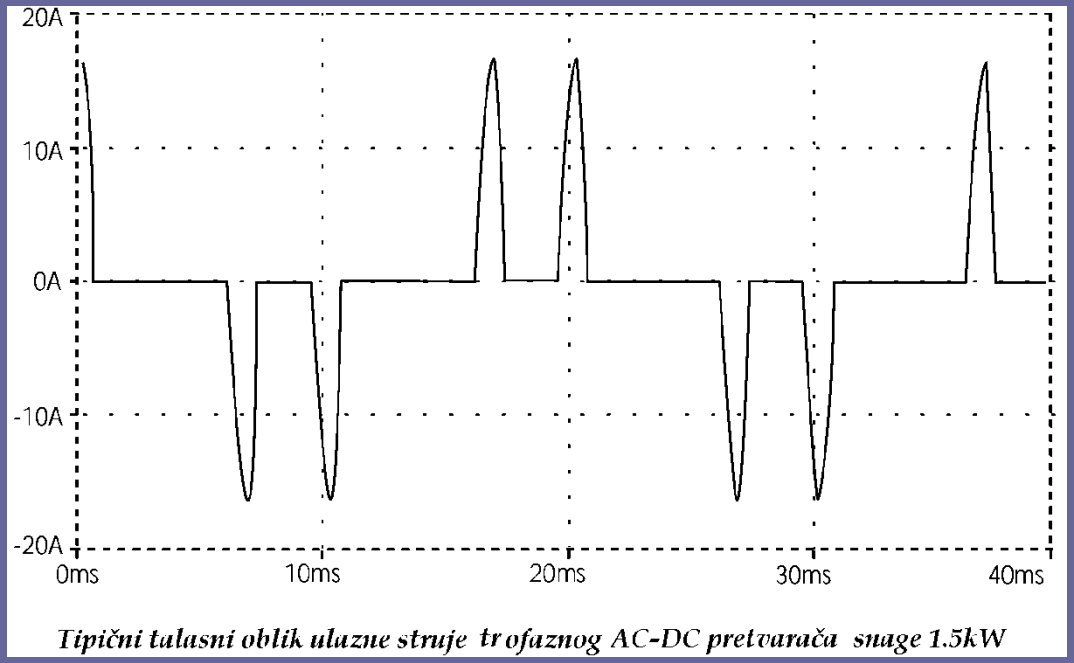


Tipični talasni oblik ulazne struje monofaznog AC-DC pretvarača snage 1.5kW

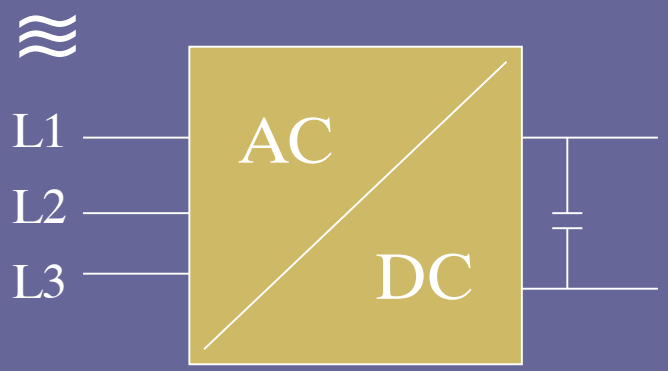


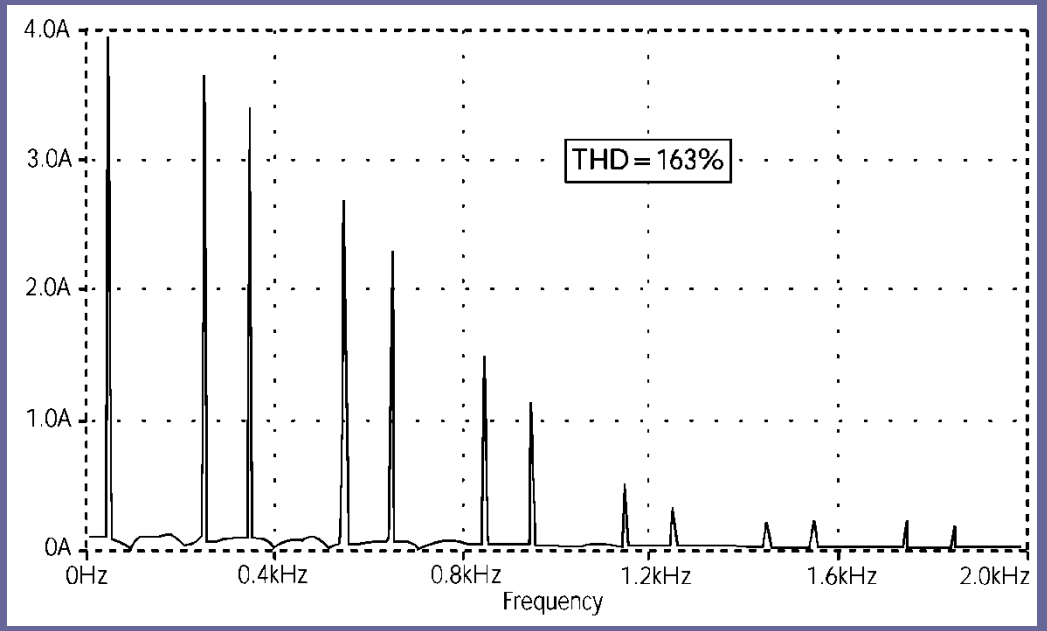


HARMONICI-trofazni nelinearni prijemnik



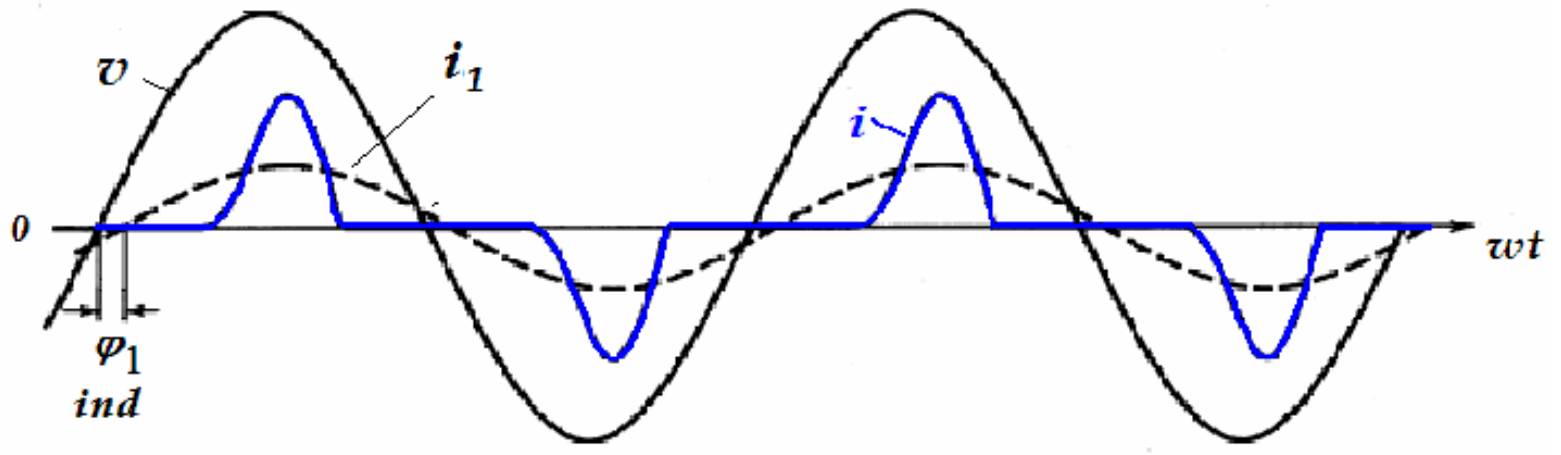
Tipični talasni oblik ulazne struje trofaznog AC-DC pretvarača snage 1.5kW





POSMATRAJMO PRVI HARMONIK(*DOMINANTNI*) U ULAZNOJ STRUJI GRECOVOG ISPRAVLJAČA

PRETPOSTAVKA: MREŽNI NAPON JE SINUSOIDALAN



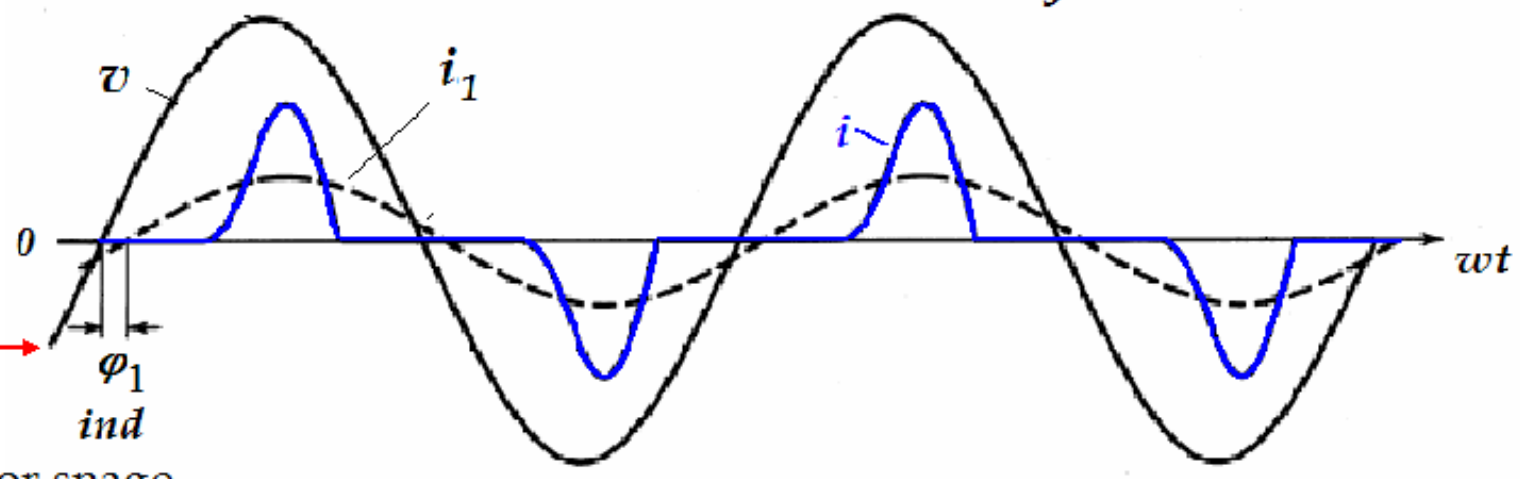
V_{eff} – *efektivna vrednost mrežnog napona v(t)*

I_{eff} – *efektivna vrednost ulazne struje i(t)*

I_1 – *efektivna vrednost prvog harmonika (dominantnog) ulazne struje i(t)*

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = \frac{V_{eff} I_1 \cos\varphi_1}{V_{eff} I_{eff}}$$

PRIČA O FAKTORU DISTORZIJE



faktor snage
prvog harmonika

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = \frac{I_1}{I_{eff}} \cdot \cos\varphi_1$$

Faktor snage
funkcija faktora
distorzije i cosφ!!!

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = g \cdot \cos\varphi_1$$

FAKTOR DISTORZIJE

$$g = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

Distorsion
Factor
(engl.)-DF

TOTALNA HARMONIJSKA DISTORZIJA- THD faktor

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = g \cdot \cos\varphi_1 \,, \quad g = DF = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_{eff}^2 - I_1^2}}{I_1}$$

$$DF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

Definicije snaga u uslovima postojanja harmonijskih izobličenja struja i napona:

Aktivna snaga: $$P = \sum_{n=0,1,2,\ldots}^{n_{max}} (U_{(n)RMS} \cdot I_{(n)RMS}) \cos(\alpha_n - \beta_n)$$

Reaktivna snaga: $$Q = \sum_{n=0,1,2,\ldots}^{n_{max}} (U_{(n)RMS} \cdot I_{(n)RMS}) \sin(\alpha_n - \beta_n)$$

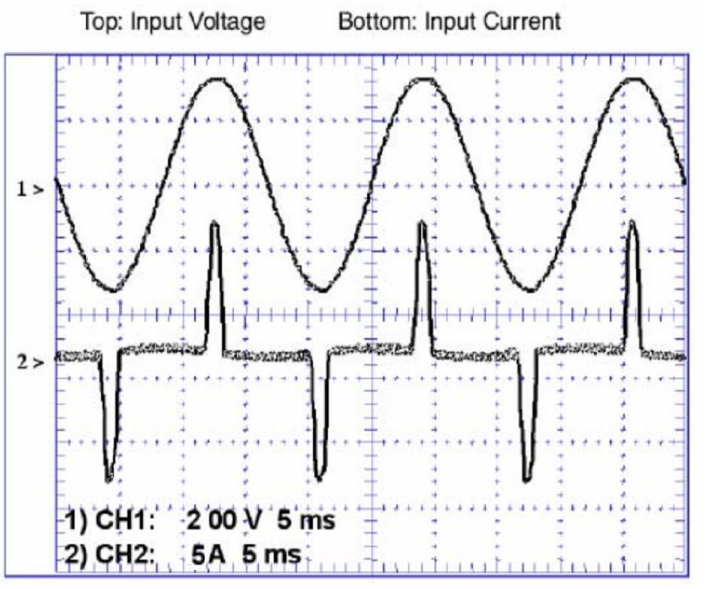
Snaga distorzije: $$D = \sum_{i=0}^{n_{max}-1} \sum_{j=i+1}^{n_{max}} (U_i^2 I_j^2 + U_j^2 I_i^2 - 2U_i U_j I_i I_j \cos(\theta_i - \theta_j))$$

Prividna snaga: $$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Faktor snage: $$PF = \frac{P}{S}$$

Kolika je ustvari vršna vrednost ulazne struje??
POJEDNOSTAVLJENA RAČUNICA

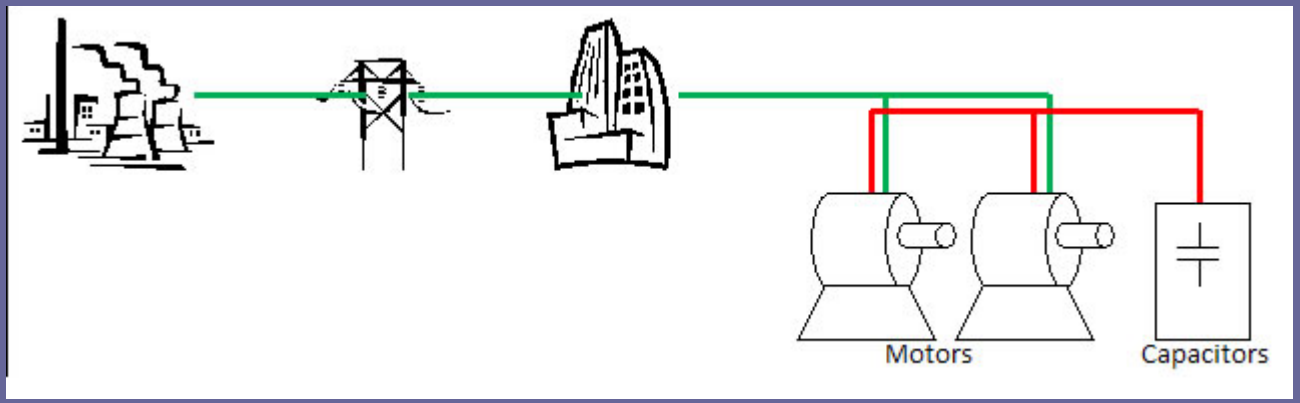
- -Pretpostavimo da imamo prekidački izvor napajanja bez PFC , čija je aktivna snaga 220W
- -Napaja se iz 220V, 50Hz
- -Efektivna vrednost ulazne struje je 1A
- -Ako impuls struje traje 1ms, a trajanje poluperiode je 10ms, zaključujemo da je vršna vrednost strujnog impulsa 10A
- -Ovo sve važi kako za (+)periodu tako i za (-) periodu
- -Zamislimo da je na jednoj fazi povezano 200 PC računara
- **-Ukupna vršna struja po poluperiodi je 200x10A=2kA!!!**
- **Problemi: strujni udari, padovi napona, naponski propadi ili "sagovi", generisanje viših harmonika.... ☹☹!!!!**



KAKO REŠTI OVE PROBLEME????

REŠENJE KOJE SE NAMEĆE JE KOREKCIJA FAKTORA SNAGE -PFC

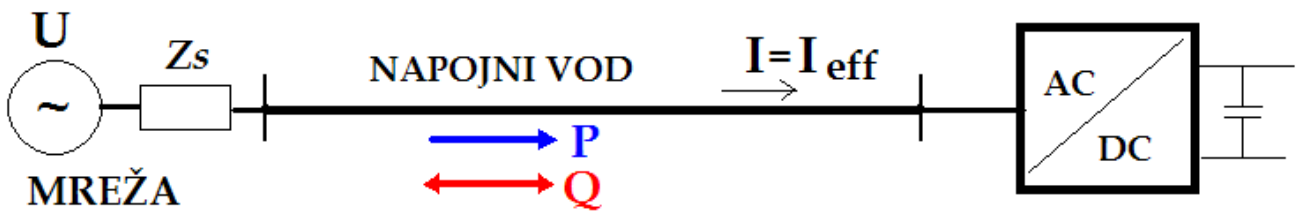
PFC- Power Factor Correction (engl)



ZAŠTO UOPŠTE KOREKCIJA SNAGE??

- **POVEĆANJE EFIKASNOSTI NAPOJNE MREŽE**
  - -niži gubici na mrežnoj impedansi
  - -manje izobličenje napona (*cross-coupling)*
  - -veća raspoloživa snaga izvora
- **REDUKCIJA "ZAGAĐENJA" NAPOJNE MREŽE ŠTETNIM HARMONICIMA**
  - -nisko frekventni i visokofrekventni harmonici
- **USAGLAŠAVANJE SA STANDARDIMA IEC 555, IEC61000, EN6055, IEEE 519, ... itd.**

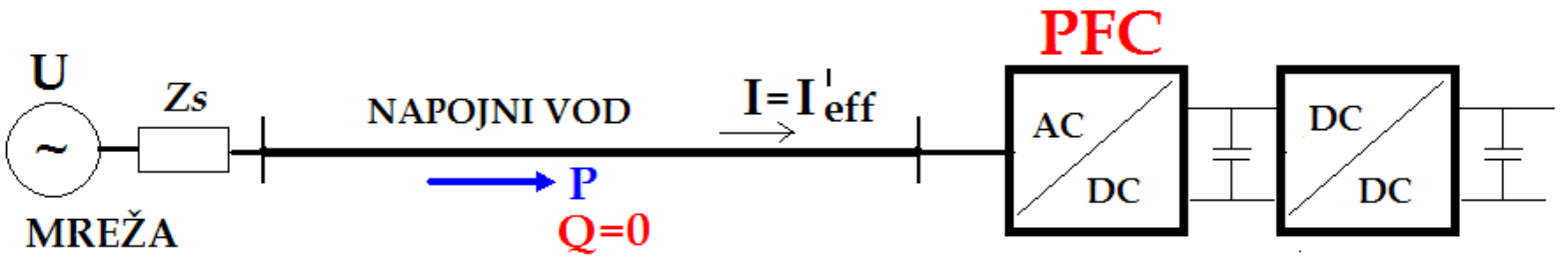
POVEĆANJE EFIKASNOSTI NAPOJNE MREŽE



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad I_{eff} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U}$$

$$\Delta u = (Z_s + Z_v) I_{eff}$$

(a) slučaj bez korekcije faktora snage



$$S' = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad I'_{eff} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U} < I_{eff}$$

$$\Delta u' = (Z_s + Z_v) I'_{eff} < \Delta u$$

(b) slučaj sa korekcijom faktora snage

LIMITI HARMONIJSKE EMISIJE PO IEC61000-3-2 i IEC 555-2

Harmonic Number (n)	Class A Limits**	Class B Limits**	Class C Limits*	Class D Limits*	IEC 555-2 limits for TV(>165W)
	(A_{rms})	(A_{rms})	% Of fundamental	mA/W of input power (50-600W)	(A_{rms}) Max DC current<0.05A
2	1.080	1.620	2	n/a	0.300
3	2.300	3.450	30 x PF	3.4	0.800
4	0.430	0.645	n/a	n/a	0.150
5	1.440	2.160	10	1.9	0.600
6	0.300	0.450	n/a	n/a	n/a
7	0.770	1.155	7	1.0	0.450
8	0.230	0.345	n/a	n/a	n/a
9	0.400	0.600	5	0.5	0.300
10	0.184	0.276	n/a	n/a	n/a
11	0.330	0.495	3	0.35	0.170
12	0.153	0.230	n/a	n/a	n/a
13	0.210	0.315	3	0.296	0.120
Even 14-40	1.84/n	2.760/n	n/a	n/a	n/a
Odd 15-39	2.25/n	3.338/n	3	3.85/n	1.5/n

KLASA A:

-simetrični trofazni prijemnici
-dimeri za svetiljke
-audio oprema

KLASA B:
-Portabilni alati

KLASA C:
-oprema za osvetljenje

KLASA D:
-PC računari
-PC monitori
-TV prijemnici do 600W

LIMITI PO EN6055-2/IEC555-2

Limits for Domestic Equipment Only		
Harmonic Number (n)	All equipment not TV (x1.5 for portable tools) (AMPS)	TV (AMPS)
1	-	-
3	2.30	0.80
5	1.14	0.60
7	0.77	0.45
9	0.40	0.30
11	0.33	0.17
13	0.21	0.12
15 and above	2.25/n	1/5/n

KOREKCIJA FAKTORA SNAGE??

- PASIVNA KOREKCIJA FAKTORA SNAGE
- AKTIVNA KOREKCIJA FAKTORA SNAGE

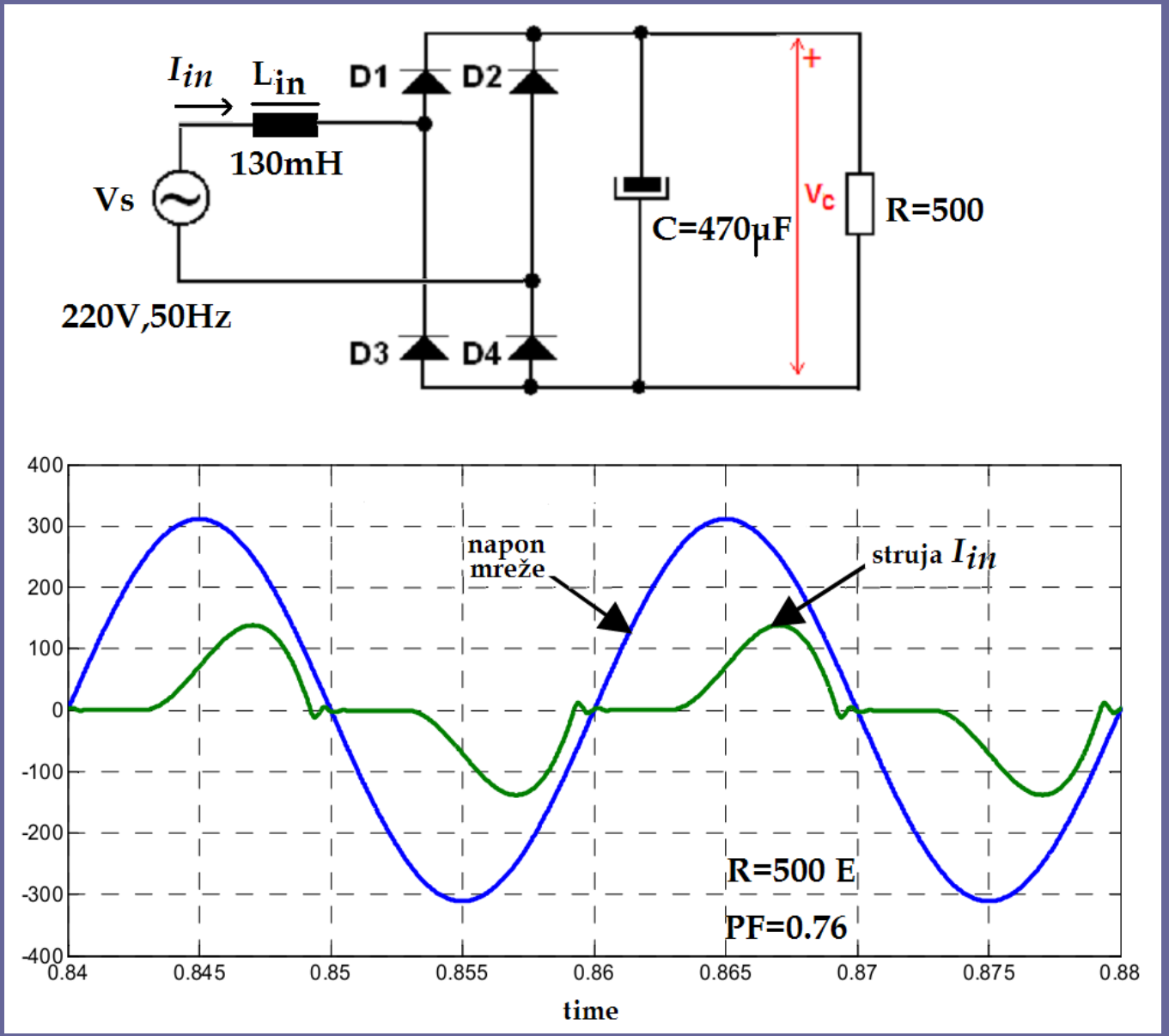
PASIVNA KOREKCIJA FAKTORA SNAGE

- OVA METODA SE BAZIRA NA KORIŠĆENJU PASIVNIH ELEMENATA (PRIGUŠNICA I KONDENZATORA) U KOMBINACIJI SA DIODNIM ISPRAVLJAČEM

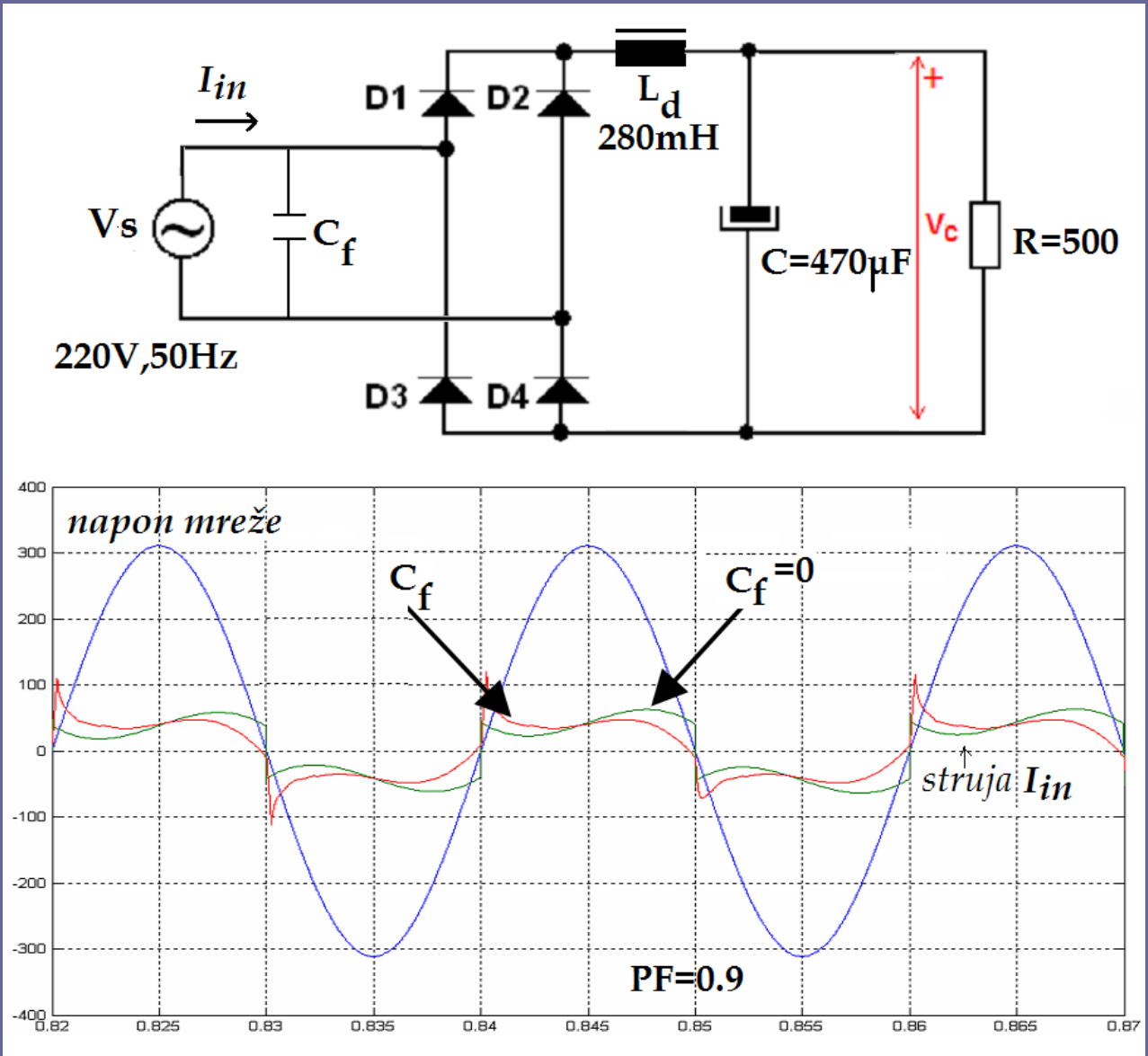
- ONA SE MOŽE OSTVARITI NA VIŠE NAČINA :

  -postavljanjem prigušnice na AC strani (ka mreži)
  -postavljanjem prigušnice na DC strani (na izlazu ispravljača)
  -korišćenjem serijski rezonantnog LC kola na AC strani (band-pass filter)
  -korišćenjem paralelnog LC kola na AC strani (band-stop filter)
  -korišćenjem harmonijskih filtera na AC strani (trap filter)
  -korišćenjem LCD filtera na DC strani

PRIGUŠNICA NA STRANI MREŽE (*AC* strana)

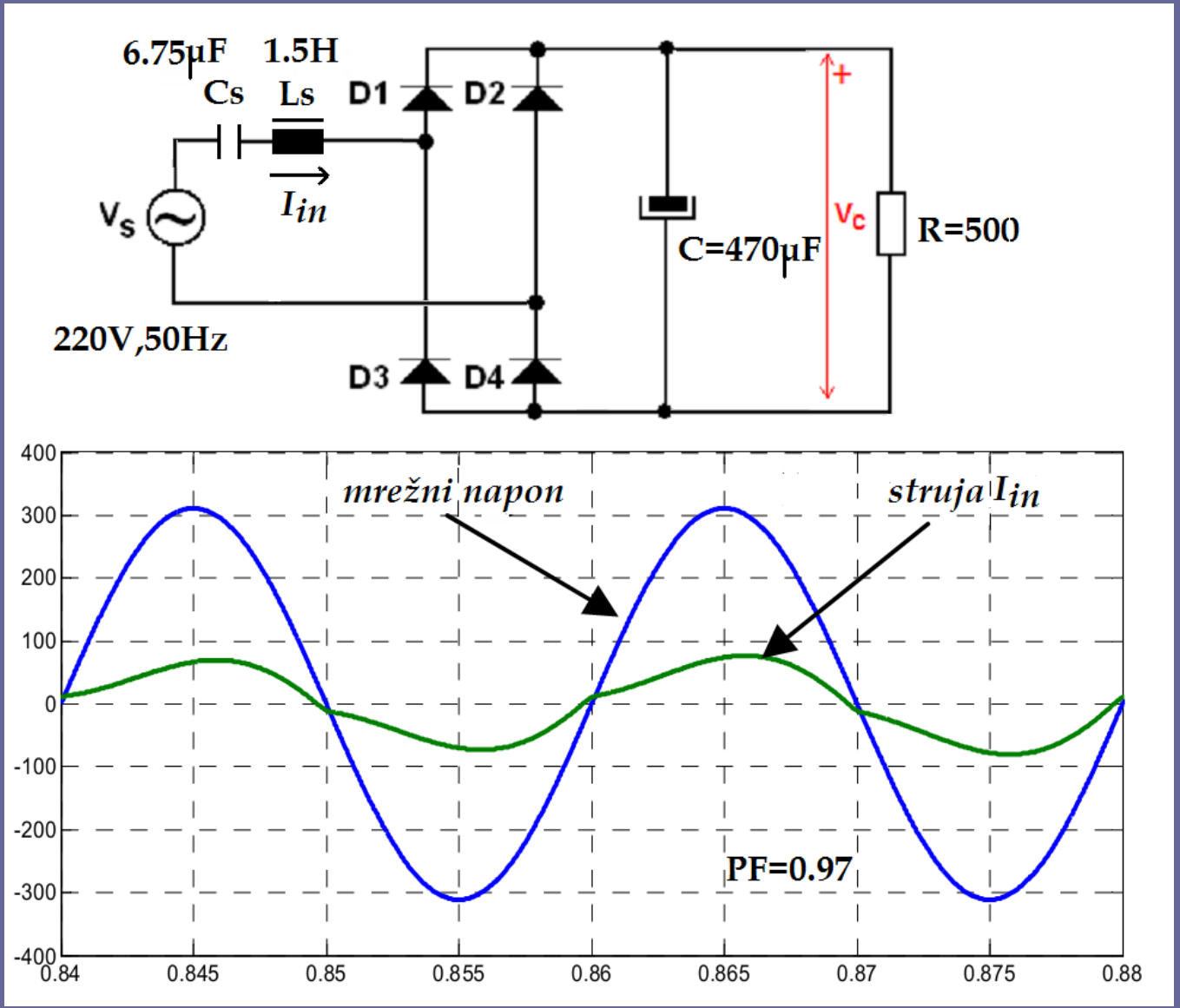


PRIGUŠNICA NA *DC* STRANI (izlaz diodnog ispravljača)



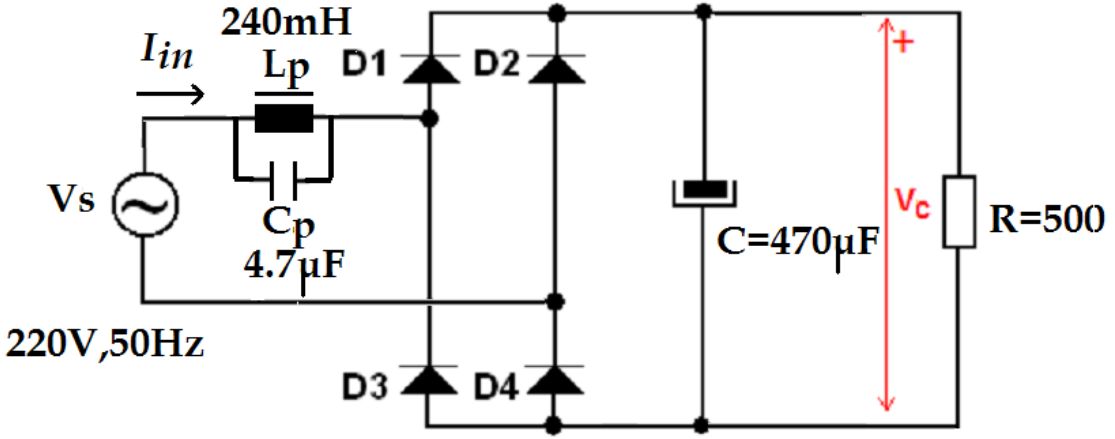
BAND - PASS SERIJSKI LC FILTAR NA *AC* STRANI

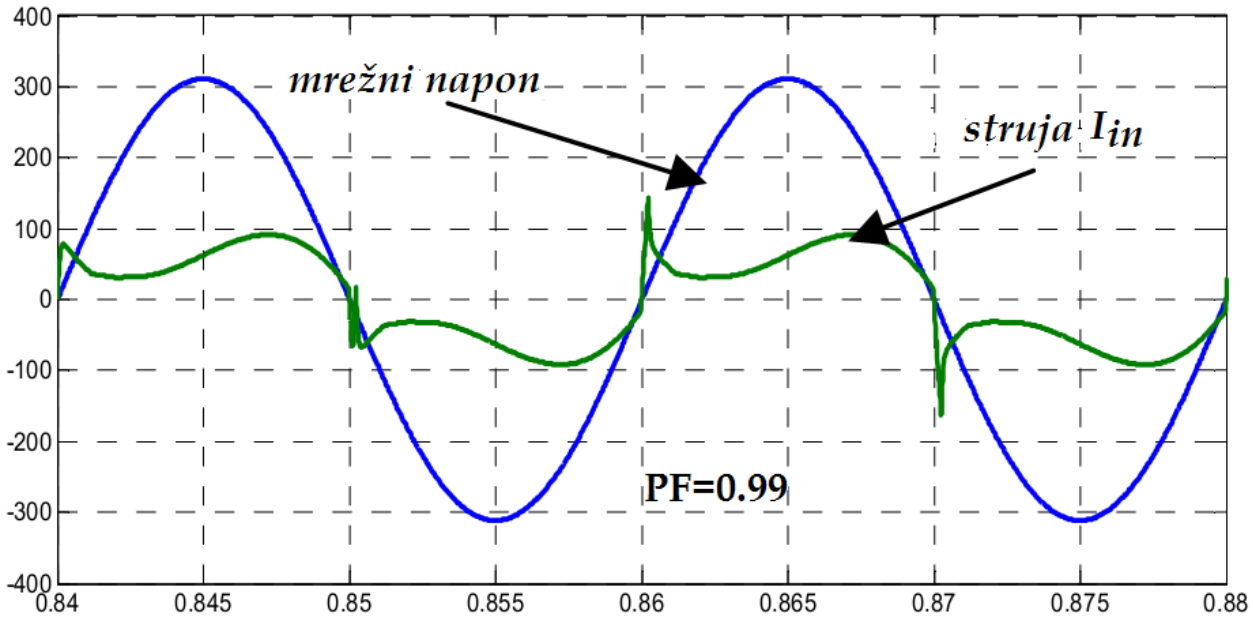
(na strani mreže)



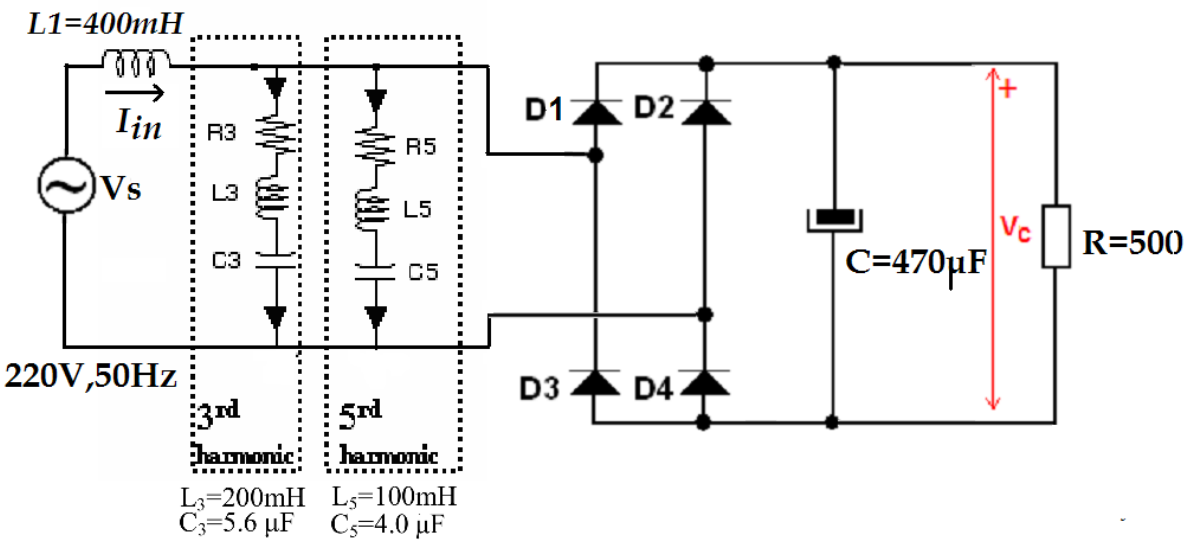
PARALELNI "LC" FILTAR NA *AC* STRANI

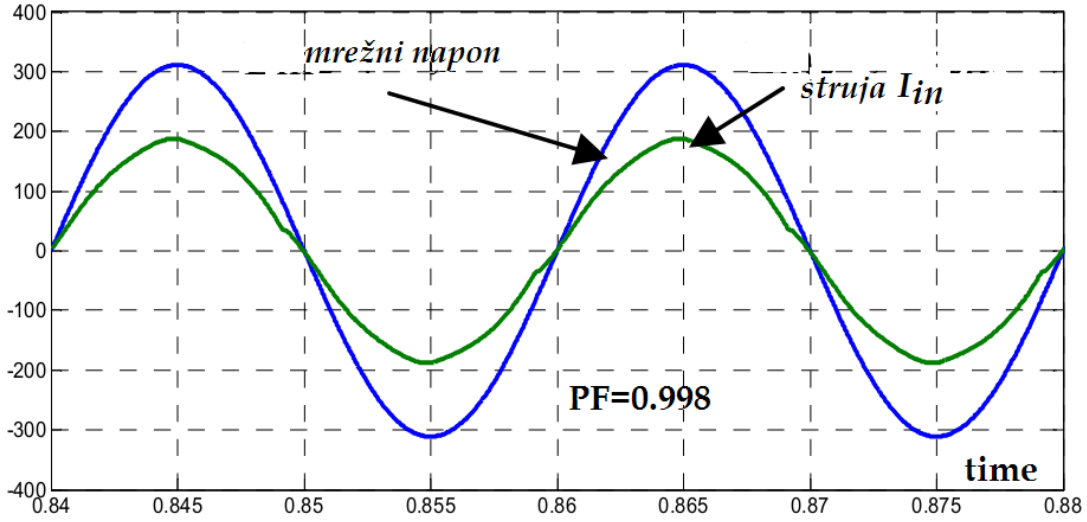
(na strani mreže)



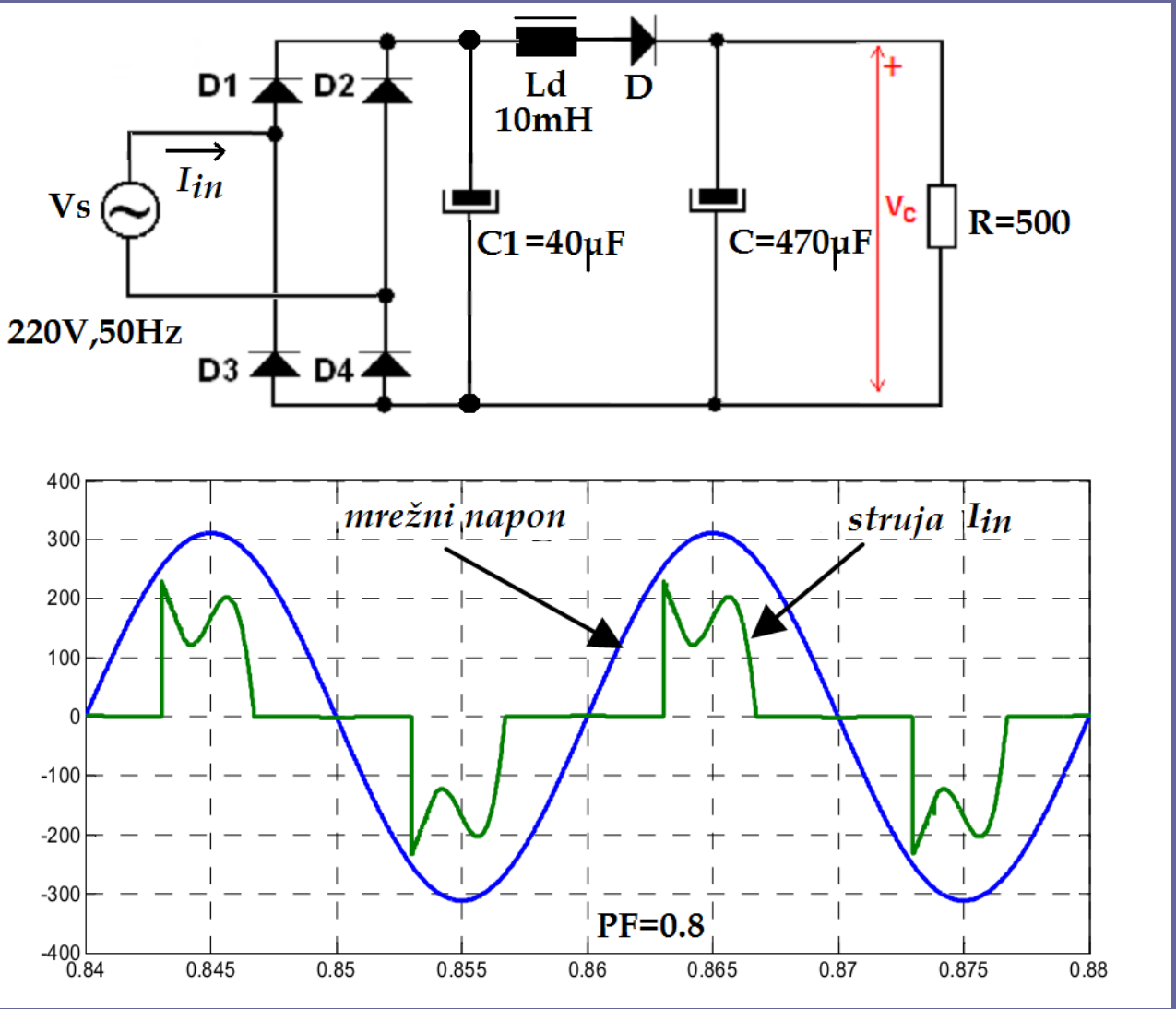


KORIŠĆENJE HARMONIJSKIH *TRAP* FILTERA NA AC STRANI





KORIŠĆENJE "LC" FILTERA SA DIODOM NA *DC* STRANI



Problemi kod pasivne PFC

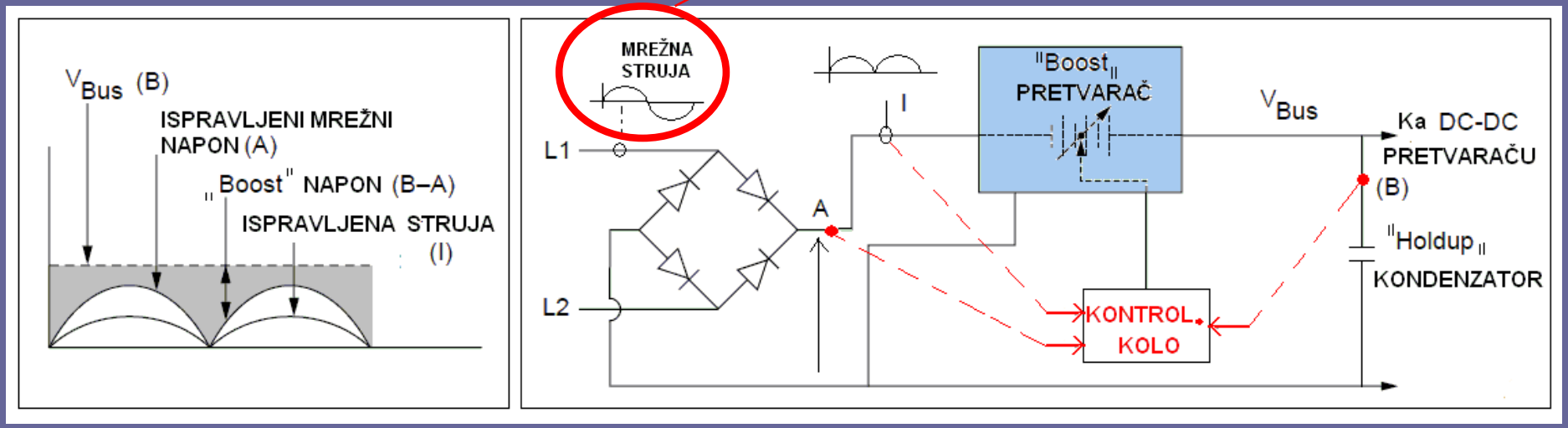
- KORIŠĆENJE VELIKIH I GLOMAZNIH PASIVNIH ELEMENATA
- CENA OPREME
- ZNAČAJNA DISIPACIJA U PASIVNIM ELEMENTIMA
- PROBLEM KORIŠĆENJA PRIGUŠNICA NA DC STRANI (zasićenje, DC komponenta fluksa...)
- SMANJENJE DC NAPONA NA IZLAZU ISPRAVLJAČA

REŠENJE

- **AKTIVNA KOREKCIJA FAKTORA SNAGE**

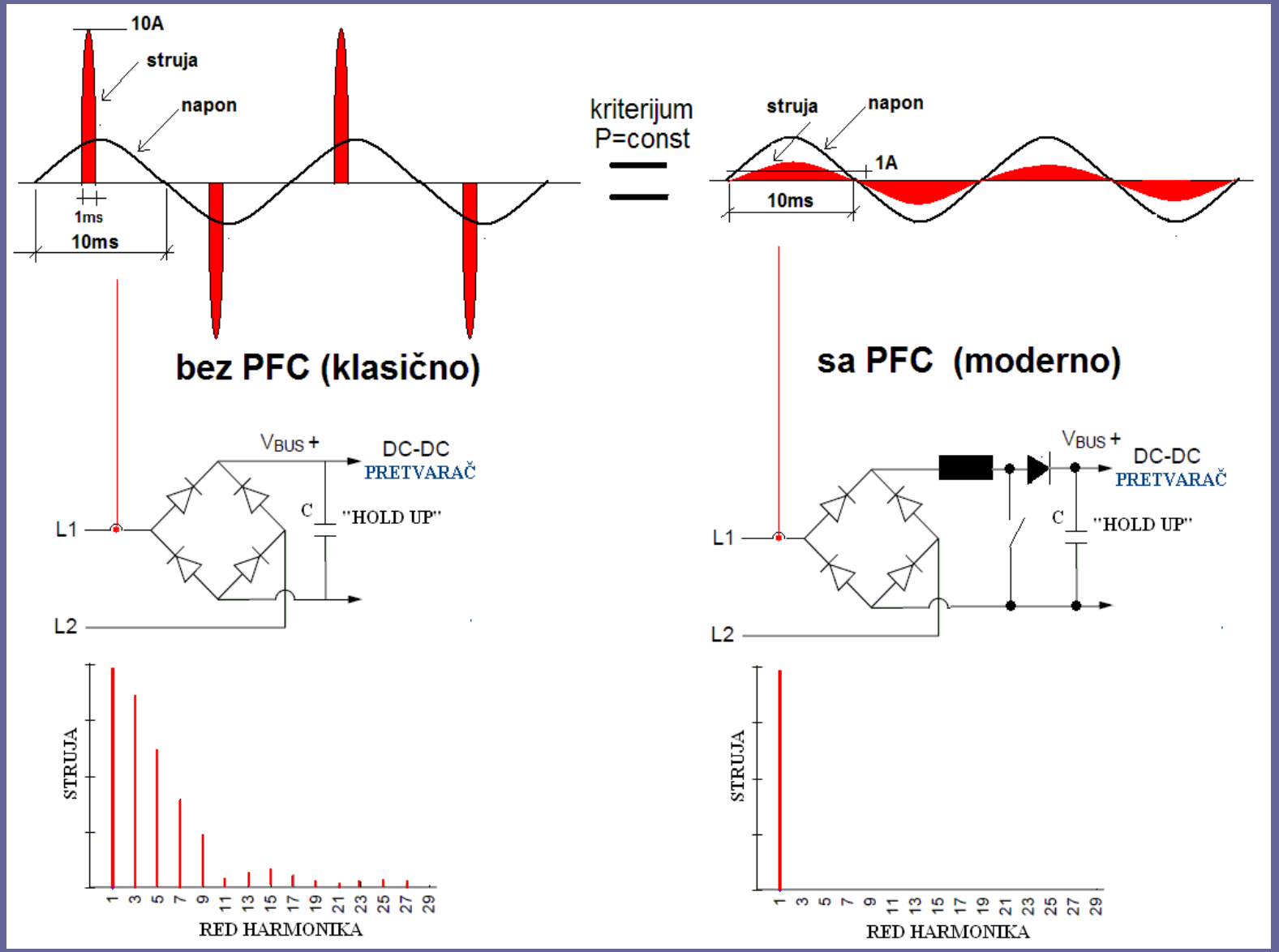
- *Active Power Factor Correction*

KAKO REŠTI PROBLEM????

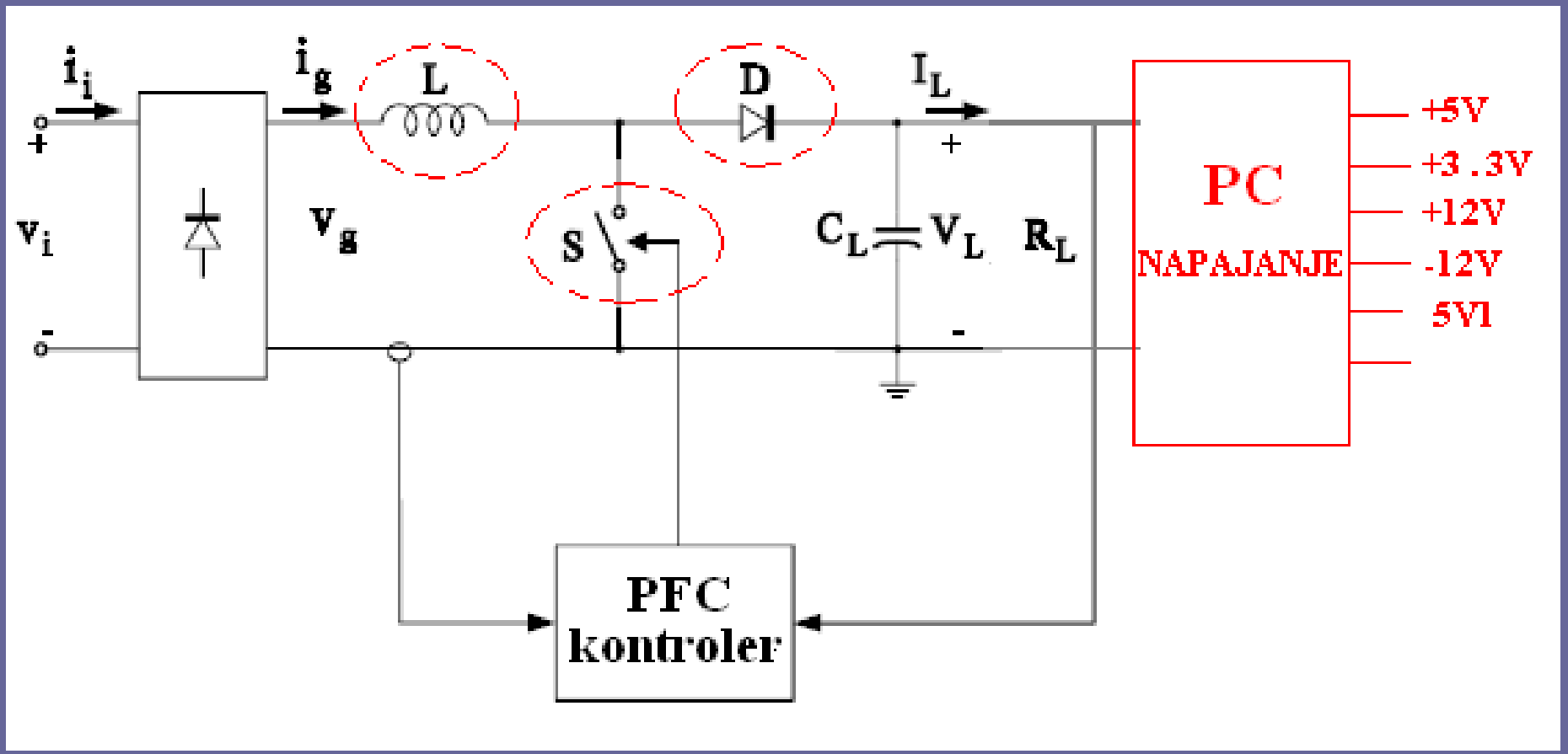


- Između punotalasnog ispravljača i kondenzatora *("hold-up")* se postavlja **aktivno elektronsko kolo** -podizač napona
- BOOST konvertor
- Potreban USLOV da bi se obezbedila sinusna ulazna struja je da moramo realizovati podizač ("boost") napona
- Želimo da ostvarimo sinusnu struju umesto oštrih impulsa, a da efektivna vrednost ostane ista

POREĐENJE DIODNOG i *PFC* ISPRAVLJAČA



PODIZAČ NAPONA - “BOOST”
PRINCIPSKA ŠEMA



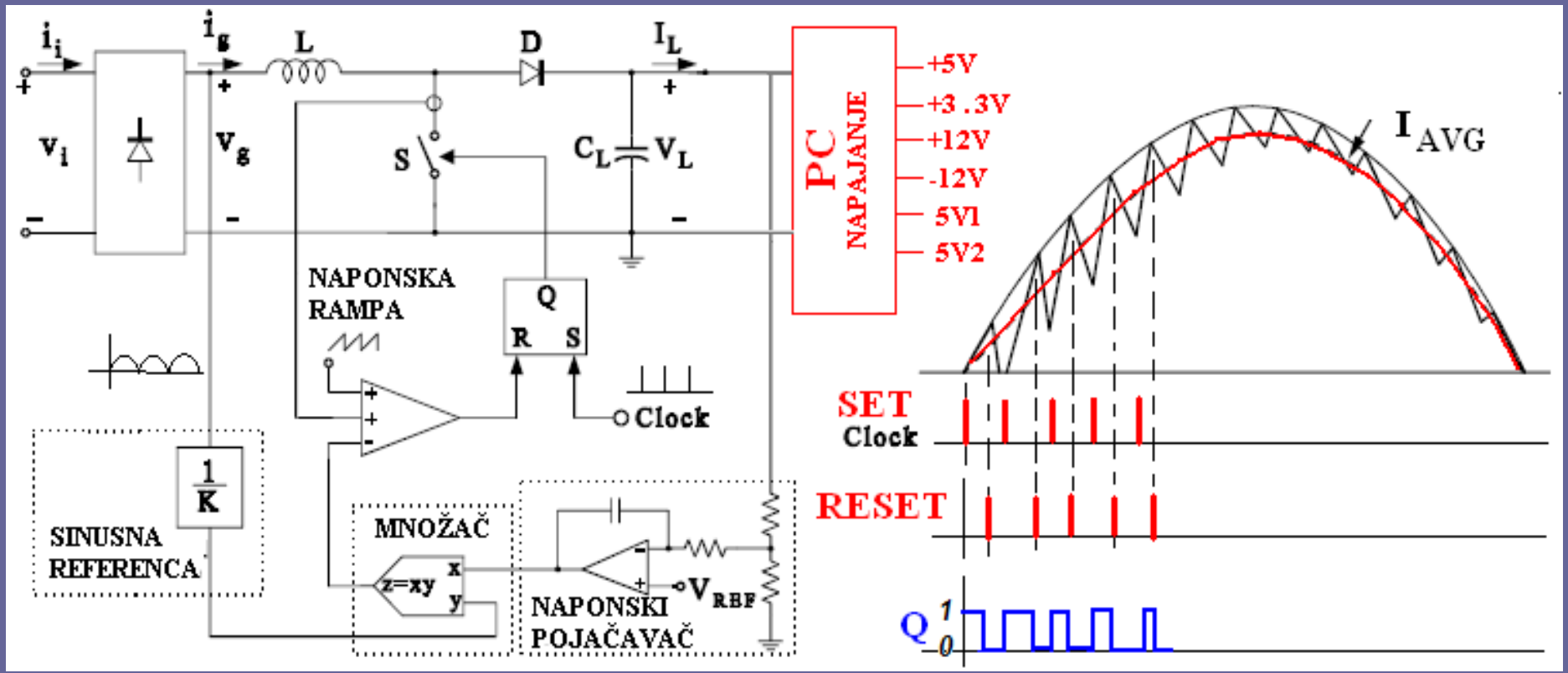
KLJUČNE KOMPONENTE: L, D i S

- PRIGUŠNICA L (DC struja)
- BRZA DIODA D
- PREKIDAČ S (MOSFET, IGBT)
- OPTEREĆENJE-PC napajanje

PFC kontroler**?????**
KAKVA JE NJEGOVA ARHITEKTURA

JEDNO MOGUĆE REŠENJE⟶

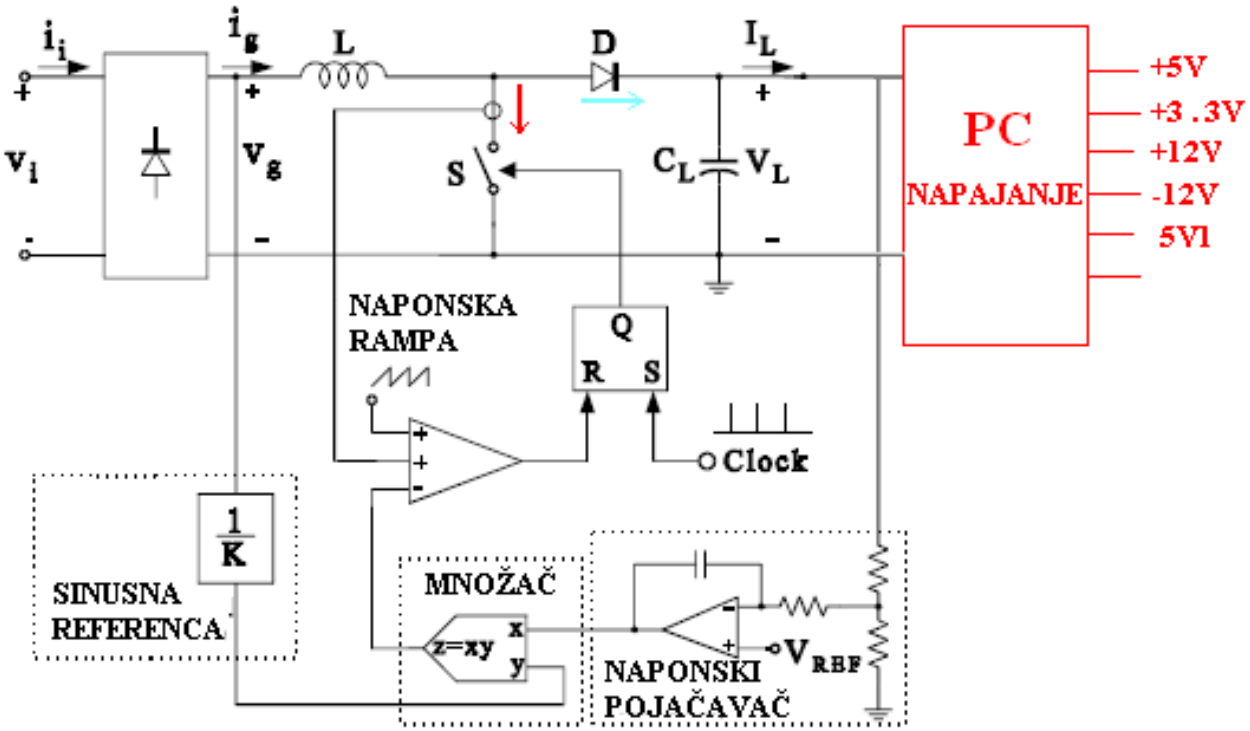
PFC – PROGRAMIRANA STRUJNA KONTROLA VRŠNE ("peak") VREDNOSTI STRUJE

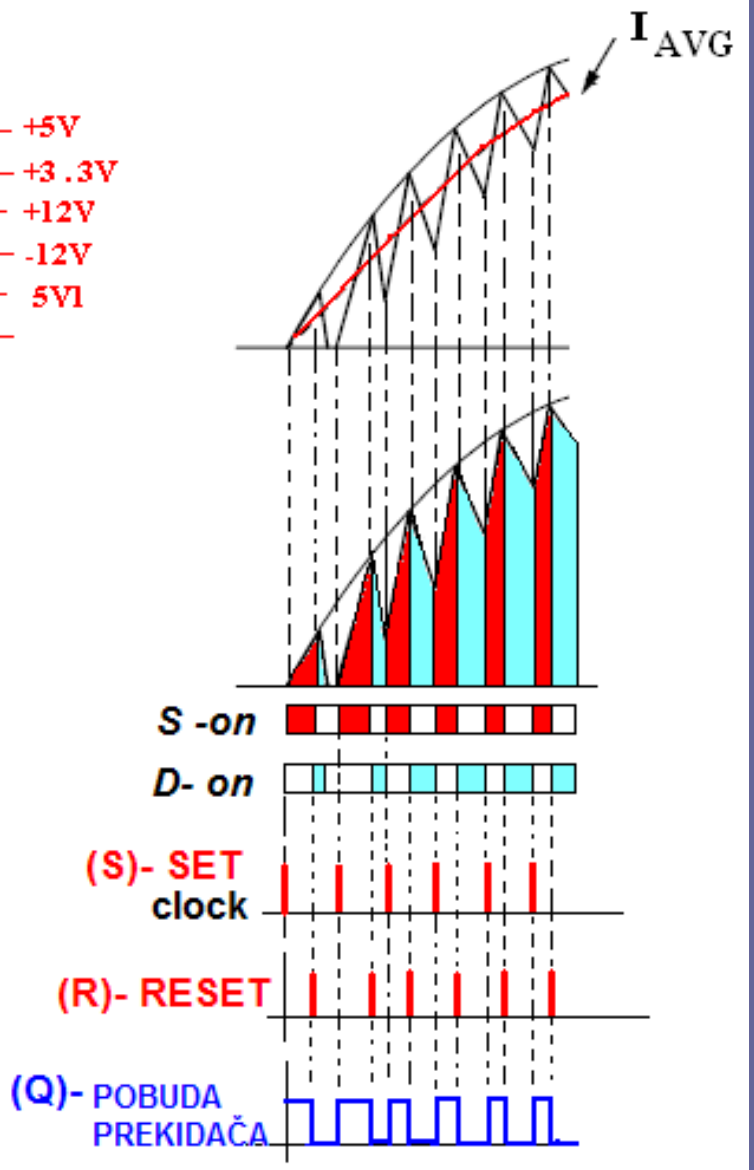


PRINCIPSKI BLOK DIJAGRAM KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI

•U pojačavač se dodatno uvodi signal "naponske rampe" koji treba da spreči sub-harmonijske oscilacije pretvarača usled različitih nagiba referentne sinusoide i stvarne struje (tzv. "slope compensation")

DETALJNI PRIKAZ PFC UPRAVLJAČKOG KOLA

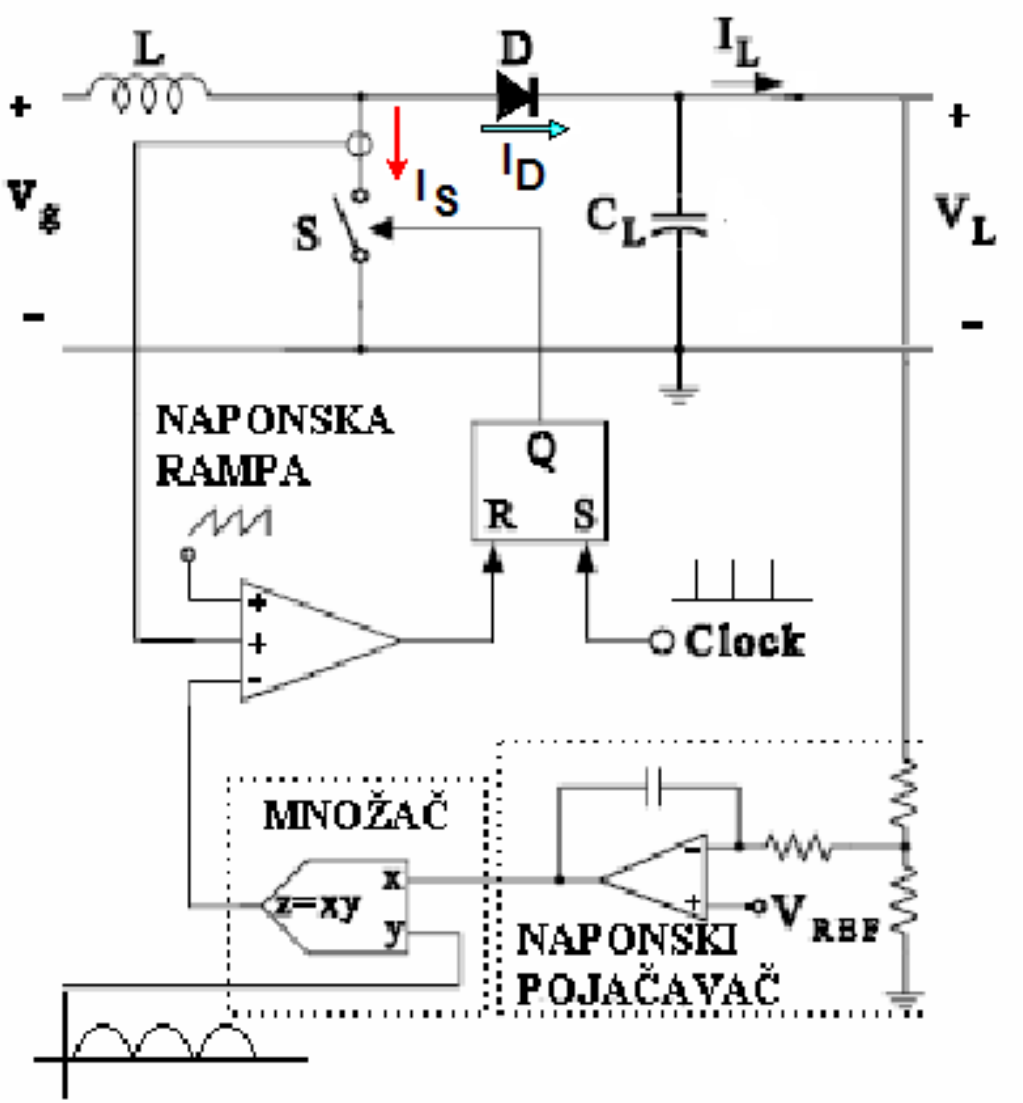


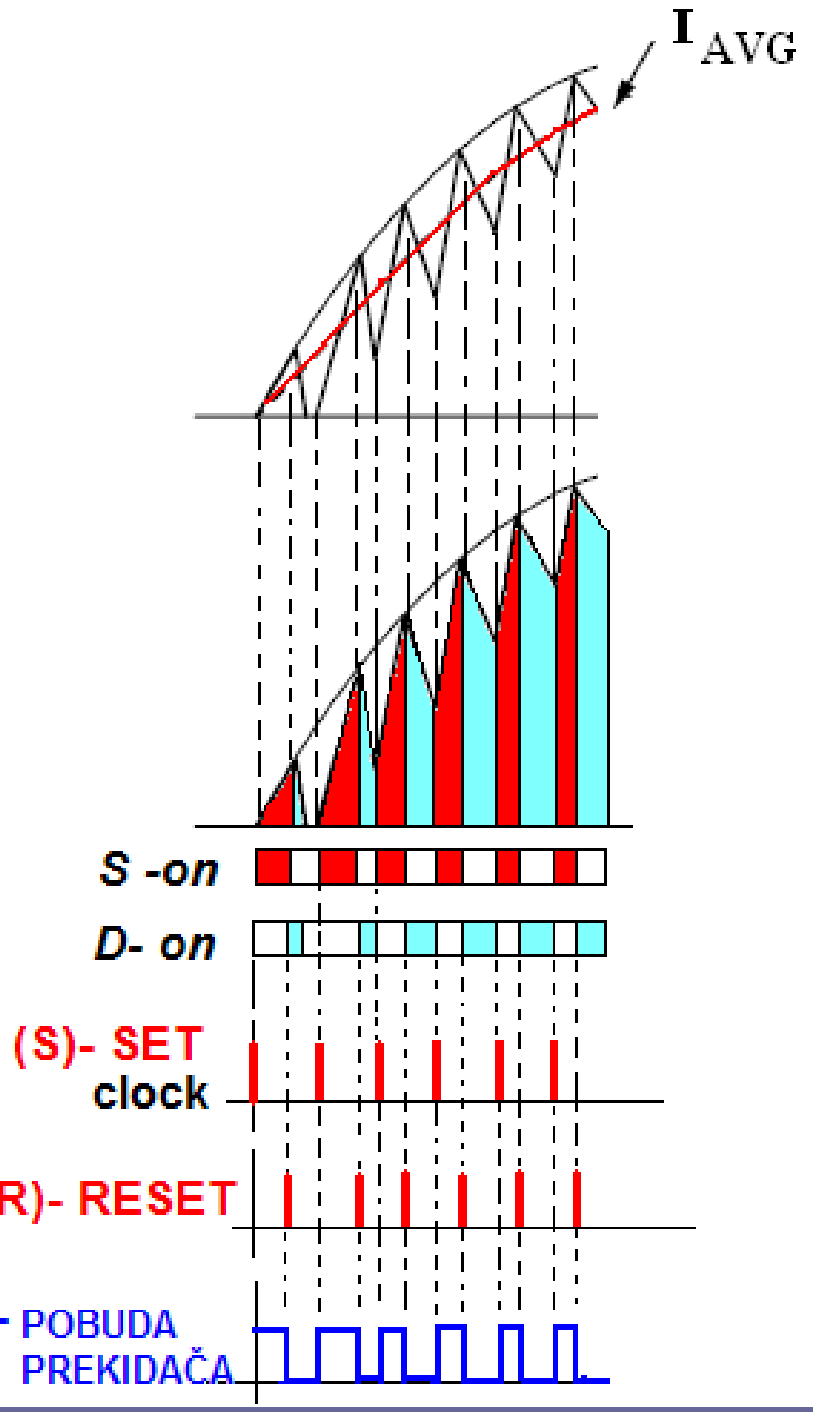


UPRAVLJAČKI BLOKOVI:

-sinusna referenca
-množač
-komparator (poređenje naponske rampe i izlaza množača)
-naponski pojačavač
-RS flip flop
-generator takta (clock)

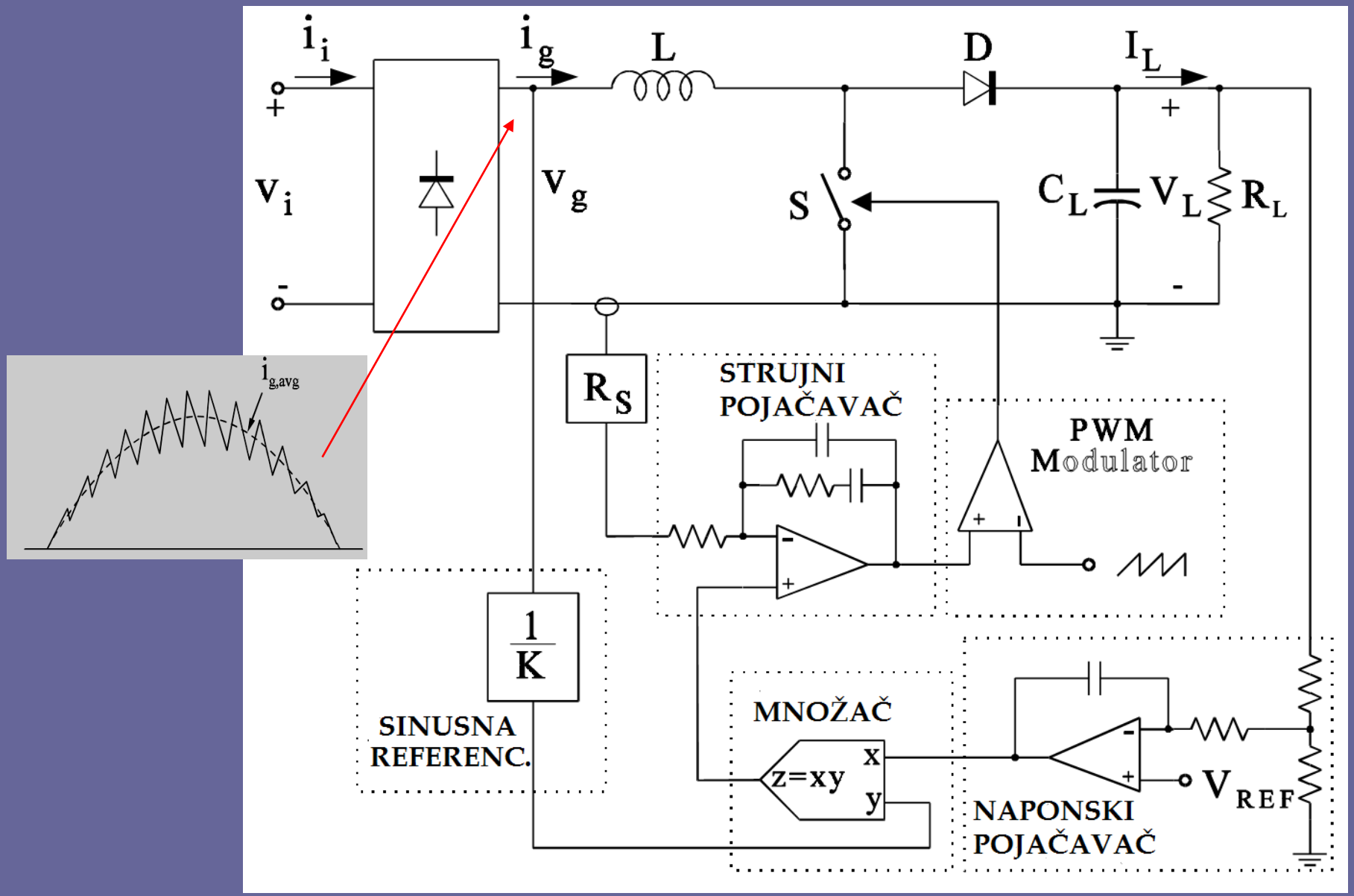
KONTROLA VRŠNE (“peak”) VREDNOSTI STRUJE



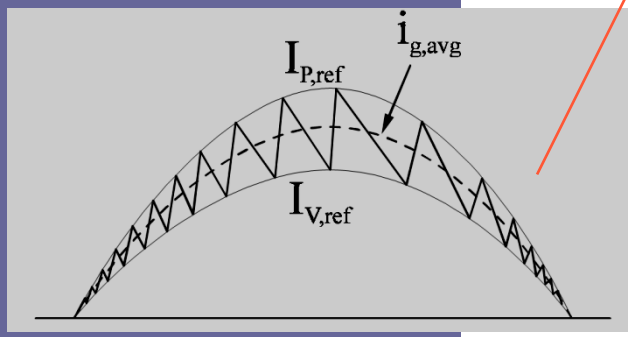


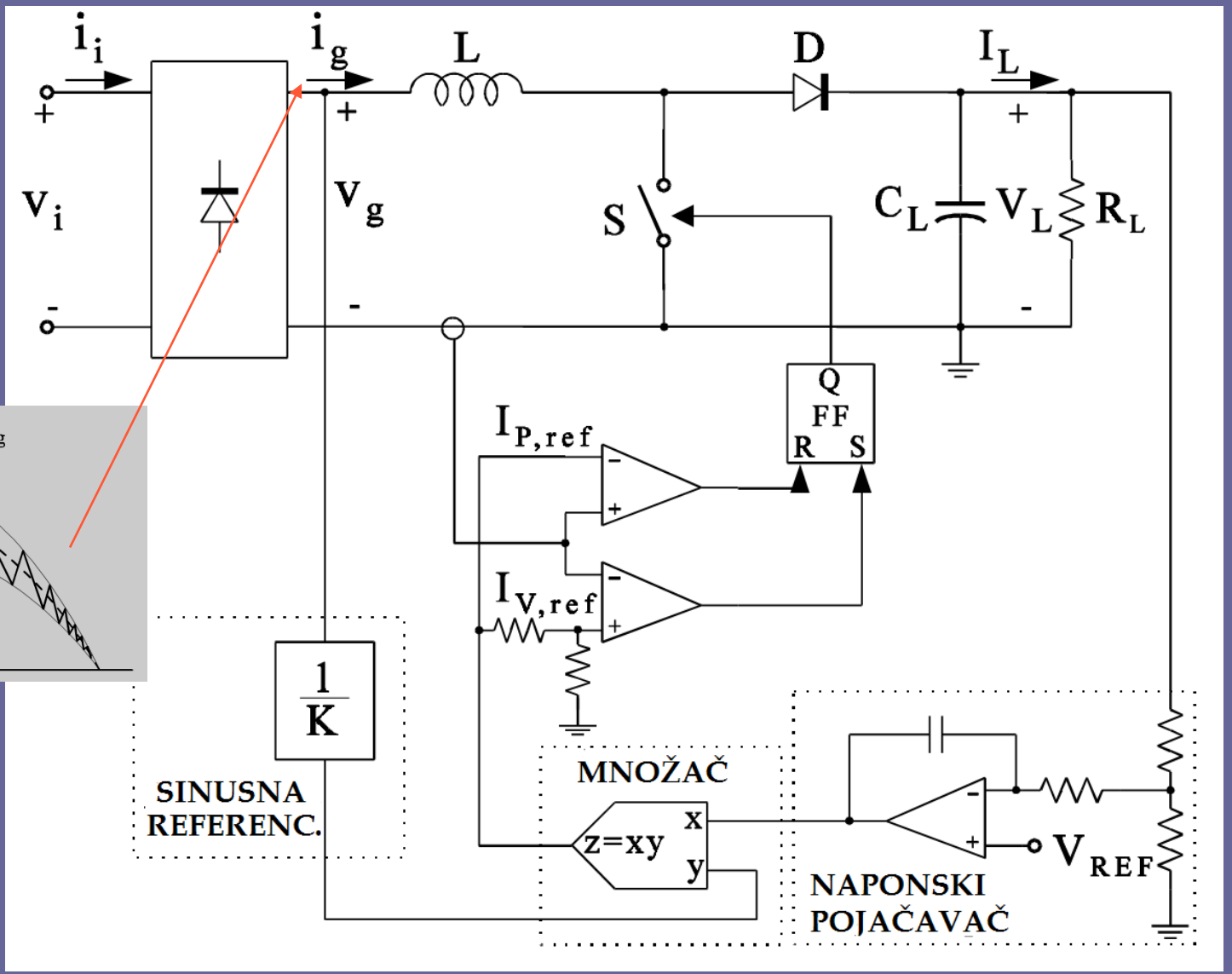
DETALJNI PRIKAZ UPRAVLJAČKOG KOLA i TALASNI OBLICI

PFC – KONTROLA SREDNJE (“average”) VREDNOSTI STRUJE

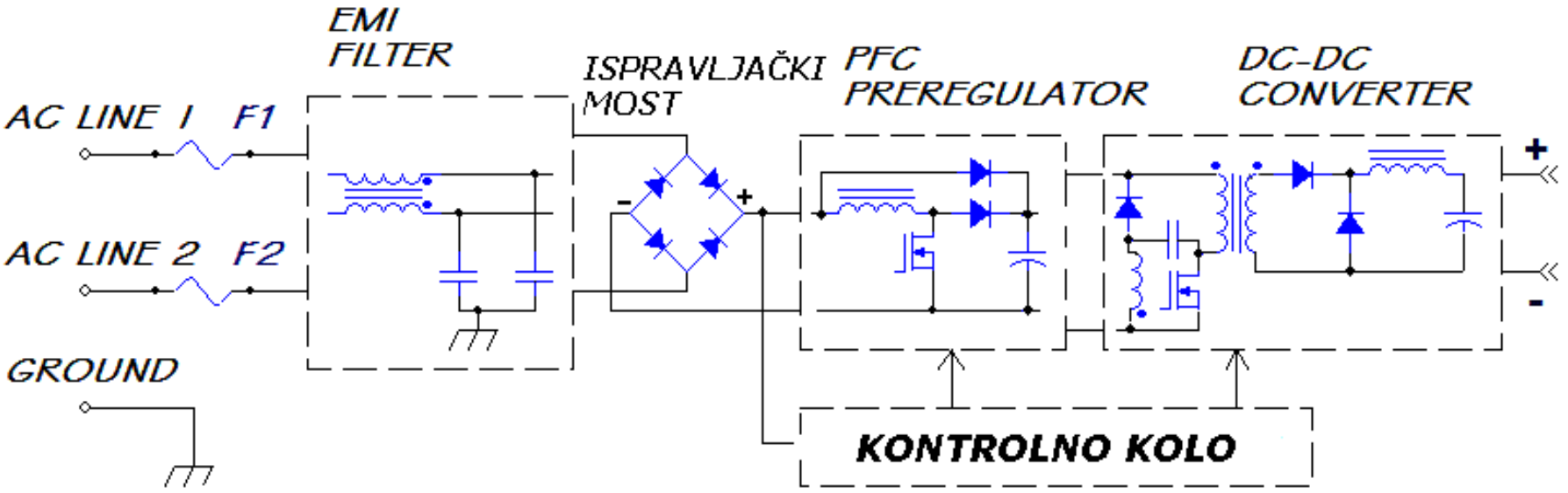


PFC – HISTEREZISNA KONTROLA ULAZNE STRUJE

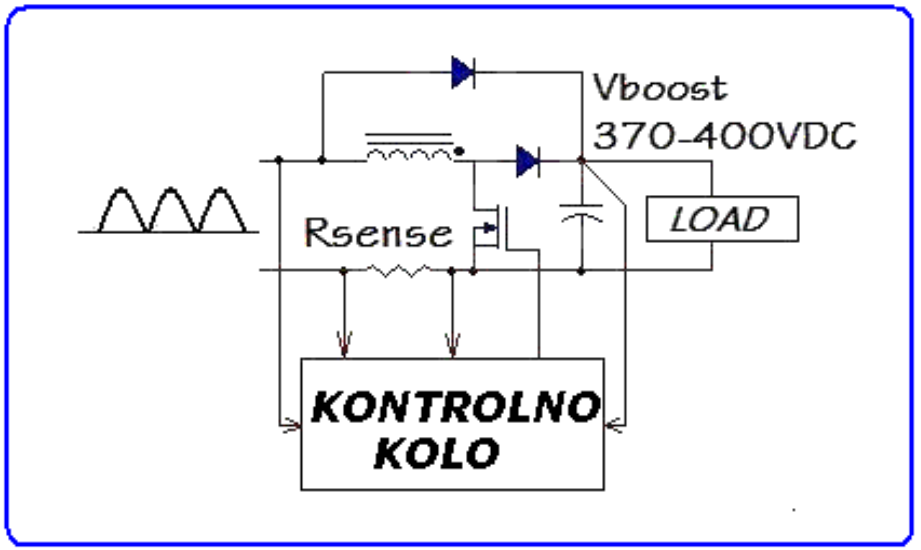




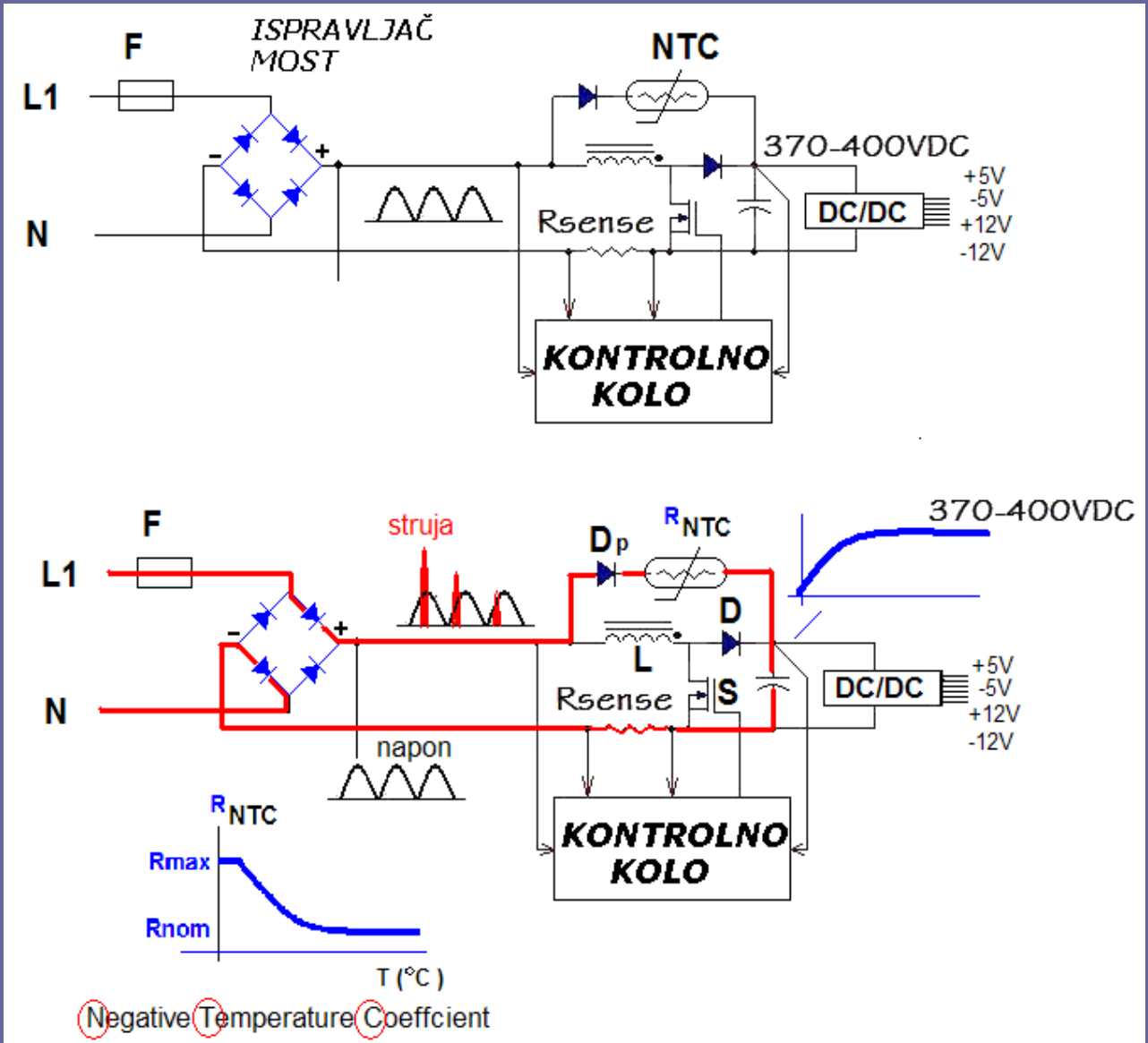
PC NAPAJANJE SA KOREKCIJOM FAKTORA SNAGE



PFC
PREREGULATOR

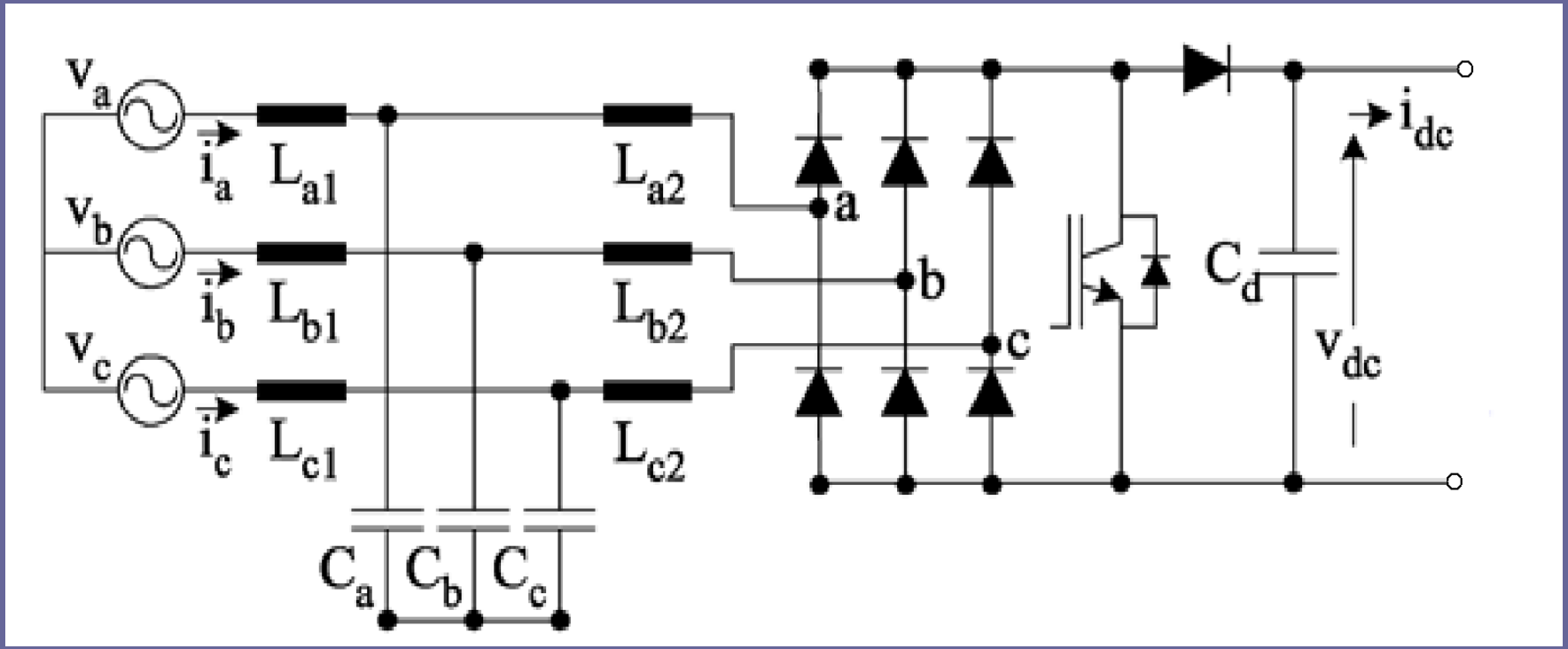


KOLO ZA POČETNO PUNJENJE (“hold-up”) KONDENZATORA



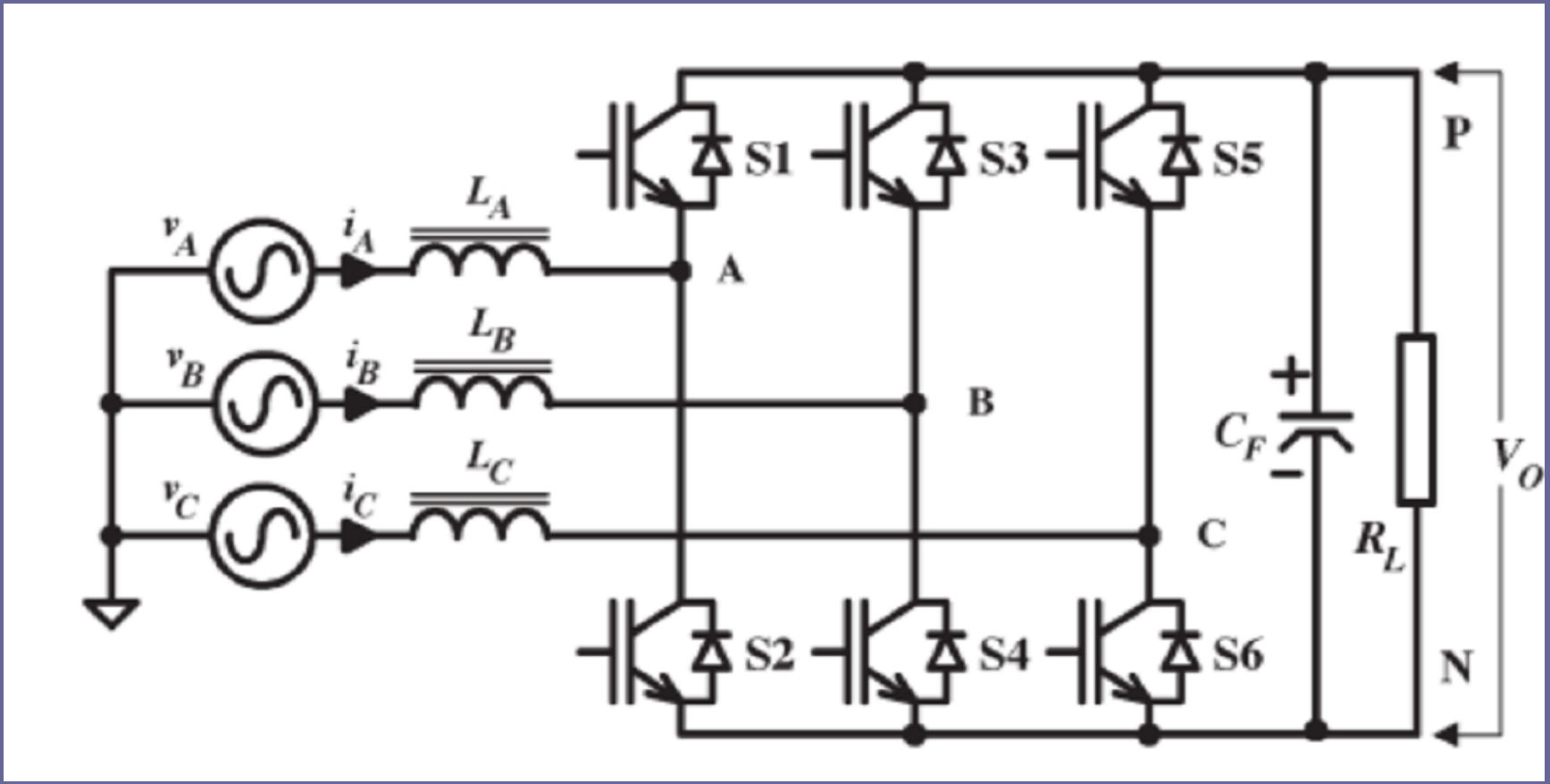
- NTC je nelinearni otpornik ograničava početnu struju punjenja kondenzatora
- U početnom trenutku t+0 napon na kondenzatoru je jednak 0V
- Stoga je kondenzator KRATAK SPOJ U POČETKU
- Nakon njegovog punjenja kolo je spremno za START

TROFAZNO KOLO ZA KOREKCIJU SNAGE



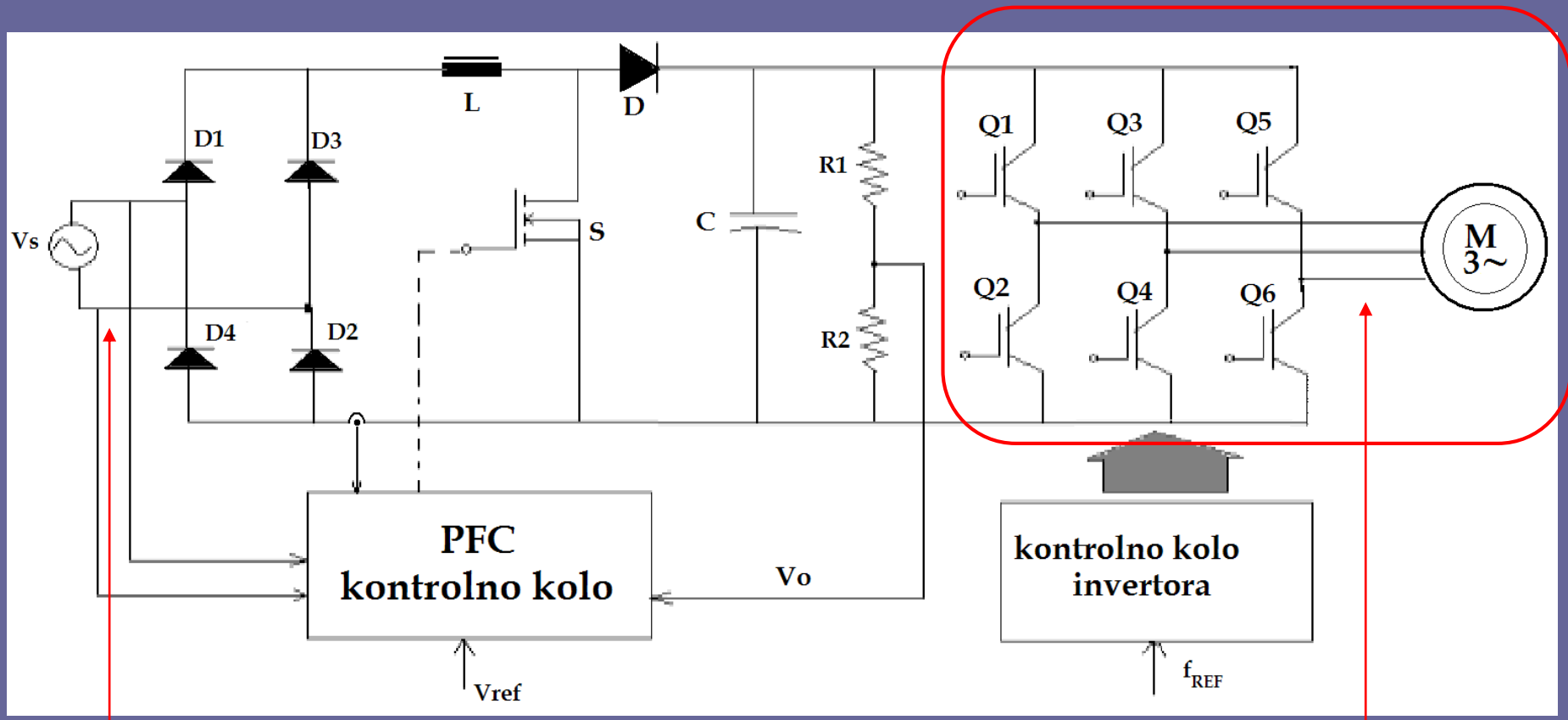
-TRI PODIZAČA NAPONA
-ZAJEDNIČKI PREKIDAČKI ELEMENAT, DIODA
-ZAJEDNIČKO DC MEĐUKOLO (kondenzator Cd)
-ULAZNI TROFAZNI L-C FILTAR
-BOOST PRIGUŠNICE La2, Lb2, Lc2

TROFAZNO KOLO ZA KOREKCIJU SNAGE (trofazni most sa 6 IGBT prekidača)



-BOOST PRIGUŠNICE NA AC STRANI
-NEMA PROBLEMA SA ZASIĆENJEM i DC REŽIMOM
-MAGNETNO KOLO PRIGUŠNICE MOŽE BITI ZA NISKE UČESTANOSTI

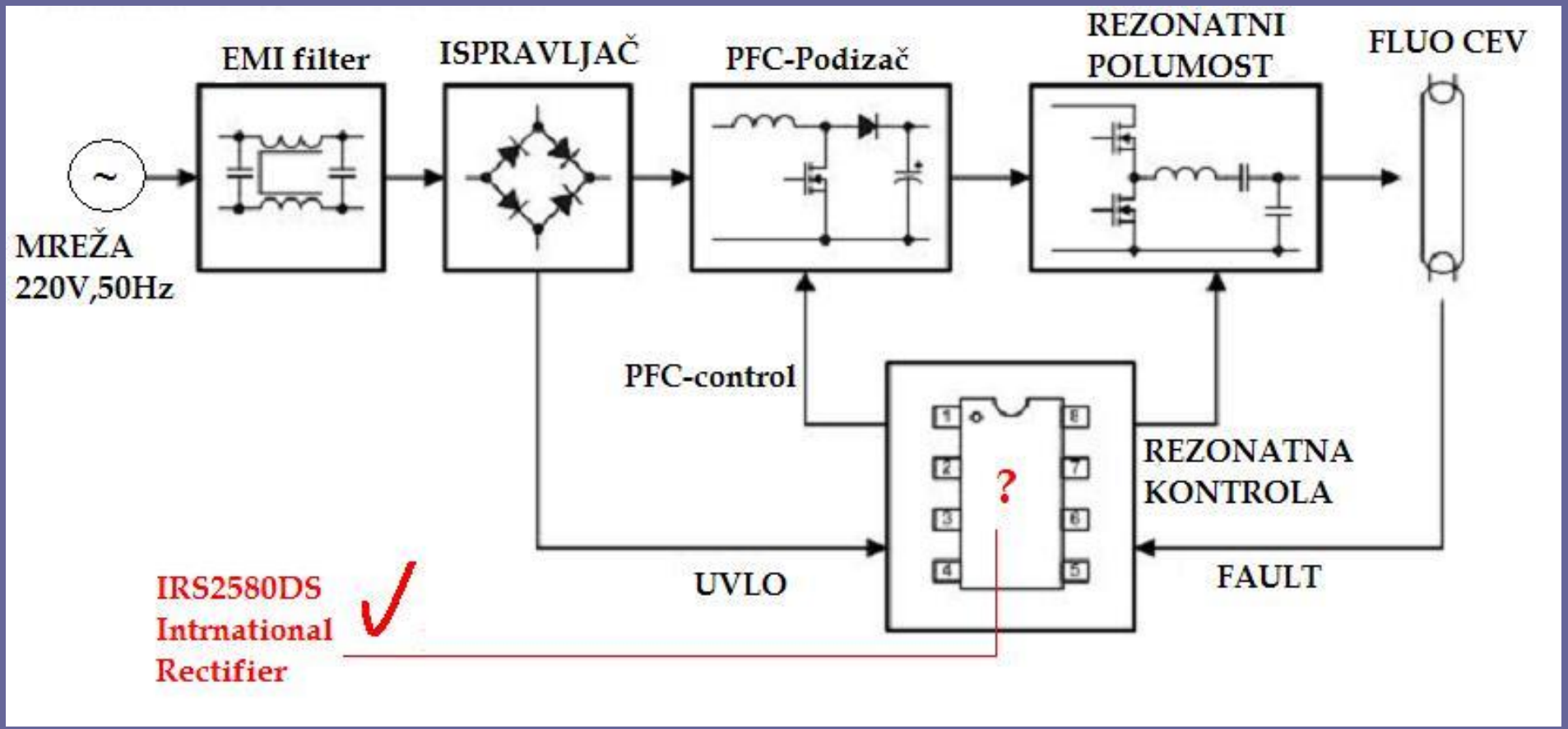
KOREKCIJA FAKTORA SNAGE U AC MOTORNOM POGONU



-**ULAZ JE MONOFAZNI 220/110V, 50 (60)Hz**
-U JEDNOSMERNOM MEĐUKOLU JE PODIZAČ NAPONA

-IZLAZ JE TROFAZNI
-POSEBNO KONTROLNO KOLO INVERTORA

Korekcija faktora snage u kolu napajanja fluorescentnih svetiljki

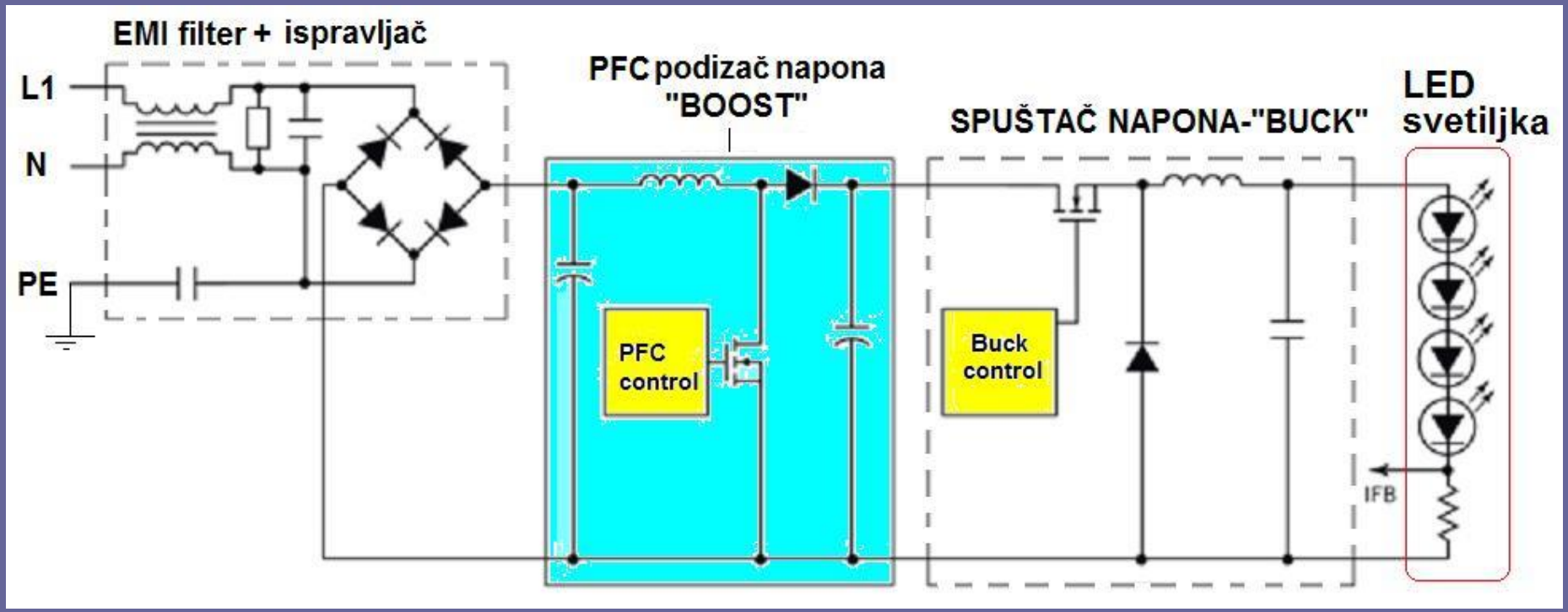


U čipu IRS2580DS je integrisana PFC kontrola i rezonantna kontrola pretvarača za pobudu fluorescentne svetiljke

DODATNE FUNKCIJE: Under Voltage Lock Out (UVLO) i detekcija neispravnosti fluorescentne svetiljke (FAULT)

Korekcija faktora snage u kolu napajanja LED svetiljki

EMI-ElectroMagnetic Interference (Elektromagnetna Interferenca)



ULAZNI DEO ČINE
EMI FILTER I
DIODNI ISPRAVLJAČ

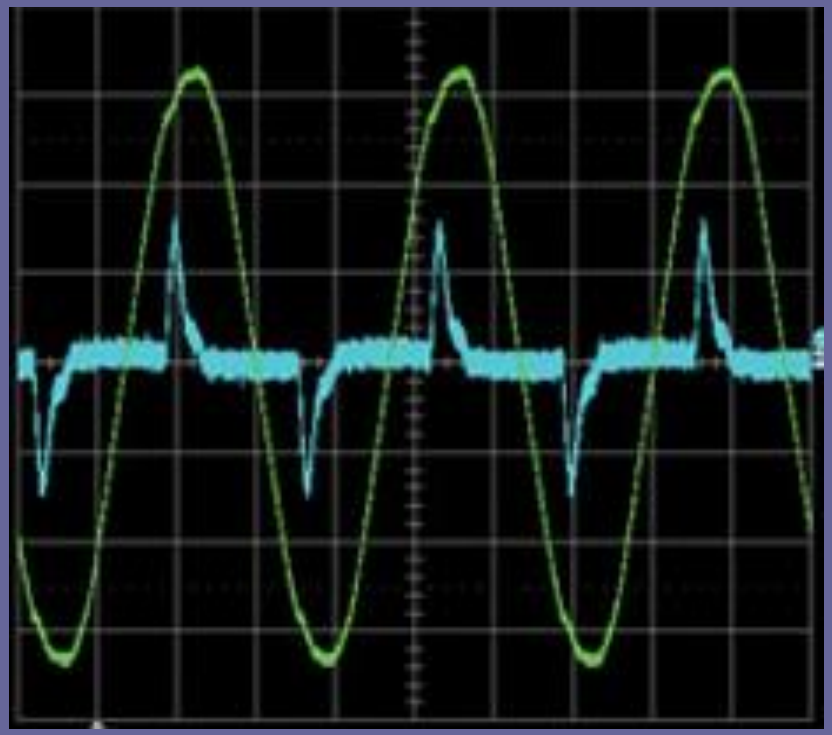
→ Potiskivanje smetnji

PFC KOREKTOR

PREDREGULATOR
NAPAJANJA

STABILIZATOR
NAPAJANJA
LED SVETILJKE

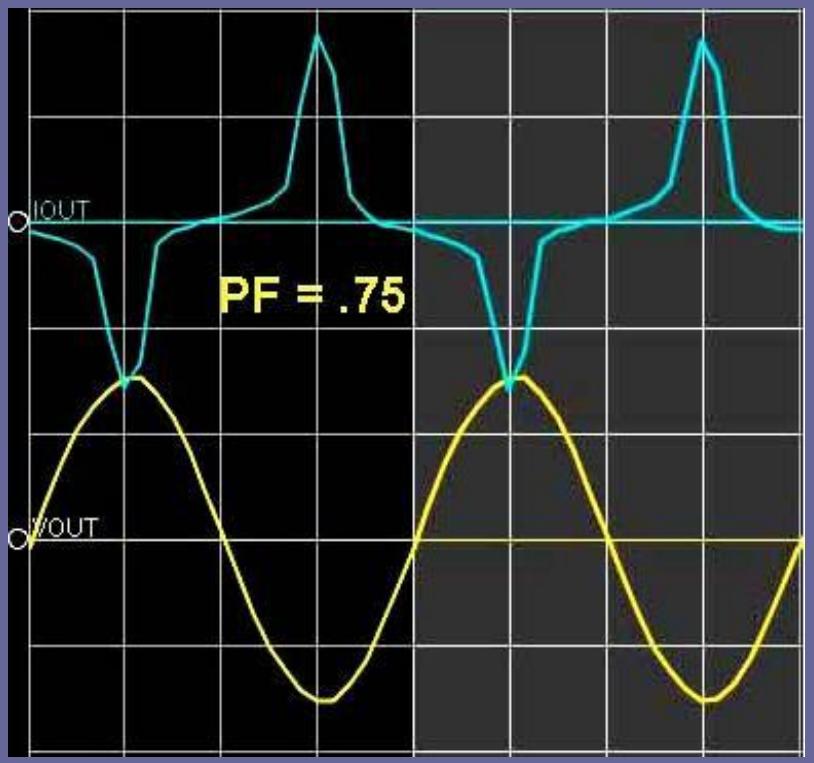
A KAKVI SU STVARNI TALASNI OBLICI ULAZNE STRUJE NAPAJANJA BEZ PFC ???????????



- Ulazna struja PC napajanja bez korekcije faktora snage
- Faktor snage: jako loš

ULAZNA STRUJA ——— 10A/c

MREŽNI NAPON ——— 100V/c



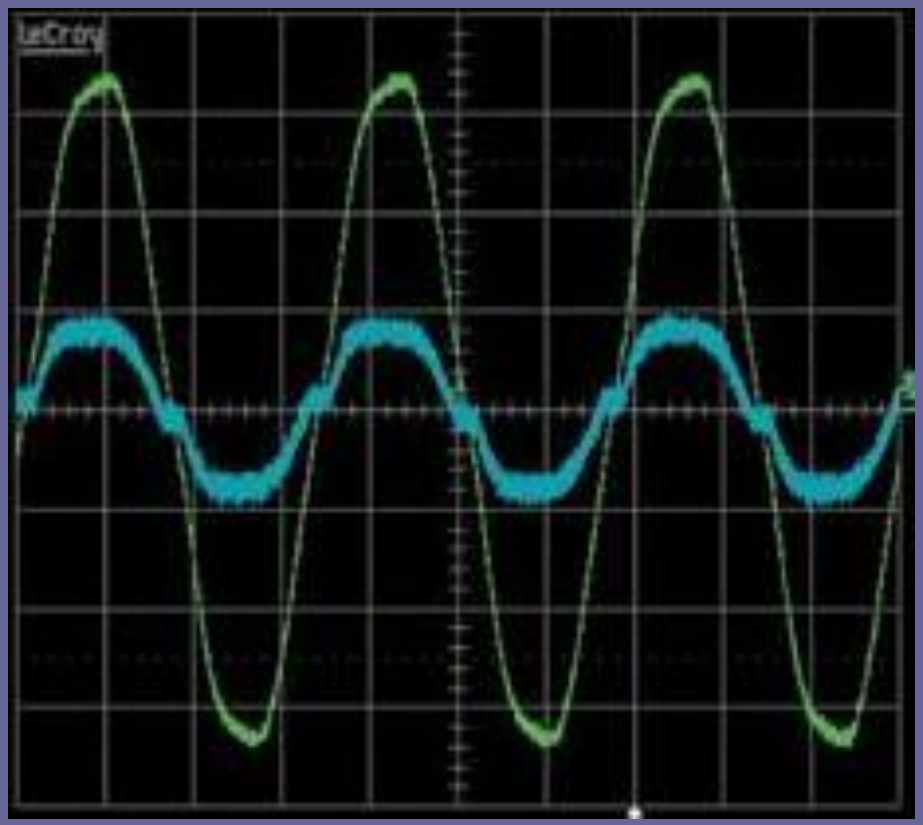
•Ulazna struja PC napajanja bez korekcije faktora snage ali sa prigušnicom postavljenom prema mrežnom napajanju

•Faktor snage: PF=0.75

ULAZNA STRUJA 5A/c

MREŽNI NAPON 200V/c

U OVOM SLUČAJU NAPOJNA MREŽA “VIDI” PC RAČUNAR KAO OMSKU OTPORNOST



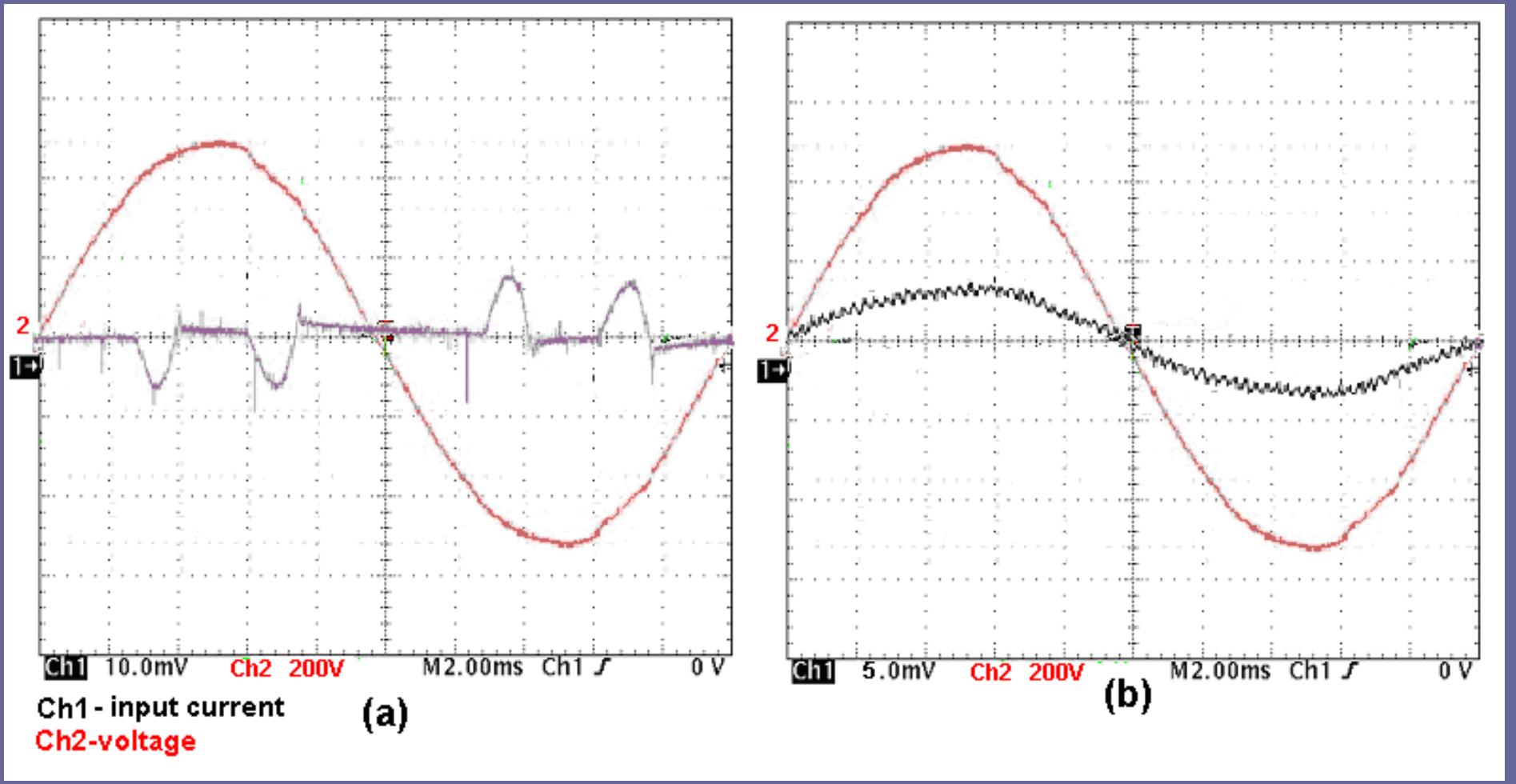
- Ulazna struja tipičnog PC napajanja sa korekcijom faktora snage

- Faktor snage: PF=1

ULAZNA STRUJA ——— 1A/c

MREŽNI NAPON ——— 100V/c

TALSNI OBLICI ZA TROFAZNI *PFC*



(a)- BEZ KOREKCIJE FAKTORA SNAGE

(b) – SA KOREKCIJOM FAKTORA SNAGE

ZAKLJUČAK

- **KOREKCIJOM FAKTORA SNAGE SE POSTIŽU SLEDEĆI POZITIVNI EFEKTI:**

  +POVEĆANJE EFIKASNOSTI NAPOJNE MREŽE

  +REDUKCIJA "ZAGAĐENJA" NAPOJNE MREŽE ŠTETNIM HARMONICIMA

- **U VEĆINI ZEMALJA U SVETU SU USVOJENI STANDARDI ZA PFC : IEC 555, IEC61000, EN6055, IEEE 519, ... itd.**
- **U BUDUĆNOSTI TREBA OČEKIVATI USVAJANJE OVIH STANDARDA I KOD NAS**

  DOBAR RAZLOG I MOTIV ZA PROUČAVANJE OVIH NAPAJANJA I ZA STICANJE ZNANJA IZ OVE OBLASTI!!!!!!!

▣ HVALA NA PAŽNJI!!!!

- PITANJA?
- DILEME ????

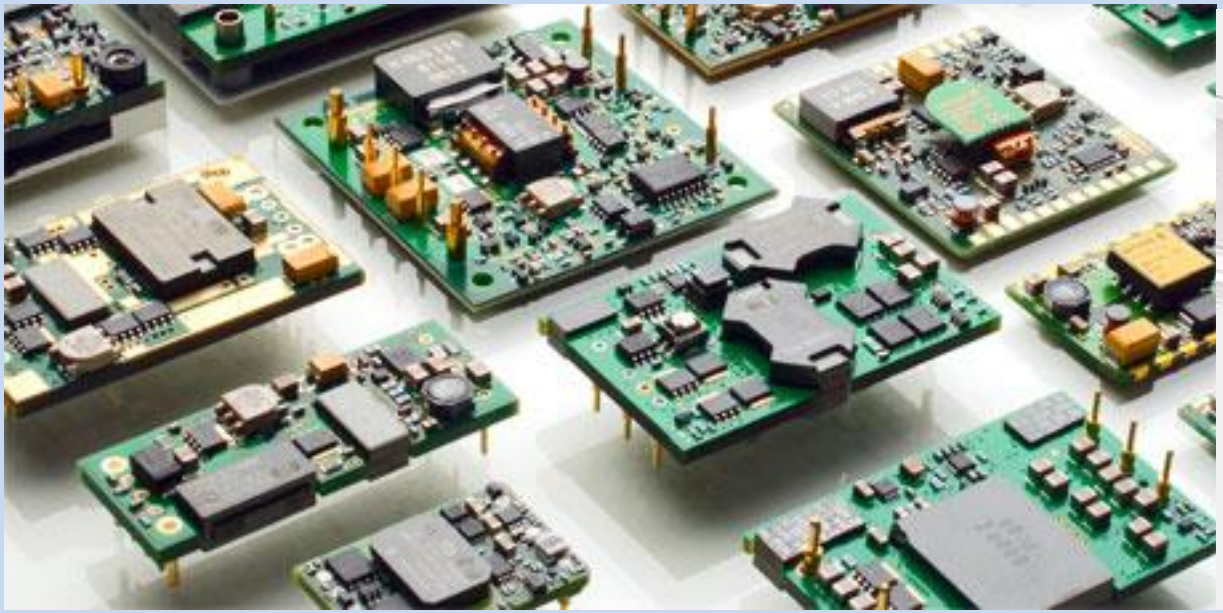
U Beogradu
Decembar 2020

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NET

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

OSNOVNE TOPOLOGIJE DC-DC PRETVARAČA-rekapitulacija



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

PREDAVANJE RAZMATRA :

- Predstave o osnovnim topologijama DC-DC pretvarača (koje se primenjuju u industrijskim izvorima napajanja)
- Dimenzionisanje poluprovodničkih komponenti u pripadajućoj topologiji

GLOBALNA PODELA:

- DC-DC pretvarači bez galvanske izolacije (galvanska izolacija između ulaza i izlaza tj.opterećenja)
- DC-DC pretvarači sa galvanskom izolacijom (galvanska izolacija između ulaza i izlaza tj.opterećenja)

DC-DC pretvarači bez galvanske izolacije

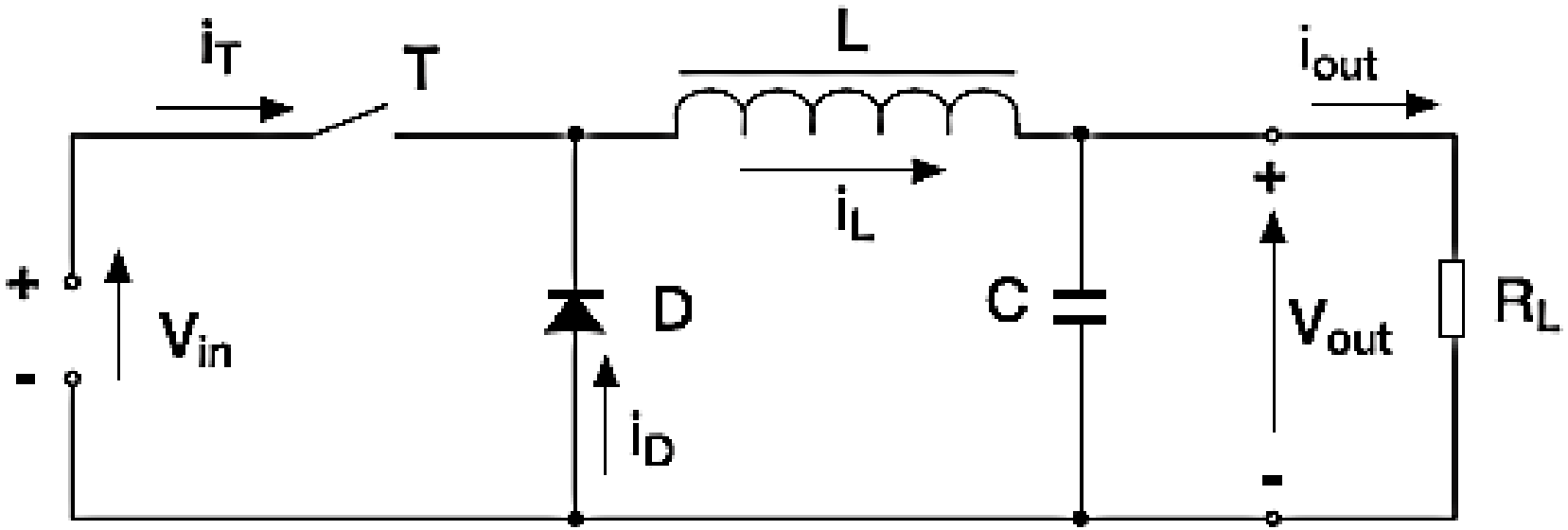
U osnovi se radi o “čoperskim” kolima

“čopovanje”= “sečenje”

- SPUŠTAČI NAPONA (Step down “Buck” regulatori)
- PODIZAČI NAPONA (Step up “Boost” regulatori)
- SPUŠTAČI/PODIZAČI NAPONA (Step up / Step down “Buck - Boost” regulatori)

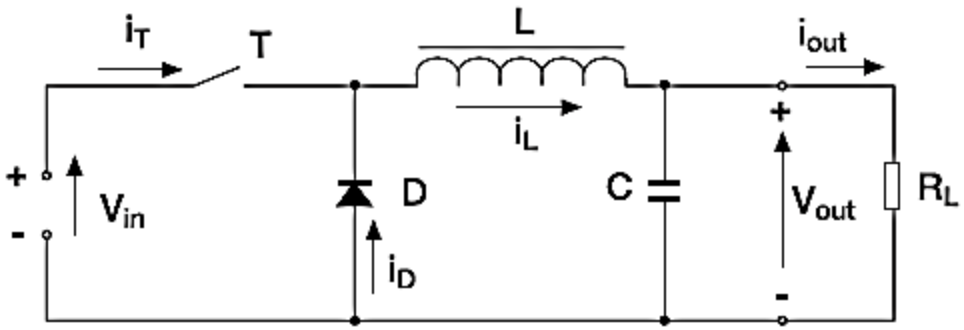
SPUŠTAČ NAPONA

- "Buck" converter: Step down voltage regulator



TOPOLOGIJA SPUŠTAČA NAPONA

SPUŠTAČ NAPONA (TOPOLOGIJA I KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI)

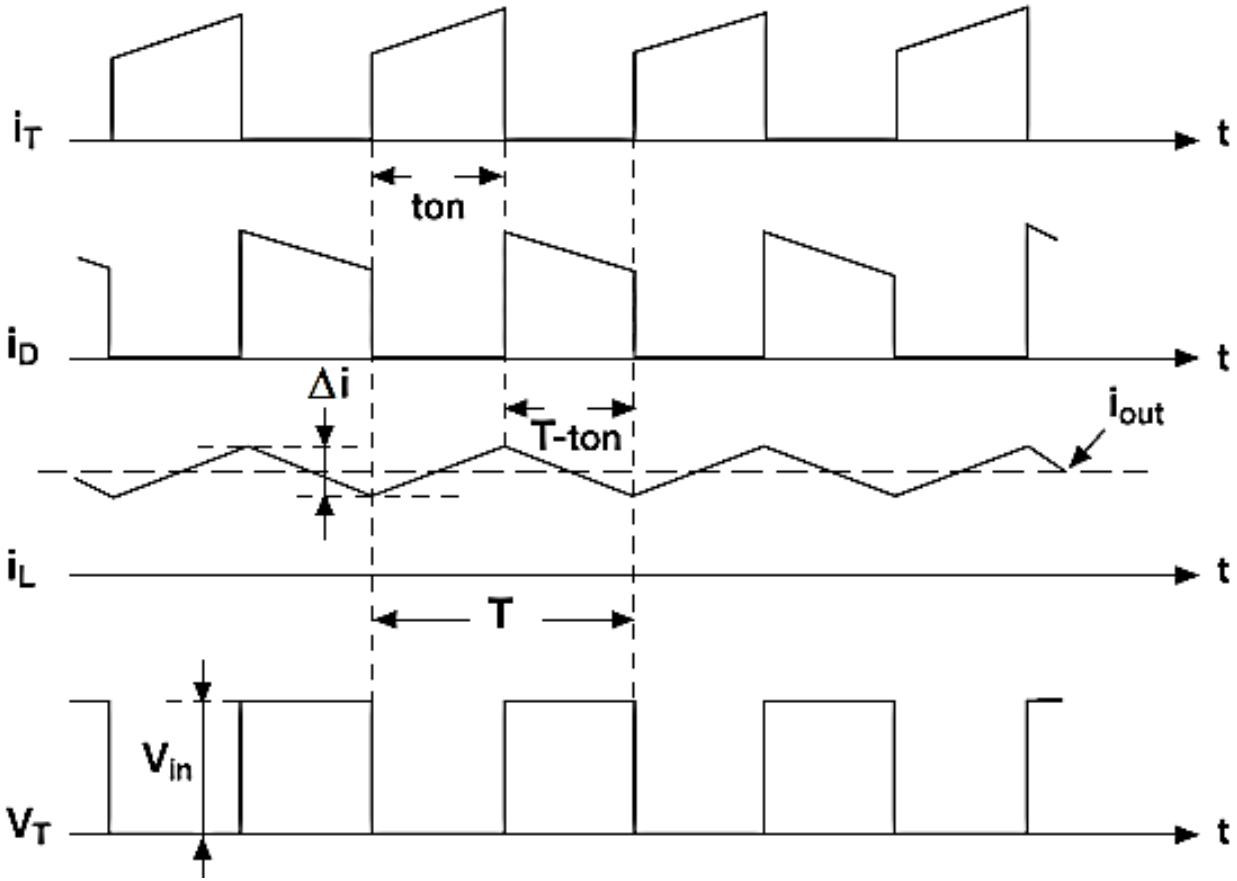


Učestanost prekidanja prekidača $f = 1/T$

Koeficijent režima rada ("DUTY-CYCLE") $\delta = t_{on}/T$

IZLAZNI NAPON

$$V_{out} = V_{in} \cdot \delta$$



Dimenzionisanje energet. prekidača (tranzistora) BJT, IGBT, MOSFET

V_{cev} ili $V_{DSS} > V_{in\,max}$

I_{cmax} ili $I_{D\,max} > I_{out} + \frac{\Delta I}{2}$

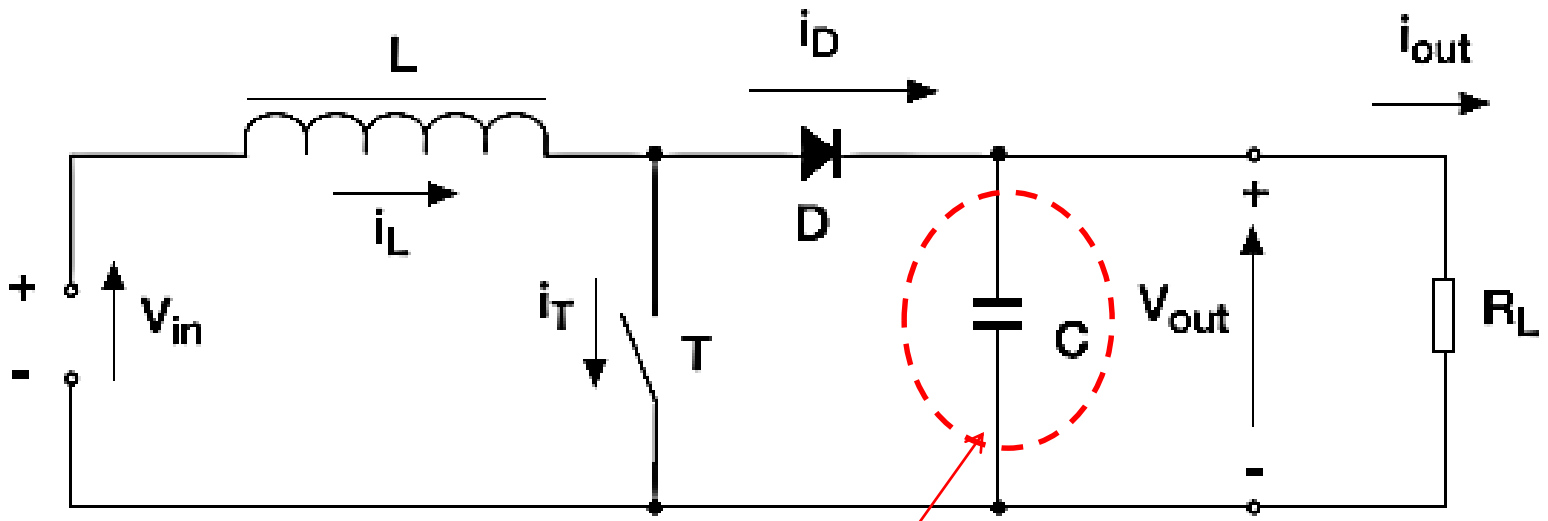
Dimenzionisanje diode

$V_{RRM} \geq V_{in\,max}$

$I_{F(AV)} \geq I_{out}\,(1-\delta)$

PODIZAČ NAPONA

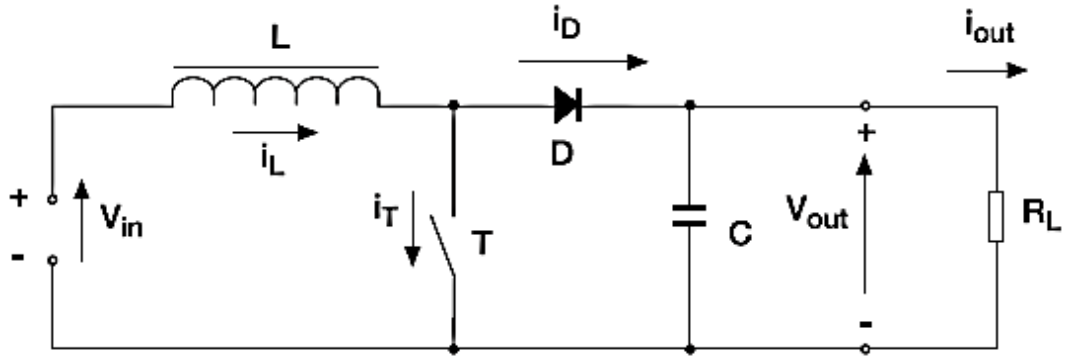
- "Boost" converter: Step up voltage regulator



IZLAZNI KONDENZATOR JE ZNAČAJNIJE
NAPONSKI "STRESIRAN" U ODNOSU NA topologiju SPUŠTAČA NAPONA
obzirom da Vout može biti >> od Vin !!!

TOPOLOGIJA PODIZAČA NAPONA

PODIZAČ NAPONA (TOPOLOGIJA I KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI)

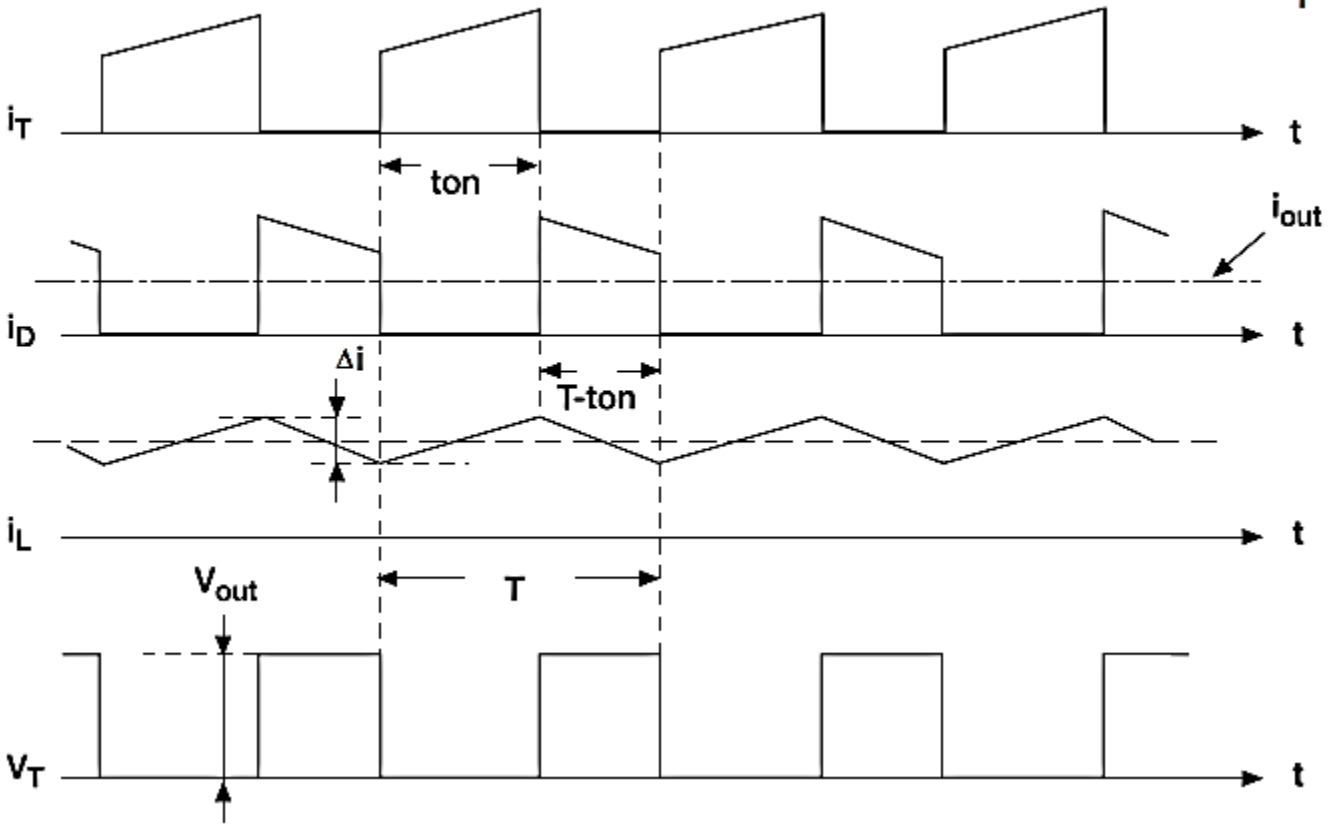


$$f = 1/T$$

$$\delta = \frac{ton}{T}$$

IZLAZNI NAPON:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-\delta}$$



Dimenzionisanje energet. prekidača (tranzistora) BJT, IGBT, MOSFET

$$V_{cev} \text{ ili } V_{DSS} > V_{out}$$

$$I_{cmax} \text{ ili } I_{Dmax} > \frac{I_{out}}{1-\delta} + \frac{\Delta I}{2}$$

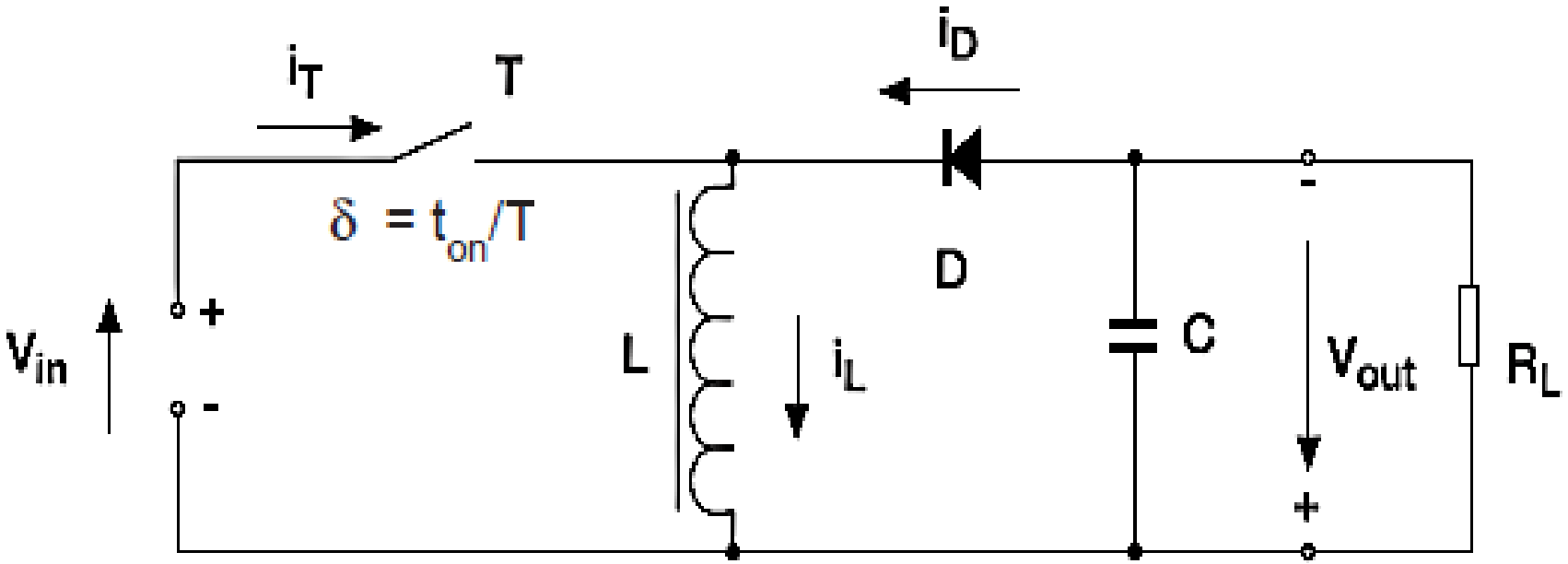
Dimenzionisanje diode

$$V_{RRM} > V_{out}$$

$$I_{F(av)} > I_{out}$$

SPUŠAČ/PODIZAČ NAPONA

- “Buck-Boost converter: Step up/Step down voltage

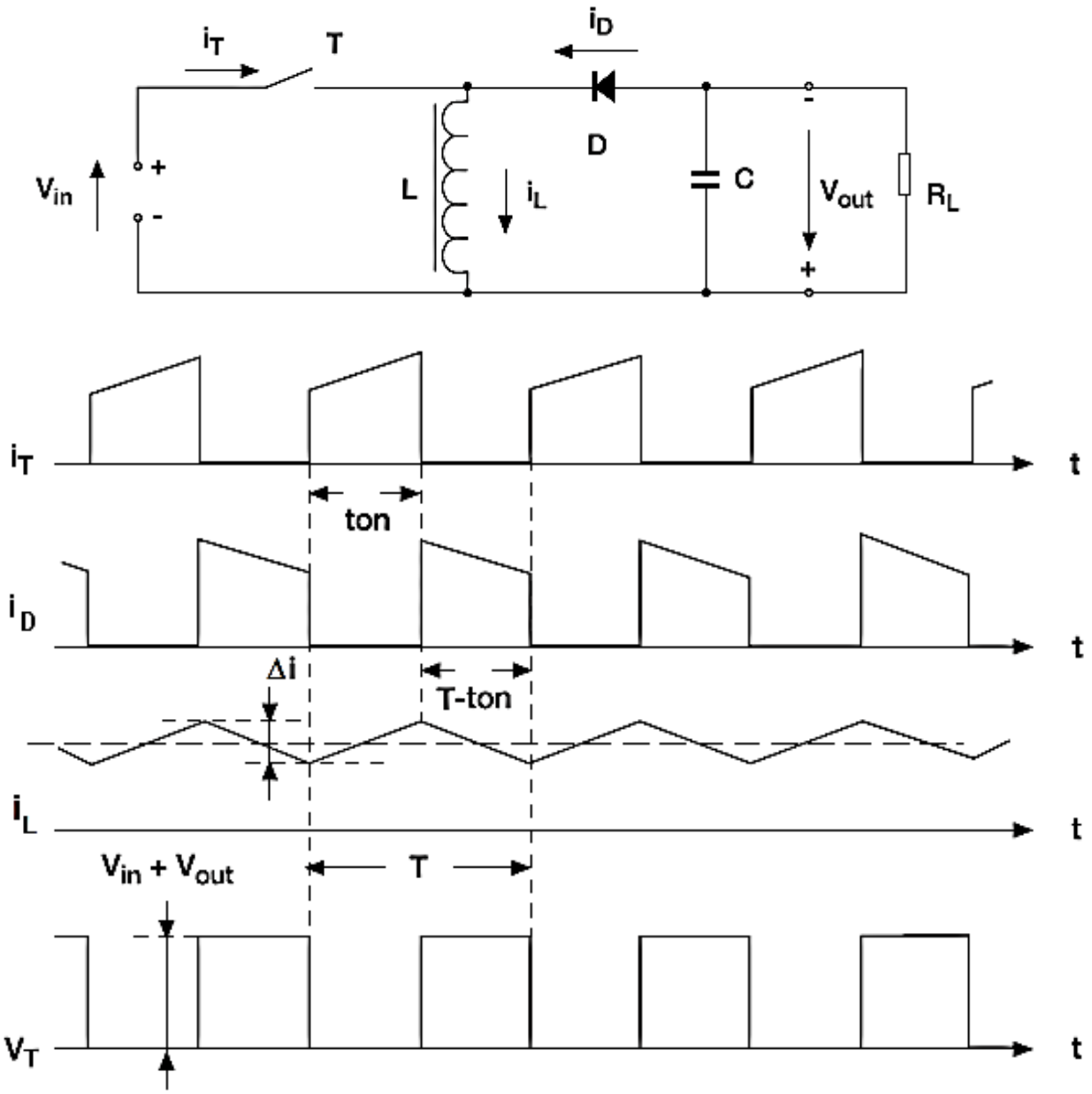


TOPOLOGIJA SPUŠTAČA/PODIZAČA NAPONA

U REŽIMU **δ < 0 5** radi kao SPUŠTAČ NAPONA

U REŽIMU **δ > 0 5** radi kao PODIZAČ NAPONA

SPUŠTAČ/ PODIZAČ NAPONA (TOPOLOGIJA I KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI)



IZLAZNI NAPON

$$V_{out} = -\frac{V_{in}.\delta}{1-\delta}$$

Dimenzionisanje energet. prekidača (tranzistora) BJT, IGBT, MOSFET

$$V_{cevmax} \text{ ili } V_{DSS} > V_{inmax} + V_{out}$$

$$I_{cmax} \text{ ili } I_{Dmax} > \frac{I_{out}}{1-\delta} + \frac{\Delta I}{2}$$

Dimenzionisanje diode

$$V_{RRM} > V_{inmax} + V_{out}$$

$$I_{F\,(av)} > I_{out}$$

REZIME- neizolovani DC/DC pretvarači

DC-DC karakt.	SPUŠTAČ STEP DOWN	PODIZAČ STEP UP	SPUŠTAČ / PODIZAČ STEP UP/DOWN
V_{out}	$V_{in} . \delta$	$V_{in}/1- \delta$	$[-V_{in} .\delta] / [1- \delta]$
RMS struja kroz C_{out}	niska	visoka	visoka
Struja iz ulaznog izvora napajanja	diskontinualna (prekidna)	kontinalna (neprekidna)	diskontinualna (prekidna)
Pobudno kolo prekidača T	plivajuće ("floating")	ref. ka masi ("grounded")	plivajuće ("floating")

UPOREDNI PREGLED neizolovanih DC-DC pretvarača

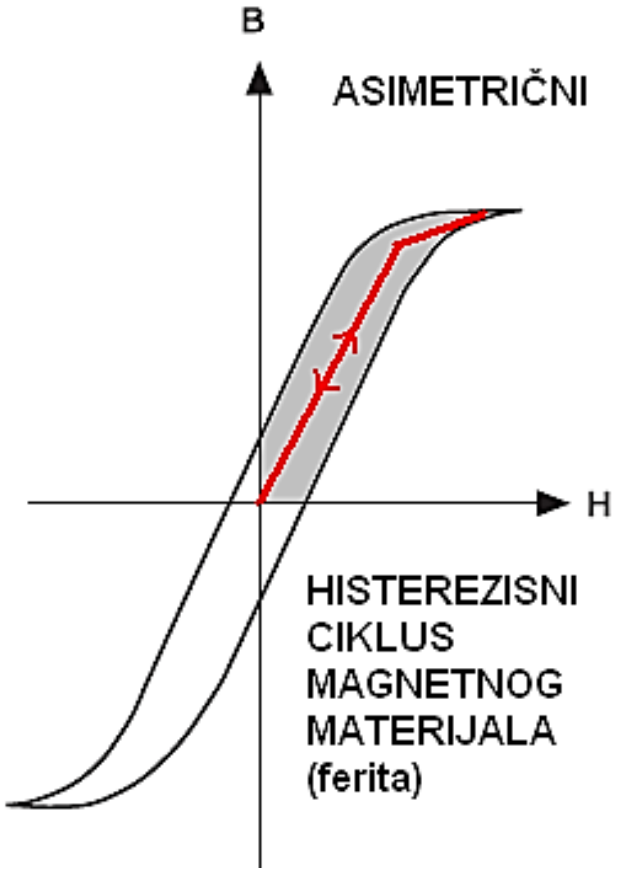
DC-DC pretvarači sa galvanskom izolacijom

- Kod ovih pretvarača se koriste visokofrekventni transformatori (spuštači ili podizači) sa magnetnim medijumom koga sačinjavaju feritna jezgra
- Ovi transformatori su ustvari "galvanski izolatori" između primarne i sekundarne strane
- Ovi izolovani pretvarači se dele, prema položaju radne tačke na B-H krivoj feritnog jezgra, na

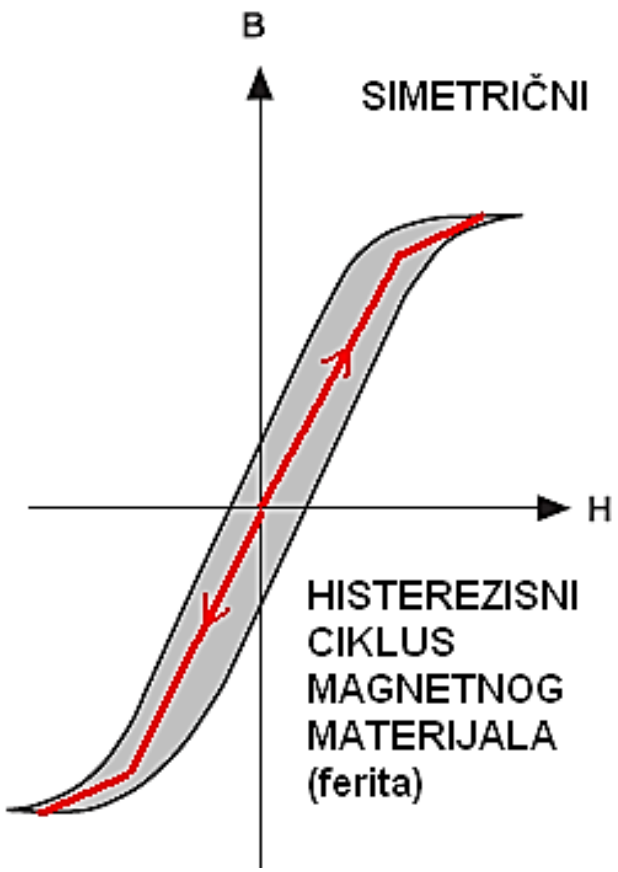
  -asimetrične [radna tačka u jednom (prvom) kvadrantu B-H krive]

  -simetrične [radna tačka u oba (prvom i trećem) kvadranta B-H krive]

RADNI KVADRANTI U MAGNETNOM MATERIJALU ZA ASIMETRIČNE I SIMETRIČNE DC-DC PRETVARAČE



RAD u JEDNOM KVADRANTU B-H krive



RAD u DVA KVADRANTA (simetrična) B-H krive

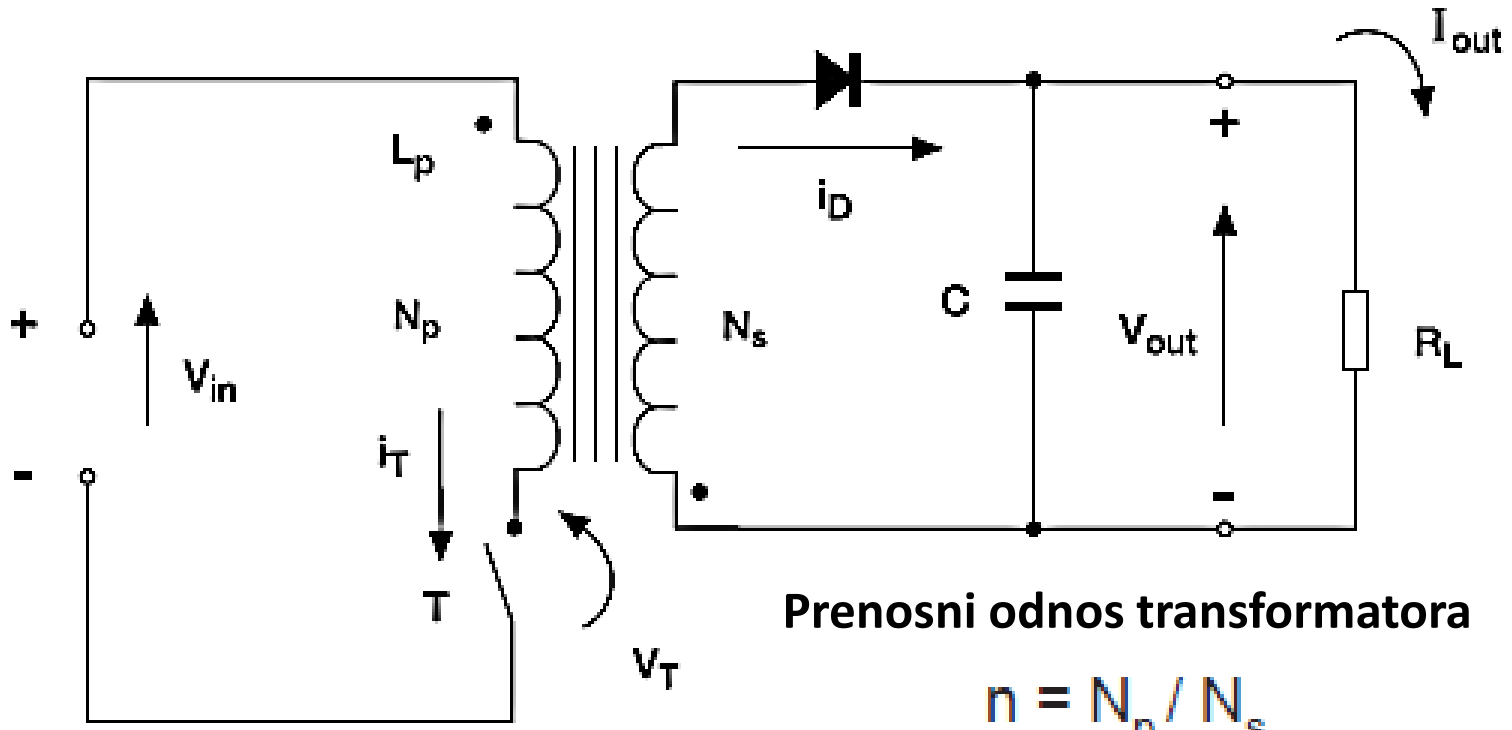
ASIMETRIČNI DC-DC pretvarači sa galvanskom izolacijom

- **“Off-line flyback”** regulatori (koji mogu imati jedan ili dva energetska prekidača i koji mogu raiti u prekidnom ili neprekidnom režimu

- **“Off line forward”** regulatori

“**Off-line flyback**” regulatori

“Off-line flyback “ regulator sa galvanskom izolacijom i jednim energetskim prekidačem -TOPOLOGIJA

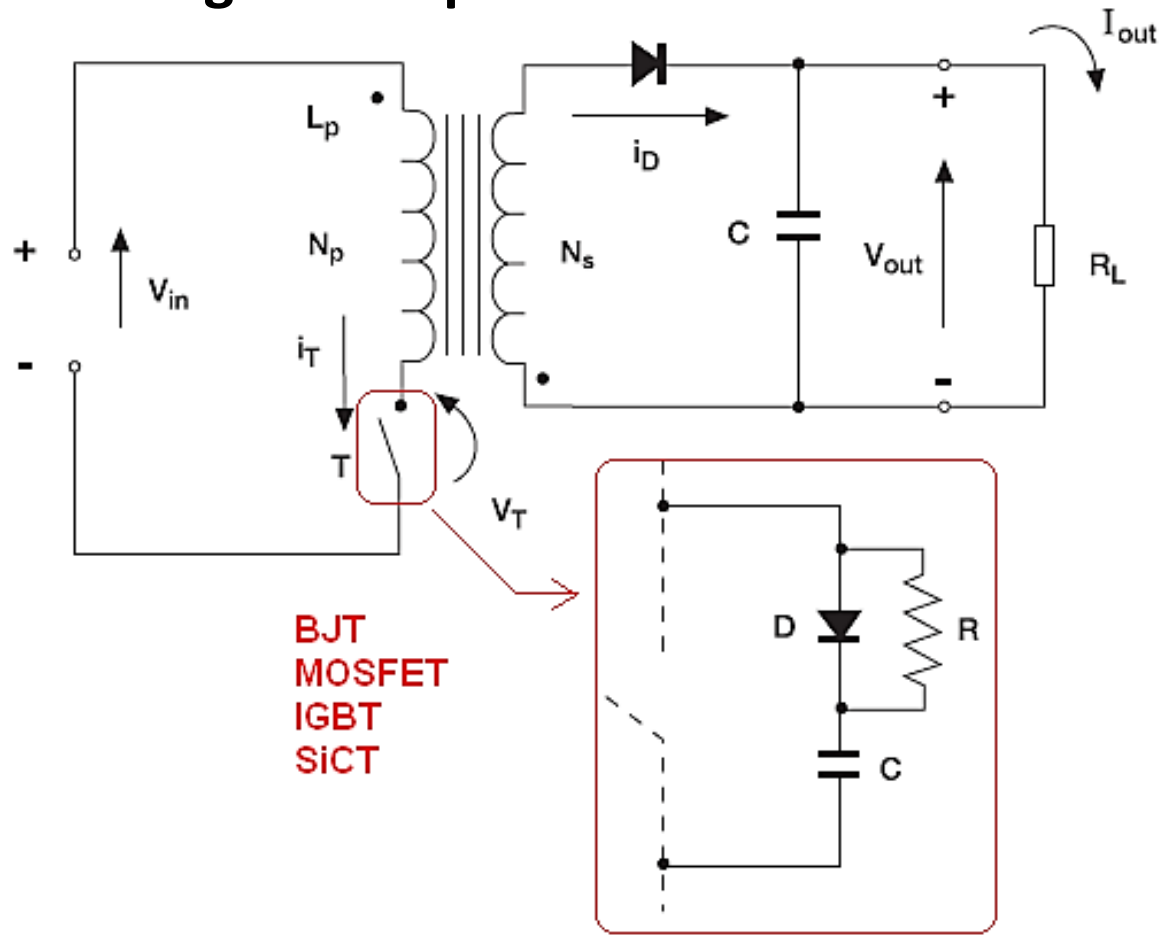


Prenosni odnos transformatora

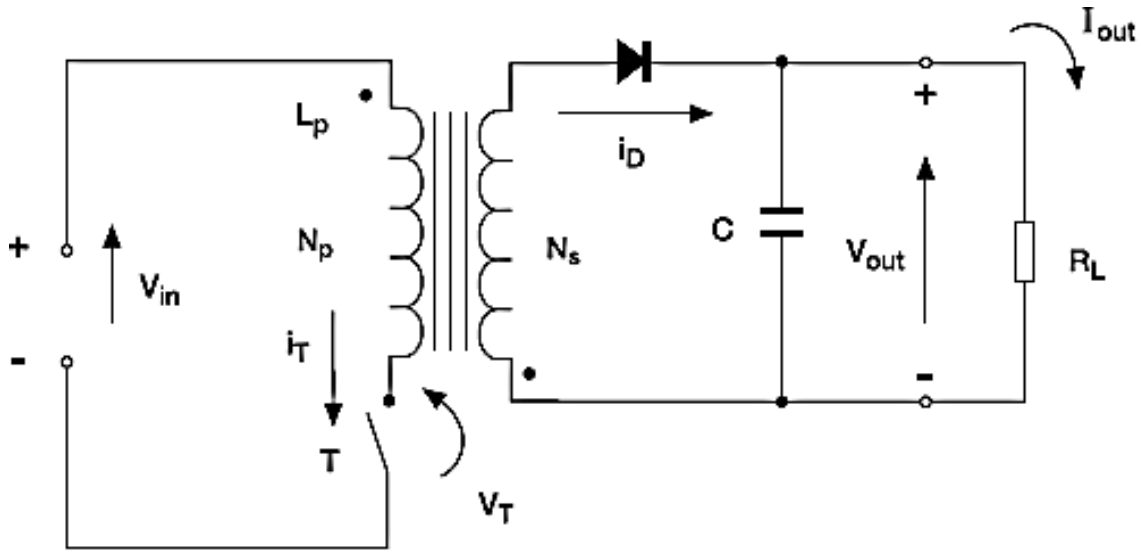
$$n = N_p / N_s$$

Energija se “nagomilava” u primarnoj induktivnosti L_p u intervalu kada je prekidač T uključen (“ON state”), a prebacuje se u sekundarno kolo , odnosno na izlaz (opterećenje) kada je prekidač T isključen (“OFF state”). Zbog toga se i zovu OFF-LINE.

RCD kolo za ublažavanje naponskog stresa na energetskom prekidaču



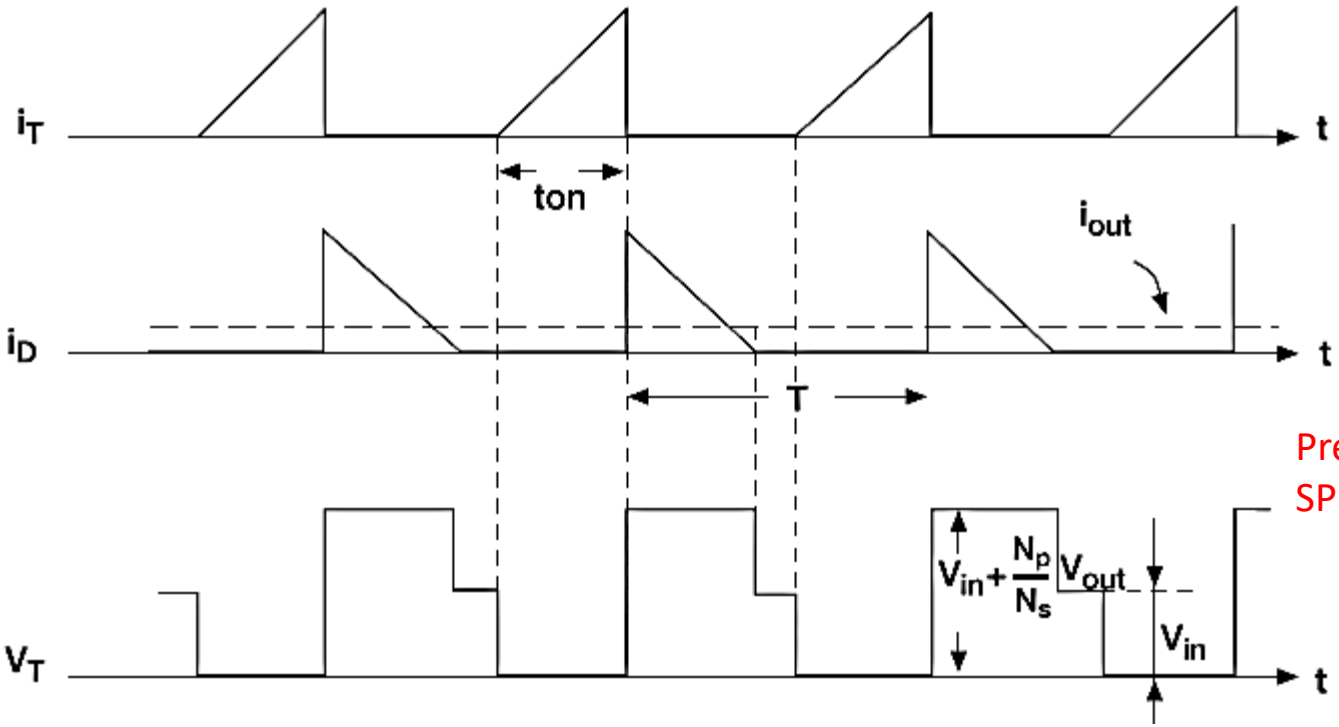
"**Off-line flyback**" regulatori se uglavnom koriste za izlazne snage od 30W do 300W. Nema potrebe za izlaznim LC filtrom (potreban je samo kondenyator C) tako da je ovaj pretvarač relativno jeftin. Potrebno je RCD kolo da bi ublažilo naponski stres na energetskom prekidaču T.



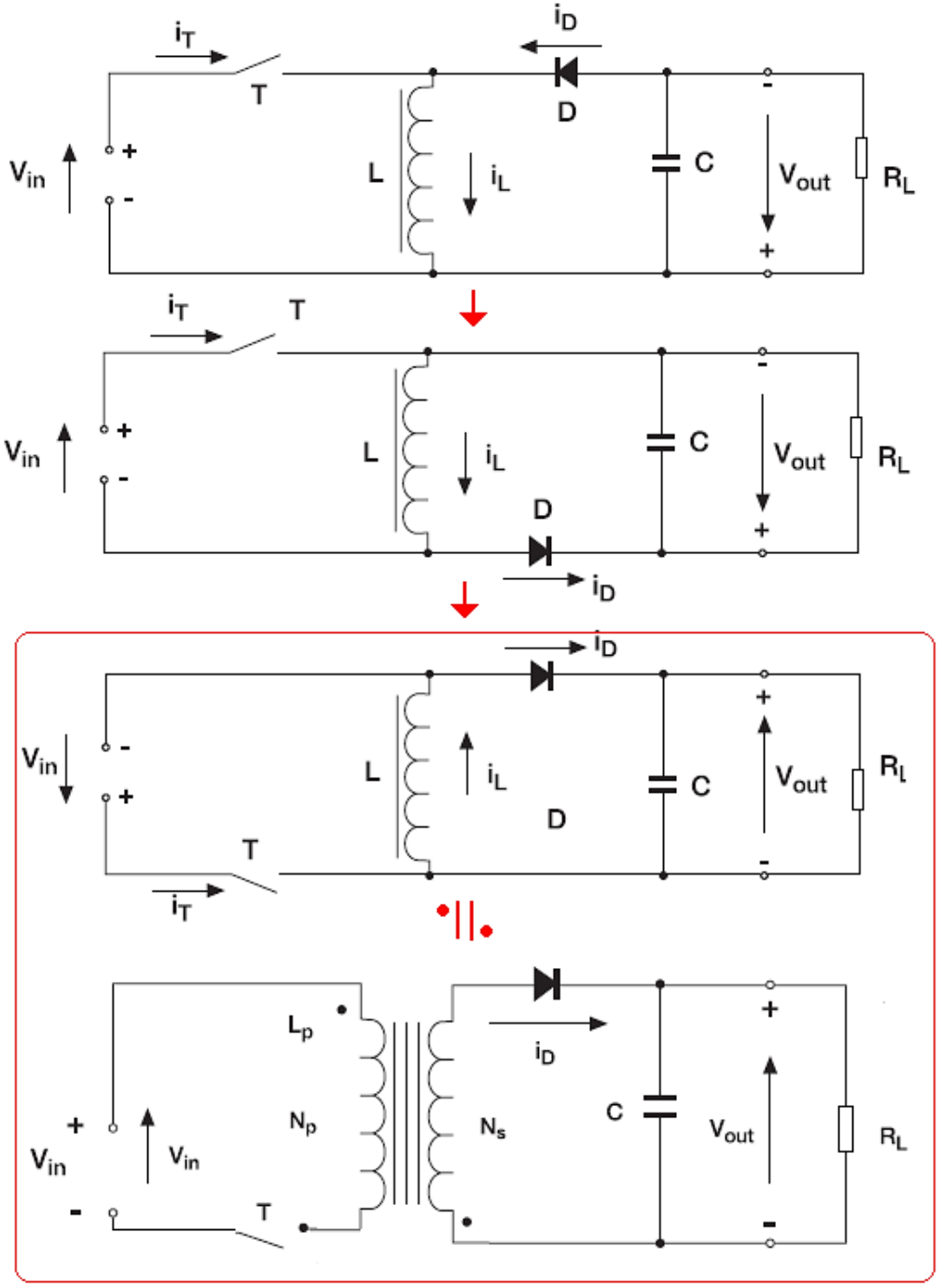
PREKIDNI (DISKONTINUALNI) REŽIM RADA

IZLAZNI NAPON

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{n} \cdot \frac{\delta}{1-\delta}$$



Pretvarač je vrlo sličan SPUŠTAČU/PODIZAČU !!



TOPOLOGIJA
SPUŠTAČ/PODIZAČ

(diodu D prebacujemo u suprotnu granu)-ekvivalentno

“Rotiramo” topologiju
Opet je sve ekvivalentno prethodnom

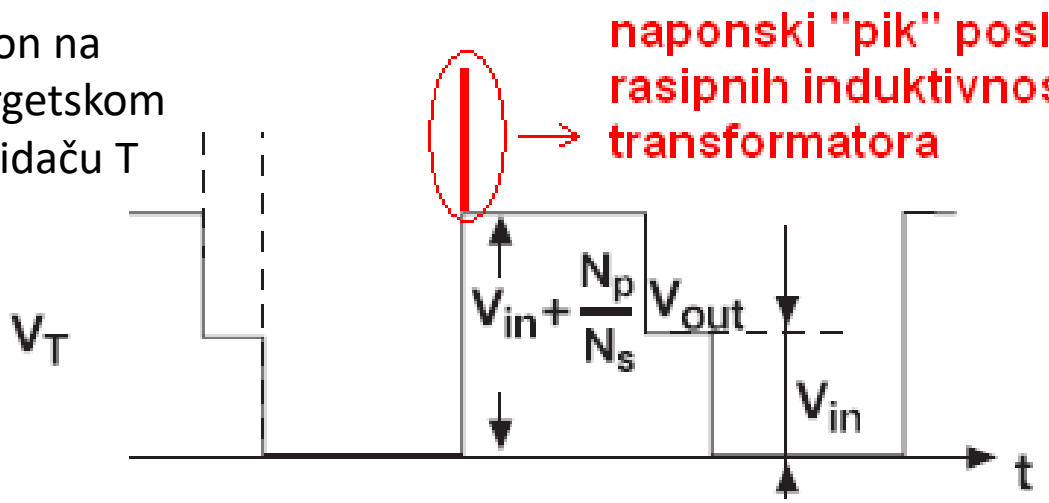
TOPOLOGIJA
SPUŠTAČ/PODIZAČ

TOPOLOGIJA
“OFF LINE FLYBACK”

DIMENZIONISANJE PREKIDAČA I DIODE

"Off-line flyback" u diskontinualnom režimu rada

Napon na energetskom prekidaču T



$n = N_p / N_s$

V_{CEV} **ili** $V_{DSS} \geq V_{inmax} + nV_{out}$ + **pik napona**

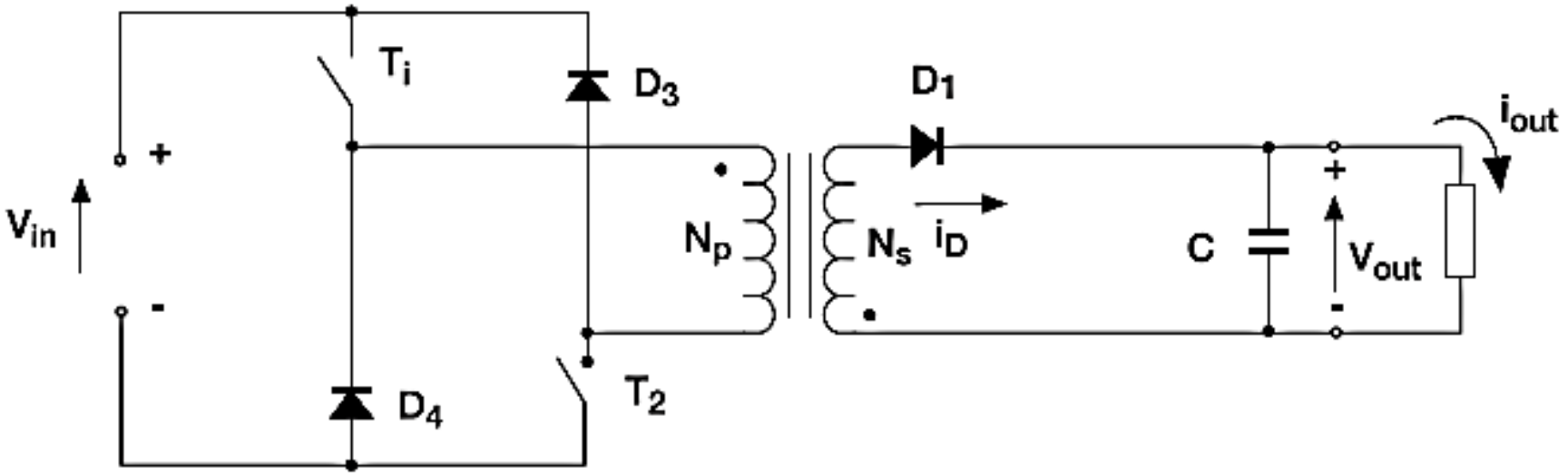
DIODA NA SEKUNDARU:

$$V_{RRM} \geq V_{out} + \frac{V_{inmax}}{n}$$

Problem je dakle "pik" napona na prekidaču
Upravo snaber RCD ublažava ovaj stres
Međutim snaber se izuzetno "greje" i disipira značajnu snagu!!!!

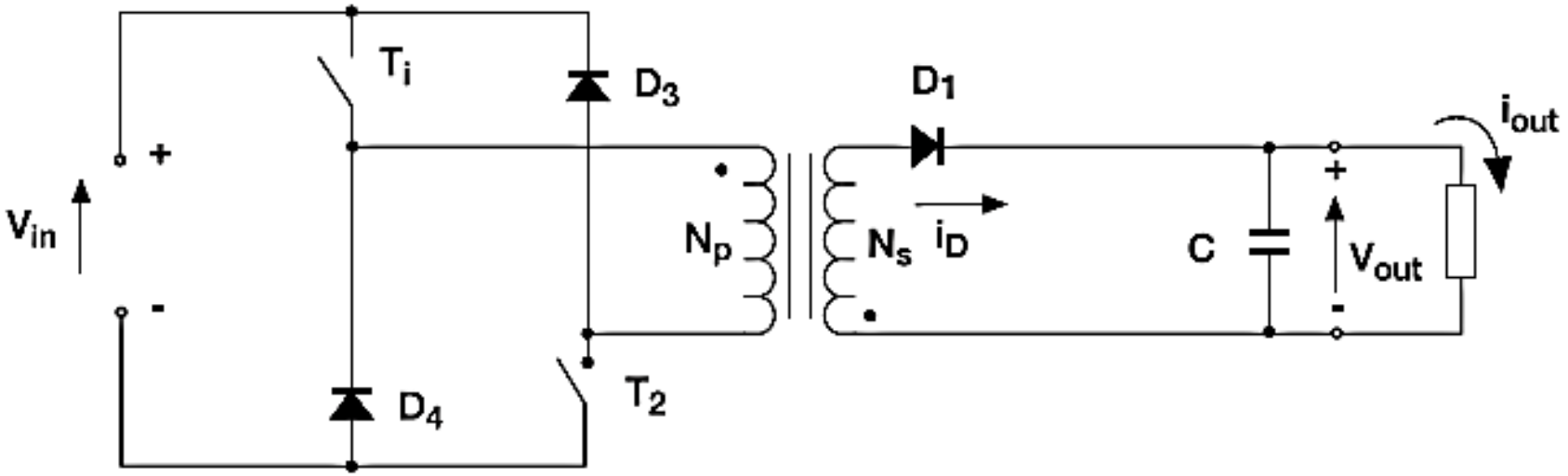
KAKO UBLAŽITI OVAJ STRES?

IZOLOVANI OFF-LINE FLYBACK SA DVA PREKIDAČA (T1,T2) I DVE POVRATNE DIODE (D3,D4)



Dve demagnetizacione diode (D1 i D2) obezbeđuju “nedisipativni” snaber za sistematsko ograničenje napona na prekidačima. Ovo omogućava rad na većim učestanostima i obezbeđuje bolju efikasnost u odnosu na topologiju sa jednim prekidačem.

Problem kod ove topologije je pobuda “gornjeg” prekidača T1. Topologija je asimetrična što je još jedna ozbiljna mana.



DIMENZIONISANJE PREKIDAČA T1, T2

$$V_{cev} \text{ ili } V_{DSS} > V_{in\,max}$$

DIMENZIONISANJE DIODA D3, D4

$$V_{RRM} \geq V_{inmax}$$

MAKSIMALNE I EFEKTIVNE VREDNOSTI STRUJA ENERGETSKOG PREKIDAČA I DIODE NA SEKUNDARU-diskontinualni režim

PREKIDAČ:

$$I_{Cpeak} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin} \delta_{max}}$$

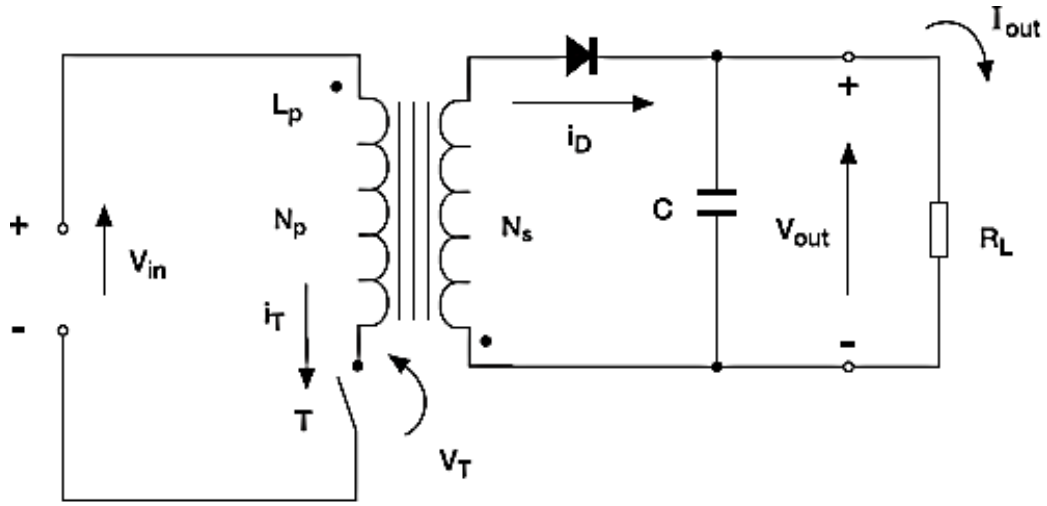
$$I_{Drms} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin} \sqrt{(3\delta_{max})}}$$

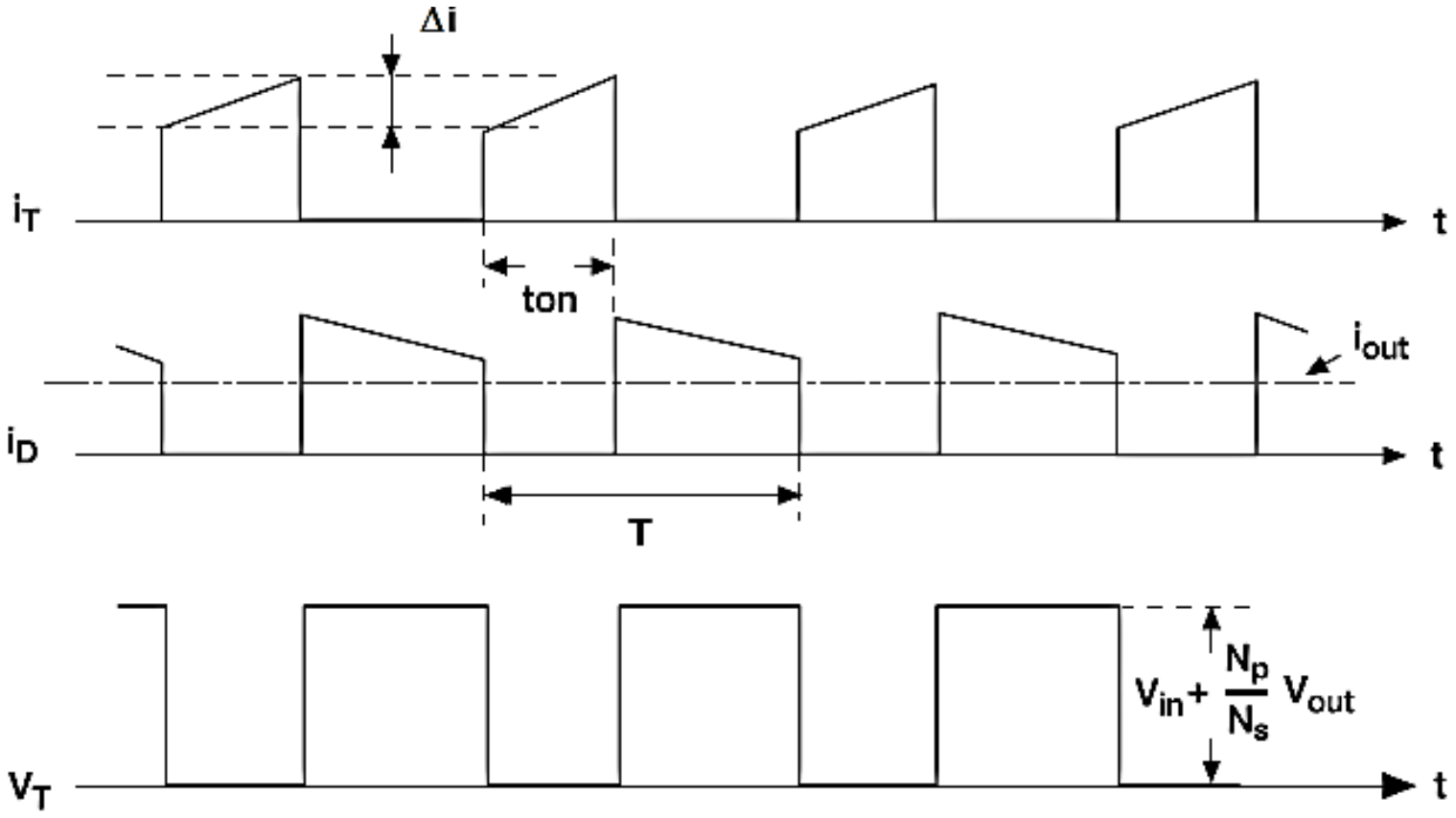
DIODA:

$$I_{Fpeak} \geq \frac{2P_{out}}{V_{out} \quad (1-\delta_{max})}$$

$$I_{F(AV)} \geq \frac{P_{out}}{V_{out}}$$

NEPREKIDNI (KONTINUALNI) REŽIM RADA





MAKSIMALNE I EFEKTIVNE VREDNOSTI STRUJA ENERGETSKOG PREKIDAČA I DIODE NA SEKUNDARU- kontinualni režim

PREKIDAČ:

$$I_{Cpeak} \geq \frac{2P_{outmax}}{\eta\, \delta_{max}\, V_{inmin}\,(1+A)}$$

$$I_{Drms} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin}} \sqrt{\left(\frac{(1 + A + A^2)}{3\delta_{max}}\right)}$$

$$A \geq = \frac{I_{peak} - \Delta I}{I_{peak}}$$

DIODA:

$$I_{Fpeak} \geq \frac{2P_{out}}{V_{out}\,(1 - \delta_{max})(1+A)}$$

$$I_{F(AV)} \geq \frac{P_{out}}{V_{out}}$$

DISKONTINUALNI REŽIM

- PREDNOSTI

- Nulti tzv. “turn-on” gubici na energetskom prekidaču
- Dobar tranzijentni *line/load* odziv
- Jednostavna stabilizacija kola povratn sprege (jedan pol u prenosnoj funkciji)
- Vreme oporavka diode nije kritično (struja pada u nulu pre pojave inverznog napona na diodi)

- MANE

- Velike vršne vrednosti struje prekidača i diode
- Relativno velika “talasnost” izlaznog napona
- $\mathbf{C}_{\text{out (disc.)}} \gg 2 \times \mathbf{C}_{\text{out (cont.)}}$

KONTINUALNI REŽIM

- PREDNOSTI

- Vršna vrednost struje diode i prekidača su polovina vrednosti koje se imaju u duskontinualnom režimu
- Mala “talasnost” izlaznog napona

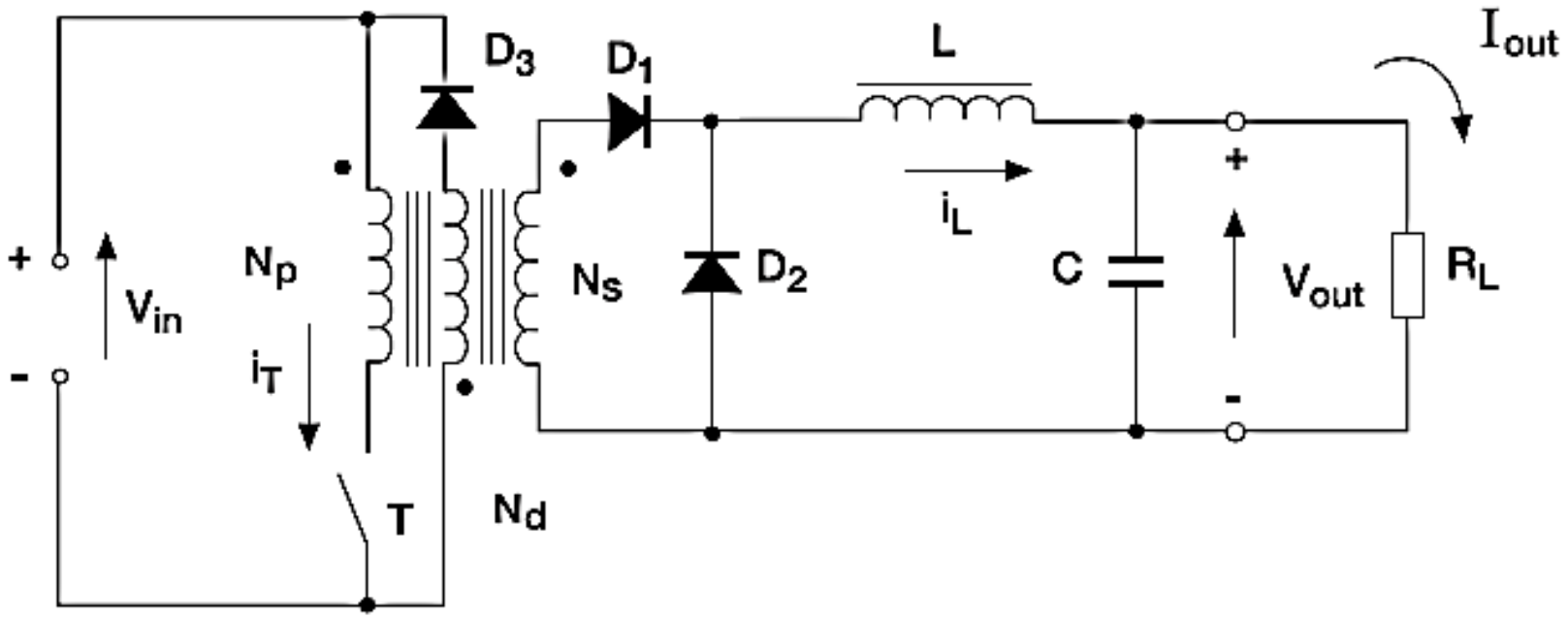
  -Cout (cont.) » 0.5 **C**out (disc.)

- MANE

- Relativno veliki gubici na diodi u toku vremena oporavka
- Problemi kod stabilizacije kola povratne sprege

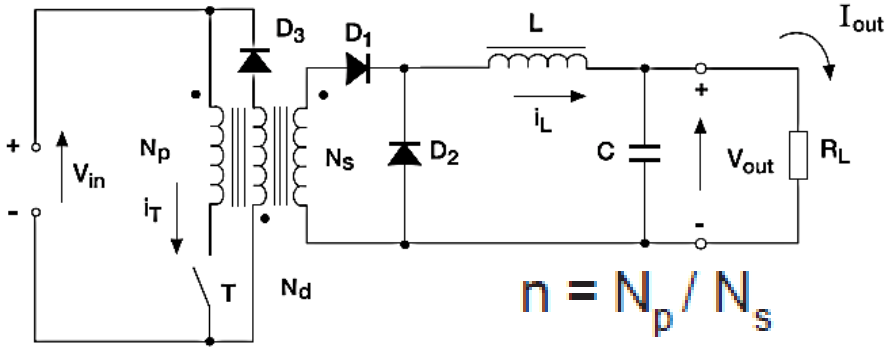
“Off line forward” regulatori

IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA JEDNIM PREKIDAČEM



FORWARD pretvarač prebacuje direktno energiju iz ulaznog izvora na opterećenje u intervalu "on-time" tj. kada je energetski prekidač T uključen. U intervalu kada je prekidač T isključen ("off-time"), nagomilana energija se kroz izlaznu induktivnost L i diodu D2 zatvara kroz opterećenje, slično kao kod čopera. I ova topologija se može realizovati sa jednim ili dva energetska prekidača. Izlazna snaga koja se može postići je do 300W, ukoliko se koristi jedan prekidač, a oko 1kW ukoliko se koriste dva prekidača.

IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA JEDNIM PREKIDAČEM (topologija i talasni oblici)



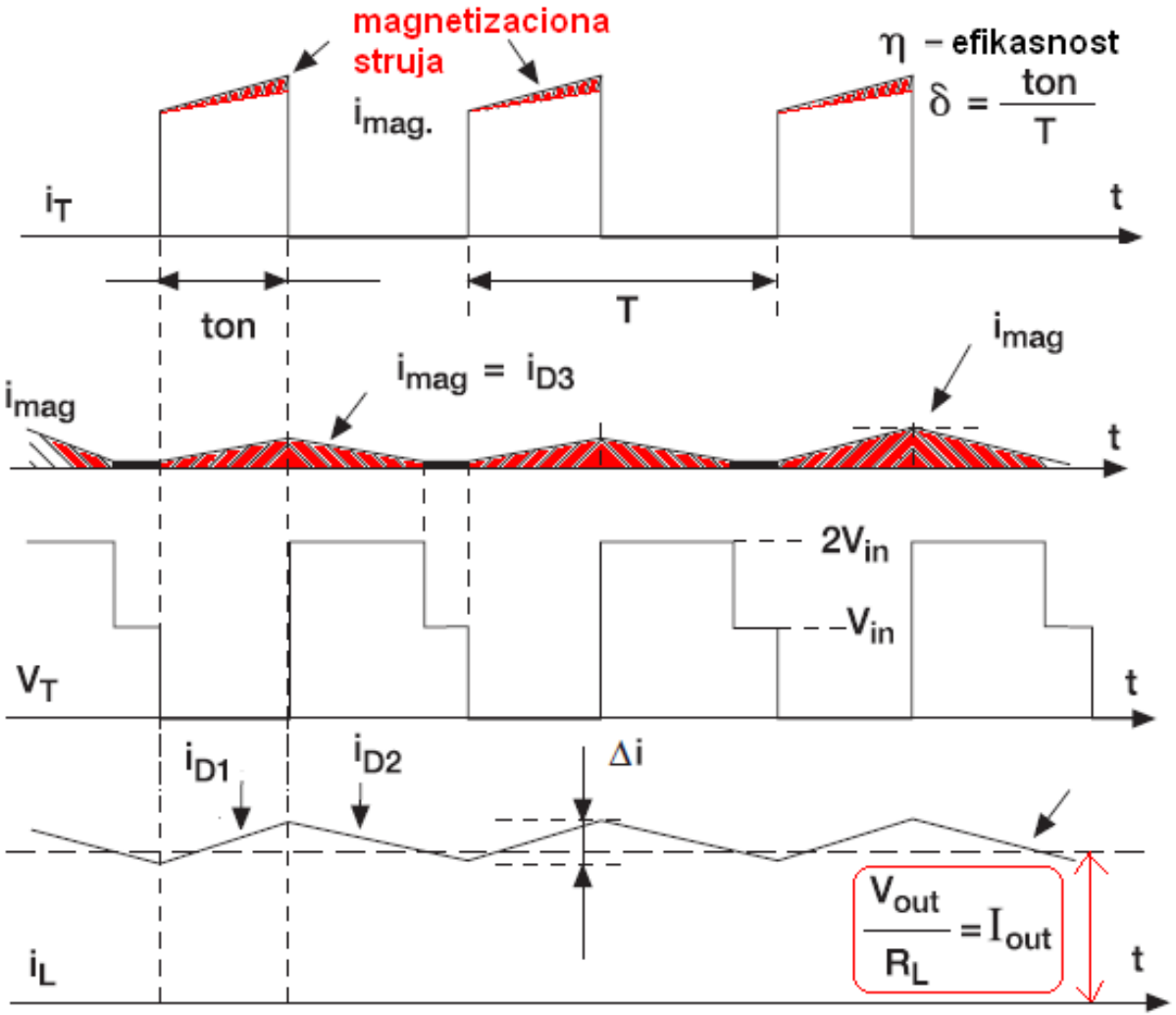
$n = N_p / N_s$

Izlazni napon

$$V_{out} = \delta \cdot \frac{V_{in}}{n}$$

Nd- demagnetizacioni namotaj

Obično je Np=Nd



Tokom demagnetizacije prekidač T "trpi" dvostruki napon Vin (teoretski), ali zbog rasipanja on može biti i dodatno uvećan za oko 80%

DIMENZIONISANJE PREKIDAČA

$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax}\left[1 + \frac{N_p}{N_d}\right] + \text{pik napona usled rasipnih ind.}$$

$$I_{cpeak} \geq \frac{1.2.P_{out}}{\eta V_{inmin} \cdot \delta_{max}}$$

$$I_{Drms} \geq \frac{1.2.P_{out}}{\eta V_{inmin} \cdot \sqrt{\delta_{max}}}$$

DIMENZIONISANJE DIODA

D1:

$$V_{RRM} \geq V_{inmax} \cdot \frac{N_s}{N_d} + \text{pik napona usled rasipnih ind.}$$

$$I_{F(av)} \geq I_{out} \cdot \delta_{max}$$

D2:

$$V_{RRM} \geq \frac{V_{inmax} \cdot (V_{out} + V_F)}{V_{inmin} \cdot \delta_{max}}$$

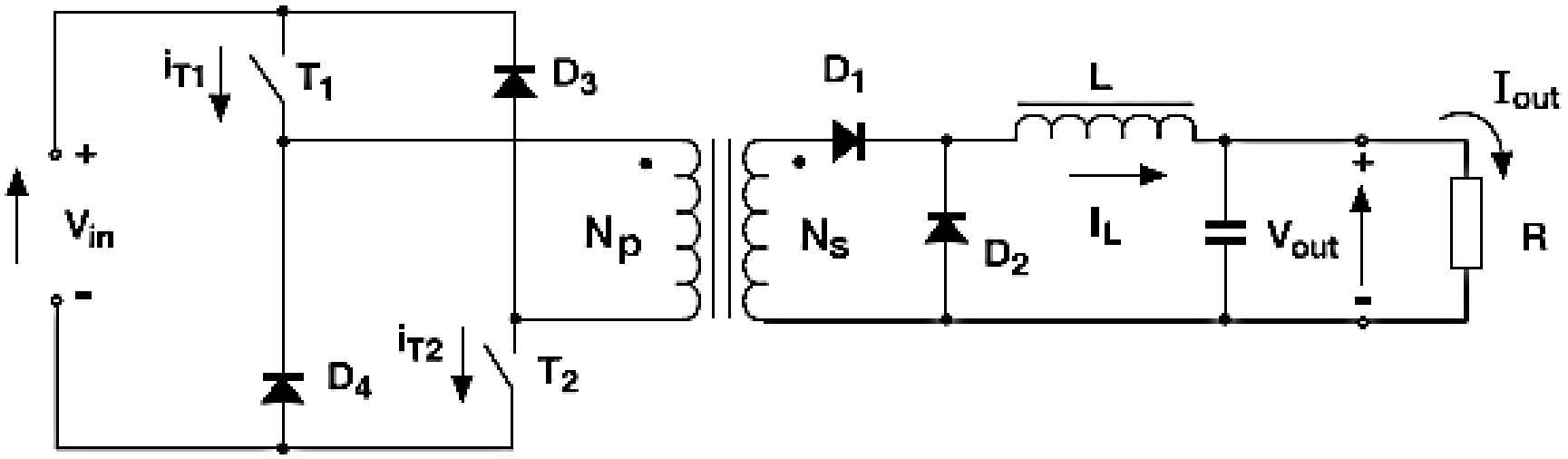
$$I_{F(av)} \geq I_{out}$$

D3:

$$V_{RRM} \geq \left[1 + \frac{N_d}{N_p}\right] V_{inmax}$$

$$I_{F(av)} \geq \frac{I_{magnpeak}}{2} \cdot \delta_{max}$$

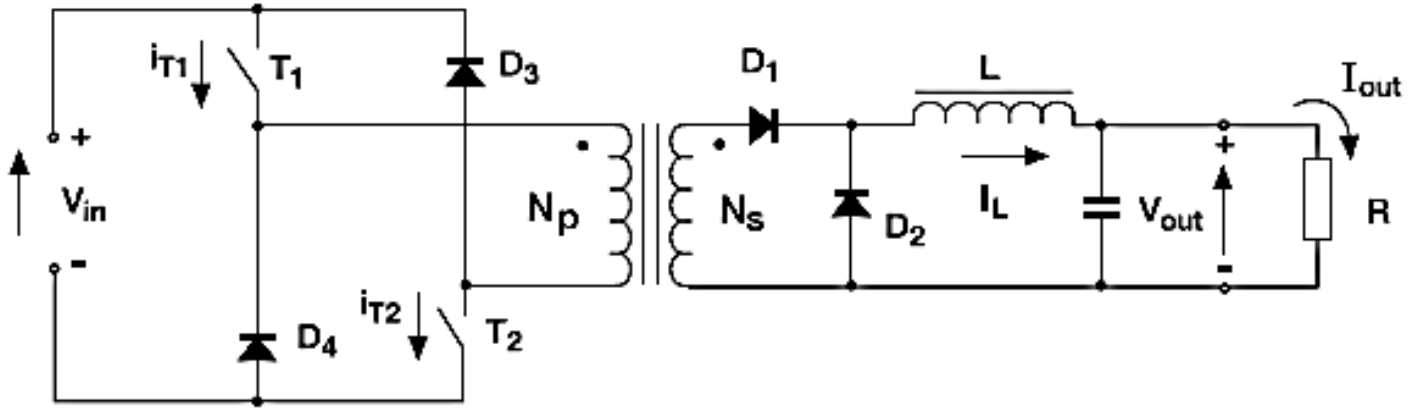
IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA DVA PREKIDAČA



U ovom slučaju nema potrebe za demagnetizacionim namotajem, ali moraju se dodati dve povratne diode D3 i D4

Mana: zahtevno drajversko kolo “gornjeg” prekidača T1

IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA DVA PREKIDAČA (topologija i talasni oblici)

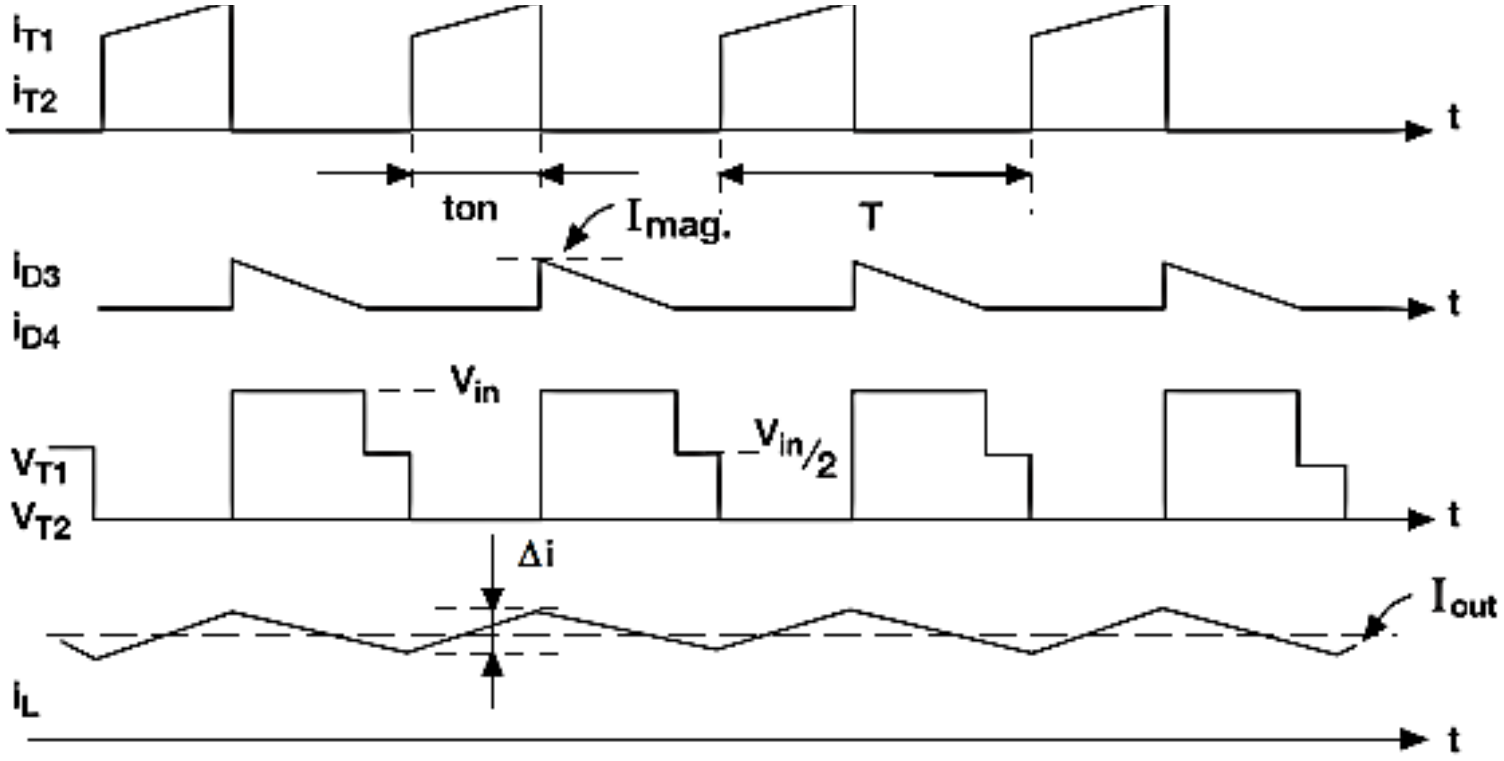


$\delta = \frac{ton}{T}$

η = efikasnost

$f = \frac{1}{T}$

L_p = induktivnost primara



DIMENZIONISANJE PREKIDAČA I DIODA

prekidač

$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax}$$

$$I_{Drms} \geq \frac{1.2.P_{out}}{\eta V_{inmin} \cdot \sqrt{\delta_{max}}}$$

diode

FORWARD D1:

$$V_{RRM} \geq \frac{V_{inmax}\ (V_{out} + V_F)}{V_{inmin} \cdot \delta_{max}}$$

$$I_{F(av)} \geq I_{out} \cdot \delta_{max}$$

FREEWHEELING D2:

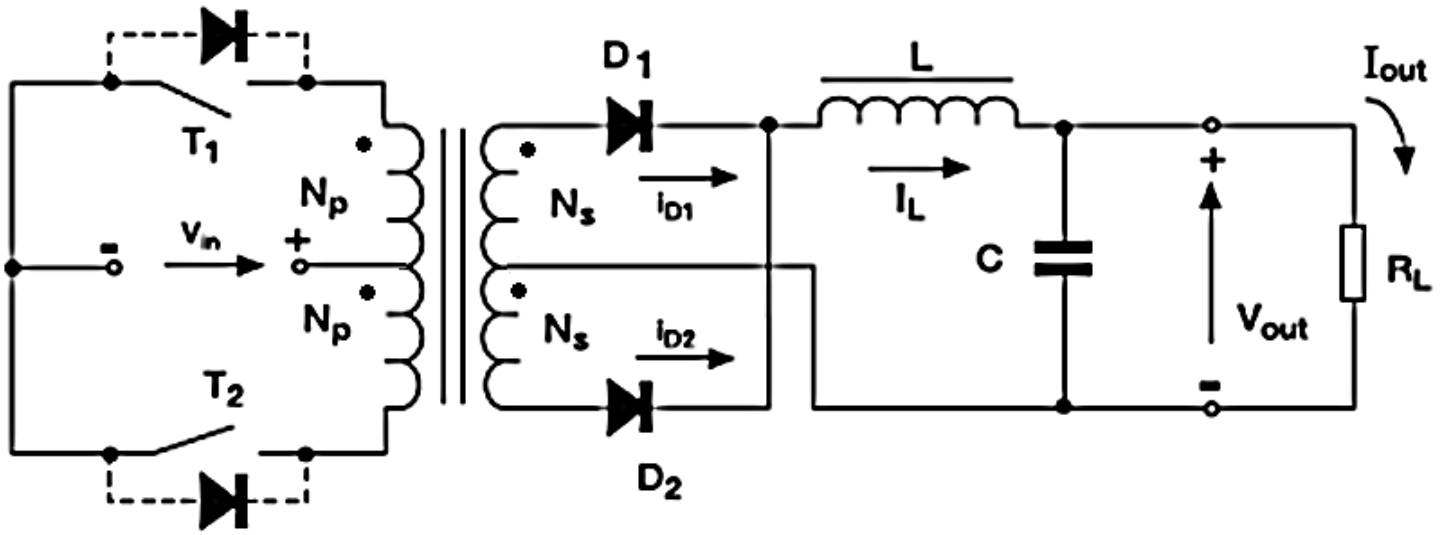
$$V_{RRM} \geq V_{inmax}\ (V_{out} + V_F)$$

$$I_{F(av)} \geq I_{out}$$

SIMETRIČNI DC-DC pretvarači sa galvanskom izolacijom

- U topologijama se koristi više prekidačkih elemenata
- Bolje je iskorišćeno magnetno kolo u odnosu na asimetrične pretvarače
- Malih su dimenzija i shodno tome i male težine
- Najčešće korišćene strukture su:
  - PUSH/PULL
  - HALF BRIDGE (polumost sa kondenzatorima)
  - FULL BRIDGE (puni most)

PUSH-PULL pretvarač



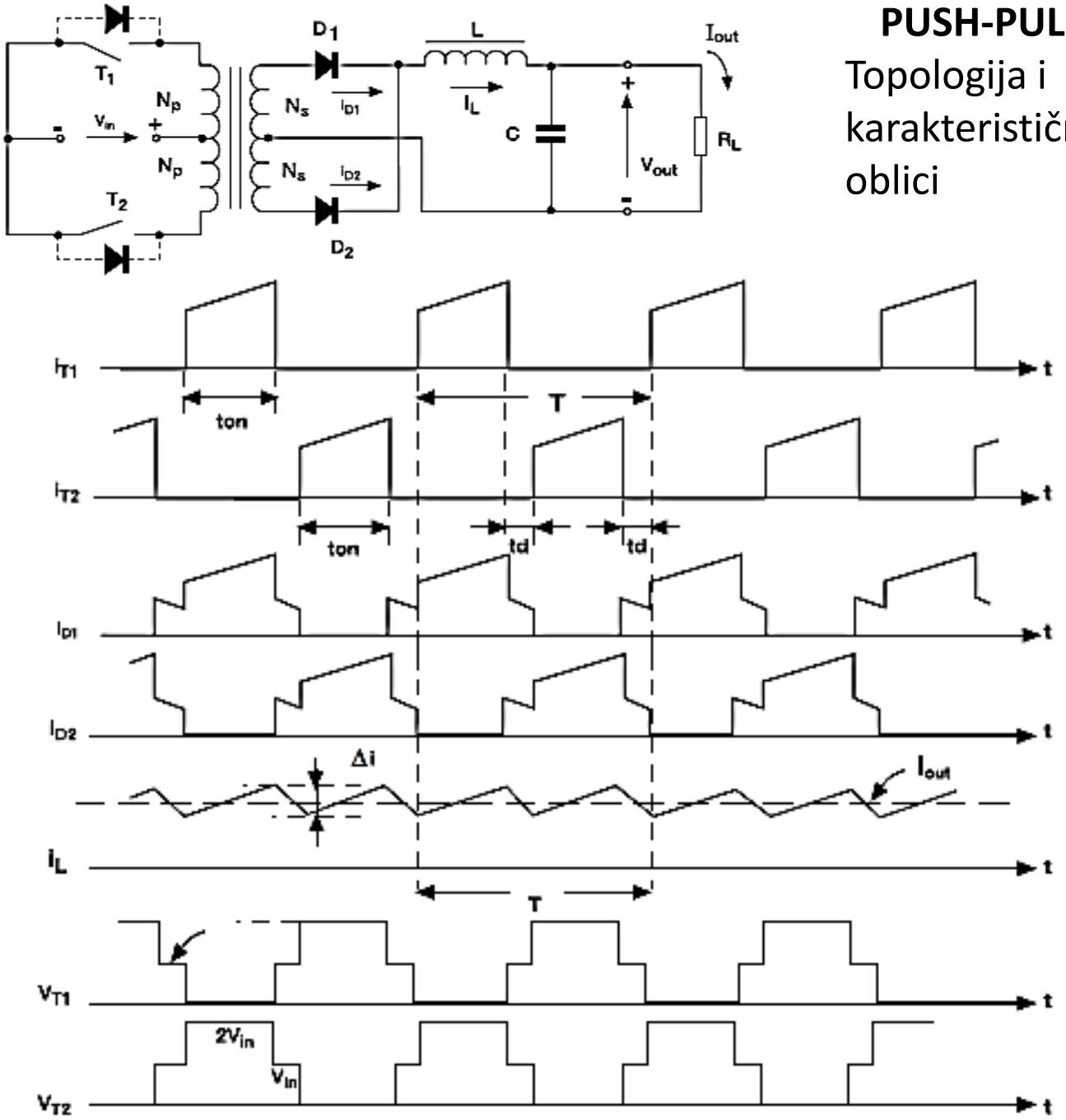
-Prekidači T1 i T2 se naizmenično uključuju sa prekidačkom učestanošću **f.**
-Sekundarno kolo radi sa dvostrukom prekidačkom učestanošću.
-Obavezno je u pobudno kolo prekidača implementirati tzv. *mrtvo vreme* („dead-time“) **td**
- jednostavno pobudno koloprekidača (referisani su prema masi)

IZLAZNI NAPON: $V_{out} = 2\frac{\delta V_{in}}{n}$

$$\delta = \frac{ton}{T}$$

PUSH-PULL pretvarač

Topologija i karakteristični talasni oblici



DIMENZIONISANJE PREKIDAČA i DIODA

prekidači

$$I_{Cpeak} \geq \frac{P_{out}}{\eta V_{inmin}}$$

vršna struja

$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq 2V_{inmax} + \text{pik napona usled rasipnih ind.}$$

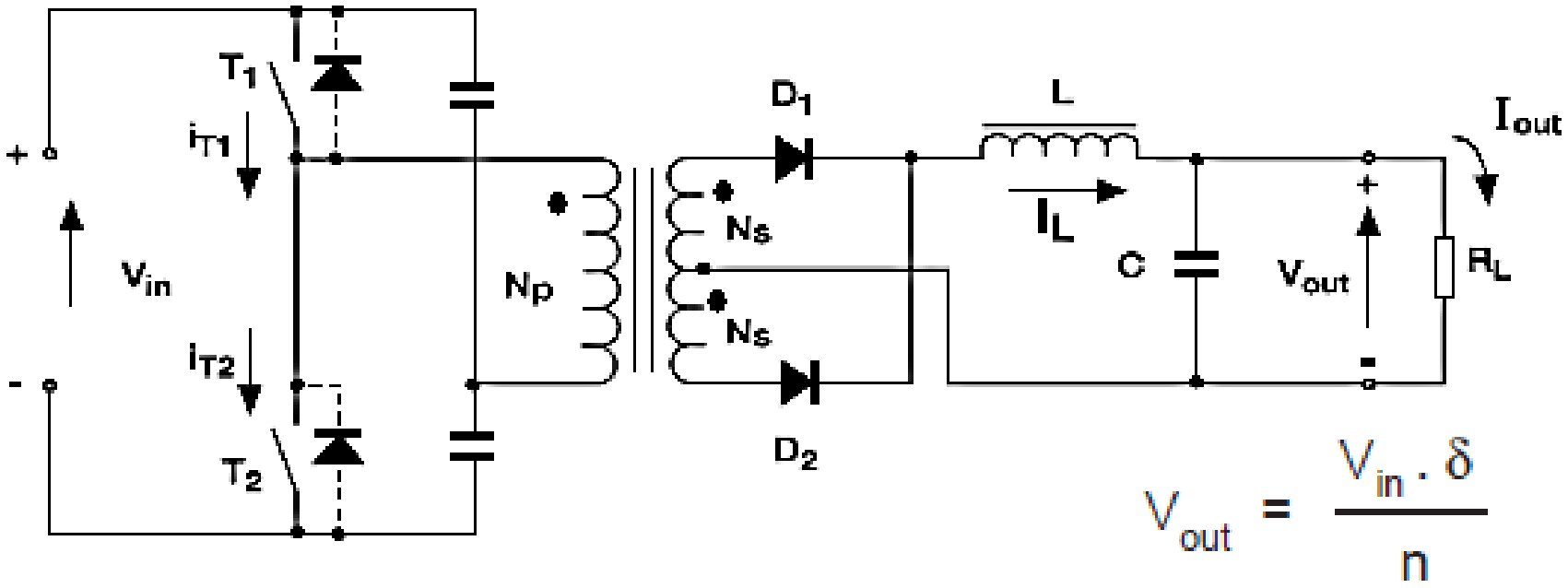
napon

diode

$$V_{RRM} \geq \frac{(V_{out} + V_F)\, V_{inmax}}{\delta_{max}.V_{inmin}} + \text{pik napona usled rasipnih ind.}$$

$$I_{F(av)} \geq \frac{I_{outmax}}{2}$$

HALF BRIDGE (polumosni pretvarač)



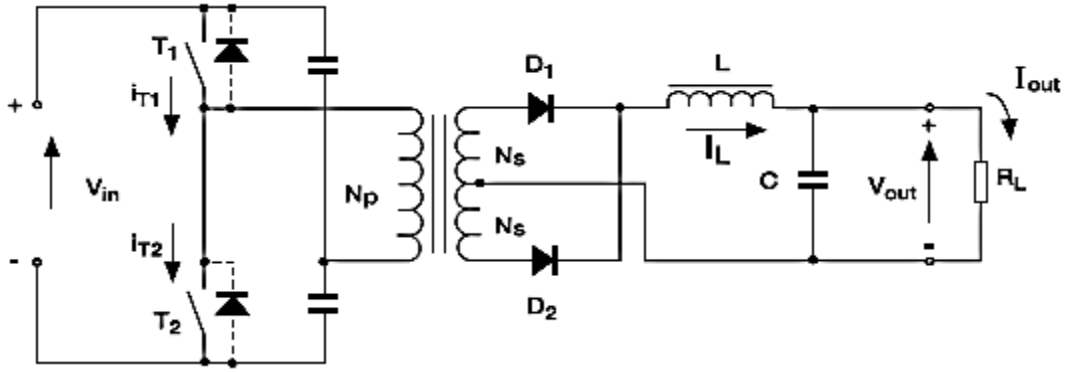
$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot \delta}{n}$$

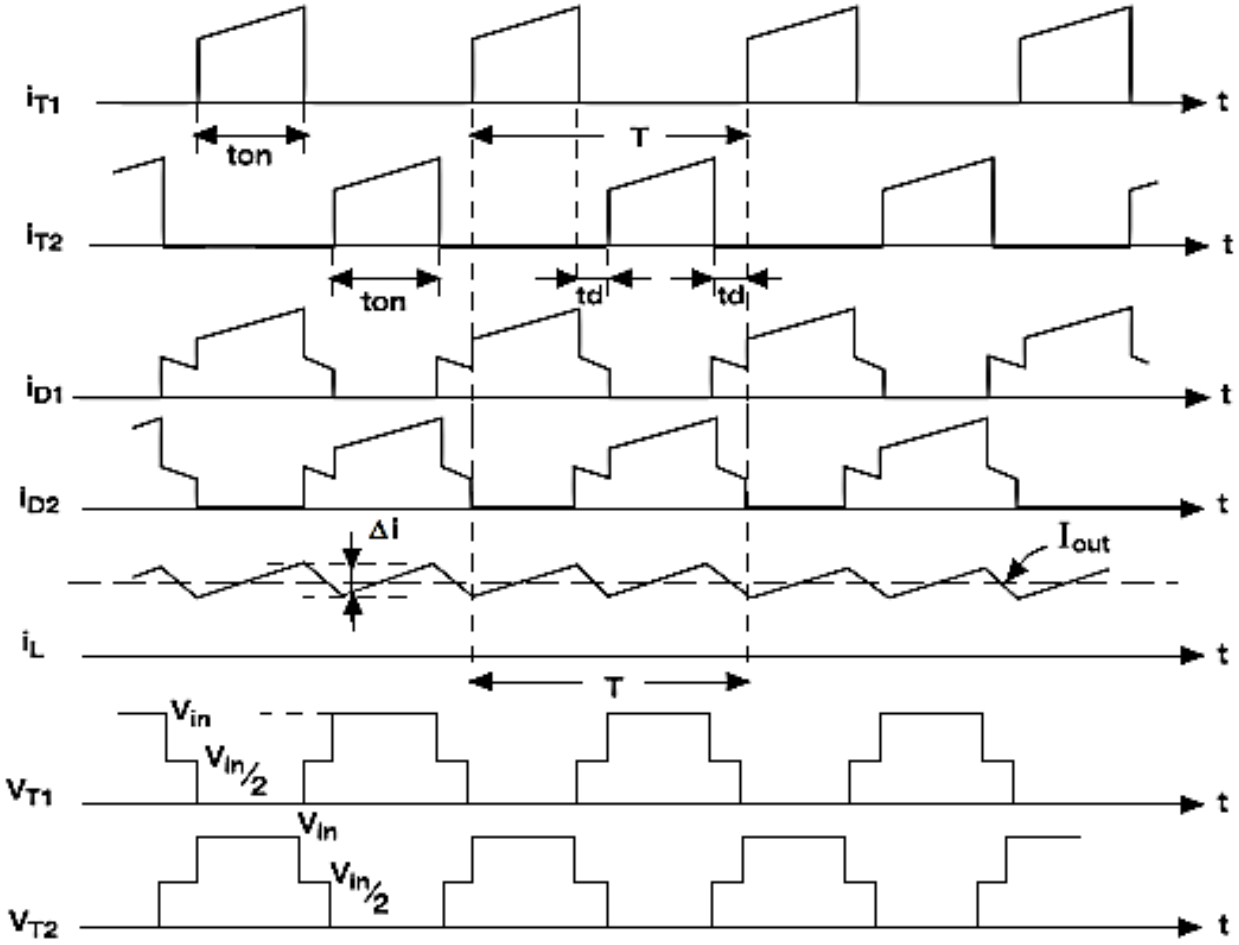
-Ova topolgija se koristi za izlazne snage do 500W. Kao i u slučaju *push-pull* pretvarača, prekidači T1 i T2 se naizmenično uključuju tokom t_{on}.

-Kondenzatori vezani na red , a onda u paraleli sa ulaznim izvorom obezbeđuju da svaki od prekidača "trpi" napon V_{in}.

- Pobuda "gornjeg" prekidača je zahtevna (to mu je mana)

HALF BRIDGE
(polumosni pretvarač)
TOPOLOGIJA I KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI





IZLAZNI NAPON

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot \delta}{n}$$

DUTY CYCLE

$$\delta = \frac{ton}{T}$$

Efikasnost (%)

$$\eta$$

DIMENZIONISANJE PREKIDAČA i DIODA

prekidači

$$I_{Cpeak} \text{ ili } I_{Dpeak} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin}}$$

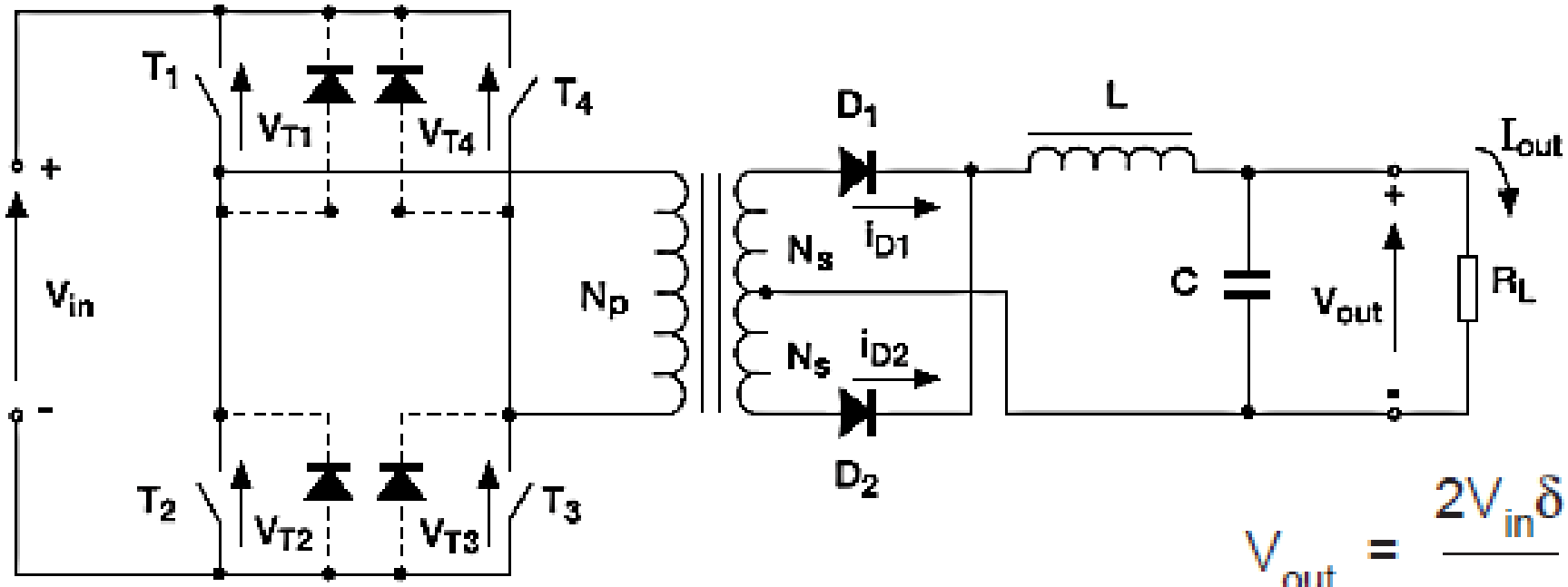
$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax}$$

diode

$$V_{RRM} \geq \frac{(V_{out} + V_F) \cdot V_{inmax}}{\delta_{max} \cdot V_{inmin}} + \text{pik usled rasip.ind.}$$

$$I_{F(av)} \geq \frac{I_{outmax}}{2}$$

FULL BRIDGE (puni most)



$$V_{out} = \frac{2V_{in}\delta}{n}$$

•Ova topologija se koristi za snage od 500W do 2kW

•Nekada se vrši paralelovanje transfrmatora kako bi se povećala izlazna snaga

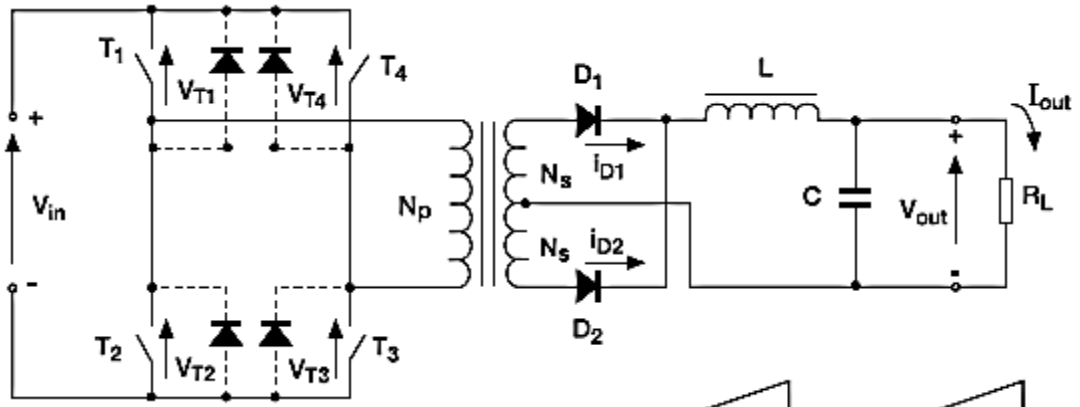
T1, T3 i T2,T4 se naizmenično uključuju sa prekidačkom učestanošću **f**

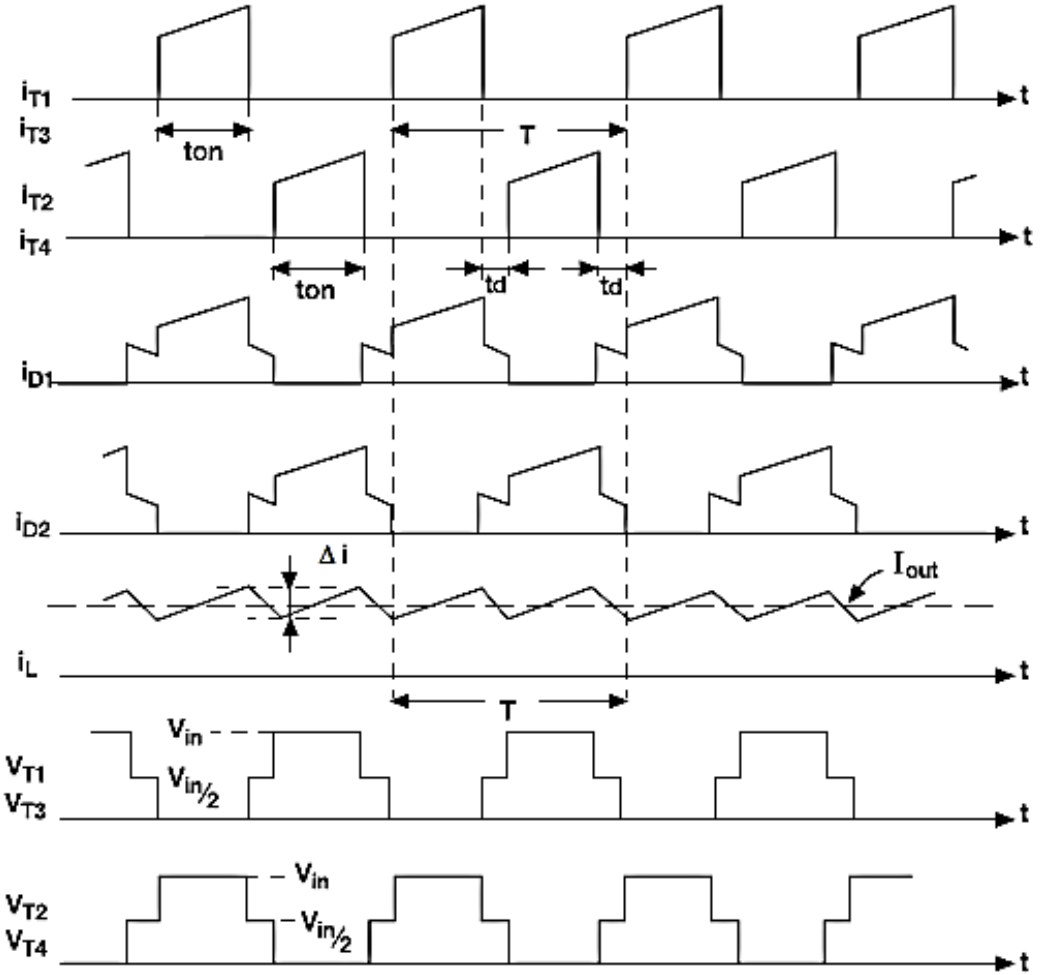
•**Dobijena izlazna snaga je dvostruko veće u odnosu na HALF-BRIDGE**

MANE: zahtevaju se 4 prekidača i 4 diode; pobuda T1 i T4 je zahtevna!!**!**

FULL BRIDGE (puni most)

Topologija i talasni oblici





DIMENZIONISANJE PREKIDAČA i DIODA

prekidači

$$I_{Cpeak} \text{ ili } I_{Dpeak} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin}}$$

$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax}$$

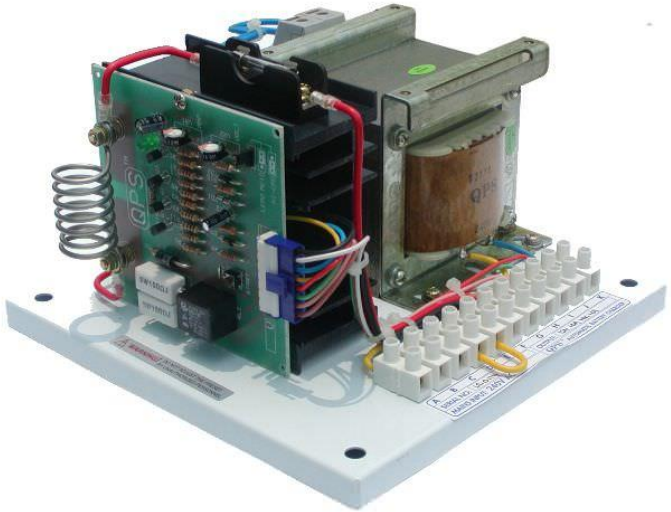
diode

$$V_{RRM} \geq \frac{(V_{out} + V_F) \cdot V_{inmax}}{\delta_{max} \cdot V_{inmin}} + \text{pik usled rasip.ind.}$$

$$I_{F(av)} \geq \frac{I_{outmax}}{2}$$

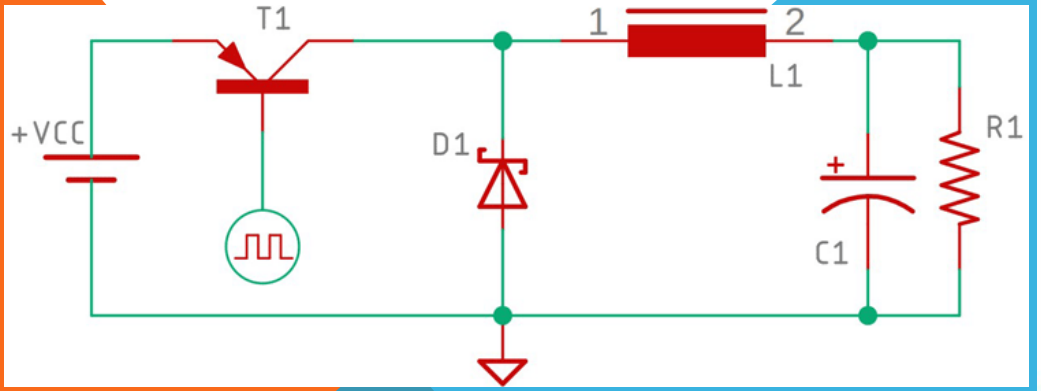
HVALA NA PAŽNJI!!

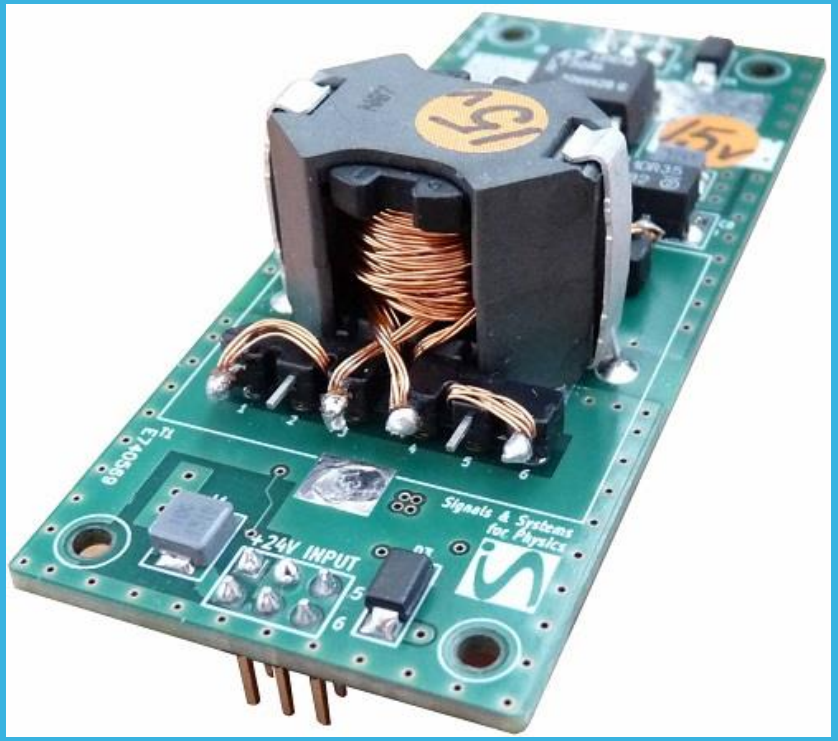
PITANJA??



VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD
STUDIJSKI PROGRAM: NET
PREDMET: Električni Pretvarači Snage 2021

PRIMER DIMENZIONISANJA DC-DC SPUŠTAČA NAPONA





PREDMETNI PROFESOR:
DR ŽELJKO DESPOTOVIĆ, DIPL.EL.INŽ.

OSNOVNA KONFIGURACIJA TOPOLOGIJE

Continuous Conduction Mode (CCM)

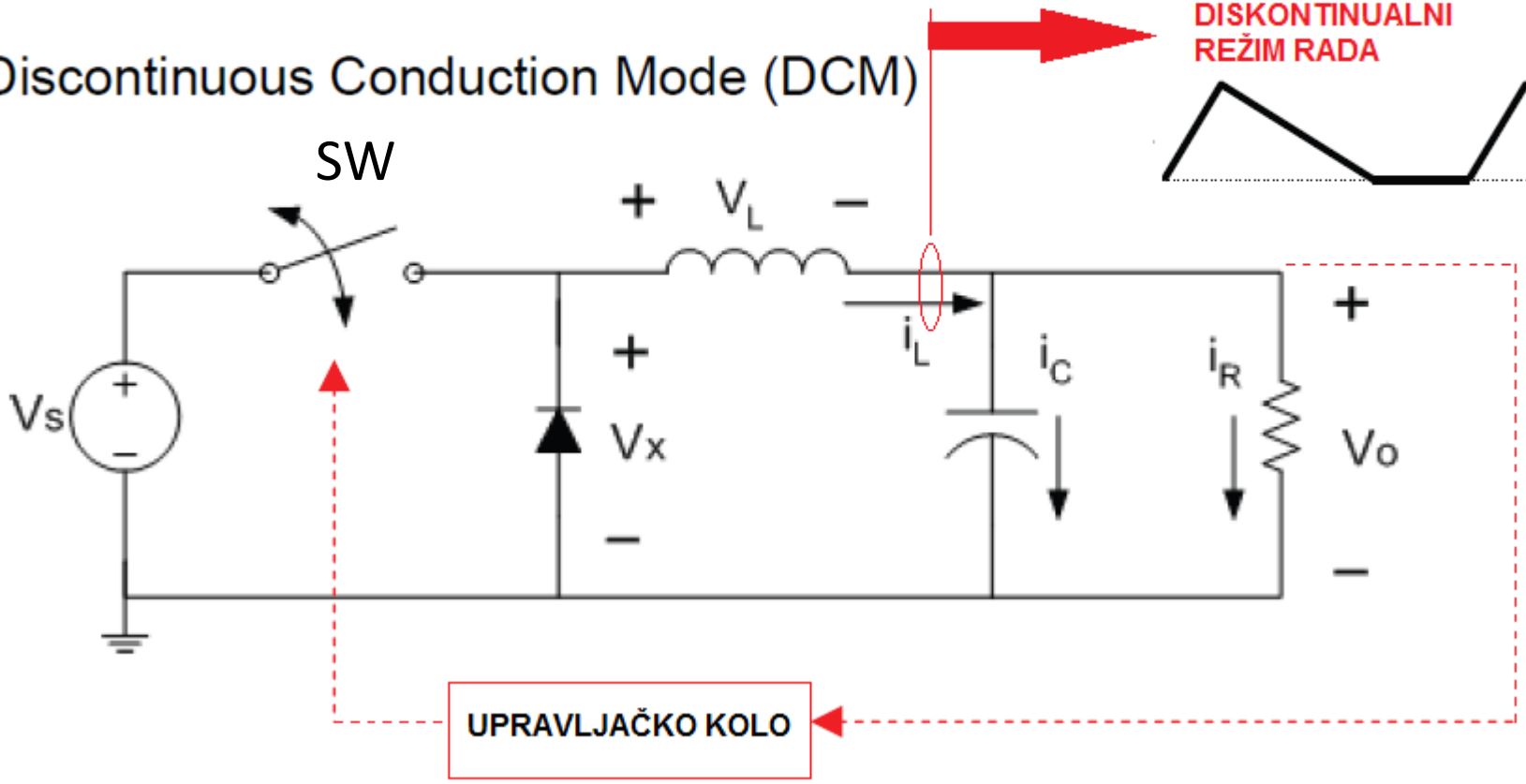
KONTINUALNI REŽIM RADA

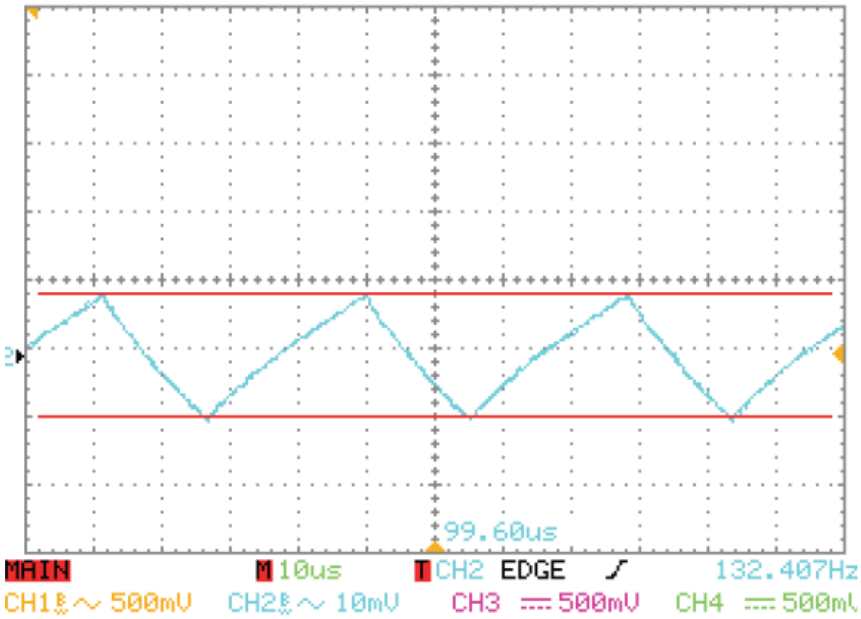
CCM

Discontinuous Conduction Mode (DCM)

DISKONTINUALNI REŽIM RADA

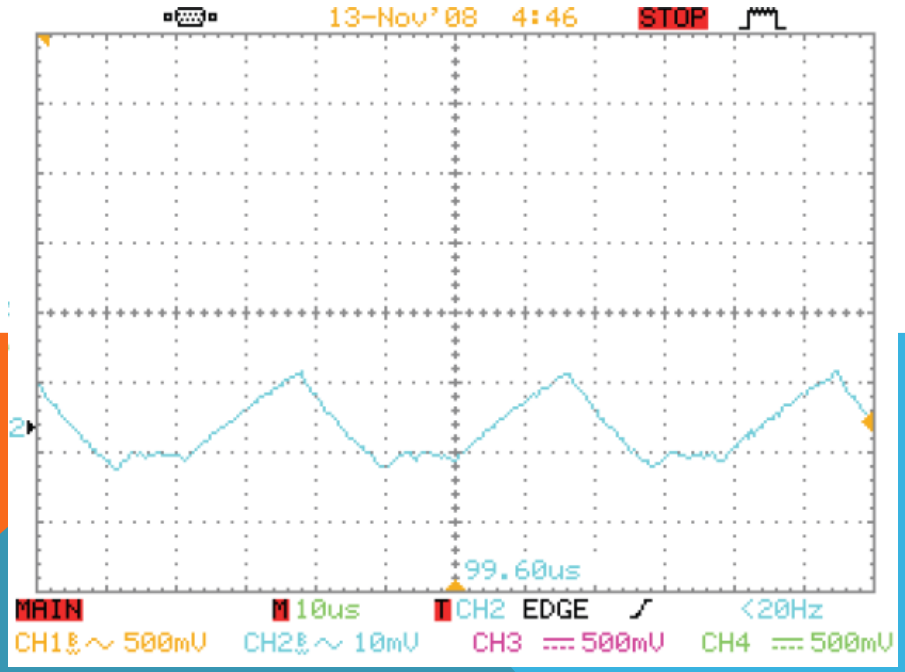
DCM





KAKO TO IZGLEDA U STVARNOSTI?

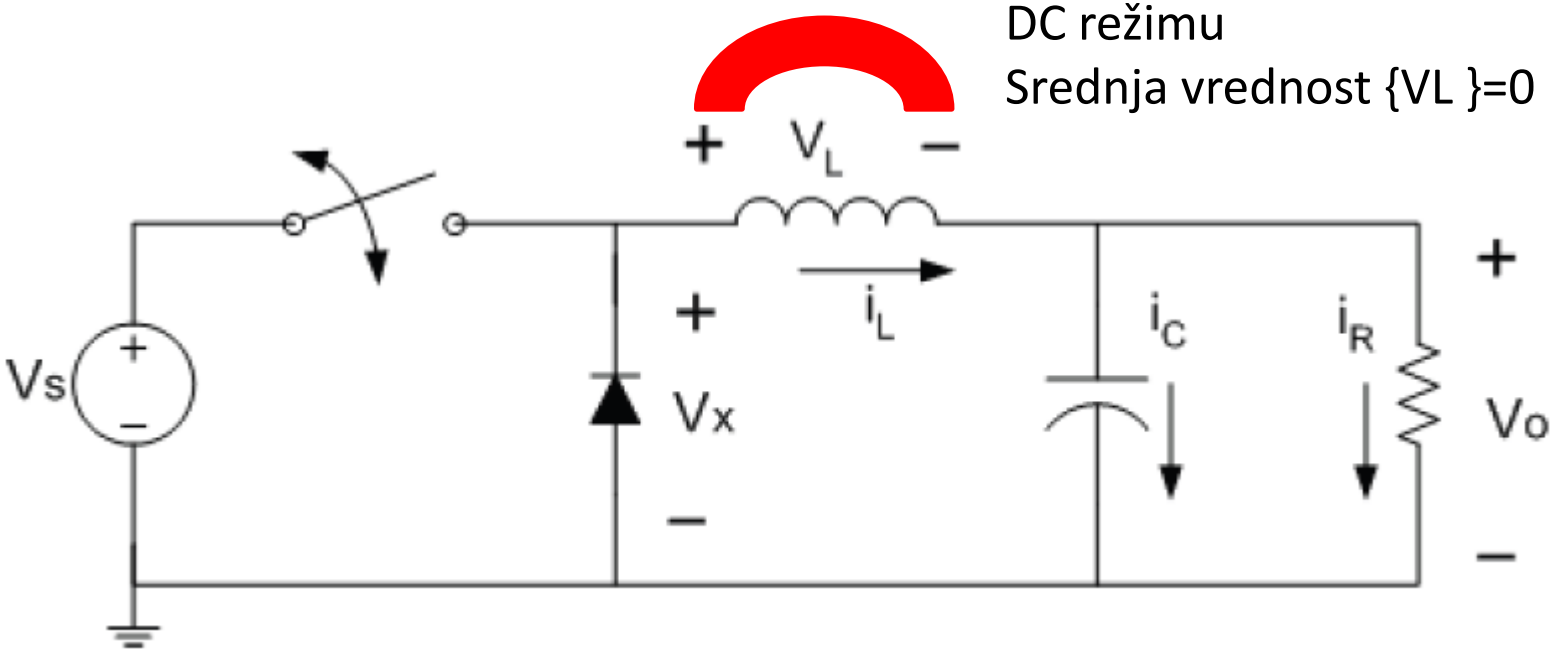
CCM režim
ili KONTINUALNI



DCM režim
ili DISKONTINUALNI

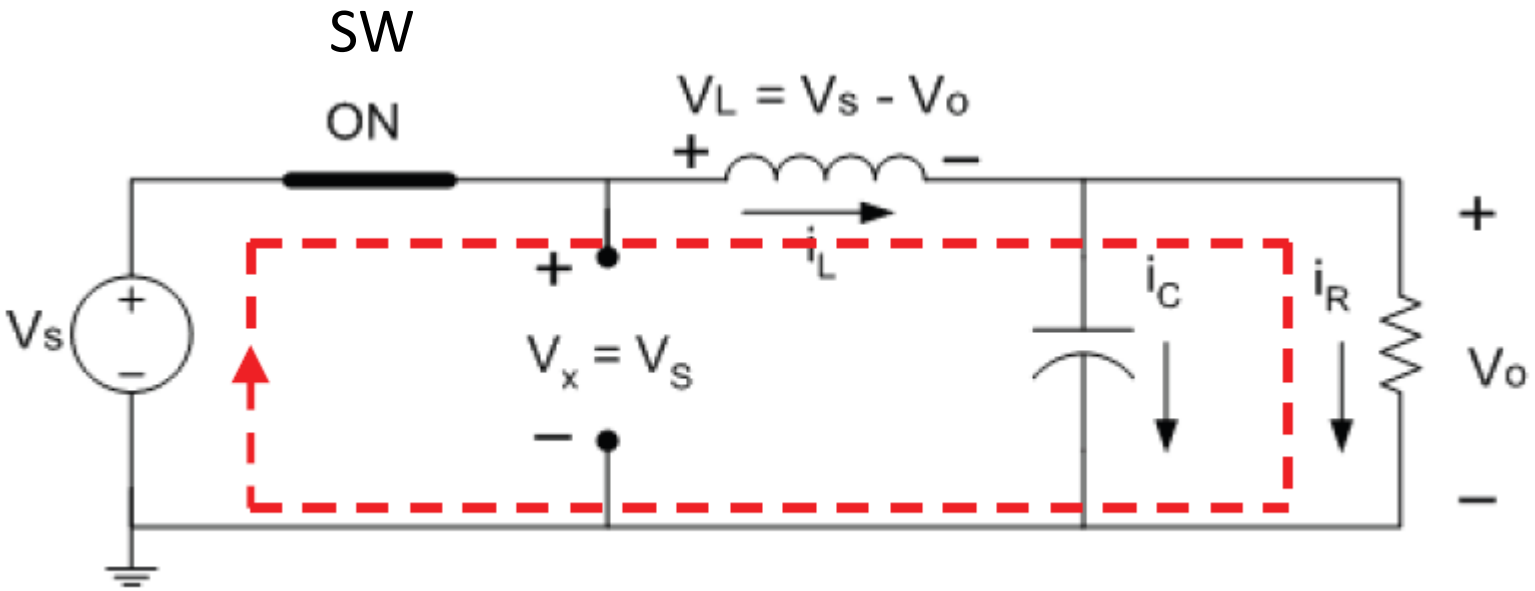
Induktivnost je KRATAK SPOJ u DC režimu

Srednja vrednost {VL }=0



$$\overline{V_L} = v_{Lon} t_{on} + v_{Loff} t_{off} = 0$$

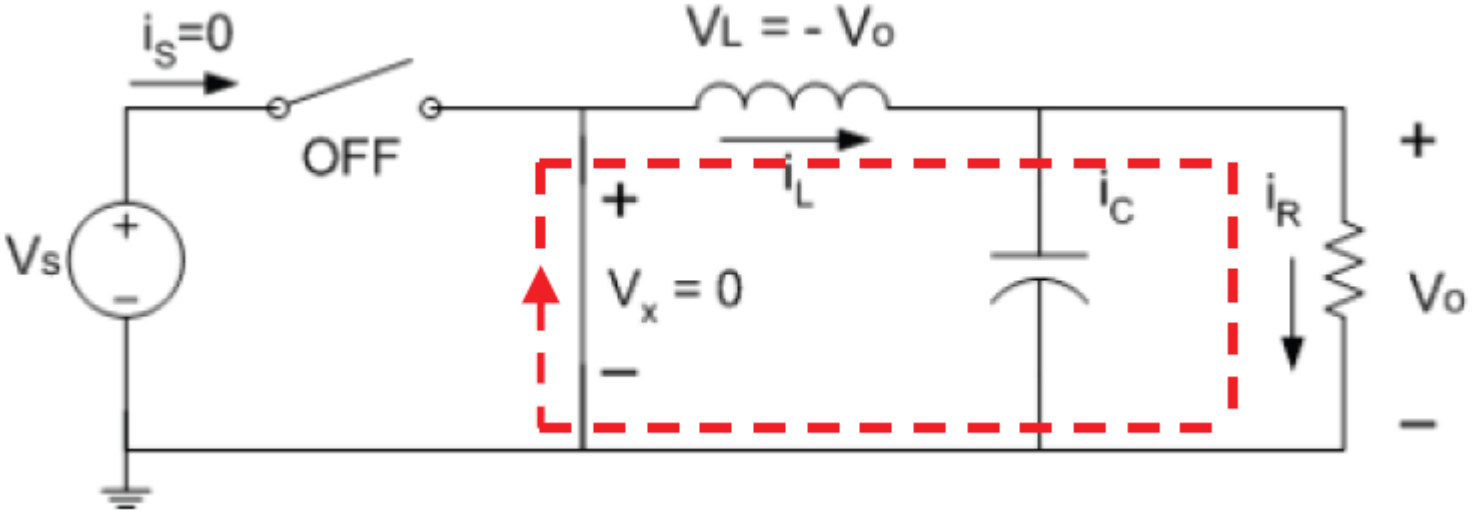
Prekidač SW zatvoren (režim u intervalu ton)



$$v_{Lon} = V_S - V_O$$

$$D = t_{on}/T$$

Prekidač SW otvoren (režim u intervalu toff)



$$v_{Loff} = -V_O$$

$$t_{off} = T - t_{on} = T - DT$$

$$t_{off} = (1-D)T$$

Prenosna funkcija pretvarača u ustaljenom režimu u modu CCM

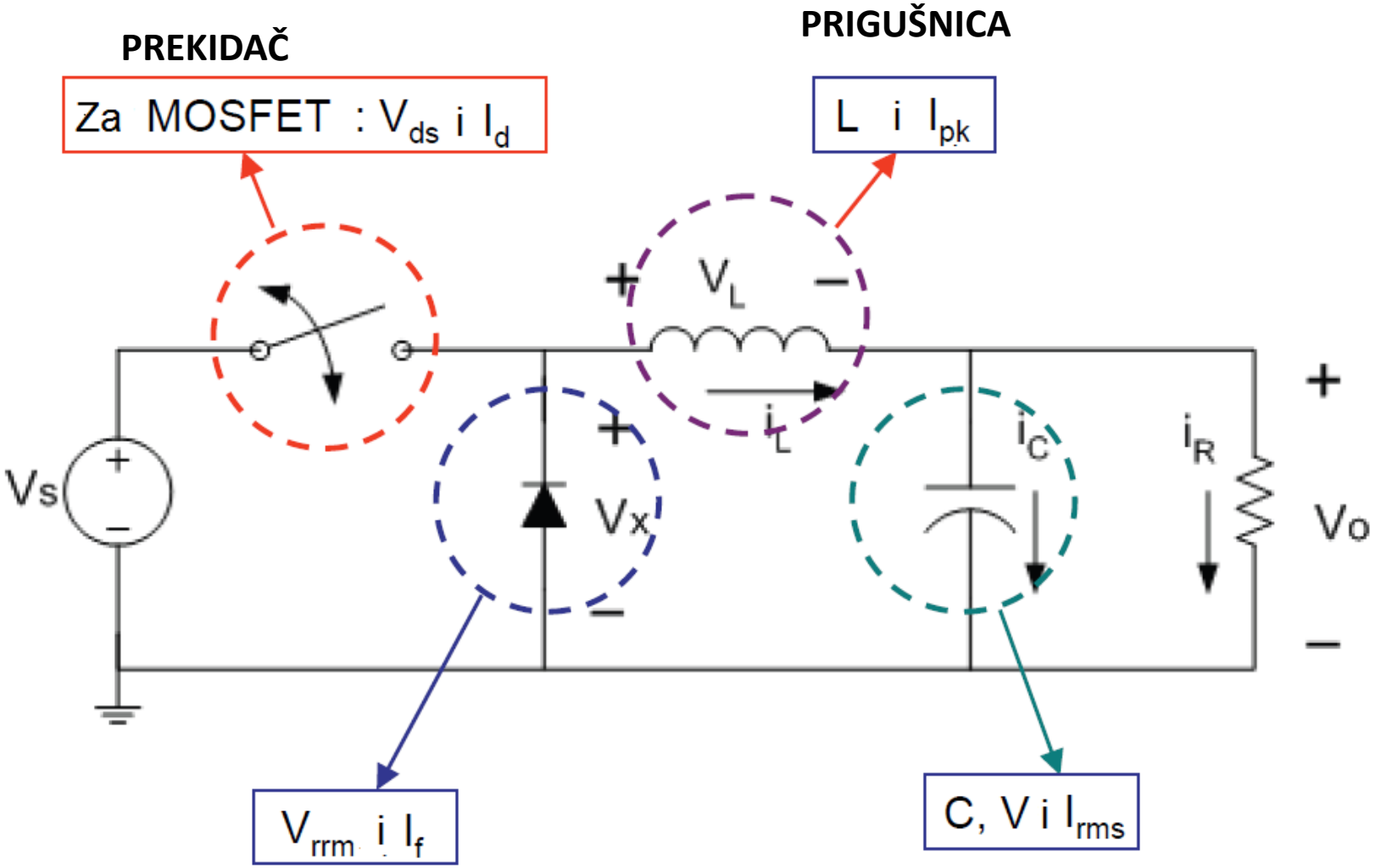
$$v_{Lon}t_{on} + v_{Loff}t_{off} = 0$$

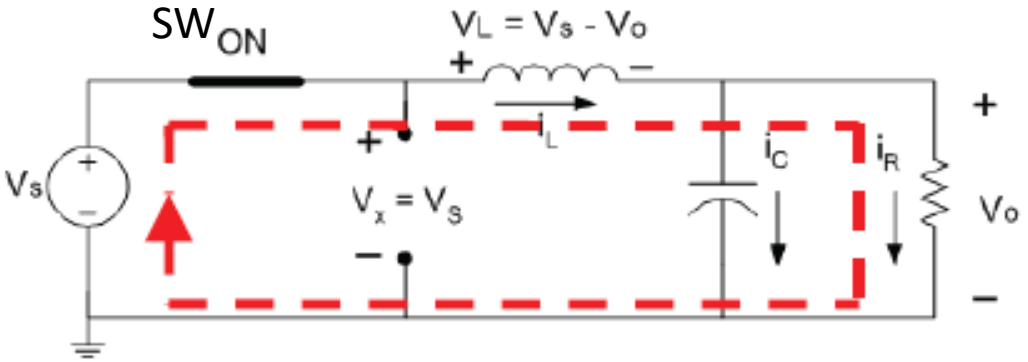
$$(V_S - V_O)DT + (-V_O)(1-D)T = 0$$

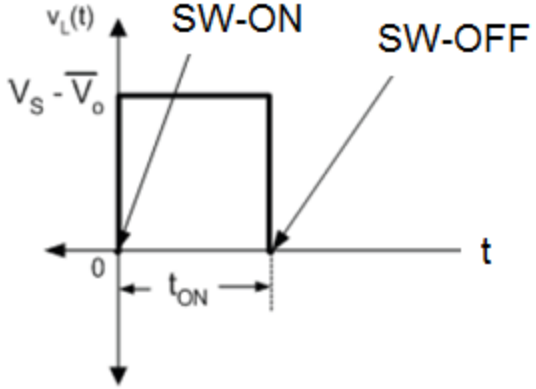
$$V_S D - V_O D - V_O + V_O D = 0$$

$$\boxed{V_O = DV_S}$$

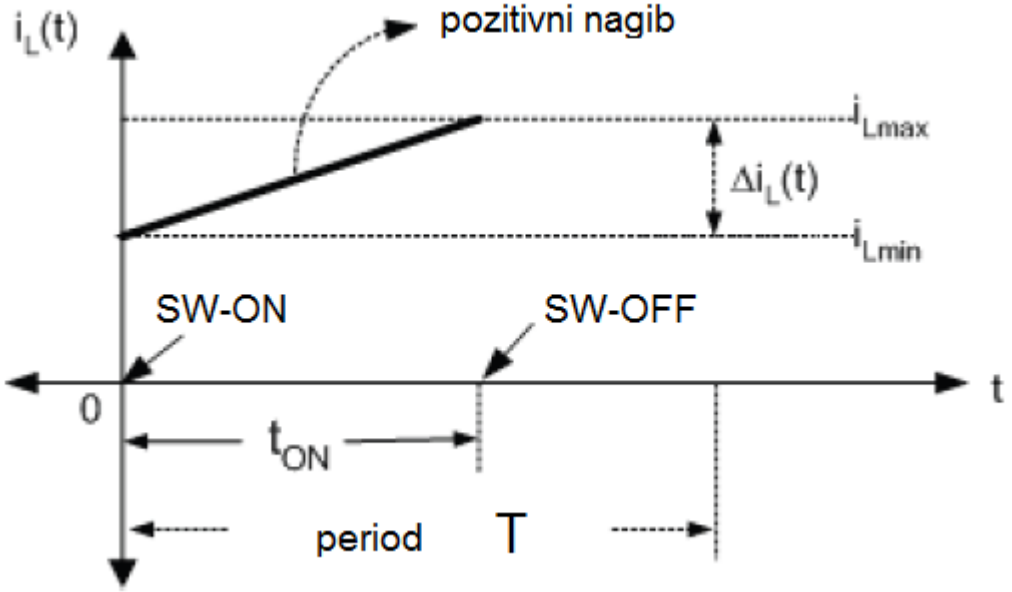
DIMENZIONISANJE PRETVARAČA (Šta se ustvari dimenzioniše?)





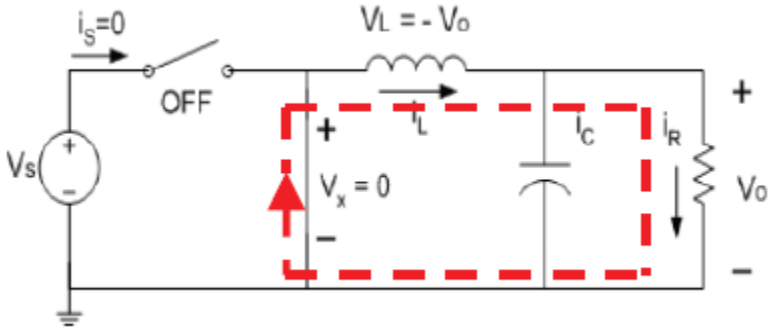


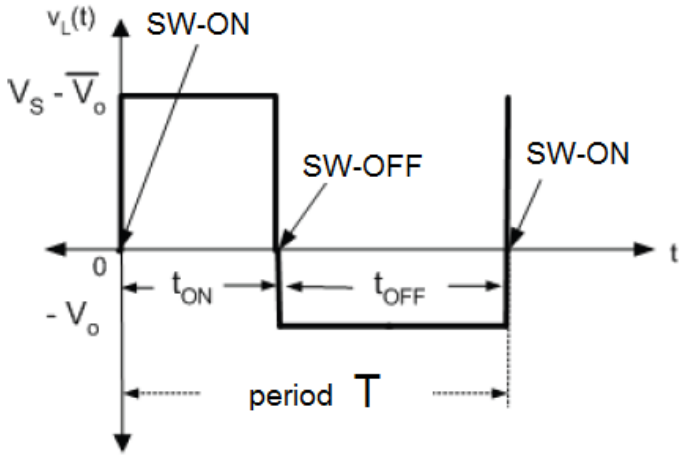
$$v_L = V_S - V_O = L\frac{di_L}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} = \oplus$$



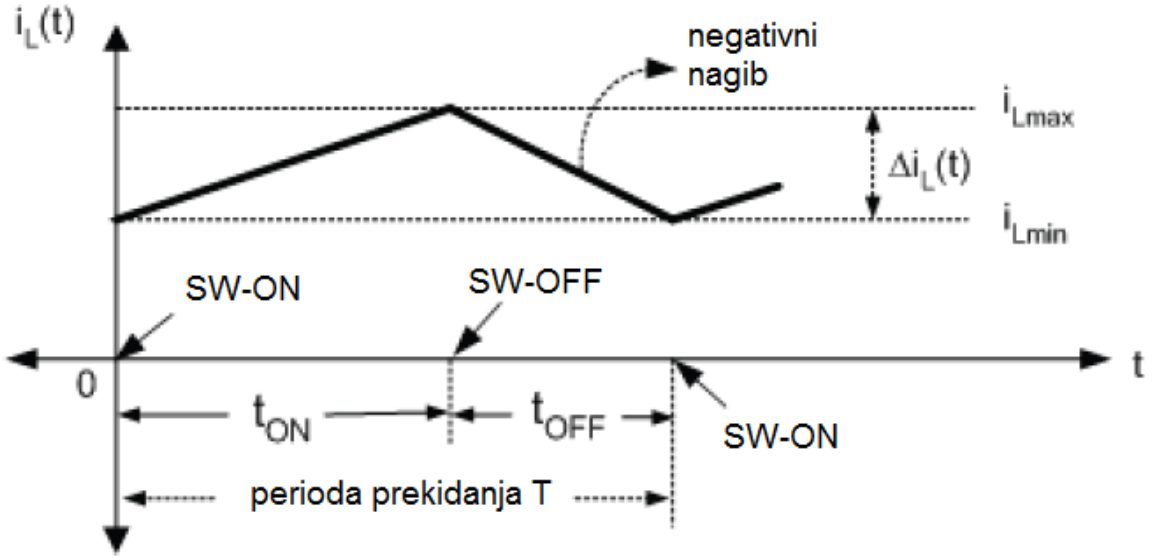
$$\Delta i_{Lon} = \frac{V_S - V_O}{L}\Delta t_{on}$$

$$\Delta i_{Lon} = \frac{V_S - V_O}{L} DT$$



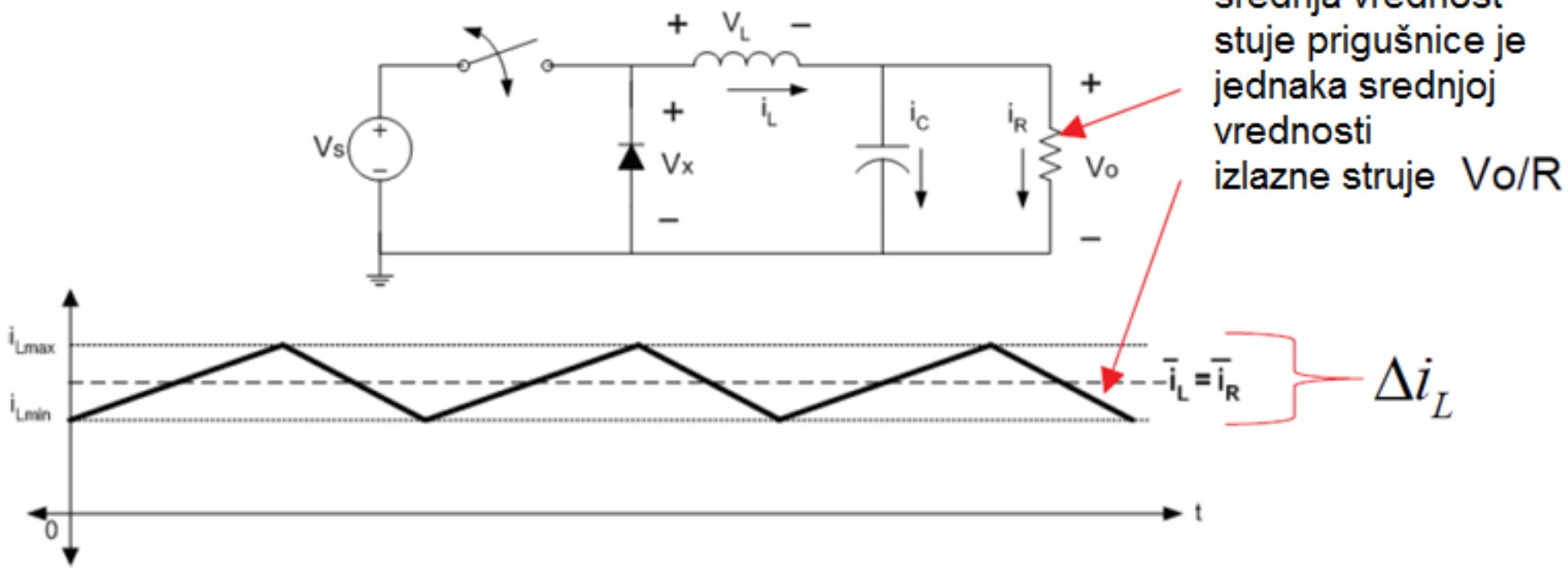


$$v_L = -V_O = L\frac{di_L}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{-V_O}{L} = \boxed{-}$$



$$\Delta i_{Loff} = \frac{-V_O}{L}\Delta t_{off}$$

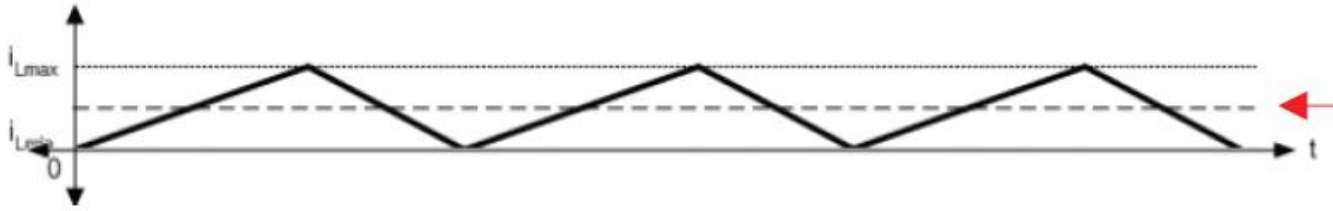
$$\Delta i_{Loff} = \frac{-V_O}{L}(1-D)T$$



$$I_{L\min} = \overline{I_L} - \frac{|\Delta i_L|}{2} = \frac{V_0}{R} - \frac{1}{2}\left[\frac{V_0}{L}(1-D)T\right] = V_0\left[\frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf}\right]$$

$$I_{L\max} = \overline{I_L} + \frac{|\Delta i_L|}{2} = \frac{V_0}{R} + \frac{1}{2}\left[\frac{V_0}{L}(1-D)T\right] = V_0\left[\frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf}\right]$$

DIMENZIONISANJE PRIGUŠNICE



Minimalna struja opterećenja u CCM režimu

$I_{omin}=\Delta i/2$

$L = L_C \quad I_{Lmin} = 0$ praktično $L > 1.05 * L_C$

$$I_{L\min} = 0 = \overline{I_L} - \frac{|\Delta i_L|}{2} = V_0 \left[\frac{1}{R_{\max}} - \frac{(1-D)}{2 L_C f} \right] \Rightarrow L_C = \frac{(1-D_{\max}) R_{\max}}{2 f}$$

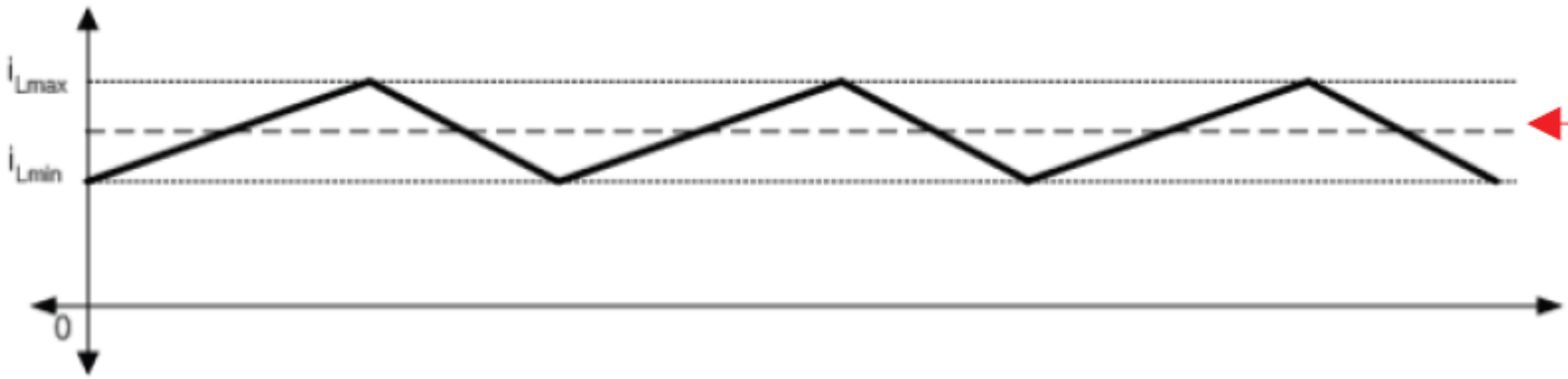
$$L_C = \frac{(1-D_{\max}) R_{\max}}{2 f}$$

$R_{max} = V_o/I_{omin}$

Pri MIN ulaznom naponu

Izbor projektanta (UGLAVNOM JE >50KHz kod upotrebe MOSFET'a)

ODREĐIVANJE MAX STRUJE PRIGUŠNICE



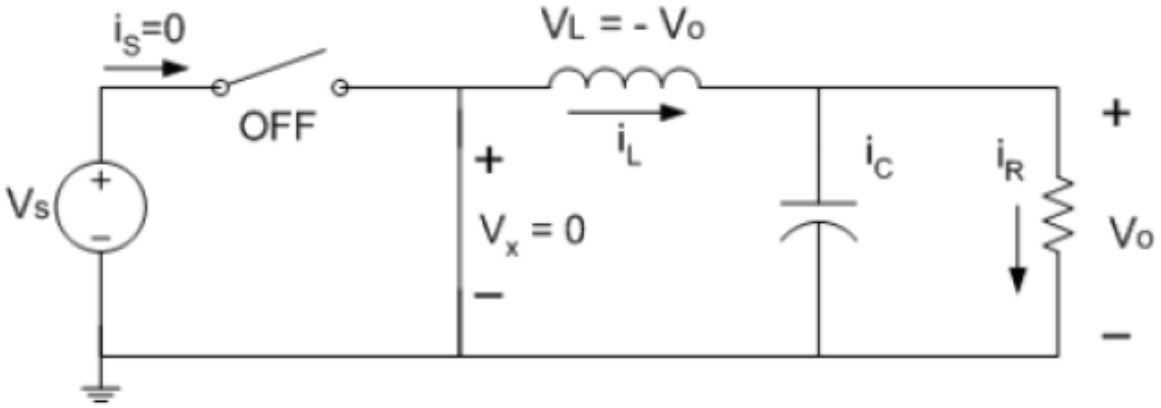
MAX struja opterećenja

$$I_{L\max} = \overline{I_L} + \frac{|\Delta i_L|}{2} = V_0 \left[\frac{1}{R_{\min}} + \frac{(1 - D_{\min})}{2Lf} \right]$$

Pri MAX ulaznom naponu

$L > 1.05 * L_C$

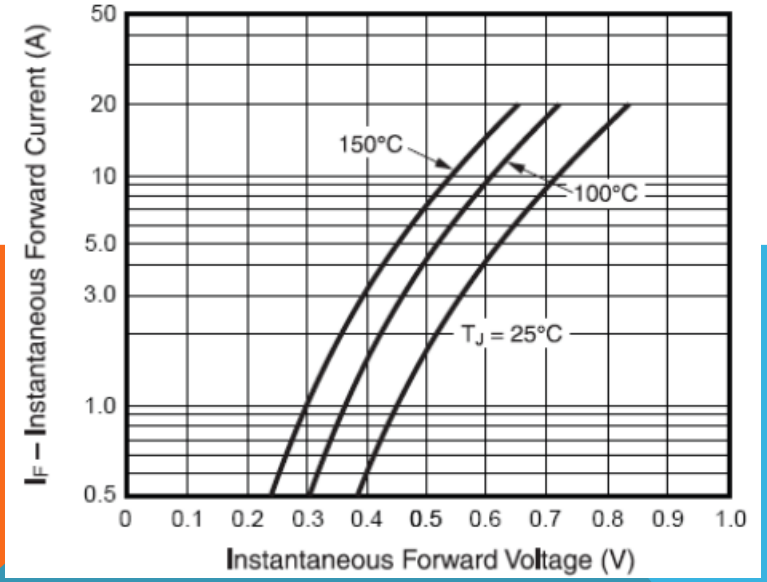
DIMENZIONISANJE PREKIDAČA -SW



U ISKLJUČENOM STANJU
PREKIDAČ (SW)
TRPI NAJVEĆI NAPON

AKO JE DIODA IDEALNA: $V_{switch\text{-}max} = V_{inmax}$

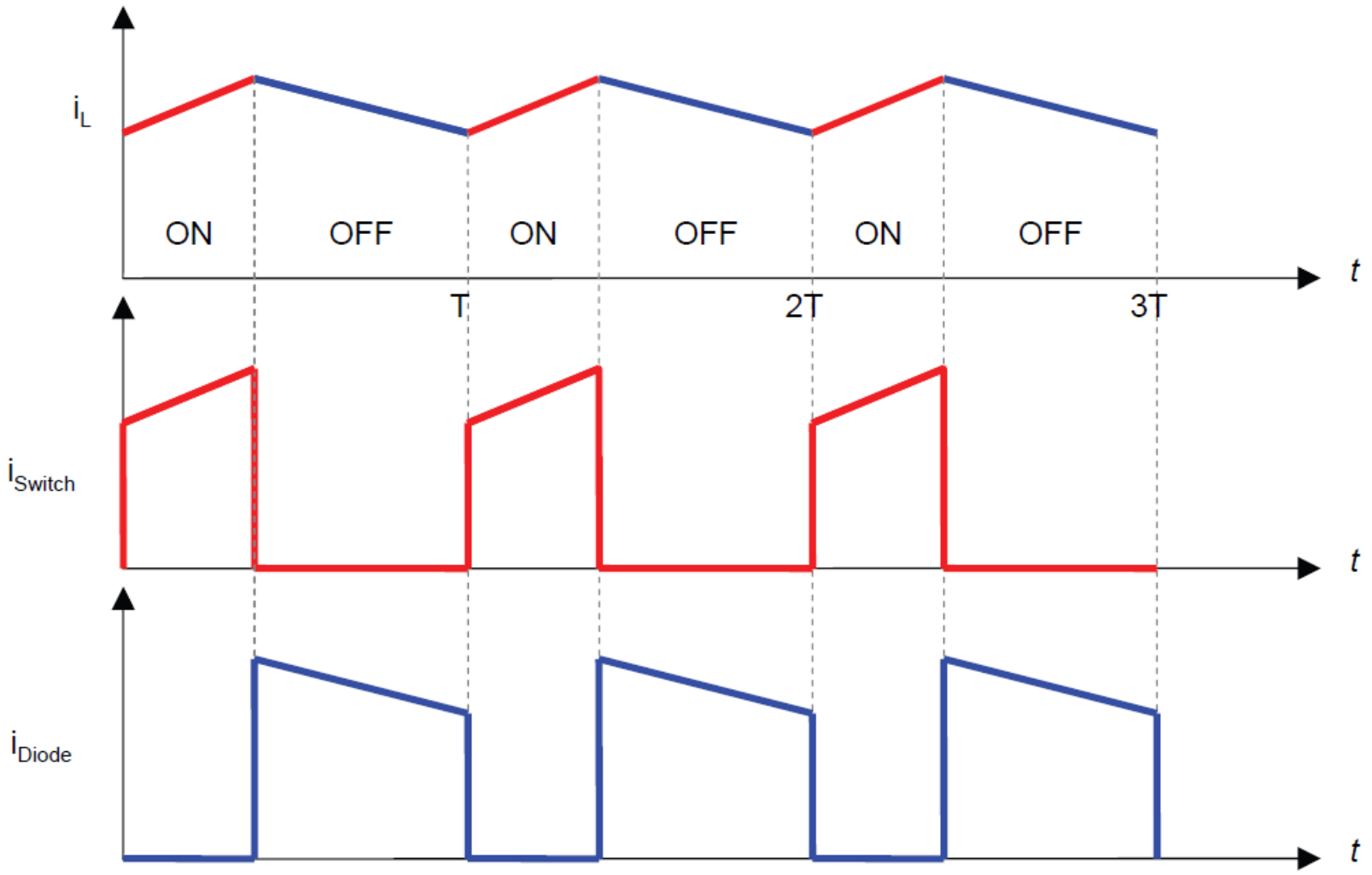
AKO DIODA NIJE IDEALNA: $V_{switch\text{-}max} = V_{inmax} + V_F$

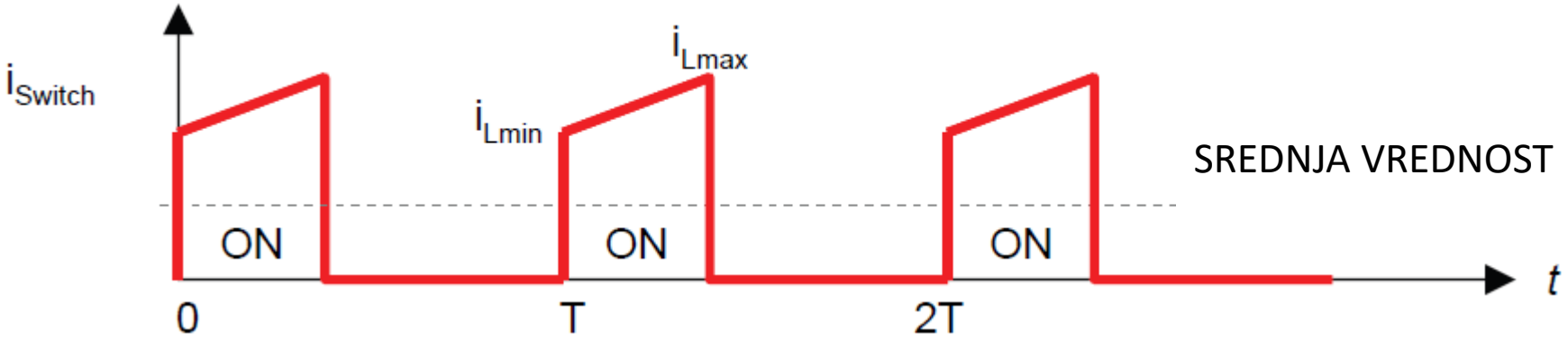


KARAKTERISTIKA
TIPIČNE DIODE

ZA NAPON PREKIDAČA Vds SE USVAJA 20% VEĆI NAPON OD $V_{sw\text{-}max}$!!!!!

STRUJA PREKIDAČA ?





SREDNJA VREDNOST

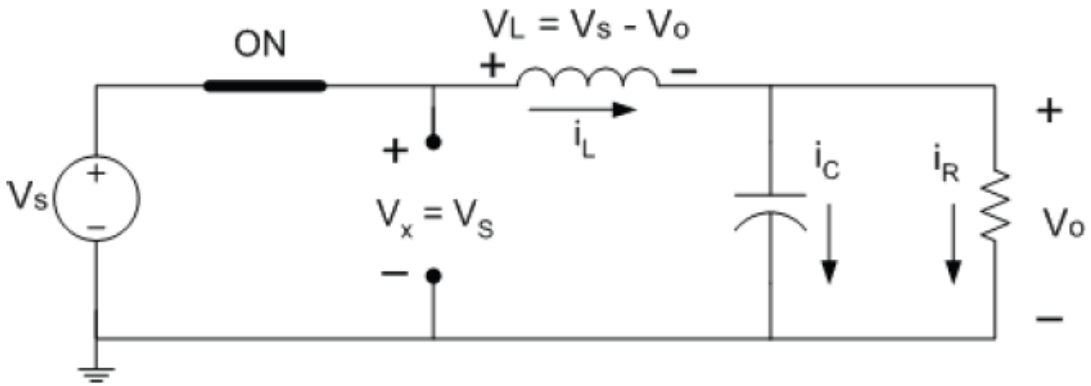
$$\overline{I_{Switch}} = \frac{\left(i_{L\min} + i_{L\max}\right)\cdot t_{on}}{2\cdot T}$$

$$\overline{I_{Switch}} = \frac{\left(\left[i_{L\max} - \Delta i_L\right] + i_{L\max}\right)\cdot DT}{2\cdot T} = \frac{\left(2i_{L\max} - \Delta i_L\right)\cdot D}{2}$$

$$\overline{I_{Switch}} = \left(i_{L\max} - \frac{\Delta i_L}{2}\right) D = \overline{I_L}\cdot D = \overline{I_o}\cdot D$$

$$\overline{I_{Switch-\max}} > \overline{I_{o\max}}\cdot D_{\max}$$

DIMENZIONISANJE DIODE (obično je to Šotki dioda)



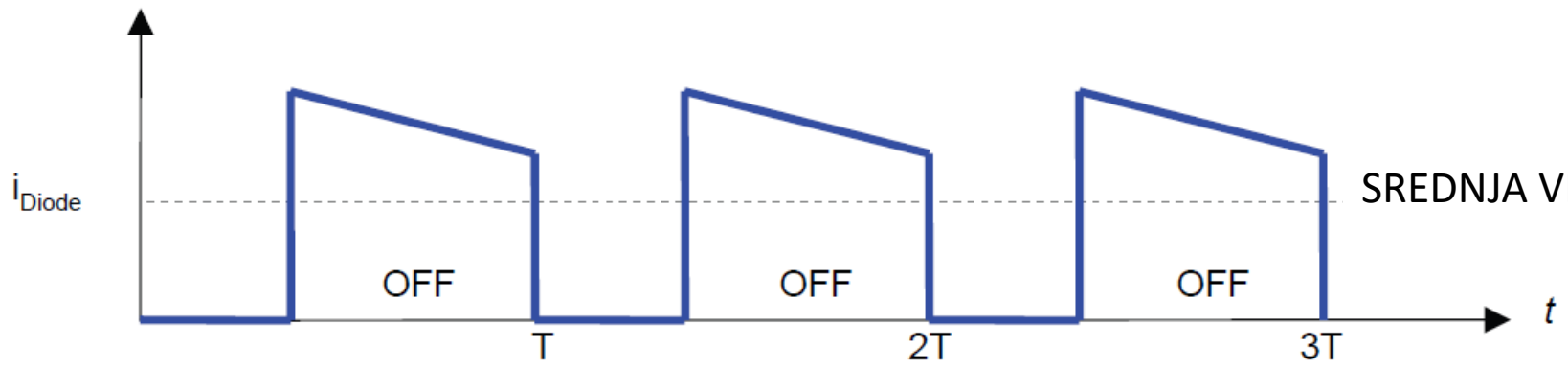
Kada je SW uključen
dioda trpi INVERZNI NAPON !!

KADA JE PREKIDAČ IDEALAN: $V_{RRM} = V_{inmax}$

KADA PREKIDAČ NIJE IDEALAN: $V_{RRM} = V_{inmax} + V_{SW}$

ZA NAPON DIODE SE USVAJA minimum 20%
VEĆI NAPON OD V_{RRM}!!!!!

STRUJA DIODE ?



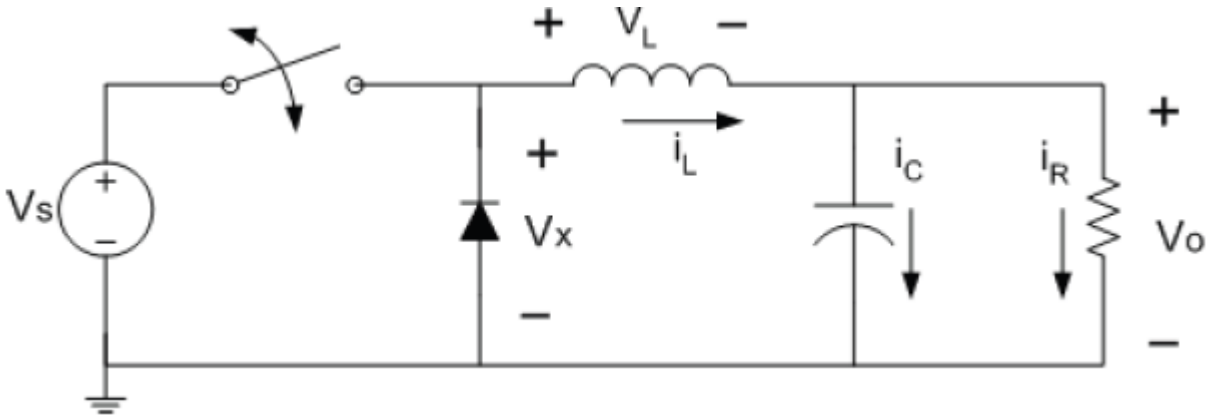
$$\overline{I_F} = \frac{\left(i_{L\min} + i_{L\max}\right)\cdot t_{off}}{2\cdot T}$$

$$\overline{I_F} = \frac{\left(\left[i_{L\max} - \Delta i_L\right] + i_{L\max}\right)\cdot\left(1-D\right)T}{2\cdot T} = \frac{\left(2i_{L\max} - \Delta i_L\right)\cdot\left(1-D\right)}{2}$$

$$\overline{I_F} = \overline{I_L}\cdot\left(1-D\right) = \overline{I_o}\cdot\left(1-D\right)$$

$$\overline{I_F} > \overline{I_{o\max}}\cdot\left(1-D_{\min}\right)$$

DIMENZIONISANJE KONDENZATORA



$$V_{cmax} = V_o + \Delta V_o/2$$

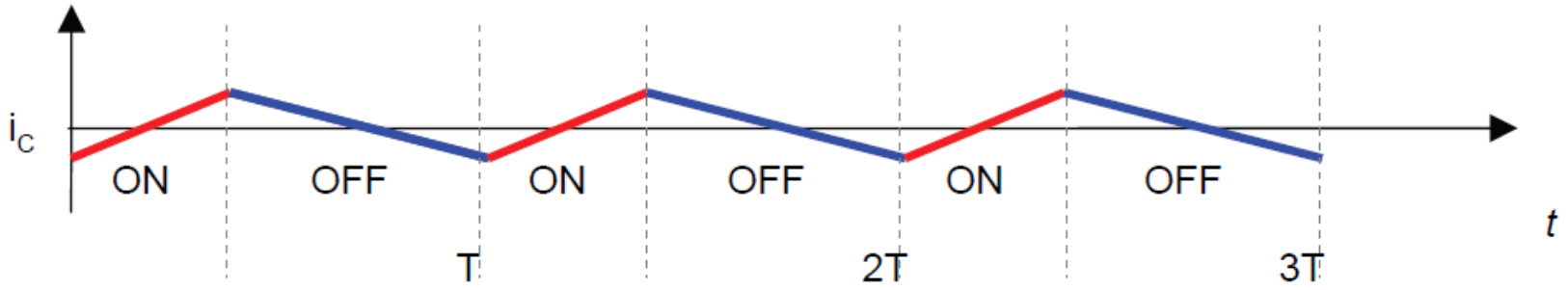
ESR (Equivalent Series Resistance)

-utiče na dodatno povećanje ripla napona ΔV_o

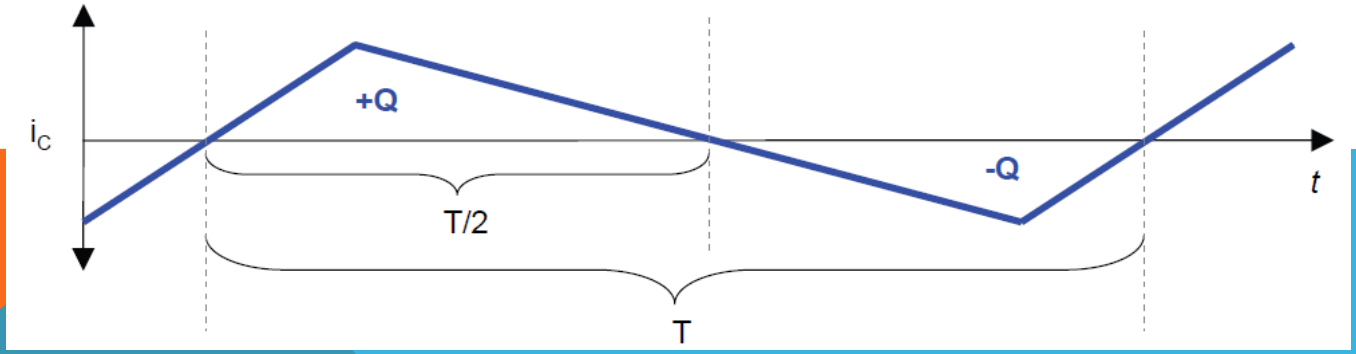
-dodatno povećanje ripla napona: $ESR * \Delta I_L$

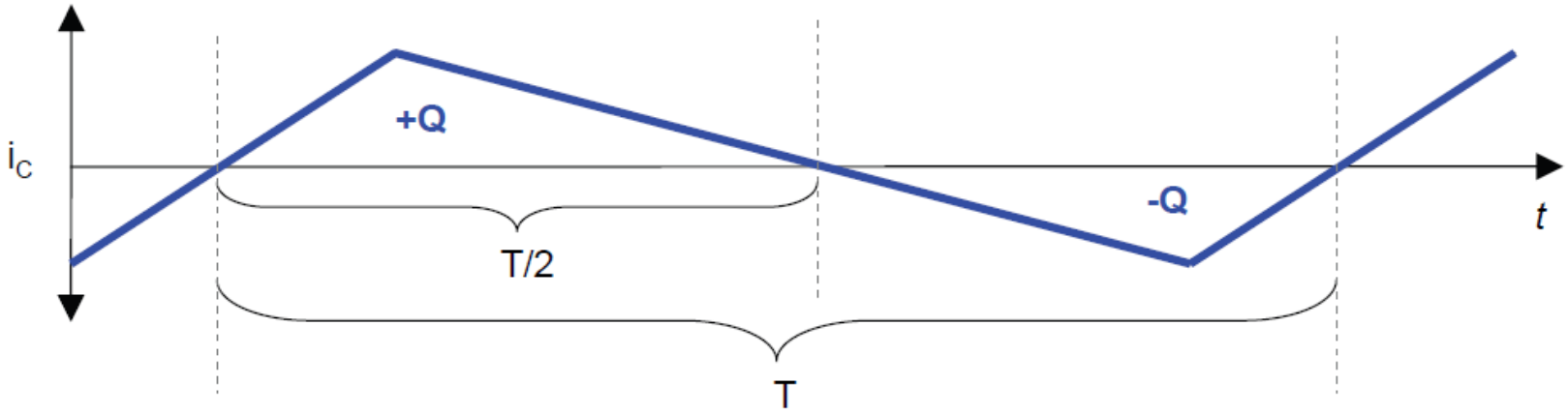
Težnja je da ESR bude što manje , kao i talasnost struje !!!!

KAKO PRORAČUNATI MIN KAPACITIVNOST?



Kroz kondenzator protiče AC(naizmenična) komponenta struje prigušnice





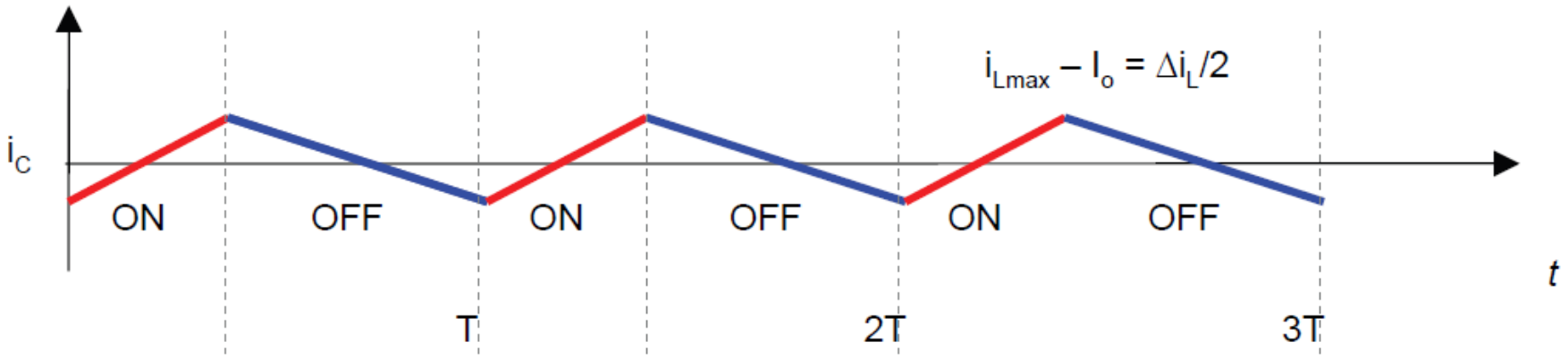
$$q = \mathrm{P}_{\Delta} = \frac{1}{2}\left(\frac{T}{2}\right)\left(\frac{\Delta i_L}{2}\right) = \frac{\Delta i_L}{8f} = \frac{\frac{V_O}{L}(1-D)T}{8f} = \frac{(1-D)V_O}{8Lf^2}$$

$$q = C \cdot \Delta V_o \Rightarrow C = \frac{q}{\Delta V_o} = \frac{(1-D)V_O}{8Lf^2\Delta V_o} = \frac{(1-D)}{8Lf^2\left(\Delta V_o / V_O\right)}$$

$$C = \frac{\left(1-D_{\min}\right)}{8Lf^2\left(\Delta V_o / V_O\right)}$$

RELATIVNA VREDNOST TALASNOSTI (tzv.RIPLA) NAPONA (izraženo u r.j.)

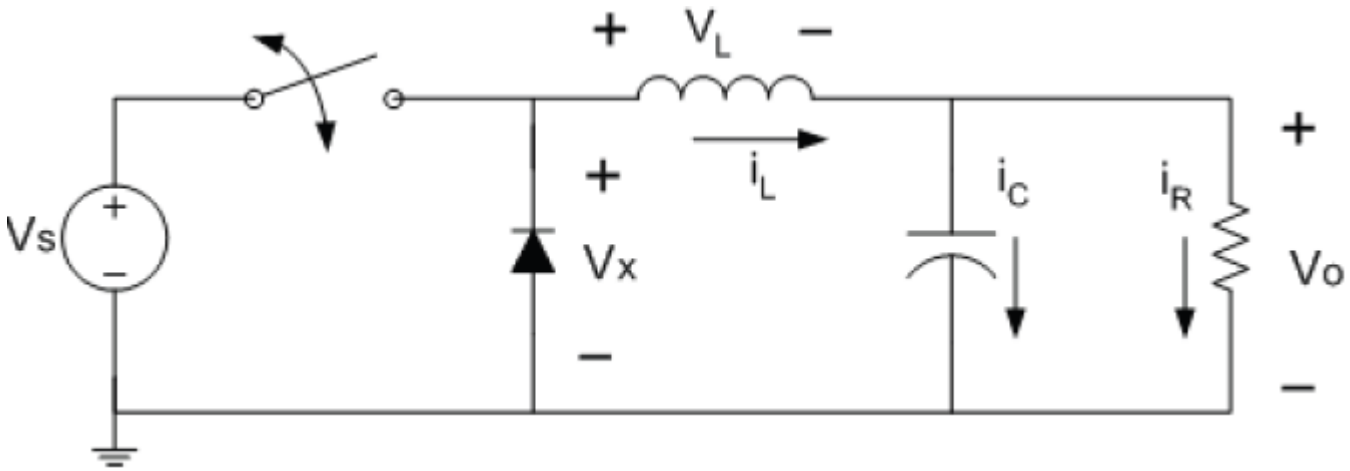
EFEKTIVNA VREDOST STRUJE KONDENZATORA?



$$i_{Crms} = \frac{i_{Cpk}}{\sqrt{3}} = \frac{\Delta i_L/2}{\sqrt{3}} = \frac{(1-D)V_O}{2\sqrt{3}Lf}$$

$$i_{Crms} = \frac{(1-D_{\min})V_O}{2\sqrt{3}Lf}$$

MAX NAPON KONDENZATORA ?



$$V_{cmax} = V_{inmax} \ ?$$

Kada je D=1 (prekidač je dovoljno dugo uključen) Vc=Vin

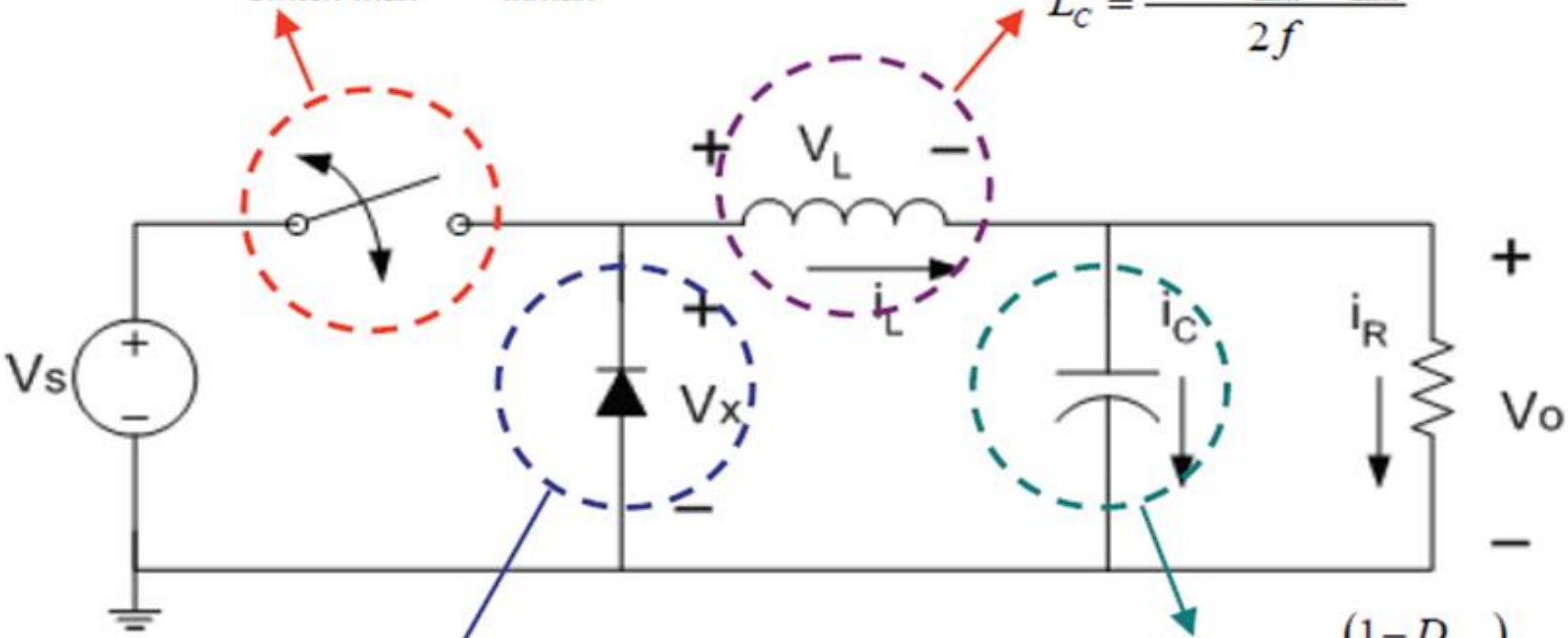
SUMARNO:

$$\overline{I_{Switch-max}} > \overline{I_{omax}} \cdot D_{max}$$

$V_{switch-max} = V_{inmax}$

$$I_{Lmax} = V_0 \left[\frac{1}{R_{min}} + \frac{(1-D_{min})}{2Lf} \right]$$

$$L_C = \frac{(1-D_{max})R_{max}}{2f}$$



$$\overline{I_F} > \overline{I_{omax}} \cdot (1-D_{min})$$

$V_{RRM} = V_{inmax}$

$$C = \frac{(1-D_{min})}{8Lf^2(\Delta V_o/V_o)}$$

$V_{cmax} = V_o + \Delta V_o/2$

$$i_{Crms} = \frac{(1-D_{min})V_o}{2\sqrt{3}Lf}$$

KAKO UZETI U OBZIR GUBITKE U PRETVARAČU?

Koji sve postoje gubici??

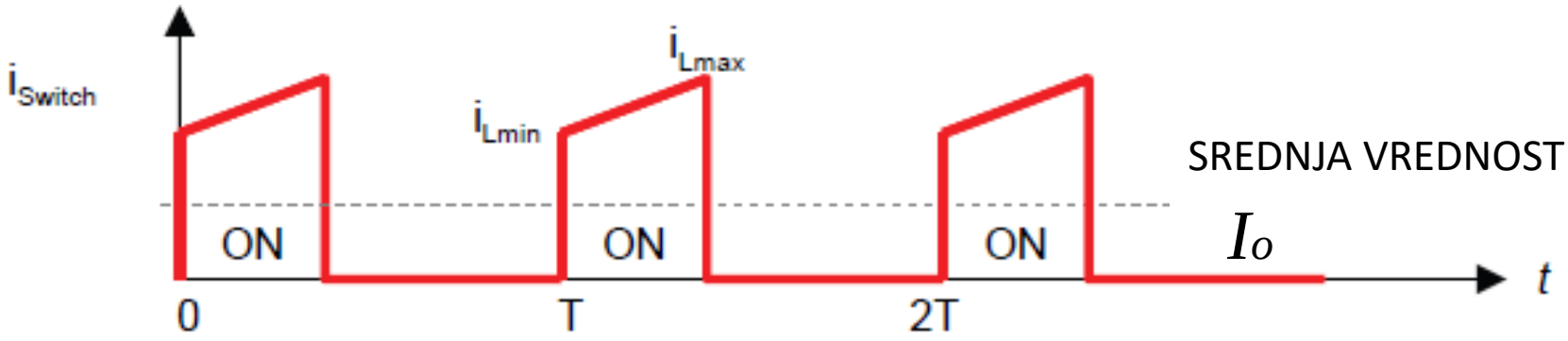
MOSFET:
-Statički gubici u MOSFET prekidaču
-Prekidački dinamičkigubici u MOSFET prekidaču
-Gubici u pobudnom kolu MOSFET prekidača

DIODA:
-Statički gubici
-Prekidački gubici

PRIGUŠNICA:
-gubici u bakru
-gubici u gvožđu

KONDENZATOR:
-gubici u ekvivalentnoj serijskoj otpornosti (ESR)

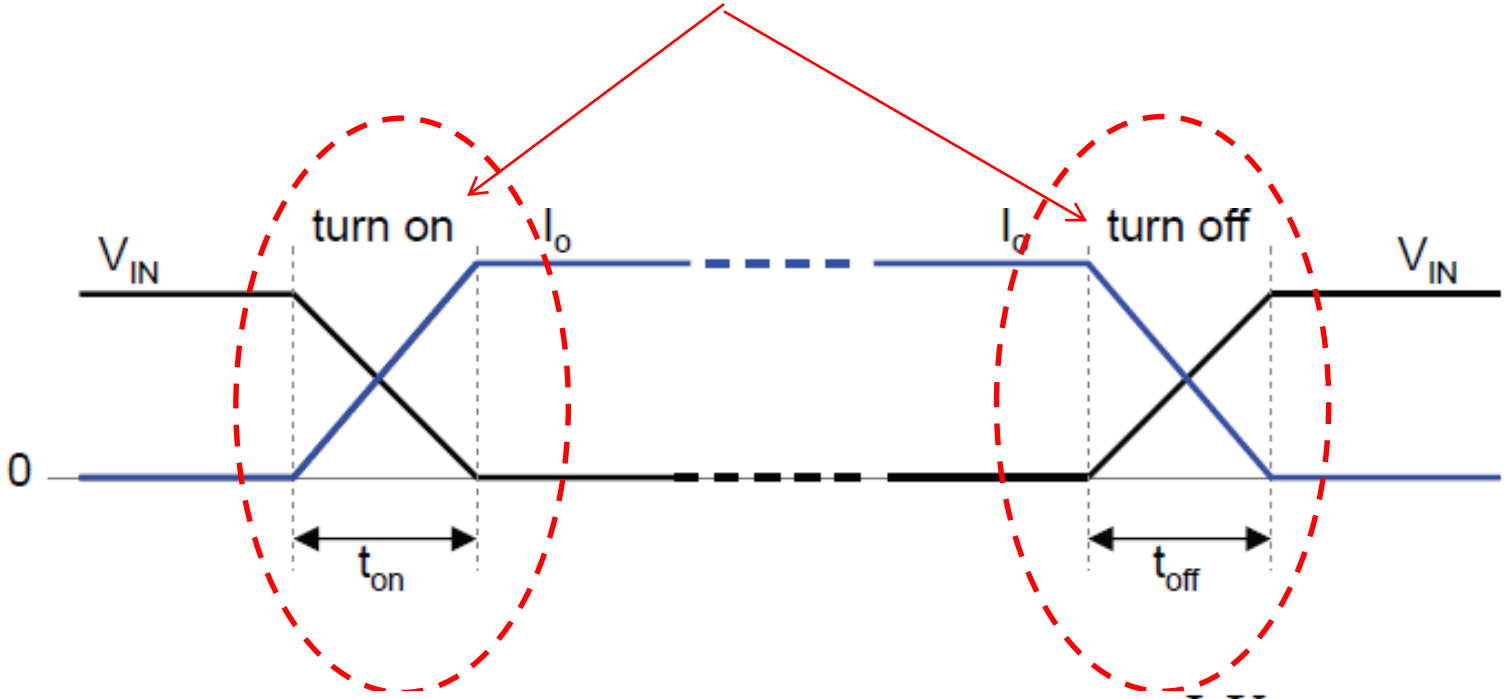
STATIČKI GUBICI MOSFET PREKIDAČA



$$P_{static} = I^2_{switch-rms} \cdot R_{DSon}$$

$$P_{static} = \left(I_o \sqrt{D} \sqrt{\left(1 + \left[\frac{\Delta i_L}{2 \cdot I_o} \right] \right)} \right)^2 \cdot R_{DSon}$$

DINAMIČKI GUBICI MOSFET PREKIDAČA



$$P(t_{on}) = \frac{I_o V_{in} t_{on}}{6T} \qquad P(t_{off}) = \frac{I_o V_{in} t_{off}}{6T}$$

$$P_{switching} = P(t_{on}) + P(t_{off}) = \frac{I_o V_{in} t_{on}}{6T} + \frac{I_o V_{in} t_{off}}{6T}$$

$$P_{switching} = \frac{I_o V_{in}}{6T}\left(t_{on} + t_{off}\right)$$

PREKIDAČKI GUBICI U POBUDNOM KOLU MOSFET PREKIDAČA

KADA JE MOSFET ISKLJUČEN, PUNI SE KAPACITIVNOST Coss:

$$P_{Coss} = \frac{1}{2} C_{OSS} V_{in}^2 f$$

PREKIDAČKI GUBICI U KOLU GEJTA:

$$P_{gate} = \frac{1}{2} Q_{gate} V_{gate} f$$

STATIČKI GUBICI DIODE U STANJU PROVOĐENJA

$$P_{forward} = V_f \cdot \overline{I_f} + \widetilde{I_f^2} \cdot r_d$$

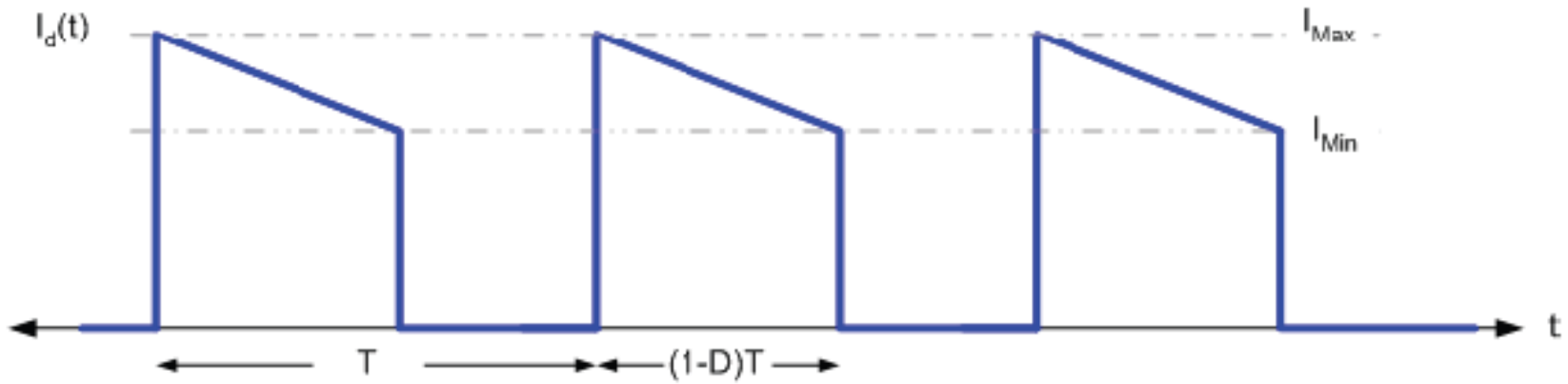
* PAD NAPONA U STANJU VOĐENJA

SREDNJA VREDNOST STRUJE DIODE

EFEKTIVNA VREDNOST STRUJE DIODE

DINAMIČKA OTPORNOST DIODE *

* KATALOG PROIZVOĐAČA



IZ KATALOGA PROIZVOĐAČA

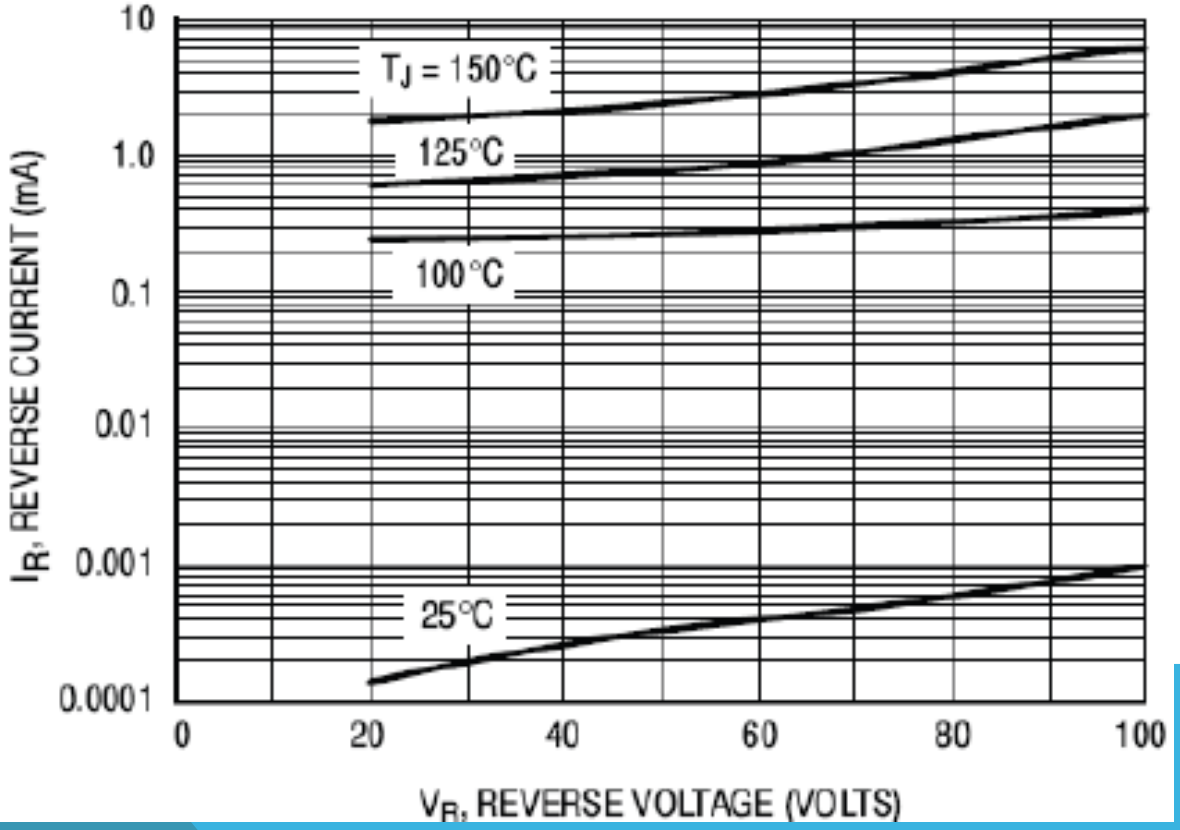
$$P_{forward} = V_f \cdot \overline{I_f} + \widetilde{I_f^2} \cdot r_d$$

$$\overline{I_f} = (1-D) \cdot \overline{I_o}$$

$$\widetilde{I_f} = \sqrt{\frac{(1-D)}{3}\left[I_{\max}^2 + I_{\min}^2 + I_{\max} \cdot I_{\min} \right]}$$

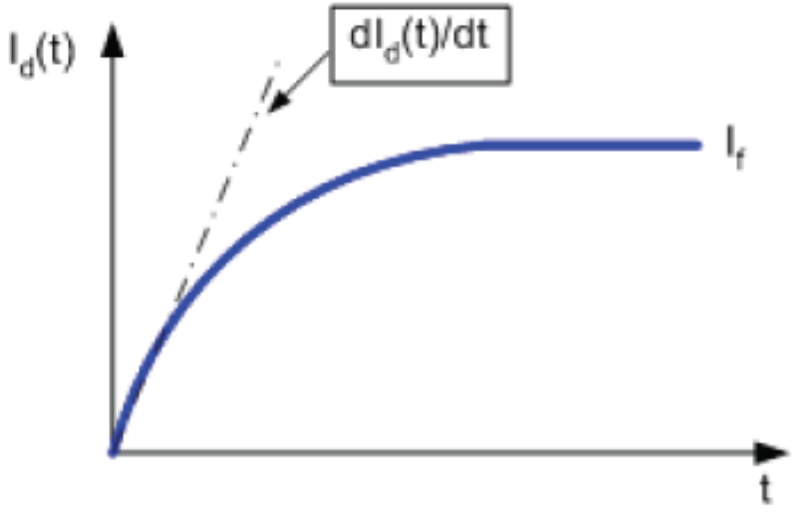
STATIČKI GUBICI DIODE U INVERZNOM REŽIMU (odnosno u STANJU NEPROVOĐENJA)

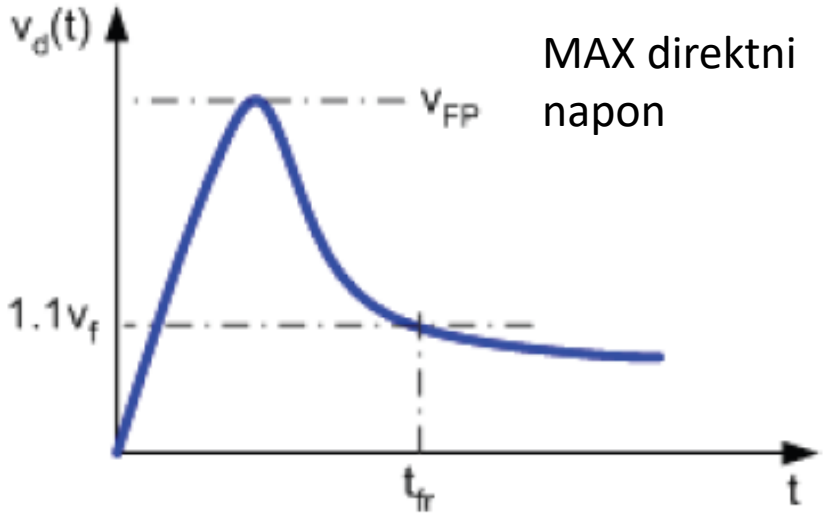
$$P_{reverse} = V_r \cdot I_r \cdot (1 - D)$$



TIPIČNA KARAKTERISTIKA DIODE U INVERZNOM REŽIMU

PREKIDAČKI GUBICI DIODE PRI UKLJUČENJU



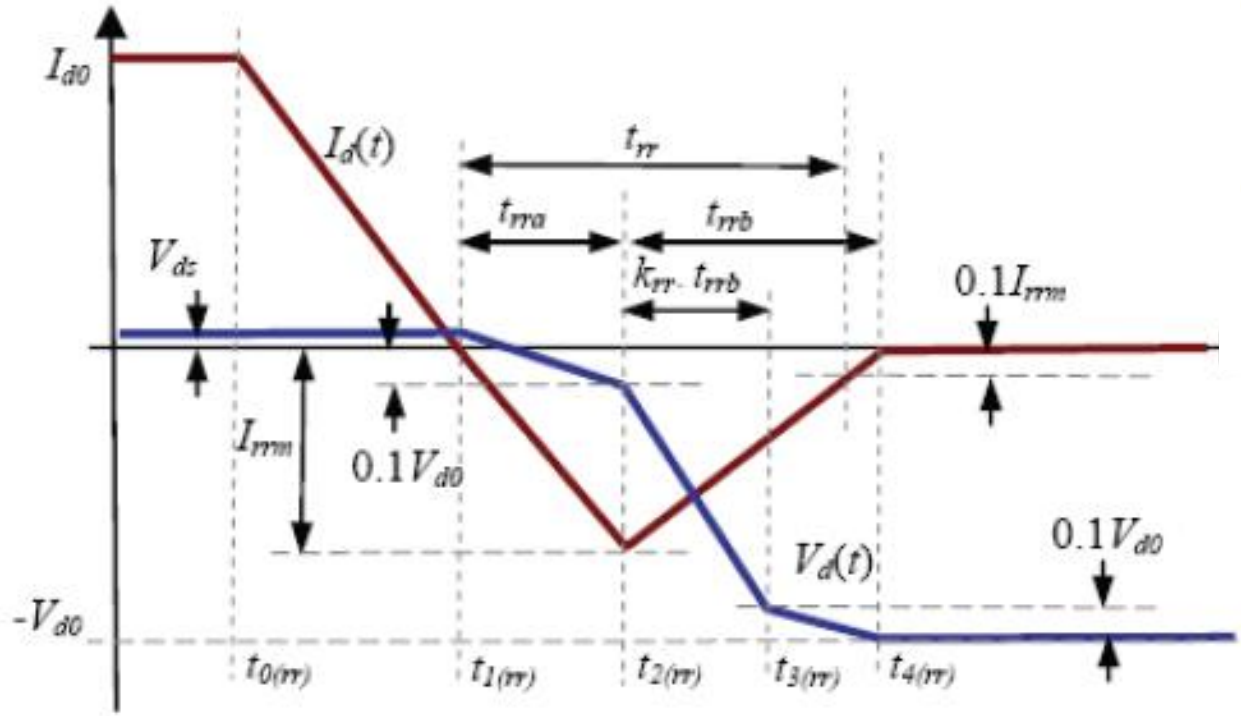


MAX direktni napon

Forwrd Recovery Time

$$P_{ON} = 0.4 \cdot \left(V_{FP} - V_f\right) \cdot t_{fr} \cdot I_f \cdot f$$

PREKIDAČKI GUBICI DIODE PRI ISKLJUČENJU



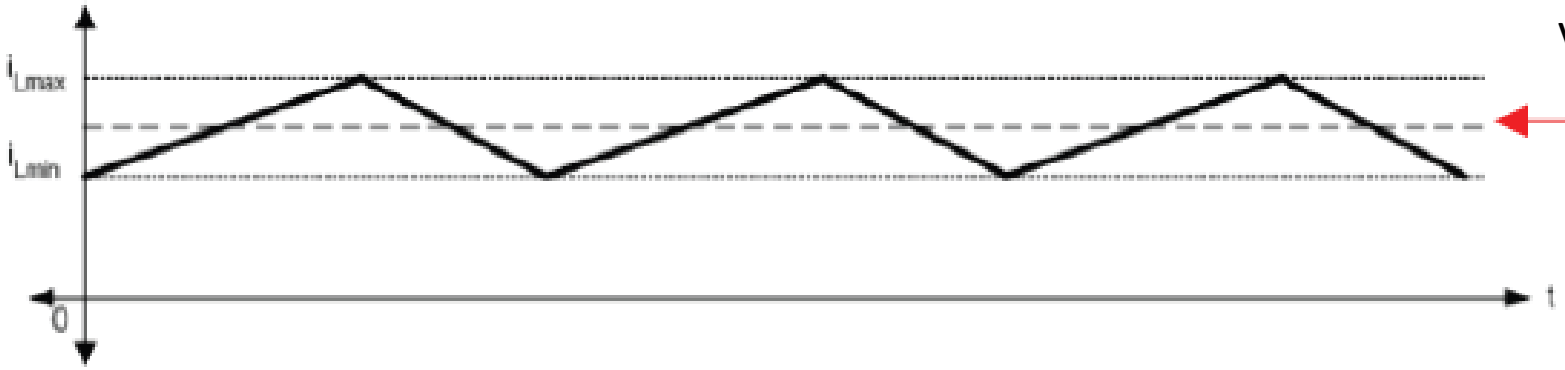
$$t_{rra} = I_{rrm} \Big/ \frac{I_{d0}}{\left(\frac{dI_d}{dt}\Big|_{t_{1(rr)}}\right)}$$

$$t_{rrb} = 1.11 \cdot \left(t_{rr} - t_{rra}\right)$$

$$\left[t_{2rr}, t_{3rr}\right] = k_{rr} \cdot t_{rrb}$$

$$P_{off} = 0.5 V_{ds} I_{d0} \frac{I_{d0}}{\left(\frac{dI_d}{dt}\Big|_{t_{1(rr)}}\right)} + 0.033 V_{d0} I_{rrm} t_{rra} + V_{d0} I_{rrm} \left(0.467 - 0.433 k_{rr} + 0.15 k_{rr}^2\right) t_{rrb}$$

GUBICI u OTPORU INDUKTIVNOSTI (gubici u bakru)



Srednja Vrednost

I

$$P_L = \widetilde{I}_L^{\,2} R_L$$

$$\widetilde{I}_L = I\sqrt{1+\frac{1}{3}\left(\frac{\Delta i_L}{2I}\right)^2}$$

GUBICI u FERITNOM JEZGRU INDUKTIVNOSTI (gubici u gvožđu)

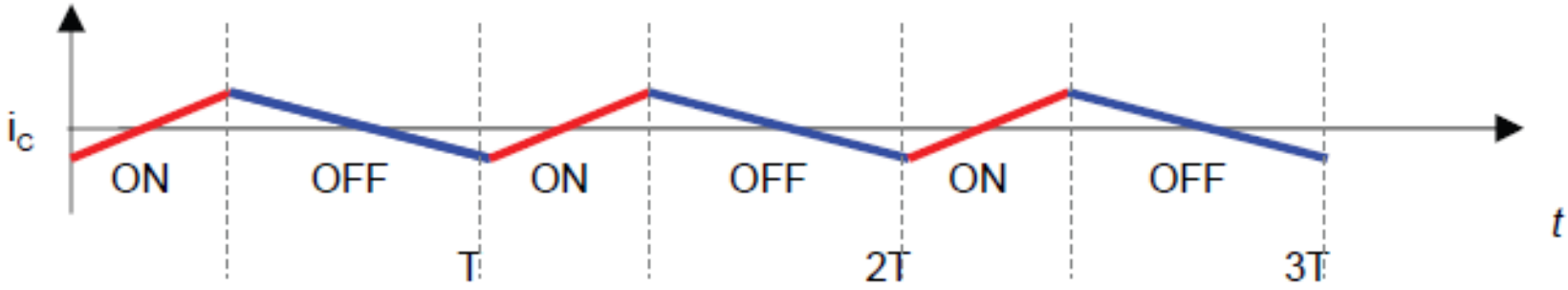
$$= k1 \times B^{k2} \times F^{k3} \times V_{Fe}$$

V_{Fe}- zapremina feritnog jezgra

B- magnetna indukcija u feritnom jezgru (200mT-500mT)

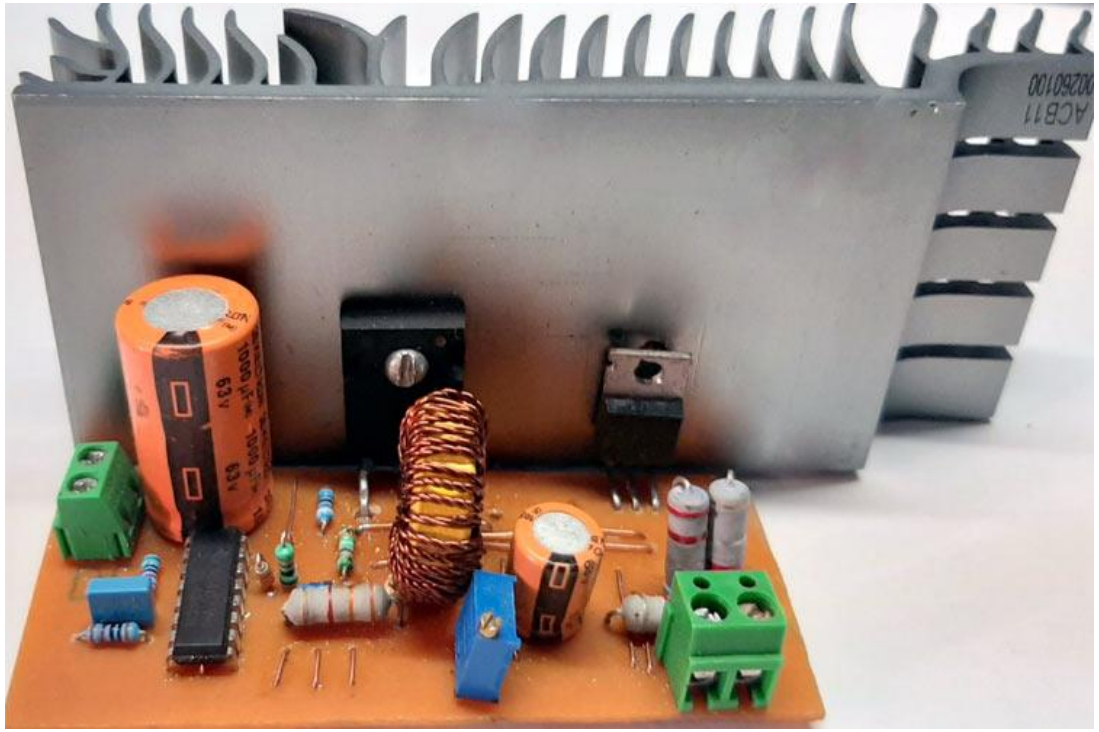
k1, k2,k3 su konstruktivni parametri i dobijaju se iz kataloških podataka ferita

GUBICI u ESR kondenzatora



$$P_{ESR} = \tilde{I}_C^{\,2} ESR$$

$$\tilde{I}_C = \frac{\Delta i_L}{2\sqrt{3}}$$



HVALA NA PAŽNJI!!!

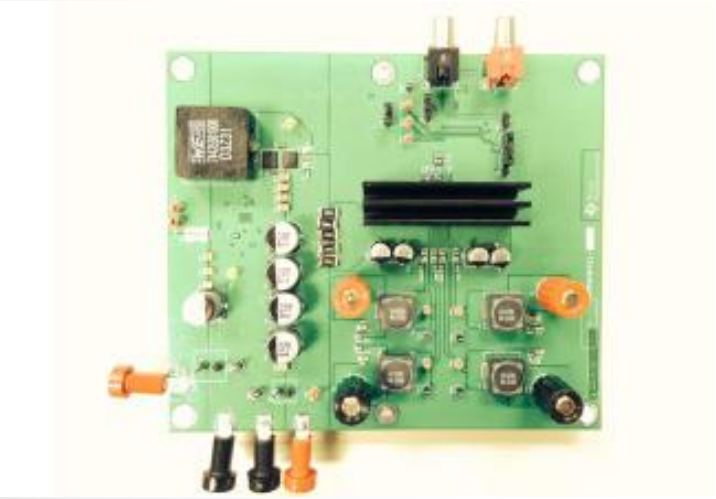
PITANJA??

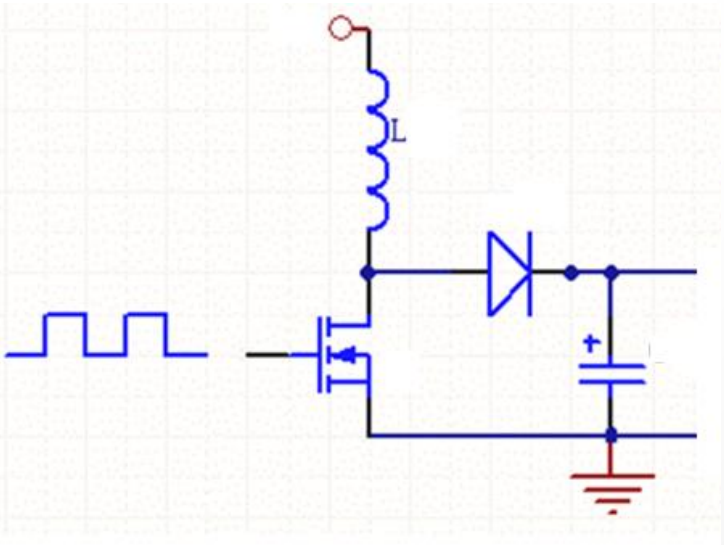
Beograd, MAJ 2021
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD
STUDIJSKI PROGRAM: NET
OSNOVNE STUDIJE
PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

DIMENZIONISANJE DC-DC PRETVARAČA PODIZAČA NAPONA

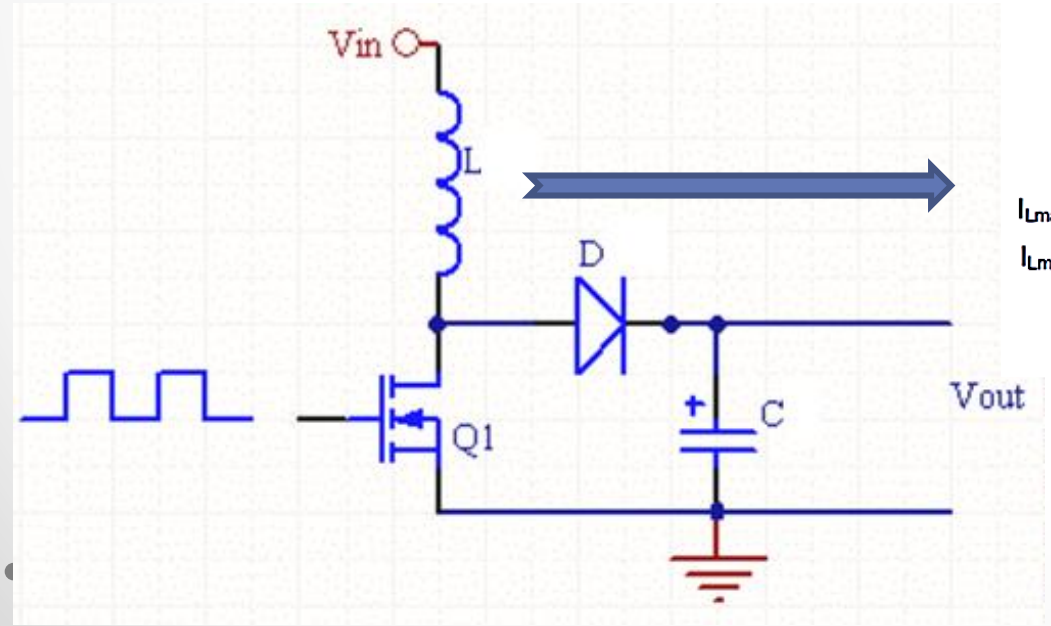
(Boost ili Step-Up Pretvarač)

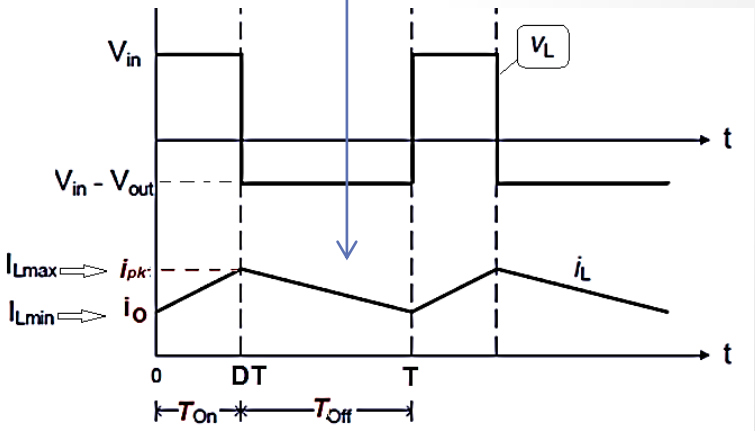




Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.

- **BOOST pretvarač** je ustvari DC/DC „podizač“napona i prekidački pretvarač visoke efikasnosti.
- Pretvarač koristi snažni tranzistorski prekidač, obično MOSFET (ređe IGBT), sa širinsko impulsnom modulacijom napona na akumulacionom elementu-prigušnici (induktoru).
- Topologija pretvarača je data na slici
- Pravougaoni naponski impulsi na prigušnici (induktoru) rezultiraju u trougaonom talasnom obliku struje.
- U nastavku će biti date osnovne jednačine za struju i napon i biće prikazan kompromis između talasnosti struje i izbora vrednosti induktivnosti.
- Za ovu raspravu pretpostavljamo da je rad pretvarača u kontinualnom režimu, što znači da struja induktora nikada ne pada na nultu vrednost.
- Za postizanje veće efikasnosti mora se uzeti ultra brza dioda.





U nastavku su date definicije veličina od interesa:

Vršna vrednost struje prigušnice	i_{pk}
Minimalna struja prigušnice	i_o
Talasnost struje prigušnice	$\Delta i \equiv \left(i_{pk} - i_o\right)$
Odnos talasnosti i srednje vrednosti struje prigušnice	$r \equiv \Delta i / i_{ave}$
Off Duty Cycle	$1 - D \equiv T_{off} / T$
Trajanje isključenosti prekidača	$T_{off} = (1 - D)/f$
Srednja vrednost struje opterećenja	$i_{ave} \equiv \Delta i / 2 \equiv i_{load}$
RMS vrednost struje za trougaoni talasni oblik	$i_{rms} = \sqrt{i_o^2 + (\Delta i)^2 / 12}$

Osnovne jednačine koje povezuju napon i struju prigušnice:

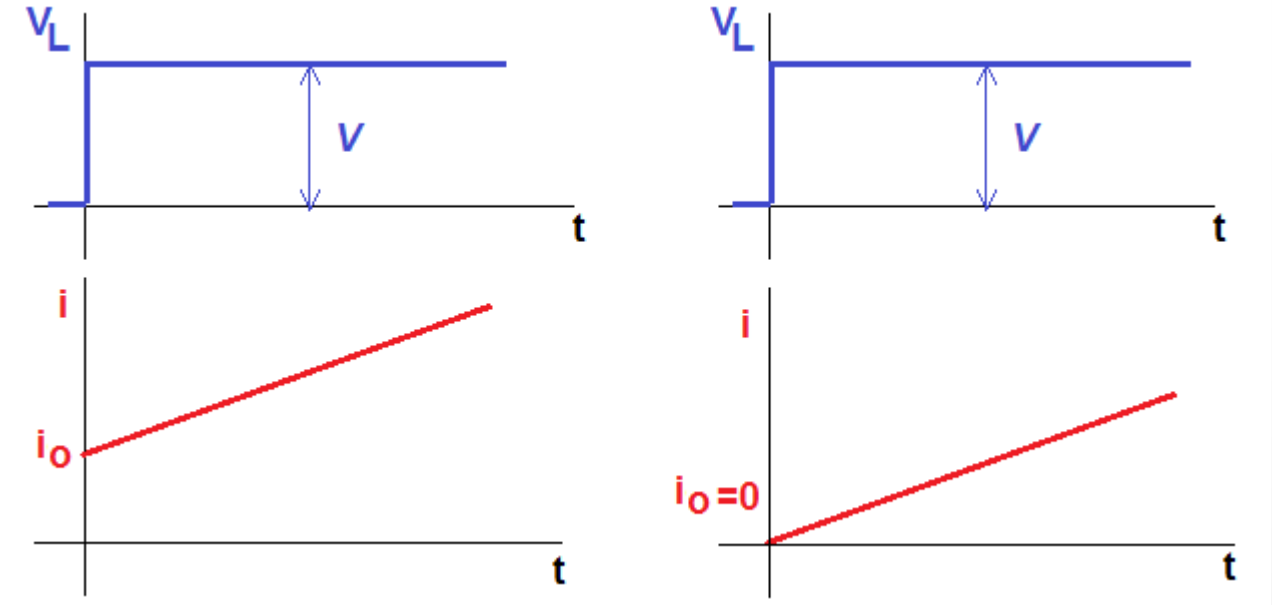
$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad i = \frac{1}{L}\int V_L \cdot dt + i_o$$

Za „step“ pravougaonog impulsa konstantne vrednosti (V_L=V=const) , promena struje prigušnice je :

$$i = \frac{V}{L} \cdot t + i_0$$

kada je i_o=0

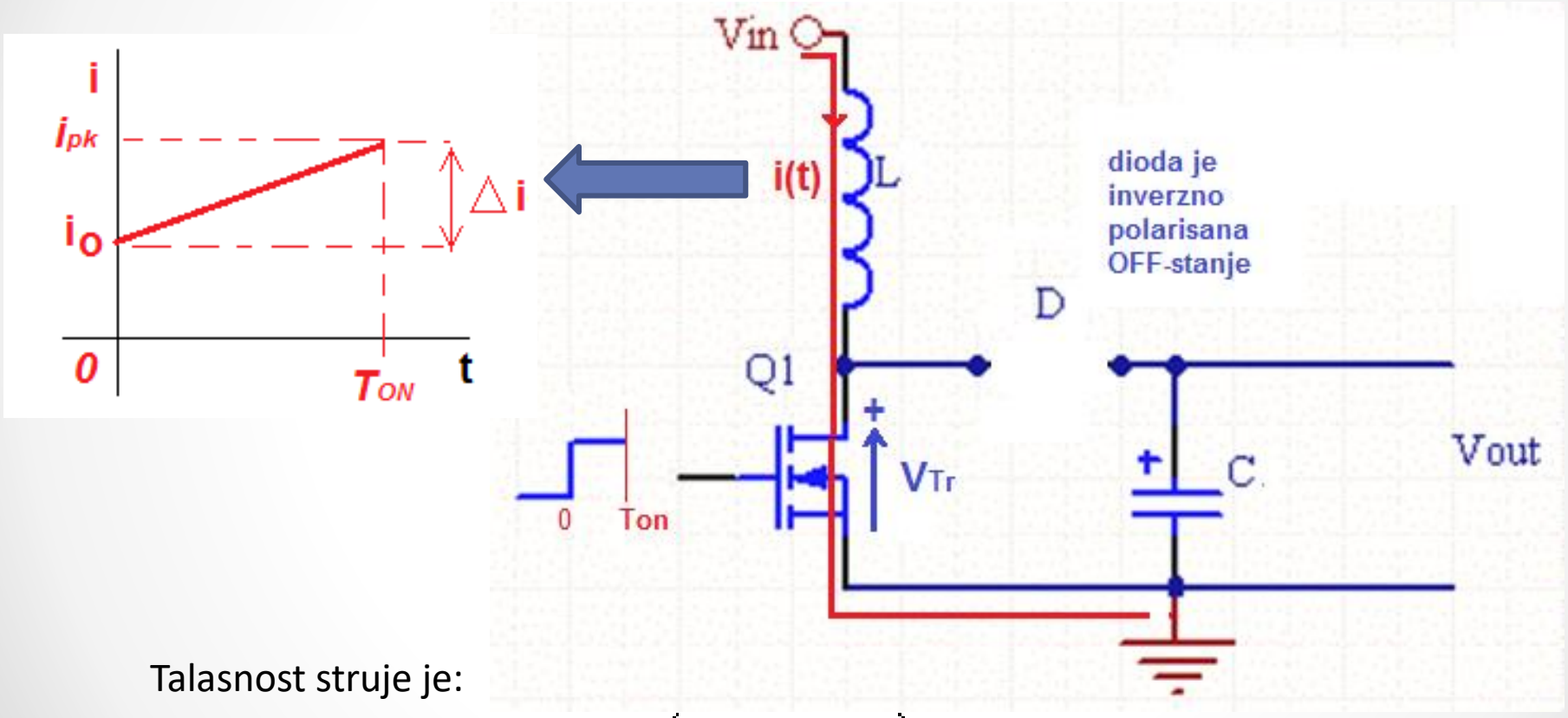
$$i = \frac{V}{L} \cdot t$$



Struja prigušnice raste linearno po rampi kada je na njenim krajevima primenjen konstantan impuls napona.

Kada je tranzistorski prekidač uključen ("ON" stanje) vršna vrednost struje je:

$$i_{pk} = \frac{(V_{in} - V_{Trans})T_{on}}{L} + i_o$$

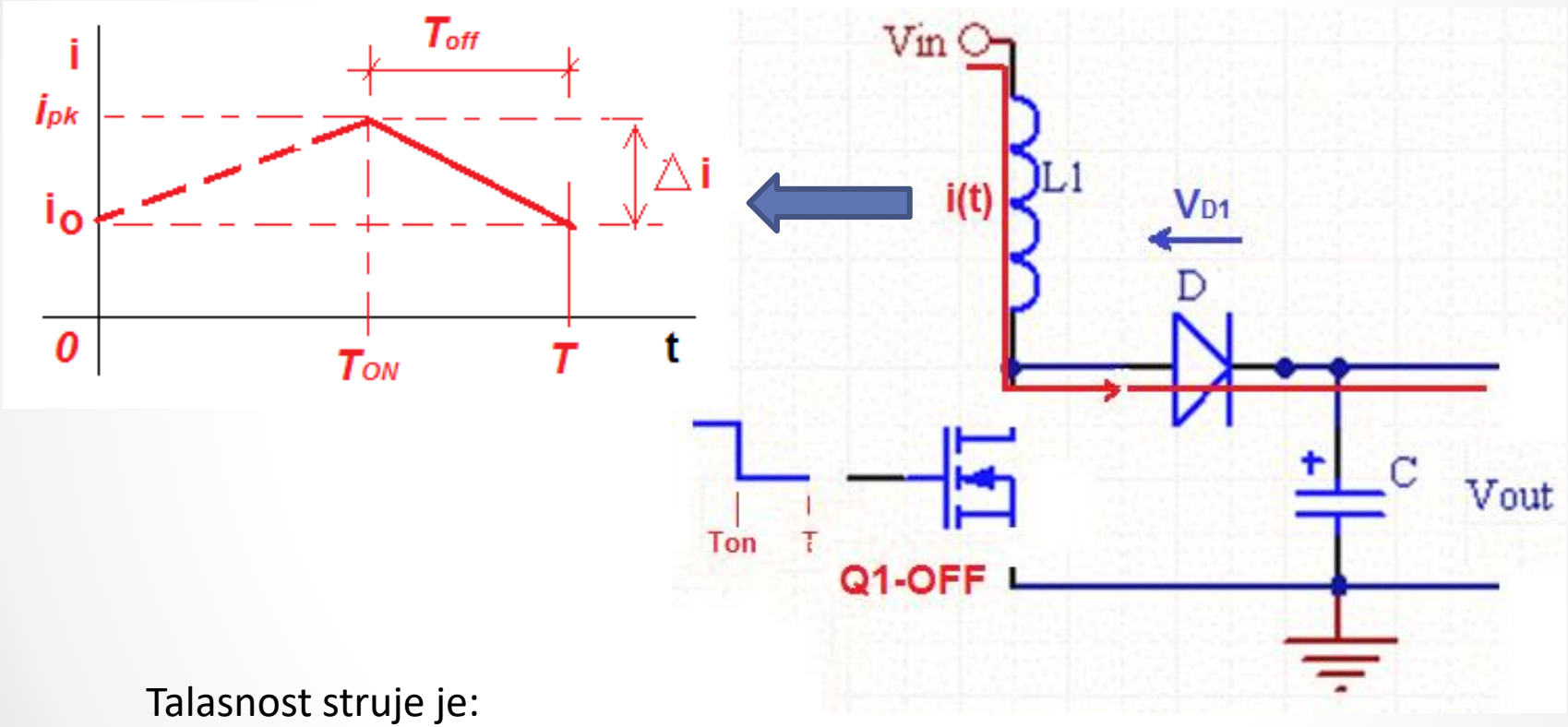


Talasnost struje je:

$$\Delta i = \frac{(V_{in} - V_{Trans})T_{on}}{L}$$

Kada je prekidački tranzistor isključen ("OFF" stanje) minimalna vrednost struje je:

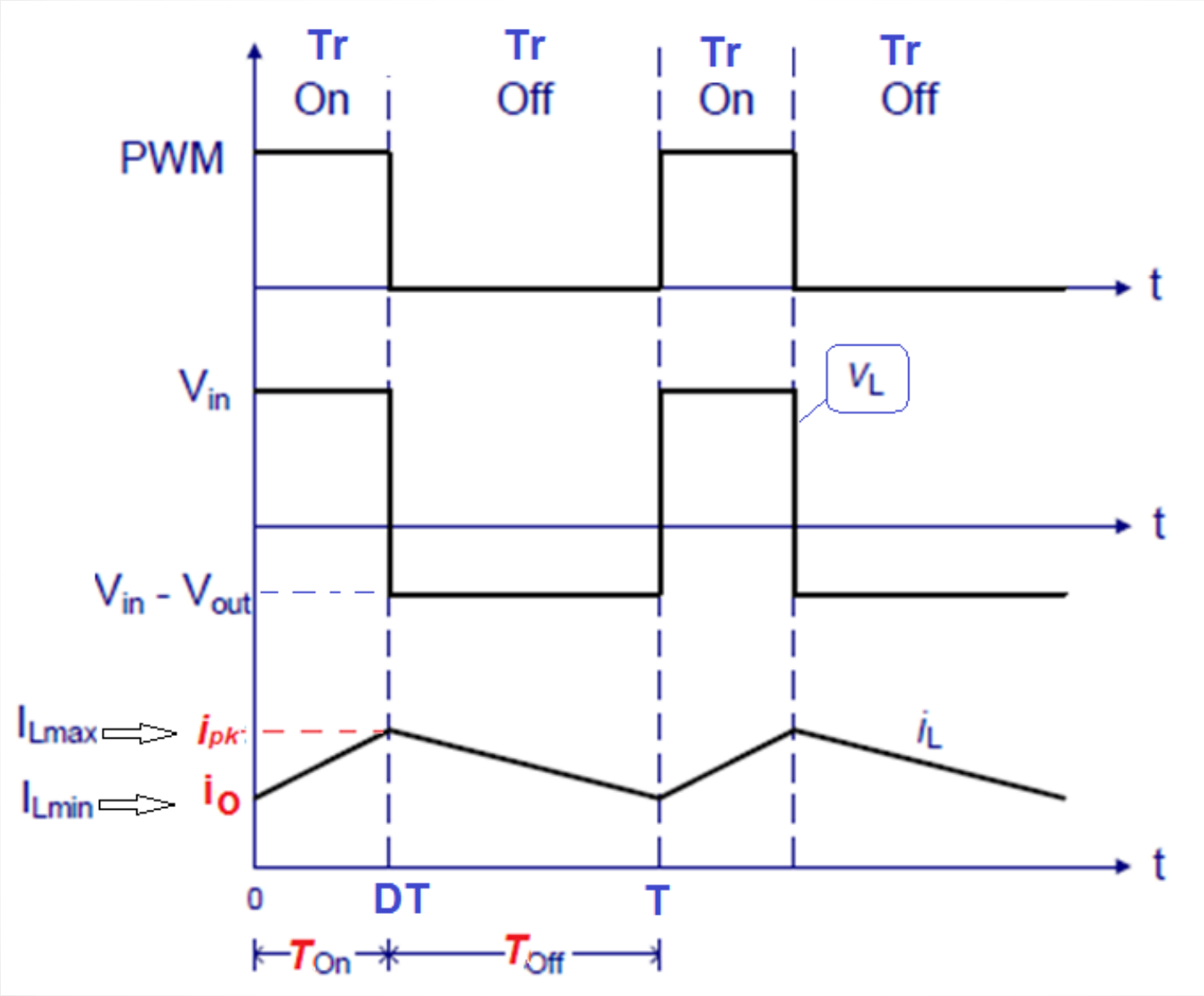
$$i_o = i_{pk} - \frac{(V_{out} - V_{in} + V_D)T_{off}}{L}$$



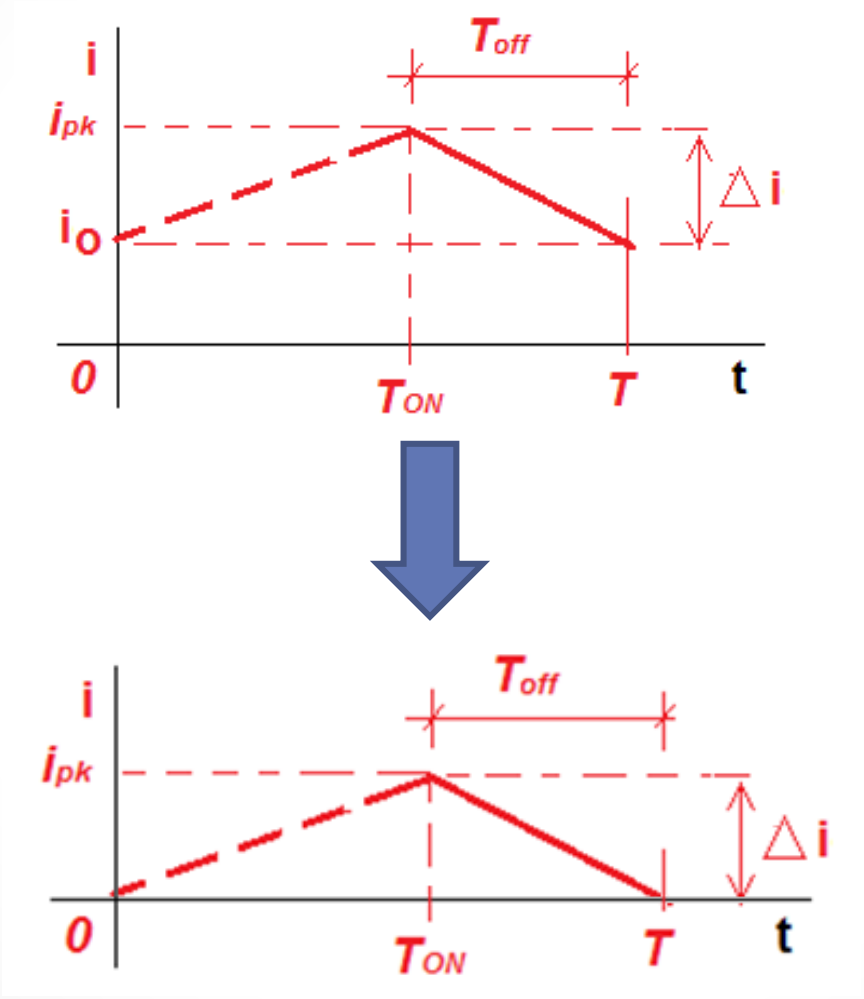
Talasnost struje je:

$$\Delta i = \frac{(V_{out} - V_{in} + V_D)T_{off}}{L}$$

KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI



Primećuje se da je uslov za prelaz iz režima kontinualni u kontinualni, odnosno da je uslov kontinualnosti/diskontinualnosti struje ustvari slučaj kada je i_o jednaka nuli.



Izjednačavanjem vrednosti talasnosti za porast struje i za njen pad, i rešavanjem jednačine po V_{out}, možemo dobiti relaciju za vrednost izlaznog napona V_{out}:

$$\frac{(V_{in} - V_{Trans})T_{on}}{L} = \frac{(V_{out} - V_{in} + V_D)T_{off}}{L}$$

$$V_{in}T_{on} - V_{Trans}T_{on} = V_{out}T_{off} - V_{in}T_{off} + V_D T_{off}$$

$$V_{in}T_{on} + V_{in}T_{off} = V_{out}T_{off} + V_{Trans}T_{on} + V_D T_{off}$$

$$V_{in} - V_{Trans}D = (V_{out} + V_D)(1 - D)$$

$$V_{out} = \frac{V_{in} - V_{Trans}D}{(1 - D)} - V_D$$

Ako ovu jednačinu $V_{out} = \frac{V_{in} - V_{Trans} D}{(1-D)} - V_D$

rešimo po D: $DV_{out} + DV_D - V_{Trans} D = V_{out} - V_{in} + V_D$

$$D = \frac{V_{out} - V_{in} + V_D}{V_{out} + V_D - V_{Trans}}$$

Ako zanemarimo pad napona na diodi i tranzistoru: $D = \frac{V_{out} - V_{in} + \cancel{V_D}}{V_{out} + \cancel{V_D} - \cancel{V_{Trans}}}$

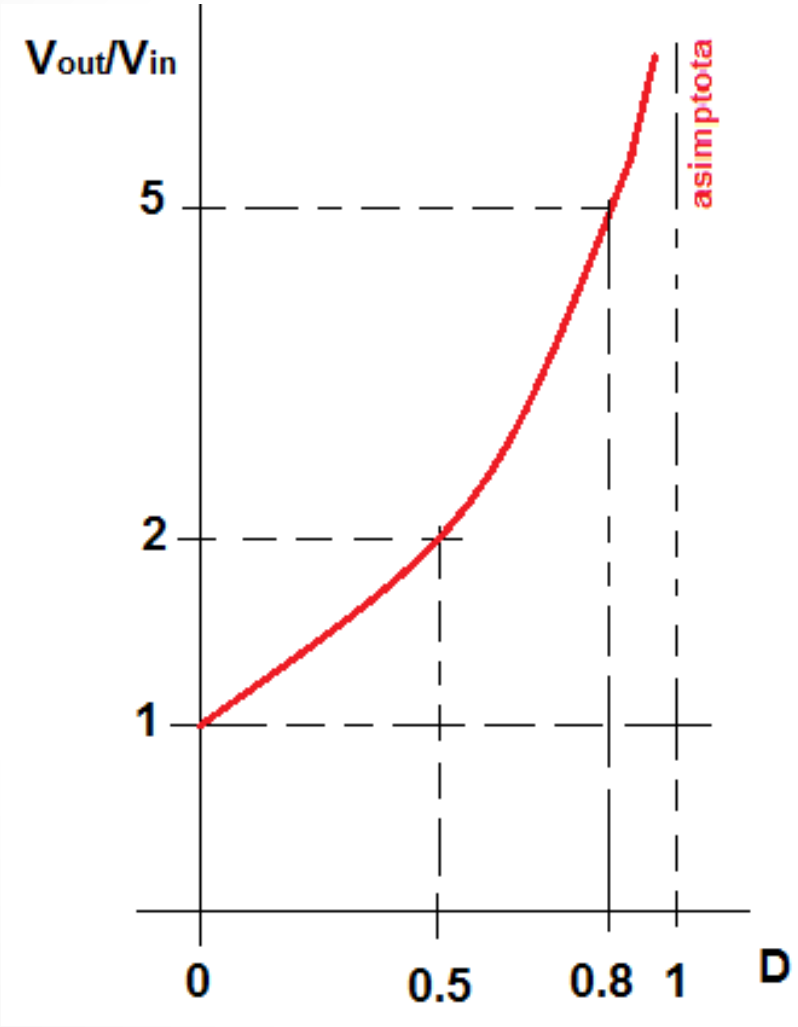
$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}$$

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

Izlazni napon zavisi prema nelinearnoj funkciji od veličine "duty cycle"- D.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

Promena izlaznog napona u zavisnosti od koeficijenta D



Praktični opseg promene koeficijenta D:

1>D>0

Preciznije:

0.9>D>0.1

PROJEKTANTSKE DILEME!!!

- Glavno pitanje prilikom projektovanja pretvarača je koji tip induktora treba koristiti.
- U većini slučajeva ulazni napon, izlazni napon i struja opterećenja diktiraju zahteve projekta, dok su induktivnost i talasnost struje jedini slobodni parametri.
- Iz jednačine za talasnost struje:

$$\Delta i = \frac{(V_{out} - V_{in} + V_D)T_{off}}{L}$$

se vidi da je induktivnost obrnuto proporcionalna talasnosti.

- Drugim rečima, ako želimo da smanjimo talasnost, moramo upotrebiti veću induktivnost.
- Stoga se u praktičnoj primeni odlučuje o talasnosti struje koja će dati razumnu vrednost induktivnosti.

KOMPROMISI!!!

- Postoje kompromisi koji se tiču niske i visoke vrednosti talasnosti struje.
- Velika talasnost struje znači da je vršna struja i_{pk} veća i shodno tome je veća verovatnoća zasićenja induktora, a samim tim i veći stres na tranzistoru.
- Stoga pri izboru prigušnice treba voditi računa da struja zasićenja magnetnog kola bude veća od vršne vrednosti struje i_{pk}.
- Takođe, tranzistor bi trebao biti tako dimenzionisan da može podneti vršnu struju veću od i_{pk}.
- Prigušnica mora biti tako projektovana tako da može da podnese odgovarajuću efektivnu vrednost struje (RMS vrednost) obzirom da ima konačnu omsku otpornost.

ŠTA SE DEŠAVA PRI MALIM OPTEREĆENJIMA????

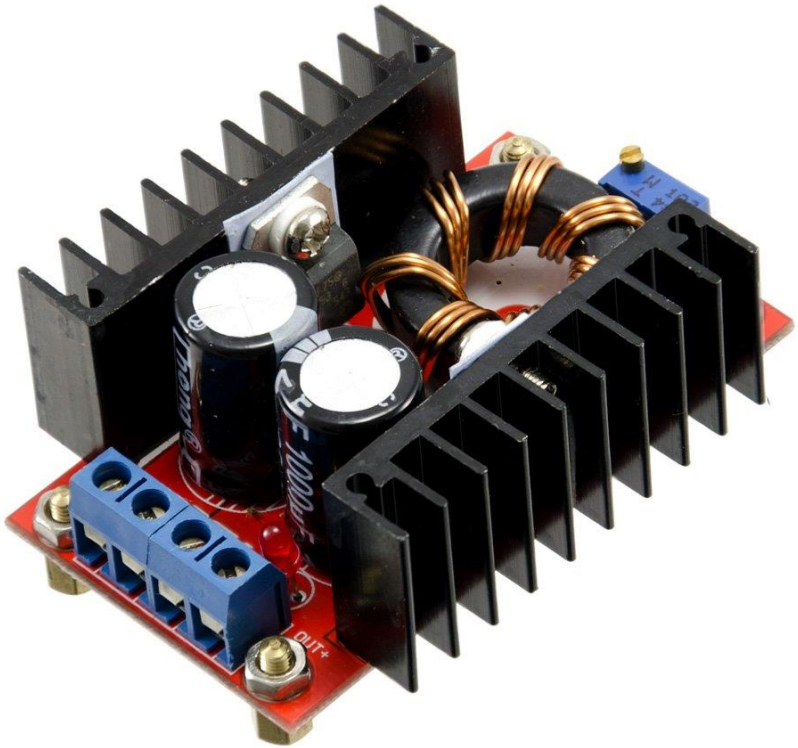
- Treba napomenuti da pri malim opterećenjima kolo može preći u prekidni (diskontinualni) režim, u kome se induktivnost (induktor) potpuno isprazni, odnosno njegova struja opadne na nulu u toku svake periode.
- Kada se ponovo primeni opterećenje, induktor se mora ponovo napuniti, pa se radni ciklus D tranzistora povećava, što dovodi do dužeg „povlačenja“ prigušnice ka masi.
- Zbog povećanog radnog ciklusa V_{out} se smanjuje, kada ustvari želimo da se poveća.
- Ovo prouzrokuje nestabilnost, koja je dobro poznata u podizačima napona, a ne predstavlja problem sa pretvaračima spuštačima napona.

- Jedan od načina za borbu protiv ove nestabilnosti je odabir dovoljno velike prigušnice , tako da je talasnost struje veća od dvostruke minimalne struje opterećenja.
- Kada se ovaj uslov ispuni, prigušnica je uvek u neprekidnom režimu.
- Ovaj uslov se može izraziti kao:

$$L = \frac{(V_{out} - V_{in} + V_D)(1 - D)}{\min(i_{load})f}$$

HVALA NA PAŽNJI!!!

PITANJA???

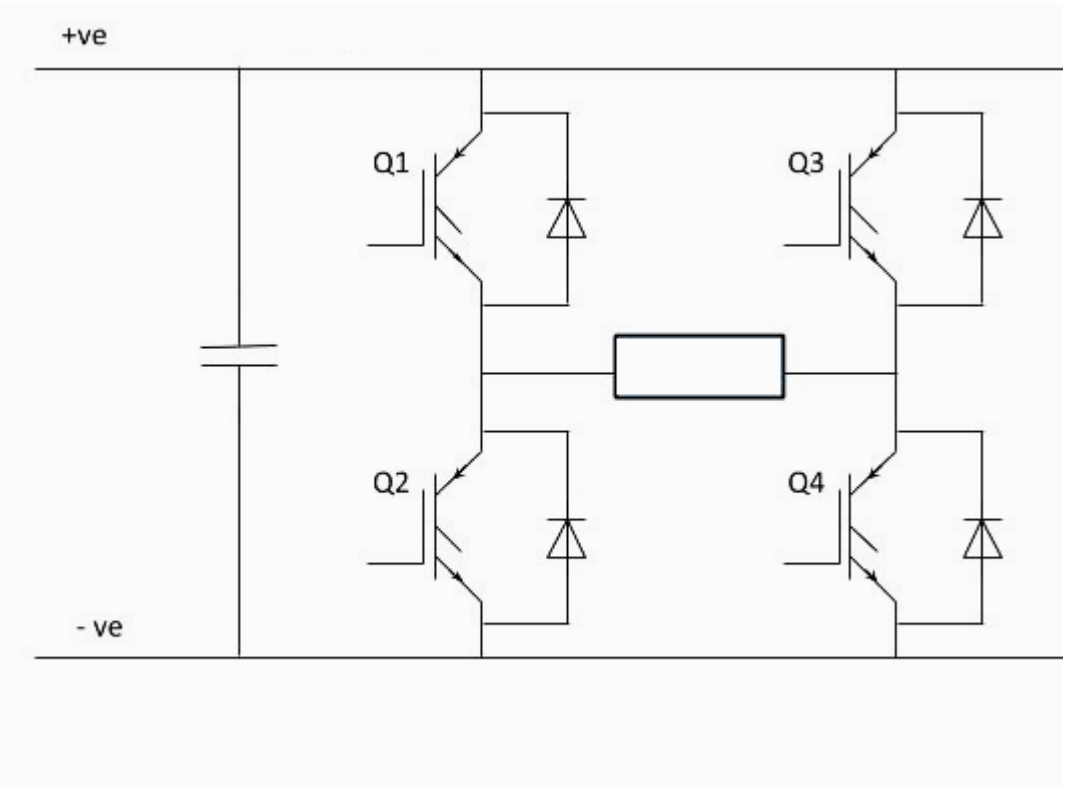


VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NET 2020/2021

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

DC/AC pretvarači - INVERTORI

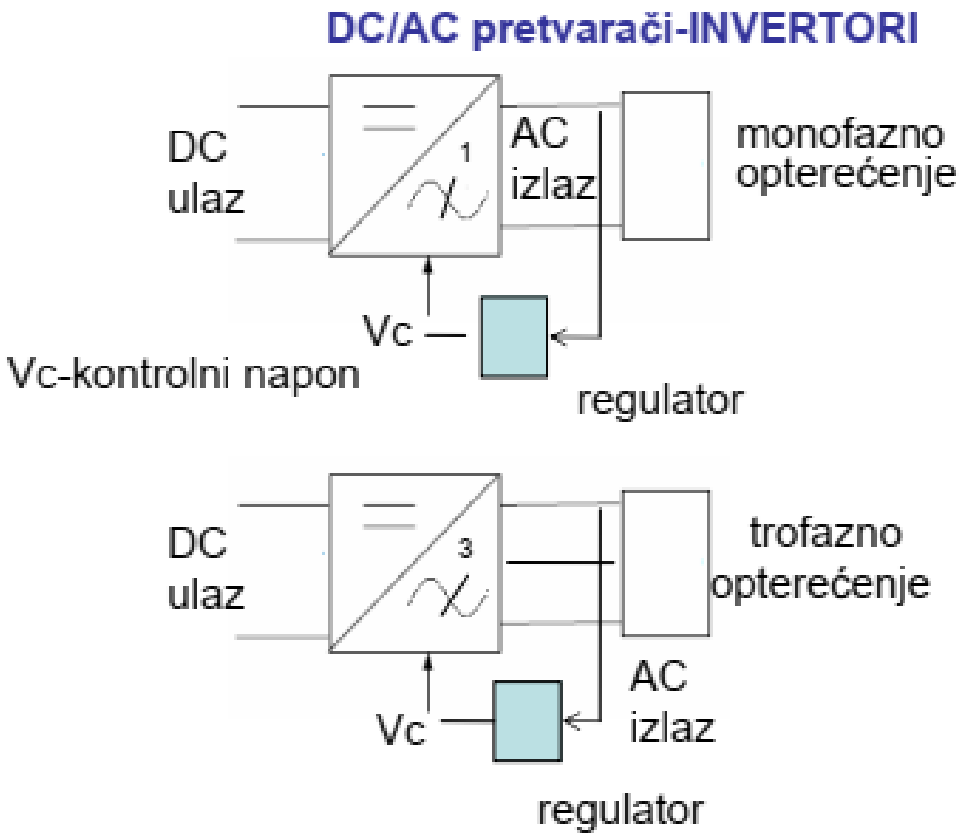


Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.

UVOD

- Invertori su DC/AC prekidački elektroenergetski pretvarači koji se koriste za napajanje potrošača naizmeničnim naponom promenljive efektivne vrednosti i/ili promenljive učestanosti.
- Prema načinu napajanja opterećenja invertori mogu biti naponski (*voltage source inverters* – VSI) ili strujni (*current source inverters* – CSI).
- U ovoj prezentaciji su analizirane topologije i funkcionisanje naponskih invertora.
- Izlazni napon naponskog invertora sastoji se od povorke bipolarnih naponskih impulsa koji se oblikuju procesom modulacije trajanja impulsa
- Upotrebom prostoperiodičnog modulišućeg signala, spektar izlaznog napona invertora će se sastojati od osnovnog harmonika, što je ustvari željeni napon na opterećenju, i niza viših harmonika koji se odstranjuju filtrom propusnikom opsega niskih učestanosti.
- Oblast primene invertora je veoma široka a najčešće se koriste u regulaciji elektromotornih pogona, u sistemima besprekidnog napajanja, za napajanje potrošača iz baterijske banke sistema ili iz obnovljivih izvora energije, za prenos energije iz obnovljivih izvora energije u distributivnu mrežu itd.

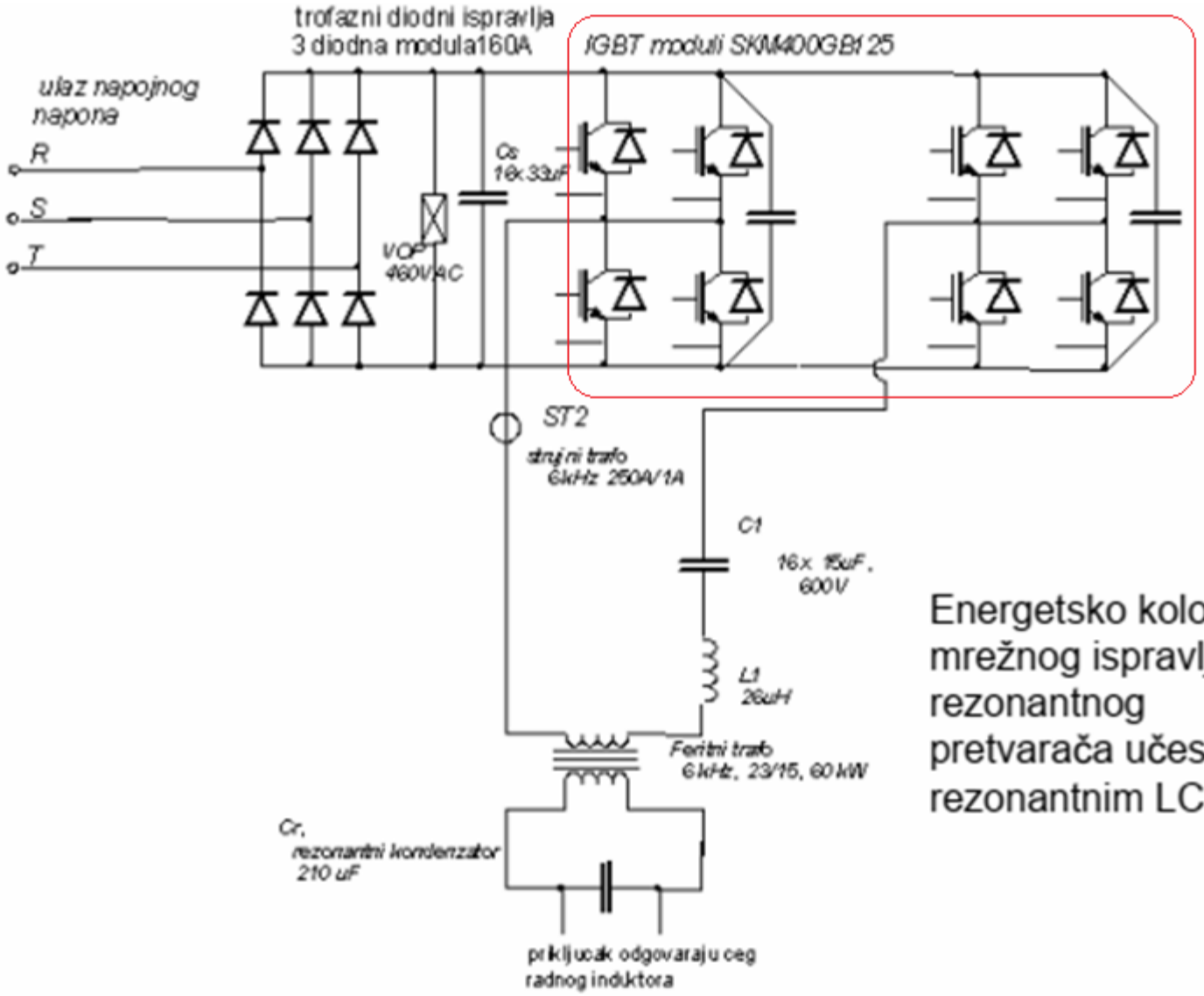
PRIMENA-osnovne blok šeme



PRIMENA:
-regulisani motorni pogoni
-kućne aplikacije
-el.vuča
-DC transmisije

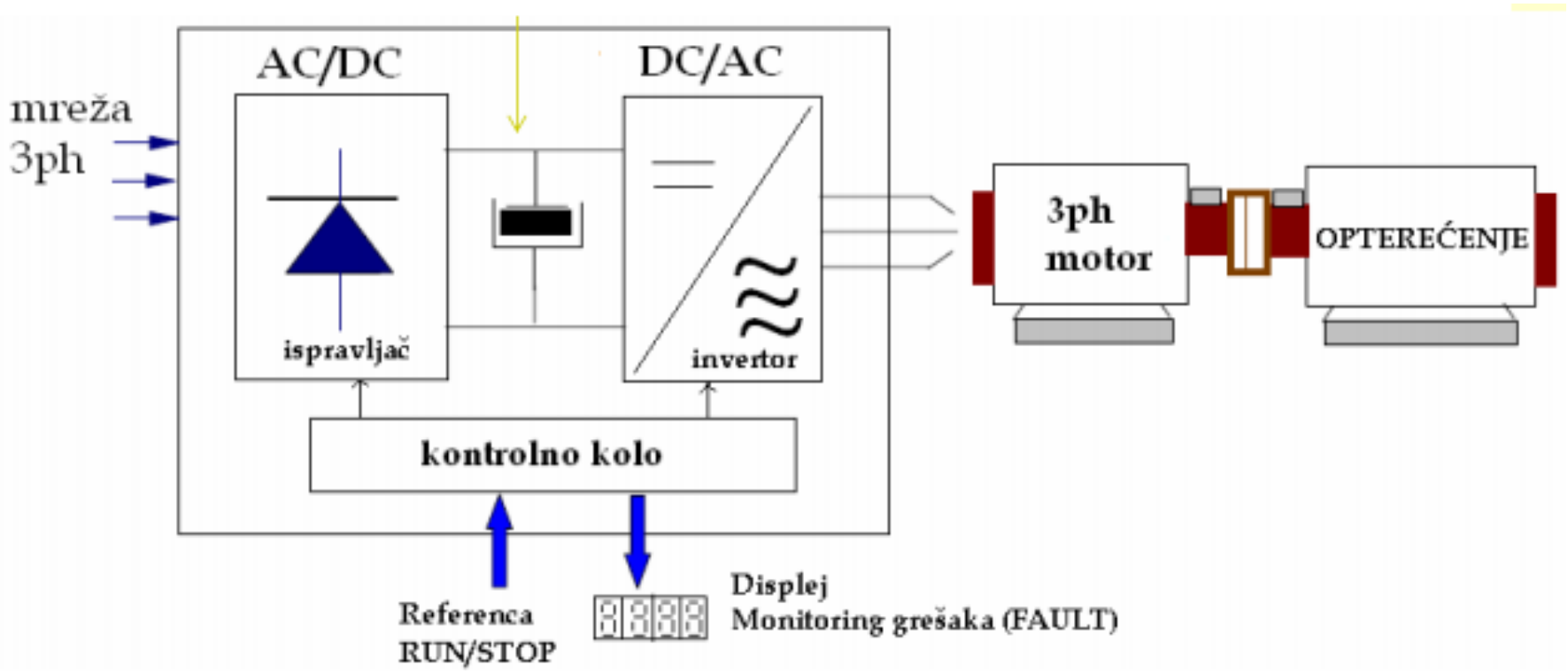
DC ulaz: jednosmerni izvori napajanja, izlaz ispravljačkih jedinica, solarne ćelije, DC vetrogeneratori , baterije, gorivne ćelije

REZONANTNI MONOFAZNI INVERTOR ZA INDUKCONO ZAGREVANJE



Energetsko kolo trofaznog mrežnog ispravljača i rezonantnog pretvarača učestanosti sa rezonantnim LC kolom

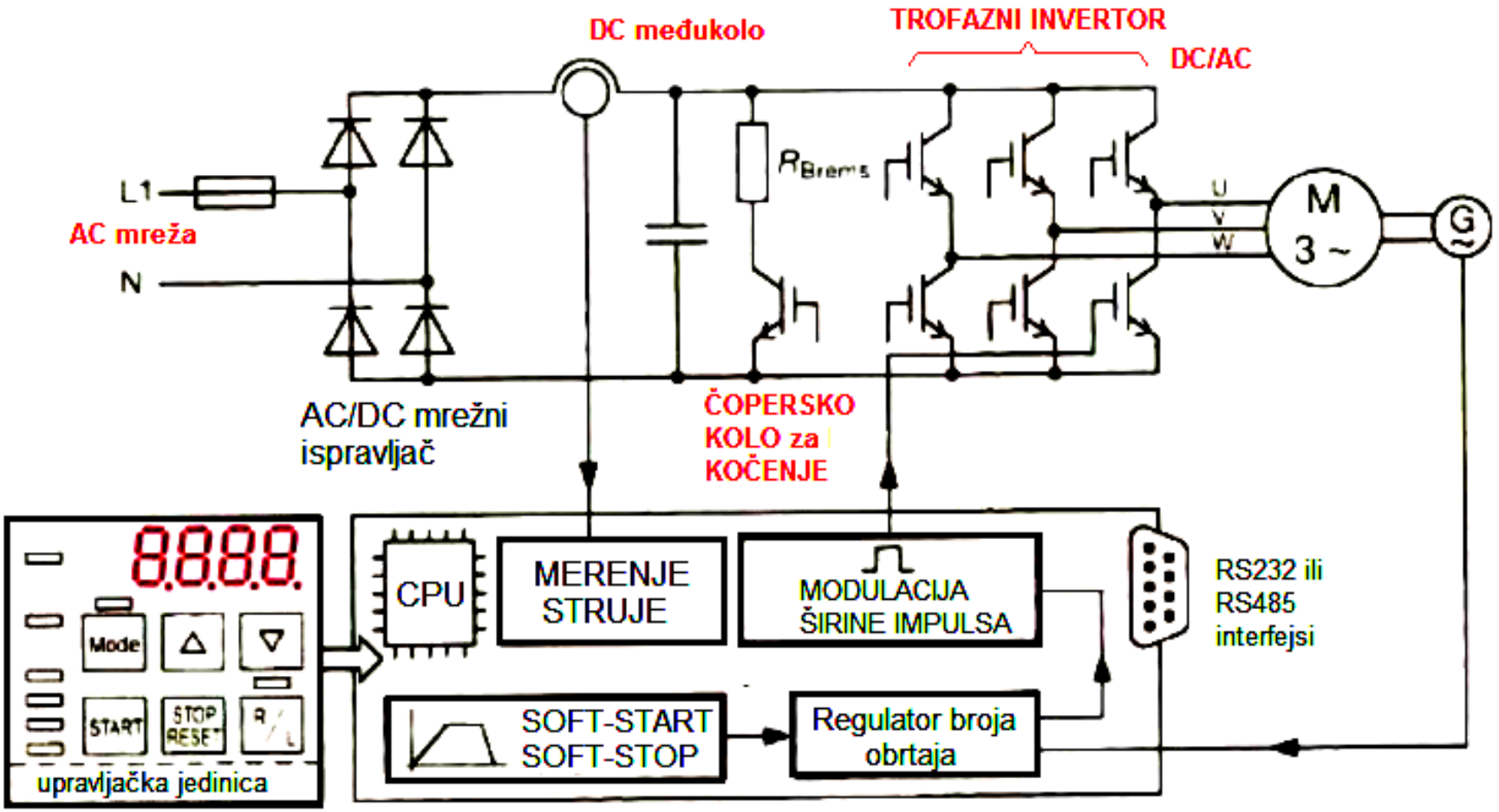
PRIMENA u AC REGULISANIM POGONIMA



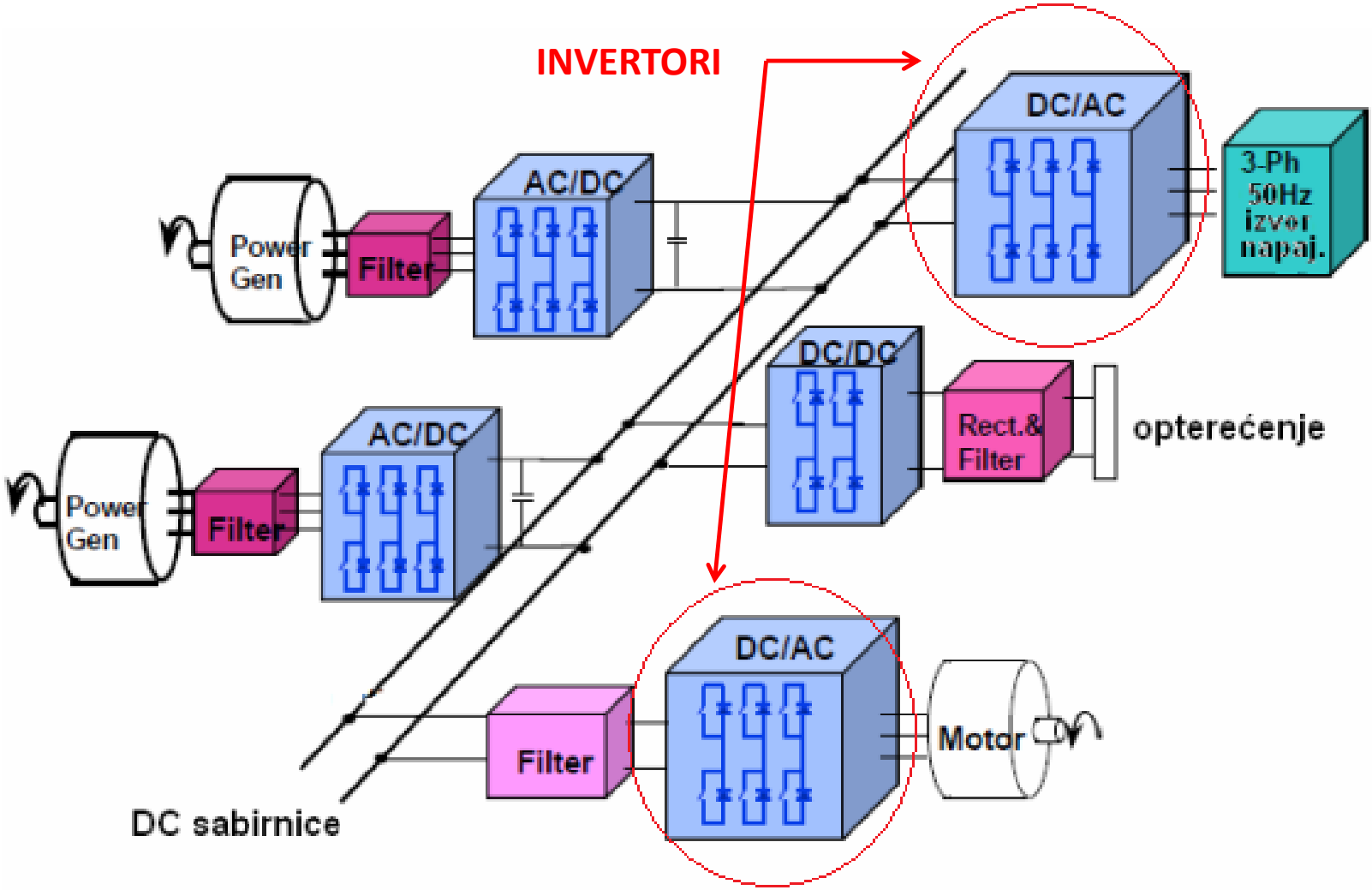
- DVA PRETVARANJA ENERGIJE AC-DC i **DC/AC** ISPRAVLJAČ, DC MEĐUKOLO, **INVERTOR**

- Pored toga, reakcija invertora na promene regulacionog zahteva je toliko brza da se može smatrati da odgovara na trenutne vrednosti naizmenične reference.

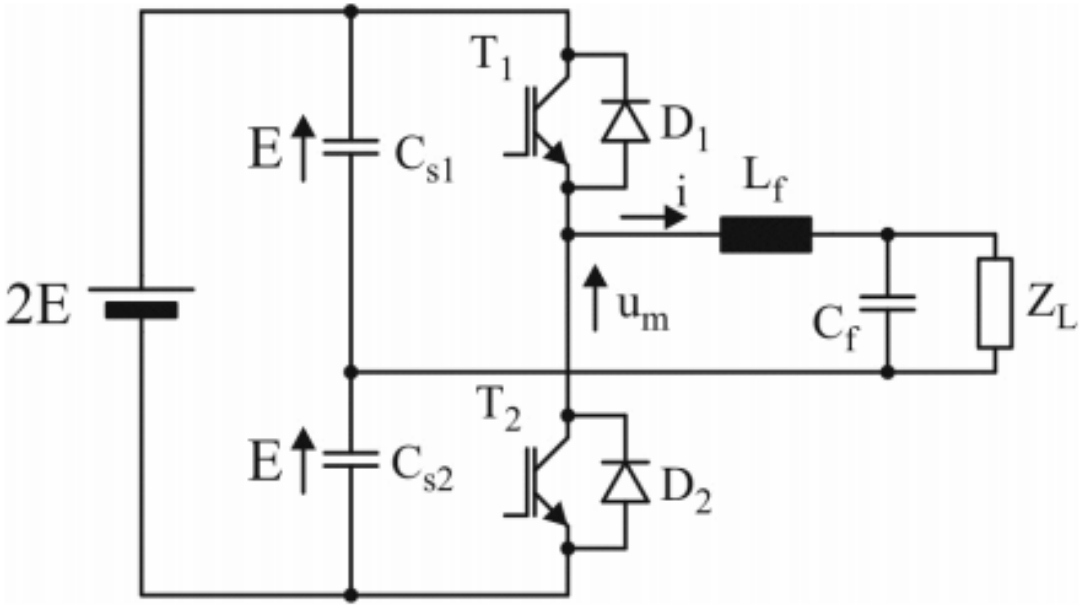
TROFAZNI INVERTOR(frekventni regulator) ZA REGULACIJU BRZINE ASINHRONOG MOTORA



PRIMENA U SISTEM U ENERGETSKIH PRETVARAČA-
Koncentrisani DC BUS sistem

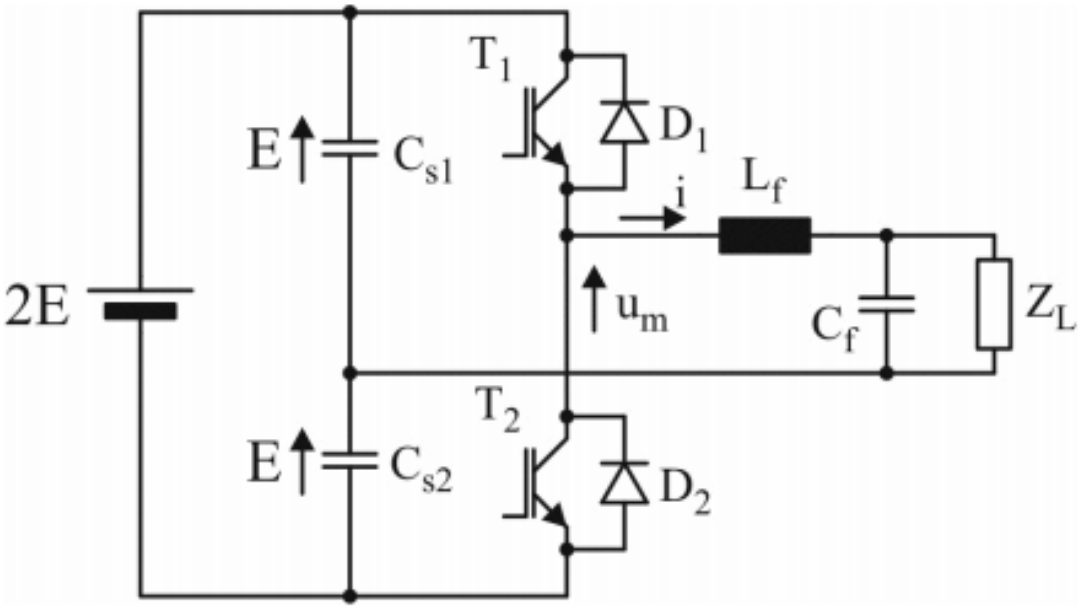


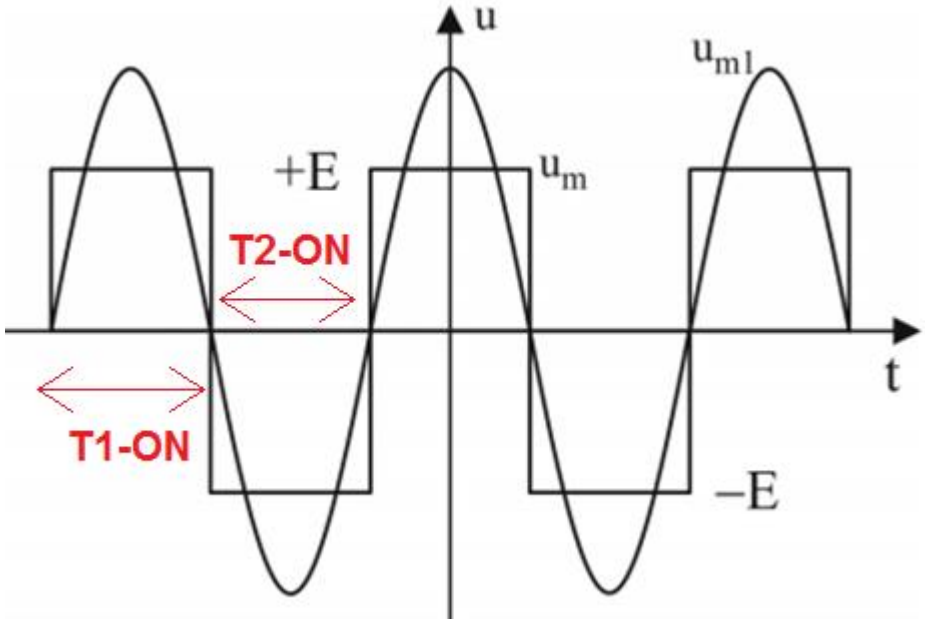
MONOFAZNI POLUMOSNI NAPONSKI INVERTOR-topologija



- U jednosmernom međukolu, na izvor jednosmernog napajanja (2E), priključena su dva redno vezana kondenzatora (C_{s1} i C_{s2}) čime se dobijaju dva naponska generatora napona „E“.
- Uključenjem tranzistora T1 izlazni napon invertora je u=E. Ako je izlazna struja ***i*** pozitivna, provodiće tranzistor T1, a ako je negativna, provodiće dioda D1.
- Uključenjem tranzistora T2 izlazni napon invertora je u=-E. Ako je izlazna struja ***i*** pozitivna, provodiće dioda D2, a ako je negativna, provodiće tranzistor T2.

POLUMOSNI NAPONSKI INVERTOR-osnovni princip rada

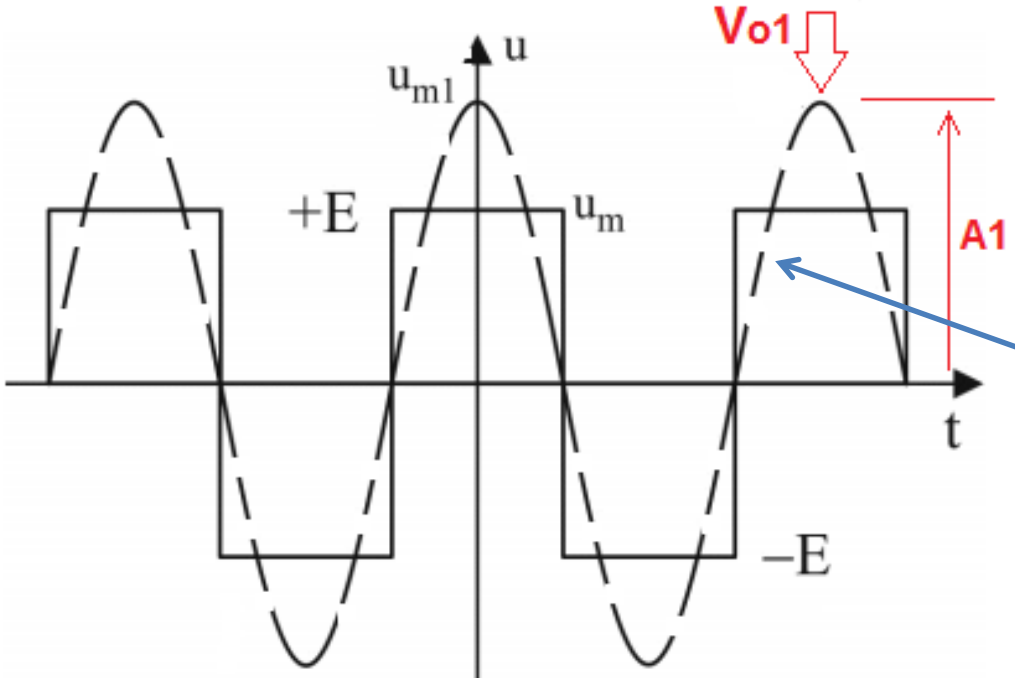




Najjednostavniji način da se ostvari naizmenični napon na opterećenju jeste da se u toku jedne poluperiode drži uključen jedan tranzistor a u toku druge poluperiode drugi tranzistor tako da će izlazni napon invertora i njegov osnovni harmonik imati pravougaoni bipolarni talasni oblik.

T1→ON i T2→OFF => Uout= +E

T2→ON i T1→OFF => Uout= -E



HARMONICI

Osnovni harmonik izlaznog napona invertora je:

$$V_{01} = A_1 \cos(\omega t)$$

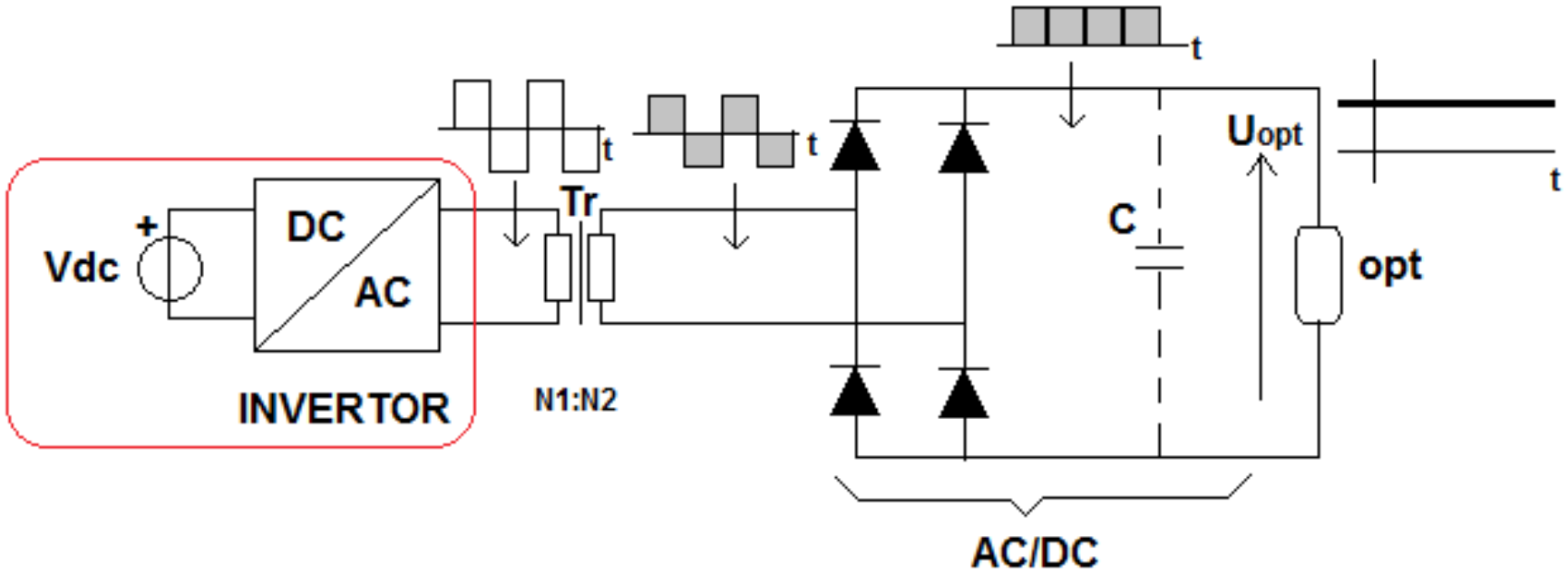
Amplituda osnovnog harmonika je:

$$A_1 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} E\cos(x)\,dx = \frac{2}{\pi}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} E\cos(x)\,dx = \frac{2E}{\pi}\sin(x)\Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{4E}{\pi}$$

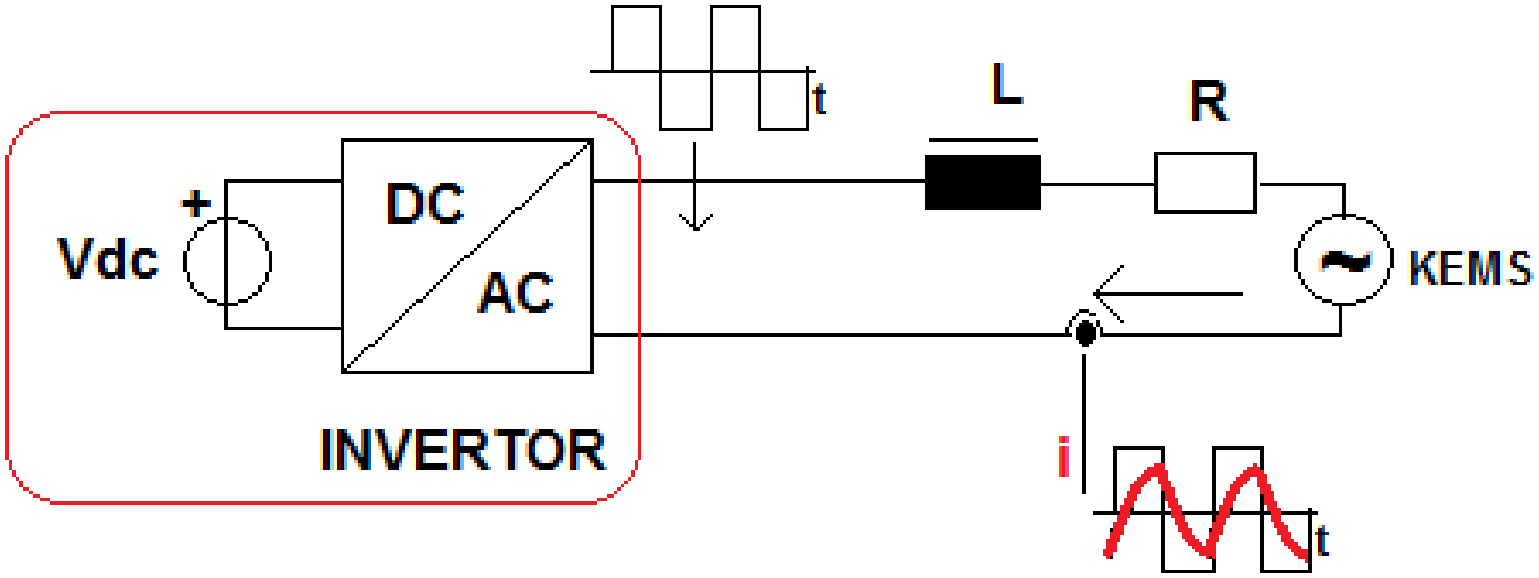
Amplituda k-tog (višeg) harmonika je :

$$A_k = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} E\cos(kx)\,dx = \frac{1}{k}\cdot\frac{4E}{\pi} \qquad k = 1,3,5,\ldots\infty$$

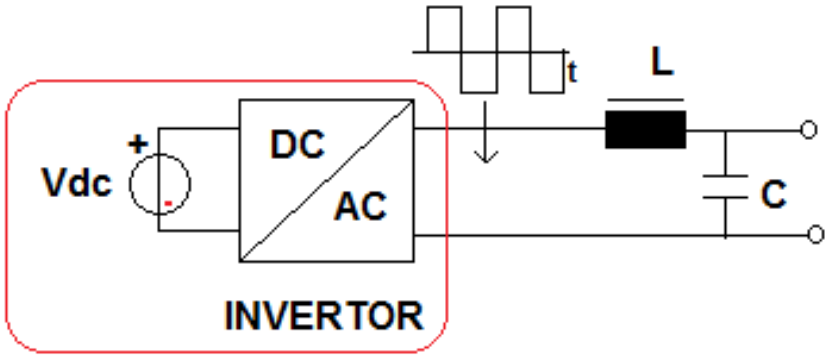
Pravougaoni, bipolarni izlazni napon invertora pogodan je za potrošače koji se na napajanje priključuju preko transformatora i diodnog ispravljača.

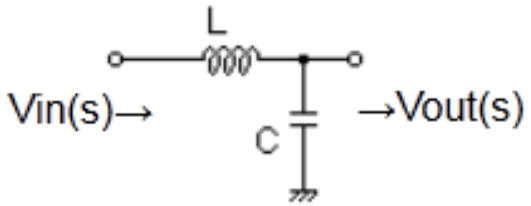


Pravougaoni, bipolarni izlazni napon invertora pogodan je za monofazne induktivne potrošače sa kvazi sinusnom strujom (elektromotor cirkulacione pumpe manje snage, elektromotor bušilice, pogoni sa komutatornim elektromotorima i sl. ....)

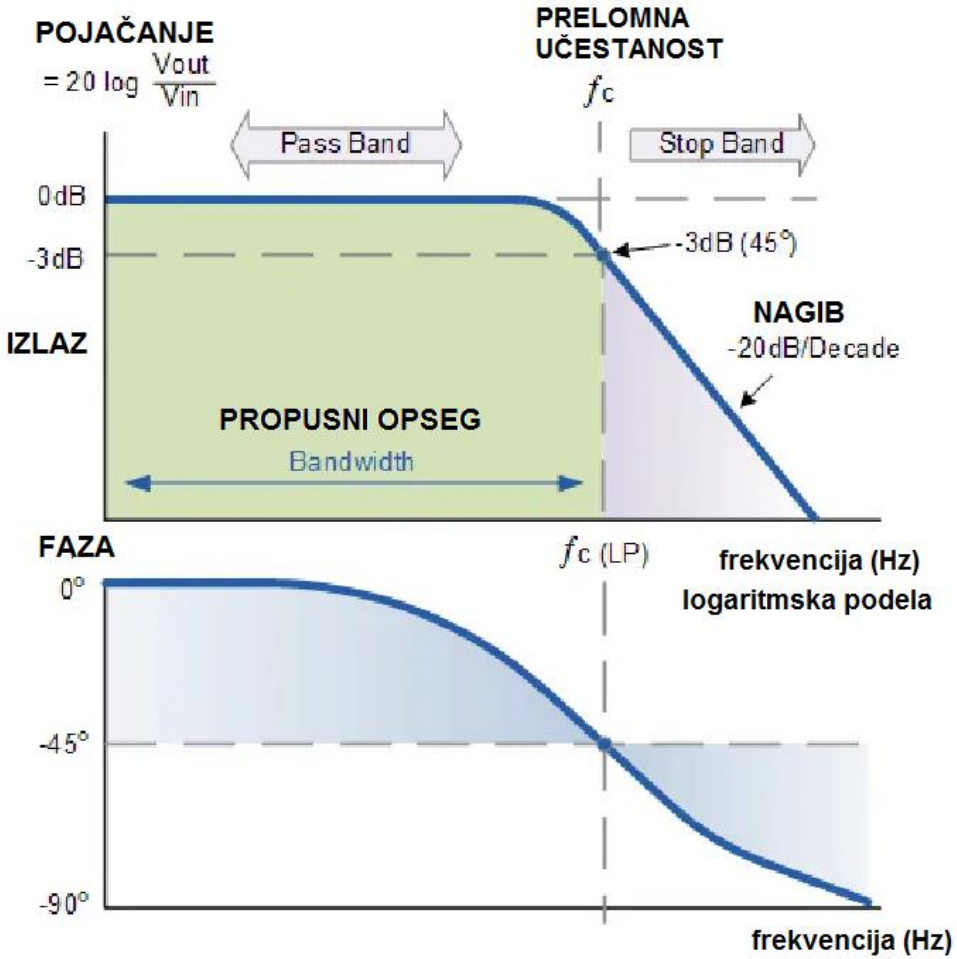


- Za potrošače koji zahtevaju prostoperiodičan napon napajanja prisustvo viših harmonika predstavlja harmonijska izobličenja koja treba odstraniti izlaznim LC filtrom.
- Prelomna učestanost filtra mora biti veća od učestanosti osnovnog harmonika kako ga ne bi oslabila.
- Zbog toga filter ima vrlo malo slabljenje za harmonike niskih učestanosti pa se ovi harmonici moraju otkloniti procesom modulacije trajanja impulsa tj.putem tzv. *Pulse Width Modulation* (PWM).





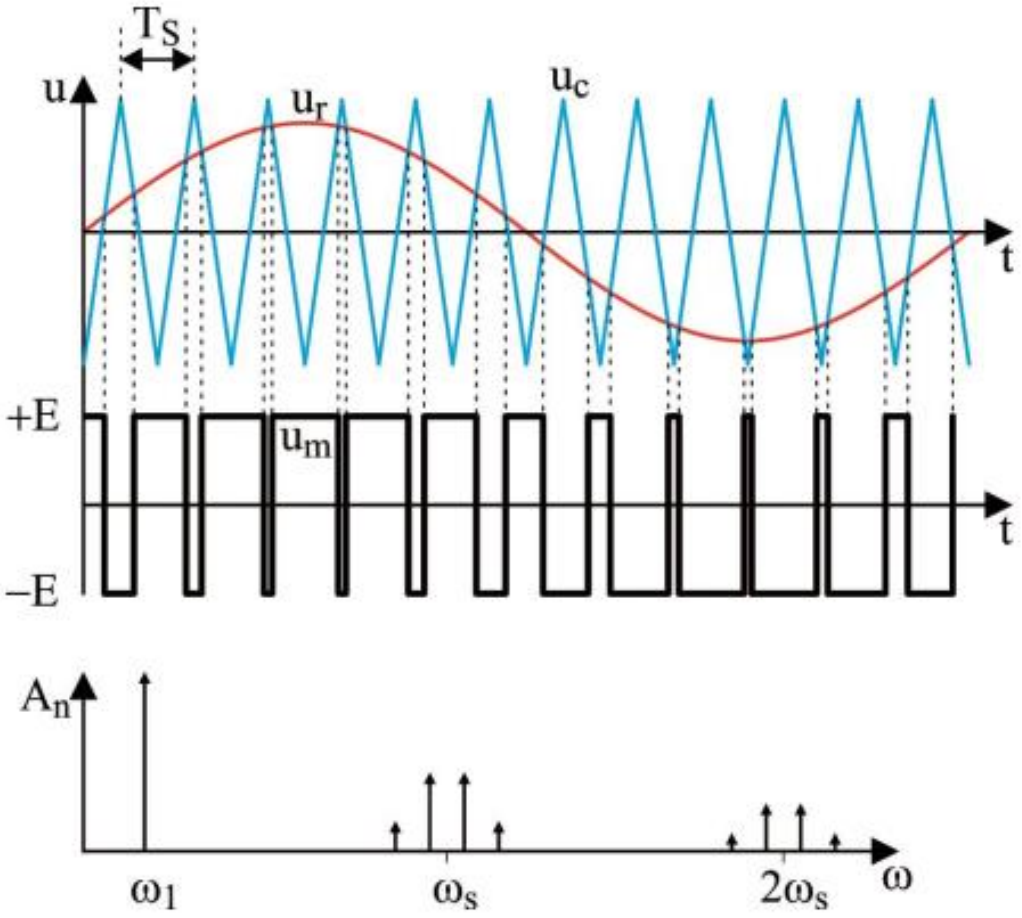
$$\frac{vo}{vi} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{LC}} = \frac{\omega_o^2}{s^2 + \omega_o^2}$$



MODULACIJA TRAJANJA IMPULSA- BIPOLARNA MODULACIJA

Modulacija položaja prednje i zadnje ivice impulsa prirodnim odabiranjem koji se može opisati matematičkim izrazom:

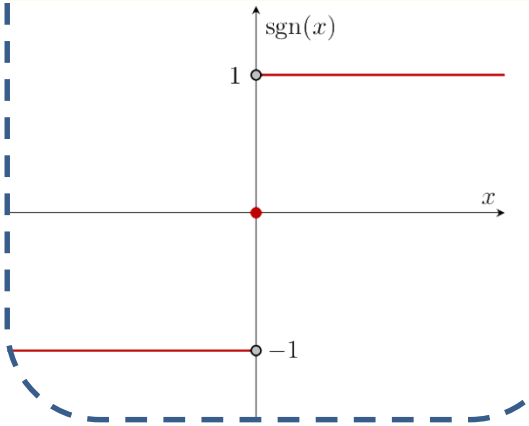
$$u_m(t) = \mathrm{sgn}\left[u_r(t) - u_C(t)\right] \cdot E$$



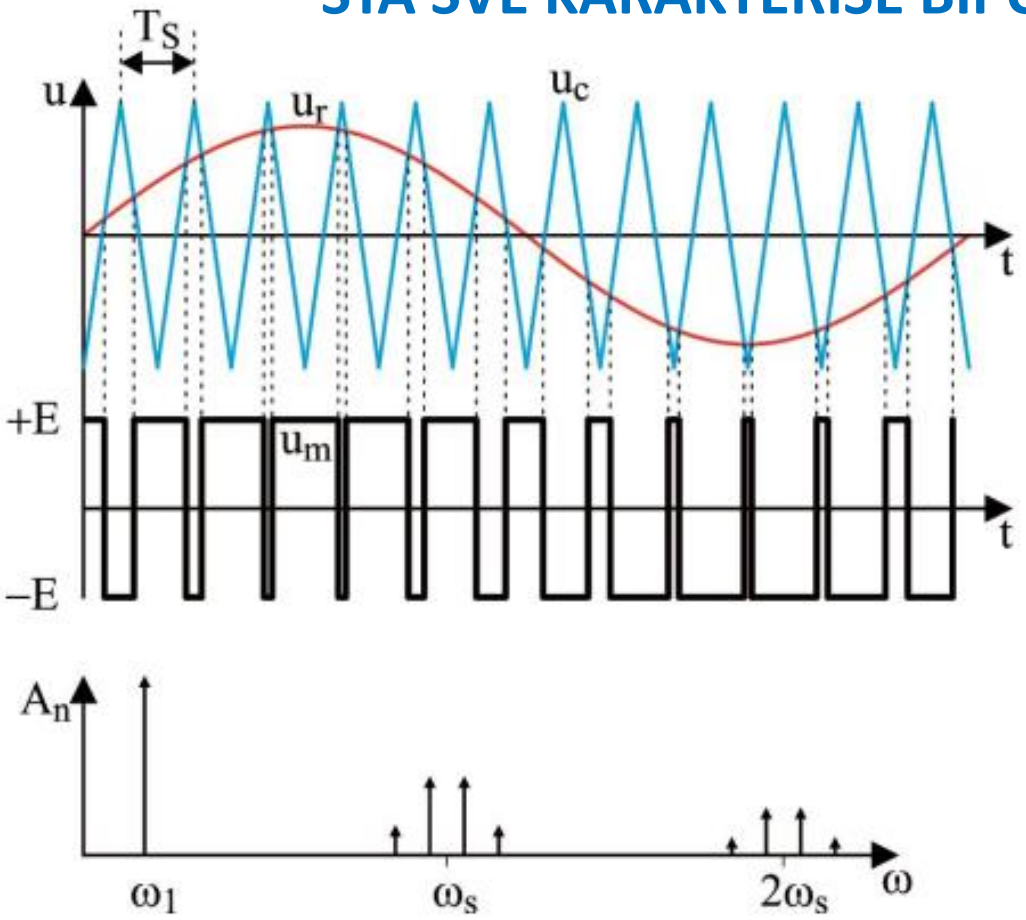
sign (x)=????

$$\mathrm{sgn}(x) = \begin{cases} \dfrac{|x|}{x} \text{ ili } \dfrac{x}{|x|}; x \neq 0 \\ 0 \qquad\qquad ; x = 0 \end{cases}$$

$$= \begin{cases} -1; x < 0 \\ 0; x = 0 \\ 1; x > 0 \end{cases}$$

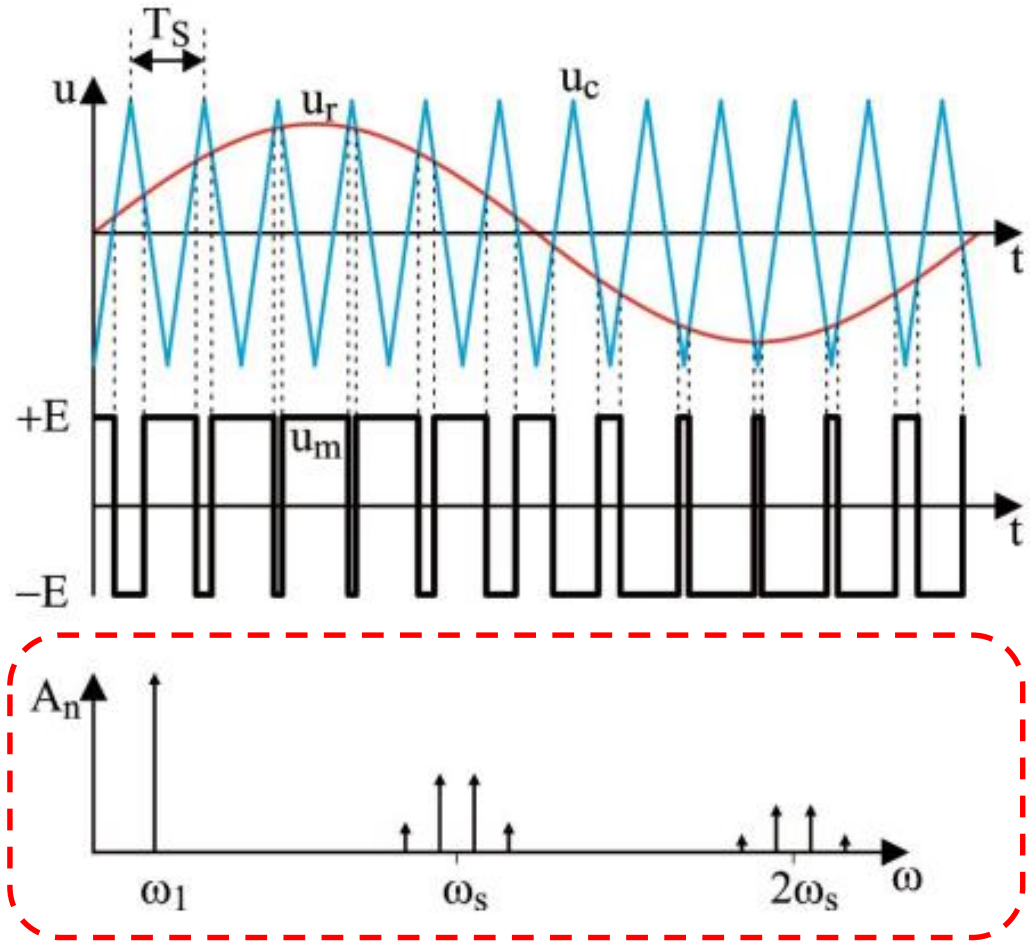


ŠTA SVE KARAKTERIŠE BIPOLARNU MODULACIJU???



-modulišući signal (Ur),
-nosilac (Uc),
-perioda odabiranja (Ts),
-modulisani signal (Um)
-spektar izlaznog napona invertora

S obzirom na to da se izlazni napon invertora menja od +E do –E ovakav tip modulacije naziva se bipolarna modulacija. Odnos maksimalnih trenutnih vrednosti modulišućeg signala i nosioca naziva se indeks modulacije.

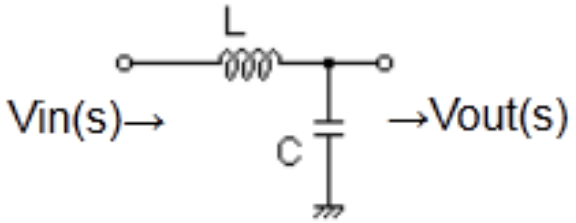


-**Spektar izlaznog napona invertora** se sastoji od osnovnog harmonika i niza viših harmonika grupisanih oko harmonika čija je učestanost celobrojni umnožak učestanosti odabiranja (ωs).

-U spektru mogu postojati samo neparni harmonici jer je ispunjen uslov $f(t+T/2)= - f(t)$

-Kako je u prikazanom primeru ωs = 12 ω1, sledi da ne postoje harmonici na učestanosti ω = kωs jer bi to bili parni harmonici.

IZRAČUNAVANJE SLABLJENJA LC- filtra



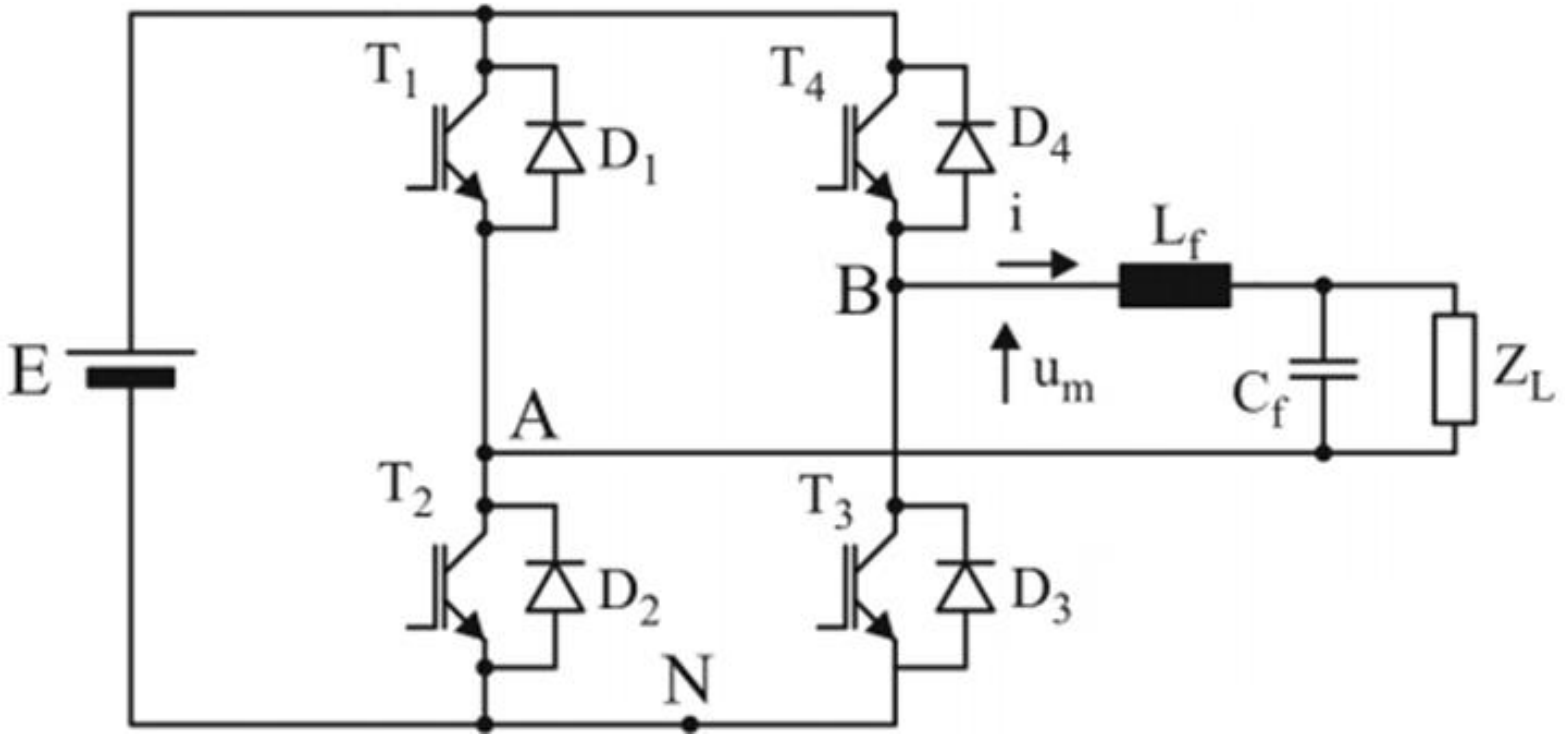
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{LC}} = \frac{\omega_o^2}{s^2 + \omega_o^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} s = j\omega \\ s^2 = -\omega^2 \end{array} \right\} \quad \frac{v_o}{v_i} = \frac{\omega_o^2}{s^2 + \omega_o^2} = \frac{\omega_o^2}{\omega_o^2 - \omega^2}$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{\omega_o^2}{\omega_o^2 - \omega^2} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}} = -\frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1} \Rightarrow \left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_o^2} - 1}$$

$$\left| \frac{v_o}{v_i} \right| \approx \frac{1}{\frac{\omega^2}{\omega_o^2}} = \frac{\omega_o^2}{\omega^2} \quad \text{za} \quad \omega >> \omega_o$$

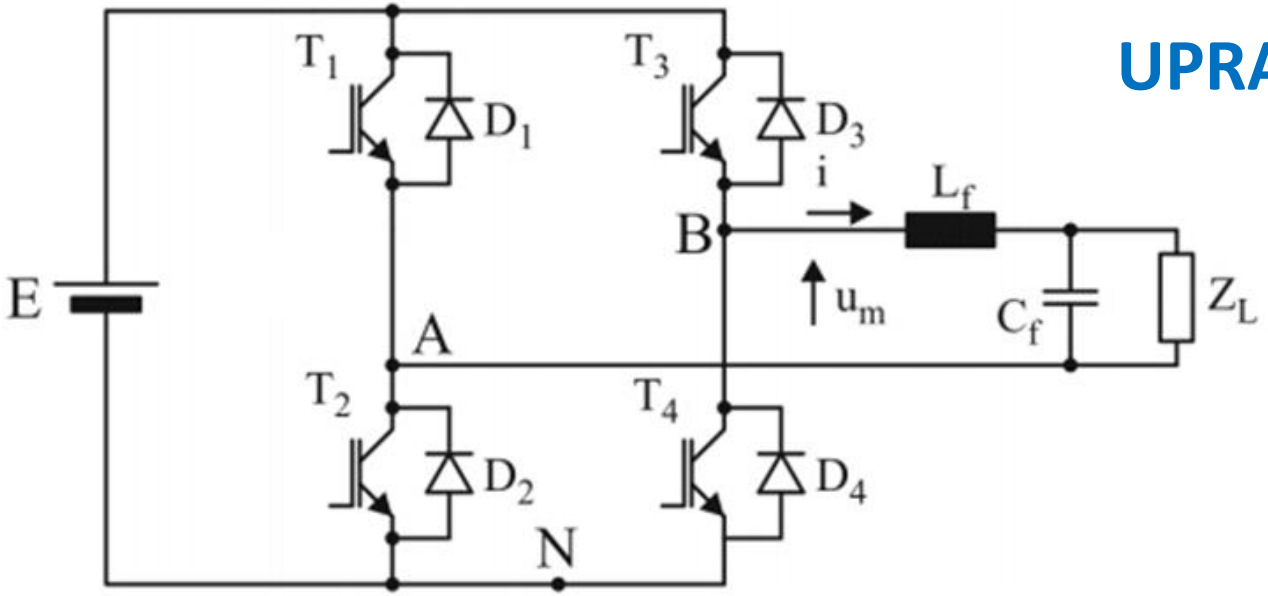
Učestanost odabiranja (ωs= 5KHz...20 kHz) i mnogo je veća od učestanosti osnovnog harmonika (obično 50Hz ili 50Hz), iz prenosne funkcije sledi da će harmonijska izobličenja napona na opterećenju biti veoma mala.

MONOFAZNI MOSNI NAPONSKI INVERTOR-topologija



Za razliku od polumosnog invertora čiji izlazni napon može imati dva naponska nivoa (+E i -E), izlazni napon mosnog invertora, može imati tri naponska nivoa !!!!

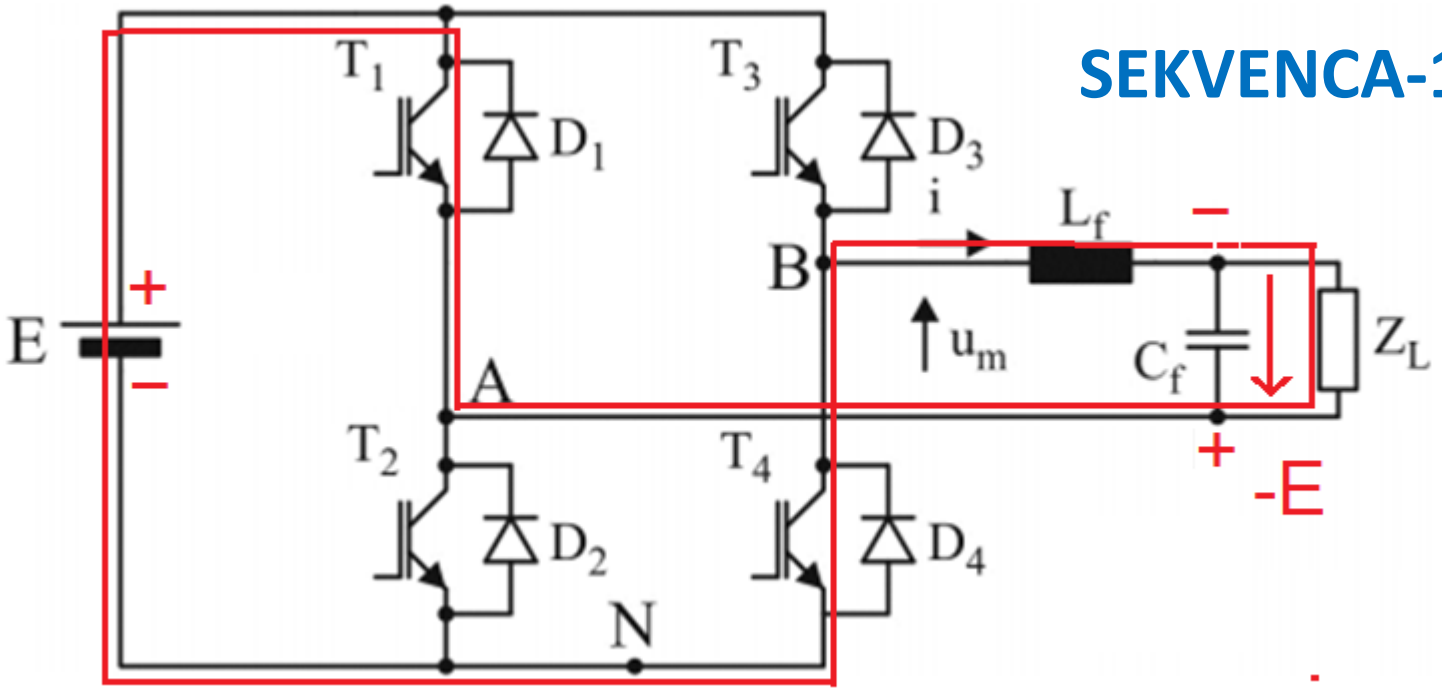
UPRAVLJANJE



T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	–E
OFF	ON	ON	OFF	+E
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

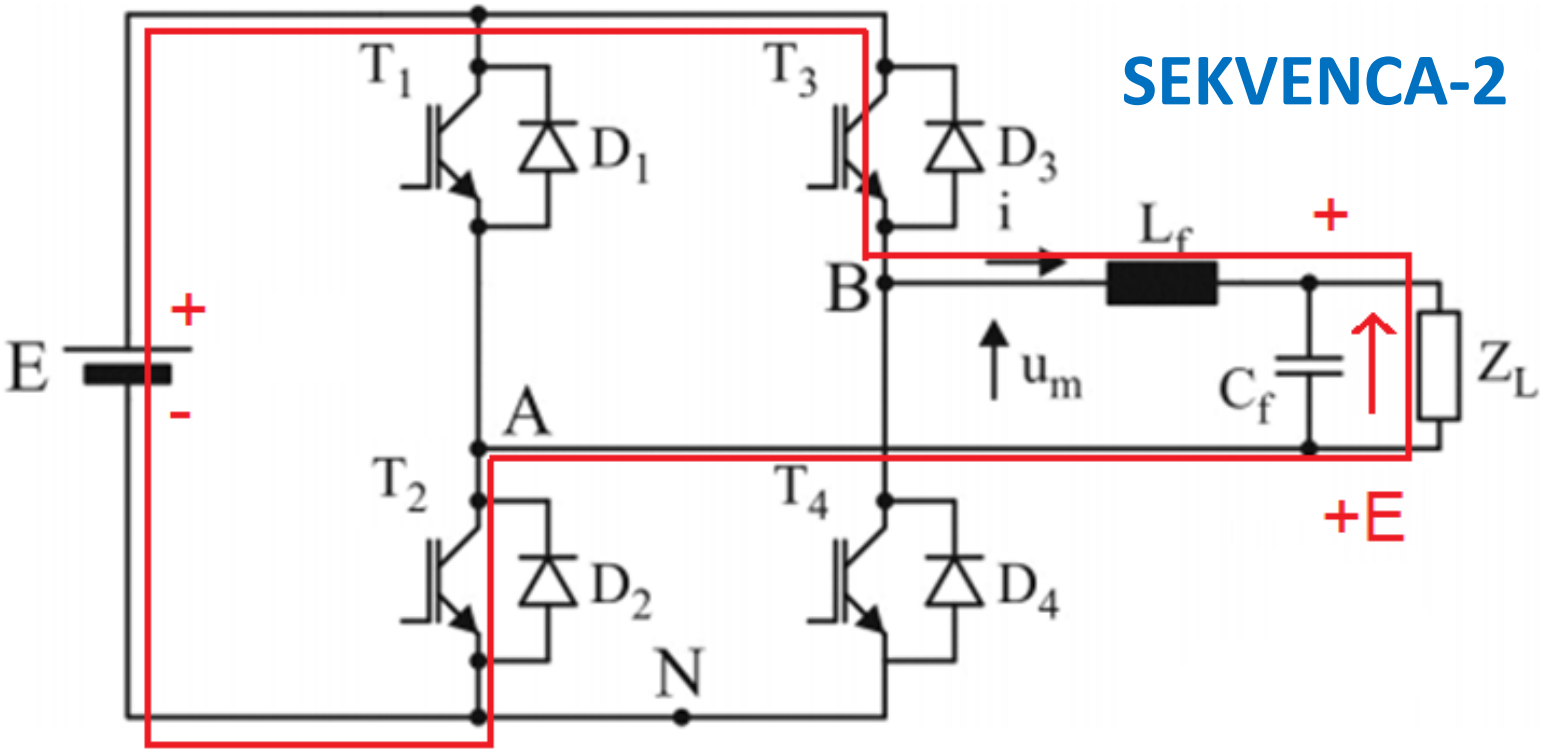
U cilju smanjenja harmonijskih izobličenja, kod ove topologije invertora, mogu se primeniti dva načina modulacije trajanja impulsa. **Prvi način upravljanja** je da se istovremenim uključenjem i isključenjem parova tranzistora T1-T4 i T2-T3 postigne bipolarna modulacija kao kod polumosnog monofaznog naponskog invertora.

SEKVENCA-1



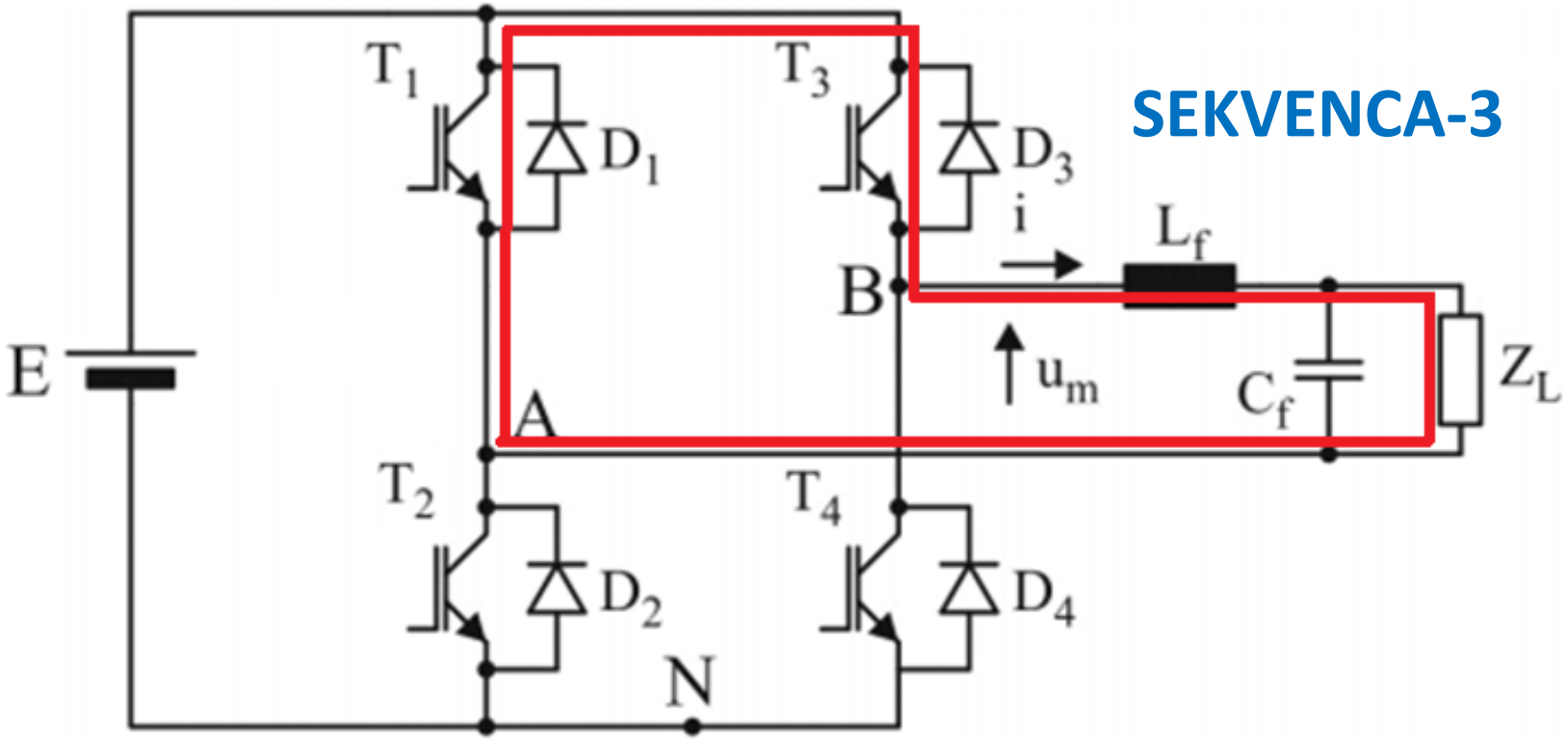
SEKVENCA-1

T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	–E
OFF	ON	ON	OFF	+E
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0



SEKVENCA-2

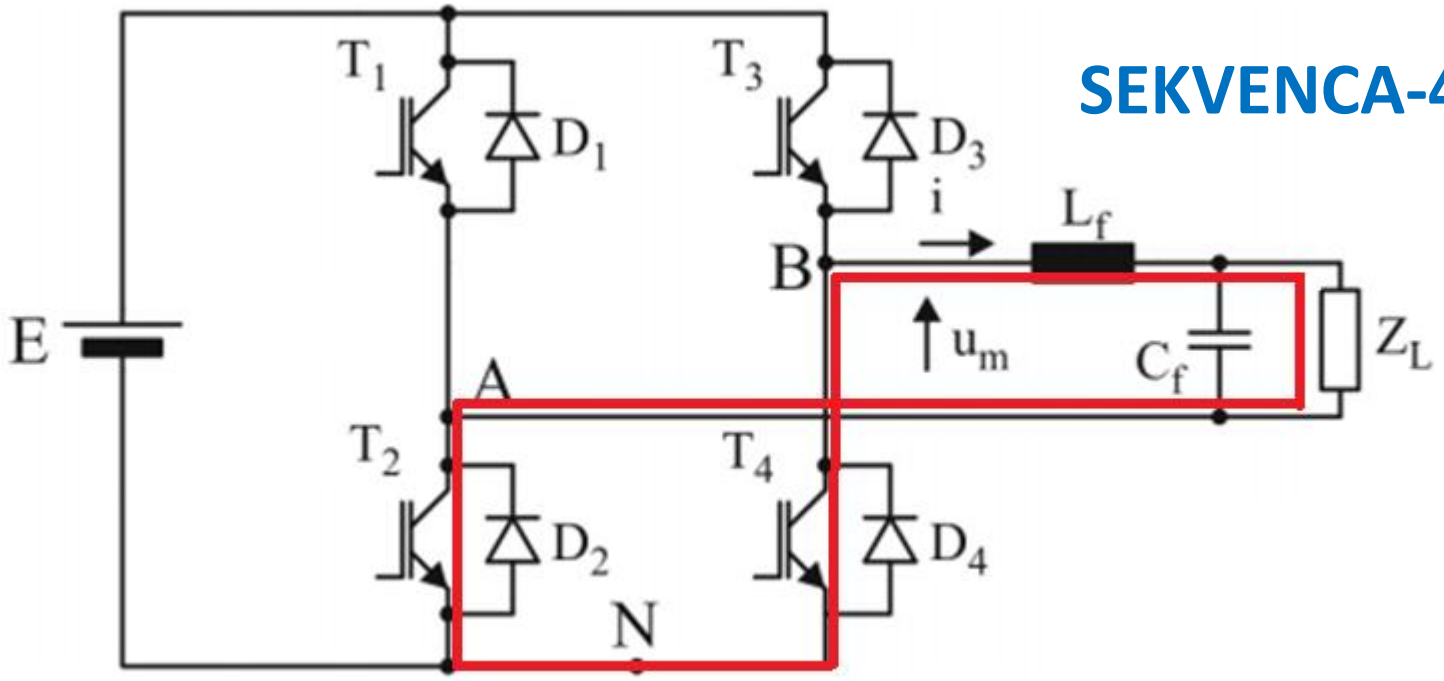
T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	–E
OFF	ON	ON	OFF	+E
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0



T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	–E
OFF	ON	ON	OFF	+E
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

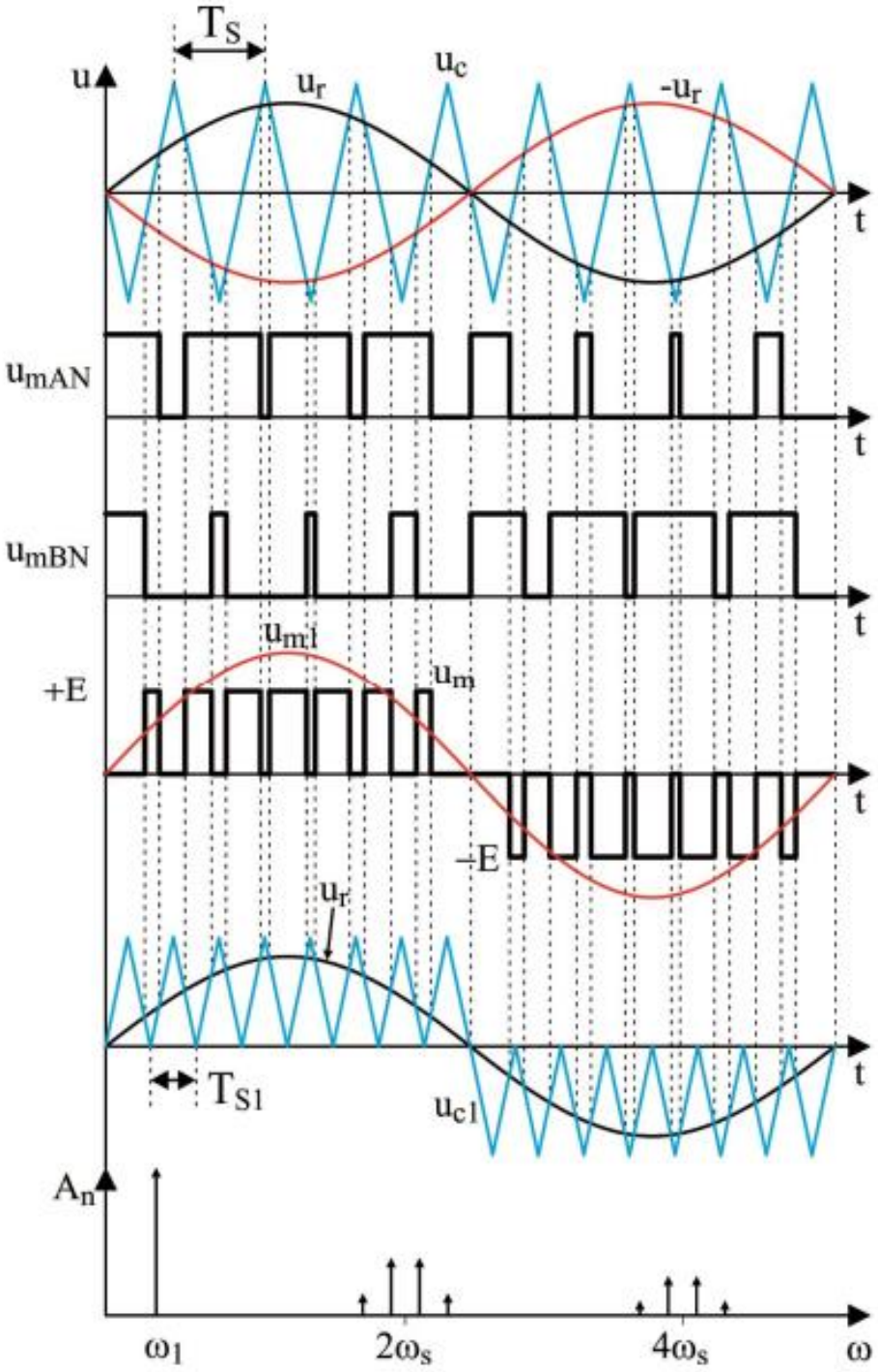
SEKVENCA-3

SEKVENCA-4



T1	T2	T3	T4	u
ON	OFF	OFF	ON	–E
OFF	ON	ON	OFF	+E
ON	OFF	ON	OFF	0
OFF	ON	OFF	ON	0

SEKVENCA-4



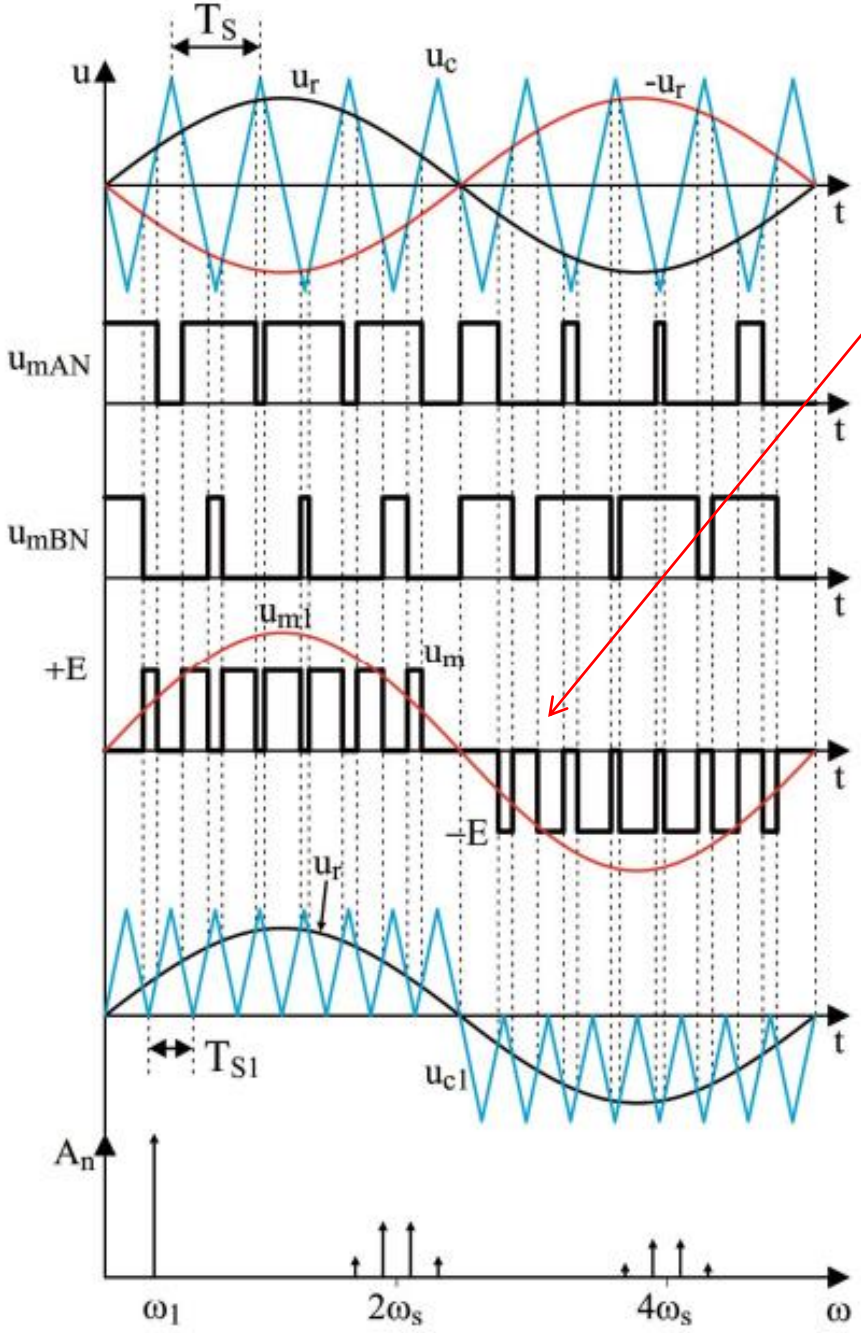
Drugi način upravljanja je da se mosni invertor posmatra kao dva nezavisna polumosna invertora gde je napon na opterećenju jednak razlici napona ova dva invertora. U tom slučaju upravljanje ovim invertorima može biti nezavisno.

-Za jednu granu invertora koristi se modulišući napon Ur dok se za drugu granu koristi napon –Ur.

-Na ovaj način dobijaju se modulisani naponi U_{mAN} i U_{mBN}.

IZLAZNI NAPON INVERTORA JE:

$$u_m = u_{mAN} - u_{mBN}$$

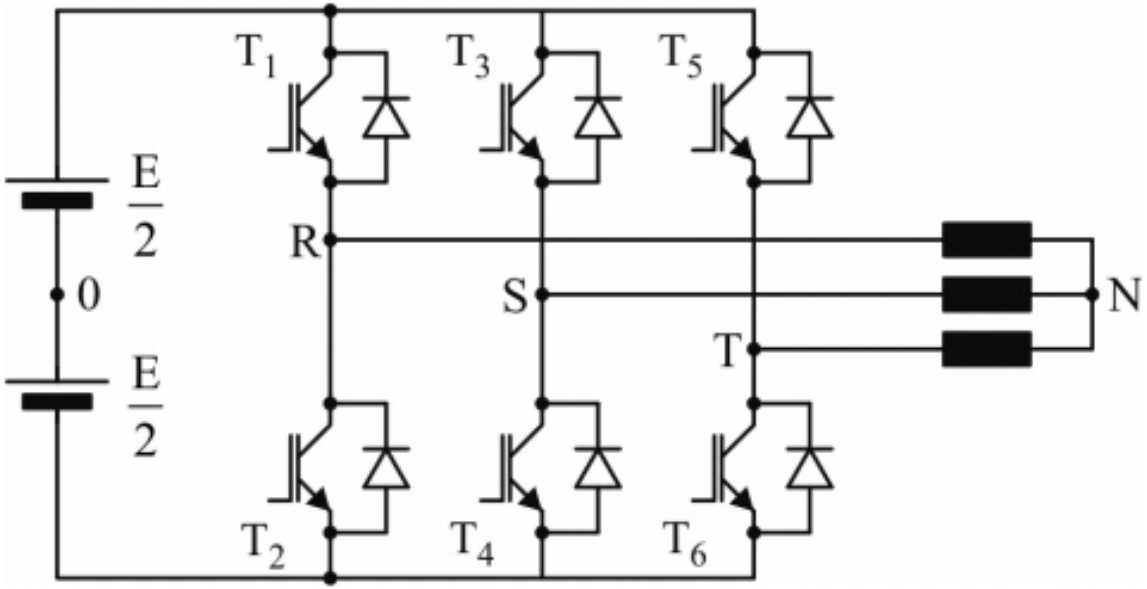


-Izlazni napon invertora,u toku jedne poluperiode menja od 0 do +E a u drugoj poluperiodi od 0 do –E zbog čega se ovaj način modulacije trajanja impulsa naziva unipolarna modulacija.

-Modulisani izlazni napon invertora istog je oblika i kao da je vršena unipolarna modulacija nosiocem (U_{C1}) dvostruko veće učestanosti (ω_{S1}) pa se viši harmonici pojavljuju grupisani oko učestanosti $n\omega_{S1}=2n\omega_s$ (n=1, 2, ...).

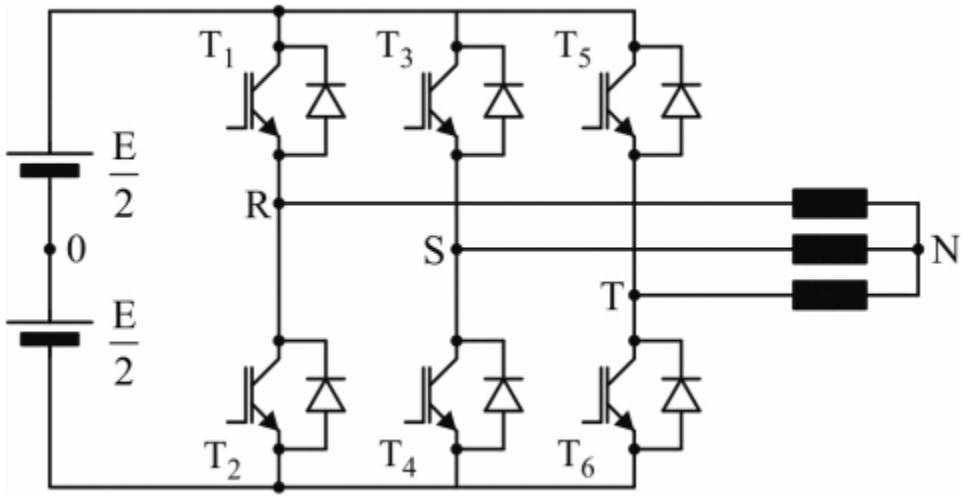
-**Prednost ovog načina modulacije je i to što su promene izlaznog napona invertora po poluperiodi dvostruko manje (0....E) nego kod bipolarne modulacije (-E....+E)**

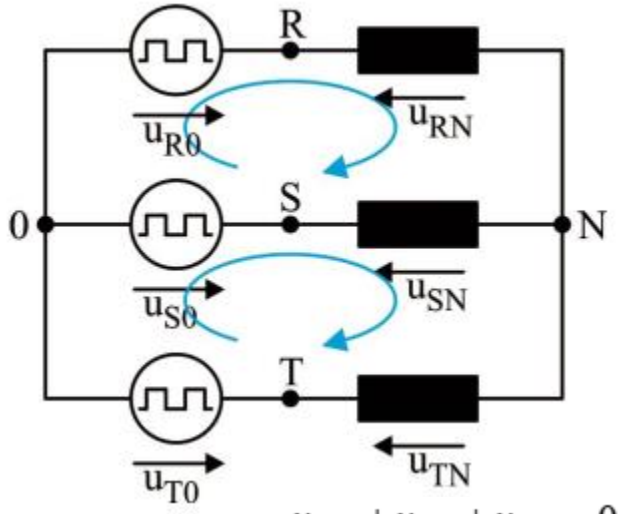
TROFAZNI INVERTORI



- Trofazni invertori koriste se za napajanje trofaznih potrošača.
- Najjednostavnija topologija trofaznog naponskog invertora se sastoji se tri monofazna polumosna naponska invertora koji, u odnosu na tačku referentnog potencijala u DC međukolu (0), stvaraju tri napona čiji su osnovni harmonici fazno pomereni za 120°, čineći simetričan trofazni sistem.
- I kod trofaznih invertora, smanjenje harmonijskih izobličenja izlaznog napona postiže se primenom raznih metoda modulacije trajanja impulsa.
- Radi lakšeg razumevanja osnovnih funkcija trofaznih invertora, u nastavku će analiziran rad invertora bez modulacije trajanja impulsa

EKVIVALENTNA ŠEMA SA OPTREĆENJEM VEZANIM U „zvezdu“





$$u_{RN} + u_{SN} + u_{TN} = 0$$

Naponske jednačine koje važe za označene konture:

$$u_{R0} - u_{RN} + u_{SN} - u_{S0} = 0$$

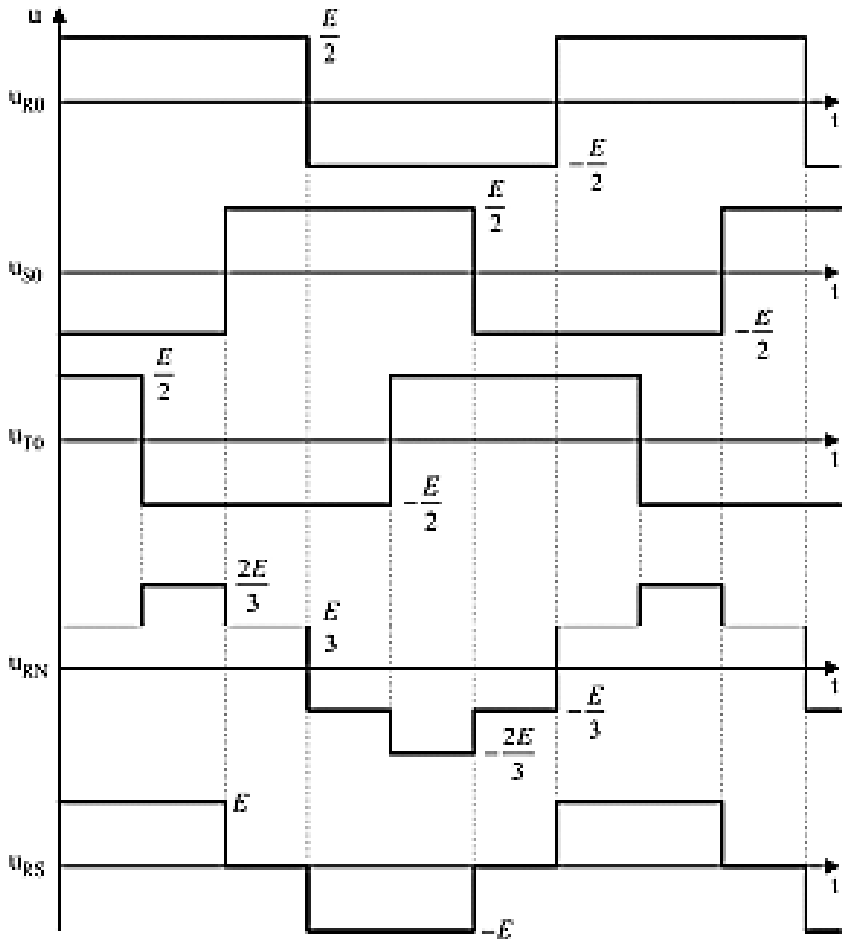
$$u_{S0} - u_{SN} + u_{TN} - u_{T0} = 0$$

$$u_{RN} = \frac{1}{3}\left(2u_{R0} - u_{S0} - u_{T0}\right)$$

$$u_{RS} = u_{R0} - u_{S0}$$

TALASNI OBLICI NAPONA??????

TALASNI OBLICI IZLAZNIH NAPONA (faznih i linijskih)



Izlazni naponi pojedinih monofaznih poluupravljivih invertora (u_{R0}, u_{S0} i u_{T0}) kao i jedan od faznih (u_{RN}) i linijskih napona na opterećenju (u_{RS}).

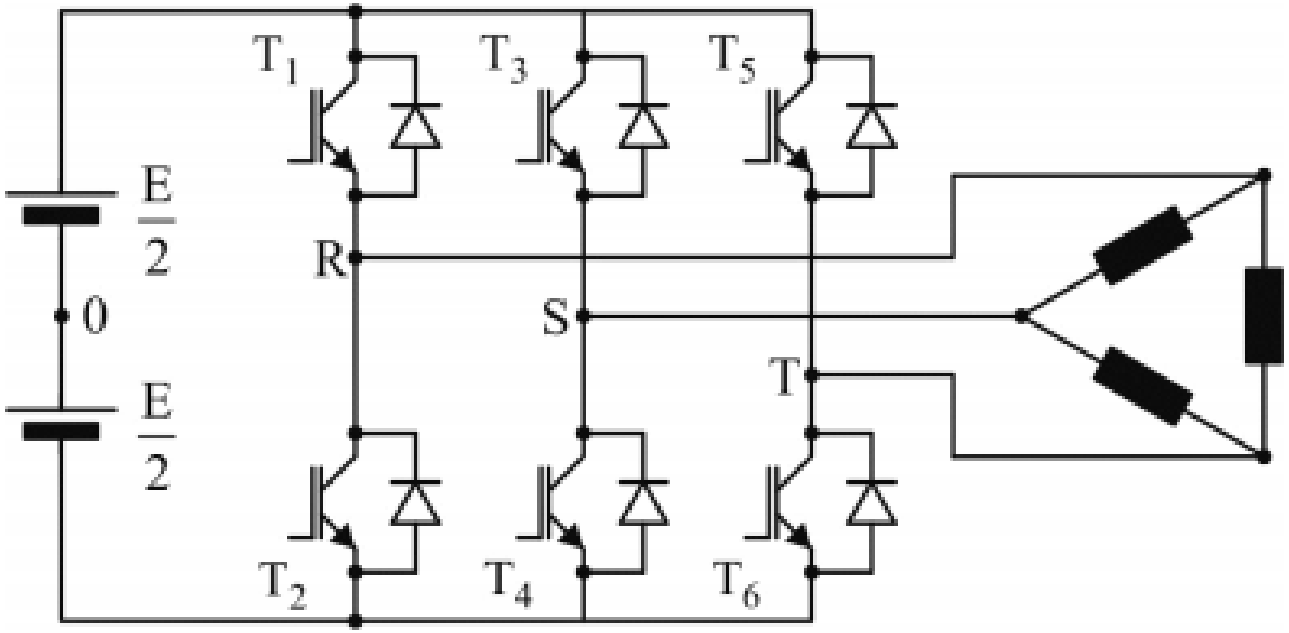
Razvojem u Furijeov red dobija se spektar faznog i linijskog napona na opterećenju:

$$u_{RN,k} = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} u_{RN}\sin(kx)\,dx = \frac{4}{\pi}\int_{0}^{\frac{\pi}{3}} \frac{E}{3}\sin(kx)\,dx + \frac{4}{\pi}\int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{2E}{3}\sin(kx)\,dx$$

$$u_{RN,k} = \frac{2E}{3k\pi}\left[2+\cos\left(k\frac{\pi}{3}\right)-\cos\left(k\frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

$$u_{RS,k} = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} u_{RN}\sin(kx)\,dx = \frac{4}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} E\sin(kx)\,dx = \frac{4E}{k\pi}\cos\left(k\frac{\pi}{6}\right)$$

Prethodno pomenuta topologija invertora može se koristiti i za napajanje opterećenja vezanih u trougao:



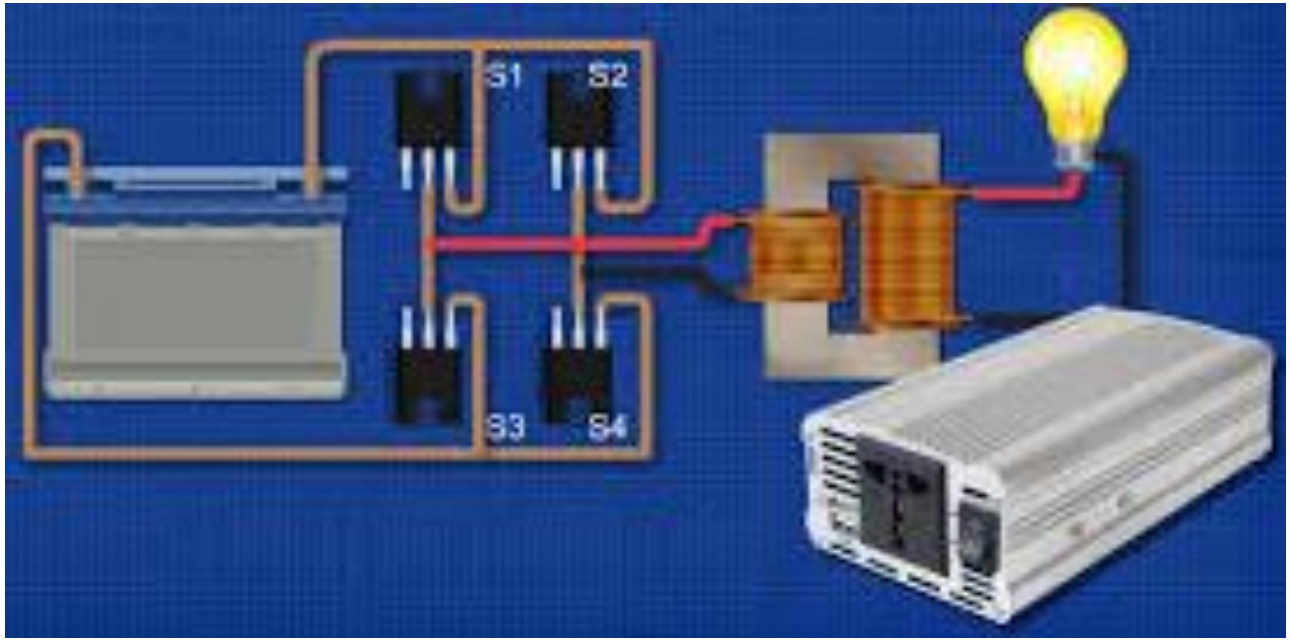
HVALA NA PAŽNJI!!!

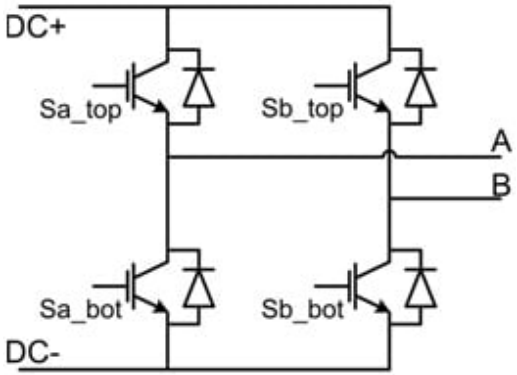
PITANJA???

U Beogradu, Jun 2021.

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-
***VIŠER*, BEOGRAD**
STUDIJSKI PROGRAM: NET
PREDMET: Električni Pretvarači Snage 2021

INVERTOR KAO ELEMENAT SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA

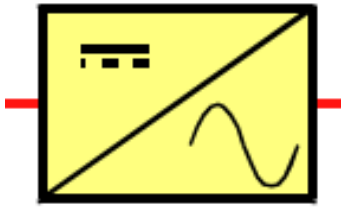


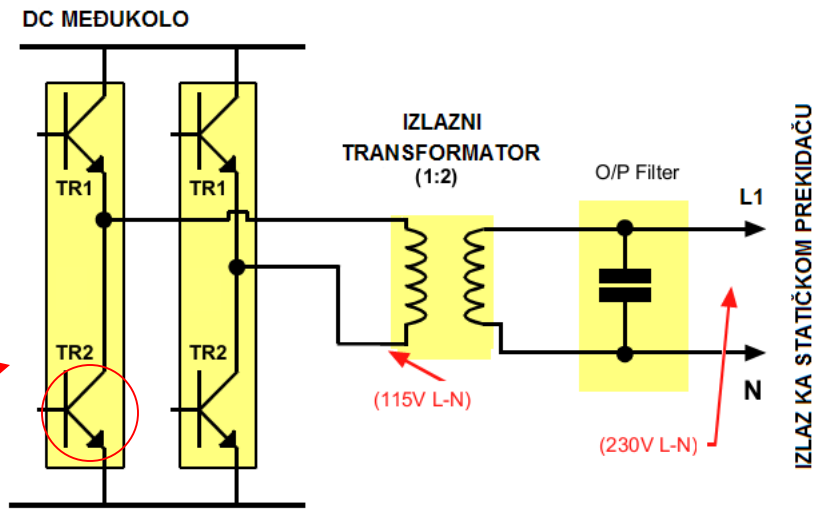


Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

- ZADATAK INVERTORA (dc/ac pretvarača) JE DA KONVERTUJE NAPON NA DC SABIRNICAMA-BATERIJSKI NAPON U NAIZMENIČNI SINUSNI NAPON NA IZLAZU ČIJA JE VREDNOST 50Hz
- INVERTORSKI PREKIDAČI SU NEKADA BILI REALIZOVANI SA BIPOLARNIM TRANZISTORIMA-BJT, DOK SE SADA IZVODE SA MOSFET ili IGBT tranzistorima
- RADNE UČESTANOSTI PREKIDAČE SE KREĆU OD 5kHz-50kHz
- TIPIČNO ZA IGBT TRANZISTORE 10kHz, a za MOSFET i do 100kHz

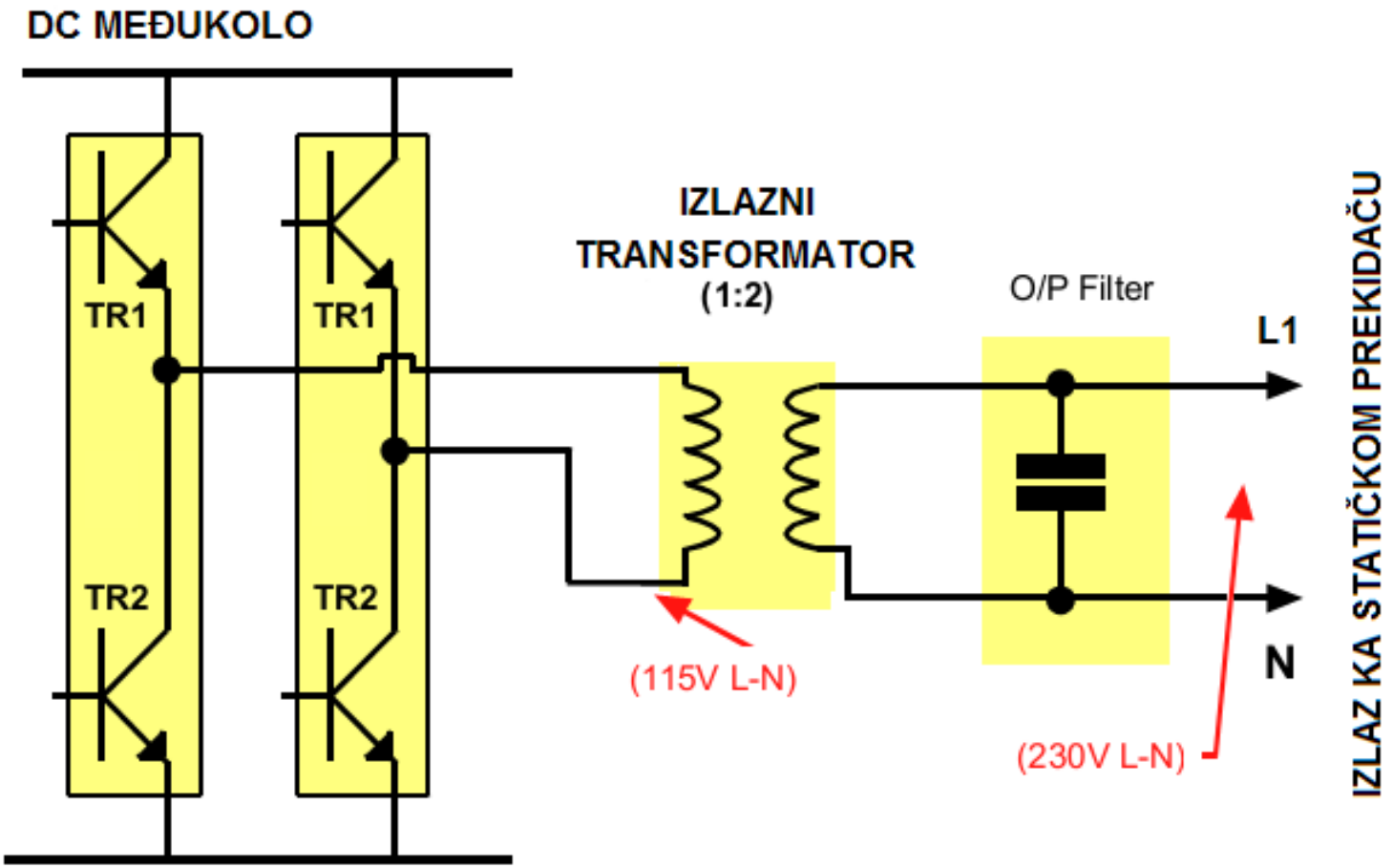




DA BI SE NA IZLAZU DOBIO SINUSNI NAPON ODNOSNO SINUSNA STRUJA PRIMENJUJU SE TEHNIKE MODULACIJE I ALGORITMI PO KOJIMA RADE PREKIDAČI U INVERTORU

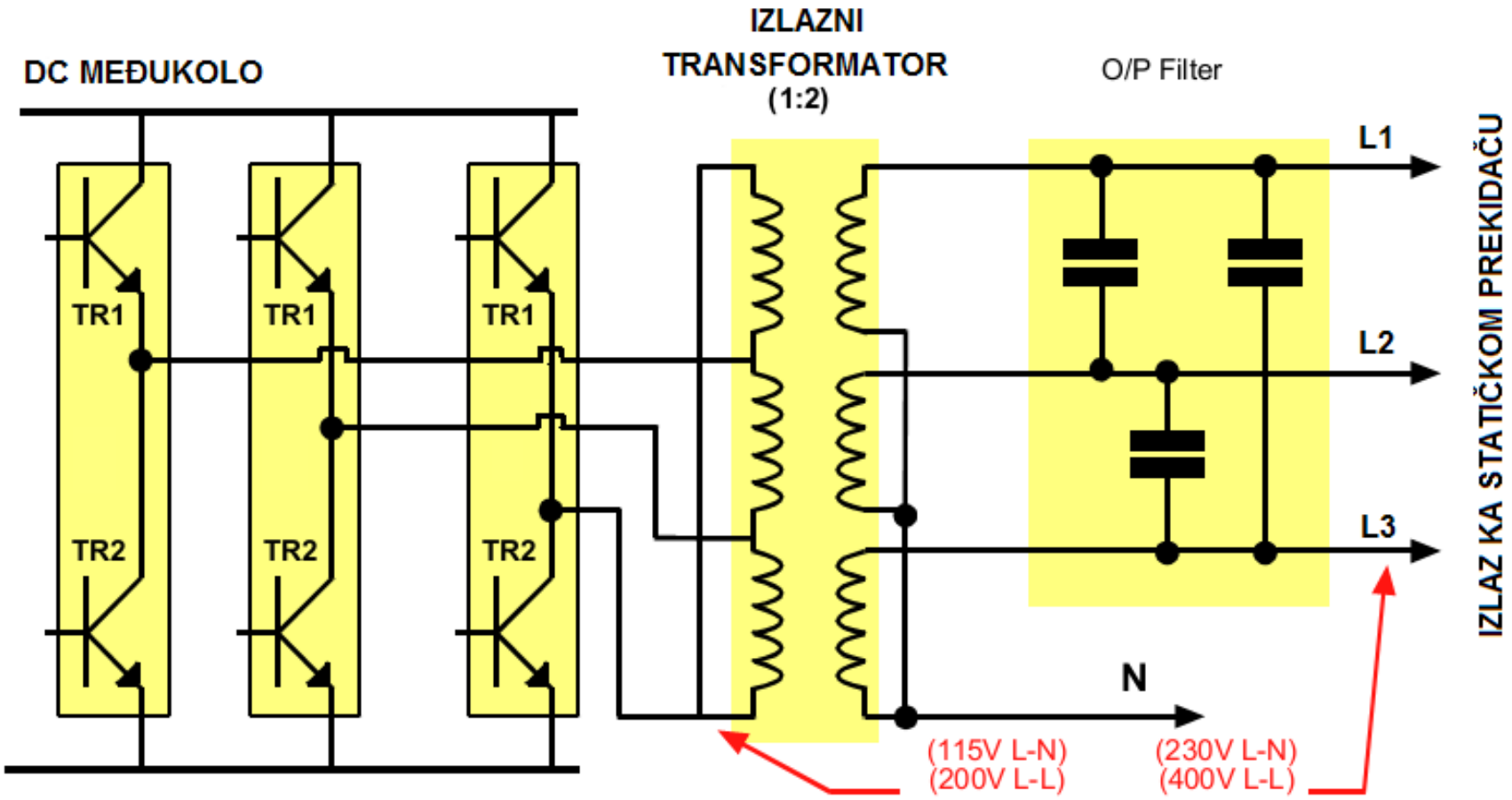
TRADICIONALNO REŠENJE- MONOFAZNI TRANSFORMATOR PODIZAČ NAPONA

Za monofazne potrošače

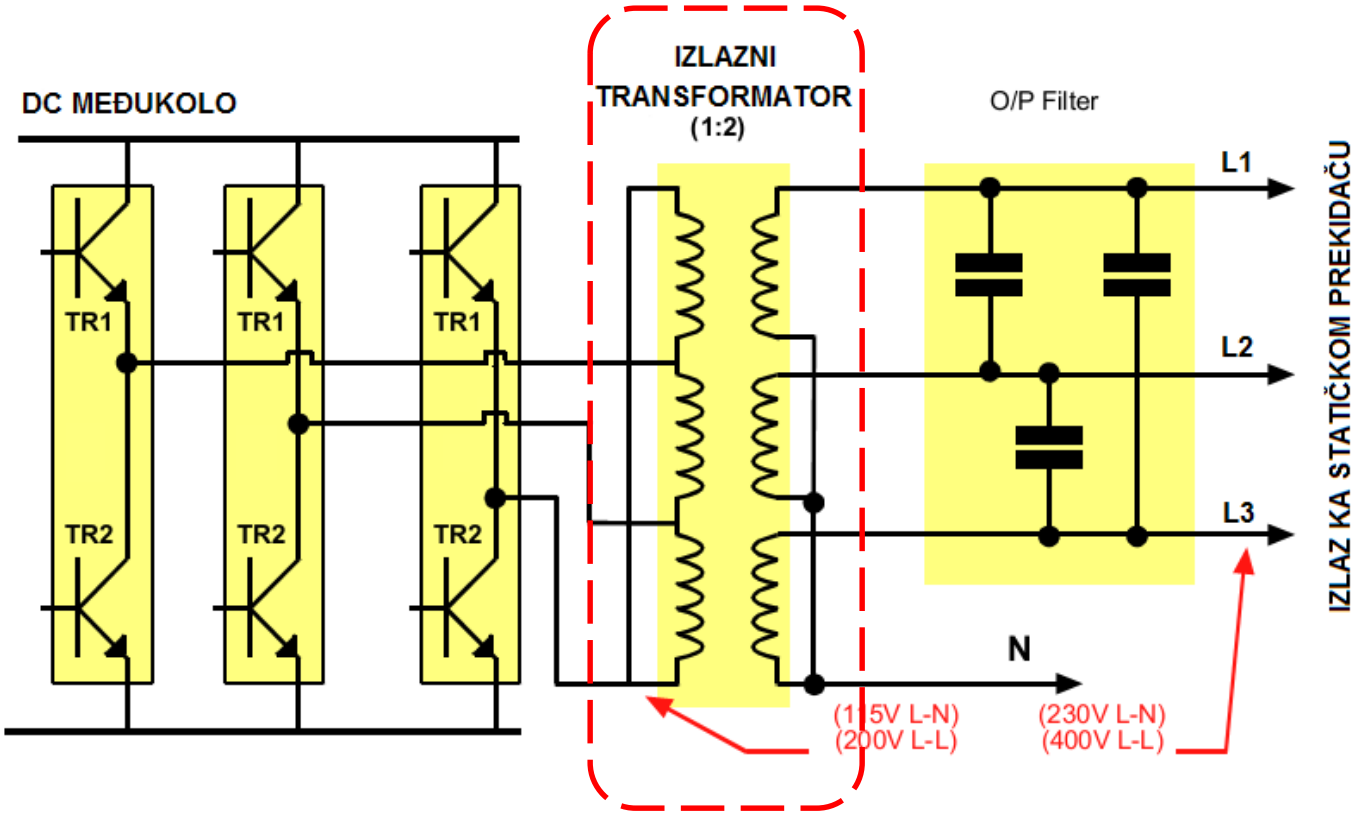


TRADICIONALNO REŠENJE- TROFAZNI TRANSFORMATOR PODIZAČ NAPONA

Za trofazne potrošače



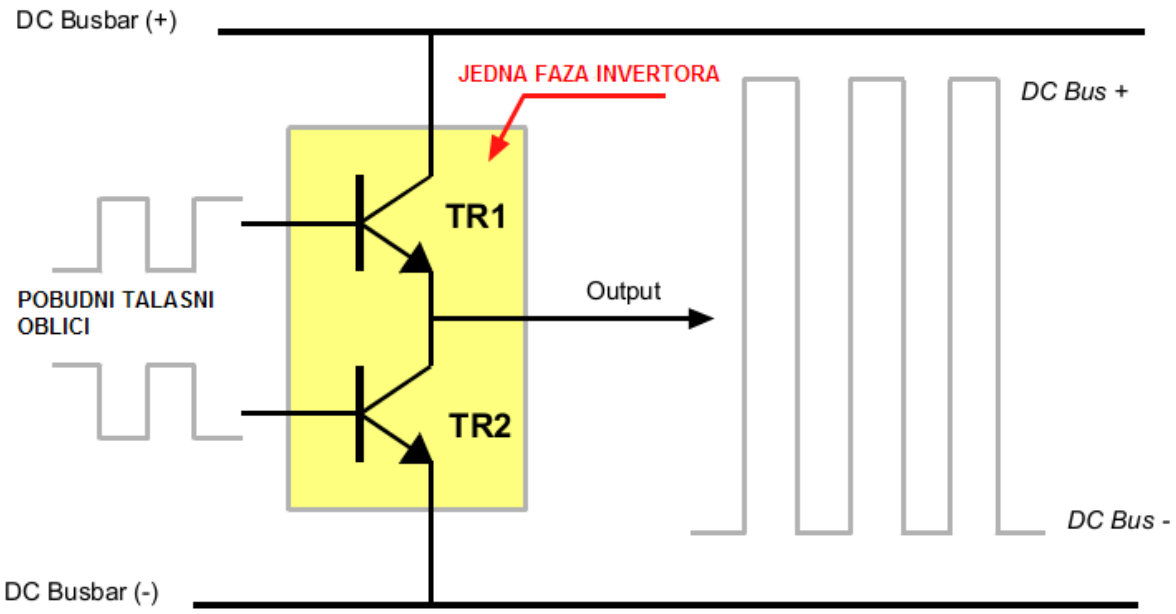
Zapaziti!!!
Koja je sprega transformatora?



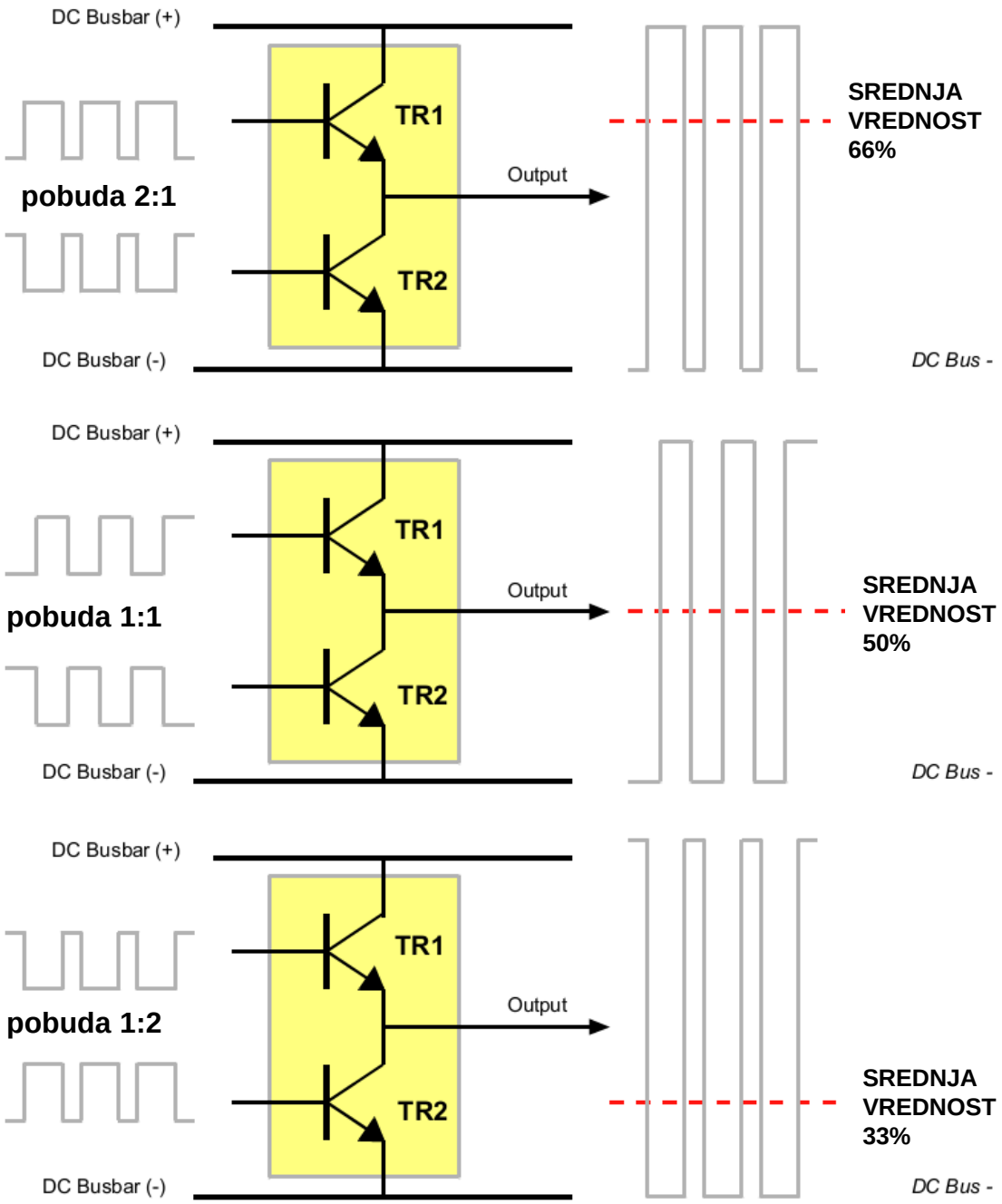
sprega transformatora: Δ-Y

-Izlazni transformator obezbeđuje galvansku izolaciju
-Sprega "Y"na sekundaru obezbeđuje pristupačnu neutralnu tačku
-Ova neutralna tačka se spaja na neutralnu tačku bajpas napajanja
-Ovim je obezbeđena zajednička referenca između dva izvora napajanja
-Izlazni filtar O/P u kombinaciji sa sekundarom transformatora (induktivni namotaj) potiskuje više harmonike struje i napona na izlazu, dajući čist sinusni izlaz

POSMATRAJMO JEDNU FAZU INVERTORA



-Jedna faza (jedna vertikala trofaznog mosta) se sastoji od dva tranzistora koji rade u opoziciji (kada je TR1 ON, drugi komplemetarni TR2 je OFF, i obrnuto)
-Pobudni talasni oblici tranzistora su komplementarni POBUDA_TR1=POBUDA_TR2
-Zajednički spoj ova dva tranzistora je izlaz koji daje napon koji je širinsko-impulsno modulisan (PWM).
-Kada su uključena oba tranzistora imamo u tom trenutku kratak spoj na DC sabirnicama
-Ovo predstavlja problem, te se stoga u pobudne impulse uvodi tzv. *"mrtvo vreme"* (dead-time) u toku kojeg su oba tranzistora isključena.Ovo vreme je vrlo kratko (10-20us)

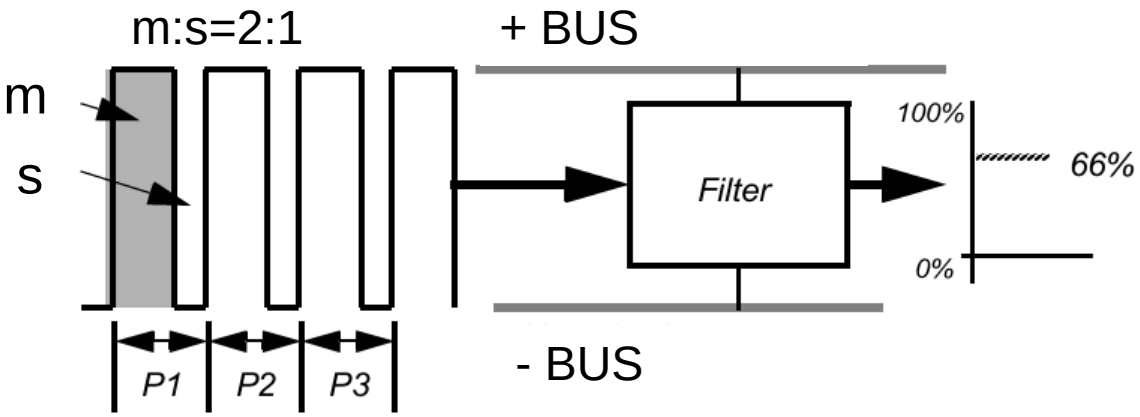


Razmotrimo tri slučaja koji se odnose na tri različita odnosa pobudnih impulsa konstantne učestanosti (tipično 10kHz) koji se dovode na baze tranzistora TR1 i TR2 (oni mogu biti tipa BJT, MOSFET, IGBT, SiC....)

1) Pobuda 2:1
   $t_{on}(TR1)=2t_{on}(TR2)$
2) Pobuda 1:1
   $t_{on}(TR1)=t_{on}(TR2)$
3) Pobuda 1:2
   $2t_{on}(TR1)=t_{on}(TR2)$

Ovim odnosima odgovaraju srednje vrednosti izlaznog napona 66%, 50%, 33% respektivno

INAČE JE MOGUĆE POSTIĆI KONTINUALNU REGULACIJU SREDNJE VREDNOSTI

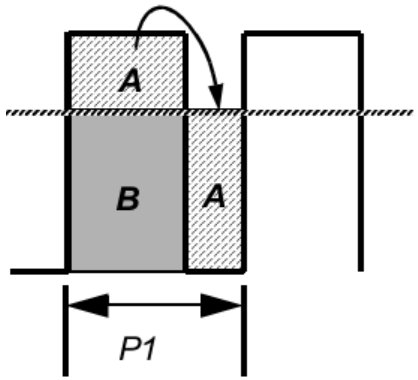


OSNOVNI PRINCIP DELOVANJA FILTRA

“m” - **m**ark

“s” - **s**pace

m:s=2:1



srednji napon

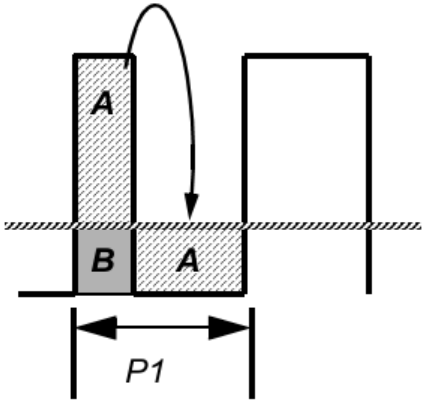
Filtriranje odnosa m:s se ostvaruje nisko propusnim filtrom (integrator)

Srednja vrednost je integral širine naponskih impulsa:

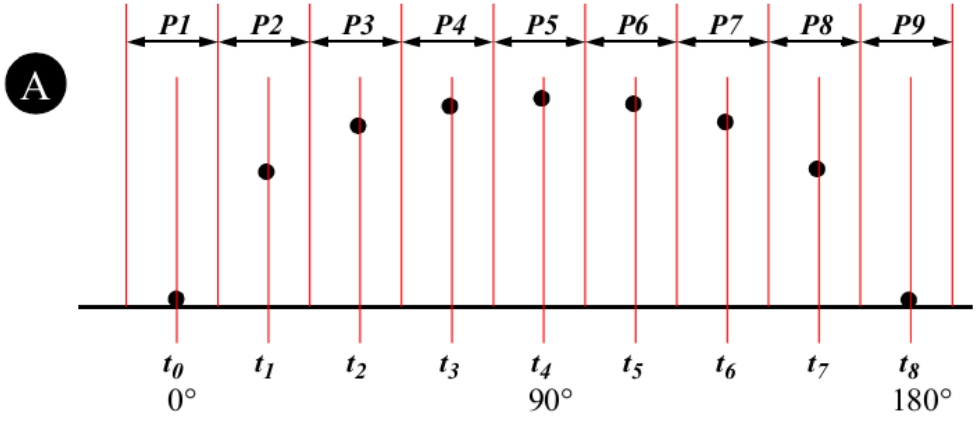
$$u = L \, di/dt$$

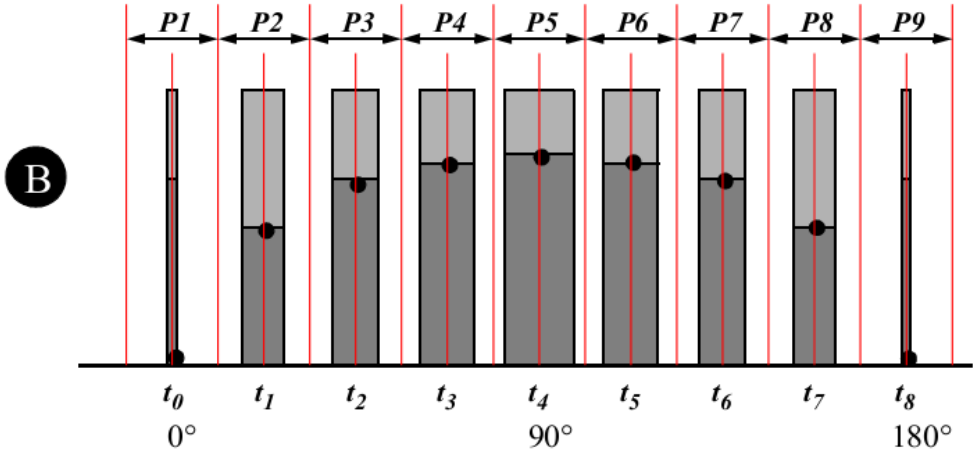
$$i = 1/L \int u(t)dt$$

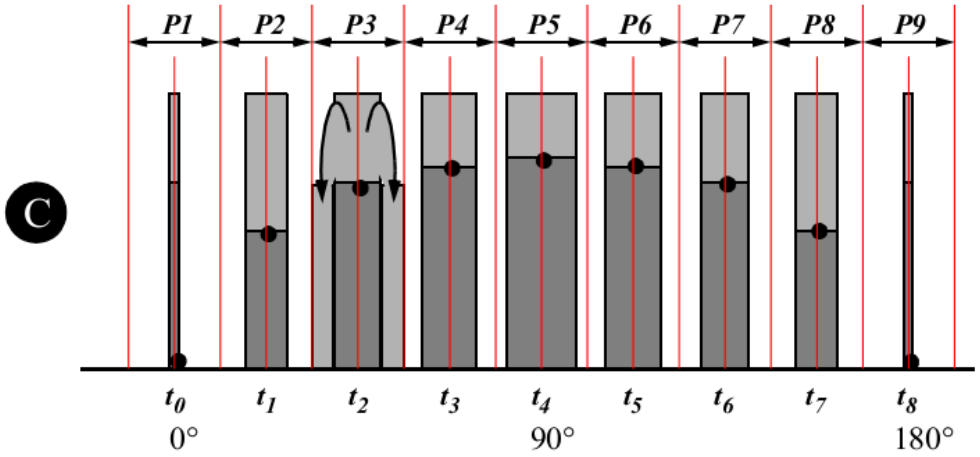
m:s=1:2



srednji napon







ŠIRINSKO IMPULSNA MODULACIJA
Pulse Width Modulation-PWM

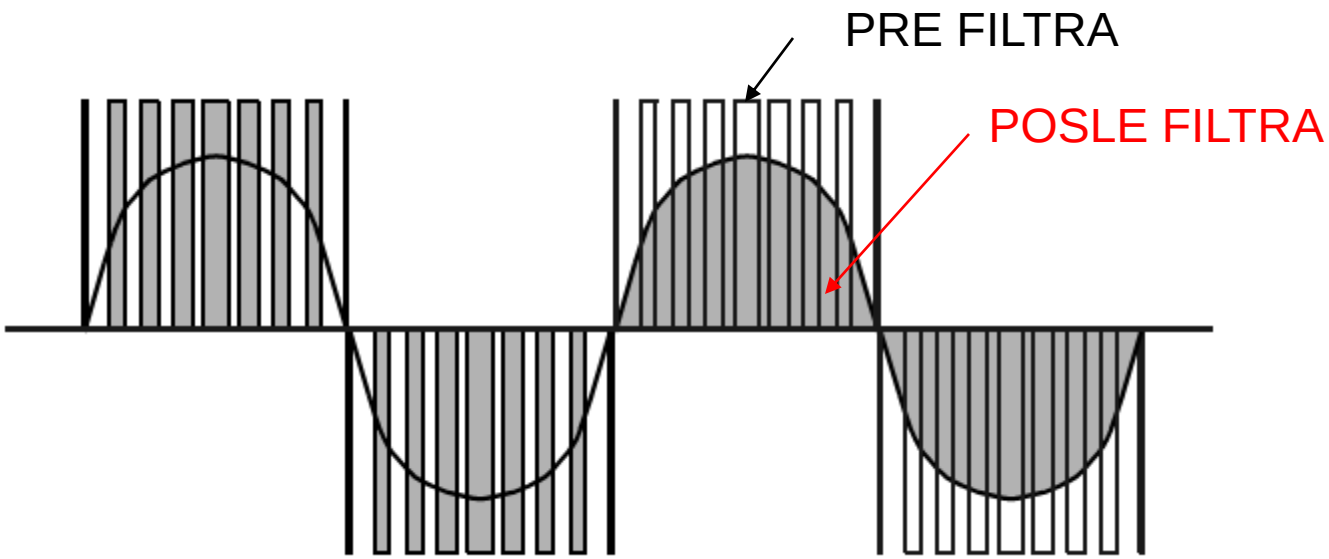
PRIKAZ A -proširenI prikaz pozitivnog Sinusnog polutalasa sa osam diskretnihvrednosti u trenutcima t1-t8. Ove vrednosti se poklapaju sa centrima širine impulsa na prikazu B

PRIKAZ B- Širine impulsa P1-P8 koji odgovaraju srednjim vrednostima na Prikazu A

PRIKAZ C- U intervalu P3 je prikazana promena širine impulsa, promenom odnosa *mark/space (m:s)* i njen uticaj na srednju vrednost u tom intervalu

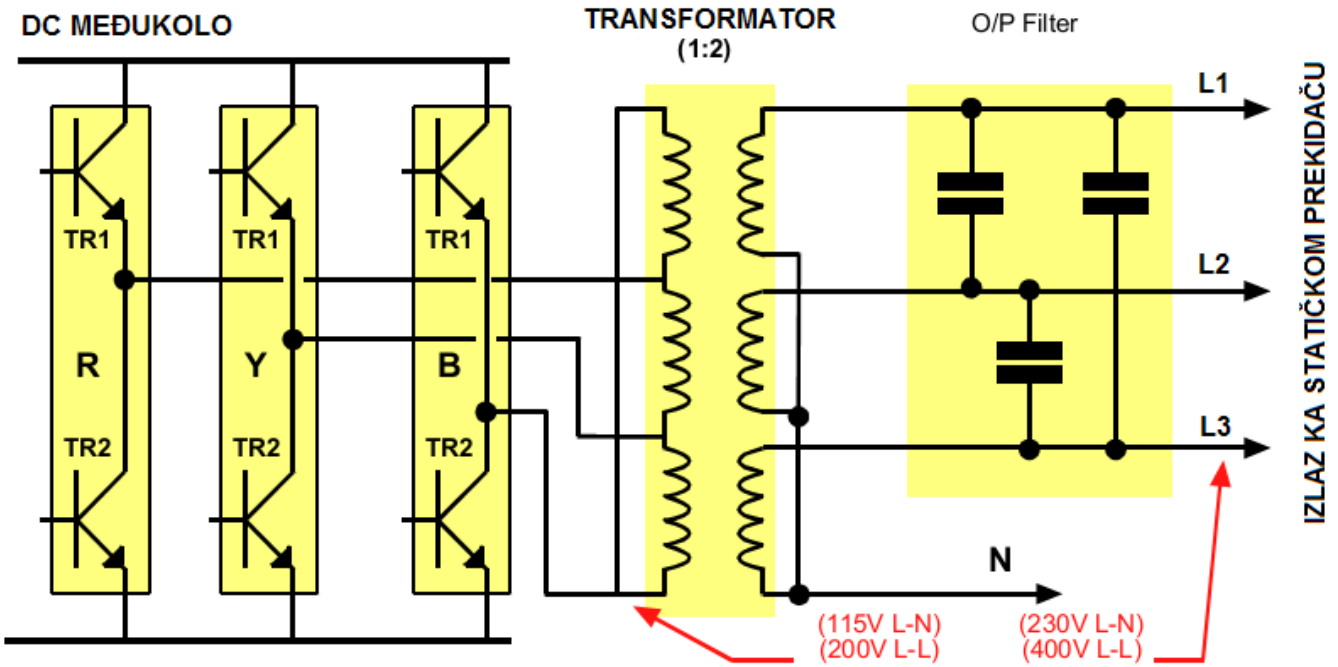
Osnovna učestanost Typ-50Hz
Modulaciona učestanost Typ-20kHz

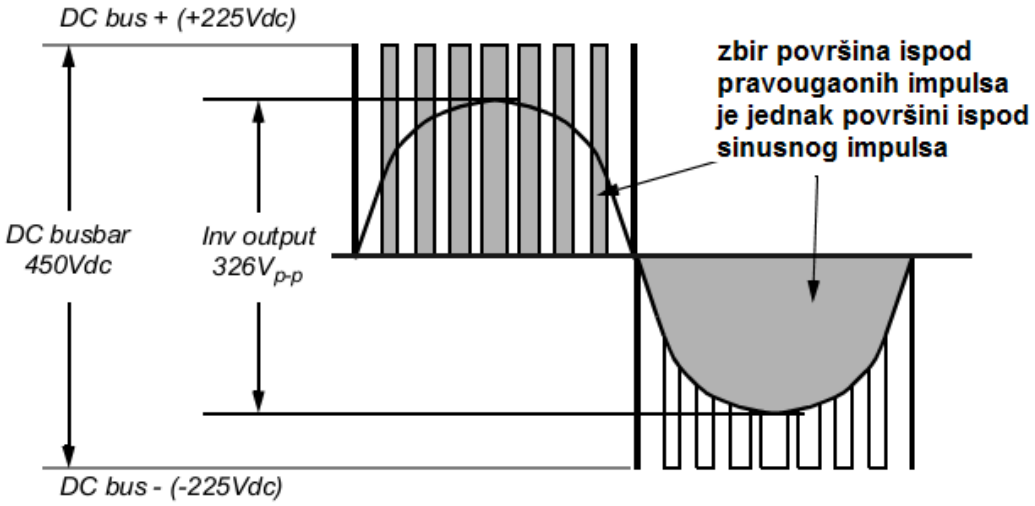
IZLAZNI NAPON INVERTORA



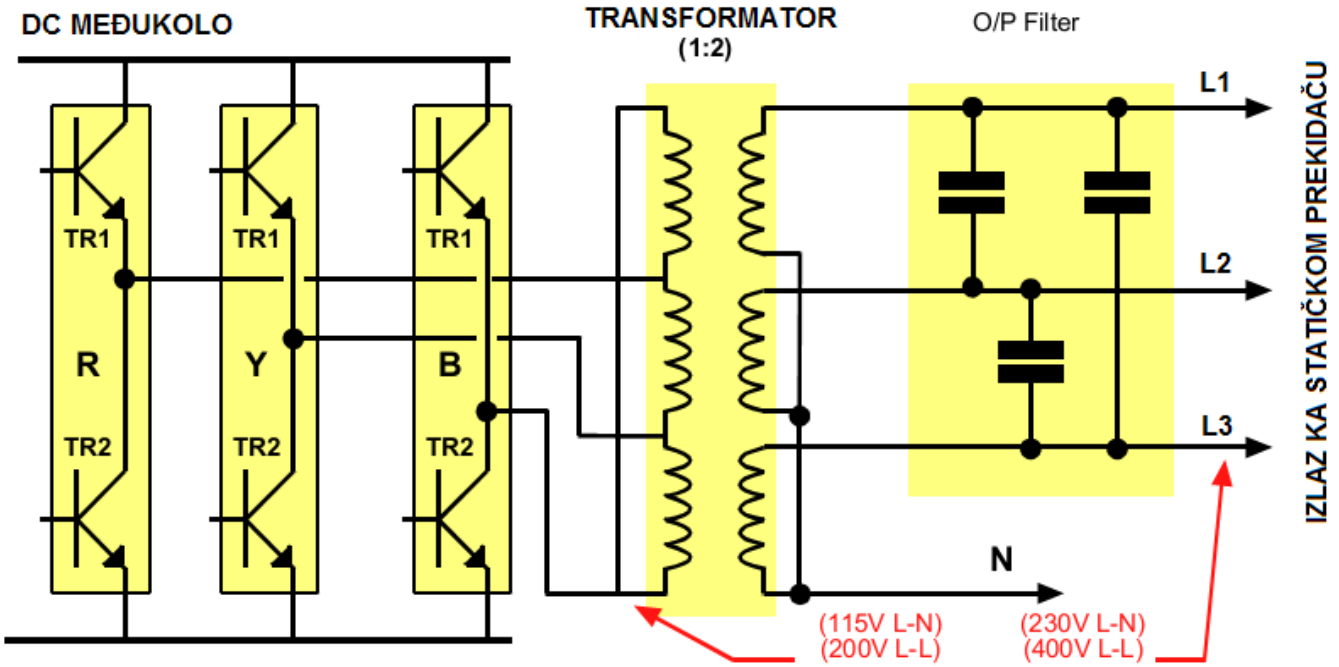
-Površina ispod sinusnog polutalasa je jednaka zbiru površina ispod svakog pojedinačnog pravougaonog impulsa
-Kontinualnim podešavanjem širine impulsa se postiže kontinualna promena trenutne vrednosti sinusnog talasa (ovo važi za kako za pozitivnu, tako i za negativnu poluperiodu

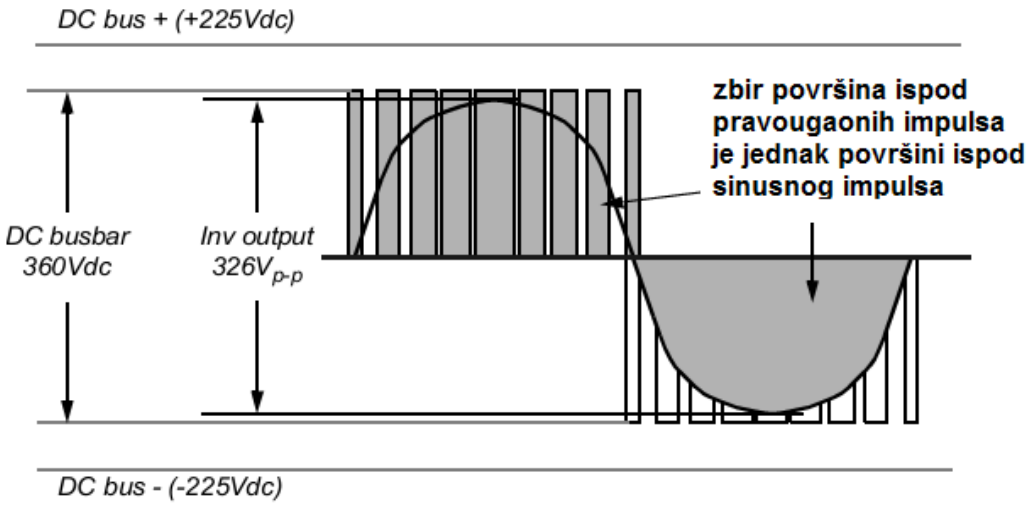
PWM regulacija pri povećanom naponu DC bus (450Vdc)



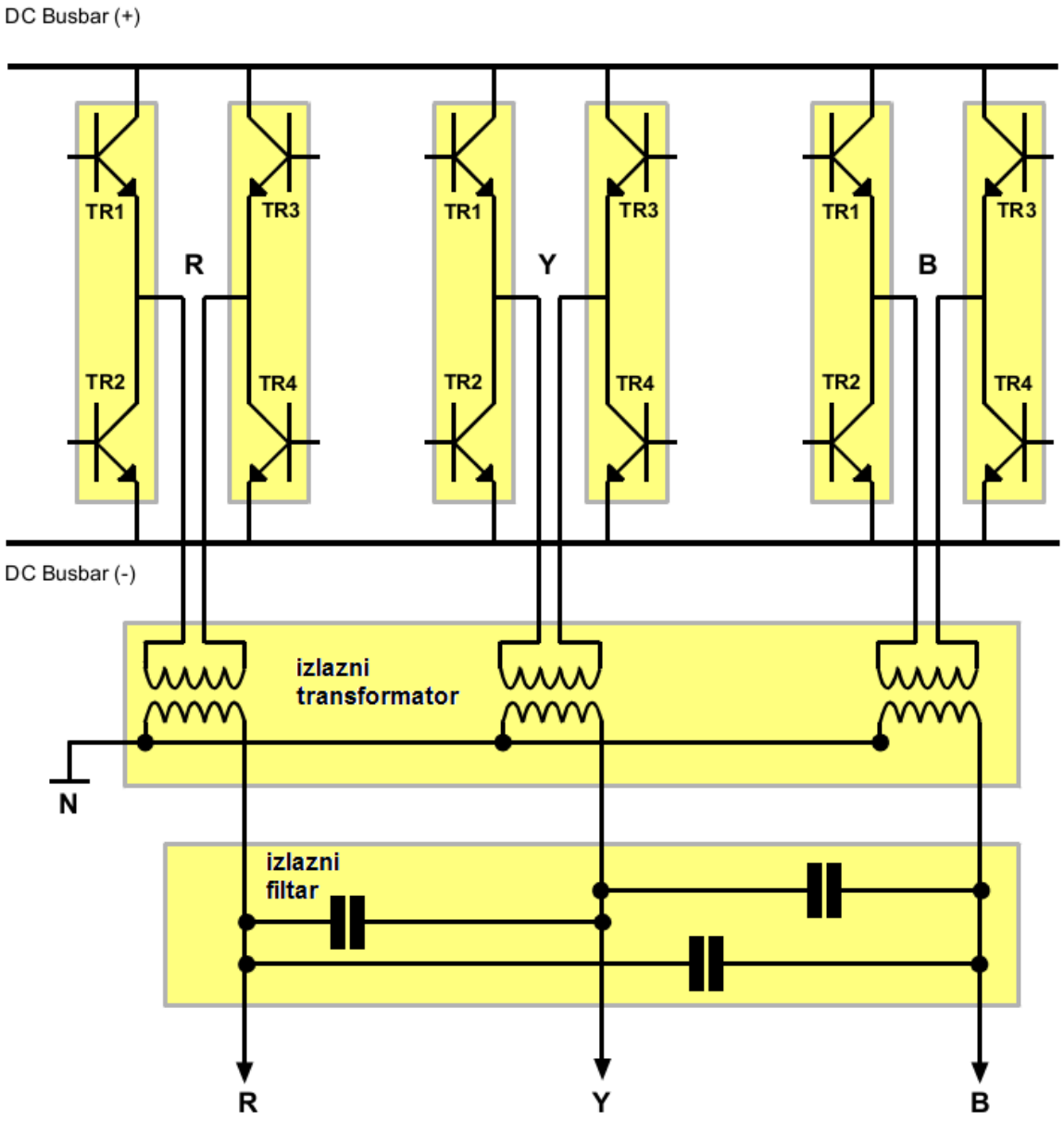


PWM regulacija pri sniženom naponu DC bus (360Vdc)





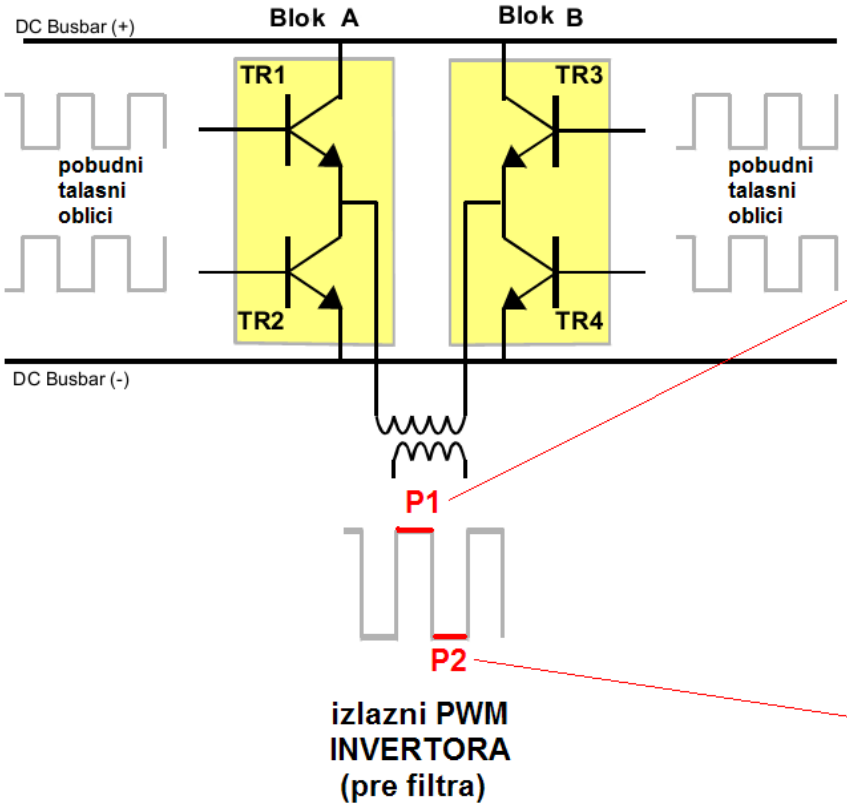
PRIKAZ TROFAZNOG INVERTORSKOG IZLAZA

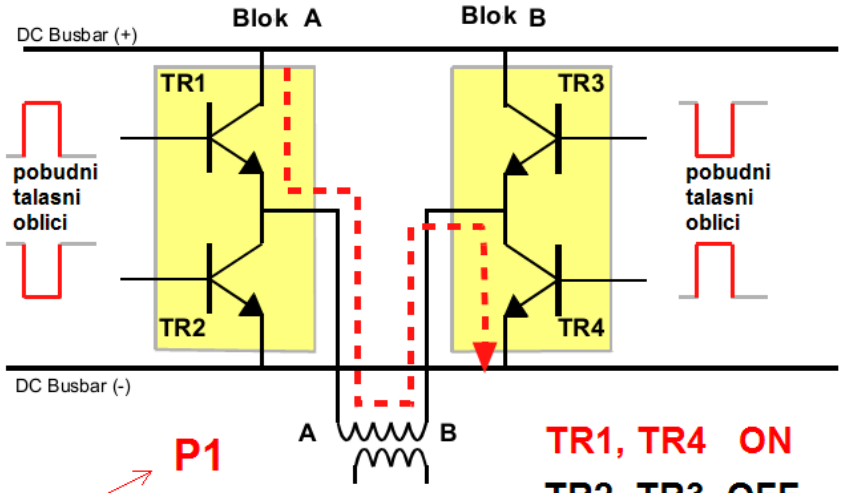


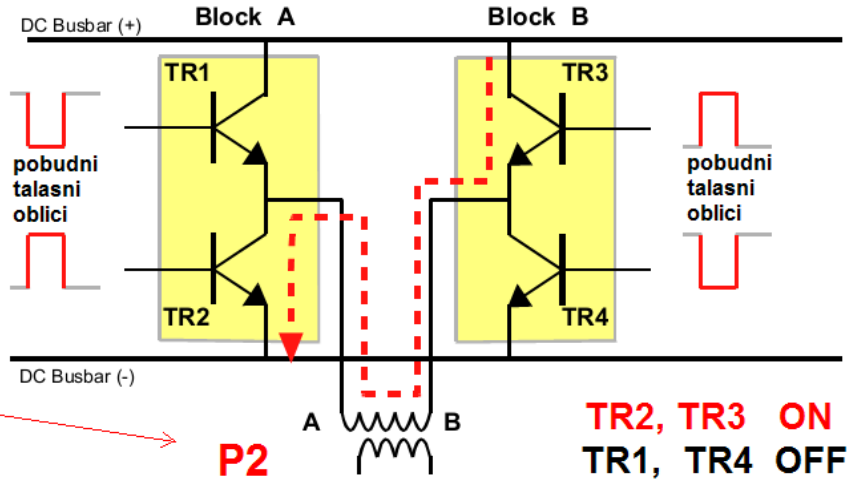
Konfiguracija sa tri monofazna transformatora čiji su sekundari međusobno vezani u spregu ZVEZDA sa izvedenim zvezdištem (nultim provodnikom

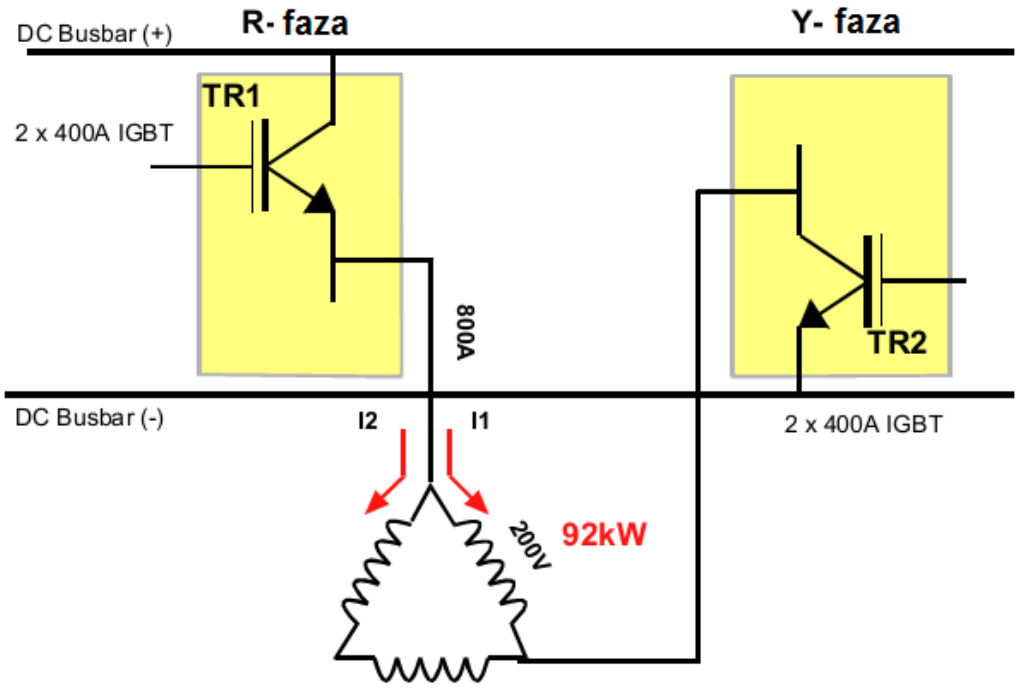
Ova konfiguracija podržava i nesimetrično trofazno opterećenje, drugim rečima pojedine faze mogu biti neravnomerno opterećene, tako da svaki invertorski most obezbeđuje regulaciju napona pripadajuće faze i regulaciju učestanosti

PRINCIP RADA JEDNE INVERTORSKE FAZE SA PUNIM TRANZISTORSKIM MOSTOM





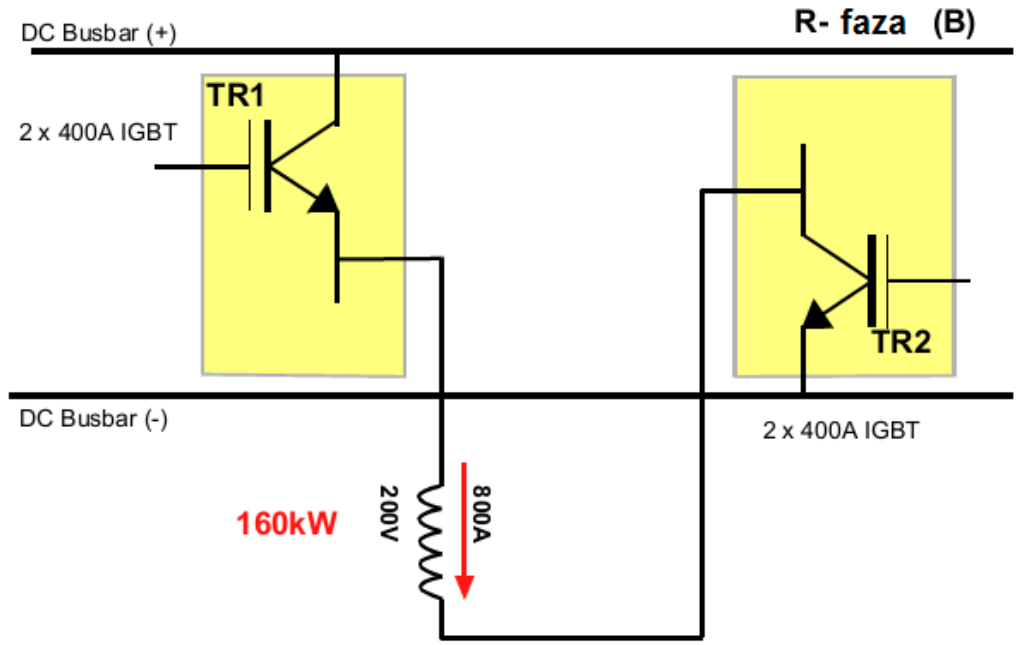




Single Ended-konfiguracija

Struja invertora se deli između dve paralelne grane, a primar transformatora je u sprezi TROUGAO

Snaga po jednoj fazi je 92kW



Double Ended-konfiguracija

Svaki primar se napaja iz svog invertora

Ova konfiguracija nudi 1.73 puta veću snagu.

Snaga po jednoj fazi je dakle 160kW

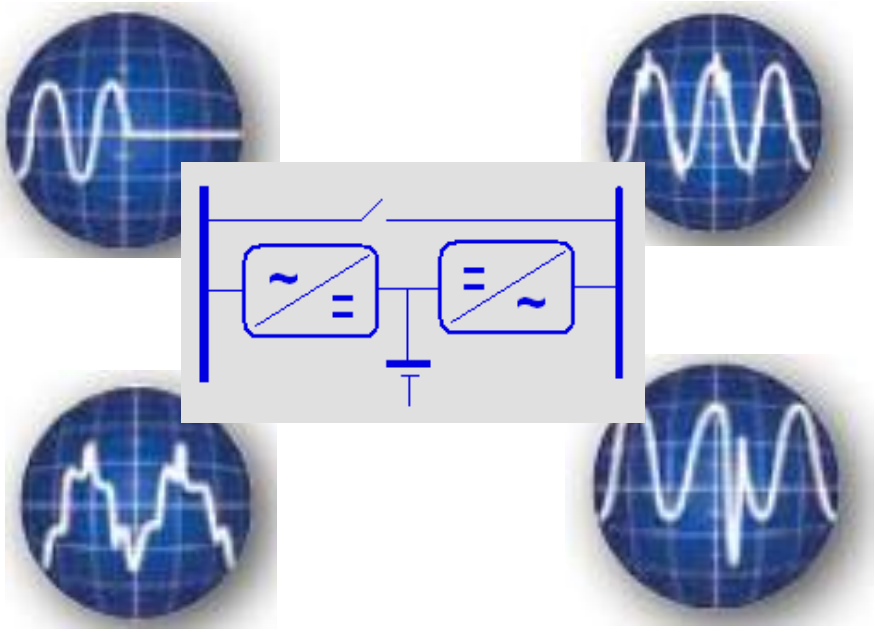
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE

OSNOVNE STUDIJE

PREDMET: ELEKTRIČNI PRETVARAČI SNAGE

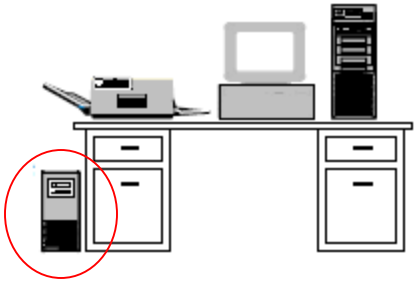
BESPREKIDNA NAPAJANJA: TIPOVI, TOPOLOGIJE i KOMPONENTE



PREDMETNI PROFESOR:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

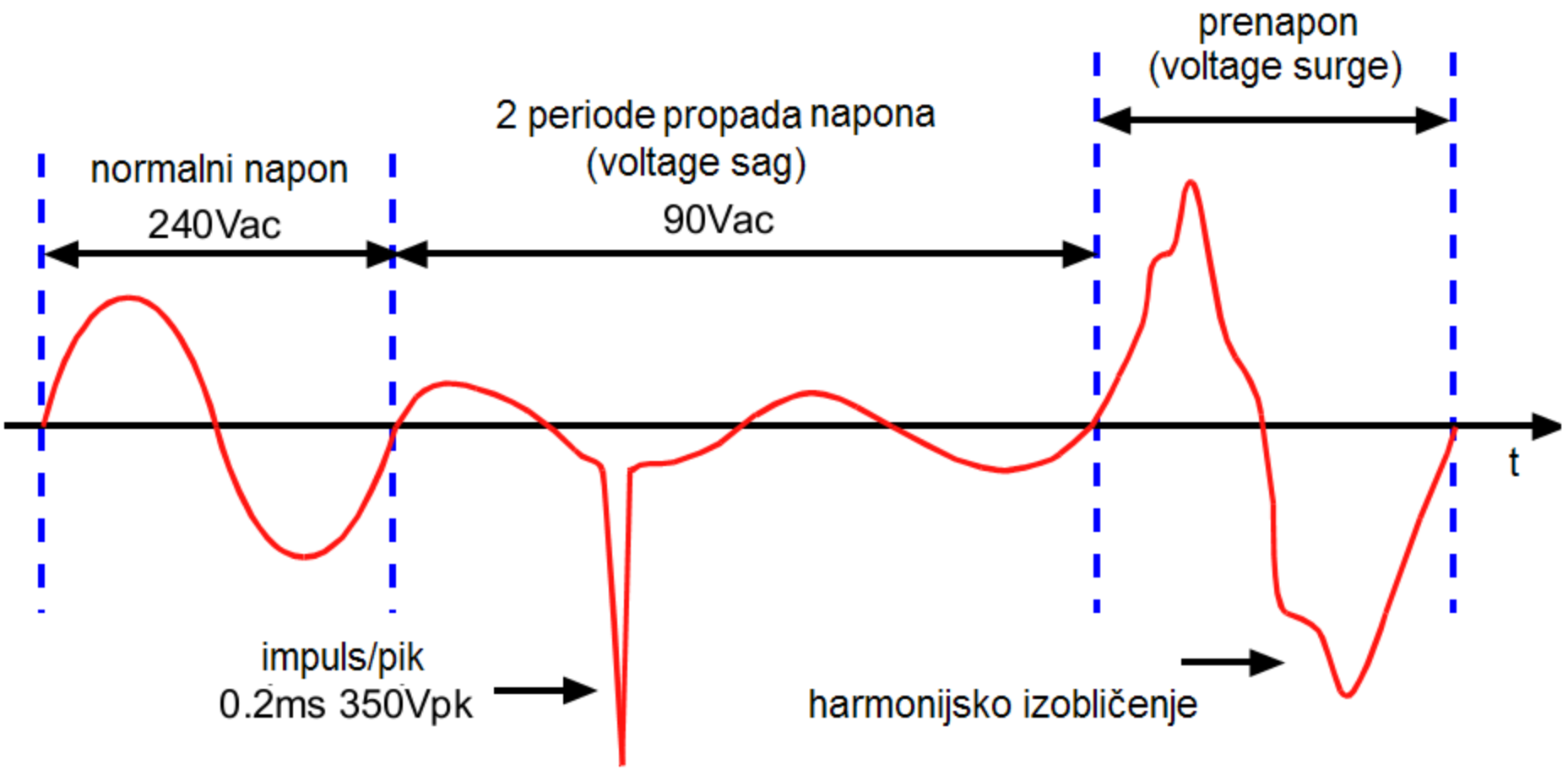
- Nagli gubitak napajanja može značajno poremetiti poslovanje, ali to nije jedini kvar u mnoštvu kvarova u napojnoj mreži koji može imati razorne posledice
- Mnoga električna opterećenja, kao što su računari su veoma osetljivi i na druge tipove kvarova
- Koji su to tipični kvarovi koji mogu imati štetan uticaj?



POJAM KRITIČNIH OPTEREĆENJA

- Naponski propadi (voltage sags)
- Kratkotrajni naponski pikovi (voltage spikes)
- Naponski udari i prenaponi (surge voltage)
- Šumovi i radio frekventna interferenca (electrical noise and EMI interference)
- Promena učestanosti napojne mreže
- Opterećenja osetljiva na ove uticaje se nazivaju KRITIČNIM OPTEREĆENJIMA i za njihov kontinualan rad je potreban stabilan i pouzdan izvor napajanja, mnogo stabilniji od napojne mreže, kako bi se garantovala njihova funkcija

NEKI TIPOVI POREMEĆAJA U MREŽNOM NAPONU



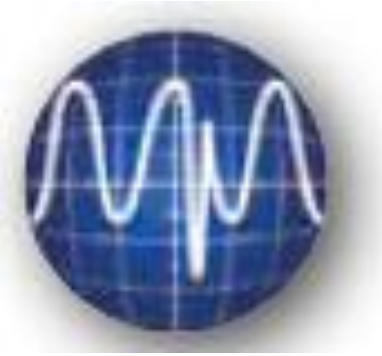
TIPOVI KRITIČNIH OPTEREĆENJA

- RAČUARI (procesiranje podataka i kontrolni sistemi)
- INDUSTRIJSKA PROCESNA OPREMA
- MEDICINSKA OPREMA (operacioni blokovi i medicinski monitoring)
- TELEKOMUNIKACIONA OPREMA
- BANKARSKI SISTEMI
- TRGOVAČKI SISTEMI
- BERZA i BIZNIS TRANSAKCIJE
- INTERNET

EFEKTI NEADEKVATNOG NAPAJANJA

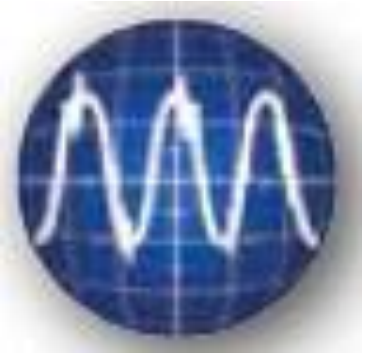
- UGROŽENOST LJUDSKOG ŽIVOTA (ispad medicinskih uređaja)
- PREKID POSLOVANJA
- GUBITAK SOFTVERA I PODATAKA
- UNIŠTENJE HARDVERA I NJEGOVIH KOMPONENTI
- ZASTOJI u PROIZVODNJI
- UGROŽENOST KONTROLNIH SISTEMA U INDUSTRIJI
- GUBITAK TELEKOMUNIKACIJA

PROBLEMI NAPAJANJA-NAPONSKI PIKOVI



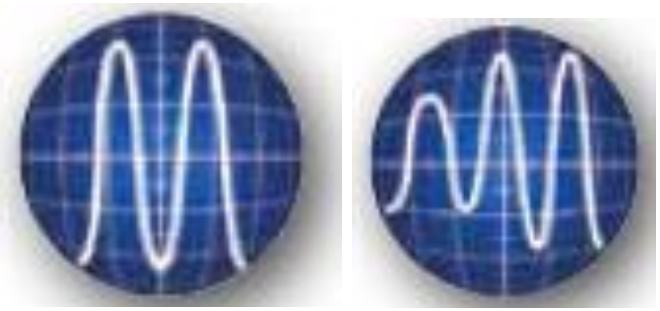
- NAPONSKI PIKOVI su kratkotrajni povišeni naponi koji se superponiraju na talasni oblik mrežnog napona
- Oni mogu biti pozitivni i negativnih vrednosti što generalno može dovesti do uništenja elektronskih komponenata
- Obično su prouzrokovani naglim prekidanjem velikih induktivnih opterećenja
- Mogu nastati i usled indukcionog dejstva udara groma
- Dovode do trajnog uništenja hardvera
- Dovode do uništenja PODATAKA i datoteka u softveru
- SUZBIJANJE: varistori, prigušivači tranzijentnih napona (transient voltage suppressors), tranzorberi, brzi odvodnici prenapona, itd...

PROBLEMI NAPAJANJA-ELEKTRIČNI ŠUM



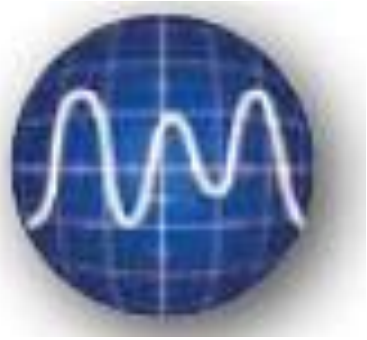
- **Common mode noise**
  Posledica poremećaja između napojnih vodova
  i uzemljenja
- **Normal mode noise**
  Posledica poremećaja između *“line-line”* petlje i *“line-neutral”* petlje (može biti prouzrokovan udarima groma, prekidanjem opterećenja, prekidom kablova, uticaje radio frekventne opreme
- Visoke učestanosti po uzemljenju mogu da utiču na osetljiva kola, pogotovu ako je ono vezano na masu kontrolne logike
- Uticaj komunikacionih kablova i drugih spoljnjih veza
- Električni šum može dovesti do “padanja” računara i gubitka podataka
- SUZBIJANJE: odgovarajućim filtrima i metodama ekranizacije i oklapanja, što kvalitetnijim uzemljenjem

PROBLEMI NAPAJANJA- PRENAPONSKI TALASI I UDARI



- VOLATGE SURGES
- To su prenaponi iznad normalnih vrednosti napona koji traju više perioda mrežnog napona
- Posledica su isključenja velikih opterećenja ili prebacivanja opterećenja u trafostanicama
- Zbog relativno dugog trajanja prenapon može dovesti do degradacije napajanja računara i do njihovog prevremenog otkaza

PROBLEMI NAPAJANJA-NAPONSKI PROPADI

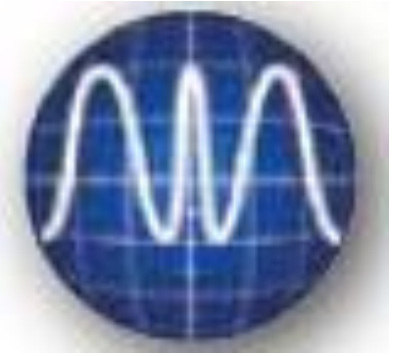


- VOLTAGE SAGS
- To su padovi odnosno “propadi” mrežnog napona koji mogu trajati nekoliko ciklusa
- Posledica su uključenja velikih opterećenja (klimatizaciona oprema, električni motori, elektrolučne peći i sl.)
- Propadi mogu izazvati ponovno uključenje računara (tzv. re-booting) ako napon padne dovoljno nisko

PROBLEMI NAPAJANJA-HARMONICI

- Posledica nelinearnih opterećenja čija struja koju uzimaju iz mreže, se karakteriše pikovima
- Ispravljački blokovi sa kapacitivnim opterećenjem koji su postavljeni prema mreži (monofazni i trofazni)
- Harmonici izazivaju nesrazmeran porast struje što dovodi do porasta temparature i pregrevanja
- PC računari sadrže ove ulazne ispravljače i povećavanjem računara u sistemu ovaj efekat postaje veći
- Naročito je veliki uticaj ovih harmonika na napojne sabirnice
- Zahtev za malim ukupnim sadržajem harmonika-TOTAL HARMONICS DISTORTION (THD)
- THD<10%

PROBLEMI NAPAJANJA: PROMENA UČESTANOSTI

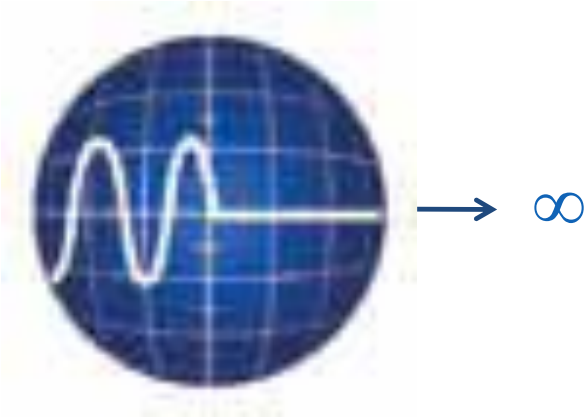


- Promena učestanosti takođe može štetno da deluje na potrošače
- Učestanost mreže je obično u opsegu tolerancije ±1% ili u boljem slučaju ±0.5%
- Usled nagle promene tokova aktivnih snaga u sistemu može da dođe do većih promena učestanosti
- Vrlo retko se radi o trajnim promenama
- Vrlo često o kratkotrajnim

PROBLEMI NAPAJANJA-brownouts

- Identični naponskim propadima ali su znatno dužeg trajanja
- Nazivaju se često i trajni padovi napona
- Mnogo su ozbiljniji od naponskih propada
- Javljaju se kada glavno napajanje nije u stanju da se “izbori” sa opterećenjem, tako da dolazi do pada napona, ali ne i njegovog nestanka
- Mogu trajati i po nekoliko sati

PROBLEMI NAPAJANJA-blackouts



- NESTAŠICE
- BLOKADA NAPAJANJA
- Potpuni gubitak napajanja
- Posledica greški u napojnim vodovima
- Incidentne situacije i prirodne katastrofe
- Uslovljene vremenskim (ne) prilikama
- Imaju razarajući efekat

TOLERANCIJA RAČUNARSKIH NAPAJANJA-ISKUSTVO

- Računarska napajanja tolerišu ulazni napon u granicama +/-5% i +/-10% zavisno od proizvođača
- Računarska napajanja tolerišu kratkotrajne pikove ulaznog napona
- Što su kraćeg trajanja dozvoljena “ekskurzija” napona je veća i obrnuto
- Računarska napajanja tolerišu propade i prekide napajanja u intervalu do MAX 10ms
- Ovo je posledica sposobnosti DC međukola koje sadrži značajne elektrolitske kondenzatore 220uF-1000uF

BESPREKIDNO NAPAJANJE

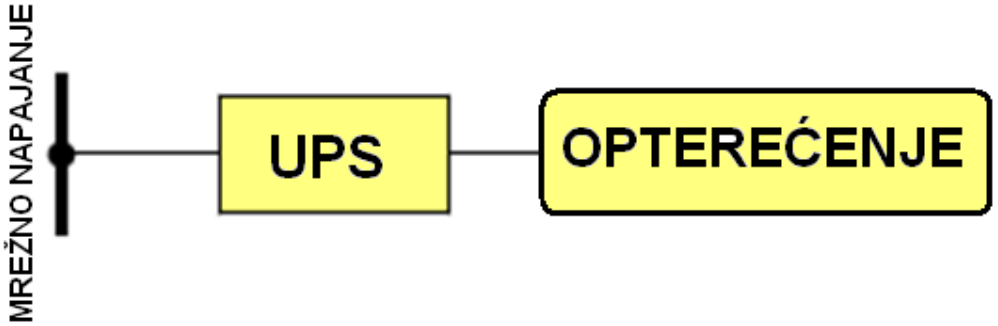
- Kritična opterećenja zahtevaju kvalitetno i NEPREKIDNO napajanje
- Rešenje je UPS
- UPS (Uninterruptible Power Supply)
- IZVOR BESPREKIDNOG NAPAJANJA
- Obezbeđuje KONTINUALNU, OBRAĐENU i “ČISTU” energiju

- BESPREKIDNA NAPAJANJA (Uninterruptible Power Supply-UPS) se koriste za trajnu i stabilnu isporuku električne energije u slučaju kvara na distributivnoj mreži ili čak kao samostalni izvori napajanja.
- Nalaze veoma veliku primenu u napajanju medicinske opreme, telekomunikacione opreme, ali u najvećem broju slučajeva, u sistemima računarskih napajanja.
- Osetljivi potrošači se najčešće dovode u vezu sa problemima kvaliteta napajanja električnom energijom. Oni ne tolerišu dugotrajno vreme bez napajanja.Čak i kratkotrajni ispad od 50-100ms može dovesti do katastrofalnih posledica (ispad operacionog bloka u bolnicama, gubitak podataka u računarskim centrima, bankama, ispad upravljačkog sistema na elektranama i sl.)
- Najprostiju konfiguraciju besprekidnih napajanja čine ispravljač, rezervni izvor energije (baterija), statički prekidač i invertor.
- Zbog harmonijskih izobličenja koje u napojnoj mreži prouzrokuje ispravljač, nove topologije ispravljača sadrže kola za korekciju faktora snage i eleiminisanje uticaja viših harmonika.

- Osnovni princip rada besprekidnog napajanja je da se rezervni izvor energije (baterija) preko mrežnog ispravljača puni jednosmernom strujom. Baterija potom napaja invertor koji pretvara njenu jednosmernu energiju (DC) u naizmeničnu energiju (AC) i kao takvu je dostavlja potrošačima.
- Ovakav sistem je najčešće predviđen za rad od nekih desetak minuta, ali da bi se minimizirala veličina baterije, neki sistemi za snabdevanje računarskih sistema rade tačno onoliko vremena koliko je potrebno da bi se hardver automatski isključio i da bi se sačuvali bitni podaci.
- Statički prekidač je takođe veoma bitna komponenta za što kvalitetnije funkcionisanje.On može biti izveden kao elektromehanički ili kao poluprovodnički (antiparalelna veza tiristora). U oba slučaja upravljačko kolo mora da aktivira prekidač kada izlazni napon padne ispod neke određene vrednosti od svoje nominalne.
- Vreme komutacije elektromehaničkih prekidača iznosi od oko 50-100ms. Ovo vreme kašnjenja može da dovede do isključenja potrošača ili čak do kvara na njima.
- Upotrebom tiristorskih statičkih prekidača može da se postigne vreme komutacije u trajanju od oko 5ms, što je sasvim dovoljno za većinu potrošača da nastave da funkcionišu normalno.

ŠTA JE USTVARI BESPREKIDNO NAPAJANJE -UPS?

- IZVOR (BESPREKIDNOG) NEPREKIDNOG NAPAJANJA
- SPREGA IZMEĐU MREŽE I OPTEREĆENJA
- ČUVAR OPTEREĆENJA
- OBEZBEĐUJE KVALITETNO NAPAJANJE



-TO JE STATIČKI SISTEM, KOJI ZAMENJUJE ROTACIONE SISTEME

-NEMA MEHANIKE (DINAMIKE)

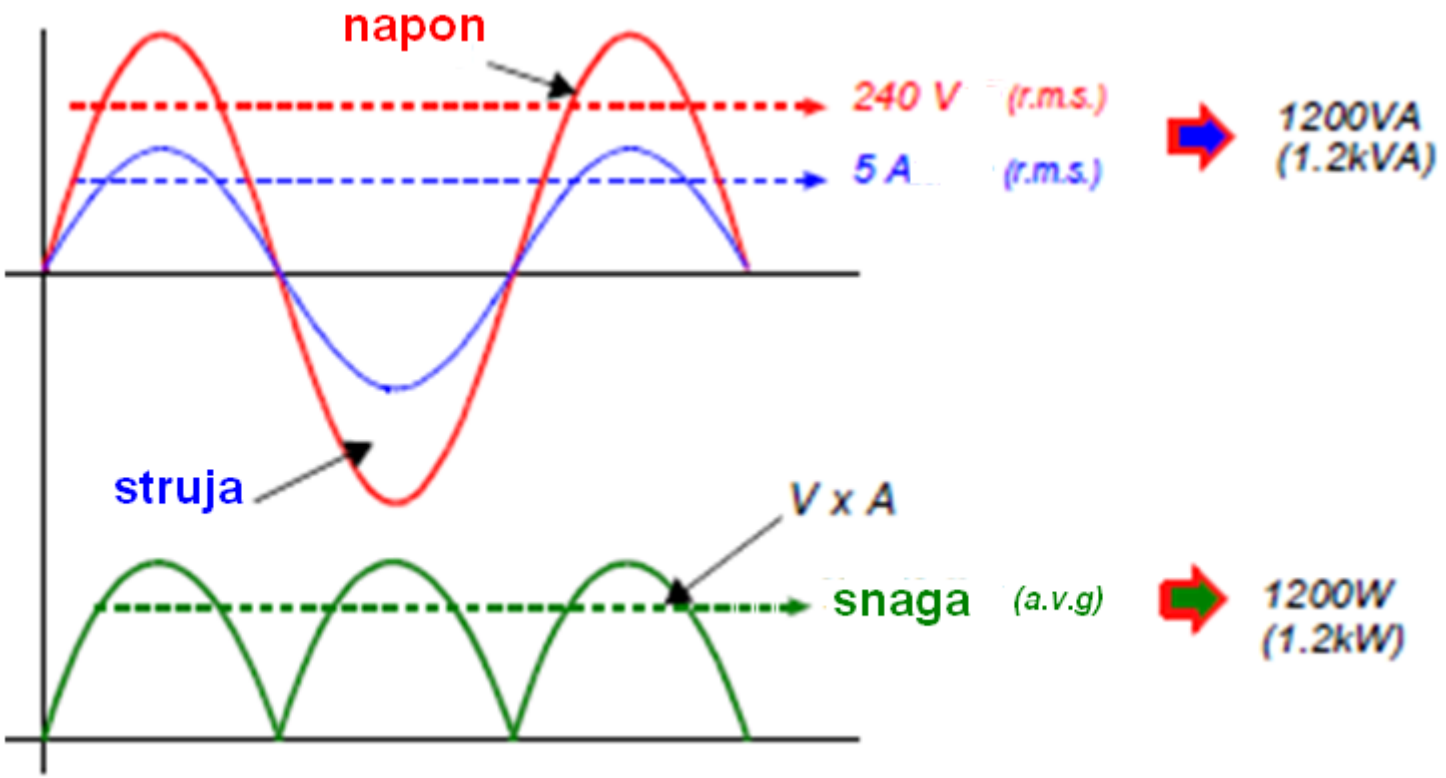
-NEMA ROTACIONIH DELOVA

-BAZIRA SE NA ENERGETSKIM PRETVARAČIMA I ENERGETSKOJ ELEKTRONICI

OSNOVNI PARAMETAR UPS-a: SNAGA (VA,kVA)

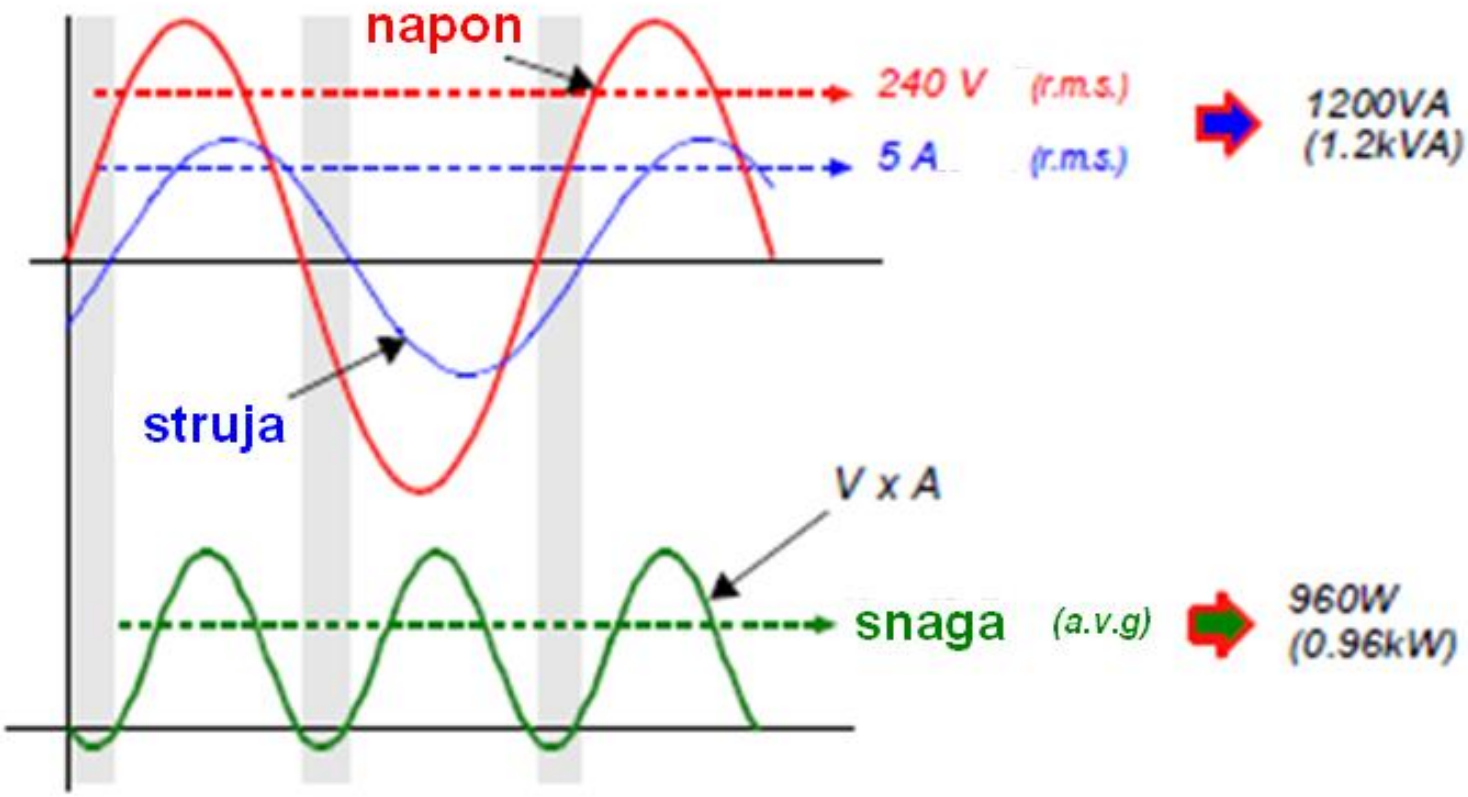
- Proizvođači uglavnom daju vrednost prividne snage **S**(kVA)
- VA ili kVA nam kažu koliko je maksimalno opterećenje koje može napajati UPS kada dođe do ispada mrežnog napajanja
- Pri izboru UPS-a veoma je bitno da opterećenje ne prelazi njegovu izlaznu snagu
- Ako je opterećenje dato u W ili kW radi korektnijeg dizajna treba izvršiti konverziju u VA ili kVA
- Da li su W(kW) u opštem slučaju isti sa VA(kVA)

VA=W za linearna kola (opterećenja)



ODNOS AKTIVNE I REAKTIVNE SNAGE =1

W≠VA za nelinearno kola (opterećenja)



P.F=0.8

ODNOS AKTIVNE I REAKTIVNE SNAGE ≠1

ODNOS AKTIVNE I REAKTIVNE SNAGE= FAKTOR SNAGE

POWER FACTOR (P.F)=P(kW)/S(kVA)

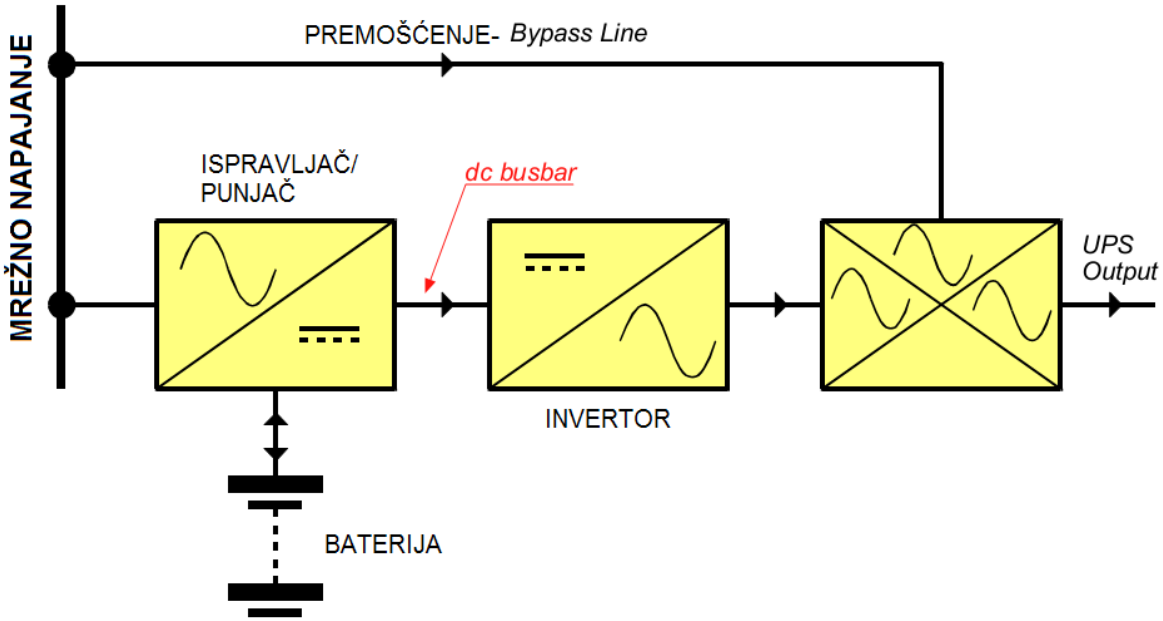
OPSEG SNAGA KOMERCIJALNIH UPS

- **50VA-3MVA**
- **MIKRO SISTEMI: do 250VA**
- **MINI SISTEMI: 500-2000VA**
- **SISTEMI SREDNJIH SNAGA: 3-2kVA**
- **SISTEMI VELIKIH SNAGA:30-400kVA**
- **SISTEMI EKSTREMNO VELIKIH SNAGA: >400kVA**

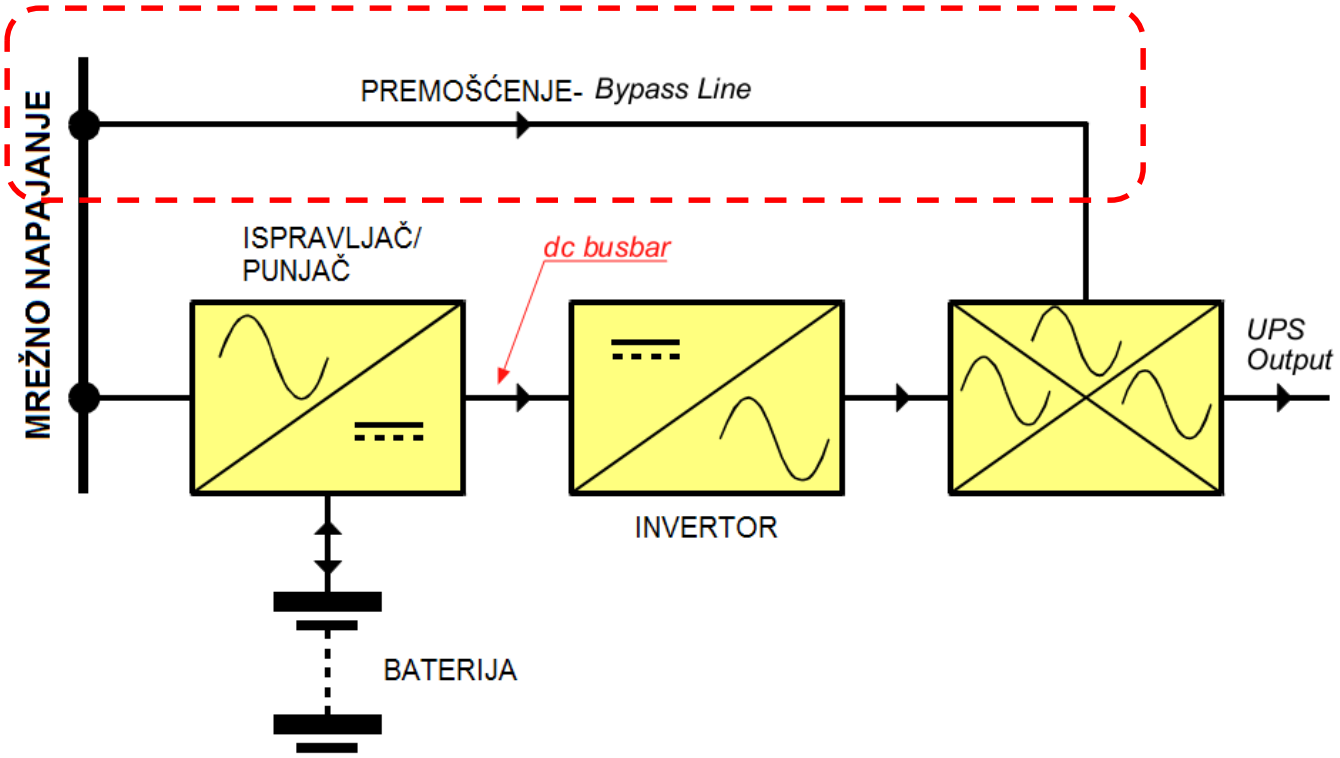
TIPOVI SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA

- UGLAVNOM JE PODELA SVEDENA NA TRI TIPA KOJA SE NAJČEŠĆE SREĆU U PRAKSi:
- PASIVNI (STAND BY) ili OFF-line
- MREŽNO INTERAKTIVNI
- AKTIVNI ili ON-line

TIPIČAN BLOK DIJAGRAM SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA



- ZAJEDNIČKO ZA SVE SISTEME JE DA MORAJU IMATI **BATERIJSKU BANKU** KOJA SKLADIŠTI ENERGIJU KADA JE MREŽNO NAPAJANJE DOSTUPNO
- KADA MREŽA NIJE DOSTUPNA, POSREDSTVOM BATERIJE I INVERTORA, SE DOBIJA IZLAZNO “AC” NAPAJANJE
- GLAVNE KOMPONENTE PORED BATRIJE SU: **PUNJAČ/ISPRAVLJAČ I INVERTOR**
- INVERTOR SE AUTOMATSKI ISKLJUČUJE KADA DC NAPAJANJE “PADNE” ISPOD ODREĐENOG NIVOA
- VREME ZA KOJE OPTEREĆENJE MOŽE BITI PODRŽANO KADA SE DESI PREKID MREŽNOG NAPAJANJA ZAVISI OD KAPACITETA BATERIJE I PROCENTA PRIMENJENOG OPTEREĆENJA
- VREME REZERVE BATERIJE
- VREME AUTONOMIJE



- BAJPAS SISTEM:OBEZBEĐUJE POVEZIVANJE KRITIČNOG OPTEREĆENJA U SLUČAJU ISPADA INVERTORA ODNOSNO DC NAPAJANJA, NA MREŽNO NAPAJANJE
- ULOGA STATIČKOG PREKIDAČA: POUZDANO I BRZO PREBACUJE NAPAJANJE OPTEREĆENJA SA INVERTORA NA MREŽU
- STATIČKI PREKIDAČ MOŽE BITI RELEJ (ZA SLUČAJ MALIH SNAGA) ILI POLUPROVODNIČKI PREKIDAČ (ANTIPARALELNA VEZA TIRISTORA) ZA VEĆE SNAGE

PASIVNI-Off line SISTEMI BESPREKIDNOG NAPAJANJA

- TRI SLUČAJA SE RAZMATRAJU

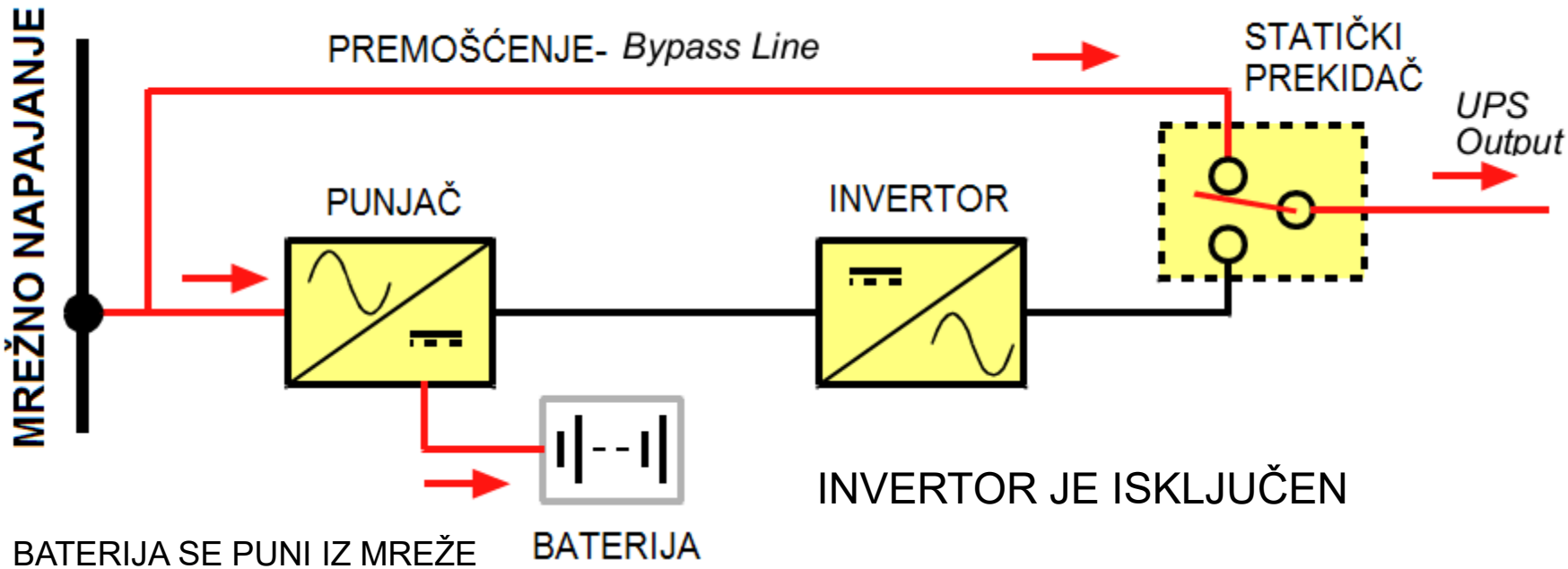
  1. NORMALNI REŽIM

  2. NESTANAK MREŽE

  3. NESTANAK DC NAPONA ILI ISPAD INVERTORA

NORMALNI REŽIM

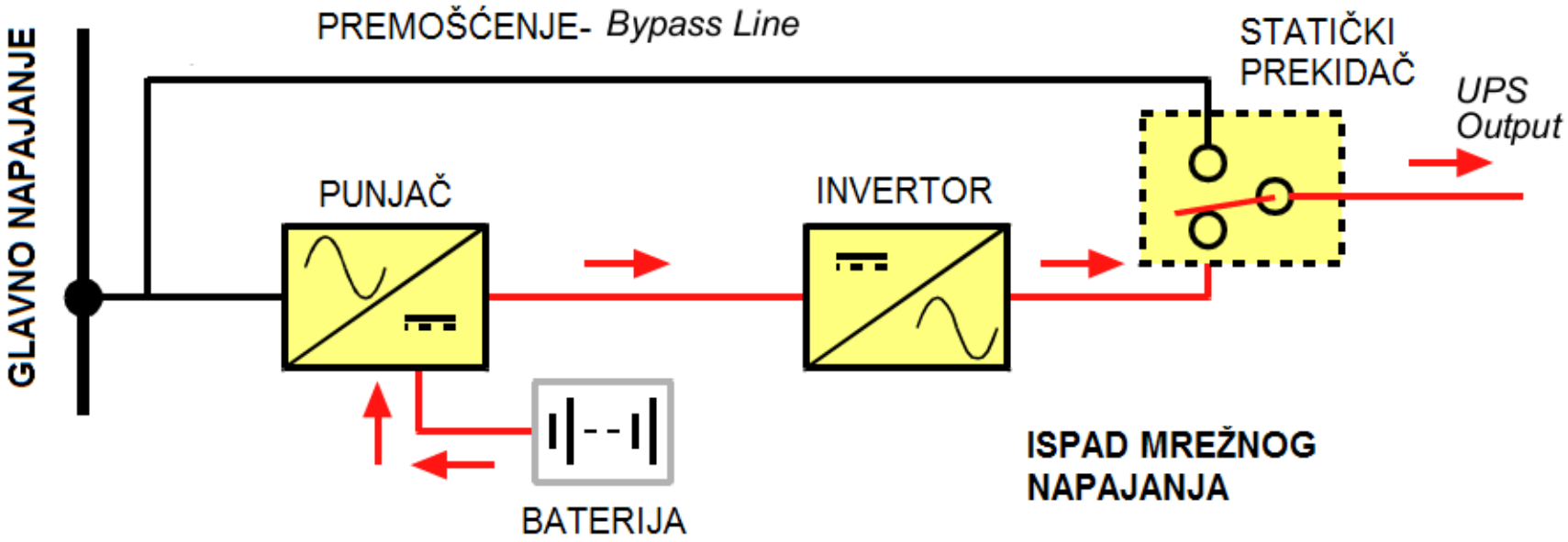
IZLAZ DOBIJA NAPAJANJE IZ MREŽE PREKO PREMOŠĆENJA I STATIČKOG PREKIDAČA



INVERTOR JE ISKLJUČEN

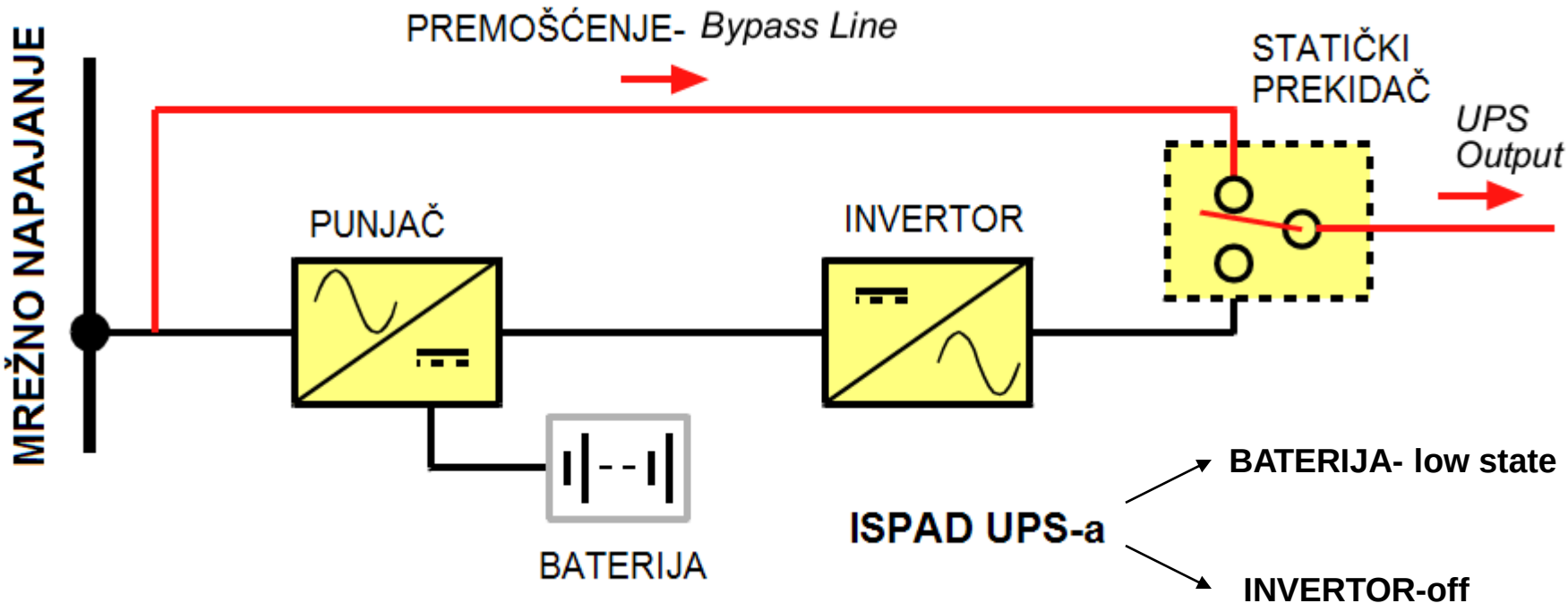
BATERIJA SE PUNI IZ MREŽE PREKO PUNJAČA

ISPAD MREŽNOG NAPAJANJA



-DC NAPAJANJE INVERTORA SE OSTVARUJE IZ BATERIJE
-OPTEREĆENJE DOBIJA NAPAJANJE IZ INVERTORA I PREKO STATIČKOG PREKIDAČA

ISPAD BATERIJSKOG (DC) NAPAJANJA ili INVERTORA



-OPTEREĆENJE DOBIJA NAPAJANJE IZ MREŽE, A PREKO STATIČKOG PREKIDAČA

-UKOLIKO DOĐE DO NESTANKA MREŽNOG NAPAJANJA, POTROŠNJA OSTAJE TRAJNO BEZ NAPONA I TO PREDSTAVLJA VELIKI PROBLEM

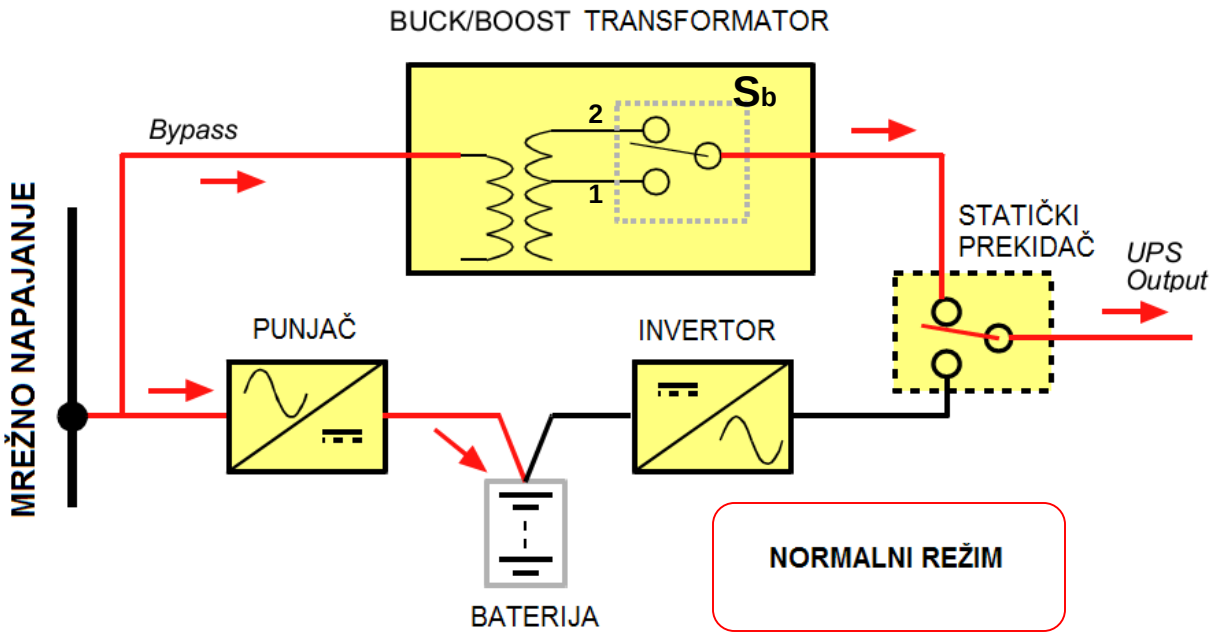
MANE PASIVNIH OFF-line sistema

- Jedan od ozbiljnih nedostataka OFF-line sistema je taj što opterećenje mora biti veoma brzo prespojeno sa invertora na LINIJU PREMOŠĆENJA (Bypass) i obrnuto
- Ako je tolerancija napona opterećenja uskog opsega, prilično često će dolaziti do ovih prebacivanja
- Ovim se povećava potrošnja baterije, broj ciklusa opterećivanja i time se ugrožava njen životni vek,
- Imamo dakle neadekvatno opterećivanje baterije
- Drugim rečima stvaraju se uslovi za podržavanje ispada celokupnog napajanja
- KAKO REŠTI OVAJ PROBLEM?

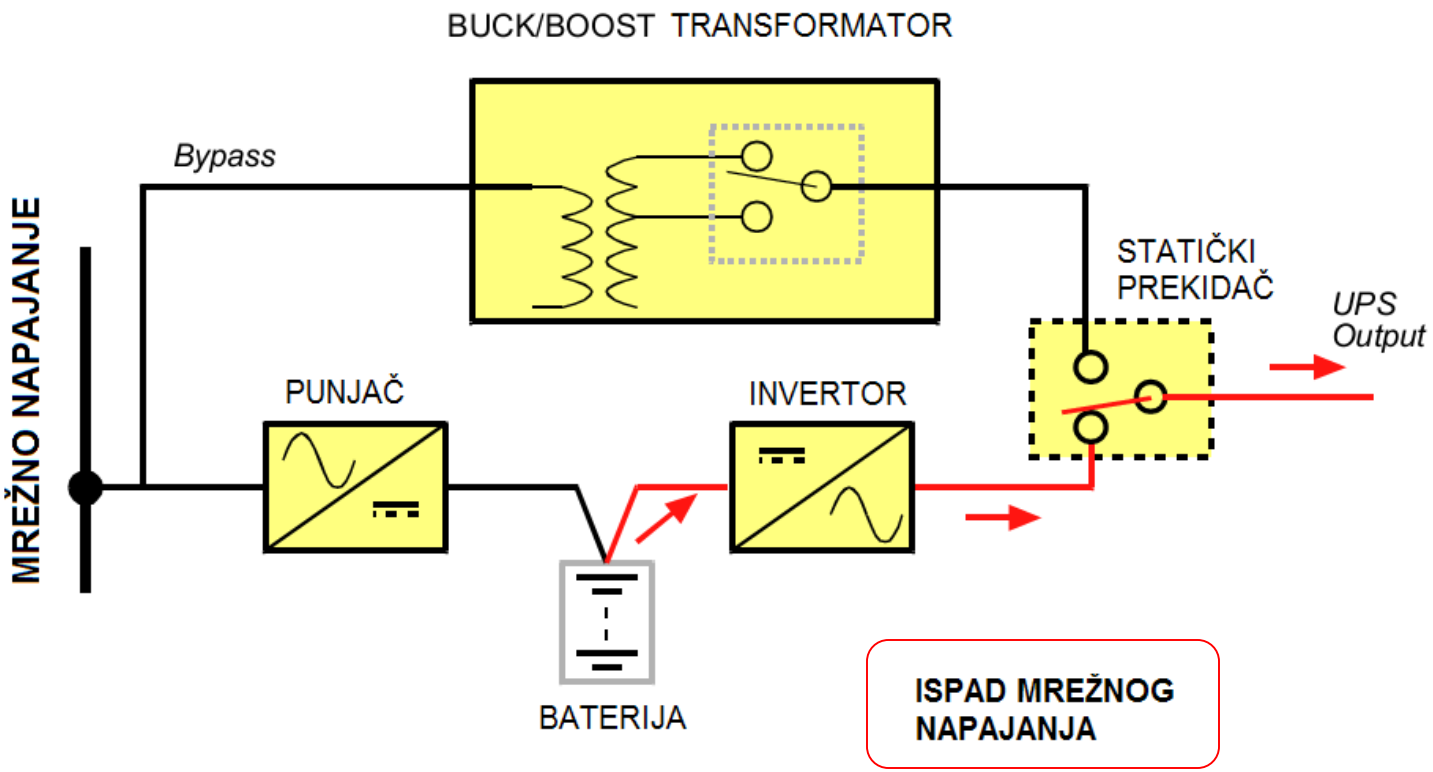
MREŽNO INTERAKTIVNI SISTEMI

- To su hibridni uređaji koji pokušavaju da pruže bolje performanse od standardnih pasivnih off-line sistema
- U “bypass” liniji, odnosno liniji premošćenja se uvodi funkcija regulacije napona
- Najčešće se to izvodi pomoću transformatorske sprege
- Pomoću transformatora u dve moguće varijante : naponski spuštač/podizač (*“buck-boost”*) ili ferorezonantni transformator

TRANSFORMATOR spuštač/podizač

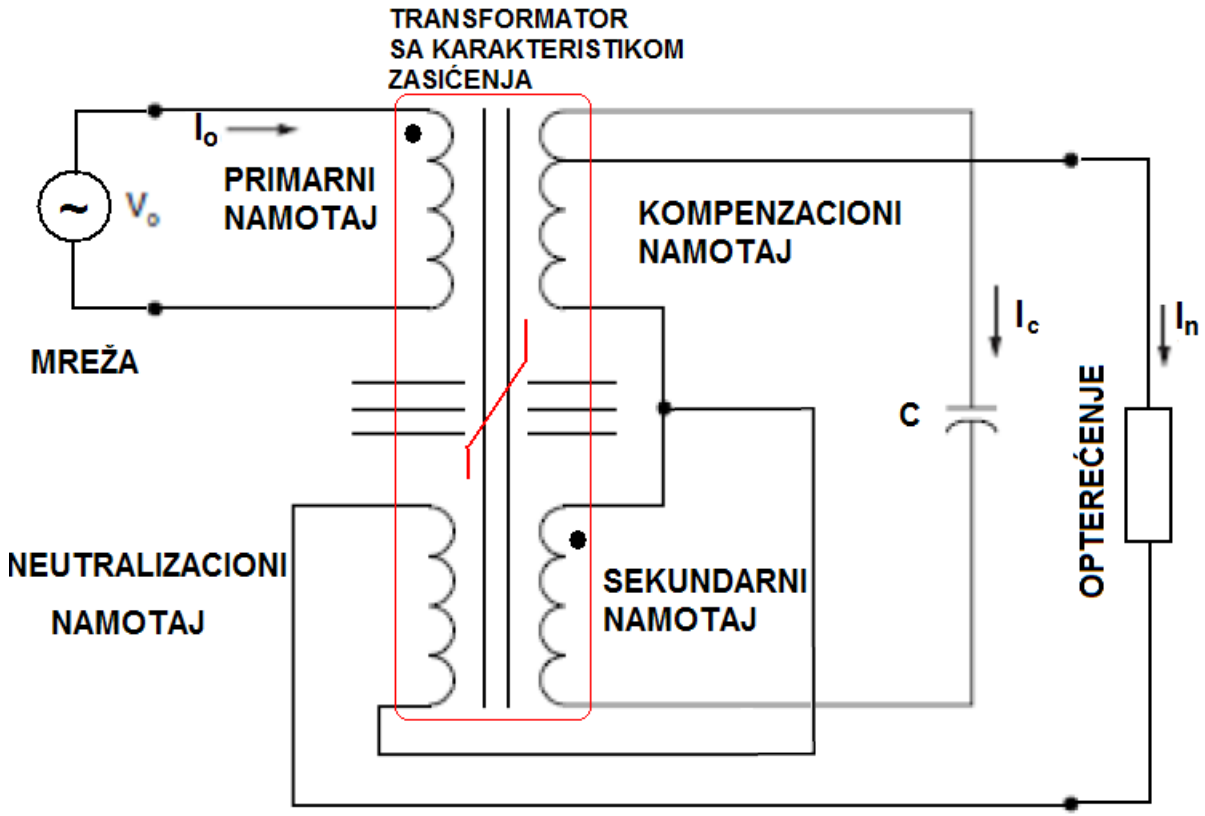


- Prekidačem i izvodima u sekundarnom namotaju transformatora se obezbeđuje funkcija podizanja/spuštanja bajpas napona (tzv. *"buck-boost"*) u cilju da se izlazni napon održi u zahtevanim granicama
- Tipični opseg napona koji se postiže ovim napajanjem -30% do +20%.
- Kada napon mreže raste prekidač **Sb** je u položaju 1
- Kada napon mreže opada prekidač **Sb** je u položaju 2

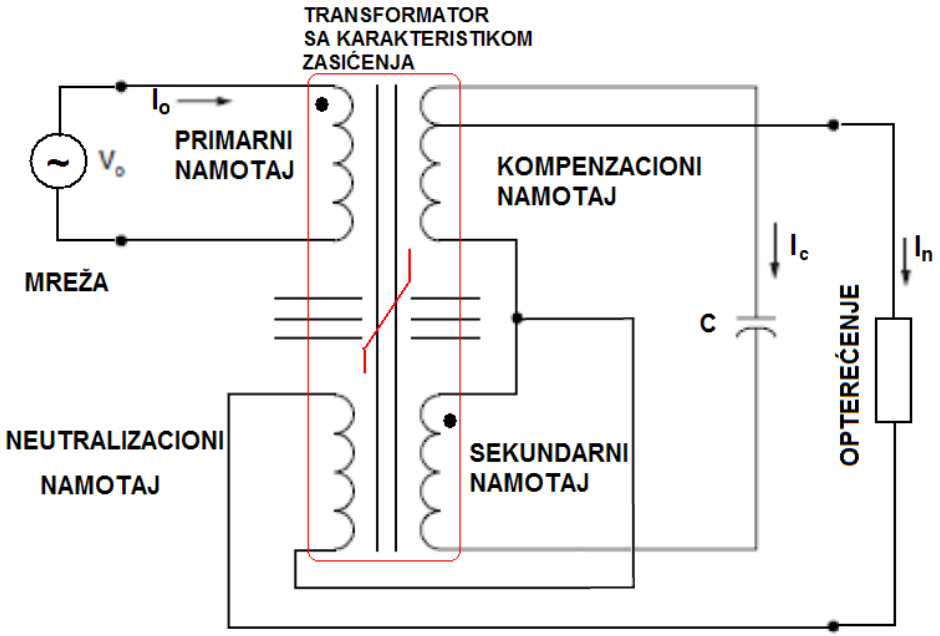


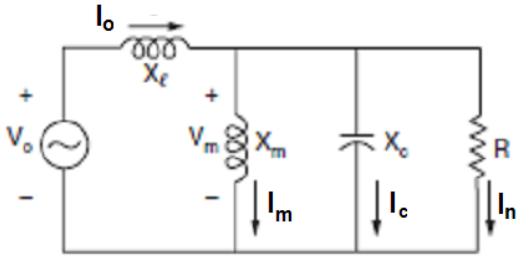
- U ovom slučaju transformator je isključen
- Opterećenje dobija napajanje iz invertora i preko statičkog prekidača
- Invertor se napaja iz baterije
- USLOV: baterija mora biti prethodno napunjena

ALTERNATIVA TRANSFORMATORU PODIZAČU SPUŠTAČU JE FEROREZONANTNI TRANSFORMATOR

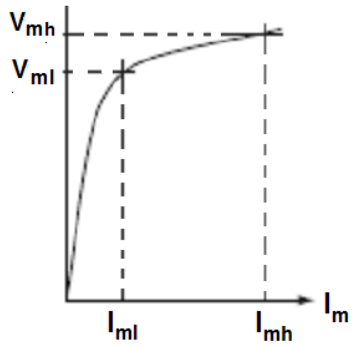


-MAGNETNO KOLO IMA IZRAŽENU KARAKTERISTIKU ZASIĆENJA
-SADRŽI PRIMARNI, SEKUNDARNI I DVA POMOĆNA NAMOTAJA
-KONDENZATOR JE DODATNI AKUMULATOR ENERGIJE
-EKVIVALENTNA ŠEMA I FAZORSKI DIJAGRAM?





EKVIVALENTNO KOLO



KARAKTERISTIKA
MAGNEĆENJA

STRUJA KONDENZATORA C

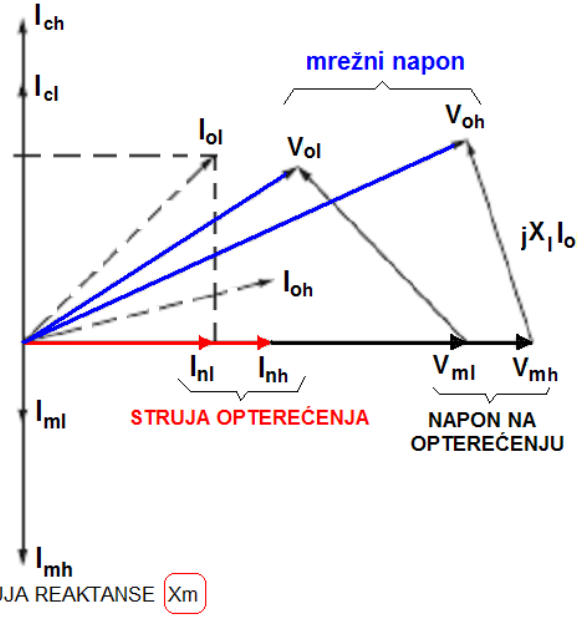
FAZORSKI DIJAGRAM

ZA VISOKI (high) i NISKI (low)

MREŽNI NAPON

index "l"- low

index "h"- high

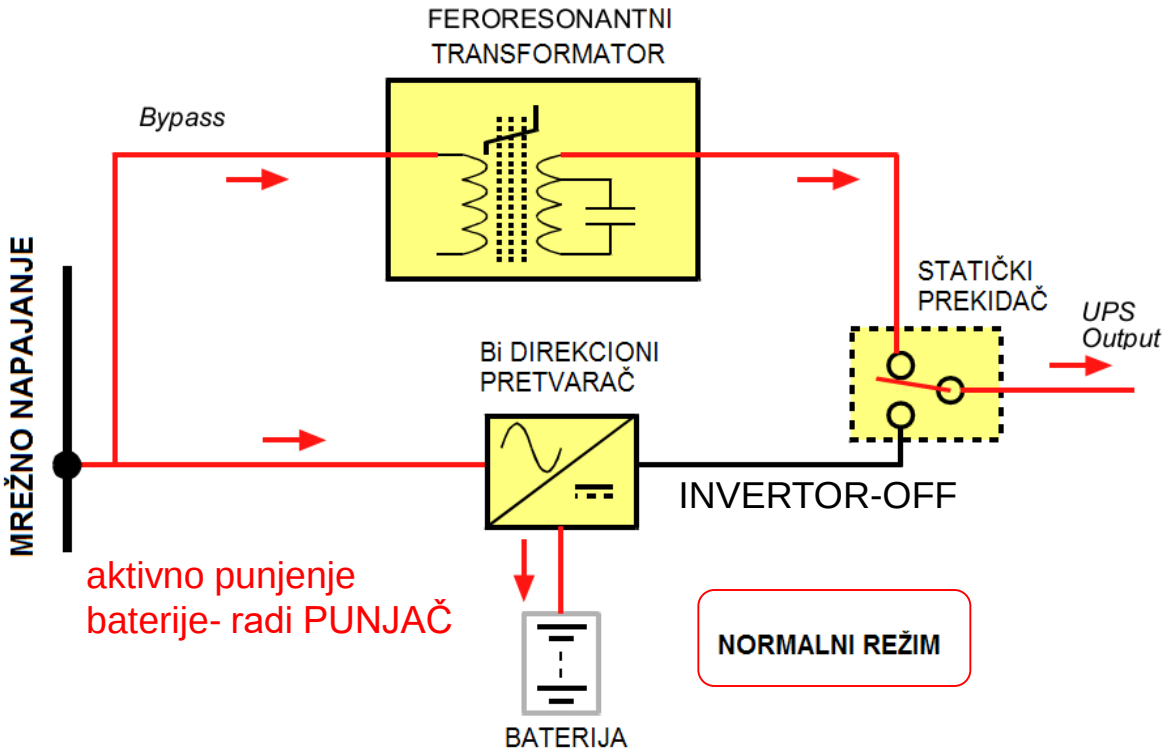


STRUJA REAKTANSE Xm

-PRI ZNAČAJNNIM ODSTUPANJIMA MREŽNOG NAPONA SE IMAJU RELATIVNO MALE PROMENE NAPONA NA OPTEREĆENJU

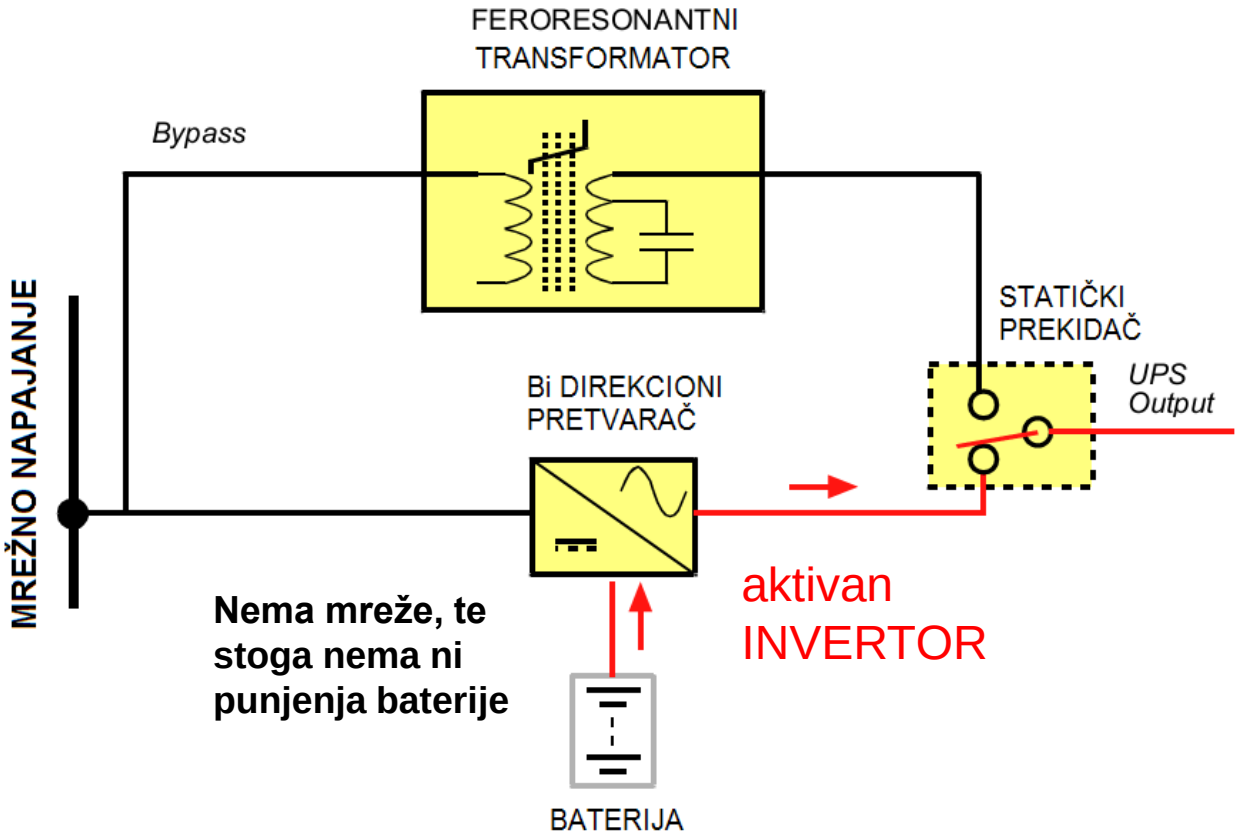
-OVO JE REALTIVNO BRZA REGULACIJA

FEROREZONANTNI TRANSFORMATOR u SISTEMU BESPREKIDNOG NAPAJANJA



•Ovim načinom se obezbeđuje regulacija izlaznog napona, eliminacija uticaja i poremećaja (električni šum) u opsegu 3% od nominalnog napona kada bajpas napon (mreža) varira u opsegu -40% do +20%

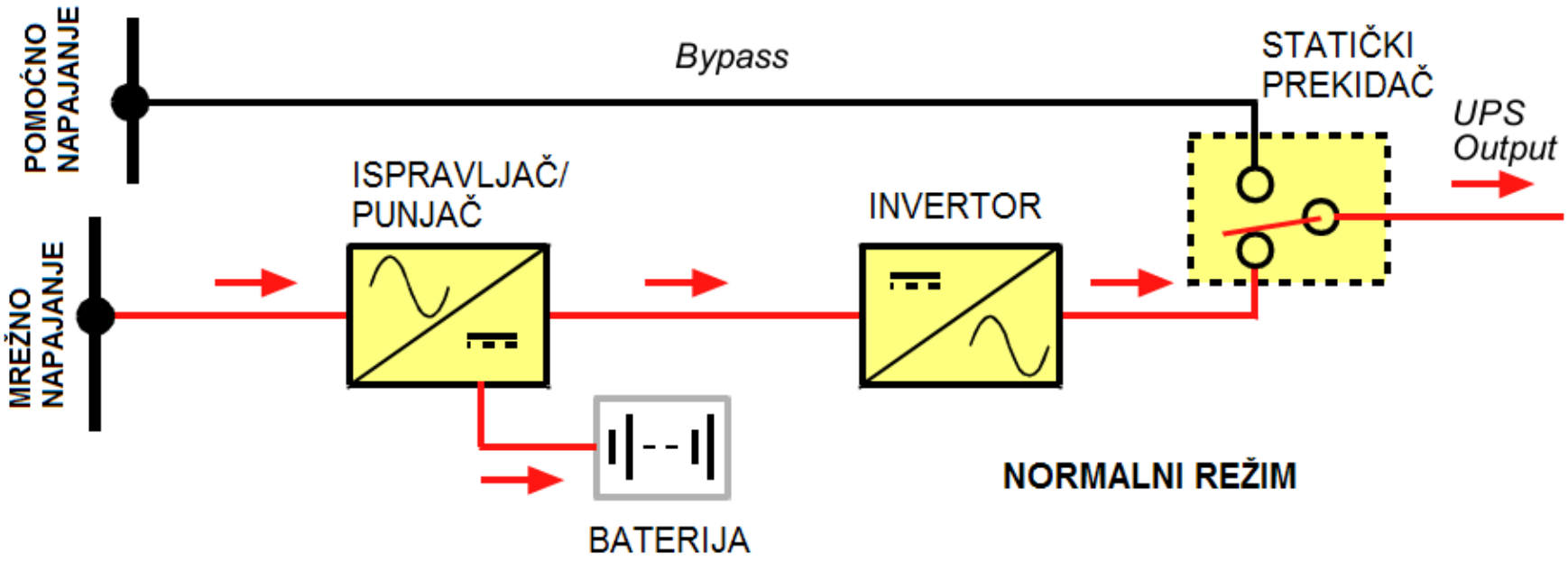
- Ferorezonantni transformator takođe skladišti deo energije i olakšava zadatak baterijskom napajanju
- **Bi-direkcioni pretvarač** (u njemu su integrisane tri funkcije: **ispravljač/punjač** i **INVERTOR**)
- Odlikuje se većom brzinom rada i prebacivanja napajanja na izlaz od klasičnog sistema koji se ima u pasivnim sistemima



- U ovom slučaju ferorezonatni transformator je isključen
- Opterećenje dobija napajanje iz Bi-direkcionog prekidača koji sada ima ulogu invertora, a preko statičkog prekidača
- Invertorski deo se napaja iz baterije
- USLOV: baterija mora biti pouzdana i prethodno napunjena

ON-line SISTEMI BESPREKIDNOG NAPAJANJA

- U odnosu na prethodno opisane sisteme u ovim sistemima **blok PUNJAČ je zamenjen** integrisanim **blokom ISPRAVLJAČ/PUNJAČ**
- Ovaj integrisani blok predstavlja ustvari dve zasebne jedinice (jedna je ispravljač, a druga punjač)
- Kada je glavno napajanje prisutno ovaj blok puni bateriju i snabdeva invertor jednosmernim naponom
- U odsustvu mreže punjač se isključuje i DC napajanje invertora je obezbeđeno iz baterije koja se sada prazni
- Konekcija između bloka ispravljač/punjač i invertora se često naziva **DC-bus**

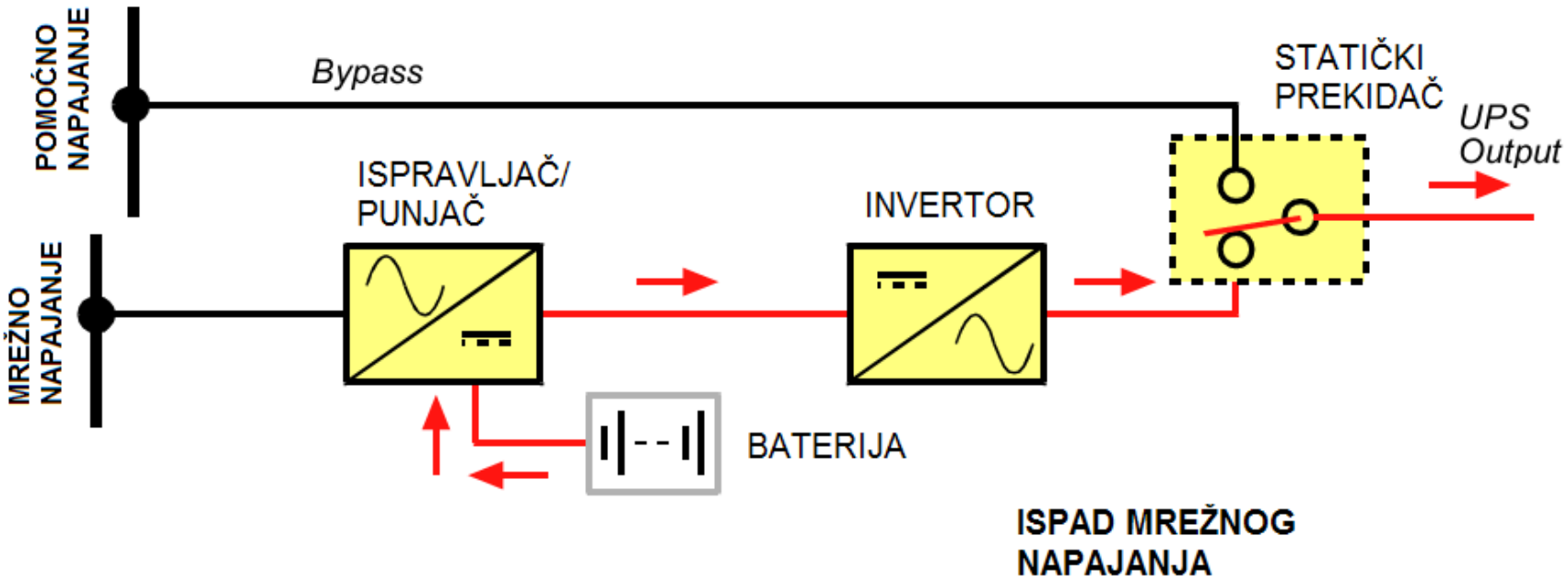


-Ovi sistemi zahtevaju izvor pomoćnog napajanja

-U normalnom ON-LINE režimu *bypass linija* koja je vezana na pomoćno napajanje je isključena

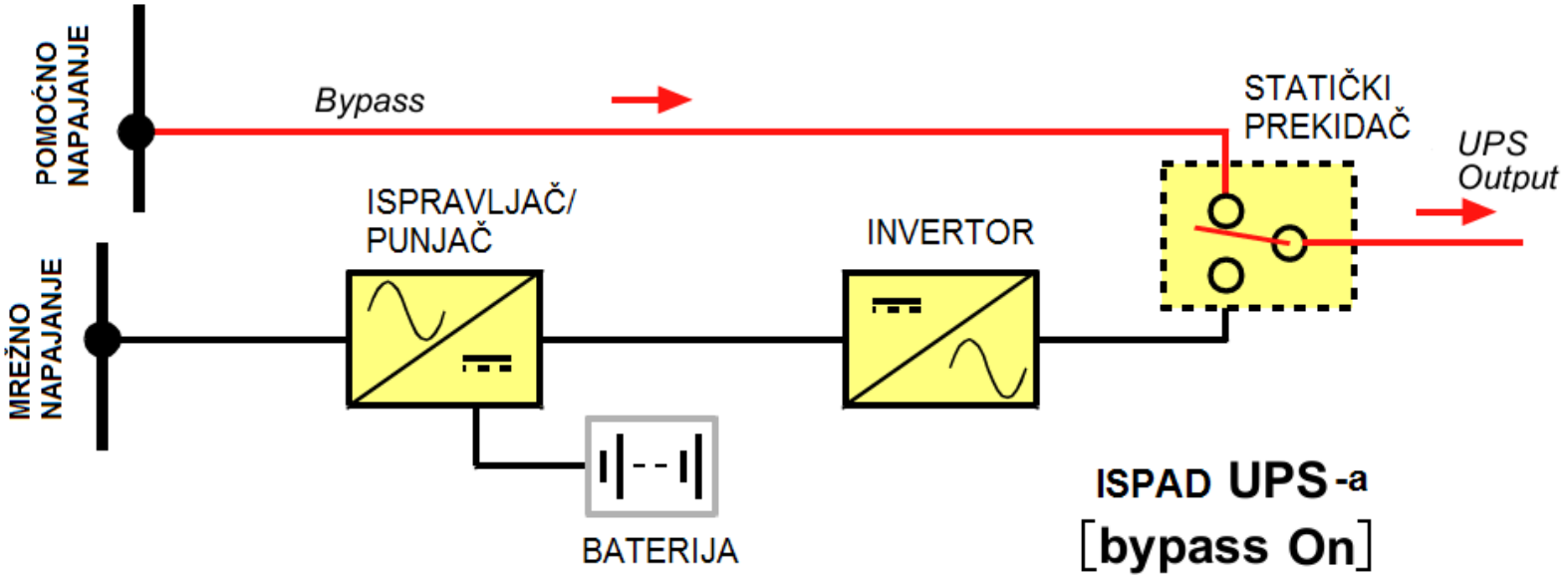
-Na mrežnom napajanju je blok ISPRAVLJAČ/PUNJAČ:
ISPRAVLJAČ obezbeđuje napajanje INVERTORA
PUNJAČ obezbeđuje punjenje baterijske banke

-STATIČKI PREKIDAČ prosleđuje napon invertora ka potrošačima
ŠTA ĆE SE DESITI KADA DOĐE DO ISPADA MREŽE???



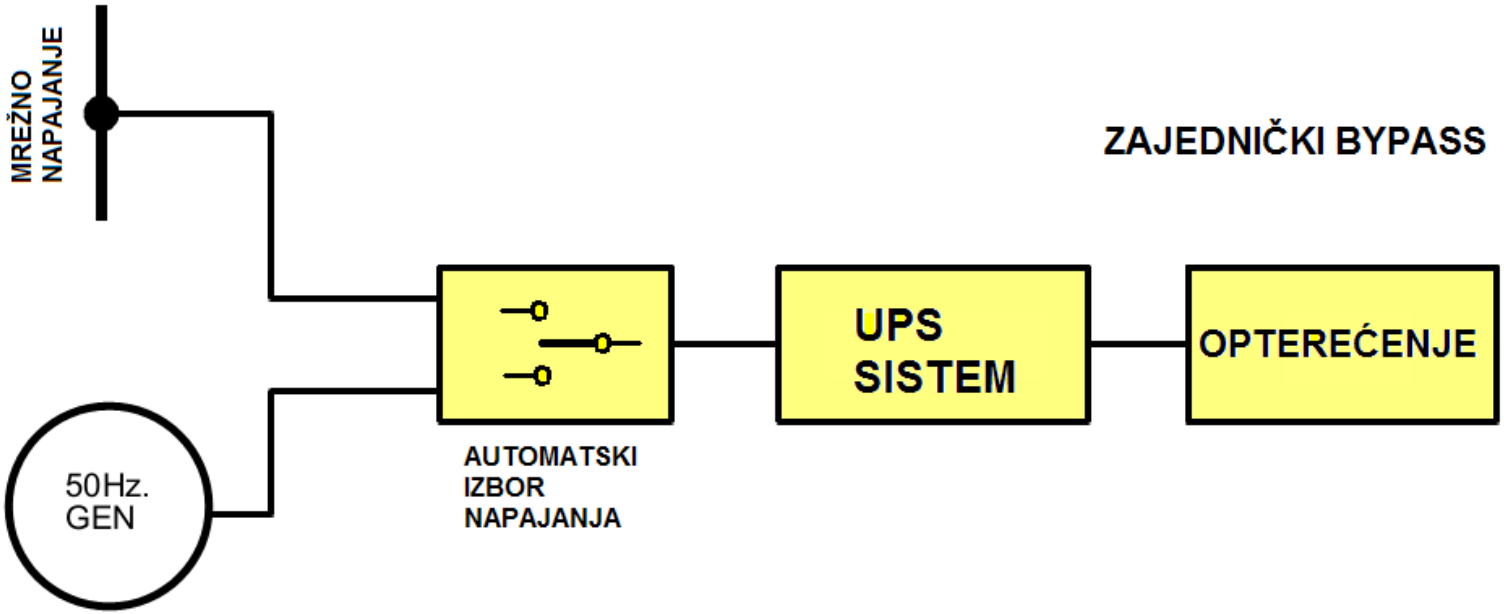
-Napajanje potrošača preuzima invertor koji se sada napaja iz baterijske banke
-Statički prekidač prosleđuje napon invertora ka potrošačima
-Učestanost napajanja je sada određena radnom učestanošću invertora
-Ova učestanost može više da se menja u poređenju sa mrežnom učestanosti
-Invertor je osetljiviji na promene opterećenja od mreže
-*Bypass linija* je isključena

ŠTA ĆE SE DESITI KADA DOĐE DO ISPADA INVERTORA ILI DO PRAŽNJENJA BATERIJE ILI ČAK NJENOG ISPADA???



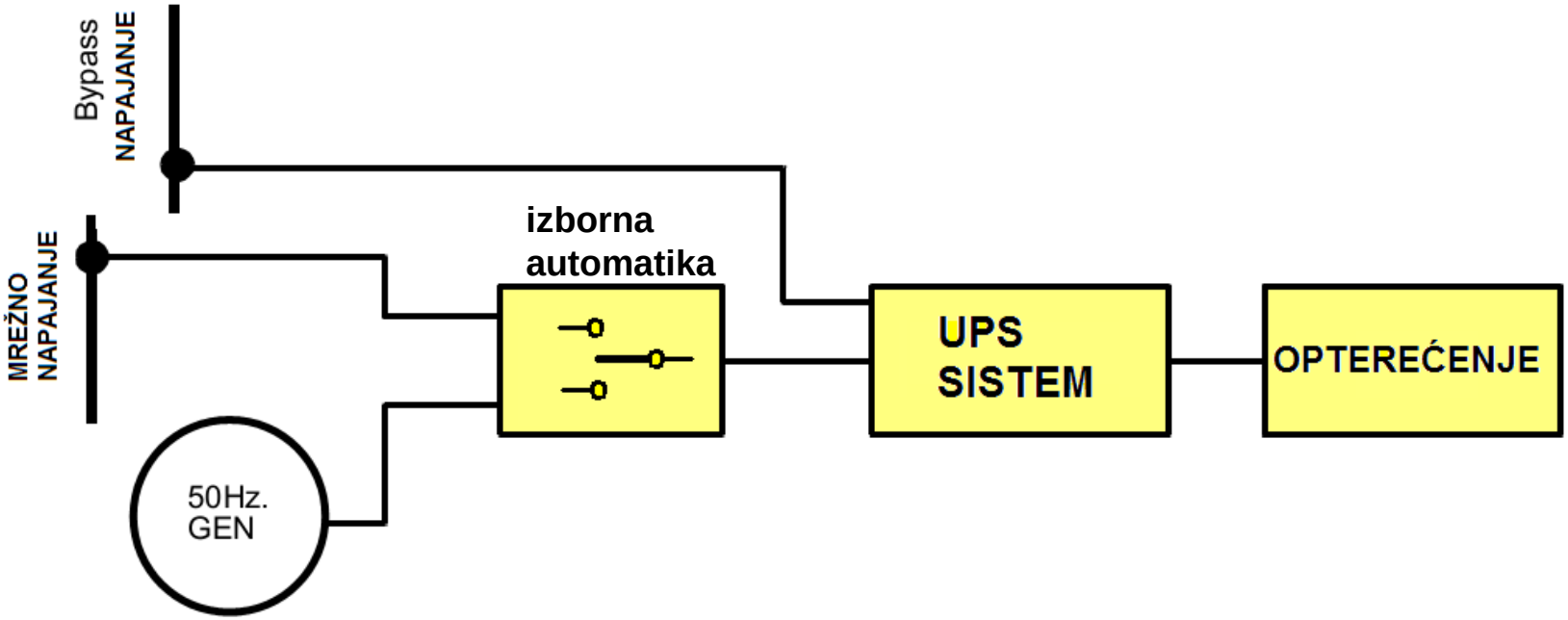
-Kada dođe do ispada invertora ili baterije, STATIČKI PREKIDAČ automatski uključuje pomoćni izvor napajanja preko *bypass linije*
-Ukoliko dođe do ispada pomoćnog napajanja potrošači trajno ostaju bez napajanja električnom energijom
-Ovo predstavlja ozbiljan problem!!!!!

ZAJEDNIČKO BAJPAS NAPAJANJE



-Zajedničko bajpas napajanje je moguće ostvariti u kombinaciji mrežnog napajanja i dizel agregata (generatora)
-Obično je obezbeđena automatika za prebacivanje, odnosno izbor napajanja
-UPS sistem ostaje kao u prethodnim slučajevima
-Veća redundantnost se može ostvariti odvojenim bajpas napajanjem

ODVOJENO BAJPAS NAPAJANJE



-U ovom slučaju imamo dva odvojena sistema napajanja
-Jedan sistem čine mreža i dizel generator
-Drugi odvojeni sistem je pomoćno *bypass* napajanje koje ne ide preko automatike za izbor napajanja, već ide direktno u UPS sistem
-Ovim je postignuta znatno veća redundansa u odnosu na sistem sa zajedničkim napajanjem (prethodni slajd)

EFEKAT ISPADA BESPREKIDNOG NAPAJANJA

- Greška, odnosno ispad sistema besprekidnog napajanja se ogleda u nesposobnosti invertora da obezbedi odgovarajući napon i učestanost na izlaznim priključcima
- Kontrolno kolo će detektovati neispravan izlazni napon ili učestanost kao kvar i odmah uključiti statički prekidač koji vrši prebacivanje napajanja na bajpas liniju
- Međutim ako invertor nije sinhronizovan sa bajpas napajanjem neće biti moguć prenos bez prekida napajanja (imaće se kratka pauza u napajanju)
- Opterećenje će biti izloženo kratkotrajnom prekidu
- Da li potrošač toleriše ovaj prekid?
- Kada dođe do ispada bajpas linije neće biti moguće obezbediti neprekidno napajanje

UTICAJ PREOPTEREĆENJA

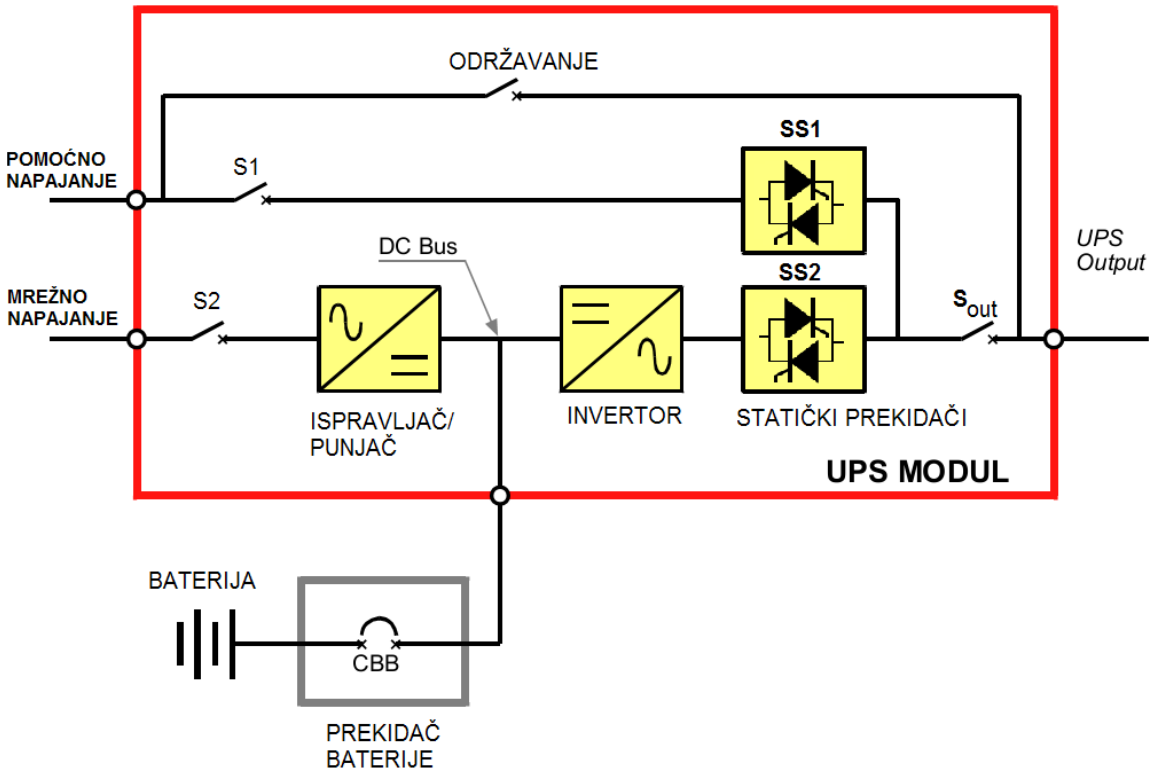
- Kada se desi preopterećenje, jedan od načina je da se preko statičkog prekidača uključi mrežno napajanje preko bajpas linije, a da se invertor isključi
- Nakon iščezavanja preopterećenja, kada se resetuje kvar, ponovo se uključuje invertor
- Ako nema bajpas linije onda dolazi do ispada sistema
- Stoga se sistemi besprekidnog napajaja projektuju tako da invertor može podneti preopterećenje određeni period vremena (obično do 30s, a u nekim slučajevima i do 50s)
- Jedno rešenje je da se napon invertora smanji dok traje preopterećenje, to znači i da će isporučena snaga biti manja
- Ako preopterećenje duže potraje, u krajnjem slučaju dolazi do isključenja izlaza posredstvom osigurača ili automatskih prekidača

ODRŽAVANJE, SERVISIRANJE i ULOGA BAJPAS LINIJE

- Obezbeđuje napajanje preko pomoćnog izvora dok je UPS modul izolovan radi servisa i popravke
- Neki UPS moduli ga standardno sadrže
- Neki UPS moduli se oslanjaju na spoljašnje bajpas kolo održavanja koji se dodaje u instalaciji
- Stoga razlikujemo:

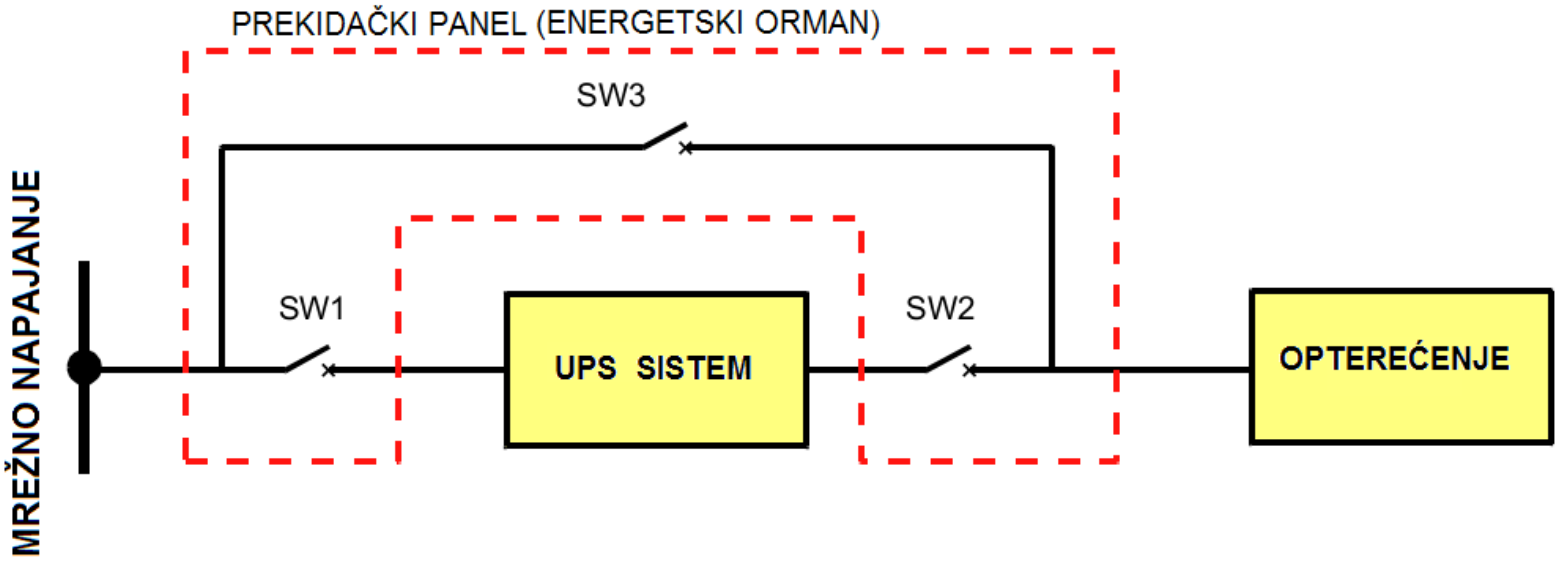
  UNUTRAŠNJI BAJPAS ODRŽAVANJA i SPOLJAŠNJI BAJPAS ODRŽAVANJA

UNUTRAŠNJI BAJPAS ORŽAVANJA



- Cilj: izolovati UPS u potpunosti radi opravke i održavanja, a preko bajpasa održavanja obezbediti napajanje potrošača
- Ovo se izvodi sistemom rastavljača i prekidača S_1,S_2,S_{out}

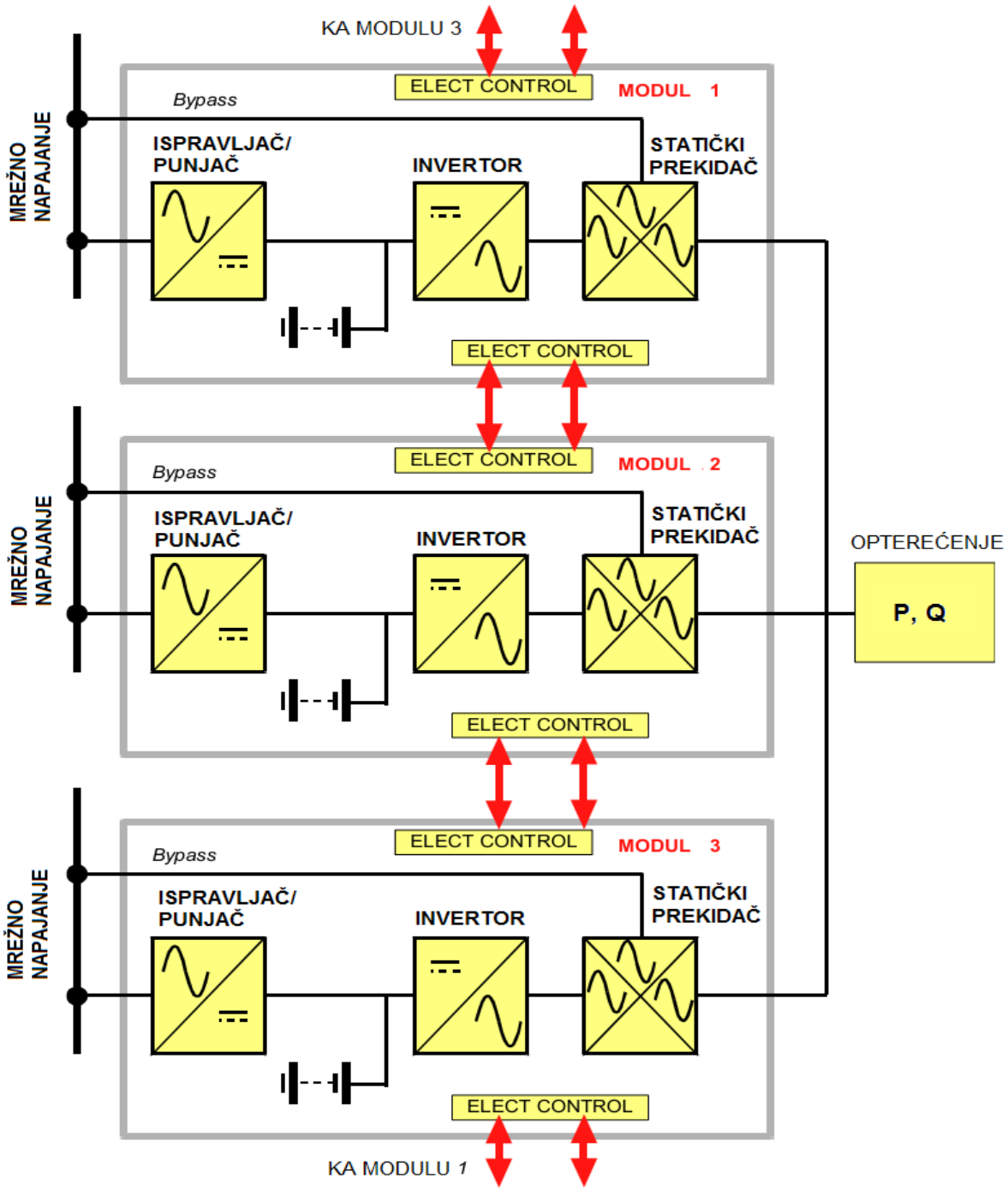
SPOLJAŠNJI BAJPAS ODRŽAVANJA



- Potpuna izolacija UPS-a se ostvaruje preko prekidača SW1-SW3, koji se ekesterno nalaze u energetskom ormanu koji je spolja dislociran, ali se nalazi u blizini sistema UPS-a
- Ovo se naziva popularno *WRAP AROUND* konfiguracija

PARALELNI SISTEMI BESPREKIDNOG NAPAJANJA

- Podrazumevaju sisteme sa dva ili više modula koji napajaju kritično opterećenje
- Generalno se koriste za srednje i veće snage u ON-LINE sistemima
- Potrebno je izvršiti sinhronizaciju između pojedinih modula
- Potrebno je upravljačkom logikom izvršiti deljenje opterećenja među modulima
- Stoga je potreban i pouzdan komunikacioni interfejs među modulima
- Moduli su vezani preko određene BUS komunikacije i imaju svoj protokol o komunikaciji
- Pogrešan pristup je da neki moduli rade sa invertorom a drugi preko bajpas linije
- Pravi pristup je da se potrošnja napaja ili samo preko invertora ili samo preko bajpas linije



TRI MODULA U PARALELI

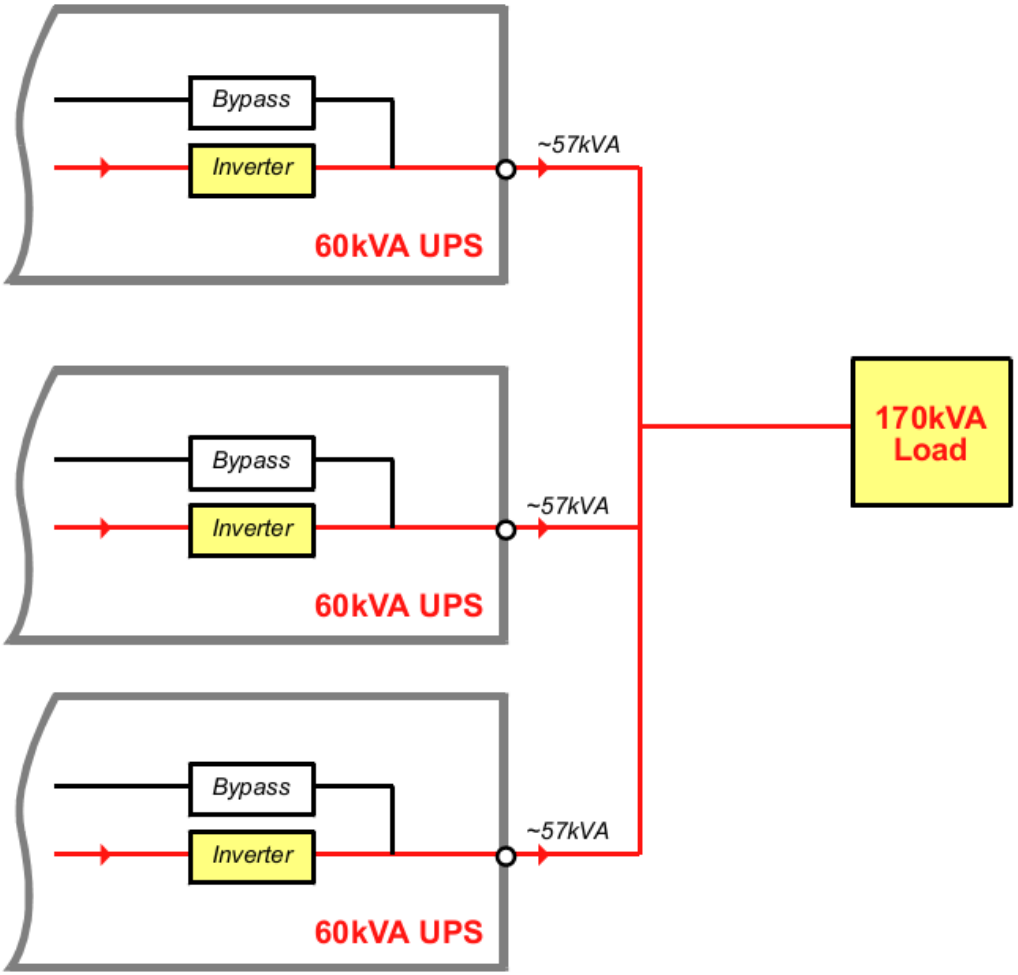
Ovom topologijom je ostvarena međusobna sinhronizacija između modula

Upravljanjem se postiže ravnomerna podela struje opterećenja

Moduli su vezani preko BUS komunikacije

Razmotrićemo efekte neravnomerne raspodele opteretne struje po pojedinim modulima

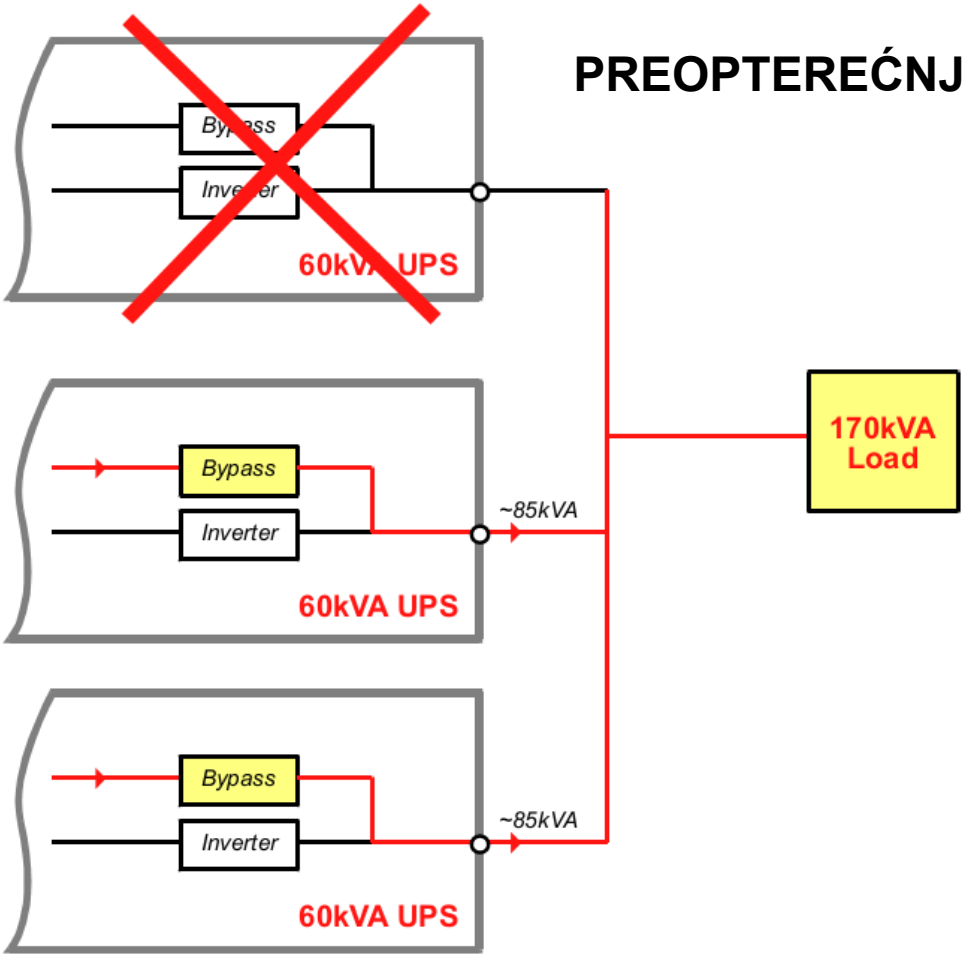
RAVNOMERNO DELJENJE OPTEREĆENJA



- Normalna podela opterećenja između UPS-eva, odnosno izlaznih invertora
- Šta se dešava kada jedan od invertora ispadne iz nekog razloga?
- Druga dva će raditi u preopterećenju!!
- Da li je to srećno rešenje?

57kVA+57kVA+57kVA=171kVA

NEMA PREOPTEREĆENJA!!



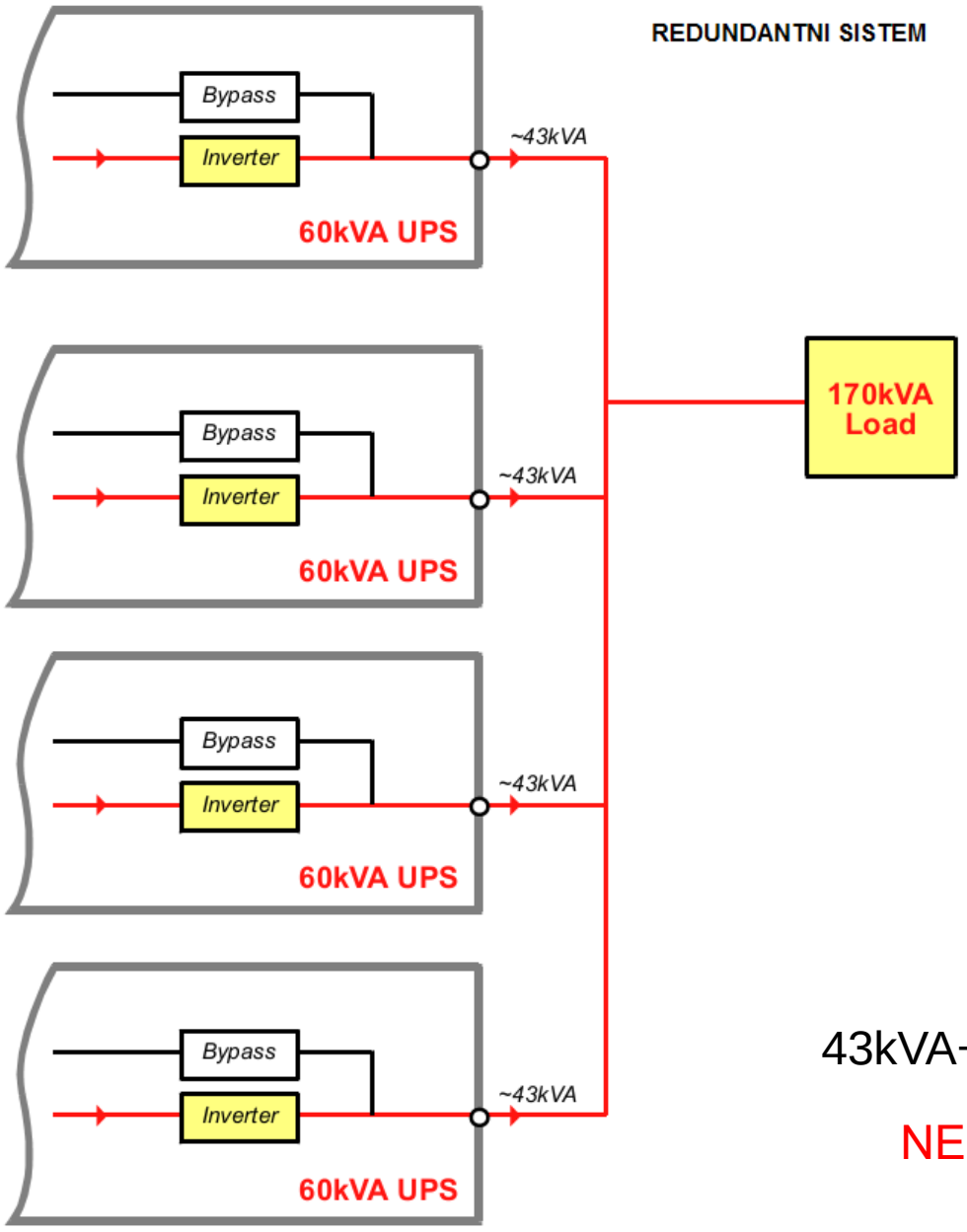
PREOPTEREĆNJE

- Rešenje je prebacivanje svih pojedinačnih napajanja na bajpas liniju, odnosno napajanje
- Invertorski izlazi za svako od napajanja su relaksirani
- Preostale dve jedinice ravnomerno dele opterećenje preko bajpas linije
- Kada se reši problem na invertoru koji je u kvaru ili koji je ispao iz pogona, odnosno kada sva tri modula sa stanovišta INVRTORA postanu ponovo pogonski spremni, sistem se prebacuje sa bajpas napajanja na invertorski sistem

85kVA+85kVA=170kVA

Obe jedinice su preopterećene 25% pošto su im nominalne snage po 60kVA

KAKO REŠITI PROBLEM PREOPTEREĆENJA?



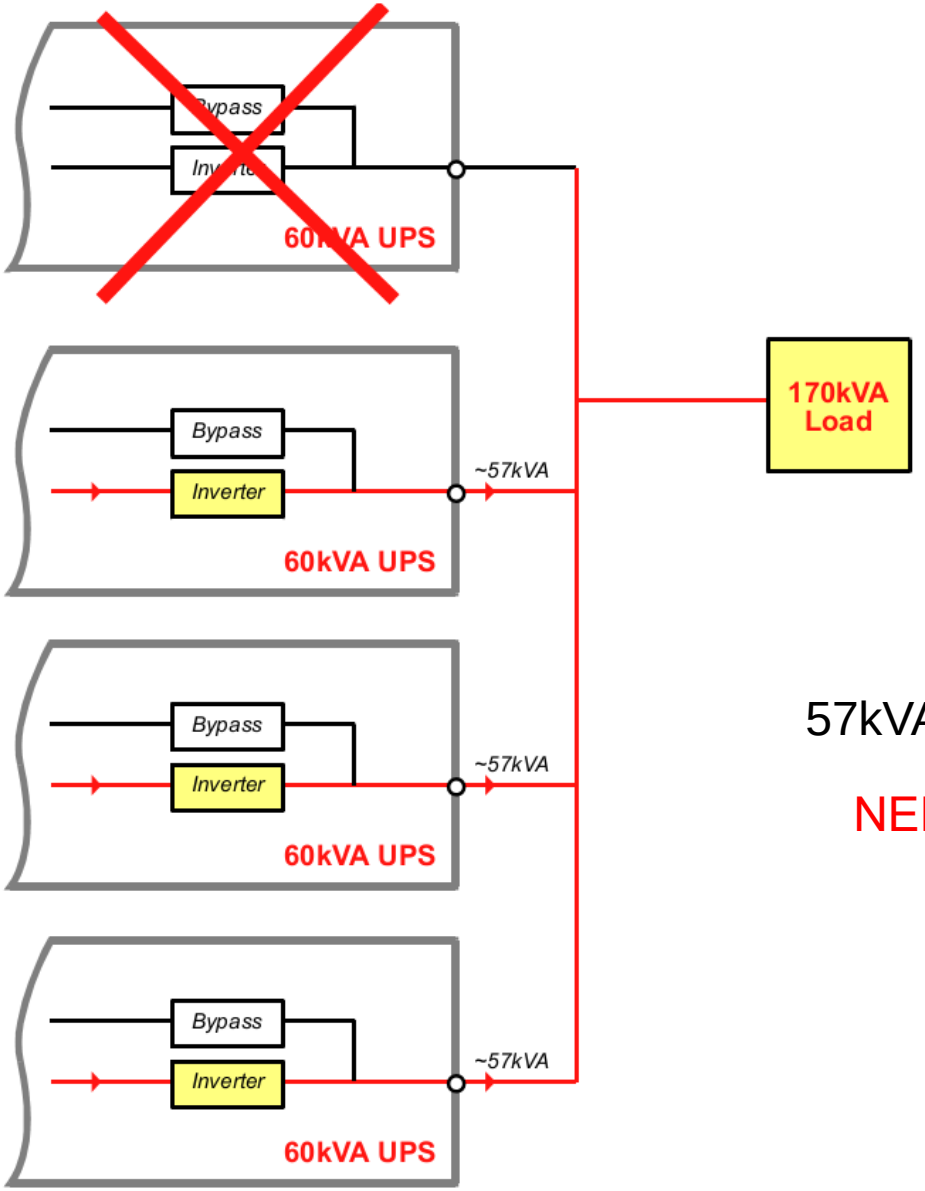
REDUNDANTNI SISTEM

- Jedno od rešenja PROBLEMA PREOPTEREĆENJA je korišćenje redundantnog sistem sa više izvora besprekodnog napajanja odnosno izlaznih invertora (3+1)
- Obično se dodaje još jedan koji bi pokrio uticaj preopterećenja
- Šta će se u ovom slučaju desiti kada dođe do preopterećenja?

43kVA+43kVA+43kVA+43kVA=172kVA

NEMA PREOPTEREĆENJA!!

REDUNANTNI SISTEM SA JEDNIM NEISPRAVNIM MODULOM



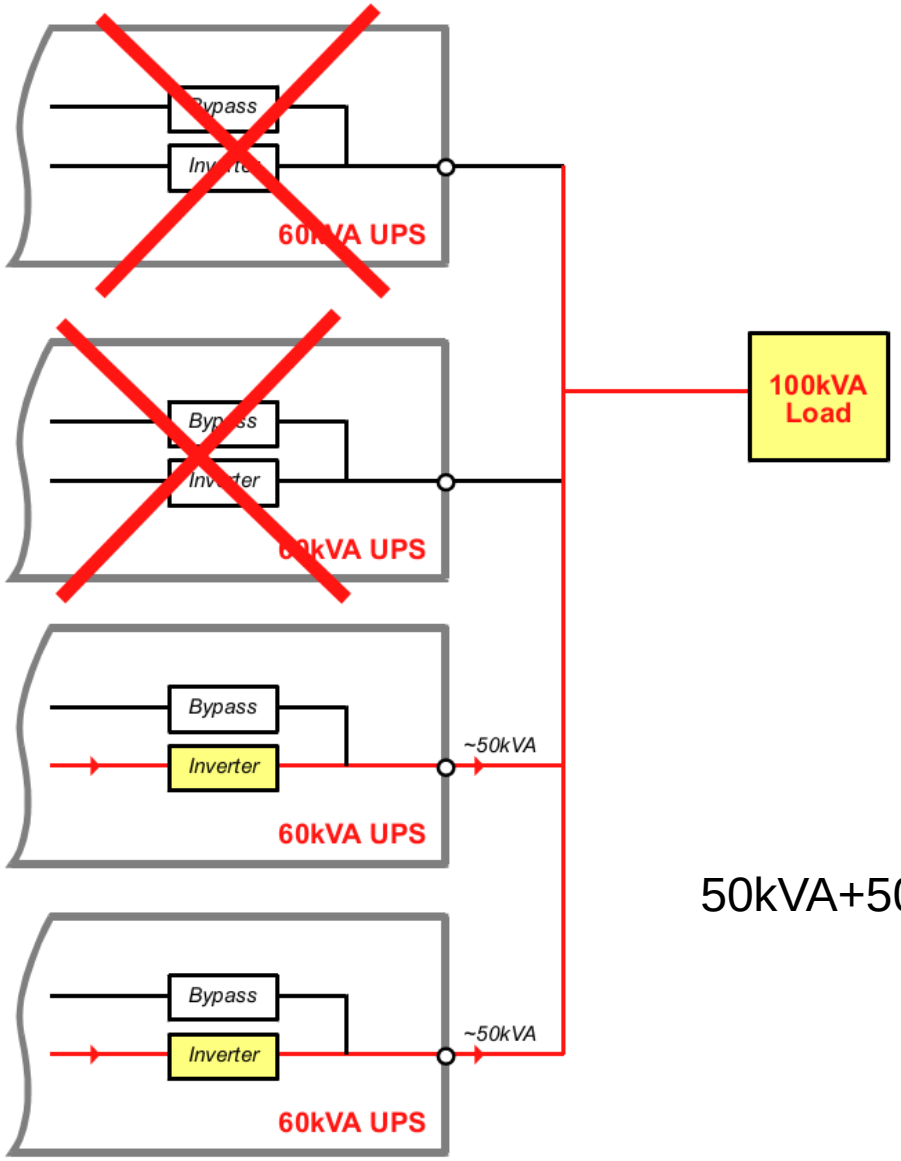
Kada u ovom redundatnom sistemu od četiri UPS-a, dođe do ispada jednog od njih, odnosno jednog invertorskog Izlaza, ostala tri dele ravnomerno opterećenje

Sada nema preopterećenja preostalih ispravnih modula

57kVA+57kVA+57kVA=171kVA

NEMA PREOPTEREĆENJA!!

REDUNANTNI SISTEM SA DVA NEISPRAVNA MODULA



Kada u ovom redundatnom sistemu
od četiri UPS-a, dođe do ispada dva od njih, odnosno dva invertorska izlaza, ostala dva dele
ravnomerno redukovano opterećenje od 100kVA

I u ovom slučaju nema preopterećenja preostalih ispravnih modula

50kVA+50KVA=100kVA

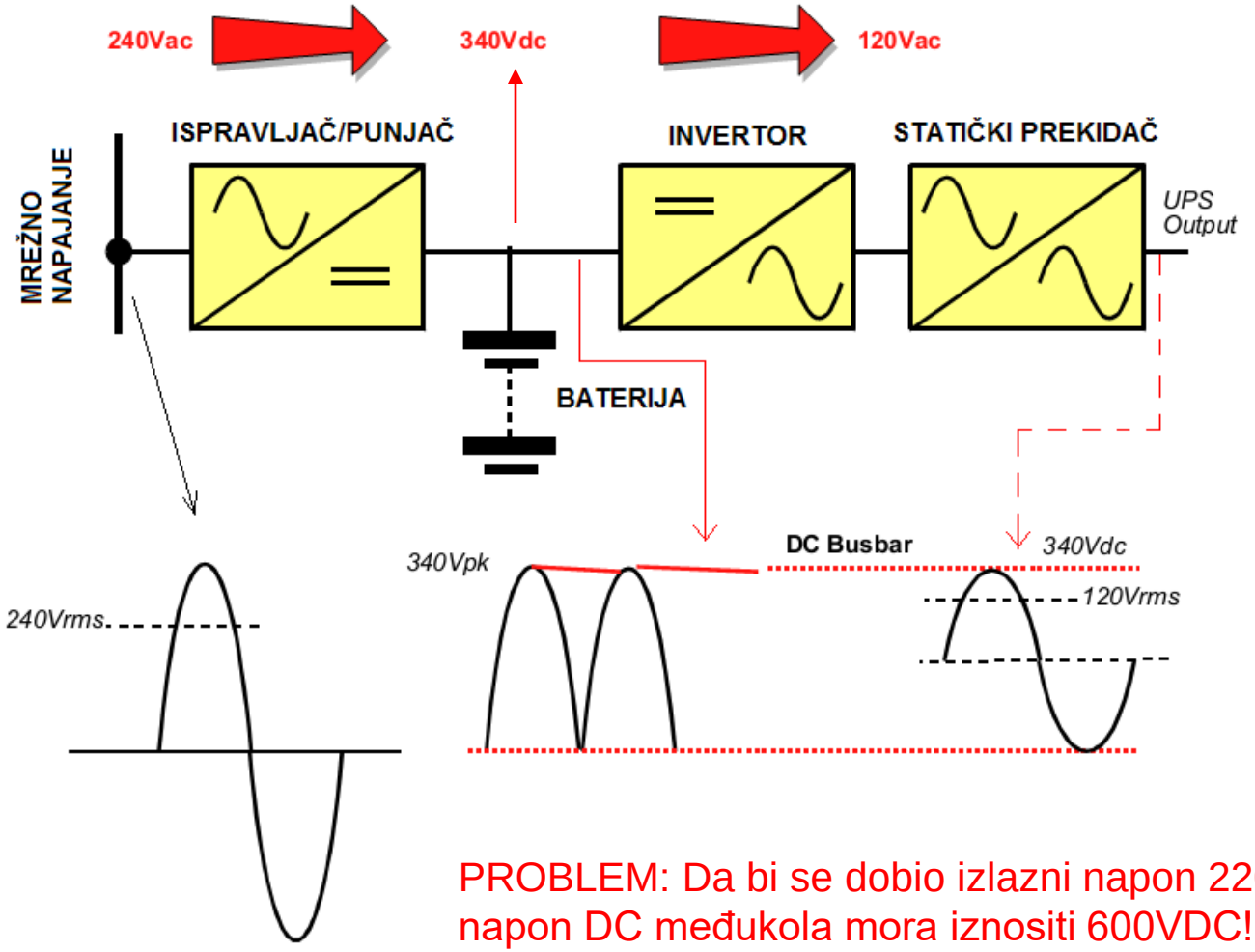
KOMPONENTE SISTEMA BESPREKOIDNOG NAPAJANJA

- ISPRAVLJAČ
- PUNJAČ
- BATERIJA
- INVERTOR
- STATIČKI PREKIDAČ

SISTEMI SA DVOSTRUKOM NAPONSKOM KONVERZIJOM

MONOFAZNI SISTEM 220/110V, 50Hz

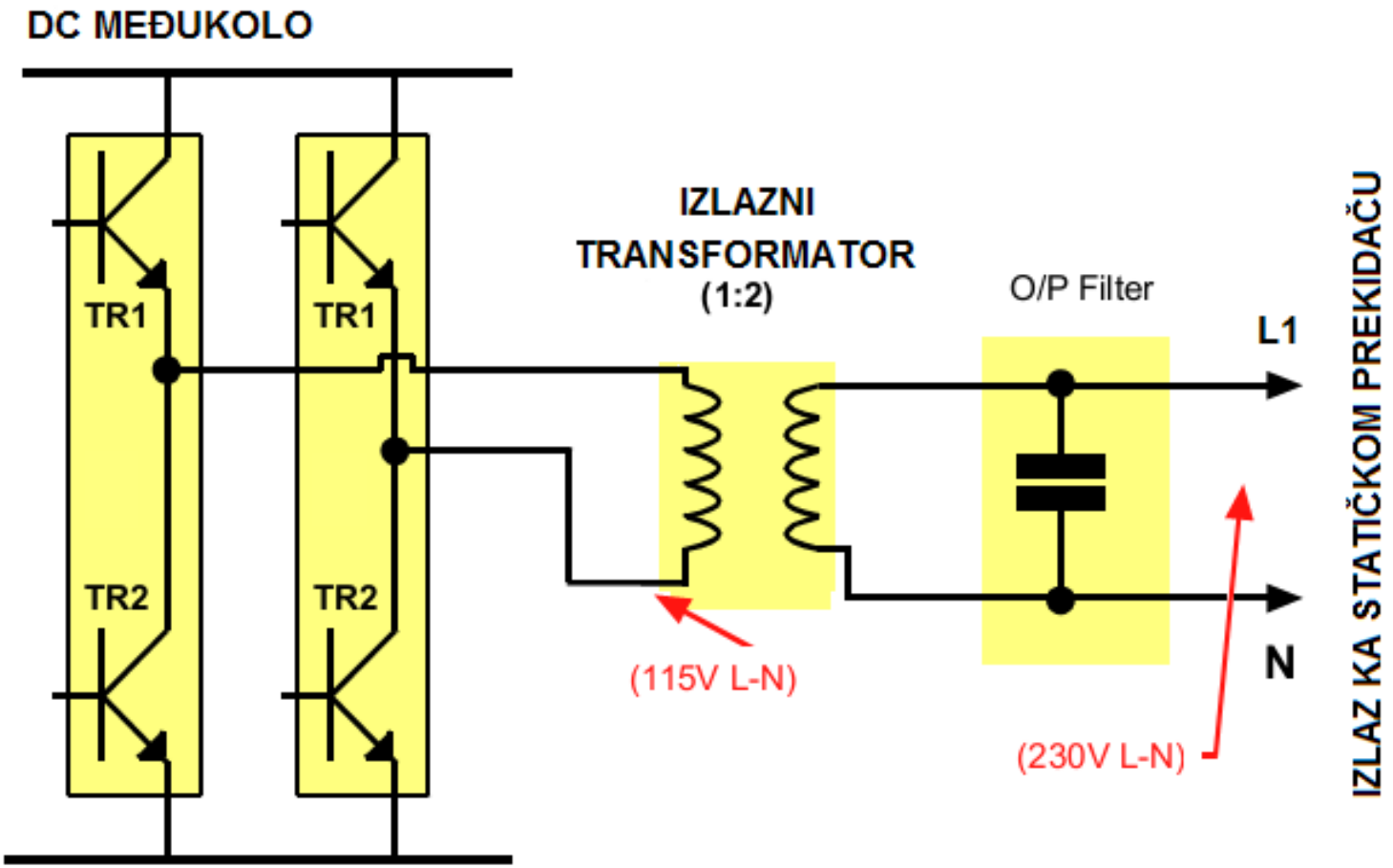
$$V_{bus} = \sqrt{2} \times V_{mains} \qquad V_{out} = \frac{V_{bus}}{2\sqrt{2}}$$



PROBLEM: Da bi se dobio izlazni napon 220V,50Hz napon DC međukola mora iznositi 600VDC!!!!
KAKO REŠITI OVAJ PROBLEM?

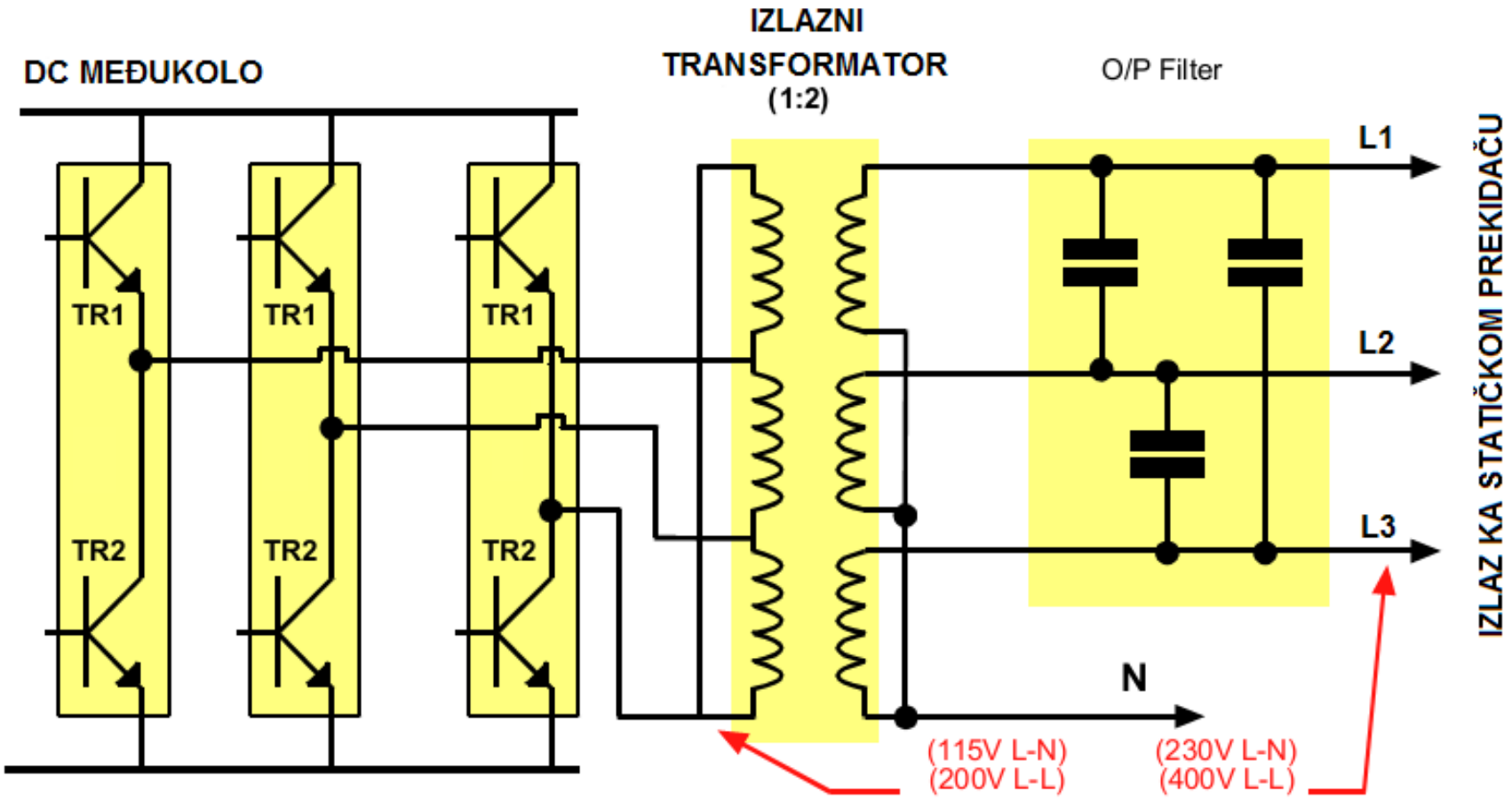
TRADICIONALNO REŠENJE- MONOFAZNI TRANSFORMATOR PODIZAČ NAPONA

Za monofazne potrošače

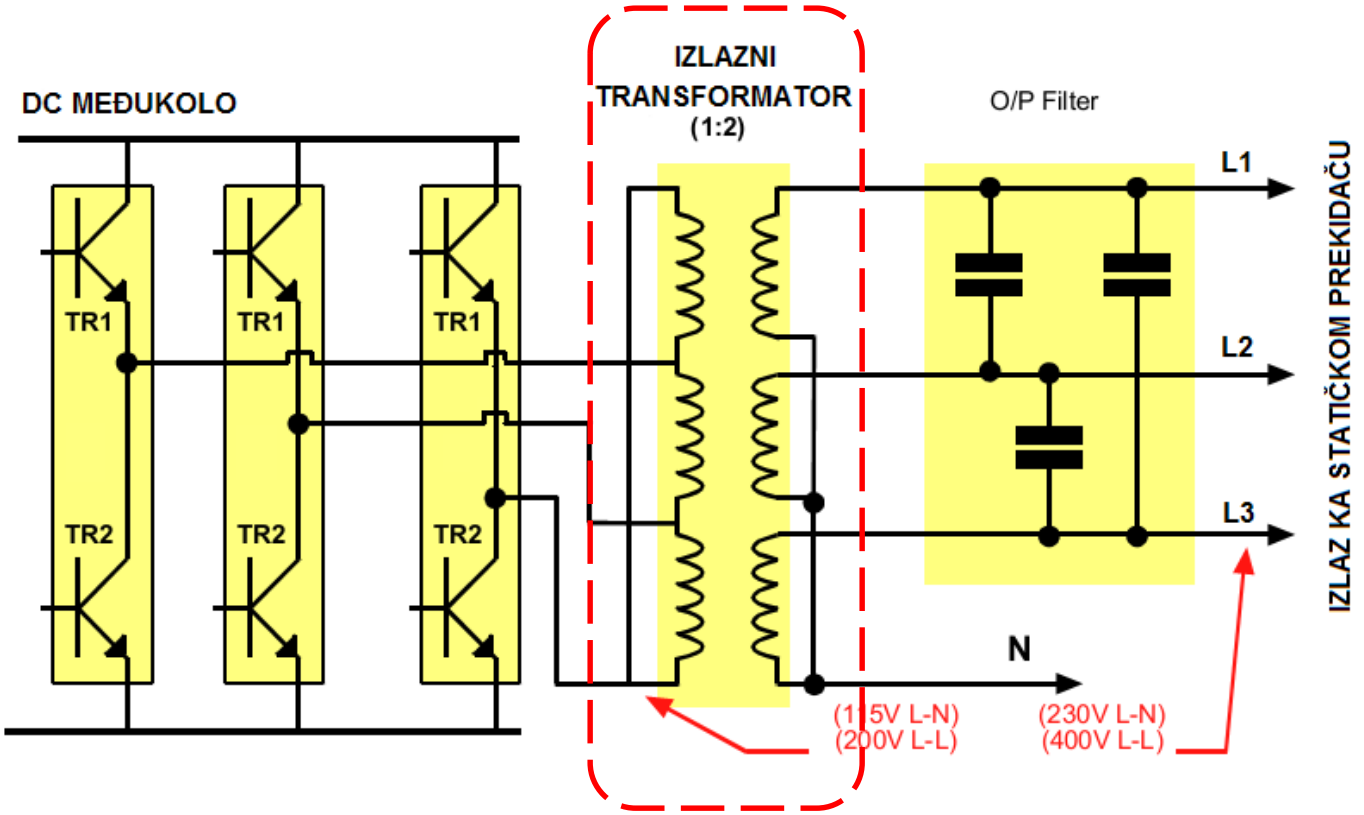


TRADICIONALNO REŠENJE- TROFAZNI TRANSFORMATOR PODIZAČ NAPONA

Za trofazne potrošače



Zapaziti!!!
Koja je sprega transformatora?



sprega transformatora: Δ-Y

-Izlazni transformator obezbeđuje galvansku izolaciju
-Sprega "Y"na sekundaru obezbeđuje pristupačnu neutralnu tačku
-Ova neutralna tačka se spaja na neutralnu tačku bajpas napajanja
-Ovim je obezbeđena zajednička referenca između dva izvora napajanja
-Izlazni filtar O/P u kombinaciji sa sekundarom transformatora (induktivni namotaj) potiskuje više harmonike struje i napona na izlazu, dajući čist sinusni izlaz

BATERIJSKI NAPON –DC međukolo (busbar)

- Pravilo koje važi za baterije, a koje se odnosi na napon po jednoj ćeliji: kada je baterija napunjena (preko ulaznog ispravljača) napon po ćeliji iznosi 2.25V, dozvoljeni napon pražnjenja (kada je invertorski stepen isprazni) takođe po jednoj ćeliji je reda veličine 1.65V
- Pomenuti pragovi napona variraju zavisno od tipa baterija ali i od proizvođača baterija
- U tipičnom UPS sistemu ovaj napon će varirati do 30% kada je baterija u normalnom radu
- Donja granica napona pri kraju pražnjenja baterije će biti ograničena izlaznim naponom invertora
- Razmotrimo jedan primer iz prakse

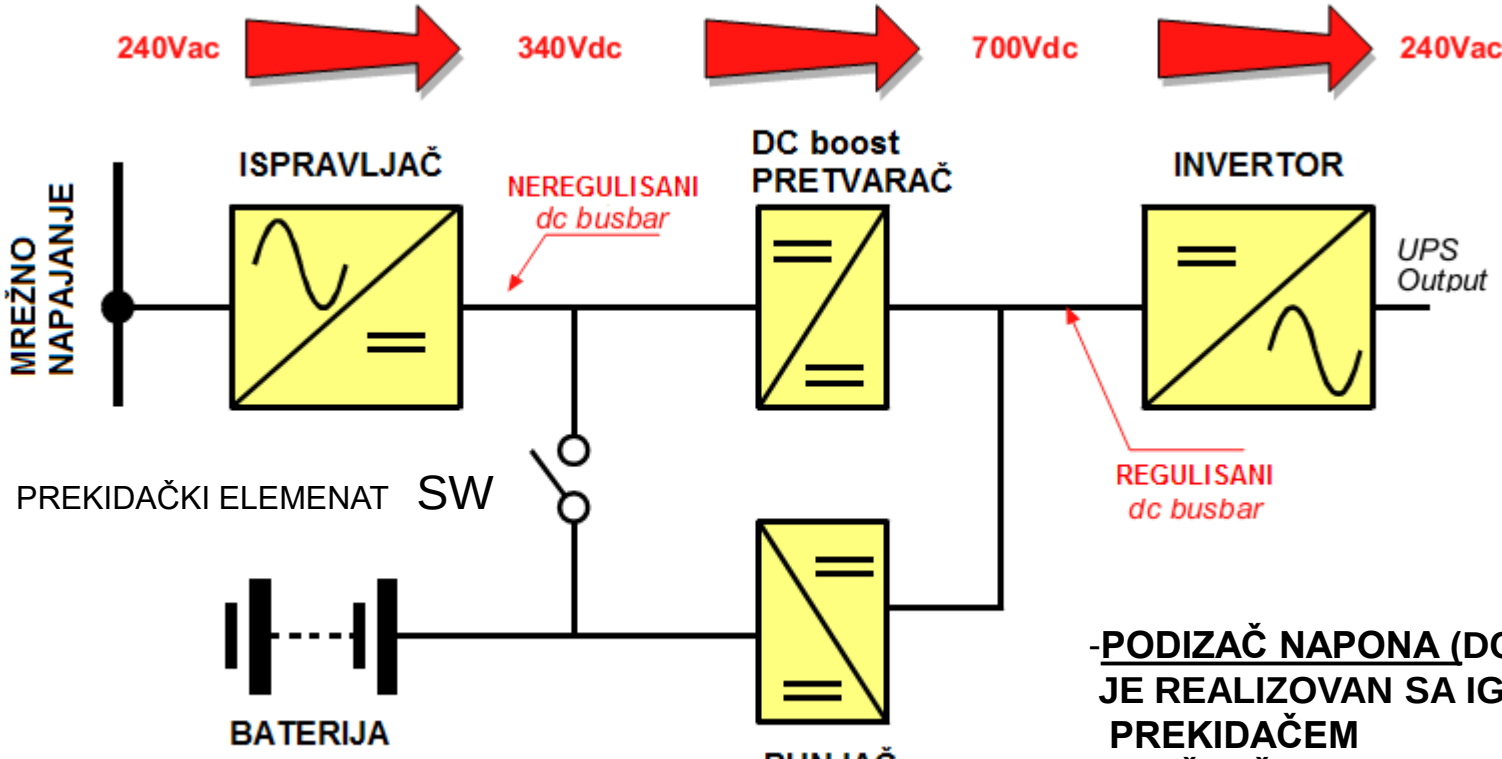
PRIMER: Napon DC međukola

- U većini praktičnih UPS sistema napon DC međukola je tipično 325Vdc
- Ovaj napon treba obezbediti kada su pojedinačne ćelije na donjoj granici ispražnjenosti, odnosno kada im je napon 1.65V/ćeliji
- Dakle broj potrebnih ćelija je 325V/1.65V/ć=197 ćelija
- Za ovih 197 ćelija napon DC međukola pri stepenu napunjenosti 100% (kada je napon po ćeliji jednak približno 2.25V) je jednak 197·2.25V=443Vdc
- Ako je ulazno napajanje trofazno 3x400V, 50Hz i ako se napon DC međukola dobija preko trofaznog diodnog ispravljača, tada je napon DC međukola približno jednak 560Vdc.
- Ovaj napon od 560Vdc je nestabilisan i neregulisan, ali je i mnogo veći od potrebnog napona 443Vdc i može dovesti do prepunjavanja baterijske banke, pa čak i do njenog trajnog uništenja
- Da bi se ovaj problem izbegao potrebno je kontrolisati punjenje, odnosno stabilisati napon i struju punjenja baterije
- Ovo se rešava kontrolisanim ispravljačima tranzistorskim i tiristorskim
- Kola koja su neobično popularna i koja se standardno koriste jesu monofazni ili trofazni tiristorski ispravljači
- Ova kola obezbeđuju stabilan i kontrolisan napon DC međukola od 445Vdc

REGULACIJA IZLAZNOG NAPONA INVERTORA

- Obzirom da se napon DC međukola menja u opsegu 325Vdc (ispražnjena baterija) do 445V (napunjena baterija), a da izlazni napon invertora mora ostati u dozvoljenom opsegu 115V±10%, potrebno je korektno u upravljačkom algoritmu invertora kompenzovati ovaj uticaj
- Povećanje broja baterija i podizanje napona DC međukola nije najsrećnije rešenje
- Jedan od najprihvatljivijih načina da se reši ovaj problem je primena širinsko-impulsne modulacije u upravljačkom algoritmu invertora
- **PWM (Pulse Width Modulation)** algoritam će biti opisan kasnije

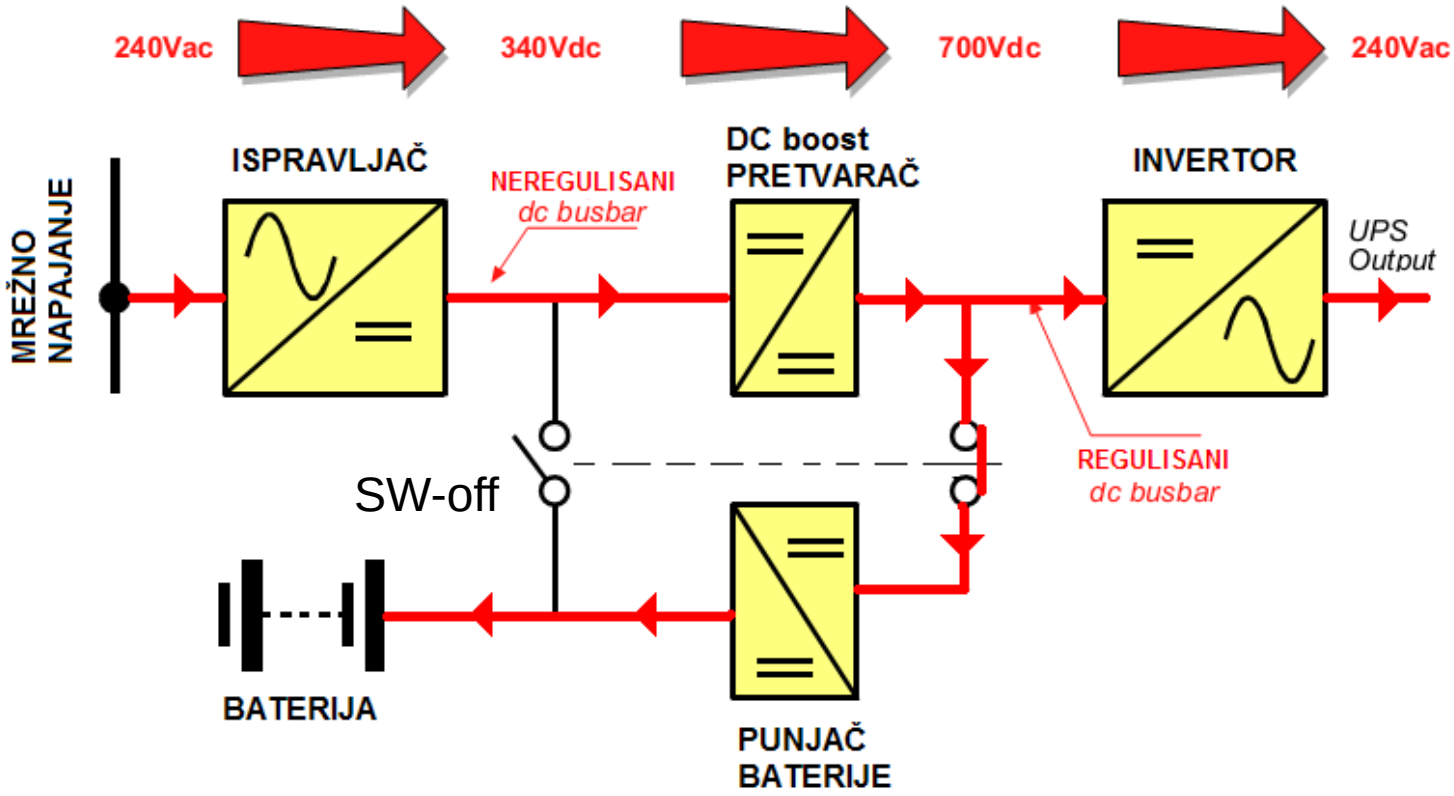
PODIZANJE ULAZNOG DC NAPONA INVERTORA BEZ TRANSFORMATORA



-**PODIZAČ NAPONA (DC boost) JE REALIZOVAN SA IGBT PREKIDAČEM**

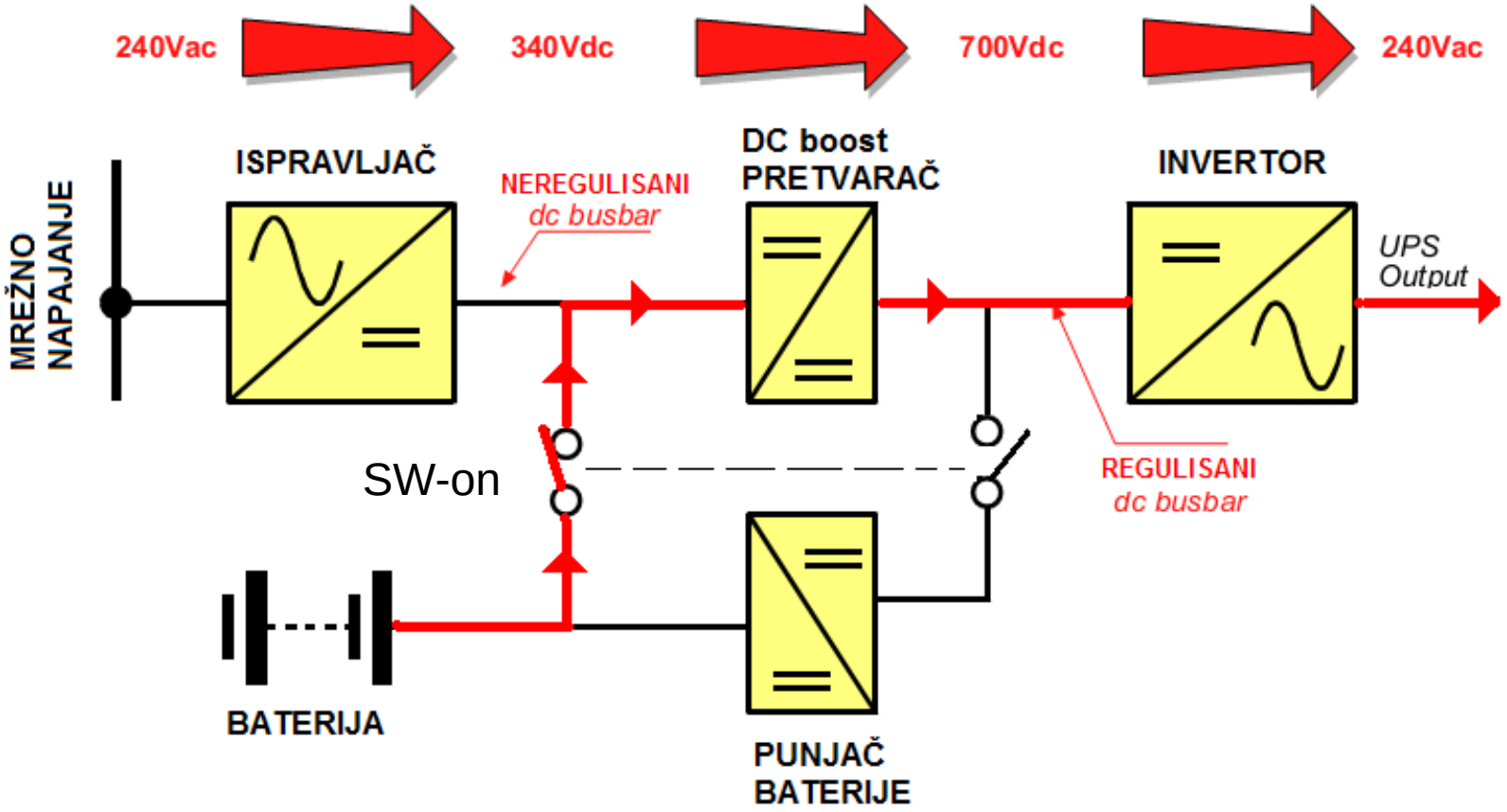
-**SPUŠTAČ NAPONA JE REALIZOVAN SA DC/DC PRETVARAČEM (PUNJAČ BATERIJE)**

NORMALI REŽIM



-Normalni režim se ima kada je prisutno mrežno napajanje
-Prekidač SW je isključen
-Preko ispravljača se dobija neregulisano DC napajanje
-DC/DC podizačem napona (DC boost) se dobija regulisani DC napon invertora, a preko njega stabilan AC izlaz (UPS out)
-Iz DC regulisanog napona peko DC/DC spuštača napona (punjača) se ostvaruje punjenje baterijske banke (stabilnim naponom bez talasnosti)

ISPAD MREŽNOG NAPAJANJA



-Sada je baterija vezana na neregulisani DC bus i preko podizača napona obezbeđuje regulisani DC napon invertora, odnosno preko njega i AC izlaz ka potrošačima

-Prekidač SW je uključen

-Punjač baterije je isključen

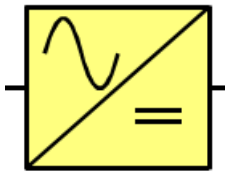
PREDNOSTI TOPOLOGIJE SA PODIZAČEM U DC MEĐUKOLU

- **U ODNOSU NA REŠENJE BESPREKIDNOG NAPAJANJA SA TRANSFORMATOROM PODIZAČEM (N1/N2=1:2) TOPOLOGIJA SA DC/DC PRETVARAČEM- PODIZAČEM NAPONA NUDI NIZ PREDNOSTI:**

  - EFIKSANIJA JE
  - JEFTINIJA JE
  - LAKŠA ZA MANIPULACIJU I RUKOVANJE
  - FLEKSIBILNIJA U POGLEDU PLANIRANJA
  - REDUKUJE GENERISANJE HARMONIKA U NAPOJNU MREŽU
  - POSEBNOM TEHNIKOM JE OMOGUĆENA KOREKCIJA FAKTORA SNAGE

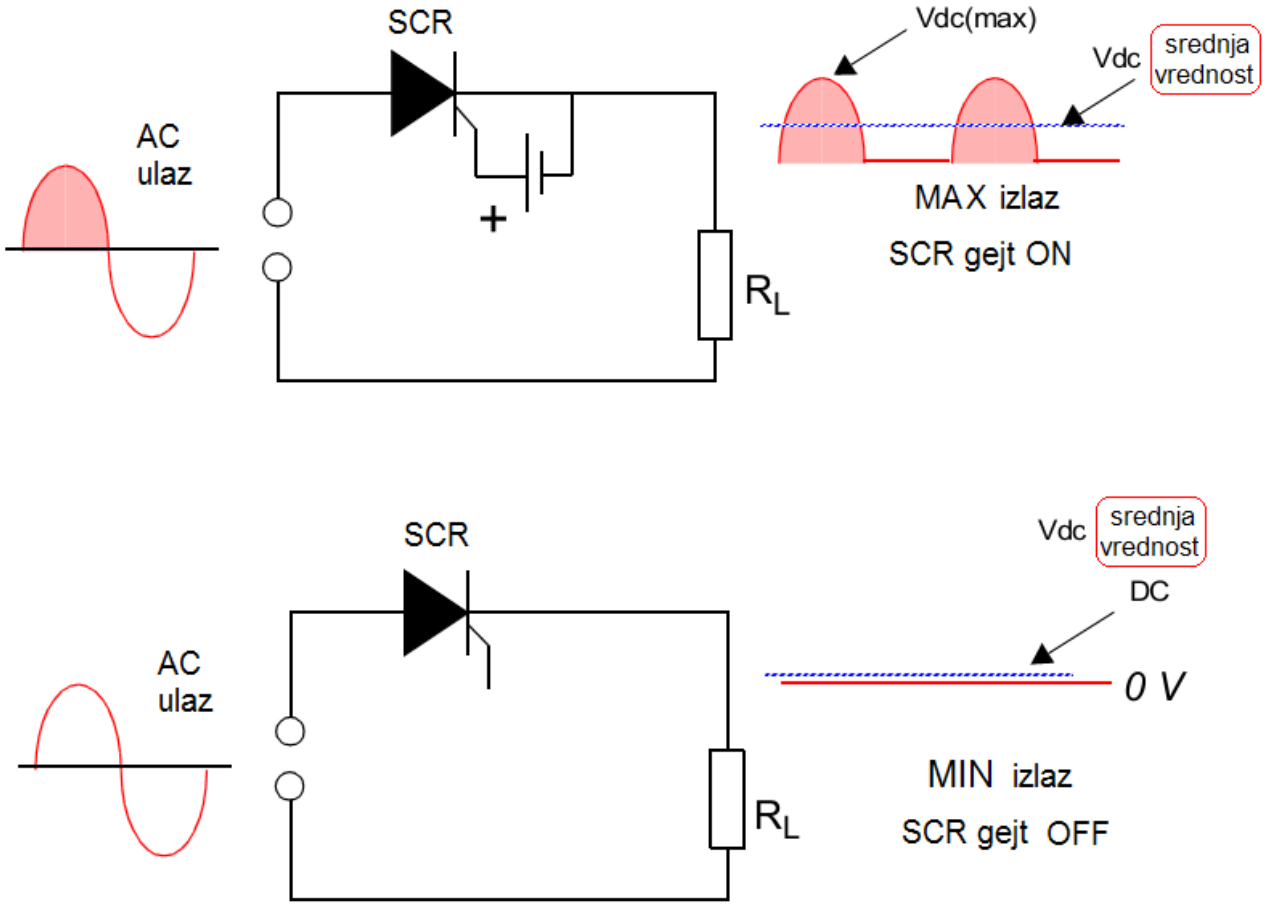
  -OVO POSLEDNJE DOVODI DO SMANJENJA OPERETIVNIH TROŠKOVA

ISPRAVLJAČKI BLOK U SISTEMU BESPREKIDNOG NAPAJANJA

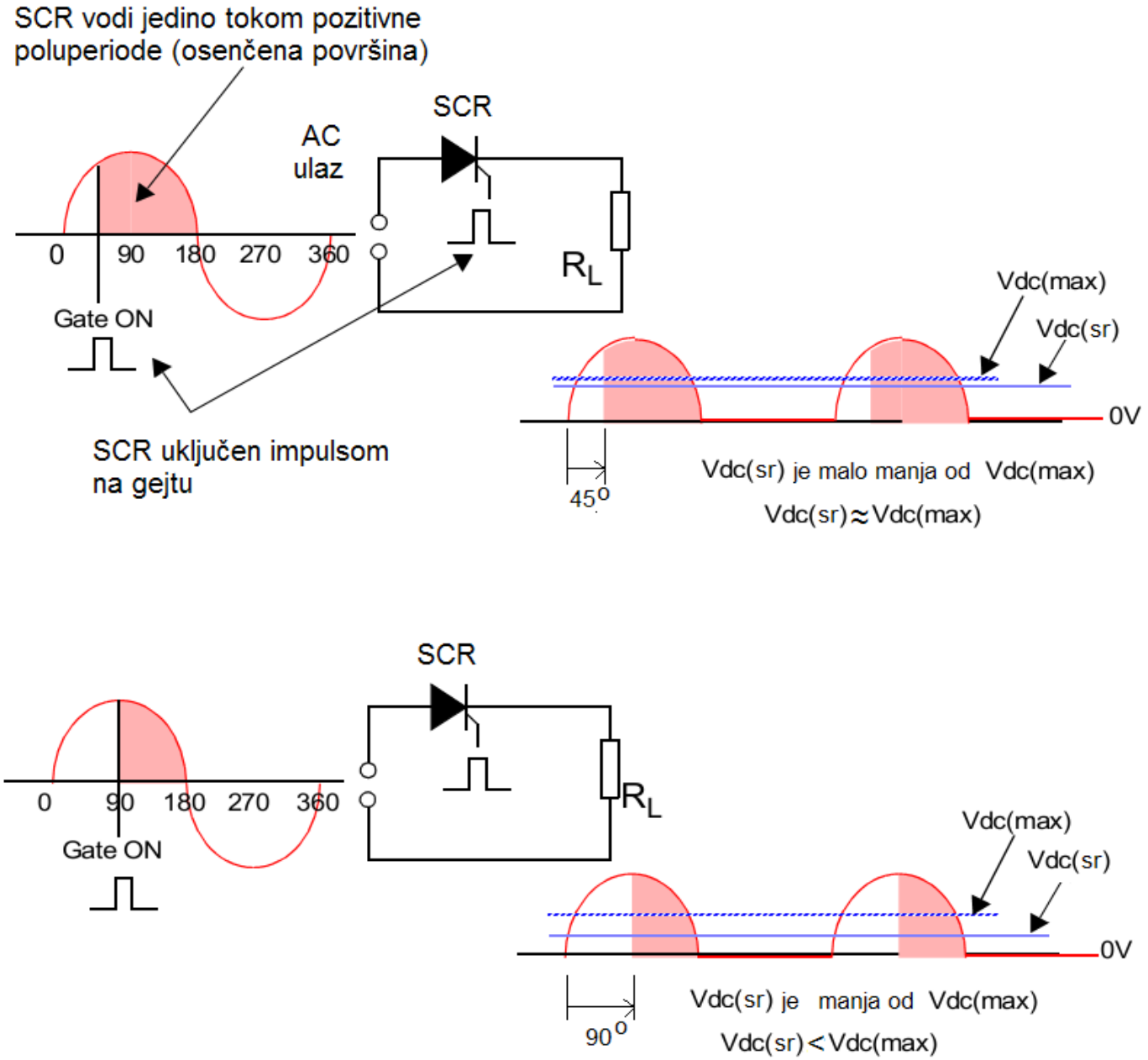


- Ispravljački blok ima zadatak da obezbedi DC regulisano napajanje (DC regulisanu sabirnicu)
- Korišćenje transformatora podizača napona podrazumeva korišćenje tiristorski fazno kontrolisanih ispravljača (**PRINCIP FAZNE KONTROLE**)
- Korišćenje novog dizajna DC regulisanog napajanja bez transformatora podrazumeva korišćenje DC/DC prekidačkog **pretvarača-podizača napona (boost)**
- U ovom delu će biti ukratko opisani principi tiristorski fazno kontrolisanih i tranzistorskih prekidačkih pretvarača za obezbeđenje DC regulisanog napajanja u sistemu besprekidnog napajanja

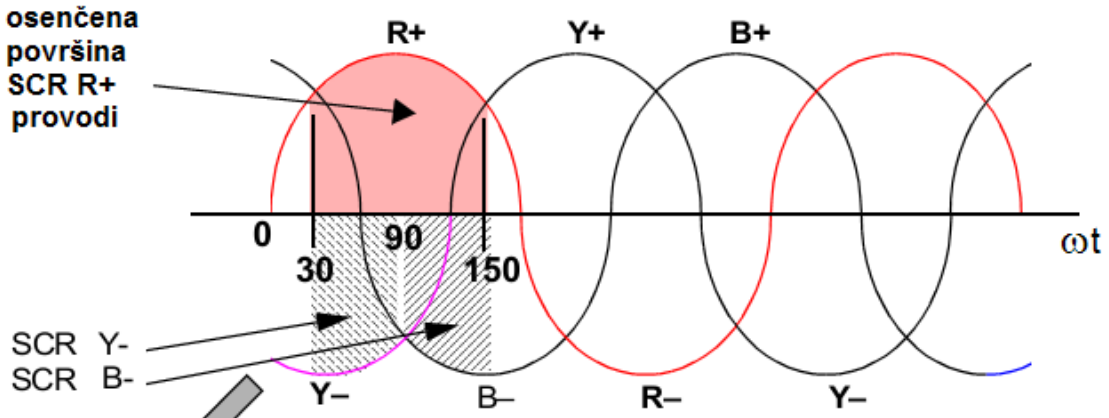
OSNOVNI PRINCIP RADA TIRISTORA KAO KONTROLISNOG PREKIDAČA

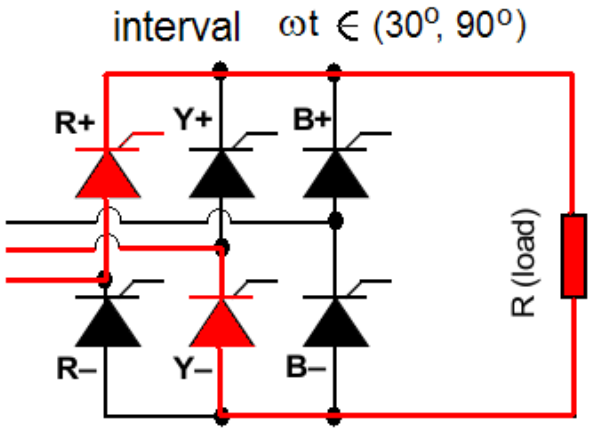


OSNOVNI PRINCIP FAZNE KONTROLE

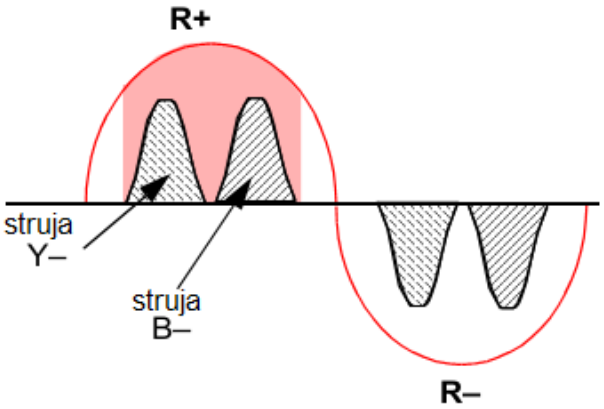


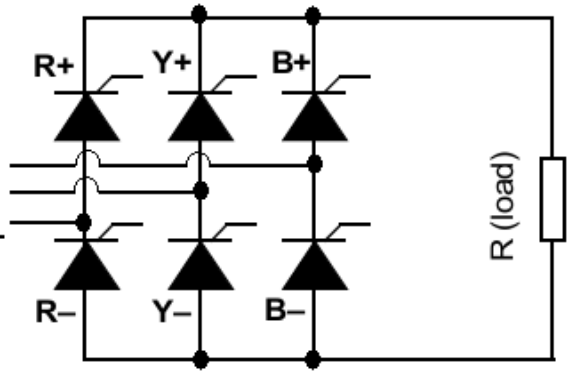
OSNOVNI PRINCIP 6-PULSNOG FAZNO KONTROLISANOG ISPRAVLJAČA

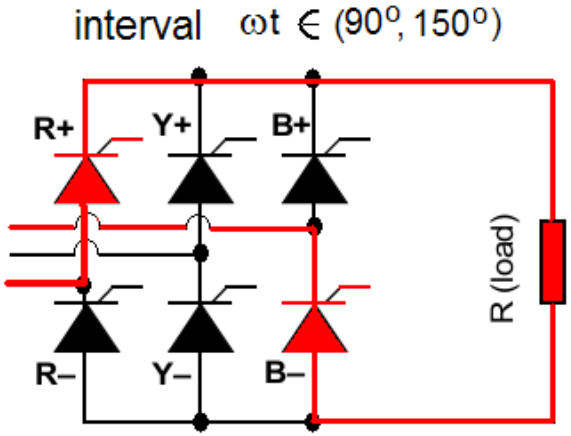




ANODNA GRUPA TIRISTORA: R+,Y+,B+
KATODNA GRUPA TIRISTORA: R- ,Y-, B-

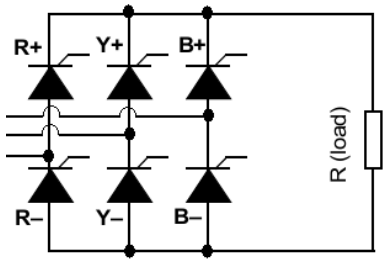


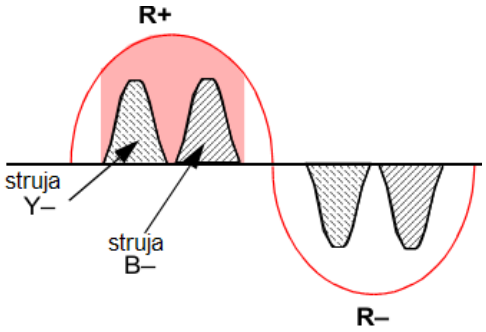


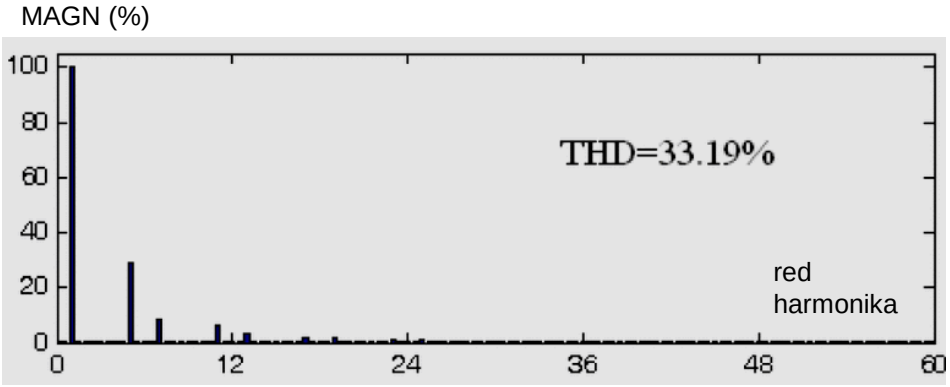


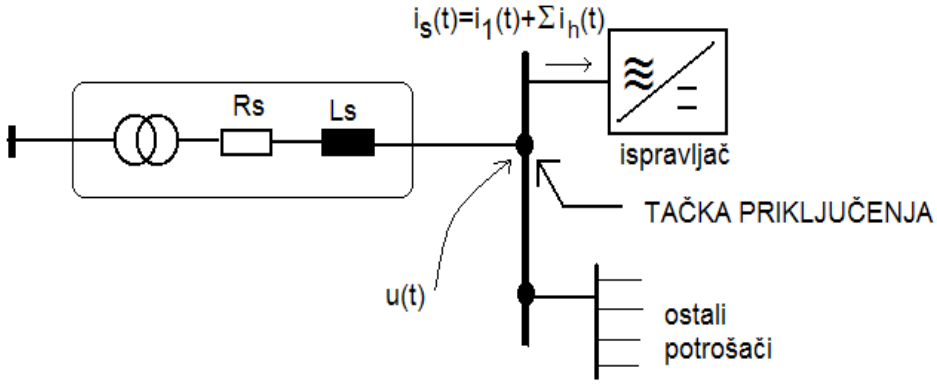
UVEK VODI TIRISTOR SA NAJPOZITIVNIJOM ANODOM U ANODNOJ GRUPI I TIRISTOR SA NAJNEGATIVNIJOM KATODOM U KATODNOJ GRUPI !!!!

UTICAJ ISPRAVLJAČA NA MREŽU









-U toku pozitivne poluperiode napona faze R imamo dva prekidna strujna impulsa koji su posledica provođenja tiristora R- i B- u ostale dve faze

-Pored osnovnog harmonika 50Hz imamo i više harmonike struje

-Osnovna komponenta 50Hz je u fazi sa naponom

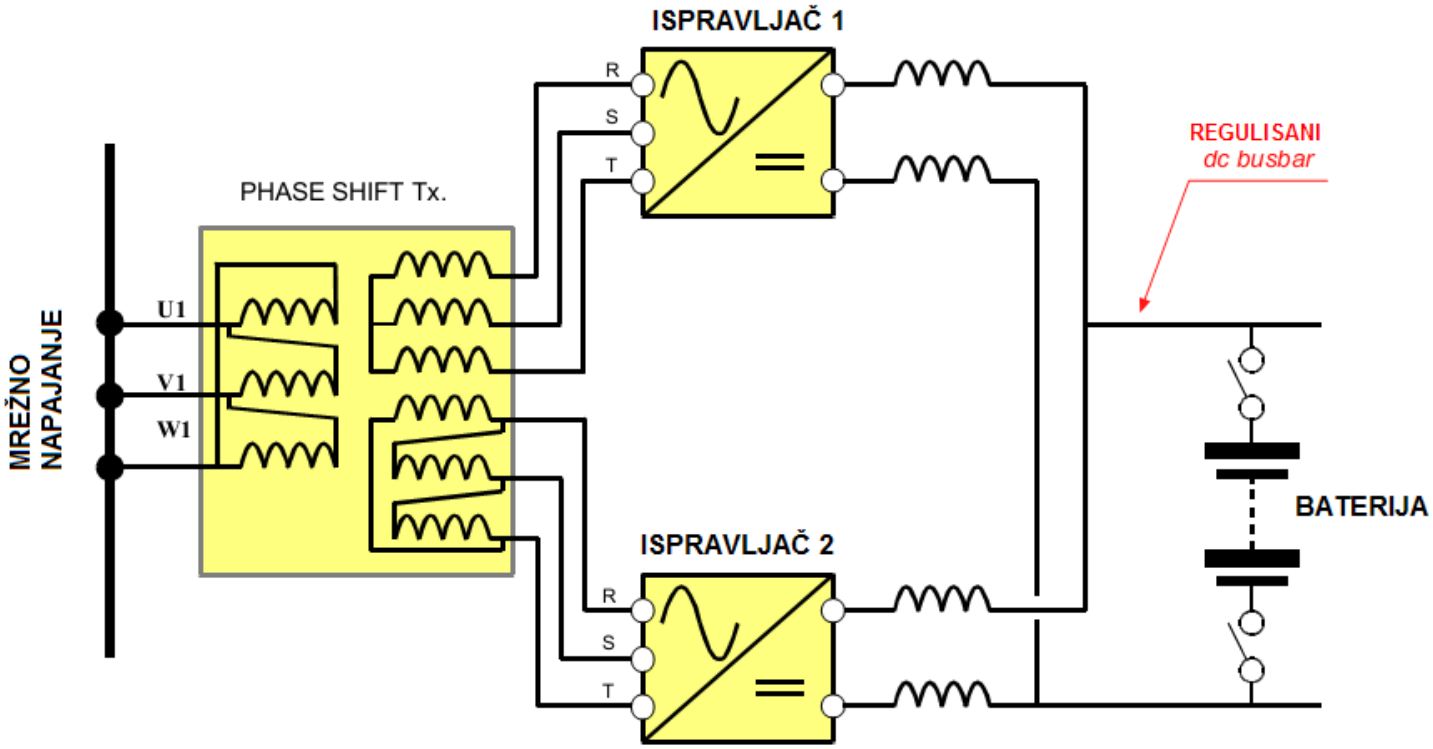
-Ostale više harmonijske komponente nisu u fazi sa naponom i prouzrokuju reaktivne VA odnosno VAr (reaktivnu snagu)

-Ovi harmonici struje u interakciji sa mrežnom impedansom dovode do izobličenja linijskog napona

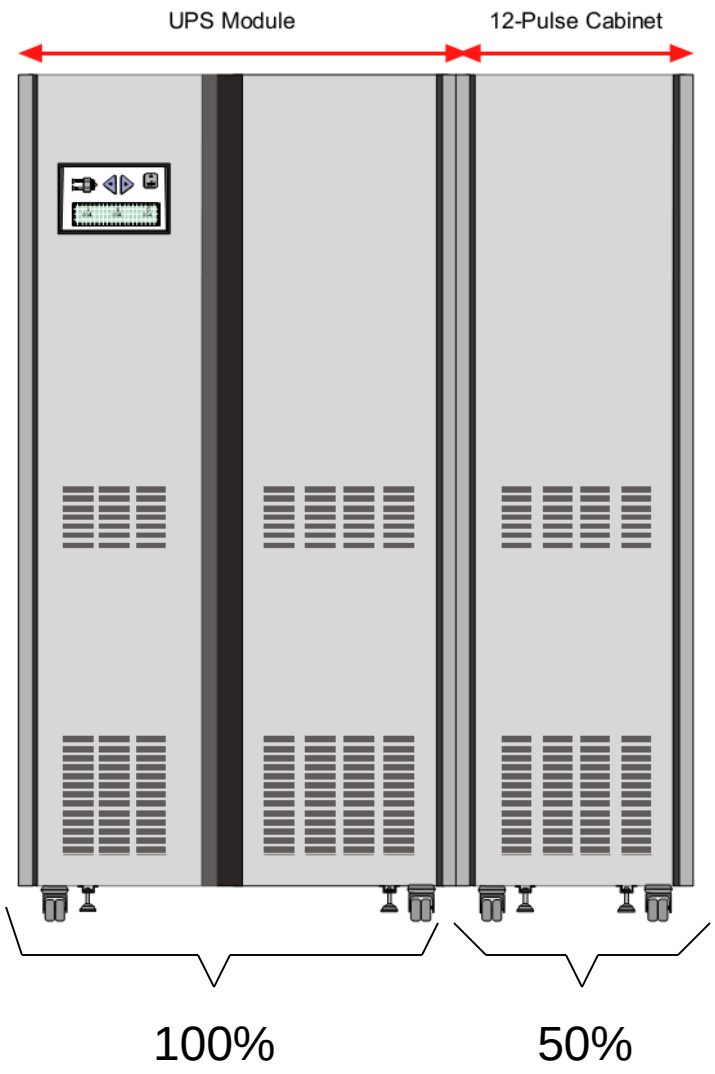
-Ovi harmonici takođe dovode do smanjena celokupnog faktora snage UPS sistema (gledano sa ulaznih priključaka), povećavaju ukupno opterećenje u odnosu na mrežu i dovode do dodatnih gubitaka

-Niska impedansa izvora napajanja će smanjiti naponsku distorziju ali neće delovati na izvorni problem

12-pulsni ispravljač



- **Problemi sa *6-pulsnim* ispravljačem se mogu rešiti korišćenjem tro-namotajnog transformatora i dva trofazna *6-pulsna* ispravljača koji rade sa međusobnim faznim pomerajem od 30°(*12 pulsni ispravljački sistem)***
- **Fazni pomeraj je ostvaren preko odgovarajućeg tro-namotajnog transformatora**
- **Izlazi ispravljača su vezani preko značajnih magnetnih prigušnica koje "peglaju" struju opterećenja i olakšavaju razmenu struja**
- **U ovom slučaju *12-pulsnog* ispravljača je THD reda veličine 10% što je značajno bolje u odnosu na klasični 6-pulsni ispravljač**



-Za 12-pulsni ispravljač i dodatnu opremu (tronamotajni transformator, izlazni filtar,...) veličina a prema tome i cena mogu da budu značajne, pogotovu kada se radi o sistemima besprekidnih napajanja većih snaga

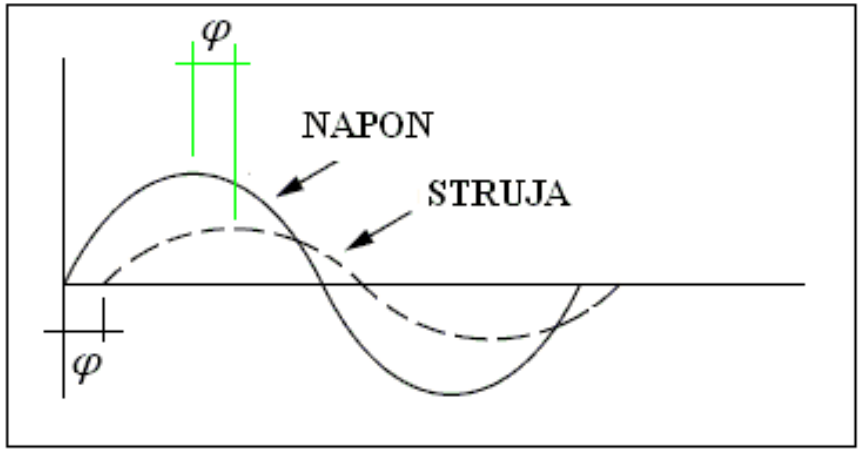
-Ispravljač i dodatna oprema će zahtevati
dodatni energetski orman koji će zauzeti za ko 50% više prostora od energetskog ormana samog UPS-a

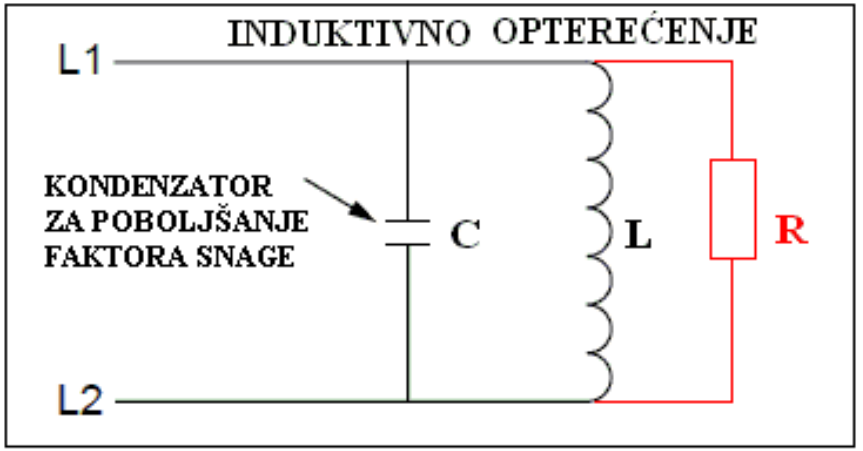
-OVO NE SAMO DA UTIČE NA UKUPNE TROŠKOVE VEĆ I POVEĆAVA DIMENZIJE CELOKUPNOG SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA ČIME SE OZBILJNO NARUŠAVA FLEKSIBILNOST INSTALACIJE !!!!

POBOLJŠANJE ULAZNOG FAKTORA SNAGE

- Kod fazno kontrolisanih ispravljača ulazna struja progresivno zaostaje za ulaznim naponom kako se ugao vođenja (trajanje struje) u ispravljaču smanjuje
- Ovo dovodi do redukcije DC izlaznog napona
- Ulazni faktor snage je dakle znatno manji od 1 kako se ugao vođenja u ispravljaču smanjuje
- Harmonici koji se generišu takođe dodatno doprinose veoma niskom faktoru snage
- Tipičan kontrolisani 6-pulsni ispravljač će imati faktor snage oko 0.8 kada radi pri punom opterećenju i puni bateriju
- Kada se koristi 12-pulsni ispravljač, koji smanjuje ulazni THD na 10%, će imati bolji faktor snage i on će iznositi tipično 0.86.
- KAO REŠENJE POBOLJŠANJA FAKTORA SNAGE (a težnja je da on bude što bliži 1) SE NAMEĆE AKTIVNA KOREKCIJA FAKTORA SNAGE

ŠTA JE FAKTOR SNAGE???





Prividna snaga $S=UI$

Aktivna snaga $P=S\cos\varphi$

Reaktivna snaga $Q=S\sin\varphi$

FAKTOR SNAGE λ

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \longrightarrow$$

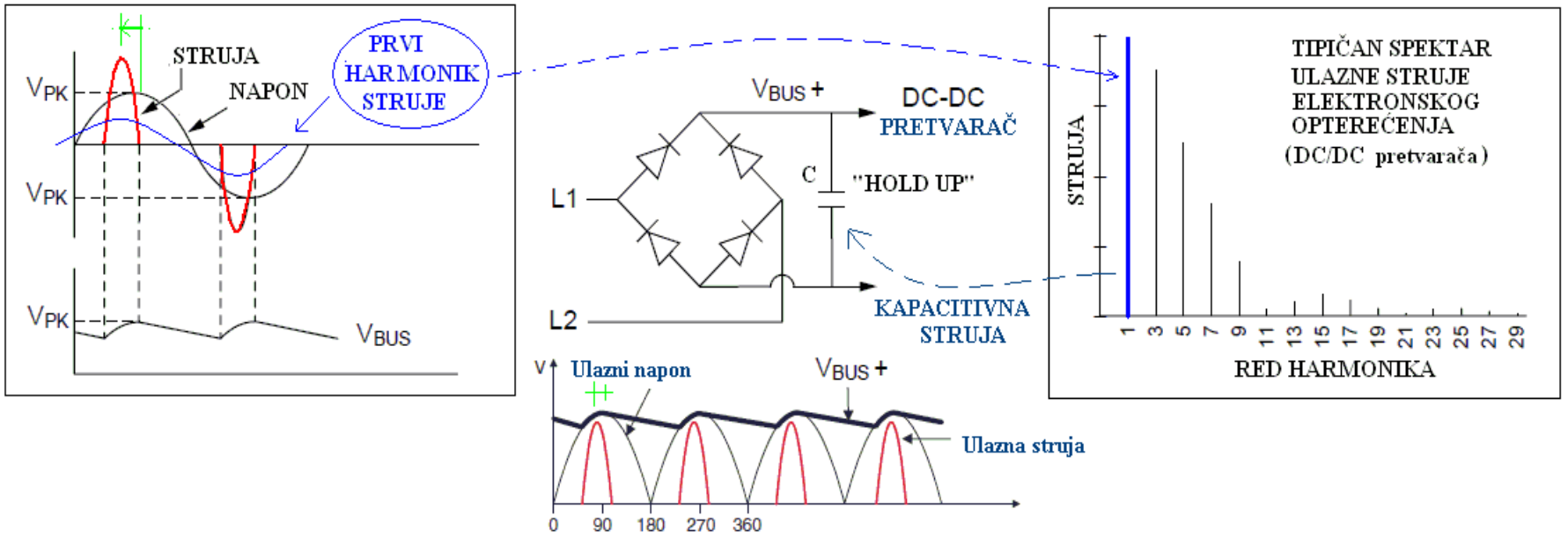
L1-L2
IMPEDANSA
$\underline{Z} = R$

$$\frac{P=\cancel{U}I_1\cos\varphi}{S=\cancel{U}I} \longrightarrow \lambda = \frac{P}{S} = \frac{I_1}{I}\cos\varphi \qquad \frac{I_1}{I}=1 \longrightarrow \lambda = \cos\varphi$$

Power Factor Correction-PFC

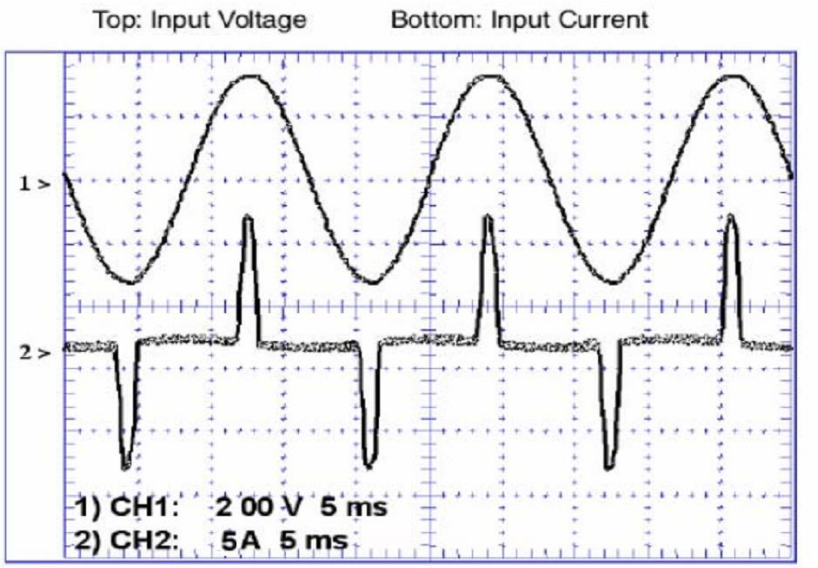
KOREKCIJA FAKTORA SNAGE

UTICAJ DIODNOG ISPRAVLJAČA NA MREŽU ☹☹

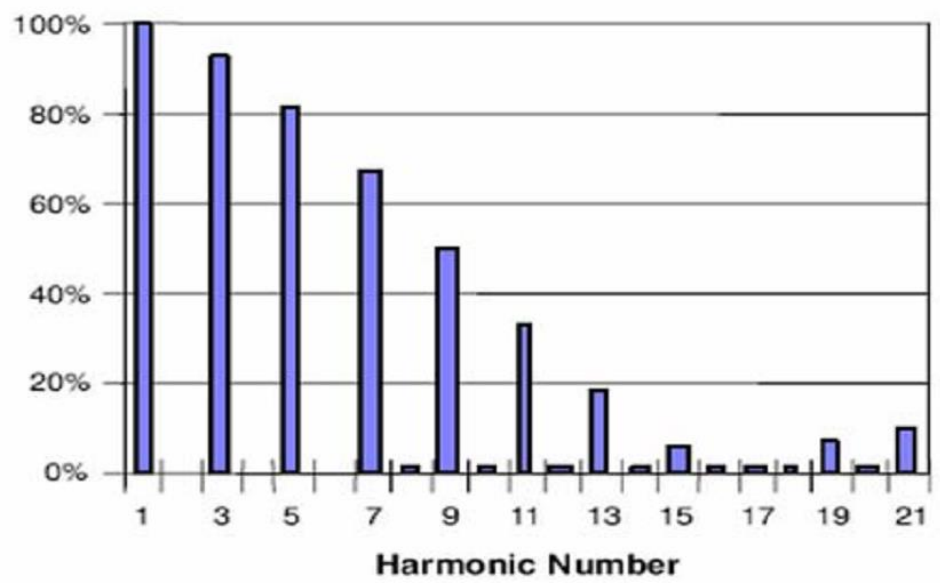


- OŠTRI IMPULSI STRUJE
- TRAJANJE IMPULSA 1ms-2ms
- KAPACITIVNA STRUJA
- VIŠI HARMONICI

REALAN SNIMAK STRUJE I NAPONA JEDNOG DIODNOG ISPRAVLJAČA



OCILOSKOPSKI SNIMAK



SADRŽAJ HARMONIKA

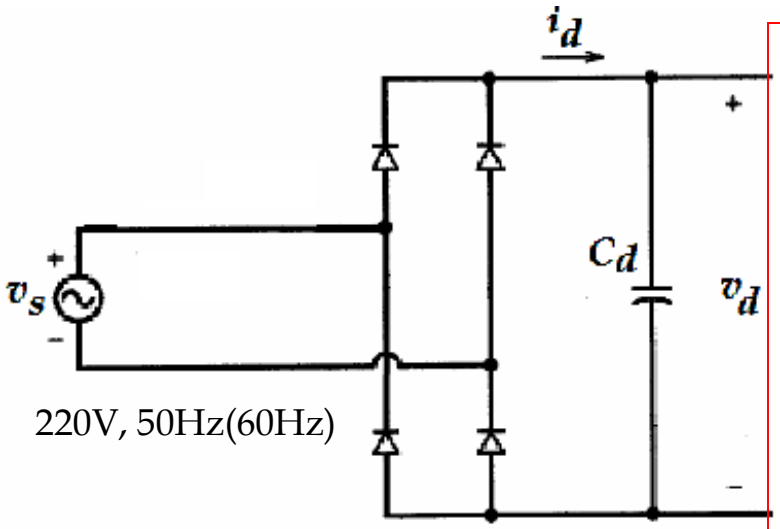
VRŠNA VREDNOST ULAZNE STRUJE 10A
TRAJANJE STRUJNOG PIKA OKO 1ms

KOLIKA JE VRŠNA VREDNOST STRUJE – POJEDNOSTAVLJENA RAČUNICA

- Pretpostavimo da imamo prekidački izvor napajanja bez PFC , čija je aktivna snaga 220W
- Napaja se iz 220V, 50Hz
- Efektivna vrednost ulazne struje je 1A
- Ako impuls struje traje 1ms, a trajanje poluperiode je 10ms, zaključujemo da je vršna vrednost strujnog impulsa 10A
- Ovo sve važi kako za (+)periodu tako i za (-) periodu
- Zamislimo da je na jednoj fazi povezano 200 PC računara
- Ukupna vršna struja po poluperiodi je 200x10A=2kA
- Problemi: strujni udari, padovi napona, naponski propadi ili “sagovi”, generisanje viših harmonika.... ☹☹

PROBLEMI SE MOGU REŠITI KOREKCIJOM FAKTORA SNAGE!!!!

DIODNI ISPRAVLJAČ NAPAJAN SA MREŽE



?

POTROŠAČ

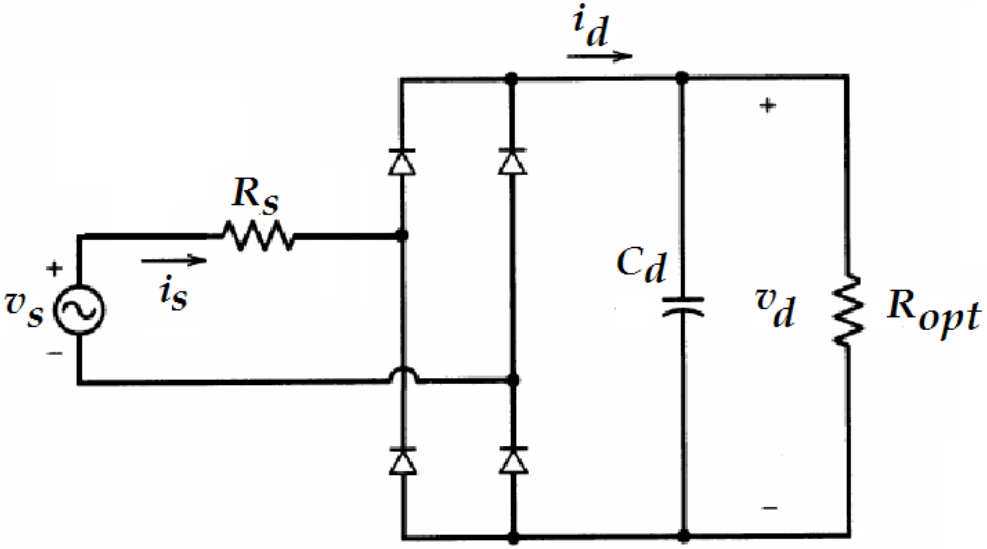
U ODNOSU NA MREŽU OVAJ DEO SE
U PRINCIPU PONAŠA
KAO KAPACITIVNO OPTEREĆENJE

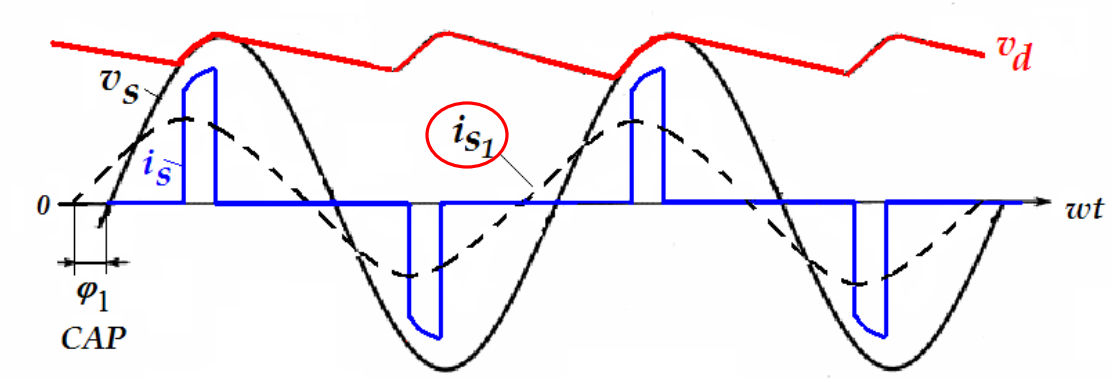
POTROŠAČ:
-UPS
-PC NAPAJANJE
-TELEVIZOR
-ŠTAMPAČ
-TELEFAX
-FREKVENTNI
REGULATOR
.....
.....

KAKO SE U ODNOSU NA MREŽU PONAŠA OVAJ SKLOP???

KAKO SE ODREĐUJE FAKTOR SNAGE U OVOM SLUČAJU???

DIODNI PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ SA R-C FILTROM KAO OPTEREĆENJEM

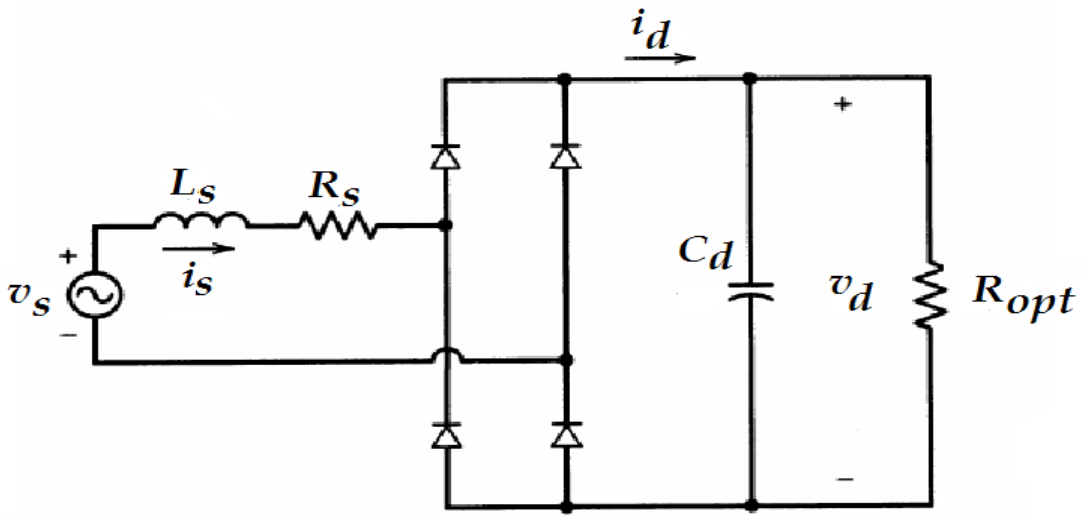


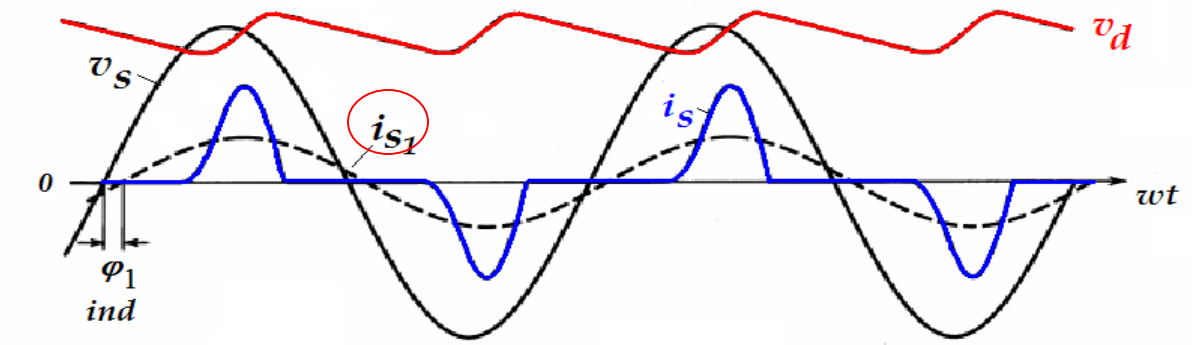


Dominatan je <u>osnovni (prvi)</u> harmonik ulazne struje - - - - - -

ŠTA U OVOM SLUČAJU PREDSATVLJA FAKTOR SNAGE???

DIODNI PUNOTALASNI ISPRAVLJAČ SA R-C FILTROM KAO OPTEREĆENJEM I ULAZNOM PRIGUŠNICOM

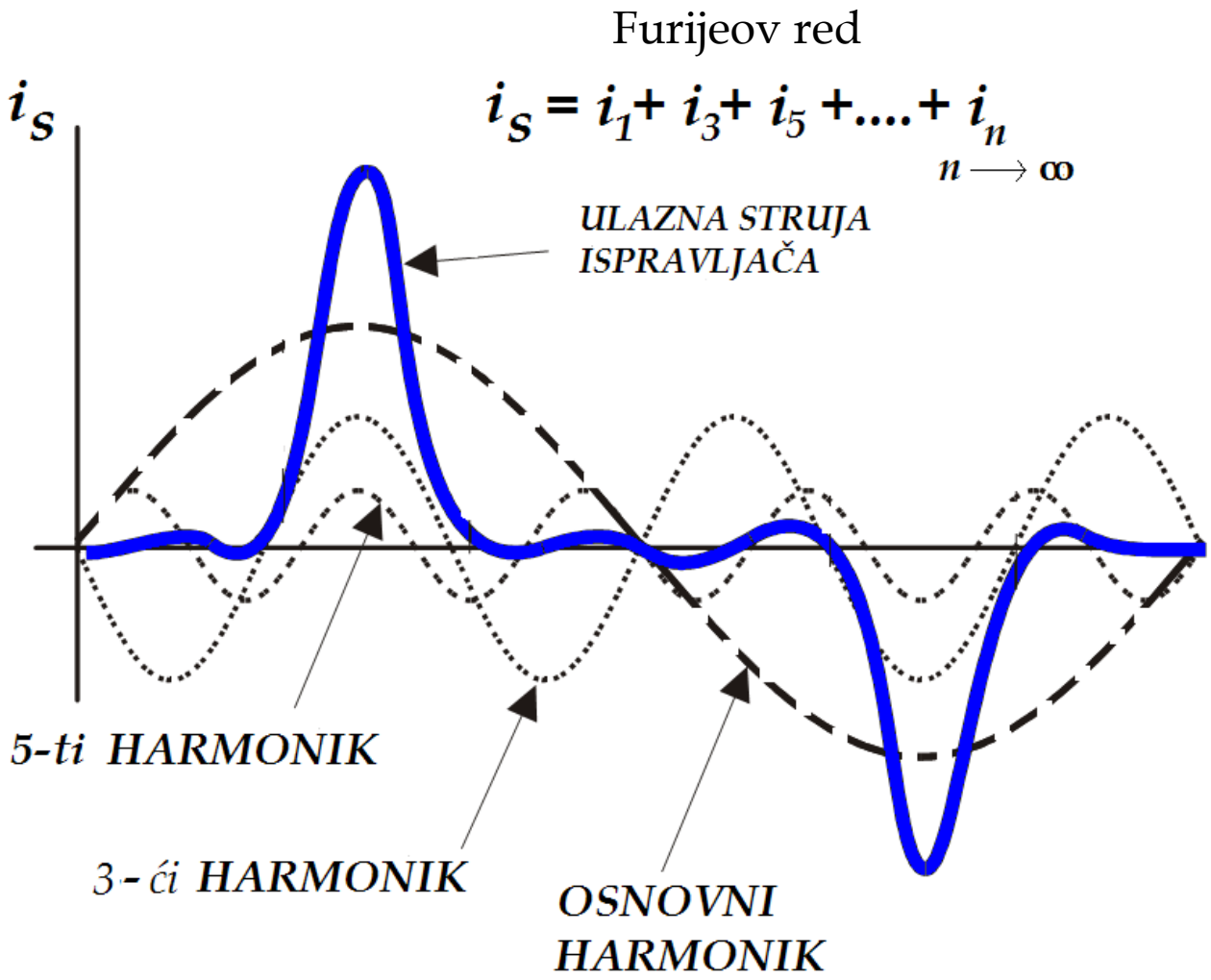




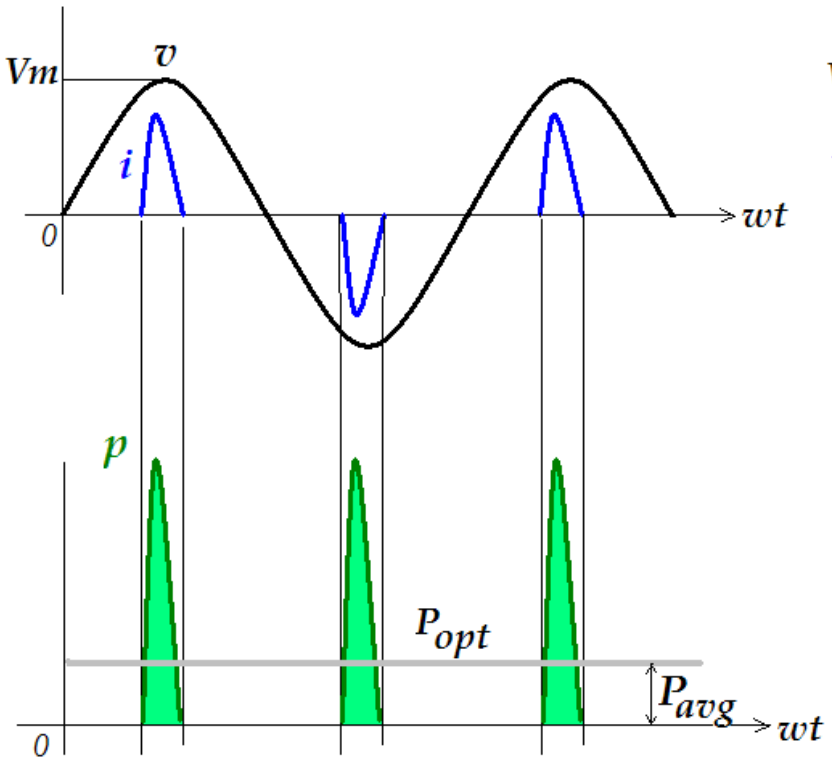
Dominatan je <u>osnovni (prvi)</u> harmonik ulazne struje – – – – – –

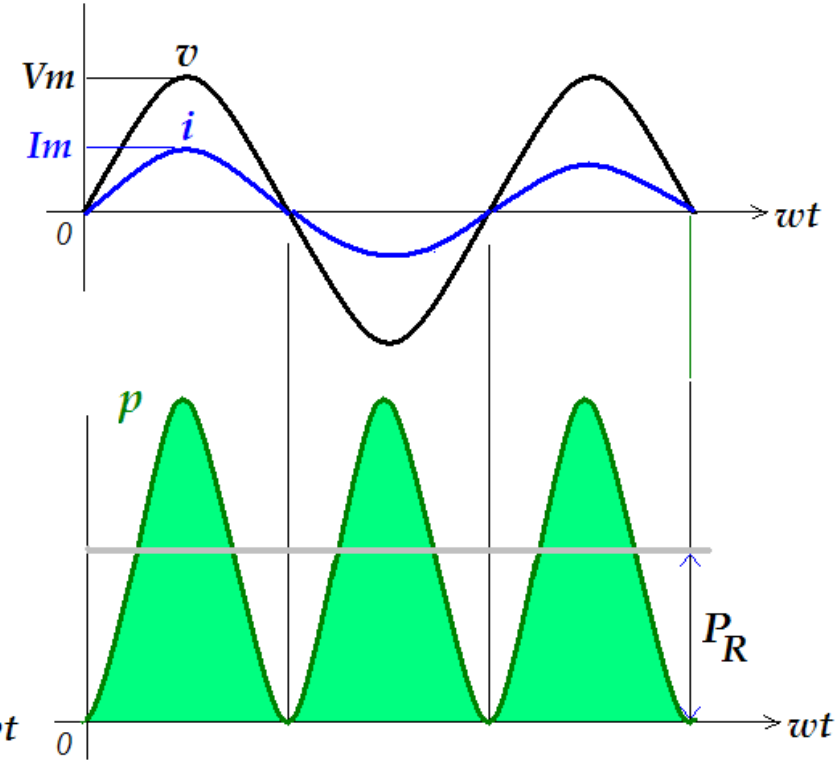
ŠTA U OVOM SLUČAJU PREDSATVLJA FAKTOR SNAGE???

HARMONIJSKI SASTAV ULAZNE STRUJE DIODNOG GRECOVOG ISPRAVLJAČA



FAKTOR SNAGE DIODNOG ISPRAVLJAČA





$$P_{opt} < \tfrac{1}{2} \cdot Vm \cdot Im \qquad P_R = \tfrac{1}{2} \cdot Vm \cdot Im$$

$$PF \overset{def}{=} \frac{P_{opt}}{P_R} = \frac{2P_{opt}}{V_m I_m}$$

OPŠTI IZRAZ ZA IZRAČUNAVANJE FAKTORA SNAGE

$$PF \overset{def}{=} \frac{P_{opt}}{P_R} = \frac{2P_{opt}}{V_m I_m}$$

$$V_m = \sqrt{2}\, V_{eff}$$

$$I_m = \sqrt{2}\, I_{eff}$$

$$PF = \frac{2P_{opt}}{\sqrt{2}\, V_{eff} \cdot \sqrt{2}\, I_{eff}} = \frac{P_{opt}}{V_{eff} I_{eff}}$$

$$V_{eff} I_{eff} = S$$

PRIVIDNA SNAGA

$$PF = \frac{P_{opt}}{S}$$

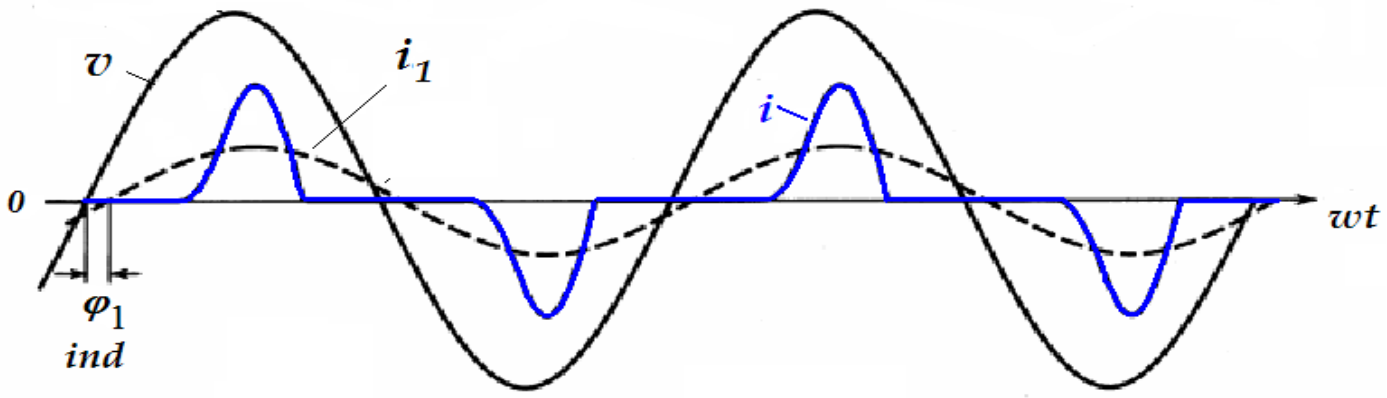
UOBIČAJENE OZNAKE ZA FAKTOR SNAGE

$$PF = \frac{P_{opt}}{S}$$

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S}$$

POSMATRAJMO PRVI HARMONIK(*DOMINANTNI*) U ULAZNOJ STRUJI GRECOVOG ISPRAVLJAČA

PRETPOSTAVKA: MREŽNI NAPON JE SINUSOIDALAN



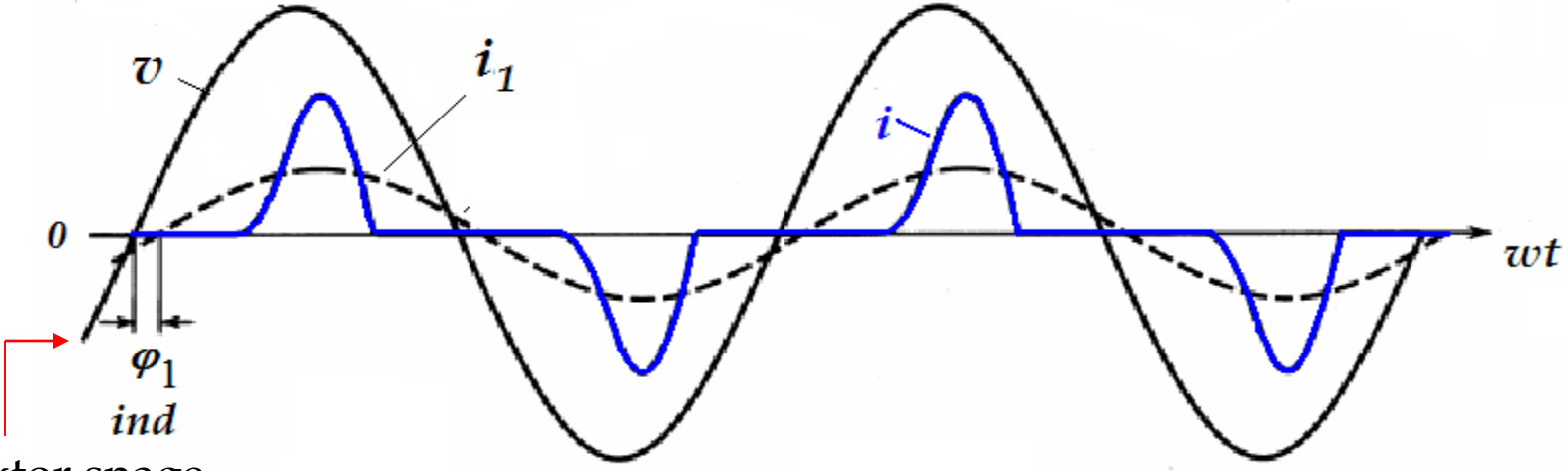
V_{eff} – *efektivna vrednost mrežnog napona v(t)*

I_{eff} – *efektivna vrednost ulazne struje i(t)*

I_1 – *efektivna vrednost prvog harmonika (dominantnog) ulazne struje i(t)*

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = \frac{V_{eff} I_1 \cos\varphi_1}{V_{eff} I_{eff}}$$

PRIČA O FAKTORU DISTORZIJE



faktor snage
prvog harmonika

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = \frac{V_{eff}\, I_1 \cos\varphi_1}{V_{eff}\, I_{eff}}$$

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = \frac{I_1}{I_{eff}} \cdot \cos\varphi_1$$

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = g \cdot \cos\varphi_1$$

FAKTOR DISTORZIJE

$$g = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

Distorsion
Factor
(engl.)-DF

TOTALNA HARMONIJSKA DISTORZIJA-THD faktor

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = g \cdot \cos\varphi_1 \,, \quad g = DF = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_{eff}^2 - I_1^2}}{I_1}$$

$$DF = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

FAKTOR DISTORZIJE ZA SINUSNE TALASNE OBLIKE

$$\lambda = \frac{P_{opt}}{S} = g \cdot \cos\varphi_1 \,, \quad g = DF = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

KADA NEMA DISTORZIJE TALASNOG OBLIKA $I_1 = I_{eff}$

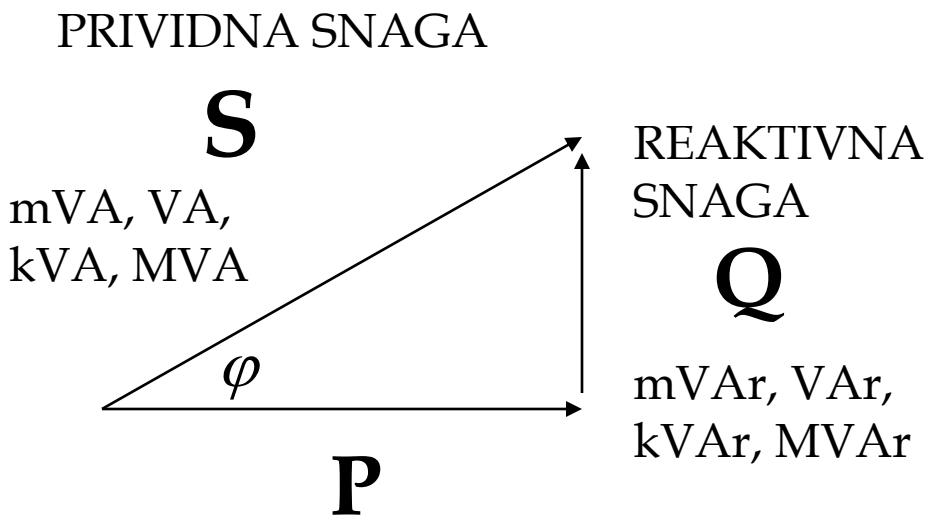
$$\varphi = \varphi_1$$

$$g = DF = 1$$

I TADA JE FAKTOR SNAGE:

$$\lambda = \cos\varphi$$

TROUGAO SNAGA



$$P=S\cos\varphi$$

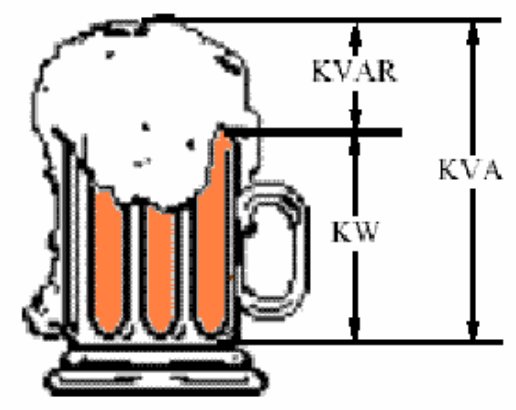
$$Q=S\sin\varphi$$

$$S^2=P^2+Q^2$$

CILJ je OSTVARITI

$$Q=0 \longrightarrow \begin{matrix} P=S \\ \cos\varphi=1 \end{matrix}$$

ANALOGIJA SA PIVOM



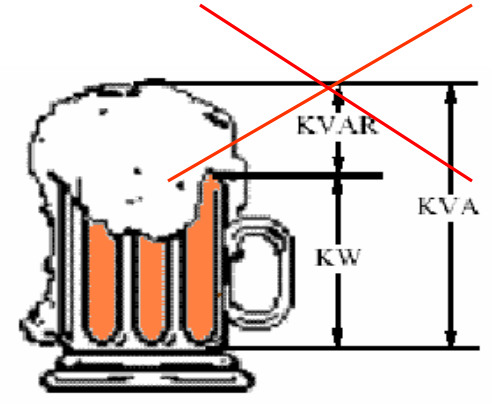
$$PF = \frac{kW}{kVA}$$

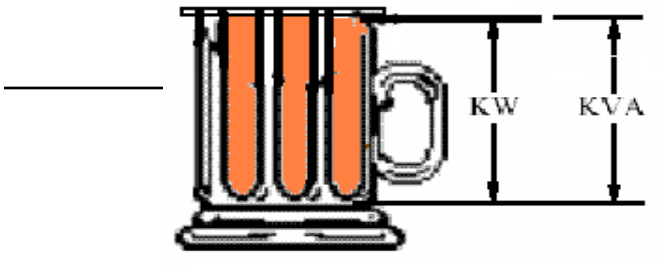
$$PF = \frac{kW}{\sqrt{(kW)^2 + (kVAR)^2}} < 1$$

kW- pivo *(beer)*
kVAR- pena *(foam)*

KOREKCIJA FAKTORA SNAGE-ANALOGIJA SA PIVOM

$$kW=kVA$$





CILJ JE POSTIĆI: $kVAR=0$

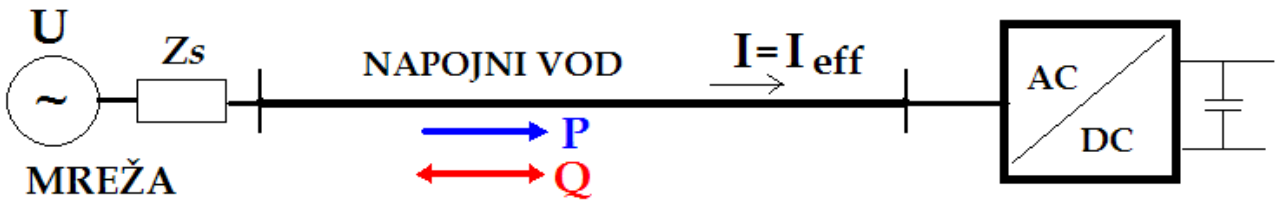
$$PF=\frac{kW}{kVA}=\frac{kVA}{kVA}=1$$

$$PF=\frac{PIVO}{PIVO}=1$$

ZAŠTO UOPŠTE KOREKCIJA FAKTORA SNAGE?

- **POVEĆANJE EFIKASNOSTI NAPOJNE MREŽE**
  - -niži gubici na mrežnoj impedansi
  - -manje izobličenje napona (cross-coupling)
  - -veća raspoloživa snaga izvora
- **REDUKCIJA "ZAGAĐENJA" NAPOJNE MREŽE ŠTETNIM HARMONICIMA**
  - -nisko frekventni i visokofrekventni harmonici
- **USAGLAŠAVANJE SA STANDARDIMA IEC 555, IEC61000, EN6055, IEEE 519, ... itd.**

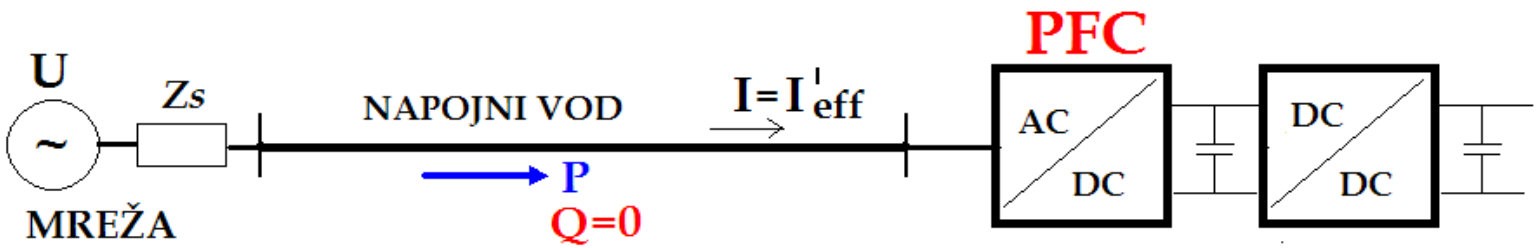
POVEĆANJE EFIKASNOSTI NAPOJNE MREŽE



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad I_{eff} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U}$$

$$\Delta u = (Z_s + Z_v) I_{eff}$$

(a) slučaj bez korekcije faktora snage



$$S' = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad I'_{eff} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U} < I_{eff}$$

$$\Delta u' = (Z_s + Z_v) I'_{eff} < \Delta u$$

(b) slučaj sa korekcijom faktora snage

LIMITI HARMONIJSKE EMISIJE PO STANDARDIMA IEC61000-3-3 i IEC 555-2

Harmonic Number (n)	Class A Limits**	Class B Limits**	Class C Limits*	Class D Limits*	IEC 555-2 limits for TV(>165W)
	(A_{rms})	(A_{rms})	% Of fundamental	mA/W of input power (50-600W)	(A_{rms}) Max DC current<0.05A
2	1.080	1.620	2	n/a	0.300
3	2.300	3.450	30 x PF	3.4	0.800
4	0.430	0.645	n/a	n/a	0.150
5	1.440	2.160	10	1.9	0.600
6	0.300	0.450	n/a	n/a	n/a
7	0.770	1.155	7	1.0	0.450
8	0.230	0.345	n/a	n/a	n/a
9	0.400	0.600	5	0.5	0.300
10	0.184	0.276	n/a	n/a	n/a
11	0.330	0.495	3	0.35	0.170
12	0.153	0.230	n/a	n/a	n/a
13	0.210	0.315	3	0.296	0.120
Even 14-40	1.84/n	2.760/n	n/a	n/a	n/a
Odd 15-39	2.25/n	3.338/n	3	3.85/n	1.5/n

KLASA A:

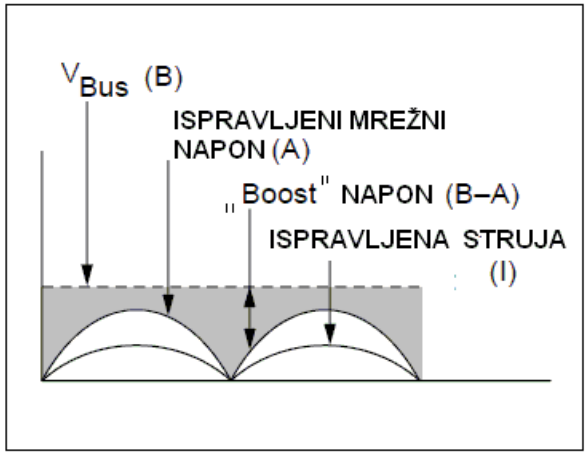
-simetrični trofazni prijemnici
-dimeri za svetiljke
-audio oprema

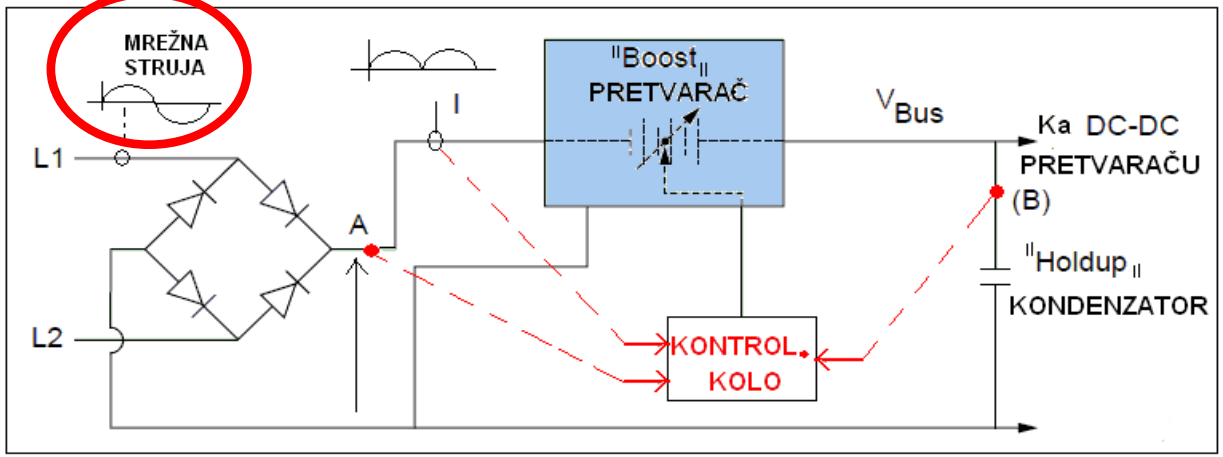
KLASA B:
-Portabilni alati

KLASA C:
-oprema za osvetljenje

KLASA D:
-PC računari
-PC monitori
-TV prijemnici do 600W

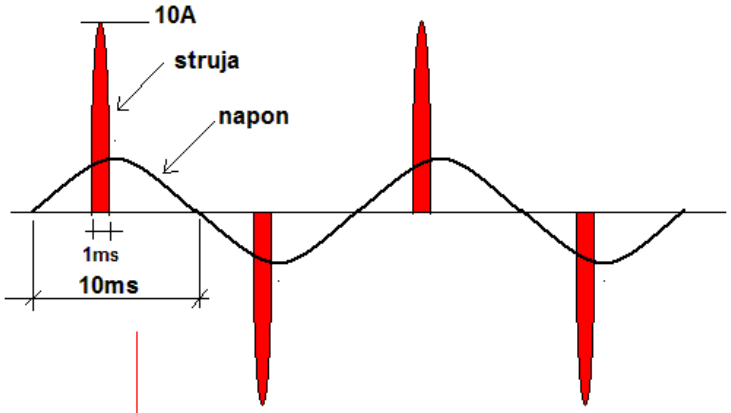
KAKO REŠTI PROBLEM????



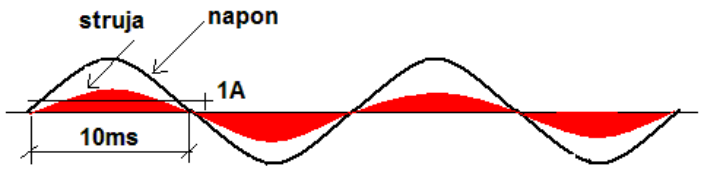


- **Između punotalasnog ispravljača i kondenzatora *("hold-up")* se postavlja <u>aktivno elektronsko kolo</u> -podizač napona**
- **BOOST konvertor**
- **Potreban USLOV da bi se obezbedila sinusna ulazna struja je da moramo realizovati podizač ("boost") napona**
- **Želimo da ostvarimo sinusnu struju umesto oštrih impulsa, a da efektivna vrednost ostane ista**

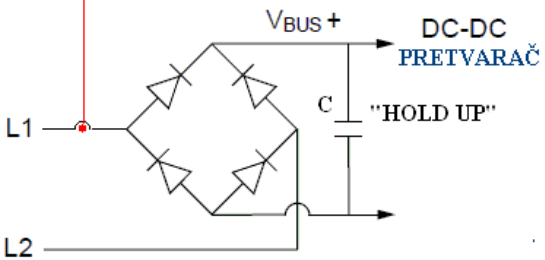
POREĐENJE KLASIČNOG I SAVREMENOG ULAZNOG ISPRAVLJAČA

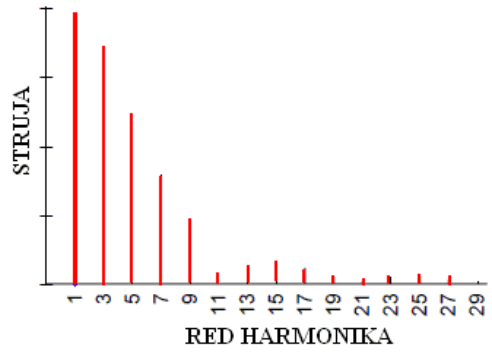


kriterijum
P=const

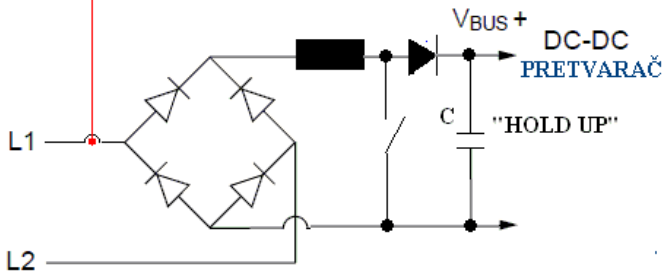


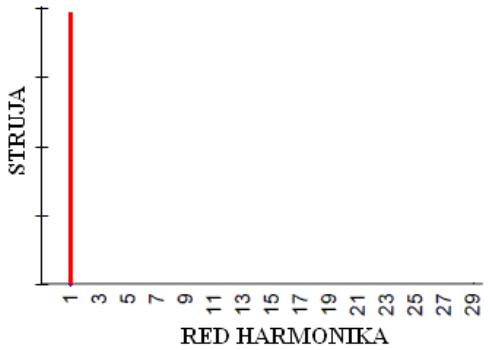
bez PFC (klasično)



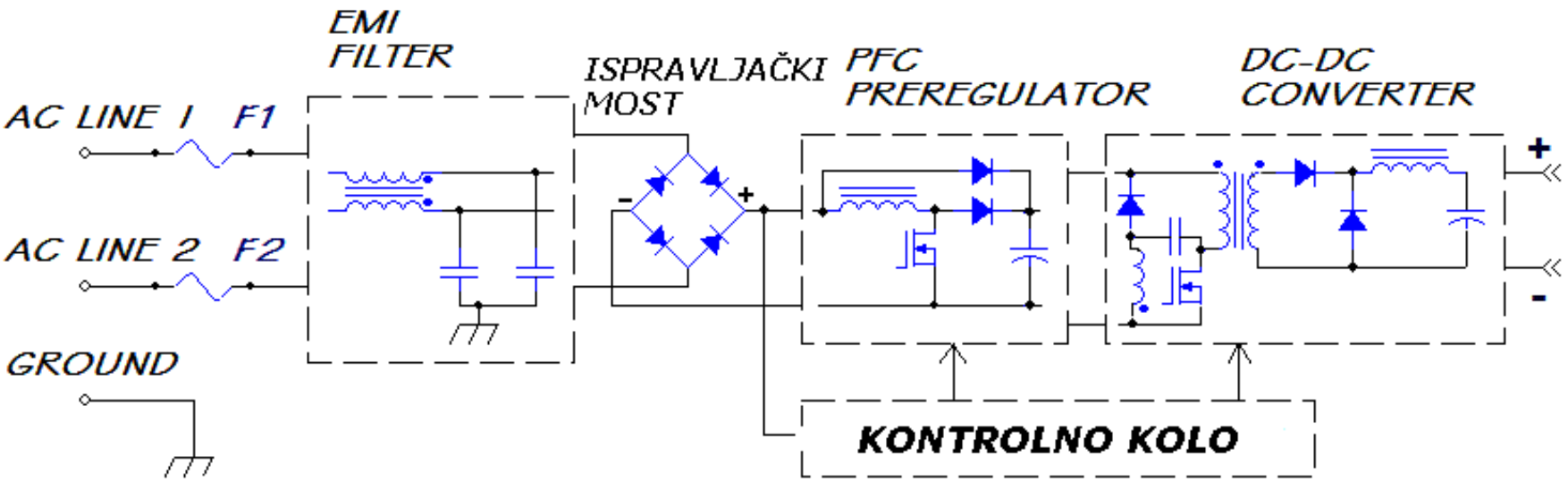


sa PFC (moderno)

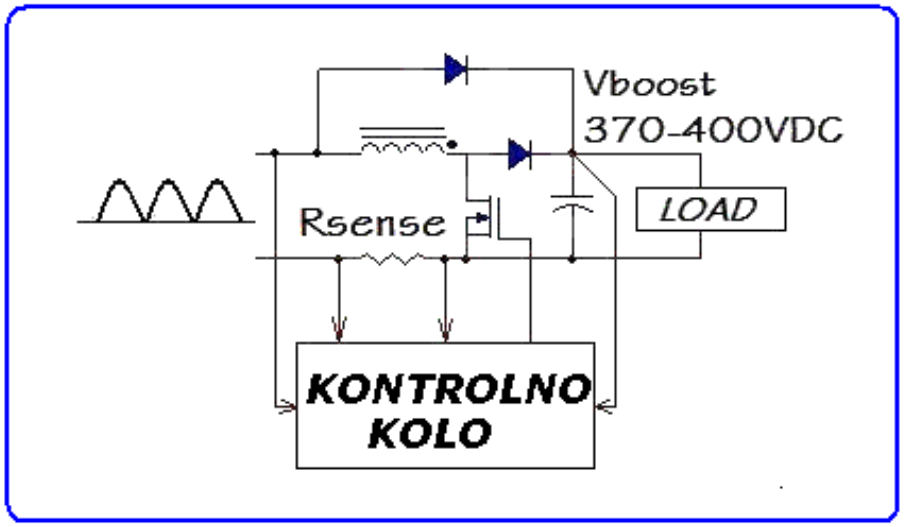




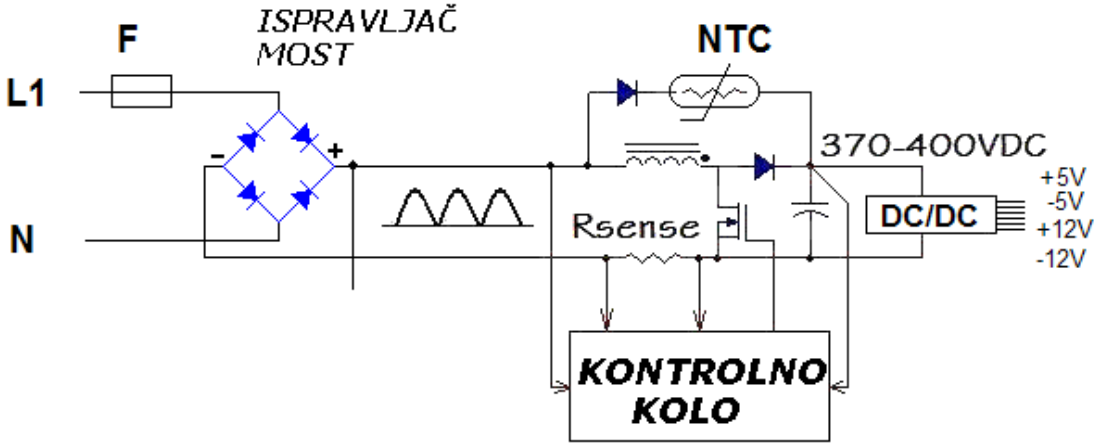
TIPIČNO NAPAJANJE SA KOREKCIJOM FAKTORA SNAGE

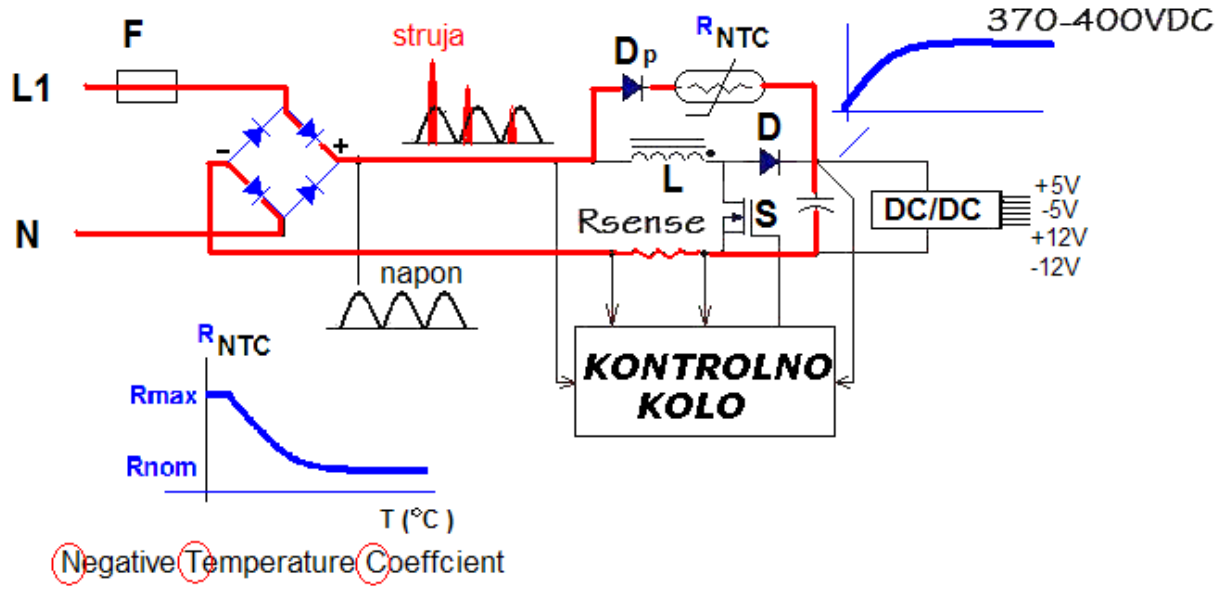


PFC
PREREGULATOR



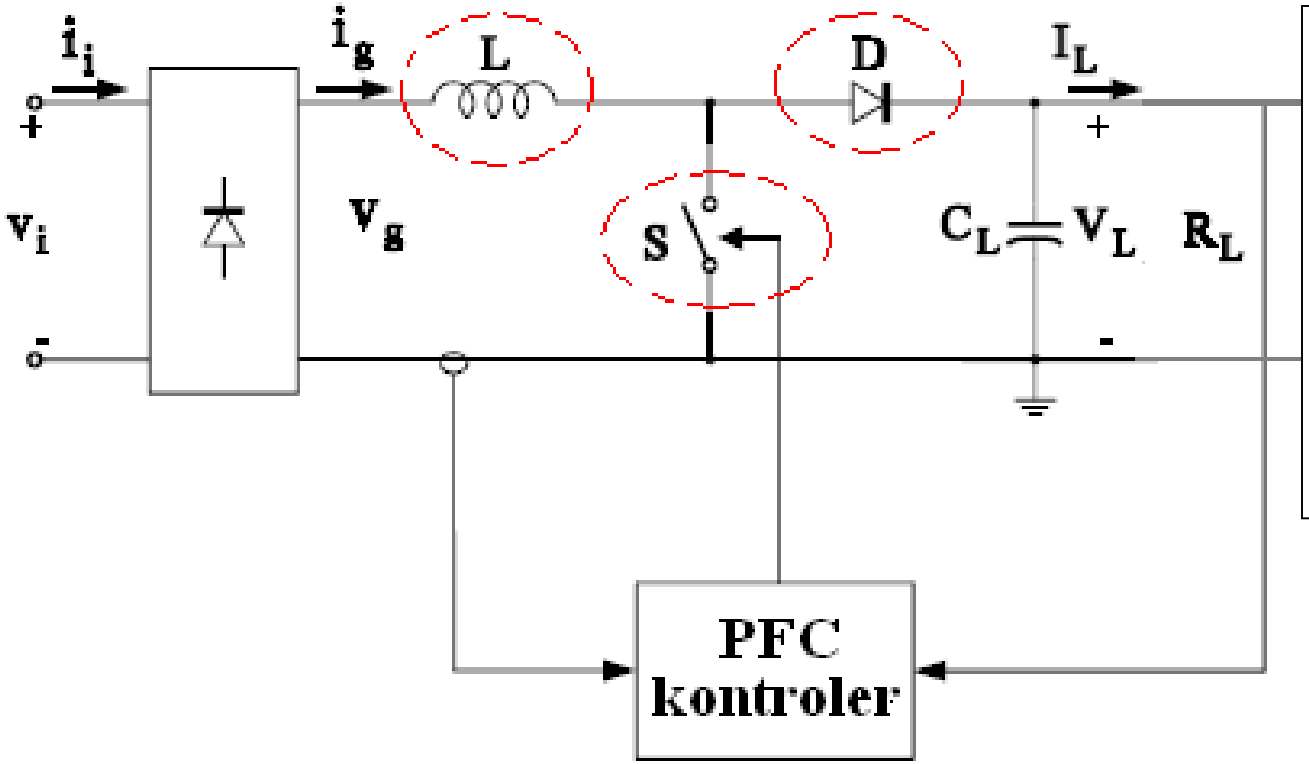
START NAPAJANJA I POČETNO PUNJENJE KONDENZATORA U DC MEĐUKOLU





- NTC je nelinearni otpornik ograničava početnu struju punjenja kondenzatora
- U početnom trenutku t_{+0} napon na kondenzatoru je jednak 0V
- Stoga je kondenzator KRATAK SPOJ U POČETKU
- Nakon njegovog punjenja kolo je spremno za START

PODIZAČ NAPONA - “BOOST”
PRINCIPSKA ŠEMA



OPTEREĆENJE

DC MEĐUKOLO UREĐAJA ZA BESPREKIDNO NAPAJANJE

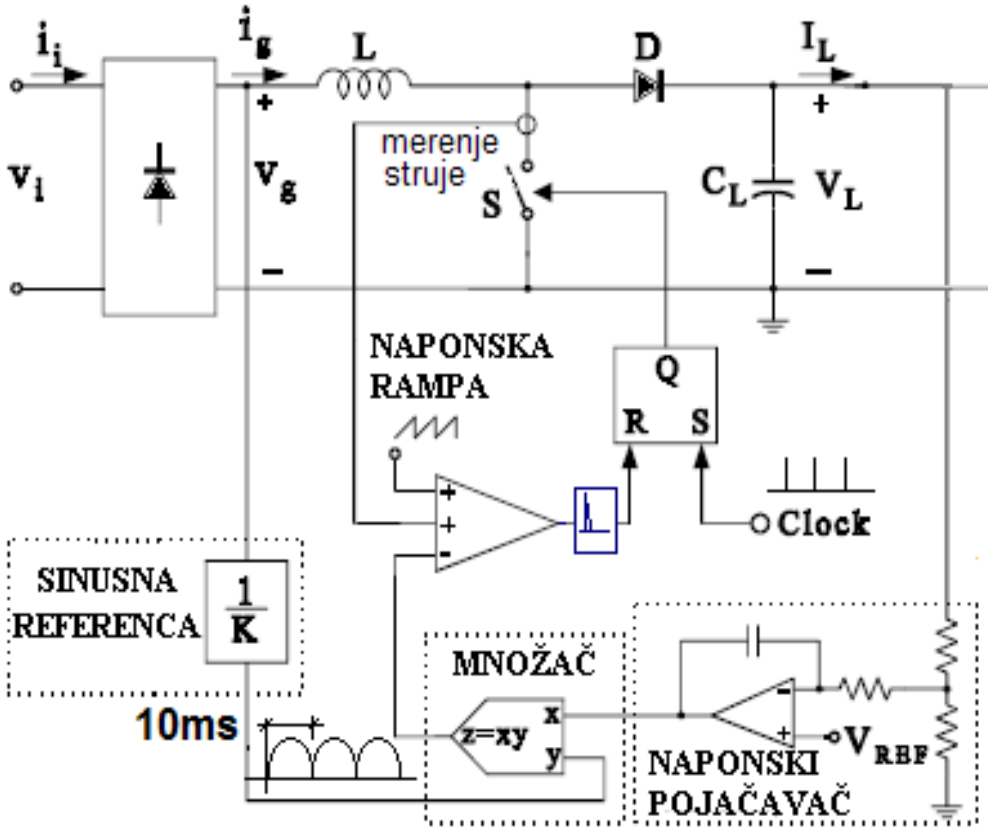
KLJUČNE KOMPONENTE: L, D i S

- PRIGUŠNICA L (DC struja)
- BRZA DIODA D
- PREKIDAČ S (MOSFET, IGBT)
- OPTEREĆENJE-UPS napajanje

PFC kontroler**?????**
KAKVA JE NJEGOVA ARHITEKTURA

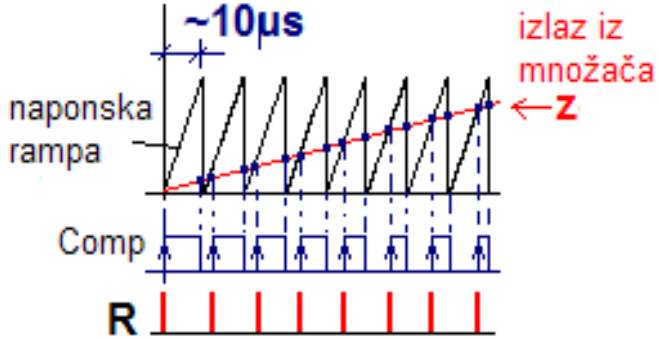
JEDNO MOGUĆE REŠENJE→

DETALJNI PRIKAZ PFC UPRAVLJAČKOG KOLA



OPTEREĆENJE

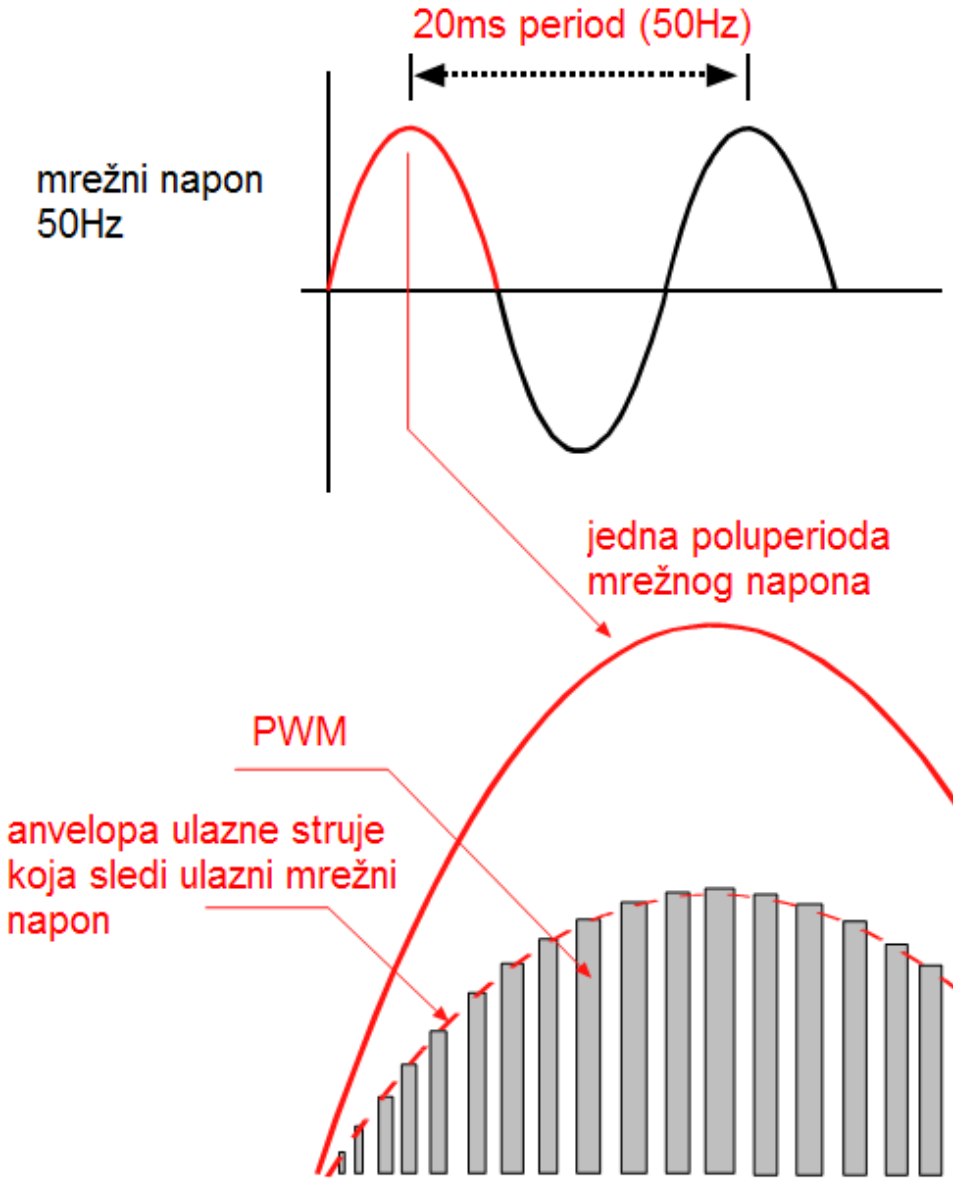
DC MEĐUKOLO UREĐAJA ZA BESPREKIDNO NAPAJANJE



UPRAVLJAČKI BLOKOVI:

-sinusna referenca
-množač
-komparator (poređenje naponske rampe i izlaza množača)
-naponski pojačavač
-RS flip flop
-generator takta (clock)

KONTROLA VRŠNE ("peak") VREDNOSTI STRUJE



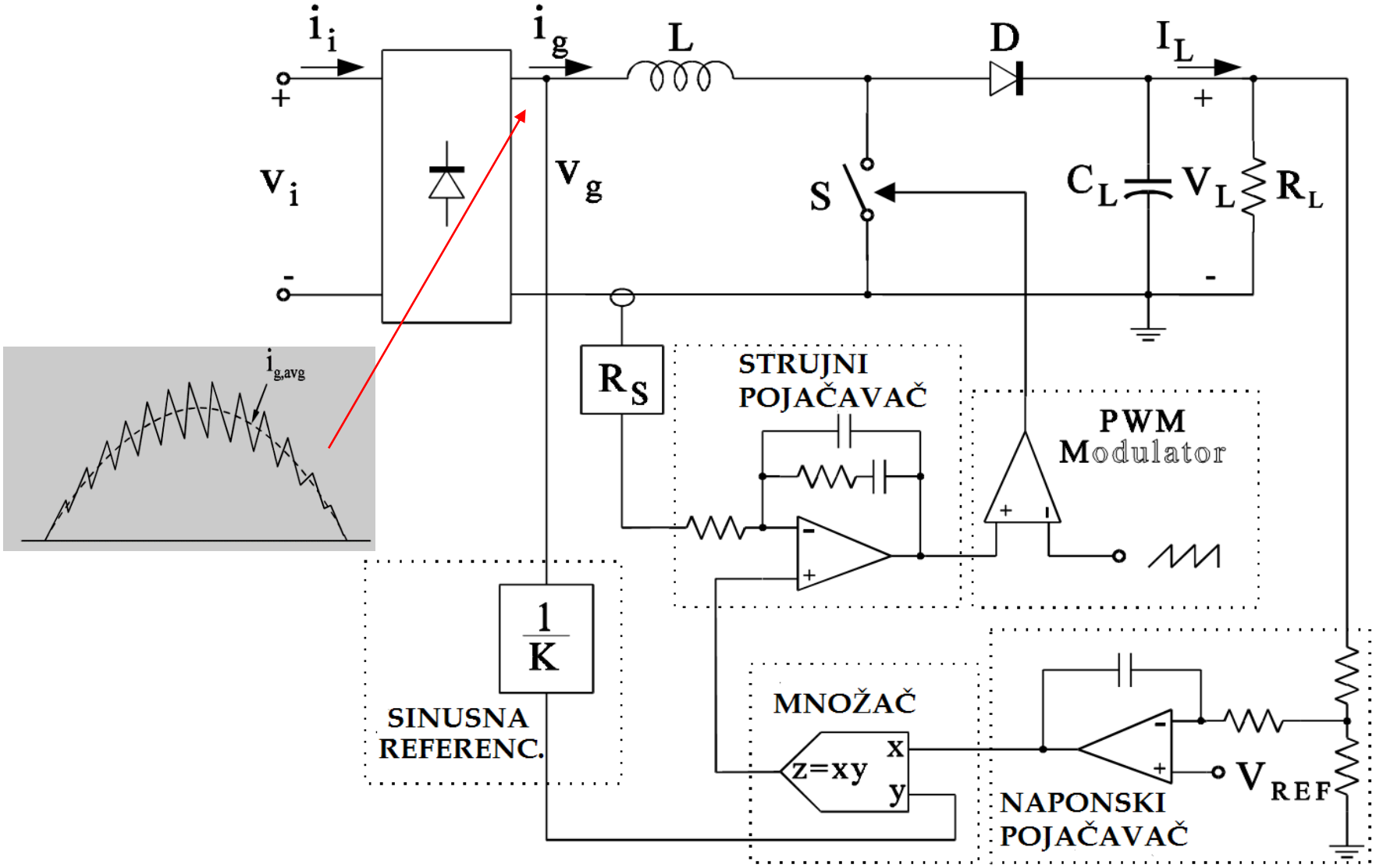
Posmatra se jedna poluperioda.
Pozitivna!!!
Sve što važi za pozitivnu poluperiodu važi i za negativnu poluperiodu.

Ulazna struja je sinhronizovana sa mrežnim naponom (u fazi je sa njim)

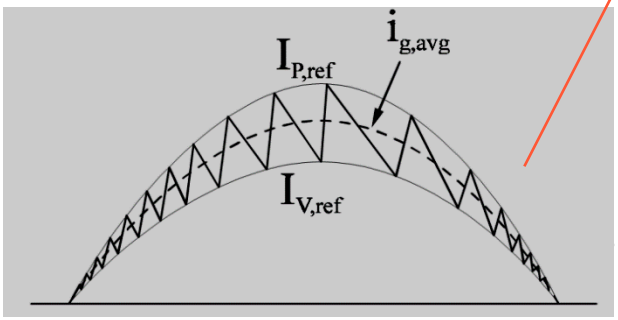
Izlazni PWM (Pulse Width Modulation) signal se dobija na izlazu RS flip flopa

ANVELOPA ULAZNE STRUJE JE SINUSOIDA KOJA JE U FAZI SA MREŽNIM NAPONOM

PFC – KONTROLA SREDNJE (“average”) VREDNOSTI STRUJE



PFC – HISTEREZISNA KONTROLA ULAZNE STRUJE



i_i i_g L D I_L

v_i v_g S C_L V_L R_L

$I_{P,ref}$ $I_{V,ref}$ Q FF R S

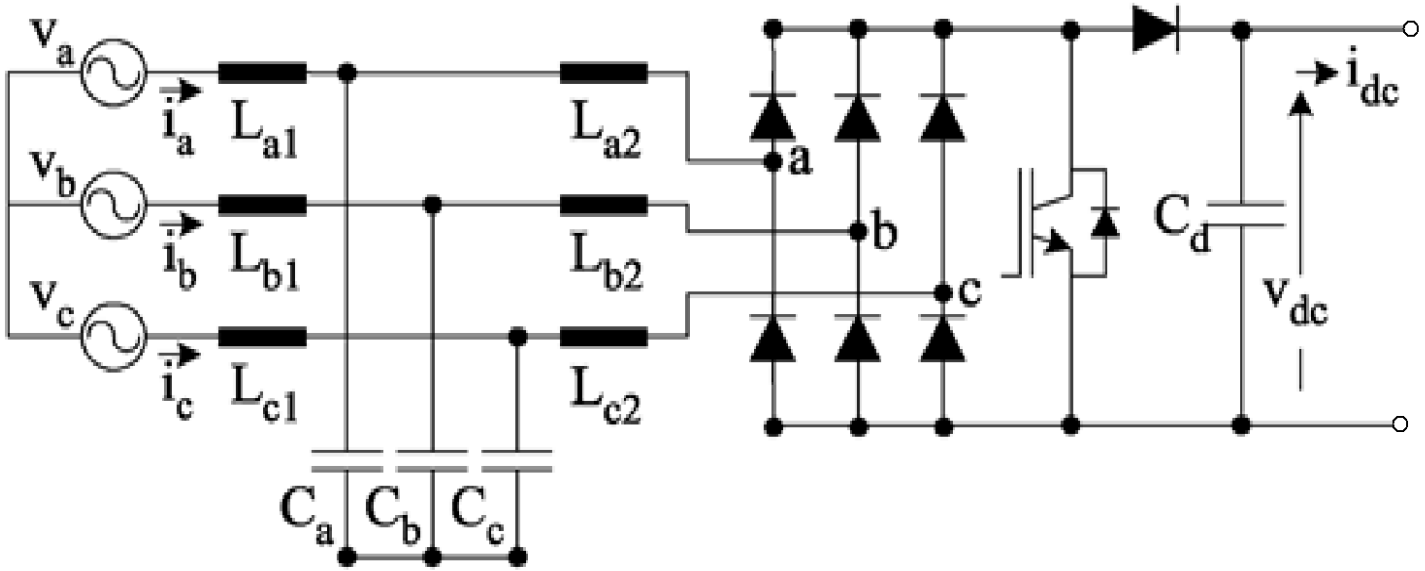
$\frac{1}{K}$

SINUSNA REFERENC.

MNOŽAČ z=xy x y

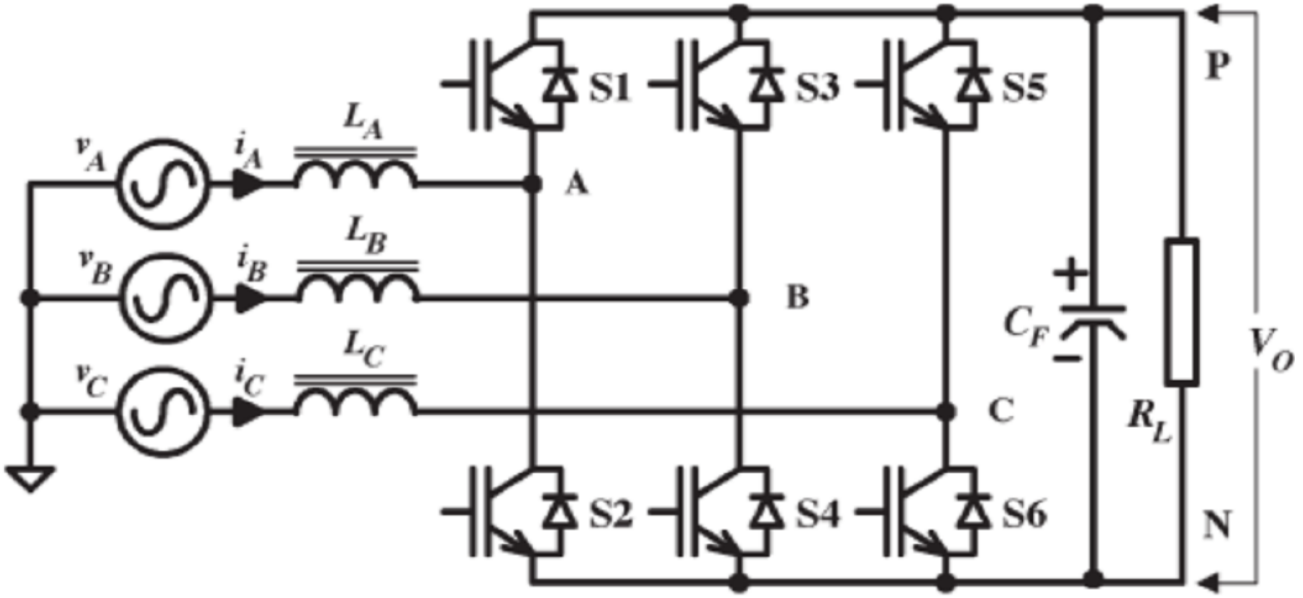
NAPONSKI POJAČAVAČ V_{REF}

KOREKCIJA FAKTORA SNAGE KADA JE ULAZNI NAPON TROFAZNI



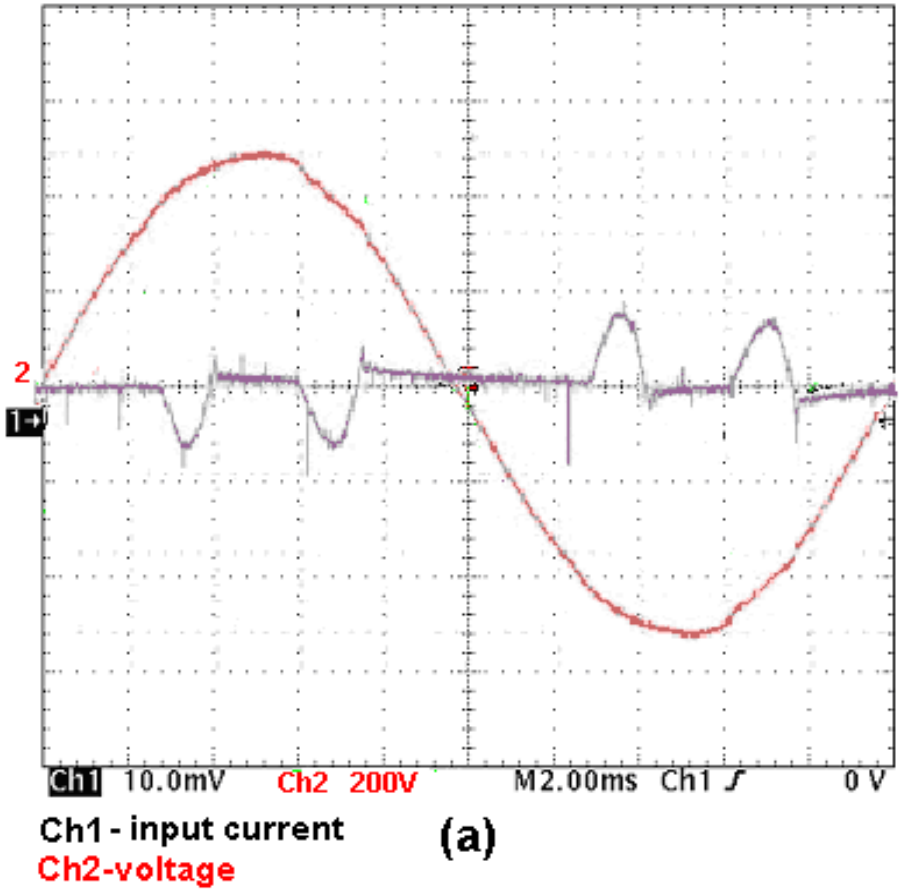
-TRI PODIZAČA NAPONA
-ZAJEDNIČKI PREKIDAČKI ELEMENAT, DIODA
-ZAJEDNIČKO DC MEĐUKOLO (kondenzator Cd)
-ULAZNI TROFAZNI L-C FILTAR
-BOOST PRIGUŠNICE L_{a2}, L_{b2}, L_{c2}

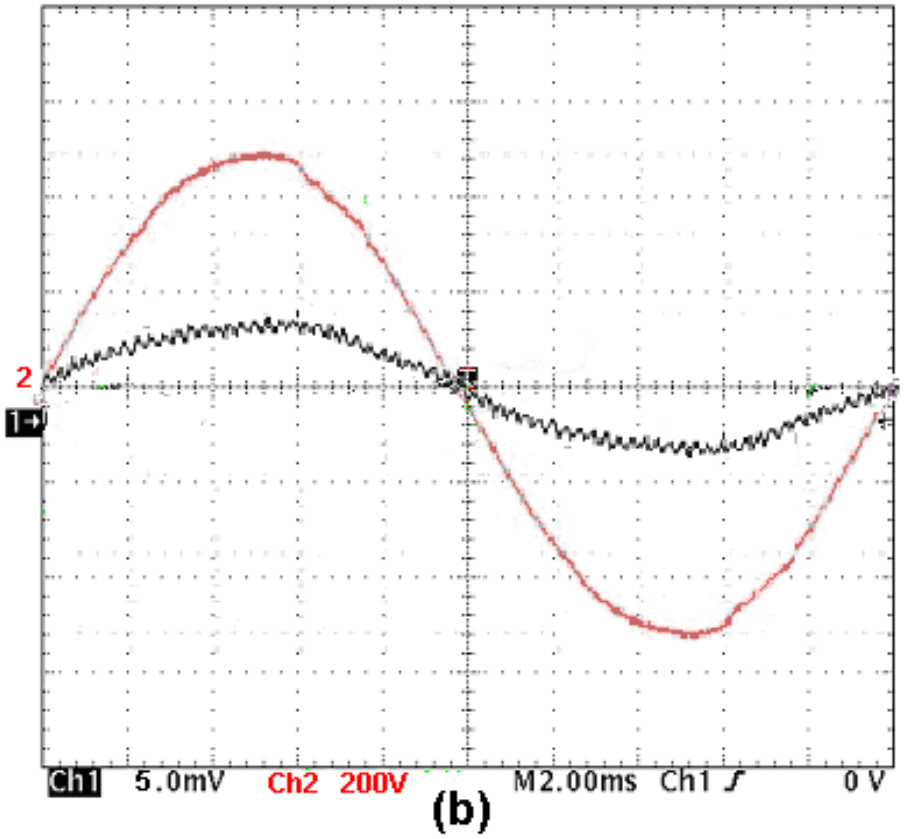
TROFAZNI KOREKTOR FAKTORA SNAGE SA TRANZISTORSKIM PREKIDAČKIM MOSTOM



-”BOOST” PRIGUŠNICE NA AC STRANI
-NEMA PROBLEMA SA ZASIĆENJEM i DC REŽIMOM
-MAGNETNO KOLO PRIGUŠNICE MOŽE BITI ZA NISKE UČESTANOSTI

KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI ZA TROFAZNI PFC



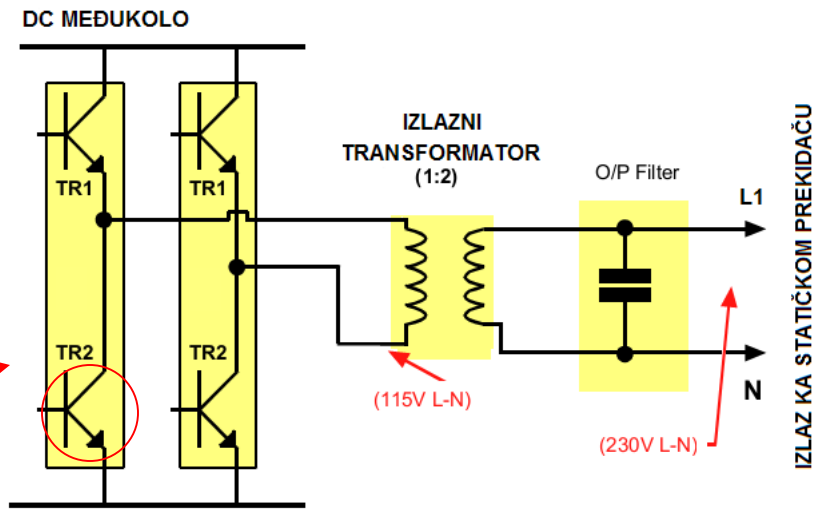


(a)- BEZ KOREKCIJE FAKTORA SNAGE

(b) – SA KOREKCIJOM FAKTORA SNAGE

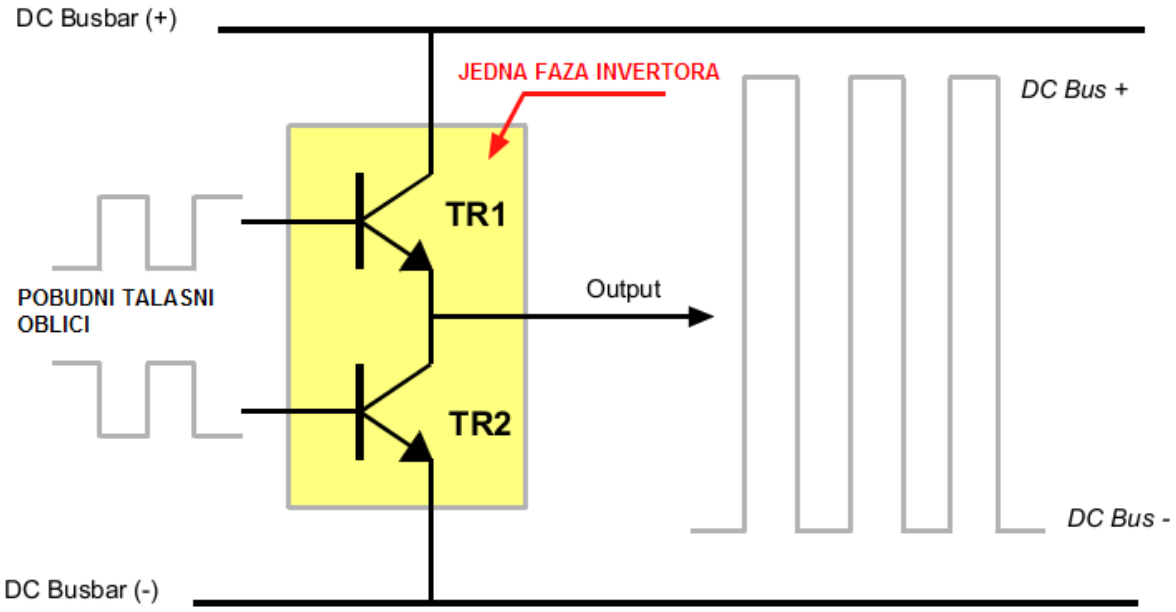
INVERTOR KAO ELEMENAT SISTEMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA

- ZADATAK INVERTORA (dc/ac pretvarača) JE DA KONVERTUJE NAPON NA DC SABIRNICAMA-BATERIJSKI NAPON U NAIZMENIČNI SINUSNI NAPON NA IZLAZU ČIJA JE VREDNOST 50Hz
- INVERTORSKI PREKIDAČI SU NEKADA BILI REALIZOVANI SA BIPOLARNIM TRANZISTORIMA-BJT, DOK SE SADA IZVODE SA MOSFET ili IGBT tranzistorima
- RADNE UČESTANOSTI PREKIDAČE SE KREĆU OD 5kHz-50kHz
- TIPIČNO ZA IGBT TRANZISTORE 10kHz, a za MOSFET i do 100kHz

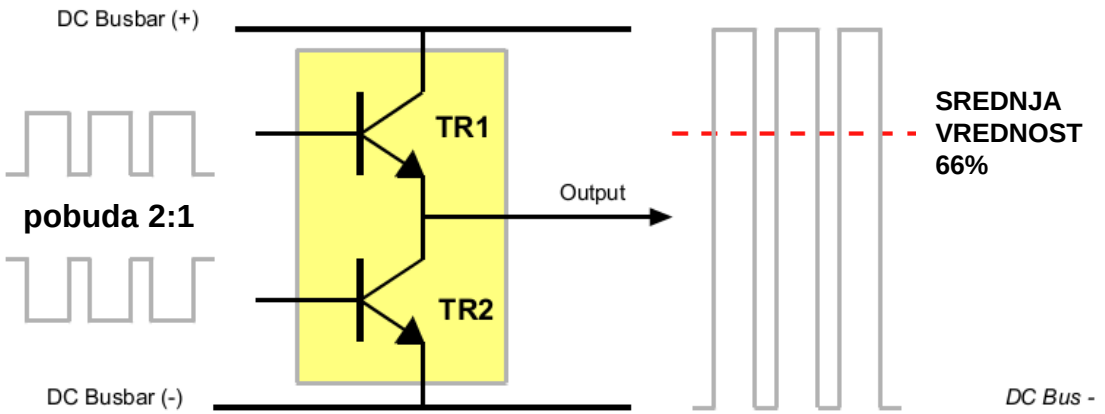


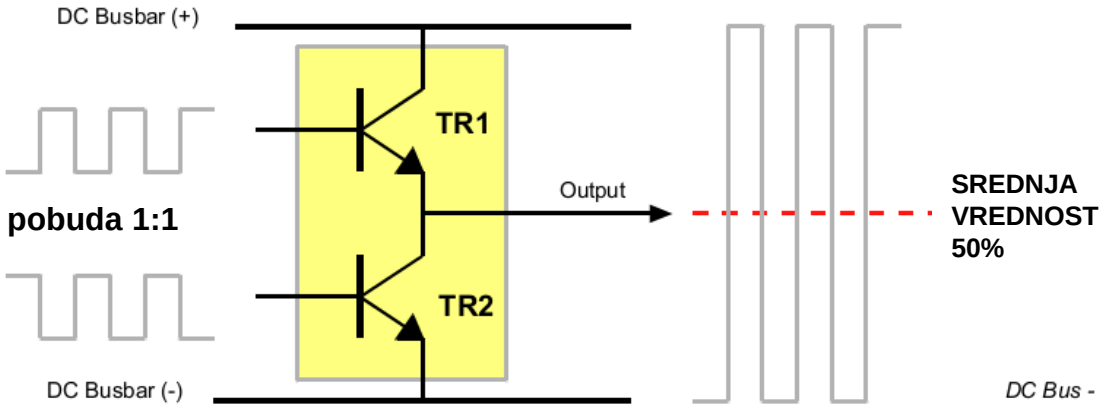
DA BIO SE NA IZLAZU DOBIO SINUSNI NAPON ODNOSNO SINUSNA STRUJA PRIMENJUJU SE TEHNIKE MODULACIJE I ALGORITMI PO KOJIMA RADE PREKIDAČI U INVERTORU

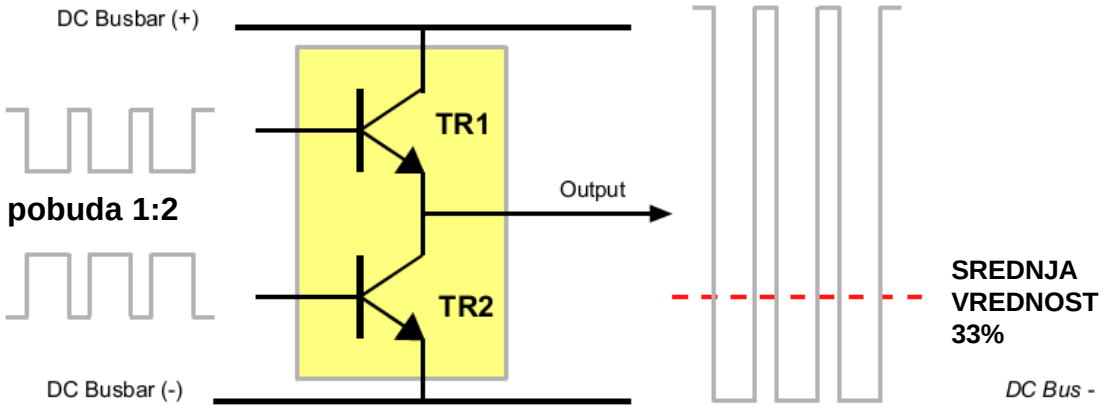
POSMATRAJMO JEDNU FAZU INVERTORA



-Jedna faza (jedna vertikala trofaznog mosta) se sastoji od dva tranzistora koji rade u opoziciji (kada je TR1 ON, drugi komplemetarni TR2 je OFF, i obrnuto)
-Pobudni talasni oblici tranzistora su komplementarni POBUDA_TR1=POBUDA_TR2
-Zajednički spoj ova dva tranzistora je izlaz koji daje napon koji je širinsko-impulsno modulisan (PWM).
-Kada su uključena oba tranzistora imamo u tom trenutku kratak spoj na DC sabirnicama
-Ovo predstavlja problem, te se stoga u pobudne impulse uvodi tzv.”mrtvo vreme” (dead-time) u toku kojeg su oba tranzistora isključena.Ovo vreme je vrlo kratko (10-20us)







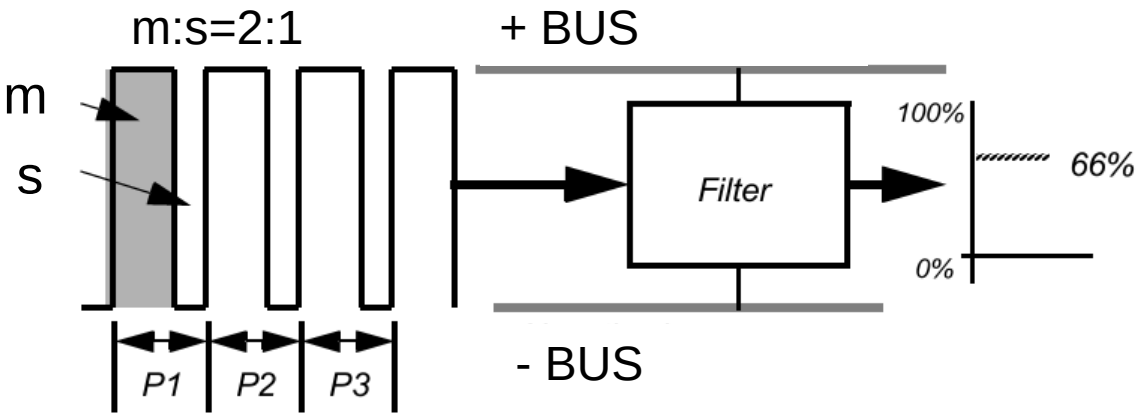
Razmotrimo tri slučaja koji se odnose na tri različita odnosa pobudnih impulsa konstantne učestanosti (tipično 10kHz) koji se dovode na baze tranzistora TR1 i TR2 (oni mogu biti tipa BJT, MOSFET, IGBT, SiC....)

1) Pobuda 2:1
   $t_{on}(TR1)=2t_{on}(TR2)$
2) Pobuda 1:1
   $t_{on}(TR1)=t_{on}(TR2)$
3) Pobuda 1:2
   $2t_{on}(TR1)=t_{on}(TR2)$

Ovim odnosima odgovaraju srednje vrednosti izlaznog napona 66%, 50%, 33% respektivno

INAČE JE MOGUĆE POSTIĆI KONTINUALNU REGULACIJU SREDNJE VREDNOSTI

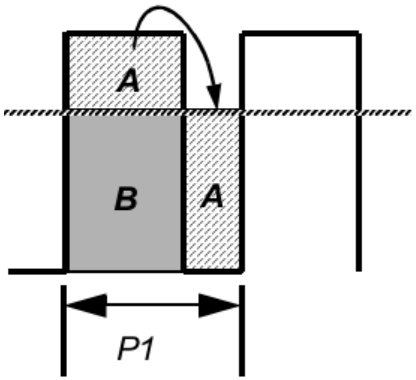
OSNOVNI PRINCIP DELOVANJA FILTRA



“m” - **m**ark

“s” - **s**pace

m:s=2:1



srednji napon

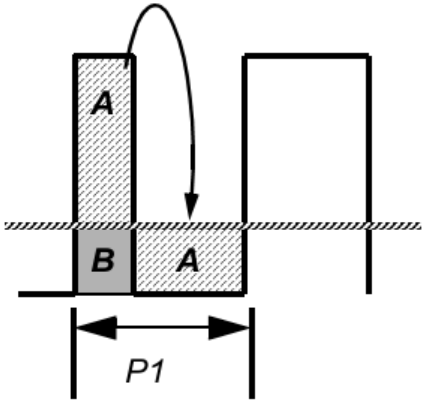
Filtriranje odnosa m:s se ostvaruje nisko propusnim filtrom (integrator)

Srednja vrednost je integral širine impulsa:

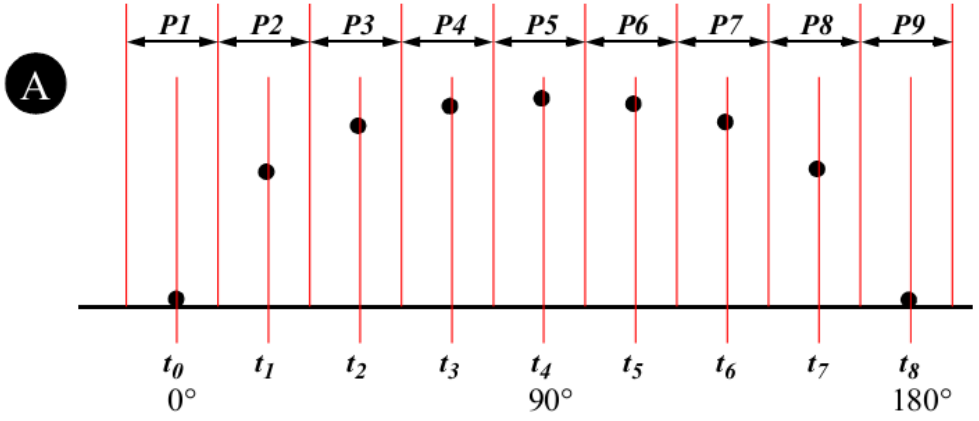
$$u = L \, di/dt$$

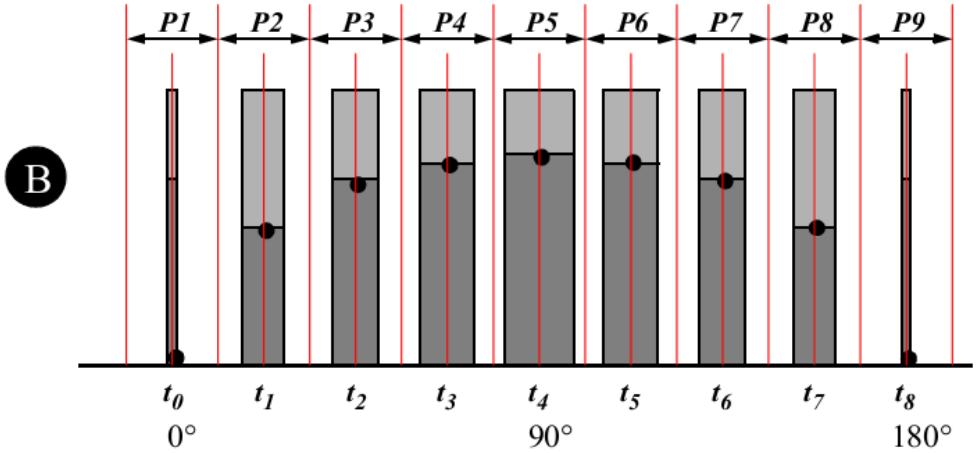
$$i = 1/L \int u(t)dt$$

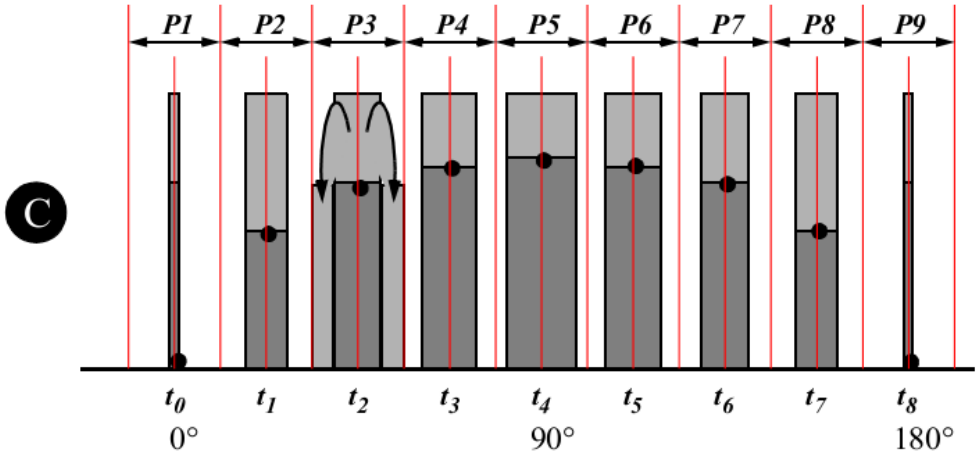
m:s=1:2



srednji napon







ŠIRINSKO IMPULSNA MODULACIJA
Pulse Width Modulation-PWM

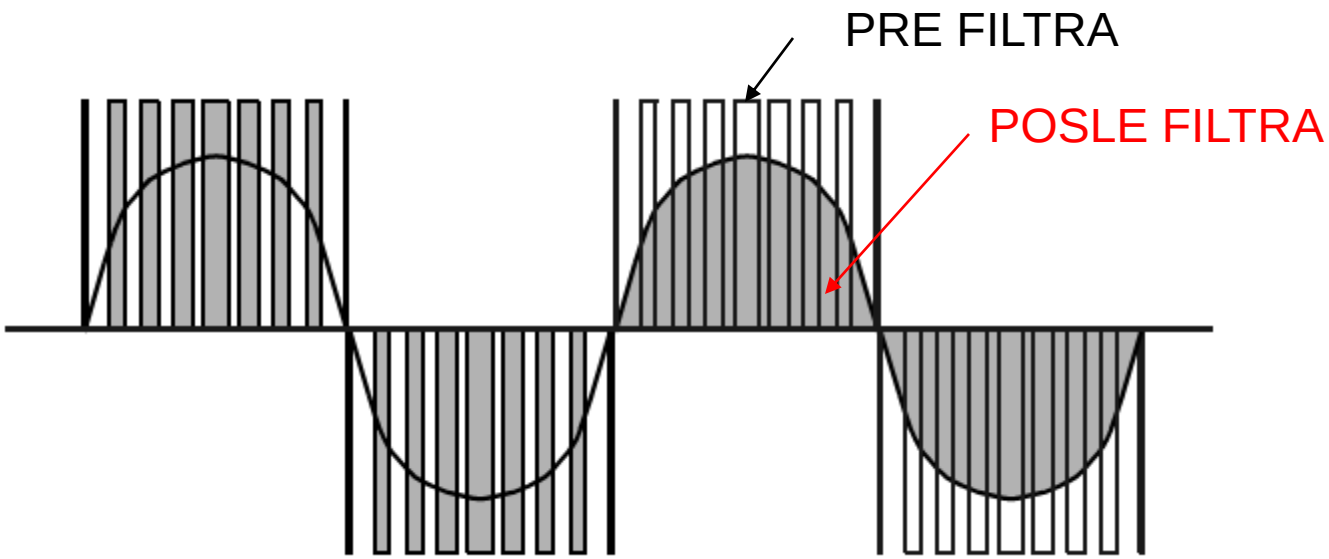
PRIKAZ A -proširenI prikaz pozitivnog Sinusnog polutalasa sa osam diskretnihvrednosti u trenutcima t1-t8. Ove vrednosti se poklapaju sa centrima širine impulsa na prikazu B

PRIKAZ B- Širine impulsa P1-P8 koji odgovaraju srednjim vrednostima na Prikazu A

PRIKAZ C- U intervalu P3 je prikazana promena širine impulsa, promenom odnosa *mark/space (m:s)* i njen uticaj na srednju vrednost u tom intervalu

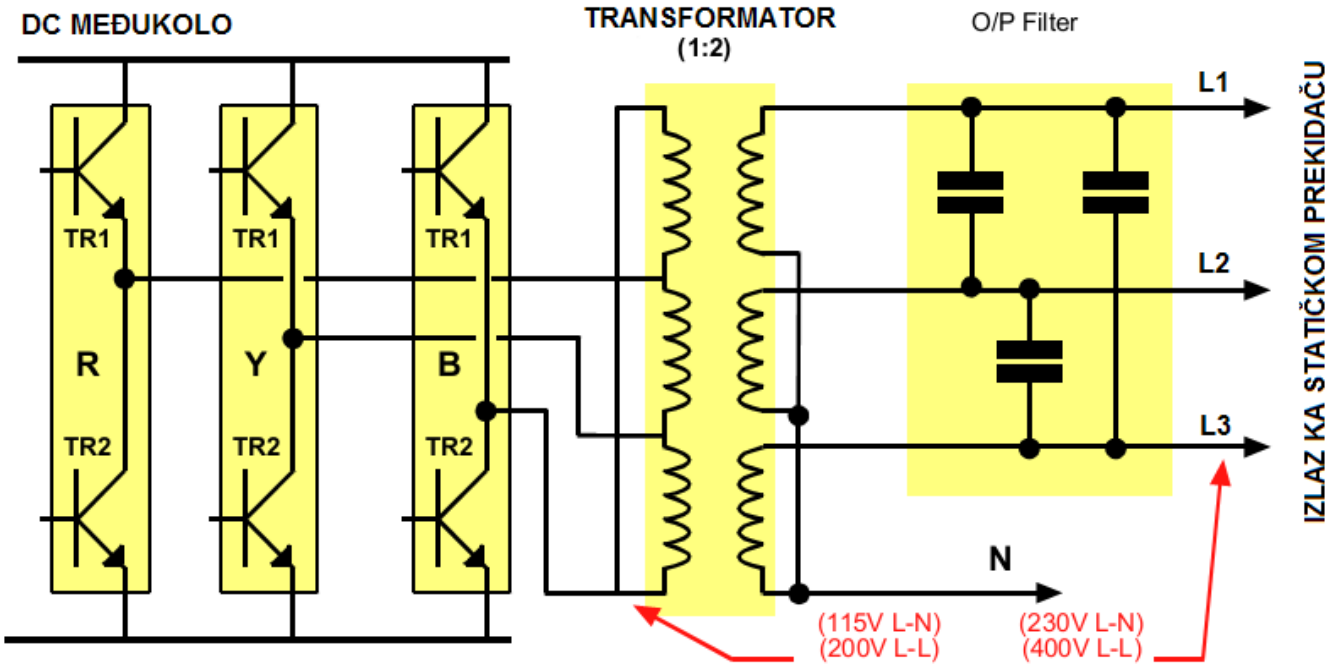
Osnovna učestanost Typ-50Hz
Modulaciona učestanost Typ-20kHz

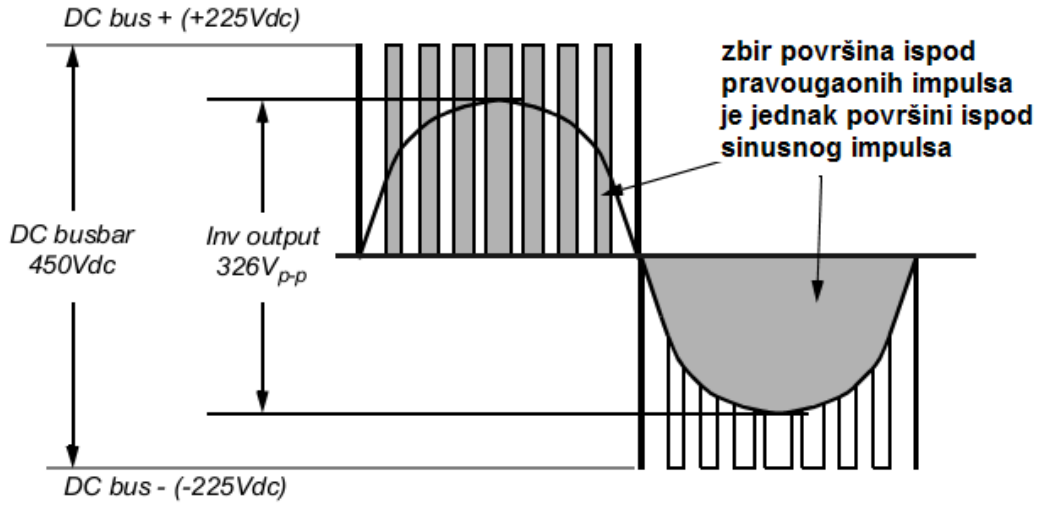
IZLAZNI NAPON INVERTORA



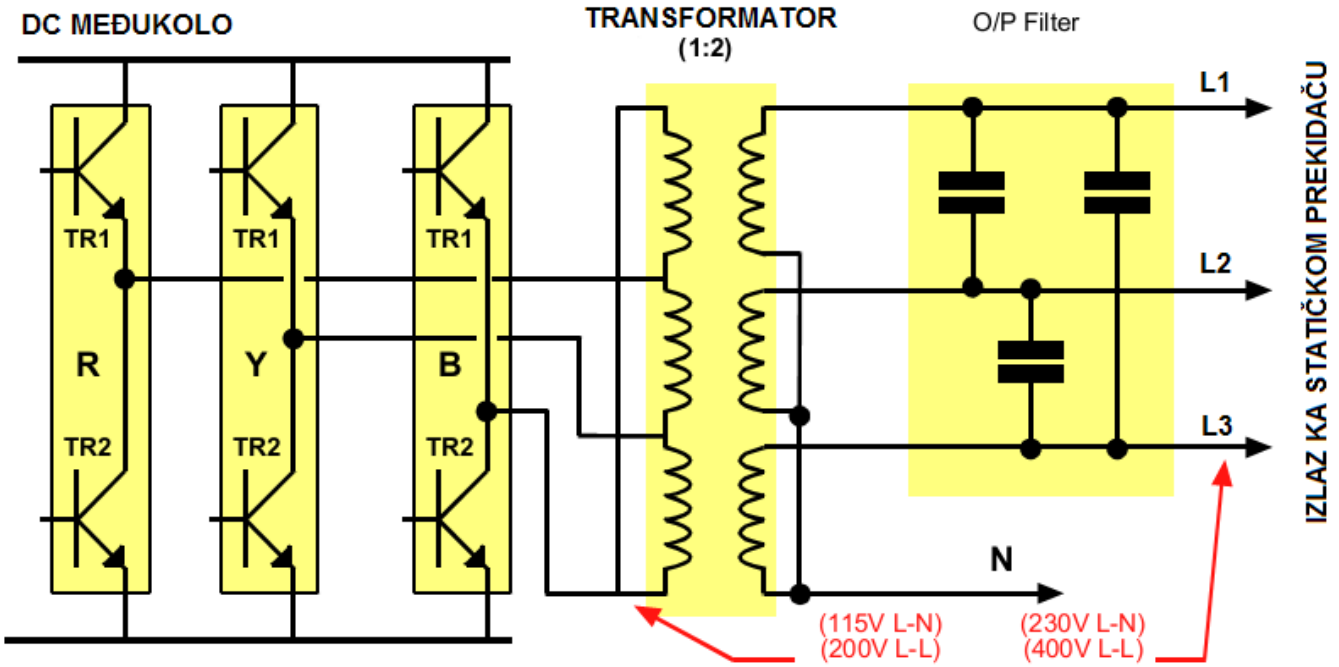
-Površina ispod sinusnog polutalasa je jednaka zbiru površina ispod svakog pojedinačnog pravougaonog impulsa
-Kontinualnim podešavanjem širine impulsa se postiže kontinualna promena trenutne vrednosti sinusnog talasa (ovo važi za kako za pozitivnu, tako i za negativnu poluperiodu

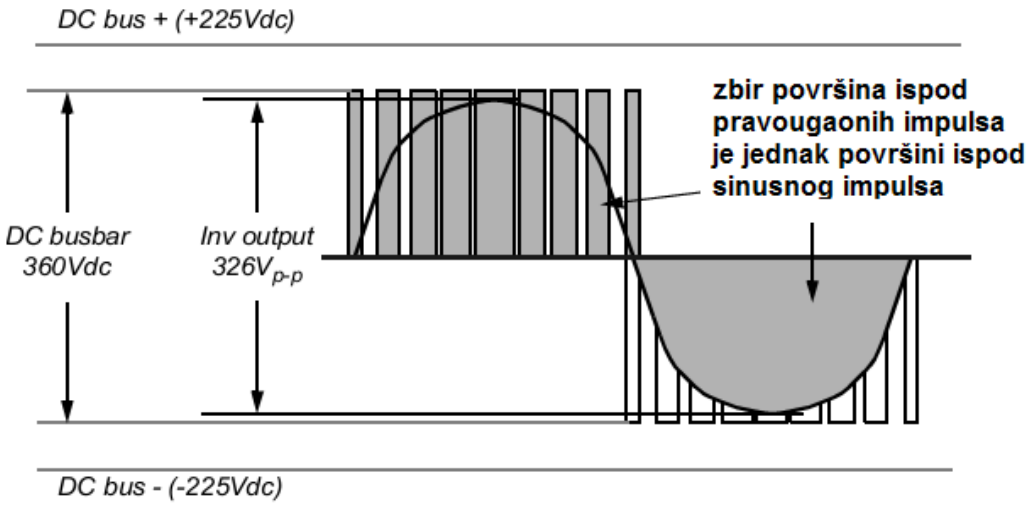
PWM regulacija pri povećanom naponu DC bus (450Vdc)



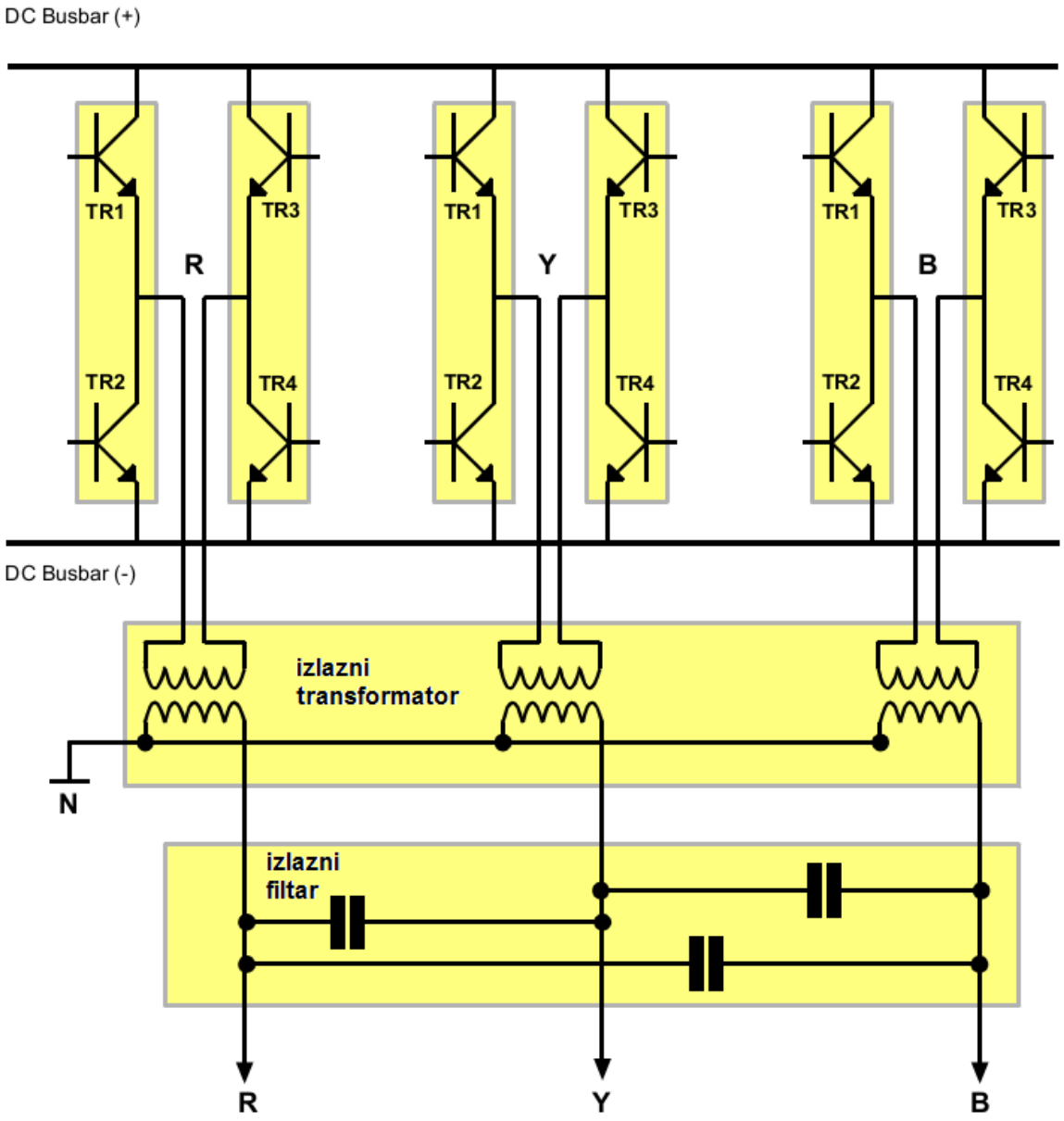


PWM regulacija pri sniženom naponu DC bus (360Vdc)





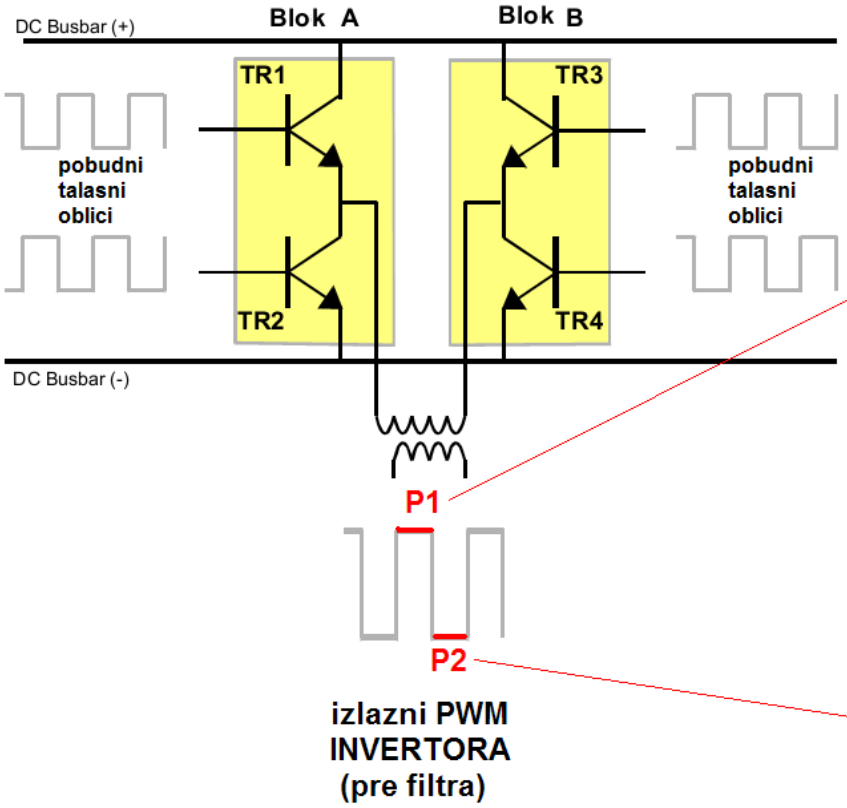
PRIKAZ TROFAZNOG INVERTORSKOG IZLAZA

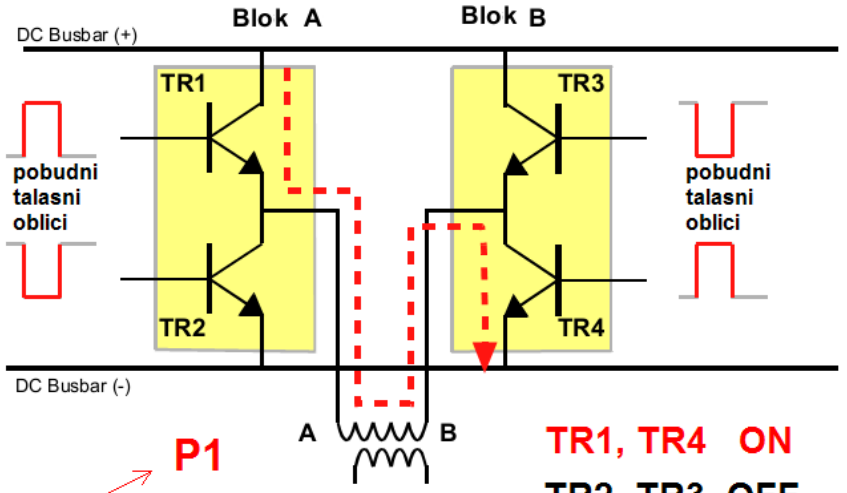


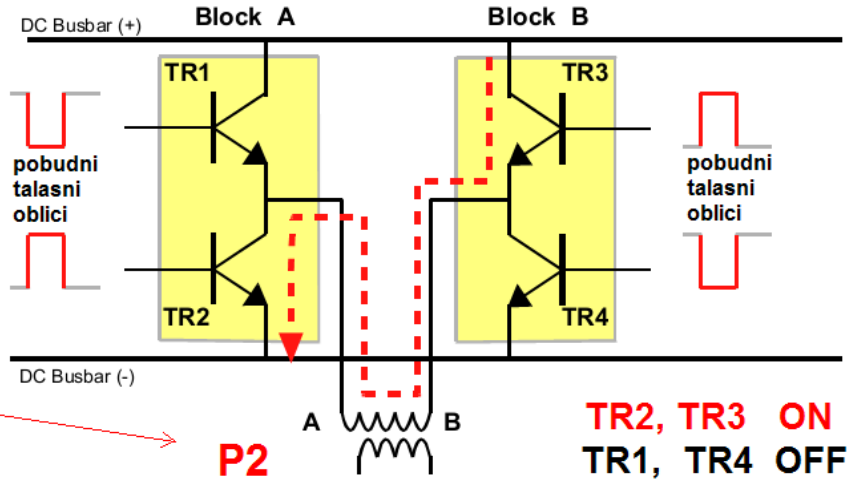
Konfiguracija sa tri monofazna transformatora čiji su sekundari međusobno vezani u spregu ZVEZDA sa izvedenim zvezdištem (nultim provodnikom

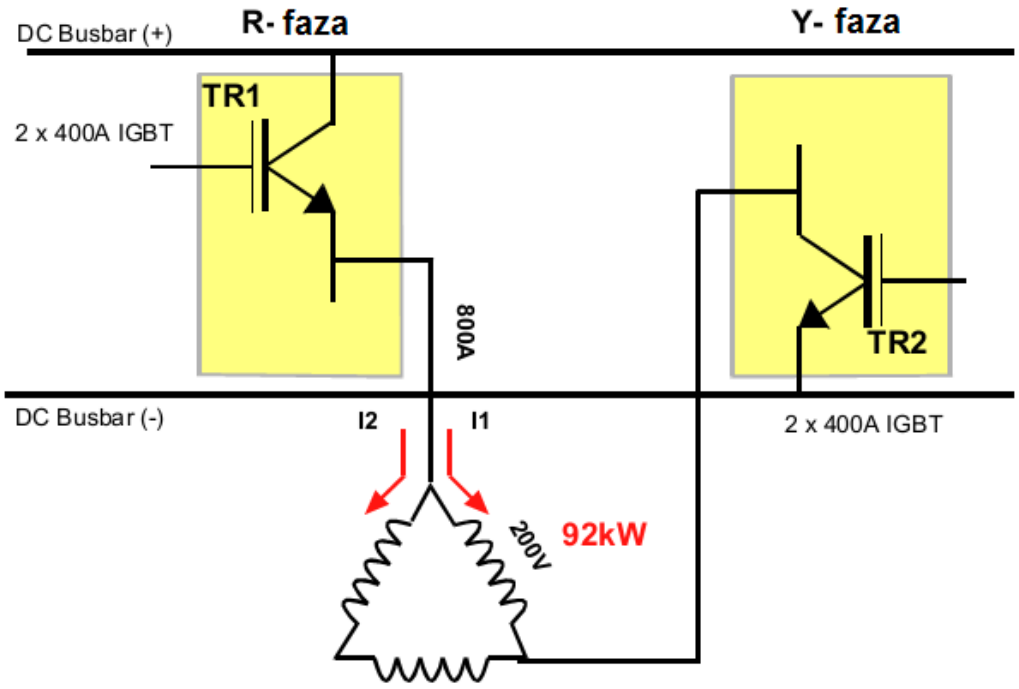
Ova konfiguracija podržava i nesimetrično trofazno opterećenje, drugim rečima pojedine faze mogu biti neravnomerno opterećene, tako da svaki invertorski most obezbeđuje regulaciju napona pripadajuće faze i regulaciju učestanosti

PRINCIP RADA JEDNE INVERTORSKE FAZE SA PUNIM TRANZISTORSKIM MOSTOM





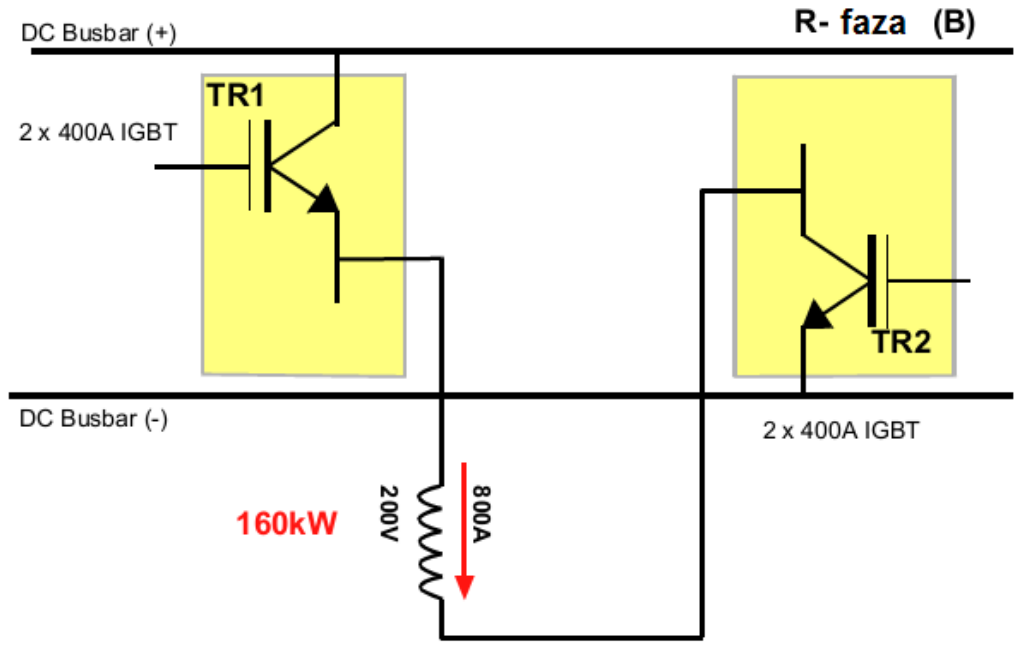




Single Ended-konfiguracija

Struja invertora se deli između dve paralelne grane, a primar transformatora je u sprezi TROUGAO

Snaga po jednoj fazi je 92kW



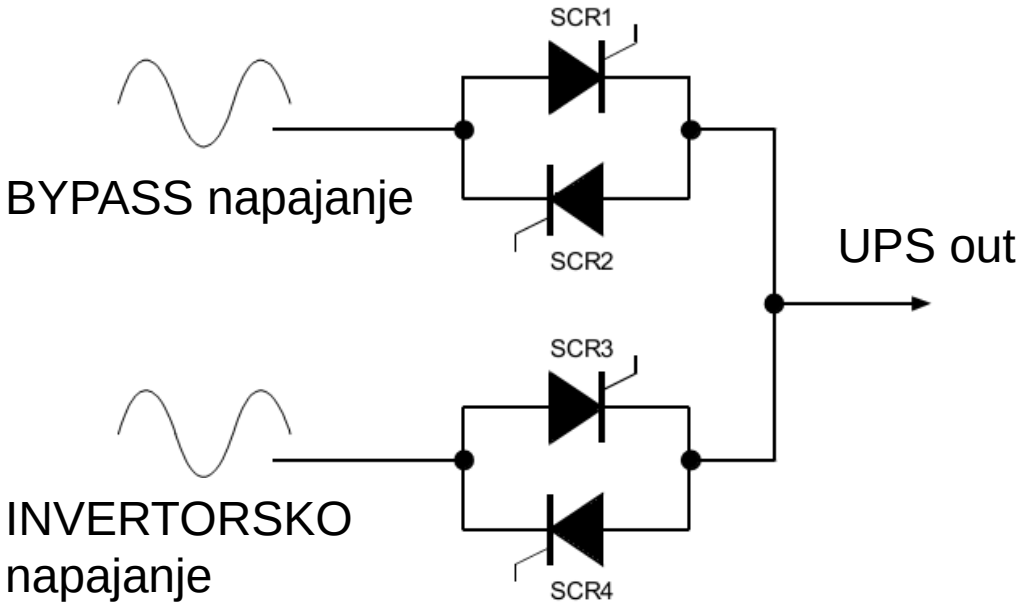
Double Ended-konfiguracija

Svaki primar se napaja iz svog invertora

Ova konfiguracija nudi 1.73 puta veću snagu.

Snaga po jednoj fazi je dakle 160kW

STATIČKI PREKIDAČ

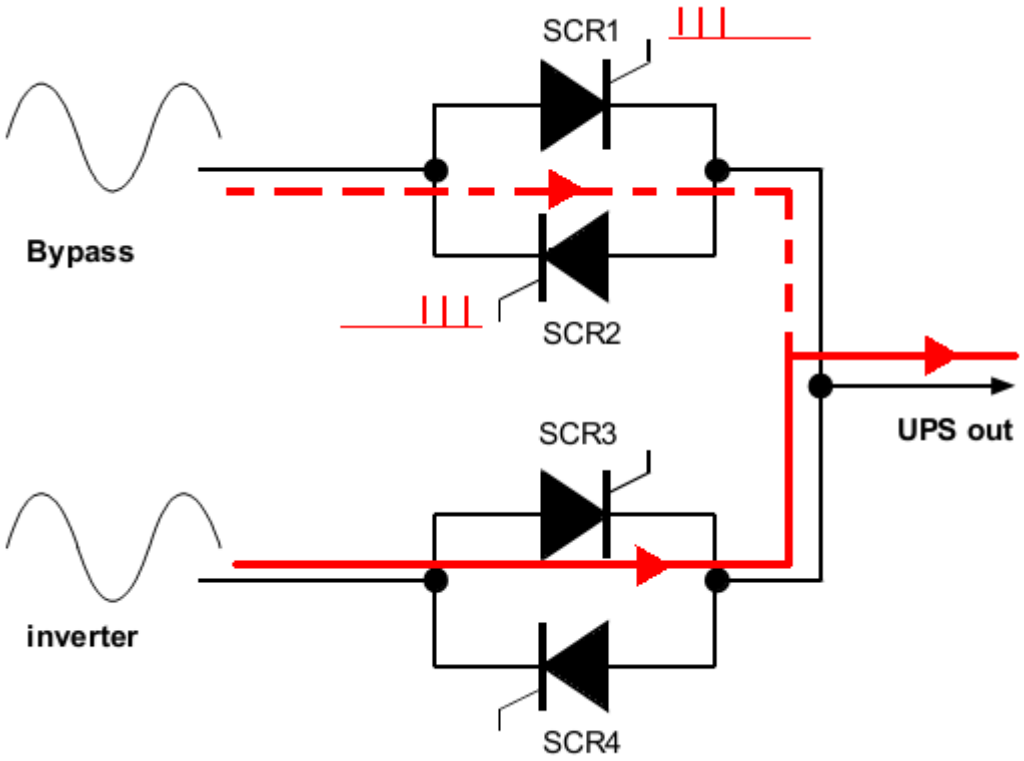


•Blok koji se naziva STATIČKI PREKIDAČ (STATIČKA PREKOLPKA) ima dva ulaza i jedan izlaz, dok svaki od ulaza sadrži antiparalelnu vezu tiristora

•Umesto tiristora mogu se koristiti prekidači, koji imaju manje gubitke u stanju vođenja, ali im je mana što su znatno sporiji od tiristora (SCR)

Tokom normalnog rada invertorski napon se prosleđuje preko SCR3-SCR4, dok su SCR1-SCR2 isključeni.
U slučaju problema sa DC bus napajanjem (baterijom), invertorom ili preopterećenjem invertora, kontrolno kolo statičke preklopke će identifikovati problem i prebaciće kritično opterećenje (UPS out) na BYPASS napajanje, odnosno vrši se prebacivanje vođenja sa SCR3,4 na SCR1,2 bez prekida

Trigerovanje (okidanje) tiristora se izvodi u trenutcima prolaska napona kroz nulu (tiristori imaju ulogu nulte sklopke).
Trigerovanjem SCR1,SCR2 dok još vode SCR3, SCR3 se dobija situacija da su u jednom kratkom vremenskom intervalu prisutni i BYPASS napajanje i INVERTORSKO napajanje

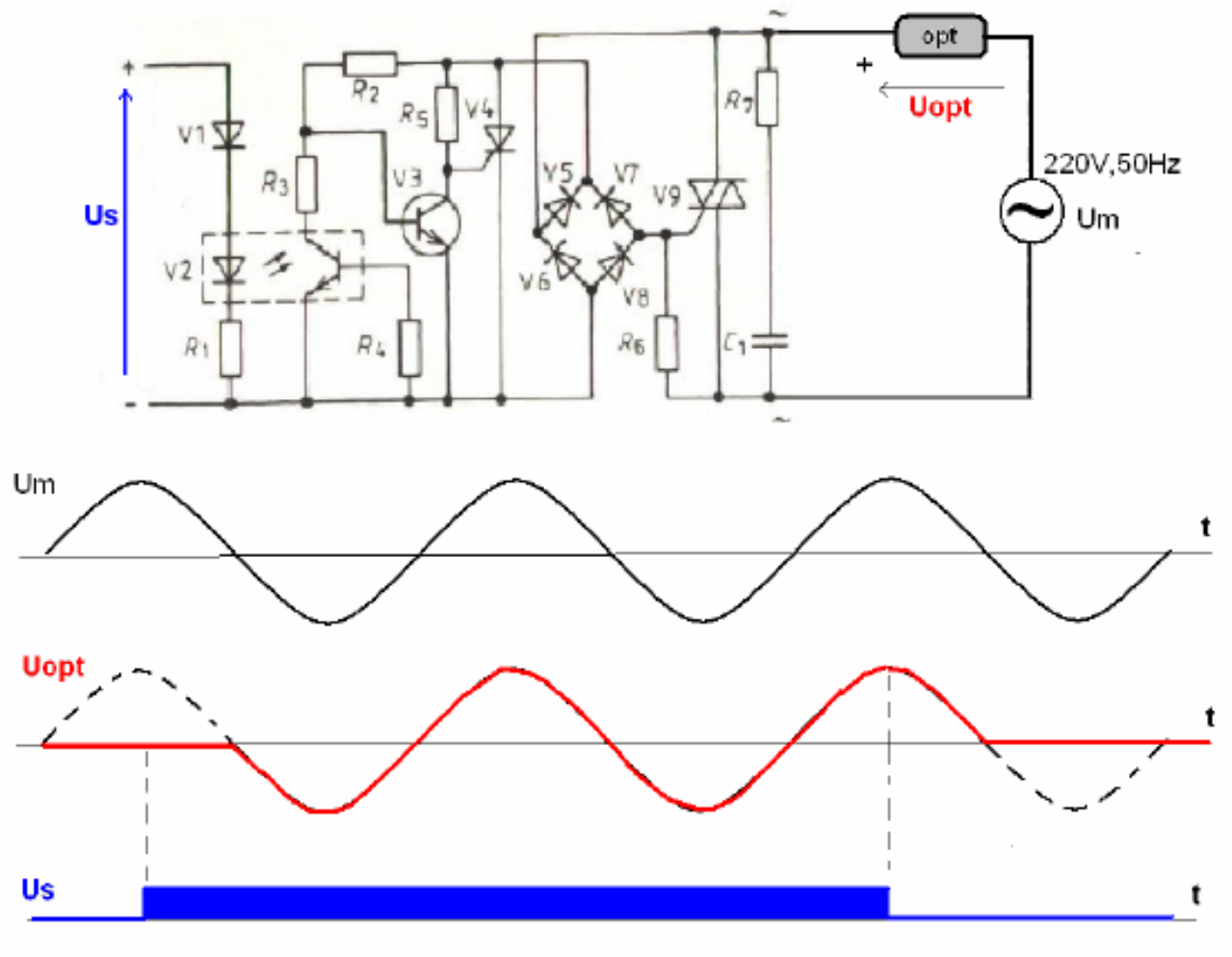


Pre nego što se ostvari prenos vođenja sa jedne na drugu tiristorsku grupu mora se ostvariti sinhronizacija napajanja

Da bi se izbeglo narušavanje isporuke električne energije kritičnom opterećenju, ako sistem nije sinhronizovan NEBI TREBALO DOZVOLITI TRANSFER SA JEDNE NA DRUGU GRUPU TIRISTORA I OBRNUTO!!!!

NULTA SKLOPKA

Uključuje opterećenje kod prolaska napona kroz nulu
Upravljanje optokaplerom
Elektronski poluprovodni releji

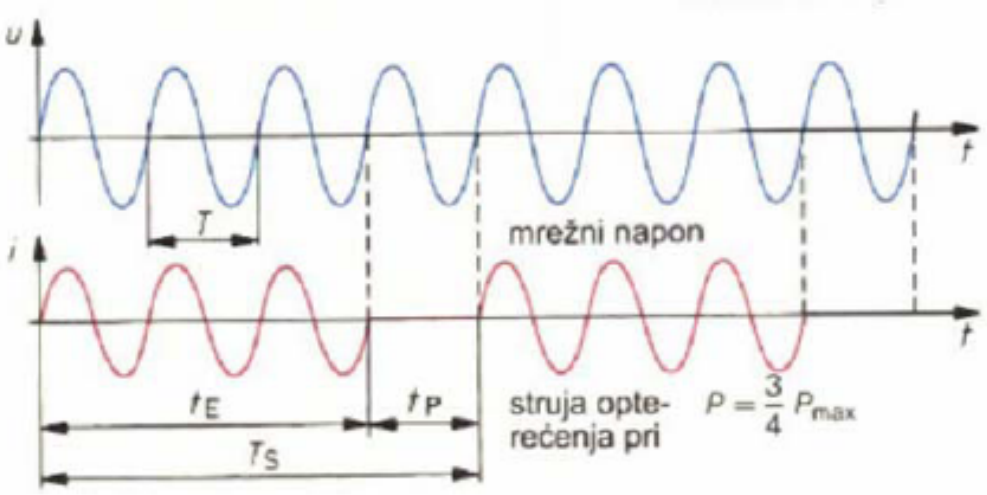


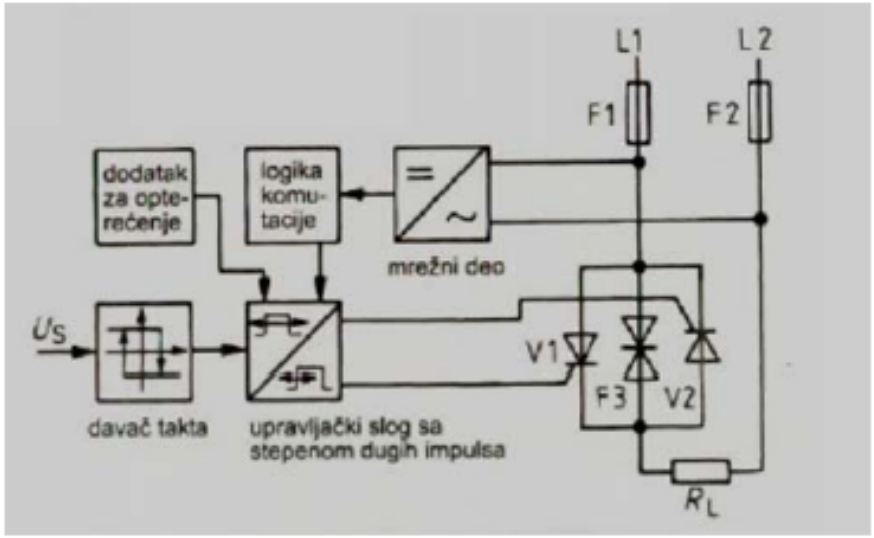
Prednosti:
-galvansko odvajanje upravljačkog kola i opterećenja
-uključivanje bez "odskakivanja"
-dug vek upotrebe
-neznatne radio smetnje
-velika brzina uključivanja

PRIMER:
Elektronski relej za AC struje 1-40A
Upravljački napon 3-30V DC

UPRAVLJANJE PAKETOM OSCILACIJA

Nulte sklopke koje uključuju opterećenje nakon podešenog broja perioda naizmeničnog napona deluju kao da su upravljane paketom oscilacija, odnosno kao puno-talasno upravljane.Srednja primljena snaga opterećenja može iznositi 0-100%.





PREDNOSTI:

-nema oscilacija u mreži jer je struja sinusoidna

-nema upravljačke reaktivne snage jer je faktor snage jednak 1

NEDOSTACI:

-nije prikladno za rasvetu zbog treperenja

-nije prikladno za pogone zbog trzanja

PRIMENA: regulacija grejanja I temperature

(peći za topljenje, sušionice, mašine za žarenje žice i odlivaka, mašine za obradu plastike)

$T=1/f$

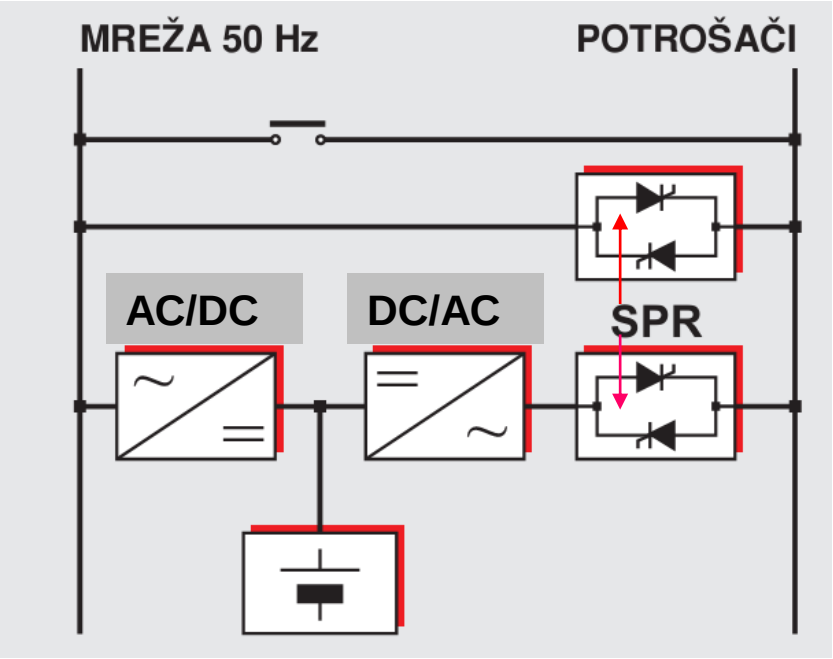
$T_S=t_E+t_P$

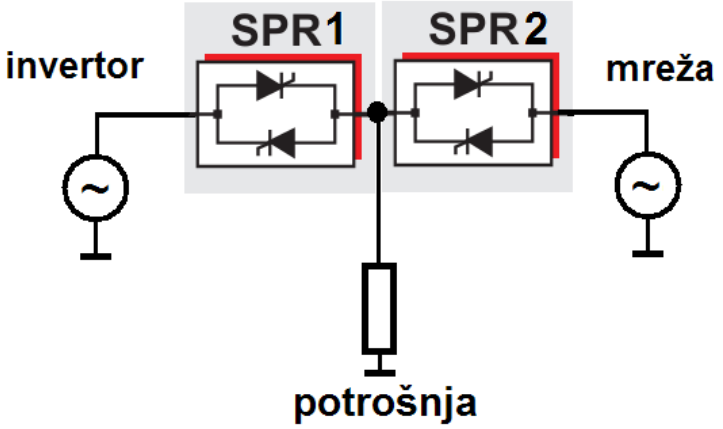
$P=(t_E/T_S)\cdot P_{max}$

$P_{max}=U^2/R$

ULOGA STATIČKE PREKLOPKE-primer na elektranama

- U elektranama postoji potreba za stalno prisutnim naponom 220 V 50 Hz koji treba da napaja elemente distribuiranog sistema za upravljanje.
- Taj osnovni zahtev se realizuje pomoću invertora, koji jednosmerni napon akumulatorskih baterija pretvaraju uželjeni naizmenični, koji je onoliko besprekidan koliko je besprekidan jednosmerni napon dobijen sa akumulatora.
- Pošto postoji mogućnost kvara invertora u toku rada, ili ispadanja jednosmernog napona iz nekog drugog razloga, jer se taj jednosmerni napon takođe razvodi po elektrani pa može da se injektuje smetnja iz nekog drugog uređaja u poljima razvodnog postrojenja, uvodi se statička preklopka, kao poseban uređaj.
- **Statička preklopke (SPR) omogućuju besprekidno prebacivanje napajanja potrošača sa invertora na rezervni izvor i obrnuto. One takođe svojim delovanjem na glavni oscilator invertora održavaju sinhronizam između invertora i rezervnog izvora.**
- Rezervni izvor može biti mreža ili kućni generator. U slučaju gubitka napona sa rezervnog izvora, invertor radi sa svojom frekvencijom. Po pravilu su potrošači spojeni na invertor, ako je on u radnom stanju.
- **Rešenje gde su potrošači spojeni stalno na rezervni izvor a invertor je u praznom hodu i spreman je da preuzme teret, nije dobro, zato što u trenutku gubitka napajanja sa rezervnog izvora može doći i do gubitka sinhronizma, a time i do kratkotrajnog gubitka napona na potrošačima.**



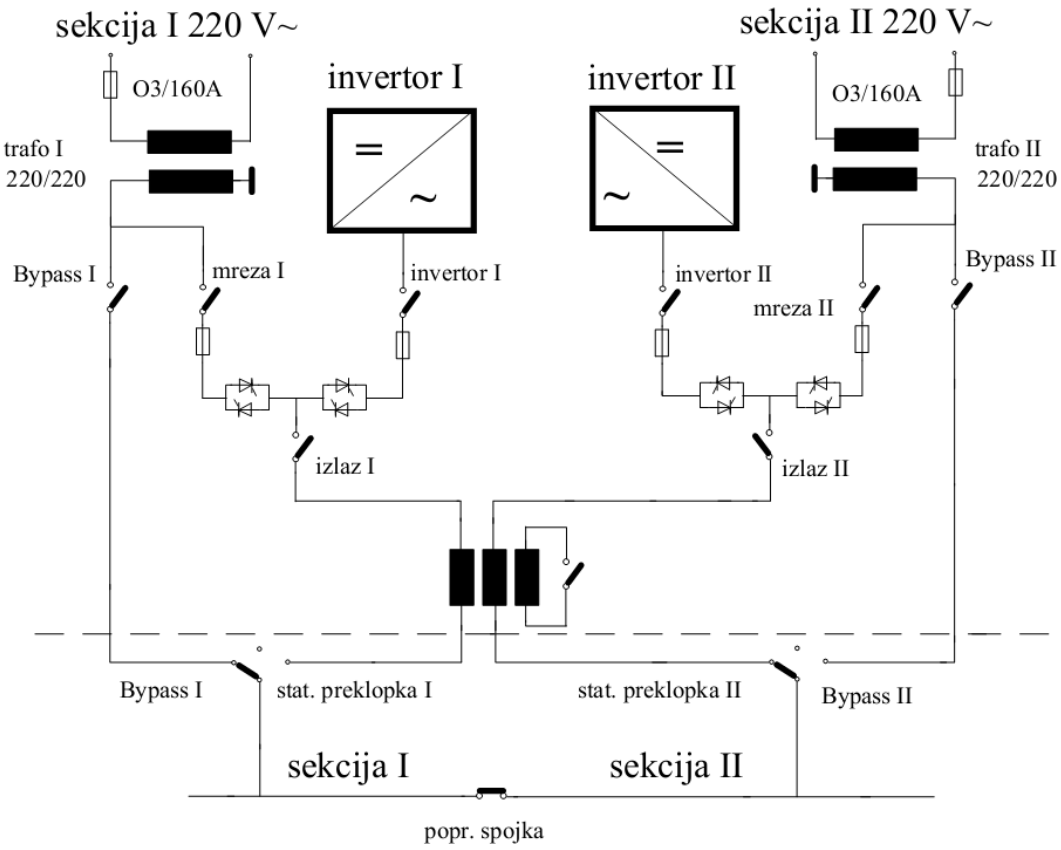


ŠTA SE KAO REŠENJA NAMEĆU U KONKRETNOJ PRAKSI?

- **Korišćenje dva invertora.** Pošto u energetskim objektima već postoje dve akumulatorske baterije, sa pripadajućim ispravljačima. Time se povećava pouzdanost u napajanju potrošača besprekidnim naponom, ali se uvodi novi režim rada, paralelni rad dva invertora. Time se takođe dolazi do zahteva za sinhronizaciju jednog invertora na drugi i zahteva za jednako deljenje tereta.

- **Korišćenje dva rezervna izvora napajanja**. Time se takođe postiže povećanje pouzdanosti, jer u slučaju kvara oba invertora i nestanka jednog rezervnog izvora napajanja ostaje drugi . Problem koji se uvodi ovim rešenjem je da naponi rezervnih izvora ne moraju među sobom biti sinhronizovani, pa se mora uvesti prioritet jednog rezervnog izvora u odnosu na drugi.

- Takođe, problem koji se javlja u praksi je da je napon rezervnog izvora nedovoljno kvalitetan, što se dešava kod dizel električnih agregata i kod malih hidro agregata, ako im je turbinski regulator slabih karakteristika. Posledica toga su varijacije napona i frekvencije, što utiče kvalitet i održavanje sinhronizma između invertorskog napona i napona rezervnog izvora.



Deljenje tereta je ostvareno pomoću transformatora za izjedna čavanje struja uzetih iz invertora.

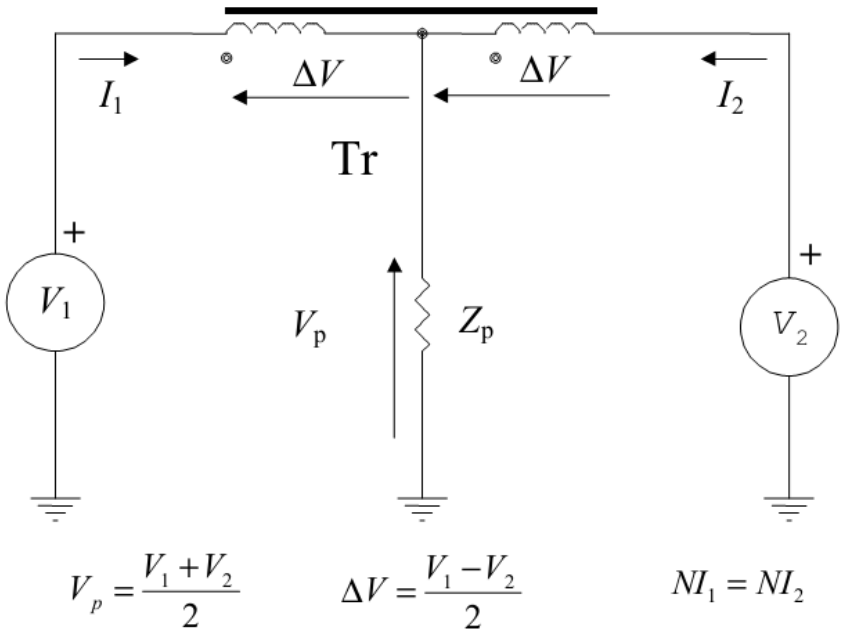
Da bi se postigle zahtevane karakteristike i povećala pouzdanost u radu, obično se koristi rešenje sa dve statičke preklopke koje su upravljane pomoću µC koje među sobom razmenjuju informacije radi postizanja sinhronizacije invertorskih napona na odgovarajuće reference.

Svaki µC vodi računa o lokalnom saobraćaju signala za sinhronizaciju, o postignutom sinhronizmu i o tome koja grupa antiparalelnih tiristora treba da dobije nalog za paljenje.

Saobraćaj signala za sinhronizaciju je tako rešen da se oba invertora sinhronizuju na onaj ulazni napon sa kućnog agregata koji postoji, odnosno ima prioritet.

U slučaju gubitka oba ulazna napona sa kućnih agregata, sinhronizuje se invertor II na invertor I.

PARALELAN RAD DVA IZVORA I IZJEDNAČENJE NJIHOVIH STRUJA



Transformator Tr na svojim krajevima ima razliku trenutnih vrednosti napona izvora V1 i V2, i projektuje se tako da mu je prenosni odnos 1:1 i nazivni napon oko 10% nazivnog napona izvora.

U radnom stanju kada izvori rade paralelno, tiristori simultano dobijaju pakete impulsa za paljenje. Tada je takođe potrebno da greška sinhronizacije napona izvora V1 i V2 bude što manja.

Već relativno mala fazna razlika može dovesti do zasićenja transformatora za izjednačavanje struje, Tr i time do havarije statičke preklopke.

Obično je maksimalno dozvoljena greška sinhronizacije ispod 500 μs, a teško je postići sinhronizaciju sa greškom manjom od 100 μs.

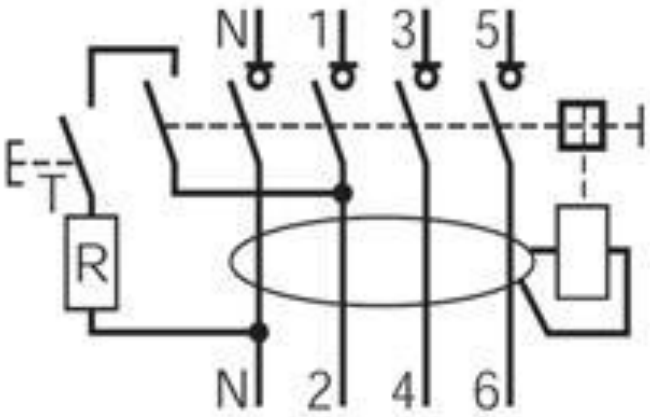
Sve dok se transformator za deljenje struje ne zasiti, ampernavojci jednog namotaja su jednaki ampernavojcima drugog namotaja, pa su onda jednake i struje koje se uzimaju iz izvora

- Proizvođači besprekidnih napajanja treba da daju detaljne podatke o sinhronizaciji i načinu na koji se ona izvodi
- Mrežna učestanost je relativno stabilna (u opsegu ±0.5%)
- Međutim ukoliko STAND-BY generator napaja UPS onda je veoma važno obezbediti stabilnost njegove izlazne učestanosti (do max ±5%) kako bi se mogla izvršiti korektno sinhronizacija

ZAŠTITA U SISTEMIMA BESPREKIDNOG NAPAJANJA

- Osnovni standard koji se koristi u sistemima zaštite besprekidnih napajanja je CEI EN 62040-1-1
- Problem selektivnosti
- Razmotrićemo nekoliko primera zaštite kao i tipove zaštitnih elemenata (prekidača, osigurača, FID sklopki) koji se najčešće koriste
- Od interesa su dva režima rada sistema besprekidnog napajanja: “ostrvski” rad i rad na mreži

Zaštitni Uređaj Diferencijalne Struje - ZUDS ili FID SKLOPKA



ZUDS (zaštitni uređaj diferencijalne struje), ili poznatiji pod nazivom FID sklopka je uređaj koji reaguje na pojavu diferencijalne struje.

Glavni delovi ZUDS -a su:

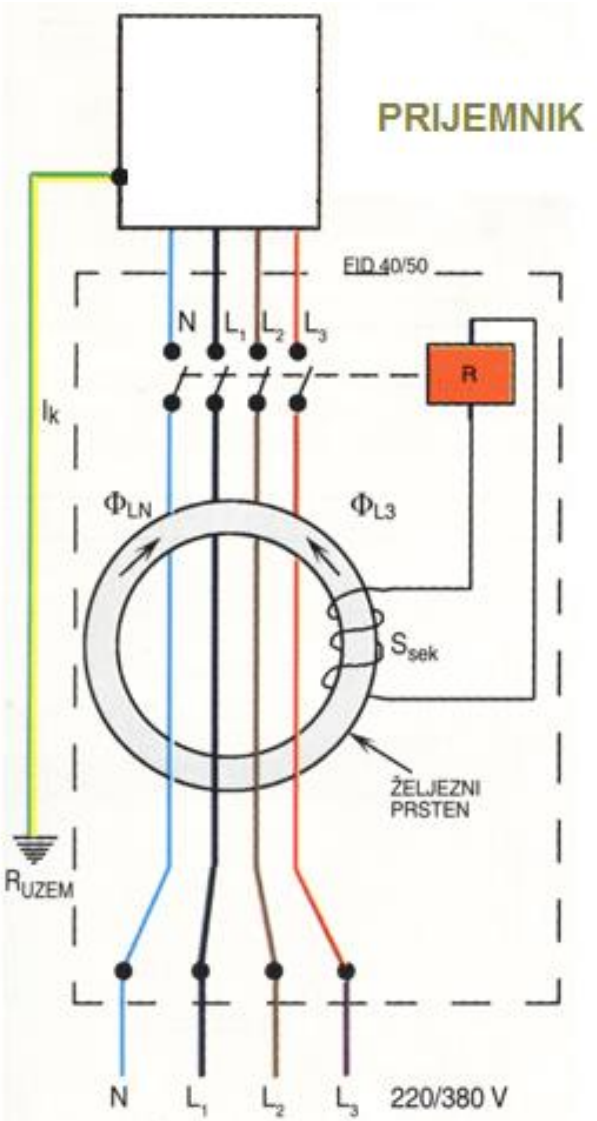
- diferencijalni transformator
- sklopni aparat.

Izgled konstrukcija zaštitne diferencijalne strujne sklopke prikazan je na slici.

•Pritiskom na taster T se simulira kvar koji dovodi do delovanja sklopke.

•Ponovno uključenje sklopke se postiže podizanjem preklopnog prekidača koji se nalazi ispod tastera.

Zaštitnu Uređaj Diferencijalne Struje (ZUDS) - princip rada



Princip rada zaštitne strujne sklopke koja se aktivira pri pojavi razlike u struji

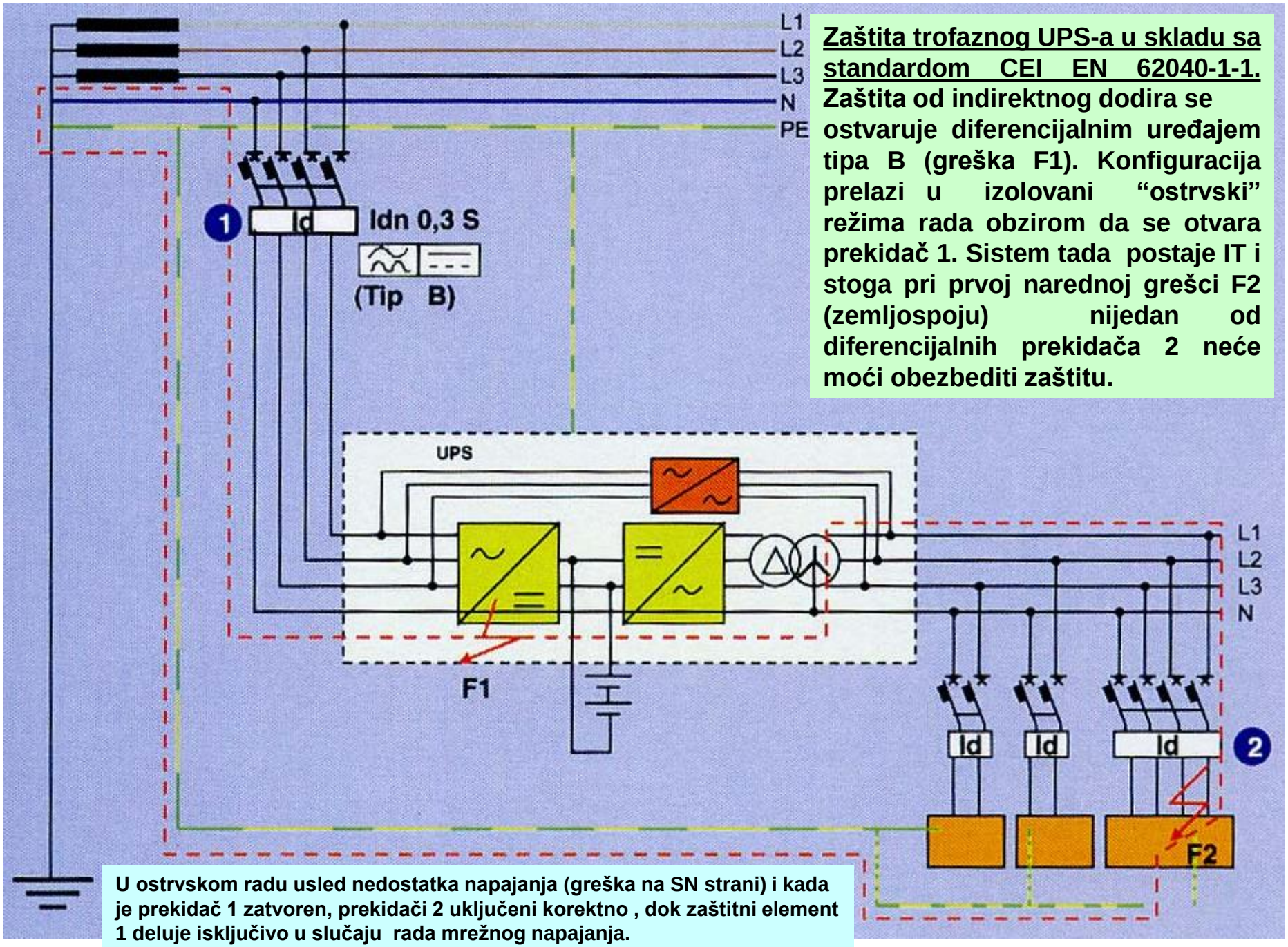
•Kod diferencijalnog strujnog transformatora svi fazni provodnici i nula prolaze kroz jezgro transformatora.

•U normalnom pogonu vektorski zbir struja kroz primarni deo transformatora jednak je nuli.U tom slučaju jednak je nuli zbir magnetnih flukseva, pa se zbog toga u sekundarnom kolu transformatora neće indukovati nikakav napon.

•Ako dođe do kvara na uređaju ili u instalaciji iza ZUDS –a, deo struje se zatvara kroz zaštitni provodnik, a deo se vraća nultim provodnikom. Ta razlika struja će izazvati pojavu magnetnog fluksa u jezgru diferencijalnog transformatora, pa će se u sekundaru indukovati struja koja će preko mehanizma za okidanje povući (otvoriti) kontakte sklopke.

•U instalacijama zaštitne strujne sklopke svi provodni delovi uređaja koji normalno nisu pod naponom moraju biti uzemljeni tako da se na njima ne sme pojaviti napon veći od 65 V.

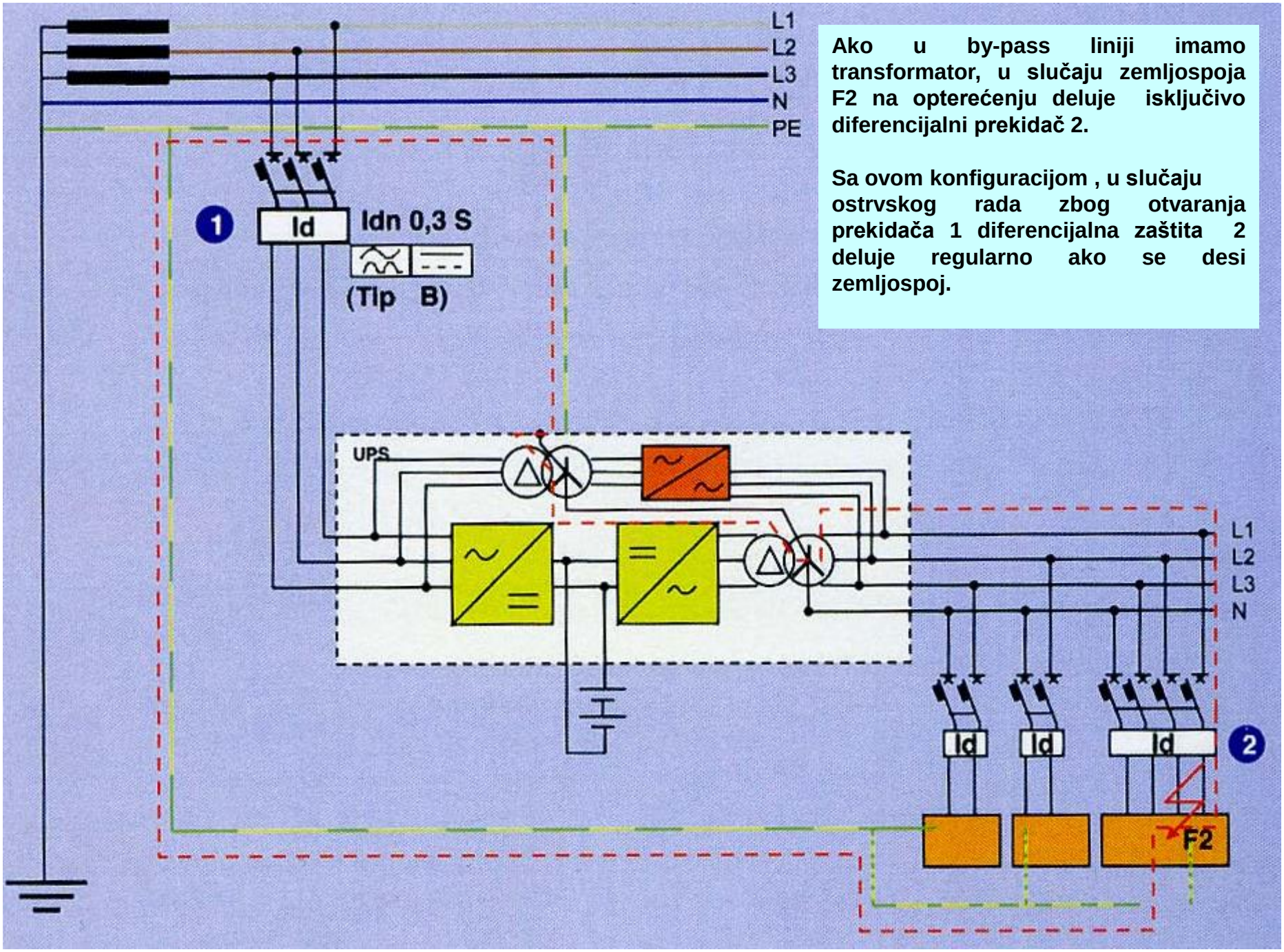
•**Neutralni provodnik ne sme se spojiti sa uzemljenim delovima.**



Zaštita trofaznog UPS-a u skladu sa standardom CEI EN 62040-1-1.

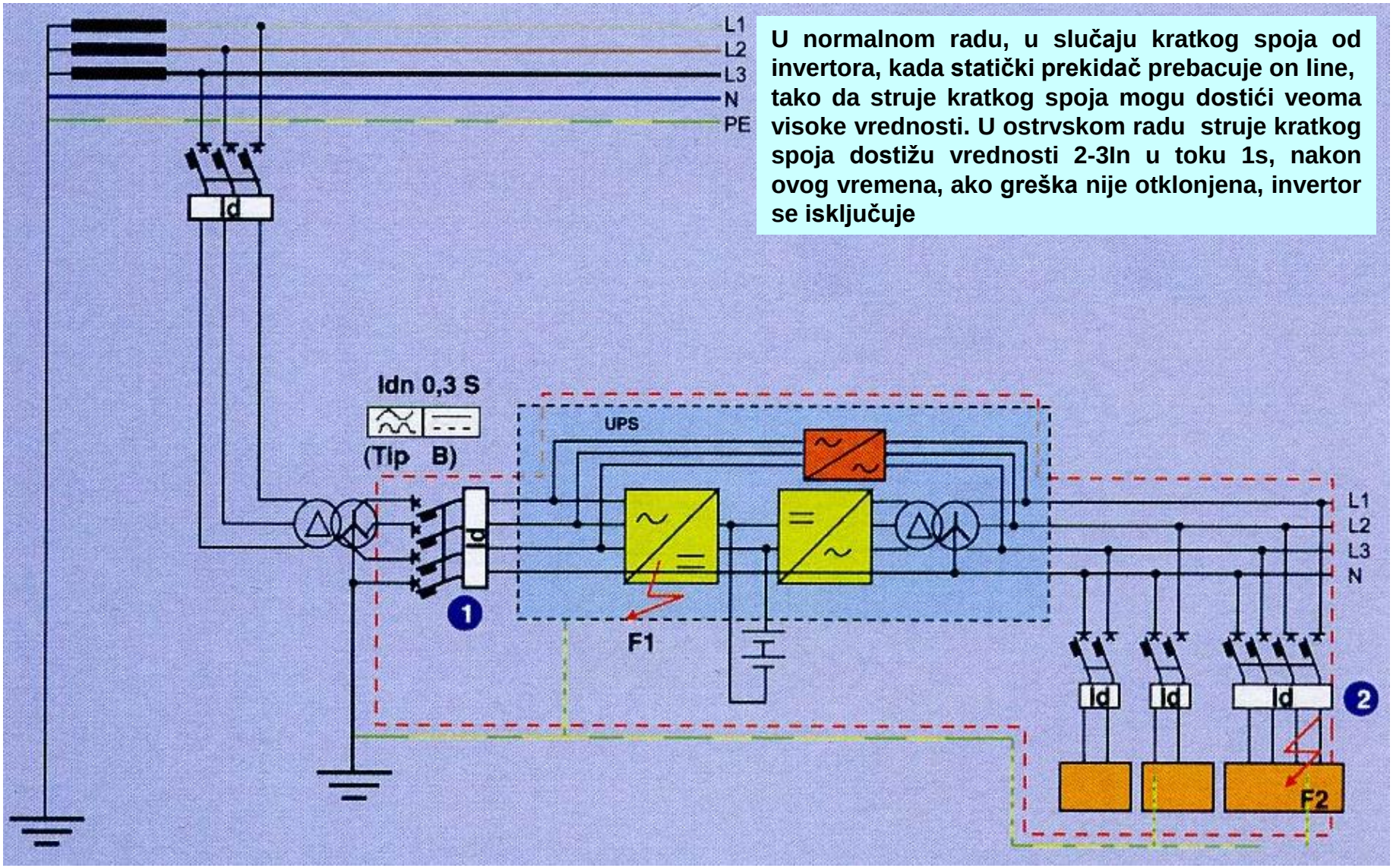
Zaštita od indirektnog dodira se ostvaruje diferencijalnim uređajem tipa B (greška F1). Konfiguracija prelazi u izolovani "ostrvski" režima rada obzirom da se otvara prekidač 1. Sistem tada postaje IT i stoga pri prvoj narednoj grešci F2 (zemljospoju) nijedan od diferencijalnih prekidača 2 neće moći obezbediti zaštitu.

U ostrvskom radu usled nedostatka napajanja (greška na SN strani) i kada je prekidač 1 zatvoren, prekidači 2 uključeni korektno , dok zaštitni element 1 deluje isključivo u slučaju rada mrežnog napajanja.



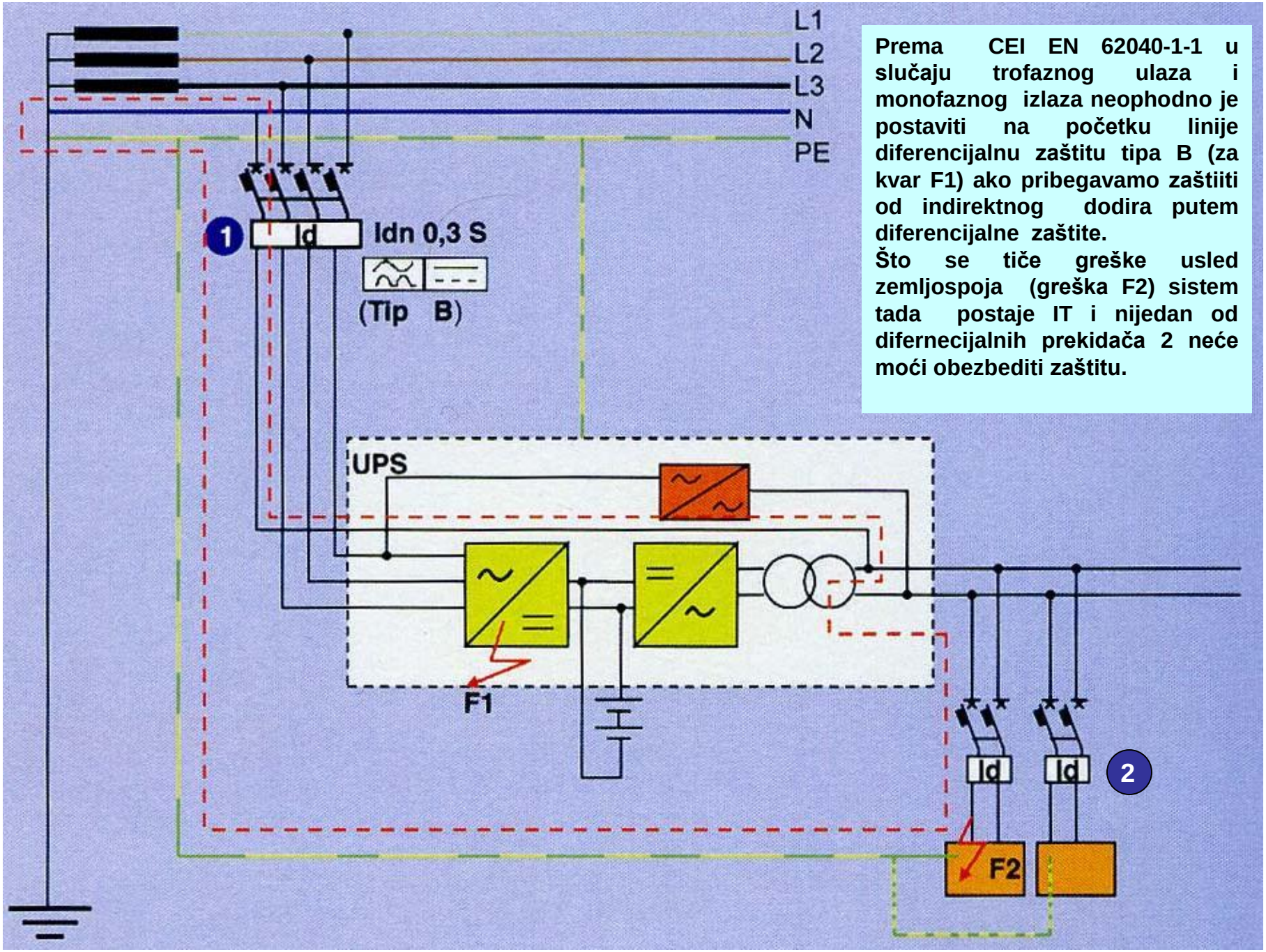
Ako u by-pass liniji imamo transformator, u slučaju zemljospoja F2 na opterećenju deluje isključivo diferencijalni prekidač 2.

Sa ovom konfiguracijom , u slučaju ostrvskog rada zbog otvaranja prekidača 1 diferencijalna zaštita 2 deluje regularno ako se desi zemljospoj.



U normalnom radu, u slučaju kratkog spoja od invertora, kada statički prekidač prebacuje on line, tako da struje kratkog spoja mogu dostići veoma visoke vrednosti. U ostrvskom radu struje kratkog spoja dostižu vrednosti 2-3In u toku 1s, nakon ovog vremena, ako greška nije otklonjena, invertor se isključuje

Konfiguracija sa dva transformatora, .jedan na ulazu u UPS siatem a drugi na izlazu invertora. UPS i njegovi korisnici su povezani na sistem TN-S. U normalnom radu (ne ostrvskom) u slučaju kvara F1 deluje diferencijalna zaštita 1, a ako se desi kvar F2 deluje Isključivo diferencijalna zaštita 2, ukoliko se kordinira sa stanovišta selektivnosti sa zaštitnim prekidačem 1.
U slučaju ostrvskog rada diferencijalna zaštita 1 deluje , pošto je ovaj rad nezavisan od mrežnog napajanja.



Prema CEI EN 62040-1-1 u slučaju trofaznog ulaza i monofaznog izlaza neophodno je postaviti na početku linije diferencijalnu zaštitu tipa B (za kvar F1) ako pribegavamo zaštiiti od indirektnog dodira putem diferencijalne zaštite.

Što se tiče greške usled zemljospoja (greška F2) sistem tada postaje IT i nijedan od difernecijalnih prekidača 2 neće moći obezbediti zaštitu.

LITERATURA

- W.Kaight, A.King, "*Uninterruptible Power Supplies*" , McGraw-Hill, 2004
- A.Kusko, *"Emergency/standby power systems",* McGraw-Hill, New York, 1989
- UPS theory, A.B.C training manual Issue 1, January 2002
- D.Rajković, Ž.Janda, "Sistemi za besprekidno napajanje električnom energijom", Agencija Spridonović, Beograd, 1999
- Ž.Janda,P.Ninković, R.Prole, "Mikroprocesorski vođena statička preklopka sa paralelnim radom invertora", Institut N.Tesla, X Simpozijum Energetska Elektronika 1999, N.Sad
- Z.Radaković, M. Jovanović, *Specijalne električne instalacije niskog napona,* Akademska misao, Beograd, 2008.
- N.Pandžić, "Novi pristupi projektovanju sistema za besprekidno napajanje", INFOTEH- Jahorina, 2009.

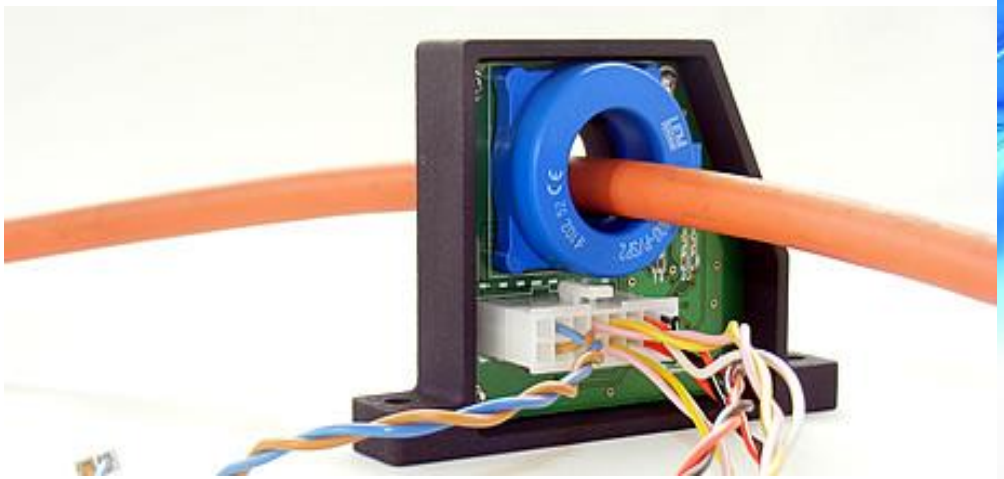
HVALA NA PAŽNJI!!!

PITANJA!!!

Visoka škola elektrotehike i računarstva
strukovnih studija- Beograd,
Osnovne studije, NET

Električni
Pretvarači
Snage

TEHNIKE I METODE MERENJA STRUJE I NAPONA U KOLIMA ELEKTROENERGETSKIH PRETVARAČA



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

UVOD

- Merenje napona i struje imaju veliki značaj u monitoringu i dijagnostici električnih mašina i transformatora, ali i u regulisanim elektromotornim pogonima
- Takođe ova merenja predstavljaju osnov za merenje snage (aktivne, reaktivne i prividne) električnih mašina
- Ova merenja se pored monitoringa i ispitivanja električnih mašina koriste i radi ostvarivanja nekoliko veoma bitnih funkcija: zaštita, upravljanje, regulacija snage i sl.
- Veoma bitno je imati visoke performanse strujnih i naponskih merenja, odnosno mernih uređaja i senzora, kako bi se ostvarile prethodno pomenute funkcije
- Koji su to najbitniji parametri koje merni sistem ili merni uređaj mora imati, a koje utiču na povećanje njegovih performansi?

NAJZNAČAJNIJI PARAMETRI MERNIH UREĐAJA

- Tačnost
- Cena
- Opseg struje ili napona (poželjno je da bude što veći)
- Izolacija od energetskog kola
- Linearnost
- Stabilnost (naročito temperaturna)
- Otpornost na tranzijente (dv/dt)
- Veliku brzinu odziva
- Kompatibilnost sa ostatkom kola u koje se ugrađuju

TIPOVI MERNIH INSTRUMENATA

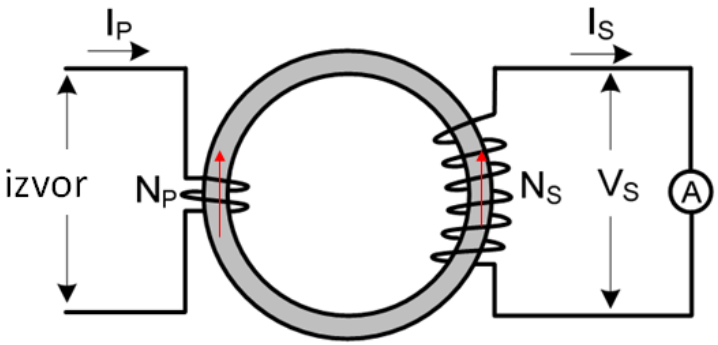
- Za merenje struje i napona se koriste, prema principu rada, mehanički i elektronski merni instrumenti, a prema načinu prikazivanja analogni i digitalni instrumenti.
- Danas su primeni uglavnom elektronski, digitalni instrumenti, mada u laboratorijskim primenama prevlađuju mehanički, analogni instrumenti.
- Za merenje jednosmernih veličina obično se koriste mehanički instrumenti sa "kretnim kalemom", čije je pokazivanje proporcionalno sa srednjom vrednošću merene veličine, a skala im je praktično linearna.
- Za merenje naizmeničnih veličina obično koriste mehanički instrumenti sa "mekim gvožđem", čije je pokazivanje proporcionalno sa efektivnom vrednošću merene veličine, a skala im je u osnovi nelinearna.
- Instrumenti sa kretnim kalemom imaju preko deset puta manju potrošnju i obično veću tačnost, u odnosu na instrumente sa mekim gvožđem.

MERNI TRANSFORMATORI

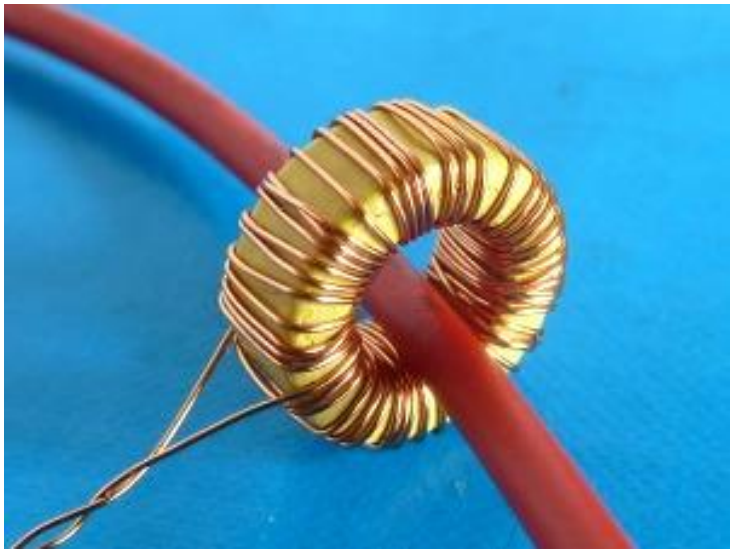
- U ovom predavanju neće biti posebno reči o merenjima relativno malih struja i napona, koje se mogu izvesti standardnim instrumentima (ampermetrima i voltmetrima) neposredno uključenim umerno strujno kolo.
- Ova merenja se obično izvode u laboratorijskim uslovima ili eventualno u slučajevima ispitivanja električnih mašina
- Pri većim strujama i naponima (kakve se imaju u monitoringu) direktna merenja struje i napona, postaje nepraktično i teško izvodljivo, pa se tada upotrebljavaju merni šantovi **ili merni transformatori.**
- **Merni transformatori** smanjuju merene struje i napone na vrednosti koje su podesne za merenje standardnim instrumentima: na nominalne struje od 1A ili 5A i nominalne napone od 100V, 200V ,$100\sqrt{3}$V i $200\sqrt{3}$V .
- Pored ovoga ovi merni transformatori služe za galvansku izolaciju mernih instrumenata od visokog napona, kao i lica koja rukuju sa ovim instrumentima, i na ovaj način rukovanje njima postaje bezopasno.

STRUJNI MERNI TRANSFORMATORI

- **Strujni merni transformatori** se upotrebljavaju za merenje struja velikih vrednosti na niskom naponu, koje bi inače bilo teško meriti nekom direktnom metodom, kao i za merenje struja relativno malih vrednosti koje se imaju na visokom naponu (primena u relejnoj zaštiti).
- Odnos primarne i sekundarne struje *(konstanta strujnog transformatora Kn*) približno je obrnuto srazmeran odnosu broja primarnih i sekundarnih navojaka.
- Primarni namotaji strujnog transformatora sastoji se od jednog ili nekoliko namotaja relativno velikog poprečnog preseka provodnika, povezanih redno u merno strujno kolo.
- Sekundarni namotaj se sastoji od većeg broja namotaja relativno malog poprečnog preseka provodnika, i priključuje se na merne instrumente sa zanemarljivim unutrašnjim otporom (ampermetri, redni namoti vatmetra, brojila).
- Stoga je radni režim strujnog transformatora je praktično režim kratkog spoja.



$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{I_S}{I_P} = \frac{N_P}{N_S}$$



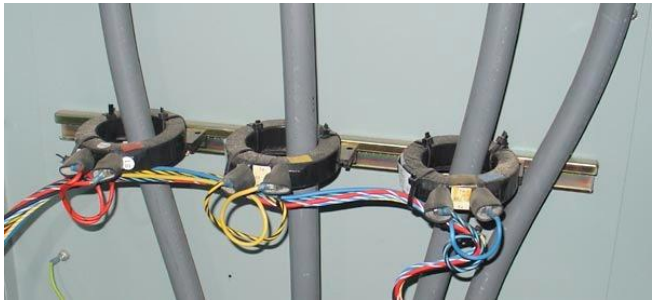
STANDARDIZOVANE VREDNOSTI PRIMARNIH i SEKUNDARNIH STRUJA

- Nominalna vrednost sekundarne struje je standardizovana i iznosi 5A za strujne transformatore za merenje i 5A ili 1A za strujne transformatore za relejnu zaštitu.
- Nominalna vrednost primarne struje zavisi od mesta primene strujnog transformatora i može da uzima vrednost od 1A do par hiljada ampera.
- Standardizovane vrednosti naznačene primarne struje su 5A, 10A, 15A, 20A, 25A, 30A, 40A, 50A, 60A, 75A i decimalni umnošci navedenih.
- Proizvode se i visokonaponski strujni transformatori čija je vrednost naznačene primarne struje i manja od 5A i to radi odvajanja visokog napona od mernih uređaja.
- **Strujni transformatori se izrađuju za pet klasa tačnosti : 0,2; 0,5; 1; 3 i 10**

35kV strujni transformator

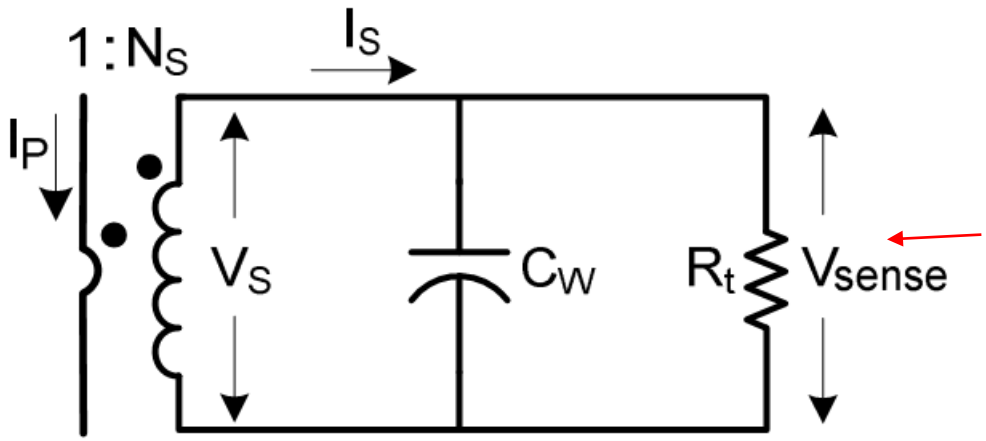
KONSTRUKCIJE STRUJNIH TRANSFORMATORA

- Strujni transformatori za niski napon su najčešće izvedeni sa izolacijom od epoksidne smole (ponekad i od plastike) i to u vidu tzv. obuhvatnog transformatora.
- Sem epoksidne smole sreću se, posebno kod starijih izvedbi, i strujni transformatori sa keramičkom - najčešće porcelanskom - izolacijom.
- Ovi transformatori najčešće nemaju klasičar primarni namotaj već njegovu ulogu vrš provodnik (kakav izolovan kabal il neizolovana šina) koji se provlači kroz sam strujni transformator - tj. strjuni transformato ga obuhvata.
- Prednost obuhvatnih strujnih transformatora u odnosu na one sa klasičnim primarnim namotajem jeste jednostavnija montaža i praktično neograničena nazivna dinamička struja.



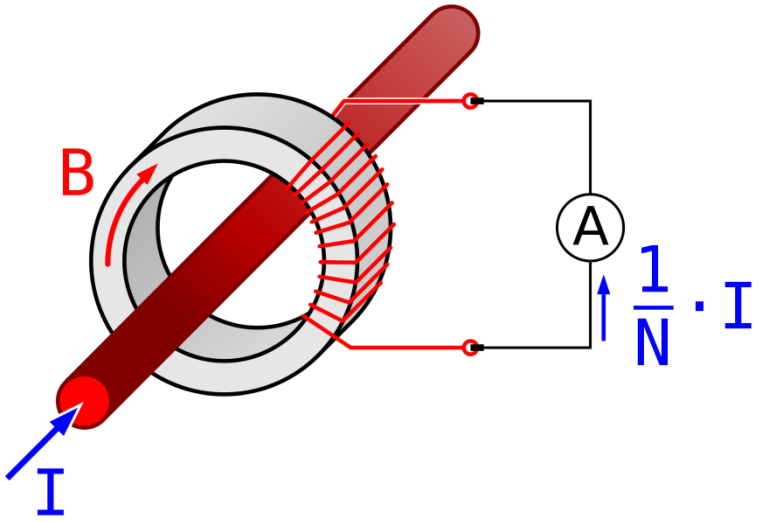
AKO PRIMAR IMA SAMO JEDAN NAMOTAJ??

$$\frac{I_S}{I_P} = \frac{1}{N_S}$$

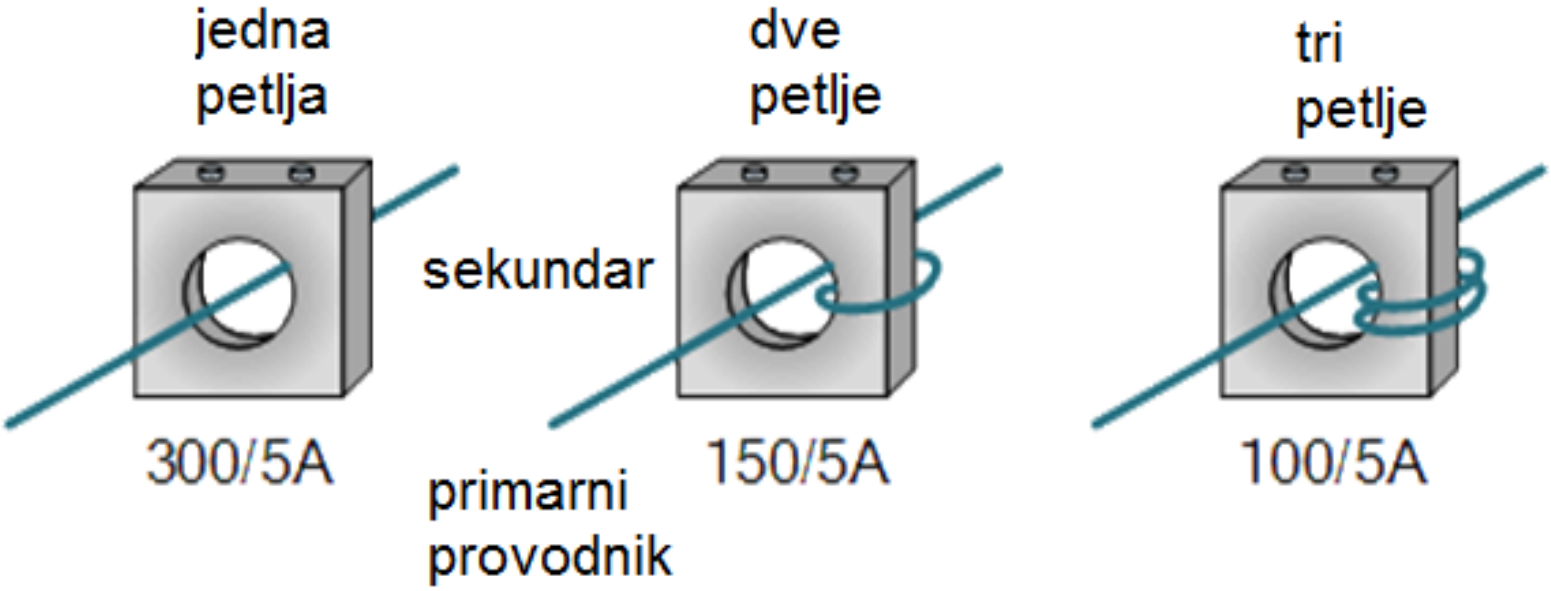


$$V_{sense} = I_S R_t = \frac{I_P}{N_S} R_t$$

Na primaru imamo samo jedan namotaj
Np=1
Cw- parazitna kapacitivnost namotaja u sekundaru (obzirom da je Ns veliki, ova kapacitivnost nije zanemarljiva)
Rt – otpornost koja se namerno stavlja u sekundar (sekundar ne sme biti otvoren tj. u praznom hodu!!!!!)



AKO PRIMAR IMA SAMO JEDAN NAMOTAJ A TREBA NAM MANJI PRENOSNI ODNOS??



PARAMETRI STRUJNOG TRANSFORMATORA

- nazivni naponski nivo za koji je predviđen
- nazivna frekvencija
- prenosni odnos ili konstanta strujnog transformatora
- nazivna primarna i sekundarna struja
- klasa tačnosti
- prekostrujni broj ili faktor sigurnosti Fs
- nominalna snaga u VA,
- trajna termička struja,
- termička klasa izolacije,
- broj jezgara,
- vrsta osnovne izolacije,
- nazivna kratrkotrajno podnosiva termička struja
- nazivna podnosiva dinamička struja.

KLASA TAČNOSTI i GREŠKE STRUJNIH TRANSFORMATORA

- Navedene klase tačnosti (0,2; 0.5; 1; 3 i 10) se odnose na merne transformatore (*drugačija konvencija i obeležavanje važe za transformatore koji se koriste u relejnoj zaštiti*). Greške kod strujnih mernih transformatora se dele na strujne i ugaone.
- **Strujna greška** predstavlja procentualnu razliku između sekundarne struje pomnožene konstantom strujnog transformatora i primarne struje.

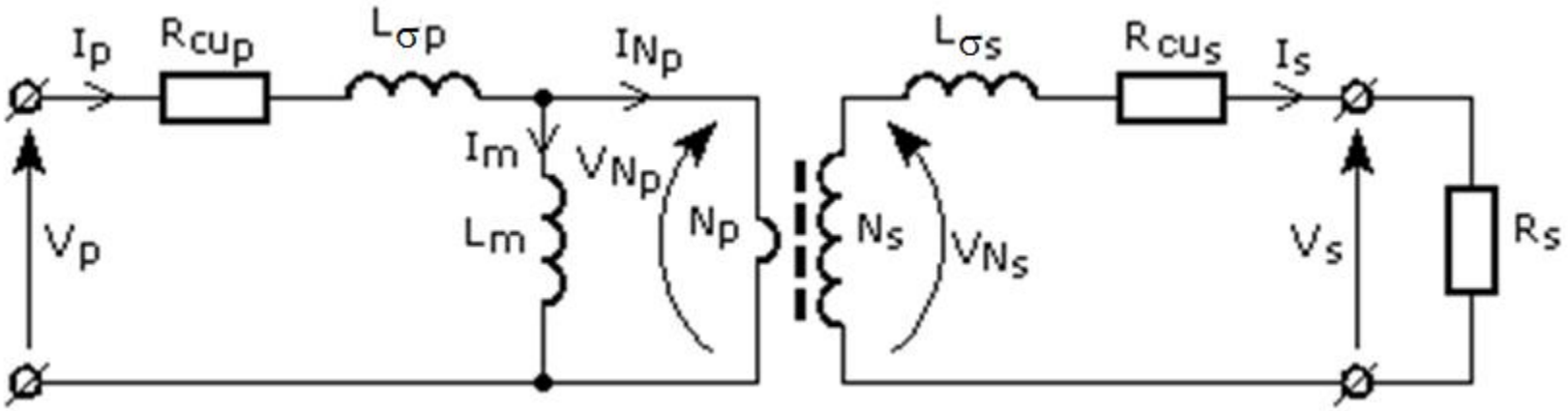
$$p_i[\%] = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} 100$$

- Po vrednosti ova greška može biti pozitivna i negativna, ali se u principu daje njena apsolutna vrednost.
- **Ugaona greška** predstavlja razliku faznih uglova primarne i sekundarne struje. *Smatra se da je fazna razlika greška pozitivna ako je vektor sekundarne struje vremenski ispred onog u primarne struje*.
- **Klasa tačnosti** strujnog transformatora jeste dozvoljena strujna greška pri nominalnoj struji primara.
- *Tako naprimer, kad se kaže da je strujni transformator klase tačnosti 0.5%, to znači da je pri nominalnoj primarnoj struji maksimalno dozvoljena greška od 0.5%.*
- *Ako je pak primarna struja manja od nominalne, ili veća preko 120% nominalne, strujna greška može biti i veća. Tako se npr. za strujni transformator klase tačnosti 0.5 dozvoljava greška od 0.75% ukoliko je struja primara 20% nominalne, i 1% ukoliko je struja primara 10% nominalne.*

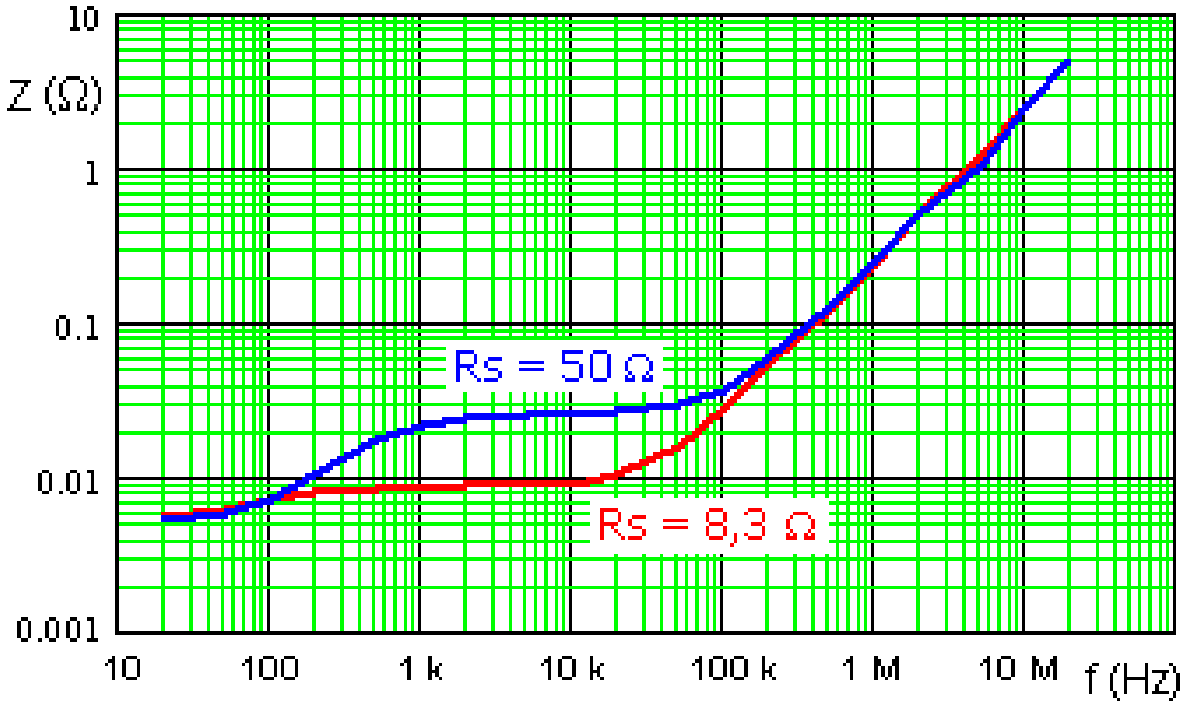
OD ČEGA ZAVISI JOŠ GREŠKA STRUJNIH TRANSFORMATORA?

- Greška strujnog transformatora zavisi i od opterećenja koje stvaraju merni, pokazni instrumenti vezani na sekundaru
- Ukoliko je opterećenje manje od nominalnog (naznačenog na pločici strujnog transformatora), strujna greška može biti i veća od naznačene klase tačnosti.
- Po IEC propisima strujna greška mora biti u granici klase tačnosti za opterećenja na sekundaru od 1/4 do 4/4 nazivne (naznačene) snage strujnog transformatora.
- O ovome treba voditi računa prilikom izbora strujnog transformatora, jer novija digitalna merna i zaštitna oprema ima značajno manju potrošnju i aktivne i reaktivne energije od starije elektromehaničke i elektronske opreme.
- Osim toga tačnost zavisi i od faktora snage opterećenja sekundara i po IEC propisima (ali i VDE) klasa tačnosti važi do cos(fi)=0.8.

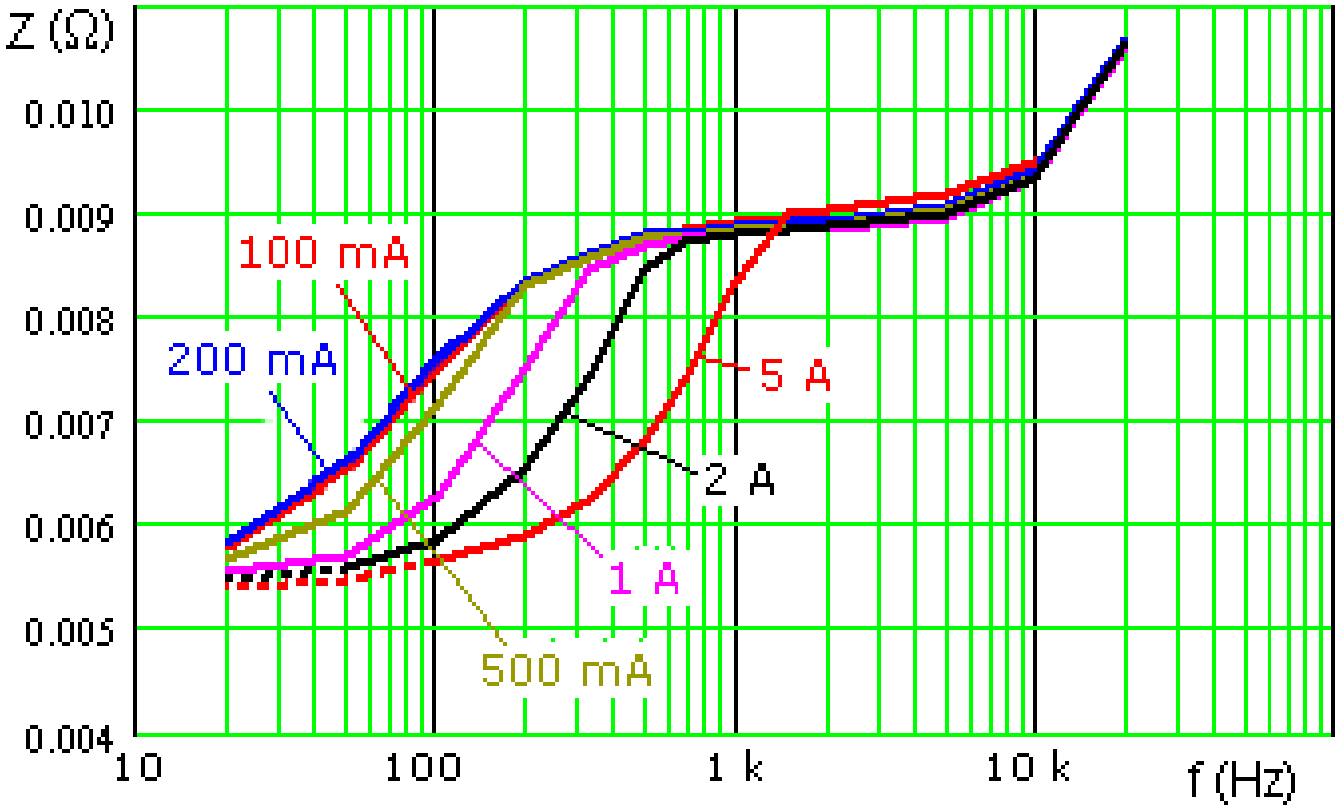
UTICAJ UČESTANOSTI PRIMARNOG SIGNALA NA GREŠKU STRUJNIH TRANSFORMATORA?



- U praktičnim slučajevima strujni transformator ima ograničen propusni opseg, odnosnoon se ne može upotrebiti pri prenosu signala visokih učestanosti.
- Drugim rečima strujni transformatori ove konstrukcije se mogu koristiti za učestanosti do max 500Hz
- Na višim učerstanostima postaju domunantne rasipne induktivnosti Lσp i Lσs .
- Rasipne induktivnosti su posledica neidealne sprege primarnog i sekundarnog namotaja strujnog transformatora.
- Pošto su ove induktivnosti spregnute na red, one uslovljavaju porast impedanse pri visokim učestanostima
- Ovo dovodi do izobličenja strujnog signala i dati transformator neće tačno preneti informaciju o stvarnoj vrednosti struje.



Frekventna karakteristika impedanse strujnog transformatora Ferroxcube LT10/6/4-3E25 gledano sa strane primara; parametar je otpornost vezana na sekundarnoj strani
Veće izobličenje , odnosno veći porast impedanse , odnosno veća greška se ima pri manjem opterećenju sekundara



Frekventna karakteristika impedanse strujnog transformatora Ferroxcube LT10/6/4-3E25 gledano sa strane primara; parametar je struja na sekundarnoj strani

SNAGA STRUJNOG TRANSFORMATORA

Indukovana elektromotorna sila (EMS) u sekundarnom namotaju :

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot a \cdot B$$

N- broj namotaja sekundara
f- učestanost
α– presek magnetnog jezgra
B- magnetna indukcija

Snaga koja se ima na sekundaru :

$$S = 4.44 \cdot N \cdot f \cdot a \cdot B \cdot I_2$$

I_2-struja sekundara

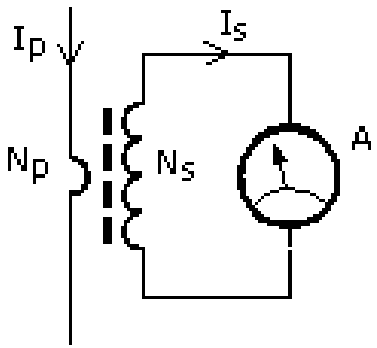
- Merni strujni transformatori rade sa niskom vrednošću indukcije B, kako bi se imala što veća tačnost.
- Stoga se povećavanje snage strujnog transformatora postiže povećanjem preseka jezgra α .
- Ovo pogotovo važi za jezgra za zaštitu, koja pri nominalnoj struji moraju imati jako nizak fluks (a time i magnetnu indukciju) da ne bi ušli u zasićenje pri strujama kvara koje mogu biti i do deset puta veće od nominalnih
- Dakle važi pravilo: veća snaga - veće jezgro - teži i veći strujni transformator.
- Snaga niskonaponskih strujnih transformatora je najčešće 5 ,10 ili 15 VA.

- Prilikom izbora snage strujog transformatora, osim snage uređaja koji se priključuju, treba voditi računa i o dužini poveznih vodova od strujnog transformatora do uređaja koje napaja.
- Ako su ovi vodovi jako dugački treba razmotriti ili povećanje naznačene snage strujnog transformatora ili smanjenje naznačene sekundarne struje sa 5A na 1A.
- Takođe, treba imati u vidu da podopterećen strujni transformator može imati veću strujnu grešku od propisane klasom tačnosti.

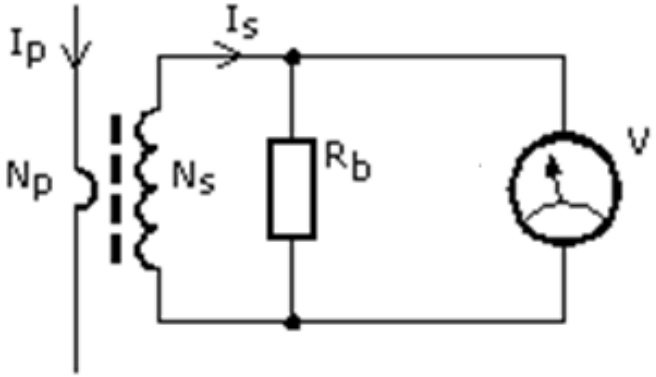
SEKUNDARNI NAMOTAJ STRUJNOG TRANSFORMATORA MORA BITI SIGURNO UZEMLJEN!!!
SEKUNDARNI NAMOTAJ NE SME OSTATI OTVOREN!!!

- Radi sigurnosti sekundarni namot mora biti sigurno uzemljen, a radi izbegavanja preteranog zagrevanja ne smemo ga ostaviti otvorenim pri uključenju transformatora ili ga otvarati u toku rada.
- Ukoliko je namot sekundara otvoren, transformator dolazi u režim praznog hoda. Tada sva primarna struja magnetiše jezgro strujnog transformatora, pošto ne postoje sekundarni ampernavoji koji bi držali ravnotežu primarnim amernavojima. To dovodi do ulaska strujnog transformatora duboko u zasićenje, i do maksimalne vrednosti fluksa. Vremenska karaketeristika fluksa stoga ima gotovo kvadratni oblik.
- Pri ovome indukcija u gvožđu jezgra poraste mnogo puta u odnosu na njenu vrednost pri naznačenoj struji (do 1,4...1.8T umesto 0,08...0,1T); u skladu s tim rastu i gubici u gvožđu te pri dužem radu neizbežno dolazi do zagrevanja jezgra, gubljenja magnetnih karakteristika i do kvara izolacije sekundarnog namota.
- Glavnu opasnost predstavlja napon na priključcima otvorenog sekundarnog namota koji je veoma izobličen i sa izraženom vršnom vrednošću kratkog trajanja, što se objašnjava veoma jakim zasićenjem magnetskog kola.
- Naponski pikovi na sekundaru dostižu nekoliko hiljada volti, što predstavlja veliku opasnost za ljude koji rukuju ovim transformatorima.
- Iz navedenog je jasno koliko je važan zahtev o stalnom kratkom spoju sekundarnog namota strujnog transformatora direktno ili preko instrumenta!!!!

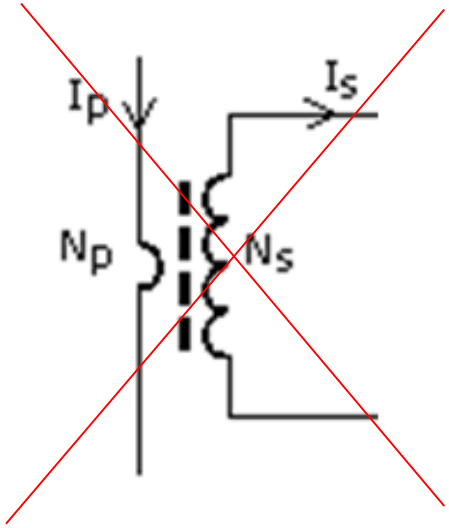
NAČINI SPAJANJA SEKUNDARA MERNOG STRUJNOG TRANSFORMATORA

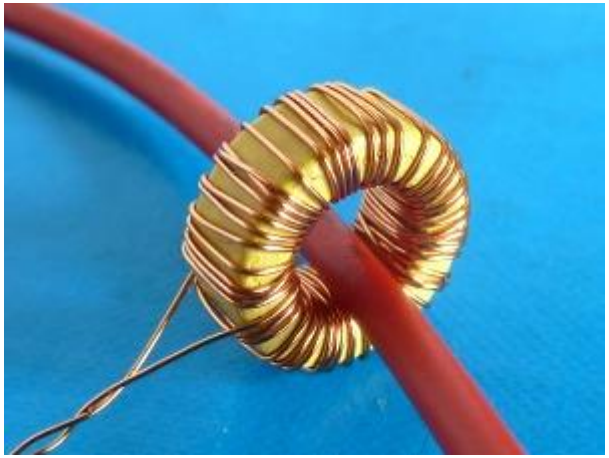


Sekundar strujnog transformatora je „zatvoren“ sa ampermetrom koji ima veoma malu impedansu



Sekundar strujnog transformatora je „zatvoren“ sa blider otpornikom Rb, i merenje struje se ustvari ostvaruje voltmetrom: V=Rb x Is





FAKTOR SIGURNOSTI STRUJNIH TRANSFORMATORA

- Jedan od bitnih parametara strujnog transformatora je faktor sigurnosti koji pokazuje ponašanje strujnog mijernog transformatora u području iznad nazivne struje.
- Strujni merni transformator je tako projektovan da može trajno da radi sa 20% većom strujom od naznačene. Daljim porastom primarne struje strujni transformator ulazi u zasićenje, tako da mu počinje rasti greška merenja.
- Potrebno je napomenuti da se ne može sprečiti da dođe do porasta primarne struje iznad 120% nominalne vrednosti.
- Preopterećenja i kratki spojevi su u mreži nepredvidivi događaji koji se ne mogu sprečiti. Kvalitet zaštite određuje kako brzo će doći do isključenja ovih događaja u mreži.
- Na neki način je potrebno zaštiti uređaje vezane za sekundar, čija je naznačena struja najčešće 5A. S obzirom da, kako je već rečeno, sekundar ne sme ostati otvoren nije dozvoljena zaštita topivim osiguračima.
- Mehanizam zaštite je iskorištenje prirodne osobine jezgra da pri povećanju struje magnetizacije iznad određene vrednosti karakteristika magnećenja dolazi do kolena tj. ulazi u zasićenje. Na taj način raste greška strujnog transformatora, što je dobro jer je sekundarna struja tada manja nego što bi bila u slučaju da je jezgra magnetski linearna.
- **Faktor sigurnosti ili prekostrujni broj strujnog transformatora predstavlja relativnu vrednost primarne struje u odnosu na naznačenu na pločici pri kojoj strujna greška prelazi 10%.**
- Treba napomenuti da se ovaj faktor određuje za nominalno opterećen strujni transformator kao i da se ovaj faktor određuje samo za merne transformatore

NAPONSKI MERNI TRANSFORMATORI

- Od naponskih transformatora se zahteva da transformišu merene napone u stalnom odnosu i gotovo bez faznog pomeraja.
- Naznačeni odnos transformacije k_n naponskog mernog transformatora definisan je odnosom njegovog naznačenog primarnog napona $U1n$ i naznačenog sekundarnog napona $U2n$:

$$k_n = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$$

- Standardni naznačeni primarni naponi mernih transformatora jednaki su standardnim naponima električnih mreža.
- Naznačeni primarni napon dvopolnog izolovanog naponskog transformatora jednak je primarnom međufaznom (linijskom) naponu mreže (npr. 35kV), a naznačeni napon jednopolno izolovanog naponskog transformatora jednak je faznom naponu mreže (npr.35/ √3 kV).
- U prvom slučaju standardni naznačeni sekundarni napon je100V ili, ređe, 200V za prostrane sekundarne strujne krugove.
- U drugom slučaju transformator je standardni naznačeni sekundarni napon iznosi 100 √3V ili 200 √3V .
- Treba napomenuti da odnos transformacije nije sasvim jednak broju navojaka u primarnom i sekundarnom namotu, nego je uvek nešto veći kako bi se smanjile greške zbog padova napona u naponskom transformatoru.

KONSTRUKCIJA NAPONSKIH MERNIH TRANSFORMATORA

- Namotaji mernih transformatora najčešće su od bakarne žice izvučene od elektrolitskog bakra kome je čistoća najmanje 99.9%.
- Bakarne žice okruglog preseka su izolovane lakom na bazi sintetičkih smola.
- Osim lakiranih žica upotrebljavaju se žice sa jednim slojem prediva od svile; ovakva izolacija se koristi kad se mora postići mala kapacitivnost namotaja da bi se mogao upotrebiti za visoke frekvencije.
- Prema vrsti upotrebljene izolacije između namotaja, razlikuju se:

  -suvi (do 145 kV)

  -malouljni za sve napone

  -uljni

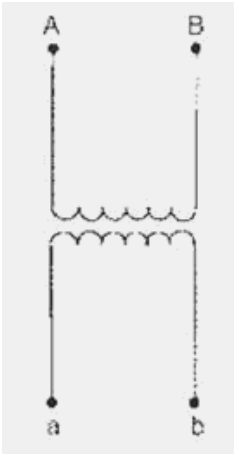
  -sa gasom SF_6

- Prema izvođenju razlikuju se dva osnovna tipa naponskih transformatora:

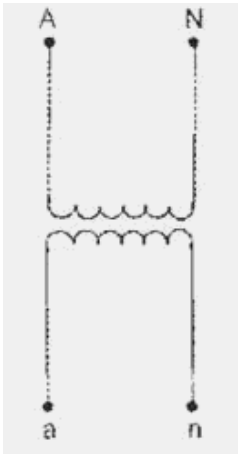
  -dvopolno izolovani naponski transformatori

  -jednopolno izolovani naponski transformaotori

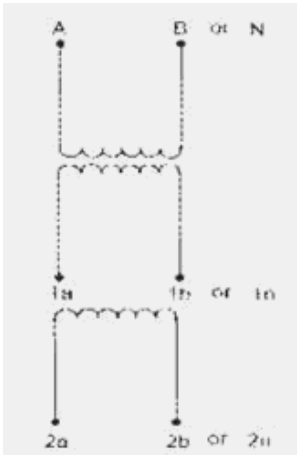
RAZLIKA IZMEĐU DVOPOLNO i JEDNOPOLNOIZOLOVANIH NAPONSKIH MERNIH TRANSFORMATORA



Dvopolno izolovani jednofazni naponski merni transformator sa jednim sekundarnim namotajem



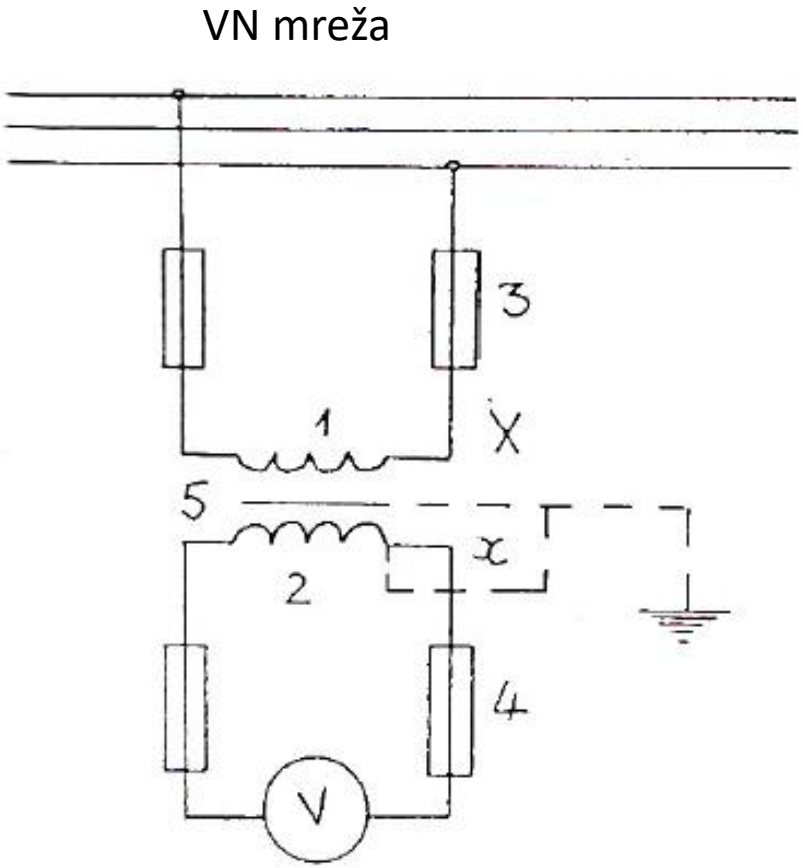
Jednopolno izolovani jednofazni naponski merni transformator sa jednim sekundarnim namotajem



Jednofazni naponski merni transformator sa dva Sekundarna namotaja

- Razlika između ova dva naponska merna transformatora je to što dvopolno izolovani naponski transformator ima dva visokonaponska priključka koja su izolovana od suda transformatora, a jednopolno izolovani naponski transformatori imaju jedan visokonaponski priključak, dok se drugi kraj uzemljuje.
- Za srednje napone, do 38 kV upotrebljavaju se jednopolni ili dvopolni izolovani suvi (izolator je epoksidna smola) ili malouljni naponski merni transformatori.
- Za visoke napone od 110 kV i više naponski transformatori se izrađuju isključivo kao jednopolno izolovani, jer je za ove napone znatno jevtinije upotrebiti tri jednopolno izolovana nego dva dvopolno izolovana transformatora.

UPOTREBA OSIGURAČA KOD MERNOG NAPONSKOG TRANSFORMATORA



- Primarni namotaj (1) je spojen na VN mrežupreko osigurača (3).
- Na sekundarni namotaj (2) se priključuju merni instrumenti ili zaštitnireleji.
- I u sekundarnom kolu su postvaljeni osigurači (4) koji služe za zaštitu naponskog transformatora od kratkog spoja.
- Prilikom lratkog spoja u sekundaru, zbog relativno velike impedanse koju ima transformator, strujau primarnom krugu bi bila mala (reda nekoliko ampera) pa osigurači (3) nebi odreagovali.

NAPONSKA GREŠKA i FAZNA GREŠKA

$$p_u[\%] = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} 100$$

- Fazna greška δu je fazna razlika (stav) između vektora primarnog i sekundarnog napona.
- Smer vektora bira se tako da idealnom transformatoru fazna razlika bude jednaka nuli.
- Smatra se da je fazna greška pozitivna ako je vektor sekundarnog napona vremenski ispred vektora primarnog napona.
- Padovi napona u transformatoru, a time i njegova naponska i fazna greška, zavise od opterećenja priključenog na sekundarne stezaljke.
- S obzirom na opterećenje koje se priključuje na njihovu sekundarnu stranu, upotrebljavaju se naponski transformatori za merenje i za zaštitu.
- Od prvih se zahteva veća tačnost, ali samo na uskom naponskom području. Kod drugih se zahteva manja tačnost, ali je potrebno da ona bude održana na znatno širem naponskom području.

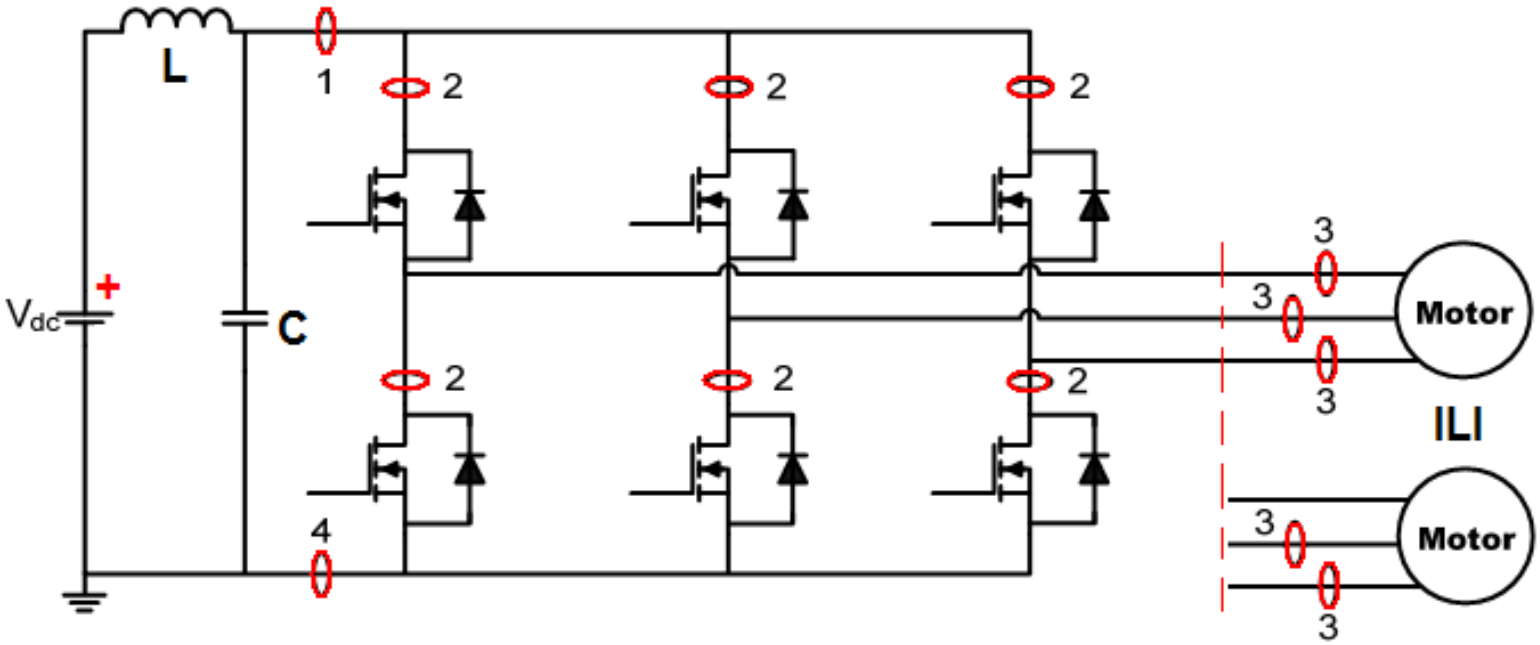
MERENJE STRUJE I NAPONA NA VISOKIM UČESTANOSTIMA

- Korišćenje mernih strujnih i naponskih transformatorima pri visokim učestanostima nailazi na prepreku usled karaktera njihovog propusnog opsega
- Pri višim učestanostima dolaze do izražaja rasipne induktivnosti, odnosno reaktanse koje dovode do izobličenja mernih signala
- Da bi se tačno izmerili tranzijentni efekti, harmonici ili prelazne pojave u struji ili naponu neophodno je imati merenja u širokom propusnom opsegu na primer : DC-200kHz ili čak do DC-200MHz
- U ovom slučaju strujni i naponski merni transformatori postaju neupotrebljivi
- Tako na primer da bi mogli doneti zaključke o stanju i eventualnim nedostacima u ležajevima električnih mašina neohodno je meriti struju praznog hoda. Ovo merenje zahteva tačno određivanje harmonika struje i upotrebu sofisticiranih senzora koji imaju široki propusni opseg
- Takođe, obzirom da se savremeni regulisani elektromotorni pogoni ne mogu zamisliti bez upotrebe pretvarača, proučavanje tehnika i metoda merenja struje i napona pri tranzijentima kao i viskom učestanostima, dobija na sve većem značaju.

MERENJE TRENUTNE VREDNOSTI STRUJE

- Merenje struje elektromotora kako u kolima regulisanih pogona, tako i u kolima sistema energetskih pretvarača je neobično značajno sa više stanovišta (kontrole i regulacije, obezbeđenje funkcija zaštite, monitoringa, kvaliteta električne energije, spektralne analize, merenja harmonijskog sadržaja i sl...)
- Postoji nekoliko tehnika za merenje struje i one će biti detaljno obrađene u ovom delu predavanja
- Ovo merenje je nešto komplikovanije od naponskih merenja
- Treba obezbediti merenje AC i DC komponenti, uz napomenu da je zahtevani propusni opseg merenja DC-200MHz (ovo nije baš lako ostvariti!!!)

Moguće merne pozicije struje u energetskom pretvaraču i elektromotoru (regulisani elektromotorni pogon)



U energetskim pretvaračima (invertorima) za pogon trofaznih motora (asinhronih , sinhronih, brush-less) je takođe moguće meriti struju na više mesta, odnosno pozicija. Pozicija (1) obezbeđuje merenje struje u DC među kolu i kao takva veoma je pogodna za zaštitu od kratkih spojeva kako u invertoru tako i na opterećenju invertora (motoru). Pozicija (2) obezbeđuje merenje struje prekidača u invertoru i kao takva je pogodna za njihovu zaštitu. Pozicija (3) meri struju opterećenja (motora) i kao takva je pogodna u strujnoj i brzinskoj regulaciji motora. Zašto u brzinskoj!!! Ako je opterećenje simetrično može se meriti struja u samo dve faze. Zašto!! Pozicija (4) omogućava merenje struje DC međukola ali i polaritet za zaštitu poluprovodničkih elemenata.

MERNE STRUJNE TEHNIKE

U OVOM DELU PREDAVANJA ĆE BITI OBRAĐENE MERNE STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA:

1. MERENJU POMOĆU OTPORNOSTI

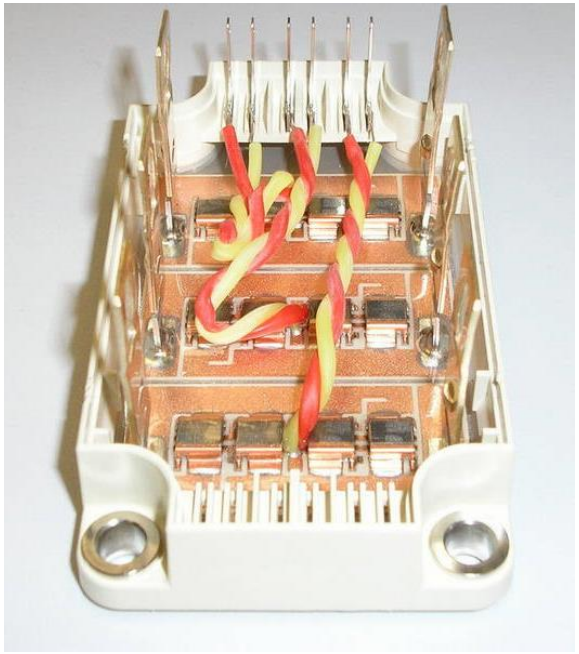
2. ELEKTROMAGNETNIM MERENJIMA

-korišćenje vazdušnih tehnika (kalem Rogowskog)
-korišćenje Holovih senzora (sa i bez povratne sprege)
-korišćenje magnetno-otpornih senzora
-korišćenje fiber optičkih senzora

ŠANT ili ŠENT, KALIBRISANI OTPORNIK

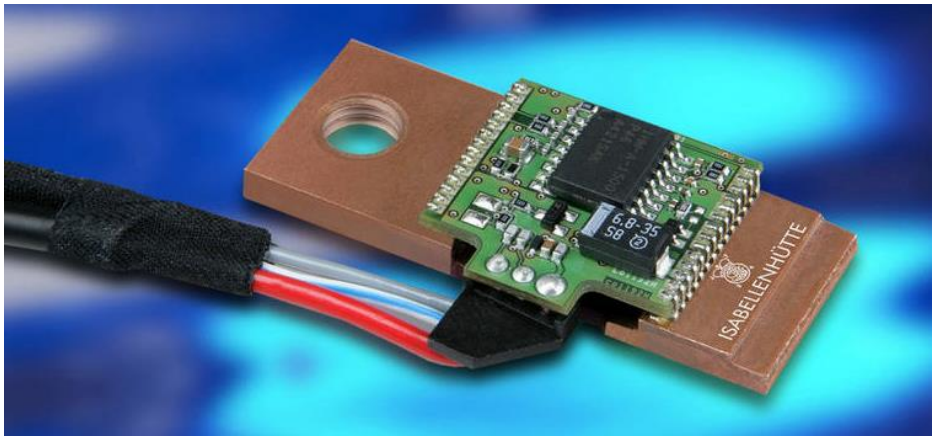
- Disipacija $P_\gamma = R \cdot I^2$
- Ne pruža galvansku izolaciju
- Temperaturna promenljivost
- Niska cena

PRIMENA



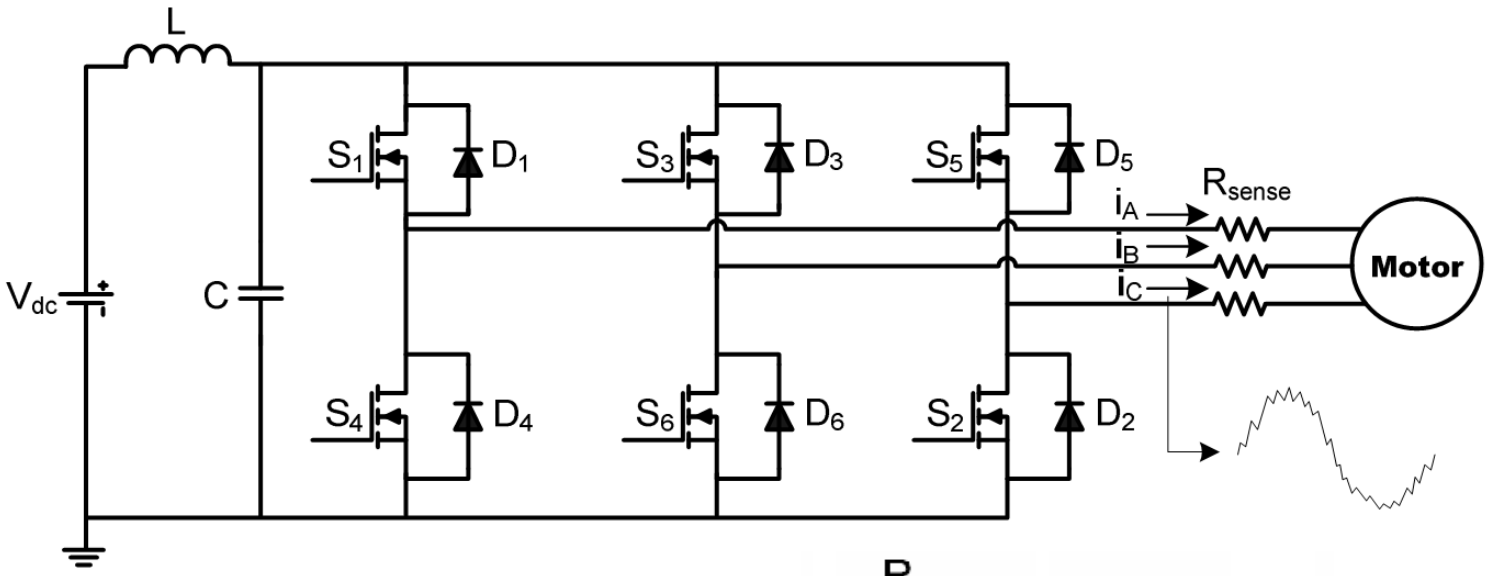
Unutar poluprovodničkih modula (frekventni pretvarači)

Kao zasebni merni pretvarači

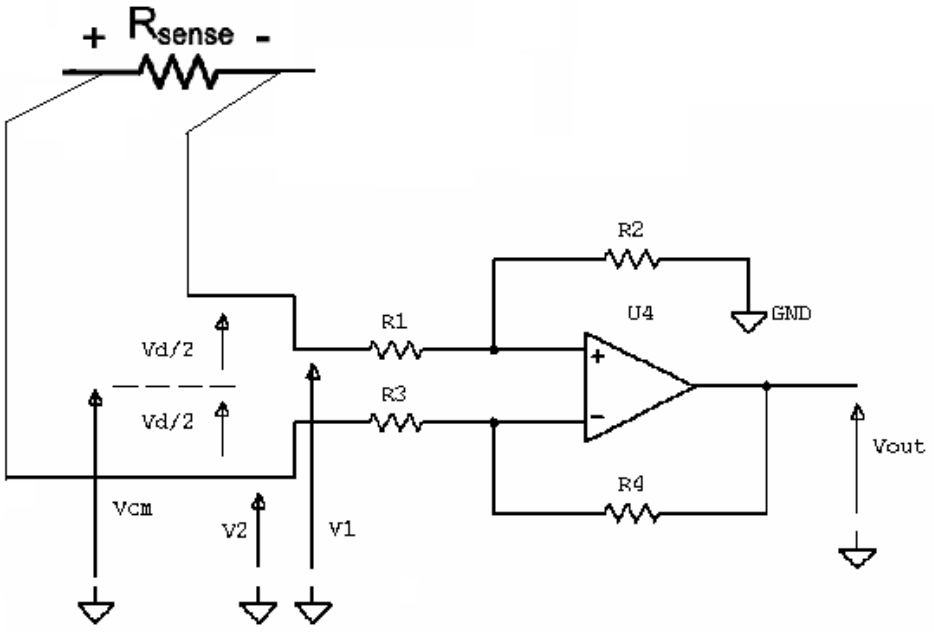


Kao moduli za ugradnju u energetske pretvarače

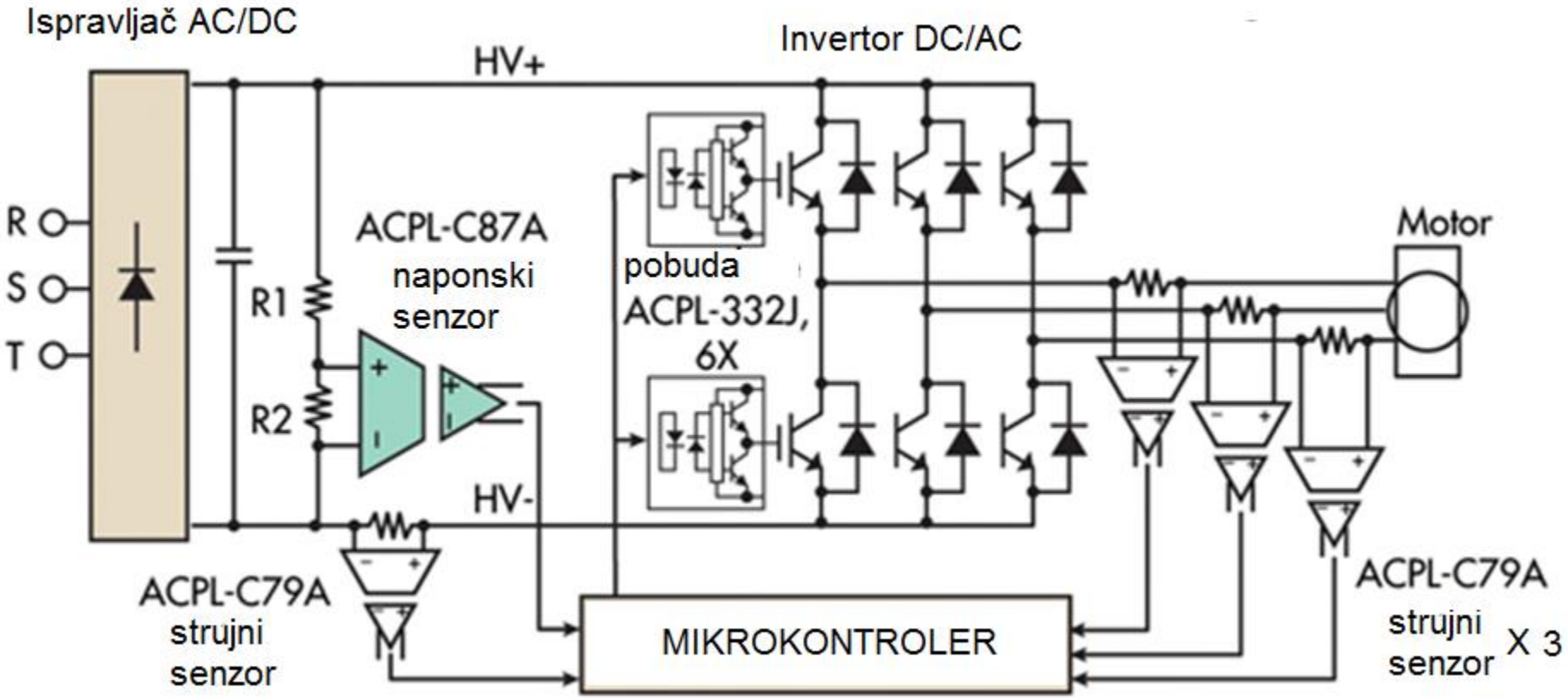
OTPORNO MERENJE STRUJE U SVAKOJ OD FAZA MOTORA



Merenje struje motora dodavanjem mernih otpornika u svaku fazu motora (moguće je koristiti samo merenje u dve faze. Problem kod ovog merenja su pored disipacije na otpornicima i tzv. *comon-mode* signali koji potiču od veoma strmih ivica napona na otpornicima (dv/dt efekat). Rešenje je korišćenje optički izolovanih operacionih pojačavača.

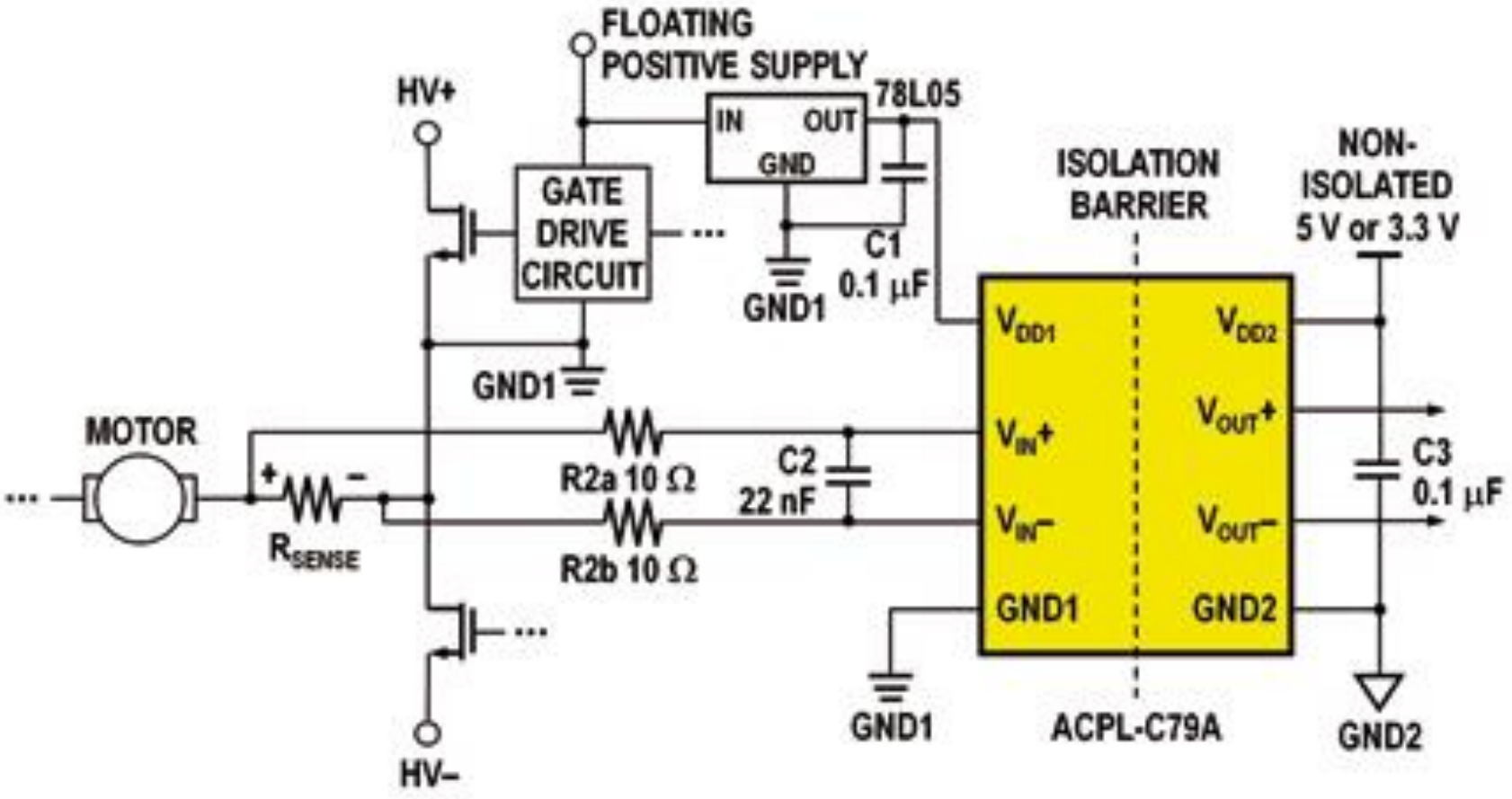


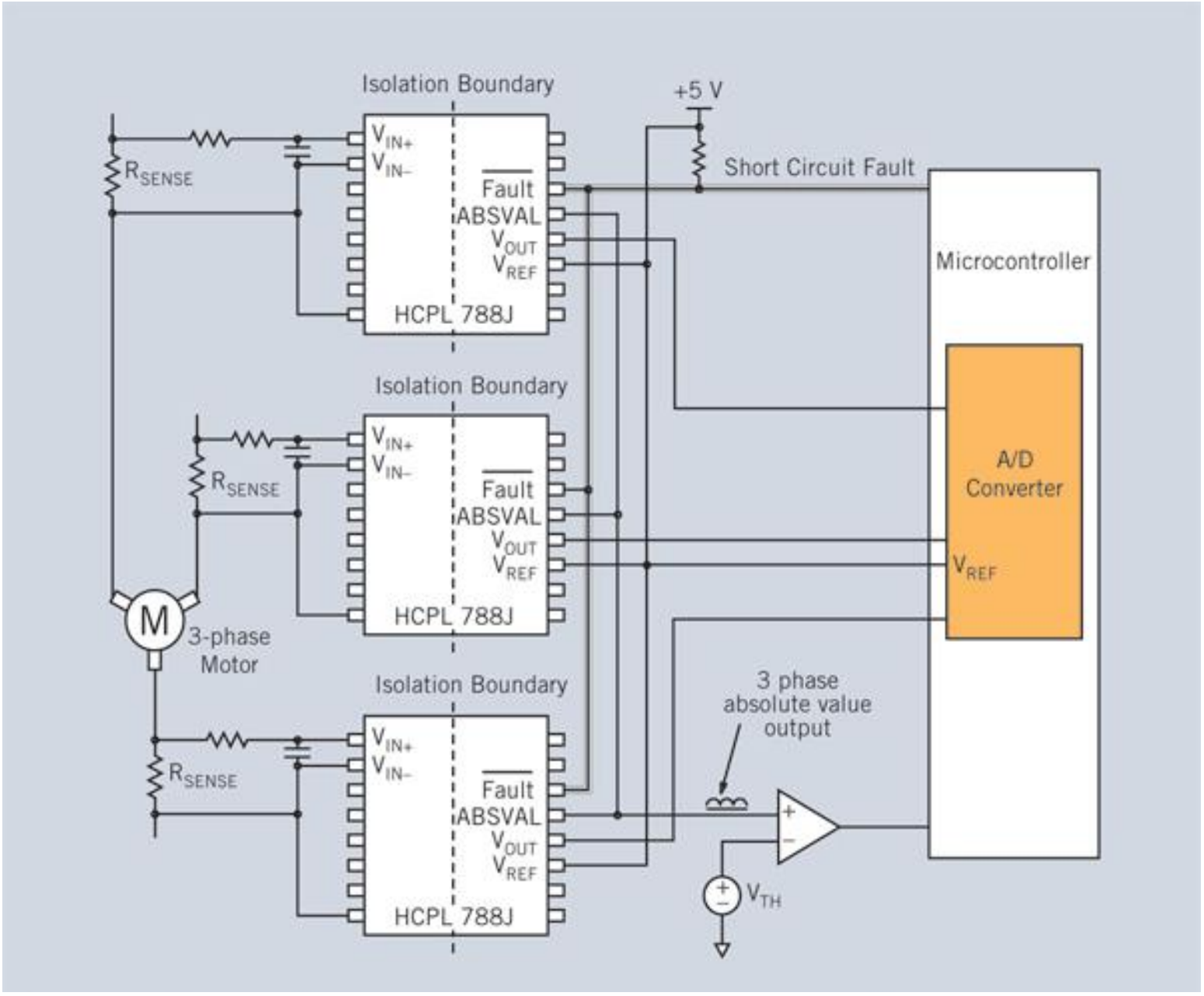
OPTOIZOLOVANO MERENJE STRUJE U REGULISANOM POGONU AC MOTORA



ACPL-C79A strujni senzor sa optoizolacijom koji koristi otporni šant u svakoj od faza motora

KONKRETAN PRIMER OPTOIZOLOVANOG MERENJA STRUJE U KOMBINACIJI SA STRUJNIM ŠANTOM





MERNI SISTEM STRUJA TROFAZNOG AC MOTORA SA OPTOIZOLOVANIM SENZORIMA HCPL 788J

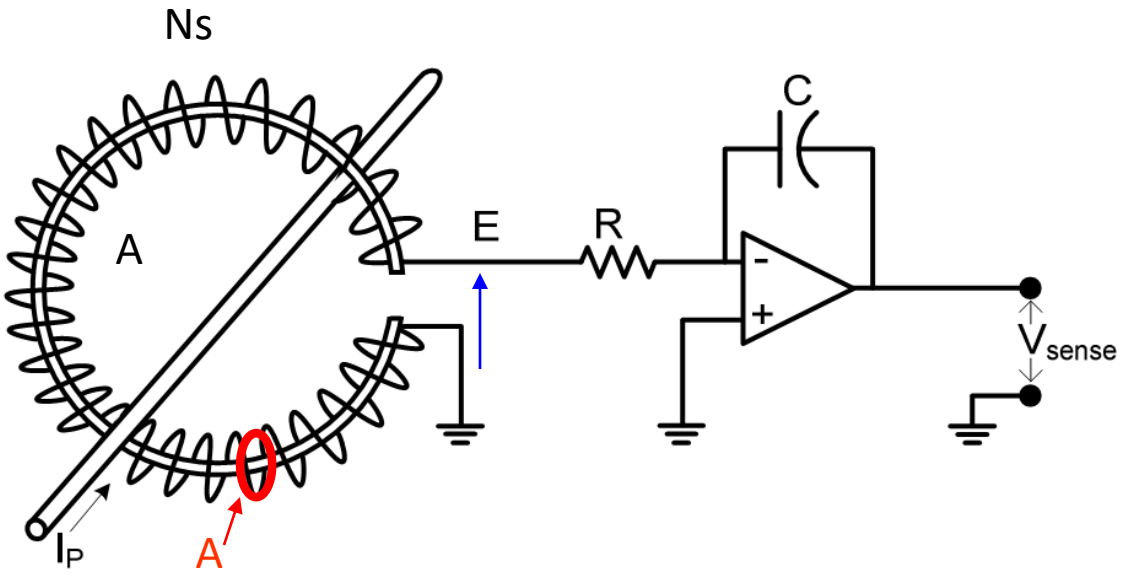
MERNA TEHNIKA BAZIRANA NA VAZDUŠNOM STRUJNOM TRANSFORMATORU- KALEM ROGOWSKOG

KORIŠĆENJE KALEMA ROGOVSKOG

Induktivnost vazdušnog kalema je:

$$M = \frac{\mu_o A N_S}{l}$$

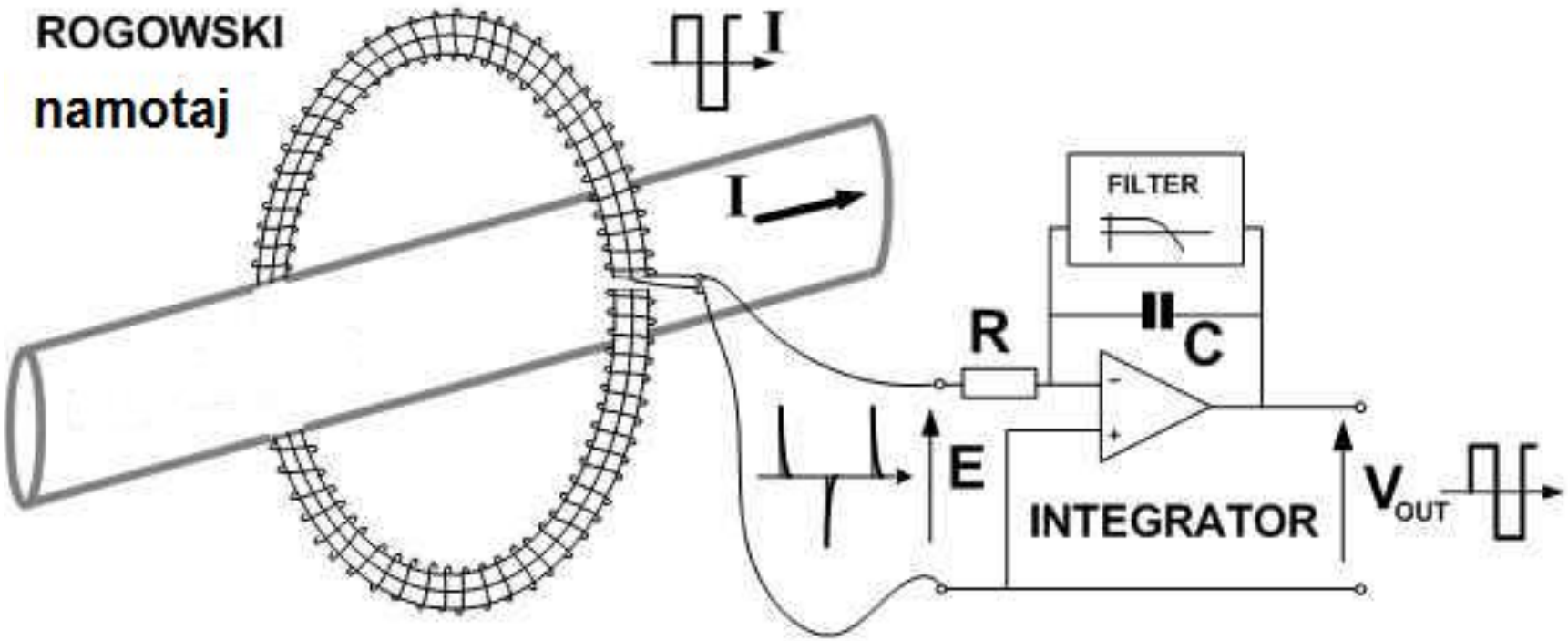
$$E = M \frac{dI_P}{dt}$$



$$V_{sense} = \frac{1}{RC}\int E\,dt = \frac{1}{RC}\frac{\mu_0 A N_S}{l} I_P$$

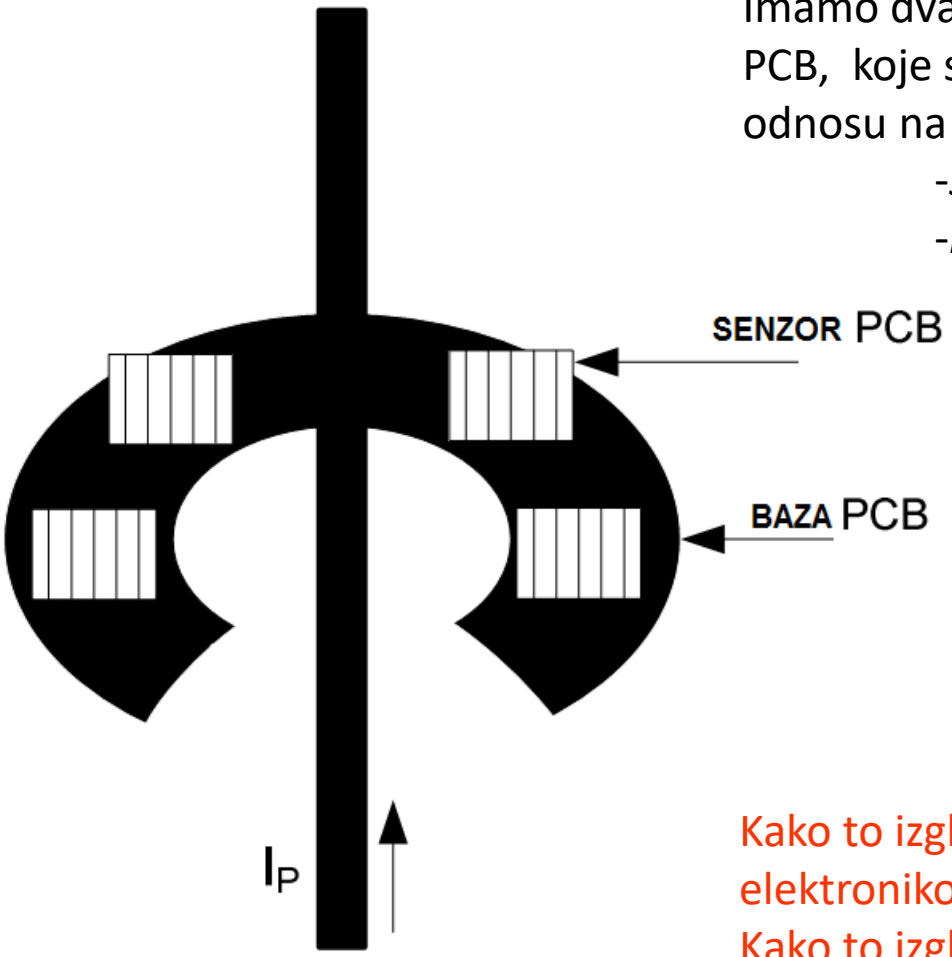
INTEGRACIJOM NAPONA NA KRAJEVIMA KALEMA SE DOBIJA NAPON KOJI JE PROPORCIONALAN STRUJI PRIMARNOG VODA

PRIMER KADA JE PRIMARNA STRUJA PRAVOUGAONA (VRLO ČEST SLUČAJ U ENERGETSKOJ ELEKTRONICI)



Merenje diferencira originalnu struju (to je ustvari napon E). Da bi dobili originalnu struju I moramo ustvari da integralimo napon E. Tako je izlazni napon integratora $V_{out} \sim I$

KORIŠĆENJE PLANARNIH KALEMOVA ROGOVSKOG



Imamo dva štampana hibrida tj.štampane ploče PCB, koje se postavljaju normalno jedna u odnosu na drugu:

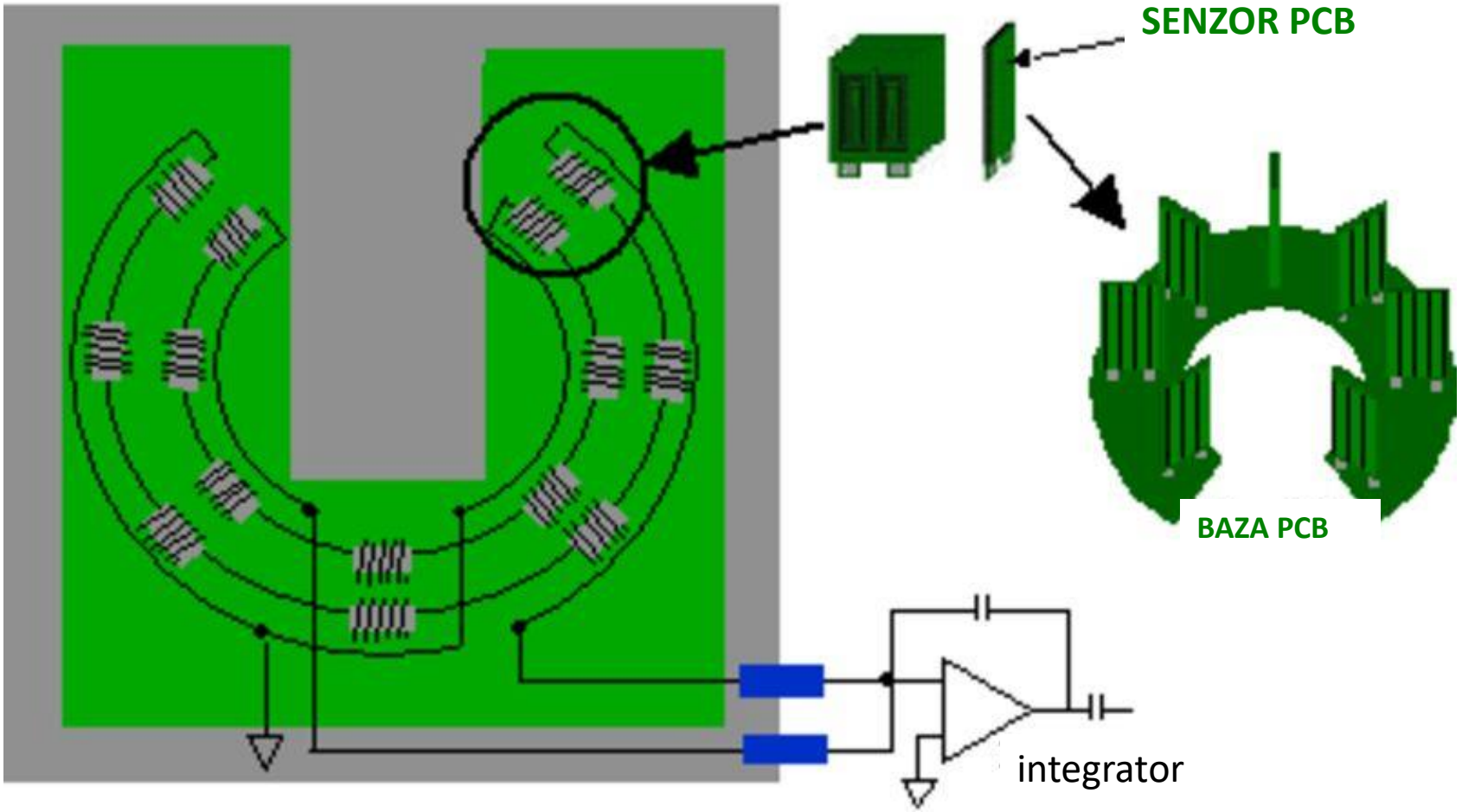
-senzorska PCB

-bazna PCB

Bazna PCB ima otvor na sredini i kroz njega prolazi struja koje se meri tj. Ip.
Magnetno polje ove struje “prožima” normalno postavljenu senzorsku PCB.

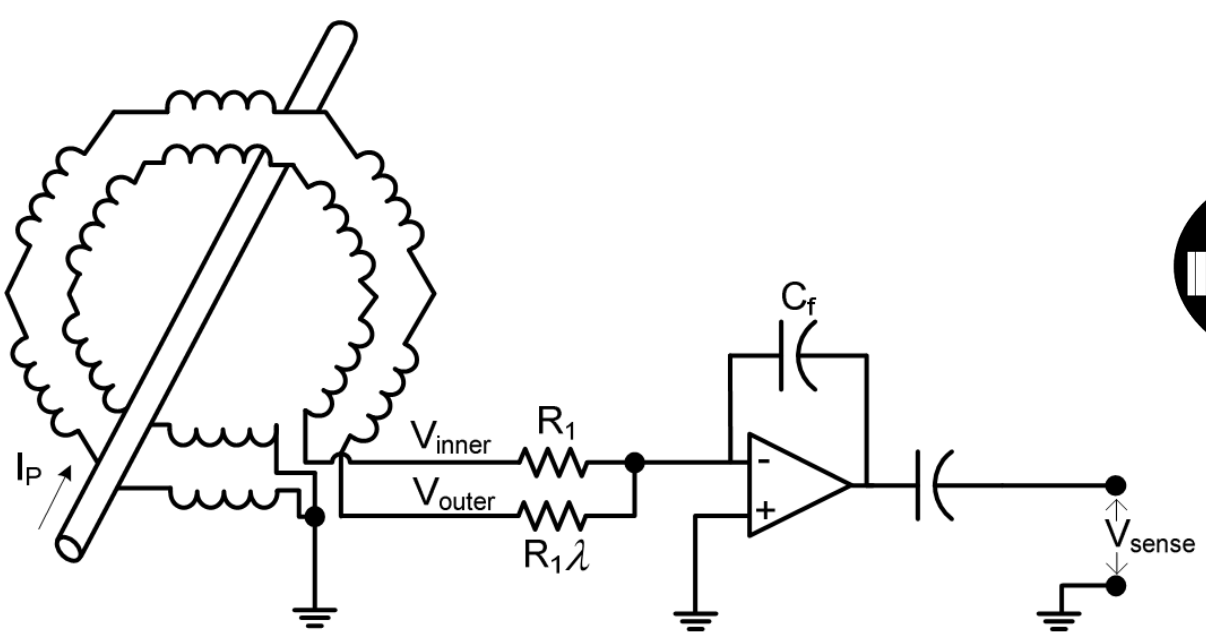
Kako to izgleda u kombinaciji sa pojačavačkom elektronikom?
Kako to izgleda u 3D?

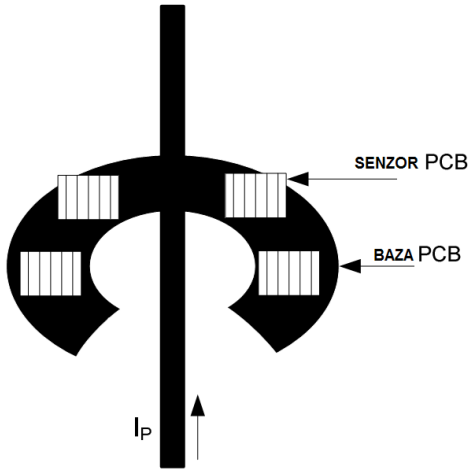
KAKO TO IZGLEDA U 3D ??



Ustvari imamo dva planarna kalema Rogowskog koji su predstavljeni sa dve petlje. Signali sa sveke od petlji se dovode u sabiračko kolo na ulazu integratora.

PLANARNI KALEMOVI ROGVSKOG DATI U DVE KONCENTRIČNE PETLJE





Bitno je uočiti indukovane napone u spoljašnjoj i unutrašnjoj petlji

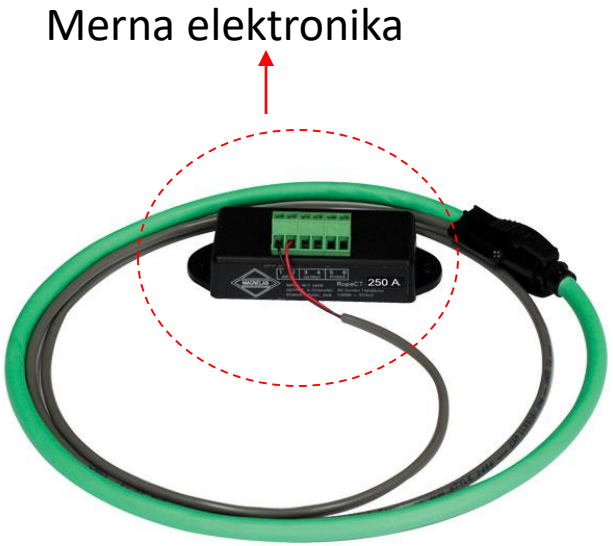
$$V_{sense} = V_{inner} - \frac{V_{outer}}{\lambda} = V_{inner}\left(1 - \frac{V_{outer}}{V_{inner}\,\lambda}\right)$$

$\lambda = (V_{outer}/V_{inner}) \longrightarrow$ V_{sense}=0

Propusni opseg 10kHz-100kHz

$(\lambda/2) = (V_{outer}/V_{inner})$ Uobičajeno se koristi

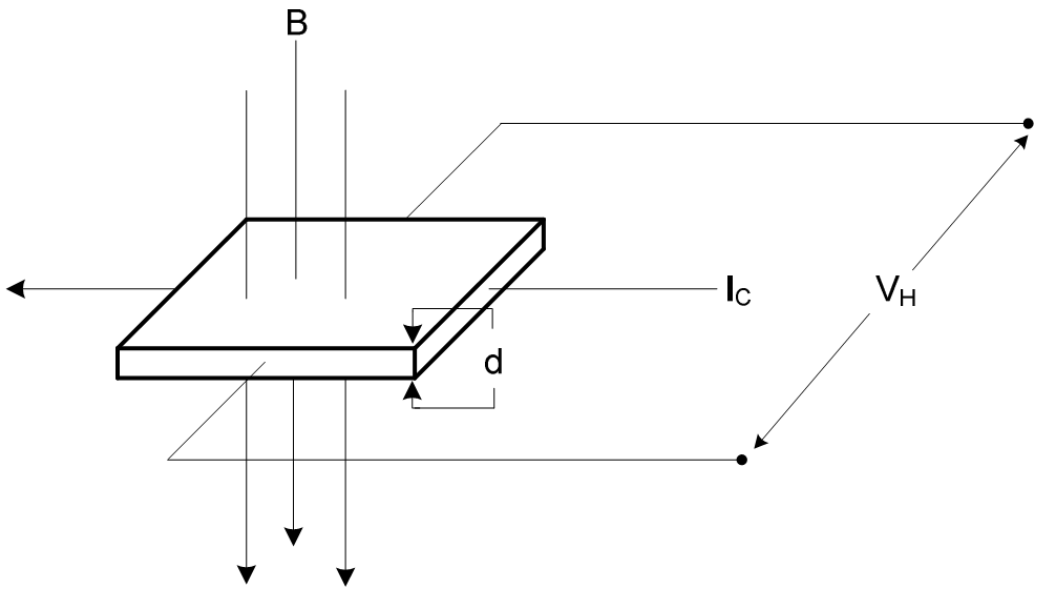
IZGLED KALEMA ROGOWSKOG (zatvoren)



OTVOREN KALEM
sa modulom TRANSMITERA (merne elektronike)

STRUJNE TEHNIKE BAZIRANE NA HOLOVOM EFEKTU

Holov efekat? Hall effect?

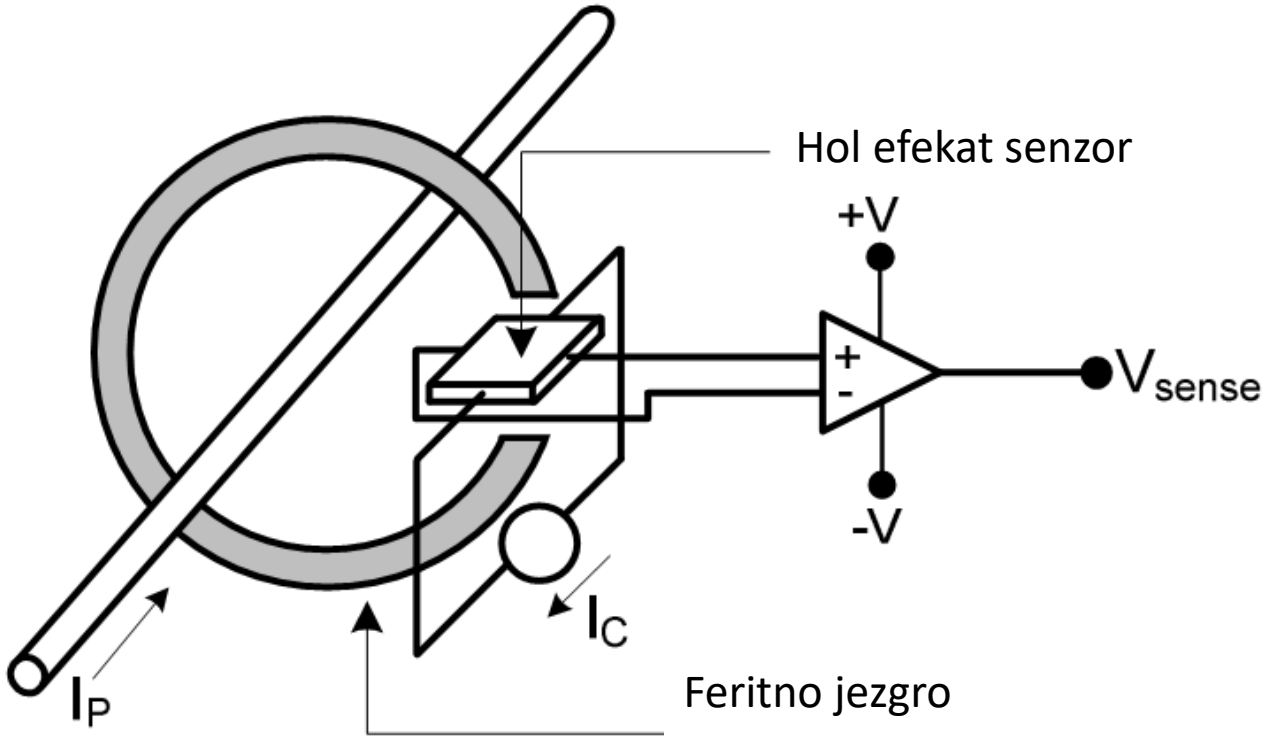


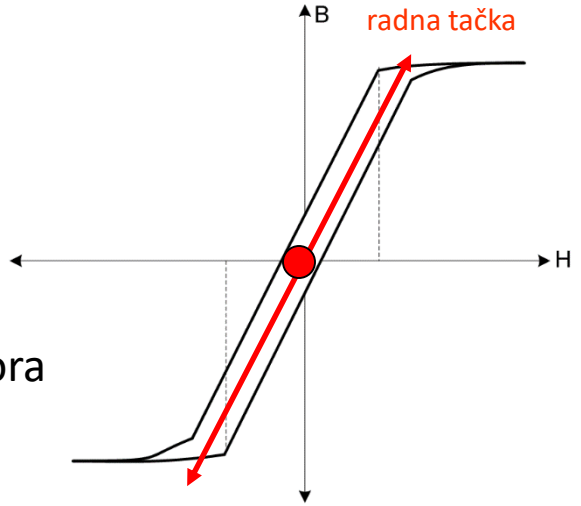
Holov napon

$$V_H = \frac{K}{d} B I_C + V_{OH}$$

→ Offset napon koji postoji i kada nema eksternog polja

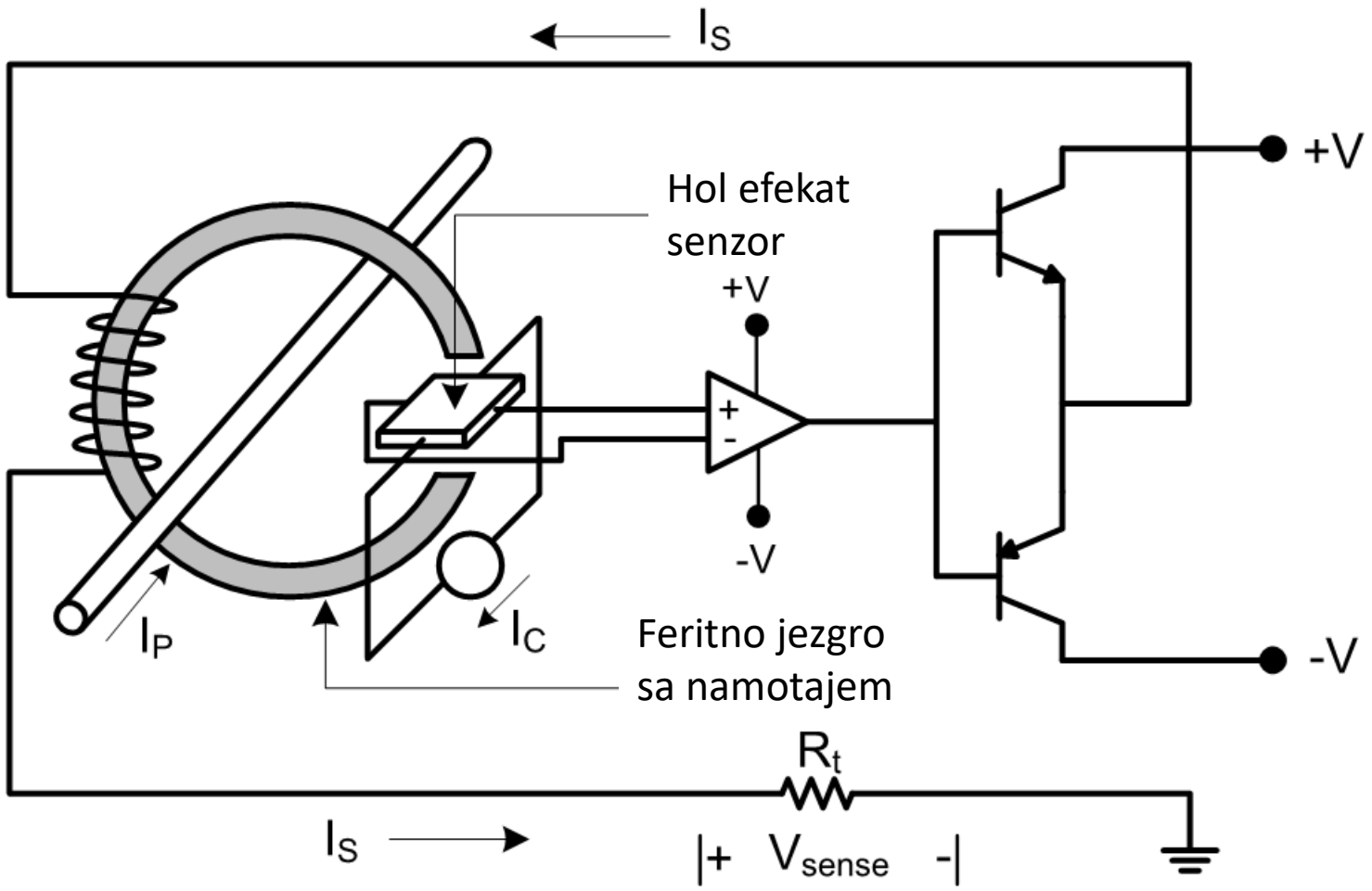
MERENJE STRUJE SA HOL EFEKAT SENZOROM
(u otvorenoj povratnoj sprezi)





B-H kriva senzora

MERENJE STRUJE SA HOL EFEKAT SENZOROM
(u zatvorenoj povratnoj sprezi)

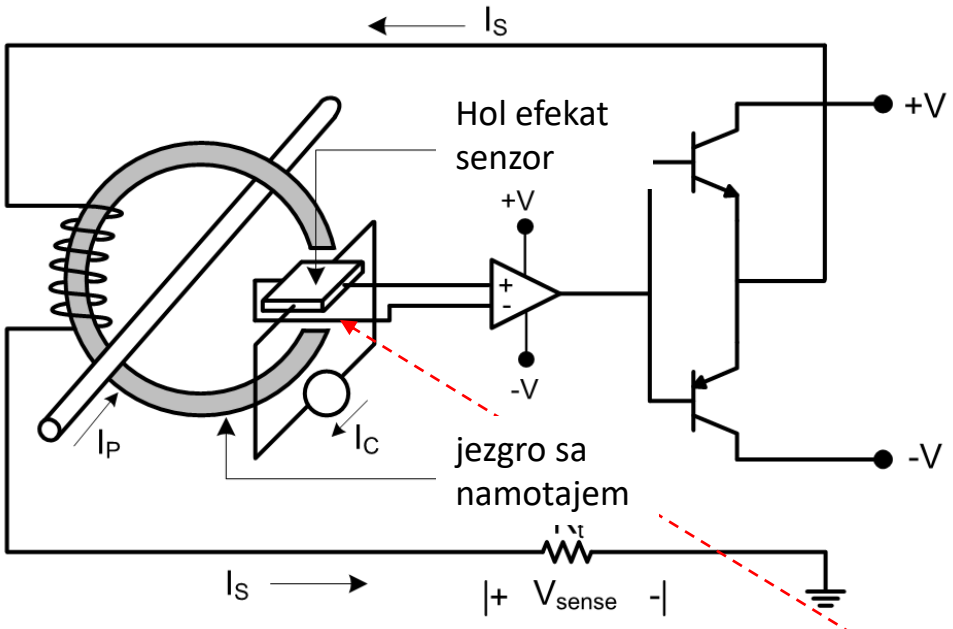


$$N_P I_P = N_S I_S$$

Ukoliko je magnetni fluks u procepu kompenzovan tj =0.

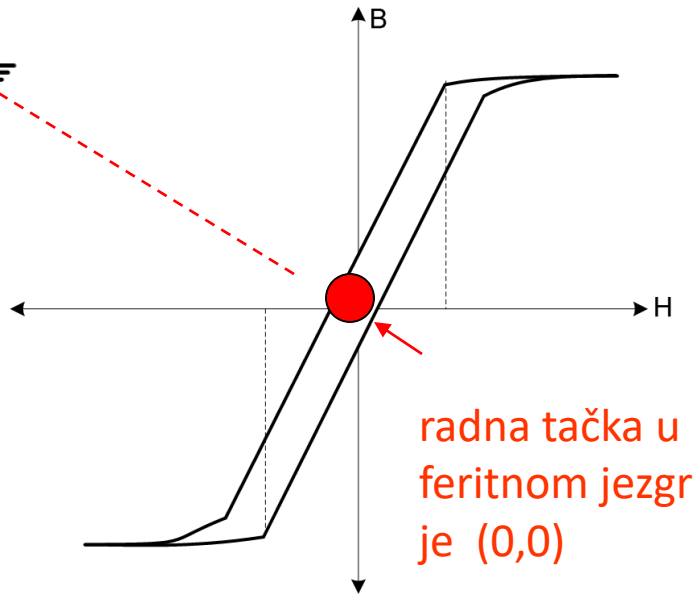
GDE SE NALAZI RADNA TAČKA??

RADNA TAČKA U FERITNOM JEZGRU PRI KOMPENZOVANOM FLUKSU

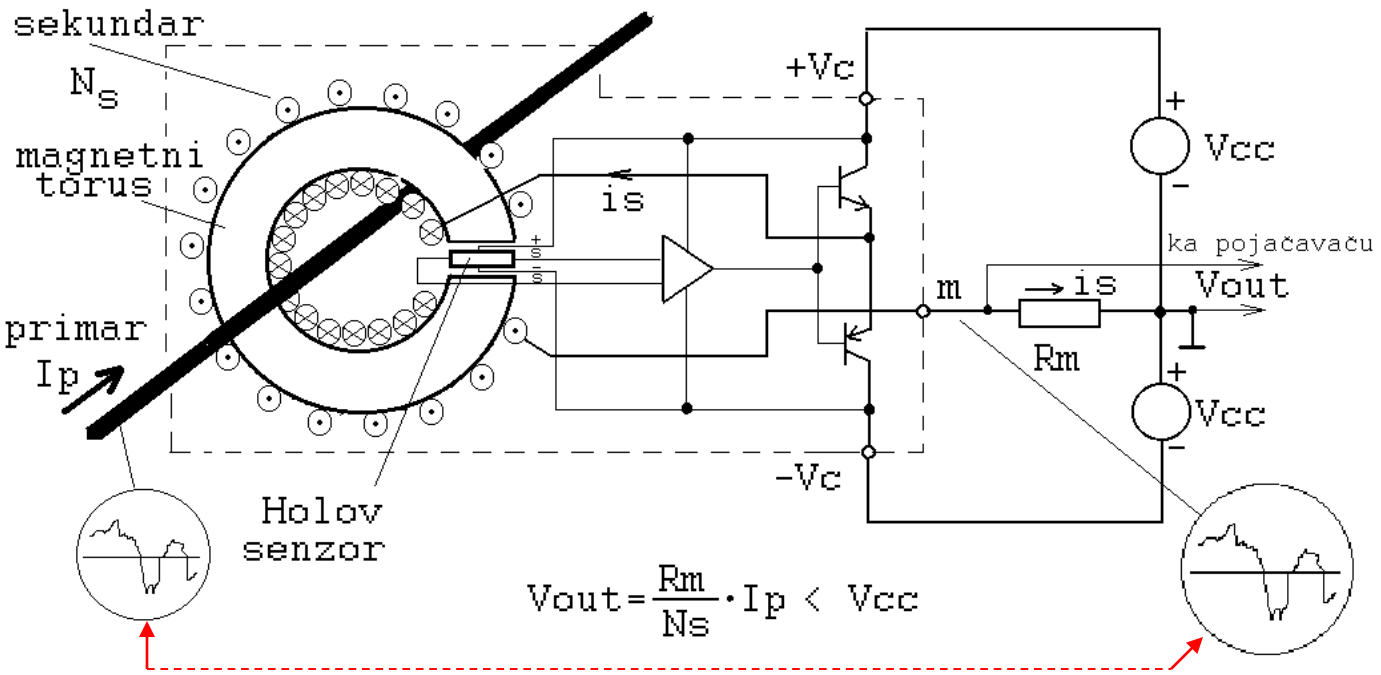


$$N_P I_P = N_S I_S$$

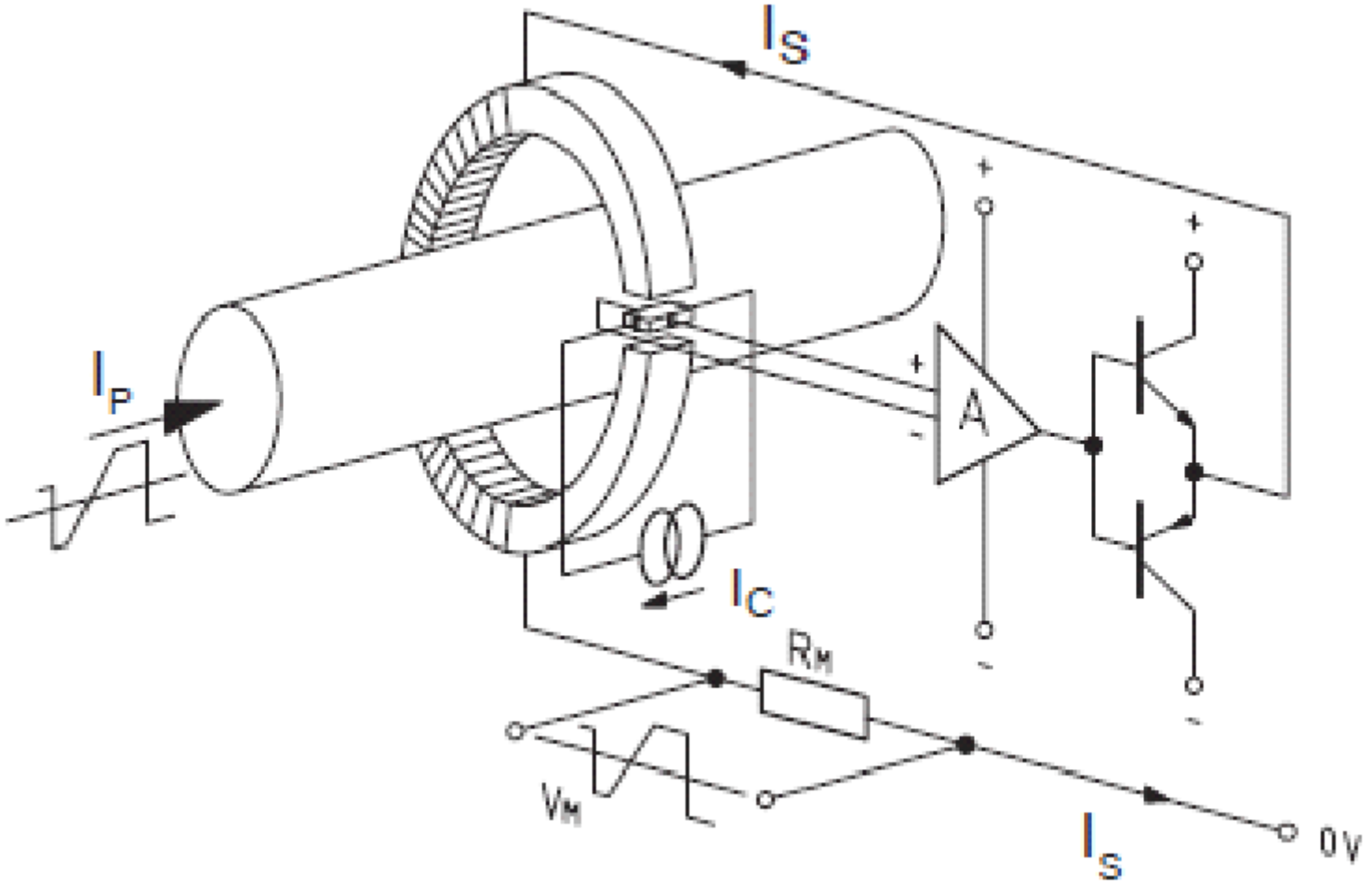
Magnetni fluks u procepu kompenzovan tj B=0, H=0



MERENJE TRENUTNE VREDNOSTI STRUJE-LEM senzor



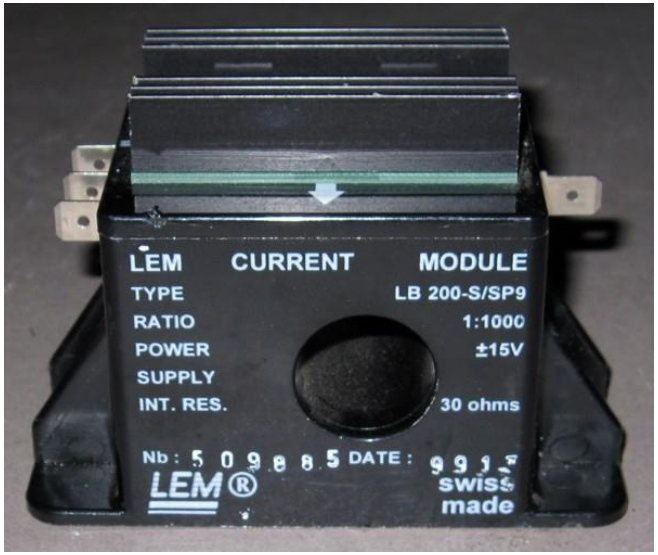
Precizno merenje trenutne vrednosti struje u širokom frekventnom opsegu (merenje veoma brzih pojava na nivou 100-200ns se ostvaruje strujnim LEM modulima. Glavni deo davača predstavlja *Holov senzor* koji se stavlja u procep torusa kroz koji se provlači provodnik čija se struja meri. Senzor se napaja sa eksternim naponom (tipično ±12VDC), a na izlazu daje napon koji je proporcionalan indukciji u procepu odnosno vrednosti primarne struje. Signal sa senzora se pojačava i vodi na izlazni tranzistorski stepen (naponski sleditelj) koji se pobuđuje u ritmu napona na senzoru . Izlazni tranzistori ustvari napajaju namotaj na torusu tako da kompenzuju struju primara te je magnetno polje u vazdušnom procepu jednako nuli. Na otporniku se meri ova kompenzujuća struja koja je preslikana struja primara u odnosu . Prednost ovog davača sa povratnom spregom je što nema problema vezanih za zasićenje magnetnog materijala torusa i što je propusni opseg davača od DC do par stotina MHz (tipično do 200MHz). **Proticanjem kompenzacione struje kroz merni otpornik dobija se željeni napon na izlazu davača.**



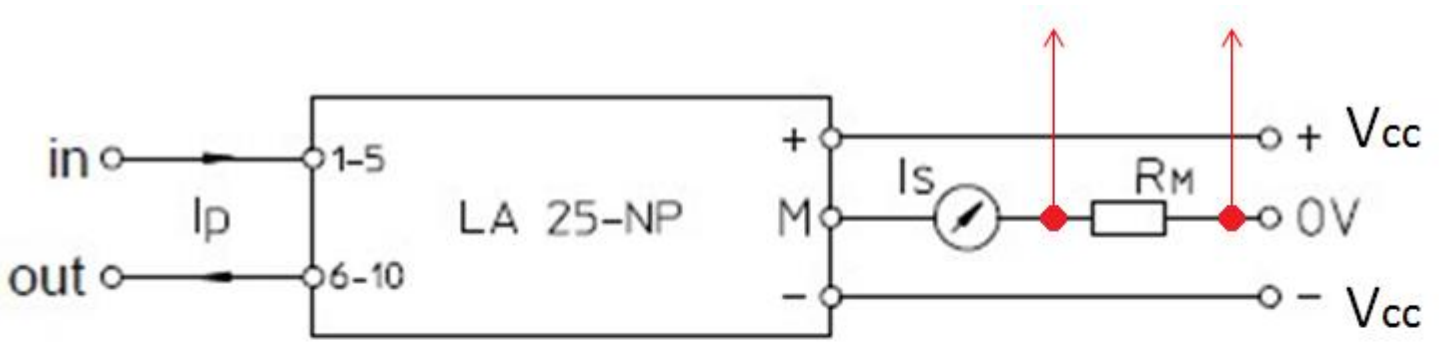
3D prikaz merenja struje sa strujnim LEM modulom sa povratnom spregom

Napon V_M je proporcionalan primarnoj struji, a njegov talasni oblik je neizobličen (propusni opseg LEM strujnog davača DC-200MHz).

IZGLEDI POJEDNIH STRUJNIH LEM MODULA

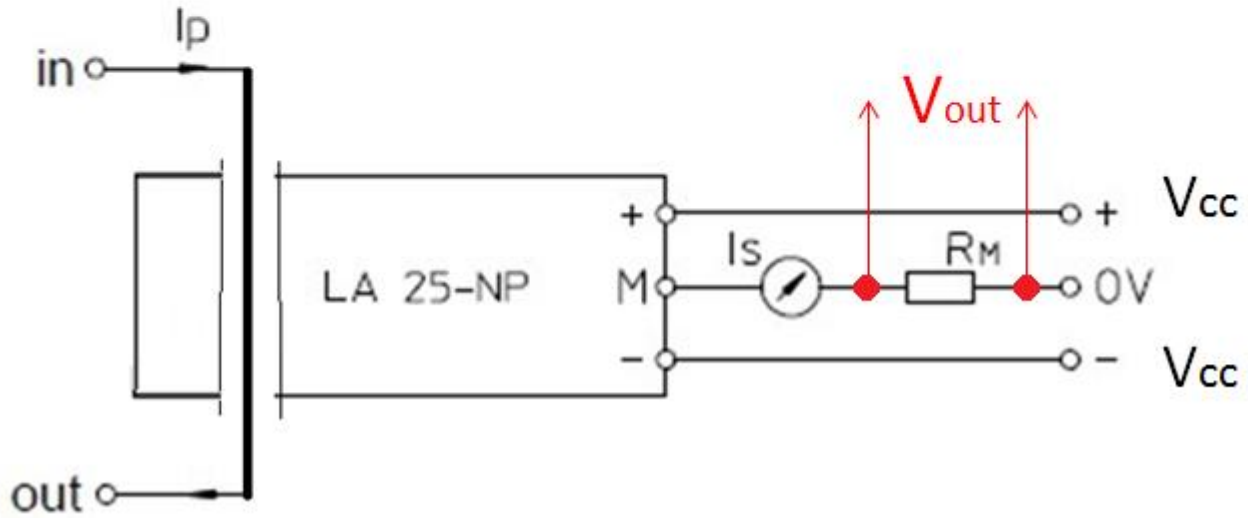


KAKO SE VEZUJE STRUJNI LEM?

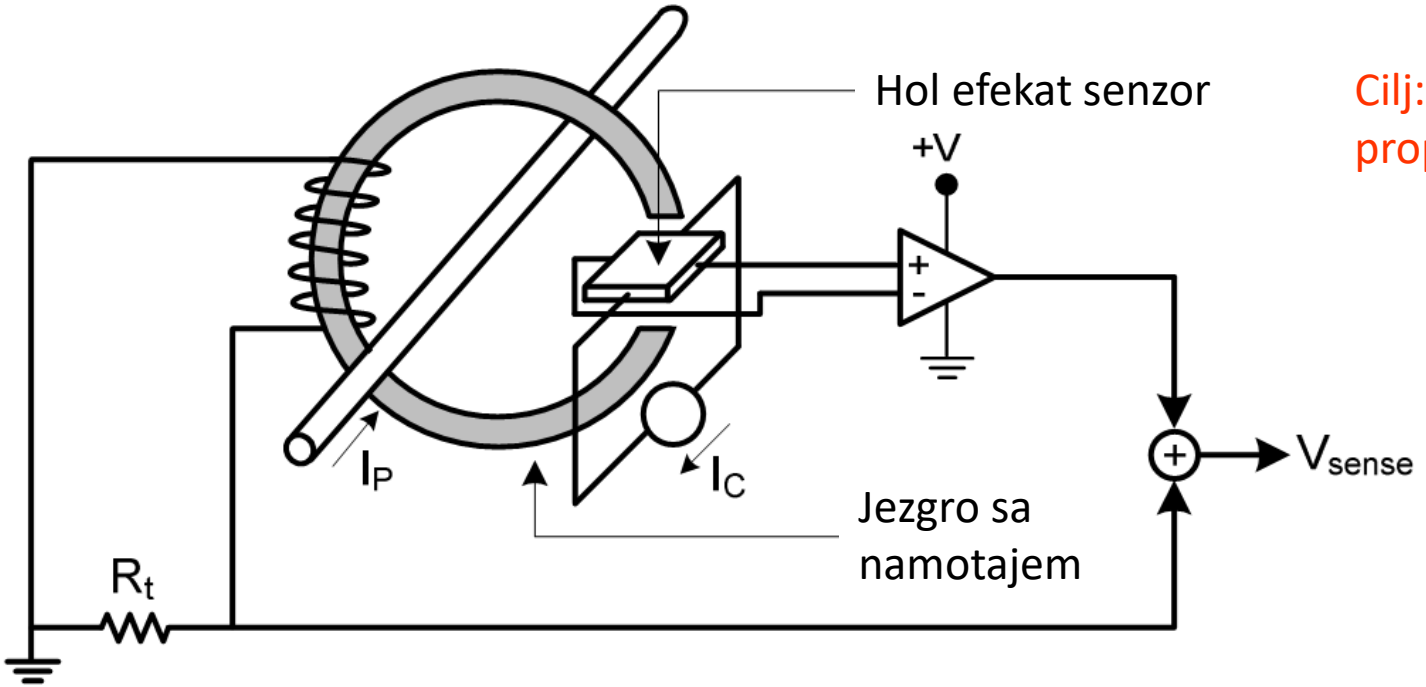


ili

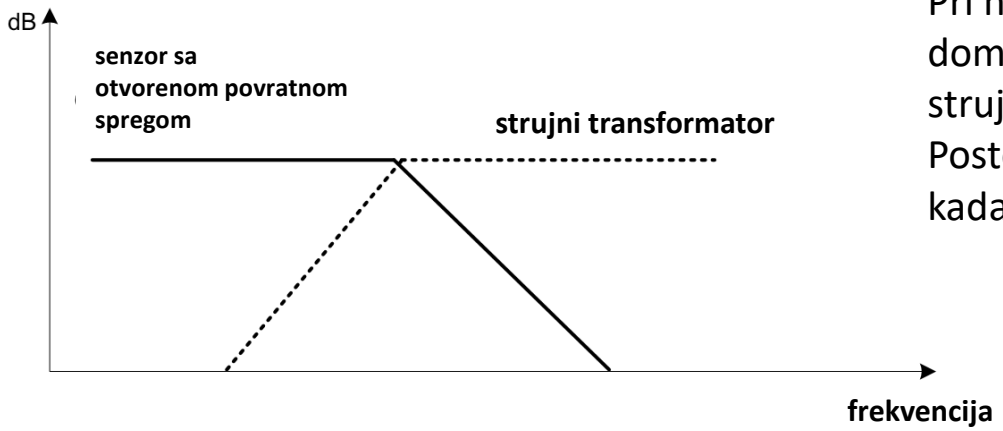
$V_{out}=(I_p/N) \times R_M \leq V_{cc}$



KOMBINACIJA HOLOVOG SENZORA U OTVORENOJ POVRATNOJ SPREZI I OBIČNOG STRUJNOG TRANSFORMATORA



Cilj: povećati propusni opseg

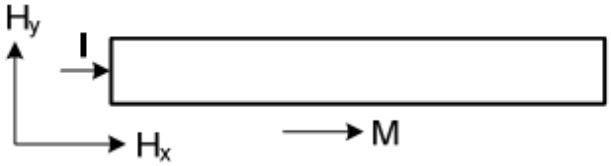


Pri nižim učestanostima dominira senzor a pri višim strujni transformator!!! Postoji i oblast preklapanja kada rade oba

MAGNETNO-REZISTIVNI STRUJNI SENZORI

- Svi provodni materijali su na nekinačin magnetno rezistivni, odnosno magneto-otporni
- Naročito se to odnosi na leguru gvožđa i nikla PERMALLOYS (Fe-NI), ali i na druge feromagnetne materijale
- Magnetni otpornik je elemenat sa dva kraja koji menja svoju otpornost u zavsianosti od primenjenog magnetnog polja
- Kako izgleda ta promena?

PROMENA OTPORNOSTI U ZAVISNOSTI OD PRIMENJENOG POLJA

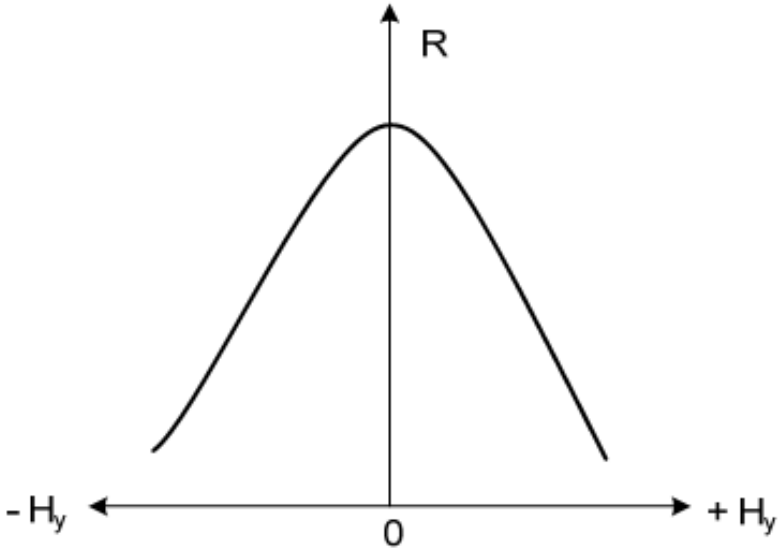


M je rezultantna magnetizacija koja potiče od Hx i Hy.

Primenjeno magnetno polje Hy
(Hx je eksterno ili interno magnetno polje)
"prožima" magneto-otporni materijal

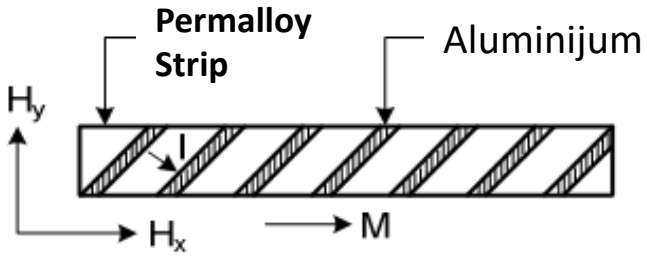
Ovi materijali su značajno osetljiviji od Holovih senzora.

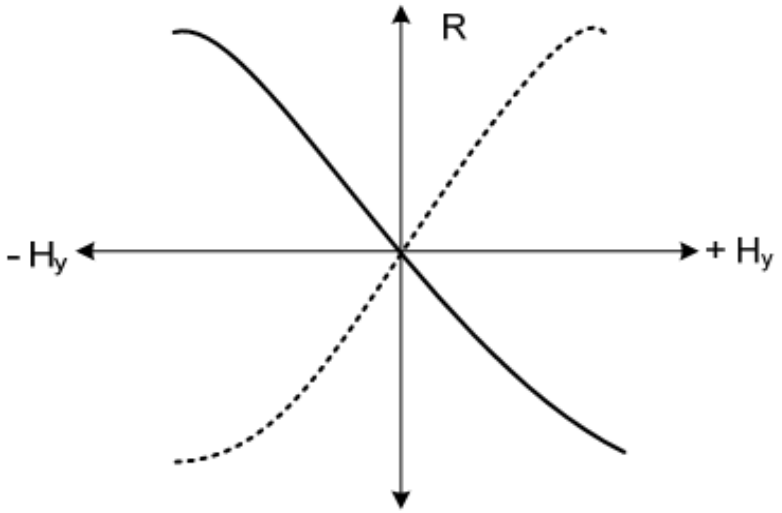
Hy je spregnuto sa materijalom i menja njegovu otpornost koja se meri na osnovu struje I koja protiče kroz njega.
Osetljivost senzora se kontroliše sa Hx



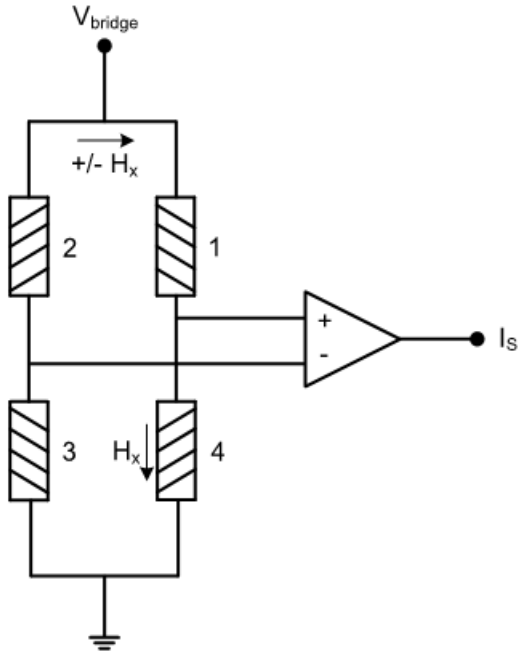
Promena otpornosti materijala u zavisnosti od Y- komponente polja

KADA SU STRUJA ***I*** I MAGNETIZACIJA ***M*** PARALELNE OTPORNOST MATERIJALA JE NAJVEĆA!!! KADA SU ONE POD UGLOM OD 90°, TADA JE ONA NAJMANJA!!!

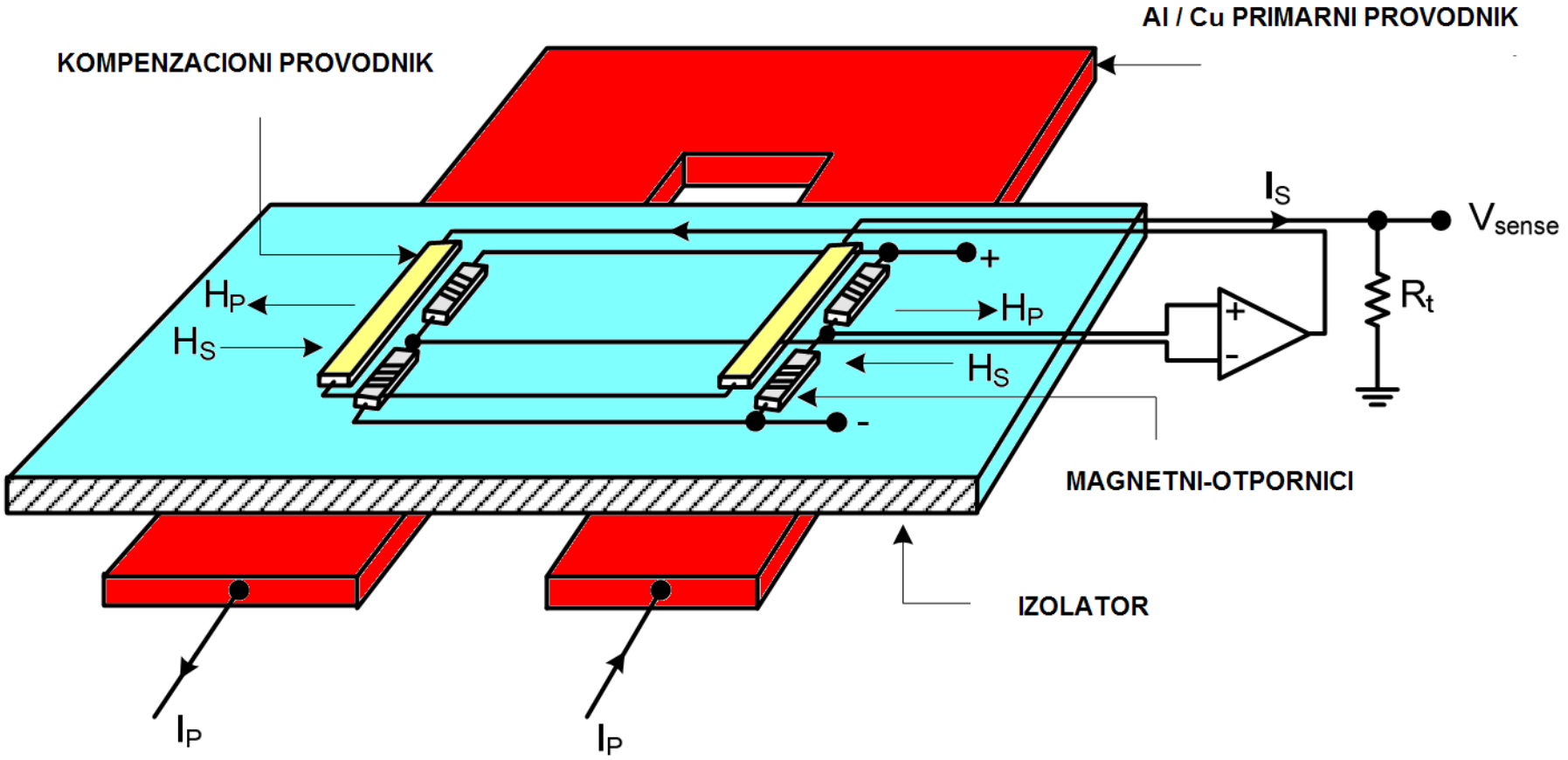




Da bi se detektovala promena smera polja (rešenje u prethodno opisanom slučaju to ne može) primenjuje se tzv. BRBERPOLE konstrukcija sa aluminijumom (Al).
Promena otpornosti za oba smera polja je data na slici desno.
Pri merenju se primenjuje most sa kojeg se uzima signal kao na slici.
Magnetni otpornici 1 i 3 su sa zakrenutom Al trakom od +45°, dok je kod 2 i 4 taj ugao -45°.



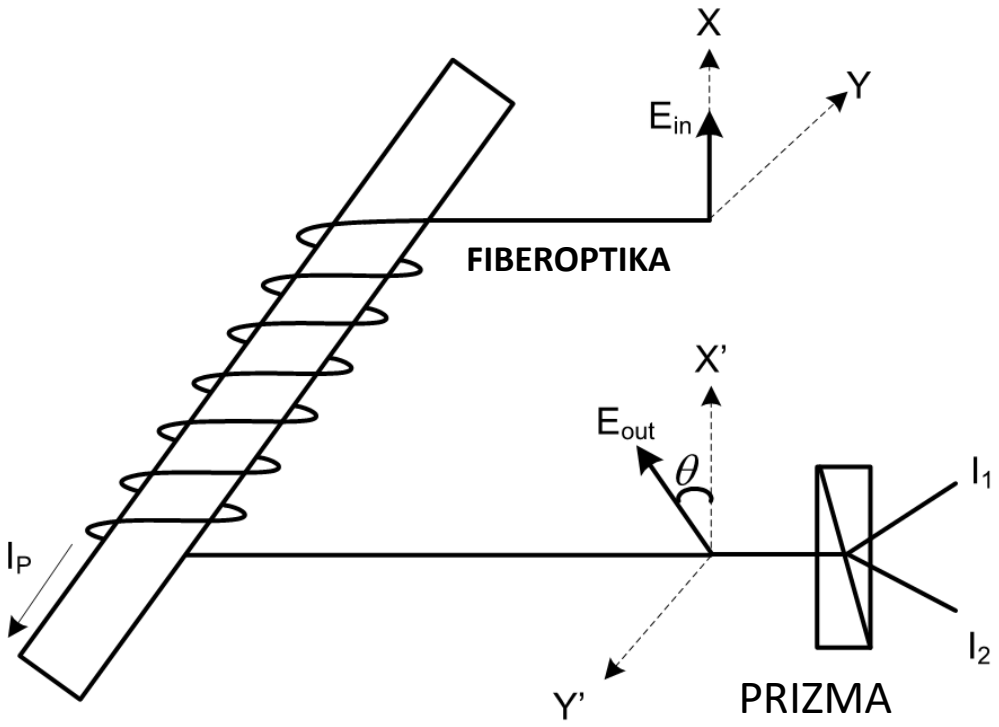
TIPIČAN INDUSTRIJSKI MAGNETO-OTPORNI DAVAČ STRUJE



Izlaz Vitstonovog mosta se vodi na ulaz OP pojačavača koji generiše kompenzacionu struju Is. Struja Is protiče kroz aluminijumske provodnike i stvara magnetno polje koje kompenzuje magnetno polje primarne struje Ip. Izlazni napon mosta je oko nulte vrednosti.Stoga je nelinearnost senzora minimizirana. Struja Is se meri na otporu Rt i napon na njemu je proporcionalan struji Ip. Ovakav senzor može da meri sa galvanskom izolacijom, AC ili DC primarnu struju Ip. Propusni opseg ove tehnike je do 100kHz.

FIBEROPTIČKI STRUJNI SENZORI

Bazirani su na Faradejevom efektu: *kada se polarizovana monohromatska svetlost prostire paralelno magnetnom polju SMER POLARIZACIJE ROTIRA kao na slici*.



Polarizacioni ugao je proporcionalan magnetnom polju optičkog puta

Ugaona rotacija je :

$$\theta = VBl$$

V- Vredetova konstanta (karakteristika materijala)
B-gustina magnetnog fluksa (indukcija)
l- dužina fiberoptičkog strujnog senzora izloženog magnetnom polju

Polarizacioni ugao zavisi i od talasne dužine svetlosti i od fiber materijala

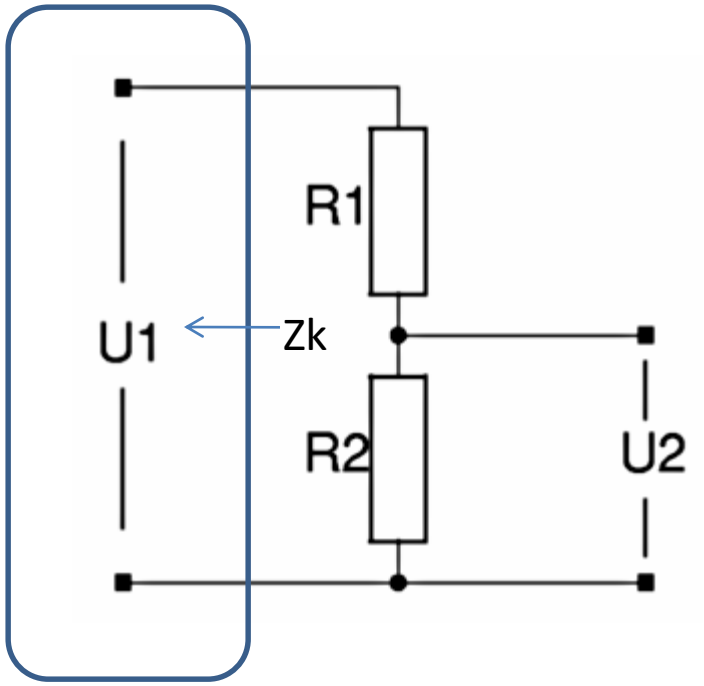
MERENJE NAPONA

- Merenje napona u kolima monitoringa električnih mašina i u regulisanim elektromotornim pogonima ne predstavlja neki naročiti problem
- Obično se kao senzor koristi razdelnik napona čija je impedansa (otpori u njemu) mnogo veća od impedanse ostatka kola u koji se postavlja
- Problem se javlja ako želimo merenje napona sa galvanskom izolacijom, što se naročito traži pri merenjima na visokim naponima (>1kV)
- Savremeni senzori za merenje visokih napona su bazirani na naponskim LEM modulima

RAZDELNICI NAPONA

- Merenje jednosmernog i naizmeničnog napona
- Nema galvanskog odvajanja
- Mogu biti otpornički i kapacitivni
- Otpornički unose manje fazno kašnjenje
- Kapacitivni stvaraju manje gubitke
- Treba imati u vidu ulaznu impedansu mernog pretvarača

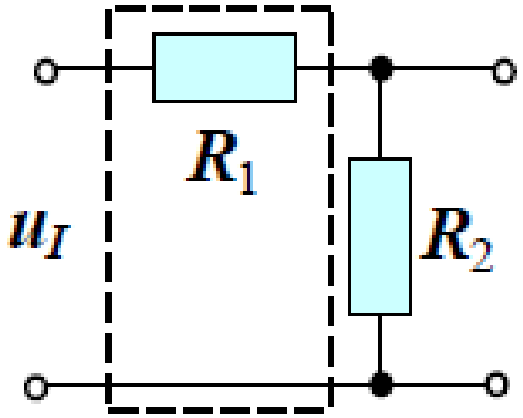
PRENOSNI ODNOS RAZDELNIKA NAPONA?



- U2=U1·R2/(R1+R2)
- R1,R2 moraju biti mnogo veći od impedanse ostatka kola
- Samo u tom slučaju struja razdelnika je beznačajna i samim tim merenje je tačnije

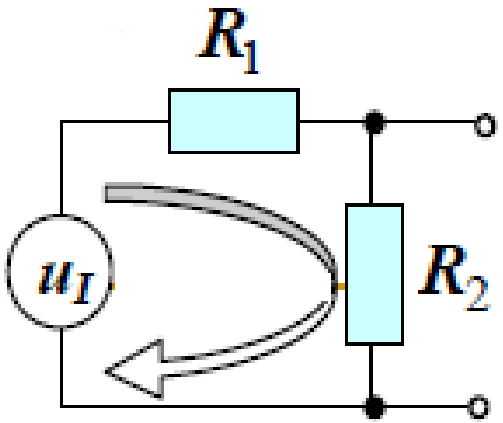
KAKO SE DALJE OBRAĐUJE IZMERENI NAPON U2?

RAZDELNIK JE USTVARI PASIVNA **MREŽA SA DVA PRISTUPA KOD KOJE** JE SNAGA NA IZLAZU MANJA OD SNAGE NA ULAZU I ZA KOJU JE ODNOS TRENUTNIH VREDNOSTI NAPONA (STRUJA) NA IZLAZU I ULAZU STALAN.



Veličine otpora R1 i R2 zavise od željene vrednosti napona Uo

$$u_O = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_I$$

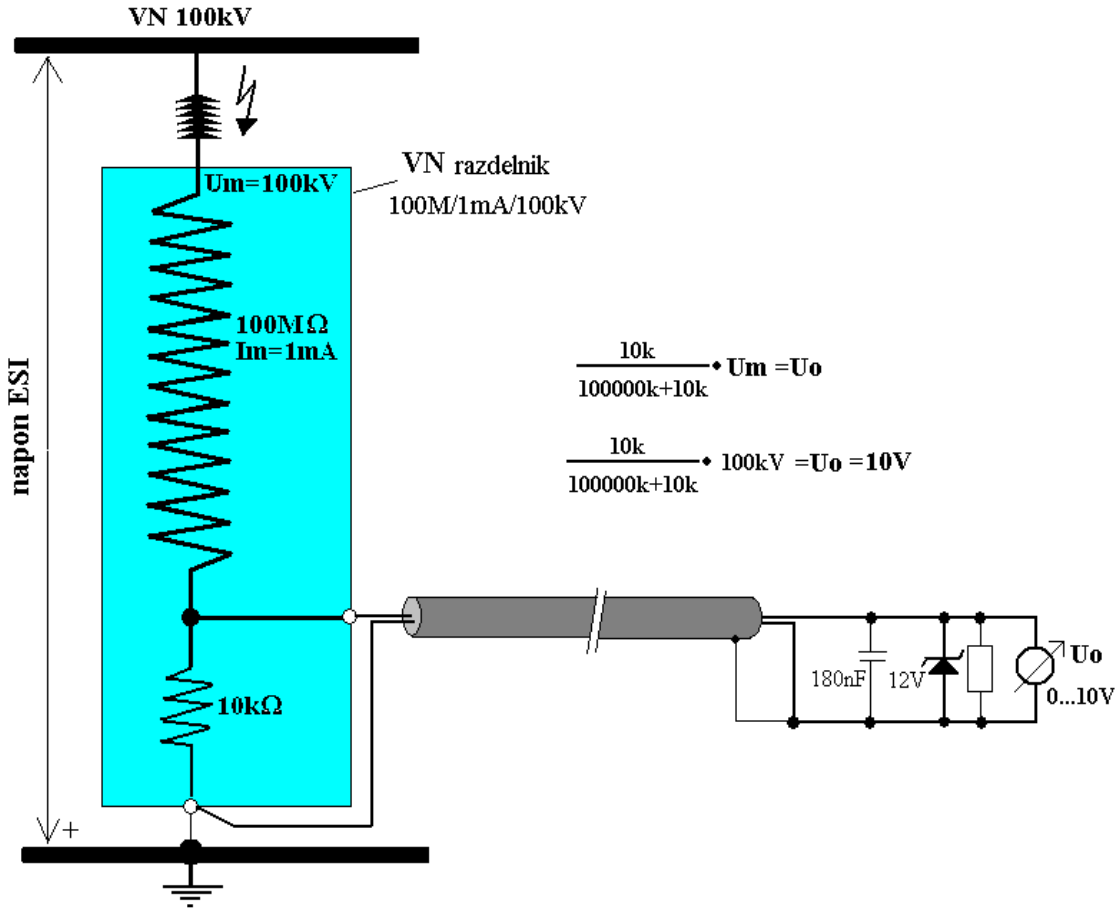


STRUJA RAZDELNIKA

$$i = \frac{u_I}{R_1 + R_2}$$

$$u_O = R_2 u_I$$

Konvencionalno VN merenje



Standardno se problem merenja visokog napona rešava **<u>VN otporničkim razdelnikom</u>**, pri čemu je razdelnik sastavljen od dva otpornika kao što prikazuje slika. Gornji kraj VN otpornika je vezan preko VN izolatora na VN kraj (standardno 35kV, 100kV ...). Standardna vrednost ovog otpornika je 100MΩ, a nominalna struja 1mA. Otpornik koji je postavljen ka uzemljenom kraju elektroda ESI je značajno manje vrednosti i sa njega se vrši merenje napona na ESI prema odnosu razdelnika. Sa otpornika 10kΩ se vodi naponski signal oklopljenim (*"širmovanim"*) kablom do mernog instrumenta ili do ulaska u digitalni kontroler.

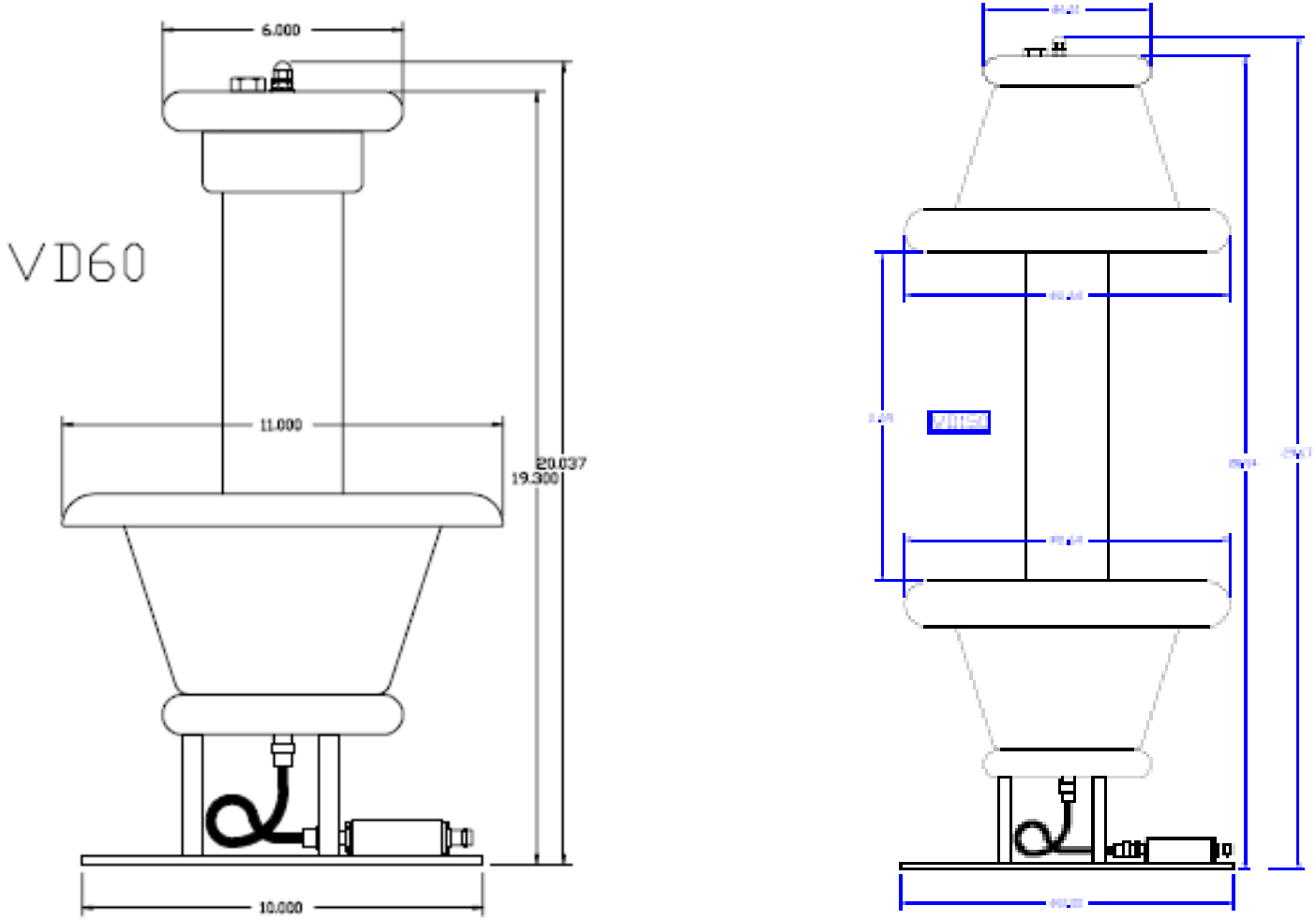
KAKO TO IZGLEDA U STVARNOSTI??

VN razdelnik

Transmiter

Uglavnom su prenosni odnosi razdelnika 1:1000 ili 1:2000 i u tom slučaju se koristi odgovarajući transmiter koji normalizuje signal visokog napona ESI na nivo 0-10V.

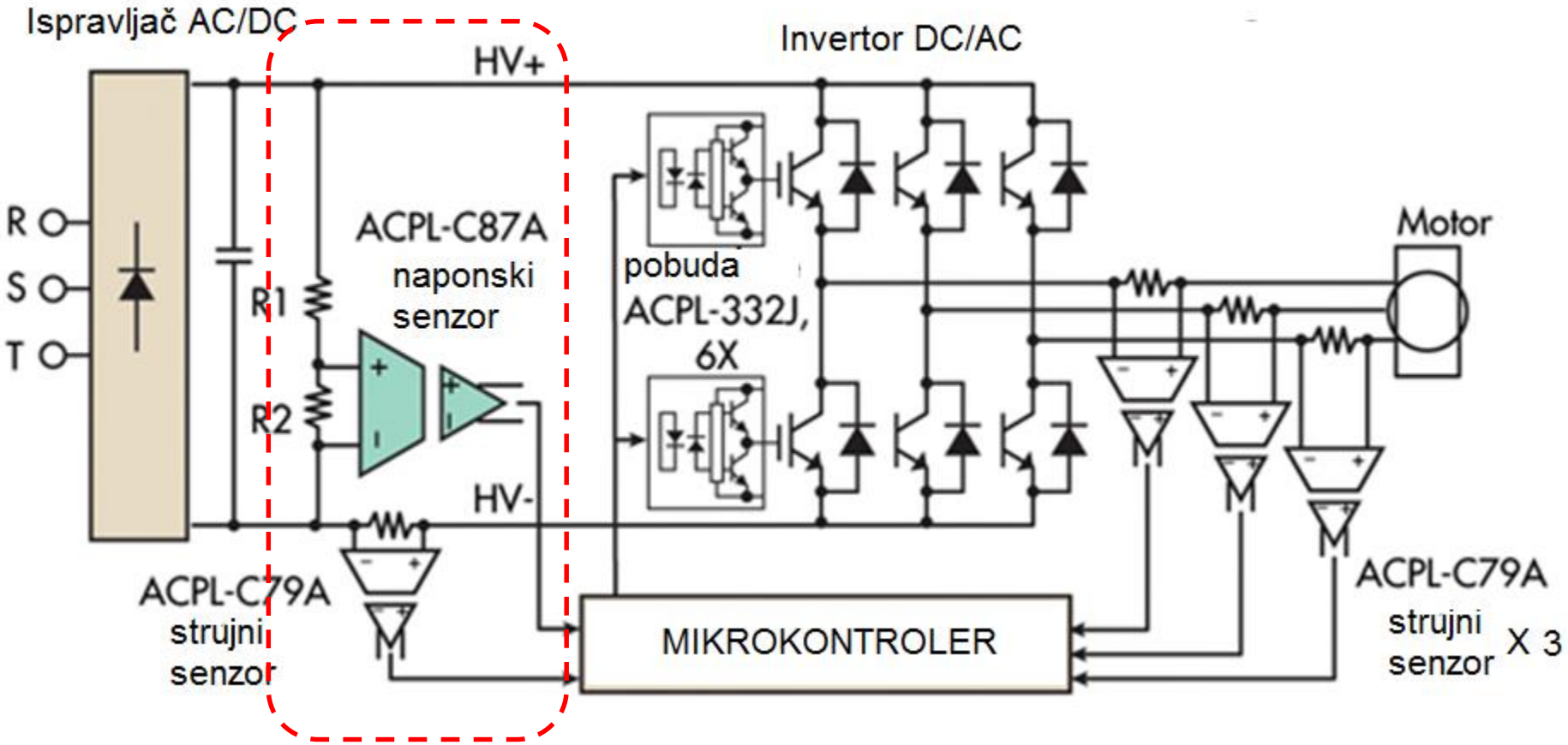
Svi ovi sistemi se odlikuju značajnim dimenzijama, a stoga i cenom. Pored ovoga oni zahtevaju specijalne uslove za montažu zbog svog specifičnog oblika



(a) (b)

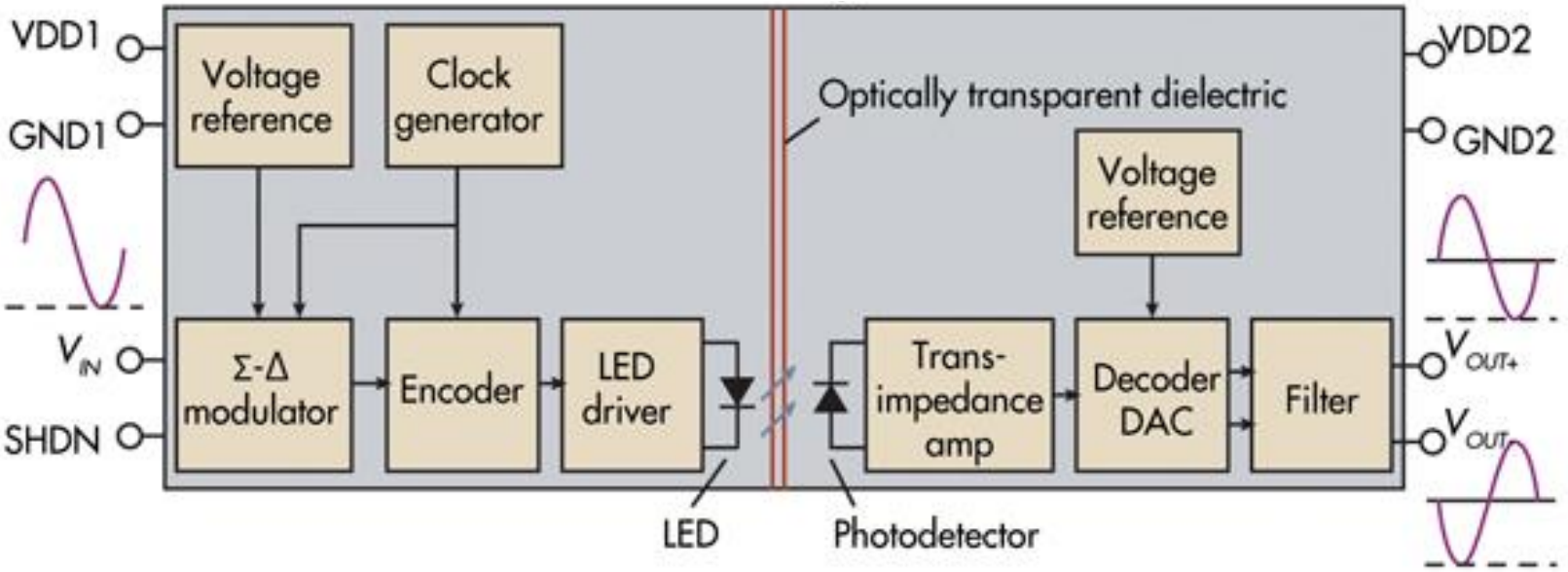
VN razdelnici firme North Star high Voltage, (a) tip VD60 za 60kV, (b) tip VD150 za 150kV

OPTOIZOLOVANO MERENJE VISOKOG NAPONA U DC MEĐUKOLU U REGULISANOM POGONA (frekventnog regulatora) AC MOTORA

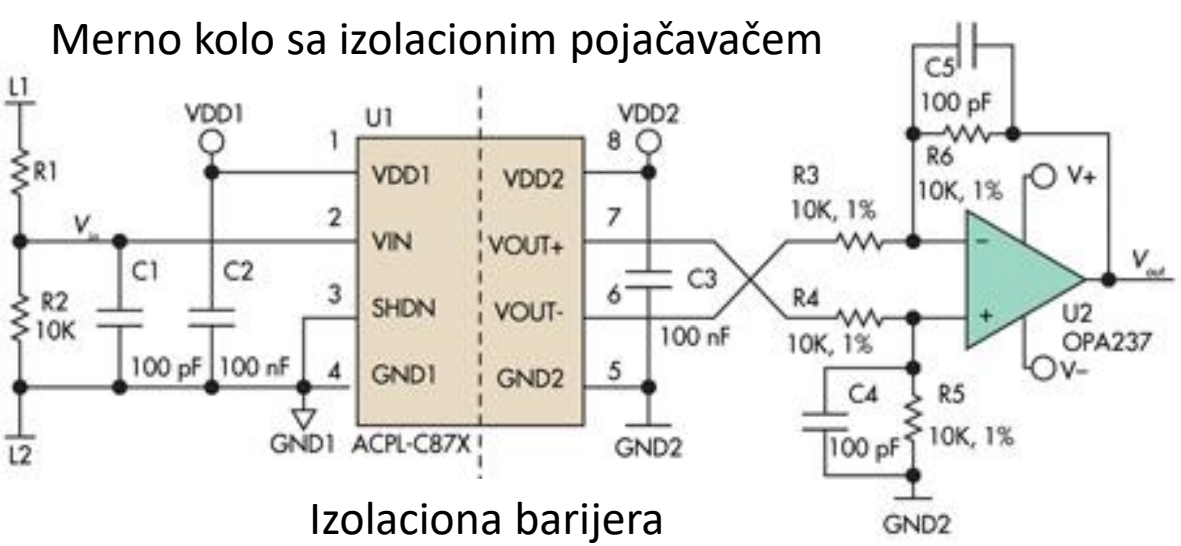


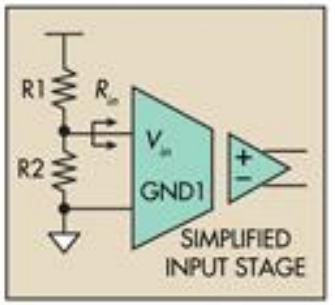
ACPL-C87A naponski senzor sa optoizolacijom koji koristi razdelnik u DC međukolu

BLOK DIJAGRAM KOLA ACPL C87 X



Merno kolo sa izolacionim pojačavačem





Izolaciona barijera

MERENJA NAPONA BAZIRANA NA Hall- EFEKTU

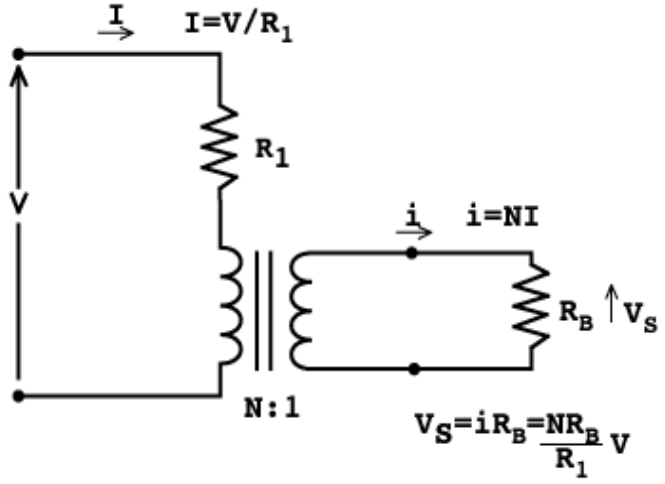
- Merenje jednosmernog i naizmeničnog napona
- Galvanska izolovanost
- Meri se struja kroz poznatu vrednost otpora
- Osetljiviji senzor struje, više navojaka na primarnoj strani
- Problemi sa disipacijom
- Problemi sa promenom otpora usled zagrevanja

LEM – NAPONSKI PRETVARAČ

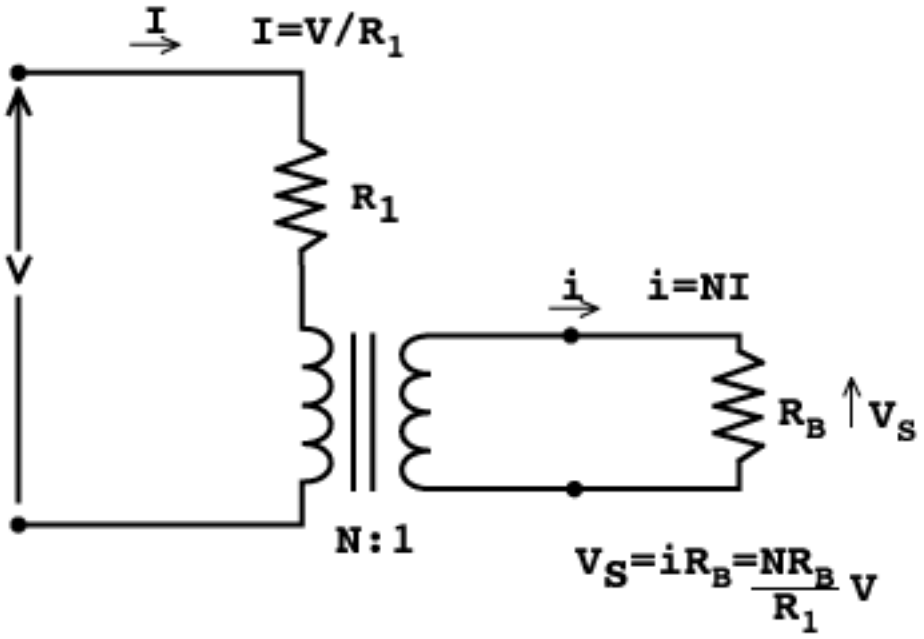
•LEM (Švajcarska firma-LEM: www.lem.com) naponski pretvarač konvertuje visoki napon u niski napon, uz izolaciju između VN izvora i signalnog NN izlaza.

•On omogućava dobijanje naponskog signala koji je u svakom trenutku proporcionalan primarnom naponu, i koji je pretvoren sa visokim kvalitetom bez izobličenja ali je istovremeno osiguran sa stanovišta bezbednosti u odnosu na VN.

•Ovo poslednje je veoma bitno sa stanovišta monitoringa energetsih merenja i instrumentacije.



PRINCIP RADA NAPONSKOG PRETVARAČA

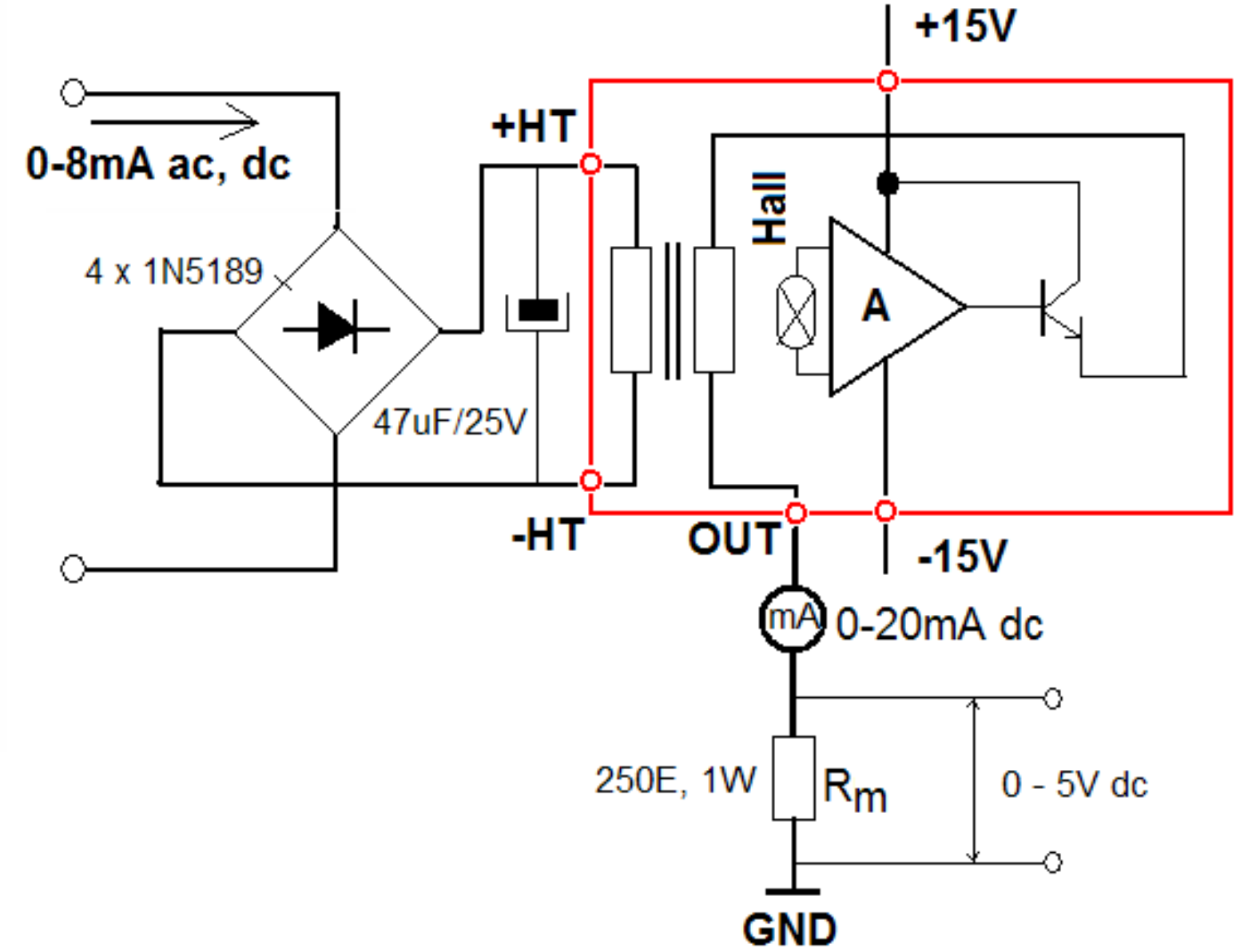


LEM naponski pretvarač ustvari koristi električno izolovani strujni senzor za merenje struje kroz jedan ili dva precizna visokonaponska otpornika koji se priključuju na visoki napon koji se meri. Signalno kolo je izolovano od primara, čak i ako se desi prekid na otpornicima u primaru.

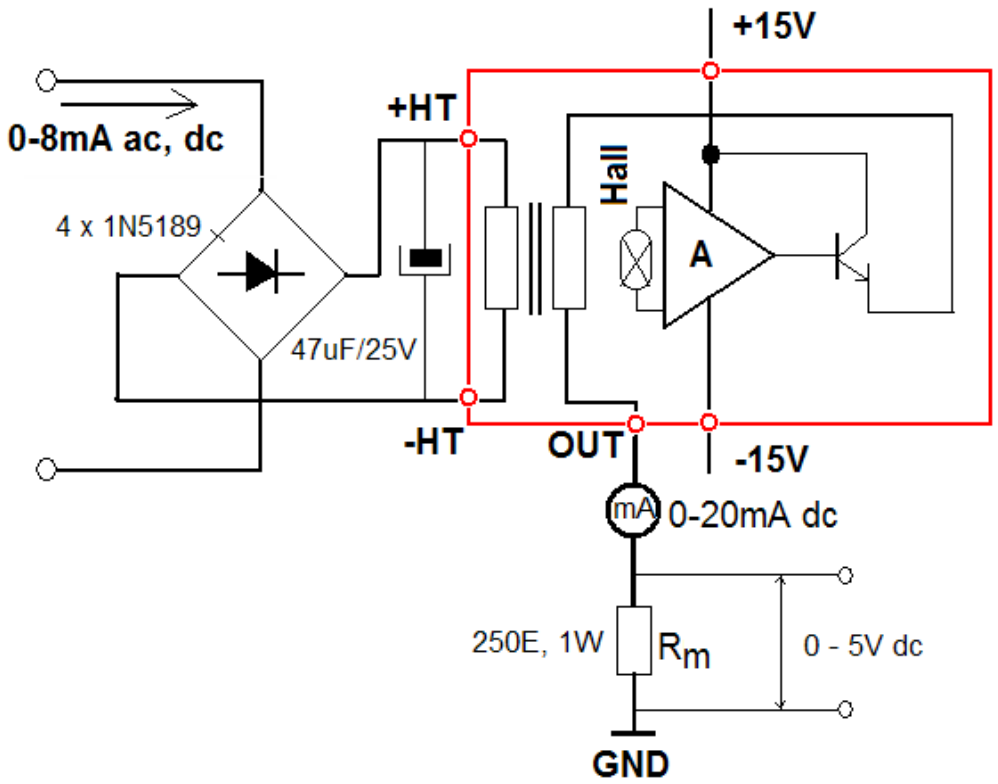
Za ulazni visoki napon V i redno vezan otporR_1, primarna struja je I = V/R_1.
PRIMER: V = ±1000V i R_1 = 0.5M, tada je I = ±2mA. Disipacija na R1 je Pd=$(2mA)^2$*1M = 4W. Ova snaga je gubitak u primarnom kolu. LEM pretvarač je veoma osetljiv (baš zato što se koristi otpornost) .

KAKO SE POSTIŽE LINEARNOST NAPONSKOG PRETVARAČA?

PRINCIPSKI BLOK DIJAGRAM NAPONSKOG LEM MODULA



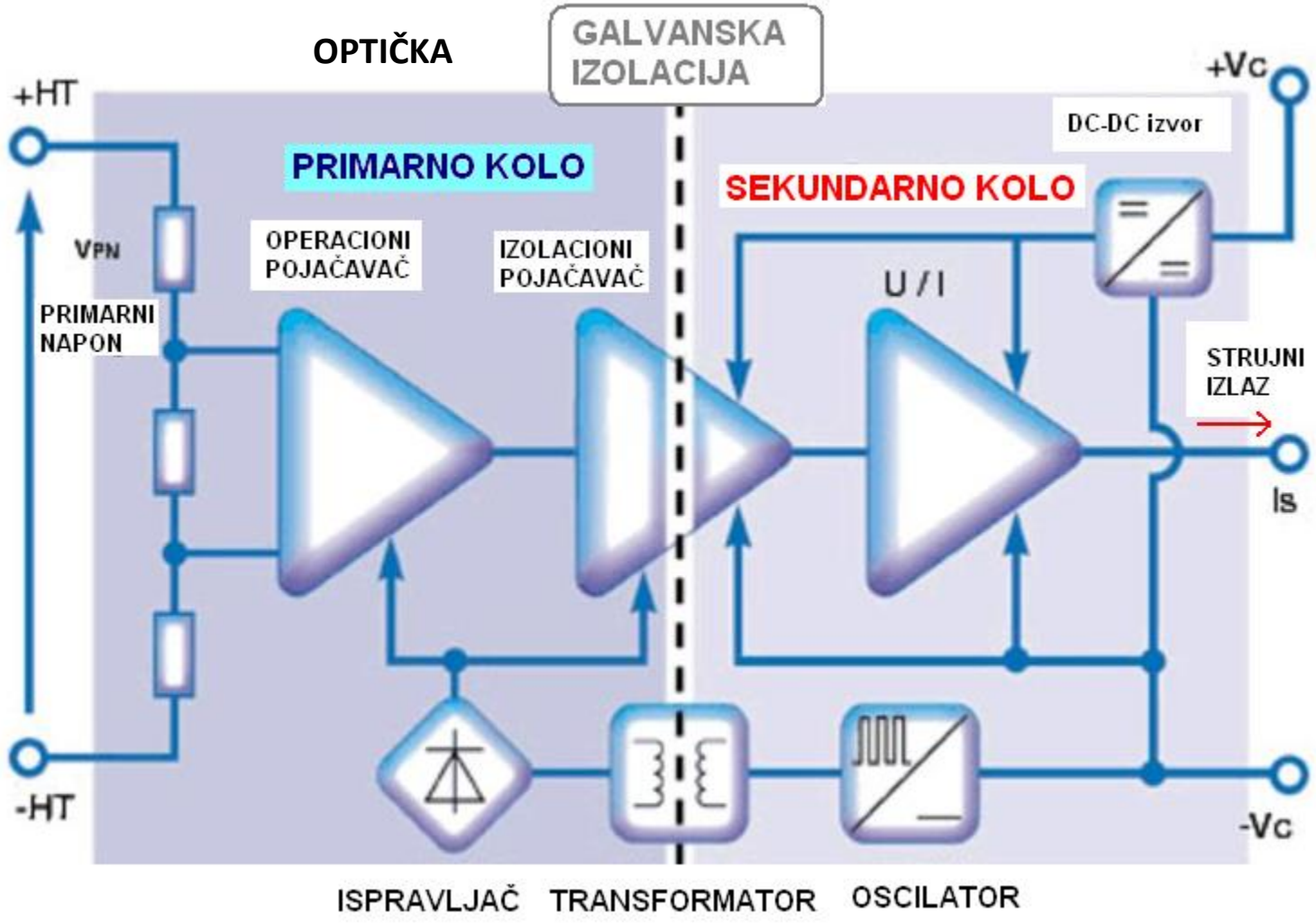
DOBIJANJE VISOKE LINEARNOSTI NAPONSKOG LEM MODULA



•Za dobijanje visoke linearnosti strujnog dela senzora , sam strujni senzor je izveden sa zatvorenom povratnom spregom ("closed loop“) ili kompenzovanim magetnim tipom gde se u magnetnom jezgru uvek održava fluks na vrednosti jednakoj nuli ili magnetno polje koje je jednako nuli.

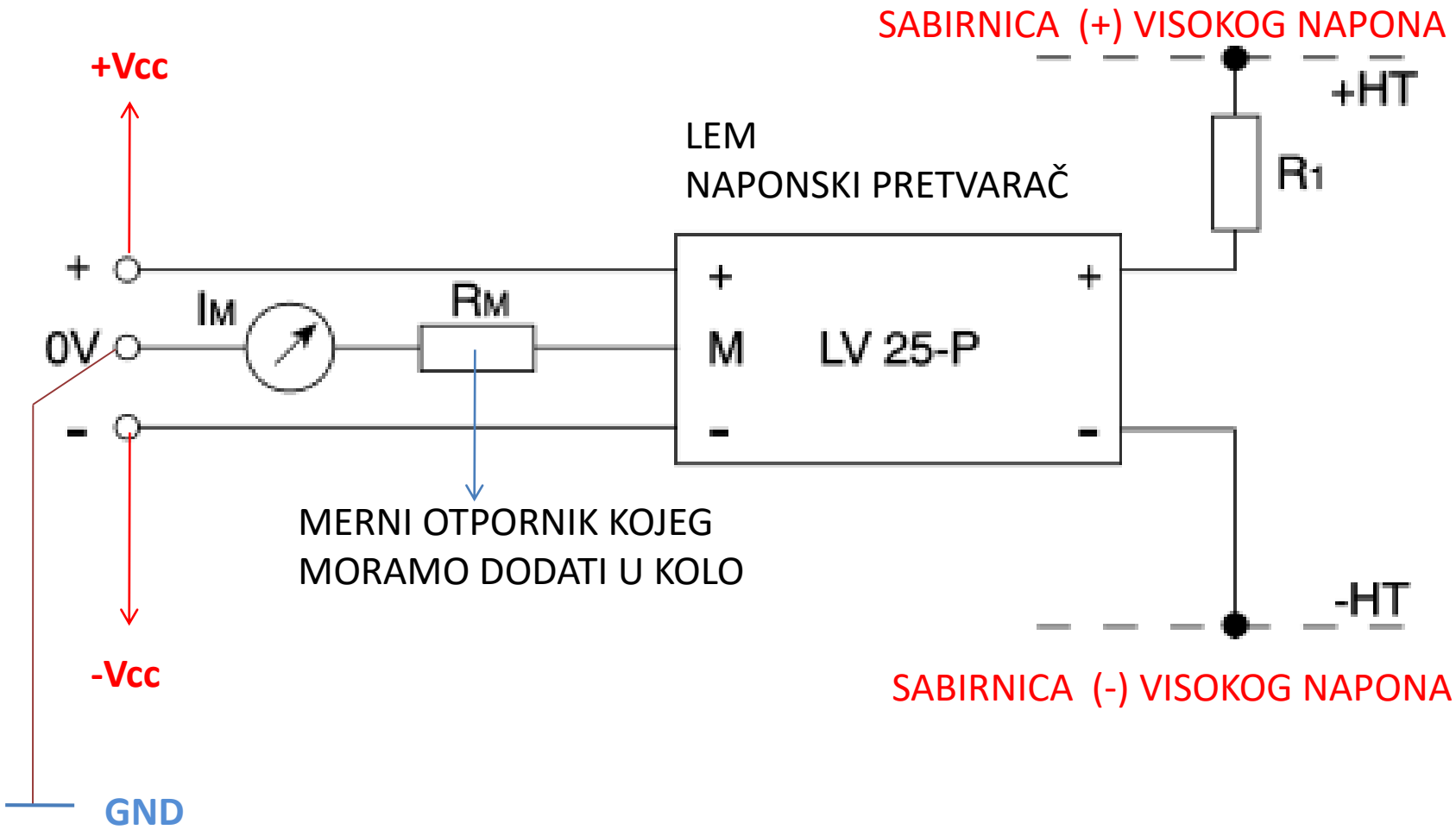
•Korišćenjem više namotaja na primaru magnetnog jezgra , strujni senzor ima veoma veliku efektivnu osetljivost .

•LEM naponski pretvarač ima strujni senzor sa odnosom primarna struja / sekundarna struja od 1:1.5 do 1:20.



Merenje visokih napona LEM serije AV 100 koristi isključivo elektronske komponente od kojih je najbitnija IZOLACIONI OPERACIONI POJAČAVAČ. Mereni napon (Vp) je direktno primenjen na ulazni operacioni pojačavač ali preko interne otporne (razdelničke) mreže i dodatne elektronike za napajanje izolacionog pojačavača. U sekundarnom kolu se koristi U/I pretvarač koji daje strujni izlaz proporcionalan ulaznom naponu Vp. DC/DC pretvarač stabiliše napajanje elektronike u sekundarnom kolu. Napon +Vc i –Vc se dovodi eksterno

KAKO SE VEZUJE NAPONSKI LEM?



LITERATURA

- J.H.Harlow: ***Electric power transformer engineering***, CRC Press
- Đ.Kalić, R.Radosavljević**, *TRANSFORMATORI*,** II Izdanje , Beograd 2003
- **Current transformers, October 2013**

http://meettechniek.info/instruments/current-transformer.html

- **Introduction to Closed Loop Hall Effect Current Transducers**, Bodo Power Systems, 2013

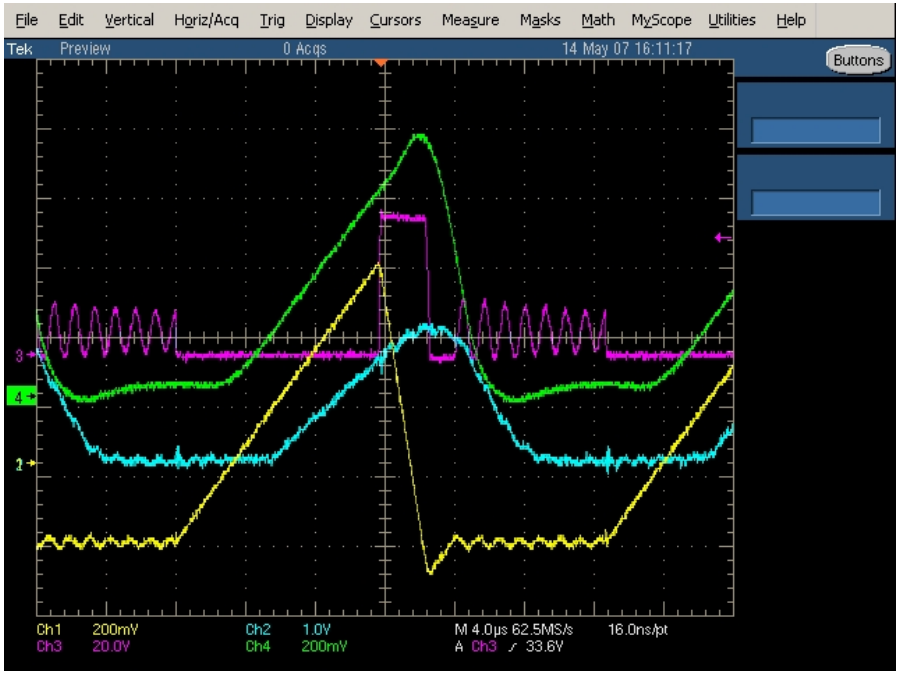
http://www.powerguru.org/closed-loop-hall-effect-current-transducers/

- Hong Lei Chen**, *Isolated voltage sensing for safe control*,** Avago Technologies, San Jose, Calif.

http://machinedesign.com/energy/isolated-voltage-sensing-safe-control

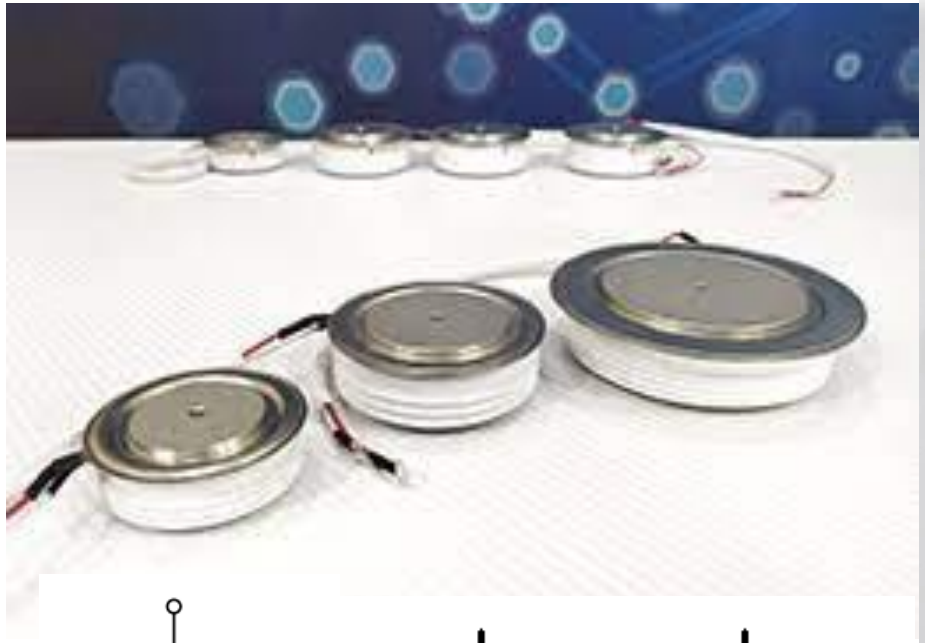
HVALA NA PAŽNJI!!!

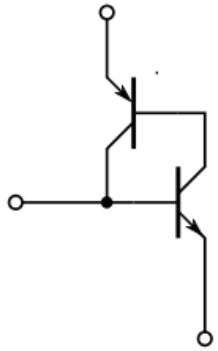
PITANJA???

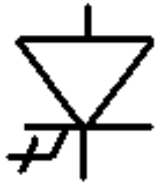


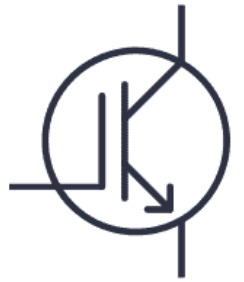
XXIII Međunarodni Simpozijum
INFOTEH 2024 – JAHORINA 20-22.03.2024.

PREGLED i PRIMENE TOPOLOGIJA ENERGETSKIH PRETVARAČA u SISTEMIMA PRENOSA ELEKTRIČNE ENERGIJE









PREDAVANJE PO POZIVU: Željko V. Despotović, Institut Mihajlo Pupin,
Univerzitet u Beogradu
zeljko.despotovic@pupin.rs

UVOD

- Oblast energetske elektronike (EE) srednjih i visokih napona je već postala jedan od ključnih aktera u sadašnjim ali i predstojećim tehničkim izazovima koje nameću sistemi fleksibilnog i kontrolisanog prenosa snaga (P,Q), mreže sa OIE, pametne mreže, tzv. *„smart grid“ i sl.*
- Svaki od ovih sistema nameće zahteve kao što su MAX propusnost snage, optimalni prenos, skoro trenutnu kontrolu struje i napona u svim delovima prenosnog EES-a.
- Takođe ova oblast EE ima veoma bitan zadatak da uspostavi pouzdanu i fleksibilnu spregu između pojedinih delova prenosnog EES-a kao i njihovu fleksibilnu spregu sa potrošačkim konzumom.
- Akcenat u radu je stavljen na topologije energetskih pretvarača koje se odnose na sisteme fleksibilnog AC prenosa tzv. *Flexible AC transmission* (FACT) i DC sisteme prenosa, tzv. *High voltage DC transmission* (HVDC).
- Na kraju je dat prikaz nekih praktičnih primera prekidačkih elemenata i istaknuti su neki problemi koji nisu rešeni, predstojeći izazovi i mogući pravci daljeg razvoja u ovoj kompleksnoj oblasti.

ISTORIJA-početci

- Istorija primene energetske elektronike i energetskih pretvarača u sistemima prenosa i distribucije počinje davne 1954.
- Tada su kao pretvarački sistemi po prvi put od strane švedske firme ASEA korišćeni brzi električni prekidači na bazi živinog luka u VN prenosu jednosmerne struje, tzv. ***high voltage DC (HVDC)*** putem kablovskog prenosnog sistema 20 MW, 100 kV, 200 A između Švedske i ostrva Gotland. U narednih nekoliko godina (do 1960.) je instalirano još devet takvih sistema.
- Sledeći značajan napredak došao je kada je prvi HVDC sistem baziran na visoko strujnim pretvaračima sa poluprovodničkim tiristorima (SCR), projektovan i pušten u rad 1970. Radi se o sistemu prenosa snage 1,44 MW, napona ±400 kV, prenosna linija od Dalasa-Oregon do Los Anđelesa-Kalifornija. Ovaj projekat je realizovalo zajedničko preduzeće koju su formirali ASEA i General Electric Co.
- Takođe kao rezultat pojave i komercijalne primene poluprovodničkih prekidača tiristora, tzv. *silicon controlled rectfiers* (SCR), počev od 1980. razvijeni su statički kompenzatori reaktivne snage (VAr kompenzatori), tzv. ***static var compensators (SVC),*** koji su postali konkurencija sinhronim kompenzatorima koji u osnovi koriste obrtne mašine.
- HVDC i SVC su od tada široko prihvaćeni u primenama fleksibilnih elektroenergetskih sistema (EES), kao pogodan i efikasan način kontrole tokova aktivne i reaktivne snage.

NEKE REALIZACIJE U SVETU

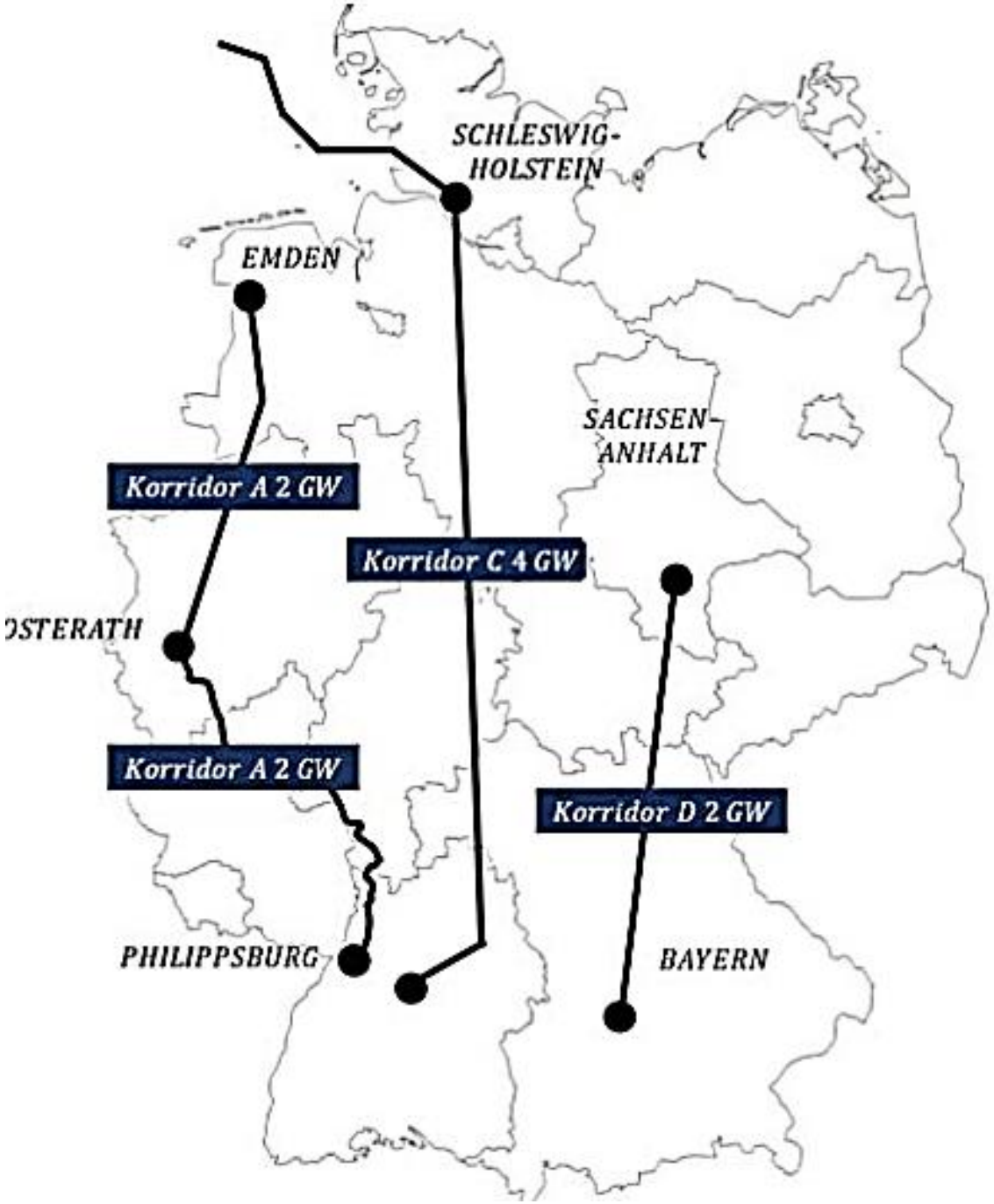
(a) Back to Back (BTB) Links

S. No.	System/Project	Year Comm-issioned	Supplier	Power Rating (MW)	Voltage (kV)
1.	Vindhyachal	1989	ABB	500	2 x 69.7
2.	Chandrapur–Ramagundam	1997/98	GEC Alsthom	1000	2 x 205
3.	Vizag–I	1999	GEC Alsthom	500	205
4.	Vizag–II	2005	ABB	500	±88
5.	Sasaram	2002	GEC Alsthom	500	205

(b) Line Projects

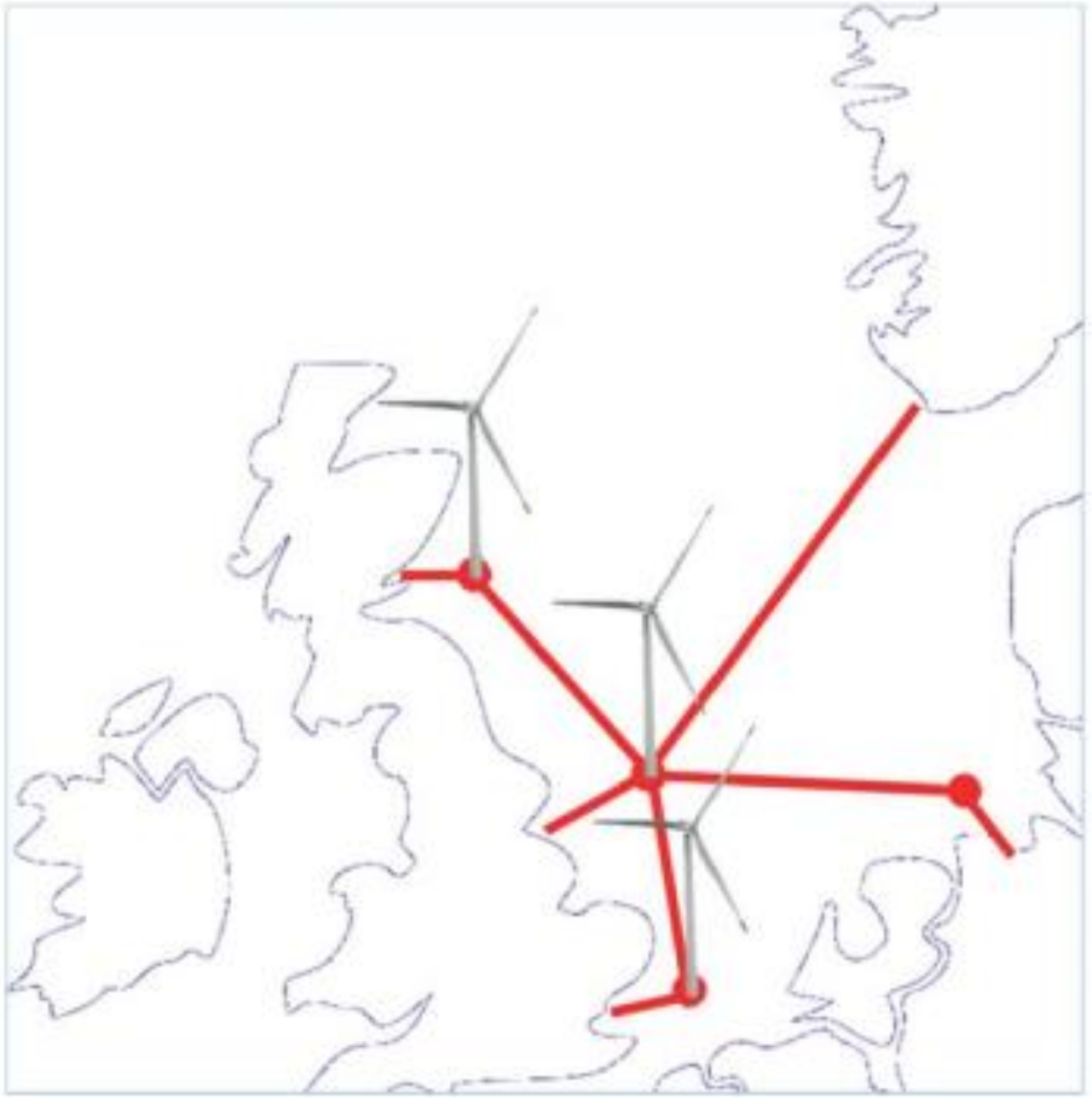
S. No.	System/ Project	Year Comm-issioned	Supplier	Power Rating (MW)	Voltage (kV)	Line Length (km)
1.	National HVDC Project–Stage–I	1989	BHEL	100	100	196
2.	NHVDC–Stage–II	2000	BHEL	100	200	196
3.	Rihand–Delhi	1991-92	ABB/BHEL	750/1500	± 500	814
4.	Chandrapur–Padghe	1998	ABB/BHEL	1500	± 500	736
5.	Talcher–Kolar	2003	Siemens	2000	± 500	1400
6.	Balia–Bhiwadi	2009	Siemens/BHEL	2500	± 500	780

BUDUĆNOST???



PLANOVI u NEMAČKOJ

PLANOVI evropske Super Mreže

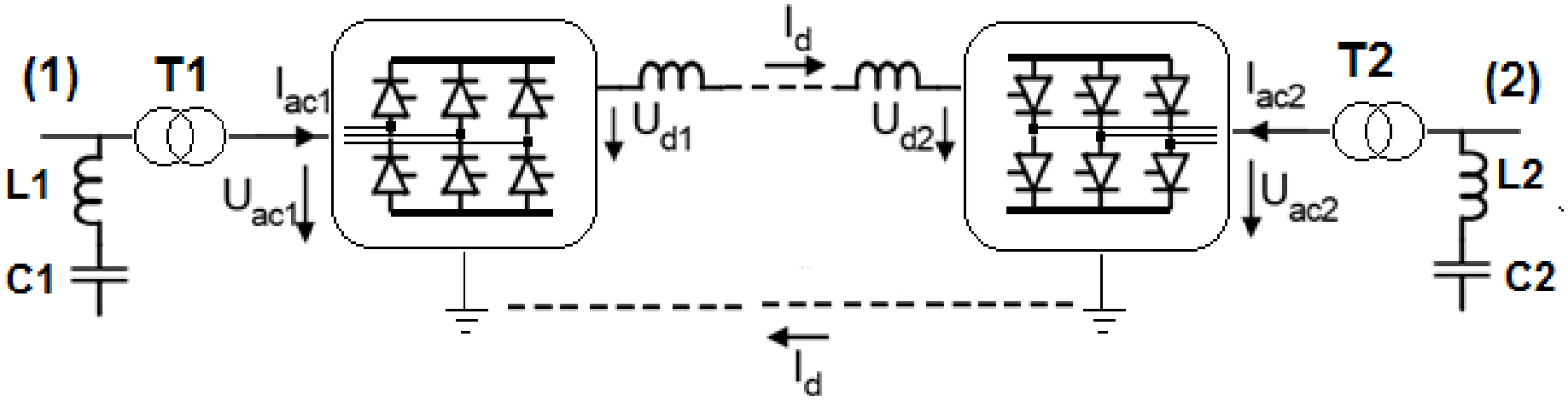


Koncept dela evropske Super Mreže u Severnom Moru

REVOLUCIJA U RAZVOJU SNAŽNIH POLPROVODNIKA

- Brzim i dinamičnim promenama tržišnih uslova u elektro-privrednom sektoru i intenzivnim napretkom u oblasti poluprovodnika velike snage, odvija se prava revolucija u razvoju poluprovodničkih topologija u sistemima prenosa i distribucije.
- Inovacije u oblasti velikih snaga i brzih poluprovodničkih prekidačkih elemenata kontrolisanih preko gejt priključka (IGBT prekidači), omogućavaju upotrebu najsavremenijih naponskih pretvarača, tzv. *voltage source converters* (VSC), sa potencijalnom primenom u sistemima od nekoliko MW do nekoliko desetina pa i stotina MW.
- **Primena snažnih naponskih pretvarača u takvim sistema se višestruko povećala** u poređenju sa tradicionalnim strujnim pretvaračima snage, tzv. *current source converters* (CSC), a uglavnom na račun glomaznih pasivnih induktivnih komponenti koje u njima dominiraju.
- Rezultat je u ovom trenutku veoma zavidan, u smislu funkcionalnosti novih sistema, njihove primene i njihovih mogućnosti.
- Najzastupljeniji su HVDC sistemi u kojim dominiraju Hitachi ABB, GE, SIEMENS

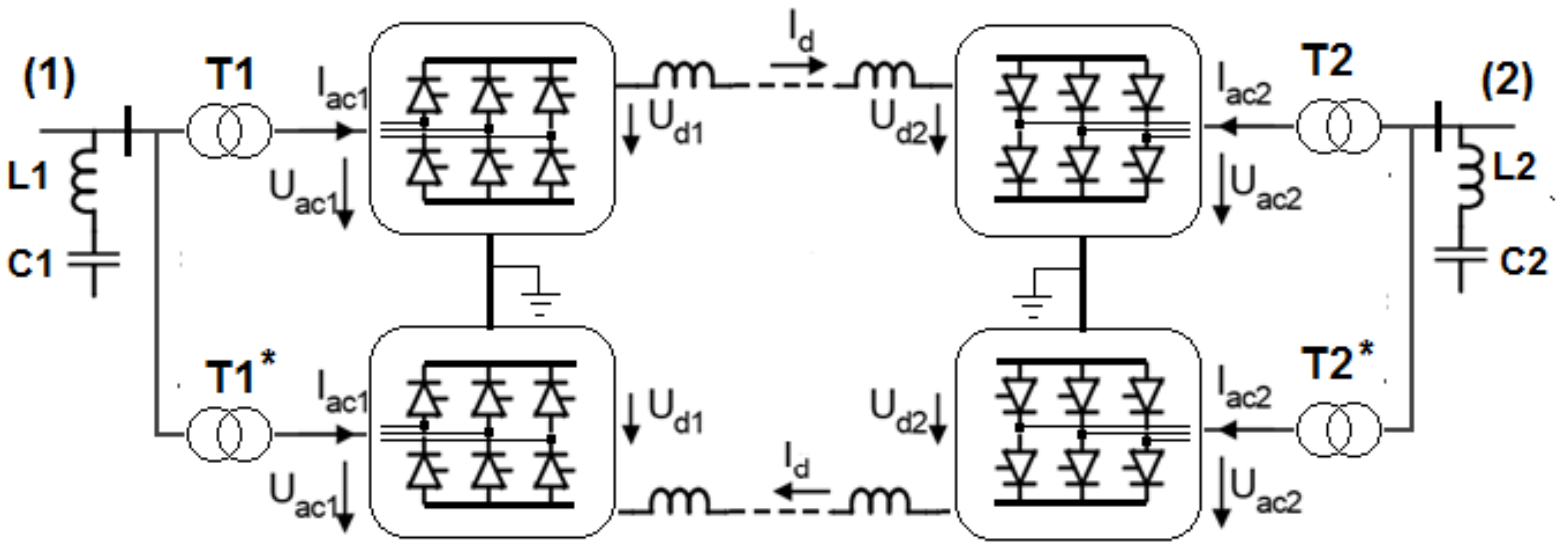
HVDC topologija 1



MONOPOLARNA TOPOLOGIJA

-MONOPOLARNI DC link
-Obično se realizuje kao I faza razvoja bipolarne topologije
jer se ulaganje u pretvarače može odložiti do porasta opterećenja koje bi eventualno zahtevalo bipolarni rad pri dvostrukom većem kapacitetu
-Tiristorski mostovi rade u režimu ISPRAVLJAČ/INVERTOR ili obrnuto INVERTOR ISPRAVLJAČ, što se postiže odgovarajućom kontrolom faznog ugla (mrežom vođeni pretvarači)
-Ima samo jedan provodnik, obično (-) polariteta
-Povratni vod je zemlja, voda (more ili okean)
-U nekim slučajevima se koristi i metlni povratni vod (plašt)
-Jeftino i jednostavno rešenje, relativno „jednostavno“ polaganje spojnog HVDC kabla
-Mana: povratni vod je zemlja ili voda; „povratna zemlja“

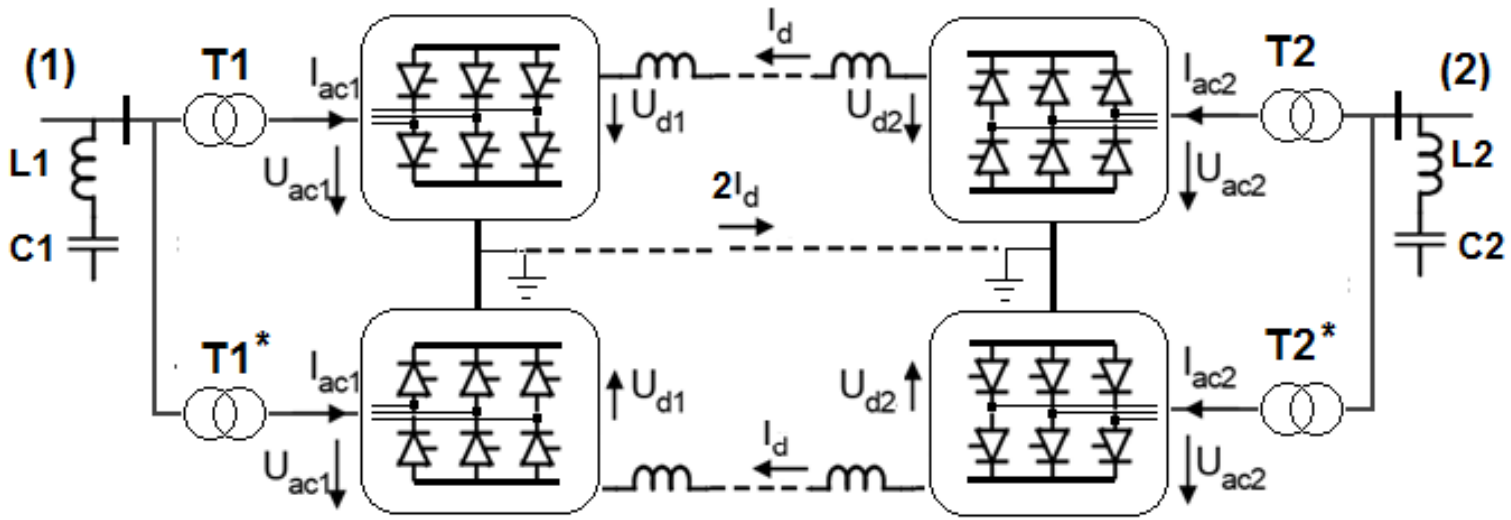
HVDC topologija 2



BIPOLARNA TOPOLOGIJA

-Bipolarni link
-Tiristorski mostovi rade u režimu ISPRAVLJAČ/INVERTOR ili obrnuto
-Ima dva provodnika jedan provodnik (+) polariteta i drugi (-) polariteta
-Svaki od njih može biti intgrisani u jedan VN kabl
-Svaka strana ima dva seta energetskih pretvarača vezanih redno na DC strani
-Spojne tačke redne veze su uzemljene na obe strane
-Oba pola rade se identičnim strujama Id te je struja kroz „zemlju“ jednaka 0
-Skuplje rešenje od prethodnog obzirom da se dodaju još dve pretvaračke stanice i teže polaganje
-Nema povratne „zemlje“ tako da ova činjenica favorizuje ovu topologiju

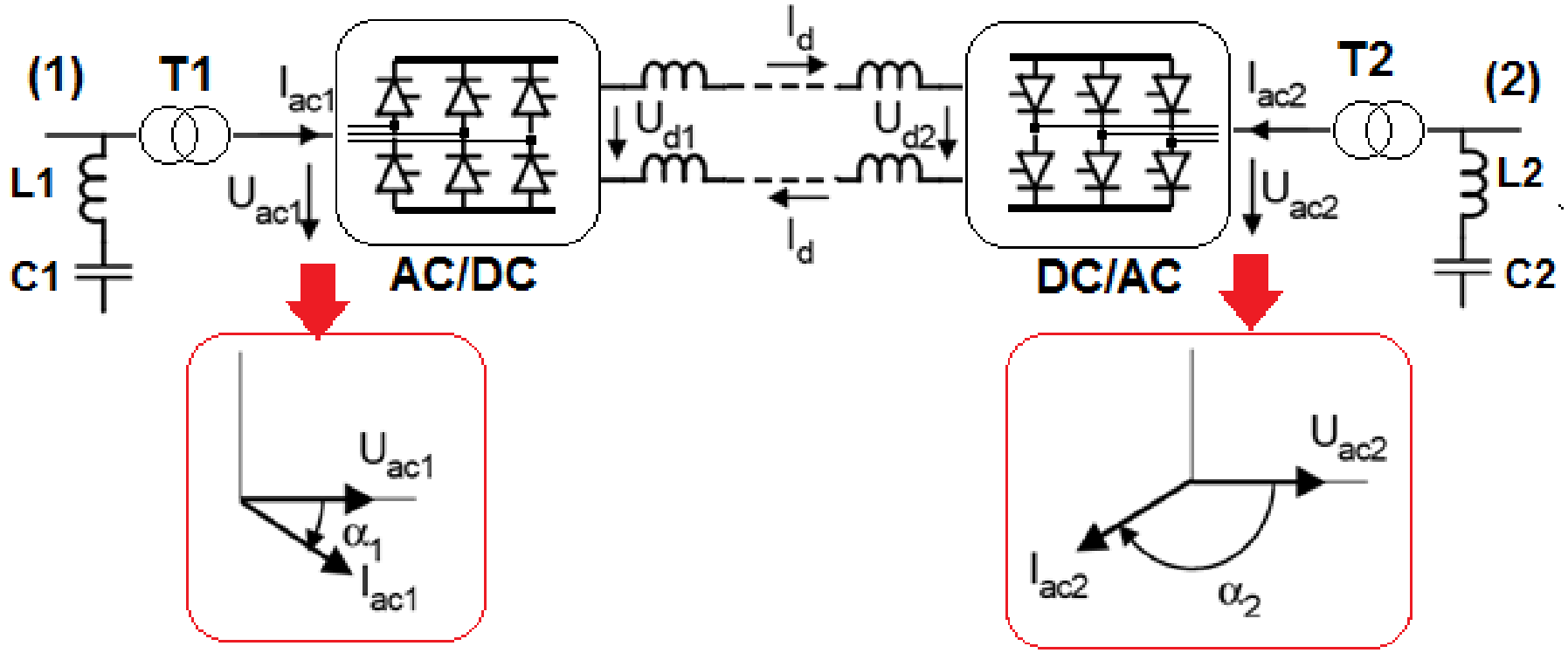
HVDC topologija 3



HOMOPOLARNA TOPOLOGIJA

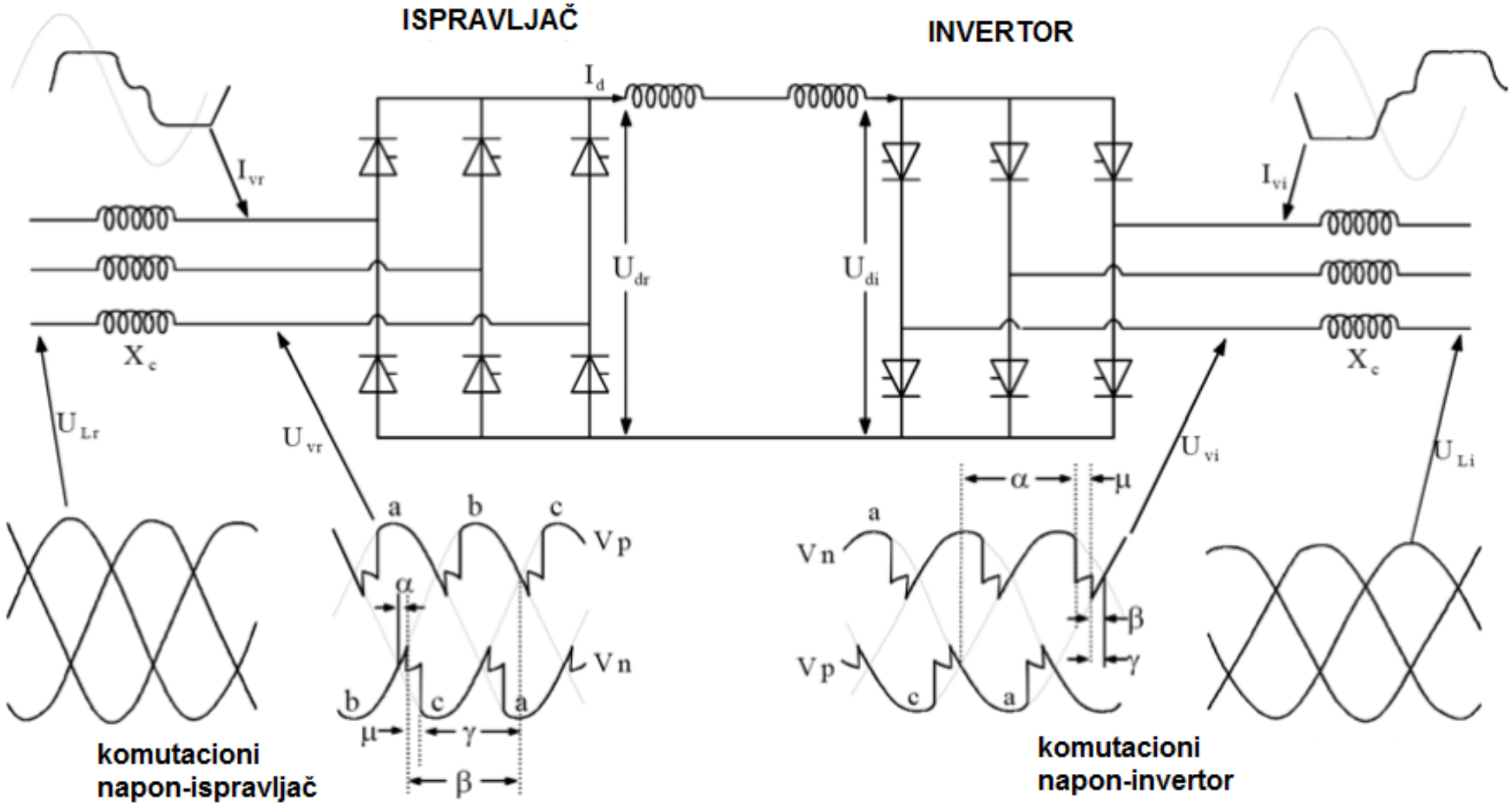
-Homopolarni link
-Tiristorski mostovi rade u režimu ISPRAVLJAČ/INVERTOR ili obrnuto
-Ima dva provodnika istog polariteta, obično (-) polariteta** i uvek je prisutan povratni vod „zemlja“ ili metalni povratni vod (plašt)
-Najveća prednost, su redukovanu troškovi izolacije
-Mana je povratna „zemlja“ što nadnašuje prethodnu prednost
**NAPOMENA : efekat korone u DC liniji je znatno manji sa negativnim polaritetom provodnika u poređenju sa slučajem kada je polaritet pozitivan

HVDC-tipična primena u kontroli snage i faktora snage



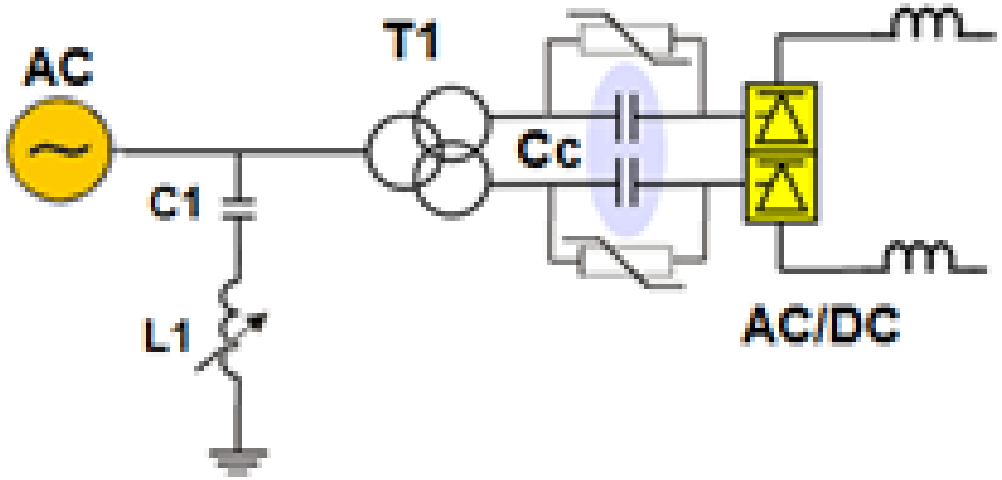
- Električni pretvarači snage koji su se prvo koristili u primenama u prenosu i distribuciji električne energije su bili zasnovani na SCR tehnologiji i strujnoj kontroli (relativno glomazna i velika prigušnica).
- To znači da je tok struje jednosmeran i njena DC vrednost je određena naponskom ravnotežom između dva AC/DC energetska pretvarača koji su povezani preko zajedničkog DC voda.
- Na AC stranama putem SCR pretvarača se kontroliše faktor snage, uvođenjem faznog kašnjenja između napona i osnovne komponente linijske struje.
- SCR pretvarač troši reaktivnu snagu, koja je normalno balansirana proizvodnjom reaktivne snage u otočno spojenoj banci pasivnog LC filtera

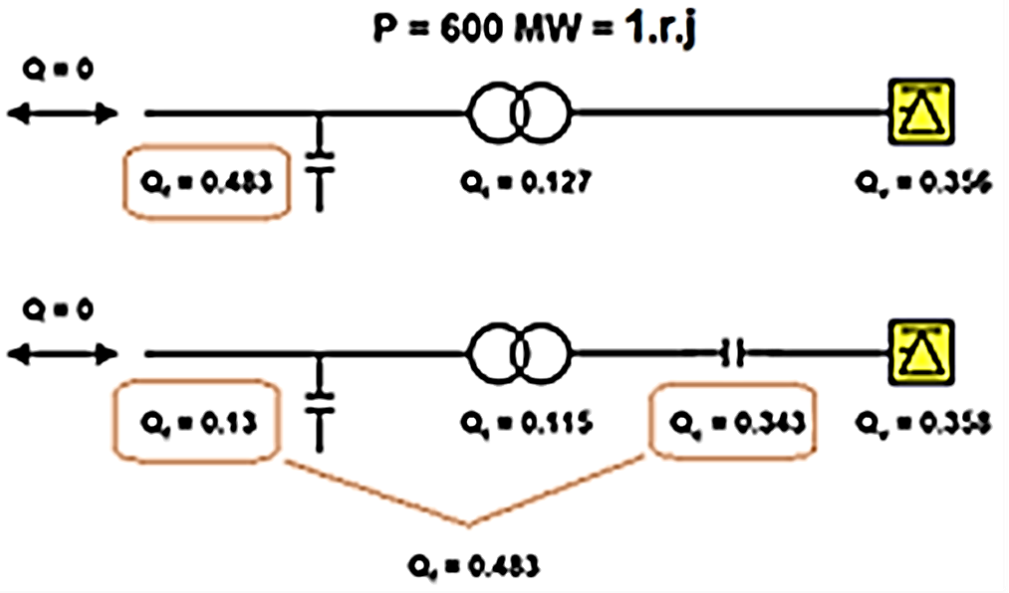
HVDC- karakteristični talasni oblici u režimu ispravljač-invertor



Novina u HVDC sa tiristorskim komponentama - redni kondenzatori

kondenzatorski komutovani pretvarači



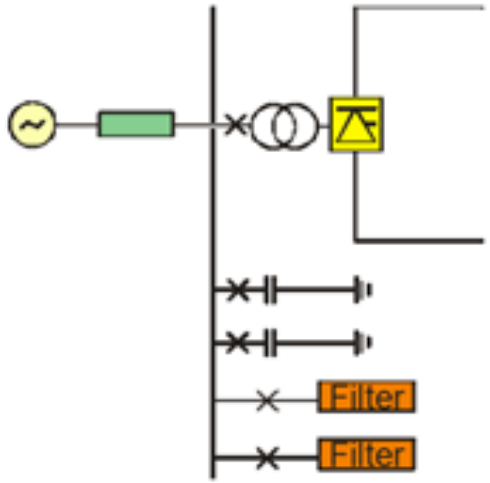


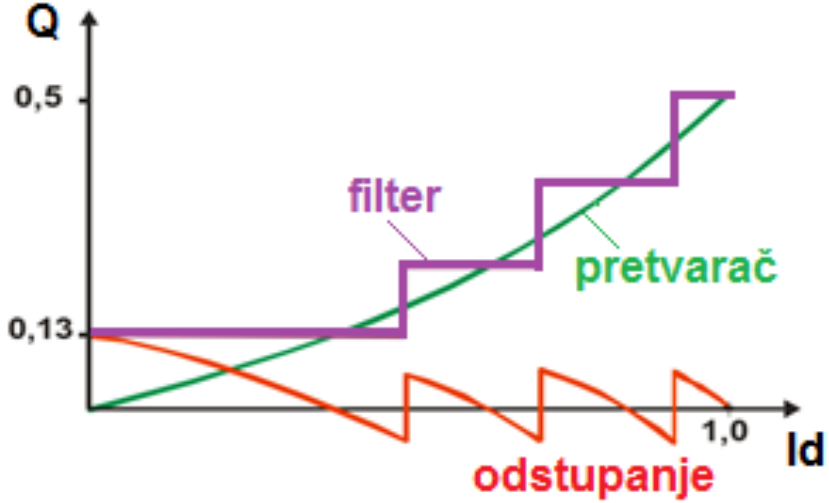
Primer poređenja kompenzacije reaktivne snage klasičnog HVDC sistema i HVDC sistema baziranog na komutacionim kondenzatorima

- Kondenzatori su deo komutacionog kola i smešteni su između tronamotajnog transformatora i SCR pretvarača.
- Reaktivna snaga kroz transformator pretvarača je minimizirana što smanjuje prividnu snagu transformatora.
- Struja kroz komutacione kondenzatore može se kontrolisati adekvatnim uključenjem SCR prekidača.
- Napon na kondenzatorima se kontroliše strujom punjenja kondenzatora.
- U ovom slučaju nema nulte komponente struje kroz kondenzatore na AC strani (sekundari tronamotajnog transformatora nisu uzemljeni).
- Naponski stres na komutacionim kondenzatorima je redukovan primenom adekvatnih prenaponskih zaštita, odnosno varistora (koji pedstavljaju standardne i pouzdane komponente)

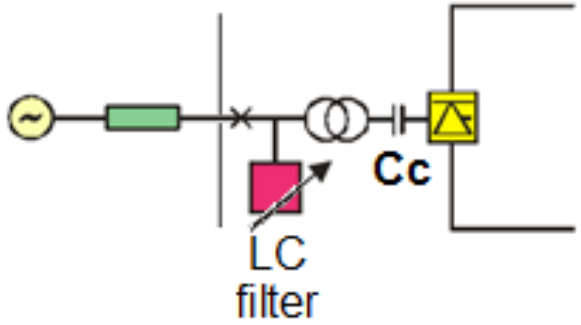
Poređenje balansiranja reaktivnih snaga promenom DC komponente struje za standardnu HVDC topologiju i HVDC topologiju sa komutacionim kondenzatorima.

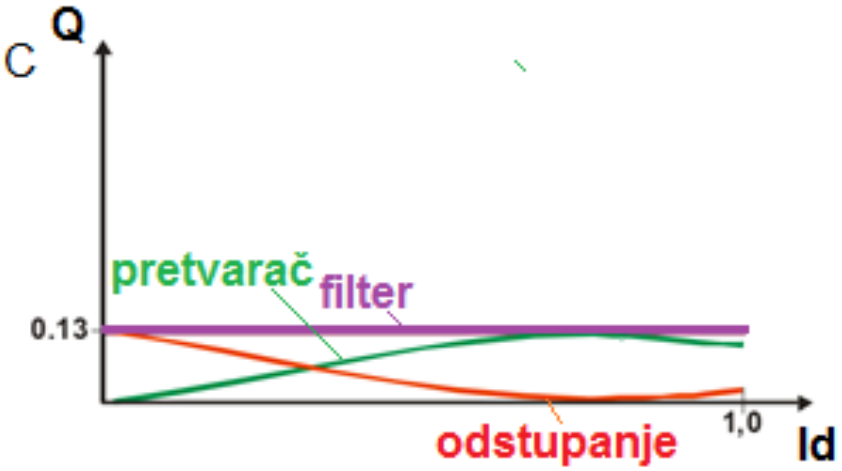
Standardna HVDC topologija



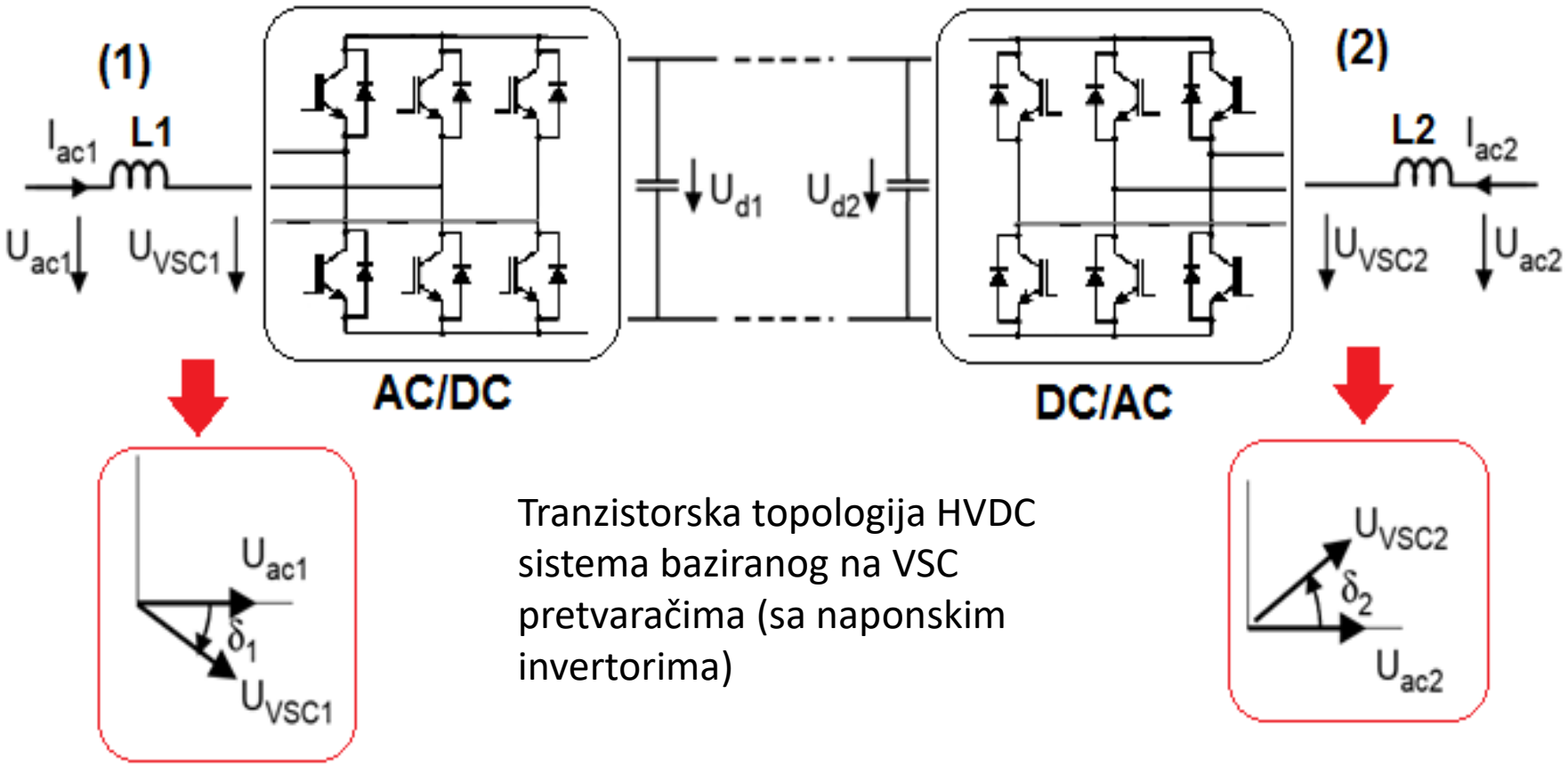


Standardna HVDC topologija + Komutacioni C





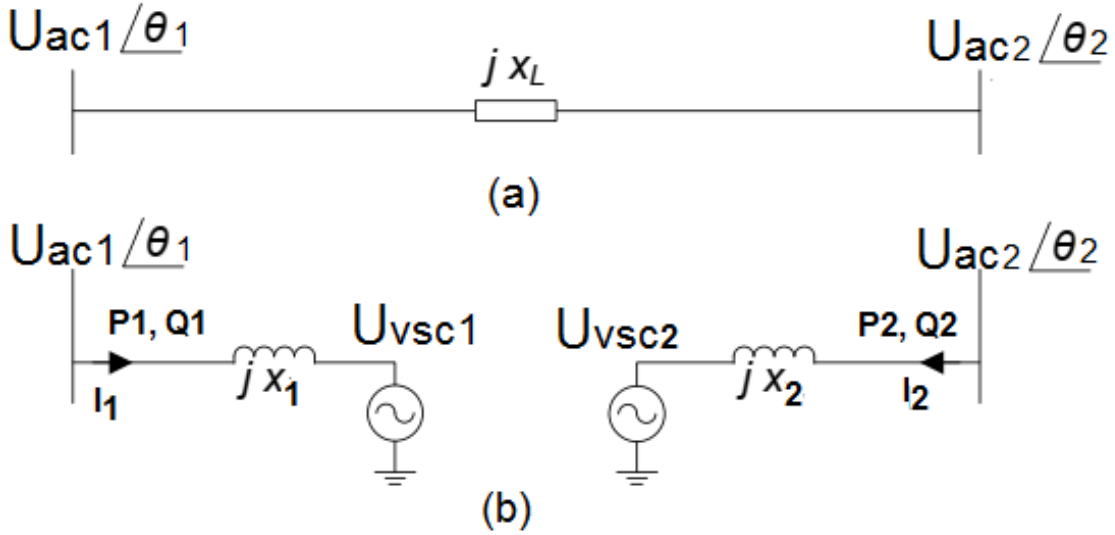
Nove HVDC topologije - primena snažnih tranzistora



Tranzistorska topologija HVDC sistema baziranog na VSC pretvaračima (sa naponskim invertorima)

- U novoj generaciji HVDC sistema zasnovanih na **VSC („voltage source converters“)**, kontrolisanim naponskim izvorima baziranim na tranzistorskim pretvaračima sa dva nivoa, tzv. two-level (na obe strane (1) i (2) prenosnog sistema), je obezbeđena regulacija napona i kontrola tokova snaga (aktivne i reaktivne).
- Fazorski dijagrami napona U_{ac} i U_{VSC} na terminalima (1) i (2) prenosne linije
- Od čvorova prenosa sistem VSC-HVDC se može posmatrati kao sinhrona mašina bez inercije !!

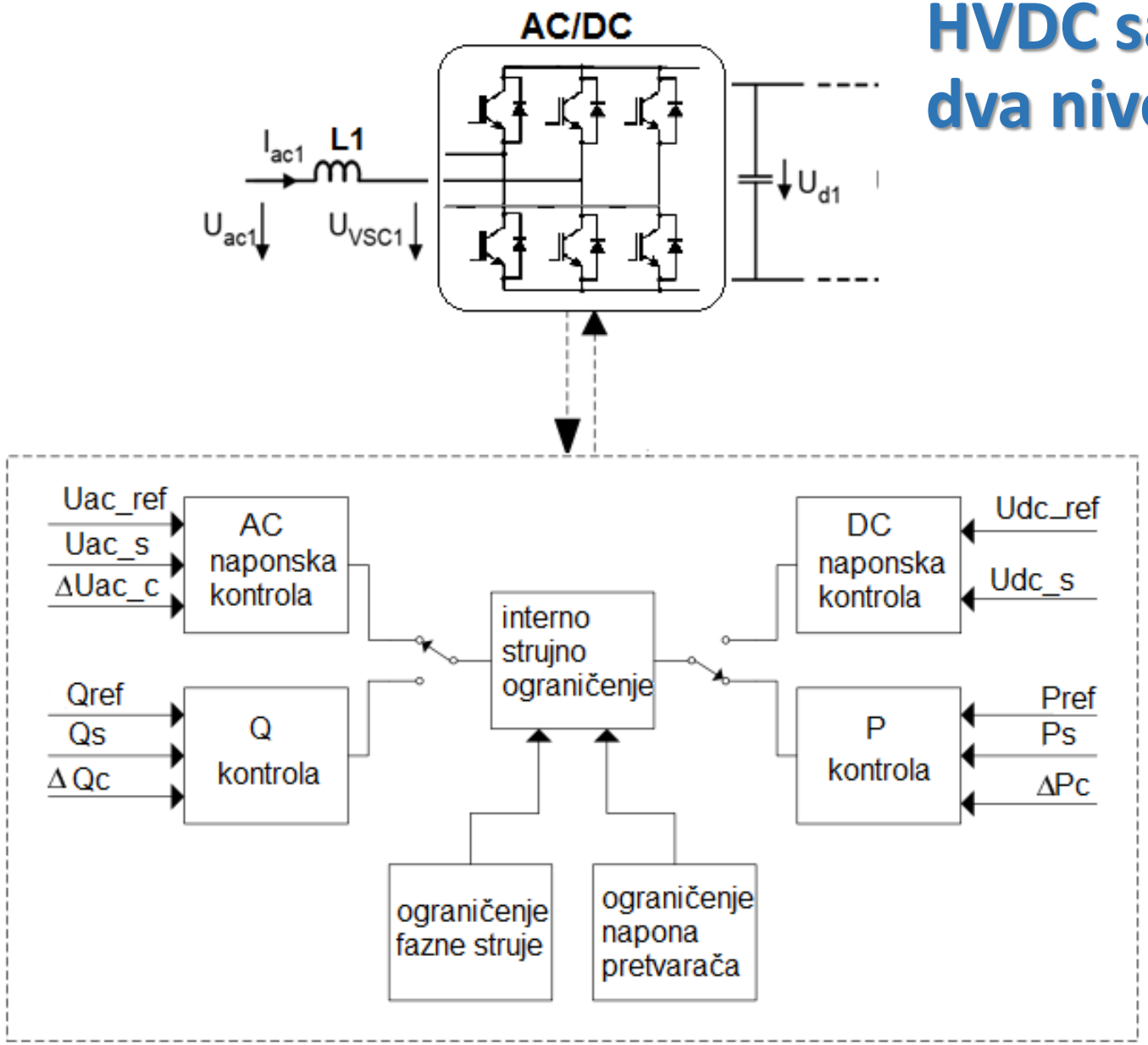
Modelovanje HVDC topologije bazirane na naponski invertorima



(a) standardni AC prenos,
(b) HVDC-VSC prenos

- Od čvorova prenosa sistem VSC-HVDC se može posmatrati kao sinhrona mašina bez inercije gde su proizvodnja ili potrošnja aktivne snage nezavisne od proizvodnje ili potrošnje reaktivne snage.
- Ovo tumačenje vodi ka modelovanju VSC-HVDC sistema prenosa kao dva kontrolisana naponska izvora UVSC1 , UVSC1, koji su redno preko reaktansi X1, X2 (slično sinhronom generatoru bez inercije) spojeni sa čvorovima prenosnog sistema.
- Na slici (a) je data predstava klasične AC prenosne linije gde su čvorovi povezani preko reaktanse X_L, dok je na slici (b) prikazan HVDC-VSC prenos.
- Naponi u čvorovima AC sistema prenosa Uac1, Uac2 su određeni amplitudom i fazom.
- Na osnovu njih je određena struja u prenosnom vodu u skladu sa utvrđenom naponskom razlikom na induktivnosti X_L.
- **U slučaju HVDC sistema prenosa, sistem se raspreže na dva podsistema u kojima je induktivnost vezana između VSC i čvorova (1) i (2) AC mreže.**
- **Na taj način, svaki AC naponski terminal poseduje dva stepena slobode, koji se mogu koristiti za kontrolu tokova aktivne i reaktivne snage ili ekvivalentnog toka aktivne snage i napona priključenog u AC čvoru.**

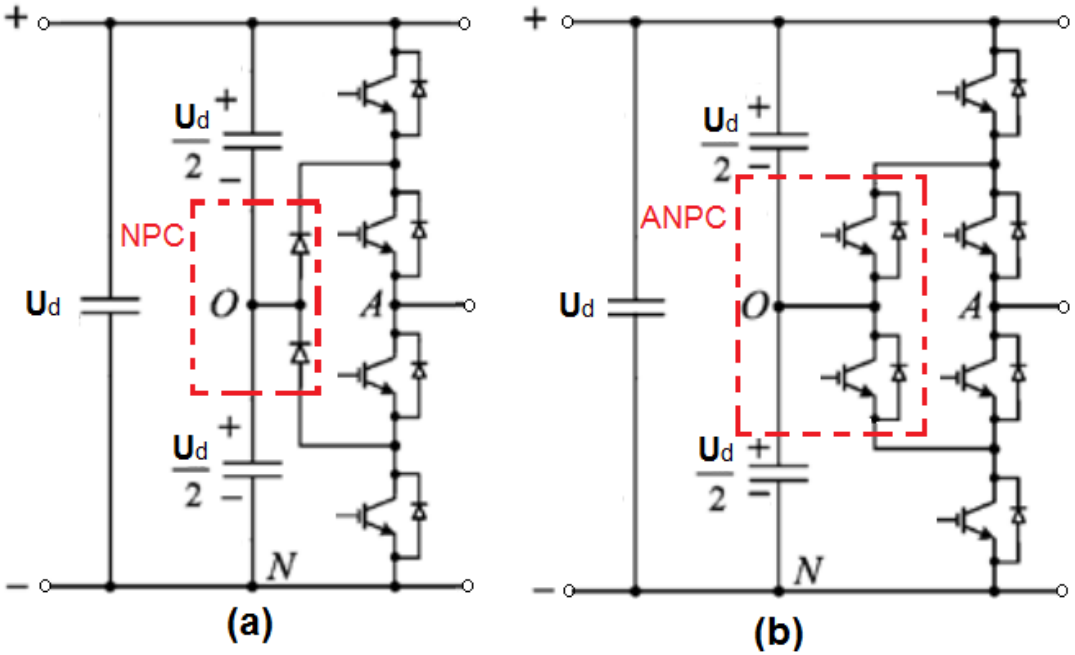
HVDC sa naponskim invertorima sa dva nivoa (realizovani sa 6 prekidača)

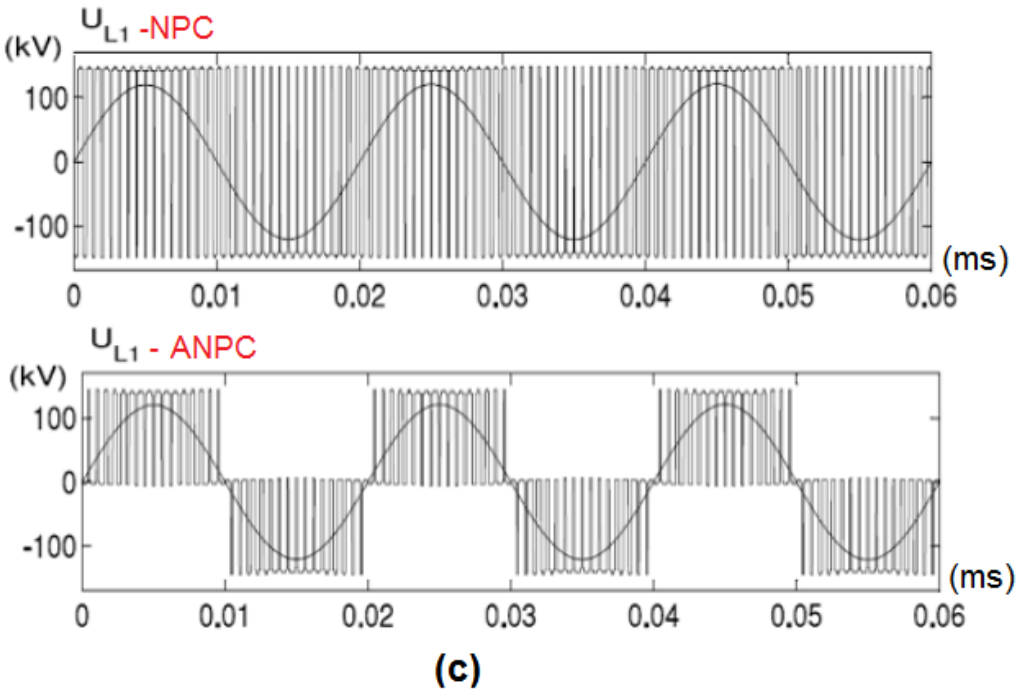


- Upotreba VSC eliminiše potrebu za unutrašnjom elektromotornom silom u priključnoj mreži i takvi pretvarači mogu biti efikasni za napajanje mreža koje imaju nedovoljan proizvodni kapacitet.
- Bilans reaktivne snage može biti uspostavljen pravilnom kontrolom VSC i ne zahteva eksterne elemente ili aparate.
- Generisanje viših harmonika iz VSC se održava na niskom nivou učestanosti, zbog visoke prekidačke učestanosti koja se koristi u VSC.

Principska šema **dvostepene HVDC-VSC topologije**: (1) sa AC naponskom kontrolom i kontrolom aktivne snage P i (2) DC naponskom kontrolom i kontrolom reaktivne snage Q, u literaturi poznat kao ***Light Open Model***

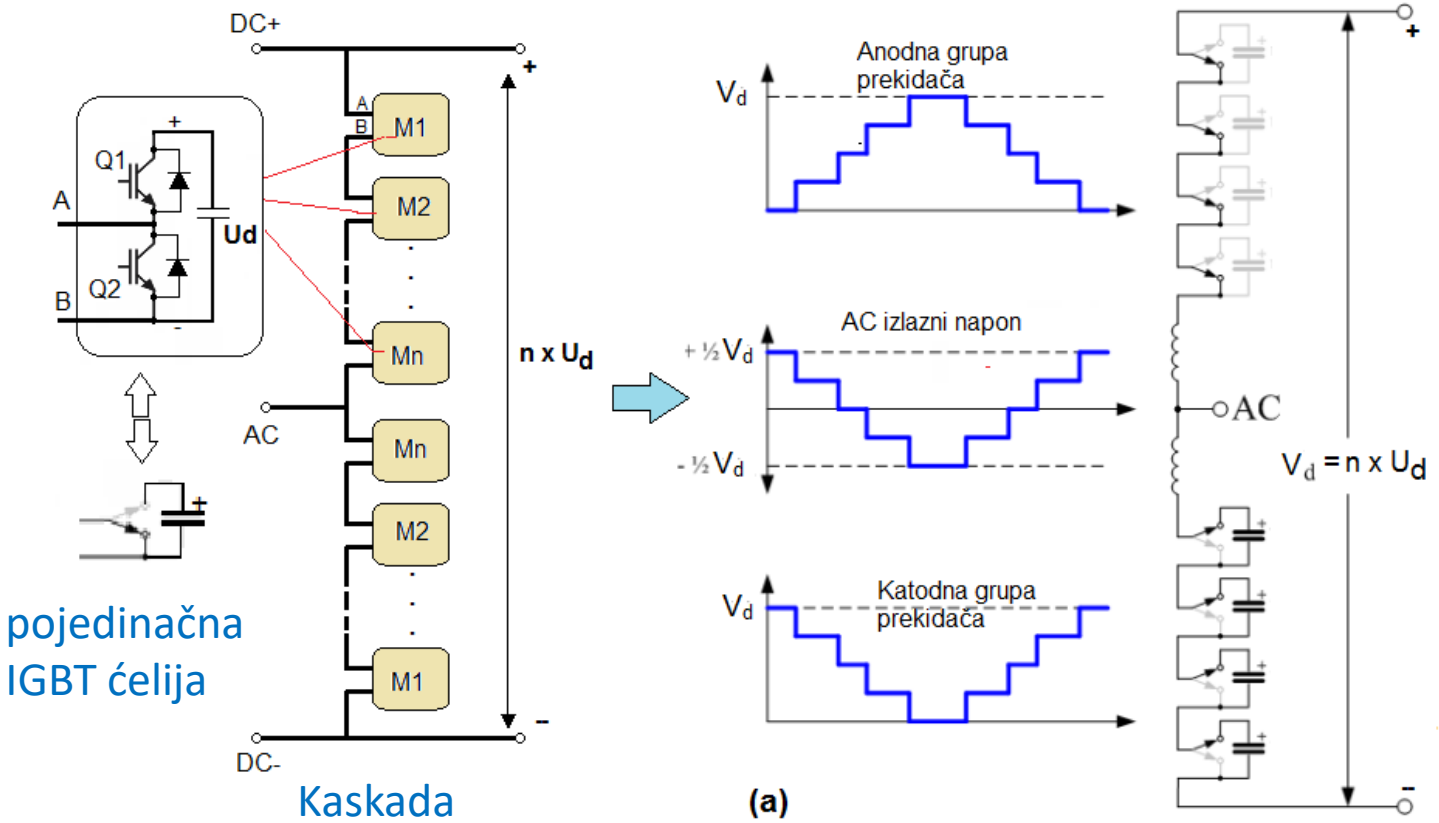
HVDC sa naponskim invertorima sa tri nivoa





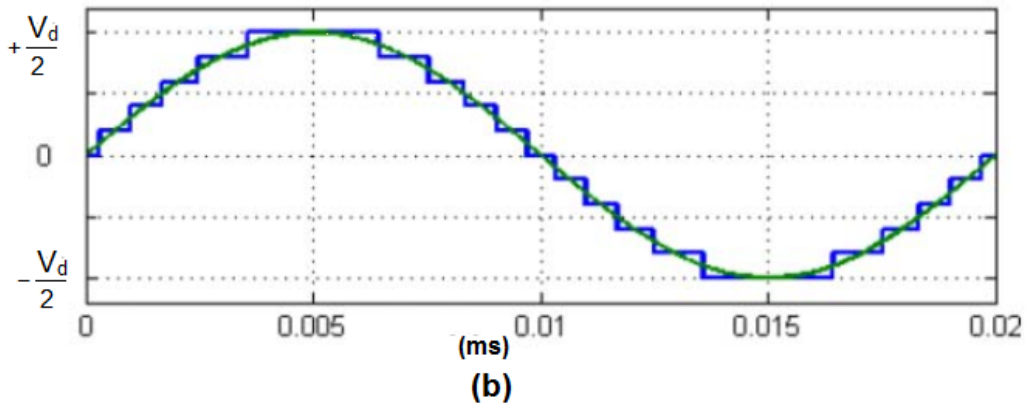
- Tipične topologije naponskih pretvarača sa tri nivoa, koje koriste serijski povezane IGBT prekidače u cilju deljenja visokog napona blokiranja
- Na slici (a) je prikazana topologija IGBT pretvarača sa tri nivoa i sa spojnim diodama i spregnutom neutralnom tačkom, tzv. *neutral point–clamped* (NPC)
- Na slici (b) je data NPC topologija, u okviru koje su umesto spojnih dioda iskorišćeni prekidački tranzistori, odnosno aktivna NPC (ANPC) topologija.
- Na slici (c) su prikazani karakteristični talasni oblici linijskih napona za ove dve topologije bazirane na modulaciji širine impulsa, odnosno PWM.
- Glavne problemi u primeni pomenutih topologija u HVDC sistemima leže u poteškoćama balansiranja napona na DC kondenzatorima, neujednačeni gubici na pojedinim prekidačima (naročito vezano za NPC topologiju) i složeno upravljanje prekidačkim elementima.
- ANPC je atraktivno rešenje za HVDC primene jer toleriše neravnomernu distribuciju gubitaka

HVDC kaskadne modularne topologije sa više nivoa



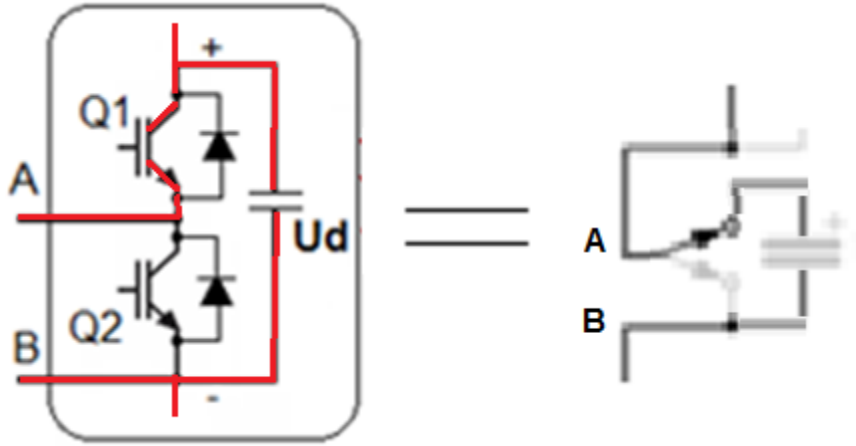
pojedinačna IGBT ćelija

Kaskada

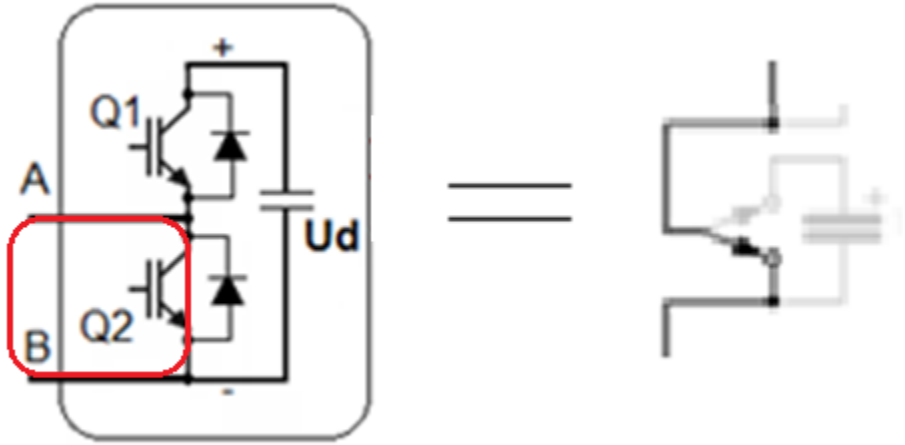


- U ovom slučaju je zbog kaskadne veze moguće obezbediti rad na višim naponskim nivoima (n x Ud).
- U poređenju sa prethodna dva tipa pretvarača sa tri nivoa, u ovom slučaju ne postoji zajednički kondenzator na DC sabirnicama, već svaka od IGBT ćelija (kojih ima ukupno *n*) ima svoj DC kondenzator koji je na niskom naponu.
- Svaka od ćelija sadrži dva IGBT prekidača (Q1 i Q2) i ona ima tri stanja: (1) kada je Q1 uključen i Q2 isključen kondenzator je uključen u kolo i u ovom slučaju modul doprinosi kvant napona koji se preslikava na fazni napon, (2) kada je Q1 isključen i Q2 uključen, kondenzator se zaobilazi, i tada je ćelija kratko spojena (3) kada su Q1 i Q2 isključeni IGBT ćelija je blokirana.
- Prikazana kaskadna modularna topologija je povoljnija za HVDC aplikacije u odnosu na topologije sa dva ili tri nivoa, jer kaskadni način povezivanja dozvoljava da se svaka ćelija teoretski uključuje i isključuje jednoj u periodi, što u velikoj meri smanjuje prekidačke gubitke.
- Stepenast AC izlazni napon; za 100 ćelija po kaskadi ima se zadovoljavajuća sinusoida što se tiče harmonika; LC filtar nije više potreban

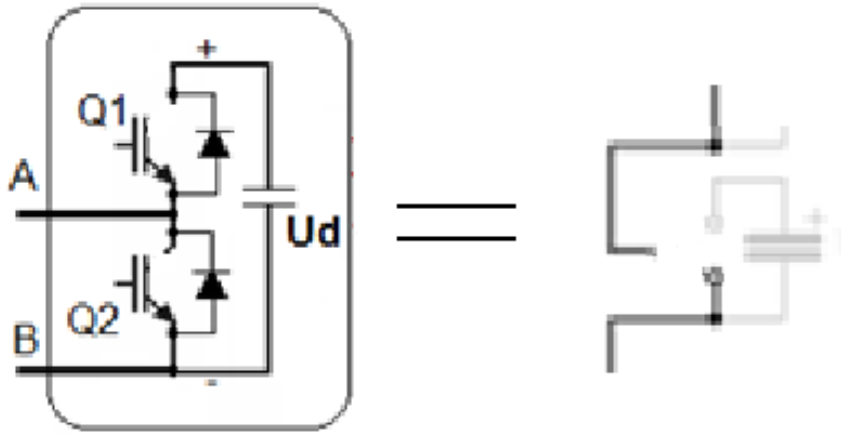
KONTROLA PREKIDAČA PO JEDNOJ ĆELIJI



(1) kada je Q1 uključen i Q2 isključen kondenzator je uključen u kolo i u ovom slučaju modul doprinosi kvant napona koji se preslikava na fazni napon

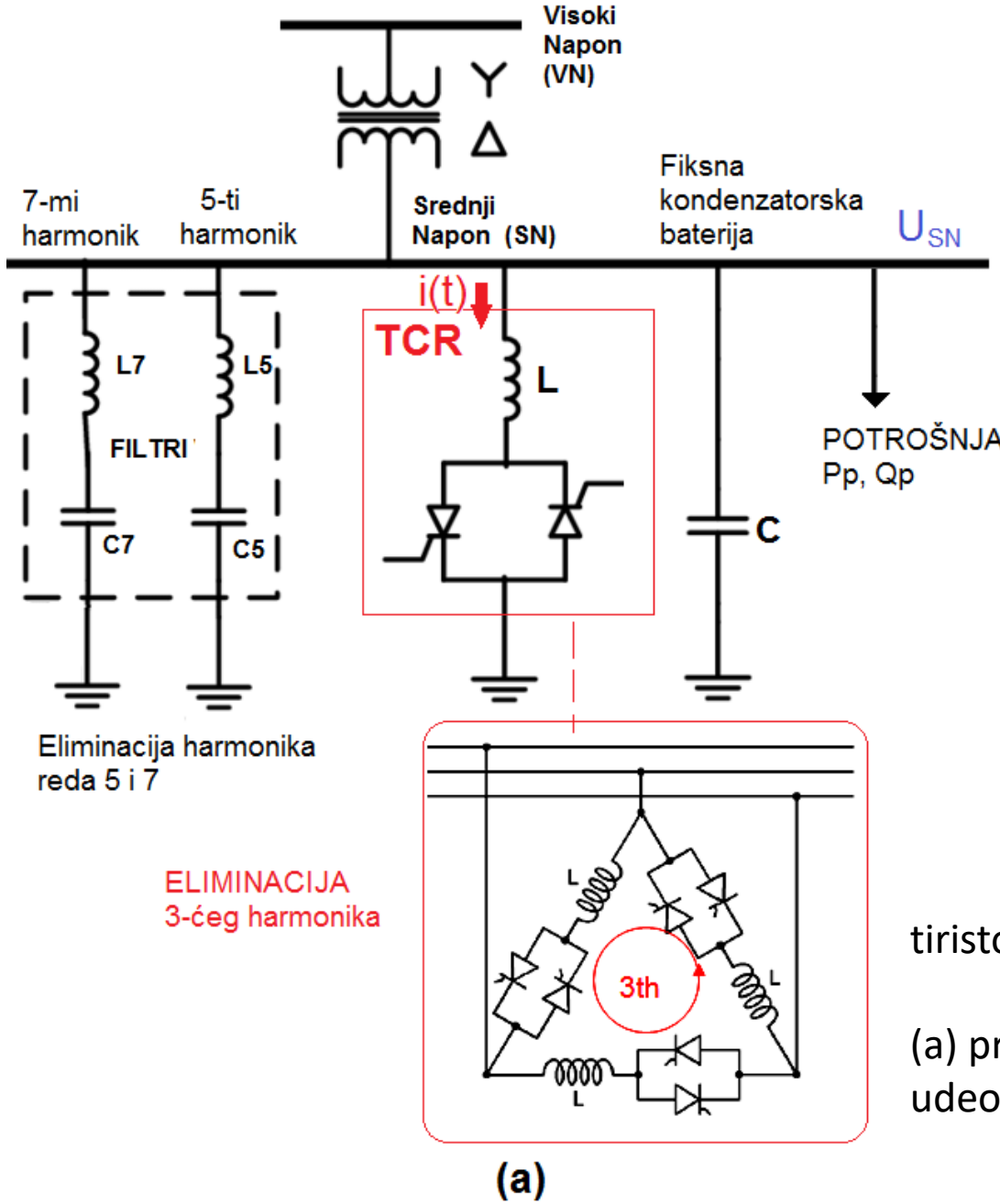


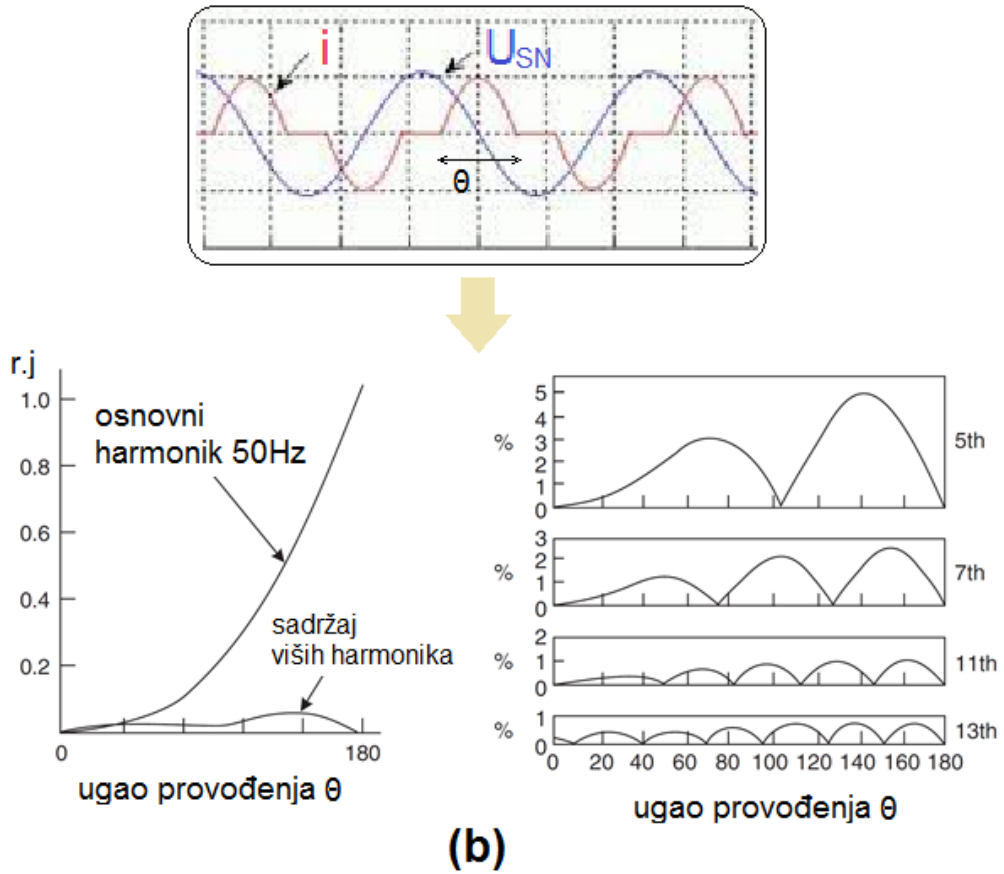
(2) kada je Q1 isključen i Q2 uključen, kondenzator se zaobilazi, i tada je ćelija kratko spojena



(3) kada su Q1 i Q2 isključeni IGBT ćelija je blokirana

STATIČKI KOMPENZATORI REAKTIVNE SNAGE-tiristorske topologije

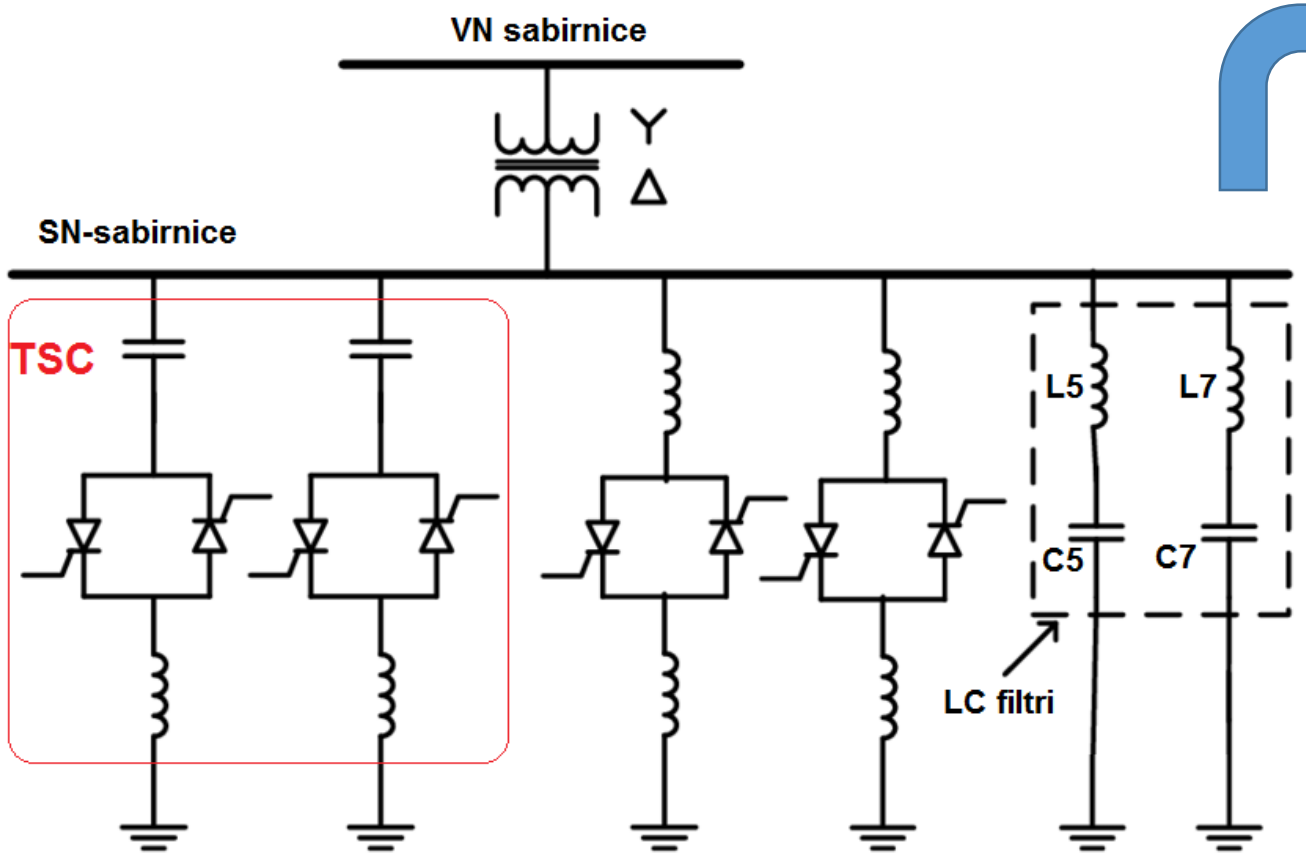




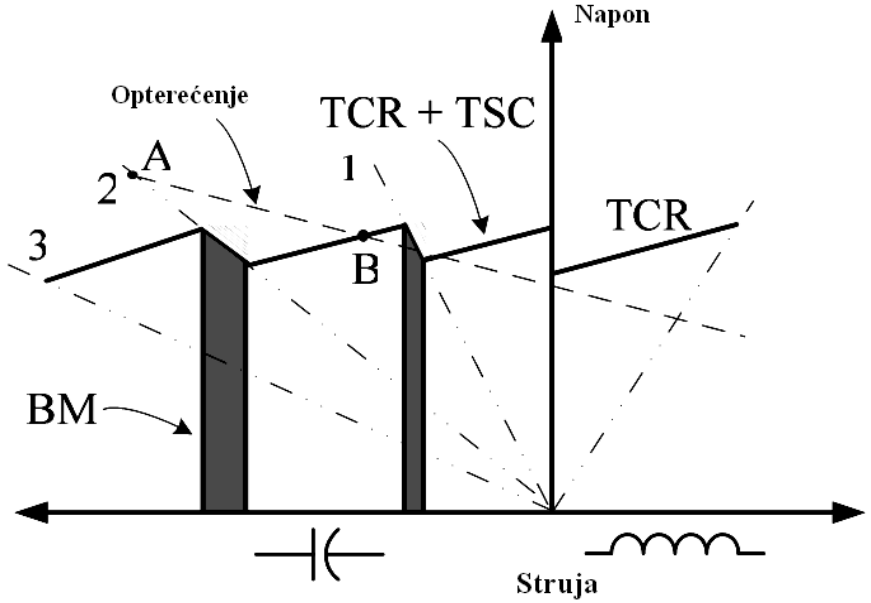
tiristorski kontrolisanog reaktora (TCR)

(a) prikaz osnovne topologije, (b) karakteristični talasni oblici i udeo viših harmonika struje

Veoma često se za poboljšanje opsega TCR kontrole koriste kondenzatori sa tiristorskim prekidačima, **tzv. *thyristor switched capacitor* (TSC).**



- Ako je potrebno da se vrši apsorpcija reaktivne snage, baterija kondenzatora je isključena i kompletnu ulogu prijema reaktivne snage ima tiristorski kontrolisana prigušnica, odnosno TCR.
- Koordinacijom kontrole između prigušnice i kondenzatorskih stepeni moguće je dobiti kontinualnu tzv. „stepless“ kontrolu.

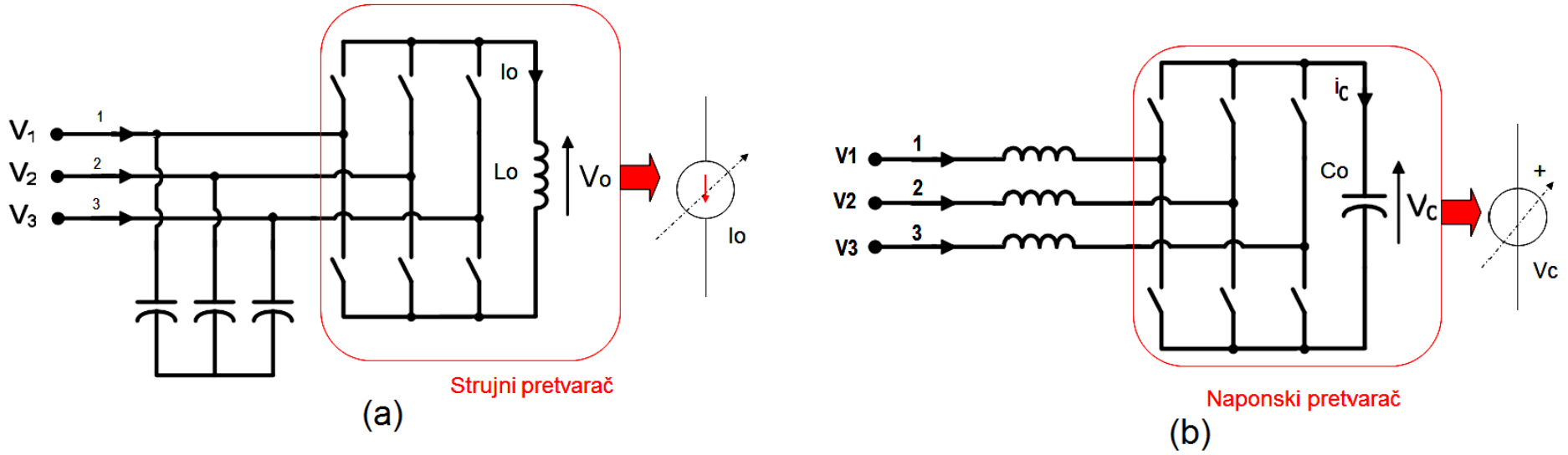


PREDNOSTI: (1) kontinualna kontrola, praktično bez tranzijenata, (2) niski sadržaj harmonikan (pošto je reaktivna snaga kontrolisanog reaktora relativno mala), (3) velika fleksibilnost rada

NEDOSTATAK: relativno visoka cena u odnosu na TSC i TCR pojedinačno.

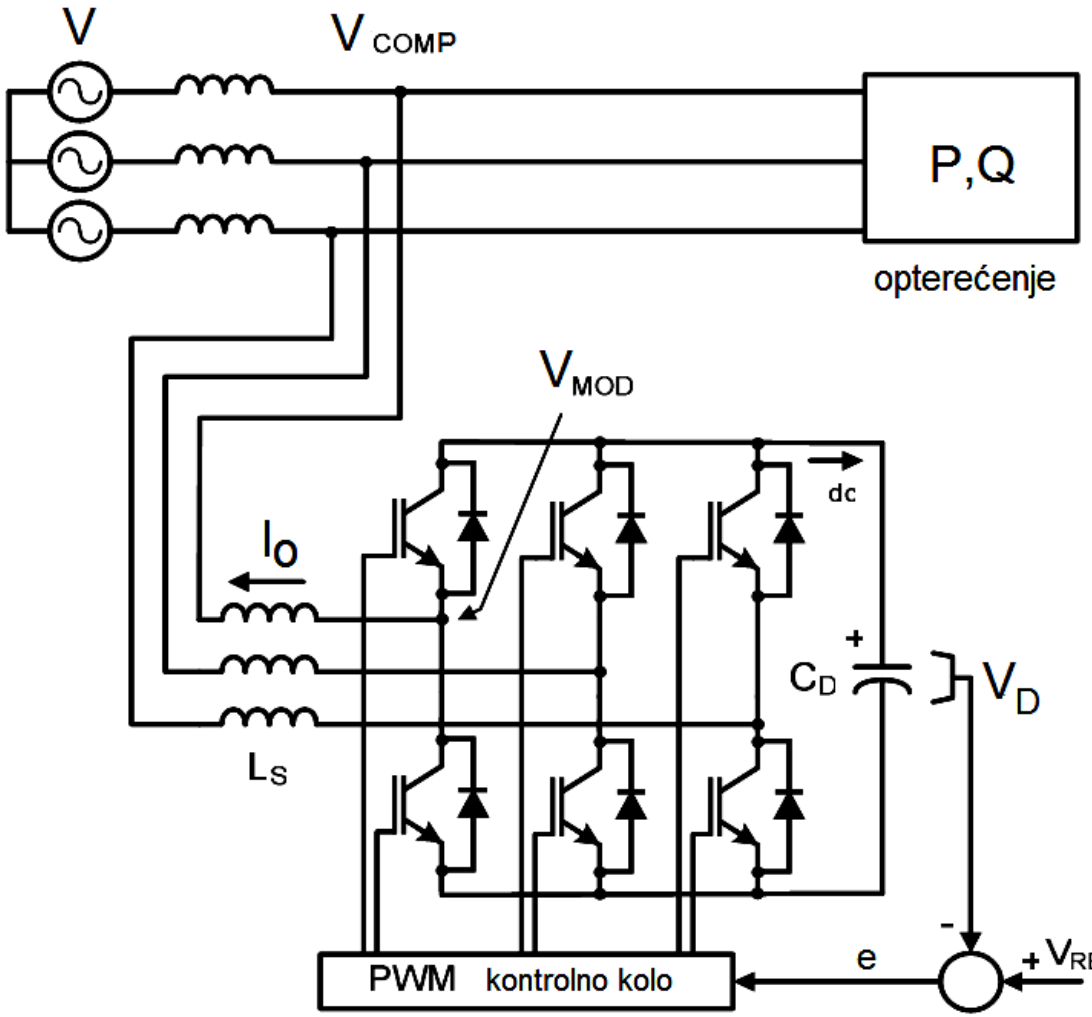
STATIČKI KOMPENZATORI REAKTIVNE SNAGE- tranzistorske topologije

- U novije vreme značajan napredak u kompenzaciji reaktivne energije postižu prekidački pretvarači bazirani na IGBT topologijama. Ideja za primenom ovih tipova pretvarača je proistekla iz činjenice da se generiše ili apsorbuje reaktivna energija, ali bez upotrebe velikih (glomaznih) i „zahtevnih“ baterija kondenzatora ili prigušnica.
- Primenom ovih topologija energetskih pretvarača se značajno smanjuju troškovi koji se odnose na pasivne komponente, koje su uz što su glomazne, još i dodatno skupe.
- Olakšavajuća činjenica u primeni prekidačkih topologija je ta, što se cene snažnih elektronskih komponenata i pripadajuće upravljačke elektronike nalaze u stalnom opadanju.
- Na tehnološkom tržištu ovih prekidačkih sistema za kompenzaciju reaktivne energije, se izdvaja nekoliko rešenja, odnosno pristupa rešavanju pomenutih tehničkih problema.

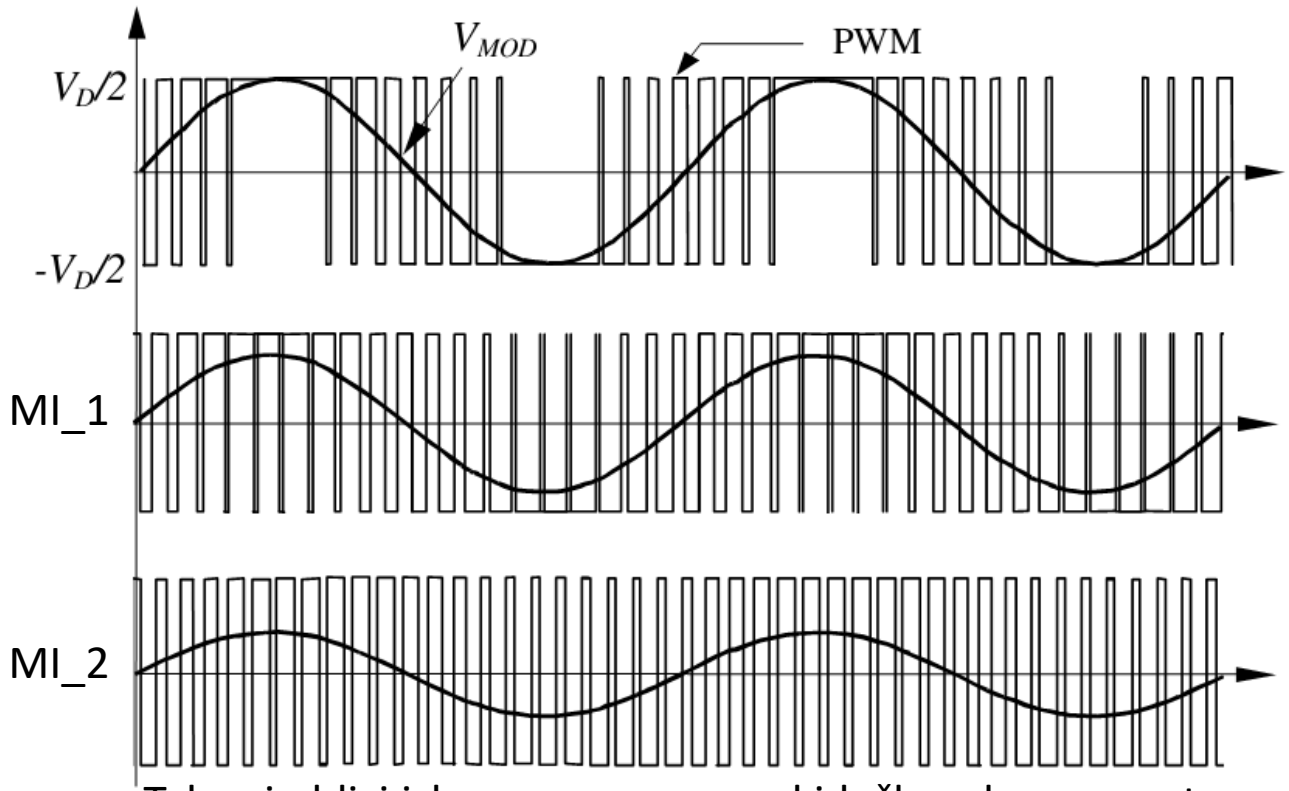


Prekidačke topologije kompenzatora reaktivne energije; (a) strujna CSC, (b) naponska VSC

STATIČKI IGBT KOMPENZATOR



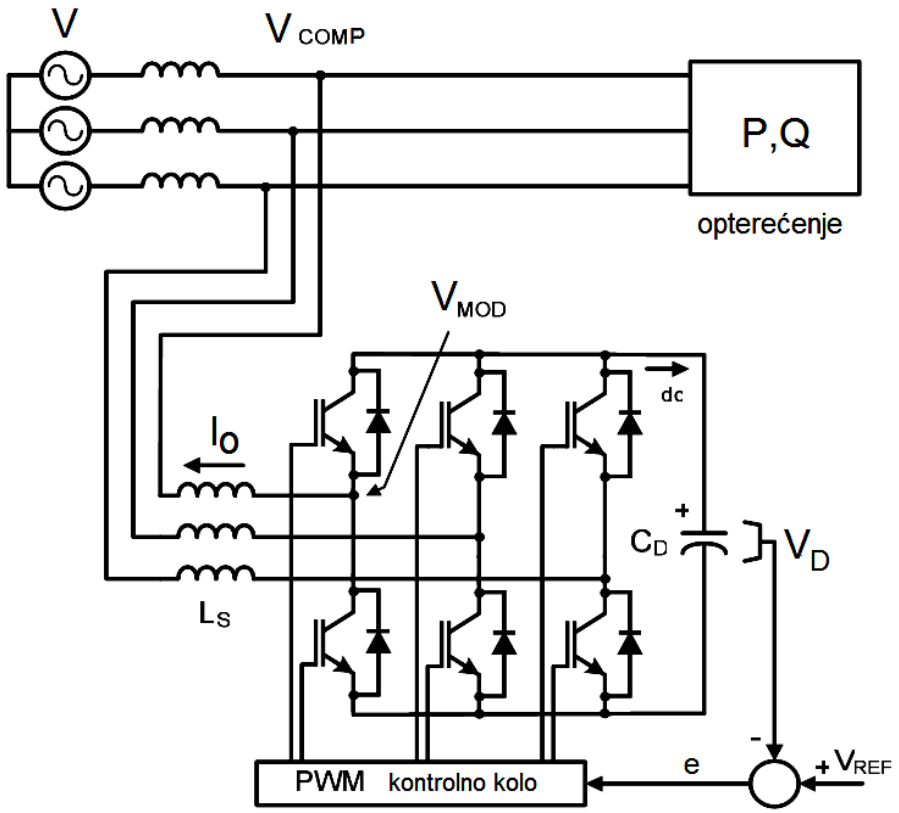
Statički kompenzator baziran na prekidački kontrolisanom naponskom pretvaraču VSC



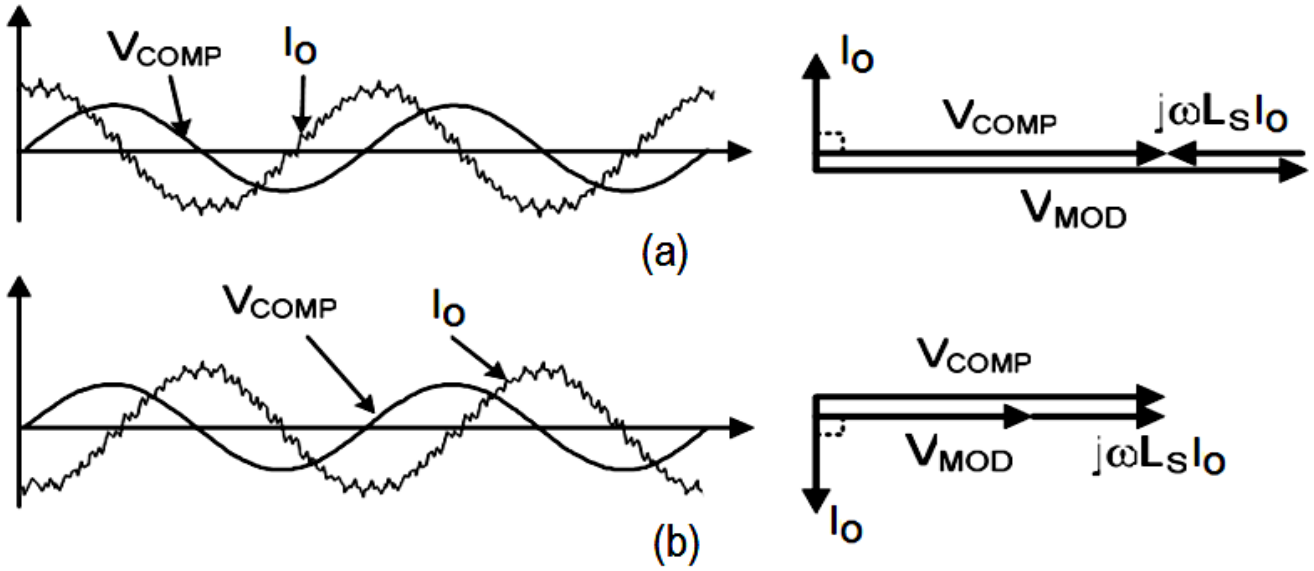
Talasni oblici izlaznog napona prekidačkog kompenzatora za različite vrednosti modulacionog indeksa MI_1 i M_I2

- Energetski pretvarač obezbeđuje kontrolu faznog pomeraja između napona na opterećenju VCOMP i napona na izlazu prekidačkog pretvarača VMOD.
- Kontrola reaktivne energije (odnosno snage) se ostvaruje podešavanjem amplitude osnovne komponente izlaznog napona pretvarača VMOD.

POD-POBUĐENI i NAD-POBUĐENI REŽIM RADA SVC



$$P = \frac{V_{COMP} \cdot V_{MOD}}{X_s} \cdot \sin\delta$$

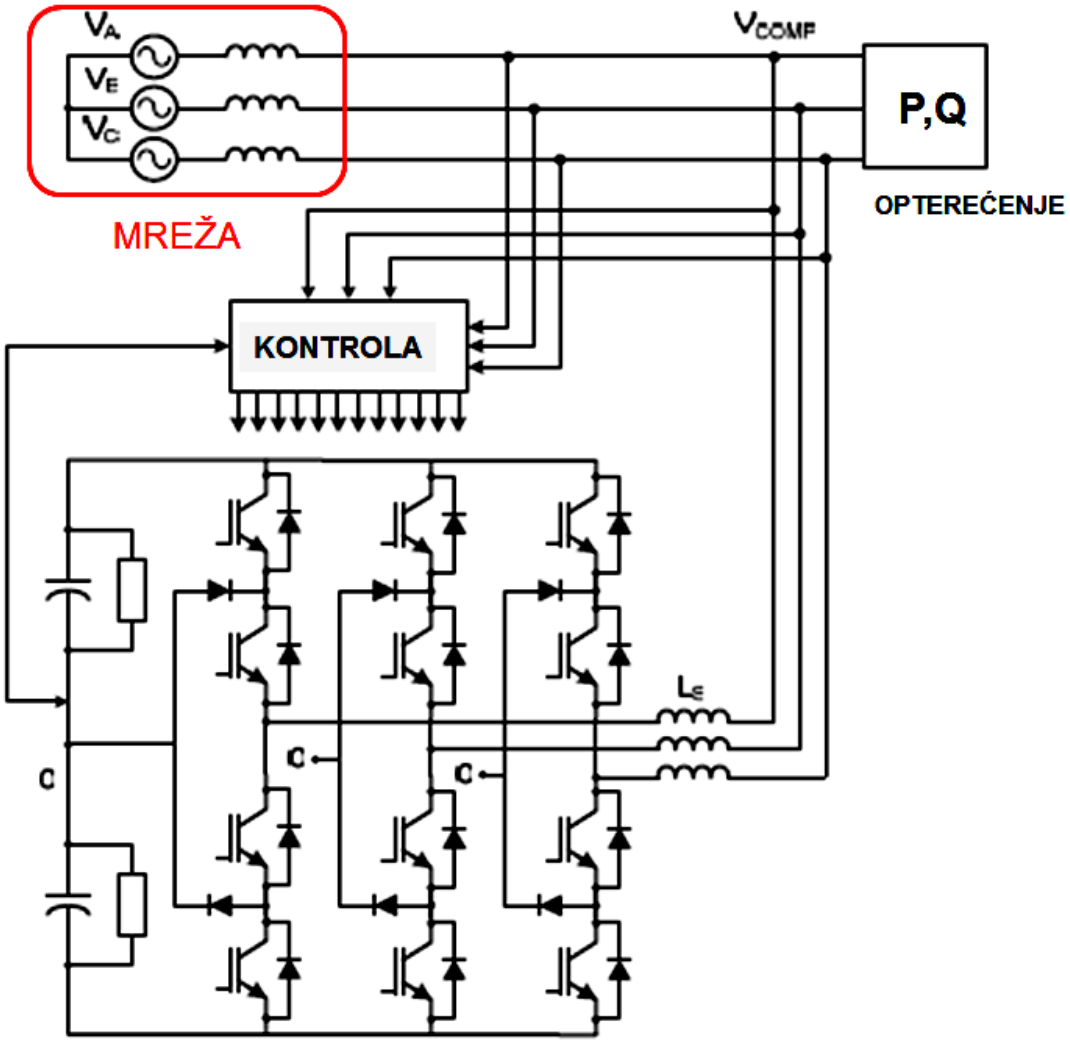


- U radu ovog tipa prekidačkog kompenzatora razlikujemo dva režima: (1) režim kada kompenzator generiše reaktivnu energiju i (2) režim kada kompenzator apsorbuje reaktivnu energiju.
- U prvom slučaju je kompenzator ekvivalentan bateriji kondenzatora, dok je u drugom slučaju ekvivalentan prigušnici.

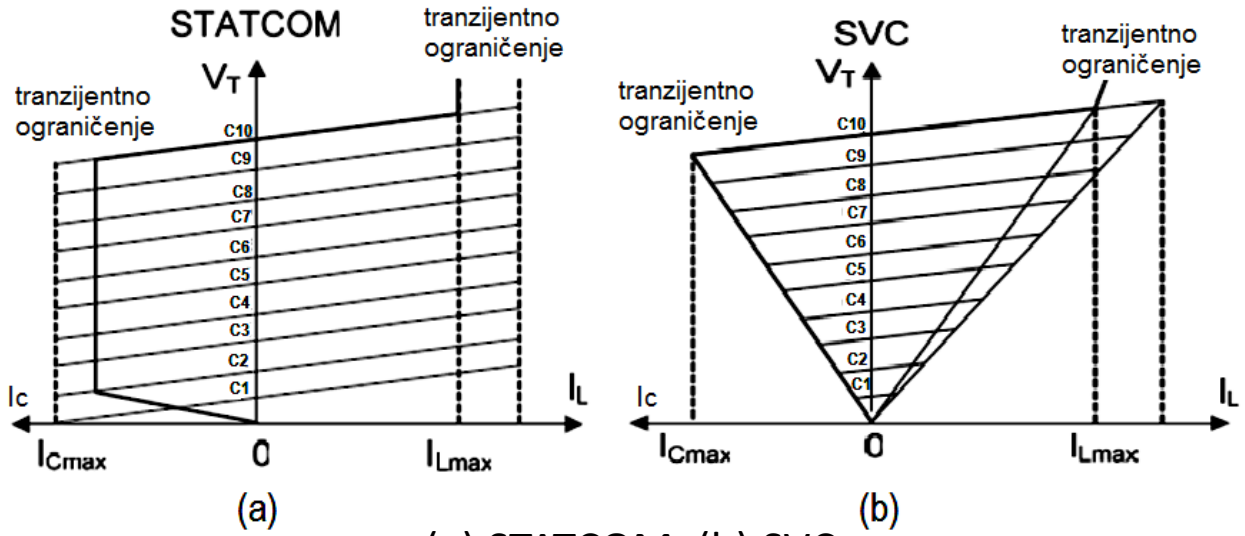
Slika (a) Kada je $V_{MOD}>V_{COMP}$, prekidački kompenzator generiše reaktivnu energiju (ekvivalentan je bateriji kondenzatora). Slučaj II koji je prikazan na slici (b) kada je $V_{MOD}<V_{COMP}$ prekidački kompenzator apsorbuje reaktivnu energiju (ekvivalentan je induktivnosti).

Dakle princip rada ovog kompenzatora je sličan radu sinhrone mašine, koja radi u režimu sinhrone kompenzacije i to u dva režima rada, pod-pobuđeni i nad-pobuđeni. Kompenzaciona struja Io će prednjačiti ili kasniti zavisno od odnosa napona V_{MOD} i V_{COMP} , kao što je prikazano na slici

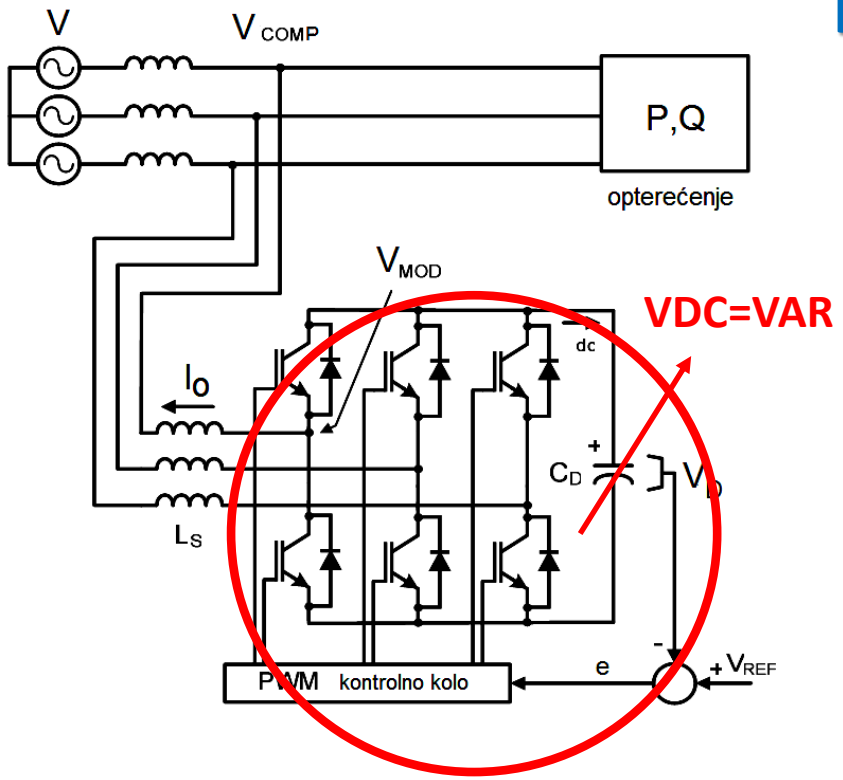
Multilevel topologija (sa tri nivoa) kompenzatora reaktivne energije

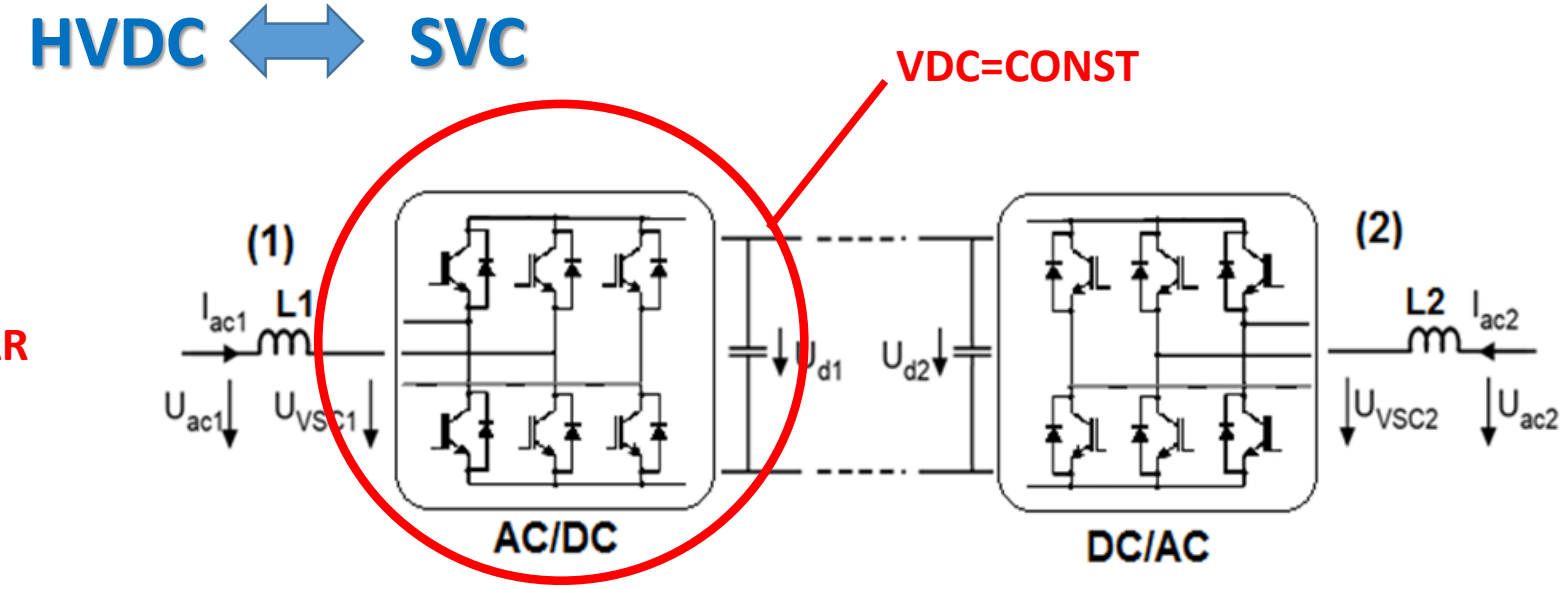


- U poređenju sa tiristorskim kompenzatorima, prekidački kompenzatori imaju niz prednosti: mogu proizvoditi aktivnu i reaktivnu snagu, redukovana je mogućnost pojave rezonance i njenih pratećih efekata.
- Obzirom da imaju brz odziv, reaktivna snaga će biti kontrolisana kontinualno i sa relativno velikom brzinom.
- Visokofrekventna (VF) modulacija širine impulsa rezultuje niskim harmonicima napona i struje, a takođe ovim se redukuje veličina i težina (a prema tome i cena) komponenata filtera.
- Dinamičke performanse usled varijacija mrežnog napona su značajno poboljšane, značajno bolji je tranzijentni odziv i stoga maksimalne performanse.
- Ovo za posledicu ima širi radni opseg u V-I dijagramu (slično kao Mordejeve krive kod sinhrone mašine).



(a) STATCOM, (b) SVC

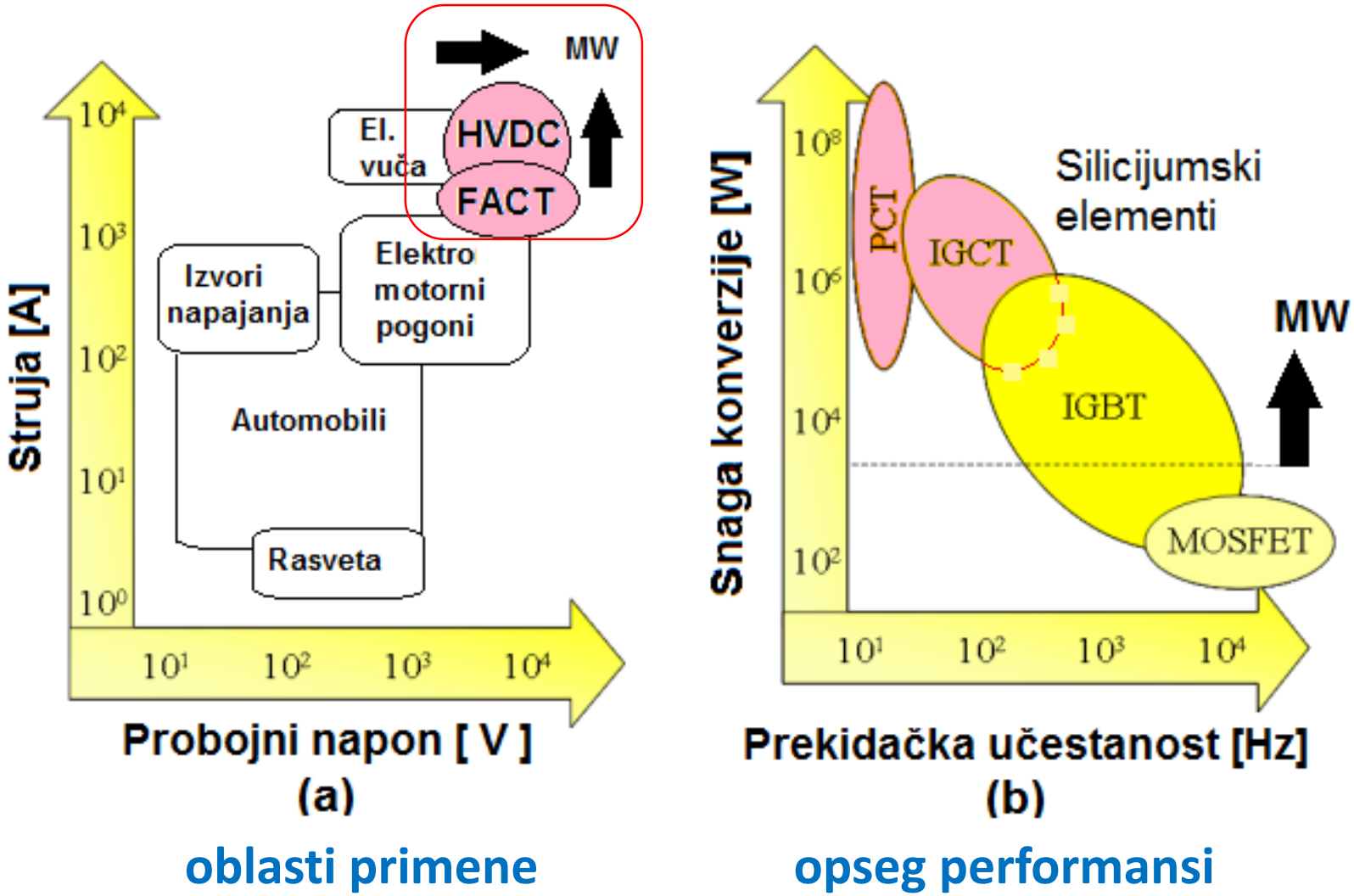




- Statički kompenzatori reaktivne snage nove generacije, poput HVDC pandana, su zasnovani na VSC, koristeći funkcionalno identične koncepte glavnog pretvaračkog kola.
- Međutim, u ovim kompenzatorima DC veza nije spojena eksterno (HVDC prenosna linija), tako da se njen naponski nivo se može slobodno birati i dodatno optimizovati, obzirom na primenu prikazane VSC topologije.
- U ovim slučajevima se obično se radi o DC naponima u opsegu od ±10 kV do ±35 kV.

Glavna ograničenja u primeni energetskih pretvarača u sistemima prenosa električne energije potiču od ograničenja **maksimalnih performansi prekidačkih elemenata** na kojima su ovi sistemi bazirani!!!!

Energetski prekidački elementi

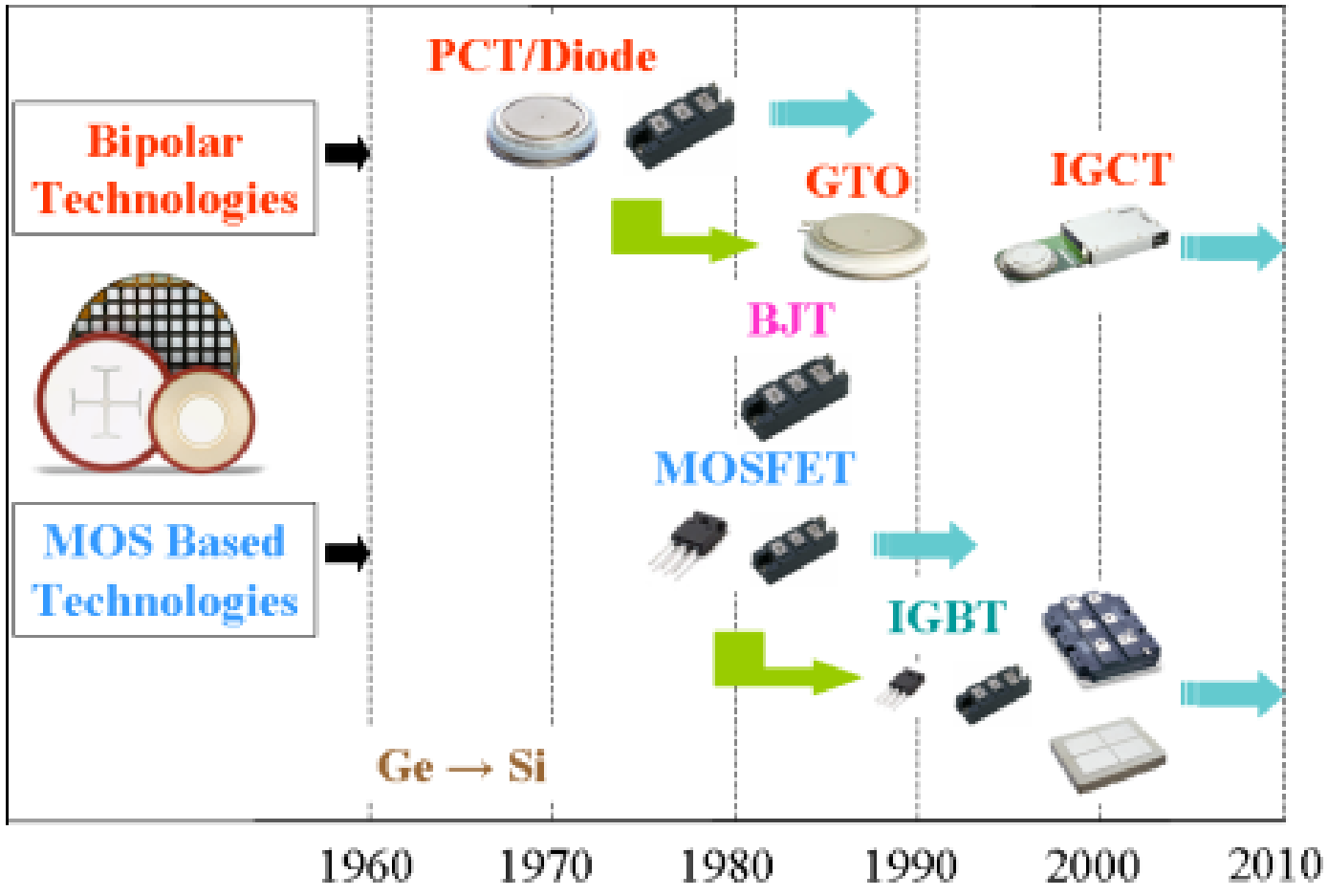


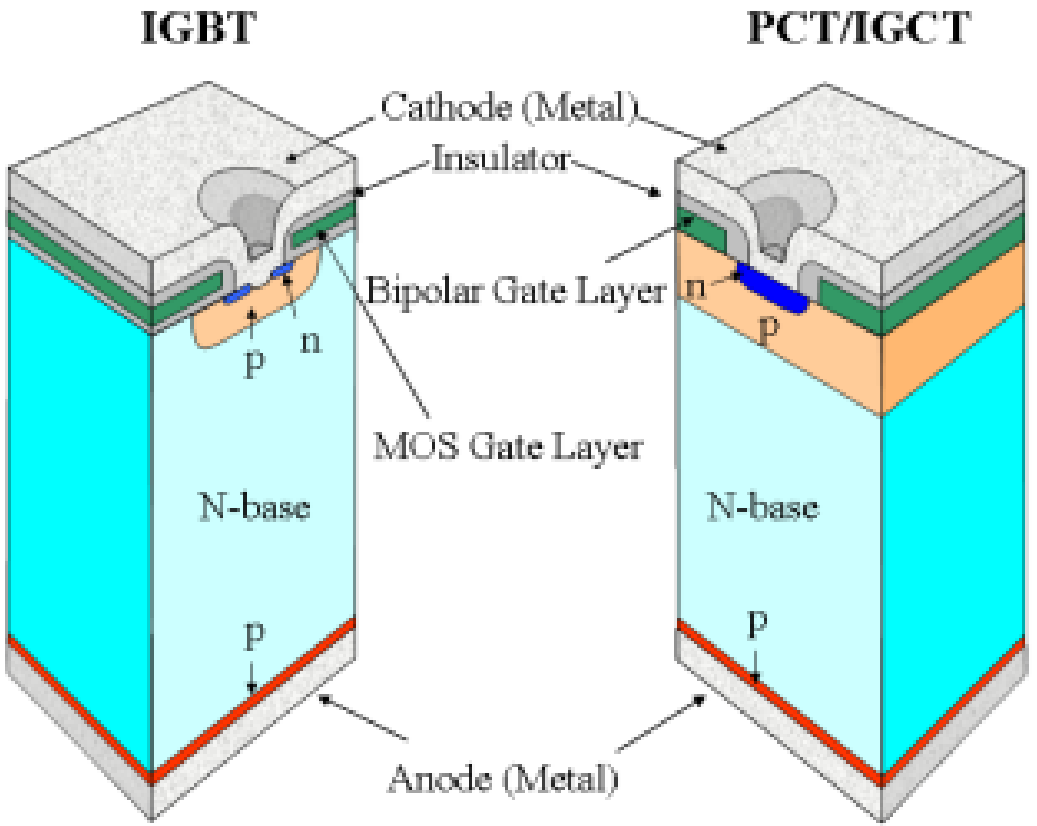
oblasti primene

opseg performansi

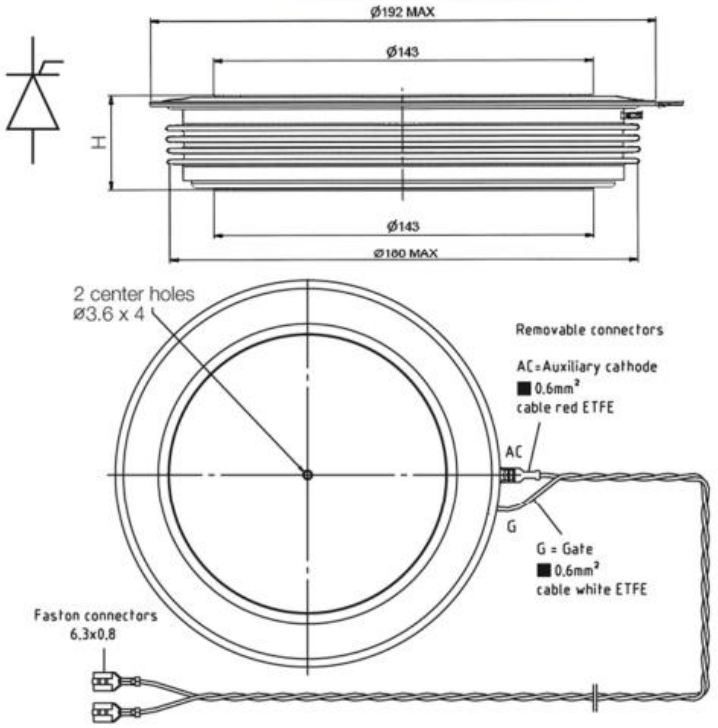
PCT-Phase Controlled Thyristor
IGCT-Insulated GATE Controlled
IGBT-Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET-Metal Oxide Semiconductor FET

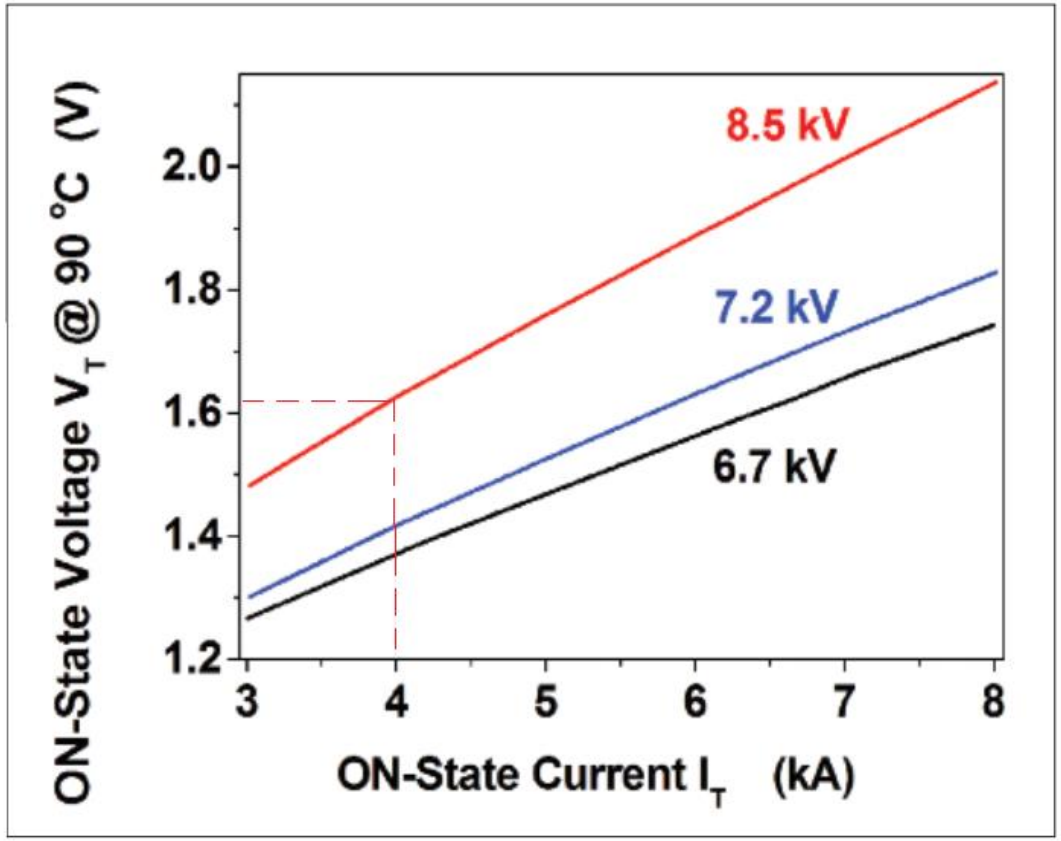
Evolutivni razvoj tehnologija snažnih prekidača u SN i VN energetskim pretvaračima





PCT-trenutne MAX performanse



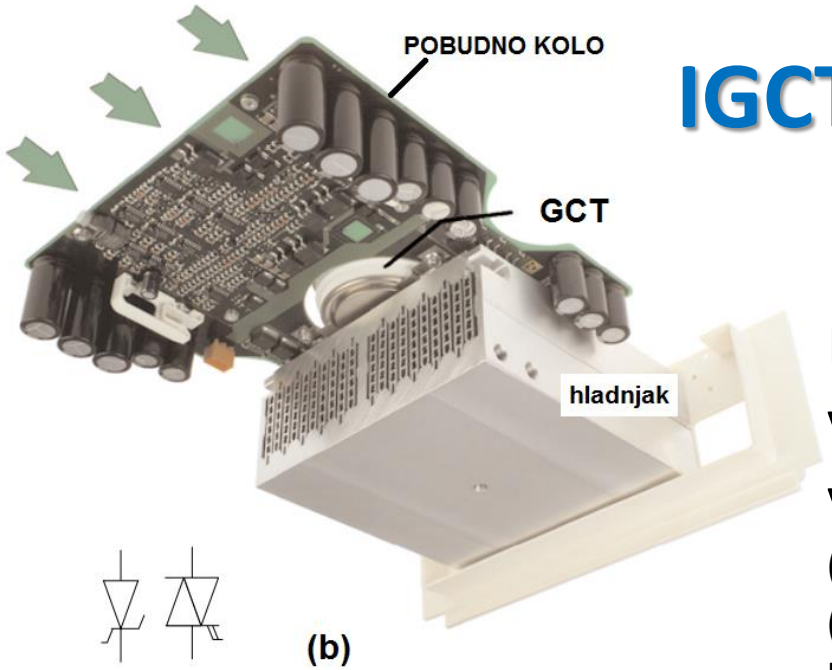


Prikaz fazno kontrolisanog tiristora 8.5kV/4000A 5STP 45Y8500 proizvodnje Hitachi ABB i V-I karakteristike u stanju vođenja

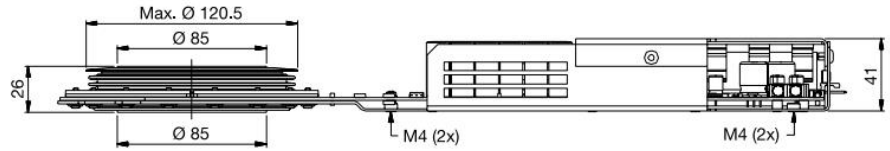
IGCT-MAX performanse

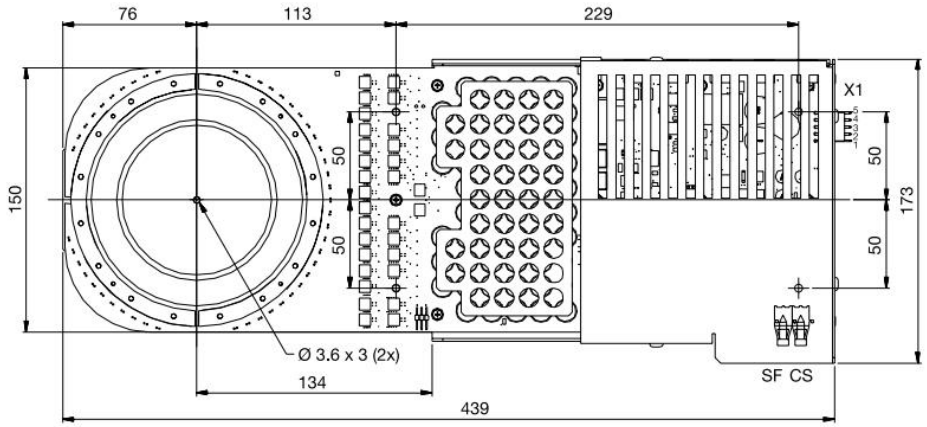
1 - GCT
2 - Interna Dioda
3 - Gejt

(a)



(b)



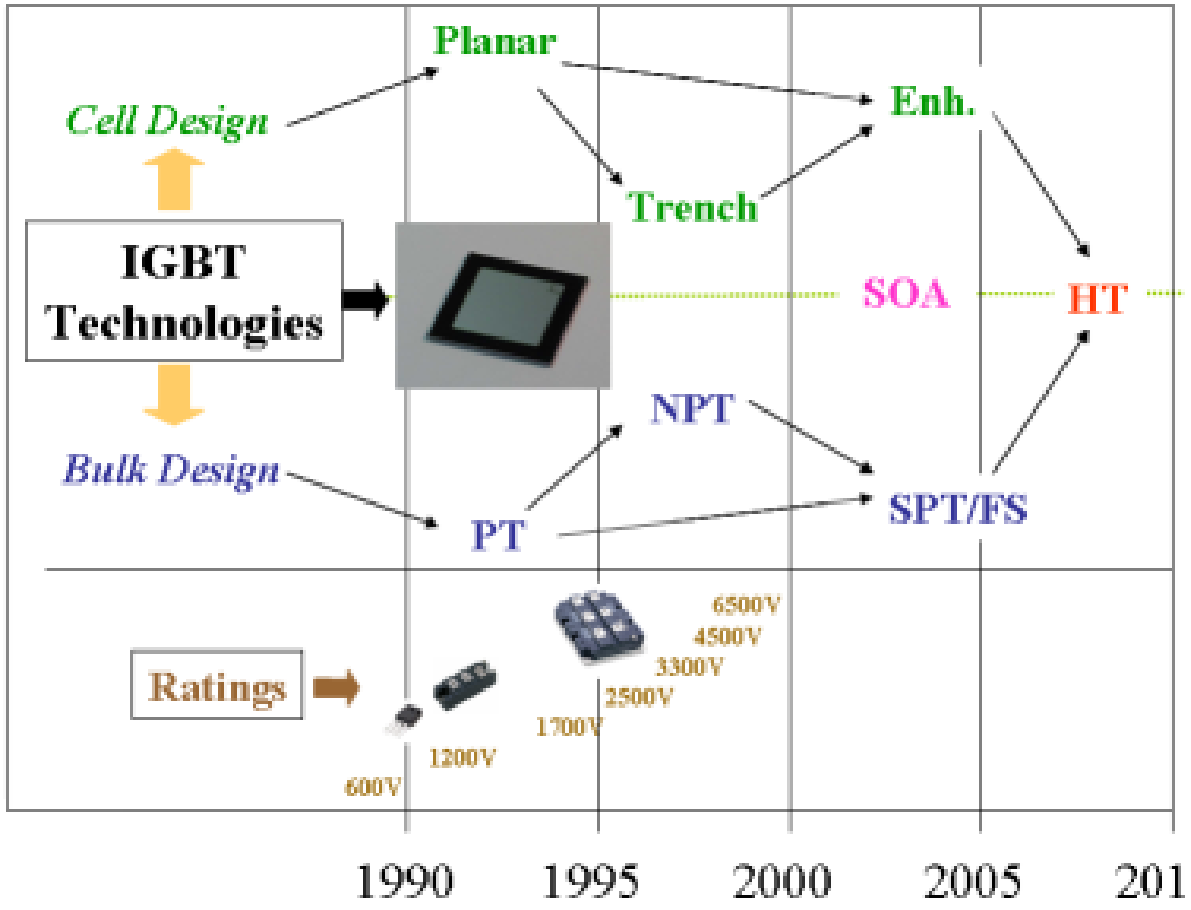


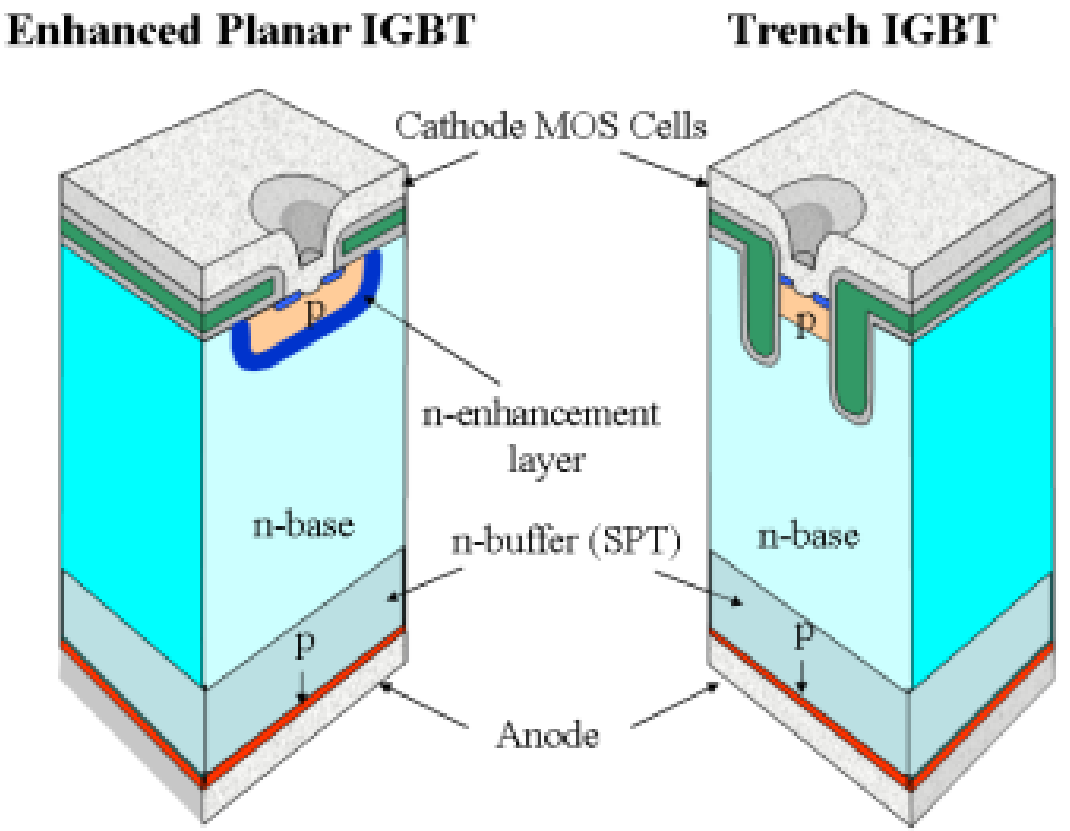
(c)

Prikaz IGCT visokonaponskog visokostrujnog prekidača;
(a) interna struktura,
(b) integrisani modul GCT sa hladnjakom i pobudnim kolom,
(c) tehnički crtež sa dimenzijama

IGCT prekidač tip 5SH36L4521 4500V/3600A, proizvodnje Hitachi ABB

Evolucija tehnologija visokonaponskih visokostrujnih IGBT prekidača





Punch-Through (PT), Non-Punch-Through (NPT) i Soft-Punch-Through (SPT) tipovi IGBT tehnologija , koji su istorijski startovali od relativno niskih struja i napona su evoluirali u elemente koji se široko koriste u visokonaponskim aplikacijama.

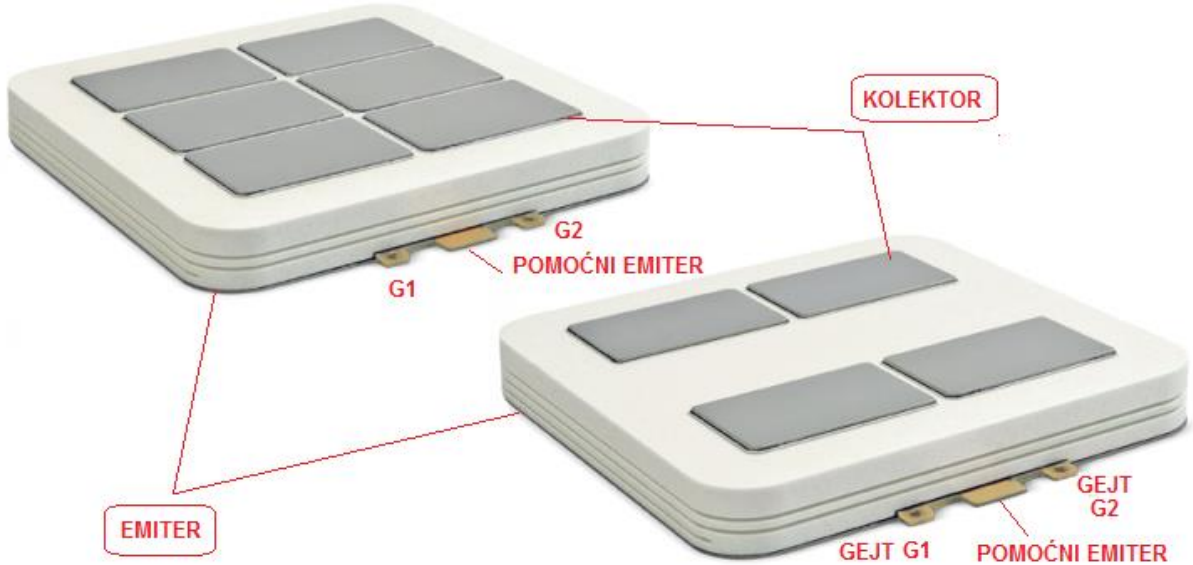
IGBT – MAX performanse

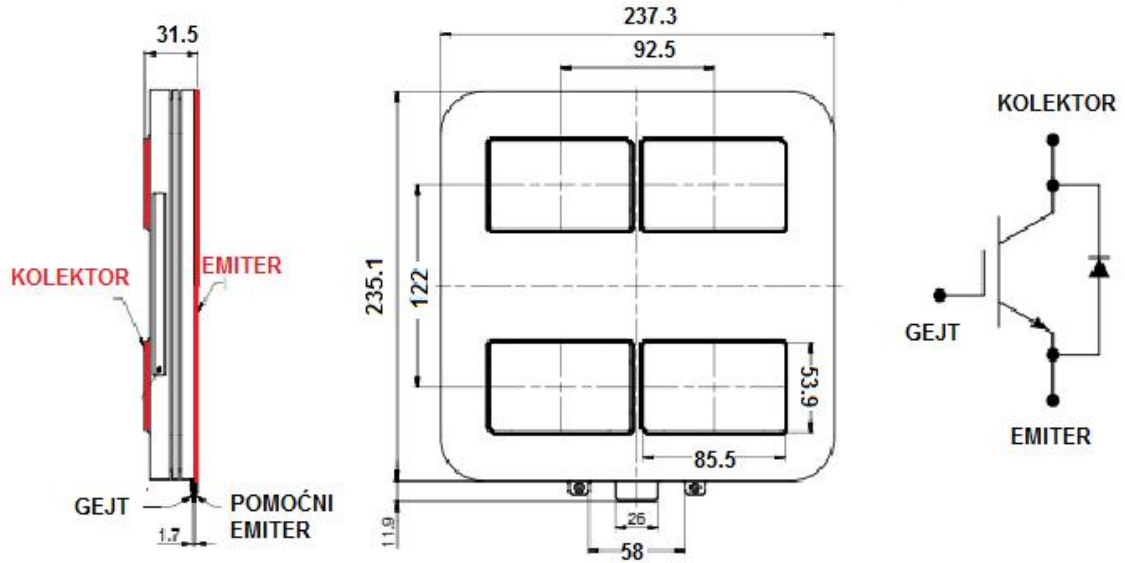
- Da bi se poboljšala pouzdanost i smanjili troškovi u sistemima koji zahtevaju redundantnost i serijski povezane IGBT module, najčešće korišćeni su Hitachi Energy stezni paketi.
- U ovom slučaju se koristi koncept IGBT „pres-pack“ tehnologije koja:
  (1) omogućava lako mehaničko i električno serijsko povezivanje,
  (2) omogućava jednostavno dimenzionisanje naslaganih elemenata zahvaljujući visokoj toleranciji montažnog pritiska,
  (3) garantuje ujednačen pritisak na više elemenata,
  (4) obezbeđuje stabilno stanje u slučaju kvara (kratkog spoja),
  (6) je podesna za režime dugotrajnijih kratkih spojeva.

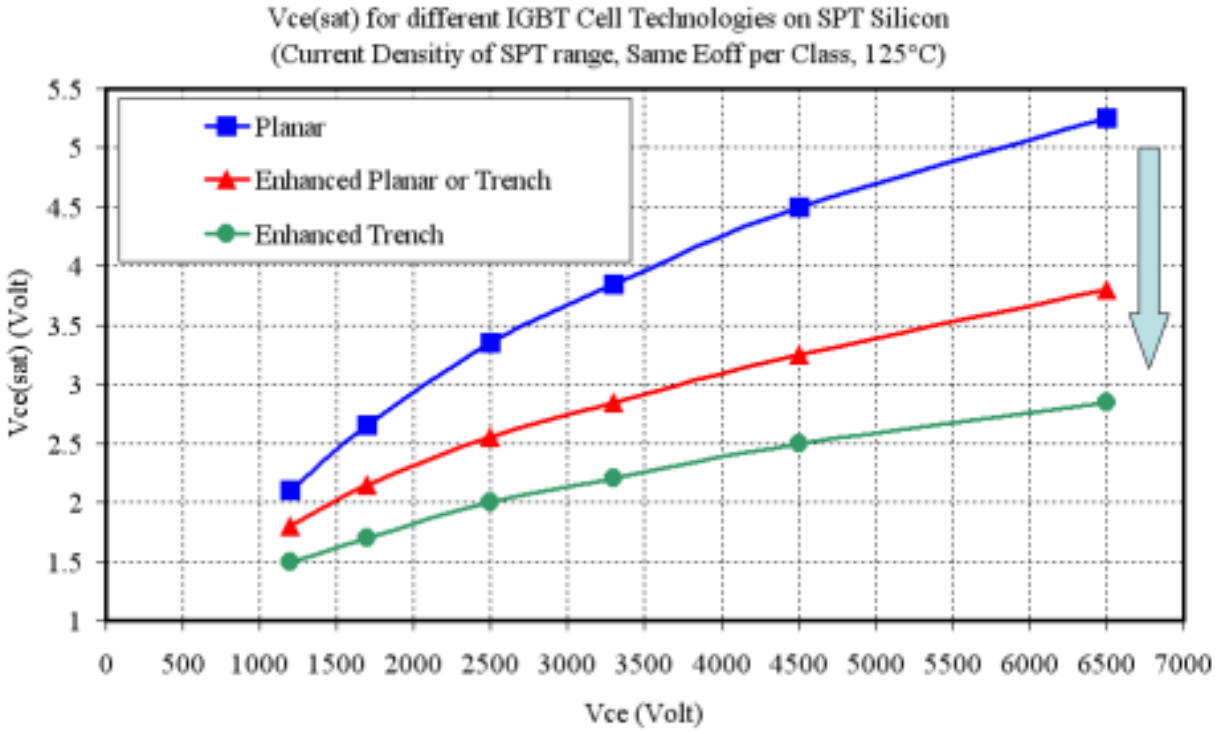
Iz ovih razloga IGBT moduli ovog tipa su veoma podesni za aplikacije kao što su HVDC, FACTS, VN prekidači i u režimima impulsnih snaga.

- **IGBT moduli tipa 5SNA1300K450300 proizvodnje Hitachi ABB, su za napone 4500 V, struje 1300 A i napon zasićenja u stanju provođenja struje između spojeva kolektora i emitera je ≈ 3 V.**
- **Maksimalne performanse ovih IGBT paketa u ovom trenutku su 5200 V/3000 A/3 V za IGBT module 5SJA 3000L520300, takođe proizvodnje Hitachi ABB.**

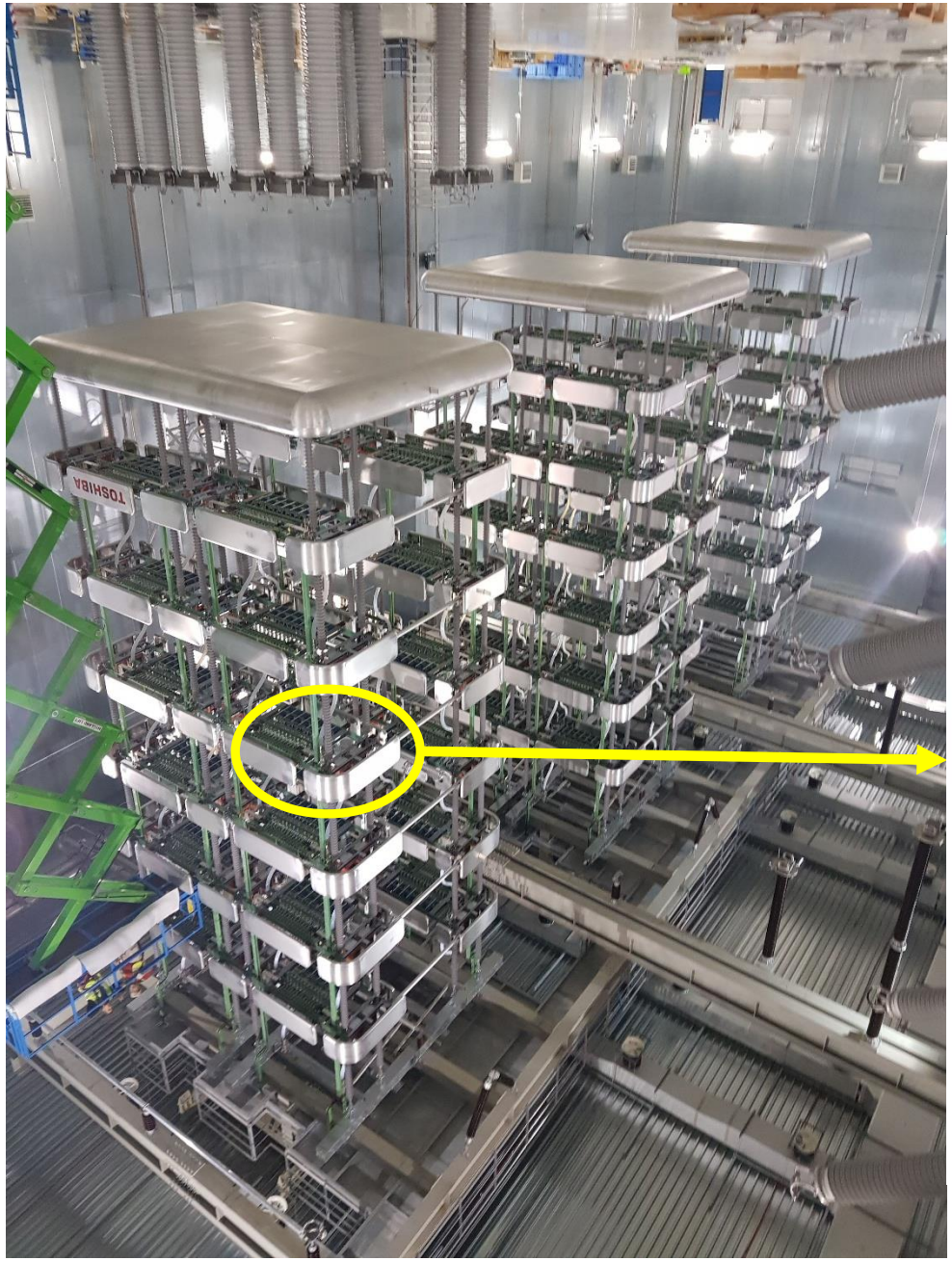
Maksimalne performanse 5200 V/3000 A/3 V za IGBT module 5SJA 3000L520300, proizvodnje Hitachi ABB.





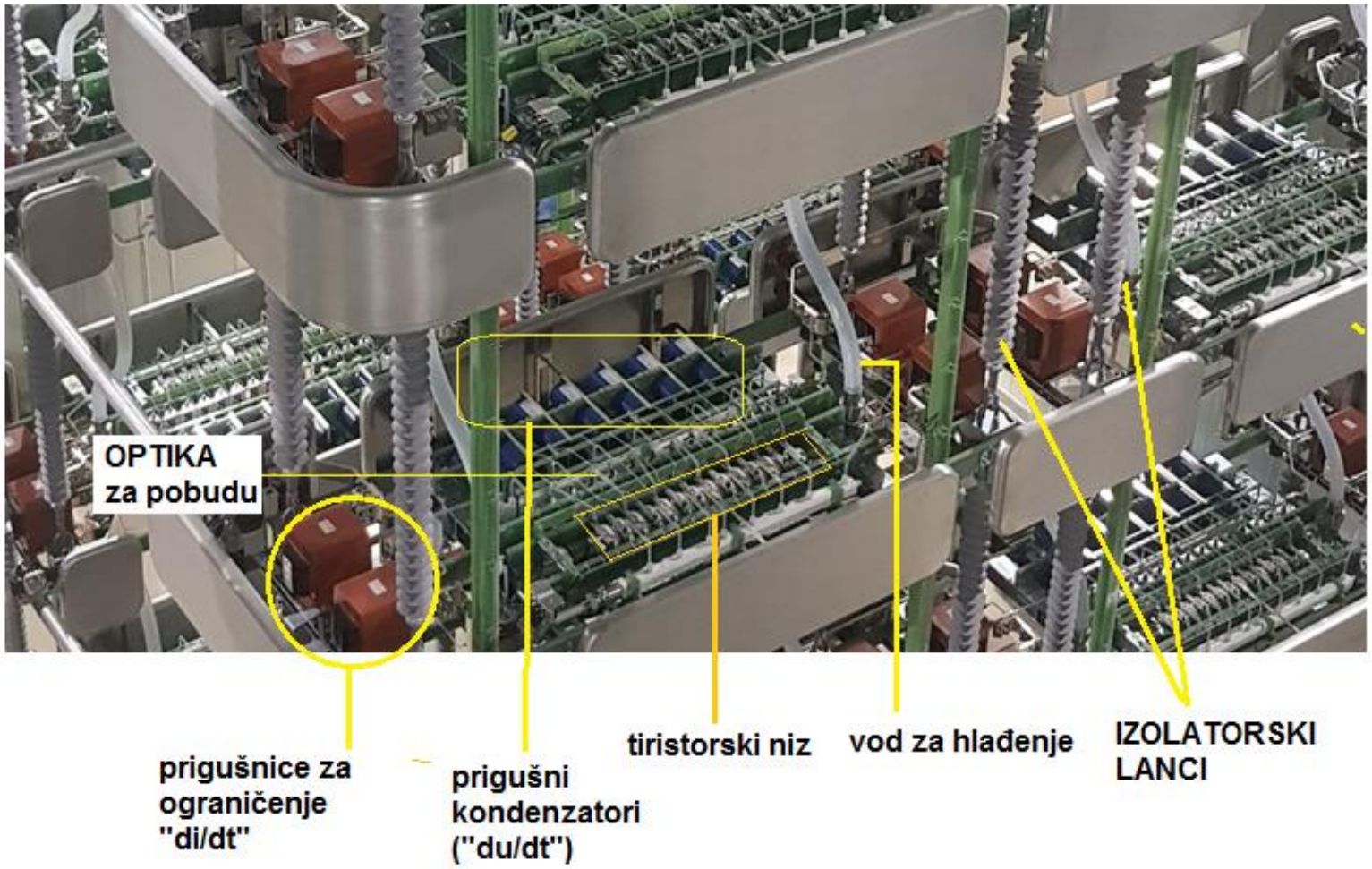


Poređenje visokonaponskih IGBT tehnologija u zavisnosti napona zasićenja Vce(sat) od podnosivog napona kolektor-emiter Vce

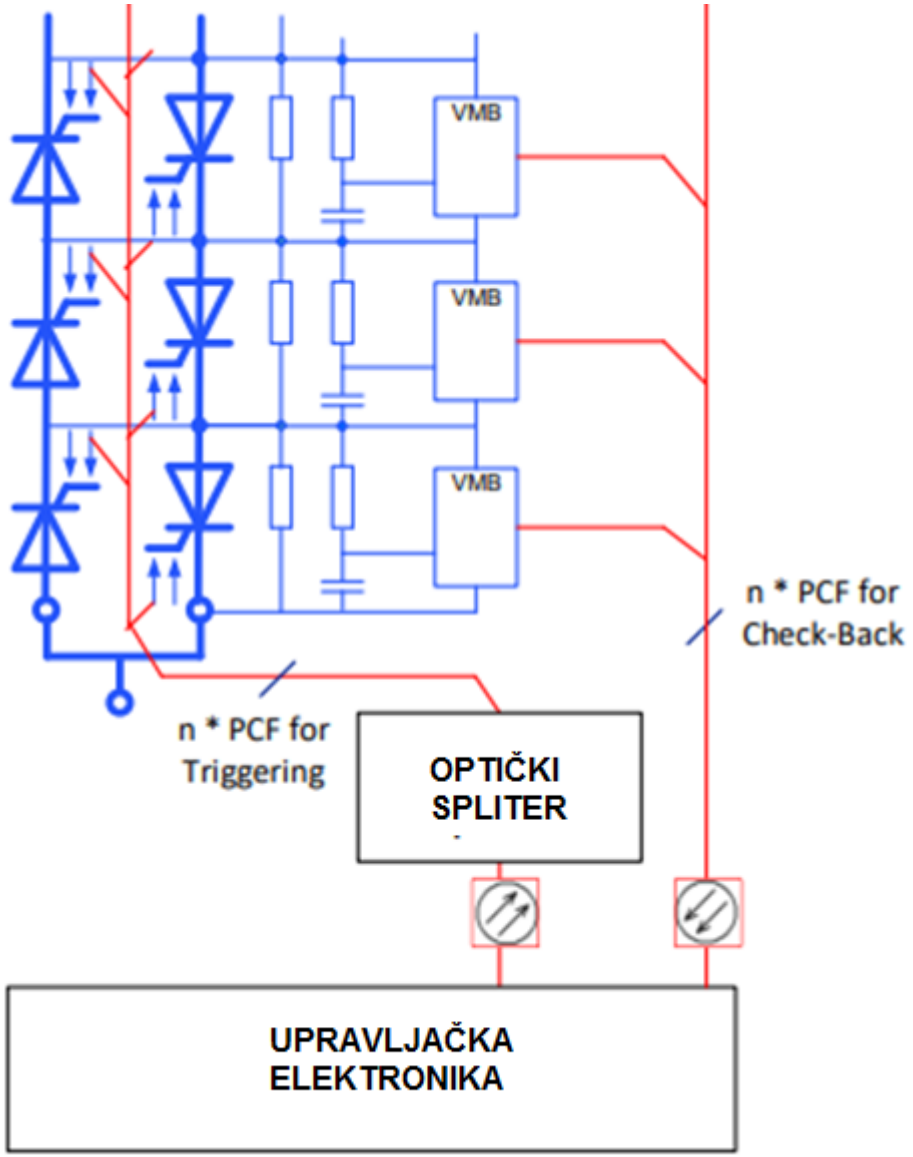


PRIMER 1- Tiristorski stek na HVDC LINK 1000 MW ± 500 kvDC “ITALIJA – CRNA GORA”

Detalji prikaza jednog dela steka

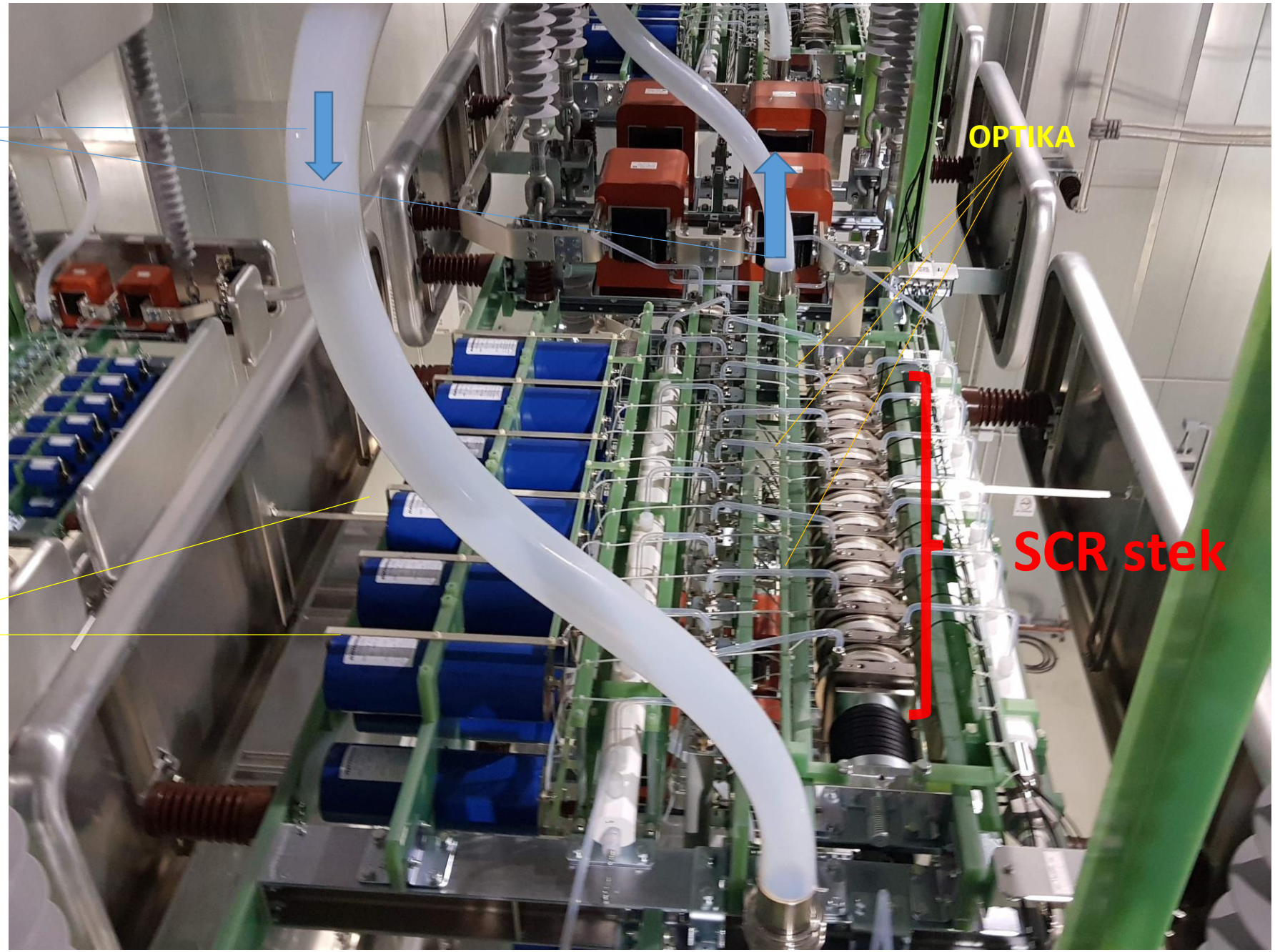


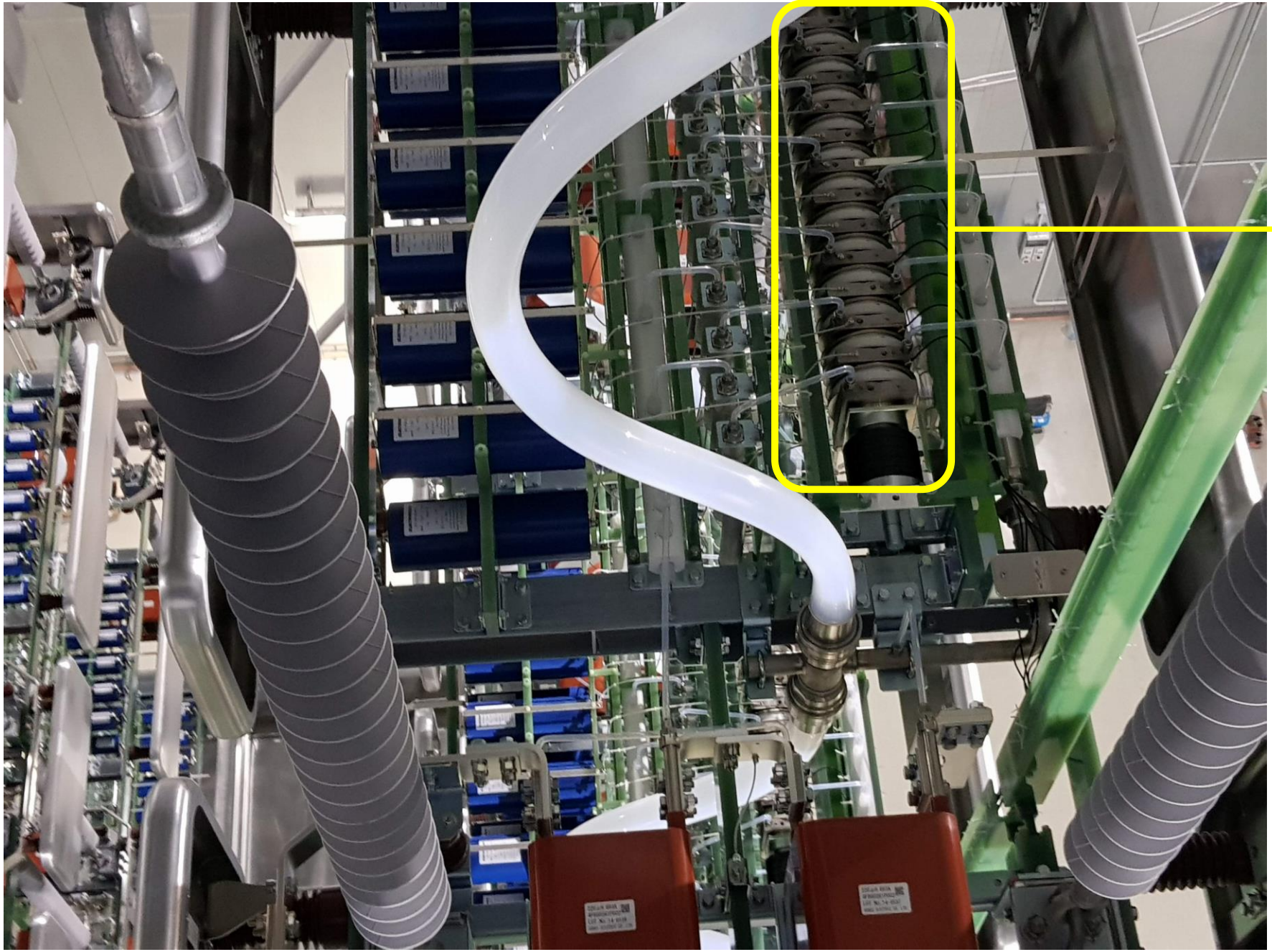
SVETLOSNO OKIDANI TIRISTORI (LIGHT TRIGGERED)



Rashladni
Fluid (voda)

RC
snaberi

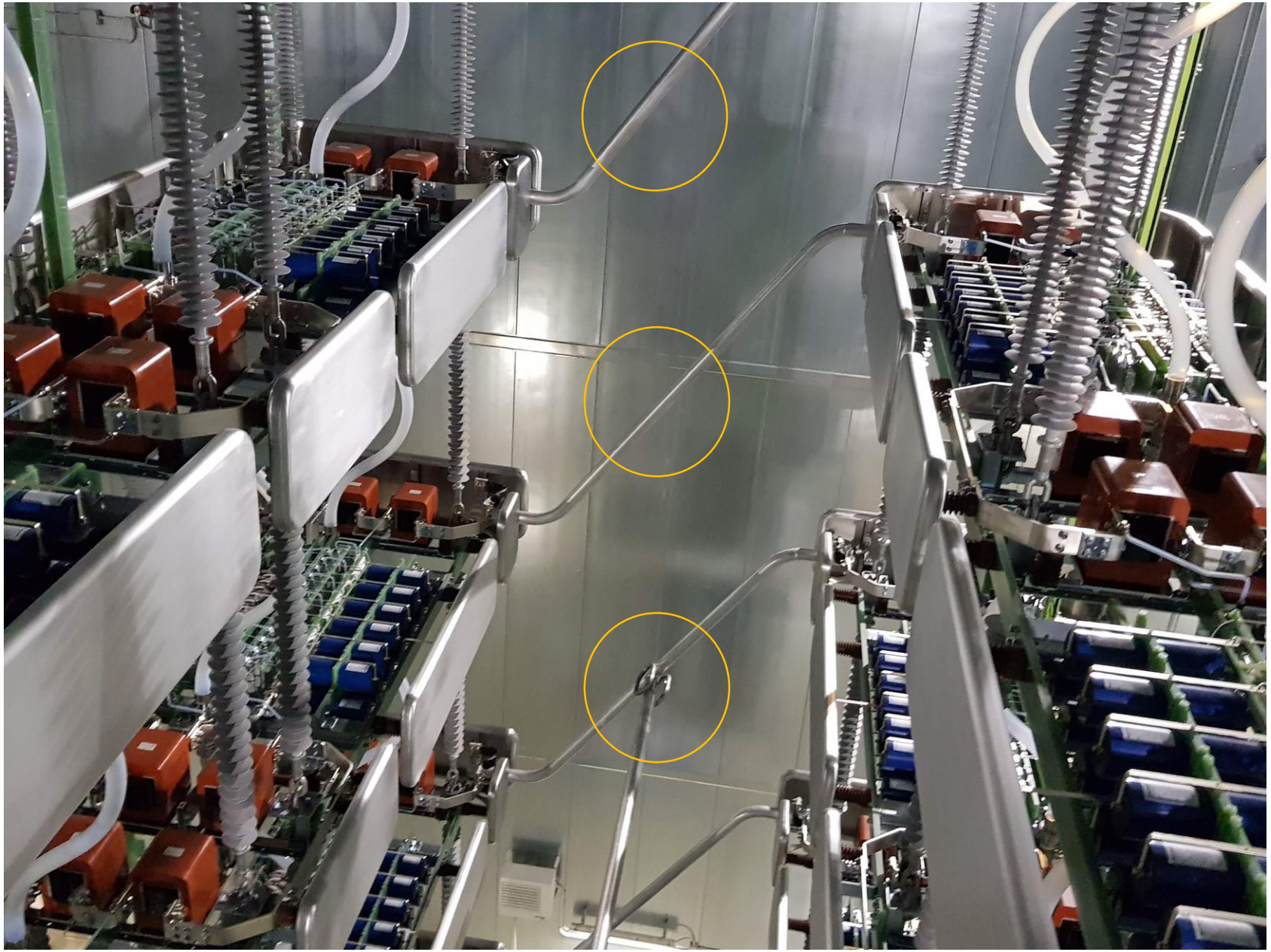


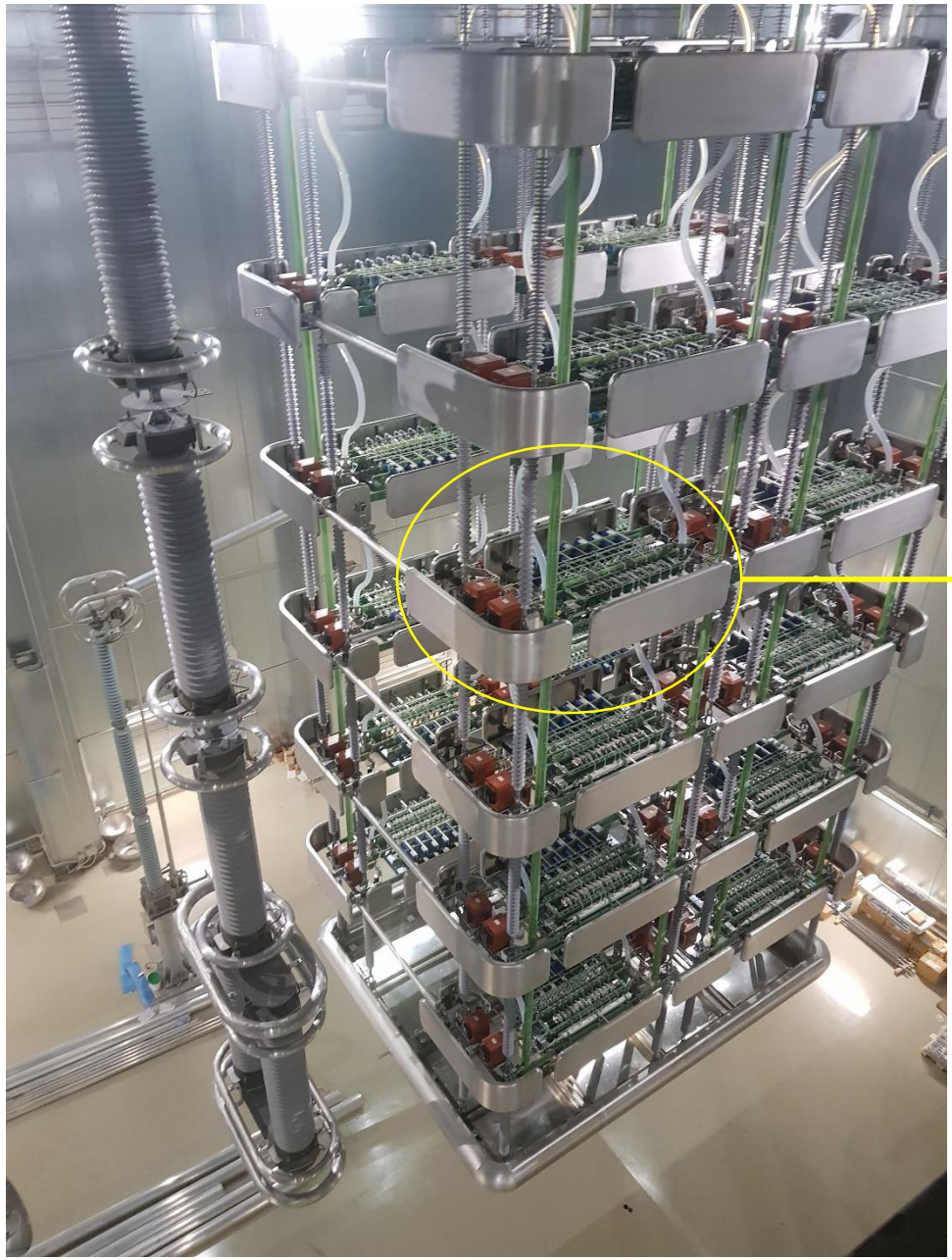


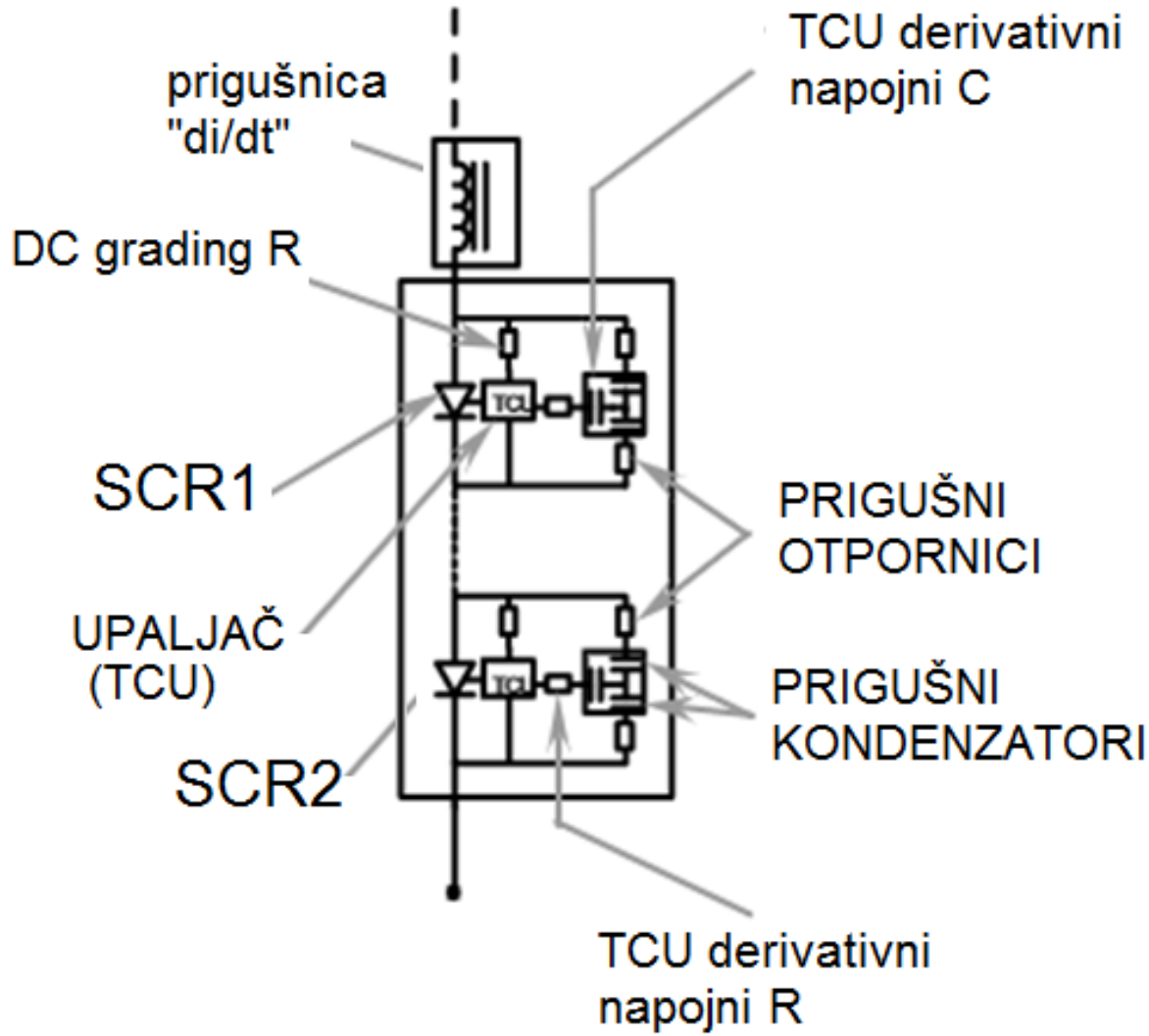
13x SCR

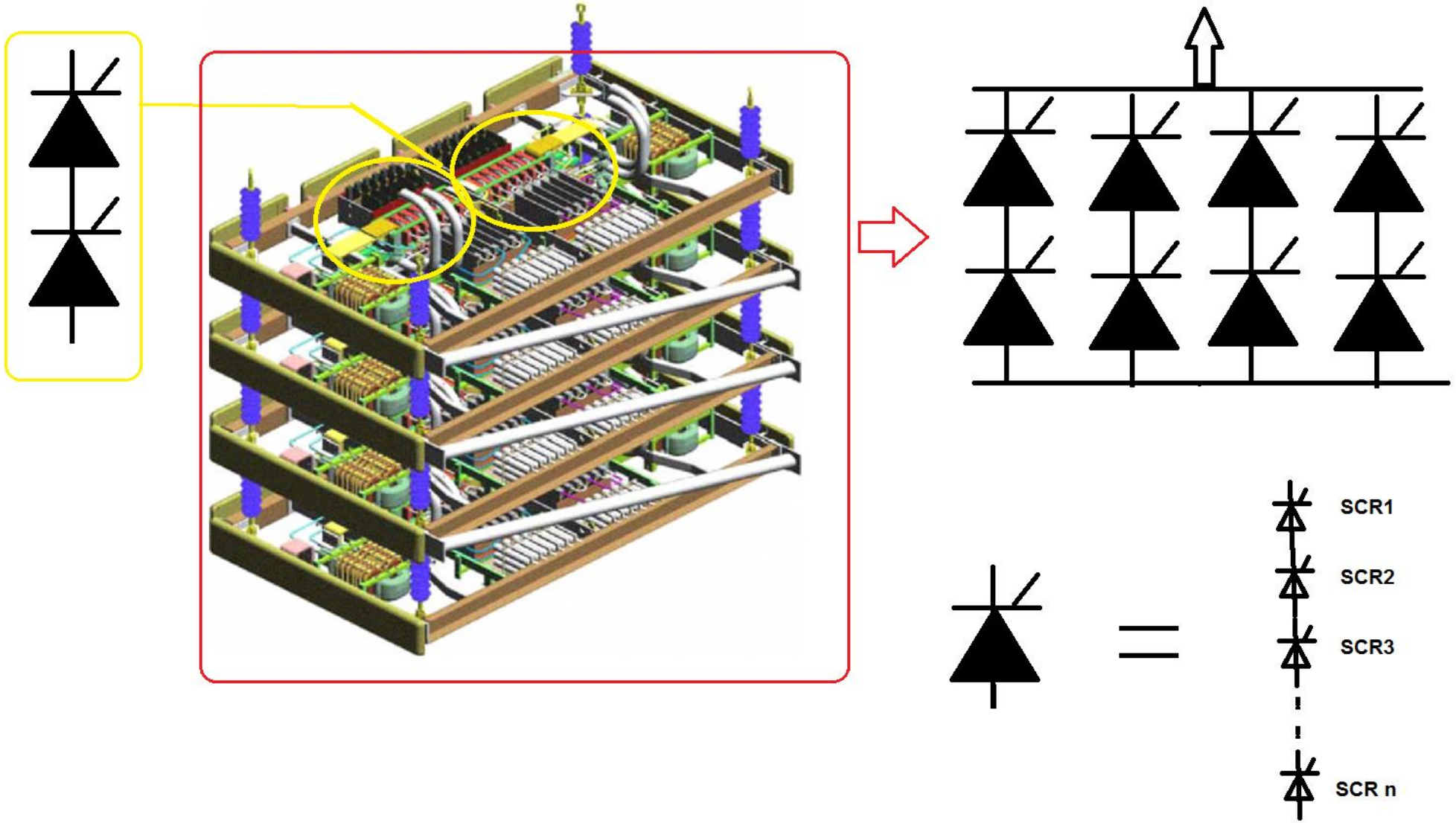
13x8.5kV=
110kV

PRIKAZ MEĐUVEZA IZMEĐU POJEDINIH TIRISTORSKIH MODULA

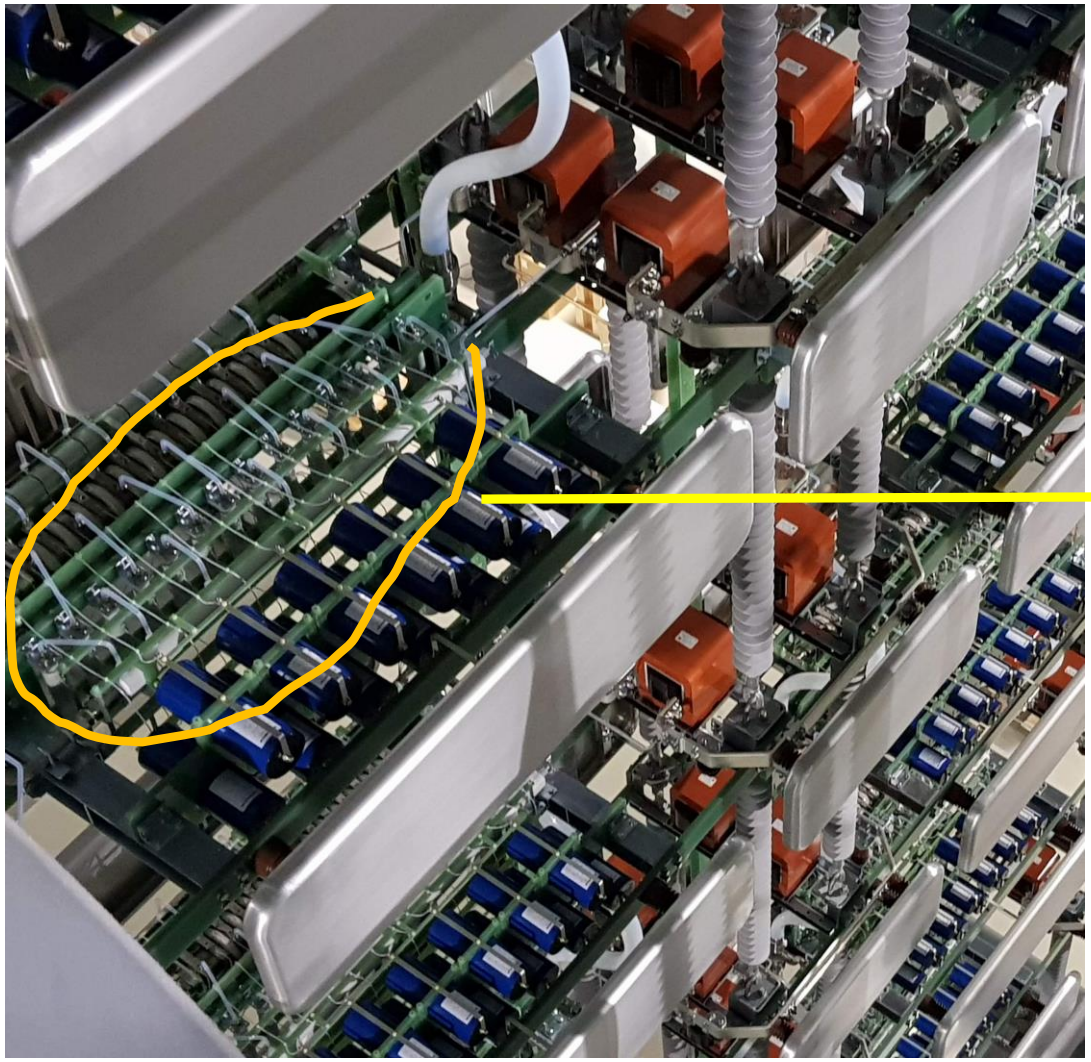


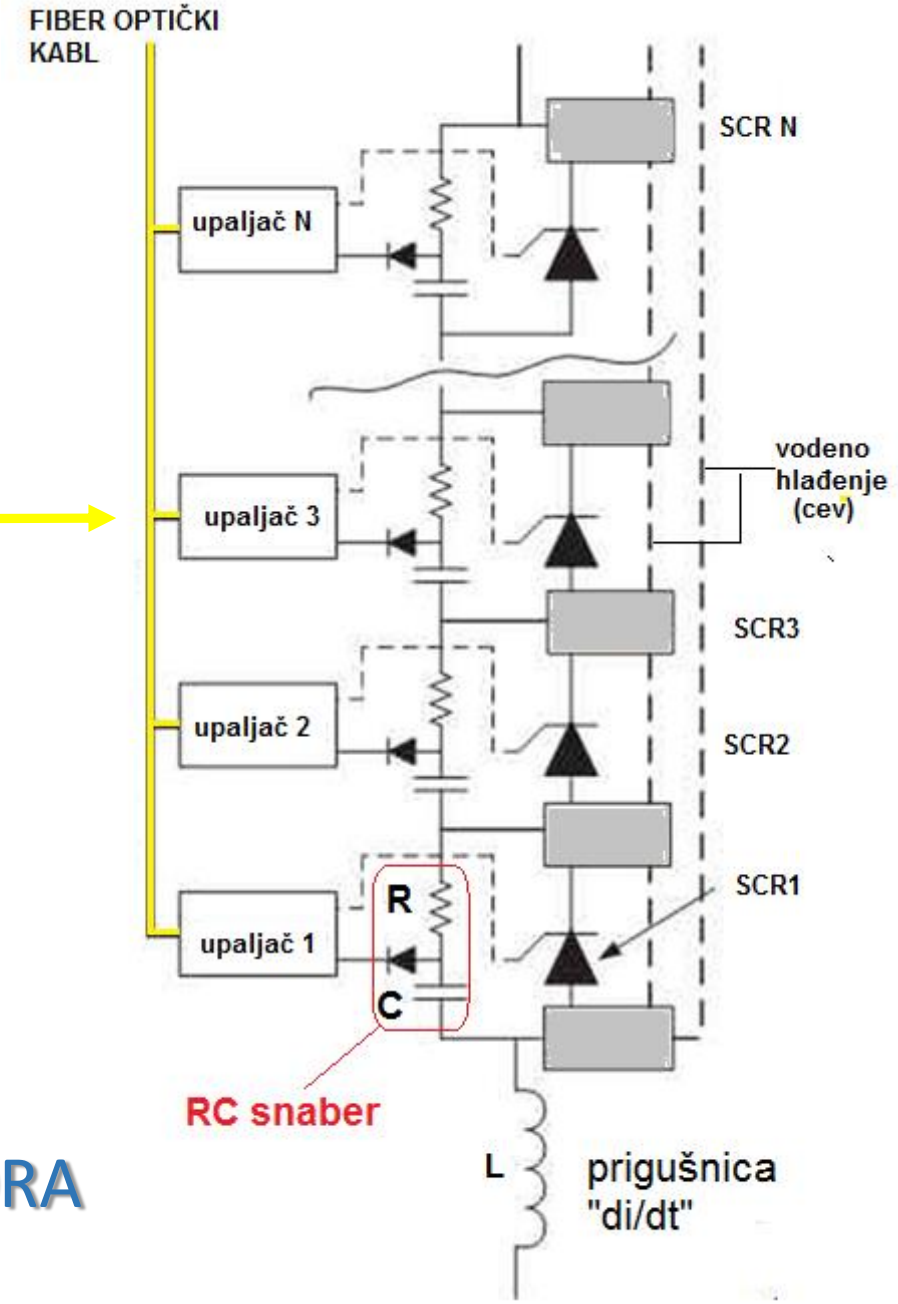



prigušnica
"di/dt"
TCU derivativni
napojni C
DC grading R
SCR1
PRIGUŠNI
OTPORNICI
UPALJAČ
(TCU)
PRIGUŠNI
KONDENZATORI
SCR2
TCU derivativni
napojni R

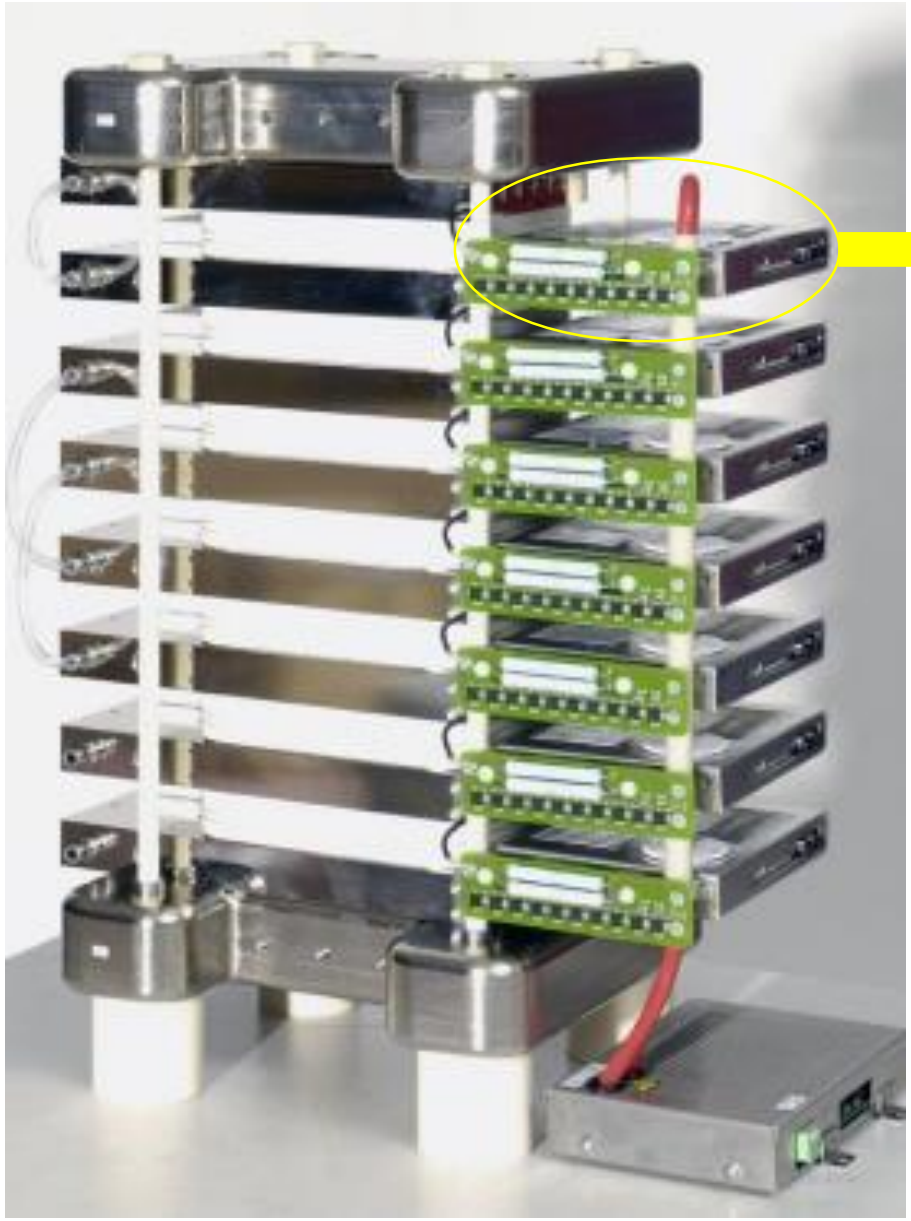


TIPIČNO: Za +/-800kV HVDC, SCR stek: 4 paralelne x 2 redne grupe tiristora

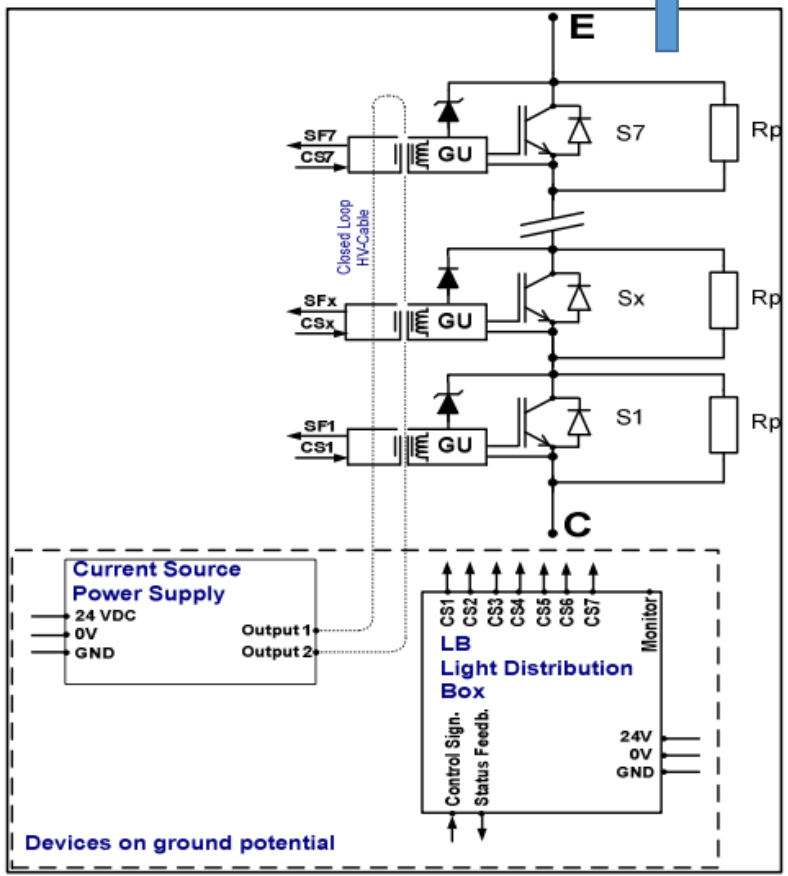




PRIMER FIBER OPTIKE ZA POBUDU TIRISTORA

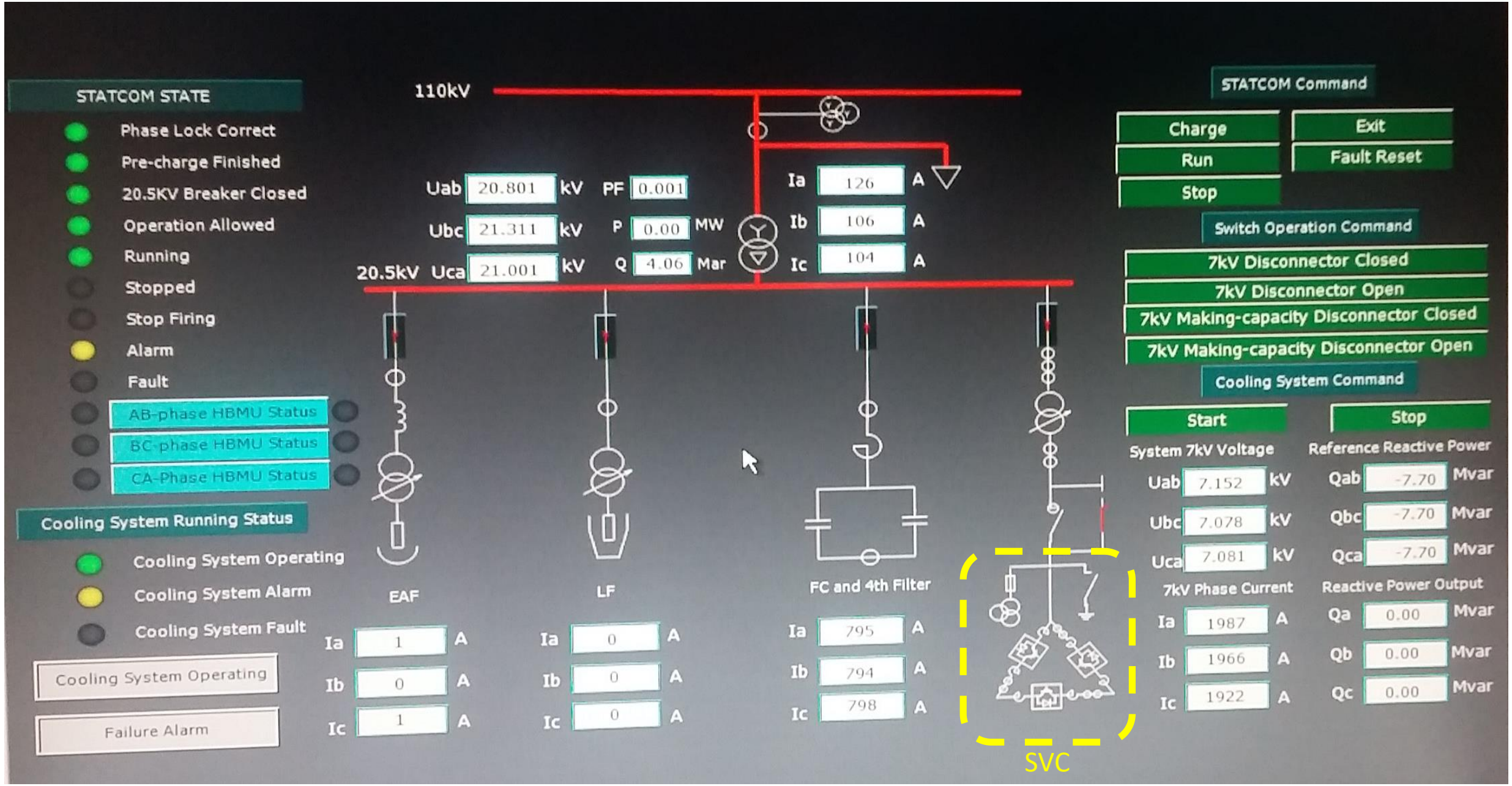


5SNA
1250K450300
4.5kV/1300A

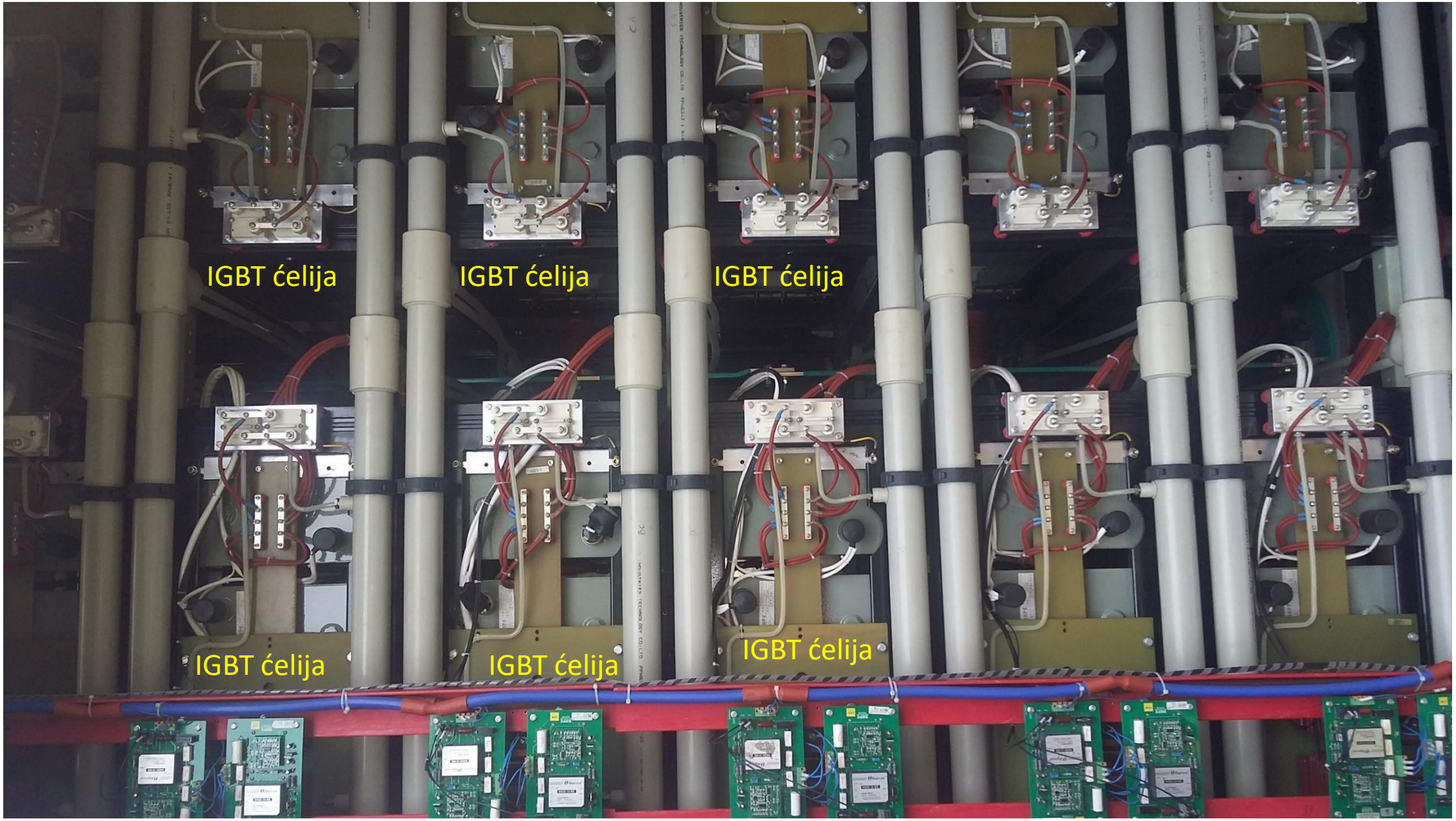


Vodeno hladjeni „press pack“ IGBT
za 22kV (5x4.5kV) i za struju od 1300A

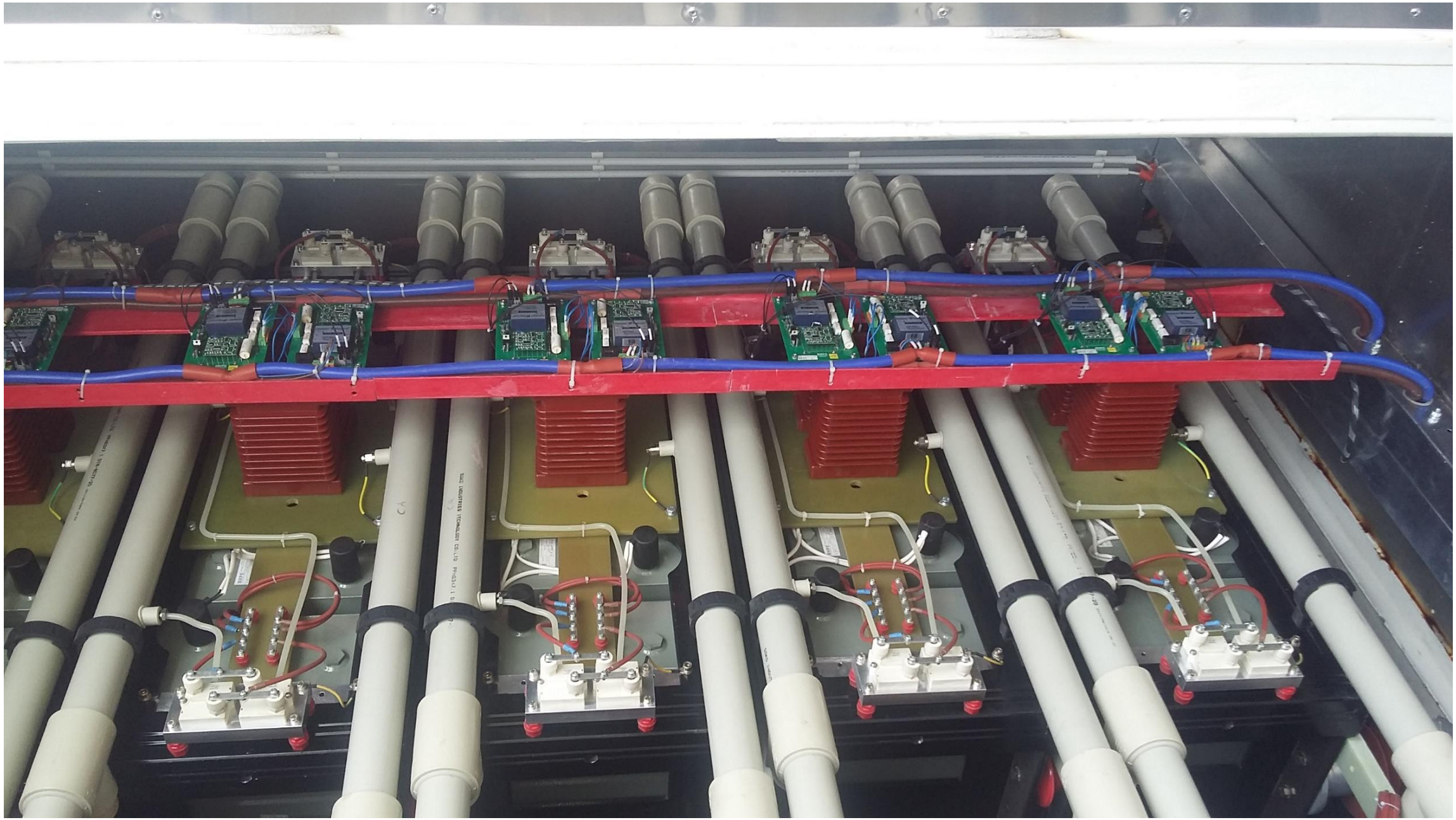
Primer 2-STATIČKI VAR KOMPENZATOR (SVC)- Sirmium Steel Sremska Mitrovica



IGBT statički VAR kompenzator



Harvest
HAD5-15-WE
VIN:85~265VAC
VOUT: ±15V/0.17A
AC/DC POWER MODULE
RHPE
7820X008
111150
111137
111114
GND



ZAKLJUČAK

- U prezentaciji je dat pregled topologija energetskih pretvarača u sistemima za SN i VN prenos električne energije
- Akcenat je dat na sisteme za DC penos (HVDC sisteme) i statičke Var kompenzatore (SVC)
- Razmatrani su karakteristični slučajevi primena ovih topologija sa istaknutim prednostima ali i manama, kao i njihov uticaj na fleksibilnost prenosa električne energije
- Takođe dati su pregled i maksimalne performanse prekidačkih elemenata SCR, IGCT i IGBT kao i principski prikazi pobudnih kola sa akcentom na FIBER OPTIK pobudne sisteme
- Na kraju su dati primeri nekih realizovanih sistema za HVDC i SVC sa kojima se autor susretao do sada u praksi

HVALA NA PAŽNJI !!!

PITANJA ??

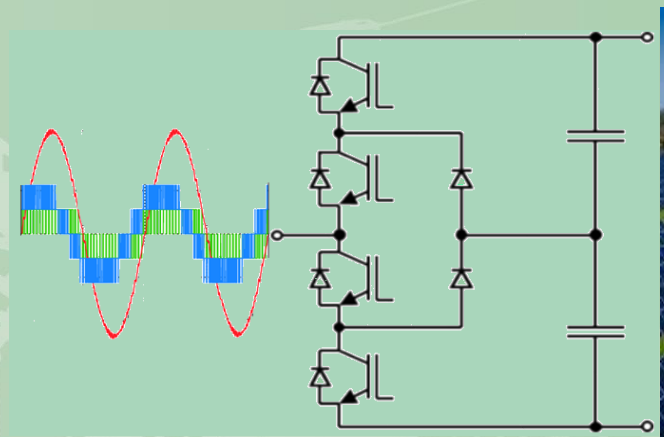
Željko V. Despotović, PhD.E.E

XXIII Internacionalni simpozijum INFOTEH

Mart 2024

UTICAJ UREĐAJA ENERGETSKE ELEKTRONIKE PV ELEKTRANA NA KVALITET ISPORUKE ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNU MREŽU

THE INFLUENCE OF POWER ELECTRONICS DEVICES OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS ON THE POWER QUALITY DELIVERY TO THE DISTRIBUTION NETWORK



37. Savetovanje
CIGRE Srbija 2025

26-30. maj 2025,
Kopaonik

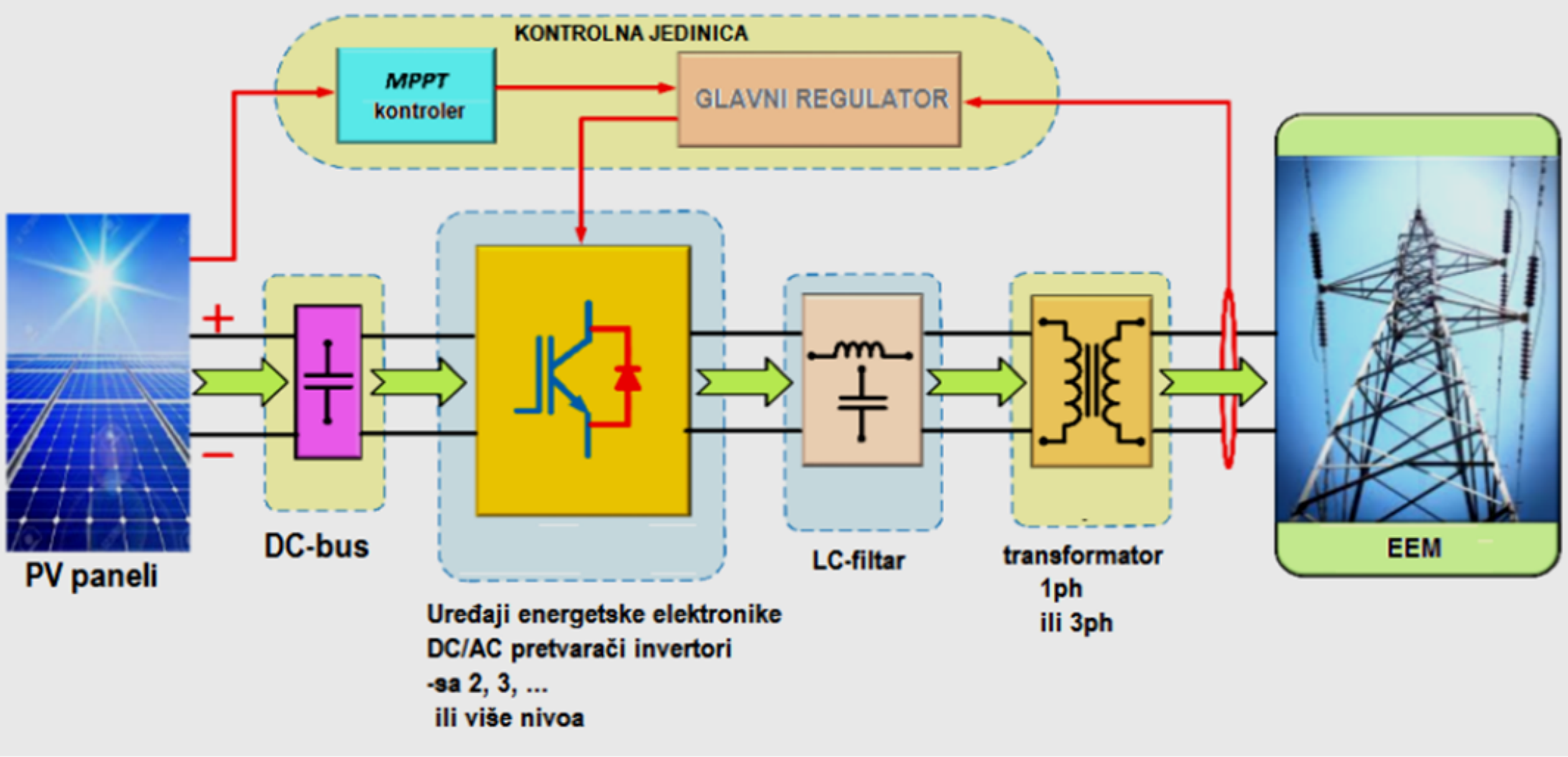
Autor – Dr Željko Despotović, dipl.el.inž
Institut Mihajlo Pupin, Beograd
zeljko.despotovic@pupin.rs

www.cigresrbija.rs

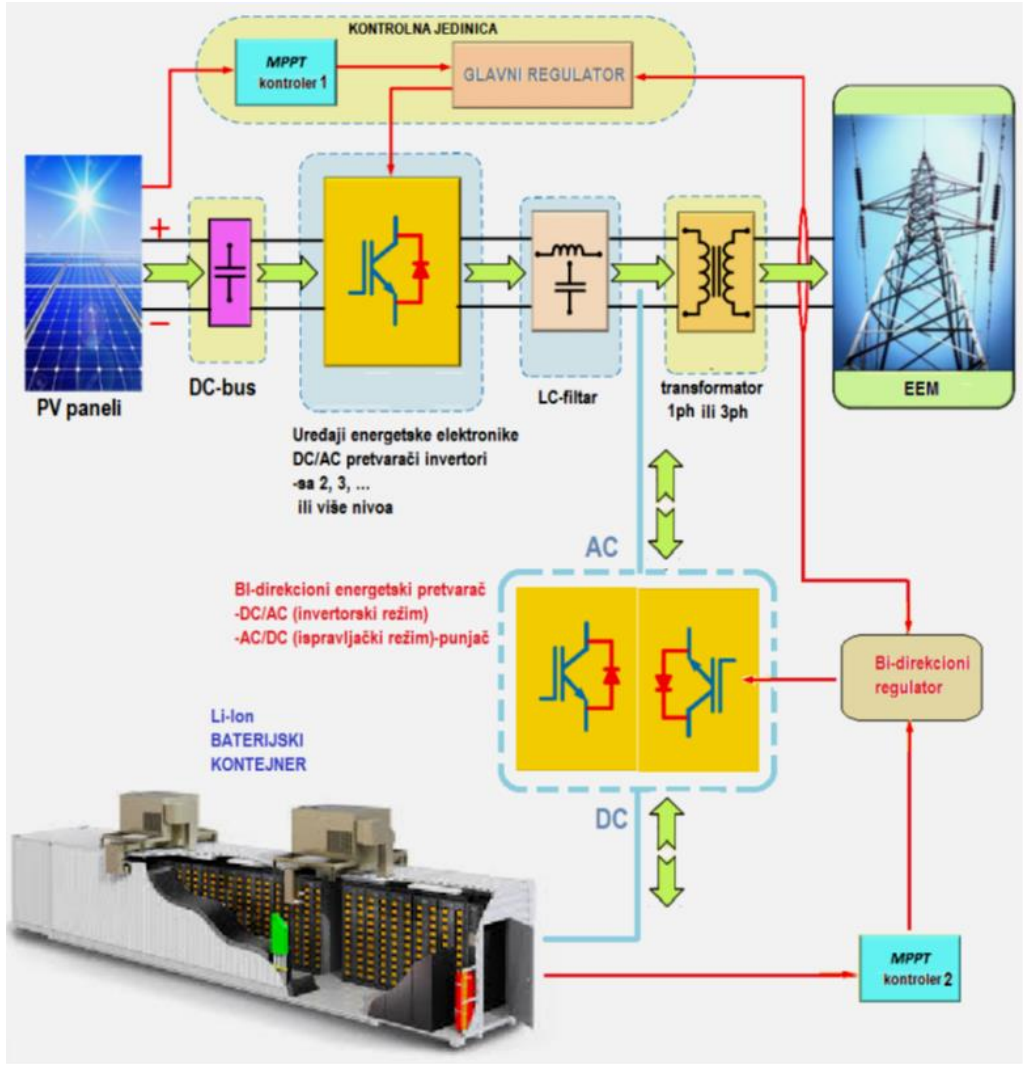
Uvod

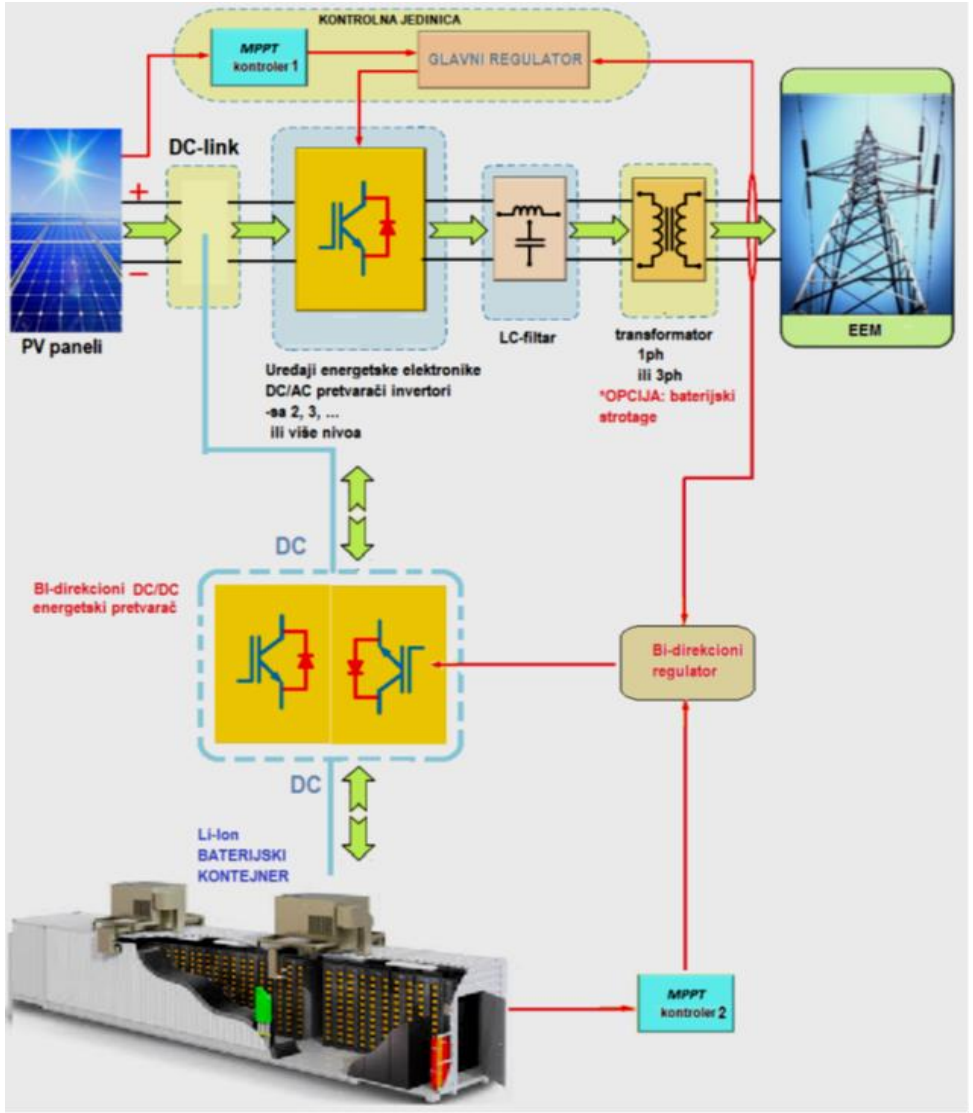
- Usled scenarija intenzivne penetracije distribuiranih energetskih resursa, između ostalog i PV postrojenja u elektroenergetskom sistemu, došlo je do značajnog povećanja korišćenja uređaja energetske elektronike povezanih na EEM.
- PV postrojenja se baziraju dominantno na uređajima energetske elektronike DC/AC pretvaračima - invertorima.
- Jedan od bitnih aspekata pouzdanog i sigurnog rada fotonaponskog mrežnog sistema je upravo pouzdanost rada invertora (energetski interfejs ka mreži).
- Kao takav izložen je raznim mrežnim uticajima, ali i sam utiče na mrežu.
- Ovi uređaji energetske elektronike, su prilagođeni ulaznom DC naponu sa stringova solarnih panela lociranih na DC strani solarne elektrane, a na svom izlazu obezbeđuju trofazni sinusni napon sa relativno niskim faktorom izobličenja.
- PV invertori u principu rade u različitim režimima, uključujući veoma česte fluktuacije sunčevog zračenja.
- Kao rezultat ovih okolnosti, PV invertori mogu injektirati više harmonike napona i struja, utičući na kvalitet isporuke električne energije u tački povezivanja na EEM.
- Viši harmonici dovode do povećanja gubitaka snage i energije, smanjenja proizvodnog kapaciteta PV sistema, degradacije i smanjenja veka trajanja mrežnih komponenti i prouzrokuju kvarove na zaštitnoj opremi.

Principski prikaz standardnog „On-grid” fotonaponskog sistema

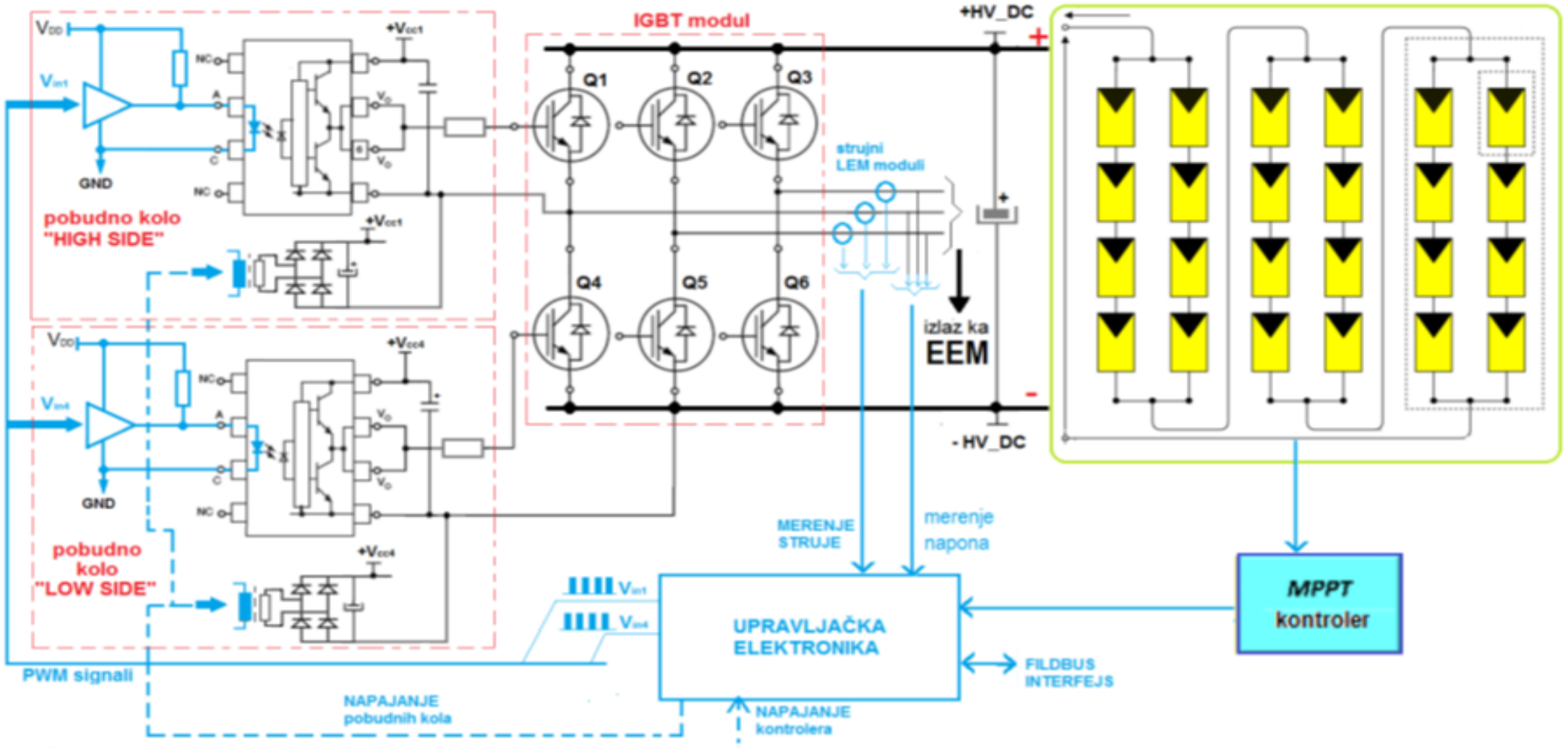


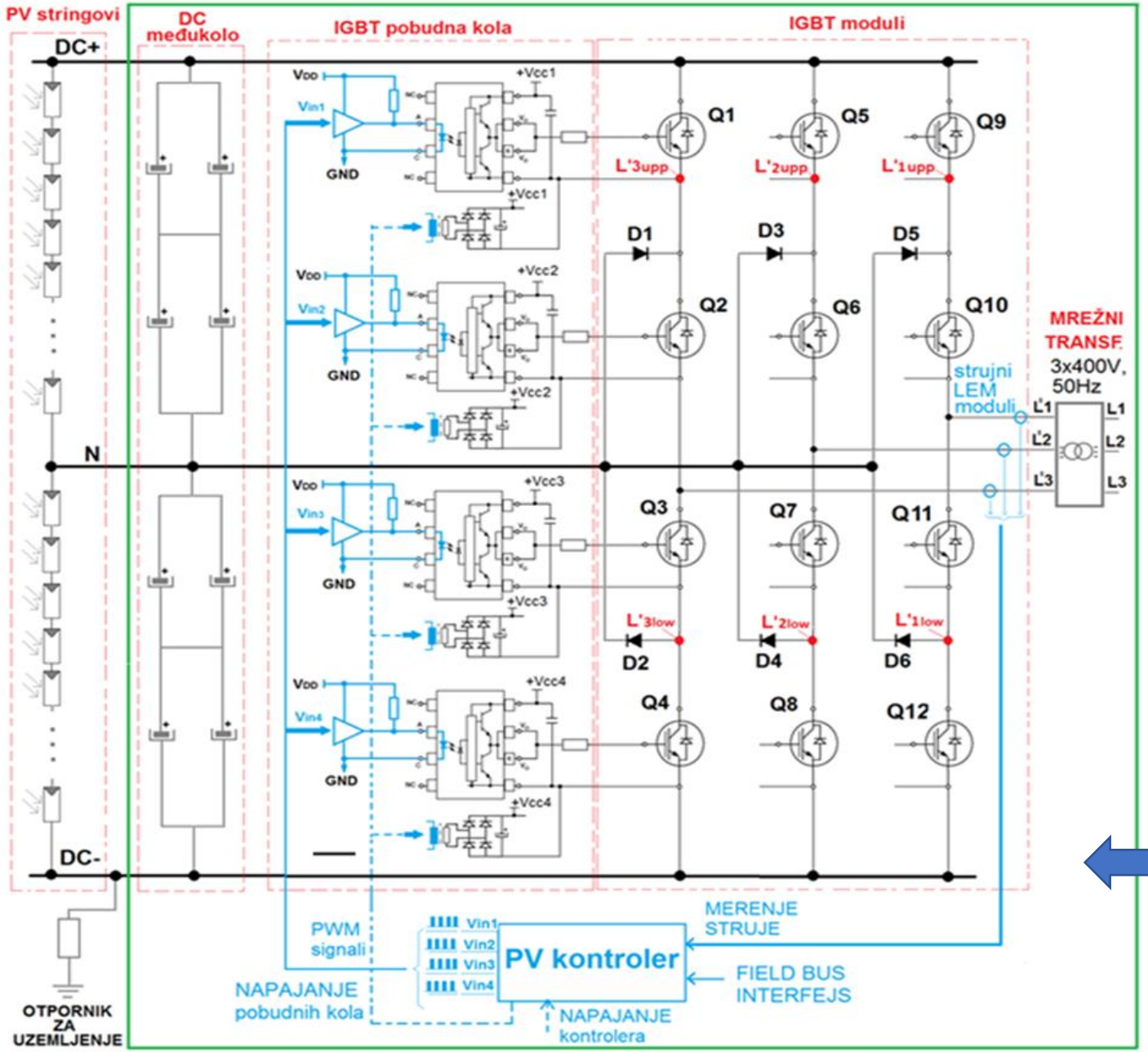
Principski prikaz „On-grid” fotonaponskih sistema sa baterijskim skladištem

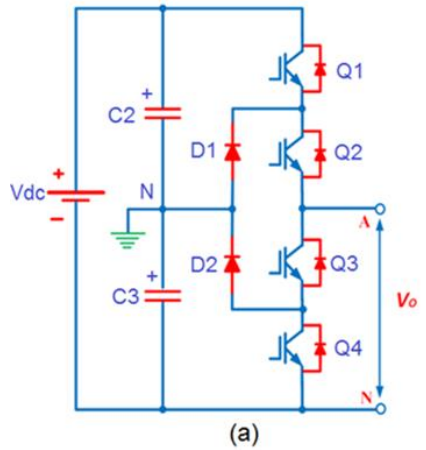


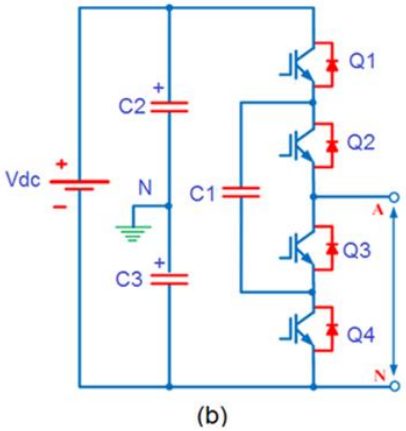


Principski prikaz solarnog invertora sa dva nivoa i pripadajuće upravljačke elektronike





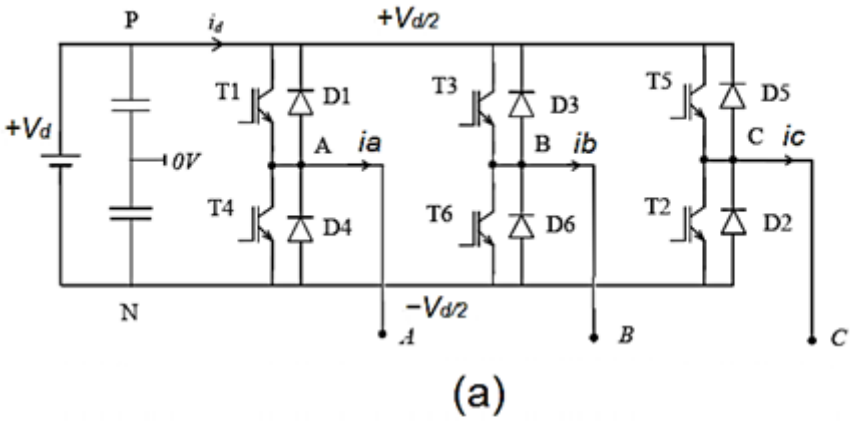




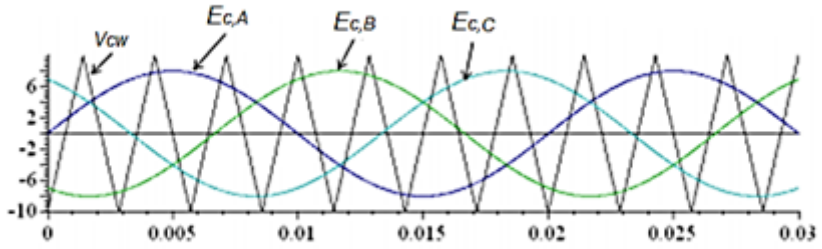
(1) **topologija sa tri nivoa** sa diodama za simetriranje i fiksiranje neutralne tačke (eng. three-level neutral point clamped-3L NPC) i

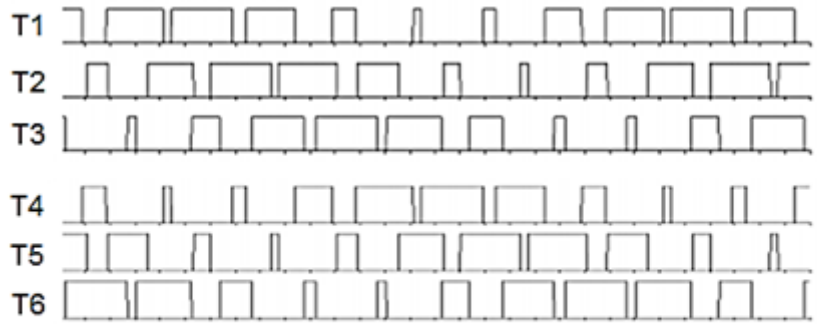
(2) **topologija sa tri nivoa** sa „lebdećim“ kondenzatorom (eng. three-level flying capacitor-3L FC).

IGBT invertor sa dva nivoa-talasni oblici i spektar napona

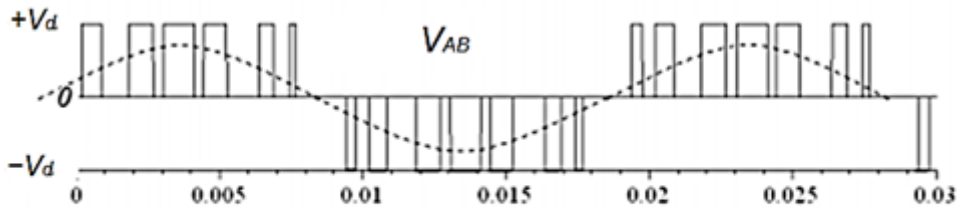


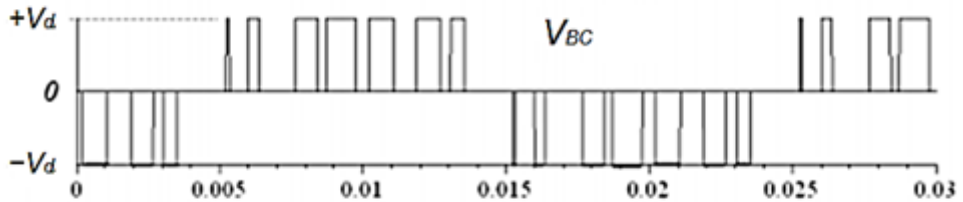
(a)

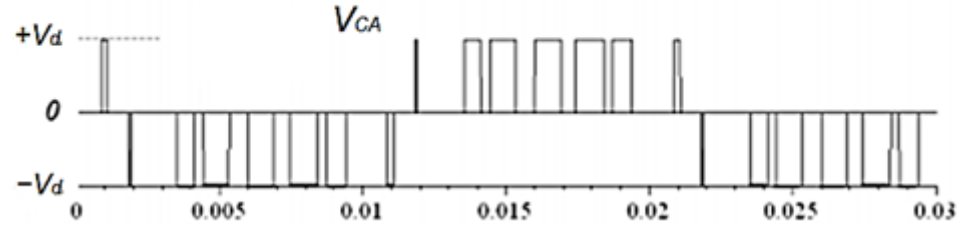




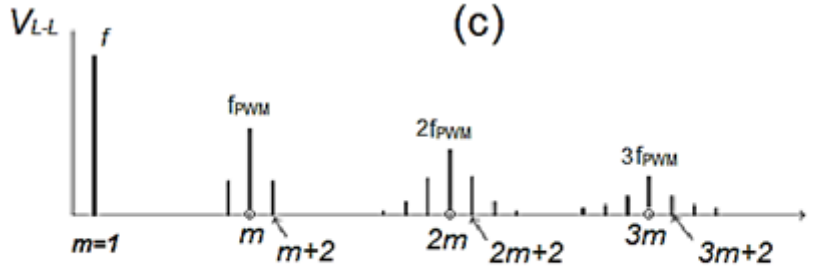
(b)





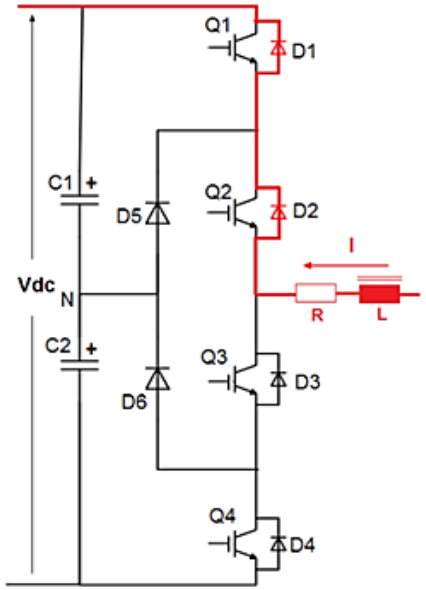


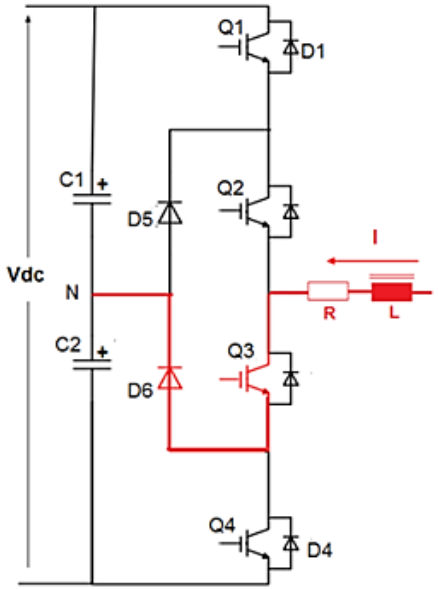
(c)



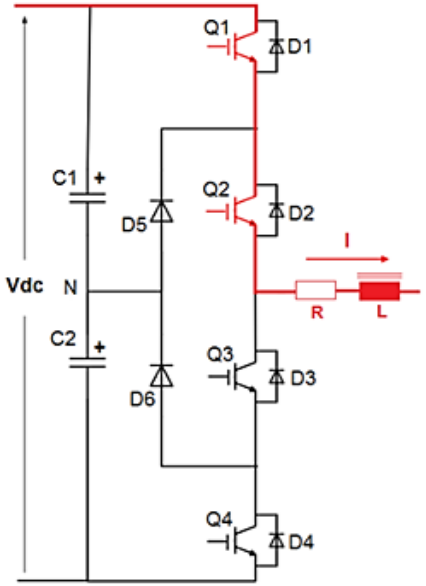
(d)

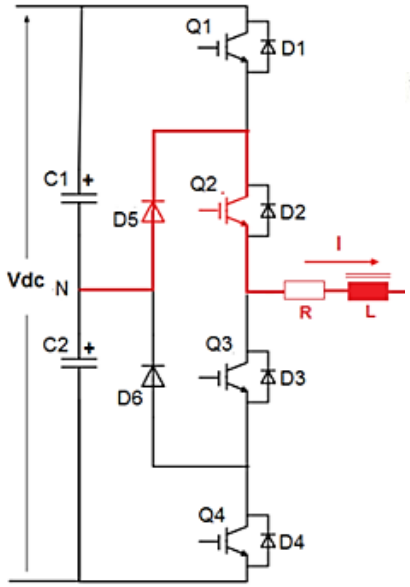
(a) osnovna topologija,
(b) upravljački signali,
(c) međufazni naponi,
(d) harmonijski spektar međufaznog napona



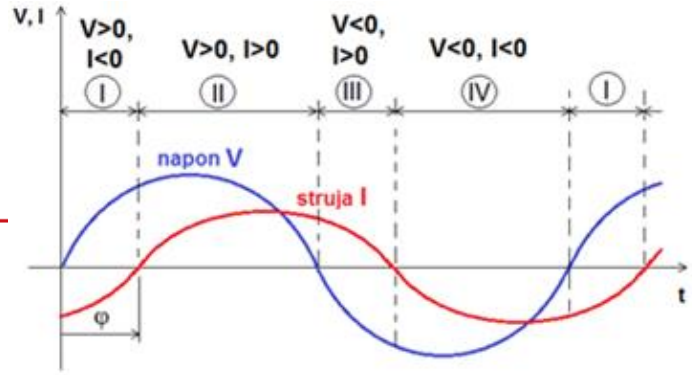


Ⅰ

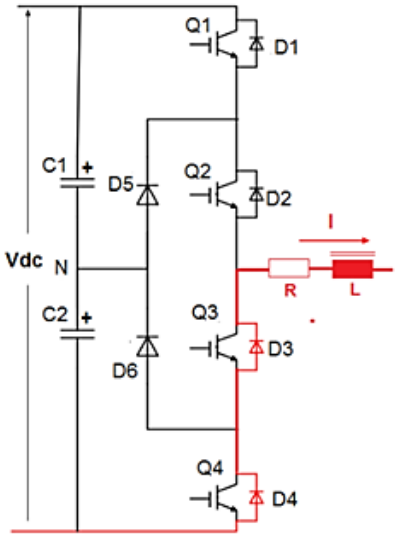


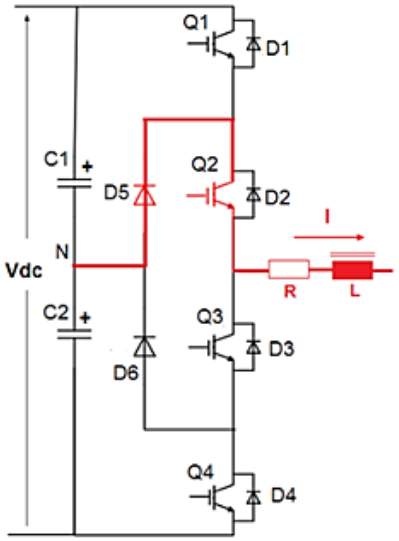


Ⅱ

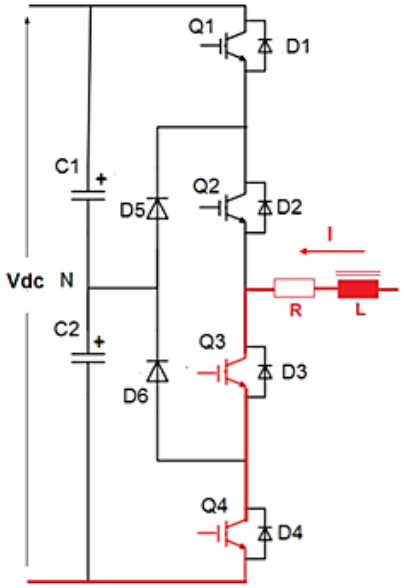


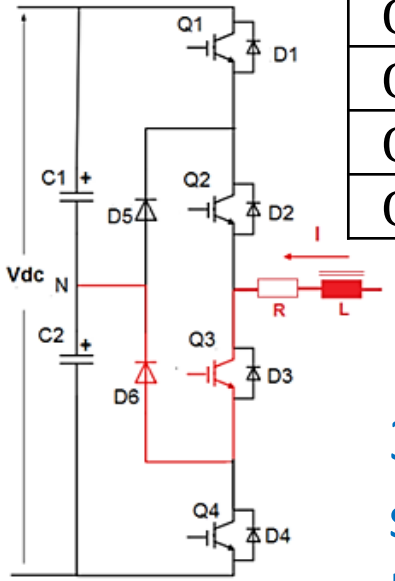
R-L opterećenje





Ⅲ



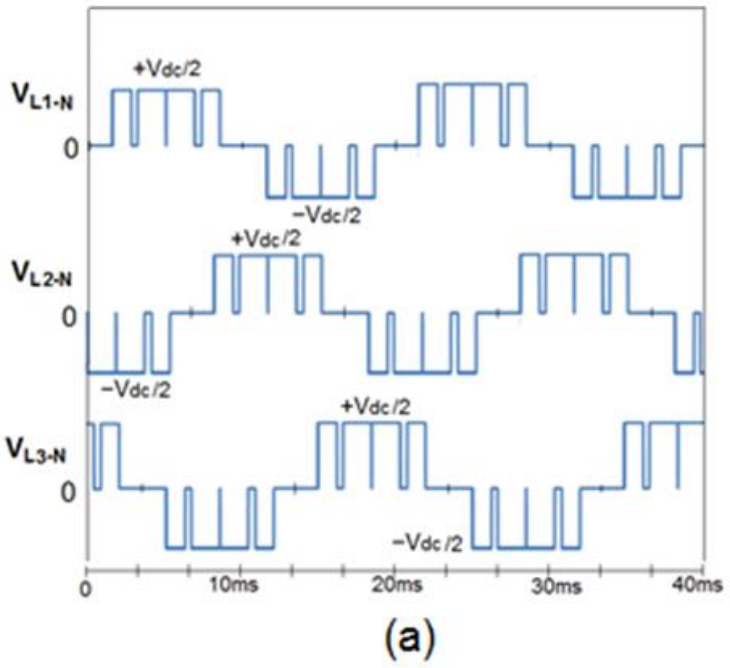


Ⅳ

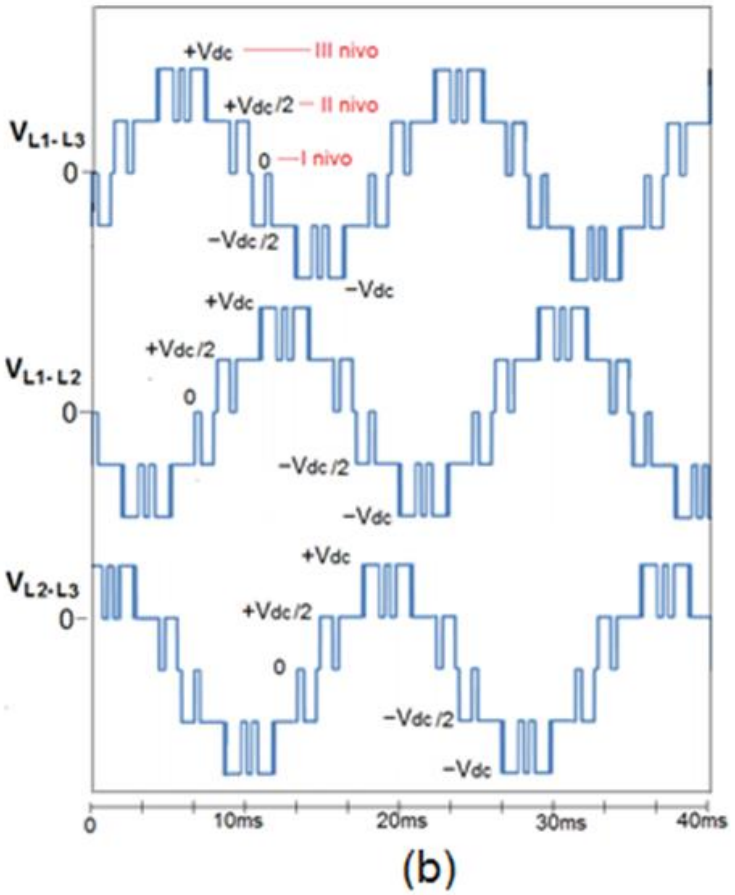
IGBT	V_{out}= $+V_{dc}/2$	V_{out}= V_N= ref 0	V_{out}= $-V_{dc}/2$
Q1	ON	OFF	OFF
Q2	ON	ON	OFF
Q3	OFF	ON	ON
Q4	OFF	OFF	ON

3L NPC topologija- sekvence uključenja IGBT prekidača

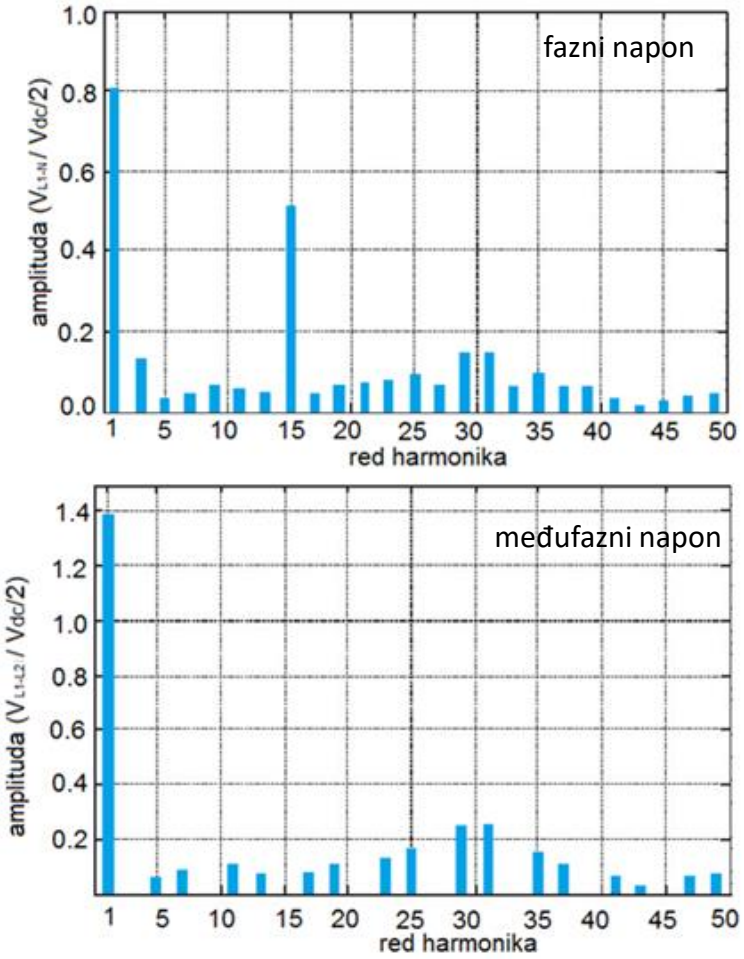
Talasni oblici i spektri harmonica-3L NPC



talasni oblici tri fazna napona



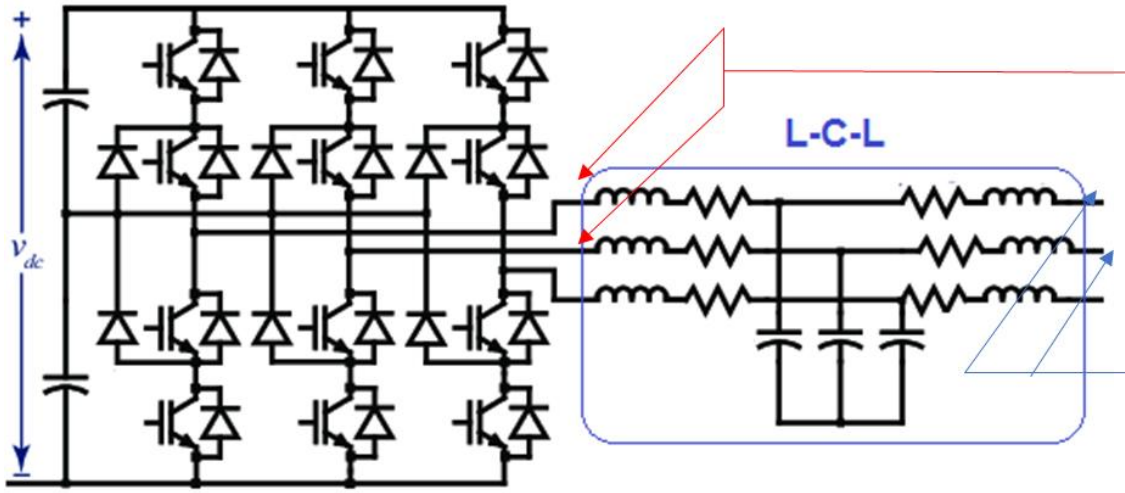
talasni oblici tri međufazna napona

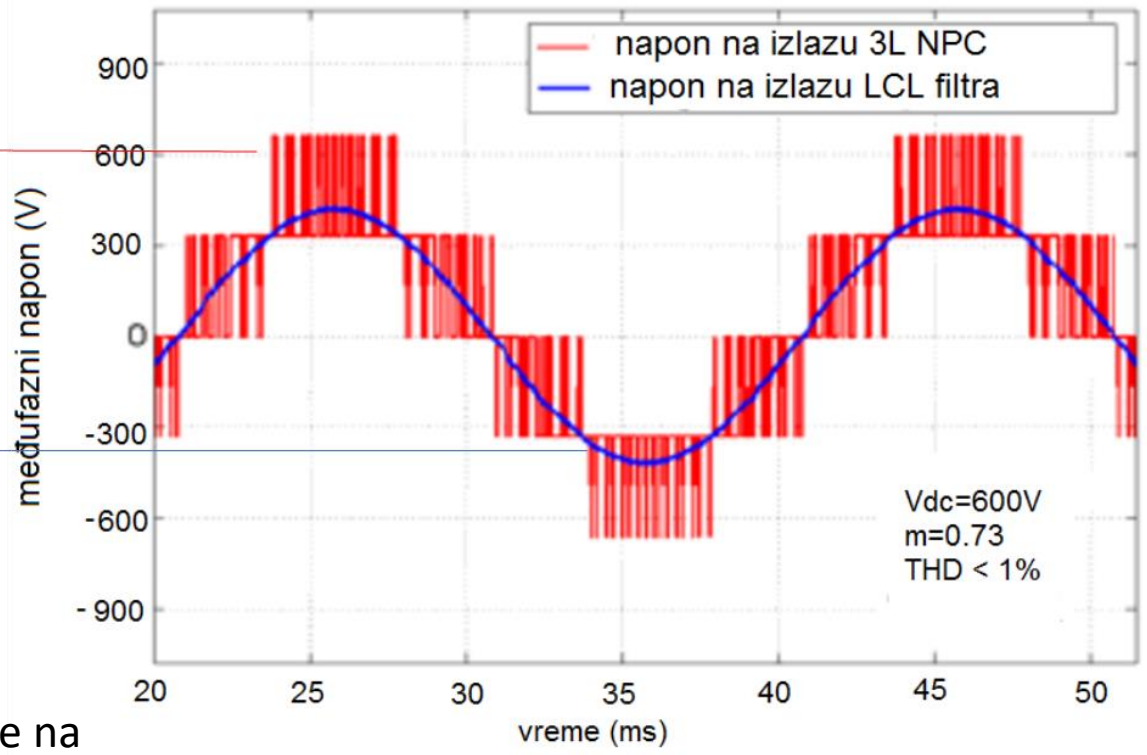


(c)

spektri harmonika

3L NPC topologija- izlazni napon nakon filtracije





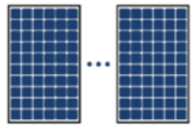
Ukoliko je PV invertor projektovan za direktno priključenje na mrežu, onda energetski transformator nije neophodan i u tom slučaju je sprega sa mrežom ostvarena preko trofaznog L-C ili L-C-L filtra.

Uticaji PV invertora na EEM

ELEKTROENERGETSKA MREŽA

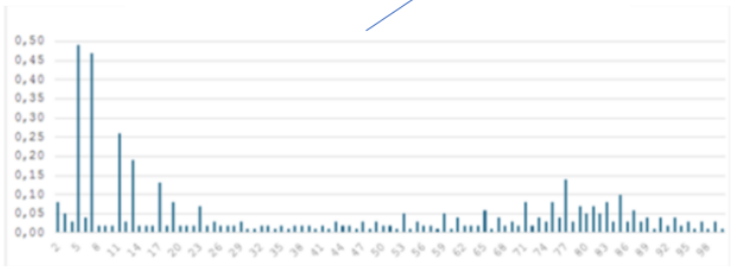
TRANSFORMATOR
i (ili)
L-C-L
filtar

DC/AC pretvarač (invertor)

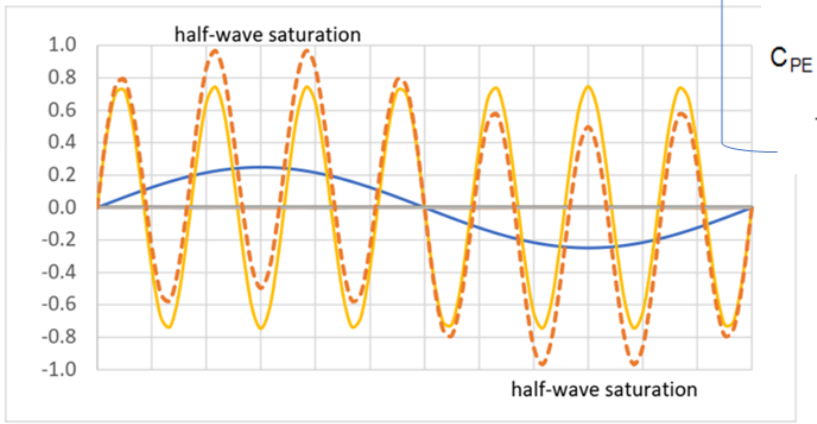


PV stringovi

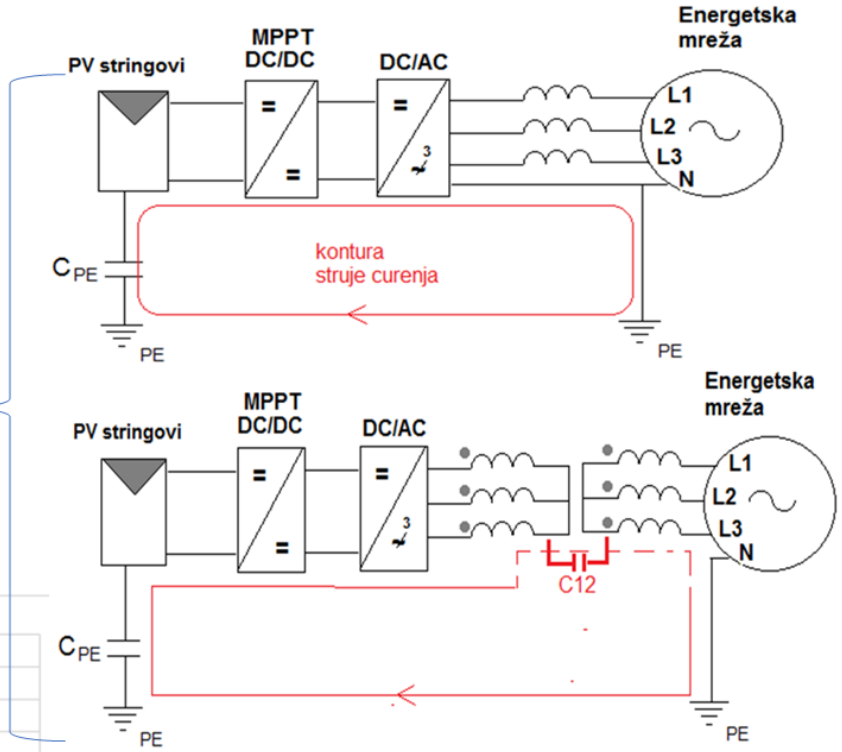
POREMEĆAJI



HARMONICI
STRIJE i NAPONA

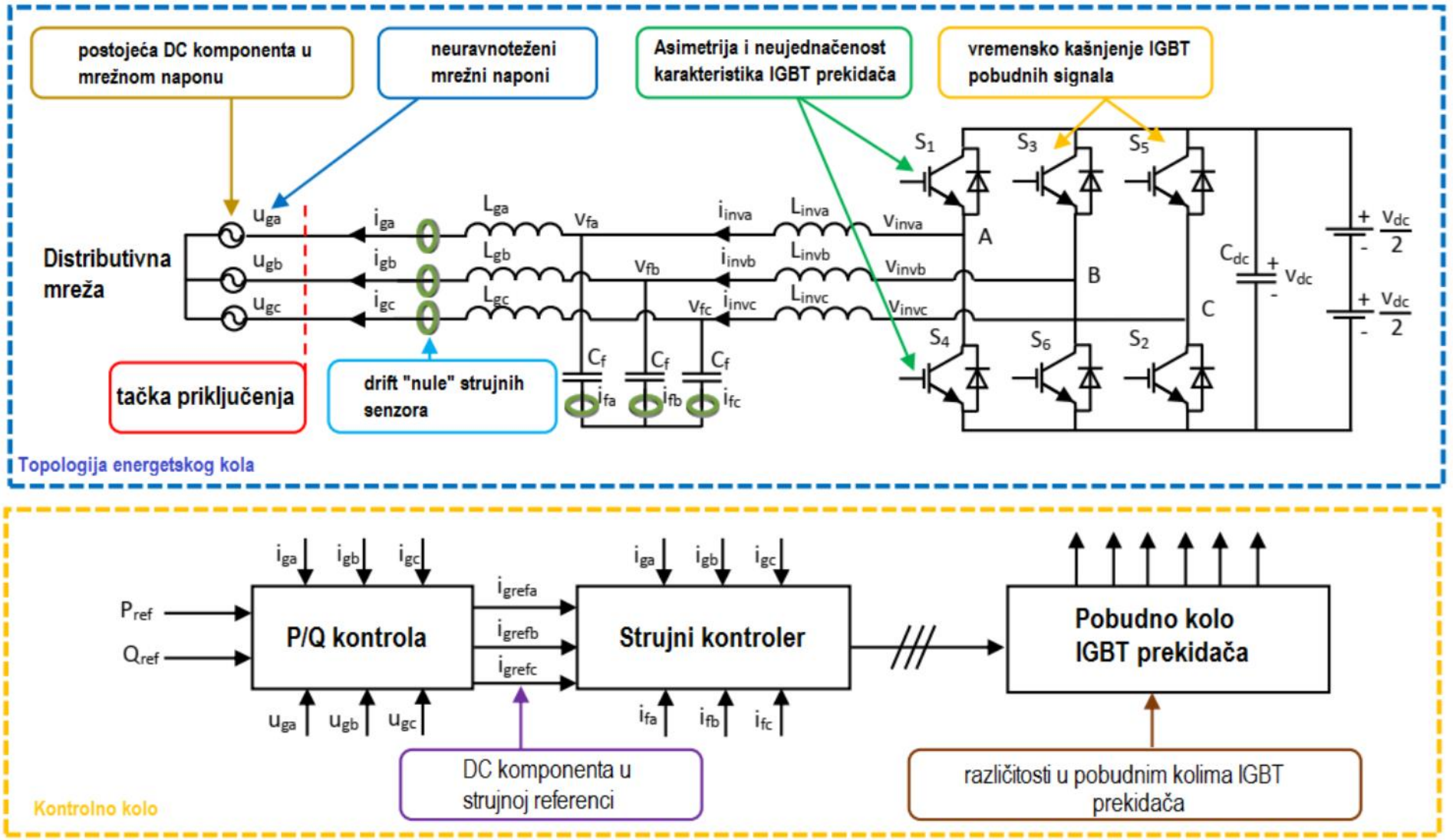


DC KOMPONENTA STRUJE

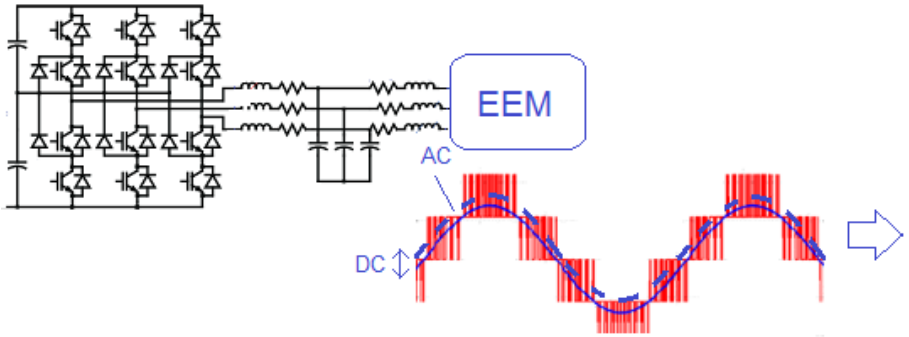


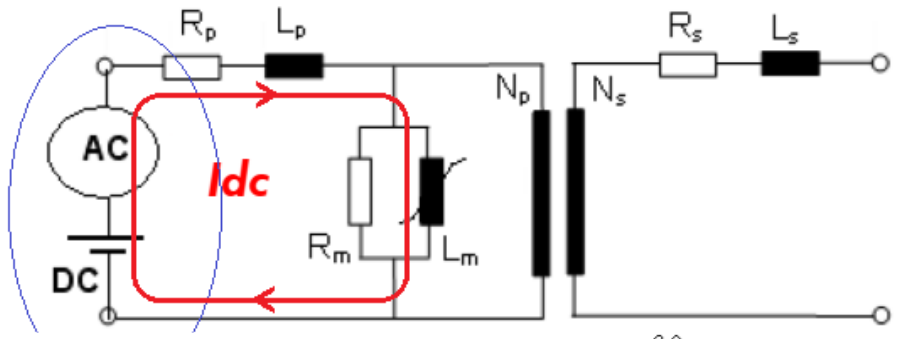
STRUJE „CURENJA“
ZUDS i ispadi PV invertora

Mogući uzroci pojave DC komponente

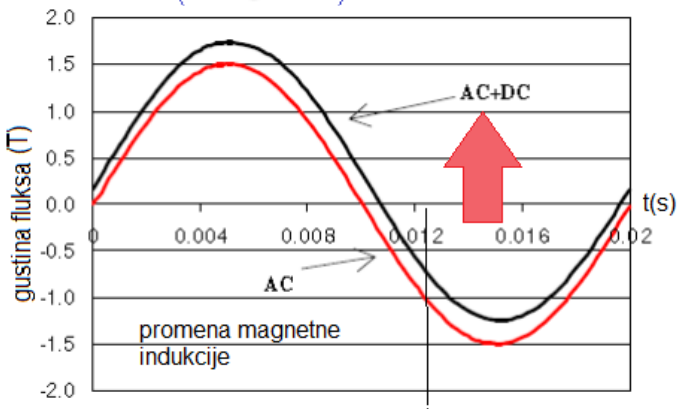


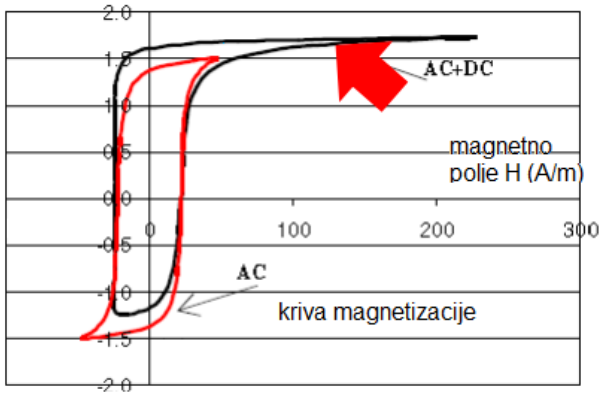
Uticaj DC komponente napona na izlazu invertora

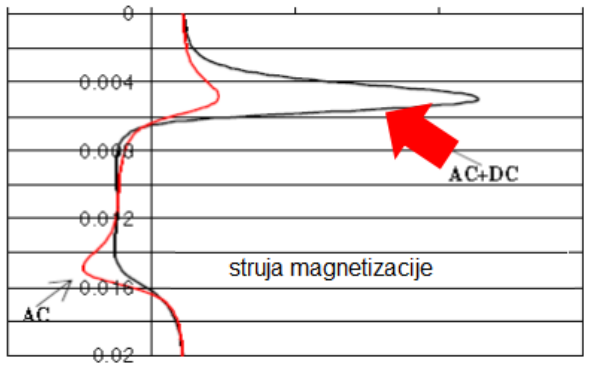




- Energetski transformatori, kako na pragu, tako i u samom elektroenergetskom sistemu „jako pate“ od jednosmernog zasićenja magnetnog jezgra, koje uslovljava značajniju struju magnetizacije, što može dovesti do pregrevanja magnetnog jezgra.
- Vrlo često dolazi do tzv. „ekskurzije” magnetnog fluksa, magnetno jezgro odlazi u zasićenje što dovodi do nastanka kratakog spoja.
- Pored ovoga, posledično može doći do termičkog stresa, koji na kraju skraćuje životni vek transformatora

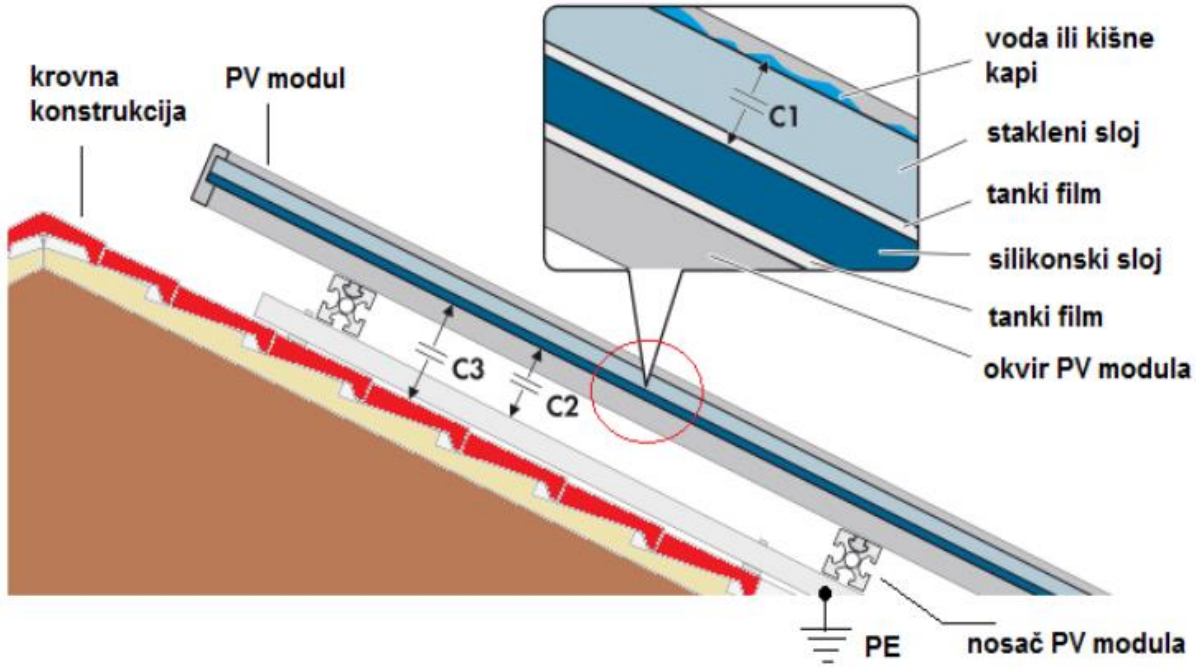






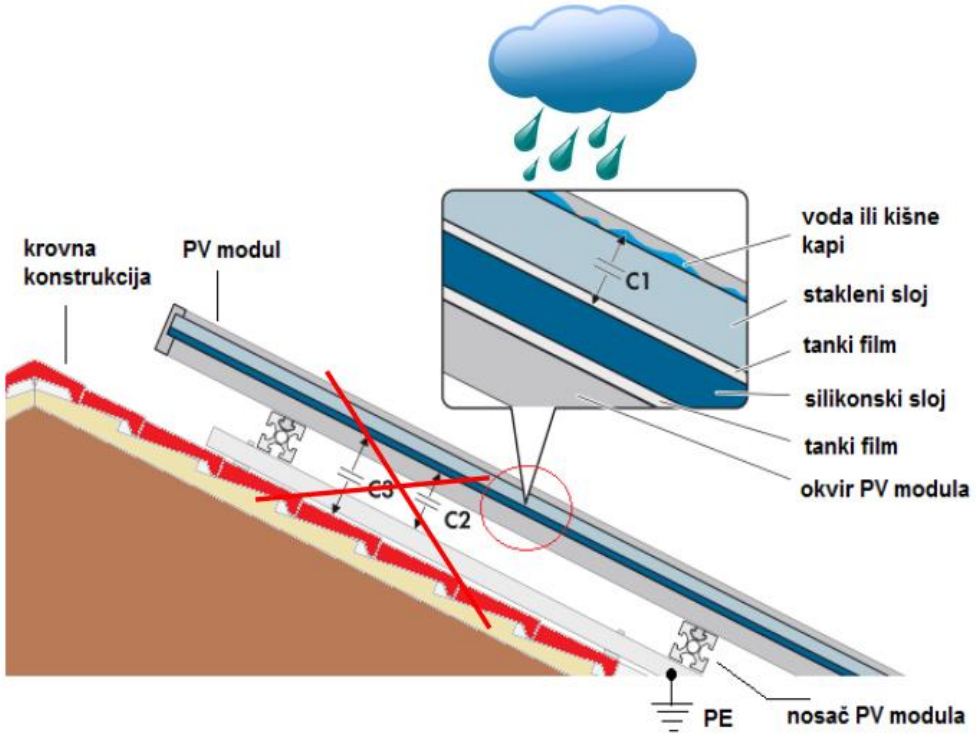
Relativno mali DC-offset na B-H krivoj magnetizacije može usloviti značajan pik struje magnećenja

Uticaj parazitne kapacitivnosti na rad PV invertora

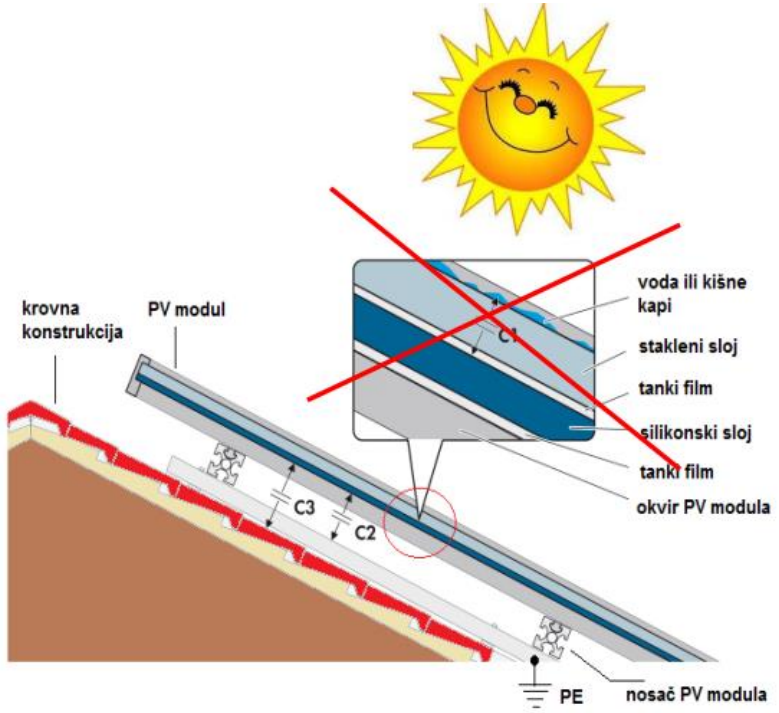


Kompletan raspored FN modula ima odgovarajući parazitni kapacitet koji se sastoji od tri komponente:
(1) C1-parazitni kapacitet vodenog ili kapljičastog sloja na površini FN modula u odnosu na sloj stakla,
(2) C2-parazitni kapacitet FN modula prema uzemljenom nosećem ramu,
(3) C3-parazitni kapacitet FN modula prema krovnoj konstrukciji
Stoga je ukupna parazitna kapacitivnost CPE=C1II(C2+C3).
U praksi važi odnos C1>> C2 >> C3

Uticaj uslova okoline na parazitnu kapacitivnost



Obično u kišnim i vlažnim uslovima ukupnim kapacitetom C_{PE} dominira C1, tako da se u tom slučaju C2 i C3 mogu zanemariti.



U suvim uslovima, s druge strane, C1 je toliko mali da se ova druga dva moraju uzeti u obzir.

Primer procene parazitne kapacitivnosti CPE za Tip1- standardni (monokristalni i polikristalni) FN modul i za Tip-2 moduli na bazi tankog filma su dati u Tabeli

Tip	Efikasnost (%)	Debljina stakla (mm)	Kapacitivnost/ m^2 (nF)	Kapacitivnost/ kW istalisane DC snage (nF)	Kapacitivnost/100kW instalisane DC snage (µF)
1	15÷20	3÷4	12÷17	60÷110	6÷11
2	10÷15	2÷3	16	100÷160	10÷16

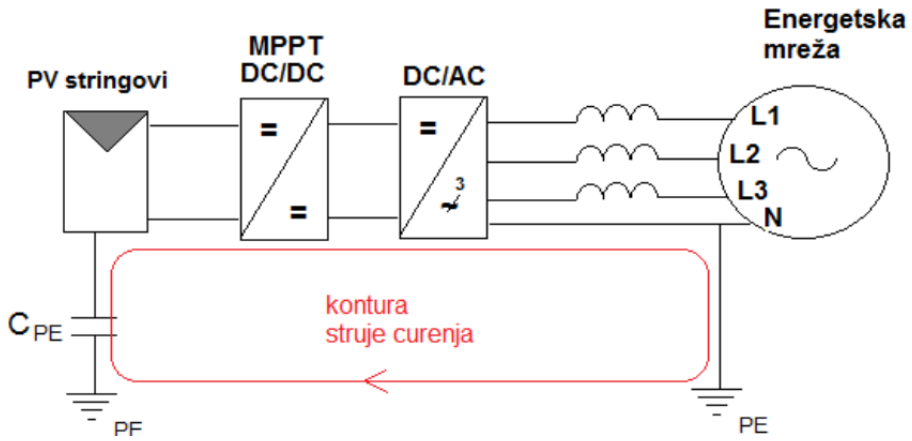
Primer iz prakse

- Praktične vrednosti struje curenja se mogu dobiti iz izraza za efektivnu
- vrednost:

$I=\omega \cdot C \cdot U=2\pi \cdot f \cdot C \cdot U$

- Za U=230V, f=50Hz i C= 8μF (tipično za FN elektranu 100kW sa
- monokristalnim FN modulima) dobija se da je efektivna vrednost struje curenja jednaka $I=2\pi \cdot 50Hz \cdot 8\mu F \cdot 230V = 577mA$.
- Ova struja curenja je reaktivna i njen fazni pomeraj je 90° u odnosu na napon.
- U prvoj aproksimaciji ova struja ne prouzrokuje bilo kakve gubitke, međutim može uticati na rad invertora koji je povezan na elektroenergetsku mrežu!!!!!!.

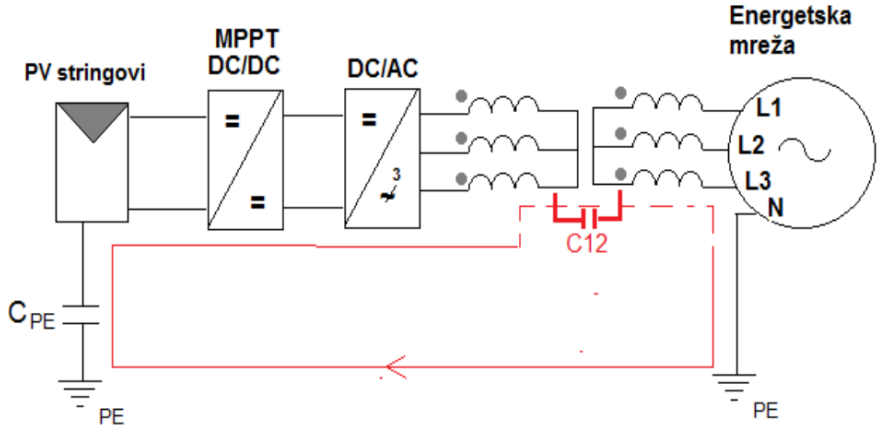
Kontrola struje curenja



Kontura struje curenja usled parazitne kapacitivnosti niza FN modula-neizolovan invertorski sistem

Kada se formira petlja između parazitnog kapaciteta CPE fotonaponskog sistema (kućnog priključka) i električne mreže (sabirnice PE), u ovom FN sistemu, impedansa petlje je relativno mala, a zajednički napon (”common mode voltage”) formira relativno veliku zajedničku struju (”common mode current”), odnosno struju curenja kroz parazitnu kapacitivnost.

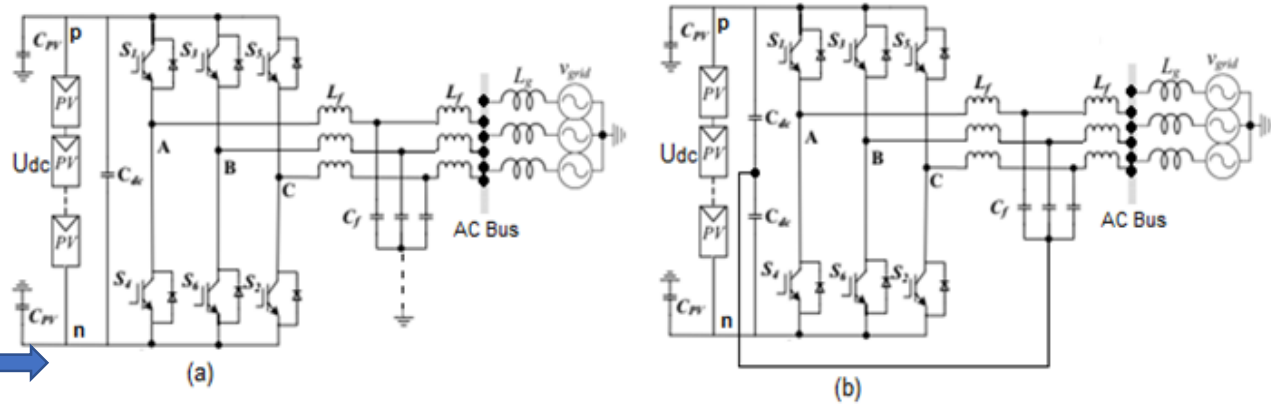
Na ovaj način deo amplitude naizmeničnog napona stiže do FN modula. Kao rezultat ovog, kompletan FN niz (string) „pliva“ na naizmeničnom potencijalu u odnosu na ostatak kola



Kontura struje curenja usled parazitne kapacitivnosti niza FN modula-izolovan invertorski sistem preko mrežnog transformatora

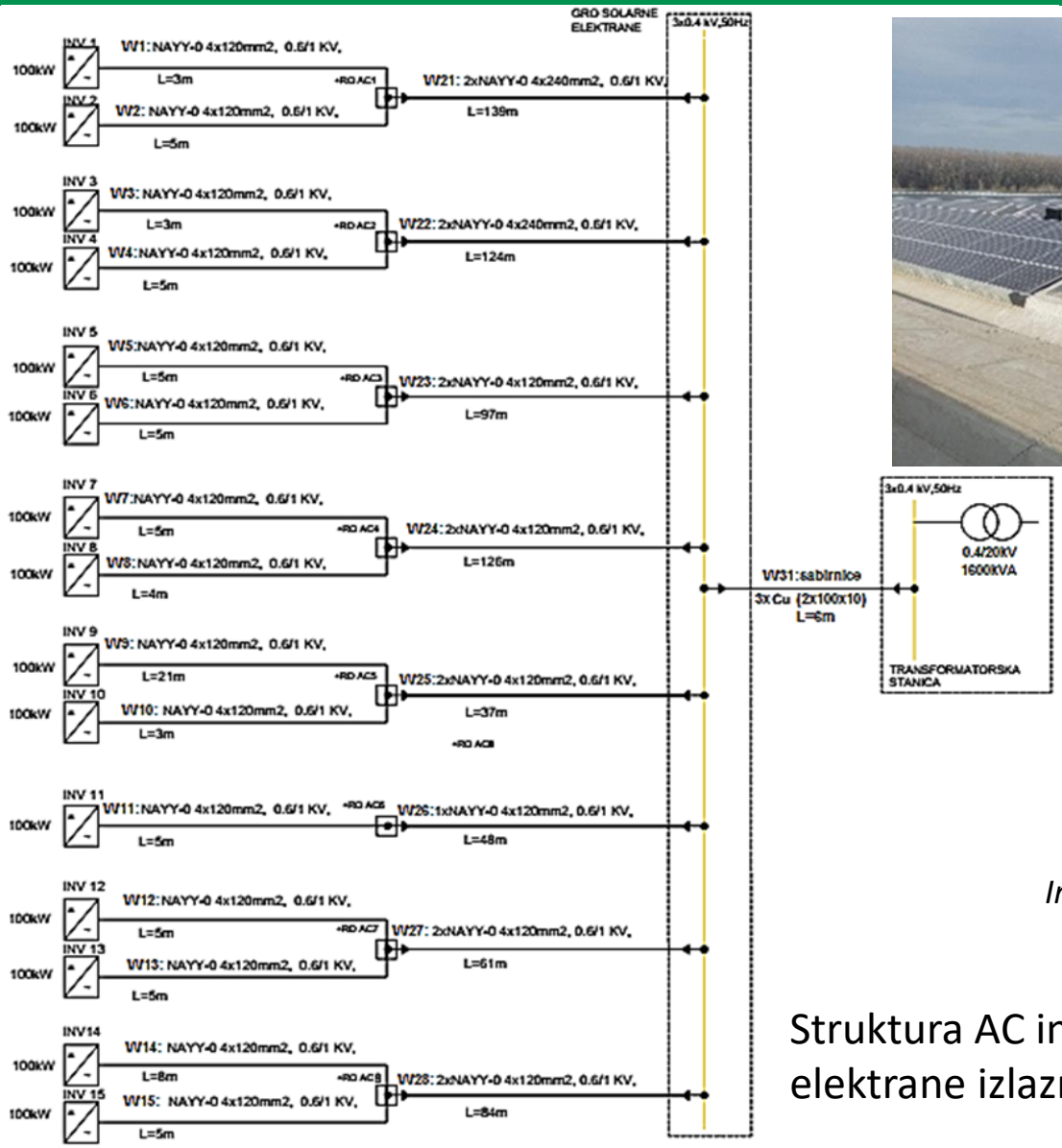
Slično se dešava za kada je invertor povezan na mrežu preko transformatora, ali je u tom slučaju parazitna struja manja jer se u zajedničku konturu ubacuje i izolaciona kapacitivnost C12 između primara i sekundara

Kontrola struje curenja u trofaznim FN invertorima; (a) sa klasičnim LCL filterom, (b) sa MLCL filterom



Primer uticaja (viši harmonici) u PV elektrane izlazne snage 1.5MW

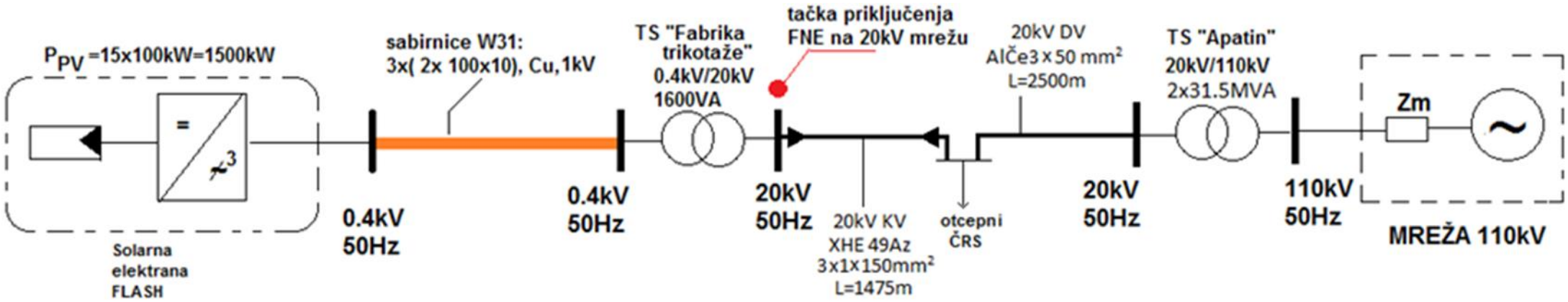
-15 invertora svaki snage 100kW
-3780 PV panela
-svaki snage 455W
-9 stringova/invertoru
-svaki string 28panela



Invertorski par 2x100kW i pripadajući AC razvodni orman

Struktura AC invertorskog 0,4 kV razvoda fotonaponske elektrane izlazne snage 1,5MW

Topologija priključnih vodova PV elektrane



Priključni 20 kV vodovi fotonaponske elektrane izlazne snage 1500 kWac

Kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika i interharmonika se proverava pomoću izraza:

$$I_{vhg} \leq I_{vhdoz} = I_{vhs,v,\mu} \cdot S_{ks} \qquad (1)$$

gde su:

I_{vhg} - stvarna vrednost struje višeg harmonika/interharmonika koju generator injektira u DS, svedena na mesto priključenja u [A]

I_{vhdoz} - dozvoljena vrednost struje višeg harmonika/interharmonika na mestu priključenja u [A]

$I_{vhs,v,\mu}$ - dozvoljena vrednost struje višeg harmonika/interharmonika svedena na jediničnu snagu kratkog spoja na mestu priključenja na EEM u [A/MVA]

S_{ks} – snaga trofaznog kratkog spoja sa priključenom elektranom

Izračunavanje dozvoljene struje viših harmonika

U Tabeli su date dozvoljene vrednosti struja viših harmonika i interharmonika svedene na snagu kratkog spoja na mestu priključenja na SN EEM 20 kV. Na osnovu Tabele 4.2 koja je deo dokumenta „Pravila o radu distributivnog sistema" [20], koje je izdala ODS EPS Distribucija d.o.o. izračunava se dozvoljena struja višeg harmonika prema jednačini:

$$I_{vhdoz} = I_{vhs,v,\mu} \cdot S_{ks\,min}$$

gde je S_{ksmin} minimalna snaga trofaznog kratkog spoja na mestu priključenja.

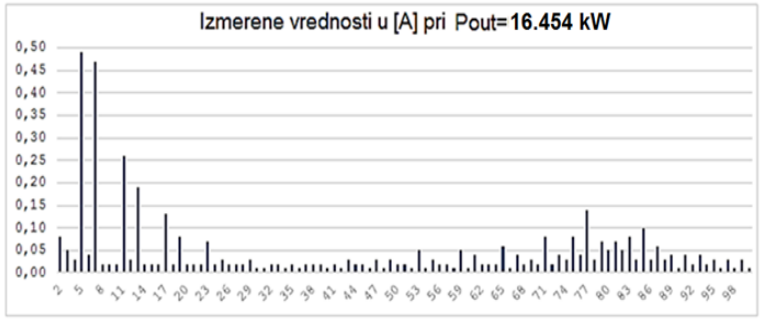
U skladu sa standardom SRPS IEC 60909, pri proračunu ove snage uzeti u obzir minimalni naponi u mreži i topologija (uklopno stanje) distributivne mreže koja dovodi do minimalne snage tropolnog kratkog spoja na mestu priključenja. Ova snaga je iz dobijena na osnovu minimlne vrednosti napona (18 kV) i struje tropolnog kratkog spoja (prema podacima EDB na SN sabirnicama njena vrednost je 4,8 kA). Minimalna snaga tropolnog kratkog spoja se dobija iz relacije (2):

$$S_{ksmin} = 1{,}732 \cdot 18\ kV \cdot 4{,}8\ kA = 152{,}24\ MVA$$

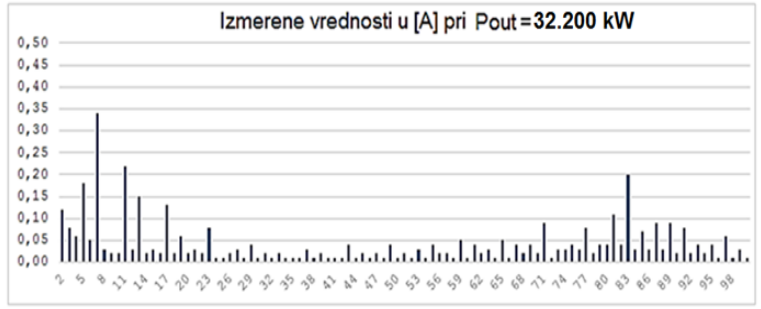
Red.br.harmonika	2	4	5	6	7	8	10	11	12
$\mathbf{I_{vhs,v,\mu}}$ **(A/MVA)**	0,029	0,009	0,029	0,012	0,041	0,004	0,007	0,026	0,005
$\mathbf{I_{vhdoz}}$ **(A)**	4,414	1,370	4,414	1,827	6,24	0,609	1,066	3,96	0,761

Red.br.harmonika	13	14	16	17	18	19	23	25	25 do 40
$\mathbf{I_{vhs,v,\mu}}$ **(A/MVA)**	0,019	0,003	0,003	0,011	0,002	0,009	0,006	0,005	$0{,}026 \cdot 25/v$
$\mathbf{I_{vhdoz}}$ **(A)**	2,893	0,457	0,457	1,675	0,304	1,37	0,913	0,761	-

Harmonijski sadržaj i izmerene vrednosti viših harmonika invertora 100kW

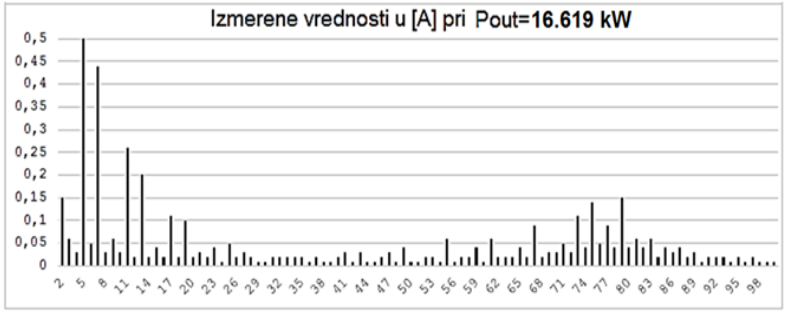


(a)

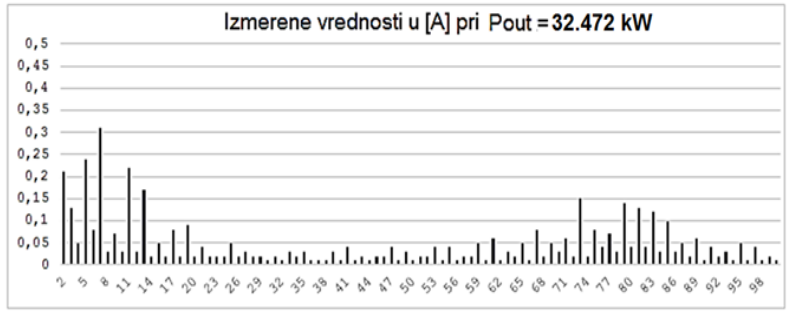


(b)

Izmerene vrednosti struja viših harmonika za invertor izlazne snage 100 kW za fazu L1; (a) pri polovini fazne nominalne snage 16,454 kW (b) pri faznoj nominalnoj snazi od 32,200 kW

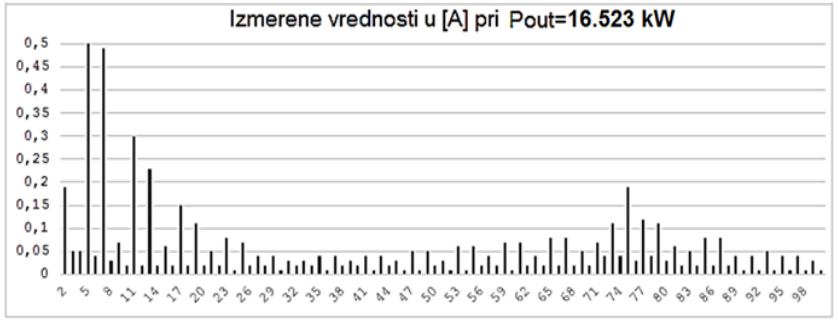


(a)

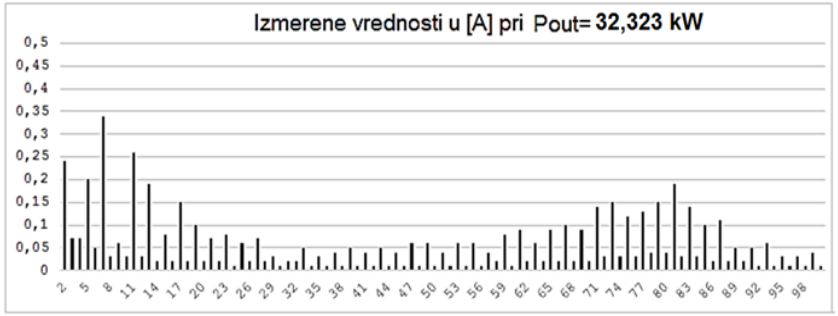


(b)

Izmerene vrednosti struja viših harmonika za invertor izlazne snage 100 kW za fazu L2; (a) pri polovini fazne nominalne snage 16,619 kW (b) pri faznoj nominalnoj snazi od 32,472 kW



(a)



(b)

Izmerene vrednosti struja viših harmonika za invertor izlazne snage 100 kW za fazu L3; (a) pri polovini fazne nominalne snage 16,523 kW (b) pri faznoj nominalnoj snazi od 32,323 kW

-Standard G99/1-6: 2020 TUV SUD Test report for Requirements for the connection of generation equipment in parallel with public distribution networks (Annex to the G99/1 certificate of compliance No: U22-0185

-IEC/TR 61000-3-7:2020, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits -Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems

-IEC/TR 61000-3-6 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems

Rezultati

Na osnovu rezultata merenja harmonika struje za različita opterećenja invertora računat je stvarni THDi (%) na osnovu relacije:

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100\%$$

Rezultati su sređeni u Tabeli 3 za sve tri faze, za dve vrednosti snage po fazi i za slučaj kada se uzme harmonijski niz od harmonika reda h=2 do harmonika reda h=25, odnosno h=100.

Srednja kvadratna vrednost $\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}$		h=25	h=100
Faza L1	16,454 kW	0,7813	0,8494
	32,200 kW	0,5284	0,6492
Faza L2	16,619 kW	0,7920	0,8672
	32,472 kW	0,5765	0,7005
Faza L3	16,523 kW	0,8581	0,9565
	32,323 kW	0,6256	0,8202

Rezultati

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 3 se uočava da je nakritičniji slučaj za fazu L3 i kada se uzme puni niz od 100 harmonika (h=100) počev od harmonika reda h=2. Usvajajući da je najkritičnija vrednost korena sume kvadrata struja viših harmonika za fazu L3 dobijamo vrednosti za THDi(%) pri izlaznim snagama invertora 0.5Pn i Pn i pri izmerenim strujama prvog harmonika $I_{1_0.5Pn}$ i I_{1_Pn} :

$$THD_i(\%)_{0,5Pn} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{1(0,5Pn)}} \cdot 100\% = \frac{0,9565A}{70,66A} \cdot 100 = 1,35\% \leq 3\%$$

$$THD_i(\%)_{Pn} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{1(Pn)}} \cdot 100\% = \frac{0,8202A}{140,53A} \cdot 100 = 0,583\% \leq 3\%$$

Stvarna vrednost struje viših harmonika koja potiče od PV invertora koji rade u režimu nominalne snage Pn, svedena na mesto priključenja (vrednost struje viših harmonika koja se povećava 15 puta jer se sistem sastoji od 15 invertora):

$$I_{vhgFNE1} = 15 \cdot I_{vhPn} \cdot \frac{0,4kV}{20kV} = 15 \cdot 0,8202 \cdot \frac{0,4}{20} = 0,246A$$

$$I_{vhgFNE2} = 15 \cdot I_{vhPn} \cdot \frac{0,4kV}{20kV} = 15 \cdot 0,9565 \cdot \frac{0,4}{20} = 0,287A$$

Rezultati

Za najkritičniji slučaj kada se usvoji da je faktor izobličenja maksimalan odnosno da mu je vrednost jednaka 3% pri punoj snazi (krajnje pesimistička pretpostavka), dobija se da su proračunske struje viših harmonika Ivh i Ivhg jednake:

$$I_{vh} = 144{,}9 \cdot \frac{3\%}{100\%} \approx 4{,}35A = I_{vhg}$$

$$I_{vhgFNE3} = 15 \cdot I_{vhPn} \cdot \frac{0{,}4kV}{20kV} = 15 \cdot 4{,}35 \cdot \frac{0{,}4}{20} = 1{,}305A$$

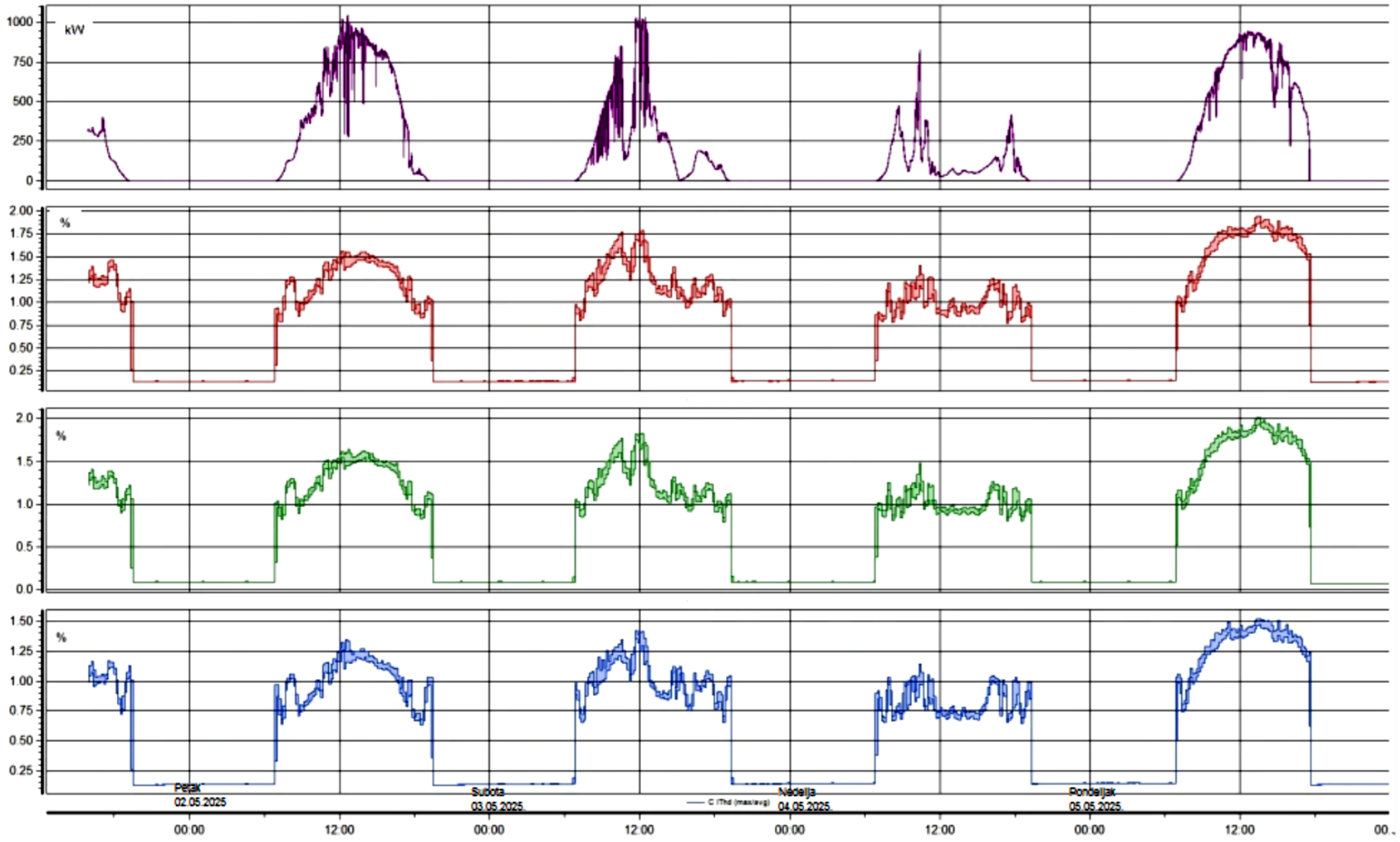
Ukupna vrednost efektivne vrednosti struje koja potiče od svih viših harmonika je data relacijom:

$$I_{vh_ukup} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + ... + I_n^2} \quad \Rightarrow \quad I_{vh_ukup} = 10{,}763A$$

$$I_{vh_ukup} = \sqrt{\begin{matrix} 4{,}414^2 + 1{,}37^2 + 4{,}414^2 + 1{,}827^2 + 6{,}24^2 + 0{,}609^2 + 1{,}066^2 + 3{,}96^2 + 0{,}761^2 + 2{,}893^2 + 0{,}457^2 \\ + 0{,}457^2 + 1{,}675^2 + 0{,}304^2 + 1{,}37^2 + 0{,}913^2 + 0{,}761^2 \end{matrix}}$$

Stvarna vrednost struje viših harmonika koja potiče od PV invertora u najgorem slučaju, svedena na mesto priključenja 20kV iznosi 1,305A, (Ivhg) i manja je od ukupne efektivne vrednosti struje viših harmonika, odnosno Ivh > Ivhg→ 10,763A > 1,305A.

Eksperimentalni rezultati

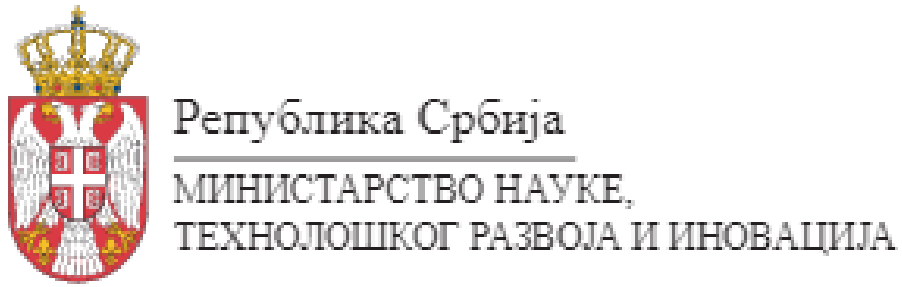


Zaključak

- U prezentaciji je dat pregledno uticaj uređaja energetske elektronike (invertora) implementiranih u PV elektranama i njihov uticaj na kvalitet isporuke električne energije EEM.
- Akcenat stavljen na harmonijski sadržaj izlaznog invertorskog napona i struje.
- U tom cilju je dat primer procene uticaja jedne konkretne PV elektrane izlazne snage 1500 kWac.
- Kao osnova za procenu ovog uticaja su poslužili eksperimentalno snimljeni spektri izlazne struje konkretnih invertora sa dva nivoa i izlazne snage 100 kW.
- Snimljeni harmonijski spektri su dobijeni za dva režima izlazne snage PV invertora (0,5Pn i Pn).
- Na osnovu ovih rezultata procenjen je uticaj 15 PV invertora (svaki snage 100 kW) na mesto priključenja solarne elektrane.
- Treba napomenuti da su dobijene vrednosti struja viših harmonika relativno male i da će i sa uticajem kablova i transformatora uslovi u tački priključenja verovatno biti zadovoljeni u konkretnom slučaju, ali da bi se izvršila tačna provera na mestu priključenja, moraju se ispitati uslovi upravo u mestu priključenja uz uvažavanje podužnih impedansi priključnih kablova, impedanse NN sabirnica i transformatora.

Zahvalnica

Istraživanje u ovom radu je podržano finansiranjem od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2024.-2025., Ugovor pod evidencionim brojem 51-03-136/2025-03/200034 od 04.02.2025.



HVALA NA PAŽNJI!

Kontakt podaci autora:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.
Institut Mihajlo Pupin
Volgina 15, Beograd
Tel.011/6771 024
zeljko.despotovic@pupin.rs

cigre СРБИЈА

www.cigresrbija.rs

INTERNATIONAL CONFERENCE / MEĐUNARODNA KONFERENCIJA
POWER PLANTS ELEKTRANE 2025
drustvo-termicara.com
SERBIAN SOCIETY OF THERMAL ENGINEERS / DRUŠTVO TERMIČARA SRBIJE

EKSPLOATACIONI PROBLEMI RADA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA

Dr Željko V. Despotović, dipl.el.inž., Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs

UVOD

- U prezentaciji će biti predstavljeni eksploatacioni problemi, koji se odnose na rad fotonaponskih elektrana (FNE) snaga većih od 500kW i načini za njihovo prevazilaženje.
- Akcenat u radu je stavljen na probleme koji prvenstveno potiču od uređaja energetske elektronike (DC/AC pretvarača-invertora), ali i samih fotonaponskih panela:

  -termički efekti,

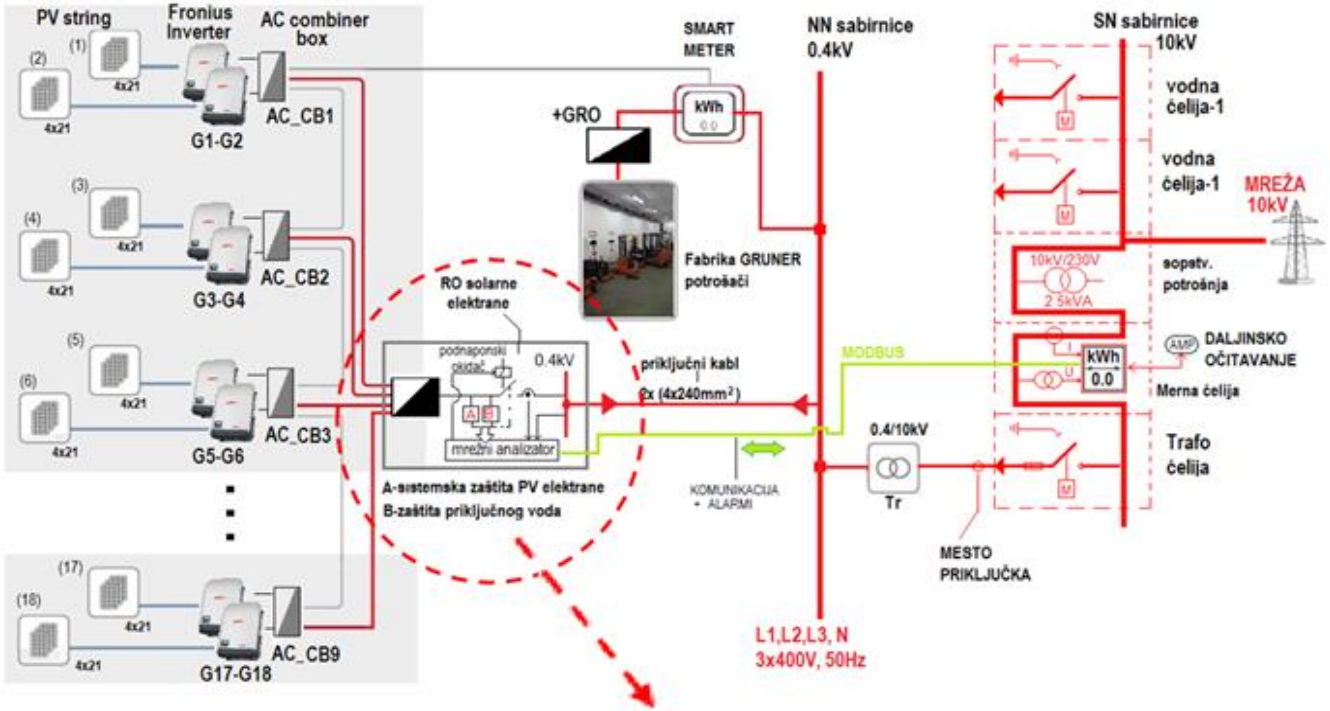
  -uticaj viših harmonika i struja curenja (koje su posledice parazitnog C)
- Poseban osvrt će biti dat na DC komponentu struje, koja potiče od invertora, kao i njen negativni uticaj na elektroenergetsku mrežu (EEM).
- U prezentaciji će biti prikazani i neki karakteristični rezultati merenja, dobijeni tokom eksploatacije.
- Razmatranja u ovoj PPT prezentaciji i u radu su rezultat desetogodišnjeg iskustva u projektovanju i izvođenju fotonaponskih elektrana.

TERMIČKI UTICAJI

- U ovom delu su istaknuti neki praktični problemi koji se odnose na termičke probleme u radu FNE velikih snaga, a tiču se naizmeničnog (AC) razvoda.
- Jedna od vrlo čestih i uočenih pojava u ekspolataciji su takozvane „vruće tačke“ , i to u okviru AC razvoda.
- Proizvedena toplota i usled nje porast temperature, nastaju usled disipacije snage u sklopu AC razvoda (velika strujna opterećenja), koja se ogleda prevashodno na zagrevanju priključaka i spojnih kontakata:

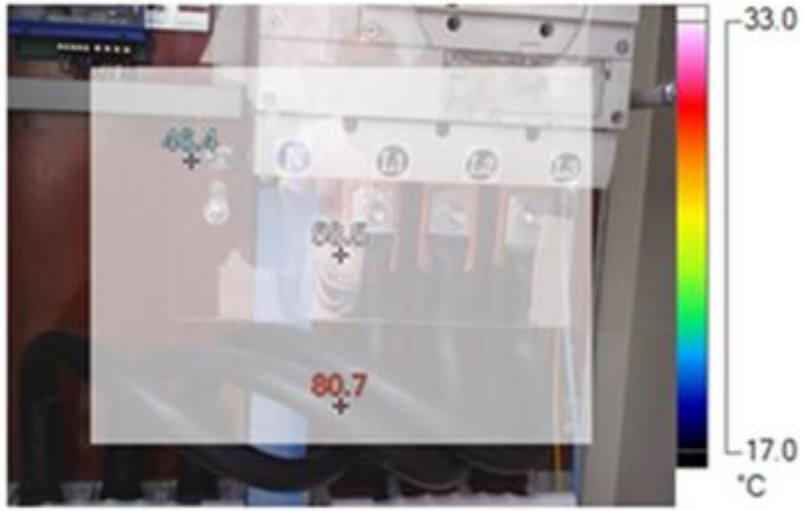
  - zaštitnih prekidača,
  - osigurača
  -kao i na priključnim kablovskim klemama

Tipičan primer: Pozicija je u AC razvodnom ormanu (polje glavnog kompakt prekidača FNE, nazivne struje 800A)



- Za nazivnu struju prekidača od I_n=800A, pri prelaznom otporu od 1mΩ (izuzetno dobar kontakt i optimistička pretpostavka), disipacija snage po kontaktu je $(800A)^2 x 1m\Omega = 640W$.
- Ako imamo tri kontakta (tropolni prekidač snage) ukupna disipacija snage je ≈2kW, a za šest kontakata (ukupan broj računatih sa obe strane prekidača) je ukupna disipacija snage ≈4kW.
- Ovo predstavlja veliki problem što se tiče povećanog zagrevanja prikazanog spojnog polja!!!.

Krovna fotonaponska elektrana izlazne snage 500kW i prikaz principske blok šeme elektrane sa naznačenim potencijalnim mestom formiranja „vrućih tačaka“



IR_00872.IS2
27-Jun-22 10:11:13 AM

Visible Light Image

Termovizijski snimci i izveštaj za zonu oko glavnog zaštitnog prekidača nazivne struje 800A na AC razvodu 400V, 50Hz

- Uočava da je maksimalna temperatura u zoni ispod zaštitnog prekidača (na mestu spoja sa izlaznim kablovima) iznosila 80.7°C.
- Ova vrednost takođe nije bila prihvatljiva sa stanovišta stabilnog i sigurnog rada AC razvoda i potrebno je bilo izvršiti projektovanje sistema za odvođenje toplote iz spojnog polja RO

Main Image Markers

Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	58.5°C	0.95	22.0°C
Hot	80.7°C		
Cold	46.4°C	0.95	22.0°C

Image Info

Background temperature	22.0°C
Emissivity	0.95
Transmission	1.00
Average Temperature	58.3°C
Image Range	46.4°C to 80.7°C
Camera Model	Ti300+
IR Sensor Size	320 x 240
Image Time	27-Jun-22 10:11:13 AM

IR_00889.IS2
01-Jul-22 11:34:37 AM

Visible Light Image

Main Image Markers

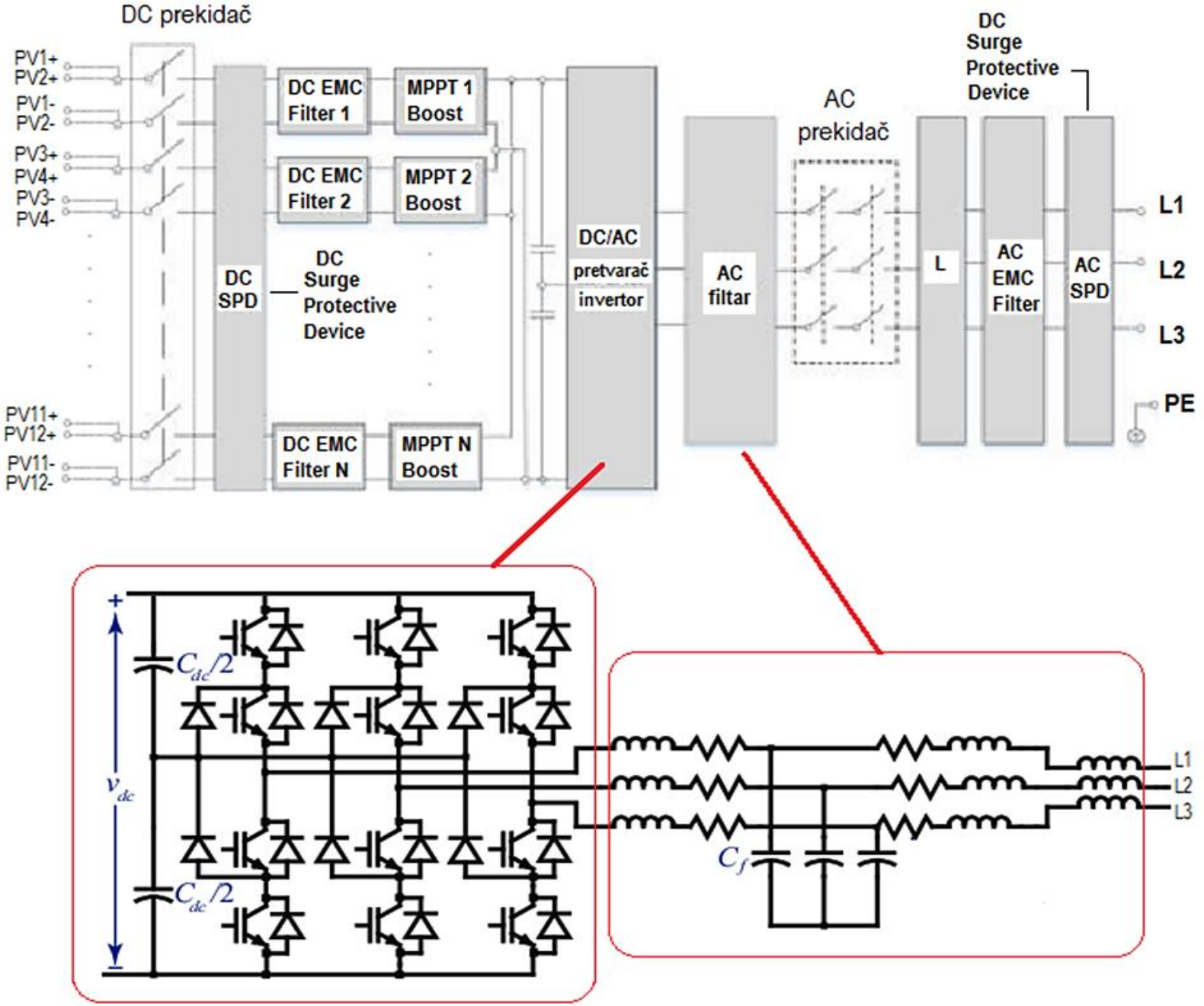
Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	49.8°C	0.95	22.0°C
Hot	57.1°C		
Cold	39.4°C	0.95	22.0°C

Image Info

Background temperature	22.0°C
Emissivity	0.95
Transmission	1.00
Average Temperature	46.4°C
Image Range	39.4°C to 57.1°C
Camera Model	Ti300+
IR Sensor Size	320 x 240
Image Time	01-Jul-22 11:34:37 AM

Termovizijski snimci za sistem sa ugrađenim sistemom hlađenja (predviđen je ventilator nazivnog napona 230V, 50Hz sa filterom, nominalnog protoka 845m³/h, električne snage 150W i u stepenu zaštite IP54).

- Rezultati snimanja koji su dobijeni na spojnom polju FNE.
- Pri ovome izlazna snaga FNE je iznosila 480kW, pri strujnom opterećenju od 700A.
- Sa prikazanog termovizijskog snimka se uočava da je temperatura u zoni sklopova osigurač-rastavljač i zaštitnog prekidača snižena za skoro 30°C upotrebom novoprojektovanog sistema hlađenja.
- Preciznije maksimalna temperatura koja se imala u ovom slučaju je iznosila 57.1°C.



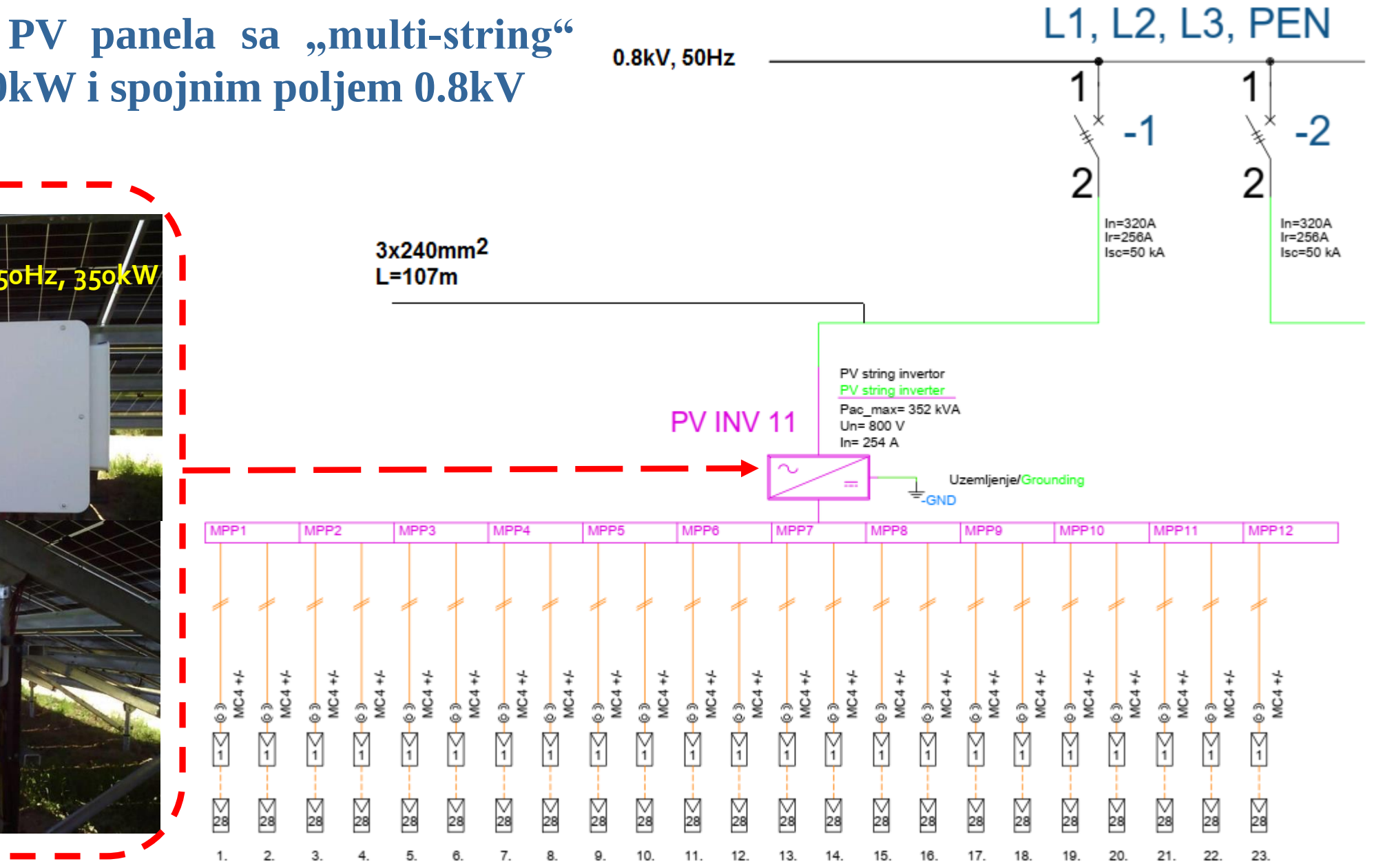
VEOMA ČESTO JE UZROK TERMIČKIH PROBLEMA i SAM SOLARNI INVERTOR

Topologija tipičnog tzv. „multi string“ invertora snage 350kW (maksimalni broj DC ulaznih stringova FN panela je 12).

- Maksimalni ulazni DC napon 1500V i izlazni napon 3x800V, 50Hz.
- Ova topologija je implementirana u sklopu jedne FNE na zemlji, ukupne izlazne snage 10MW.

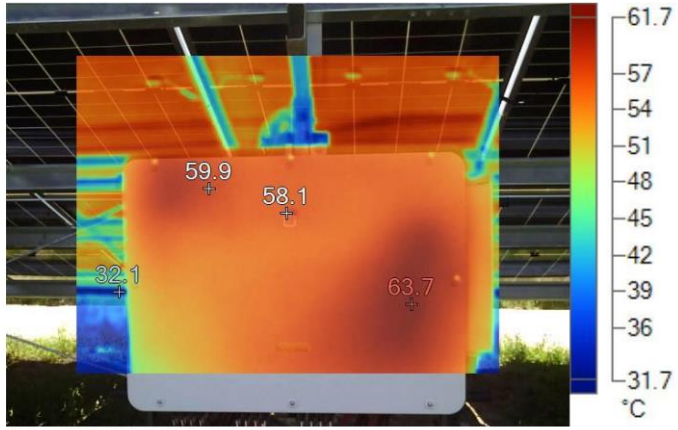
Solarni invertor sa tri nivoa snage 350kW i sa LCL filtrom u sklopu jedne fotonaponske elektrane snage 10MW

Konfiguracija PV panela sa „multi-string“ invertorom 350kW i spojnim poljem 0.8kV



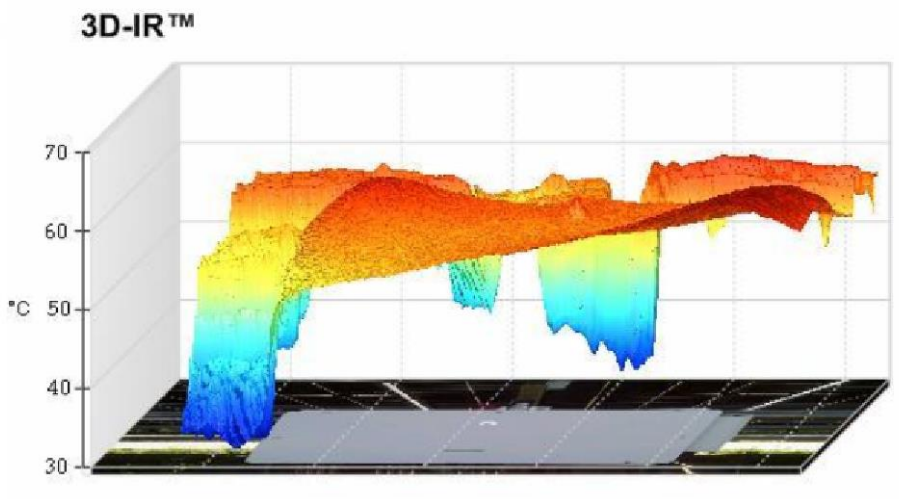
Termovizijska inspekcija prednje strane RO „multi-string“ invertora 350kW/0.8kV

Inspection Date:	6/8/2024 12:07:28 PM	Location	
Equipment		Equipment Name:	
Ambient Air Temp:		Wind Speed	
Load (%)		Max Rated Load:	
Exception Temperature:		Potential Problem	
Recommended Action		Repair Priority:	
Emissivity:	0.94	Reflected Temperature:	25.0 °C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	TiS45-18010146



IR_00006.IS2

Visible Light Image



Main Image Markers

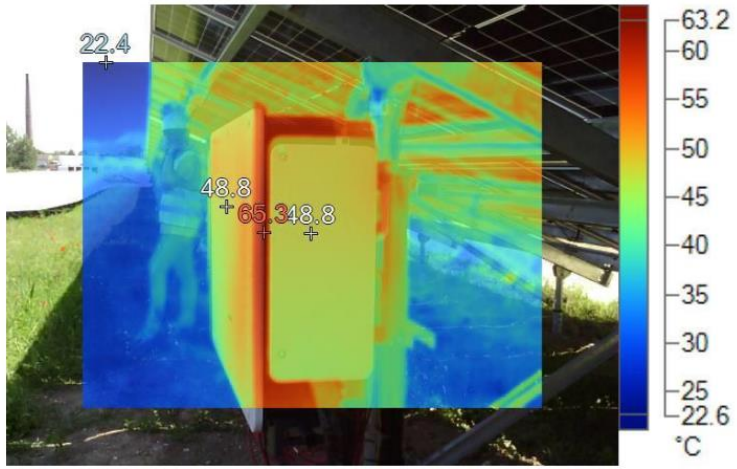
Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	58.1°C	0.94	25.0°C
Hot	63.7°C	0.94	25.0°C
Cold	32.1°C	0.94	25.0°C
P0	59.9°C	0.94	25.0°C

Rezultati termovizijskog snimanja površine ormana invertora 1500Vdc/3x800V, 50Hz, pri izlaznoj struji na svakom od linijskih priključaka od 240Aeff

Na osnovu ovih snimaka sledi zaključak da je uočeno povećano zagrevanje prednjih vrata razvodnog ormana invertora – desna strana, pri čemu je maksimalna temperatura najtoplije tačke 63.70C. Lokalizovani porast temperature na vratima RO koincidenciji sa termičkim stanjem na montažnoj ploči energetske elektronike unutar samog RO invertora.

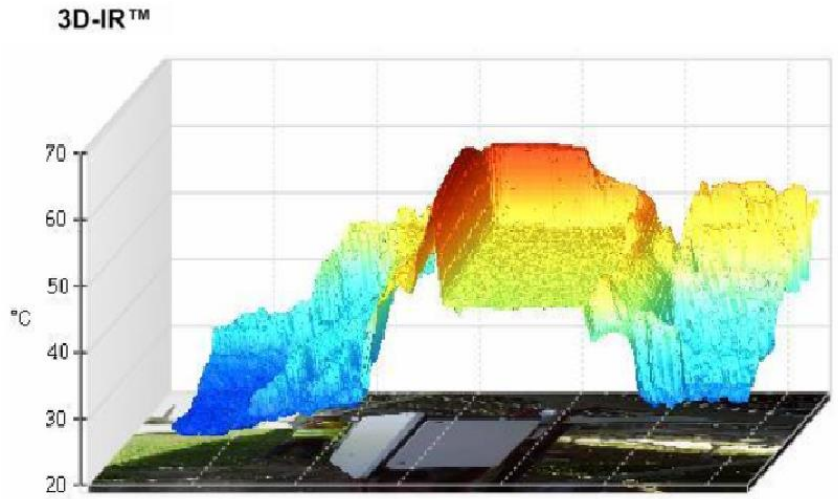
Termovizijska inspekcija bočne strane RO „multi-string“ invertora 350kW/0.8kV

Inspection Date:	6/8/2024 12:07:43 PM	Location	
Equipment		Equipment Name:	
Ambient Air Temp:		Wind Speed	
Load (%)		Max Rated Load:	
Exception Temperature:		Potential Problem	
Recommended Action		Repair Priority:	
Emissivity:	0.94	Reflected Temperature:	25.0 °C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	TiS45-18010146



IR_00007.IS2

Visible Light Image



Main Image Markers

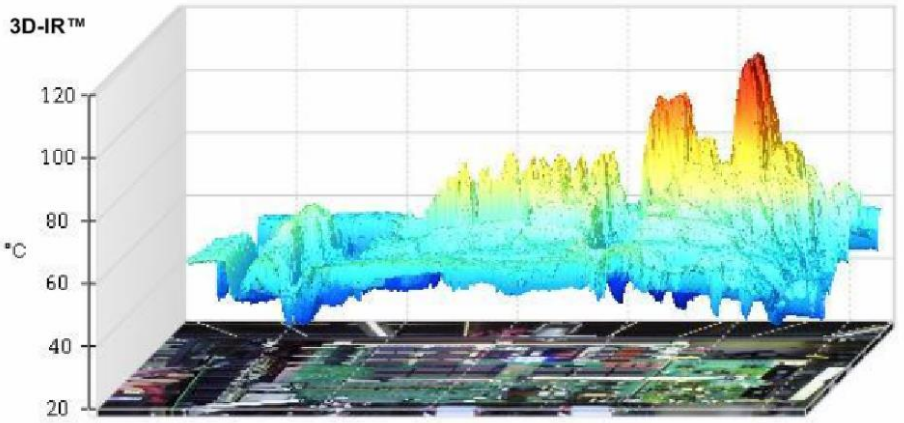
Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	48.8°C	0.94	25.0°C
Hot	65.3°C	0.94	25.0°C
Cold	22.4°C	0.94	25.0°C
P0	48.8°C	0.94	25.0°C

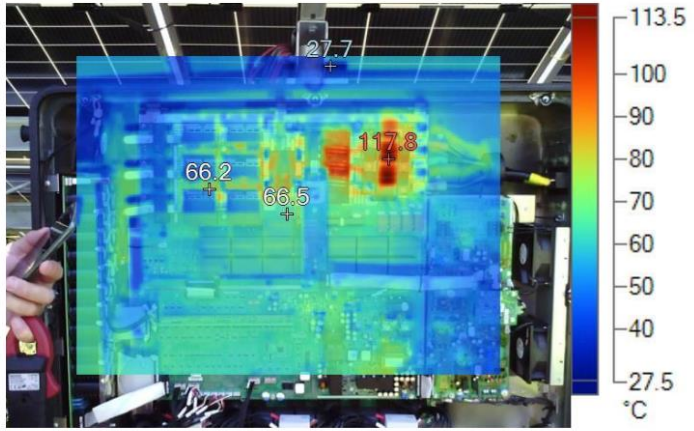
Rezultati termovizijskog snimanja bočne strane ormana invertora 1500Vdc/3x800V, 50Hz, pri izlaznoj struji na svakom od linijskih priključaka od 240Aeff

Sa termovizijskog snimka je uočeno povećano zagrevanje po obodu bočne ploče-desna strana. Kao što se vidi iz tabele i 3D-IR dijagrama, maksimalna temperatura najtoplije oblasti je iznosila oko 65.3 °C.

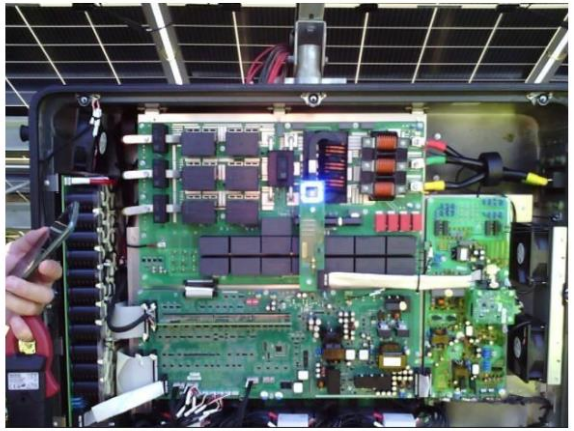
Termovizijska inspekcija unutrašnjosti RO „multi-string“ invertora 350kW/0.8kV

Inspection Date:	6/8/2024 12:23:07 PM	Location	
Equipment		Equipment Name:	
Ambient Air Temp:		Wind Speed	
Load (%)		Max Rated Load:	
Exception Temperature:		Potential Problem	
Recommended Action		Repair Priority:	
Emissivity:	0.94	Reflected Temperature:	25.0 °C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	TiS45-18010146





IR_00018.IS2



Visible Light Image

Main Image Markers

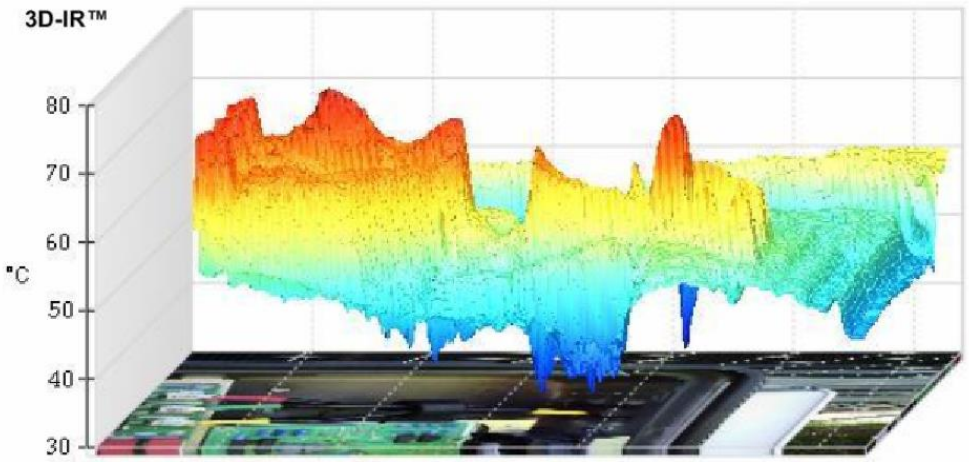
Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	66.5°C	0.94	25.0°C
Hot	117.8°C	0.94	25.0°C
Cold	27.7°C	0.94	25.0°C
P0	66.2°C	0.94	25.0°C

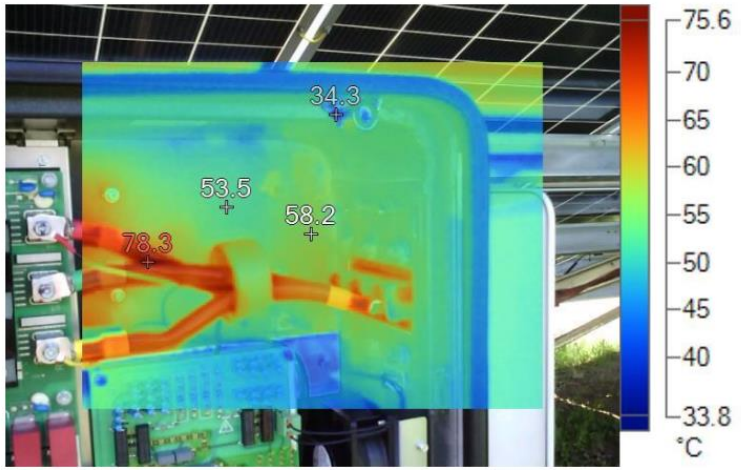
Rezultati termovizijskog snimanja unutrašnje ploče energetske elektronike i izlaznih AC priključaka invertora 1500Vdc/3x800V, 50Hz, pri izlaznoj struji na svakom od linijskih priključaka od 240Aeff

Na osnovu termovizijskog snimka je uočeno povećano zagrevanje na AC priključnim tačkama. Maksimalna temperatura najtoplije oblasti je iznosila 117.8°C. Ova vrednost je značajno veća od dozvoljene temperature i može biti uzrok drugih termičkih problema, od kojih je najgori scenario požar i izgaranje invertora, a takođe i prenošenje požara na okolne fotonaponske panele ispod kojih se nalazi invertorski razvodni orman

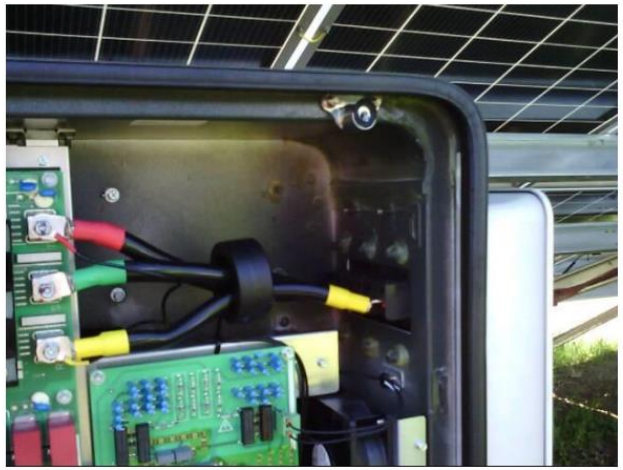
Termovizijska inspekcija AC priključnih klema „multi-string“ invertora 350kW/0.8kV

Inspection Date:	6/8/2024 12:23:42 PM	Location	
Equipment		Equipment Name:	
Ambient Air Temp:		Wind Speed	
Load (%)		Max Rated Load:	
Exception Temperature:		Potential Problem	
Recommended Action		Repair Priority:	
Emissivity:	0.94	Reflected Temperature:	25.0 °C
Camera Manufacturer	Fluke Thermography	Camera:	TiS45-18010146





IR_00020.IS2



Visible Light Image

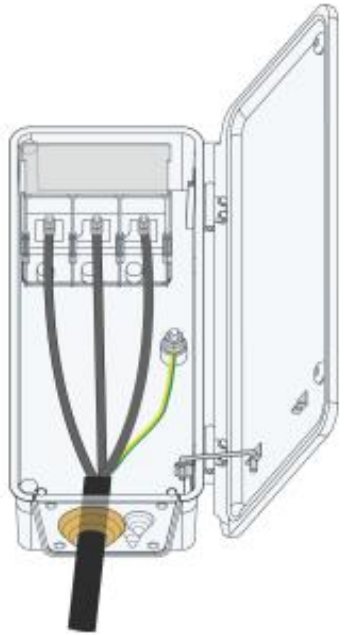
Main Image Markers

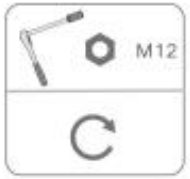
Name	Temperature	Emissivity	Background
Centerpoint	58.2°C	0.94	25.0°C
Hot	78.3°C	0.94	25.0°C
Cold	34.3°C	0.94	25.0°C
P0	53.5°C	0.94	25.0°C

Rezultati termovizijskog snimanja izlaznog kabla invertora 1500Vdc/3x800V, 50Hz, pri izlaznoj struji na svakom od linijskih priključaka od 240Aeff

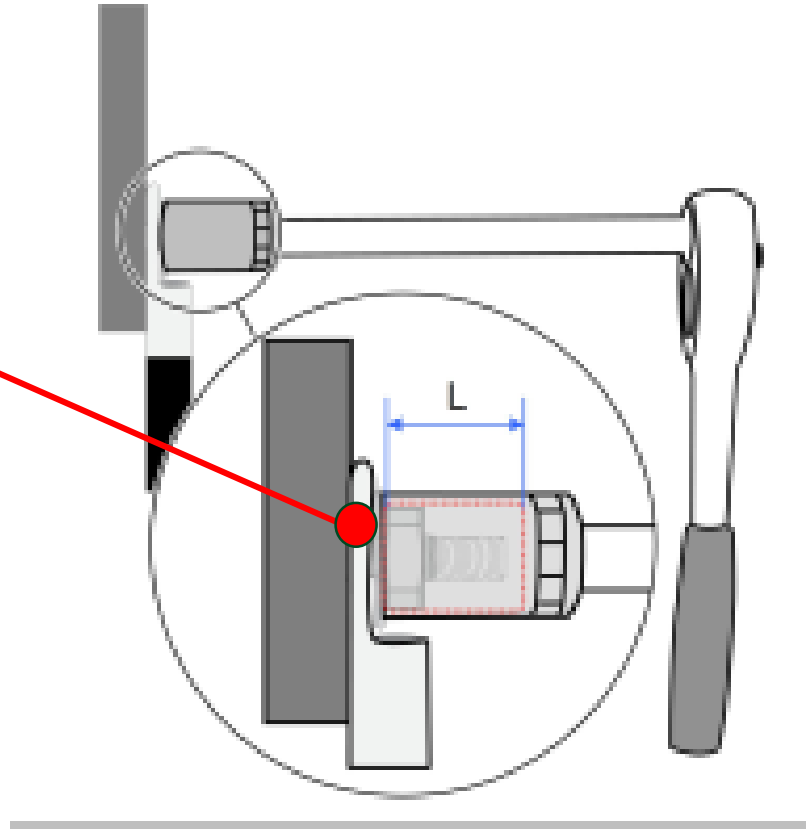
Prikaz termovizijskog snimanja izlaznog napojnog kabla, gde se uočava povišena temperatura izolacije kabla od 78.3°C, koja je posledica prethodno opisanog fenomena porasta temperature unutar razvodnog ormana.

PROBLEM STEZANJA PRIKLJUČNIH KONTAKATA





Prelazna otpornost (3÷5)mΩ



Moment stezanja MIN (4÷6)Nm

Kada se ne ispoštuje adekvatno dotezanje sa moment ključem prelazni otpor klema-papučica iznosi oko 10 mΩ. Pri struji od 240A, na spoju se disipira snaga Ps=10 mΩ • (240A)²=576 W. Ako se uzmu u obzir sva tri spoja (a termovizija je pokazala njihovo pregrevanje) dolazimo do ukupne snage ΣPs = 576 W x 3≈ 1.8 kW. Ova snaga koja se dispira u razvodnom ormanu invertora za par sati podigne temperaturu unutar na 120° C i više. Ova temperatura dalje razvija ogromnu količinu toplote unutar zatvorenog kućišta, koju postojeći ventilatori ne mogu da odvedu. Iz ovog razloga ostala oprema unutar ormana dolazi na ovu temperaturu i onda kreće lančani proces otkazivanja pojedinih delova, njihovog paljenja i širenja požara unutar. Takođe strada izolacija na priključnim AC klemama invertora i dolazi do međufaznih ili čak do tropolnog kratkog spoja → POŽAR

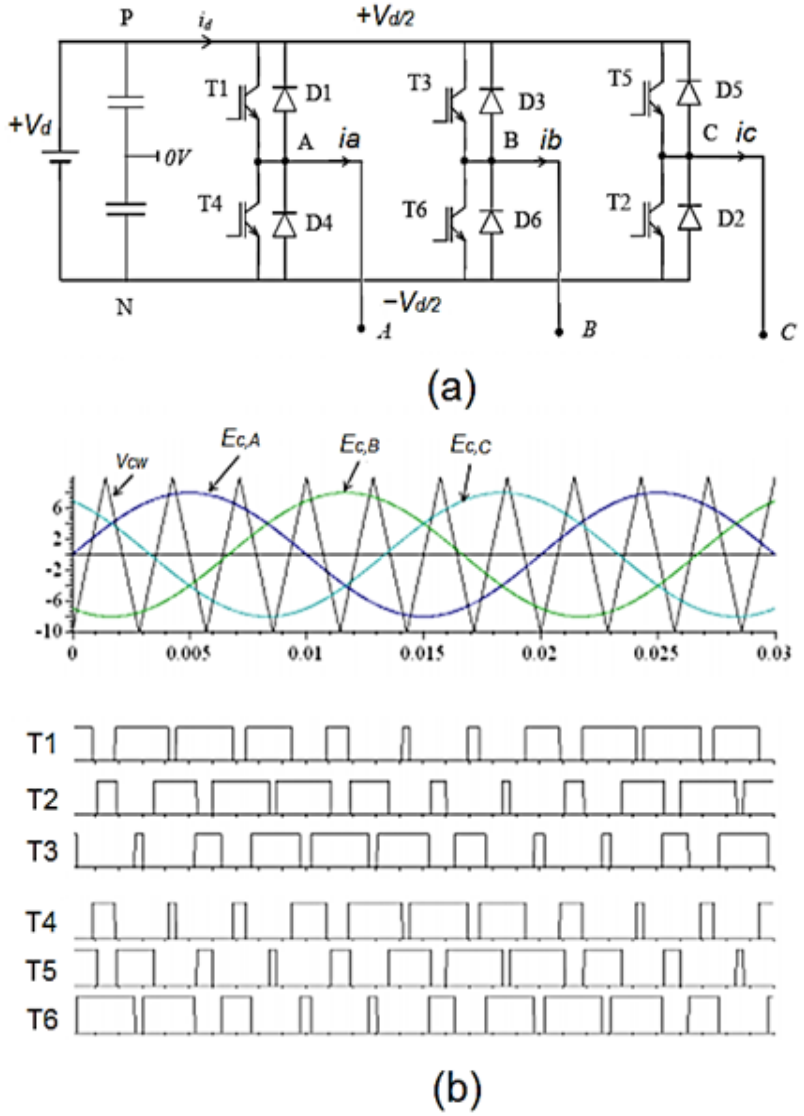
UTICAJ VIŠIH HARMONIKA

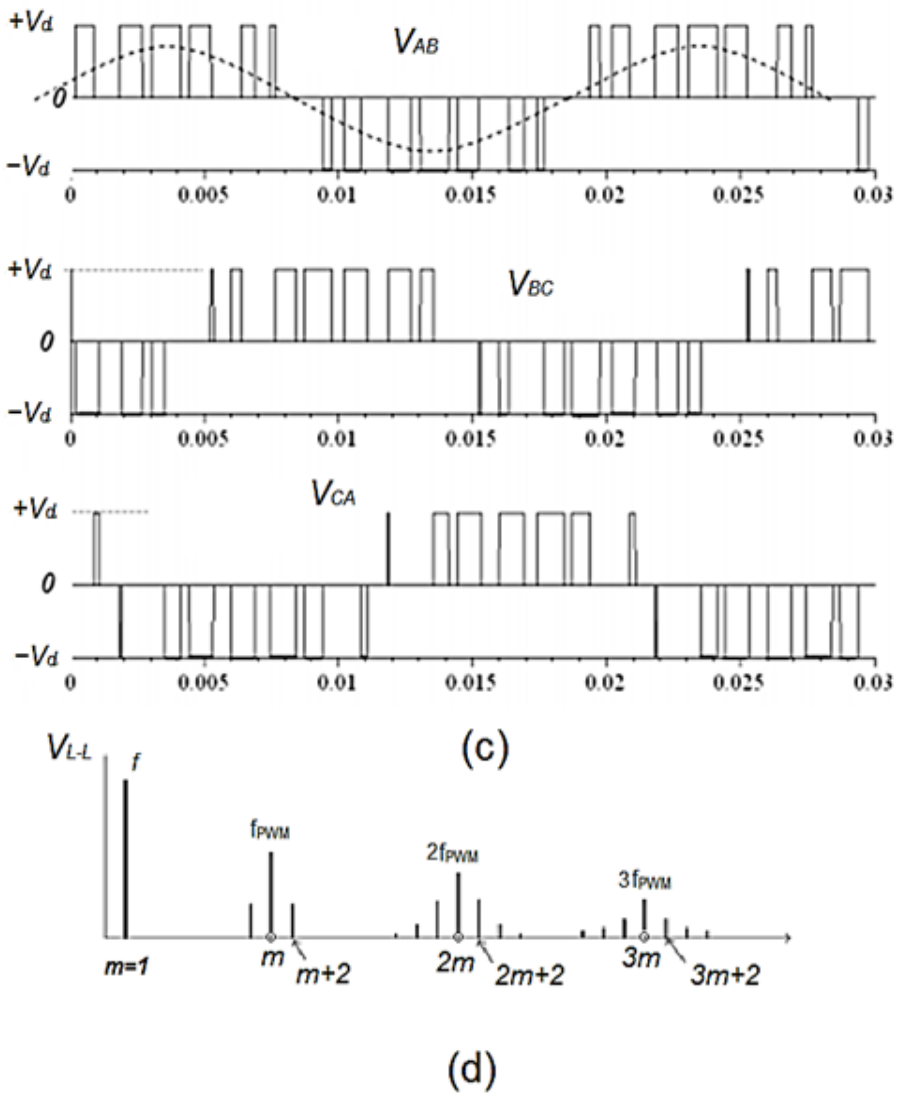
- Invertori kao ključni uređaji energetske elektronike ugrađeni u sistem FNE su nesavršeni uređaji u pogledu generisanja izlaznih napona i struja (odstupaju od glatke sinusoide).
- Težnja projektanata ovih uređaja je da se dobiju izlazni naponi i struje što približniji „glatkim“ sinusnim talasnim oblicima.
- Ovo predstavlja veliki projektantski izazov, ali istovremeno i kompromis u pogledu cene i gabarita opreme sa jedne strane i harmonijskih izobličenja sa druge strane.
- Ovom prilikom je razmotren uticaj dve najčešće korišćene topologije invertora koje se primenjuju u FN sistemima:

(1) *topologija sa dva nivoa („two level”)*

(2) *topologija sa tri nivoa („three-level”).*

Topologija solarnog invertora sa dva nivoa („two level”)

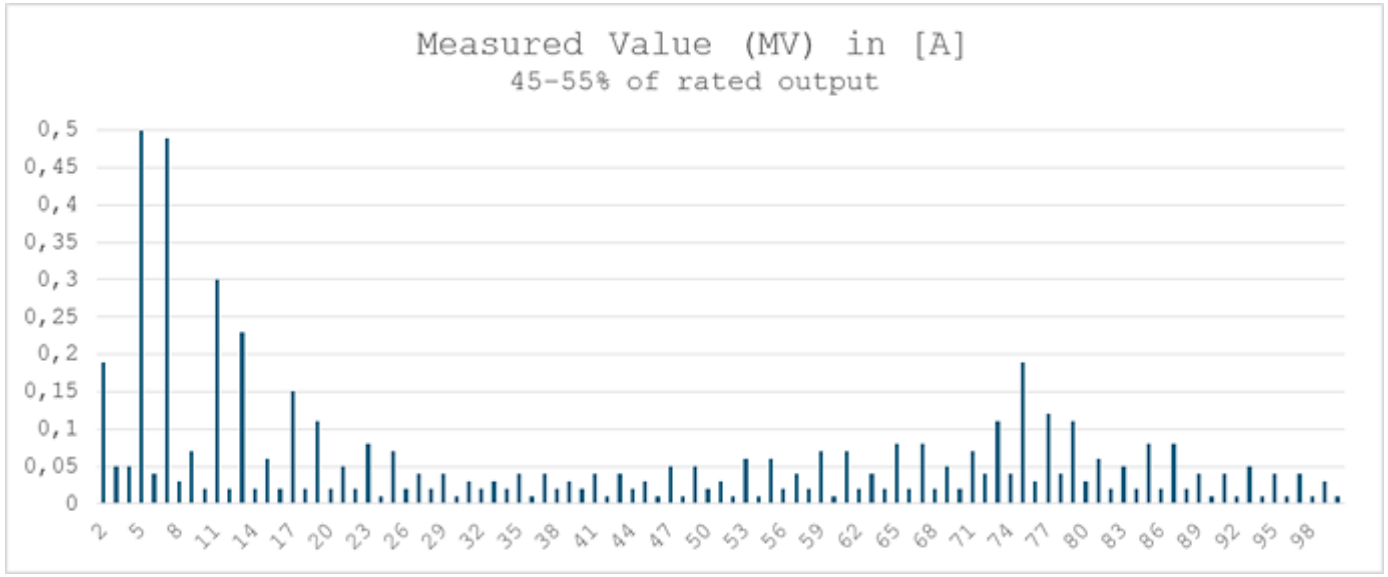




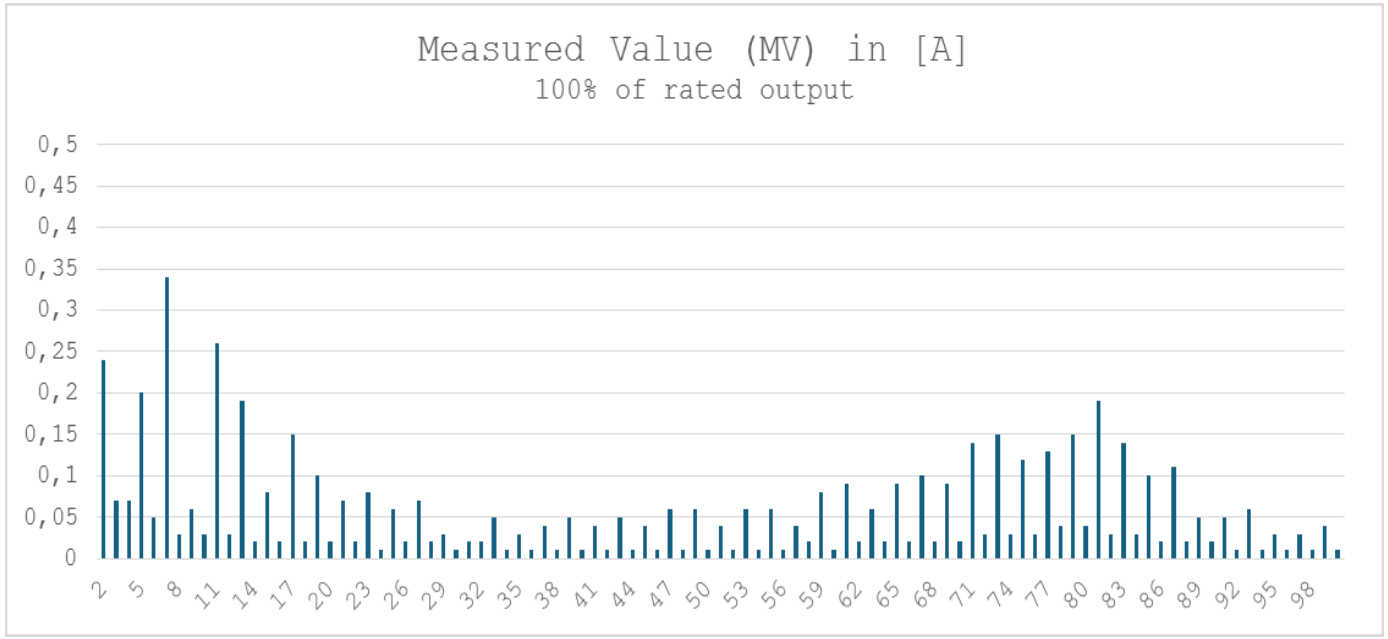
Karakteristični talasni oblici izlaznih napona i struja IGBT fotonaponskog invertora sa dva nivoa;

(a) osnovna šema IGBT topologija,
(b) modulacioni i upravljački signali IGBT prekidača,
(c) talasni oblici međufaznih napona invertora,
(d) harmonijski spektar međufaznog izlaznog napona invertora

Snimljeni spektri harmonika za FN invertor („two level“) 100kW, 0.4kV

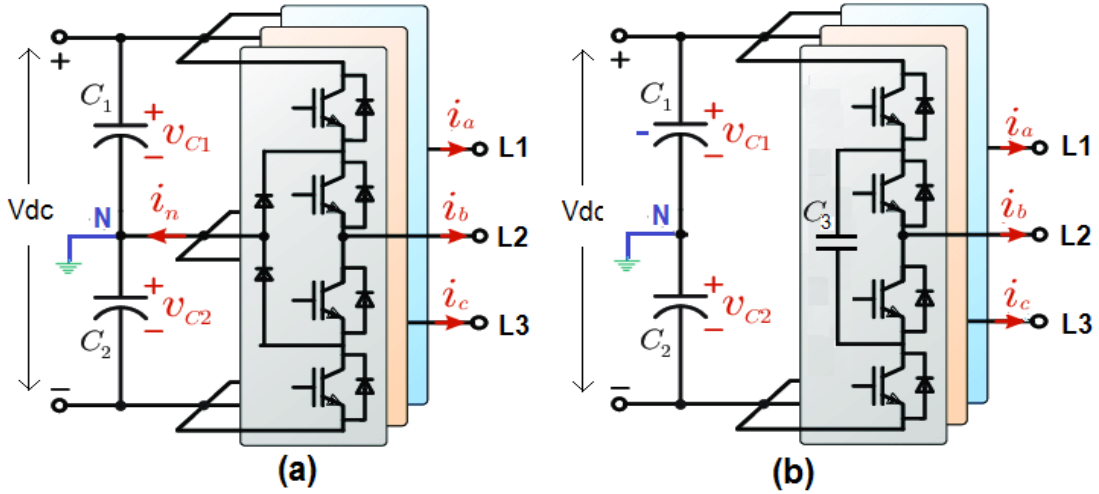


Izmerene vrednosti struja viših harmonika za invertor SE100K Solar Edge izlazne snage 100 kW za fazu L1; (a) pri polovini fazne nominalne snage 16.454 kW



Izmerene vrednosti struja viših harmonika za invertor SE100K Solar Edge izlazne snage 100 kW za fazu L1; (a) pri punoj (nominalnoj) snazi 32.2 kW

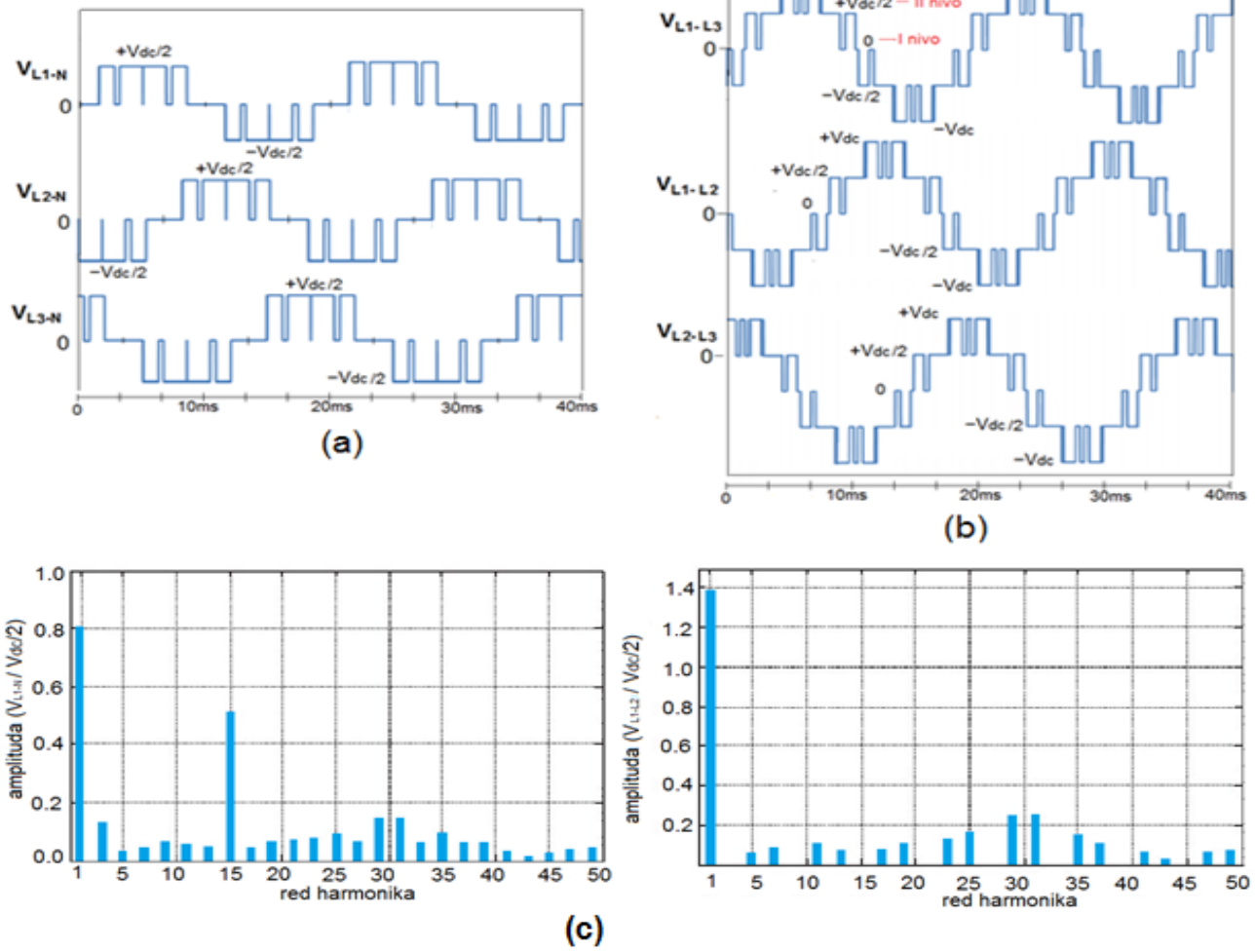
Topologija FN invertora sa tri nivoa („three level”)



Topologije invertora sa tri nivoa; (a) 3L NPC, (b) 3L FC

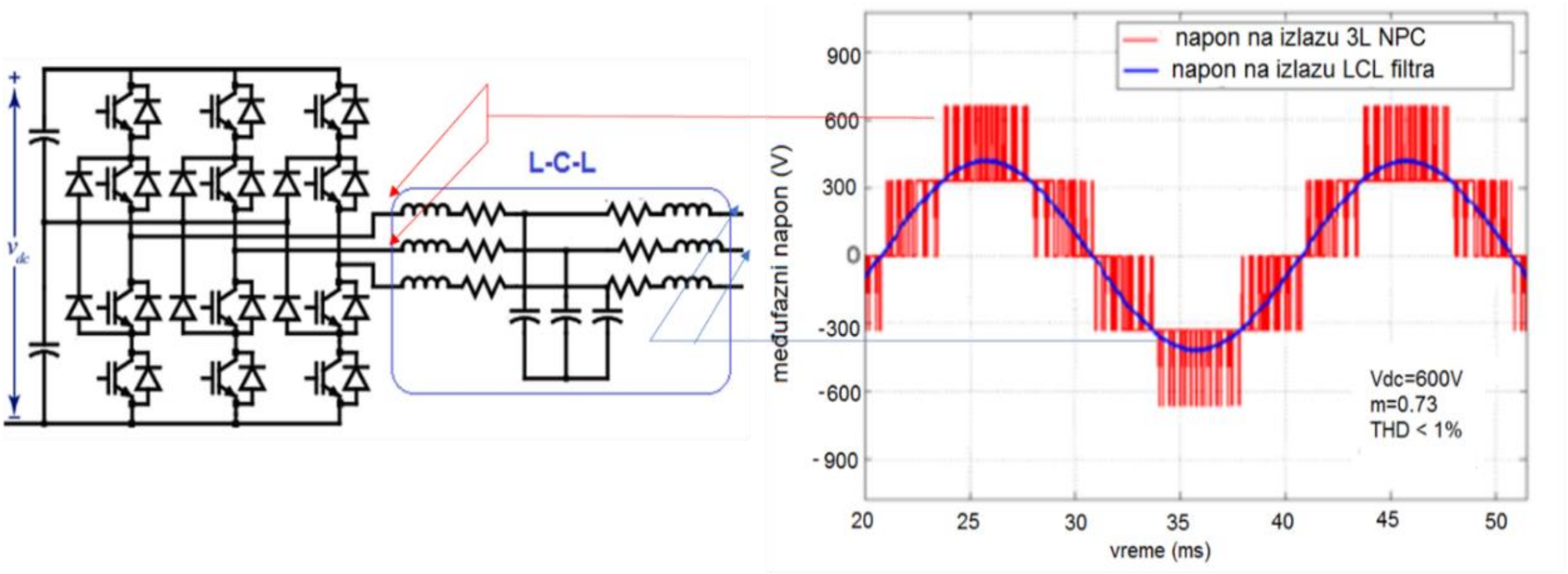
(1) topologija sa tri nivoa sa diodama za simetriranje i fiksiranje neutralne tačke (eng. three-level neutral point clamped-3L NPC)

(2) topologija sa tri nivoa sa „lebdećim“ kondenzatorom (eng. three-level flying capacitor-3L FC)



Talasni oblici i spektri harmonika faznih napona i jednog međufaznog napona za topologiju invertora sa tri nivoa (3L NPC); (a) talasni oblici tri fazna napona, (b) talasni oblici tri međufazna napona, (c) spektri harmonika faznog (levo) i međufaznog napona (desno)

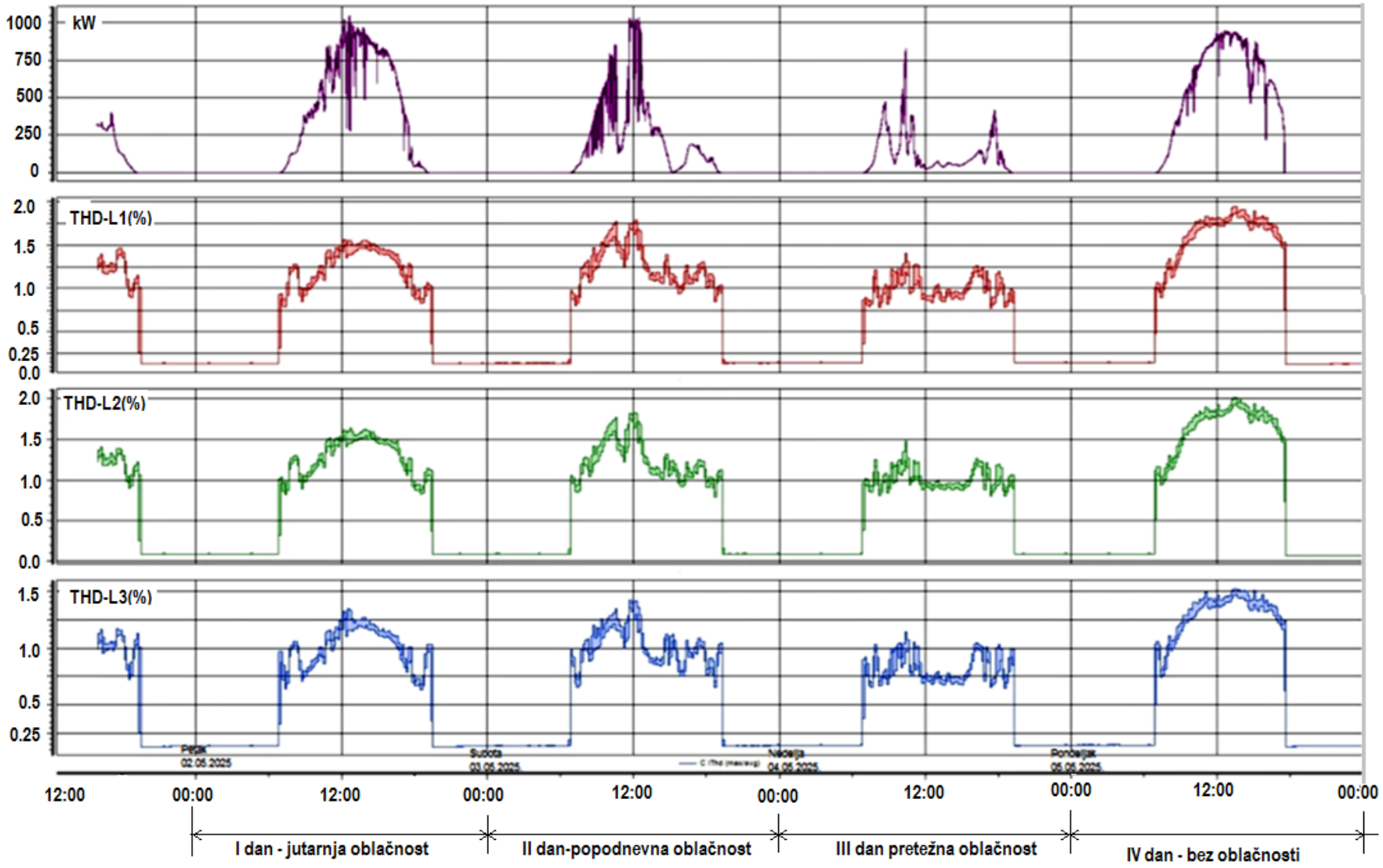
Filtracija izlaznog napona FN invertora sa tri nivoa („three level”)



Izlazni napon 3L NPC invertora 100kW nakon filtracije sa L-C-L filtra

Izlazni talasni oblik invertora sa tri nivoa sadrži značajnije harmonijsko izobličenje usled naglog prelaza između dva nivoa napona. Ovo zahteva dodatno filtriranje (obično se koristi L-C-L filtar u FN aplikacijama) da bi se dobio zadovoljavajući sinusni talasni oblik struje za osetljive aplikacije u pogledu smanjenog izobličenja.

Tipični dnevni dijagrami snage i THD jedne FNE snage 1MW



Dnevni vremenski dijagrami proizvedene snage jedne FNE maksimalne izlazne snage 1MW i THD faktor za faze L1-L3 na NN invertorskim sabirnicama posmatrani u toku četiri dana sa različitom sunčevom insolacijom usled različite oblačnosti

UTICAJ DC KOMPONENTE STRUJE FN INVERTORA

- Poslednjih godina sve češće se vrše merenja kvaliteta električne energije kako u distributivnoj tako i u prenosnoj mreži.
- Ova merenja se prvenstveno fokusiraju na klasično proveravanje parametra kao što su padovi napona, naponski tranzijenti i harmonici.
- Maksimalne vrednosti su obezbeđene standardima (EN50160, IEEE 519) za kvalitet u EDB mrežama.
- Važan parametar kvaliteta električne energije, koji se obično ne razmatra a bitan je, jeste DC komponenta struje ili DC „*offset*“.

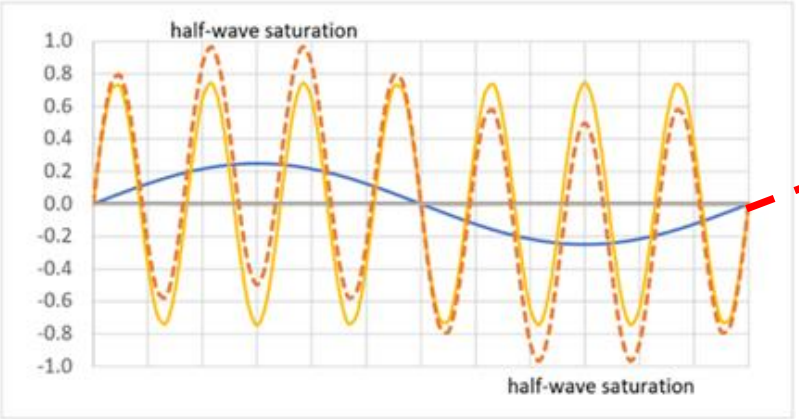
Sledeća pitanja su do sada često dobijala malo pažnje:

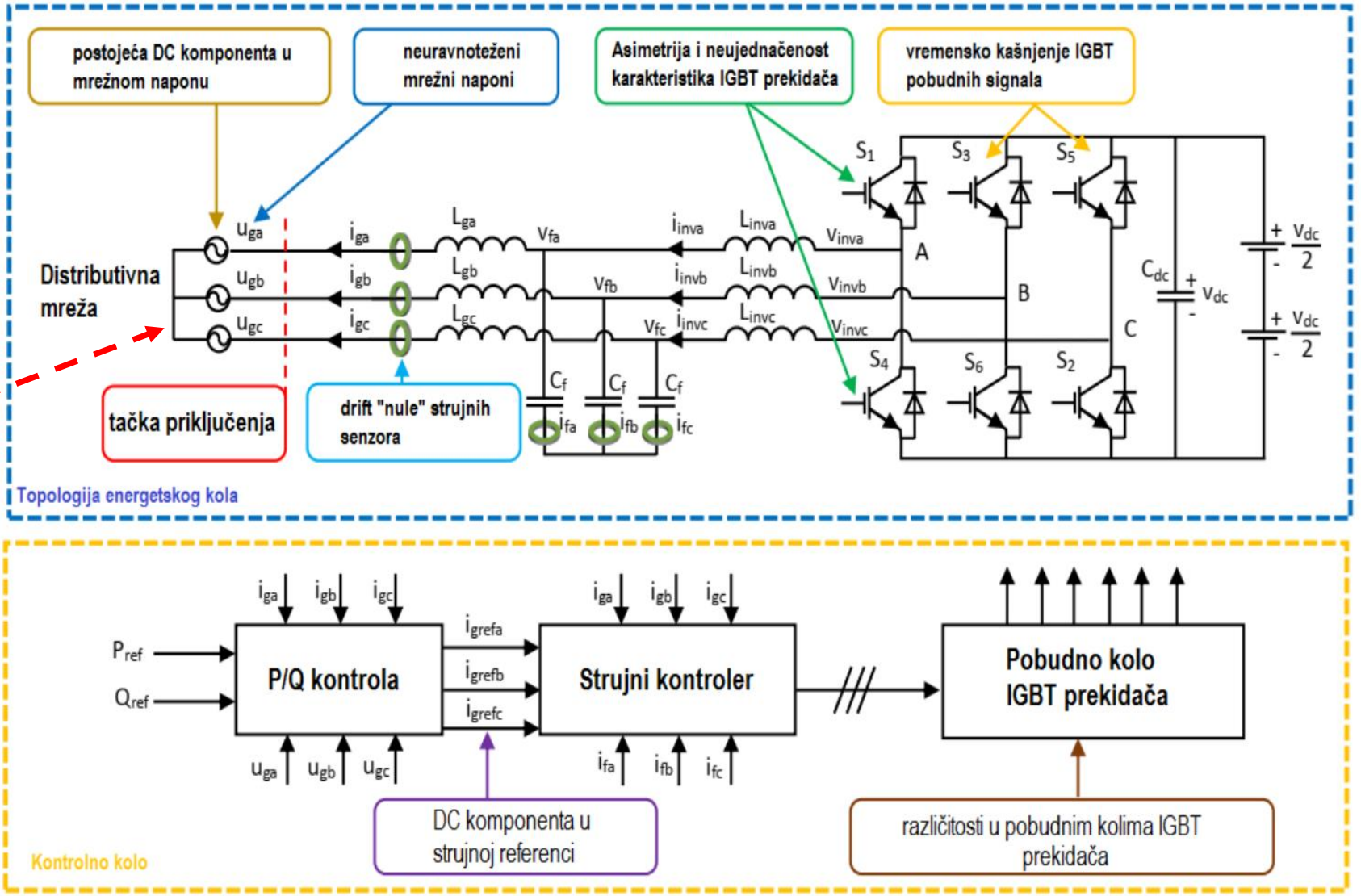
(1) Koliko se uopšte struja „DC offseta“ ubrizgava u mrežu?,

(2) Kako ovu DC komponentu struje treba meriti i kvalifikovati na pouzdan način?,

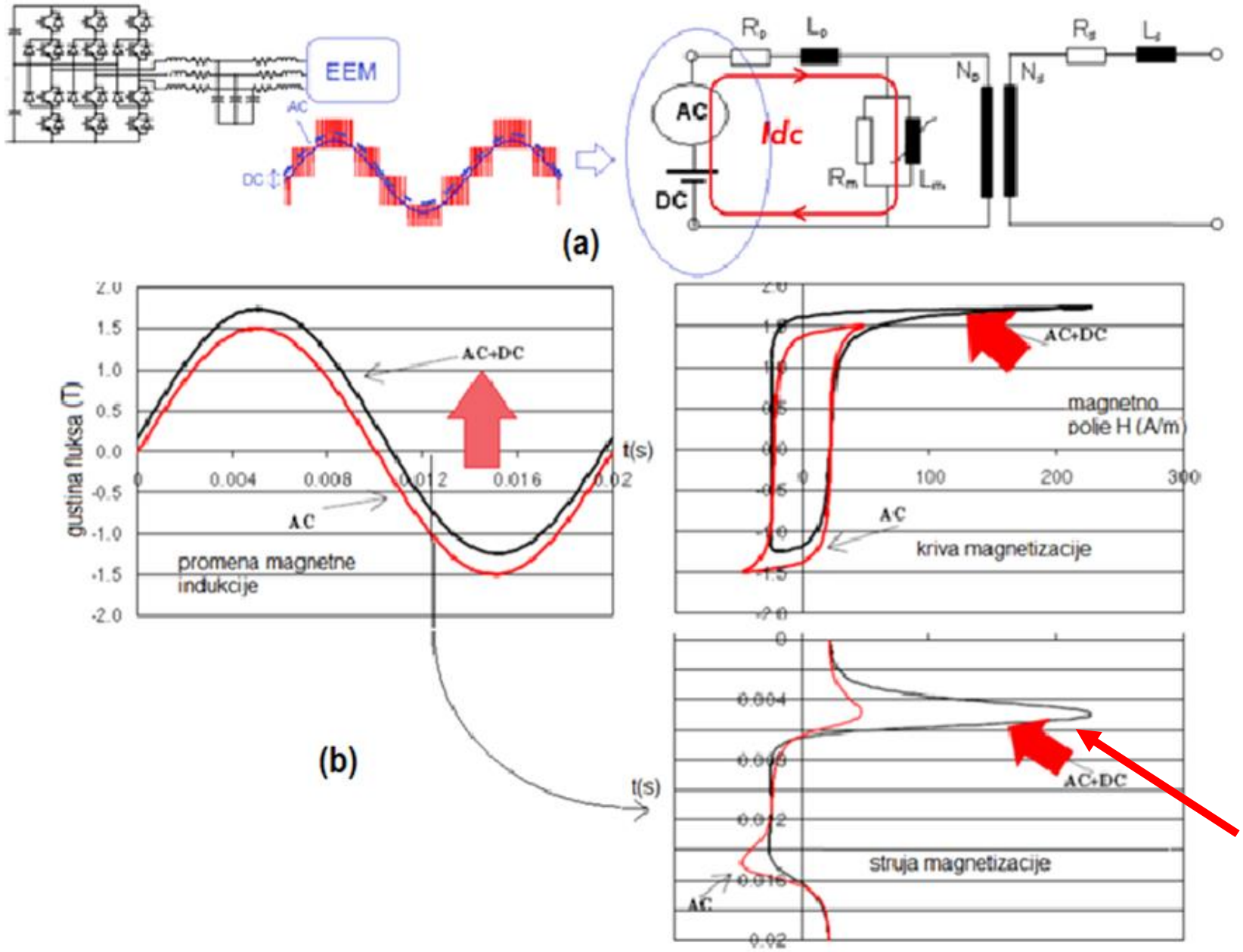
(3) Kako DC komponenta utiče na preostali sistem i šta se može učiniti da se ograniči njeno prisustvo?

Mogući uzroci nastanka DC komponente u izlaznom naponu invertora





Osnovna topologija fotonaponskog invertora sa dva nivoa, sa LCL filtrom i upravljačkom kolom sa naznačenim delovima koji potencijalno mogu dovesti do stvaranja DC offseta u izlaznom naponu invertora



- **Energetski transformatori u EEDM su jako ugroženi od posledica pojave DC komponente struje,** odnosno od pojave zasićenja koje nastaje kao posledica ove struje.
- Transformator koji „pati“ od jednosmernog zasićenja magnetnog jezgra ima značajniju struju pobude-slika (a).
- Ovo može dovesti do pregrevanja magnetnog jezgra.
- Vrlo često dođe do ekskurzije fluksa, tako da jezgro ode u zasićenje i nastane kratak spoj kao što pokazuje -slika(b).

relativno mali DC-„offset“ na B-H krivoj magnetizacije može dovesti do značajnog pika struje magnećenja!!!!!

Maksimalne vrednosti za DC komponentu struje FN inverora-standardi

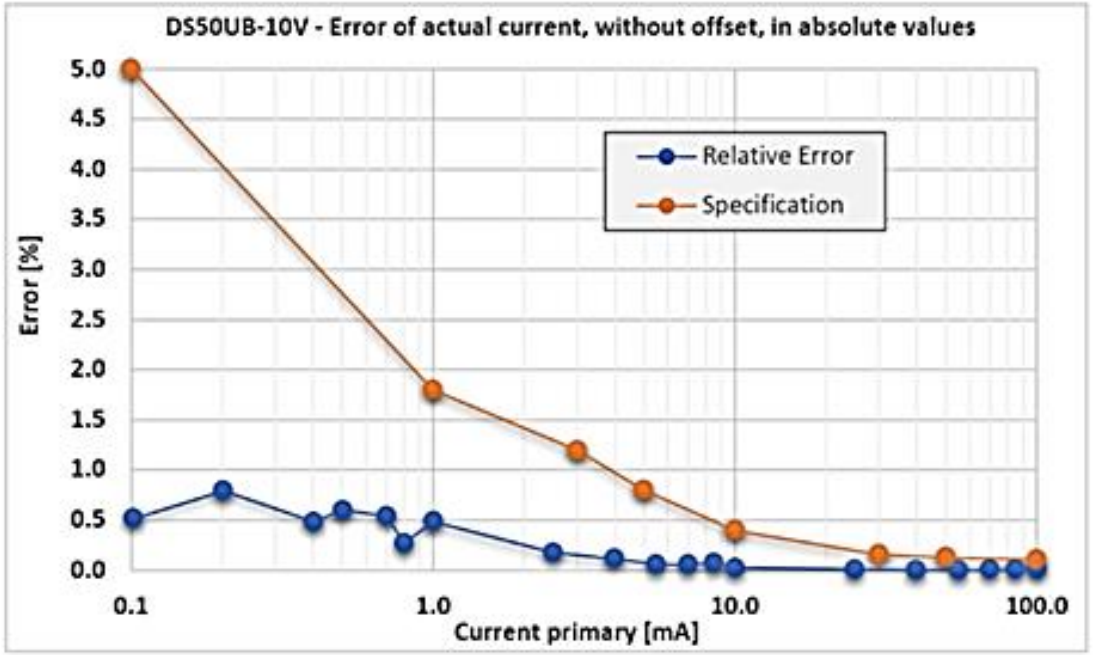
Tri primera su navedena u Tabeli

Country	Standard	Limit
Australia	AS4777.2	5 mA or 0.5 % of its rated current
USA	IEEE Standard 1547-2018	0.5 % of its rated current
Italy	CEI 0-21	0.5 % of its rated current

**** Jednosmerne struje mogu izazvati koroziono oštećenje kablova i oštećenje druge opreme, kao i zasićenje energetskih transformatora i drugih induktivnih elemenata (prigušnica)***

Za merenje koriste specijalni strujni tzv. „fluxgate senzori“ i specijalno sertifikovana merna oprema.

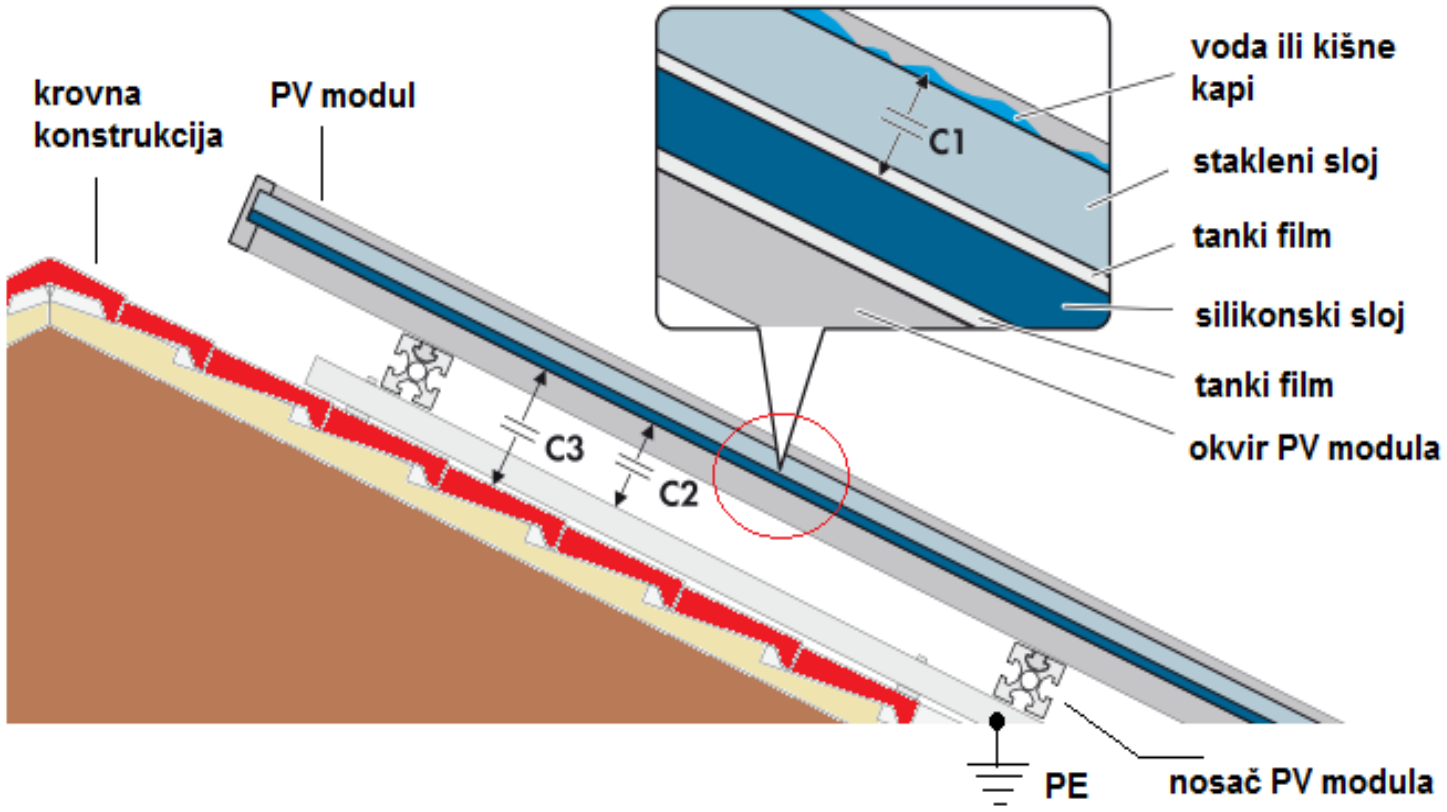
- Ovi senzori su kalibrisani direktno po standardu IEC 17025: SRPS ISO/IEC 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/IEC 17025:2017),
- Publication date: Dec 25, 2017



UTICAJ PARAZITNOG KAPACITETA FN ELEKTRANE

- Obzirom na strukturu i mehaničke dimenzije, fotonaponski (FN) paneli bilo da su montirani na tlu ili na krovovima zgrada, uvek imaju izvesnu kapacitivnost prema zemlji ili bliskim uzemljenim metalnim delovima.
- Ova kapacitivnost nije neophodna za funkcionisanje pojedinačnog FN panela ili niza FN panela (stringova).
- Ona potiče suštinski od konačnih dimenzija i mehaničke strukture solarnih modula, ali i zavisi i od načina njihove instalacije i ugradnje.
- U praksi se često ovaj kapacitet naziva „parazitni“ obzirom da postoji, a nema uticaj na funkcionalni rad FN nizova.
- Ovaj kapacitet je proporcionalan površini solarnih panela, a obrnuto proporcionalan rastojanju između solarnih panela i zemlje ili uzemljenih metalnih delova.
- Stoga FN niz ili više njih (kao na primer jedne FN elektrane) pokazuju relativno veliku parazitnu kapacitivnost prema „zemlji“.
- Ona može biti dodatno povećana ako su površine pojedinačnih ili grupnih nizova FN panela vlažni, kao posledica kiše ili kondenzacije.

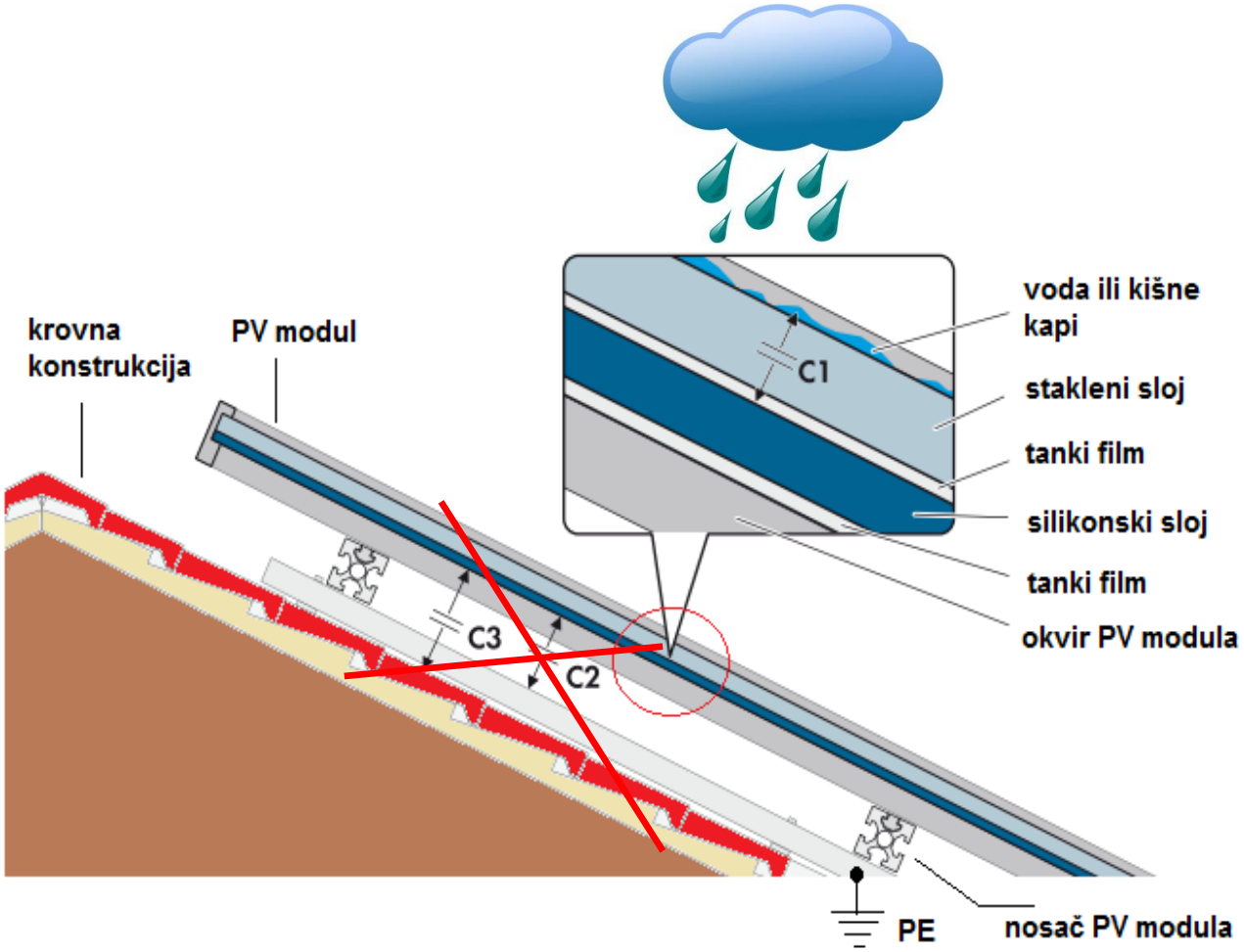
PARAZITNI KAPACITET JEDNOG FN MODULA



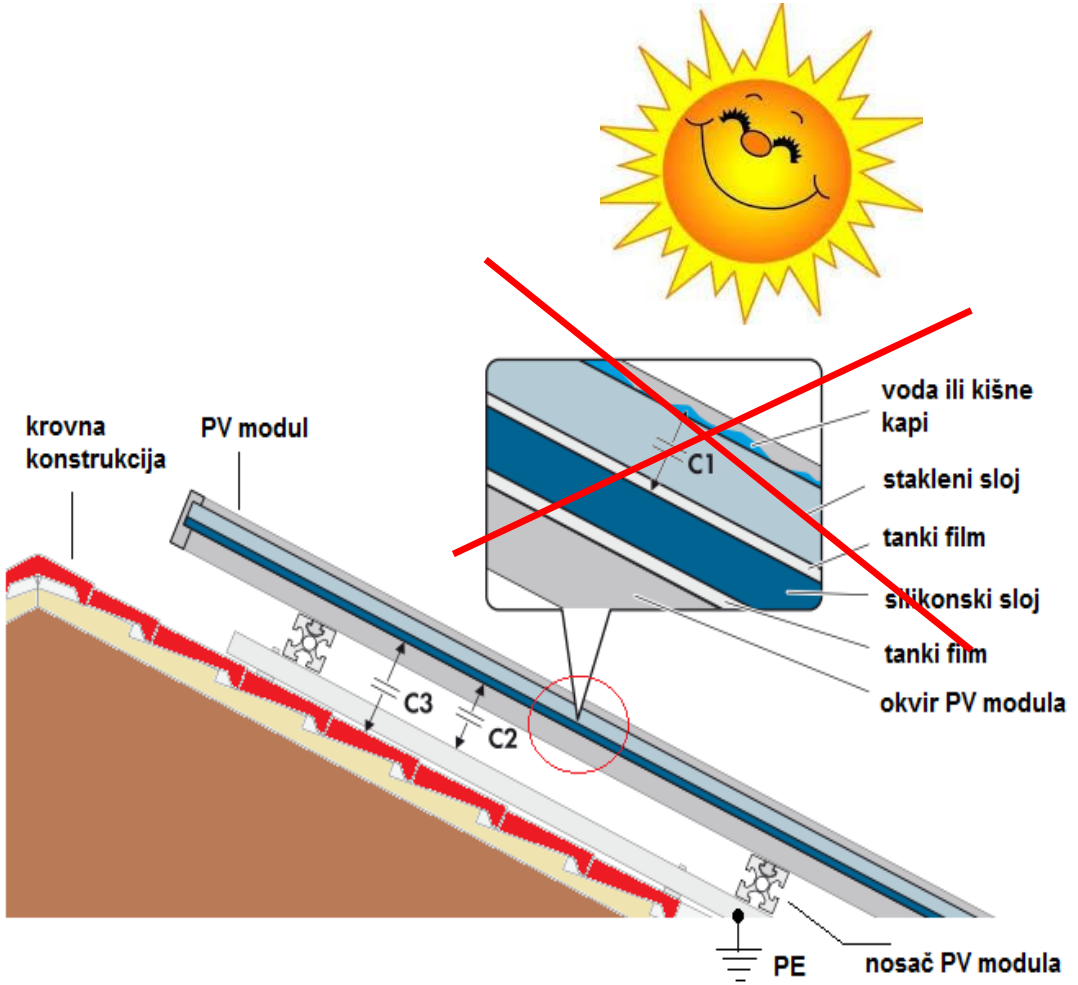
- Kompletan raspored FN modula ima odgovarajući parazitni kapacitet koji se sastoji od tri komponente:
  (1) C_1-parazitni kapacitet vodenog ili kapljičastog sloja na površini FN modula u odnosu na sloj stakla,
  (2) C_2-parazitni kapacitet FN modula prema uzemljenom nosećem ramu,
  (3) C_3-parazitni kapacitet FN modula prema krovnoj konstrukciji
- Stoga je ukupna parazitna kapacitivnost $C_{PE}=C_1 II(C_2+C_3)$.
- U praksi važi odnos $C_1 >> C_2 >> C_3$.

$C=\varepsilon_o \varepsilon_r S/d$

ε_o-dielektrična konstanta vazduha (8.85·10-12As/Vm
ε_r- relativna dielektrična konstanta dielektrika (za staklo je =5÷10)
S-površina FN modula ili grupe modula
d-karakteristična rastojanja između pojedinih površina



Obično u kišnim i vlažnim uslovima ukupnim kapacitetom C_{PE} dominira C_1, tako da se u tom slučaju C_2 i C_3 mogu zanemariti.



U suvim uslovima, s druge strane, C_1 je toliko mali da se ova druga dva moraju uzeti u obzir.

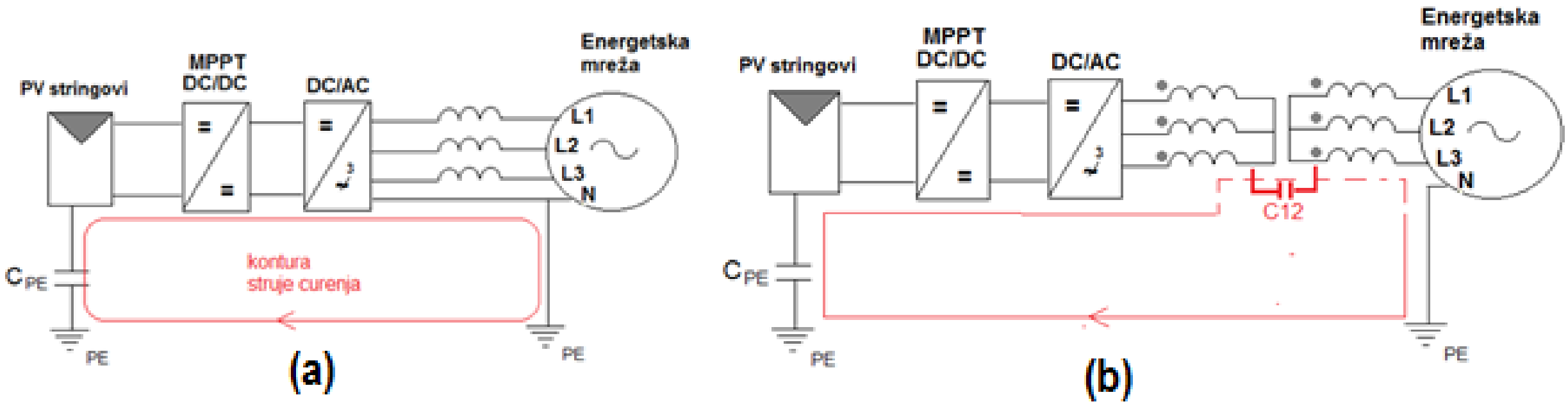
PROCENJENE VREDNOSTI PARAZITNE KAPACITIVNOSTI C1

- Treba napomenuti da je u svim slučajevima ukupni kapacitet C_{PE} toliko mali da je bilo koji uticaj na radno ponašanje fotonaponskog sistema zanemarljiv.
- Ipak najveći uticaj na struje curenja invertora ima vrednost C_1 tokom kišnih i vlažnih uslova (slučaj kondenzacije vlage je tipičan), te će ona stoga biti predmet daljeg razmatranja.
- Primer procene parazitne kapacitivnosti $C_{PE} \approx C1$ za dva tipa FN panela
- Tip1- standardni (monokristalni i polikristalni) FN modul
- Tip-2 modul na bazi tankog filma su dati

Tip	Efikasnost (%)	Debljina stakla (mm)	Kapacitivnost/ m^2 (nF)	Kapacitivnost/ kW istalisane DC snage (nF)	Kapacitivnost/100kW instalisane DC snage (µF)
1	15÷20	3÷4	12÷17	60÷110	6÷11
2	10÷15	2÷3	16	100÷160	10÷16

SPREGA INVERTOR-ELEKTROENERGETSKA MREŽA i „STRUJA CURENJA“

- Tokom rada FN moduli su povezani na AC mrežu preko invertorskog pretvarača DC/AC direktno ili preko transformatora,
- Kada se formira petlja između parazitnog kapaciteta C_{PE} fotonaponskog sistema i električne mreže (sabirnice PE), u ovom FN sistemu, impedansa petlje je relativno mala, a zajednički napon (*"common mode voltage"*) formira relativno veliku zajedničku struju (*"common mode current"*), odnosno ***„struju curenja“*** kroz parazitnu kapacitivnost.



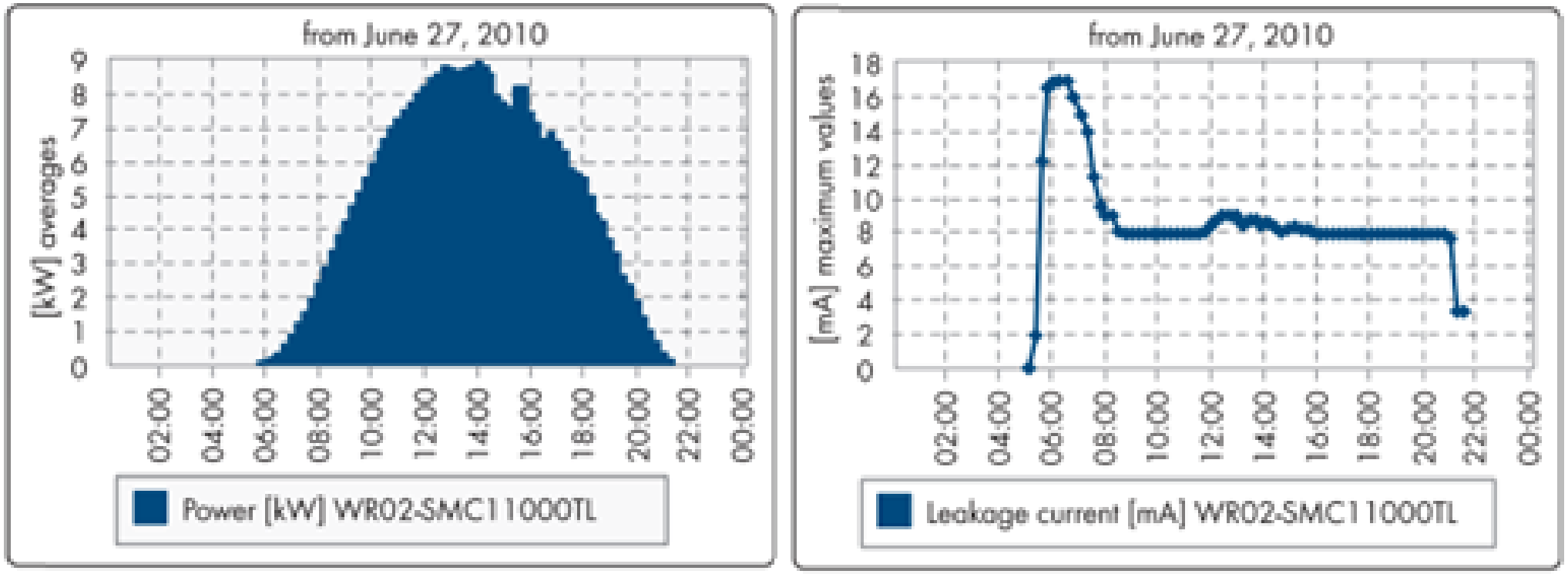
Uticaj sprege DC/AC pretvarača (invertora) i mreže na struju curenja kroz parazitnu kapacitivnost; (a) direktna sprega sa elektroenergetskom mrežom i (b) sprega preko energetskog transformatora

PRIMER: Efektivna vrednosti parazitne struje se može dobiti iz izraza

$$I=\omega \cdot Cp \cdot U=2\pi \cdot f \cdot C_{PE} \cdot U$$

- Za fazni napon U=230V, f=50Hz i parazitnu kapacitivnost C_{PE}= 8μF (tipično za FNE snage 100kW sa monokristalnim FN modulima) dobija se da je efektivna vrednost struje curenja jednaka $I=2\pi \cdot 50Hz \cdot 8\mu F \cdot 230V = 577mA$.
- U prvoj aproksimaciji ova struja ne prouzrokuje bilo kakve gubitke, međutim može uticati na rad invertora koji je povezan na elektroenergetsku mrežu.
- U jednom slučaju ova pojava prouzrokuje da se pod dejstvom automatske zaštite invertor privremeno isključuje sa mreže, pri čemu će se nakon određenog vremena ponovo vratiti na mrežno napajanje.
- U drugom slučaju, dovod će biti prekinut sve dok se zaštitni uređaj za preostalu struju ručno ne aktivira (tzv. resetovanje zaštite).
- Prekidi ove vrste mogu uticati na pouzdani rad FNE, ali se u velikoj meri mogu sprečiti pažljivim i profesionalnim planiranjem sistema i obezbeđenjem odgovarajućih zaštita.

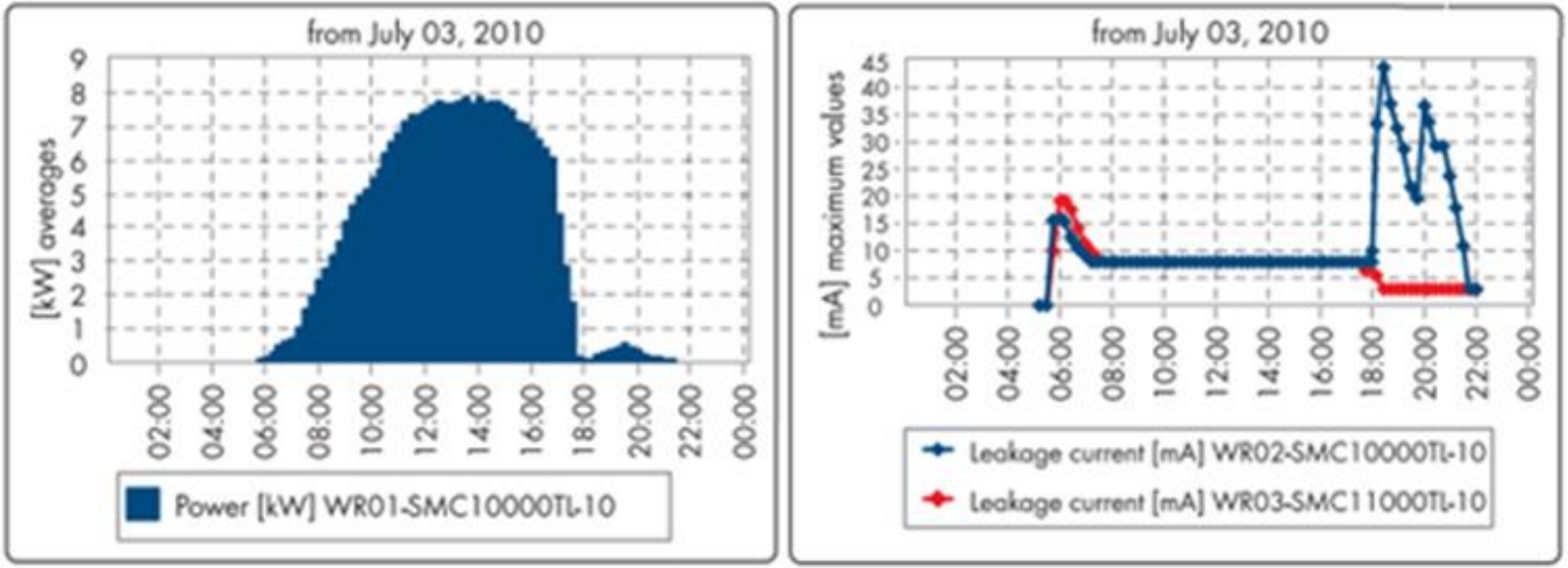
UTICAJ JUTARNJE KONDENZACIJE na „STRUJU CURENJA“



Snimak ulazne DC snage i struje curenja na FN sistemu snage 10kW- uticaj jutarnje kondenzacije na FN panelima [REF]

REF: Leading Leakage Currents, Information on the design of transformer-less inverters of type Sunny Boy, Sunny Tripower, Sunny High power, SMA Leakage current-TI-en-26, Version 2.6, 2016,

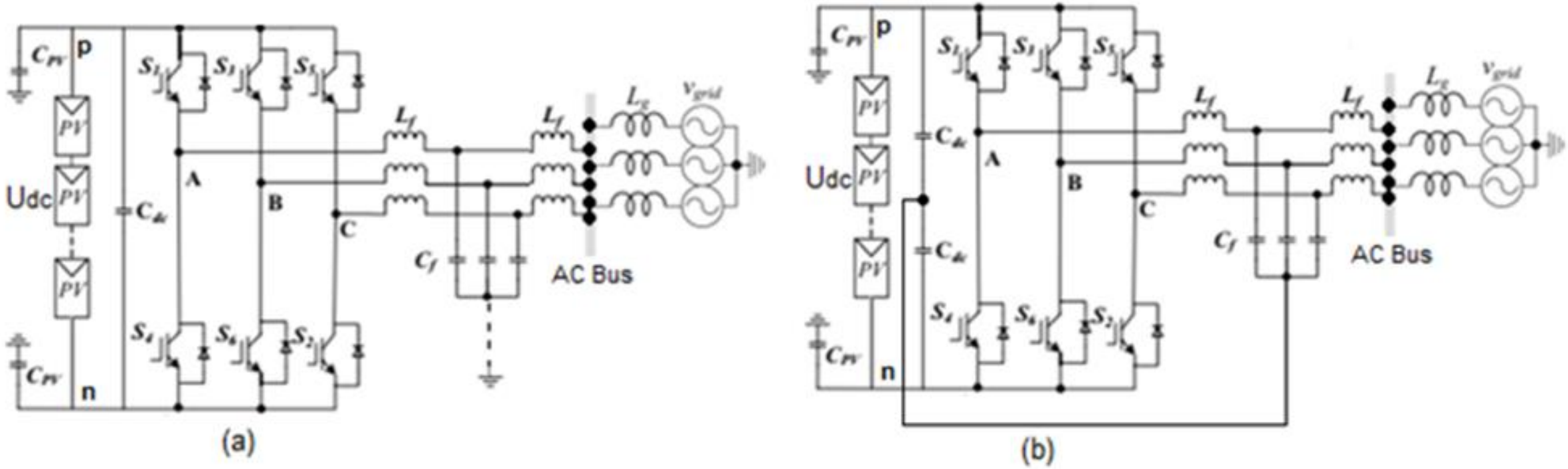
UTICAJ POPODNEVNE KIŠE na „STRUJU CURENJA“



Snimak ulazne DC snage i struja curenja na FN sistemu snage 10kW- uticaj popodnevne intenzivne kiše na FN panelima; za dva tipa invertora SMC1000TL i SMC11000TL (REF)

REF: Leading Leakage Currents, Information on the design of transformer-less inverters of type Sunny Boy, Sunny Tripower, Sunny High power, SMA Leakage current-TI-en-26, Version 2.6, 2016,

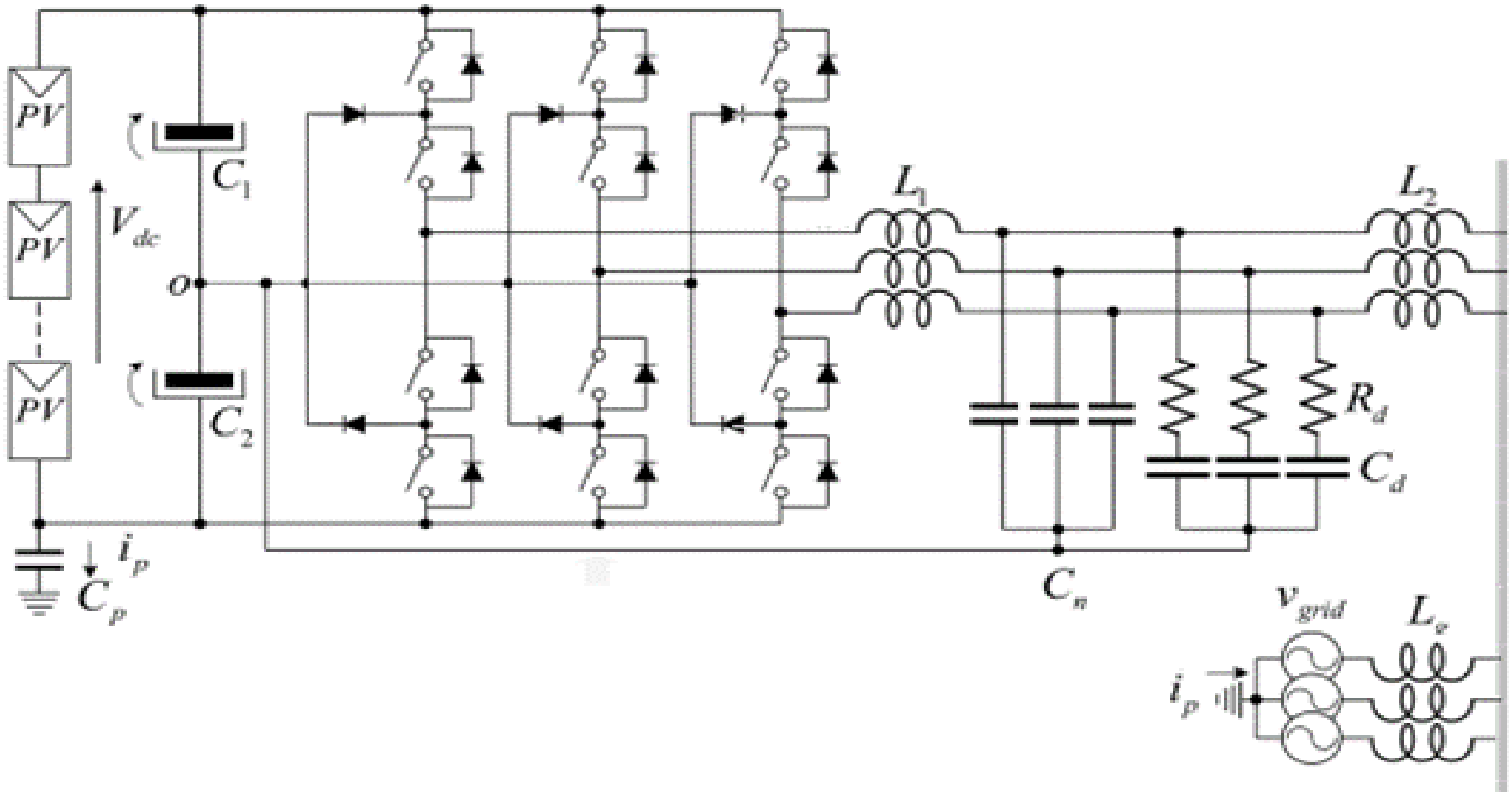
KONTROLA i OGRANIČENJE „STRUJA CURENJA“- putem invertorske topologije sa dva nivoa i L-C filtrom



Kontrola i ograničenje struje curenja u trofaznim FN invertorima; (a) sa klasičnim LCL filterom, (b) sa MLCL filterom

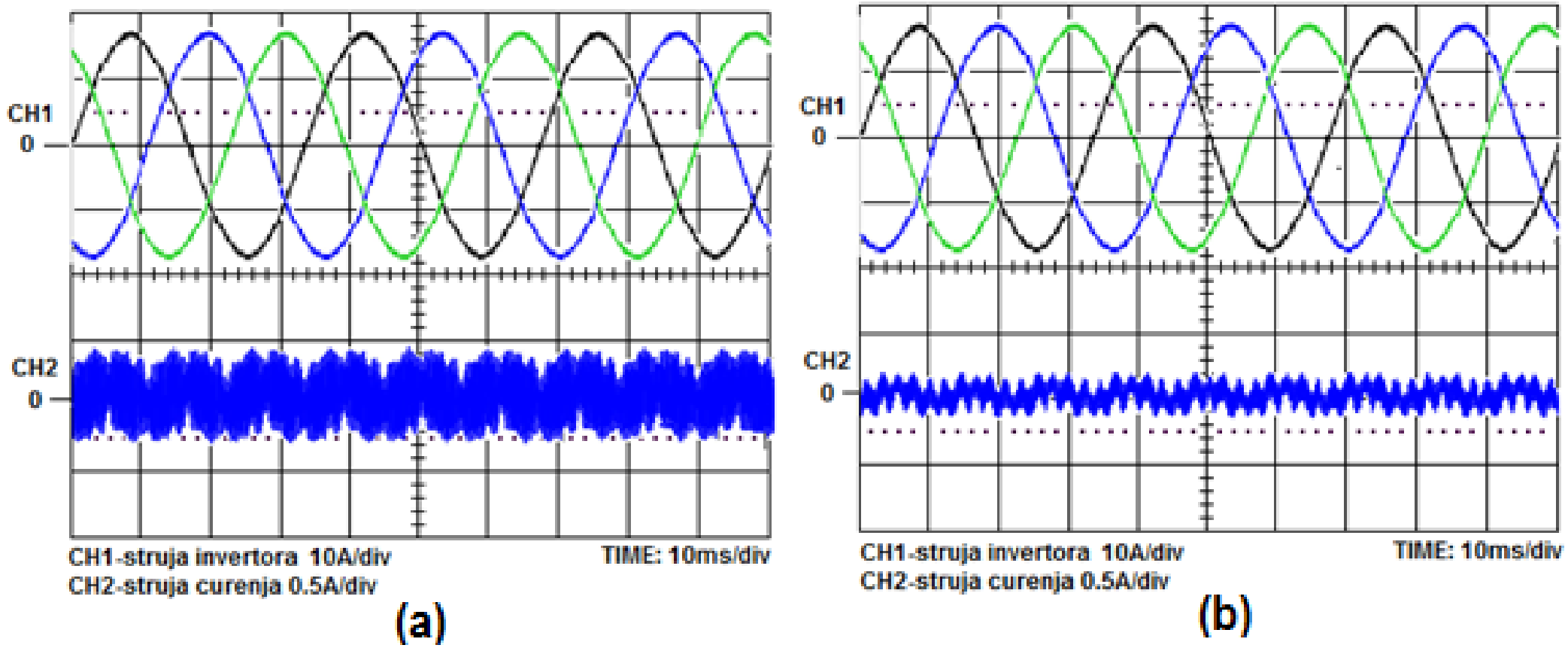
NAPOMENA. Detaljnije objašnjenje je dato u radu

KONTROLA i OGRANIČENJE „STRUJA CURENJA“- putem invertorske topologije sa tri nivoa i modifikovanim L-C-L filtrom



Kontrola i ograničenje struje curenja u trofaznom FN invertoru sa tri nivoa priključenim na mrežu preko MLCL filtera sa pasivnim prigušenjem

KONTROLA i OGRANIČENJE „STRUJA CURENJA“- EKSPERIMENT



Snimak izlaznih struja trofaznog NPC invertora sa tri nivoa i struje curenja za slučaj (a) otpornosti od 10Ω u MLCL filtru sa pasivnim omskim prigušenjem, (b) za slučaj otpornosti od 1Ω u MLCL filtru sa pasivnim omskim prigušenjem

ZAKLJUČAK

- U predavanju je dat pregled nekih tipičnih eksploatacionih problema koji se mogu javiti u toku rada FNE, pri čemu je naglasak dat na uređaje energetske elektronike, odnosno DC/AC pretvarače (invertore).
- Razmotreni su termički problemi rada pri čemu su prikazani eksperimentalni rezultati nekih karakterističnih termovizijskih snimaka na FNE snaga 500kW i 10MW.
- Razmotren je uticaj topologija FN invertora sa dva i tri nivoa (tzv. „multilevel“) i njihov uticaj na elektroenergetsku mrežu u pogledu viših harmonika struje. Ubrizgavanje viših harmonika struje utiče na izobličenje napona na priključnim NN sabirnicama i može dovesti do ugrožavanja pouzdanog rada ostalih uređaja i potrošača koji su vezani na ove sabirnice.
- Poseban naglasak je dat na uzrocima nastajanja DC komponente struje u FN invertorima i njen uticaj na energetske transformatore u distributivnoj EEM.
- Na kraju je istaknut problem parazitne kapacitivnosti FNE koja nastaje kao posledica konačnih i ne tako malih dimenzija postrojenja, kao i njen uticaj na rad FN invertora. Dat je i prikaz nekih karakterističnih rezultata.
- Takođe su za jedan FN invertor snage 100kW prikazana dva eksperimentalna rezultata merenja parazitne struje (za slučaj direktno vezanog invertora na mrežu bez prigušnog kola i sa prigušnim kolom).

ZAHVALNICA

Ova studija je nastala u okviru istraživanja koja su delom finansirana od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za 2025., Ugovor pod evidencionim brojem 51-03-136/2025-03/200034 od 04.02.2025.

Република Србија

МИНИСТАРСТВО НАУКЕ, ТЕХНОЛОШКОГ РАЗВОЈА И ИНОВАЦИЈА

HVALA NA PAŽNJI !!!

PITANJA ??

Dr Željko Despotović, dipl.el.inž.
zeljko.despotovic@pupin.rs

institut MIHAJLO PUPIN

powerplants2025

06. Novembar 2025.