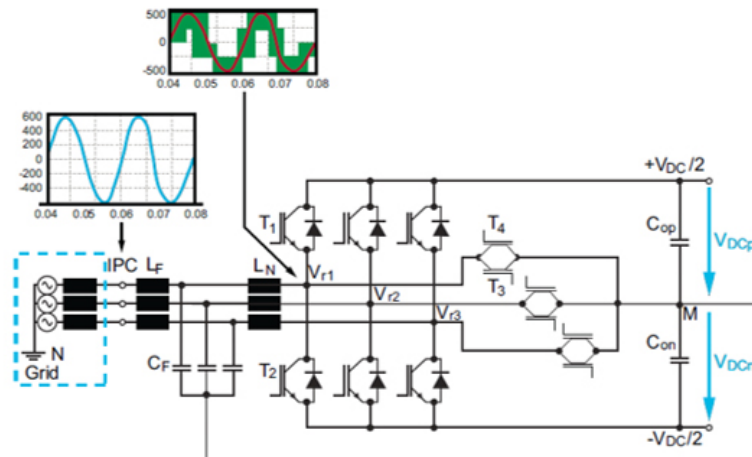
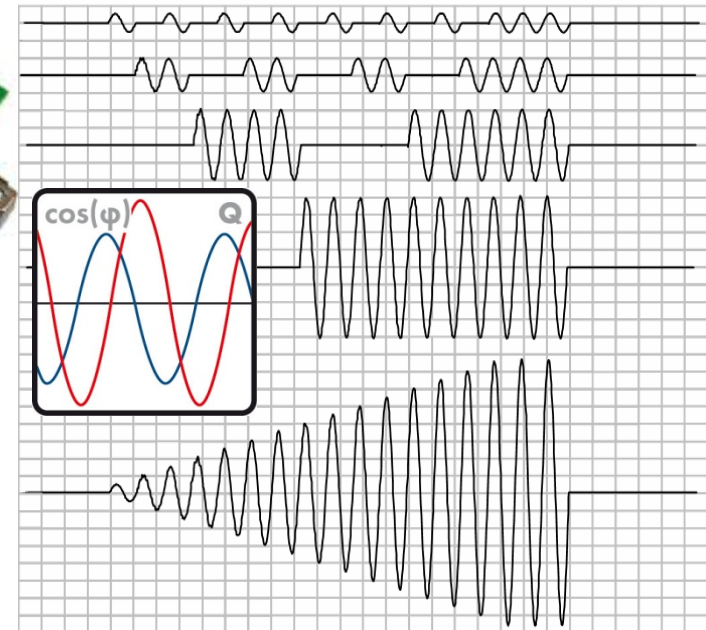




# ENERGETSKI PRETVARAČI ZA DINAMIČKU KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE

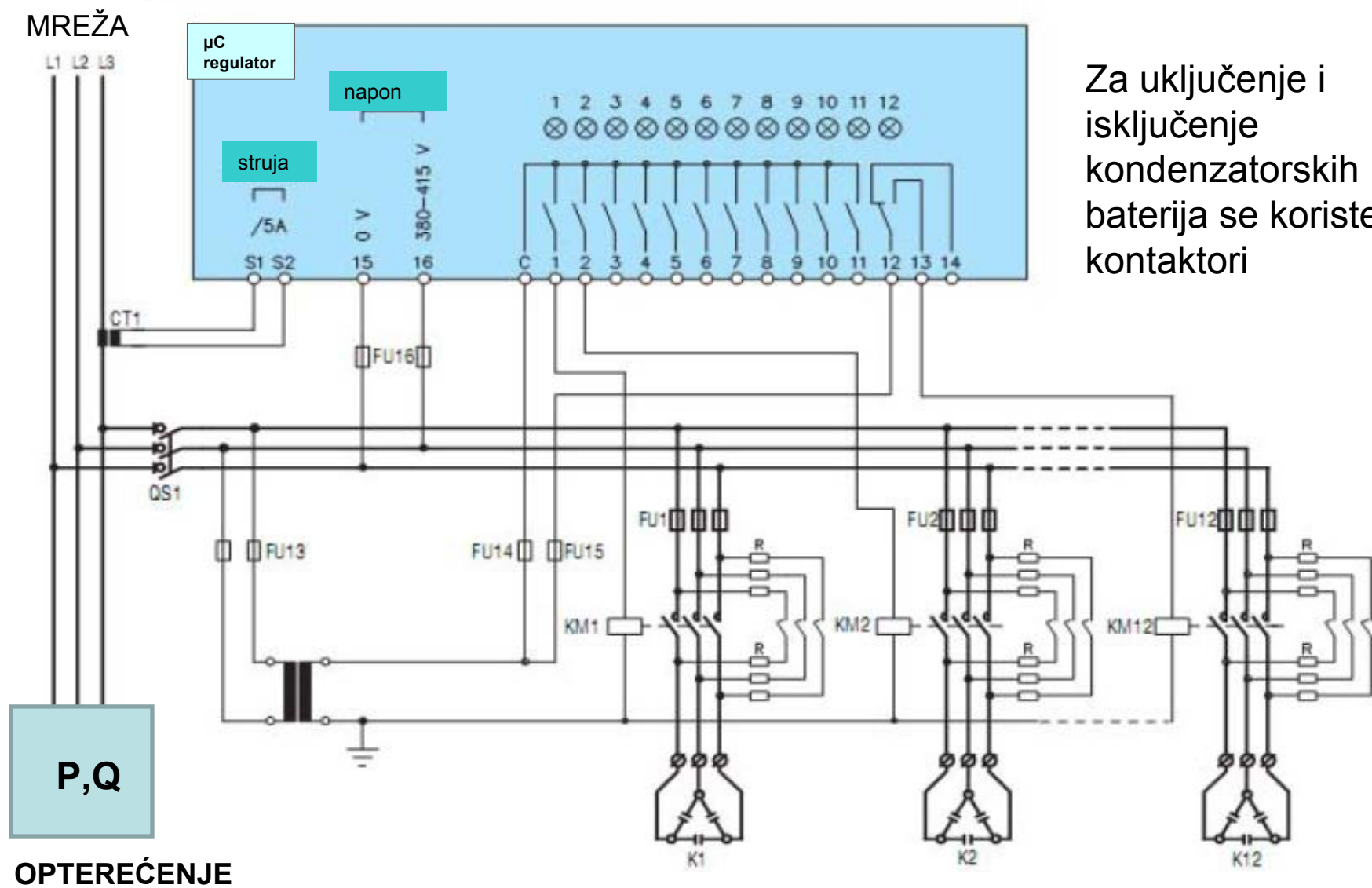


**Predmetni profesor:**  
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

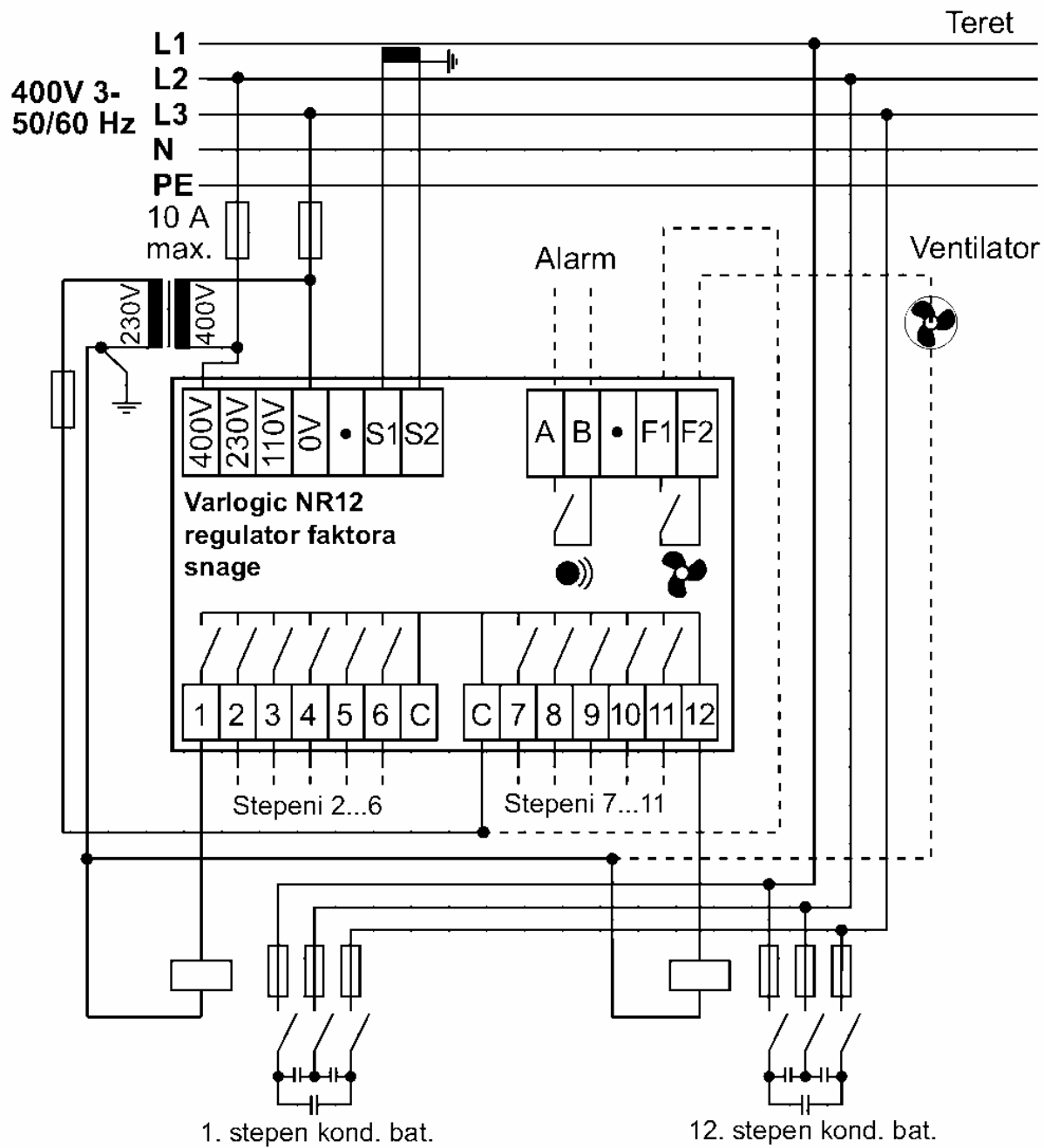
# UVOD

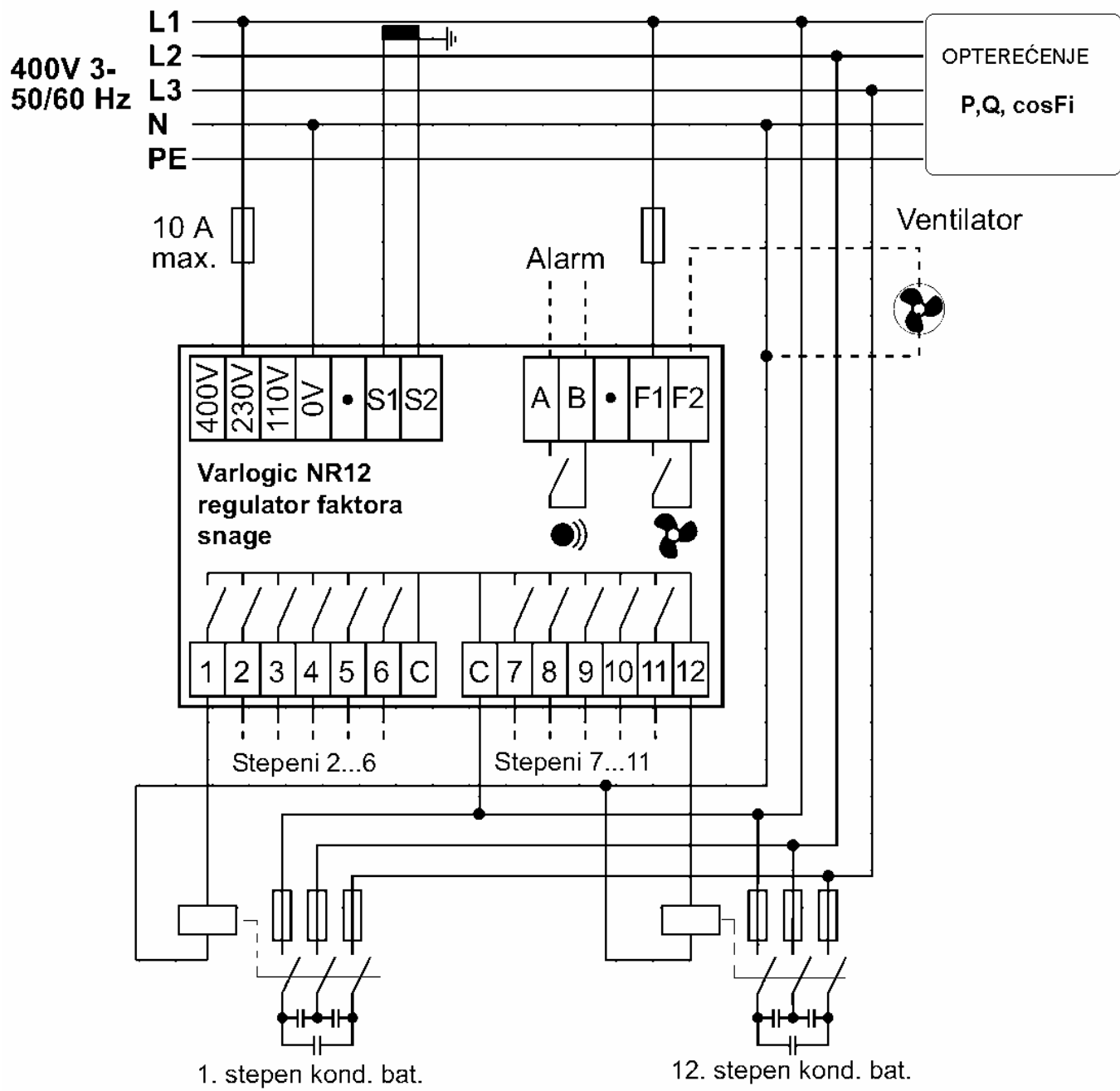
- Nedostatak centralne statičke kompenzacije je nemogućnost upravljanja faktorom snage u uslovima promenljivog opterećenja
- Da bi se faktor snage posmatranog postrojenja prema priključnoj mreži održavao na zahtevanoj vrednosti (tipično 0,95) pri različitim režimima rada i opterećenjima potrebno je vršiti 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





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 :  $Q_2 = Q_1, Q_3 = Q_1, \dots, Q_n = Q_1$

1.1.2.2.2.2 :  $Q_2 = Q_1, Q_3 = 2Q_1, Q_4 = 2Q_1, \dots, Q_n = 2Q_1$

1.2.3.4.4.4 :  $Q_2 = 2Q_1, Q_3 = 3Q_1, Q_4 = 4Q_1, \dots, Q_n = 4Q_1$

1.2.4.8.8.8 :  $Q_2 = 2Q_1, Q_3 = 4Q_1, Q_4 = 8Q_1, \dots, Q_n = 8Q_1$

## 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

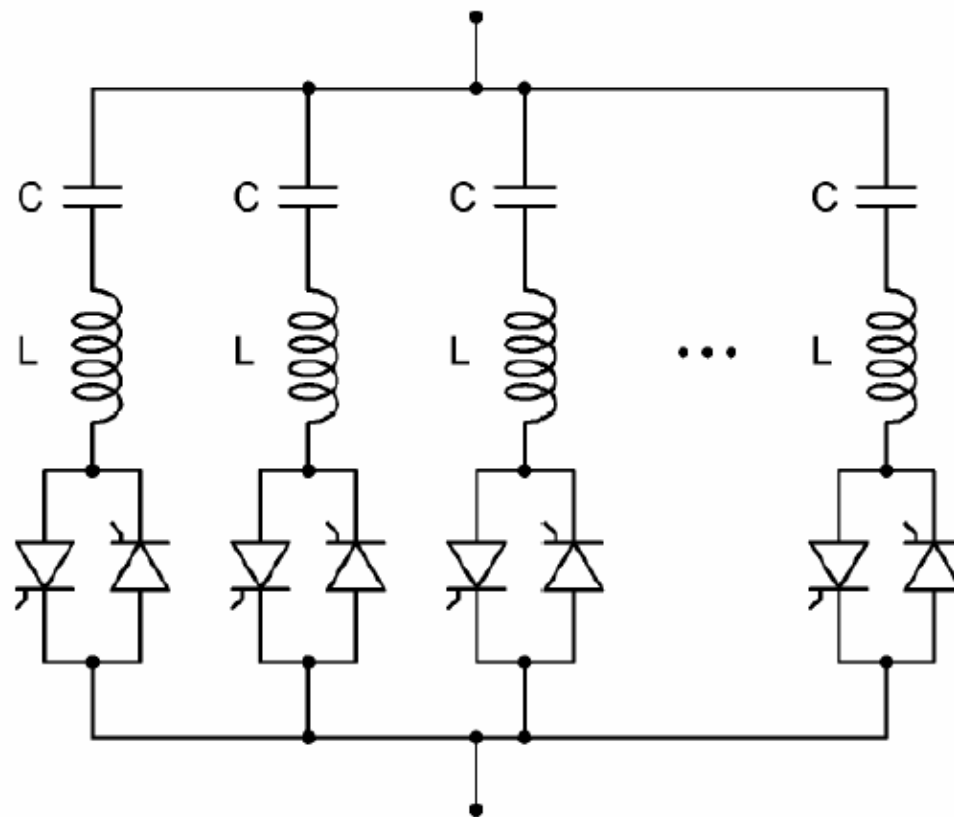
Kombinacije	Broj iskorišćenih izlaza regulatora											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.1.1.1.1.1...	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.1.2.2.2.2...	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
1.2.2.2.2.2...	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
1.1.2.3.3.3...	1	2	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31
1.2.3.3.3.3...	1	3	6	9	12	15	18	21	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

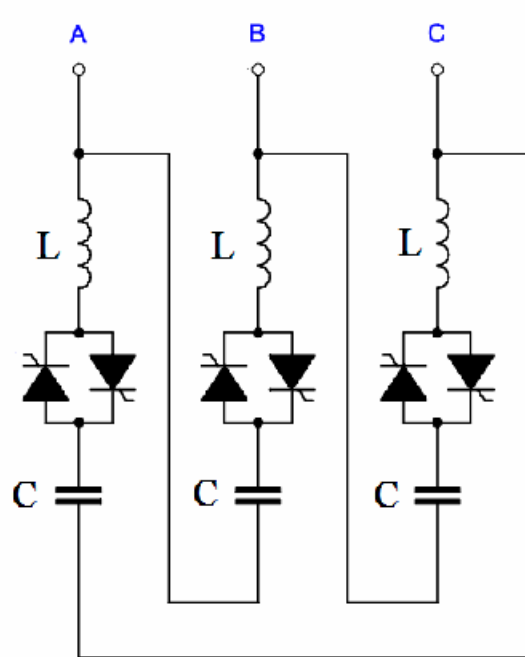
- Uključenje / isključenje kondenzatora se vrši kontaktorima
- Ako promene opterećenja nisu brze i ako se ne zahteva brzo uključivanje i isključivanje kondenzatora (minimalni period 20 do 90 sekundi)
- Mehanička izdržljivost kontaktora je 5 do 10 miliona uključivanja).
- Ako je potrebno brzo i često 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)!!!**



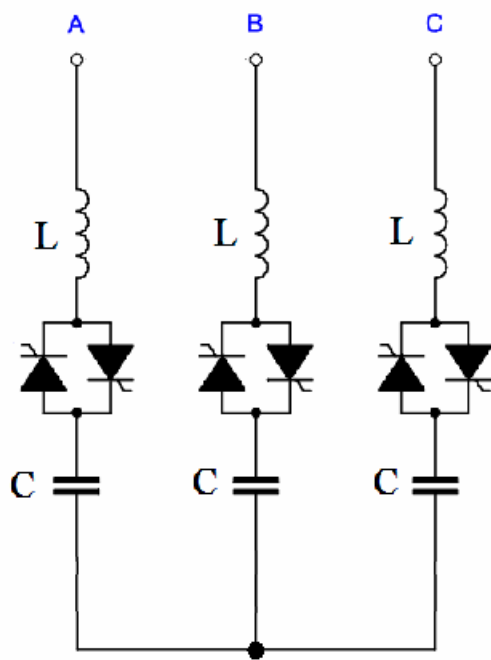
- Stepenasta dinamička kompenzacija reaktivne snage se najčešće realizuje pomoću tiristori kontrolisane kondenzatorske baterije (**TSC**–Thyristor **S**witched **C**apacitor)



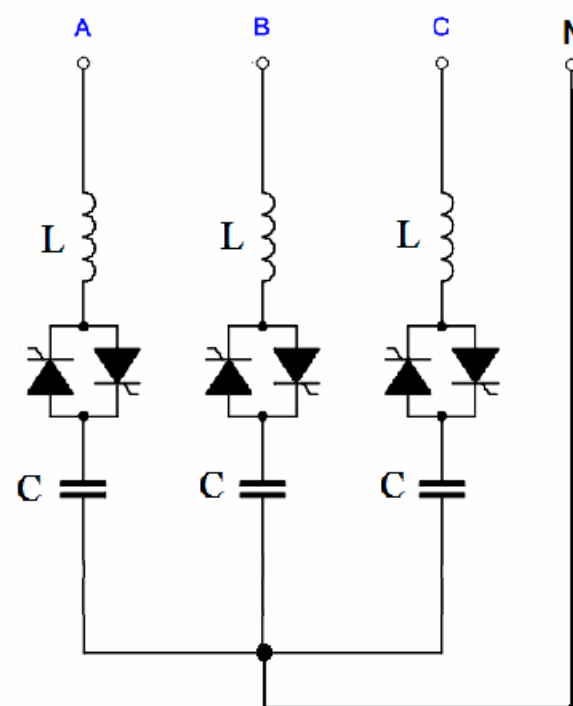
- Trofazni TSC (osnovni modul) se sastoji ustvari od tri pretvarača vezana najčešće u spregu "trougao" ili spregu "zvezda" (sa ili bez nultog provodnika)



sprega "trougao"

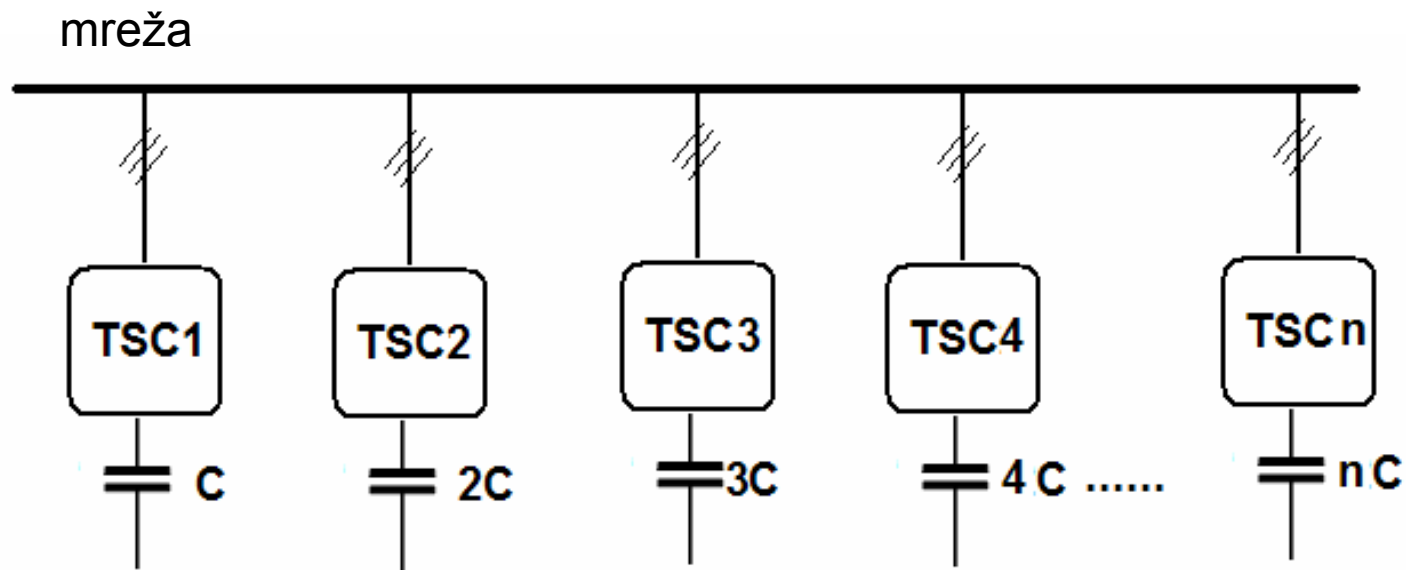


sprega "zvezda"  
bez nultog  
provodnika



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

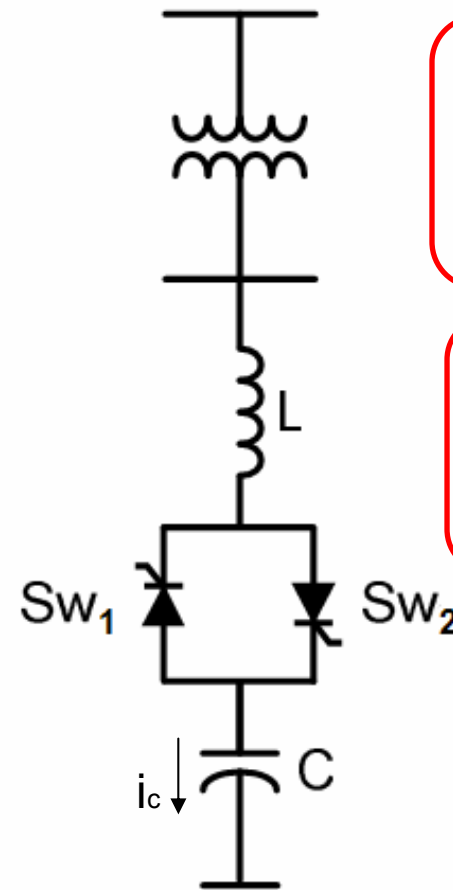


## PREDNOSTI TIRISTORA U ODNOSU NA KONTAKTORE U KOMPENZACIONIM KOLIMA REAKTIVNE SNAGE

- 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 uključanja 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 trenucima
- 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

$$\omega_r = 1/\sqrt{LC}$$

Napon na kondenzatoru u trenutku  $t=0+$

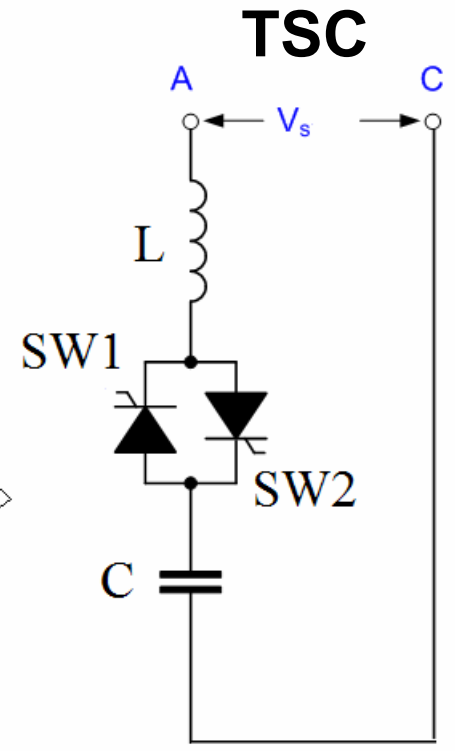
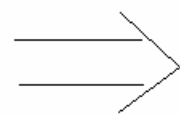
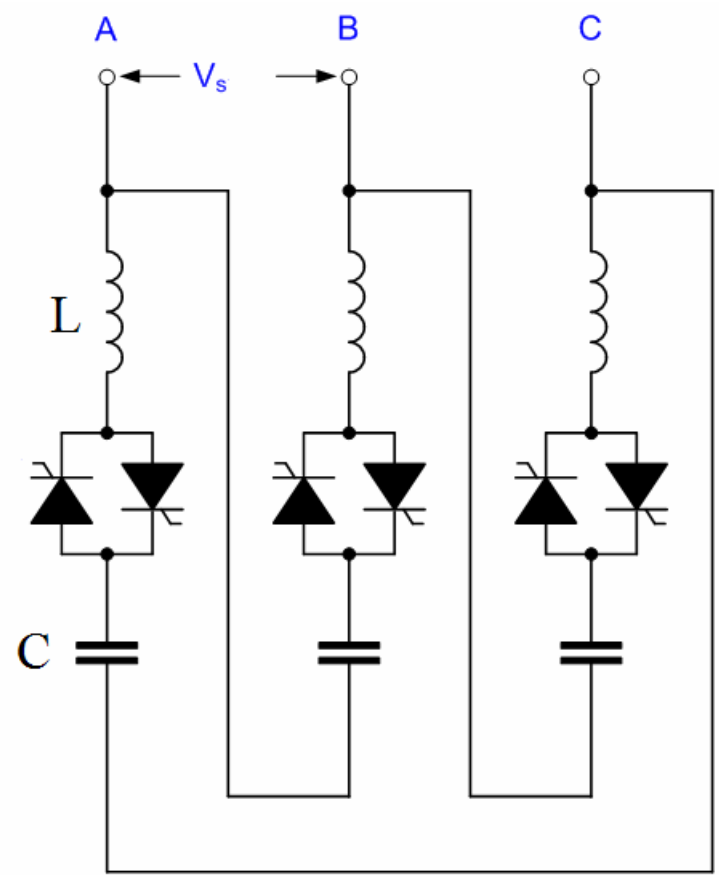
$\alpha$  Fazni ugao pri kojem se uključuje kondenzator

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  $i(t)=0$

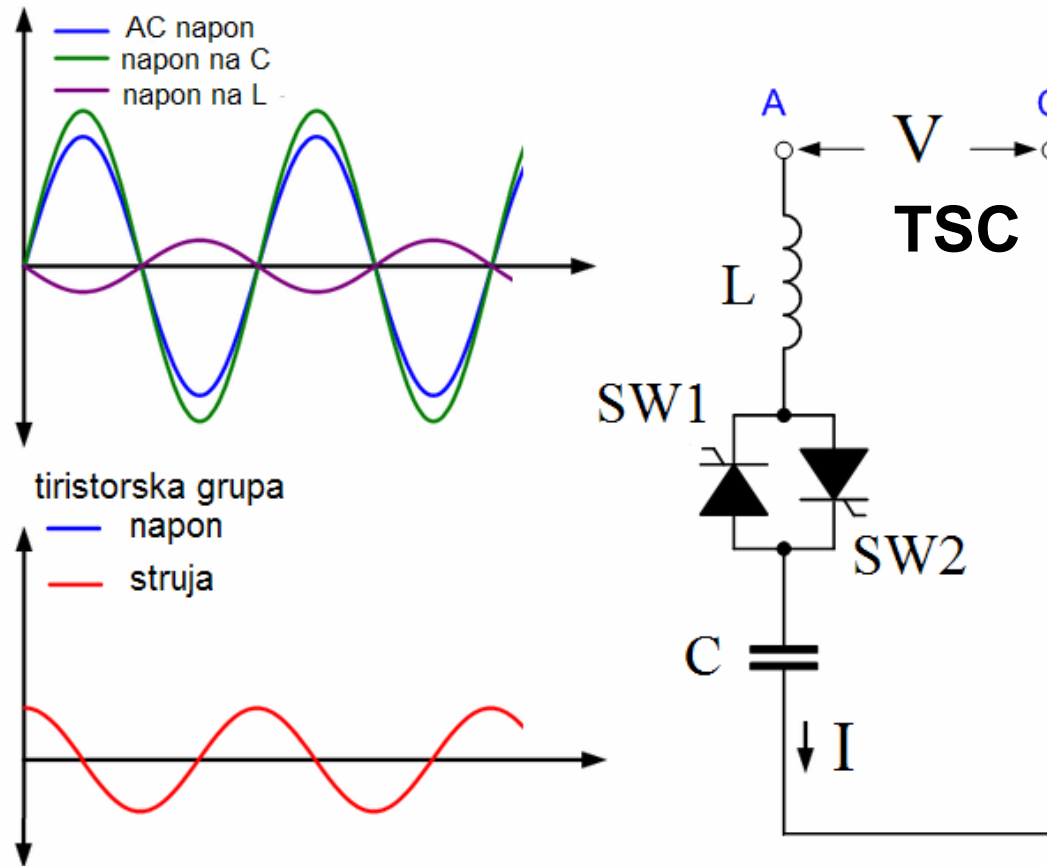
**POSMATRAJMO JEDNU FAZU TROFAZNOG TIRISTORSKOG  
PREKIDAČKOG KAPACTIVNOG KOLA**  
(Thyristor Switched Capacitor Circuit - TSCC)



ANALIZU SPROVODIMO ZA  
JEDNOFAZNO KOLO

- Kolo radi u on-off režimu
- Ustvari razlikujemo tri karakteristična režima rada kola

## USTALJENI REŽIM – tiristori SW1-SW2 uključeni



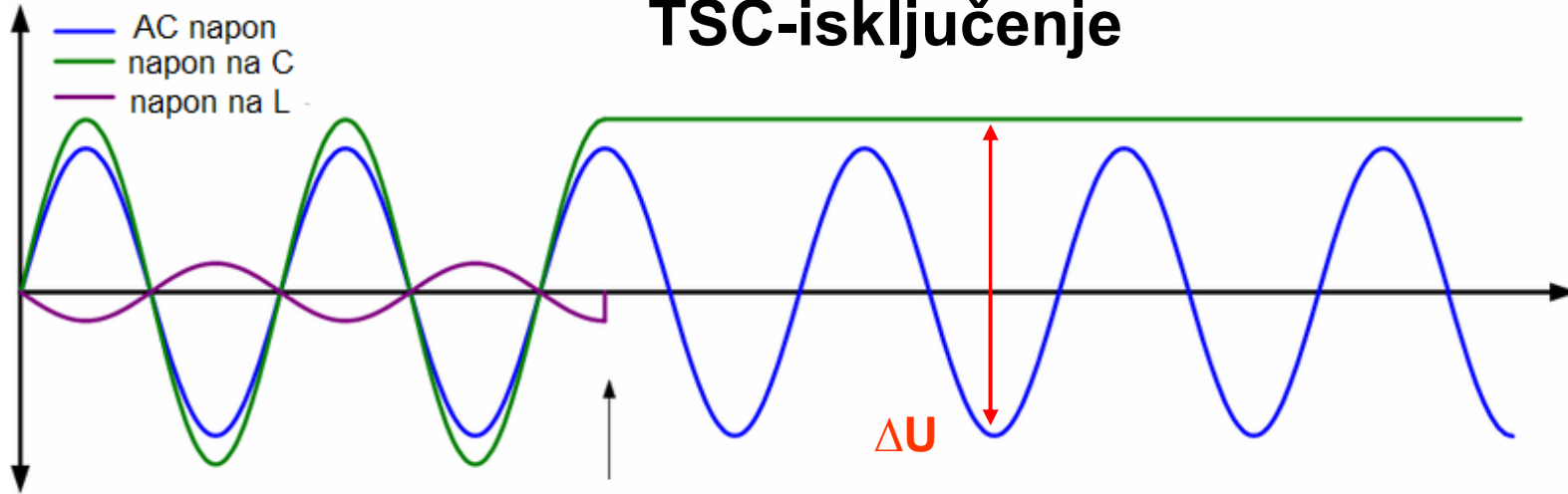
$$I = \frac{V}{X}$$

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

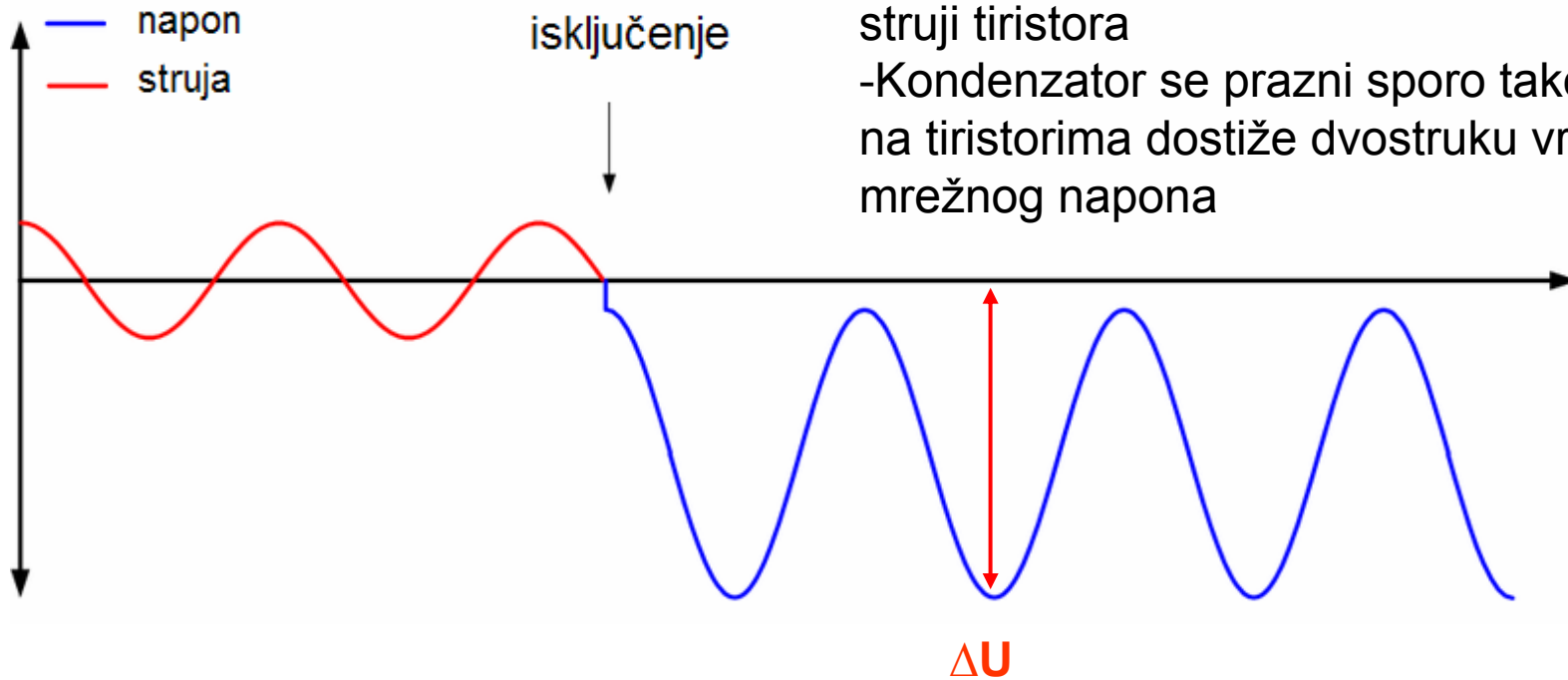
$$\omega_r^2 = \frac{1}{LC}$$

- Naponi na L i C su pomreni za  $\pi$  (ustvari u kontra fazi su)
- Struja u kolu je ograničena ukupnom impedansom  $X$
- Rezonantna učestanost je  $f_r = 150-250\text{Hz}$
- Izbor prigušnice je kompromis između njene veličine i zahteva za zaštitom tiristorske grupe prilikom uključanja kondenzatora
- Uključenje kondenzatora je direktno (kolo je tada u KRATKOM SPOJU)

# TSC-isključenje



tiristorska grupa



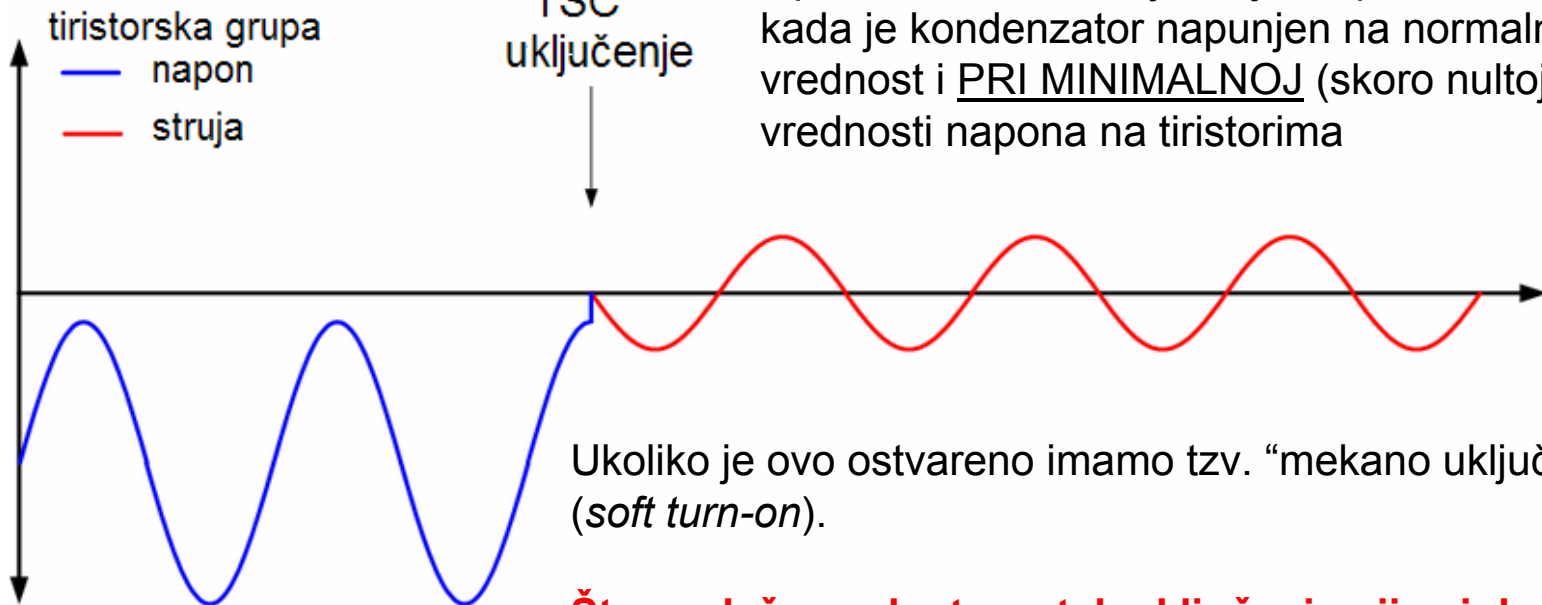
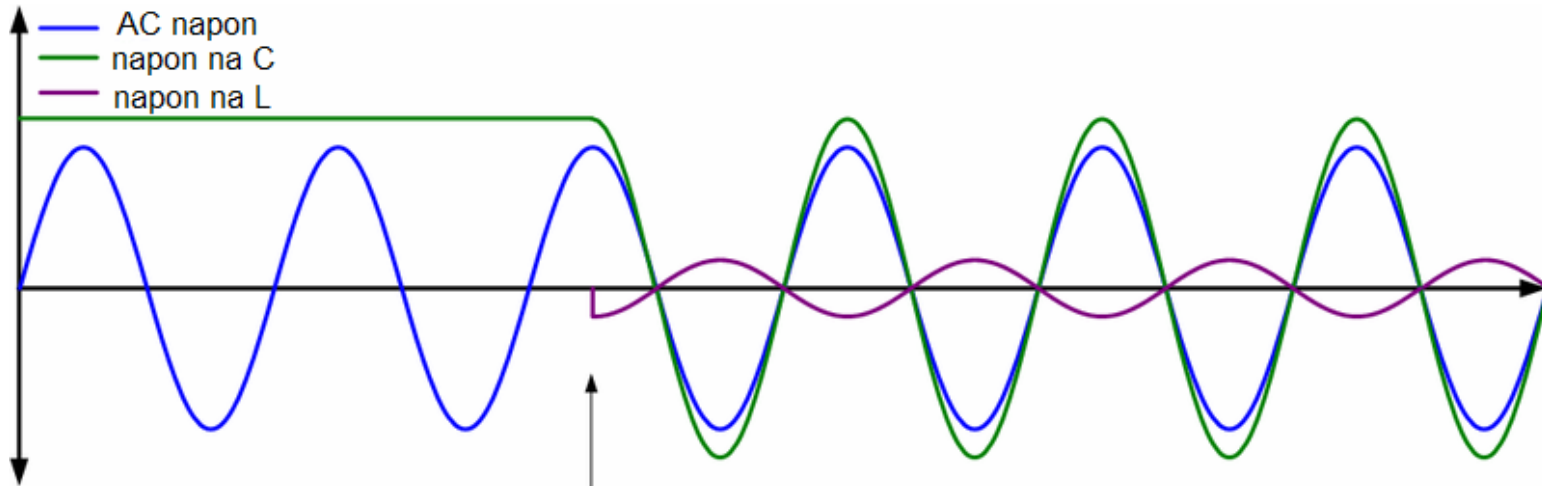
TSC  
isključenje

-TSC isključenje se ostvaruje pri nultoj struji tiristora

-Kondenzator se prazni sporo tako da napon na tiristorima dostiže dvostruku vrednost mrežnog napona



# TSC-uključenje



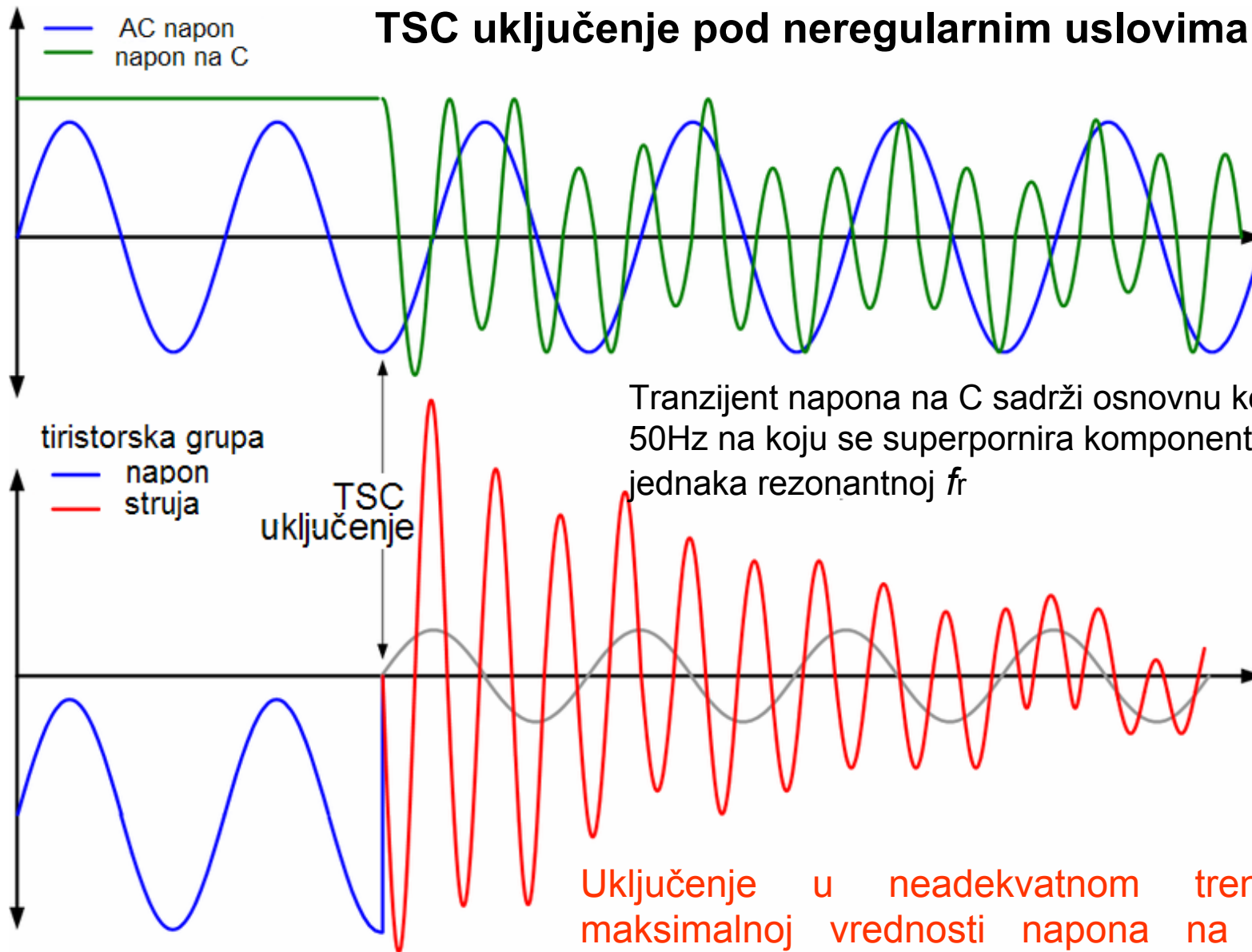
TSC  
uključenje

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??**

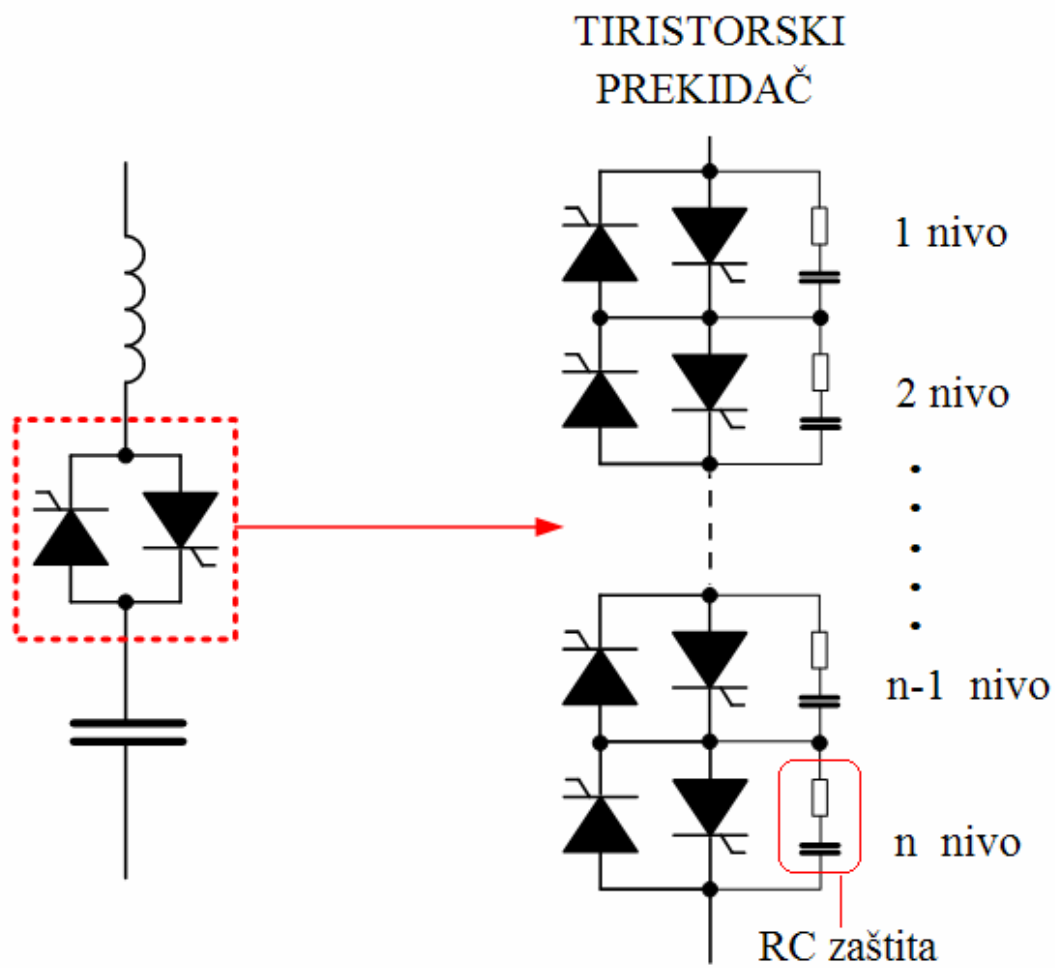
## TSC uključenje pod neregularnim uslovima



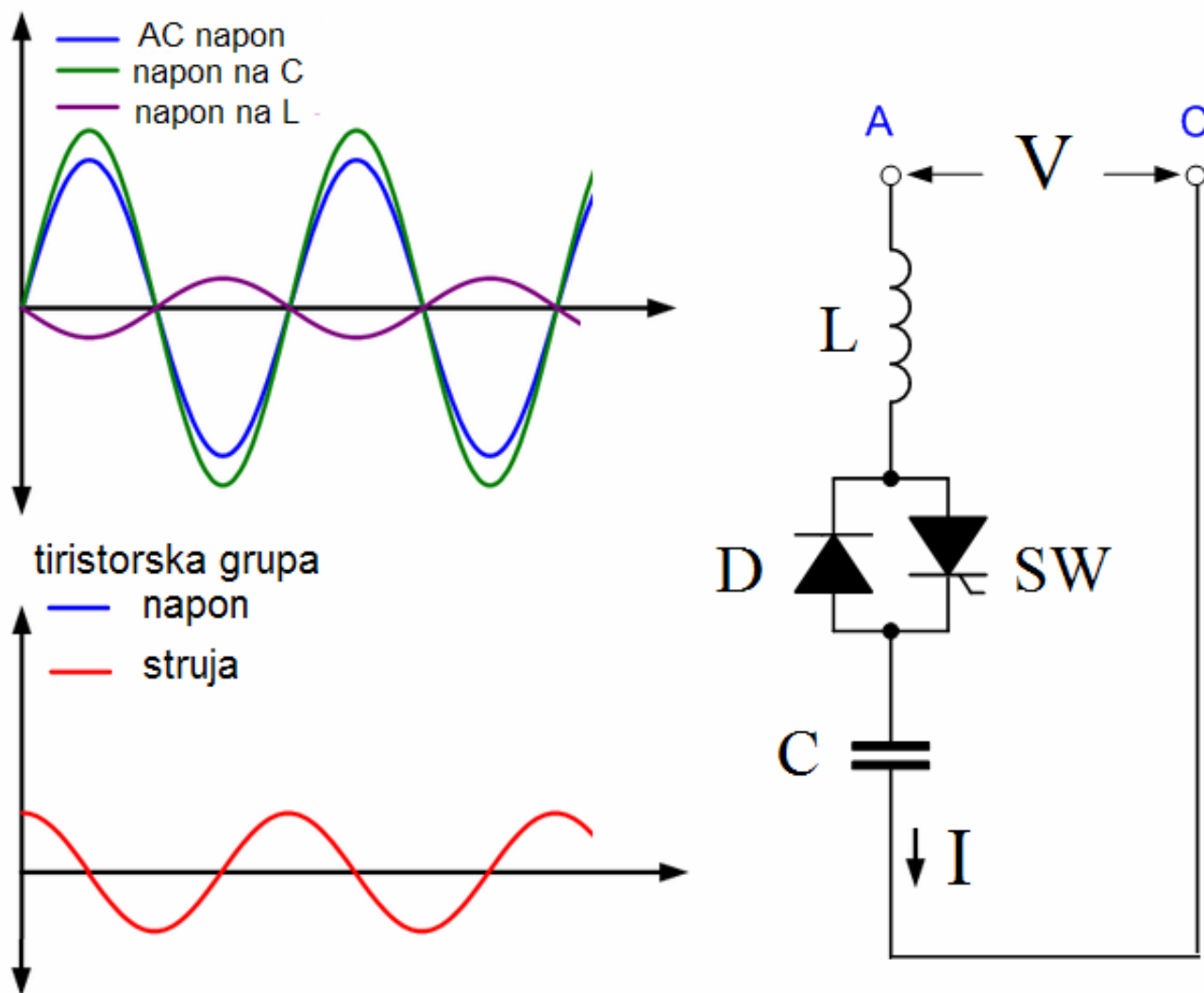
Tranzijent napona na C sadrži osnovnu komponentu 50Hz na koju se superponira komponenta učestanosti jednaka rezonantnoj  $f_r$

Uključenje u neadekvatnom trenutku (pri maksimalnoj vrednosti napona na tiristorima) dovodi do neželjenih tranzijenata u naponu kondenzatora i što je još nepovoljnije, u struji!!!!

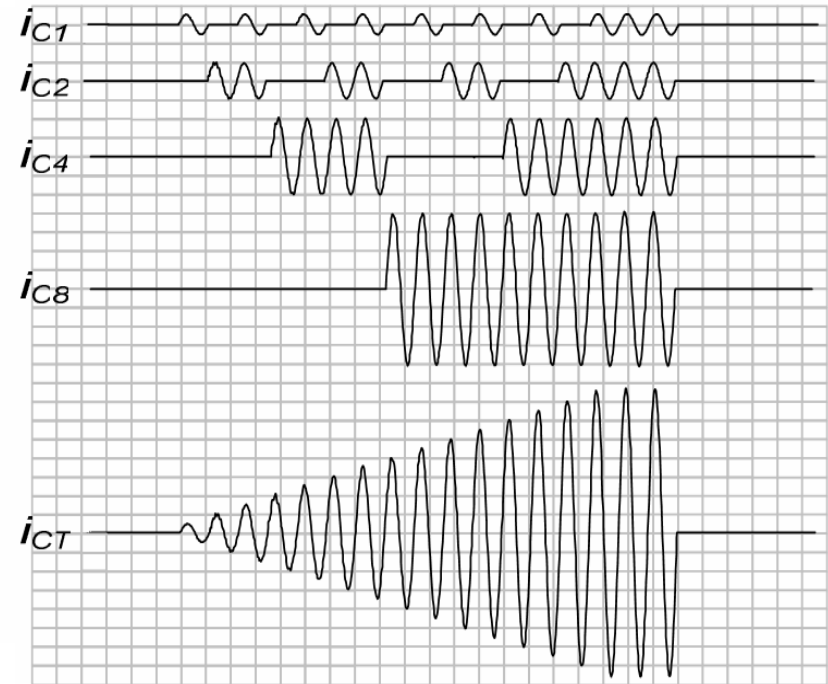
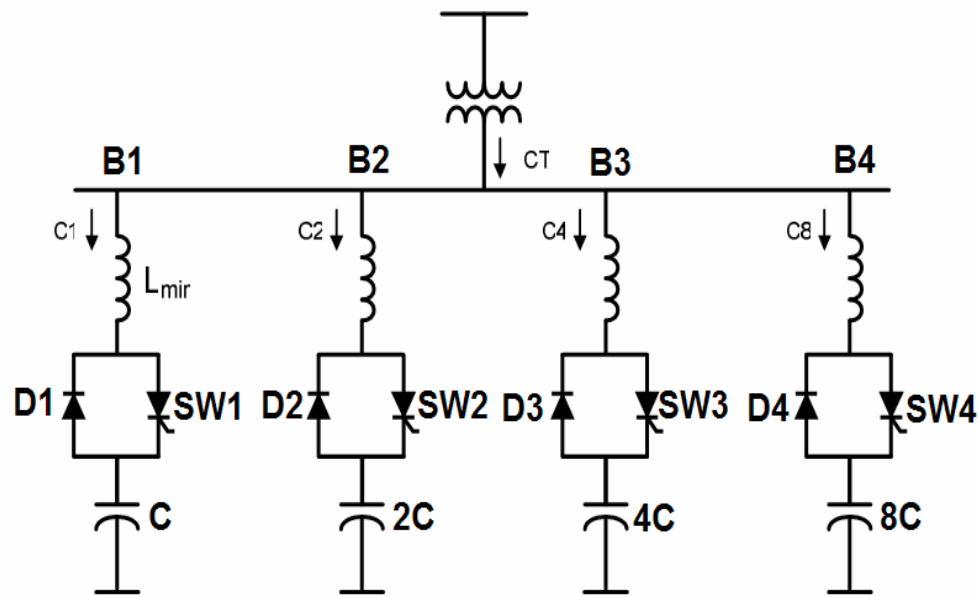
- ZBOG VIŠESTRUKO VEĆIH VREDNOSTI NAPONA OD MREŽNIH NA TIRISTORSKOJ GRUPI ČESTO SE KORISTI PREKIDAČ PRILAGOĐEN ZA VISOKONAPONSKI RAD .
- ON SE SASTOJI OD REDNE VEZE VIŠE ANTIPARALELNIH GRUPA TIRISTORA



PRETHODNO POMENUTE FUNKCIJE “MEKANO” TSC  
UKLJUČENJA I ISKLJUČENJA SE MOGU OSTVARITI SA  
**JEDNIM TIRISTOROM I JEDNOM DIODOM**



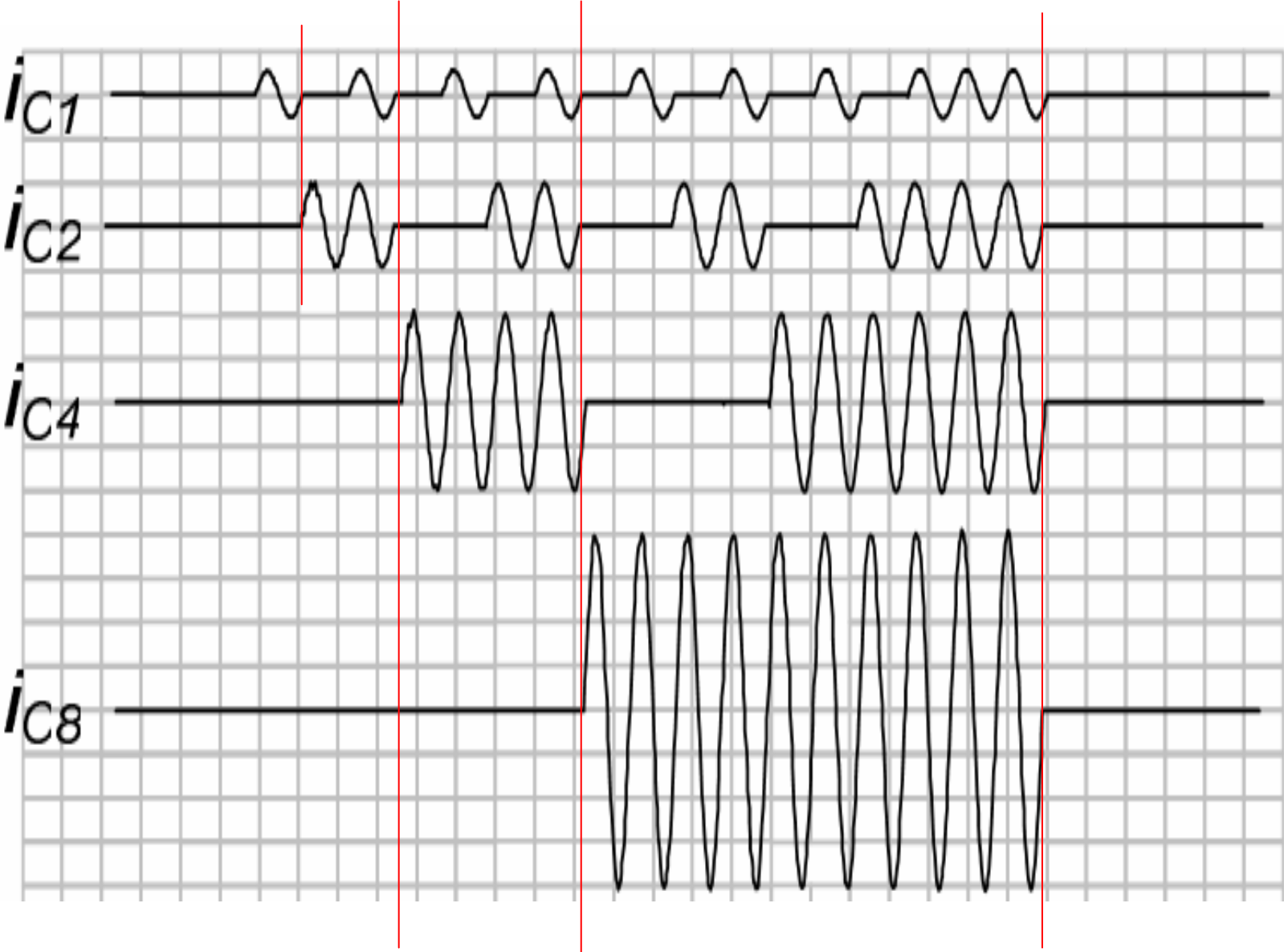
# STEPENASTO UKLJUČENJE KONDENZATORA SA TIRISTORSKO-DIODNIM PREKIDAČKIM ELEMENTOM



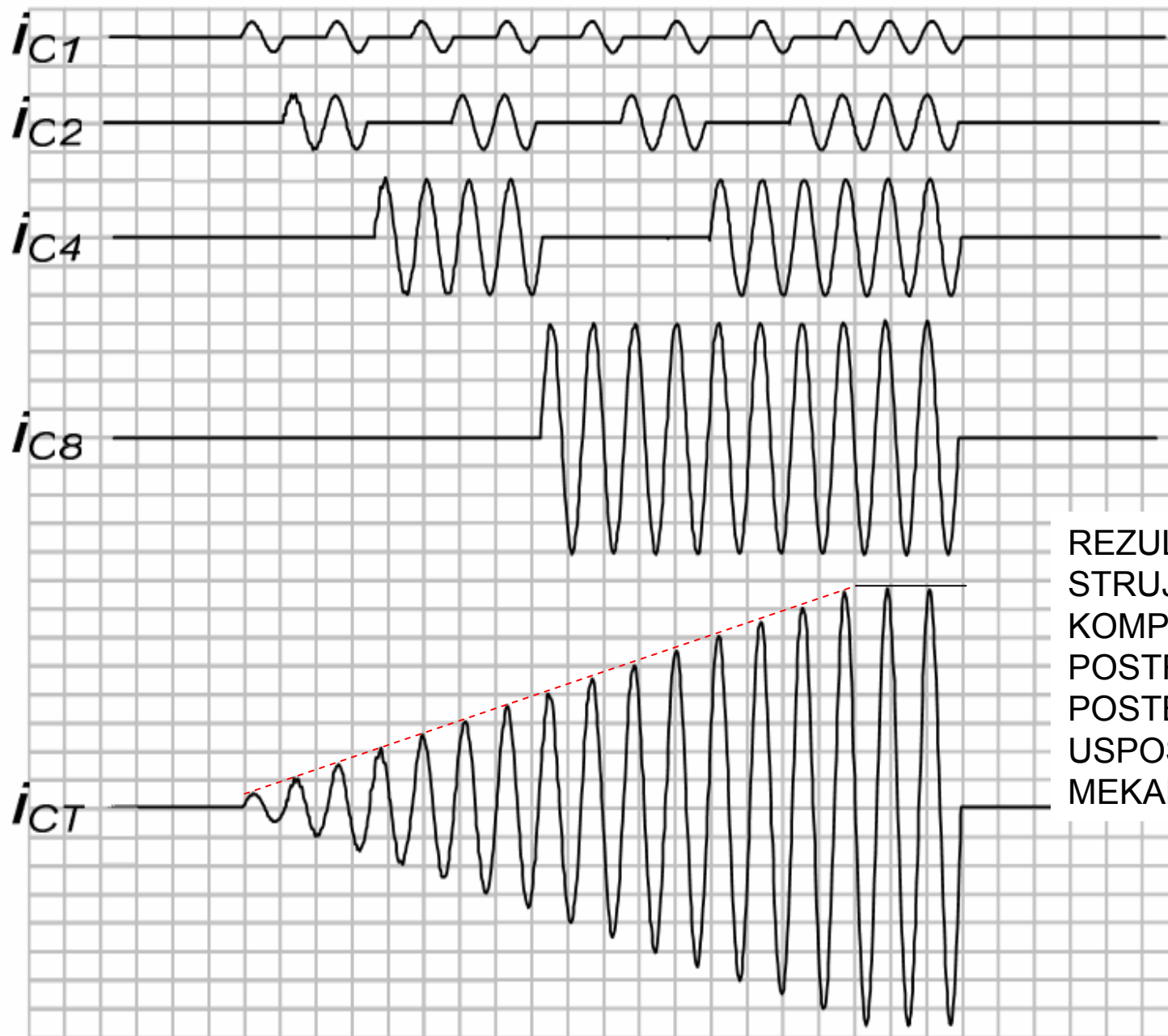
-Ovim načinom stepenaste regulacije postiže se kontinualna regulacija ukupne kapacitivne struje  $i_{CT}$

-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

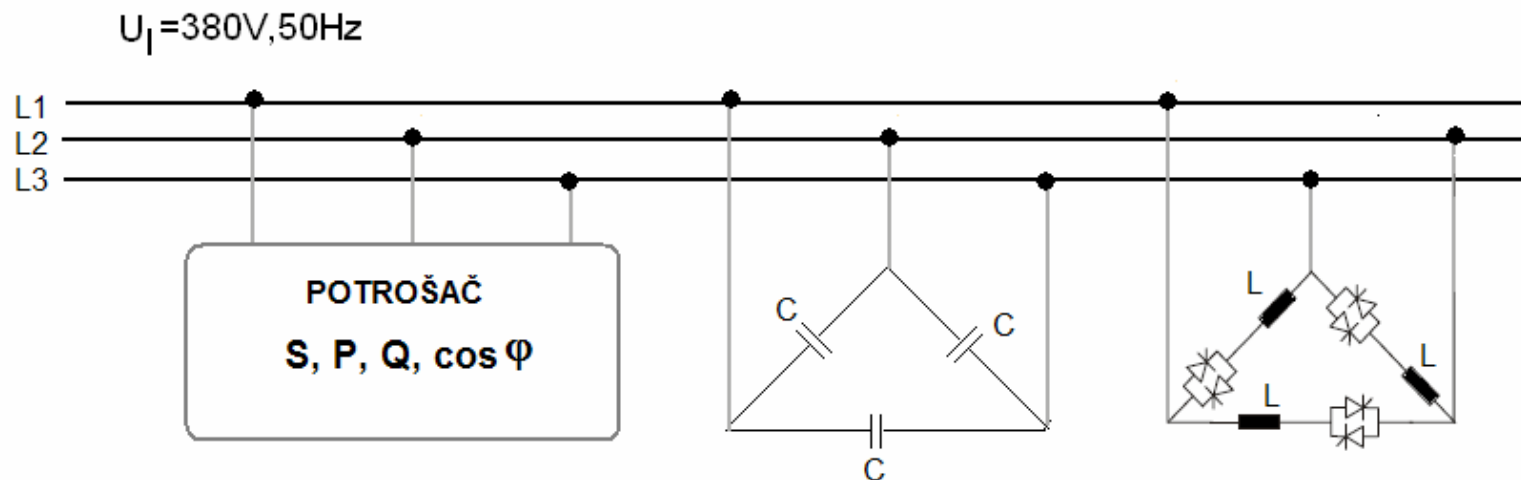


Kako izgleda ukupna struja koju troši postrojenje?



REZULTANTNA  
STRUJA  
KOMPENZACIONOG  
POSTROJENJA SE  
POSTEPENO  
USPOSTAVLJA-  
MEKANI "SOFT" START

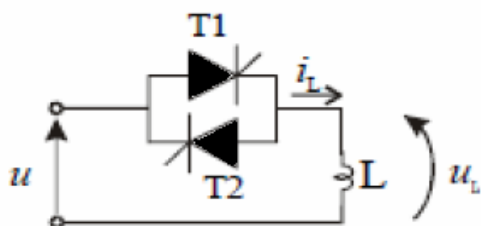
# TIRISTORSKI KONTINUALNI REGULATORI REAKTIVNE ENERGIJE (Thyristor Controlled Reactor-TCR)



- U slučaju da su dnevne promene induktivne komponente struje velike, paralelno opterećenju se može priključiti fiksna baterija kondenzatora dovoljno velike kapacitavnosti, 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

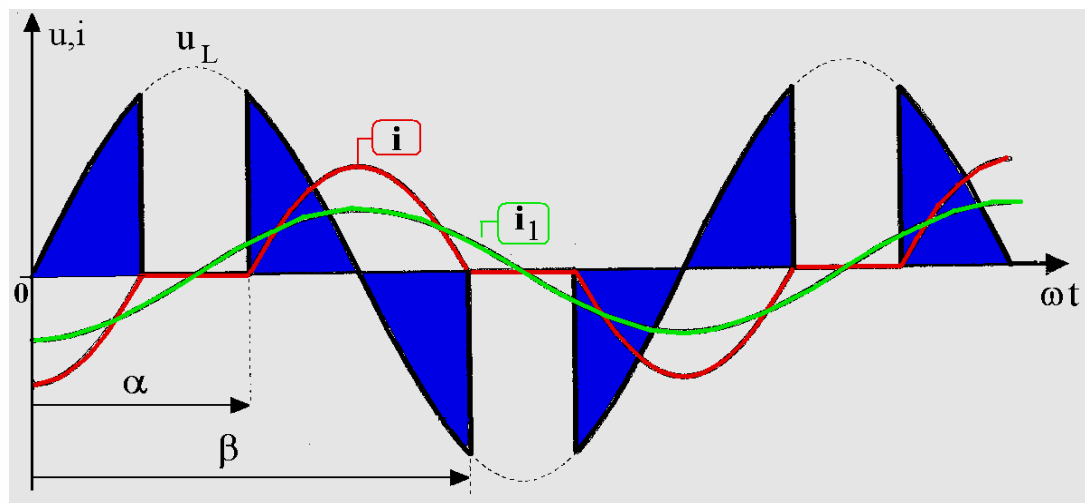
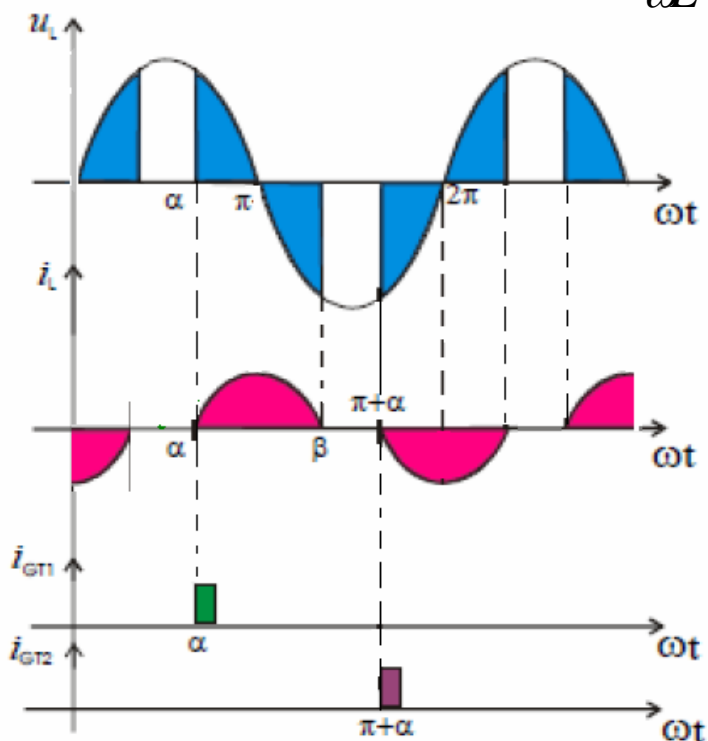


$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^t \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \cdot \int_{\alpha}^x \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin x \cdot dx = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (-\cos x)_{\alpha}^x = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U (\cos \alpha - \cos x)$$

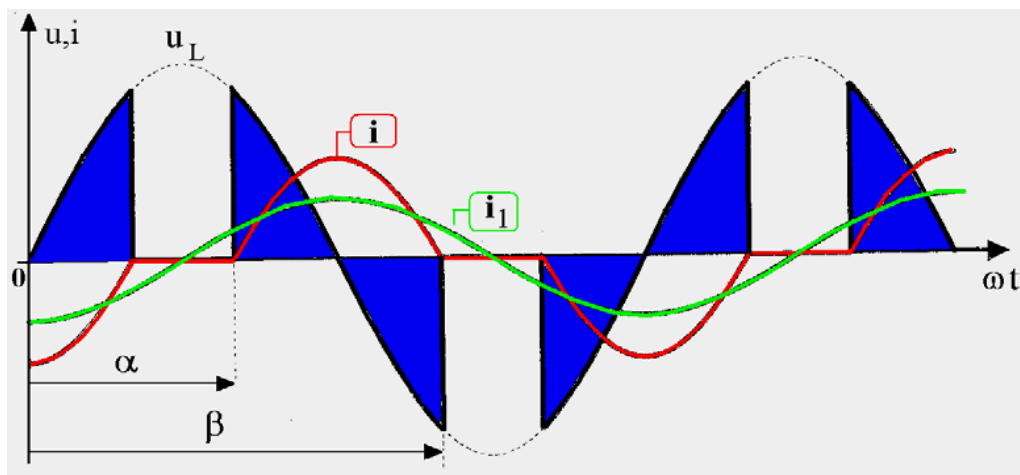
$$i_L(t) = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad 2\pi - \alpha \geq \omega t \geq \alpha$$

$$\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$$



osnovni harmonik struje - i1

# IZRAČUNAVANJE EFEKTIVNE VREDNOSTI STRUJE PRVOG HARMONIKA



$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \cdot \cos x dx = \frac{4}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot [\cos \alpha - \cos x] \cdot \cos x dx$$

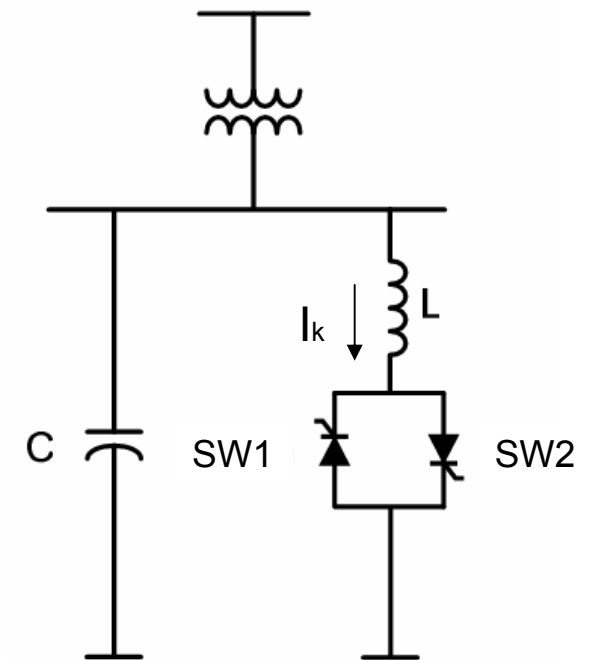
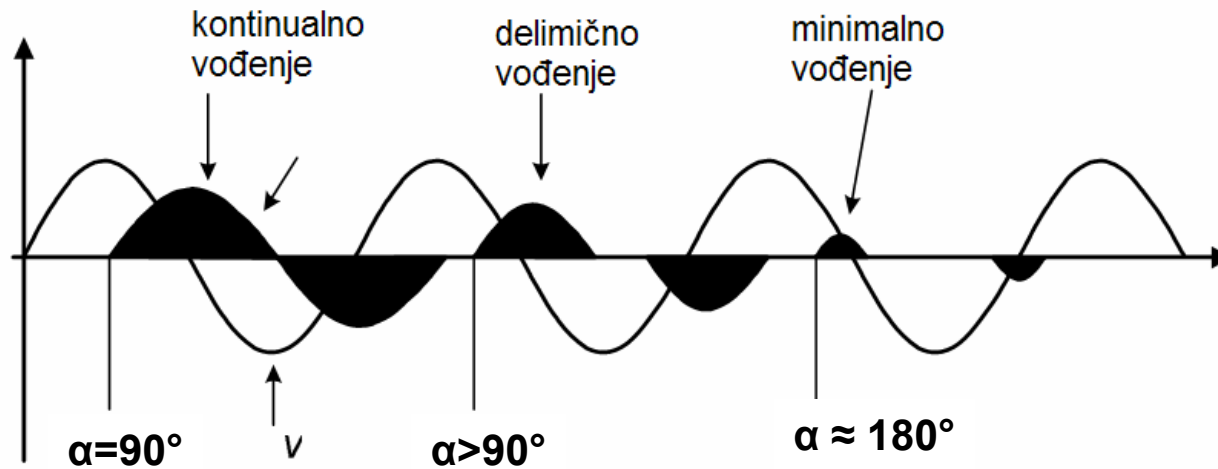
Amplituda osnovnog harmonika struje

$$A_1 = -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot \left[ 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

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

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \cos kx dx \quad A_k = -\frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L} \cdot \frac{\sin k\alpha \cdot \cos \alpha - k \cdot \cos k\alpha \cdot \sin \alpha}{k \cdot (k^2 - 1)}$$

uz uslov  $k > 1$

Neželjena harmonijska izobličenja potiču uglavnom od trećeg harmonika koji ima maksimalnu vrednost za

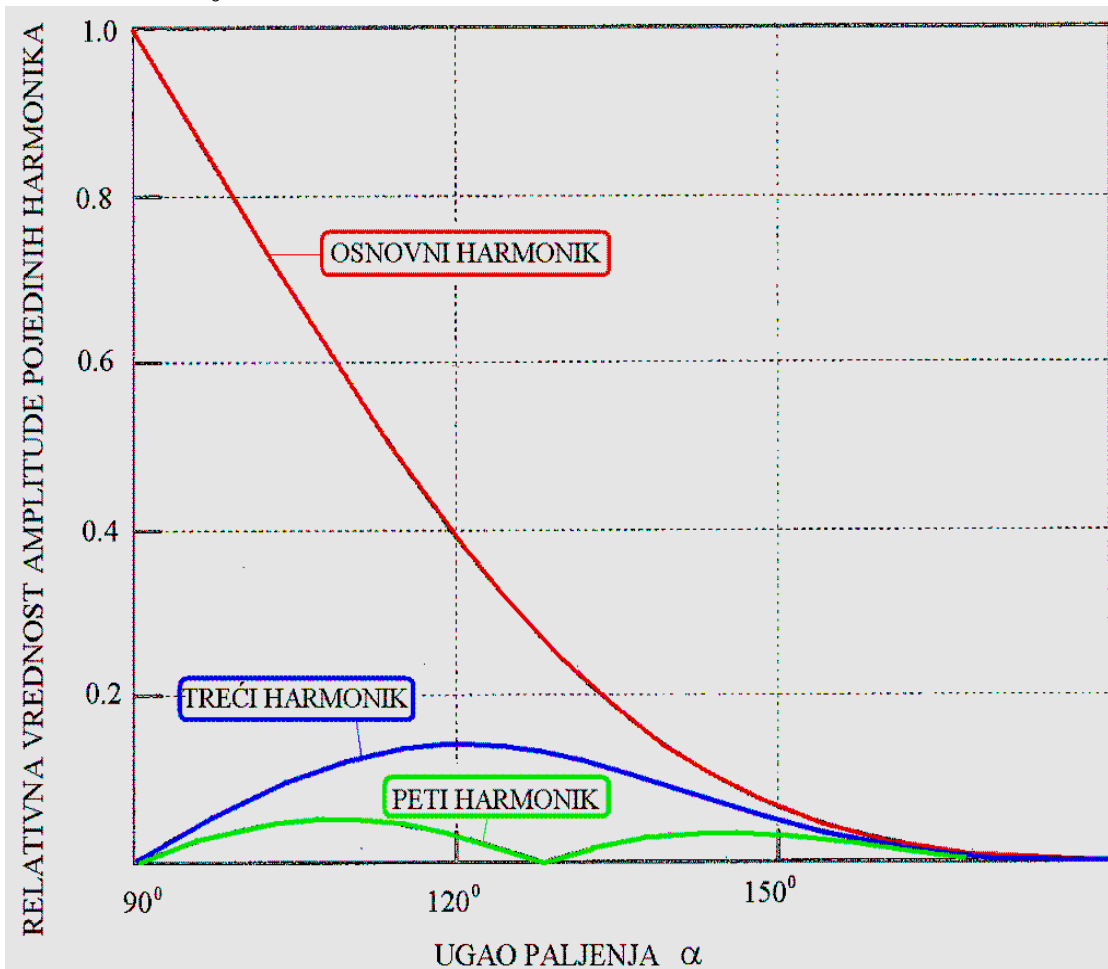
$$\alpha = 120^\circ$$

$$A_3 = A_{3MAX} = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138 \cdot \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}$$

$$I_3 = \frac{A_{3MAX}}{\sqrt{2}} = \frac{U}{\omega L} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138 \cdot \frac{U}{\omega L}$$

**EFEKTIVNA VREDNOST STRUJE TREĆEG HARMONIKA**

Šta je sa petim harmonikom?



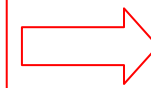
Sadržaj harmonika u struji kod monofaznog tiristorskog regulatora sa induktivnim opterećenjem

Za ugao upravljanja  $\alpha = 120^0$

efektivne vrednosti harmonika su:

$$I_1 = \frac{A_{1MAX}}{\sqrt{2}} = 0.3900 \cdot \frac{U}{\omega L}$$

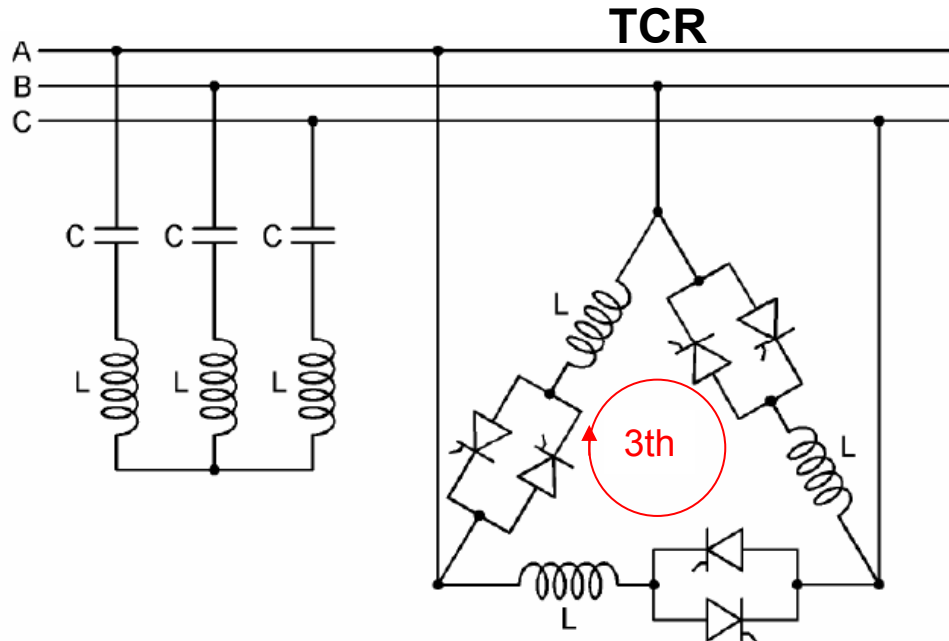
$$I_3 = \frac{A_{3MAX}}{\sqrt{2}} = 0.1380 \cdot \frac{U}{\omega L}$$



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 regulatora, 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.

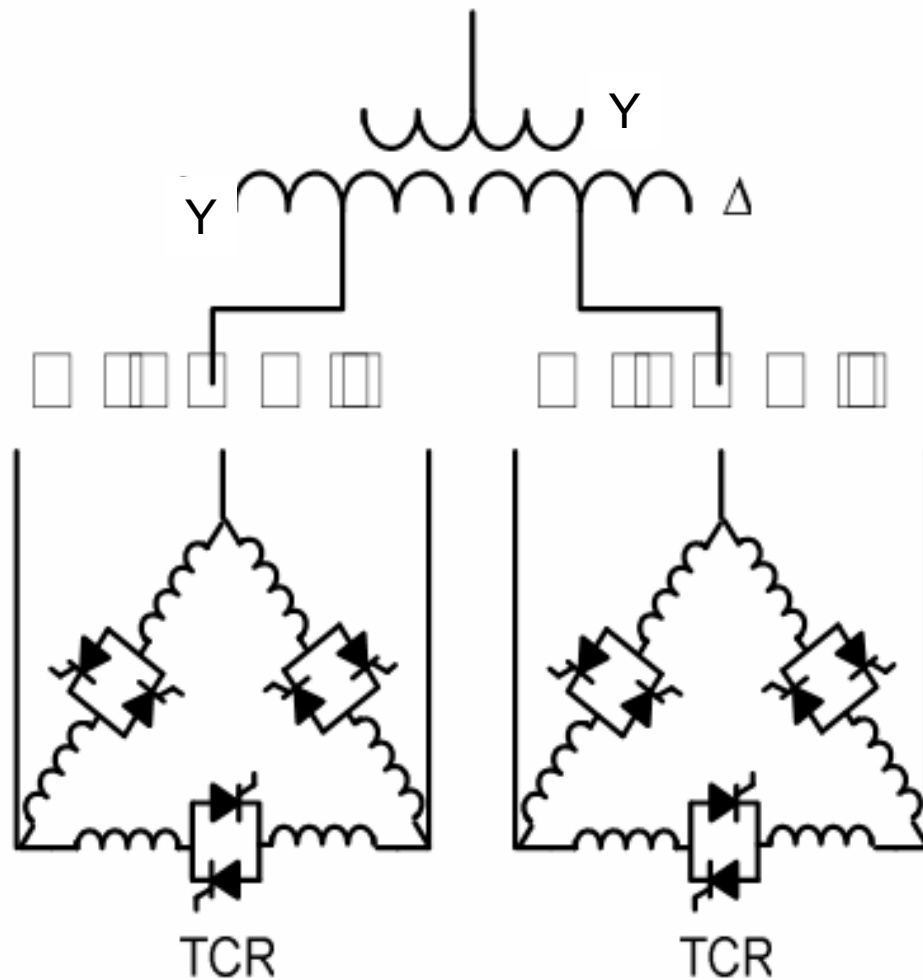
U protivnom, u mrežu se unose i parni harmonici, te stoga i jednosmerna komponenta struje.

Na red sa kondenzatorima se stoga dodaju prigušnice male induktivnosti čija je primarna funkcija da zajedno sa kondenzatorima čine filter 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  $\alpha$  u opsegu  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$

induktivnost prigušnice se može podešavati u opsegu :

$$L_{MIN} \leq L \leq +\infty$$

UKUPNA TROFAZNA SNAGA KOMPENZATORA je jednaka:

$$Q = 3U_f I_1 = 3U_l I_1 = \frac{6}{\omega L} \cdot U_l^2 \cdot \left[ 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

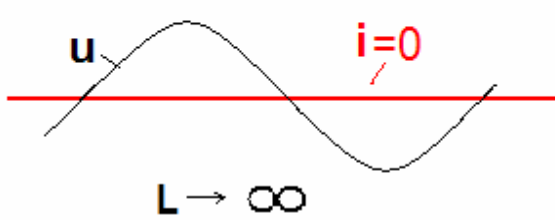
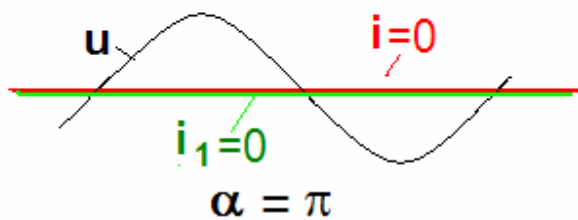
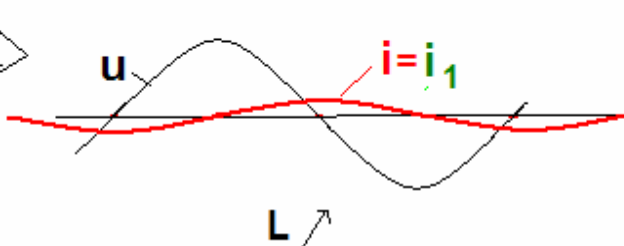
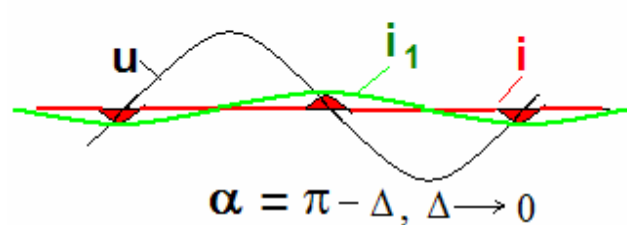
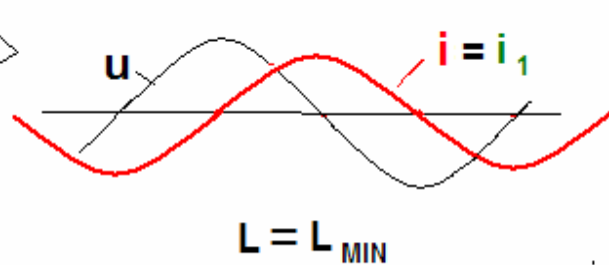
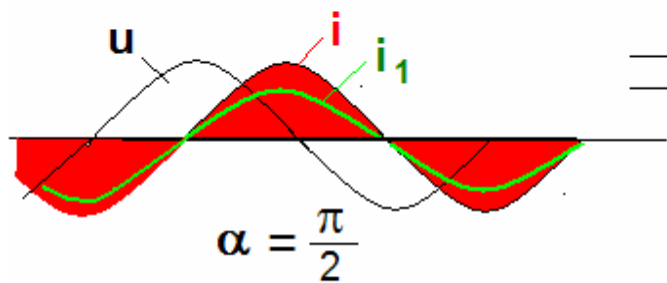
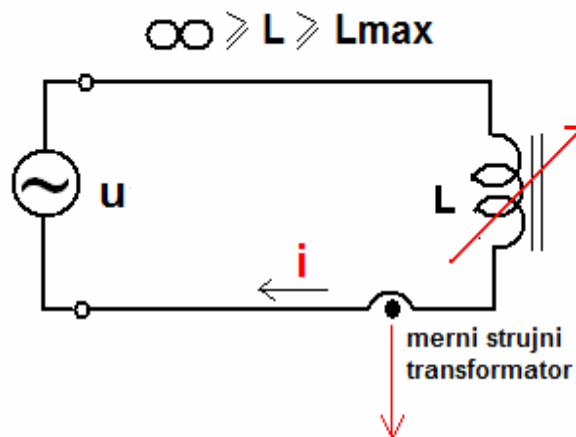
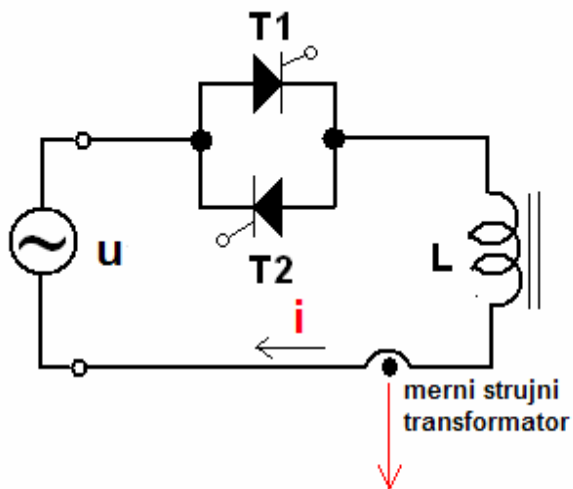
opseg ugla  
upravljanja

$$\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$$

gde je za spregu tiristorskog regulatora u „trougao“  $U_f = U_l$

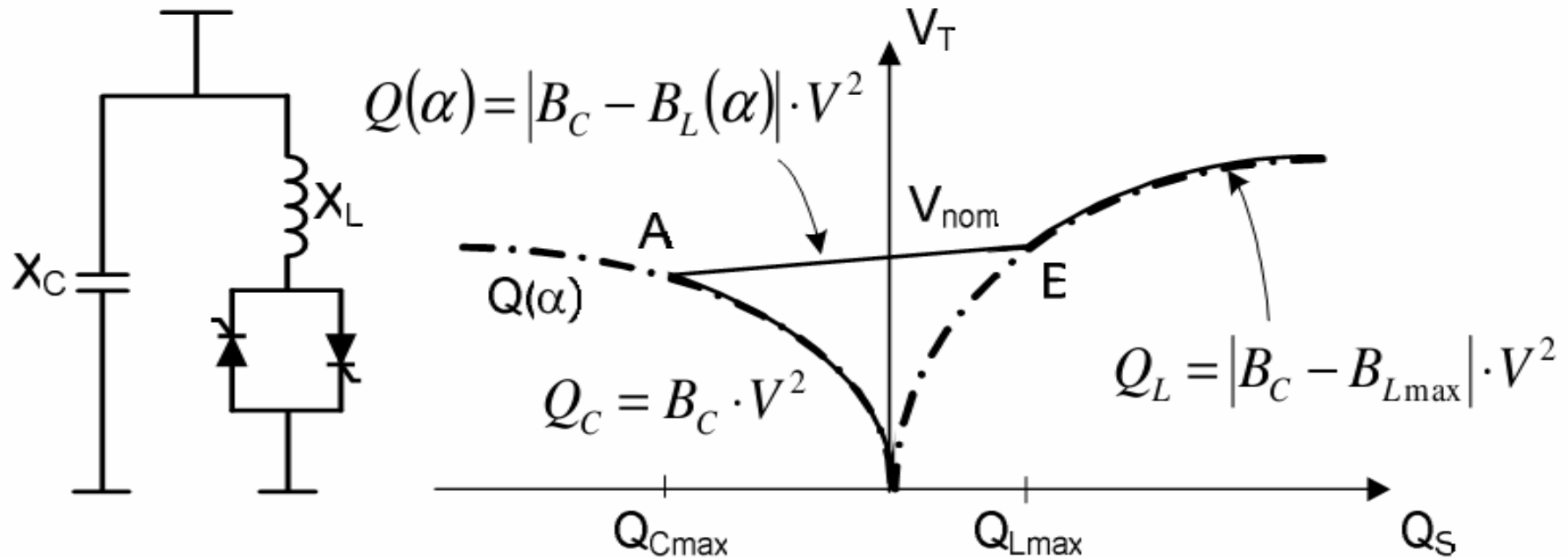
tj. efektivne vrednosti faznog i linijskog napona su jednake i iznose 380V(400V)





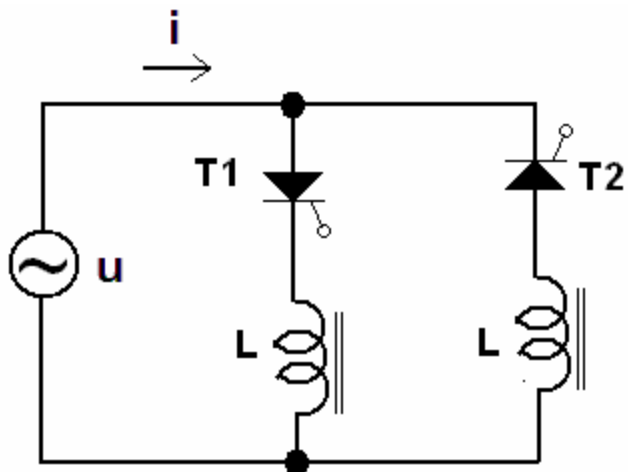
$L_{MIN} \leq L \leq +\infty$

## 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:

$$0 \leq \alpha \leq \pi$$

Stoga je ova konfiguracija povoljnija u odnosu na konfiguraciju sa antiparalelnom vezom tiristora kod koje je opseg regulacije bio u intervalu:

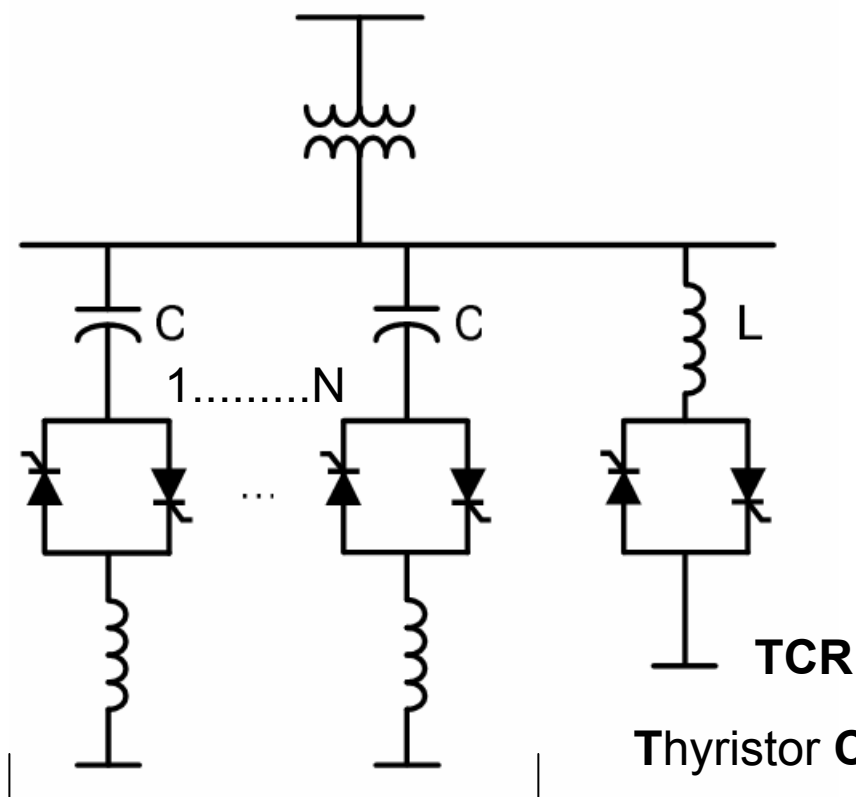
$$\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$$

Efektivna vrednost struje osnovnog harmonika je ista kao i kod faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora:

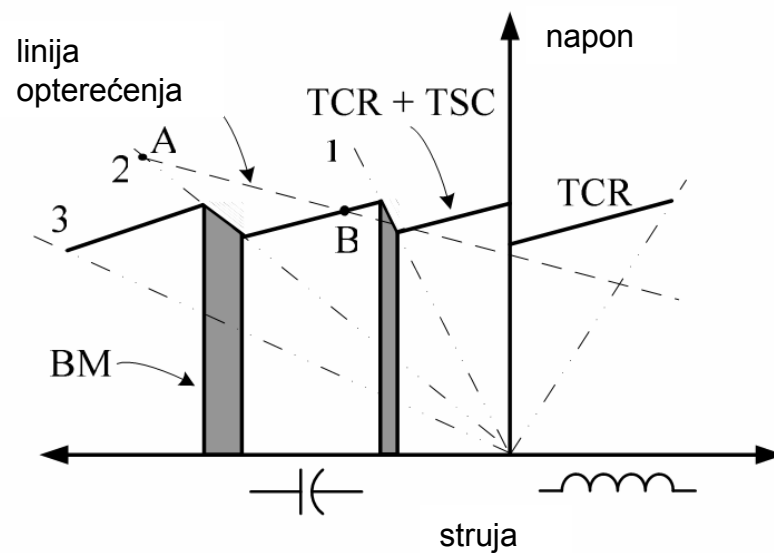
$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[ 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] \quad 0 \leq \alpha \leq \pi$$

MANA: dve prigušnice, više bakra i gvožđa, skuplje rešenje

# KOMBINACIJA TIRISTORSKOG SERIJSKOG KOMPENZATORA I TIRISTORSKI KONTROLISANE PRIGUŠNICE (STEPLESS kontrola)

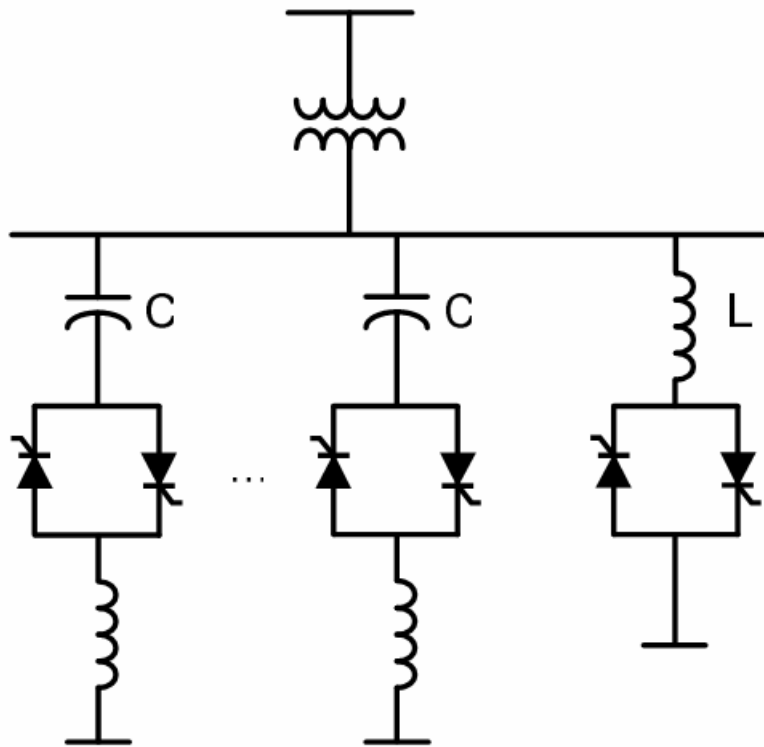


**TSC**  
Thyristor **S**witched **C**apacitors



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

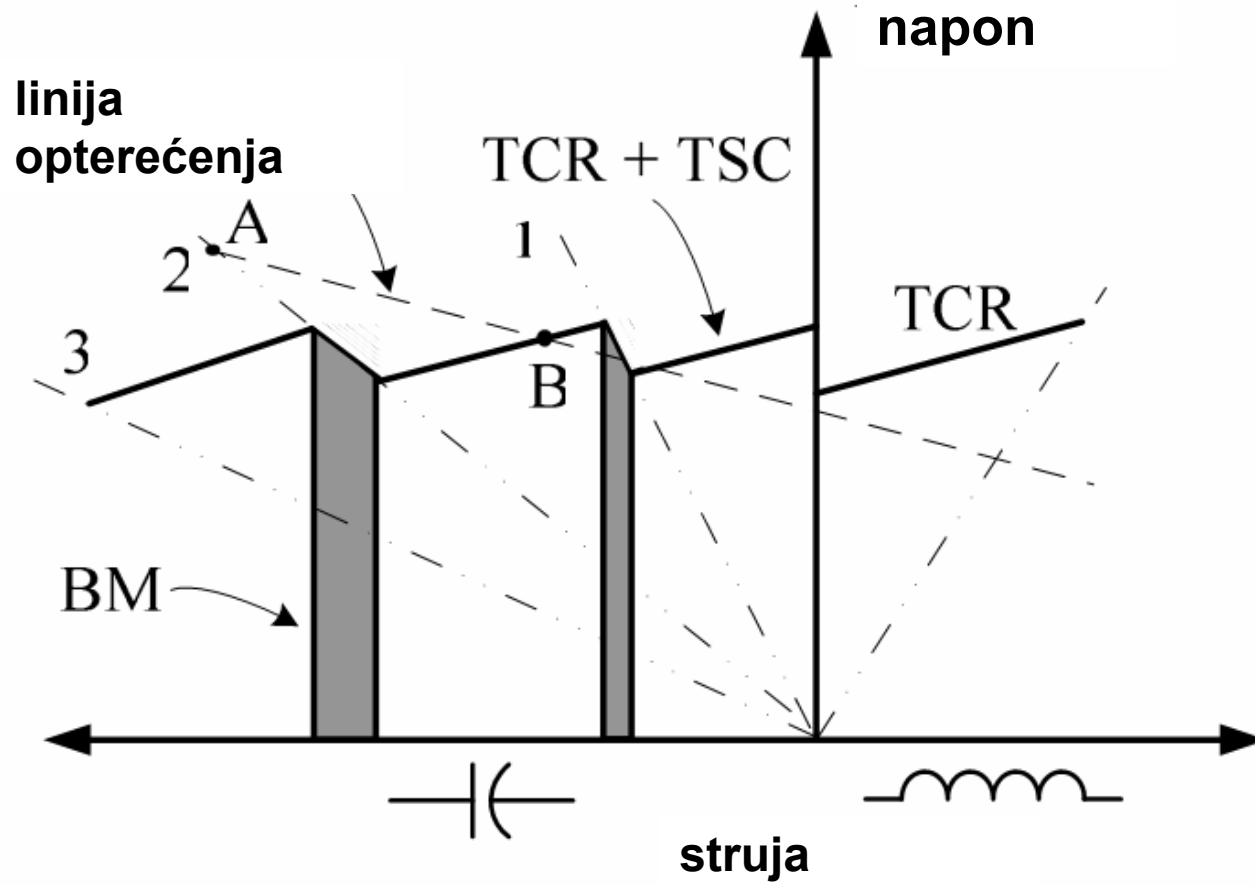
-Ovi statički kompenzatori se karakterišu:

- kontinualnom kontrolom, praktično bez tranzijenata
- niskim generisanjem harmonika (pošto je reaktivna snaga kontrolisanog reaktora relativno mala
- velikom fleksibilnošću rada i kontrole

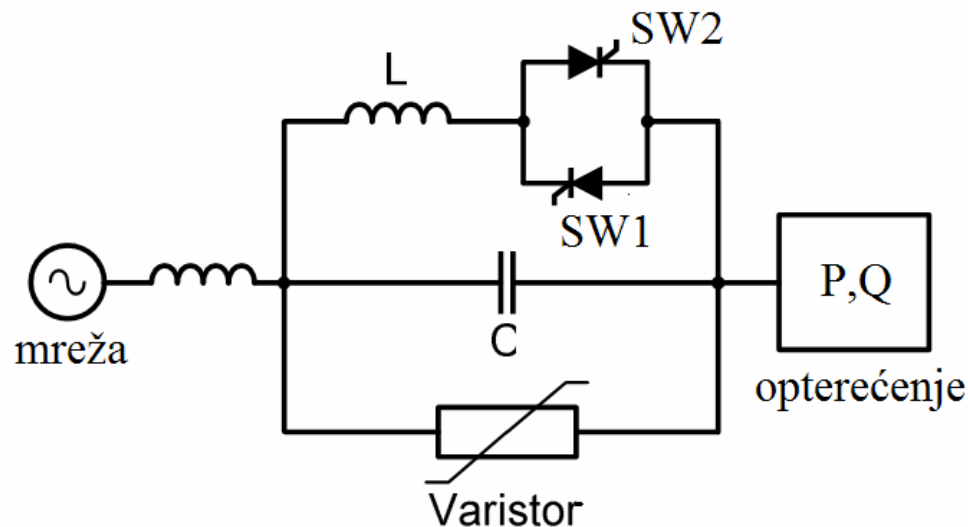
### GLAVNI NEDOSTATAK

-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



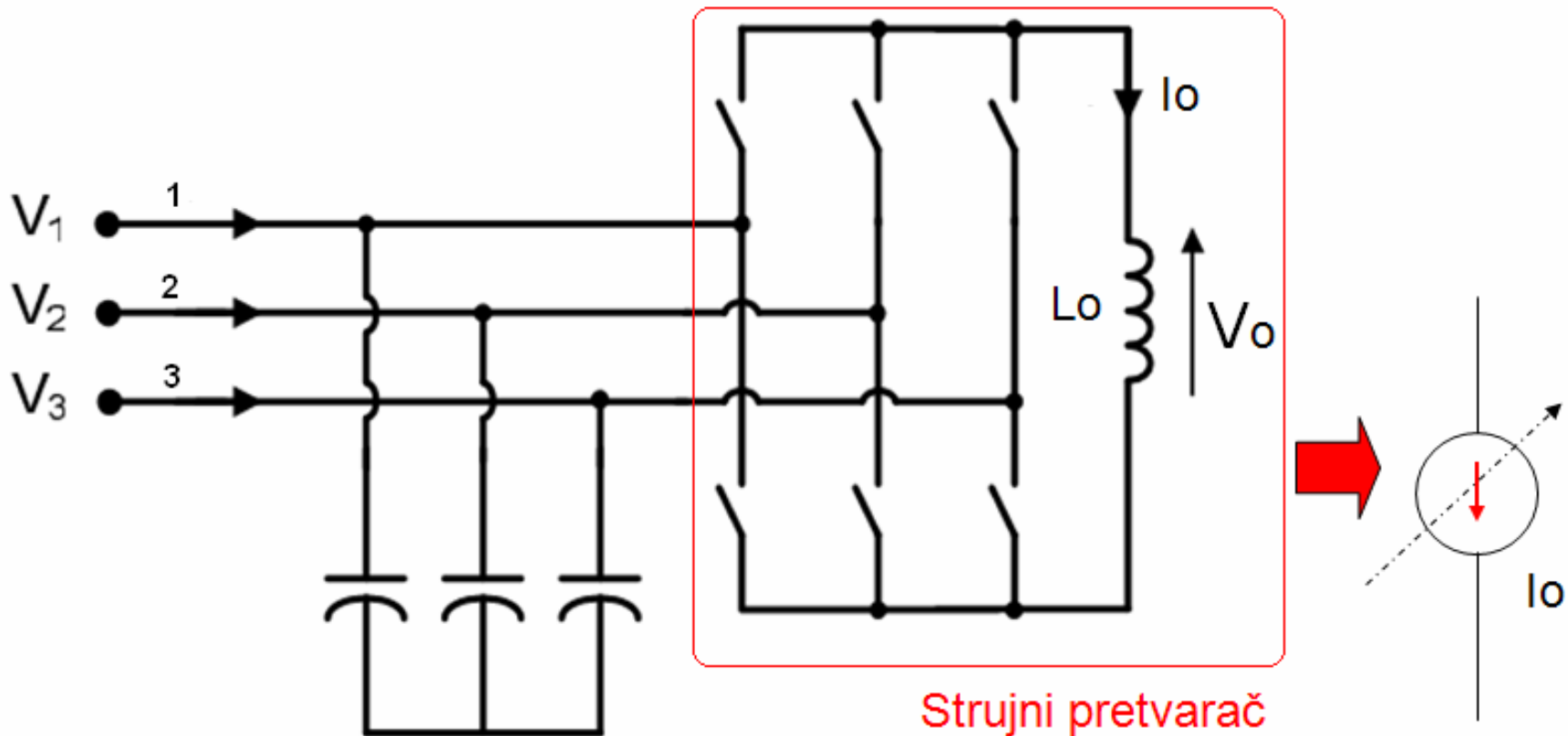
- Ovi kompenzatori su jako korisni kada je potrebno uvesti i povećati prigušenja kod među-povezivanja velikih sistema (velikih interkonekcija)
- Nima se prevazilazi efekat Subsinsrone Rezonance (SSR)
- SSR je fenomen koji se odnosi na interakciju između velikog termobloka i redno kompenzovanog transmisionog sistema.
- Dva su koncepta 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 PODRAMEVAJU 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

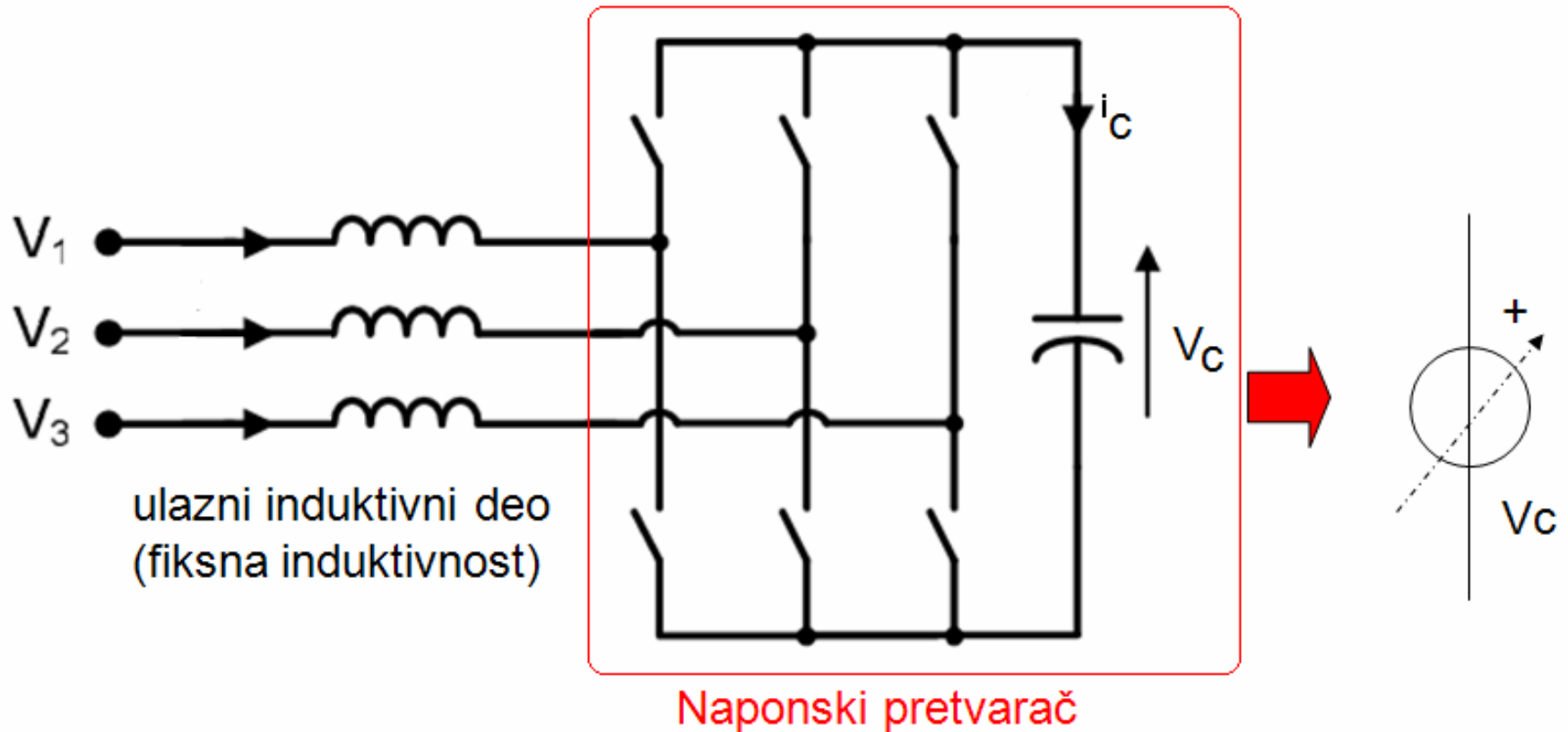


ulazni kapacitivni  
deo (fiksni kapacitet)

Strujni pretvarač

- prekidački regulisana prigušnica
- $L_o$  je dimensionisana tako da se cela grana ponaša kao strujni ponor

# VAR kompenzator baziran na naponskom pretvaraču



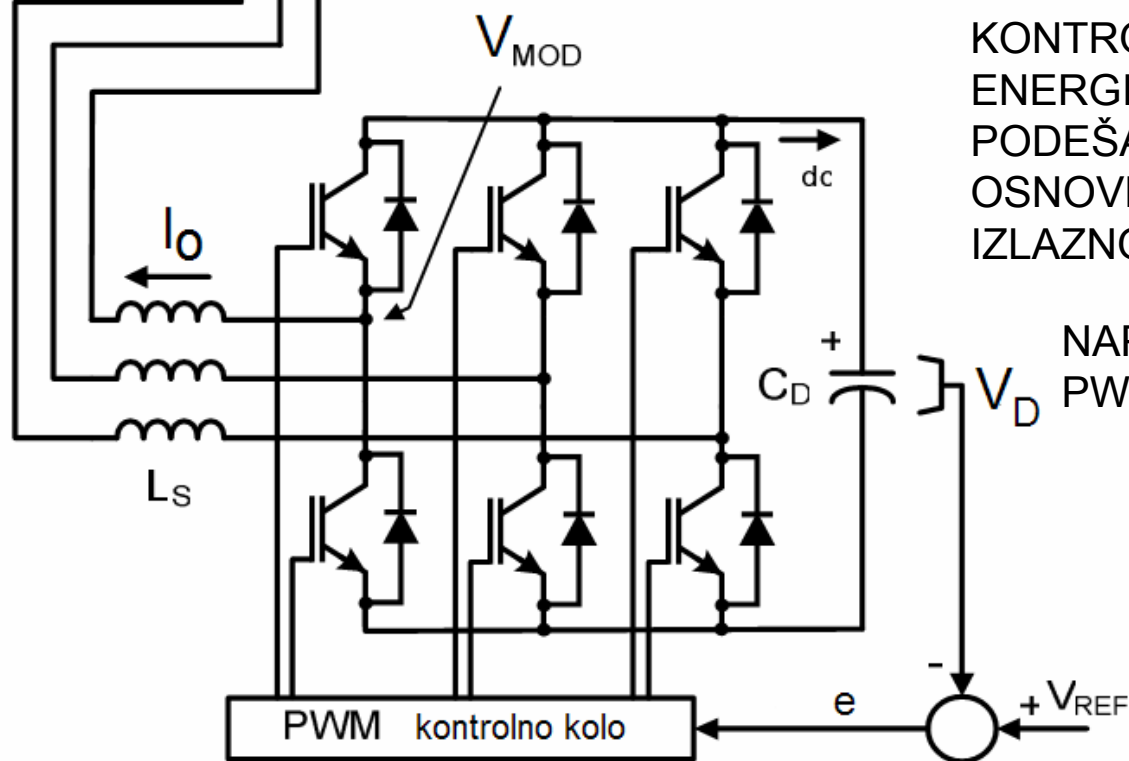
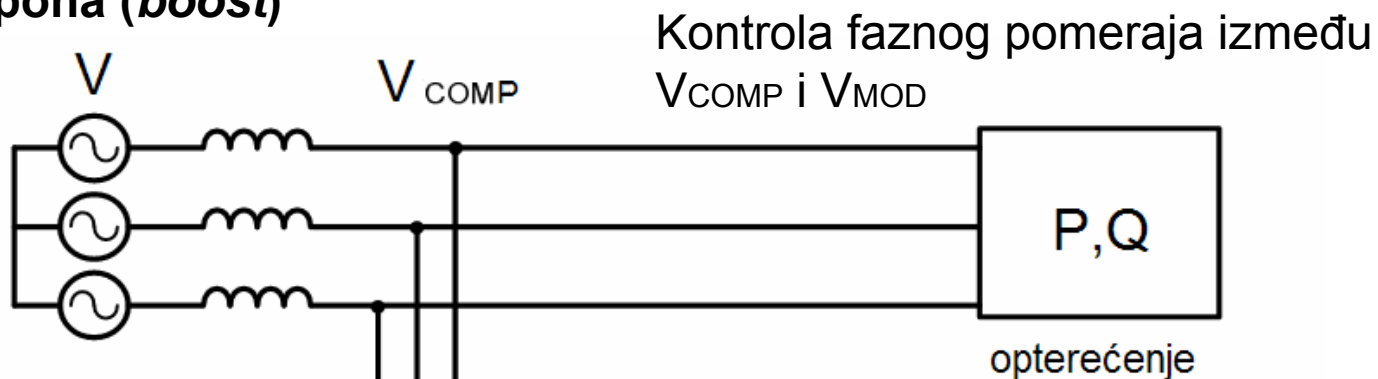
- prekidački regulisan napon na  $C_o$
- $C_o$  je dimenzionisan tako da se cela grana ponaša kao naponski izvor

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

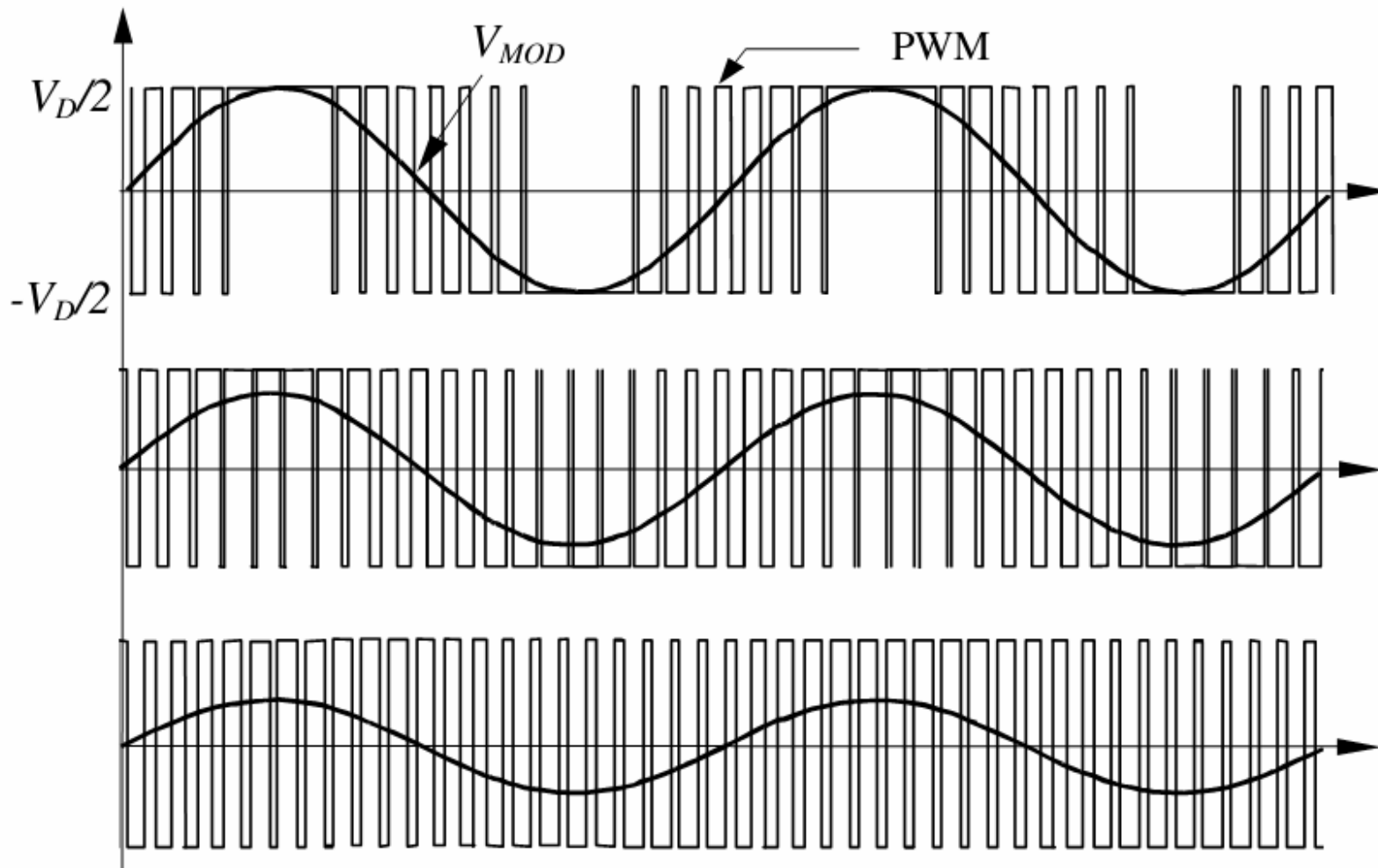
# VAR kompenzator sa ugrađenim naponskim pretvaračem- podizračem napona (*boost*)



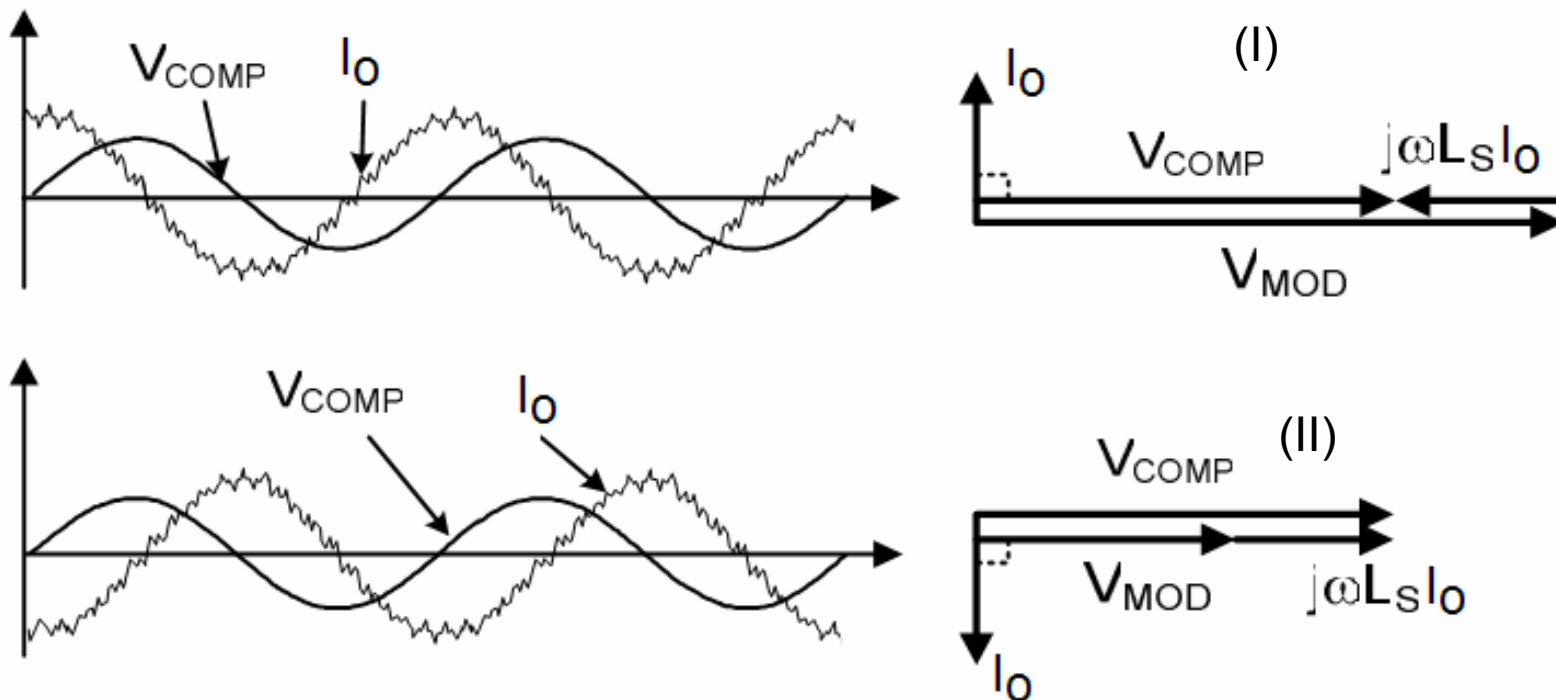
KONTROLA REAKTIVNE ENERGIJE SE OSTVARUJE PODEŠAVANJEM AMPLITUDE OSNOVNE KOMPONENTE IZLAZNOG NAPONA  $V_{MOD}$

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 apsorbavane od strane pretvarača

$$P = \frac{V_{COMP} \cdot V_{MOD}}{X_s} \sin(\delta)$$

$X_s$  - reaktansa sprežne prigušnice  $L_s$

$\delta$ - fazni ugao između  $V_{MOD}$  i  $V_D$ .

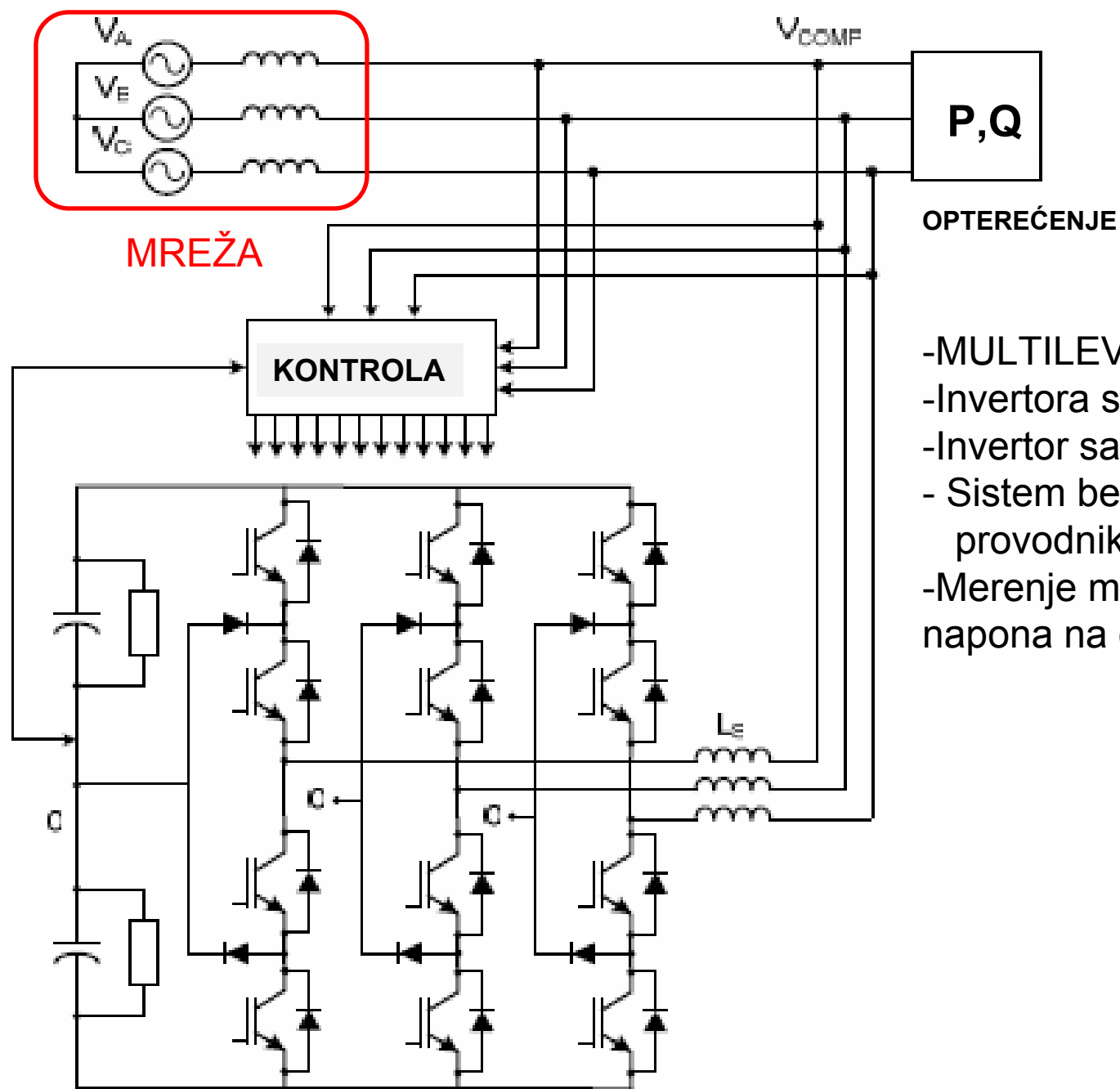
**JEDAN OD GLAVNIH PROBLEMA KOJI OGRANIČAVAJU PRIMENU PRETHODNO OPISANIH PRETVARAČA U VISOKONAPONSKIM SISTEMIMA JE OGRANIČAVAJUĆI KAPACITET POLUPROVODNIČKIH PREKIDAČA (IGBT ili IGCT) KOJI SU RASPOLOŽIVI NA TRŽIŠTU!!!!**

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  $V_{comp}$

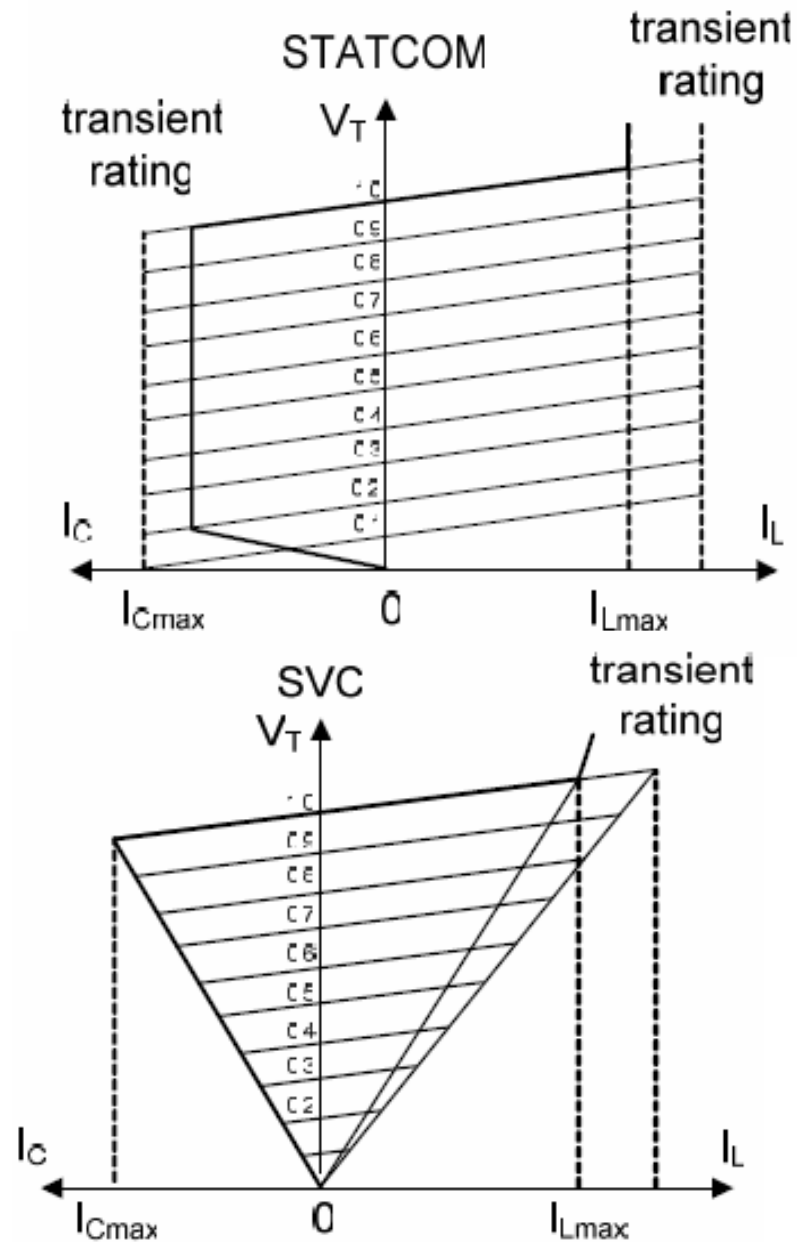
## **U poređenju sa tiristorskim kompenzatorima, prekidački VAR kompenzatori imaju niz prednosti:**

- 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 kompensatora:

V-I karakteristika kod prekidačkog VAR  
kompensatora (prekidački izvor)

Mnogo širi opseg regulacije u odnosu na  
tiristorske VAR kompenzatore



V-I karakteristika kod tiristorskog VAR  
kompensatora

# ZAKLJUČAK

- U predavanju su dati osnovni principi **DINAMIČKE KOMPENZACIJE** reaktivne snage
- Obradeni 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???**

