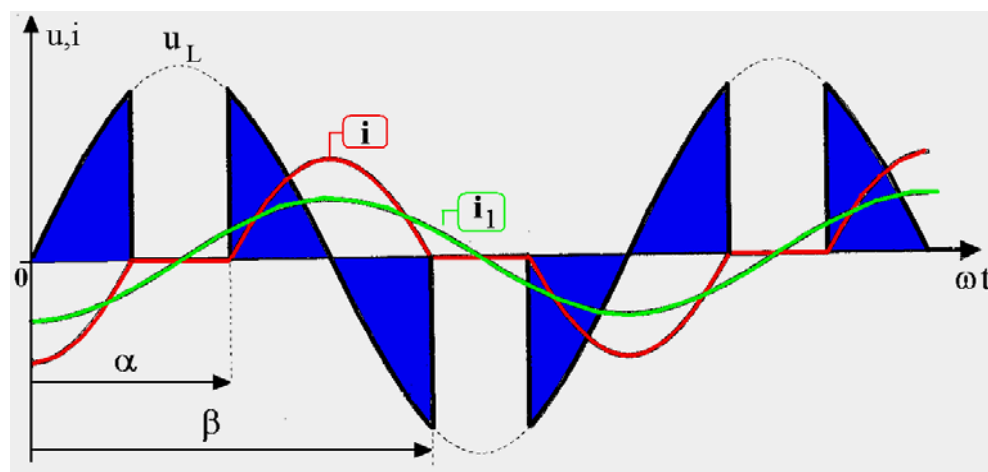
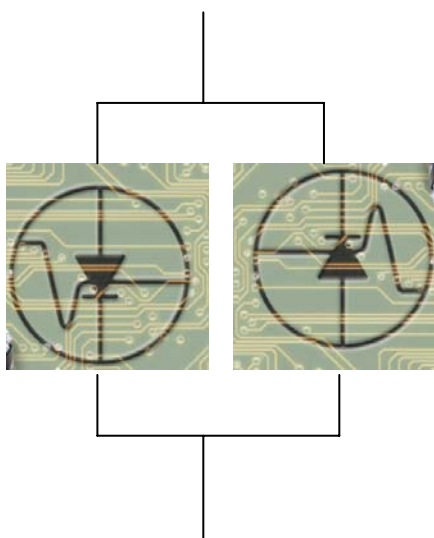


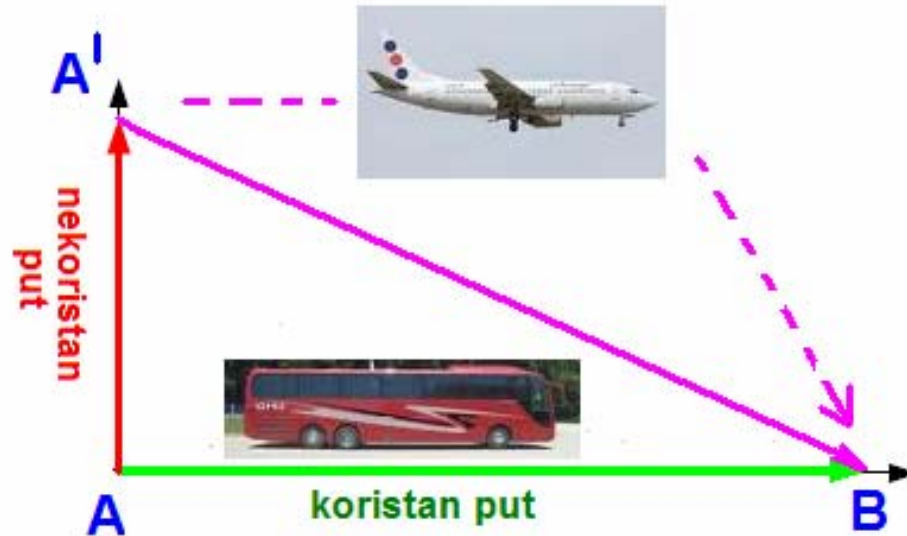


TIRISTORSKI ENERGETSKI PRETVARAČI ZA KOMPENZACIJU REAKTIVNE SNAGE



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 $\cos\varphi=0.8$ za ASINHRONE MOTORE, MOTOR SNAGE npr.10kW, svakog sata utroši 10kWh aktivne energije i 7.5kVAh reaktivne energije 10kW se pretvori u rad, dok se 7.5kVAh 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- $\cos\varphi=0.8$



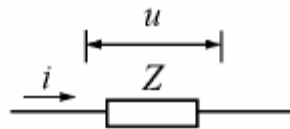
Potreban presek provodnika ako je potrošač u potpunosti kompenzovan- $\cos\varphi=1$

SNAGA POTROŠAČA NAIZMENIČNE STRUJE

Neka su trenutne vrednosti struje i napona prijemnika impedanse Z dati sa

$$i(t) = I_m \sin \omega t$$

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$



$$U_m = \sqrt{2}U$$

$$I_m = \sqrt{2}I$$

Trenutna snaga koju prima prijemnik jednaka je:

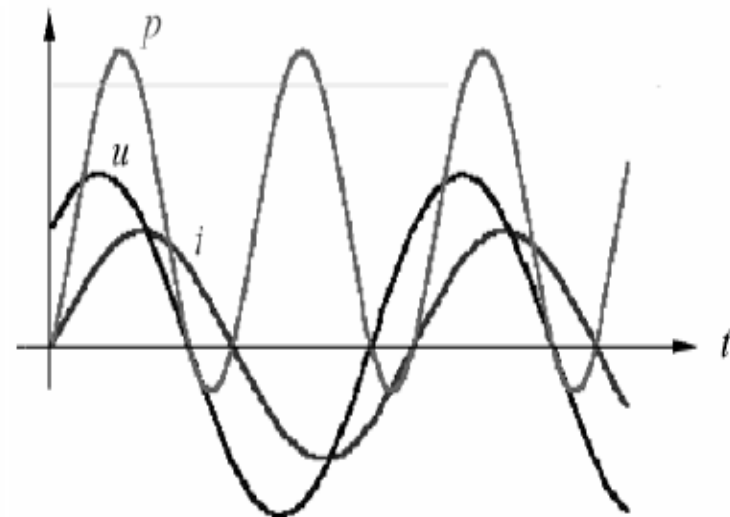
$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$p(t) = 2 \cdot UI \cdot \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi)$$

Uvodeći trigonometrijsku transformaciju:

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi)$$



AKTIVNA SNAGA

Aktivna (srednja) snaga definiše se kao:

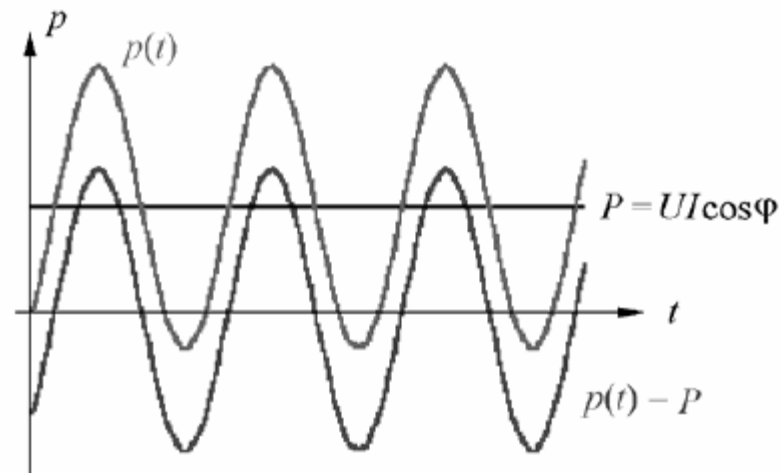
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} UI \left[\cos \varphi \cdot t - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t + \varphi) \right] \Bigg|_0^T$$

$$P = \frac{1}{T} UI \cdot \left[\cos \varphi \cdot T - \frac{1}{2\omega} \sin\left(\frac{4\pi}{T} T + \varphi\right) + \frac{1}{2\omega} \sin\left(\frac{4\pi}{T} 0 + \varphi\right) \right]$$

$$P = \frac{1}{T} UI \cdot \left[\cos \varphi \cdot T - \frac{1}{2\omega} \cos \varphi + \frac{1}{2\omega} \cos \varphi \right]$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Jedinica za aktivnu snagu je vat [W].



REAKTIVNA SNAGA

Reaktivna snaga predstavlja maksimalnu snagu povratnih procesa.

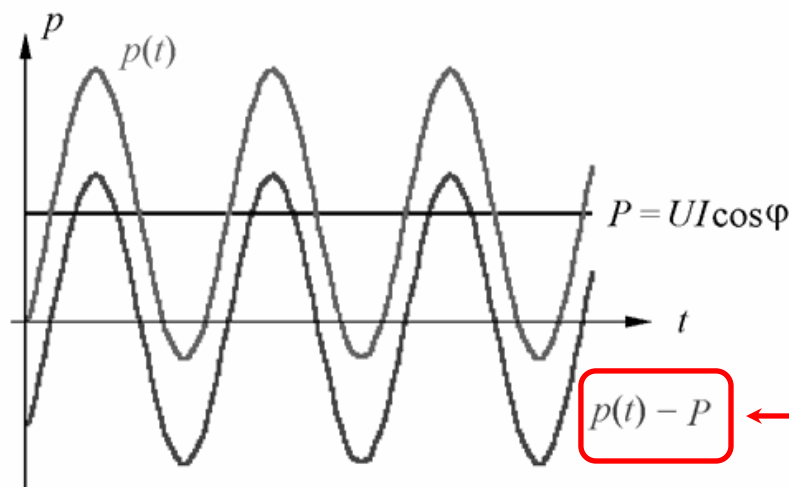
$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

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 :

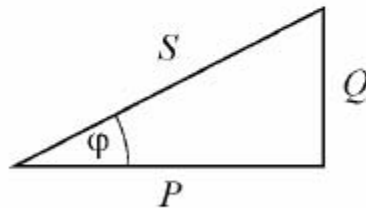
$$S = U \cdot I$$

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

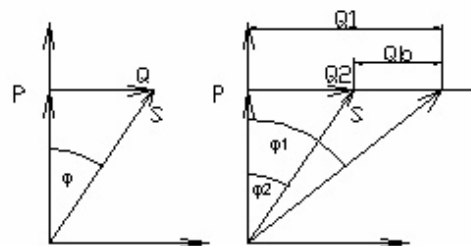
- Pod kompenzacijom reaktivne energije podrazumeva se instalacija opreme koja generiše reaktivnu energiju na mestu montaže i time *kompenzuje* potrošnju reaktivne energije u pogonu.
 - Ovim se drastično smanjuje količina preuzete reaktivne energije iz mreže, a time i računi za utrošenu reaktivnu energiju.
 - 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



$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad \tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

SNAGA KONDENZATORSKE BATERIJE
POTREBNA ZA KOMPENZACIJU

$$Q_b = Q_1 - Q_2$$

$$Q_b = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

KOMPENZACIJA ZA SLUCAJ
TROFAZNOG ASINHRONOG MOTORA

$$Q_b = Q_{m \cos \varphi_1} - Q_{m \cos \varphi_2}$$

$$Q_b = k \cdot \frac{P}{\eta} \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

KOEFICIJENT
OPTEREĆENJA
MOTORA

STEPEN ISKORIŠĆENJA
MOTORA

PRIMER: Odrediti snagu kondenzatora za popravku faktora snage motora od 110kW. Faktor opterećenja motora $\kappa = 0.9$, a stepen iskorišćenja $\eta = 0.91$

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 $\cos \varphi = 0.86$ $\tan \varphi = 0.57$; za $\cos \varphi = 0.95$ $\tan \varphi = 0.35$

$$Q_b = 0.9 \cdot \frac{110}{0.91} \cdot (0.57 - 0.32) = 26.6 \text{ kVar}$$

$$C = \frac{Q_b}{\omega U^2}$$

$$\omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$$

$$U = 220 \text{ V, } 50 \text{ Hz ili } 380 \text{ V, } 50 \text{ Hz}$$

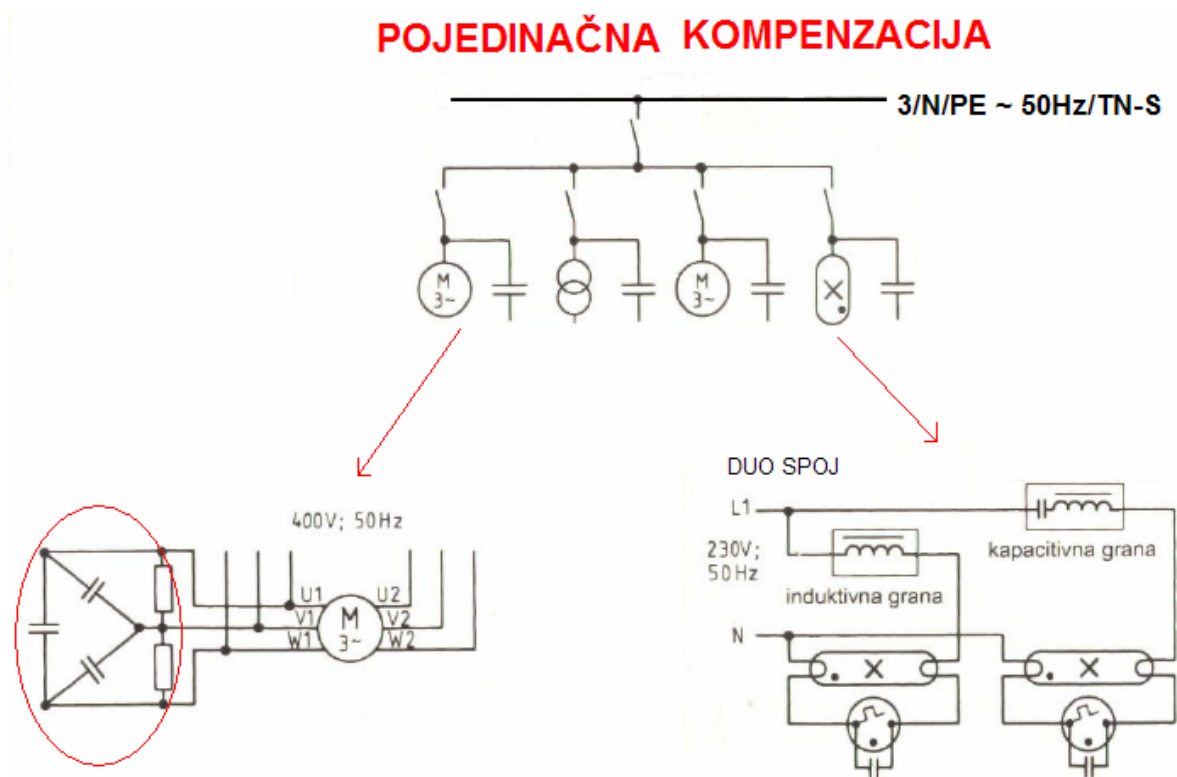
(zavisno da li je potrošač
trofazni ili monofazni)

$$C [\mu\text{F}] = 6.66 \cdot 10^{-3} \cdot Q_b [\text{Var}]$$

$$C [\mu\text{F}] = 60 \cdot 10^{-3} \cdot Q_b [\text{Var}]$$

TIPOVI KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE

POJEDINAČNA KOMPENZACIJA

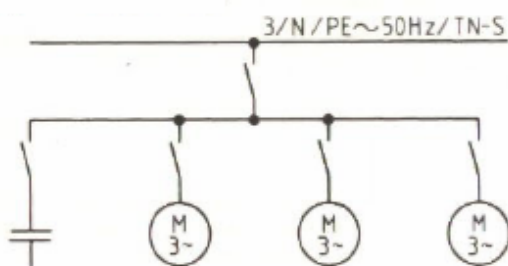


Potrošači reaktivne snage sa paralelno spojenim kondenzatorima
Kod trofaznih potrošača kondenzatorske baterije vezane u spoju "trougao"

PRIMENA: motori, fluorescentne svetiljke (duo spoj), transformatori

TIPOVI KOMPENZACIJE REAKTIVNE ENERGIJE

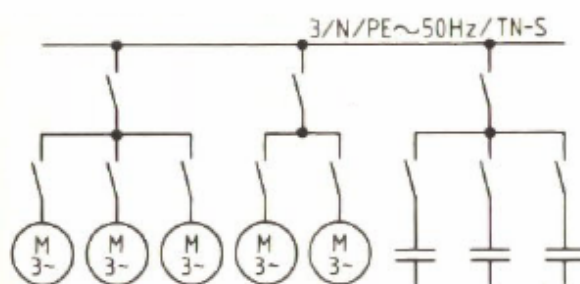
GRUPNA KOMPENZACIJA



POTROŠAČI REAKTIVNE SNAGE SA JEDNOM
PARALELNO SPOJENOM
KONDENZATORSKOM JEDINICOM

PRIMENA: manja postrojenja sa
motorima i fluo svetilkama

CENTRALNA KOMPENZACIJA



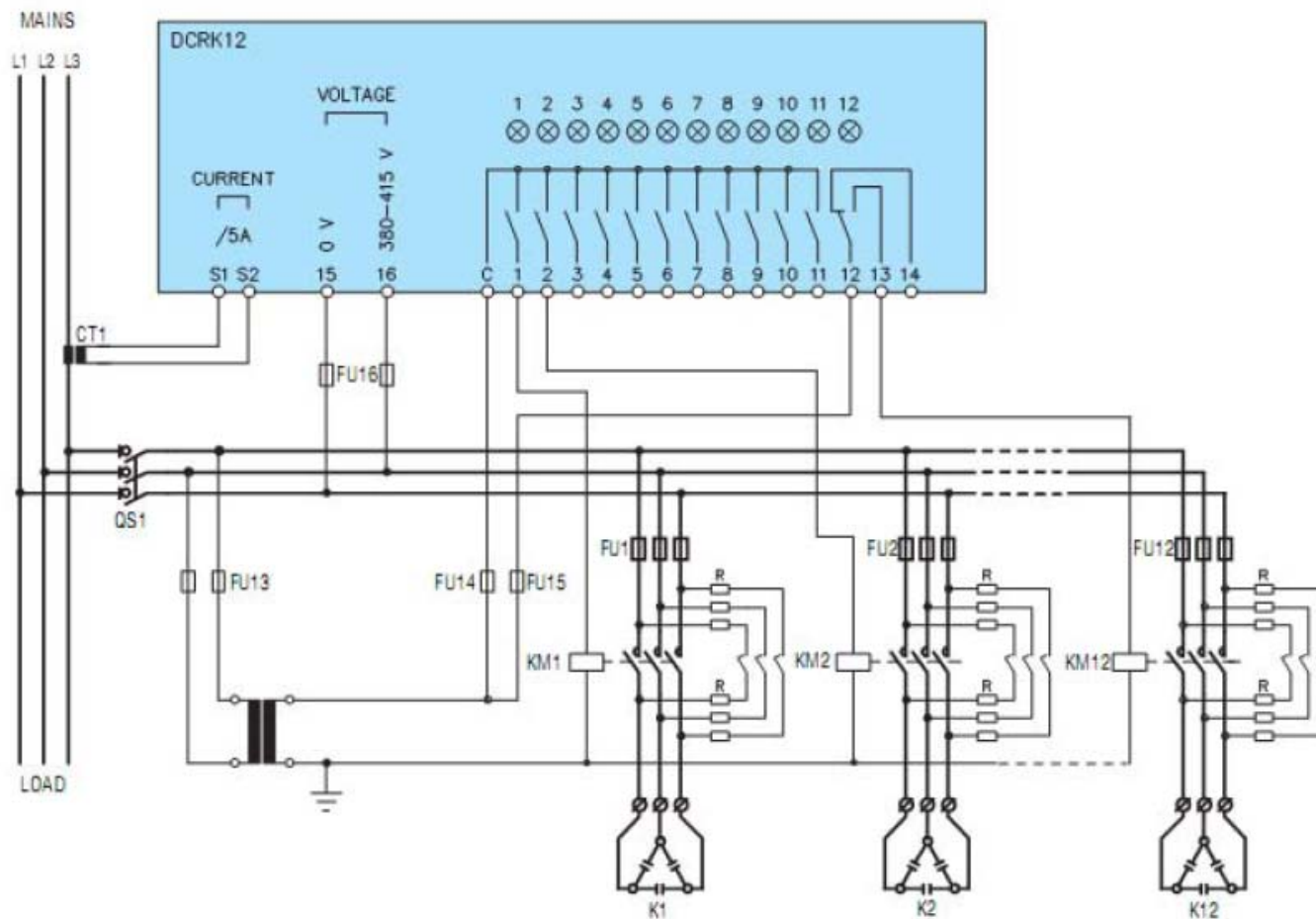
CENTRALNA KOMPENZACIJA UKUPNE
REAKTIVNE SNAGE POTROŠAČKOG
POSTROJENJA POMOĆU REGULACIONE
KONDENZATORSKE JEDINICE

PRIMENA: zanatski i proizvodni pogoni,
administrativne zgrade, radionice

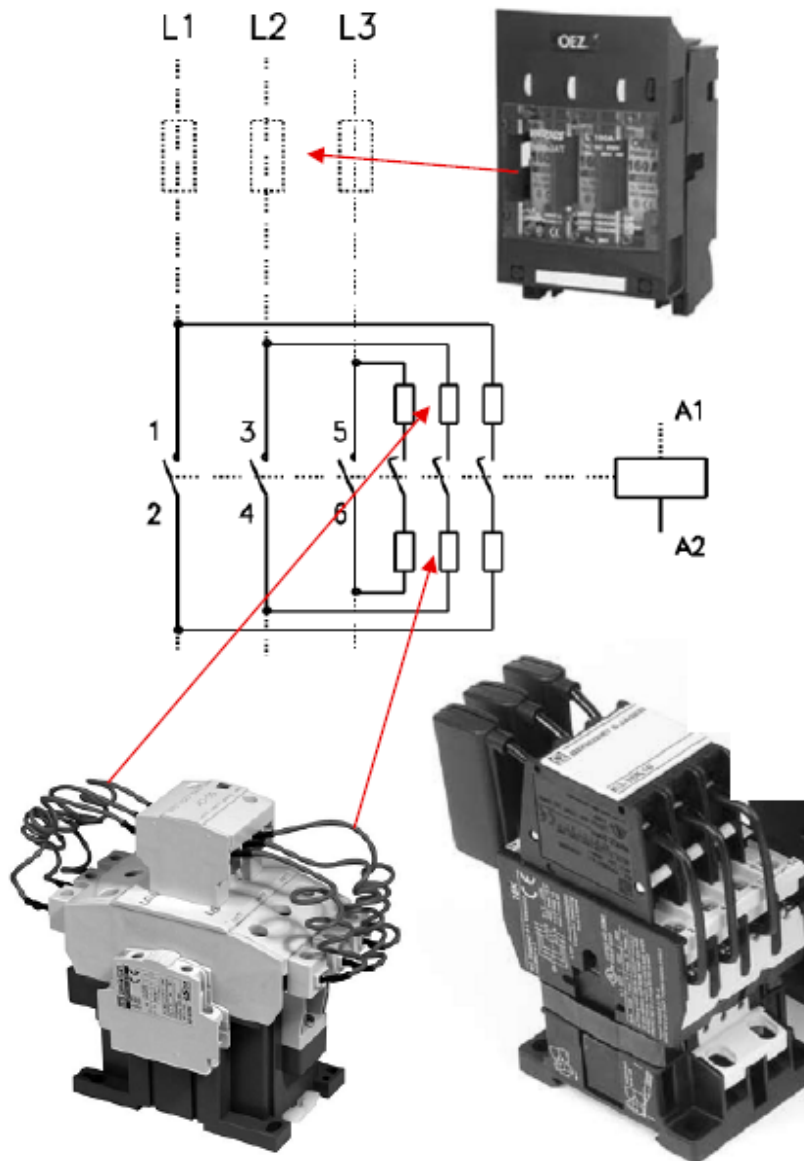
FAKTORI SNAGE ZA NEKE KARAKTERISTIČNE POTROŠAČE

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

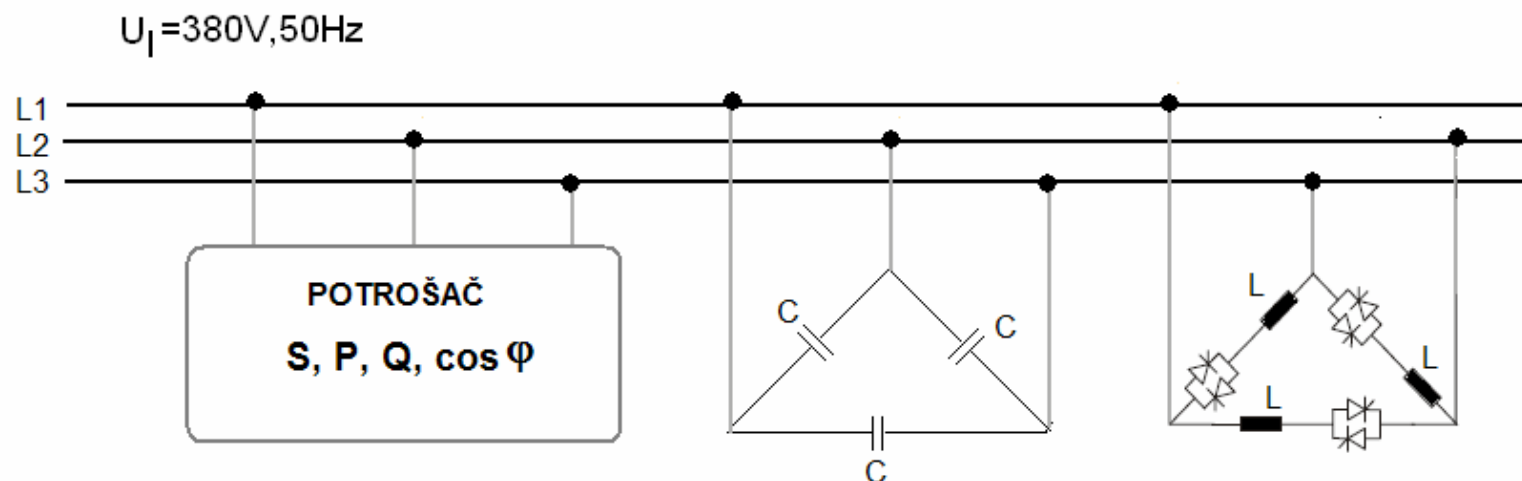


- Kondenzatorski kontaktori uključuju i isključuju kondenzatorske baterije koje imaju male induktivnosti i male gubitke

- PRIGUŠNI OTPORI se uključuju neposredno pre uključanja kondenzatorskih baterija, da bi se smanjile struje uključanja ispd $70I_n$.

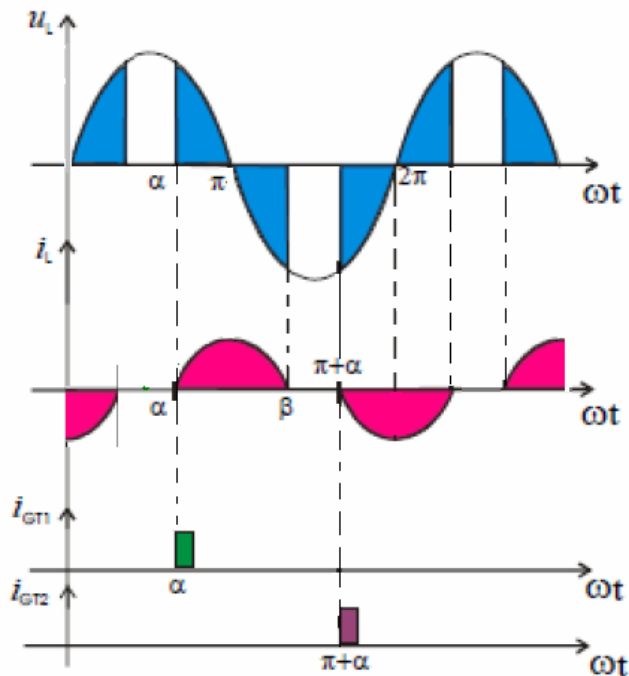
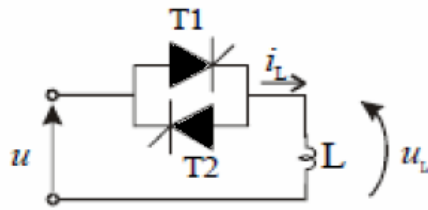
- OSIGURAČI za kondenzatorske baterije su vrednosti $1.6I_n \dots 2.5I_n$

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

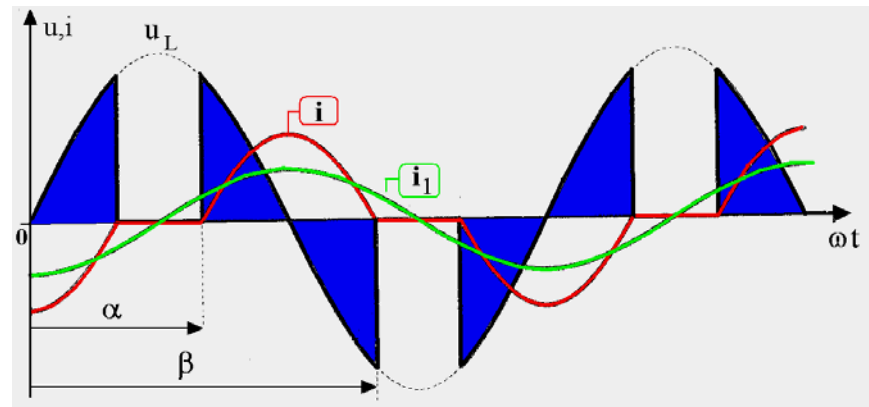


$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^t \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

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

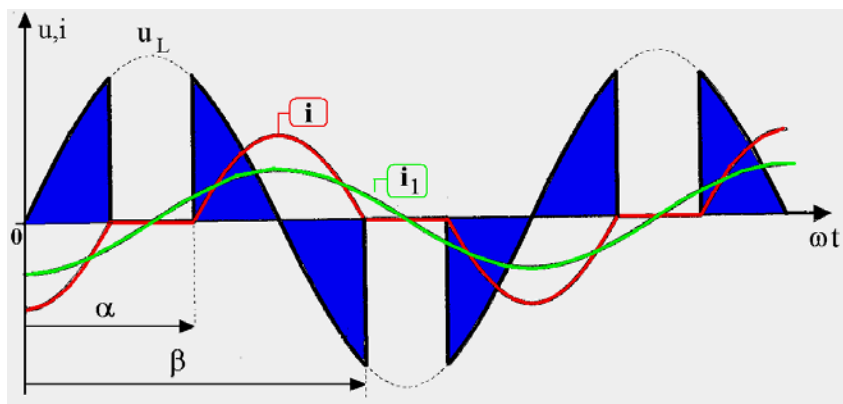
$$i_L(t) = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad 2\pi - \alpha \geq \omega t \geq \alpha$$

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



osnovni harmonik struje - i_1

IZRAČUNAVANJE FEKTIVNE VREDNOST STRUJE PRVOG HARMONIKA



Amplituda osnovnog harmonika struje

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

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

Efektivna vrednost struje prvog harmonika

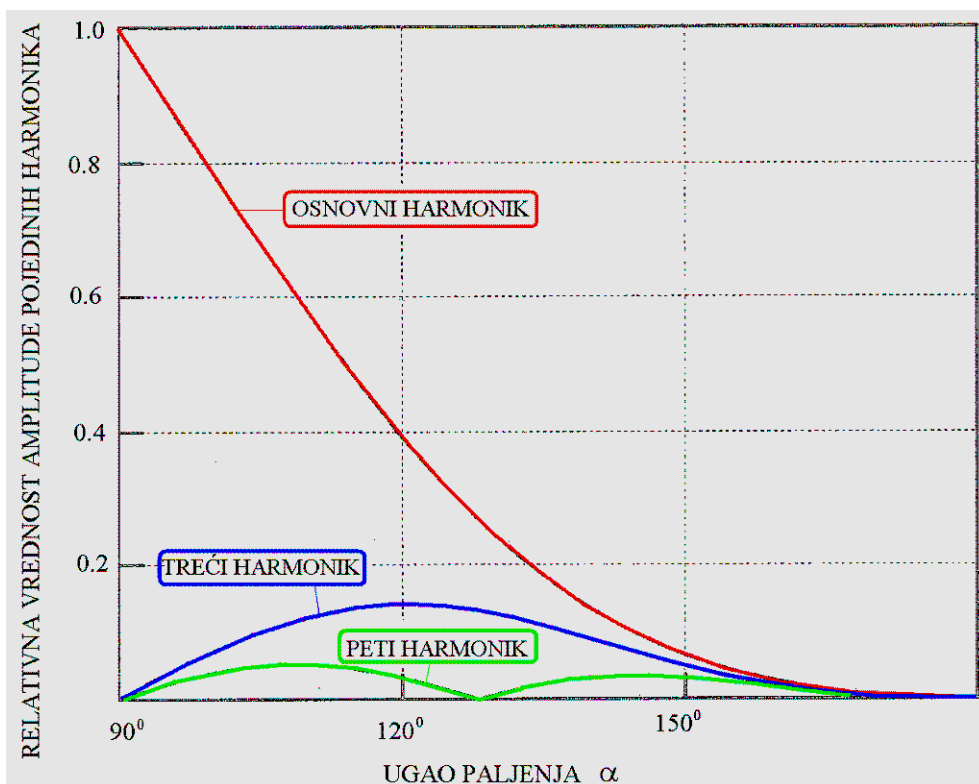
$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

ŠTA JE SAVIŠIM HARMONICIMA???

Amplitude struja viših harmonika

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \cos kx dx$$

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



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

$$\alpha = 120^\circ$$

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

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

EFEKTIVNA VREDNOST 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 $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ induktivnost prigušnice se može podešavati u opsegu od L_{MIN} do beskonačne vrednosti, odnosno $L_{MIN} \leq L \leq +\infty$

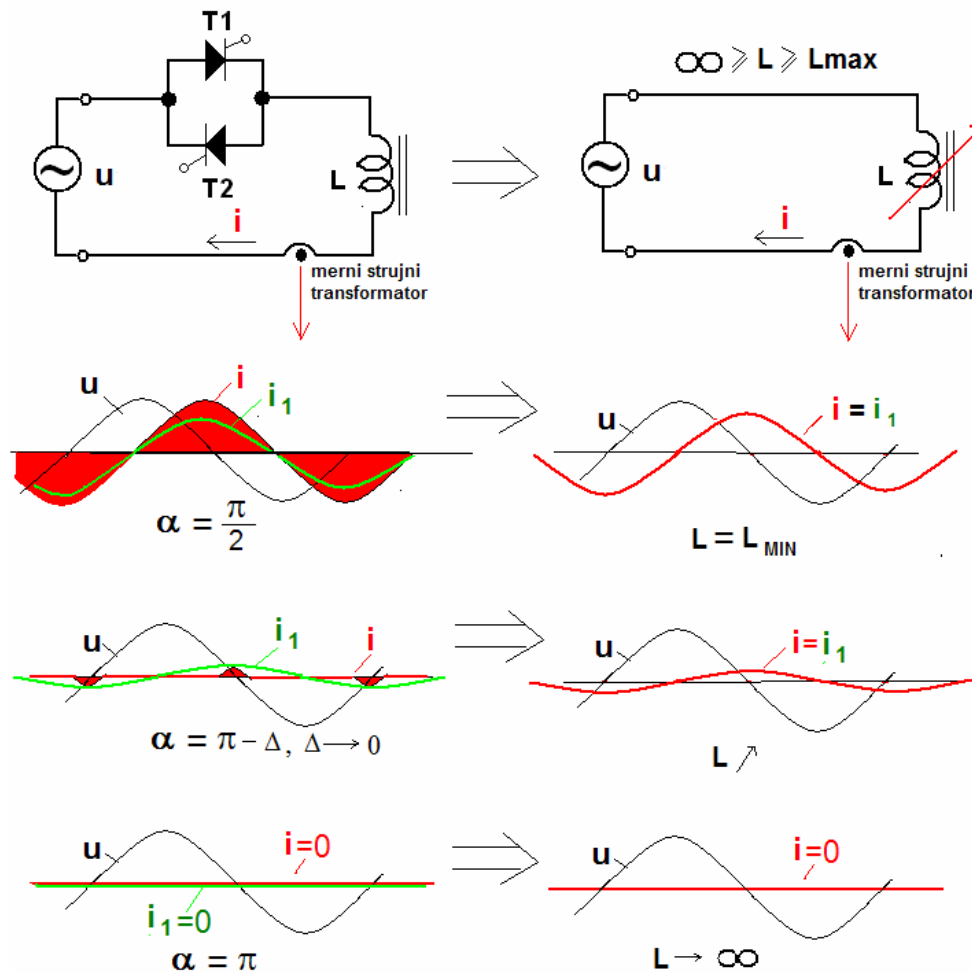
UKUPNA TROFAZNA SNAGA KOMPENZATORA je jednaka:

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

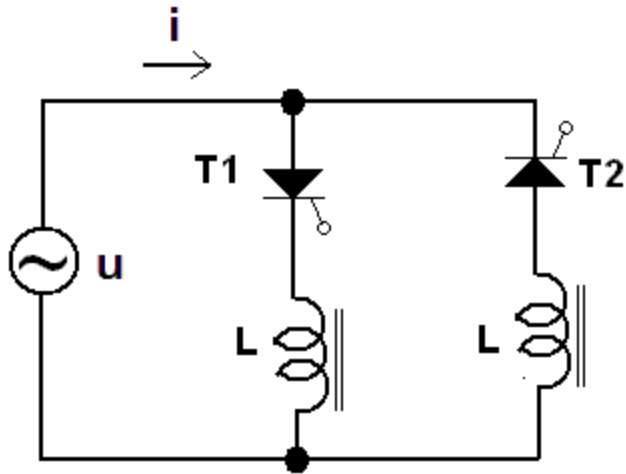
gde je za spregu tiristorskog regulatora u „trougao“ $U_f = U_l$

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

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:

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

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 ko i kod faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora:

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