

TIRISTORSKI KOMPENZATORI REAKTIVNE ENERGIJE

Reaktivna energija (ili u terminu "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 su na primer elektrolučne i indukcione peći, elektrovučna postrojenja, fluorescentna rasveta i sl. 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. 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 šest meseci do dve godine.

Dobiti koje pruža korišćenje sistema za kompenzaciju reaktivne energije

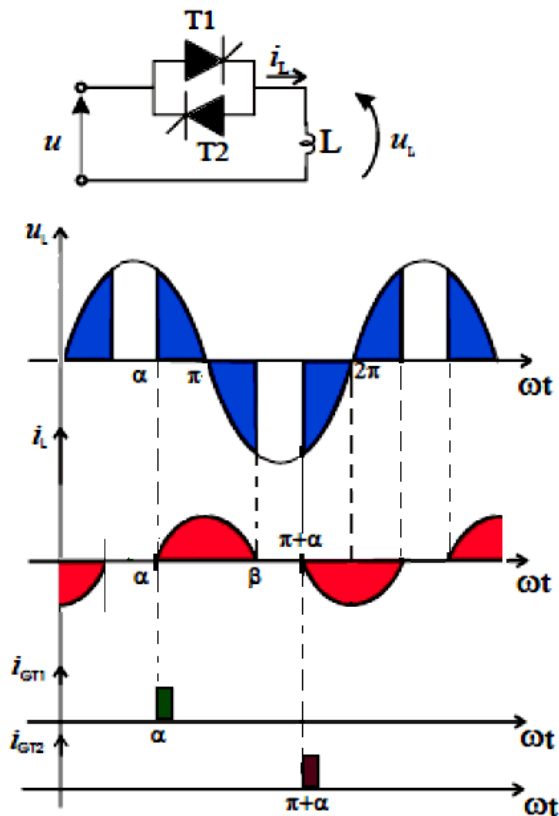
Dobit za potrošača: Potrošači koji u svom računu imaju stavku za reaktivnu energiju imaju direktnu finansijsku dobit (nakon izvršene kompenzacije reaktivne energije iz računa se eliminiše stavka koja se odnosi na reaktivnu energiju ili se značajno umanjuje). Uloženi novac za kompenzaciju reaktivne energije se vraća u periodu eksploatacije višestruko (od 10 do 15 puta).

Dobit za elektroenergetski sistem: 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.

U ovom predavanju će biti obrađeni statički tiristorski pretvarači za kompenzaciju reaktivne energije, koji su bazirani na korišćenju topologije sa anti-paralelnom spregom tiristora. Topologija monofaznog tiristorskog regulatora je veoma značajna jer se u osnovi koristi i u trofaznim sistemima, te će stoga na ovom mestu baš ova topologija prvo biti proučavana i biće date teorijske osnove za nju.

Nakon teoretskog uvoda, predavanje će biti prošireno na složenije, trofazne topologije tiristorskih kompenzatora, kao i na neke tipične hibridne tiristorske topologije (kombinacija stepenastih tiristorskih regulatora i tiristorski kontrolisan reaktor), kao i na prikaz tipičnog serijskog kompenzatora reaktivne energije.

Na Sl.1. su prikazani tipični monofazni regulator kod koga je primenjena fazna regulacija ugla paljenja tiristora, sa čisto induktivnim opterećenjem, kao i talasni oblici mrežnog napona na opterećenju i struje opterećenja.



Sl.1. Fazni regulator sa induktivnim opterećenjem

Cilj je dobiti izraz za struju potrošača (reaktivnog opterećenja- prigušnice L). Izraz za struju se dobija iz teorije koja sledi.

Naponska jednačina za induktivni potrošač ($\varphi = \pi/2$):

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (1)$$

Struju i_L dobijamo iz jednačine (1) integracijom :

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

Napon mreže se menja po sinusnom zakonu $u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t$, tako da je jednačinu (2) moguće napisati kao :

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{\alpha/\omega}^t \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \cdot dt \quad (3)$$

Uvodeći smenu $\omega t = x$ dobijamo da je jednačina (3)

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \cdot \int_{\alpha}^x \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin x \cdot dx \quad (4)$$

Rešavanjem integrala u jednačini (4) dobijamo da je:

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

Odnosno vremenska promena struje opterećenja je sada data jednačinom :

$$i_L(t) = \frac{1}{\omega L} \sqrt{2} \cdot U \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (5)$$

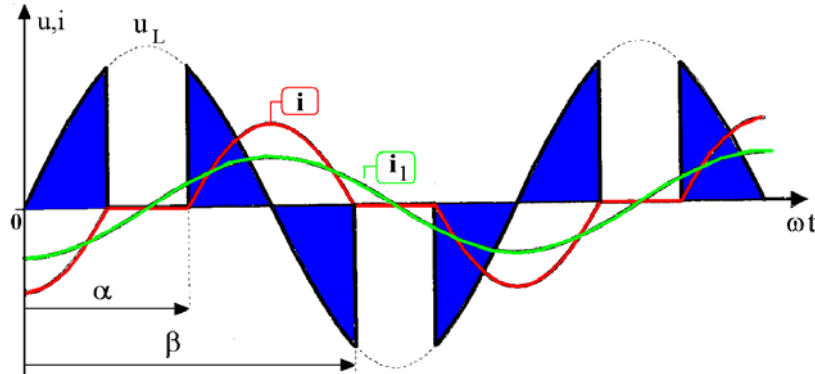
pri uslovu da je :

$$2\pi - \alpha \geq \omega t \geq \alpha \quad (6)$$

Izraz (5) važi za uglove α :

$$\pi/2 \leq \alpha \leq \pi \quad (7)$$

Na Sl.2. su dati talasni oblici mrežnog napona u , napona na opterećenju u_L , struje opterećenja i_L i struje njenog osnovnog harmonika i_1 .



Sl.2. Talasni oblik prvog harmonika struje

Amplituda osnovnog harmonika struje i_1 se dobija razvojem talasnog oblika struje u Furijeov red:

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \cdot \cos x dx = \frac{4}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot [\cos \alpha - \cos x] \cdot \cos x dx \quad (8)$$

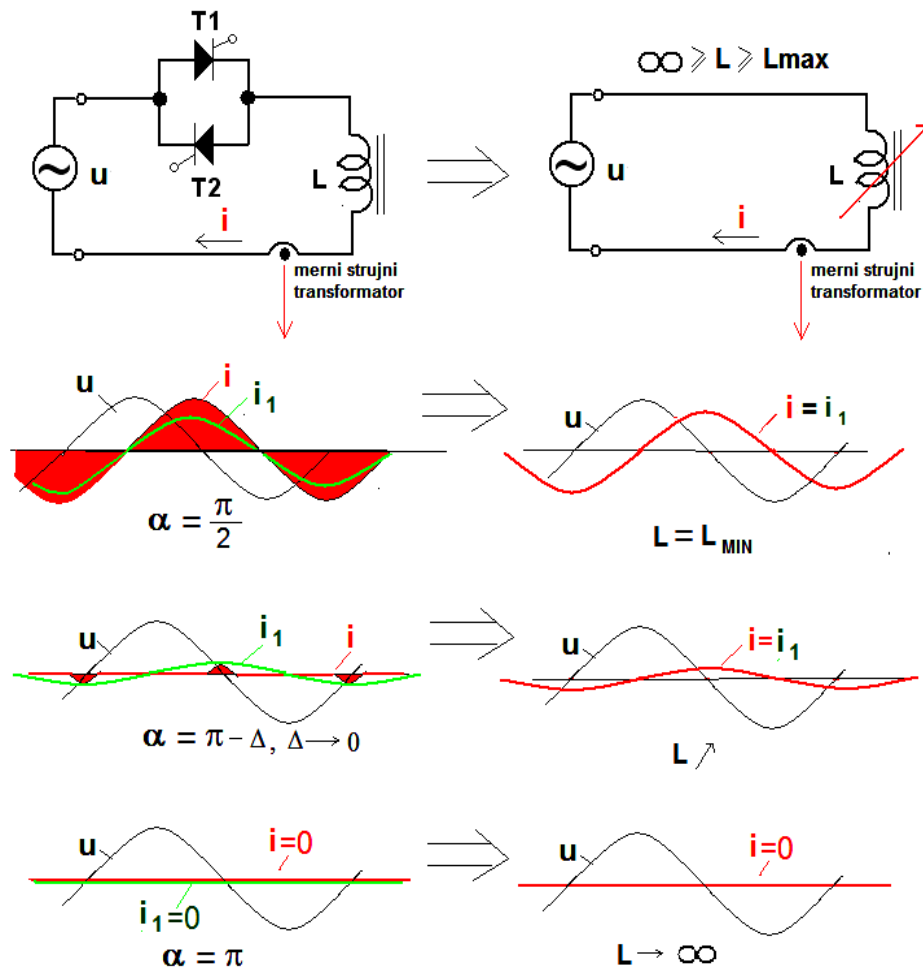
Izračunavanjem integrala u jednačini (8) se dobija da je amplituda osnovnog harmonika struje i_1 u funkciji ugla α jednaka :

$$A_1 = -\frac{2\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] \quad (9)$$

Stoga je efektivna vrednost struje osnovnog harmonika data relacijom:

$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] \quad (10)$$

Viši harmonici struje (i_3, i_5, i_7, \dots), koji su posledica struje opterećenja mogu se zanemariti jer su oslabljeni velikom impedansom prigušnice na višim učestanostima. 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 $L_{MIN} \leq L \leq +\infty$, kao što je prikazano na Sl.3.



Sl.3. Tiristorski regulator sa induktivnim opterećenjem kao ekvivalent promenljivoj induktivnosti

Iz ovog razloga se ovi fazni regulatori primenjuju u sistemima za kompenzaciju reaktivne energije (reaktivne snage).

Mogućnost postrojenja za distribuciju električne energije, da snabdeva priključene potrošače dovoljnim količinama energije zavisi od načina na koji potrošači koriste tu energiju. Mera efikasnosti korišćenja električne energije je faktor snage koji je definisan kao odnos aktivne i prividne snage:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (11)$$

Najveća vrednost faktora snage se ima za omsko opterećenje tj. kada je $P=UI$, odnosno $\lambda=1$. Smanjenje faktora snage se može dogoditi iz dva razloga:

- Kada je struja koja se uzima iz mreže fazno pomerena u odnosu na napon, pa je za prenos energije istom snagom potrebna znatno veća efektivna vrednost struje.
- Kada struja opterećenja nije prosto periodična. U ovom slučaju u struji osim prvog harmonika koji vrši prenos energije, postoje i viši harmonici čija se učestanost razlikuje od učestanosti mrežnog napona.
- Ovi harmonici ne vrše prenos energije već samo utiču na povećanje efektivne vrednosti struje.

Povećanje efektivne vrednosti struje za istu snagu kojom se prenosi energija ima višestruke negativne efekte:

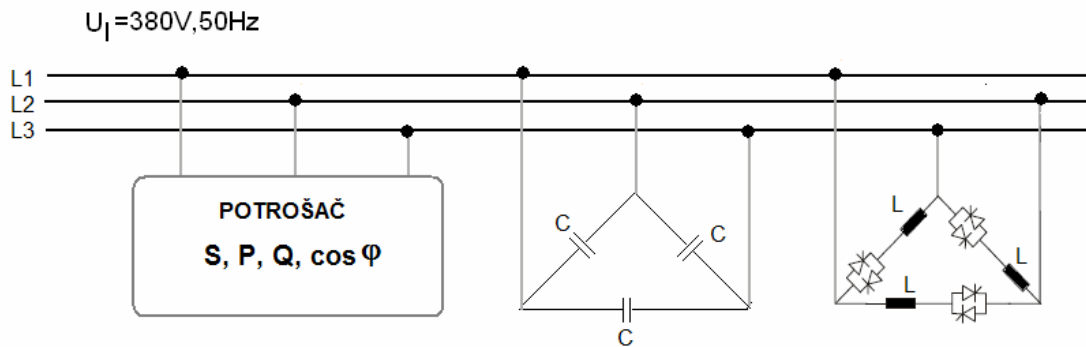
- Povećavanje gubitaka u distributivnoj mreži
- Povećanje gubitaka u generatorima za proizvodnju električne energije
- Na osnovu prethodnog, nepotpuno korišćenje raspoložive mehaničke snage
- Kontaktna oprema se mora dimenzionisati na veće struje nego što je to potrebno

U ovom delu se analiziraju mogućnosti popravke faktora snage za opterećenja koja iz mreže uzimaju prostoperiodičnu struju koja je fazno pomerena u odnosu na mrežni napon. To su na primer veća industrijska postrojenja gde struja kasni za mrežnim naponom, tako da se potrošač prema mreži ponaša kao otporno-induktivno ($R-L$) opterećenje.

Ako su promene induktivne komponente struje opterećenja male, paralelno sa potrošačem se može priključiti baterija kondenzatora odgovarajuće fiksne kapacitivnosti, tako da u toku dana, faktor snage vrlo malo odstupa od maksimalne vrednosti.

Za veće promene induktivne komponente struje baterija kondenzatora se mora podeliti u više manjih grupa pa se onda prema potrebi uključuje potreban broj grupa kondenzatora. Uključenje pojedinih grupa kondenzatora se može vršiti pomoću kontaktora ili poluprovodničkih prekidača (tiristora, GTO, IGBT i sl.) Kada se uključanje ostvaruje preko tiristora potrebno je uključanje vršiti kada su napon na kondenzatoru i mrežni napon jednaki, jer bi u suprotnom moglo doći do oštećenja tiristora zbog prevelikih struja uključenja.

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. Principiska šema ovakvog rešenja je data na Sl.4.



Sl.4. Popravka faktora snage u trofaznom sistemu sa induktivno opterećenim trofaznim tiristorskim regulatorom

Jednačina (10) određuje efektivnu vrednost prvog harmonika struje. Na sličan način se mogu izvesti i efektivne vrednosti struja viših harmonika. Amplituda k -tog harmonika se izračunava iz osnovne jednačine:

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(x) \cos kx dx \quad (12)$$

Rešavanjem integrala (12) dobija se da je amplituda k -tog harmonika:

$$A_k = -\frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L} \cdot \frac{\sin k\alpha \cdot \cos \alpha - k \cdot \cos k\alpha \cdot \sin \alpha}{k \cdot (k^2 - 1)} \quad (13)$$

Na Sl.5 je grafički prikazan odnos pojedinih harmonika tako što su date njihove efektivne vrednosti. Sa ove slike se uočava da neželjena harmonijska izobličenja potiču uglavnom od trećeg harmonika, koji ima maksimalnu vrednost za $\alpha = 120^\circ$. Za ovu vrednost ugla iz relacije (13) se dobija da je:

$$A_3(\alpha) = \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L} \cdot \frac{\sin 3\alpha \cdot \cos \alpha - 3 \cdot \cos 3\alpha \cdot \sin \alpha}{3 \cdot (3^2 - 1)} \quad (14)$$

odnosno:

$$A_3 = A_{3MAX} = A_3\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{4\sqrt{2}U}{\pi\omega L} \cdot \frac{\sin 3 \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot \cos \frac{2\pi}{3} - 3 \cdot \cos 3 \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot \sin \frac{2\pi}{3}}{3 \cdot (3^2 - 1)} \quad (15)$$

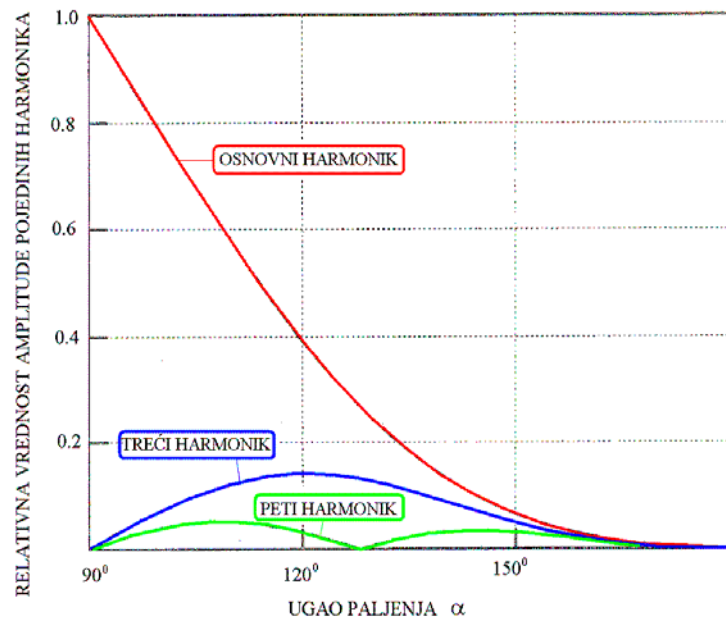
Odnosno krajnji izraz za A_{3MAX}

$$A_3 = A_{3MAX} = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138 \cdot \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \quad (16)$$

Efektivna vrednost struje trećeg harmonika je data relacijom:

$$I_3 = \frac{A_{3MAX}}{\sqrt{2}} = \frac{U}{\omega L} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4\pi} = 0.138 \cdot \frac{U}{\omega L} \quad (17)$$

Ostali harmonici imaju zanemarljivo male vrednosti zbog velike impedanse induktivnog opterećenja.

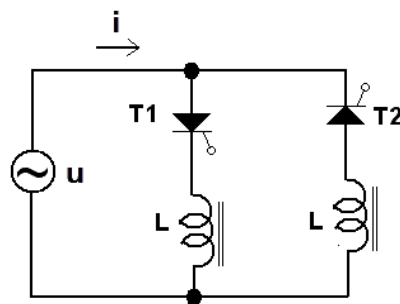


Sl.5. Sadržaj harmonika u struji kod monofaznog tiristorskog regulatora sa induktivnim opterećenjem

Ako se tri monofazna tiristorska regulatora vežu u trougao, kao što pokazuje Sl.5., struje trećeg harmonika će se zatvarati unutar trougla i neće se pojavljivati u struju mreže, tako da će harmonijska izobličenja struje trofaznog kompenzatora biti zanemarljivo mala. Ukupna trofazna reaktivna snaga trofaznog kompenzatora je data relacijom:

$$Q = 3U_f I_1 = 3U_l I_1 = \frac{6}{\omega L} \cdot U_l^2 \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] \quad \text{za } \pi/2 \leq \alpha \leq \pi \quad (18)$$

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), kao što pokazuje Sl.4. Umesto faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora (Sl.1) za realizaciju kompenzatora se može koristiti kao osnovna jedinica monofazni regulator sa dve prigušnice kao što prikazuje Sl.6.



Sl.6. Kompenzator sa proširenim opsegom ugla paljenja

U slučaju ove konfiguracije faznog regulatora ugao paljenja tiristora se može menjati u punom opsegu tj. $0 \leq \alpha \leq \pi$. 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:

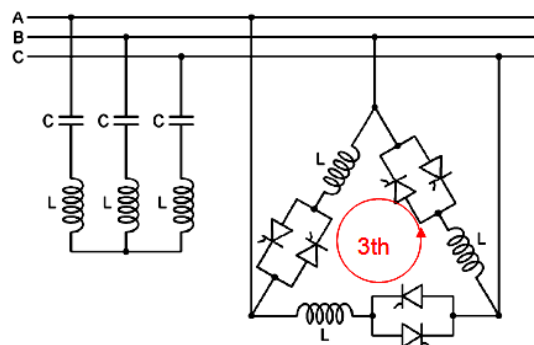
$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]; \quad 0 \leq \alpha \leq \pi \quad (19)$$

jedina razlika je opsegu promene ugla paljenja.

Poređenjem ova dva rešenja tiristorskih kompenzatora može se zaključiti da su prednosti rešenja sa dve prigušnice u proširenom opsegu ugla paljenja tiristora. Za istu efektivnu vrednost osnovnog harmonika potrebna je dvostruko veća vrednost prigušnice, što za posledicu ima dvostruko manja harmonijska izobličenja struje koja se uzima iz mreže. Nedostatak ovog rešenja je u nedovoljnoj iskorišćenosti prigušnica jer se magnećenje svake pojedinačne prigušnice vrši samo u jednu stranu, pa se postavlja opravdano pitanje da li je poboljšanje performansi kompenzatora dovoljno opravdano za znatno veći utrošak materijala (gvožđa za magnetno kolo i bakra za namotaje).

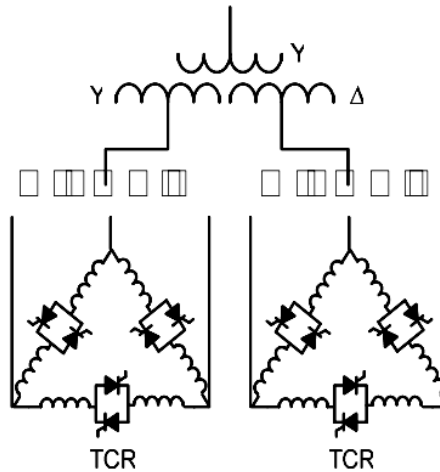
Najčešće korišćeni sistem za statičku tiristorsku kompenzaciju reaktivne snage (ili energije) je prikazan na Sl.4. Promenom ugla paljenja tiristora menja se efektivna vrednost osnovnog harmonika struje kroz prigušnicu (ekvivalentno efektu promenljive induktivnosti). Baterija kondenzatora generiše konstantnu 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, kao što je pokazano na Sl.5. 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, ali i jednosmerna komponenta struje. Na red sa kondenzatorima se stoga dodaju prigušnice male induktivnosti (kao što je prikazano na Sl.7), 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 najčešće **peti , a ponekada i sedmi harmonik.**



Sl.7. Eliminacija trećeg i petog harmonika u sistemu tiristorske kompenzacije

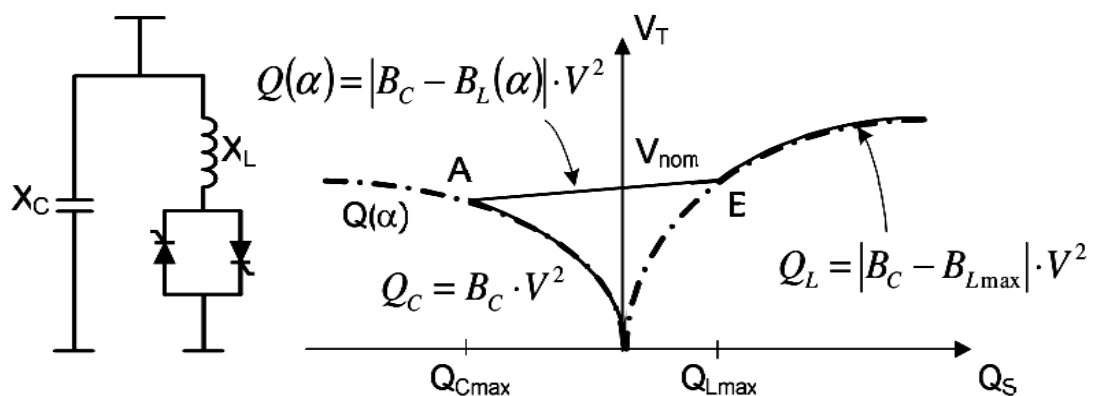
Veoma bitna napomena je da se prvi dominantni viši harmonik-treći harmonik struje faznog regulatora se zatvara unutar trougla faznog regulatora i nema ga u mrežnoj struji.



Sl.8. Eliminacija petog i sedmog harmonika u sistemu tiristorske kompenzacije (12-pulsna kombinacija)

Na Sl.8 je prikazana 12-pulsna kombinacija kojom se postiže eliminacija petog i sedmog harmonika, pri čemu 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”.

Na Sl.9 je prikazana tipična V-Q karakteristika tiristorski kontrolisane prigušnice u kombinaciji sa kondenzatorom.

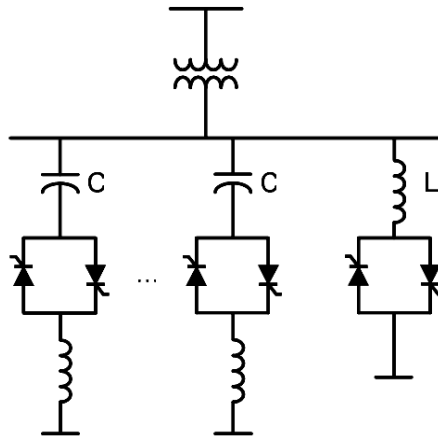


Sl.9. Tipična V-Q karakteristika tiristorskog kompenzatora reaktivne snage

Karakteristika V-Q je ustvari karakteristika napon V-reaktivna snaga Q, za fazno kontrolisani kompenzator reaktivne energije. Baterija kondenzatora je fiksna, a 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 ovog tipa VAR kompenzatora).

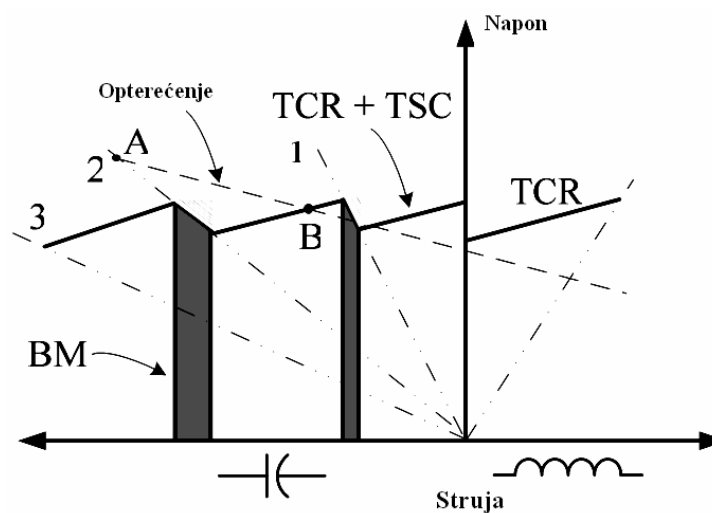
Na Sl.10 je prikazana konfiguracija u kojoj se koriste stepenasta regulacija-TSC i kontinualna regulacija-TCR, odnosno kompenzacija reaktivne snage; Navedene skraćenice imaju značenja: TSC- *Thyristor Switched Capacitor Circuit* i TCR- *Thyristor Controlled Reactor*.



Sl.10. Kombinacija stepenaste i kontinualne kompenzacije reaktivne snage

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.

Na Slici 11 je prikazana tipična $V-I$ karakteristika ovog tipa kompenzatora reaktivne snage.

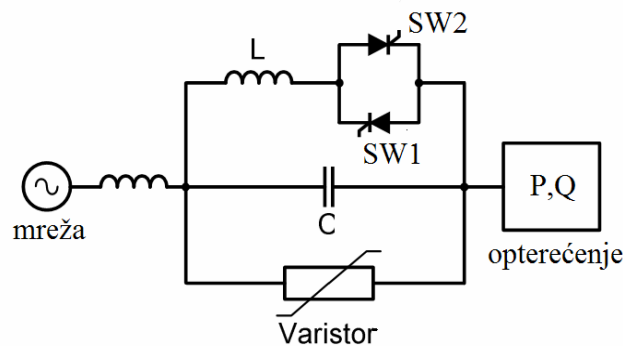


Sl.11. Naponsko-strujna karakteristika TCR i TSC kombinacije za kompenzaciju reaktivne snage

Pomenuti statički kompenzatori se karakterišu: (1) kontinualnom kontrolom, praktično bez tranzijenata, (2) niskim generisanjem harmonika (pošto je reaktivna snaga kontrolisanog reaktora relativno mala, (3) velikom fleksibilnošću rada i kontrole.

Glavni nedostatak im je relativno visoka cena u odnosu na TSC i TCR pojedinačno.

Prethodno razmatrani kompenzatori spadaju u grupu paralelnih (otočnih) kompenzatora. U nekim aplikacijama se primenjuju tiristorski kontrolisani serijski kompenzatori, tzv. *Thyristor Controlled Series*, kompenzatori. Jedna tipična principiska šema je data na Sl. 12.



Sl.12. Principiska šema topologije tiristorski kontrolisanog serijskog kompenzatora-TCS reaktivne snage

Dva su prihvaćena koncepta TCS sistema:

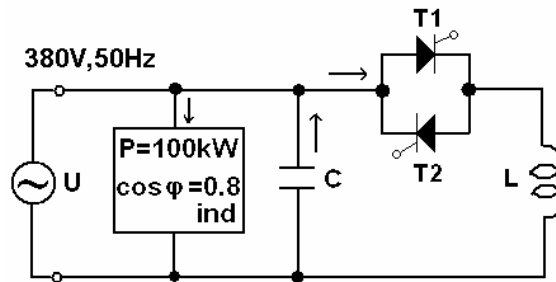
- (1) prvi koncept pruža elektromehaničko prigušenje između velikih električnih sistema promenom reaktansi za interkonekcija, odnosno TCS će obezbediti promenljivu kapacitivnu reaktansu;
- (2) drugi koncept menja svoju prividnu impedansu za subsinhronu frekvenciju

Ovi kompenzatori su jako korisni kada je potrebno uvesti i povećati prigušenja kod među-povezivanja velikih sistema (velikih interkonekcija). Njima se prevazilazi efekat tzv. *subsinhrone rezonance* (SSR). Inače SSR je fenomen koji se odnosi na interakciju između velike termičke jedinice (termo bloka) i redno kompenzovanog transmisivnog sistema.

PRAKTIČNI PRIMERI-ZADACI

MONOFAZNI SISTEM- ZADATAK 1:

U kompenzacionom postrojenju prikazanom na slici reaktivna snaga se reguliše prema priloženoj šemi.



Potrošač snage 100kW i faktora snage $\cos\varphi=0.8$ (ind) priključen je na mrežni napon 380V, 50Hz. U cilju kompenzacije reaktivne snage paralelno sa potrošačem su priključeni kondenzator $C=4000\mu\text{F}$ i tiristorski regulator reaktivne snage koji se sastoji od antiparalelne veze tiristora i induktivnosti $L=1.7\text{mH}$. Potrebno je izračunati:

- Kolika treba da bude efektivna vrednost struje prvog harmonika regulatora da bi faktor snage prvog harmonika celog postrojenja bio jednak 1?
- Ugao paljenja tiristorske grupe da bi se postigao prethodni zahtev.

REŠENJE:

Posmatrajmo konfiguraciju POTROŠAČ-KONDENZATORSKA BATERIJA. Ukupna reaktivna snaga ove konfiguracije je data relacijom:

$$Q_1 = Q_p - Q_b$$

Reaktivna snaga kondenzatorske baterije se dobija iz jednačine:

$$Q_b = UI_C = U \cdot \frac{U}{Z_C} = \frac{U^2}{\frac{1}{\omega C}} = \omega CU^2$$

Obzirom da je $\omega=2\pi f=314$ rad/s, $C=4\text{mF}$ i $U=380\text{V}$, dobijamo da je reaktivna snaga baterije kondenzatora jednaka :

$$Q_b = 314 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 380^2 \cong 181.366\text{kVar}$$

Reaktivna snaga potrošača se dobija iz jednačine:

$$\begin{aligned} Q_p &= S \cdot \sin \varphi = \frac{P}{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi = P \cdot \tan \varphi \\ \cos \varphi &= 0.8 \end{aligned}$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0.8^2} = 0.6$$

$$Q_p = P \cdot \tan \varphi = 100kW \cdot \frac{0.6}{0.8} = 75kVar$$

Ukupna reaktivna snaga konfiguracije: POTROŠAČ-KONDENZATORSKA BATERIJA je:

$$Q_1 = Q_p - Q_b = 75kVar - 181.36kVar = -106.36kVar$$

Iz ovoga sledi da je kapacitivna snaga veća od induktivne, tako da tiristorski regulator sa antiparalelnom vezom tiristora i prigušnicom L treba da troši reaktivnu snagu. Reaktivna struja prvog harmonika tiristorskog regulatora (fazna struja) je data relacijom:

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

Ukupna reaktivna snaga prvog harmonika struje tiristorskog regulatora je data relacijom:

$$Q_r = UI_1 = U \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

$$Q_r(\alpha) = \frac{2U^2}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

U je vrednost faznog napona regulatora.

- a) Da bi ukupni faktor bio jednak 1 reaktivna snaga regulatora mora biti:

$$Q_r(\alpha) = Q_1 = UI_1$$

Iz ove relacije određujemo potrebnu efektivnu vrednost struje prvog harmonika:

$$I_1 = \frac{Q_1}{U} = \frac{106.36kVar}{380} \approx 280A$$

- b) Vrednost faznog ugla regulatora dobijamo kada vrednost za efektivnu vrednost struje I_1 uvrstimo u jednačinu:

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

Obzirom da je $\omega=2\pi f=314$ rad/s, $L= 1.7mH$ i $U=380V$, dobijamo da je :

$$280 = \frac{2 \cdot 380}{314 \cdot 1.7 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] = 1423.75 \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

Ugao α_1 koji treba odrediti obijamo rešavanjem jednačine:

$$\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] = 0.1966$$

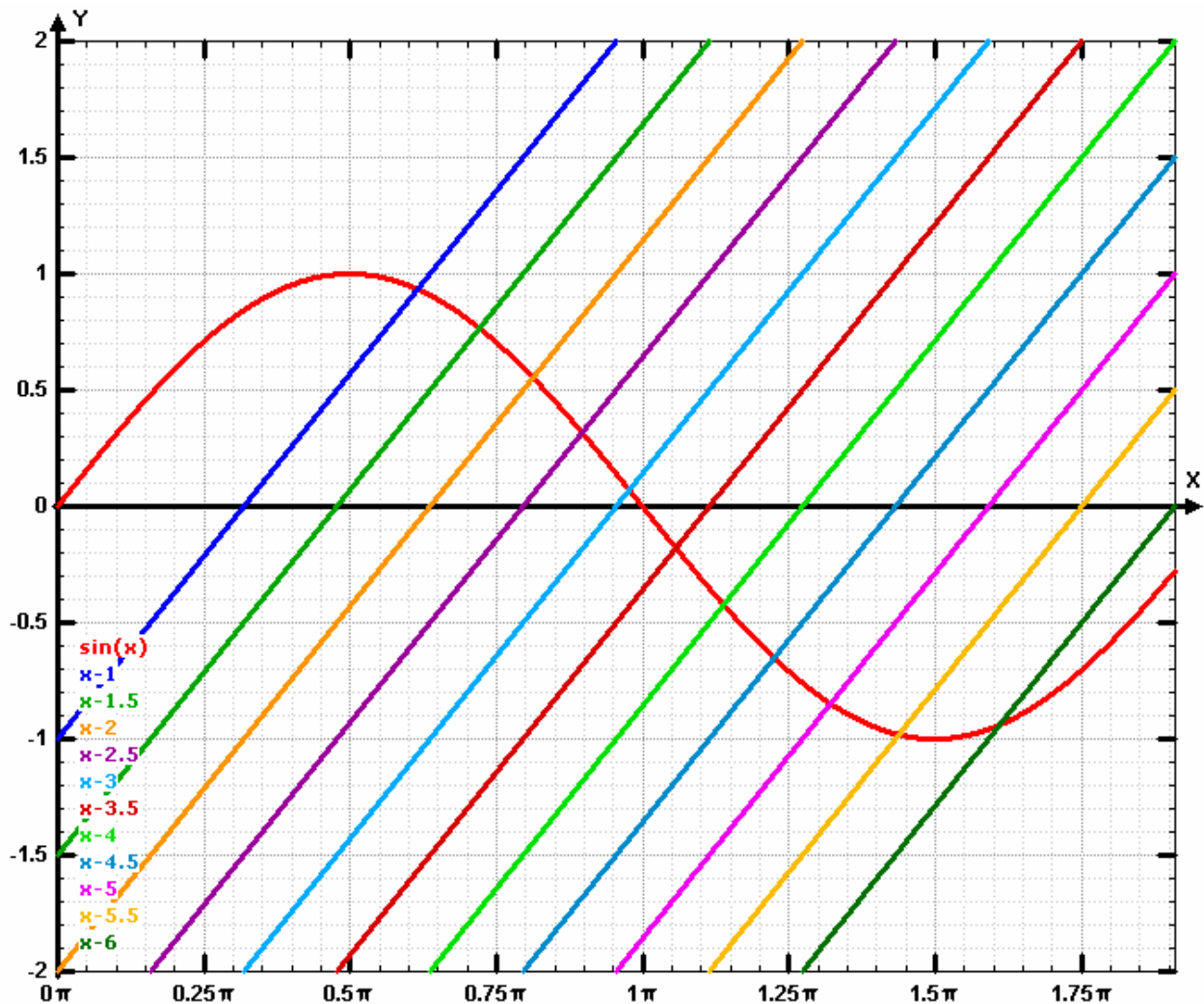
Odnosno iz jednačina:

$$\frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} = 0.8$$

$$2\alpha - \sin 2\alpha = 5.045$$

Grafičkim rešavanjem ove poslednje jednačine (Slika 1.1) se dobija da je :

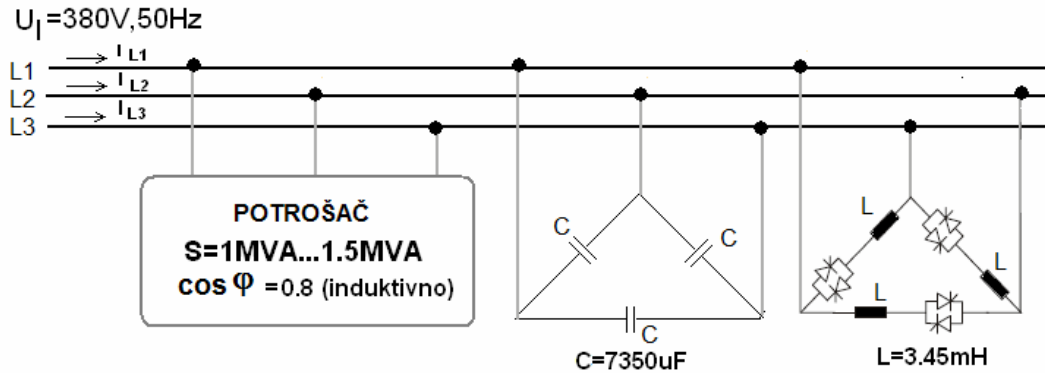
$$\alpha_1 = 120^\circ = \frac{2\pi}{3} \text{ rad}$$



Slika 1.1.-Grafičko rešavanje transcendentne jednačina $x - \sin x = A$; $A = 1 \dots 6$

TROFAZNI SISTEM-ZADATAK 2:

U kompenzacionom postrojenju prikazanom na slici reaktivna snaga se reguliše prema priloženoj šemi. Izračunati potreban opseg ugla paljenja tiristorske grupe da bi faktor snage prvog harmonika bio jednak jedinici.



REŠENJE:

Posmatrajmo konfiguraciju POTROŠAČ-KONDENZATORSKA BATERIJA. Ukupna reaktivna snaga ove konfiguracije je data relacijom:

$$Q_1 = Q_p - Q_b$$

Reaktivna snaga kondenzatorske baterije se dobija iz jednačine:

$$Q_b = 3UI_C = 3U \cdot \frac{U}{Z_C} = \frac{3U^2}{\frac{1}{\omega C}} = 3\omega CU^2$$

Obzirom da je $\omega = 2\pi f = 314$ rad/s, $C = 7.35$ mF i $U = 380$ V, dobijamo da je reaktivna snaga baterije kondenzatora jednaka :

$$Q_b = 3 \cdot 314 \cdot 7.35 \cdot 10^{-3} \cdot 380^2 \cong 1 \text{ MVar}$$

Reaktivna snaga potrošača se dobija iz jednačine:

$$Q_p = S \cdot \sin \varphi = \frac{P}{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi = P \cdot \tan \varphi$$

Obzirom da je $S = 1 \text{ MVA} \dots 1.5 \text{ MVA}$ za vrednosti reaktivne snage potrošača ćemo imati dve granične vrednosti:

$$Q_{P\min} = S_{\min} \cdot \sin \varphi$$

Tako je:

$$Q_{P\max} = S_{\max} \cdot \sin \varphi$$

$$Q_{P\min} \leq Q_p \leq Q_{P\max}$$

Vrednosti $Q_{P\min}$ i $Q_{P\max}$, odnosno opseg promene reaktivne snage dobijamo za sledeće vrednosti:

$$\cos \varphi = 0.8$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0.8^2} = 0.6$$

$$Q_{P\min} = S_{\min} \cdot \sin \varphi = 0.6 \text{ MVar}$$

$$Q_{P\max} = S_{\max} \cdot \sin \varphi = 0.9 \text{ MVar}$$

$$0.6 \text{ MVar} \leq Q_P \leq 0.9 \text{ MVar}$$

Ukupna reaktivna snaga konfiguracije: POTROŠAČ-KONDENZATORSKA BATERIJA je:

$$Q_{l\min} = Q_{P\min} - Q_b = 0.6 \text{ MVA} - 1 \text{ MVA} = -0.4 \text{ MVar}$$

$$Q_{l\max} = Q_{P\max} - Q_b = 0.9 \text{ MVA} - 1 \text{ MVA} = -0.1 \text{ MVar}$$

Iz ovoga sledi da je kapacitivna snaga veća od induktivne, tako da tiristorski regulator sa antiparalelnom vezom tiristora i prigušnicom L treba da troši reaktivnu snagu. Reaktivna struja prvog harmonika tiristorskog regulatora (fazna struja) je data relacijom:

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

Ukupna reaktivna snaga prvog harmonika struje tiristorskog regulatora je data relacijom:

$$Q_r = 3U_f I_1 = 3U I_1 = 3 \cdot U \frac{2U}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

$$Q_r(\alpha) = \frac{6U^2}{\omega L} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right]$$

U je vrednost faznog napona regulatora obzirom da je on vezan u sprezi "trougao" ($U_l = U_f$).

Obzirom da je $\omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$, $L = 3.45 \text{ mH}$ i $U = 380 \text{ V}$, dobijamo da je reaktivna snaga prvog harmonika jednaka :

$$Q_r(\alpha) = \frac{6 \cdot 380^2}{314 \cdot 3.45 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] = 0.8 \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] u \text{ (MVar)}$$

Da bi ukupni faktor bio jednak 1 za ukupni opseg promene opterećenja ($S = 1 \text{ MVA} \dots 1.5 \text{ MVA}$) reaktivna snaga regulatora mora biti:

$$Q_r(\alpha_1) = Q_{l\min} \text{ , za slučaj minimalnog opterećenja}$$

Odnosno,

$$Q_r(\alpha_2) = Q_{1\max}, \quad \text{za slučaj maksimalnog opterećenja.}$$

U tom slučaju fazni ugao α regulatora mora da se menja u opsegu:

$$\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$$

Sada će biti određene vrednosti upravljačkih faznih uglova α_1 i α_2 .

Ugao α_1 dobijamo rešavanjem jednačine:

$$0.8 \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] = 0.4$$

Odnosno iz jednačina:

$$\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] = 0.5$$

$$\frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} = 0.5$$

$$2\alpha - \sin 2\alpha = \pi$$

Rešavanjem ove poslednje jednačine (grafičkim rešavanjem sa Sl.1.1.) se dobija da je :

$$\alpha_1 = 90^\circ = \pi / 2 \text{ rad} = 1.57 \text{ rad}$$

Ugao α_2 dobijamo rešavanjem jednačine:

$$0.8 \cdot \left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] = 0.1$$

Odnosno iz jednačina:

$$\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right] = 0.125$$

$$\frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} = 0.875$$

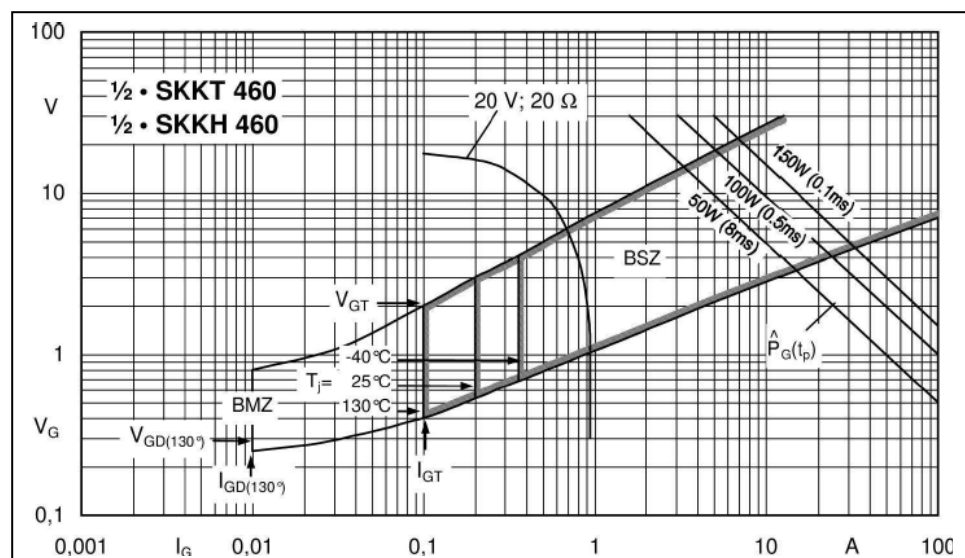
$$2\alpha - \sin 2\alpha = 5.495$$

Rešavanjem ove poslednje jednačine (Sl.1.1) se dobija da je :

$$\alpha_2 = 130^\circ = 2.26 \text{ rad}$$

Tako je konačno opseg ugla regulacije kojim se kompenzuje reaktivna snaga u ovom postrojenju jednak :

$$90^\circ \leq \alpha \leq 130^\circ$$



Slika 3 -Karakteristika gejta

Tabela 1

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{TAV}	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	460 (335)	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	18000	A
	$T_{vj} = 130$ °C; 10 ms	15500	A
i^2t	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 .. 10 ms	1620000	A ² s
	$T_{vj} = 130$ °C; 8,3 ... 10 ms	1200000	A ² s
V_T	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 1400$ A	max. 1,6	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 0,88	V
r_T	$T_{vj} = 130$ °C	max. 0,45	mΩ
$I_{DD}; I_{RD}$	$T_{vj} = 130$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}; V_{DD} = V_{DRM}$	max. 240	mA
t_{gd}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
t_{gr}	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	2	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 250	A/μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 1000	V/μs
t_q	$T_{vj} = 130$ °C ,	100 .. 200	μs
I_H	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 500	mA
I_L	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 2000	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 200	mA
V_{GD}	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 0,25	V
I_{GD}	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 10	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,072 / 0,035	K/W
$R_{th(j-c)}$	sin. 180°; per thyristor / per module	0,074 / 0,037	K/W
$R_{th(j-c)}$	rec. 120°; per thyristor / per module	0,078 / 0,039	K/W
$R_{th(c-s)}$	per thyristor / per module	0,02 / 0,01	K/W
T_{vj}		- 40 ... + 130	°C
T_{stg}		- 40 ... + 125	°C

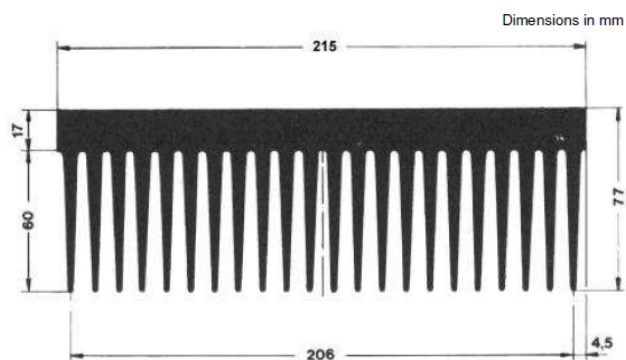
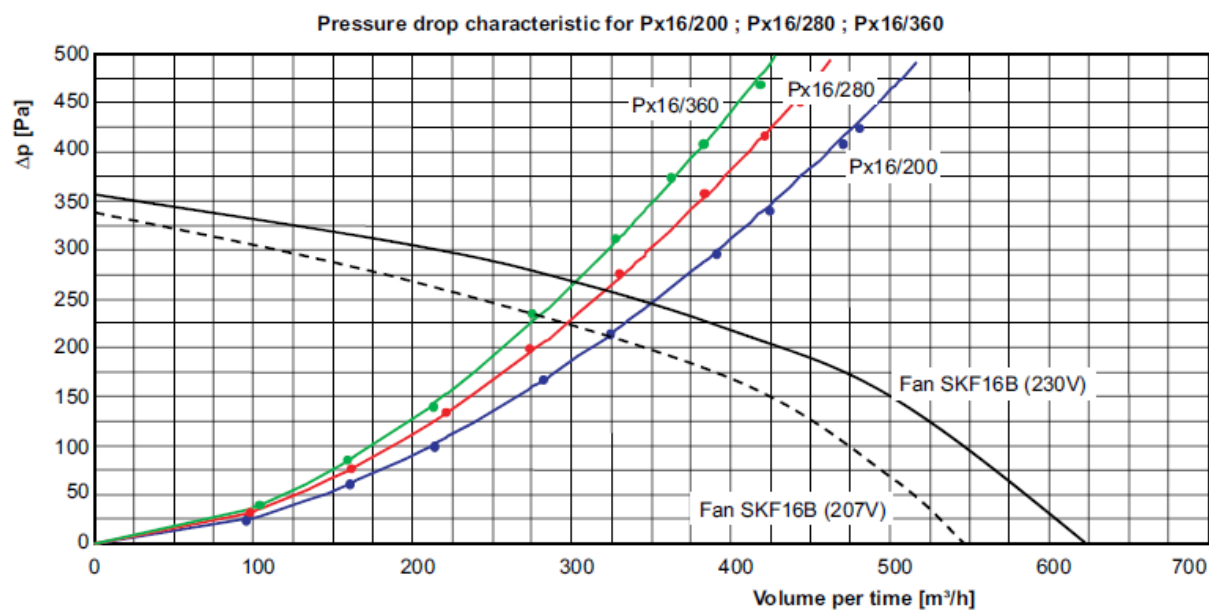
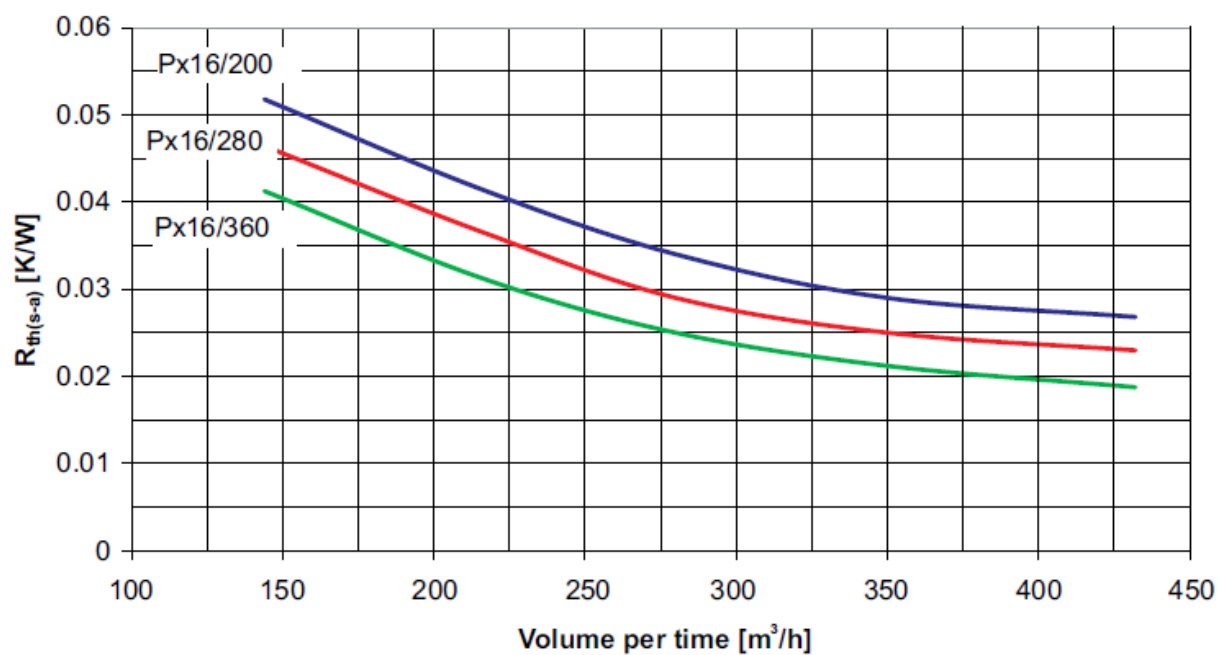


Tabela 2

Standard lengths	n	b / d Ø mm	R_{thha} K/W	R_{thha} with fan SKF 16B-230-01 K/W	w kg
P 16/170	3	20		0,05	4
P 16/200	3	20		0,046	4,7
	6	20		0,039	
	3	34		0,038	
	2	50		0,04	
	3	50		0,033	
P 16/300	6	34		0,036	7
	6	50		0,024	



Slika 4- Karakteristika hladnjaka i ventilatora



Slika 5- Karakteristika hladnjaka

U Beogradu 22.11.2019.

Predmetni profesor:

Prof.dr Željko Despotović, dipl.el.inž