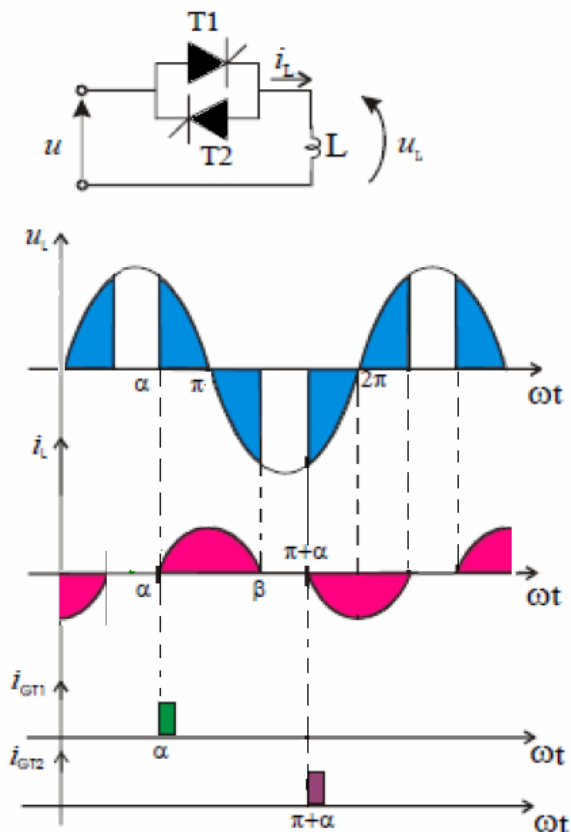


Tiristorski regulatori sa induktivnim opterećenjem-KOMPENZACIJA REAKTIVNE SNAGE



Sl.1. Fazni regulator sa induktivnim opterećenjem

Na Sl.1. je prikazan fazni regulator sa čisto induktivnim opterećenjem, kao i talasni oblici mrežnog napona na opterećenju i struje opterećenja. 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 :

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

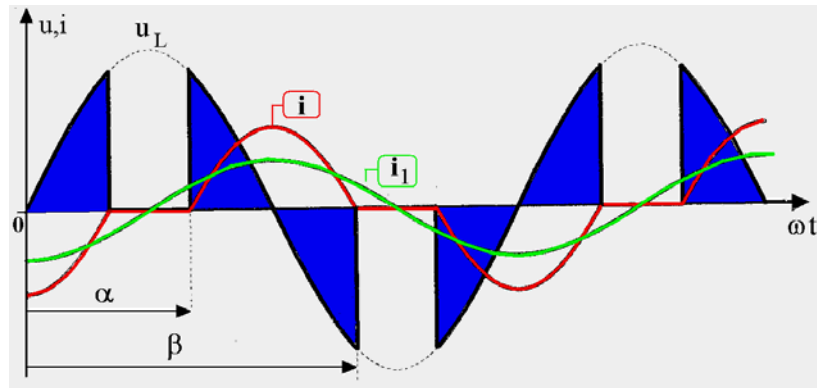
pri uslovu da je :

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

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:

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

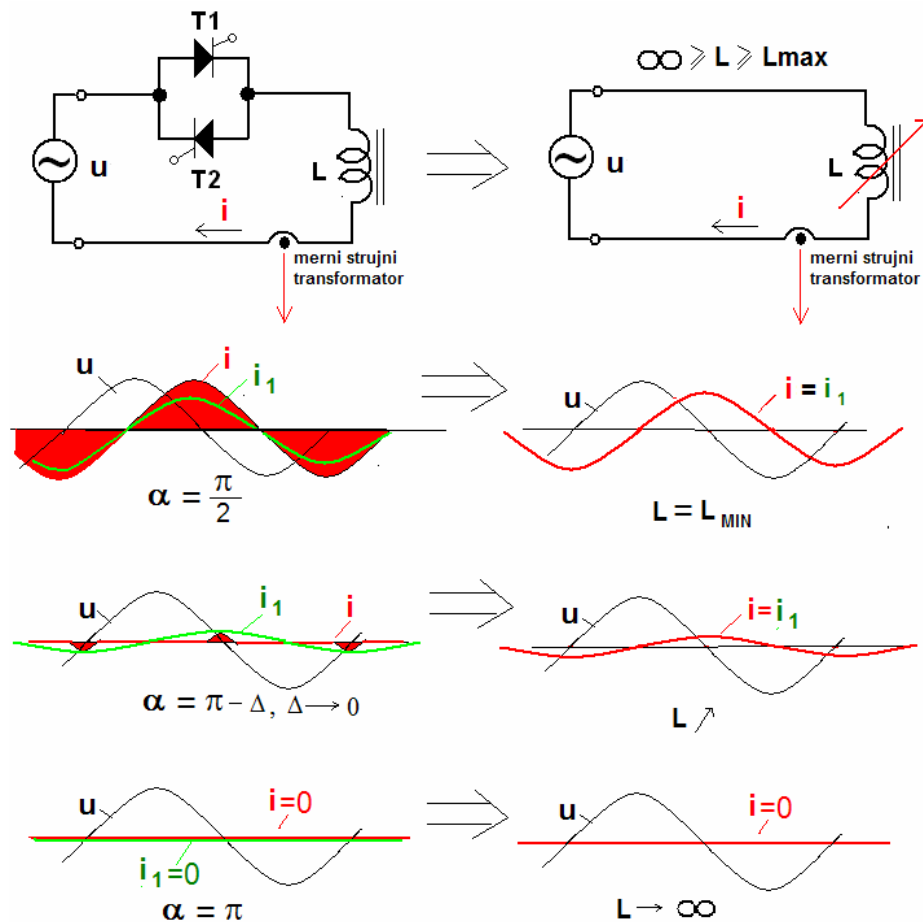
Izračunavanjem integrala u jednačini (8) se dobija da je amplituda osnovnog harmonika struje i_1 u funkciji ugla α jednaka :

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

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 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 2 nepotpuno korišćenje raspoložive mehaničke snage
- Kontaktna oprema se mora dimenzionisati na veće struje nego što je to potrebno

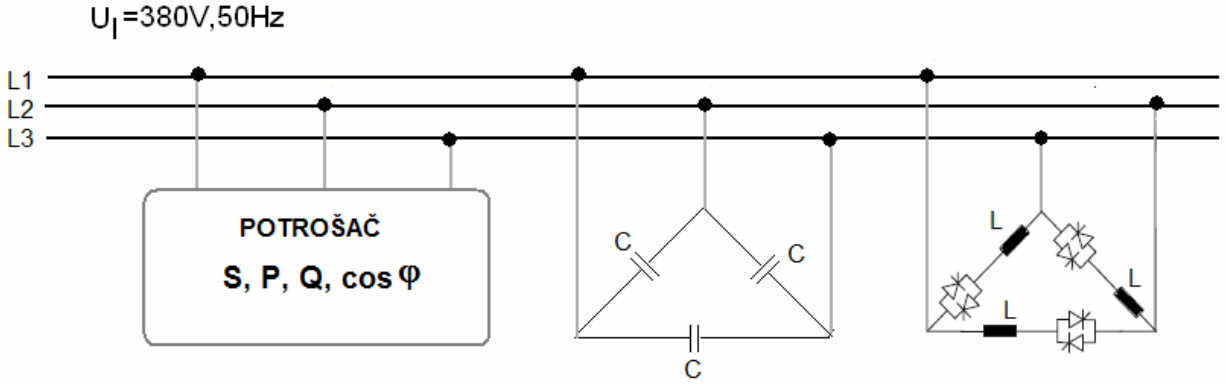
U ovom delu se analiziraju mogućnosti popravke faktora snage za opterećenja koja iz mreže uzimaju prostoperiodičnu struju koja je fazno pomerena u odnosu na mrežni napon. To su na primer veća industrijska postrojenja gde struja kasni za mrežnim naponom, tako da se potrošač prema mreži ponaša kao otporno-induktivno (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 uključenje ostvaruje preko tiristora potrebno je uključenje 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. Principijska šema ovakvog rešenja je data na Sl.4.



Sl.4. Korekcija faktora snage 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:

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

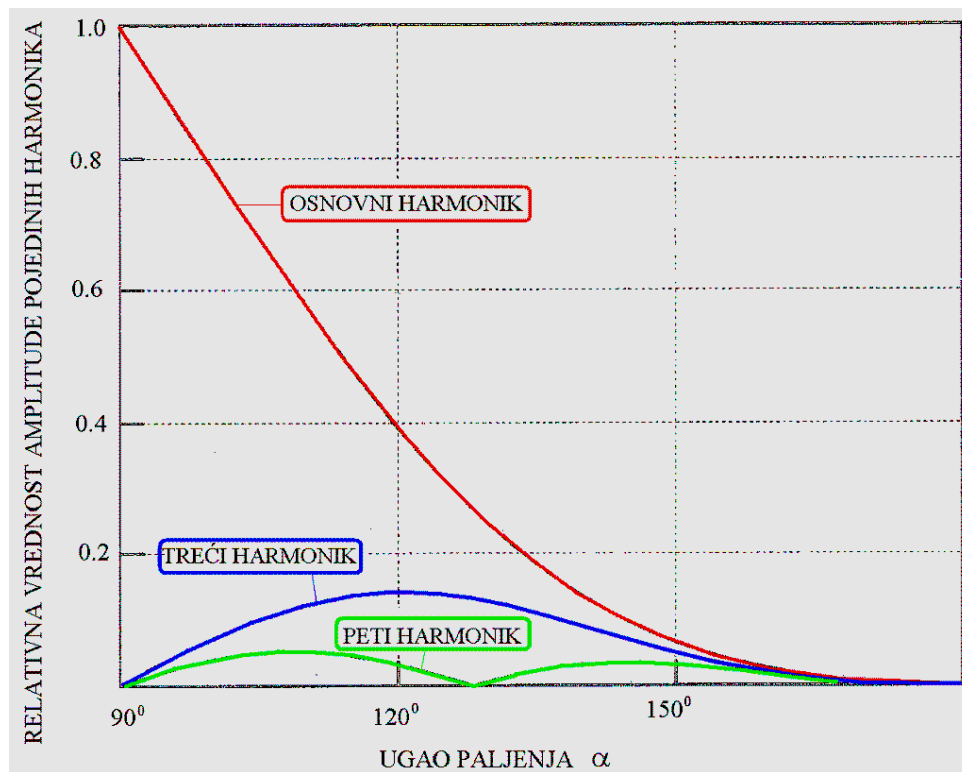
Odnosno krajnji izraz za A_{3MAX}

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

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

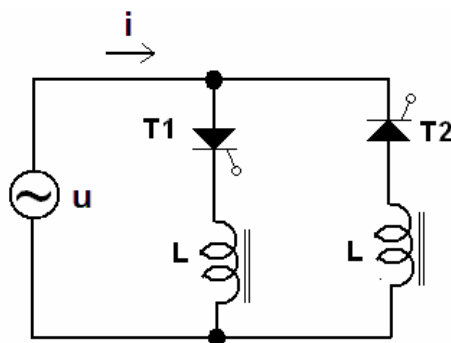
Ako se tri monofazna tiristorska regulatora vežu u trougao, kao što pokazuje Sl.5., struje trećeg harmonika će se zatvarati unutar trougla i neće se pojavljivati u struju mreže, tako da će harmonijska izobličenja struje trofaznog kompenzatora biti zanemarljivo mala.

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).