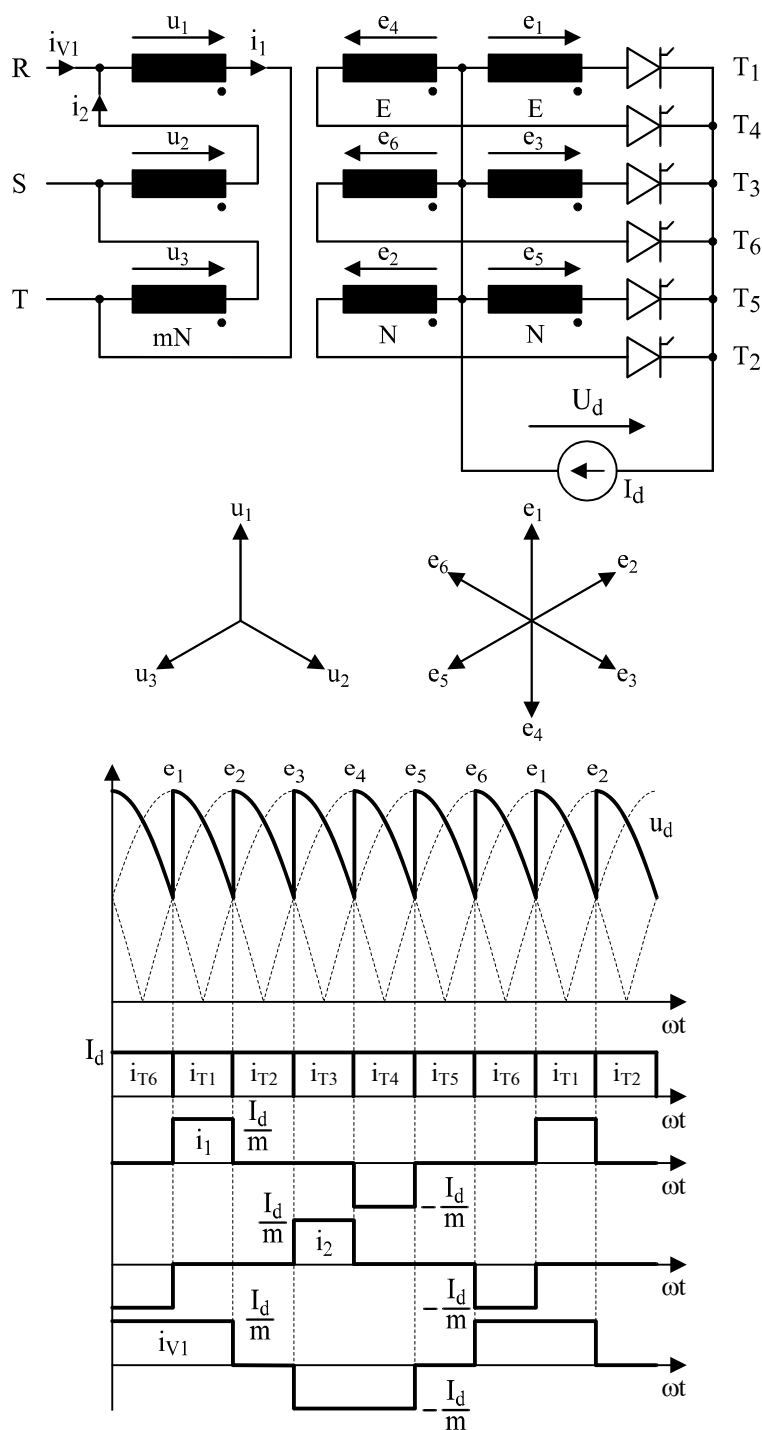


3.11.Šestofazni jednostrani ispravljač

Za dobijanje usmerenih struja u postrojenjima većih i najvećih snaga koriste se šestofazne i višefazne sprege koje u odnosu na trofazne sprege obezbeđuju u prvom redu manju valovitost struje i napona na prijemniku a uz to bolji sačinilac snage postrojenja, veći stepen iskorišćenja uz manje investicione troškove. Višefazne sprege najčešće se dobijaju pogodnim povezivanjem trofaznih i šestofaznih sprega.



Sl. 3.50. Šestofazni jednostrani ispravljač.

Na slici 3.50. je prikazan šestofazni jednostrani ispravljač jer su namotaji sekunda transformatora povezani tako da čine šestofaznu zvezdu. Talasni oblik napona na opterećenju je isti kao kod trofaznog mostnog ispravljača (slika 3. Error! Bookmark not defined..) s tom razlikom što se, kod šestofaznog jednostranog ispravljača, napon na

opterećenju sastoji od delova faznog napona sekundara transformatora dok se kod trofaznog mostnog ispravljača napon na opterećenju sastoji od delova međufaznog napona sekundara transformatora pa je prema (3.240) srednja vrednost napona na opterećenju:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}E}{\pi} \cos(\alpha). \quad (3.240)$$

Snaga dimenzionisanja transformatora

Efektivna vrednost struje kroz sekundarne namotaje transformatora je:

$$I'' = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_d^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{6}}. \quad (3.241)$$

Efektivna vrednost struje kroz primarne namotaje transformatora je:

$$I'' = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T I_d^2 dt} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}. \quad (3.242)$$

Snaga na koju treba dimenzionisati transformator je srednja vrednost prividnih snaga primara i sekundara transformatora:

$$S = \frac{1}{2}(S' + S'') = \frac{1}{2} \left(3 \cdot U \cdot \frac{I_d}{m \cdot \sqrt{3}} + 3 \cdot E \cdot \frac{I_d}{\sqrt{6}} \right) = \frac{3 \cdot E \cdot I_d}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{2}{\sqrt{6}} \right). \quad (3.243)$$

Maksimalna snaga kojom se energija prenosi opterećenju postiže se onda kada je najveći napon na opterećenju, odnosno za ugao paljenja tiristora $\alpha = 0$. Prema (3.240) ova snaga iznosi:

$$P_0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot EI_d. \quad (3.244)$$

Odnos snage na koju je potrebno dimenzionisati transformator i maksimalne snage kojom se energija može prenositi opterećenju je:

$$\frac{S}{P_0} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{2}{\sqrt{6}} \right) = 1.55. \quad (3.245)$$

Iz ovog izraza se vidi da je iskorišćenje transformatora znatno manje nego kod trofaznog mostnog ispravljača ($S/P_0 = 1.05$).

Spektar struje transformatora

Loše iskorišćenje transformatora kod ove sprege ispravljača je posledica velikih harmonijskih izobličenja struje sekundara transformatora. Na svakom stubu transformatora struje sekundara stvaraju magnetopobudnu silu M_2 . Razvojem ove magnetopobudne sile u furijeov red:

$$M_2(t) = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin(k\omega t), \quad (3.246)$$

dobija se amplituda k-tog harmonika:

$$B_k = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{I_d}{m} \cdot \sin(k\omega t) d(\omega t) = \frac{2I_d}{km\pi} \left[\cos\left(k \frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(k \frac{2\pi}{3}\right) \right]. \quad (3.247)$$

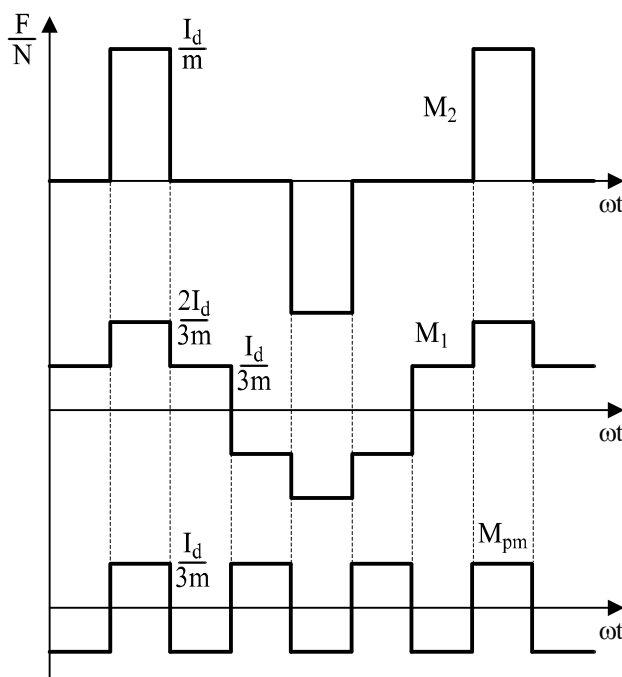
Iz izraza (3.247) se vidi da postoje samo neparni harmonici. Amplitude neparnih harmonika čija je učestanost jednaka celobrojnom umnošku trostruke učestanosti mrežnog napona iznose:

$$B_k = \frac{4I_d}{km\pi} \quad k = 3 \cdot (2n-1); \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.248)$$

dok su amplitude ostalih neparnih harmonika:

$$B_k = \frac{2I_d}{km\pi} \quad k = (2n-1); \quad n = 1, 2, 3, \dots; \quad k \neq 3 \cdot (2n-1). \quad (3.249)$$

Kod veze transformatora trougao - šestofazna zvezda, kako je to prikazano na slici 3.50. struje harmonika čija je učestanost jednaka celobrojnom umnošku trostruke učestanosti mrežnog napona zatvaraju se u trouglu jer su međusobno u fazi. Kod veze transformatora zvezda - šestofazna zvezda ako je u primaru priključen nulti provodnik, kroz ovaj provodnik teče zbir struja harmonika čija je učestanost jednaka celobrojnom umnošku trostruke učestanosti mrežnog napona, a ako nulti provodnik nije priključen ove struje se ne mogu zatvoriti u primarnom namotaju transformatora, pa se javlja magnetopobudna sila prinudnog magnećenja M_{pm} , a struje primara transformatora stvaraju magnetopobudne sile $M_1 = M_2 - M_{pm}$ (slika 3.51.). Stga se, kod ove sprege ispravljača izbegava veza primara transformatora u zvezdu.



Sl. 3.51. Relativne vrednosti magnetopobudnih sila transformatora.

Napon dimenzionisanja poluprovodničkih prekidačkih elemenata

Osim lošeg iskorišćenja transformatora nedostatak šestofaznog jednostranog ispravljača u odnosu na trofazni mostni ispravljač je što se za istu srednju vrednost napona na opterećenju tiristori moraju dimenzionisati na dvostruko veći inverzni napon. Kod šestofaznog jednostranog ispravljača maksimalna vrednost inverznog napona tiristora jednaka je dvostrukoj amplitudi faznog napona sekundara transformatora pa je odnos maksimalne vrednosti inverznog napona tiristora i maksimalne srednje vrednosti napona na opterećenju:

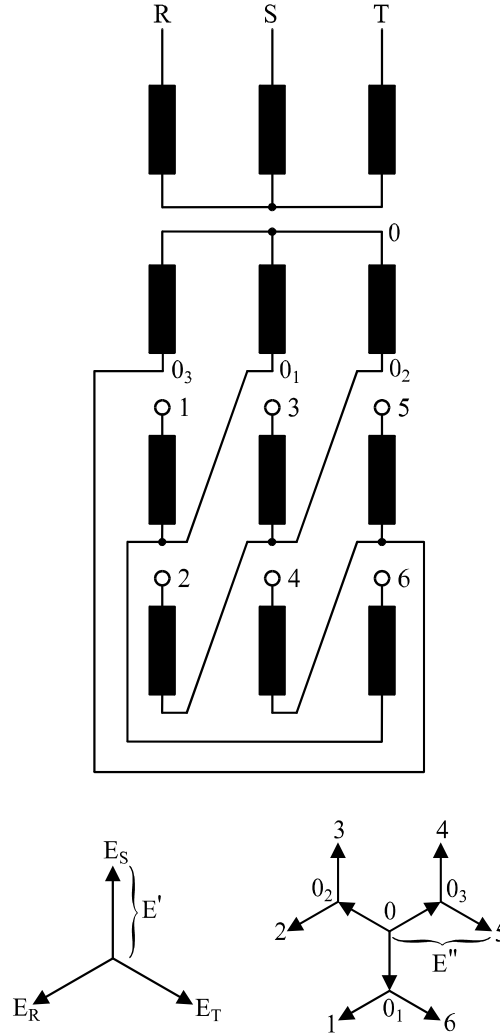
$$\frac{U_r}{U_{d0}} = \frac{2\sqrt{2}E}{3\sqrt{2}E} = \frac{2\pi}{3}, \quad (3.250)$$

dok je kod trofaznog mostnog ispravljača maksimalna vrednost inverznog napona tiristora jednaka amplitudi međufaznog napona sekundara transformatora pa je odnos maksimalne vrednosti inverznog napona tiristora i maksimalne srednje vrednosti napona na opterećenju:

$$\frac{U_r}{U_{d0}} = \frac{\sqrt{6}E}{3\sqrt{6}E} = \frac{\pi}{3}. \quad (3.251)$$

Sprega transformatora zvezda - račvasta zvezda

Za ovu spregu, čija je šema sa vektorskim dijagramom data na slici 3.52. važi isti izraz za srdenju vrednost napona na opterećenju kao za prethodno opisanu šestofaznu spregu (3.240).



Sl. 3.52. Šestofazni jednostrani ispravljač sa transformatorom u sprezi zvezda - račvasta zvezda.

Vidi se da ova sprega ima tri unutrašnje i šest spoljašnjih grana sekundara. Kroz spoljašnje grane protiče struja pojedinih tiristora, dakle strujni impulsi u trajanju jedne šestine periode, pa je efektivna vrednost struje u spoljašnjim granama:

$$I_{(6)} = \frac{I_d}{\sqrt{6}}, \quad (3.252)$$

a u unutrašnjim granama protiče struja koja je jednaka zbiru struja dve spoljašnje grane, dakle strujni impulsi u trajanju jedne trećine periode, pa je efektivna vrednost struje u spoljašnjim granama:

$$I_{(3)} = \frac{I_d}{\sqrt{3}}. \quad (3.253)$$

U ovoj sprezi nema fluksa prinudnog magnećenja zato što postoje uvek dve jednake magnetopobudne sile na dva različita stuba transformatora. Fazni napon sekundara transformatora je:

$$E'' = 2 \cdot \frac{E'}{m} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{3} \frac{E'}{m} \quad m = \frac{N'}{N''}. \quad (3.254)$$

Struja kroz primarni namotaj teče za vreme proticanja struje kroz sekundarne namotaje koji se nalaze na istom stubu transformatora. Tako, na primer, u fazi "S" struja će imati dva impulsa čije je trajanje $2\pi/3$: jedan pozitivan kada rade faze 3 i 4 i jedan negativan kada rade faze 6 i 1. Efektivna vrednost struje primara transformatora je:

$$I' = \frac{I_d}{m} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (3.255)$$

Snaga na koju treba dimenzionisati transformator je srednja vrednost prividnih snaga primara i sekundara:

$$S = \frac{1}{2}(S' + S'') = \frac{1}{2} \left(3E' \frac{I_d}{m} \sqrt{\frac{2}{3}} + 3EI_{(3)} + 6EI_{(6)} \right), \quad (3.256)$$

$$S = \frac{1}{2} \left(3E' \frac{I_d}{m} \sqrt{\frac{2}{3}} + 3 \frac{E''}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{\sqrt{3}} + 6 \frac{E''}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{\sqrt{6}} \right). \quad (3.257)$$

Prema (3.254) sledi da je $E'/m = E''/\sqrt{3}$ pa je:

$$S = \frac{1}{2} \left(3 \frac{E''}{\sqrt{3}} I_d \sqrt{\frac{2}{3}} + 3 \frac{E''}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{\sqrt{3}} + 6 \frac{E''}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{\sqrt{6}} \right) = \left(\sqrt{2} + \frac{1}{2} \right) E'' I_d. \quad (3.258)$$

Imajući u vidu (3.240), odnos snage na koju je potrebno dimenzionisati transformator i maksimalne snage kojom se energija može prenositi opterećenju je:

$$\frac{S}{P_0} = \left(\sqrt{2} + \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 1.42, \quad (3.259)$$

dakle iskorišćenje transformatora je nešto bolje nego kod prethodno opisane sprege. Osim toga i komutacioni pad napona je manji jer u komutaciji učestvuju induktivnosti rasipanja polunamotaja sekundara. Tako, pri komutaciji faza 1 i 2, delovanje induktivnosti rasipanja dveju spoljnih grana se poništavaju jer se nalaze na istom stubu transformatora, pa u komutaciji učestvuju induktivnosti rasipanja dveju unutrašnjih grana 00_1 i 00_2 . Isto tako pri komutaciji faza 2 i 3 u komutaciji učestvuju induktivnosti rasipanja dveju spoljnih grana 0_22 i 0_23 jer se kroz unutrašnji namotaj 00_2 struja ne menja. S obzirom na bolje iskorišćenje transformatora i manji komutacioni pad napona ova sprega se koristi u postrojenjima manje i srednje snage (do nekoliko stotina kilovata). Ipak treba imati u vidu da je cena transformatora nešto veća zbog većeg broja izvoda.

3.12. Sprega dva ispravljača sa međufaznom prigušnicom

Kada na svakom jezgru trofaznog transformatora postoje pored primarnog i dva identična sekundarna namotaja moguće je ostvariti dve sekundarne zvezde u opoziciji. Povezujući zvezdišta ovih zvezda preko jedne prigušnice sa srednjim izvodom (X_m) ostvaruje se sprega ispravljača prikazana na slici 3.53.

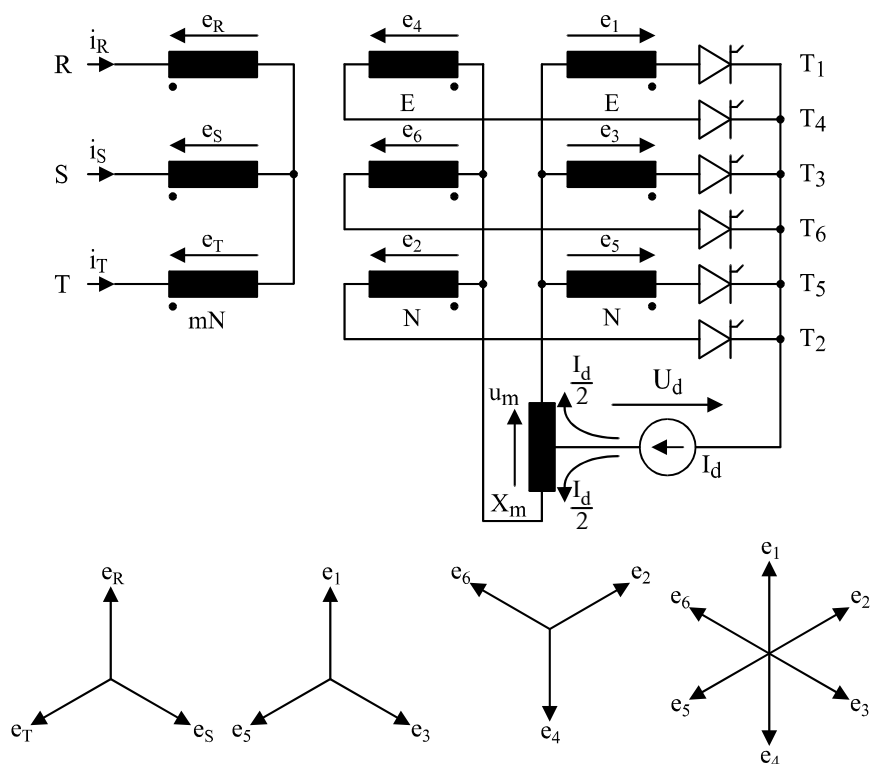
Dve sekundarne zvezde rade nezavisno jedna od druge a paralelno u odnosu na prijemnik. Nezavisan rad ovih sekundara omogućuje prigušnica X_m sprečavajući da se pojavi struja komutacije između dve sekundarne zvezda čak i u slučaju da postoji, pri jednovremenom radu dva tiristora, potencijalna razlika između dva zvezdišta.

Na slici 3.54. su prikazani karakteristični talasni oblici napona istruja za ispravljač sa uglom paljenja $\alpha=0^\circ$ (diodni ispravljač). Napon na međufaznoj prigušnici je jednak razlici faznih napona u granama čiji tiristori provode. Ako posmatramo period kada zajedno provode tiristori T_5 i T_6 ili tiristori T_2 i T_3 napon na međufaznoj prigušnici, prema vektorskom dijagramu na slici 3.53. je:

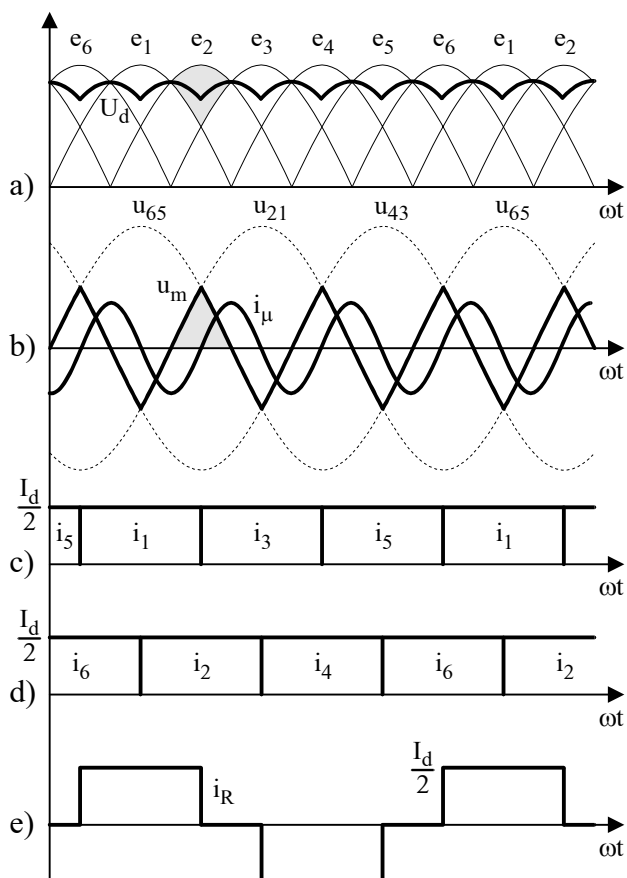
$$u_{X_m} = e_6 - e_5 = e_6 + e_2 = e_1. \quad (3.260)$$

Dakle napon na međufaznoj prigušnici (u_m) se sastoji od delova faznih napona sekundara i njegov osnovni harmonik ima tri puta veću učestanost od učestanosti mreže (slika 3.54.b). Sa slike 3.54.a se vidi da je talasni oblik napona na opterećenju isti kao kod trofaznog puš-pul ispravljača samo što je amplituda napona na opterećenju:

$$U_{d \max} = \sqrt{2} E \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right), \quad (3.261)$$



Sl. 3.53. Sprega dva ispravljača sa međufaznom prigušnicom.



Sl. 3.54. Talasni oblici napona i struja za sprege dva ispravljača sa međufaz-nom prigušnicom.

pa je, prema (3.240) srednja vrednost napona na opterećenju:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}E}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot \cos(\alpha) = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha). \quad (3.262)$$

Kako dve sekundarne zvezde rade paralelno, svaka daje polovinu jednosmerne struje. Impulsi struja pojedinih faza prikazani su na slici 3.54.c i 3.54.d, a na slici 3.54.d je prikazan talasni oblik struje u primarnoj fazi "R". Fluks prinudnog magnećenja ne postoji zato što se magnetopobudne sile prinudnog magnećenja, koje bi stvarale svaka zvezda posebno, međusobno poništavaju jer su zvezde sekundara u opoziciji.

Snaga dimenzionisanja međufazne prigušnice

Međufazna prigušnica predstavlja, u stvari, delitelj napona i kroz nju protiče struja magnećenja i_μ koja je posledica razlike napona pojedinih zvezdišta sekundara transformatora u_m (slika 3.54.b). Na slici 3.55.a je prikazana ekvivalentna šema ispravljača za period kada zajedno provode tiristori T_1 i T_2 . Napon na međufaznoj prigušnici je tada:

$$u_m = e_2 - e_1 = e_2 + e_4 = e_3. \quad (3.263)$$

Pod dejstvom ovog napona se razvija struja magnećenja i_μ a struje pojedinih tiristora odnosno struje polunamotaja međufazne prigušnice su:

$$i_{T1} = i_{Xm_2} = \frac{I_d}{2} - i_\mu, \quad (3.264)$$

$$i_{T2} = i_{Xm_1} = \frac{I_d}{2} + i_\mu. \quad (3.265)$$

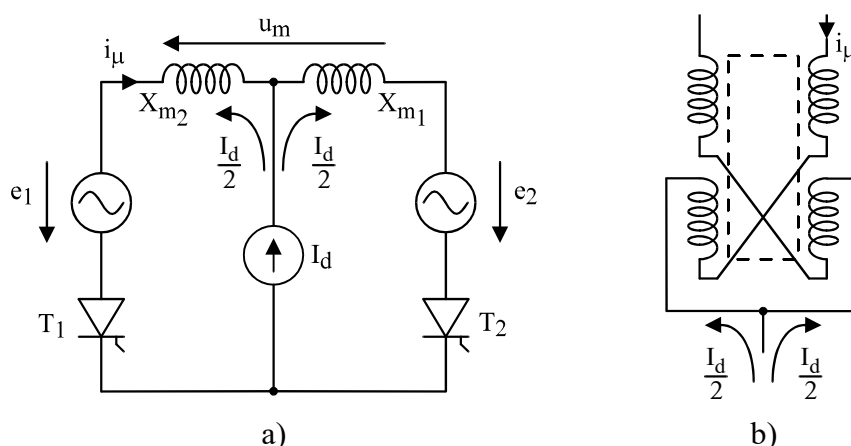
Struja tiristora može teći samo u smeru od anode ka katodi pa stoga mora biti ispunjen uslov:

$$0 \leq i_{T1(2)} \leq I_d \Rightarrow \frac{I_d}{2} \geq i_\mu \max \Rightarrow I_d \geq 2 \cdot i_\mu \max. \quad (3.266)$$

Pri manjim strujama opterećenja dva tiristora mogu zajedno provoditi samo dok struja magnećenja međufazne prigušnice ne dostigne polovinu struje opterećenja. U tom trenutku struja tiristora T_1 postaje jednaka nuli dok sva struja opterećenja teče kroz tiristor T_2 . Od tog trenutka do kraja tekuće šestine periode napon na međufaznoj prigušnici je jednak nuli jer je:

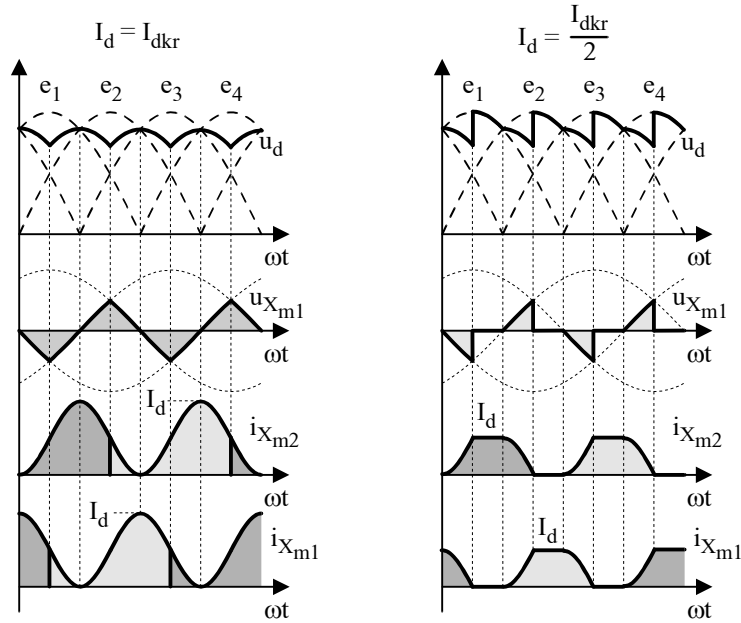
$$i_{Xm_2} = 0; \quad i_{Xm_1} = I_d, \quad (3.267)$$

zbog čega tiristor T_1 postaje inverzno polarisan naponom $u_{T1i} = e_2 - e_1 = e_3$ pa se gasi a ispravljač nastavlja da radi kao trofazni puš-pul ispravljač.



Sl. 3.55. Konstrukcija međufazne prigušnice.

Na slici 3.56. su prikazani talasni oblici napona i struja ispravljača za slučaj $I_d = I_{dkr} = 2i_{\mu \max}$ i $I_d = I_{dkr}/2 = i_{\mu \max}$. Smanjivanjem struje od I_{dkr} do nule srednja vrednost napona na opterećenju raste od vrednosti:



Sl. 3.56. Rad ispravljača za mele struje opterećenja.

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha) \quad (3.268)$$

do vrednosti:

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}E}{\pi} \cos(\alpha), \quad (3.269)$$

što prestavlja povećanje srednje vrednosti napona na opterećenju od:

$$\Delta U_d = \left(\frac{\frac{3\sqrt{2}E}{\pi} \cos(\alpha)}{\frac{3\sqrt{6}E}{2\pi} \cos(\alpha)} - 1 \right) \cdot 100 (\%) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \cdot 100 (\%) = 15.5 \%. \quad (3.270)$$

Dimenzionisanje međufazne prigušnice se može izvršiti tako što će se ona posmatrati kao transformator na čijim namotajima je napon jednak polovini osnovnog harmonika razlike napona između dva zvezdišta a efektivna vrednost struje svakog namotaja jednaka polovini jednosmerne struje opterećenja. Efektivna vrednost osnovnog harmonika napona na jednom polunamotaju međufazne prigušnice je:

$$U_{1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sqrt{2}E}{2} \sin\left(\frac{x}{3}\right) \sin(x) dx = \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} E, \quad (3.271)$$

odakle sledi da je snaga na koju treba dimenzionisati prigušnicu:

$$S = U_{1m} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{3\sqrt{3}}{16\pi} E I_d. \quad (3.272)$$

Maksimalna snaga opterećenja je:

$$P_0 = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} E I_d, \quad (3.273)$$

pa je:

$$\frac{S}{P_0} = \frac{\frac{3\sqrt{3}}{16\pi}}{\frac{3\sqrt{6}}{2\pi}} = \frac{1}{8\sqrt{2}} = 0.088. \quad (3.274)$$

Sa trostruko većom učestanošću količina potrebnog bakra u transformatoru smanjuje se tri puta ili sav aktivni materijal 1.5 puta što znači da prava tipska snaga (za poređenje sa transformatorom) iznosi:

$$\frac{S}{P_0} = \frac{0.088}{1.5} = 0.059. \quad (3.275)$$

S obzirom da napon na krajevima međufazne prigušnice i struja kroz istu sadrže i više harmonike uzima se da tipska snaga međufazne prigušnice praktično iznosi 7% nominalne snage opterećenja. Induktivnost međufazne prigušnice se bira tako da njena struja magnećenja bude neprekidna do 1% nominalne struje opterećenja. Ako sa S_m označimo površinu poluperiode napona na na prigušnici (u_m) onda je:

$$\Delta i_\mu = \frac{S_m}{L_m} \Rightarrow L_m \geq \frac{S_m}{\Delta i_\mu} = \frac{S_m}{0.01 \cdot I_{dn}}. \quad (3.276)$$

Međufazna prigušnica se, zbog potrebne simetrije, izvodi prema šemi prikazanoj na slici 3.55.b. Magnetopobudne sile koje potiču od jednosmerne struje se poništavaju a magnetopobudne sile koje potiču od struje magnećenja (i_μ) deluju saglasno.

Snaga dimenzionisanja transformatora

Struja kroz sekundarne namotaje transformatora sastoji se od impulsa amplitude $I_d/2$ u trajanju $2\pi/3$ pa je njena efektivna vrednost:

$$I'' = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_d}{2}, \quad (3.277)$$

dok je, prema slici 3.54. efektivna vrednost struje primarnih namotaja:

$$I' = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{I_d}{2} = \frac{1}{m} \cdot \frac{I_d}{\sqrt{6}}. \quad (3.278)$$

Tipična snaga transformatora je:

$$S = \frac{1}{2} (S' + S'') = \frac{1}{2} \left(3E' \frac{1}{m} \frac{I_d}{\sqrt{6}} + 6E'' \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{I_d}{2} \right) = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} + \sqrt{3}}{2} E'' I_d, \quad (3.279)$$

odnosno s obzirom na (3.273):

$$\frac{S}{P_0} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} + \sqrt{3}}{2} \cdot \frac{2\pi}{3\sqrt{6}} = 1.26. \quad (3.280)$$

Zbog dobrog iskorišćenja transformatora i malog komutacionog pada napona (svaki ispravljač komutuje polovinu struje opterećenja) ova sprema se vrlo često koristi za niskonaponske primene veće snage.