Predgovor

Prvenstvena namena ovog udžbenika je da posluži studentima treće godine osnovnih studija Energetskog odseka Elektrotehničkog fakulteta kao osnovna literatura za izučavanje oblasti „Energetski pretvarači“. Stoga je sadržaj ovog udžbenika ograničen na teme koje se obrađuju u okviru kursa „Energetski pretvarači 1“ (13E013EP1), po nastavnom programu koji se primenjuje od školske 2015/16. godine. Udžbenik predstavlja i pokušaj da se, iz široke oblasti „Energetski pretvarači“, izdvoje i analiziraju osnovne topologije pretvarača. Osim toga, ova knjiga može korisno poslužiti inženjerima i istraživačima u privredi pri rešavanju praktičnih problema. Uvek može da se postavi pitanje pravilnog odmeravanja i usklađivanja obima i odnosa pojedinih, po prirodi često i heterogenih pitanja iz ove oblasti. Autori, međutim, nalaze da su ovde obrađene teme neophodne u procesu formiranja inženjera u oblasti energetike, koji treba da ima sposobnost šireg sagledavanja oblasti koju izučava.

Pri obradi teksta nisu se mogli otkloniti svi nedostaci i greške, pa će autori sa zahvalnošću prihvatiti sve primedbe, ispravke i sugestije. Autori se takođe zahvaljuju recenzentima, čije su sugestije, predlozi i primedbe umnogome doprineli kvalitetu sadržaja ovog udžbenika.

U Beogradu, juna 2015. godine. Autori

Sadržaj

Predgovor III
Fazni regulatori 7
1.1. Tiristori 7
1.2. Monofazni fazni regulatori sa otpornim opterećenjem 10
1.3. Monofazni fazni regulatori sa otporno-induktivnim opterećenjem 14
1.4. Monofazni fazni regulatori sa induktivnim opterećenjem 16
1.5. Trofazni fazni regulatori 19
1.6. Kompenzacija reaktivne snage 23
Ispravljači 28
2.1. Princip rada 28
2.2. Dvofazni jednostrani ispravljač 32
Spektar struje koja se uzima iz mreže 33
Dimenzionisanje transformatora 35
Faktor snage ispravljača 37
Uticaj induktivnosti rasipanja transformatora 37
Invertorski limit 40
2.3. Monofazni mosni ispravljač 42
Komutacija u monofaznom mosnom ispravljaču 44
Dimenzionisanje transformatora 46
2.4. Trofazni jednostrani ispravljač 48
Spektar struje koja se uzima iz mreže 50
Dimenzionisanje transformatora 53
Faktor snage ispravljača 54
Uticaj induktivnosti rasipanja transformatora 54
Invertorski limit 57
2.5. Trofazni mosni ispravljač 59
Spektar struje koja se uzima iz mreže 59
Dimenzionisanje transformatora 62
Faktor snage ispravljača 63
Uticaj induktivnosti rasipanja transformatora 63
2.6. Šestofazni jednostrani ispravljač 64
Dimenzionisanje transformatora 64
Spektar struje transformatora 66
Naponsko naprezanje poluprovodničkih prekidačkih elemenata 69
2.7. Sprega dva ispravljača sa međufaznom prigušnicom 70
Dimenzionisanje međufazne prigušnice 72
Dimenzionisanje transformatora 75
2.8. Dvanaestofazne i višefazne ispravljačke sprege 76
Čoperi 78
3.1. MOSFET i IGBT tranzistori 79
3.2. Modulacija trajanja impulsa 82
3.3. Klasifikacija topologija čopera 84

3.4. Čoper spuštač napona 85
3.5. Direktni čoper sa galvanskom izolacijom 92
3.6. Asimetrični mosni pretvarač 94
3.7. Čoper podizač napona 95
3.8. Čoper podizač napona sa mekom komutacijom 101
3.9. Čoper spuštač i podizač napona 104
3.10. Dvokvadrantni čoper 108
3.11. Visokofrekventne prigušnice i transformatori 110
Invertori 114
4.1. Monofazni polumosni naponski invertor 114
4.2. Monofazni mosni naponski invertor 117
4.3. Trofazni naponski invertor 118
4.4. NPC invertor 122
Dodatak 124
Literatura 127

Poglavlje 1

Fazni regulatori

Fazni regulatori su prekidački regulatori koji kao izvor električne energije koriste naizmenični mrežni napon, a koriste se za napajanje opterećenja naizmeničnim naponom promenljive efektivne vrednosti. Podešavanje efektivne vrednosti napona na opterećenju vrši se tako što se opterećenje ne priključuje direktno na izvor napajanja, već preko mreže prekidača. Zatim se, uključenjem i isključenjem prekidača, opterećenje priključuje na mrežni napon u pogodnim vremenskim intervalima. Funkciju prekidača vrše tiristori tako što se u odabranom trenutku periode mrežnog napona tiristoru dovodi impuls za paljenje, dok se za gašenje tiristora koristi promena polariteta mrežnog napona i kao posledica toga prolazak njegove struje kroz nulu. Zbog toga se fazni regulatori svrstavaju u kategoriju mrežom vođenih pretvarača. Najveći deo oblasti primene faznih regulatora predstavlja upravljanje termičkim potrošačima kao što su grejači i inkadescentno osvetljenje (svetiljke sa užarenim vlaknom) jer talasni oblik napona nema bitnog uticaja na njihovo optimalno funkcionisanje. Osim toga, fazni regulatori se koriste i za kompenzaciju reaktivne snage, regulaciju broja obrtaja asinhronih motora u ventilatorskim i pumpnim postrojenjima, meko puštanje u rad asinhronih motora itd. Ranije su se za ove primene koristili autotransformatori, transformatori sa više izvoda ili magnetni pojačavači, dok se sada uglavnom koriste fazni regulatori. Prednost faznih regulatora je veći koeficijent korisnog dejstva, manji gabariti i posebno mogućnost jednostavnijeg i bržeg upravljanja. Njihov glavni nedostatak su velika harmonijska izobličenja struje koja se uzima iz mreže.

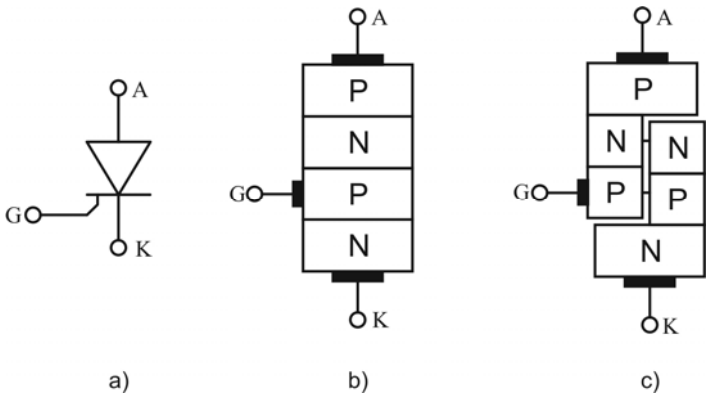
1.1. Tiristori

Tiristori su poluprovodnički poluupravljivi prekidački elementi. Poluupravljivi su jer se može upravljati trenutkom uključenja dok se isključenje tiristora događa kada se za to stvore uslovi u kolu. Tiristor je četvoroslojna dioda sa priključcima: anoda, katoda i gejt. Simbol i struktura tiristora prikazani su na slici 1.1. a) i b).

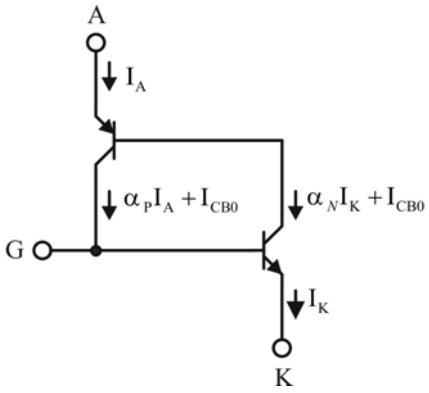
Radi lakšeg razumevanja rada tiristora, struktura sa slike 1.1. b) može se razdvojiti na dva bipolarna tranzistora kao što je prikazano na slici 1.1. c). Novodobijena ekvivalentna šema tiristora prikazana je na slici 1.2. Kada je tiristor direktno polarisan (anoda na višem potencijalu od katode) i struja gejta jednaka nuli, anodna odnosno katodna struja je:

$$I_A = I_K = \alpha_P I_A + I_{CB0} + \alpha_N I_K + I_{CB0} \tag{1.1}$$

gde je: α_P i α_N – pojačanje PNP i NPN tranzistora u spoju sa zajedničkom bazom ($\alpha = I_C/I_E$), I_{CB0} – inverzna struja spoja kolektor baza i I_A, I_K – struja tiristora.



Sl. 1.1. Simbol i struktura tiristora.

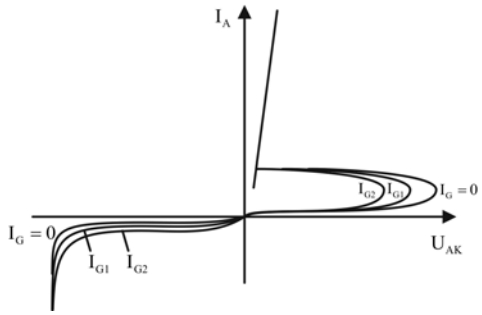


Sl. 1.2. Ekvivalentna šema tiristora.

Iz (1.1) sledi da je struja tiristora:

$$I_A = \frac{2I_{CB0}}{1-(\alpha_N + \alpha_P)} \tag{1.2}$$

Pri malim naponima direktne polarizacije struja I_{CB0} je mala pa su mala i pojačanja α_P i α_N, tako da je i struja tiristora veoma mala. Sa porastom napona direktne polarizacije raste i struja I_{CB0} zbog čega rastu i pojačanja α_P i α_N. Kada zbir pojačanja poraste na vrednost blisku jedinici, tiristor prelazi u provodno stanje tako što se oba tranzistora uključuju i prelaze u zasićenje. Ovaj proces naziva se proboj tiristora u direktnoj polarizaciji. Na slici 1.3. prikazana je statička karakteristika tiristora.

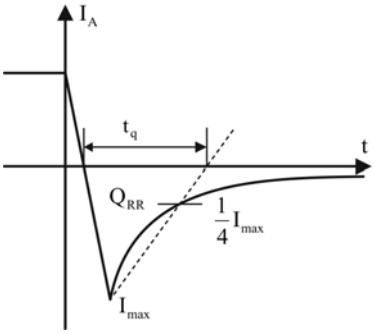


Sl. 1.3. Statička karakteristika tiristora.

Uspostavljanjem male bazne struje NPN tranzistora (struja između gejta i katode I_{G1}), struja kolektora poraste za iznos $\beta_N I_{BN}$ ($\beta = I_C/I_B$). Za isti iznos će porasti bazna struja PNP tranzistora pa će njegova kolektorska struja narasti za iznos $\beta_N\beta_P I_{BN}$. Zbog porasta kolektorskih struja tranzistora, do uključenja tiristora doći će pri manjem naponu direktne polarizacije. Pri dovoljno velikoj struji gejta, do uključenja tiristora će doći i pri vrlo malom naponu direktne polarizacije. Po uključenju tiristora on će ostati uključen i kada struja gejta postane jednaka nuli.

Zaključak: Tiristor se uključuje kratkotrajnim strujnim impulsom kroz spoj gejt–katoda.

Do isključenja tiristora će doći kada se u kolu stvore takvi uslovi da struja tiristora opadne na nulu i posle toga tiristor bude inverzno polarisan u dovoljno dugom vremenskom intervalu. Neposredno po inverznoj polarizaciji tiristora počinje da raste inverzna struja do vrednosti I_{max} (slika 1.4.) a zatim eksponencijalno opada do nule. Vreme gašenja tiristora (t_q) je vreme od trenutka kada direktna struja tiristora opadne na nulu do trenutka koji se dobija presekom linije koja prolazi kroz tačke I_{max} i $I_{max}/4$ sa vremenskom osom. Da bi se postiglo sigurno isključenje tiristora, vreme inverzne polarizacije tiristora (t_0) treba da bude 1,5 do 2 puta veće od vremena gašenja tiristora (t_q).

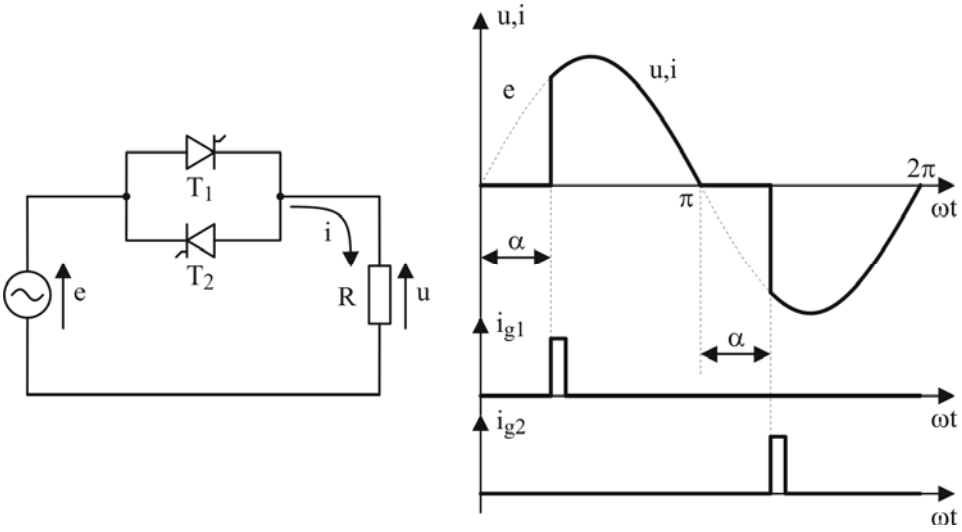


Sl. 1.4. Vreme gašenja tiristora.

Zaključak: Tiristor se isključuje ako je dovoljno dugo inverzno polarisan ($t_0 > t_q$).

1.2. Monofazni fazni regulatori sa otpornim opterećenjem

Na slici 1.5. prikazan je monofazni fazni regulator sa antiparalelnom vezom tiristora. Ova konfiguracija najčešće se koristi zato što sadrži najmanji broj prekidačkih elemenata, pa su i gubici najmanji. Mana ove konfiguracije je u tome što su katode tiristora na različitom potencijalu pa je zato neophodna galvanska izolacija upravljačkog kola. Princip regulacije efektivne vrednosti napona na opterećenju sastoji se u tome da se opterećenje ne drži priključeno na mrežni napon u toku cele poluperiode, već samo u toku jednog njenog dela. Koliki će taj deo poluperiode biti zavisi od trenutka kada se tiristor uključuje dovođenjem impulsa za paljenje. Ovaj trenutak je definisan uglom paljenja α koji predstavlja vreme (izraženo u ugaonim jedinicama) koje protekne od trenutka kada tiristor postane direktno polarisan do trenutka kada dobije impuls za paljenje. Na slici 1.5. prikazani su talasni oblici mrežnog napona, impulsa za paljenje i napona, odnosno struje opterećenja. U pozitivnoj poluperiodi mrežnog napona direktno je polarisan tiristor T_1. Ovaj tiristor se uključuje impulsom I_{g1} u trenutku $\omega t = \alpha$ i provodiće sve do kraja poluperiode jer tada struja opterećenja opada na nulu a mrežni napon menja smer i tiristor T_1 postaje inverzno polarisan. Tiristor T_1 će biti inverzno polarisan u toku cele naredne poluperiode, što je znatno duže vreme od vremena potrebnog da se izvrši njegovo gašenje. Za vreme dok tiristor T_1 provodi, napon na opterećenju je jednak mrežnom naponu. Isto se događa i u negativnoj poluperiodi mrežnog napona, s tom razlikom što tada provodi tiristor T_2, jer je on tada direktno polarisan.



Sl. 1.5. Fazni regulator sa otpornim opterećenjem.

Ugao paljenja tiristora može se menjati od $\alpha = \pi$ do $\alpha = 0$, što znači da se efektivna vrednost napona na opterećenju može menjati od nule do efektivne vrednosti mrežnog napona. Za ugao paljenja „α“ efektivna vrednost napona na opterećenju je: