Sadržaj

Predgovor 5
Fazni regulatori 7
1.1. Monofazni fazni regulatori 7
1.2. Monofazni fazni regulatori sa otporno-induktivnim opterećenjem u paralelnoj vezi 9
1.3. Monofazni fazni regulatori sa induktivnim opterećenjem 10
1.4. Sekvencijalni fazni regulatori 12
1.5. Trofazni fazni regulatori 17
Ispravljači 22
2.1. Spektar izlaznog napona dvofaznog jednostranog ispravljača 22
2.2. Talasnost struje opterećenja i prekidni režim rada dvofaznog jednostranog ispravljača 25
2.3. Dvofazni jednostrani ispravljač sa zamajnom diodom 31
2.3.1. Spektar struje koja se uzima iz mreže 33
2.3.2. Spektar napona na opterećenju 35
2.4. Monofazni mosni ispravljač - razdeljeno upravljanje 37
2.5. Poluupravljivi mosni ispravljač 40
2.6. Trofazni jednostrani ispravljač 44
2.6.1. Spektar napona na opterećenju 45
2.6.2. Talasnost struje opterećenja i prekidni režim rada ispravljača 47
2.7. Trofazni jednostrani ispravljač sa zamajnom diodom 51
2.7.1. Komutacija u trofaznom jednostranom ispravljaču sa zamajnom diodom 53
2.7.2. Trofazni jednostrani ispravljač sa smanjenim opsegom regulacije 55
2.7.3. Uticaj sprege trofaznog transformatora 57
2.8. Trofazni mosni ispravljač 62
2.8.1. Spektar napona na opterećenju 64
2.9. Trofazni mosni poluupravljivi ispravljač 66
2.9.1. Komutacija u trofaznom mosnom poluupravljivom ispravljaču 69
2.9.2. Spektar struje sekundara transformatora 73
Čoperi 75
3.1. Ćukov pretvarač 75
3.1.1. Model transformatora 78
3.1.2. Analiza valovitosti struje prigušnica 80
3.2. SEPIC pretvarač 83
3.3. ZETA pretvarač 86
3.4. PUSH-PULL pretvarač 88
3.5. Indukciono grejanje 93
3.5.1. Napajanje iz dvokvadrantnog čopera 94
3.5.2. Napajanje iz invertora 98
Invertori 99
4.1. Monofazni mosni invertor sa mekom komutacijom 99
4.2. Strujni invertor 103
4.3. Modulacija trajanja impulsa primenom vektora stanja 104

4.4. ZSI 110
4.4.1. Radni režimi ZSI invertora 116
4.5. Sistemi besprekidnog napajanja 118
Literatura 122

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 2“, 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 topologije pretvarača koje su od interesa za studente osnovnih i master studija. 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. Autor, međutim, nalazi 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 autor sa zahvalnošću prihvatiti sve primedbe, ispravke i sugestije. Autor se takođe zahvaljuju recenzentima, čije su sugestije, predlozi i primedbe umnogome doprineli kvalitetu sadržaja ovog udžbenika.

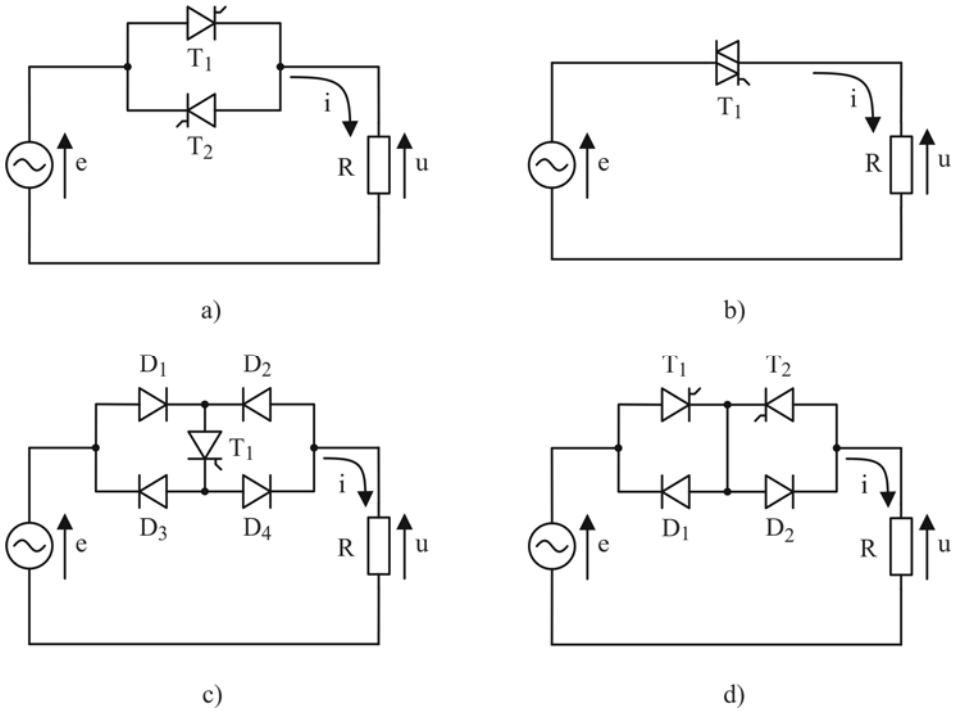
U Beogradu, januara 2016. godine. Autor

Poglavlje 1

Fazni regulatori

1.1. Monofazni fazni regulatori

Na slici 1.1. prikazano je nekoliko najčešće korišćenih konfiguracija monofaznih faznih regulatora.



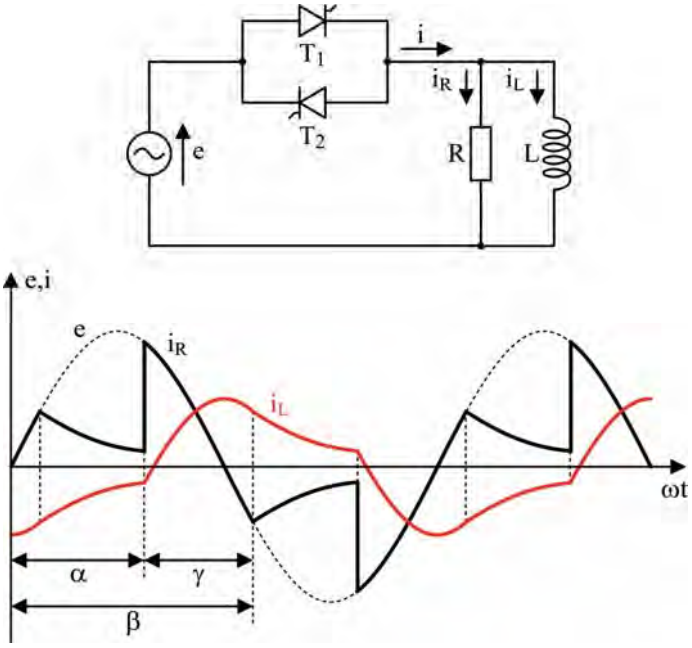
Sl. 1.1. Konfiguracije monofaznih faznih regulatora: a) konfiguracija sa antiparalelnom vezom tiristora b) konfiguracija sa trijakom c) konfiguracija sa jednim tiristorom d) konfiguracija sa antirednom vezom dva tiristora.

Osnovnu konfiguraciju čini fazni regulator sa antiparalelnom vezom tiristora prikazan na slici 1.1.a). Ova konfiguracija se najčešće 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 (upravljačko kolo treba da generiše strujni impuls za uključenje tiristora

između gejta i katode). Zato se, za manje snage, koristi jednostavniji fazni regulator sa trijakom prikazan na slici 1.1.b). Ova konfiguracija je ograničena na manje snage zato što se trijaci ne mogu proizvesti za tako velike struje kao tiristori. Problem galvanske izolacije upravljačkog kola može se rešiti upotrebom samo jednog tiristora, kako je to prikazano na slici 1.1.c). Kod ove konfiguracije faznog regulatora struja opterećenja, bez obzira na smer, protiče kroz tri poluprovodnička elementa (dve diode i tiristor), zbog čega su gubici znatno veći. Još jedan način rešavanja problema galvanske izolacije upravljačkog kola prikazan je na slici 1.1.d), gde se koriste dva tiristora sa zajedničkom katodom i dve diode. Za razliku od konfiguracije prikazane na slici 1.1.c), kod ovog faznog regulatora struja se uspostavlja kroz dva poluprovodnička elementa pa su gubici nešto manji, ali je cena regulatora veća zbog korišćenja dva tiristora.

1.2. Monofazni fazni regulatori sa otporno-induktivnim opterećenjem u paralelnoj vezi

Ekvivalentna šema nekih opterećenja ne može se predstaviti rednom, već paralelnom vezom otpornika i prigušnice (slika 1.2.).

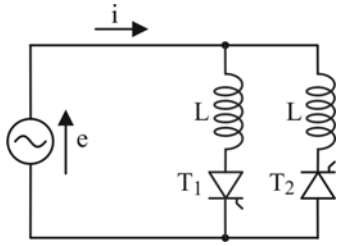


Sl. 1.2. Struje otpornog i induktivnog dela opterećenja.

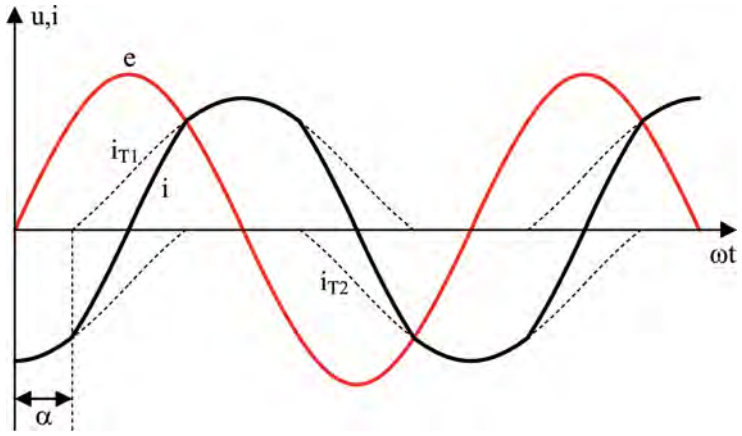
U tom slučaju, kada se u trenutku $\omega t = \alpha$ dovede impuls za uključenje (paljenje) tiristora, tiristor provede i napon na opterećenju postaje jednak mrežnom naponu. Struja tiristora jednaka je zbiru struja otpornog i induktivnog dela opterećenja. U trenutku $\omega t = \pi$ mrežni napon, odnosno struja otpornog dela opterećenja, menja smer a struja prigušnice zadržava isti smer i počinje da opada. U trenutku $\omega t = \beta$ izjednačavaju se struja otpornika i prigušnice pa struja tiristora postaje jednaka nuli zbog čega on prestaje da provodi. Od tog trenutka nadalje magnetna energija zatečena u prigušnici troši se na otporniku i struja eksponencijalno opada sve dok se ne uključi sledeći tiristor. Talasni oblici struja otpornog i induktivnog dela opterećenja prikazani su na slici 1.2.

1.3. Monofazni fazni regulatori sa induktivnim opterećenjem

Umesto faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora i induktivnim opterećenjem kao osnovna jedinica za realizaciju kompenzatora reaktivne energije može se koristiti i monofazni fazni regulator sa dve prigušnice prikazan na slici 1.3.



Sl. 1.3. Kompenzator sa proširenim opsegom ugla paljenja.



Sl. 1.4. Talasni oblik struje kompenzatora.

Za razliku od faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora, kod ove konfiguracije faznog regulatora ugao paljenja tiristora može se menjati u opsegu $0^0 < \alpha < 180^0$ a talasni oblik struje koja se uzima iz mreže za $\alpha = 30^0$ prikazan je na slici 1.4.

Efektivna vrednost struje osnovnog harmonika ista je kao i kod faznog regulatora sa antiparalelnom vezom tiristora:

$$I_1 = \frac{|A_1|}{\sqrt{2}} = \frac{2E}{L\omega}\left[1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}\right]; \quad 0 \le \alpha \le \pi, \tag{1.1}$$

s tim što je jedina razlika u opsegu promene ugla paljenja.

Upoređenjem ova dva rešenja može se zaključiti da su prednosti rešenja sa dve prigušnice u proširenom opsegu ugla paljenja tiristora. Osim toga, za istu efektivnu vrednost osnovnog harmonika struje potrebna je dvostruko veća induktivnost prigušnice,