

Miloš R. Nedeljković

Energetski pretvarači 2
Topologije energetskih pretvarača

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet
Akademska misao – Beograd

Beograd, 2016. godine.

Miloš R. Nedeljković
Energetski pretvarači 2
Topologije energetskih pretvarača

Recenzenti
dr Nikola Popov
dr Željko Despotović

Lektor
„Vaš lektor“ – Ana Micić Pavlović

Odlukom Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta broj 2366/3 od 21. 12. 4016 godine ova knjiga je odobrena kao udžbenik u elektronskom obliku na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu.

Izdavač
Elektrotehnički fakultet – Beograd
Akademska misao – Beograd

ISBN", 9: /: 8/9688/885/2

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. Čukov 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 inverter sa mekom komutacijom | 99 |
| 4.2. Strujni inverter | 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 zahvaljuje recenzentima, čije su sugestije, predlozi i primedbe umnogome doprineli kvalitetu sadržaja ovog udžbenika.

U Beogradu, januara 2016. godine.

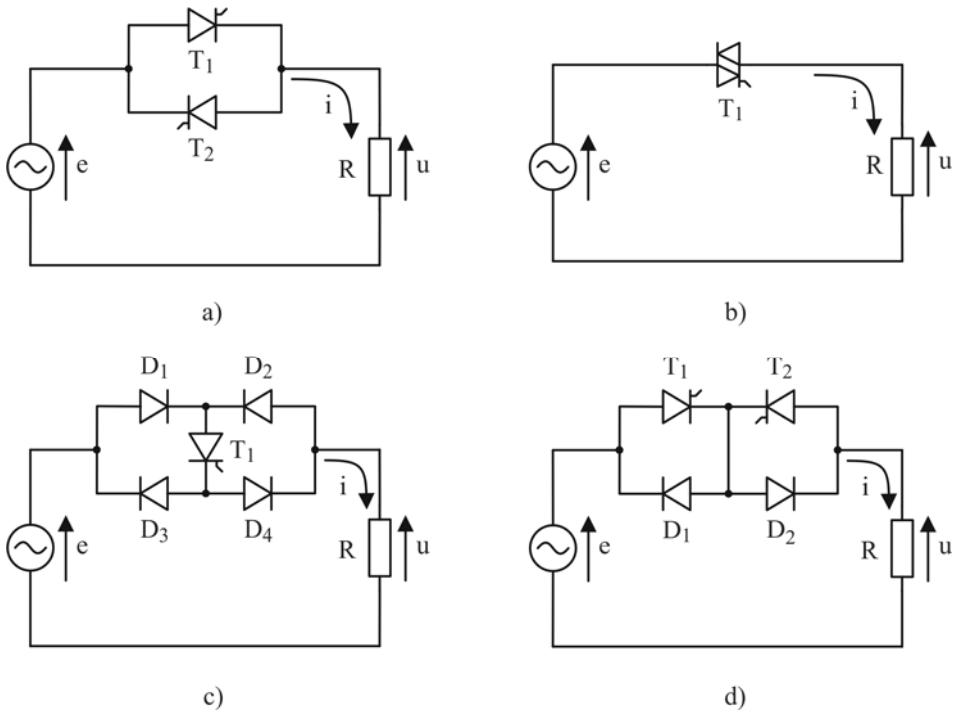
Autor

Poglavlje 1

Fazni regulatori

1.1. Monofazni fazni regulatori

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



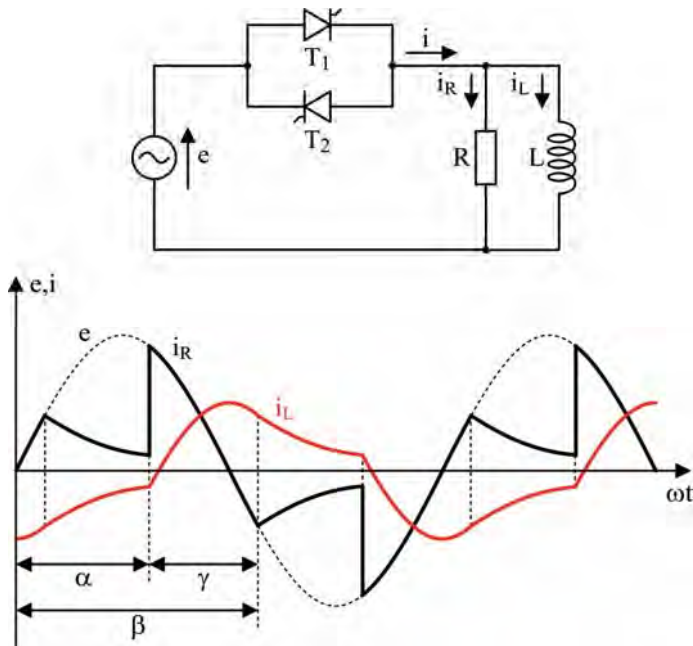
Sl. 1.1. Konfiguracije monofaznih faznih regulatora: a) konfiguracija sa antiparalelnom vezom tiristora b) konfiguracija sa trijakom c) konfiguracija sa jednim tiristorom d) konfiguracija sa antirednom vezom dva tiristora.

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 gejtta 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.).

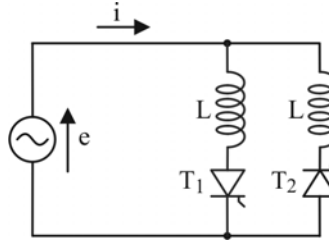


Sl. 1.2. Struje otpornog i induktivnog dela opterećenja.

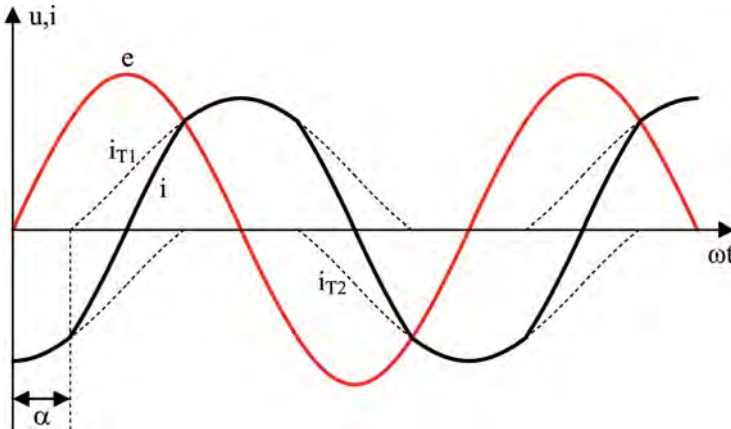
U tom slučaju, kada se u trenutku $\omega t = \alpha$ dovede impuls za uključenje (paljenje) tiristora, tiristor provede i napon na opterećenju postaje jednak mrežnom naponu. Struja tiristora jednaka je zbiru struja otpornog i induktivnog dela opterećenja. U trenutku $\omega t = \pi$ mrežni napon, odnosno 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:

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

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,