Rekonstrukcija i mjerenja na maketi induktivno opterećenog jednofaznog ispravljača u punoupravljivom mosnom spoju 10A, 600V

Kutnjak, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:249668

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni studij

REKONSTRUKCIJA I MJERENJA NA MAKETI INDUKTIVNO OPTEREĆENOG JEDNOFAZNOG ISPRAVLJAČA U PUNOUPRAVLJIVOM MOSNOM; SPOJU 10A, 600V

Završni rad

Filip Kutnjak

Osijek, 2016.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 02.09.2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada

Ime i prezime studenta:	Filip Kutnjak
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	3819, 07.11.2013.
OIB studenta:	01312408248
Mentor:	Izv.prof.dr.sc. Denis Pelin
Sumentor:	Ivan Biondić
Naslov završnog rada:	Rekonstrukcija i mjerenja na maketi induktivno opterećenog jednofaznog ispravljača u punoupravljivom mosnom spoju 10A, 600V
Znanstvena grana rada:	**Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)**
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 Jasnoća pismenog izražavanja: 3 Razina samostalnosti: 2
Datum prijedloga ocjene mentora:	02.09.2016.
Datum potvrde ocjene Odbora:	

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 26.09.2016.

Ime i prezime studenta:	Filip Kutnjak
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	3819, 07.11.2013.
Ephorus podudaranje [%]:	9%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Rekonstrukcija i mjerenja na maketi induktivno opterećenog jednofaznog ispravljača u punoupravljivom mosnom spoju 10A, 600V**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Denis Pelin

i sumentora Ivan Biondić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj:

1. UVOD 1
1.1. Zadatak rada 1
2. REKONSTRUKCIJA MAKETE 2
3. ANALIZA RADA 4
4. MJERENJA U LABORATORIJU 8
4.1. Mjerenja za kut upravljanja α=3.6° 10
4.2. Mjerenja za kut upravljanja α=72° 11
5. DORADA PREDLOŠKA ZA 4. LABORATORIJSKU VJEŽBU 13
6. ZAKLJUČAK 19
LITERATURA 20
SAŽETAK 21
ABSTRACT 21
ŽIVOTOPIS 22
PRILOZI 23
Prilog 1: Predložak za laboratorijsku vježbu 24
Prilog 2: Snimljeni valni oblici 45
Prilog 3: Podatkovna tablica integriranog sklopa TCA 785 46
Prilog 4: Podatkovna tablica tiristora TYN616 51
Prilog 5: Podatkovna tablica tranzistora BD677 52

1. UVOD

Za seminarski rad iz kolegija „Osnove energetske elektronike“ trebalo je izraditi maketu ispravljača u jednofaznom punoupravljivom mosnom spoju, izraditi kućište za maketu, te obaviti mjerenja na ispravljaču odnosno obaviti rekonstrukciju mjerenja. Zatim se uz dodatna mjerenja seminar koristio pri izradi završnog rada. Shema ispravljača je preuzeta s Loomen stranice kolegija. Korištene su komponente koje je bilo lako nabaviti. Napravljeni ispravljač je punovalni jednofazni ispravljač 10 A, 600 V na kojem se tiristorima, odnosno upravljivim ventilima, upravlja fazno pomoću integrirnog sklopa TCA785. Izrađeni ispravljač se planira sljedeće akademske godine, 2016./2017., koristiti na laboratorijskim vježbama iz kolegija „Osnove energetske elektronike“ na preddiplomskomm studiju elektrotehnike.

1.1. Zadatak rada

Za izrađeni induktivno opterećenog jednofaznog ispravljača u punoupravljivom mosnom spoju 10 A, 600 V, izvesti mjerne točke i maketu preurediti za laboratorijske vježbe. Izvršiti mjerenja u radnim točkama i napraviti predložak za laboratorijske vježbe.

2. REKONSTRUKCIJA MAKETE

Rekonstrukcija makete je rađena radi izrade kućišta za maketu odnosno kako bi se maketu prilagodilo upotrebi na laboratorijskim vježbama, te kako bi mjerenja na njoj bila što sigurnije obavljana.

Na slici 2.1 je prikazan ispravljač nakon odrađenih svih koraka njegove izrade.



Slika 2.1. Maketa ispravljača

Nakon izrade same makete ispravljača pristupilo se izradi kućišta za istu. Kućište je napravljeno od pleksiglasa dimenzija 29x14,5x10cm. Na gornju stranu kućišta je zalijepljenja nadomjesna shema jednofaznog punoupravljivog mosnog spoja sa izvedenim mjernim točkama. Na mjestima gdje će se obavljati mjerenja odnosno na pozicijama mjernih točaka su postavljene priključnice kako bi se mogli priključiti spojni vodiči. Mjeriti će se struja ventilskog para V_1-V_4 i ventilskog para V_2-V_3. Priključnice su također postavljene kako bi se uređaj mogao spojiti na pojnu mrežu te kako bi se moglo priključiti trošilo. Potenciometri od 10 kΩ i 100 kΩ su također postavljeni na kućište jer se s njima podešava kut upravljanja te namještaju valni oblici rampi dani u prilogu 3. Također su na kućište postavljeni osigurači kako bi se u slučaju njihova izgaranja isti mogli jednostavnije zamijeniti bez otvaranja samog kućišta.

Slika 2.2 prikazuje samo kućište, dok slika 2.3 prikazuje potpuno završenu maketu ispravljača prilagođenu za rad na laboratorijskim vježbama.



Slika 2.2. Kućište

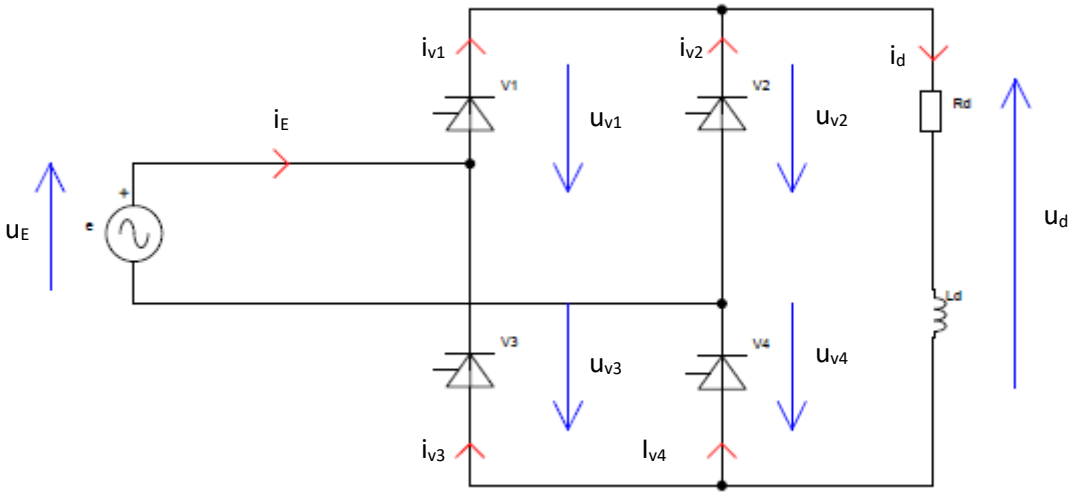


Slika 2.3. Ispravljač

3. ANALIZA RADA

Radi lakšeg razumijevanja rezultata dobivenim mjerenjem na maketi punovalnog ispravljača bit će dana kratka analiza rada neophodna za shvaćanje rada i funkcije samog ispravljača.

Za obavljanje analize rada koristit će se nadomjesna shema jednofaznog mosnog spoja s djelatno-induktivnim opterećenjem koja je prikazna na slici 3.1[1]. Također je važno napomenuti da su tiristori u ovom slučaju modelirani strujno jednosmjernim sklopkama.



Slika 3.1. Nadomjesna shema jednofaznog mosnog spoja s djelatno-induktivnim opterećenjem

Primjene li se Kirchoffovi zakoni na mrežu sa slike 3.1 dobiva se:

KZN:

1) $u_E = u_{V1} - u_{v2}$ (4-1)

2) $u_E = u_{v4} - u_{v3}$ (4-2)

3) $u_d = -u_{v4} - u_{v2}$ (4-3)

KZS:

1) $i_d = i_{V1} + i_{V2}$ (4-4)

2) $i_E = i_{V1} - i_{V3}$ (4-5)

3) $i_d = i_{V4} + i_{V3}$ (4-6)

Kako bi analiza rada bila jednostavnija uveden je niz pretpostavki. Zanemaren je induktivitet pojne mreže, struja na trošilu je glatka, trošilo je djelatno-induktivno, te stoga komutacija nije trenutna (k≠0). Ako se pretpostavi da je kut upravljanja α≠0 može se izračunati napon praznog hoda $U_{di\alpha}(0)$. Kut upravljanja α predstavlja odgodu okidanja upravljačkih impulsa za određeni vremenski period izražen u ms, dok kod neupravljivog ispravljača ne postoji ta odgoda odnosno kut upravljanja jer se sastoji od dioda (neupravljiva komponenta) a ne tiristora. Također, prema definiciji praznog hoda, struja trošila je zanemariva, te stoga napon praznog hoda iznosi[1]:

$$U_{di\alpha}(0) = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \hat{E}\sin\omega t\, d\omega t = \frac{2\hat{E}}{\pi}\cos\alpha \tag{4-7}$$

Nadalje je prikazna upravljačka karakteristika, gdje je $U_{di0}(0)$ idealan napon praznog hoda neupravljivog ispravljača[1].

$$\frac{U_{di\alpha}(0)}{U_{di0}(0)} = \cos\alpha \tag{4-8}$$

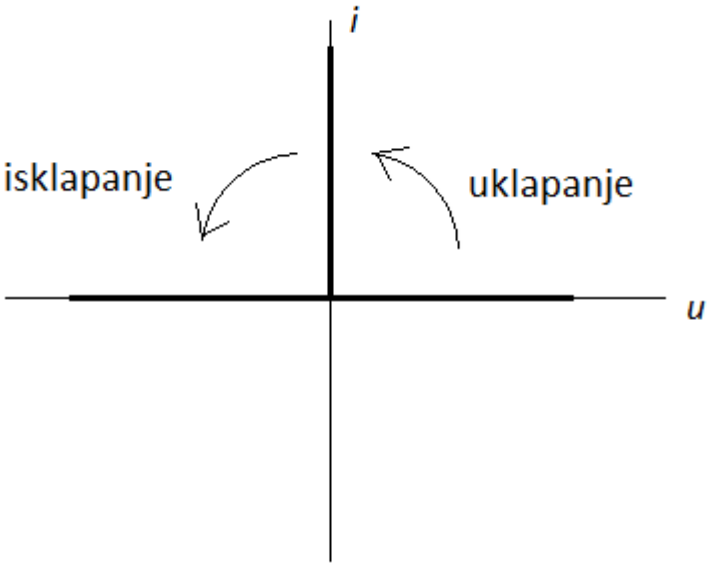
Struja trošila, uz zanemaren induktivitet pojne mreže, iznosi[1]:

$$I_d = \frac{U_{di\alpha}(0)}{R_d} = \frac{U_{di0}(0)\cos\alpha}{R_d} \tag{4-9}$$

Ispravljački je način rada ostvariv samo u području kutova upravljanja[1]:

$$0 \leq \alpha \leq \pi/2$$

Za razumijevanje rada tiristora odnosno strujno jednosmjerne sklopke potrebno je poznavati njihovu *i-u* karakteristiku koja je prikazana na slici 3.2.

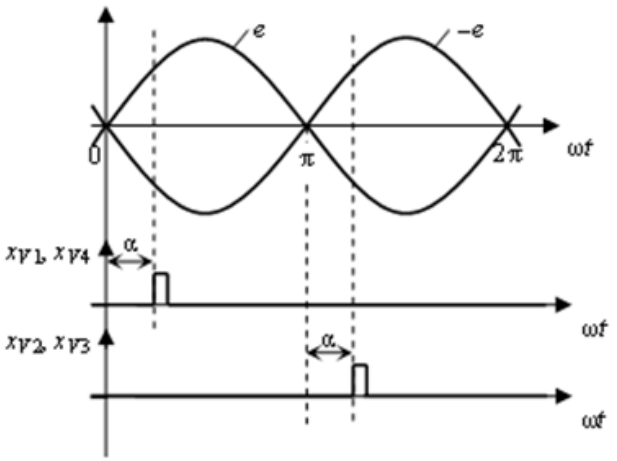


Slika 3.2. *i-u* karakteristika strujno jednosmjerne sklopke

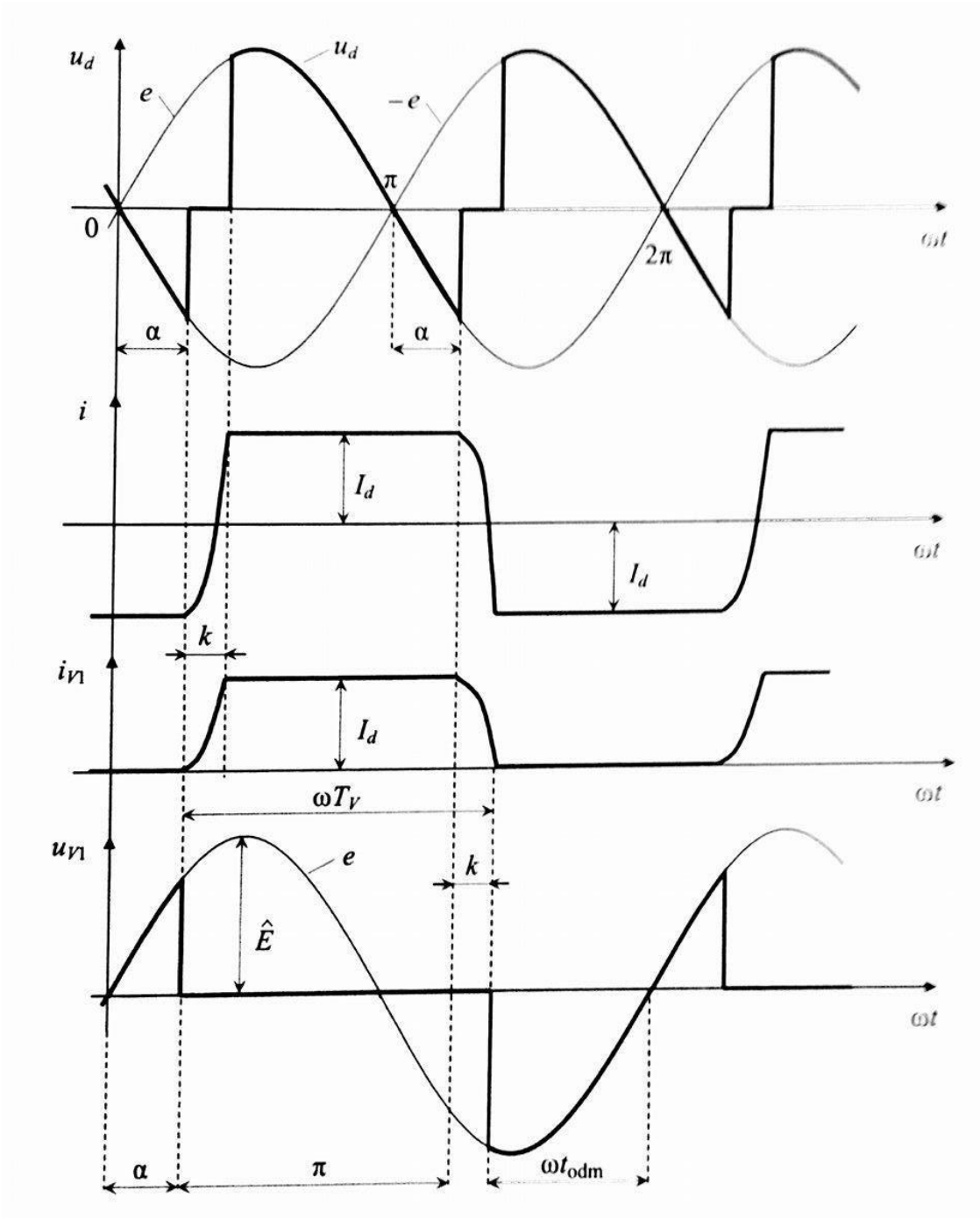
Naime, u ovom slučaju tiristor uklapa kad je napon pozitivan s tendencijom rasta, a isklapa kad je struja pozitivna s tendencijom pada. Kut upravljanja se određuje prema jednadžbi (4-10):

$$\alpha = \frac{T_X \cdot 360°}{20\ ms} \tag{4-10}$$

Sada je, nakon provedene analize rada, moguće nacrtati karakteristične valne oblike struje i napona ispravljača što je prikazano na slici 3.3[1] i 3.4[1]. Slika 3.3 prikazuje slijed upravljačkih signala dok slika 3.4 prikazuje karakteristične valne oblike napona i struja.



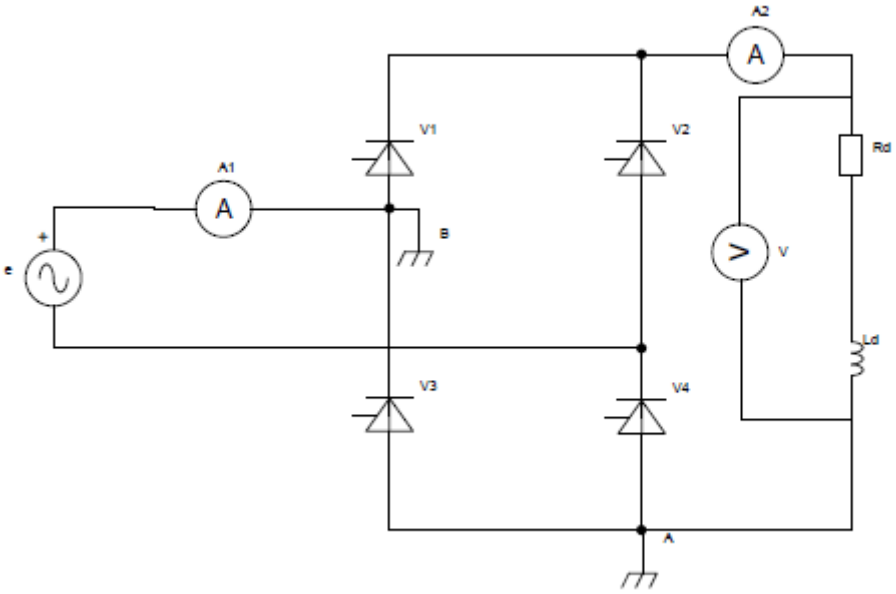
Slika 3.3. Slijed upravljačkih signala



Slika 3.4. Karakteristični valni oblici napona i struja ispravljača

4. MJERENJA U LABORATORIJU

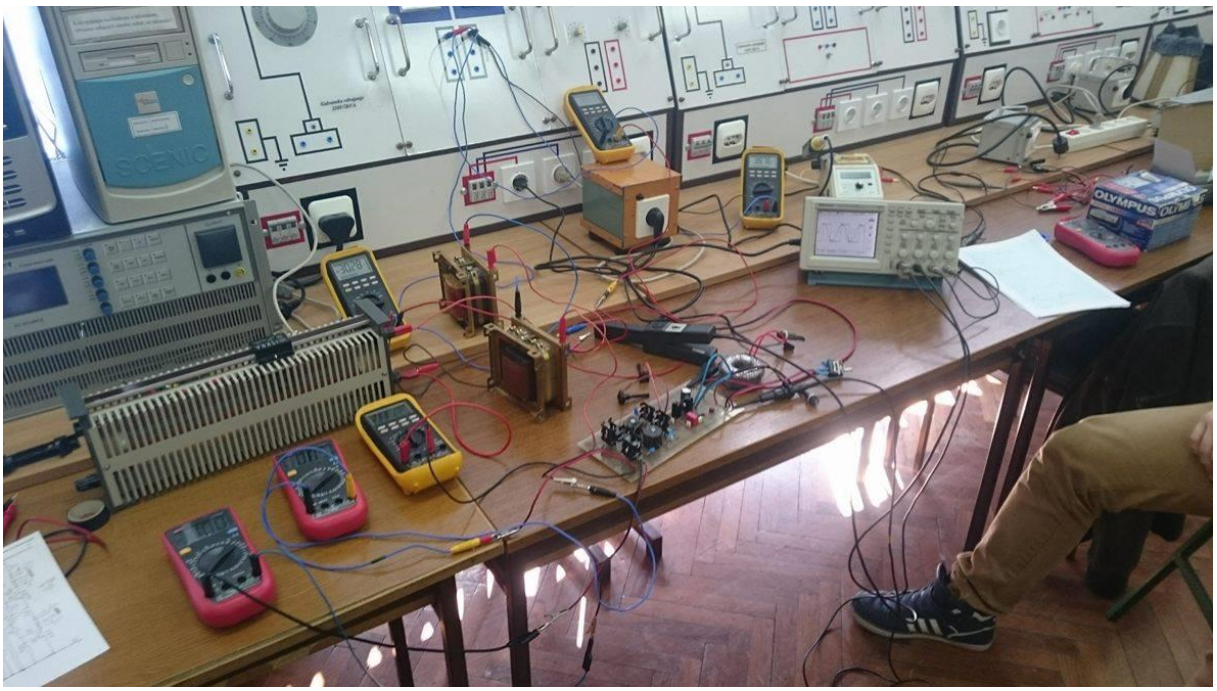
Mjerenja su se obavljala s djelatno-induktivnim opterećenjem za što su se koristile dvije prigušnice (330 mH, 2 Ω) spojene u seriju s promjenjivim otpornikom (33 Ω, 3,1 A) koji je bio postavljen na 10 Ω. Mjerilo se za kuteve upravljanja od α=3,6°, α=45° i α=72°. Kao što je već napisano ispravljački režim rada kreće se u području $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ no kako bi se izbjeglo prekomjerno zagrijavanje te zbog problema s potencimetrima teoretski maksimalni i minimalni kut nije postignut. Mjerili su se valni oblici upravljačkih impulsa x_{V1} i x_{V2} na nožicama 14 i 15 integriranog kruga TCA 785, struje i napona pojne mreže i trošila te napona ventila V_1,V_3 i V_4. Mjerenja su rađena prema shemi na slici 4.1.



Slika 4.1 Shema mjerenja

Ampermetar A_1 mjeri struju pojne mreže, A_2 struju trošila, voltmetar V napon trošila, dok oznake A i B kod masa označavaju dvije točke koje su se koristile kod mjerenja valnih oblika odnosno gdje su bile spojene mase osciloskopa. Masa A se koristila za mjerenje valnog oblika napona na ventilima V_1,V_3 i V_4 te za mjerenje valnih oblika struje i napona trošila. Masa B se koristila kod mjerenja valnih oblika napona i struje pojne mreže te upravljačkih impulsa x_{V1} i x_{V2}. Važno je napomenuti da nikako u isto vrijeme ne smiju biti spojne dvije mase osciloskopa na dvije različite mjerne točke kako ne bi došlo do kratkog spoja i time oštećenja cijelog ispravljača, a moguće i mjerne opreme.

Na slici 4.2 je prikazano radno mjesto u laboratoriju gdje su se obavljala mjerenja.



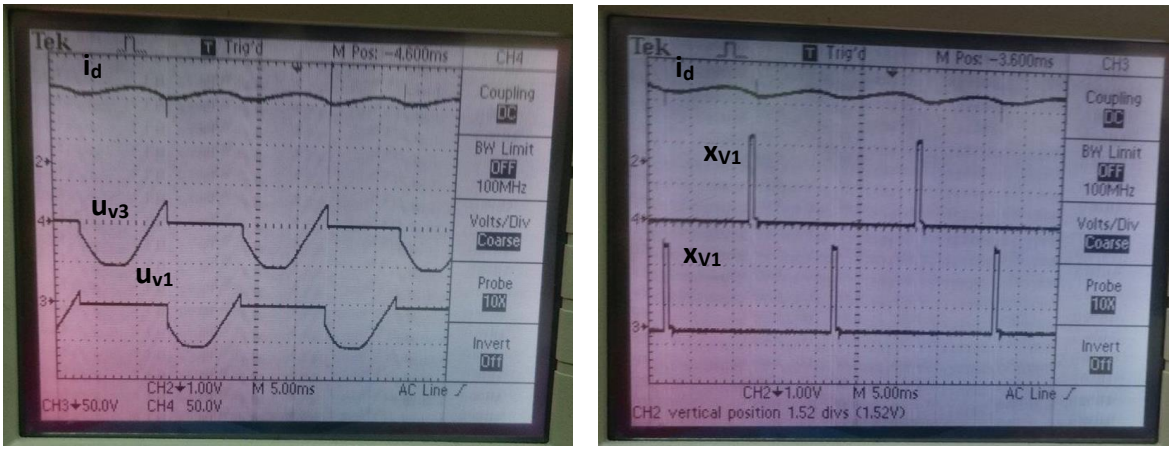
Slika 4.2. Radno mjesto

Tablica 4.1. Izmjerene vrijednosti napona i struja

	$U_d(0)$	U_E	I_1	$I_2(0)$
α=3.6°	30,79V	38,82V	1,848A	1,850A
α=45°	16,8V	38,10V	1,010A	1,030A
α=72°	8,33V	39,38V	0,520A	0,500A

U tablici 4.1 se primjećuje kako struja pojne mreže (I_1) i trošila ($I_2(0)$) te napon trošila ($U_d(0)$) padaju s povećanjem kuta vođenja dok napon pojne mreže (U_E) ostaje na približno istoj vrijednosti. Instrumenti koji su mjerili napon i struju pojne mreže su bili postavljeni na izmjenično područje dok su instrumenti koji su mjerili struju i napon trošila bili postavljeni na istosmjerno područje.

4.1. Mjerenja za kut upravljanja α=3,6°

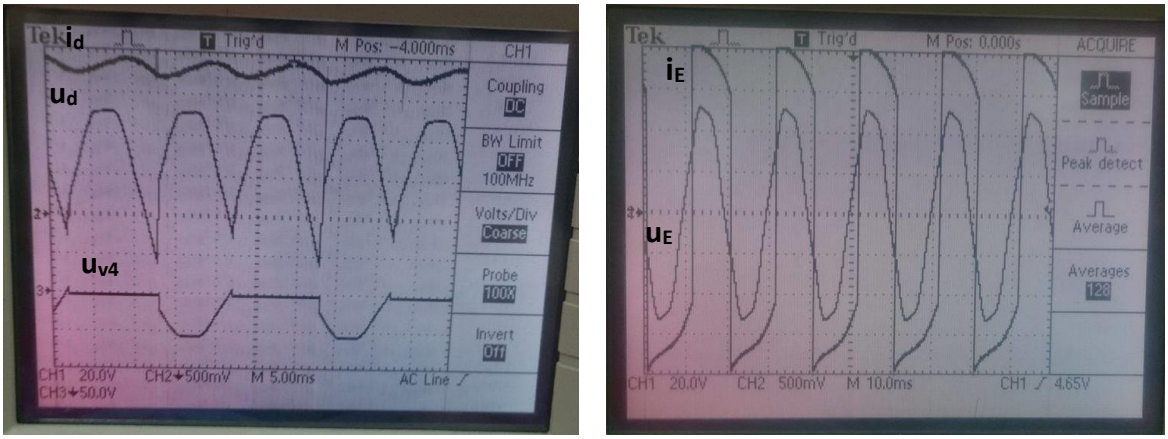


a) b)

Slika 4.3. Karakteristični valni oblici napona ventila i upravljački signali

a) Struja trošila; i_d i naponi ventila V_1 i V_3; u_{v1}, u_{v3}

b) Struja trošila; i_d i upravljački signali x_{v1}, x_{v2}



a) b)

Slika 4.4. Karakteristični valni oblici napona i struja trošila i pojne mreže

a) Napon i struja trošila; u_d, i_d i napon ventila V_4; u_{v4}

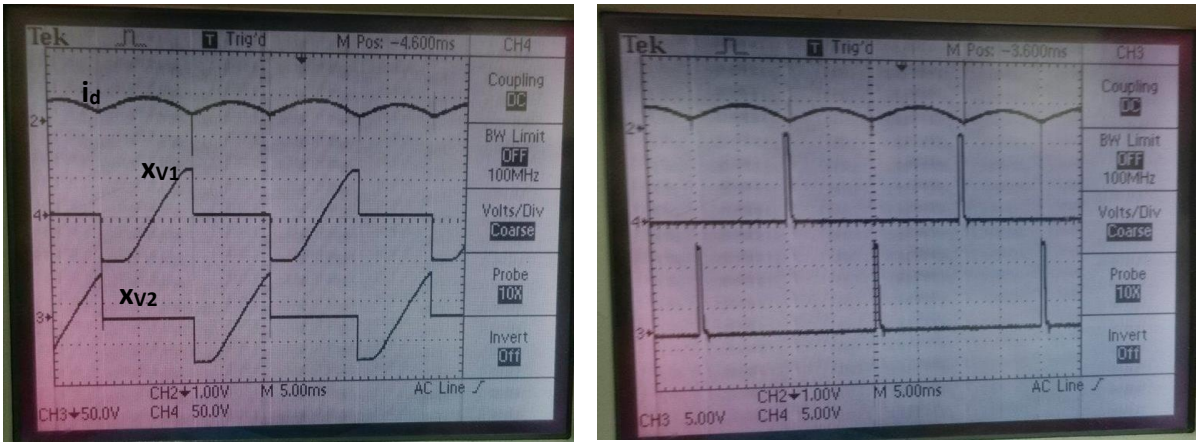
b) Napon i struja pojne mreže; u_E, i_E

Na slici 4.3a se vidi kako ventili V_3 i V_1 rade protutaktno, odnosno ventilski parovi. Dok jedan ventilski par vodi, drugi ne vodi i obratno. Primjećuje se i nešto veća vršna vrijednost napona na ventilu V_3 zbog različitog induktiviteta impulsnih transformatora.

Na slici 4.3b je prikazana struja trošila i upravljački signali x_{V1} i x_{V2}. Upravljački signali kasne za točno pola periode jedan za drugim. Oni nastaju na izlazima 14 i 15 integriranog sklopa TCA 785 koji upravlja tiristorima odnosno daje upravljački signal u trenutku kada bi upravljivi ventili odnosno tiristori trebali početi voditi. To se primjećuje i na valnom obliku struje trošila tj. u trenutku kada je dan signal struja trošila raste što je znak da ventilski par vodi.

Na slici 4.4a je prikazan napon na ventilu V_4, te su prikazani napon i struja trošila. Ventil V_4 vodi kada je napon u_{V4} nula te je stoga struja na trošilu pozitivna.

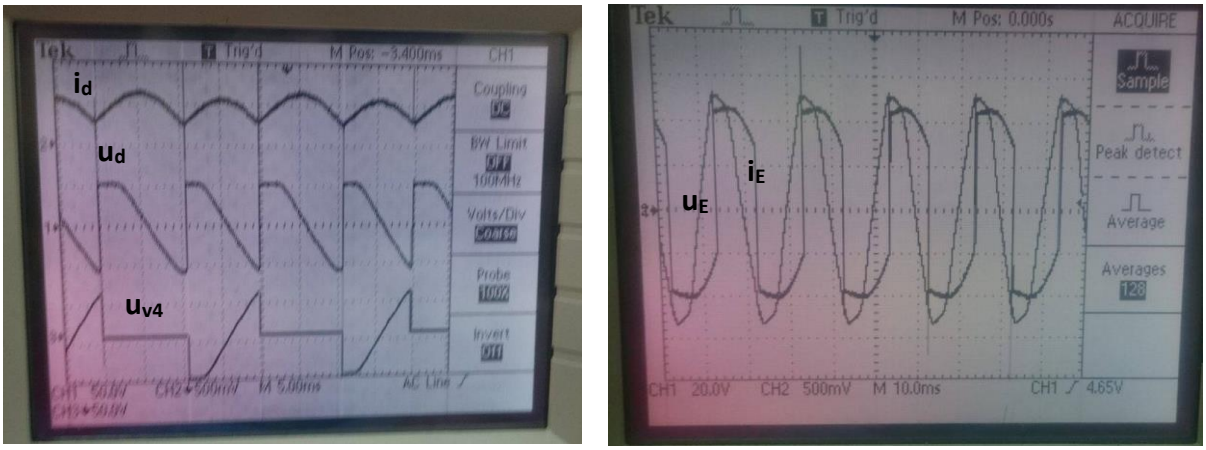
4.2. Mjerenja za kut upravljanja α=72°



a) b)

Slika 4.5. Karakteristični valni oblici napona ventila i upravljački signali

a) Struja trošila; i_d i naponi ventila V_1 i V_3; u_{v1}, u_{v3}
b) Struja trošila; i_d i upravljački signali x_{v1}, x_{v2}



a) b)

Slika 4.6. Karakteristični valni oblici napona i struja trošila i pojne mreže

a) Napon i struja trošila; u_d, i_d i napon ventila V_4; u_{v4}
b) Napon i struja pojne mreže; u_E, i_E

Usporede li se slike valnih oblika za kuteve upravljanja α=3,6° i α=72° primjećuje se razlika u vremenu okidanja upravljačkih impulsa. Kut kašnjenja okidanja tj. kut upravljanja za α=3,6° odgovara odgođenju vođenja u iznosu od 0,2 ms, dok kut upravljanja α =72° odgovara odgođenju vođenja u iznosu od 4 ms.

5. DORADA PREDLOŠKA ZA 4. LABORATORIJSKU VJEŽBU

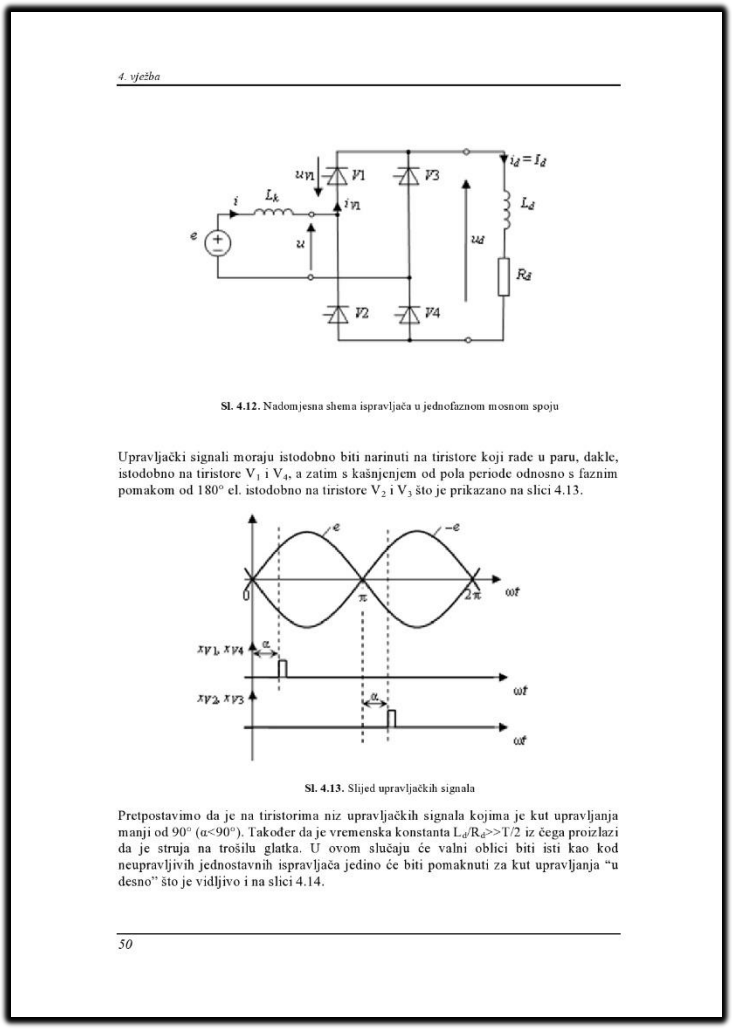
U 4. laboratorijskoj vježbi „Upravljivi ispravljači“ iz kolegija „Osnove energetske elektronike“ dodano je poglavlje induktivno opterećenog punoupravljivog ispravljača u mosnom spoju.

U vježbi treba usporediti karakteristične valne oblike dobivene analizom matematičkog modela i mjerenjima na fizičkom modelu:

a) induktivno opterećenog tropulsnog upravljivog ispravljača,
b) induktivno opterećenog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju,
c) induktivno opterećenog punoupravljivog ispravljača u mosnom spoju.

Slika 5.1. Zadatak vježbe

U vježbi je dana teorijska analiza rada ispravljača potrebna za razumijevanja rada ispravljača, koja se sastoji od nadomjesne sheme ispravljača u jednofaznom punoupravljivom mosnom spoju i slijeda upravljačkih signala prikazanih na slici 5.2.



4. vježba

Sl. 4.12. Nadomjesna shema ispravljača u jednofaznom mosnom spoju

Upravljački signali moraju istodobno biti narinuti na tiristore koji rade u paru, dakle, istodobno na tiristore V_1 i V_4, a zatim s kašnjenjem od pola periode odnosno s faznim pomakom od 180° el. istodobno na tiristore V_2 i V_3 što je prikazano na slici 4.13.

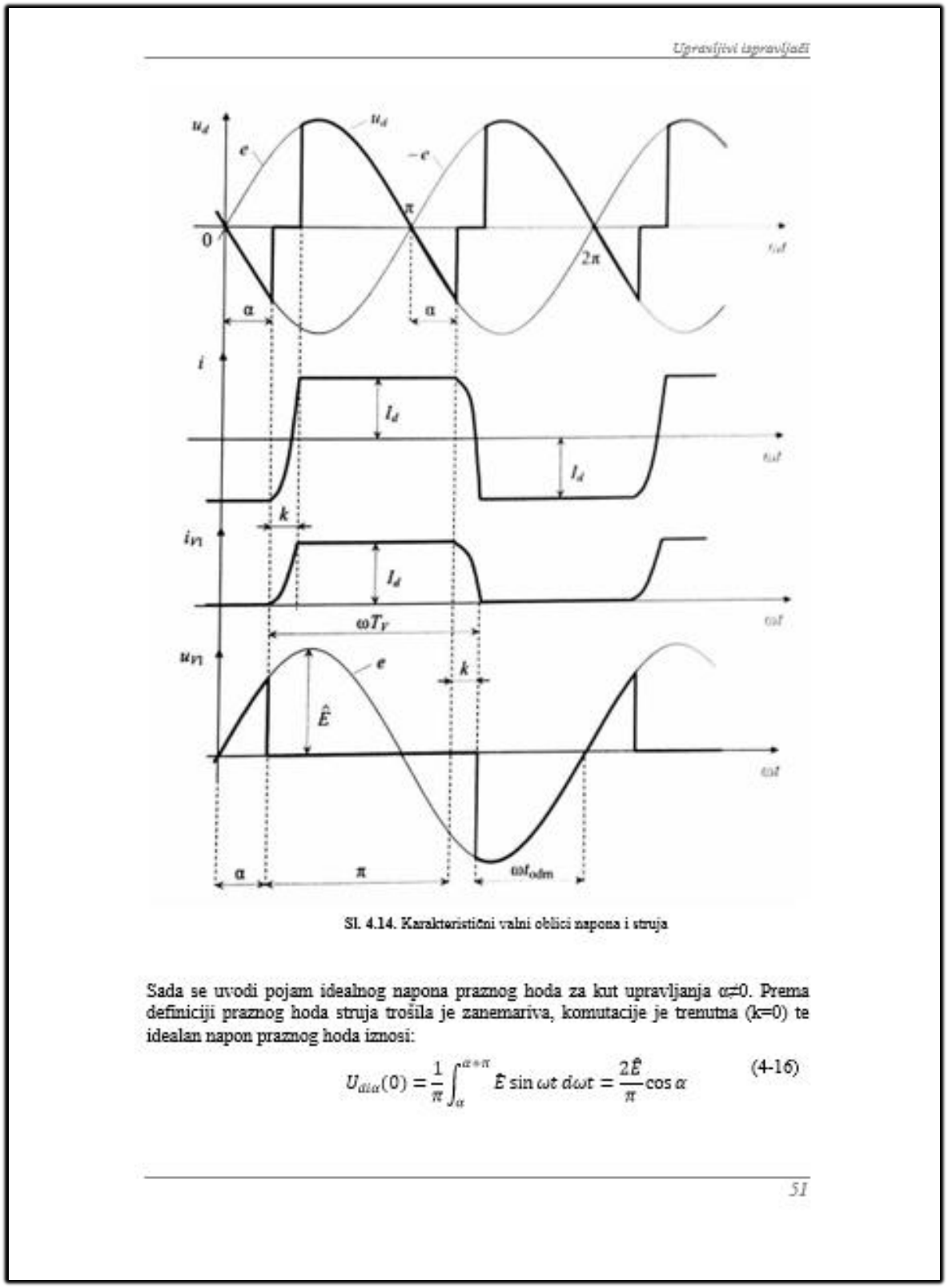
Sl. 4.13. Slijed upravljačkih signala

Pretpostavimo da je na tiristorima niz upravljačkih signala kojima je kut upravljanja manji od 90° (α<90°). Također da je vremenska konstanta $L_d/R_d>>T/2$ iz čega proizlazi da je struja na trošilu glatka. U ovom slučaju će valni oblici biti isti kao kod neupravljivih jednostavnih ispravljača jedino će biti pomaknuti za kut upravljanja “u desno” što je vidljivo i na slici 4.14.

50

Slika 5.2. Nadomjesna shema jednofaznog mosnog spoja i slijed upravljačkih impulsa

U vježbi su priloženi karakteristični valni oblici dobiveni teorijskom analizom rada koji se mogu očekivati kao rezultati mjerenja provedenih na laboratorijskoj vježbi (slika 5.3). Također je dana matematička analiza rada ispravljača koja je prikazana na slici 5.4.



Sl. 4.14. Karakteristični valni oblici napona i struja

Sada se uvodi pojam idealnog napona praznog hoda za kut upravljanja α≠0. Prema definiciji praznog hoda struja trošila je zanemariva, komutacije je trenutna (k=0) te idealan napon praznog hoda iznosi:

$$U_{di\alpha}(0) = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \hat{E}\sin\omega t\, d\omega t = \frac{2\hat{E}}{\pi}\cos\alpha \qquad (4\text{-}16)$$

51

Slika 5.3. Karakteristični valni oblici napona i struja trošila i ventila

Izraz (4-16) može se zapisati i na sljedeći način te se onda dobiva upravljačka karakteristika usmjerivača koja je temeljni izraz za projektiranje pobudnog stupnja usmjerivača:

$$\frac{U_{di\alpha}(0)}{U_{di0}(0)} = \cos\alpha \tag{4-17}$$

Zanemarimo li induktivitet pojne mreže L_k struja trošila iznosi:

$$I_d = \frac{U_{di\alpha}(0)}{R_d} = \frac{U_{di0}(0)\cos\alpha}{R_d} > 0 \tag{4-18}$$

Kako bi struja bila pozitivna mora biti pozitivan i idealni napon praznog hoda. On je pozitivan samo kada je vrijednost funkcije $\cos\alpha$ pozitivna što je ostvarivo ako je kut upravljanja u području $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$. U području kutova upravljanja $-\pi/2 \leq \alpha \leq 0$ na tiristor je narinut negativan napon. Tiristor nije komponenta koja uklapa u III. kvadrantu u-i ravnine.Prema tome je ispravljački način rada moguć samo u području kutova upravljanja [1]:

$$0 \leq \alpha \leq \pi/2 \tag{4-19}$$

Kut okidanja određuje se prema relaciji (4-20) gdje je T_X period okidanja izražen u milisekundama.

$$\alpha = \frac{T_X \times 360°}{20ms} \tag{4-20}$$

Uzme li se u obzir induktivitet pojne mreže kao i valni oblici prikazani na slici 4.14. vrijedi da je:

$$\int_{\alpha}^{\alpha+k} \hat{E}\sin\omega t\, d\omega t = \omega L_k \int_{-I_d}^{I_d} di = 2\omega L_k I_d \tag{4-21}$$

Odakle proizlazi da je kut komutacije jednak:

$$k = \arccos\left(\cos\alpha - \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{E}}\right) - \alpha \tag{4-22}$$

Induktivni pad napona jednak je:

$$D_k = 4fL_kI_d \tag{4-23}$$

Te je vanjska karakteristika usmjerivača pri napajanju pasivnog induktibnog trošila jednaka:

$$U_{d\alpha}(0) = U_{di0}(0)\cos\alpha - 4fL_k \tag{4-24}$$

S obzirom da je $U_{d\alpha}(0) = R_dI_d$ sada se može točnije odrediti struja trošila

$$I_d = \frac{U_{di0}(0)\cos\alpha}{R_d + 4fL_k} > 0 \tag{4-25}$$

Slika 5.4. Matematička analiza rada ispravljača

Opisana su dva podsustava ispravljača, energetski i upravljački, čiji su opisi dani na slici 5.5.

b) Induktivno opterećeni punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju

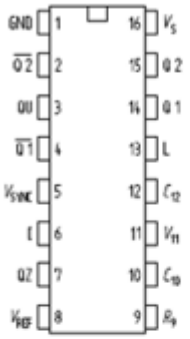
Maketa korištena u vježbi je jednofazni punovalni punoupravljivi ispravljač izrađen kroz završne radove [4,5]. Ispravljač se sastoji od dva dijela, upravljačkog i energetskog.

U upravljačkom dijelu ispravljača nalazi se integrirani sklop TCA785 koji na pinovima 14 i 15 dalje upravljačke signale za upravljanje tranzistorima koji kasne jedan za drugim za pola periode. Raspored i funkcija nožica integriranog sklopa TCA 785 je prikazan na slici 4.13., dok slika 4.14. prikazuje karakteristične valne oblike na pojedinim pinovima odnosno nožicama. Širina upravljačkog signala je regulirana kondenzatorom od 1nF zbog samog TCA785 kod kojeg je karakteristično da se širina impulsa povećava odnosno smanjuje i to u odnosu 0.5μs/nF.

Energetski dio ispravljača se sastoji od 4 tiristora TYN616 (16 A, 600-1000V). Kutom vođenja α kod tiristora se upravlja potenciometrom od 10kΩ u upravljačkom dijelu ispravljača.

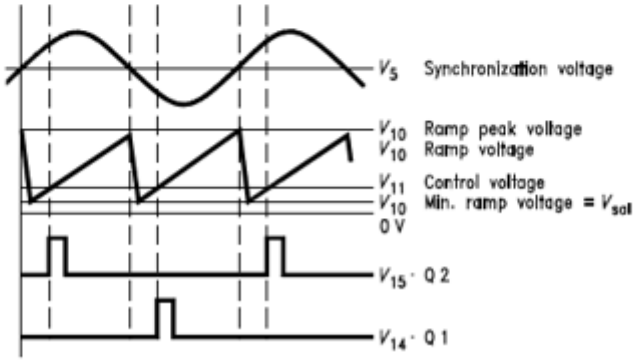
Slika 5.5. Opisi podsustava ispravljača

Također je prikazan i raspored nožica integriranog sklopa TCA785 kao i funkcije pojedinih nožica i karakteristični valni oblici koji se dobiju na pojedinim nožicama sklopa što je prikazano slikom 5.6.



Funkcije i definicije pin-ova		
Pin	**Simbol**	**Funkcija**
1	GND	Uzemljenje
2	$\overline{Q2}$	Izlaz 2 invertiran
3	QU	Izlaz U
4	$\overline{Q1}$	Izlaz 1 invertiran
5	V_{SYNC}	Sinkroni napon
6	I	Inhibicija
7	QZ	Izlaz Z
8	V_{REF}	Stabilizirani napon
9	R_9	Otpor rampe
10	C_{10}	Kapacitet rampe
11	V_{11}	Kontrolni napon
12	C_{12}	Širenje impulsa
13	L	Dugački impuls
14	Q1	Izlaz 1
15	Q2	Izlaz 2
16	V_s	Napajanje

Sl- 4.13. Raspored i funkcija nožica integriranog sklopa TCA 785



Slika 4.14. Karakteristični valni oblici na pojedinim priključcima

Slika 5.6. Raspored i funkcija nožica te karakteristični valni oblici integriranog sklopa TCA 785

Zadatak za pripremu je preuzet iz udžbenika „Ivan Flegar: Sklopovi energetske elektronike – odabrani primjeri“ iz poglavlja „6. Ispravljači“ te je prikazan na slici 5.7.

5. Dvopulsni ispravljač u punoupravljivom mosnom spoju napaja trošilo parametara $L_d = 600$ mH i $R_d = 8\ \Omega$. Ispravljač je priključen na izmjeničnu pojnu mrežu koja se može modelirati izmjeničnim naponskim izvorom u(t)=220sin 314t [V], i induktivitetom L = 5 mH. Odredite valni oblik napona u_1 na mjestu priključka ispravljača za ove kuteve upravljanja [6]:
   a) $\alpha = 30°$ el.
   b) $\alpha = 150°$ el.

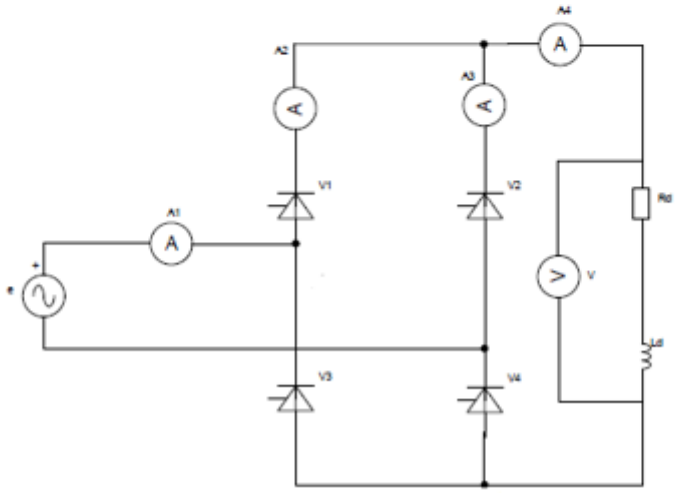
Slika 5.7. Zadatak za pripremu

Opisan je postupak provedbe laboratorijske vježbe prikazan na slici 4.8.

c) Snimanje valnih oblika i mjerenje karakterističnih veličina za punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju

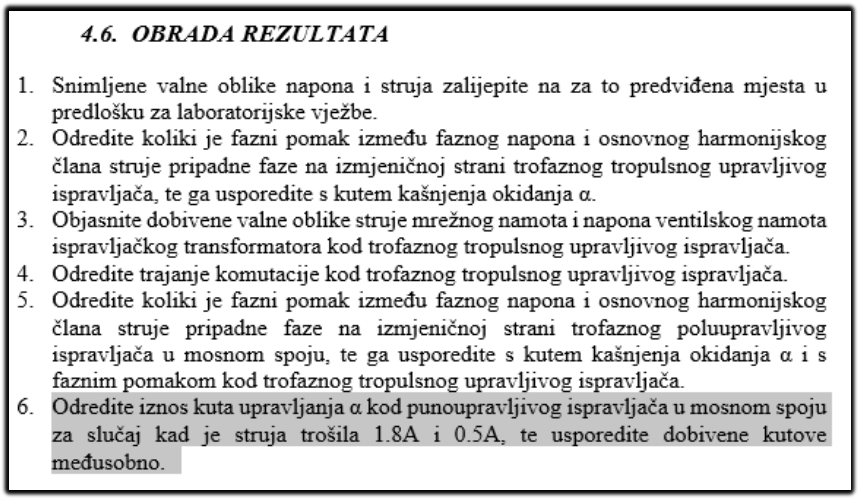
Mjernu opremu spojite prema shemi spajanja danoj na slici 4.17., a zatim provedite mjerenja ovim redoslijedom:

1. Pomoću regulacijskog transformatora povećavajte napon izvora dok struja trošila ne dosegne vrijednost od 1.8A.
2. Namjestite kut upravljanja na vrijednost od α=3.6°.
3. Očitajte i zapišite vrijednosti koje pokazuju mjerni instrumenti.
4. Promatrajte i snimite na osciloskopu valne oblike napona upravljivih ventila V_1 i V_2, napona i struje pojne mreže, te napona i struje trošila.
5. Ponovite koraka od 1 do 4 za vrijednosti struje trošila 0.5A i vrijednost kuta upravljanja α=72°.
6. Smanjite napon izvora na nulu, isključite pobudni uređaj i odspojite mjerne instrumente s uređaja.



Slika 5.8. Provedba laboratorijske vježbe

Na slici 5.9 je dodan zadatak za analizu dobivenih rezultata.



4.6. OBRADA REZULTATA

1. Snimljene valne oblike napona i struja zalijepite na za to predviđena mjesta u predlošku za laboratorijske vježbe.
2. Odredite koliki je fazni pomak između faznog napona i osnovnog harmonijskog člana struje pripadne faze na izmjeničnoj strani trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača, te ga usporedite s kutem kašnjenja okidanja α.
3. Objasnite dobivene valne oblike struje mrežnog namota i napona ventilskog namota ispravljačkog transformatora kod trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača.
4. Odredite trajanje komutacije kod trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača.
5. Odredite koliki je fazni pomak između faznog napona i osnovnog harmonijskog člana struje pripadne faze na izmjeničnoj strani trofaznog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju, te ga usporedite s kutem kašnjenja okidanja α i s faznim pomakom kod trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača.
6. Odredite iznos kuta upravljanja α kod punoupravljivog ispravljača u mosnom spoju za slučaj kad je struja trošila 1.8A i 0.5A, te usporedite dobivene kutove međusobno.

Slika 5.9. Zadatak za analizu rezultata

6. ZAKLJUČAK

U završnom radu je obavljena rekonstrukcija makete ispravljača u jednofaznom punoupravljivom mosnom spoju. Izrađeno je kućište za maketu na koje su izvučeni priključci za mjerne točke te za napajanje samog ispravljača zbog lakšeg provođenja mjerenja. Također su na kućište izvučeni potenciometri kao i osigurači radi lakše zamjene istih.

Jeda od specifičnosti punoupravljivog mosnog spoja je mogućnost upravljanja trenutkom kada će tiristori odnosno upravljivi ventili početi voditi. Kut upravljanja odnosno odgoda trenutka okidanja upravljačkih signala se namješta potenciometrima od 10 kΩ i 100 kΩ. Mogućnost upravljanja trenutkom okidanja se razlikuje od neupravljivog jednofaznog mosnog spoja gdje se koriste diode koje su neupravljive komponente.

Mjerenja su obavljena za karakteristične kutove upravljanja α=3,6° i α=72°. Teoretski kut upravljanja ide u rasponu od $0 \leq \alpha \leq 90°$ no zbog problema s potenciometrima, te fizičkih ograničenja prigušnica koje su korištene kao djelatno-induktivno trošilo postigli su se ranije spomenuti kutovi.

Nakon obavljenih mjerenja te usporedbom sa urađenom analizom rada primjećuje se kako se oni poklapaju što znači da su pretpostavke u analizi rada dobro postavljene te da ispravljač radi ispravno.

LITERATURA

[1] I. Flegar: „Elektronički energetski pretvarači“, KIGEN, Zagreb, 2010.

SAŽETAK

Napravljena je rekonstrukcija makete odnosno za istu je izrađeno kućište s izvedenim priključcima za mjerne točke. Maketa je prilagođena upotrebi za laboratorijske vježbe u idućoj akademskoj godini. Provedena je analiza rada te su određeni karakteristični valni oblici napona i struja koji se mogu očekivati kao rezultati mjerenja. Mjerenja su vršena s djelatno-induktivnim opterećenjem za karakteristične kutove upravljanja. Dorađen je predložak za laboratorijsku vježbu 4 „Upravljivi ispravljači“. U vježbi je dana teorijska analiza rada ispravljača u jednofaznom mosnom spoju, opisan je fizički model pretvarača te je dan postupak provođenja vježbe kao i zadaci za pripremu i analizu rezultata.

Ključne riječi: fazno upravljanje, impulsni transformator, strujno jednosmjerna sklopka

RECONSTRUCTION AND MEASUREMENTS ON THE MODEL OF AN ACTIVE – LOADED SINGLE PHASE FULLY CONTROLLED BRIDGE RECTIFIER; 10A, 600V

ABSTRACT

A reconctruction of the model with the construction of an appropriate casing was made with derived connections for the measurement points. The model is adapted to the use of laboratory exercises in the next academic year. A work analysis was conducted and typical voltage and current waveforms have been determined that can be expected as the measurements results. The measurements were performed while the rectifier was active-inductive loaded for typical firing angles. The template for the laboratory exercise 4 “Controlled rectifiers” was revised. A theoretical work analysis of the single phase fully controlled rectifier was given and the physical model of the converter was described. Steps for performing the exercise were described and tasks for preparation and results analysis were given.

Key words: phase-control, pulse transformers, current one-way switch

ŽIVOTOPIS

Filip Kutnjak rođen je 19.10.1994. godine u Osijeku. Živi u Josipovcu kod Osijeka gdje je pohađao Osnovnu školu Josipovac. Po završetku osnovnoškolskog obrazovanja upisuje Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku te se opredijeljuje za smjer elektrotehnika. 2013. godine upisuje 1. godinu preddiplomskog studija elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek. Na 2. godini studija se opredjeljuje za smjer elektroenergetika.

Sudjelovao je na natjecanju iz plivanja, te na sveučilišnom natjecanju u vaterpolu.

U Osijeku, svibanj 2016. Filip Kutnjak

_____

(Vlastoručni potpis)

PRILOZI

Prilog 1 – Predložak za laboratorijsku vježbu

Prilog 2 – Snimljeni valni oblici

Prilog 3 – Podatkovna tablica integriranog sklopa TCA 785

Prilog 4 – Podatkovna tablica tiristora TYN616

Prilog 5 – Podatkovna tablica tranzistora BD677

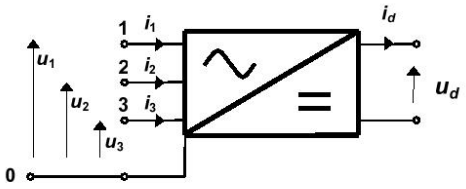
Prilog 1: Predložak za laboratorijsku vježbu

4. vježba

UPRAVLJIVI ISPRAVLJAČI

4.1. UVOD

Ispravljači su električki uređaji koji povezuju izmjeničnu pojnu mrežu i istosmjerno trošilo, pri čemu se energija prenosi od izmjenične pojne mreže prema istosmjernom trošilu. S obzirom na stupanj upravljivosti [1], upravljivi ispravljači dijele se na poluupravljive fazno upravljane ispravljače koji se sastoje od dioda i tiristora, i punovalne fazno upravljane ispravljače koji se sastoje samo od tiristora. Promjenom vremena kašnjenja okidanja tiristora ostvaruje se promjena izlaznih veličina ispravljača, tj. struje i napona trošila. Promjena izlaznih veličina ispravljača je potrebna u primjenama kada se postavlja zahtjev za mijenjanje brzine i/ili smjera vrtnje istosmjernog motora kao trošila. Takva energetska trošila su u pravilu veće snage pa se stoga koriste trofazni upravljivi ispravljači, slika 4.1.



Sl. 4.1. Simbol trofaznog ispravljača.

Štetno povratno djelovanje fazno upravljanih ispravljača na pojnu mrežu očituje se postojanjem faznog pomaka φ osnovnog harmonijskog člana fazne struje pojne mreže u odnosu na pripadni fazni napon [2]. Ovaj je fazni pomak induktivan i uz zanemarene reaktancije pojne mreže je kod simetrično fazno upravljanih ispravljača jednak kutu upravljanja α, dakle $\varphi = \alpha$. Poželjno bi bilo da je $\varphi < \alpha$. Ovo se postiže ako se:

- paralelno trošilu spoji dioda (ispravljač s porednom diodom),
- serijski spoje upravljivi i neupravljivi ispravljač.

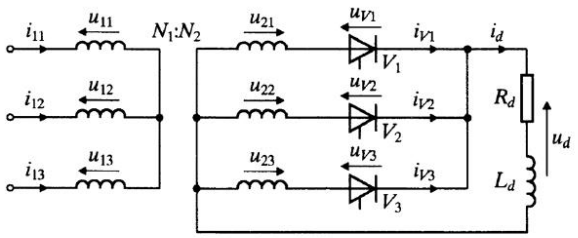
U vježbi treba usporediti karakteristične valne oblike dobivene analizom matematičkog modela i mjerenjima na fizičkom modelu:

a) induktivno opterećenog tropulsnog upravljivog ispravljača,
b) induktivno opterećenog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju,
c) induktivno opterećenog punoupravljivog ispravljača u mosnom spoju.

4.2. ANALIZE RADA PRETVARAČA

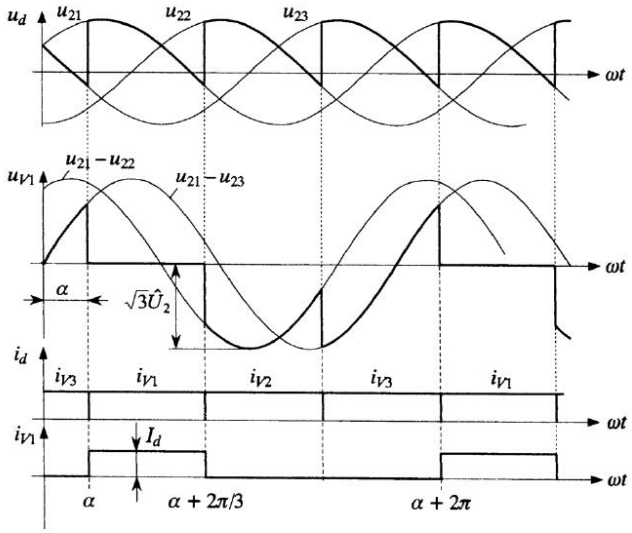
a) Induktivno opterećeni tropulsni upravljivi ispravljač

Pretpostavimo da je ispravljački transformator savršen, prijenosnog omjera $N_1 : N_2$, te priključen na trofaznu simetričnu sinusnu pojnu mrežu u_{1k}, $k = 1, 2, 3$, amplitude faznog napona $\hat{U}_1$. Neka su ventili idealni, a vremenska konstanta trošila istosmjernog kruga $L_d/R_d >> T/3$, pa se istosmjerni krug može zamijeniti istosmjernim strujnim uvorom I_d [1].



Sl. 4.2. Shema spoja induktivno opterećenog tropulsnog upravljivog ispravljača.

Na ventilskoj strani vrijedi da je $u_{2k} = u_{Vk} + u_d$, $k = 1, 2, 3$, $\sum_{k=1}^{3} i_{Vk} = I_d$, gdje je prema slici 4.3., $u_{21} = \hat{U}_2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$, $u_{22} = \hat{U}_2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right)$, $u_{23} = \hat{U}_2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{4\pi}{3}\right)$. Također vrijedi $\hat{U}_2 = N\hat{U}_1$, $N = N_2/N_1$.



Sl. 4.3. Karakteristični valni oblici induktivno opterećenog tropulsnog upravljivog ispravljača.

Pretpostavimo također da su tiristori simetrično fazno upravljani, što znači da su trenutci okidanja tiristora pomaknuti za 120° el.

Ventil V_k može provesti ako dobije upravljački (okidni) impuls na geit kad je napon pripadne mu faze u_{2k} pozitivniji od napona drugih dviju faza. Interval od trenutka kada napon jedne od faza u_{2k} postane pozitivniji od napona drugih dviju faza do trenutka kada provede pripadajući ventil V_k, zove se kut upravljanja (ili kut kašnjenja okidanja), a označava se sa α, slika 4.3.

Iz valnih oblika prikazanih na slici 4.3. proizlazi da je srednja vrijednost napona na trošilu:

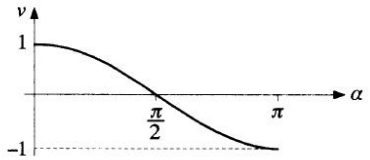
$$U_{di\alpha}(0)=\frac{3\hat{U}_2}{2\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\frac{2\pi}{3}}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{6}\right)d\omega t=\frac{3\sqrt{3}}{2\pi}\hat{U}_2\cos\alpha\,, \tag{4-1}$$

dok je struja trošila $I_d=\dfrac{U_{di\alpha}(0)}{R_d}$.

Odnos srednje vrijednosti izlaznog napona kod nekog kuta upravljanja α i srednje vrijednosti napona za α = 0, naziva se faktor upravljanja, ν. Ovisnost faktora upravljanja o kutu α zove se upravljačka karakteristika ispravljača, (4-2) i grafički je prikazana slikom 4.4.:

$$\nu=\frac{U_{di\alpha}(0)}{U_{di0}(0)}=\cos\alpha \tag{4-2}$$

Izraz (4-2) vrijedi i ako nije zadovoljena pretpostavka da je $L_d/R_d >> T/3$. Dovoljno je da je struja trošila kontinuirana.



Sl. 4.4. Upravljačka karakteristika tropulsnog ispravljača pri kontinuiranoj struji trošila.

U intervalu π/2 < α < π vrijednost za $U_{di\alpha}(0)$ je negativna, što je uz $I_d > 0$ nemoguće. Ovaj način rada je ipak moguć ako u modelu trošila postoji aktivni element (izvor). Pojna mreža tada postaje trošilo, a ispravljač radi kao izmjenjivač. Ispravljač koji može raditi i kao izmjenjivač naziva se usmjerivač.

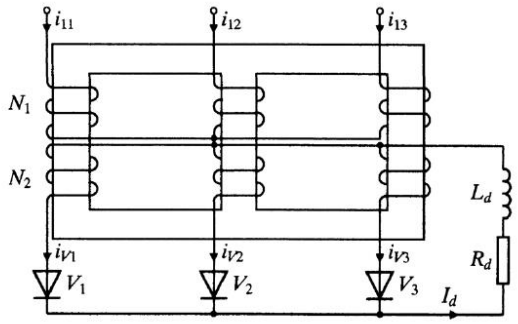
Nakon analize ventilske strane ispravljača odredimo i valni oblik struje mrežnog (primarnog) namota ispravljačkog transformatora uz pretpostavku trostupne jezgre i Yy spoj, slika 4.5. U intervalu u kojem vodi ventil V_1 vrijede, uz zanemarenu struju magnetiziranja, izrazi:

$$N_1(i_{11}-i_{12})-N_2 i_{V1}=0 \tag{4-3}$$

$$i_{V1}=I_d \tag{4-4}$$

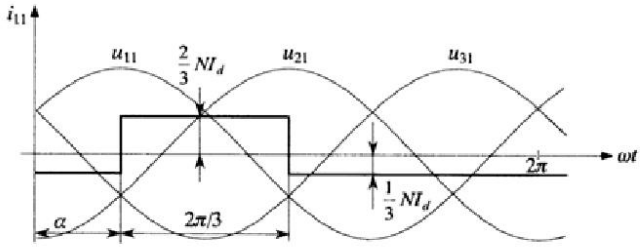
$$i_{12}-i_{13}=0 \tag{4-5}$$

$$i_{11}+i_{12}+i_{13}=0 \tag{4-6}$$



Sl. 4.5. Shema spoja ispravljačkog transformatora.

te dobivamo da je $i_{11} = (2/3)NI_d$ i $i_{12} = i_{13} = (-1/3)NI_d$, gdje je $N = N_2/N_1$. Analogni izrazi bi se dobili i u intervalu kad vode ventili V_2 i V_3.



Sl. 4.6. Valni oblik struje mrežnog namota jedne faze uz α = 60° el.

Budući da je srednja vrijednost struje svakog ventilskog (sekundarnog) namota $I_d/3$, zaključujemo da je svaki stup transformatora istosmjerno predmagnetiziran strujom (za detalje o istosmjernom predmagnetiziranju vidi Uvodnu vježbu):

$$I_{\mu}(0) = \frac{NI_d}{3} \tag{4-7}$$

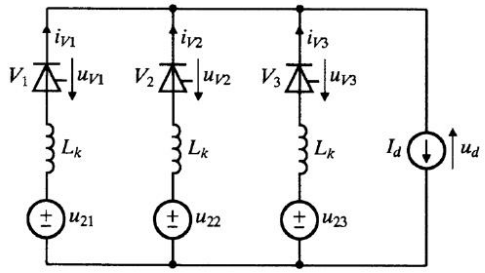
KOMUTACIJA

Pretpostavimo da ispravljački transformator nije savršen. Slika 4.7. prikazuje nadomjesnu shemu spoja u kojoj je uzet u obzir komutacijski induktivitet L_k. Zbog postojanja komutacijskog induktiviteta, prijelaz struje s jednog ventila na drugi nije trenutan. Ako je dan impuls na ventil V_1 u trenutku $\omega t = \alpha$, a do tog trenutka je struju I_d vodio ventil V_3, u skladu sa shemom spoja prema slici 4.7. vrijedi ovaj zapis jednadžbi:

$$u_{21} = L\frac{di_{V1}}{dt} + U_d \tag{4-8}$$

$$u_{23} = L\frac{di_{V3}}{dt} + U_d \tag{4-9}$$

$$I_d = i_{V1} + i_{V3} \tag{4-10}$$



Sl. 4.7. Nadomjesna shema spoja tropulsnog ispravljača kada se u obzir uzme komutacija.

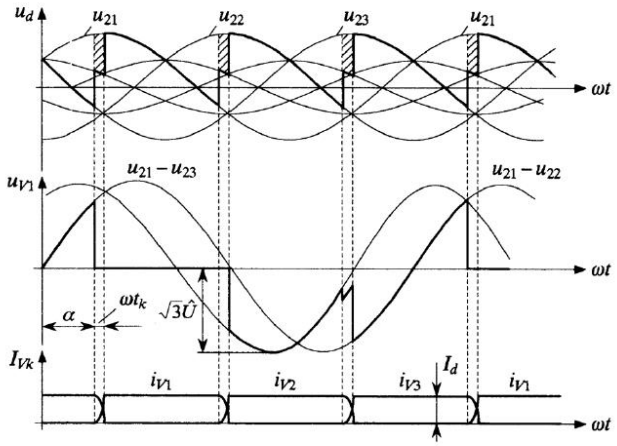
Rješenjem jednadžbi (4-8) do (4-10) dobiva se struja ventila V_1 u intervalu komutacije $\alpha \leq \omega t \leq \alpha+\omega t_k$:

$$i_{V1} = \frac{\sqrt{3}\hat{U}_2}{2\omega L}\left(\cos\alpha - \cos\omega t\right) \tag{4-11}$$

Za vrijeme komutacije napon na trošilu je smanjen i iznosi $u_d = \frac{1}{2}\left(u_{21}+u_{23}\right)$, čime je smanjena i srednja vrijednost napona na trošilu za iznos induktivnog pada napona D_x. Crtkana površina na slici 4.8. odgovara induktivnom padu napona:

$$D_x = \frac{3}{T}\left[\frac{1}{\omega}\int_{\alpha}^{\alpha+\omega t_k} u_L d\,\omega t\right] = \frac{3}{T}L_k\int_0^{I_d} di_{V1} = 3f\cdot L_k\cdot I_d \tag{4-12}$$

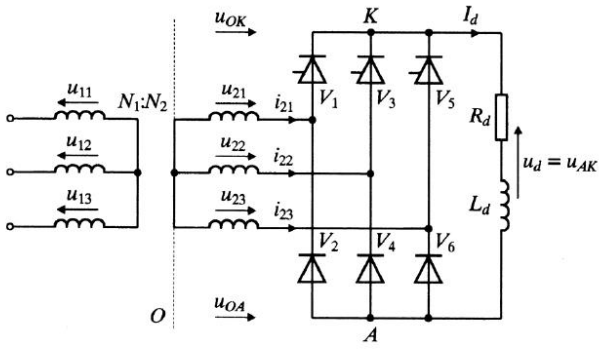
Napon na induktivitetu L_k je u_L (npr. u promatranom intervalu $u_L = u_{21} - u_d$), ωt_k je trajanje komutacije, a f je frekvencija izmjeničnog napona.



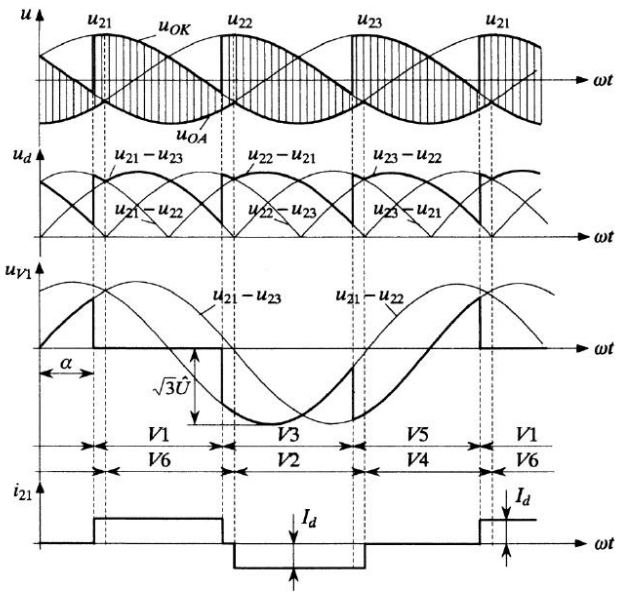
Sl. 4.8. Karakteristični valni oblici napona i struja tropulsnog upravljivog ispravljača kada se u obzir uzme komutacija.

b) Induktivno opterećeni poluupravljivi ispravljač u mosnom spoju

Slika 4.9. prikazuje shemu spoja induktivno opterećenog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju. Ovaj ispravljač se sastoji od serijskog spoja diodnog tropulsnog ispravljača (tvore ga diode V_2, V_4, V_6, sa zajedno spojenim anodama) i tiristorskog tropulsnog ispravljača (tvore ga tiristori V_1, V_3, V_5, sa zajedno spojenim katodama).



Slika 4.9. Shema spoja induktivno opterećenog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju.



Slika 4.10. Karakteristični valni oblici poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju za $\alpha < \pi/3$.

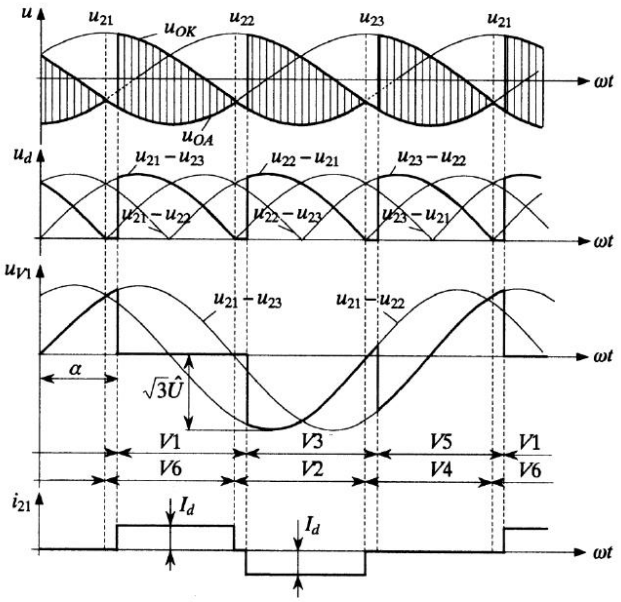
Prema slici 4.9. je:

$$u_d = u_{AK} = u_{OK} - u_{OA}\,, \tag{4-13}$$

a fazne struje ventilskih namota su jednake:

$$i_{21} = i_{V1} - i_{V2}\,;\; i_{22} = i_{V3} - i_{V4}\,;\; i_{23} = i_{V5} - i_{V6} \tag{4-14}$$

Uzevši u obzir izraze (4-13) i (4-14), te uz analizu tropulsnog ispravljača, određuju se svi karakteristični valni oblici napona i struja za promatranu shemu spoja. Slike 4.10. i 4.11. prikazuju karakteristične valne oblike napona i struja uz trenutnu komutaciju za dva uobičajena kuta upravljanja.



Slika 4.11. Karakteristični valni oblici trofaznog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju za $\alpha > \pi/3$.

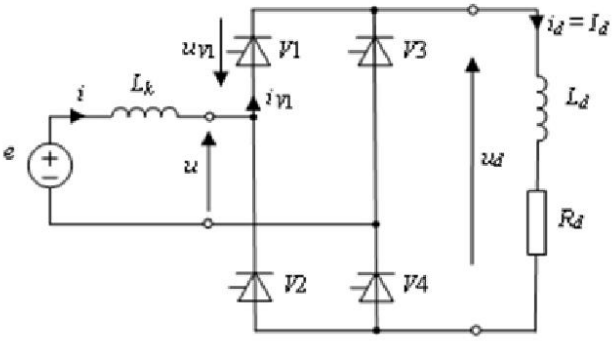
Faktor upravljanja trofaznog poluupravljivog mosnog spoja je [2]:

$$\nu = \frac{1}{2}\left(1 + \cos\alpha\right), \tag{4-15}$$

dok je fazni pomak osnovnog harmonijskog člana fazne struje pojne mreže u odnosu na pripadni fazni napon jednak $\varphi = \alpha/2$.

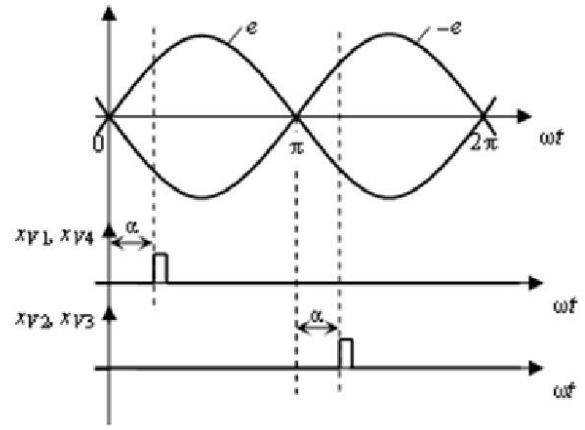
c) Induktivno opterećeni punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju

Nadomjesna shema ispravljača u jednofaznom mosnom spoju prikazana je na slici 4.12. Shema je jednaka spoju kod neupravljivog ispravljača jedino su diode zamijenjene tiristorima.



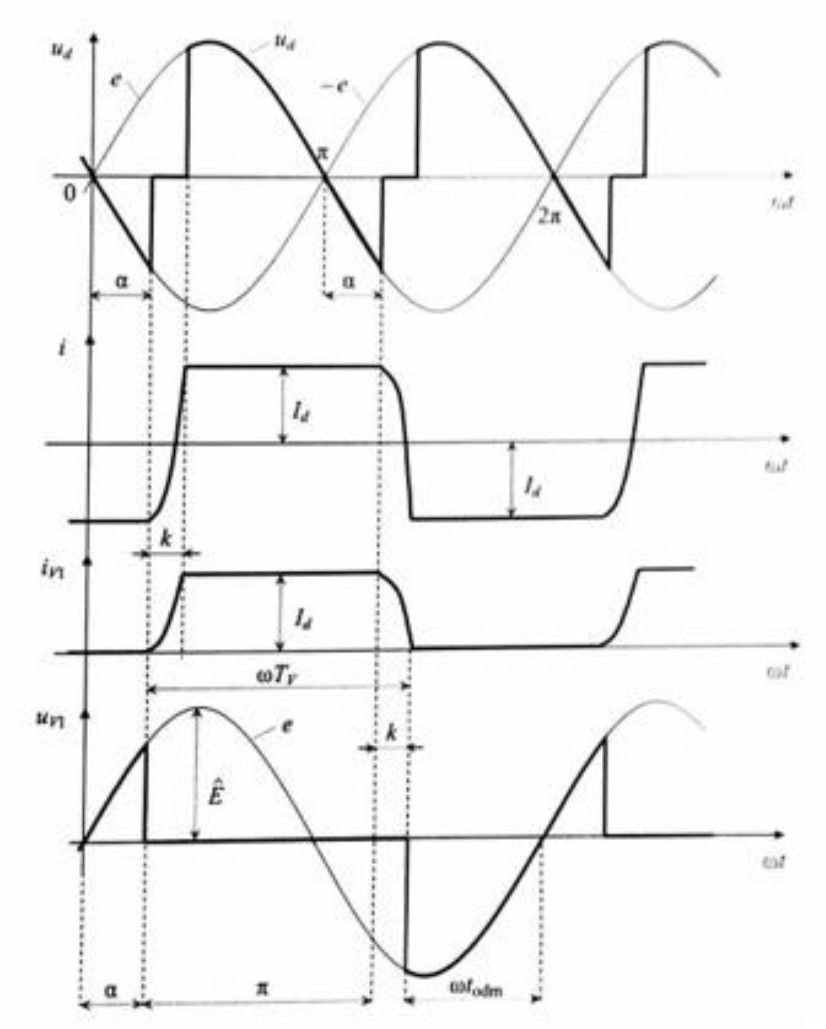
Sl. 4.12. Nadomjesna shema ispravljača u jednofaznom mosnom spoju

Upravljački signali moraju istodobno biti narinuti na tiristore koji rade u paru, dakle, istodobno na tiristore V_1 i V_4, a zatim s kašnjenjem od pola periode odnosno s faznim pomakom od 180° el. istodobno na tiristore V_2 i V_3 što je prikazano na slici 4.13.



Sl. 4.13. Slijed upravljačkih signala

Pretpostavimo da je na tiristorima niz upravljačkih signala kojima je kut upravljanja manji od 90° ($\alpha<90°$). Također da je vremenska konstanta $L_d/R_d>>T/2$ iz čega proizlazi da je struja na trošilu glatka. U ovom slučaju će valni oblici biti isti kao kod neupravljivih jednostavnih ispravljača jedino će biti pomaknuti za kut upravljanja "u desno" što je vidljivo i na slici 4.14.



Sl. 4.14. Karakteristični valni oblici napona i struja

Sada se uvodi pojam idealnog napona praznog hoda za kut upravljanja α≠0. Prema definiciji praznog hoda struja trošila je zanemariva, komutacije je trenutna (k=0) te idealan napon praznog hoda iznosi:

$$U_{di\alpha}(0) = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \hat{E}\sin\omega t\, d\omega t = \frac{2\hat{E}}{\pi}\cos\alpha \qquad (4\text{-}16)$$

Izraz (4-16) može se zapisati i na sljedeći način te se onda dobiva upravljačka karakteristika usmjerivača koja je temeljni izraz za projektiranje pobudnog stupnja usmjerivača:

$$\frac{U_{di\alpha}(0)}{U_{di0}(0)} = \cos\alpha \tag{4-17}$$

Zanemarimo li induktivitet pojne mreže L_k struja trošila iznosi:

$$I_d = \frac{U_{di\alpha}(0)}{R_d} = \frac{U_{di0}(0)\cos\alpha}{R_d} > 0 \tag{4-18}$$

Kako bi struja bila pozitivna mora biti pozitivan i idealni napon praznog hoda. On je pozitivan samo kada je vrijednost funkcije $\cos\alpha$ pozitivna što je ostvarivo ako je kut upravljanja u području $-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2$. U području kutova upravljanja $-\pi/2 \leq \alpha \leq 0$ na tiristor je narinut negativan napon. Tiristor nije komponenta koja uklapa u III. kvadrantu u-i ravnine.Prema tome je ispravljački način rada moguć samo u području kutova upravljanja [1]:

$$0 \leq \alpha \leq \pi/2 \tag{4-19}$$

Kut okidanja određuje se prema relaciji (4-20) gdje je T_X period okidanja izražen u milisekundama.

$$\alpha = \frac{T_X \times 360°}{20ms} \tag{4-20}$$

Uzme li se u obzir induktivitet pojne mreže kao i valni oblici prikazani na slici 4.14. vrijedi da je:

$$\int_{\alpha}^{\alpha+k} \hat{E}\sin\omega t\, d\omega t = \omega L_k \int_{-I_d}^{I_d} di = 2\omega L_k I_d \tag{4-21}$$

Odakle proizlazi da je kut komutacije jednak:

$$k = \arccos\left(\cos\alpha - \frac{2\omega L_k I_d}{\hat{E}}\right) - \alpha \tag{4-22}$$

Induktivni pad napona jednak je:

$$D_k = 4fL_k I_d \tag{4-23}$$

Te je vanjska karakteristika usmjerivača pri napajanju pasivnog induktibnog trošila jednaka:

$$U_{d\alpha}(0) = U_{di0}(0)\cos\alpha - 4fL_k \tag{4-24}$$

S obzirom da je $U_{d\alpha}(0) = R_d I_d$ sada se može točnije odrediti struja trošila

$$I_d = \frac{U_{di0}(0)\cos\alpha}{R_d + 4fL_k} > 0 \tag{4-25}$$

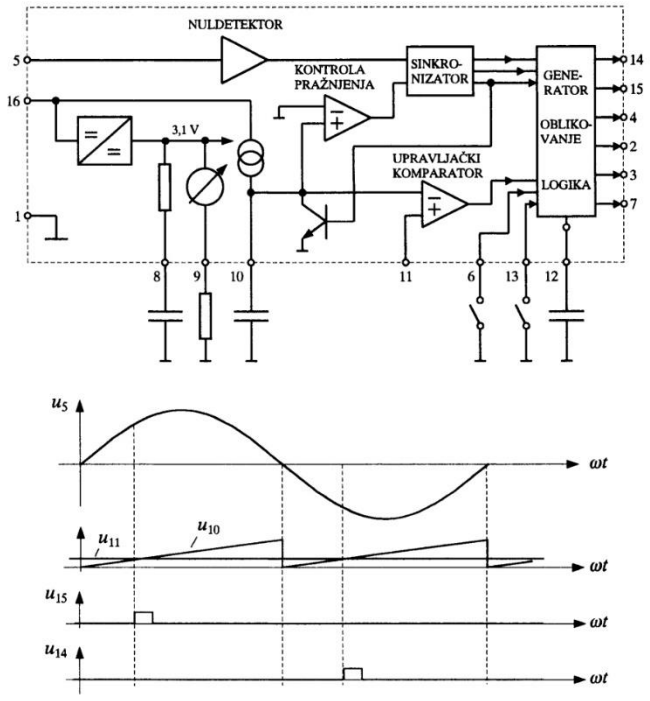
4.3. FIZIČKI MODELI PRETVARAČA

a) Induktivno opterećeni tropulsni upravljivi ispravljač

Maketa korištena u vježbi je trofazni poluvalni upravljivi ispravljač izraden kroz diplomski rad [3]. Ispravljač se sastoji od tri tiristora KT 707 700 Y 15 A i pripadajućeg upravljačkog dijela. Također, u vježbi se koriste i tri diode PBY 275, Iskra.

Tiristor provede nakon što se na njegov geit narine strujni impuls. Prethodno je napon na tiristoru morao biti pozitivan. Da bi se na tiristor mogao narinuti ispravan slijed impulsa, potrebno je imati niz sklopova koji povezani u jednu cjelinu čine tzv. pobudni uređaj (često zvan i upravljački uređaj). Osnovni sklopovi ovakvog uređaja su: generator impulsa, sklop za sinkronizaciju rada s mrežom, sklop za promjenu kuta upravljanja, sklop za oblikovanje impulsa i pobudni stupanj koji treba impuls pojačati i osigurati dovoljno snage za pobudu tiristora.

Pobudni uređaj sastoji se od tri potpuno simetrična dijela – za svaki tiristor po jedan dio – koji se temelje na integriranom krugu TCA 780 u kojem su integrirani svi prije navedeni sklopovi, izuzev pobudnog stupnja, slika 4.12.



Sl. 4.12. Blok shema integriranog kruga TCA 780 s pripadajućim dijagramom valnih oblika napona na karakterističnim priključcima.

Funkcije priključaka integriranog kruga TCA 780 su:

1 - minus pol napajanja
16 - plus pol napajanja
5 - dovod sinkronizacijskog izmjeničnog napona
8 - referentni napon 3,1 V
11 - dovod upravljačkog istosmjernog napona
10 - spoj vanjskog kondenzatora generatora pilastog napona
9 - spoj vanjskog otpora generatora pilastog napona (određuje struju punjenja vanjskog kondenzatora)
12 - spoj kondenzatora za proširenje impulsa
13 - postavljanje širine impulsa na 180°-α (spojem na masu)
6 - blokada impulsa (spojem na masu)
15 - izlaz impulsa u pozitivnom poluvalu sinkronizacijskog napona
14 - izlaz impulsa u negativnom poluvalu sinkronizacijskog napona

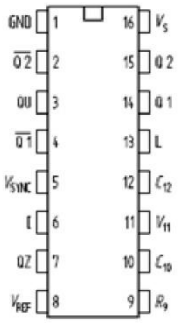
Na slici 4.15. dana je shema spoja pobudnog uređaja i način njegova spajanja s tiristorima. Potenciometrom P_1 mijenja se iznos istosmjernog upravljačkog napona, čime se mijenja trenutak pojave impulsa na priključku 15, odnosno kut upravljanja α. Impulsi dobiveni s izlaza integriranih krugova pojačavaju se u pobudnom stupnju, koji se također sastoji od tri potpuno identična dijela, osnova kojih je tranzistor BSX 45 u spoju zajedničkog emitera. Ovako pojačani impulsi u pobudnom stupnju dovode se s pomoću impulsnog transformatora na geit tiristora, čime je ujedno postignuta galvanska odvojenost pobudnog uređaja od energetskog dijela.

b) Induktivno opterećeni punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju

Maketa korištena u vježbi je jednofazni punovalni punoupravljivi ispravljač izrađen kroz završne radove [4,5]. Ispravljač se sastoji od dva dijela, upravljačkog i energetskog.

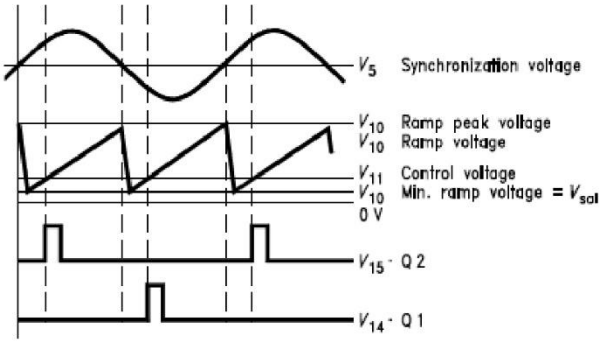
U upravljačkom dijelu ispravljača nalazi se integrirani sklop TCA785 koji na pinovima 14 i 15 dalje upravljačke signale za upravljanje tranzistorima koji kasne jedan za drugim za pola periode. Raspored i funkcija nožica integriranog sklopa TCA 785 je prikazan na slici 4.13., dok slika 4.14. prikazuje karakteristične valne oblike na pojedinim pinovima odnosno nožicama. Širina upravljačkog signala je regulirana kondenzatorom od 1nF zbog samog TCA785 kod kojeg je karakteristično da se širina impulsa povećava odnosno smanjuje i to u odnosu 0.5μs/nF.

Energetski dio ispravljača se sastoji od 4 tiristora TYN616 (16 A, 600-1000V). Kutom vođenja α kod tiristora se upravlja potenciometrom od 10kΩ u upravljačkom dijelu ispravljača.



Funkcije i definicije pin-ova		
Pin	**Simbol**	**Funkcija**
1	GND	Uzemljenje
2	$\overline{Q2}$	Izlaz 2 invertiran
3	QU	Izlaz U
4	$\overline{Q1}$	Izlaz 1 invertiran
5	V_{SYNC}	Sinkroni napon
6	I	Inhibicija
7	QZ	Izlaz Z
8	V_{REF}	Stabilizirani napon
9	R_9	Otpor rampe
10	C_{10}	Kapacitet rampe
11	V_{11}	Kontrolni napon
12	C_{12}	Širenje impulsa
13	L	Dugački impuls
14	Q1	Izlaz 1
15	Q2	Izlaz 2
16	V_s	Napajanje

Sl- 4.13. Raspored i funkcija nožica integriranog sklopa TCA 785



Slika 4.14. Karakteristični valni oblici na pojedinim priključcima

4.4. ZADACI ZA PRIPREMU

1. Nacrtajte valni oblik napona u_{VI}, te valne oblike struja primarnih namota ispravljačkog transformatora tropulsnog ispravljača sheme spoja prema slici 4.2. ako su sekundarni naponi sinusni, amplitude 20 V i frekvencije 50 Hz, trošilo otpora $R_d = 2\ \Omega$, a kut upravljanja $\alpha = 60°$ el. Pretpostavite da je ispravljački transformator savršen, ventili idealni, a $L_d/R_d >> T/3$.

2. Kolike su srednje vrijednosti napona i struje trošila u prethodnom zadatku?

3. Odredite srednju vrijednost napona na trošilu $U_{di\alpha}(0)$ ako je kut upravljanja $\alpha = \pi/3$, a efektivna vrijednost faznog napona 230 V. Zanemarite komutacijski

induktivitet L_k i koristite faktor upravljanja ν iz izraza (4-2). Idealan napon praznog hoda trofaznog neupravljivog ispravljača u mosnom spoju je $U_{di0}(0) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi}\hat{U}$, gdje je $\hat{U}$ vršna vrijednost faznog napona.

4. Nacrtajte ulaznu u_{l1}–i_{l1} karakteristiku trofaznog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju sheme spoja prema slici 4.10., ako je zadana amplituda faznih napona pojne mreže $\hat{E}$, glatka struja trošila I_d, prijenosni omjer transformatora $N_1 : N_2 = 1:1$, za tri kuta upravljanja:
   a) $\alpha = 0°$,
   b) $\alpha = 60°$,
   c) $\alpha = 90°$.
5. Dvopulsni ispravljač u punoupravljivom mosnom spoju napaja trošilo parametara $L_d = 600$ mH i $R_d = 8\ \Omega$. Ispravljač je priključen na izmjeničnu pojnu mrežu koja se može modelirati izmjeničnim naponskim izvorom u(t)=220sin 314t [V], i induktivitetom L = 5 mH. Odredite valni oblik napona u_l na mjestu priključka ispravljača za ove kuteve upravljanja [6]:
   a) $\alpha = 30°$ el.
   b) $\alpha = 150°$ el.

4.5. RAD U LABORATORIJU

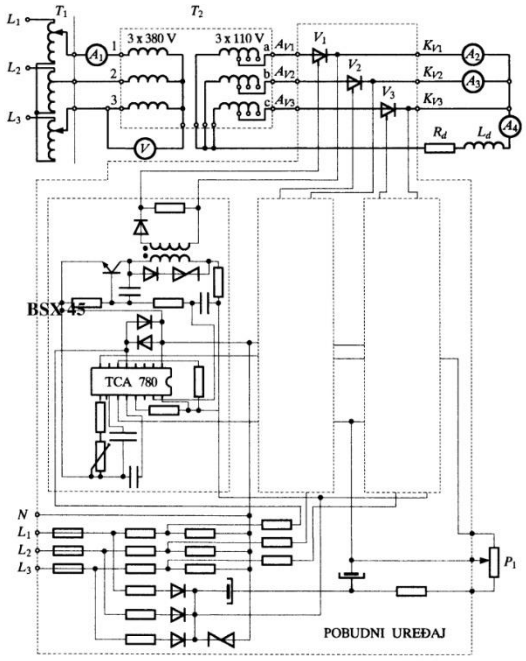
U vježbi se koristi sljedeća oprema:
- trofazni regulacijski transformator 3x380 V/ 3x0-380 V (T_1),
- trofazni transformator TTR-3, Končar (T_2),
- tri tiristora KT 707, Iskra,
- tri diode PBY 275, Iskra,
- pobudni uređaj izrađen na osnovi integriranih krugova TCA 780,
- dvije prigušnice 300 mH/2 Ω (djelatno-induktivno trošilo),
- osciloskop Tektronix TDS 224 s naponskom sondom Tektronix P2100 (10x) i strujnim kliještima Tektronix A622,
- izolacijski transformator za napajanje osciloskopa,
- univerzalni mjerni instrumenti, Metex i Unitest,
- spojni vodiči.

a) Snimanje valnih oblika i mjerenje karakterističnih veličina za tropulsni upravljivi ispravljač

Mjernu opremu spojite prema shemi spajanja danoj na slici 4.15., a zatim provedite mjerenja ovim redoslijedom:

1. Uključite pobudni uređaj i s pomoću potenciometra P_1 namjestite $\alpha = 60°$ el.
2. Povećavajte postupno napon izvora, s pomoću transformatora T_1 od vrijednosti nula, sve dok struja trošila ne dosegne vrijednost od 2 A.
3. Očitajte i zapišite vrijednosti koje pokazuju ampermetri i voltmetar.
4. Promatrajte i snimite na osciloskopu valne oblike napona namota 1 transformatora T_2, napona namota a transformatora T_2, napona ventila V_1, napona trošila, struje trošila, te struja ventila V_1 i V_2.

5. Smanjite napon izvora na nulu, isključite pobudni uređaj i odspojite mjerne instrumente s uređaja.

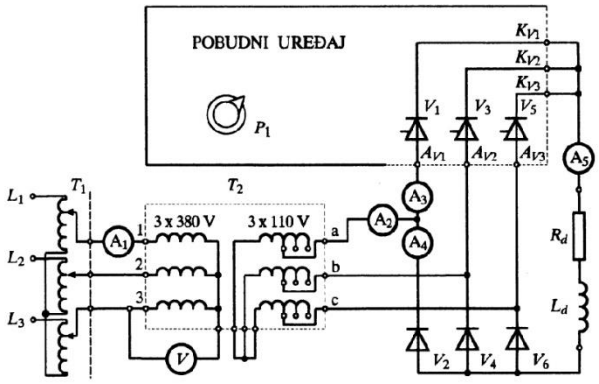


Sl. 4.15. Shema spajanja tropulsnog upravljivog ispravljača.

b) Snimanje valnih oblika i mjerenje karakterističnih veličina za poluupravljivi ispravljač u mosnom spoju

Mjernu opremu spojite prema shemi spajanja danoj na slici 4.16., a zatim provedite mjerenja ovim redoslijedom:

1. Uključite pobudni uređaj i s pomoću potenciometra P_1 namjestite $\alpha = 60°$ el.
2. Povećavajte postupno napon izvora, s pomoću transformatora T_1 od vrijednosti nula, sve dok struja trošila ne dosegne vrijednost od 2 A.
3. Očitajte i zapišite vrijednosti koje pokazuju ampermetri i voltmetar.
4. Promatrajte i snimite na osciloskopu valne oblike napona i struje namota 1 transformatora T_2, napona i struje namota a transformatora T_2, napona ventila V_1, te napona i struje trošila.
5. Smanjite napon izvora na nulu, isključite pobudni uređaj i odspojite mjerne instrumente s uređaja.

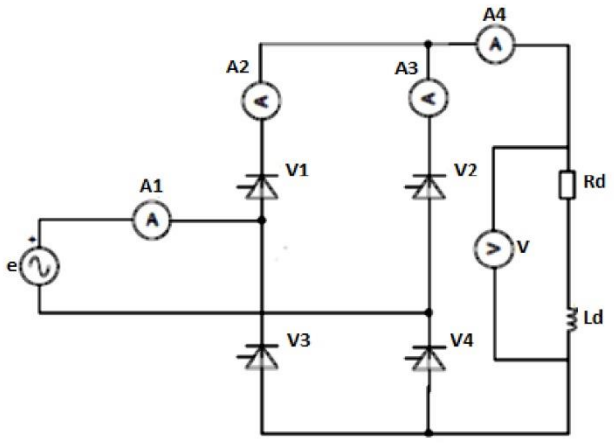


Sl. 4.16. Shema spajanja poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju.

c) Snimanje valnih oblika i mjerenje karakterističnih veličina za punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju

Mjernu opremu spojite prema shemi spajanja danoj na slici 4.17., a zatim provedite mjerenja ovim redoslijedom:

1. Pomoću regulacijskog transformatora povećavajte napon izvora dok struja trošila ne dosegne vrijednost od 1.8A.
2. Namjestite kut upravljanja na vrijednost od α=3.6°.
3. Očitajte i zapišite vrijednosti koje pokazuju mjerni instrumenti.
4. Promatrajte i snimite na osciloskopu valne oblike napona upravljivih ventila V_1 i V_2, napona i struje pojne mreže, te napona i struje trošila.
5. Ponovite koraka od 1 do 4 za vrijednosti struje trošila 0.5A i vrijednost kuta upravljanja α=72°.
6. Smanjite napon izvora na nulu, isključite pobudni uređaj i odspojite mjerne instrumente s uređaja.

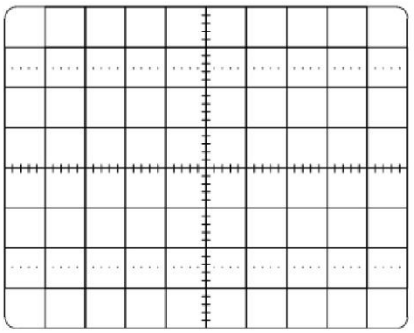


4.6. OBRADA REZULTATA

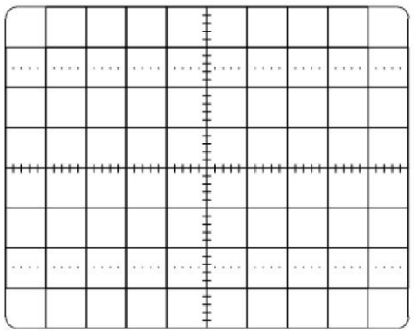
1. Snimljene valne oblike napona i struja zalijepite na za to predviđena mjesta u predlošku za laboratorijske vježbe.
2. Odredite koliki je fazni pomak između faznog napona i osnovnog harmonijskog člana struje pripadne faze na izmjeničnoj strani trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača, te ga usporedite s kutem kašnjenja okidanja α.
3. Objasnite dobivene valne oblike struje mrežnog namota i napona ventilskog namota ispravljačkog transformatora kod trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača.
4. Odredite trajanje komutacije kod trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača.
5. Odredite koliki je fazni pomak između faznog napona i osnovnog harmonijskog člana struje pripadne faze na izmjeničnoj strani trofaznog poluupravljivog ispravljača u mosnom spoju, te ga usporedite s kutem kašnjenja okidanja α i s faznim pomakom kod trofaznog tropulsnog upravljivog ispravljača.
6. Odredite iznos kuta upravljanja α kod punoupravljivog ispravljača u mosnom spoju za slučaj kad je struja trošila 1.8A i 0.5A, te usporedite dobivene kutove međusobno.

Rezultati mjerenja za tropulsni upravljivi ispravljač:

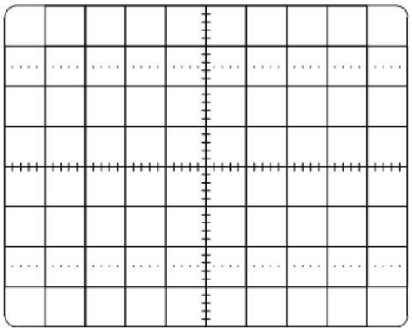
V [V]	A_1 [A]	A_2 [A]	A_3 [A]	A_4 [A]



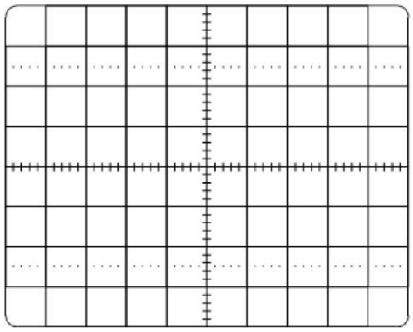
Napon i struja namota 1 transformatora T_2



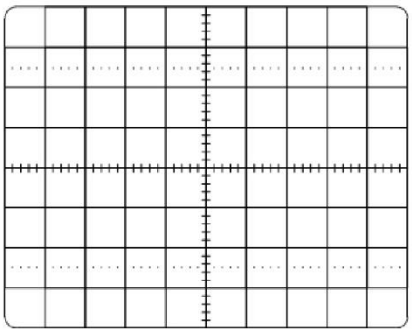
Napon namota a transformatora T_2



Napon ventila V_1



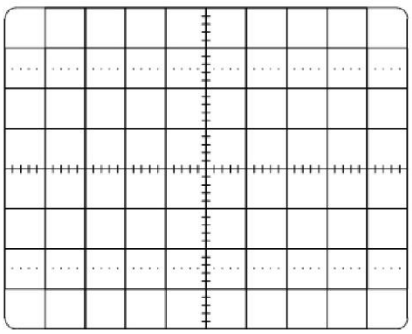
Struja ventila V_1 i struja ventila V_2



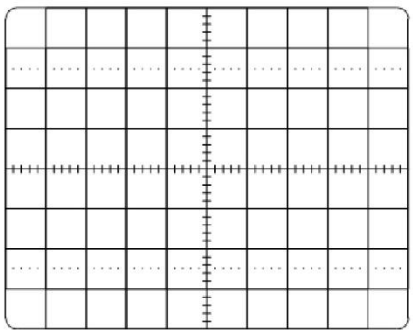
Napon i struja trošila

Rezultati mjerenja za poluupravljivi ispravljač u mosnom spoju:

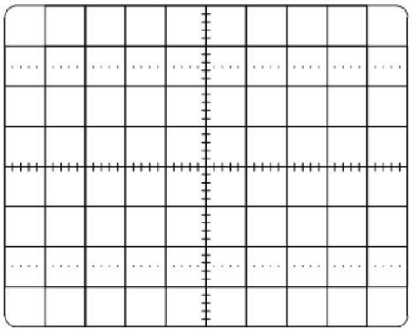
V [V]	A_1 [A]	A_2 [A]	A_3 [A]	A_4 [A]	A_5 [A]



Napon i struja namota 1 transformatora T_2



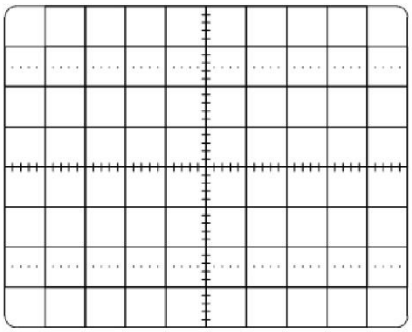
Napon ventila V_1



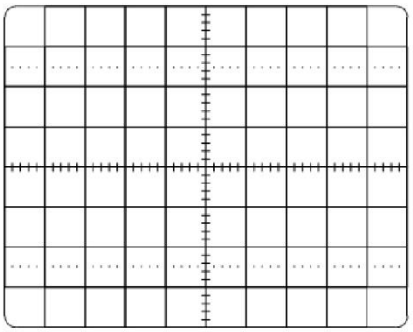
Napon i struja trošila

Rezultati mjerenja za punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju, I_d=1.8A:

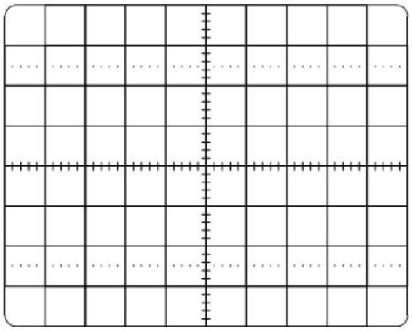
V [V]	A_1 [A]	A_2 [A]	A_3 [A]	A_4 [A]



Napon ventila V_1 i V_2 i struja trošila



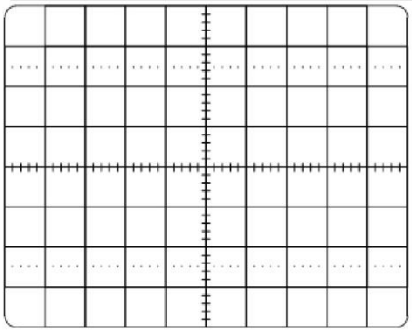
Napon i struja pojne mreže



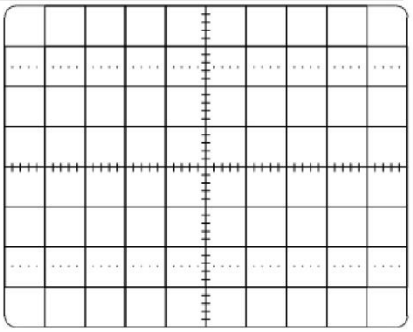
Napon i struja trošila

Rezultati mjerenja za punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju, I_d=0.5A:

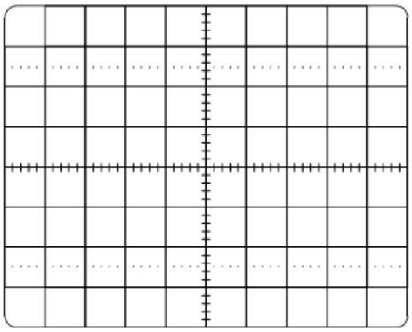
V [V]	A_1 [A]	A_2 [A]	A_3 [A]	A_4 [A]



Napon ventila V_1 i V_2 i struja trošila



Napon i struja pojne mreže



Napon i struja trošila

LITERATURA

[1] I. Flegar, „Elektronički energetski pretvarači", Kigen, Zagreb, 2010.

[2] D. Sliškovid, I. Flegar, "Energetska elektronika – Laboratorijske vježbe", Graphis, Zagreb, 1996.

[3] D. Deže, „Trofazni poluvalni upravljivi ispravljač", diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 1988.

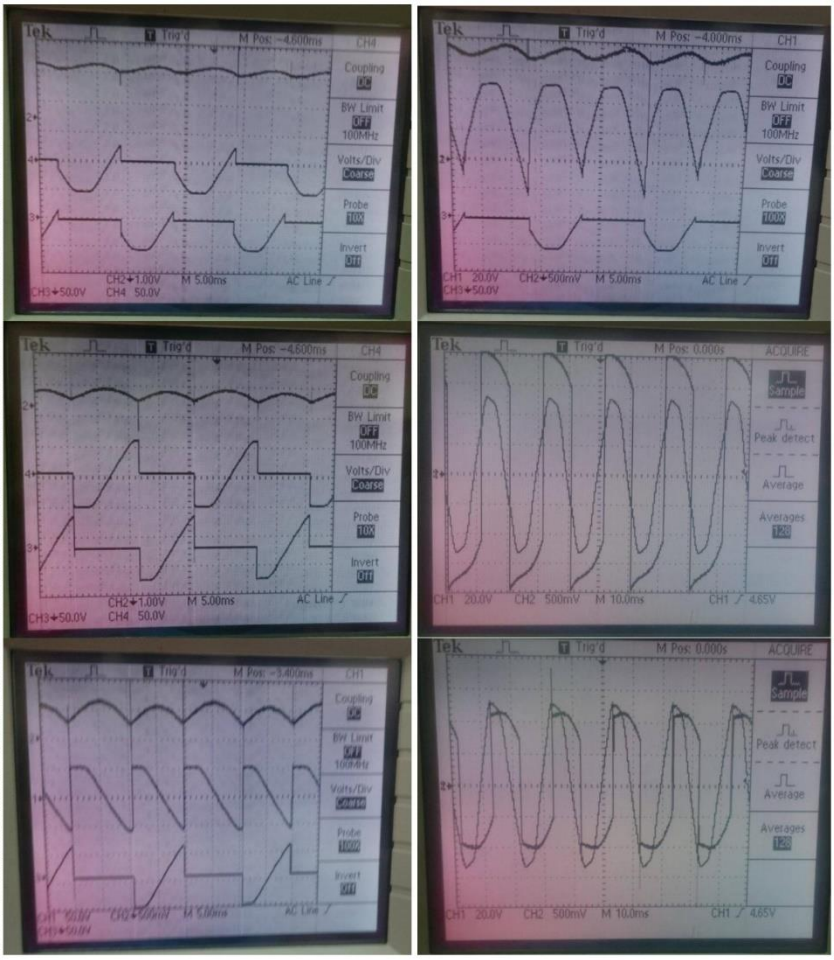
[4] F. Kutnjak, „Rekonstrukcija i mjerenja na maketi induktivno opterećenog ispravljača u jednofaznom mosnom spoju 10A, 600V", završni rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2016.

[5] M. Ugljar, „Izrada i analiza rada ispravljača u jednofaznom punoupravljivom mosnom spoju 10A, 600V", završni rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2016.

[6] I. Flegar, „Sklopovi energetke elektronike – Odabrani primjeri", Graphis, Zagreb, 1996.

Prilog 2: Snimljeni valni oblici

Punoupravljivi ispravljač u mosnom spoju



Prilog 3: Podatkovna tablica integriranog sklopa TCA 785

SIEMENS

Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

Features

- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range

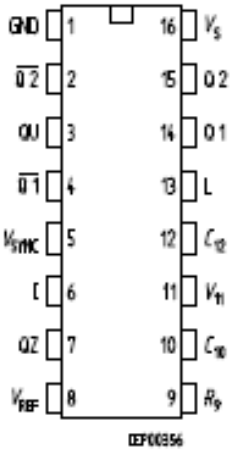


P-DIP-16-1

Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0 ° and 180 °. Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

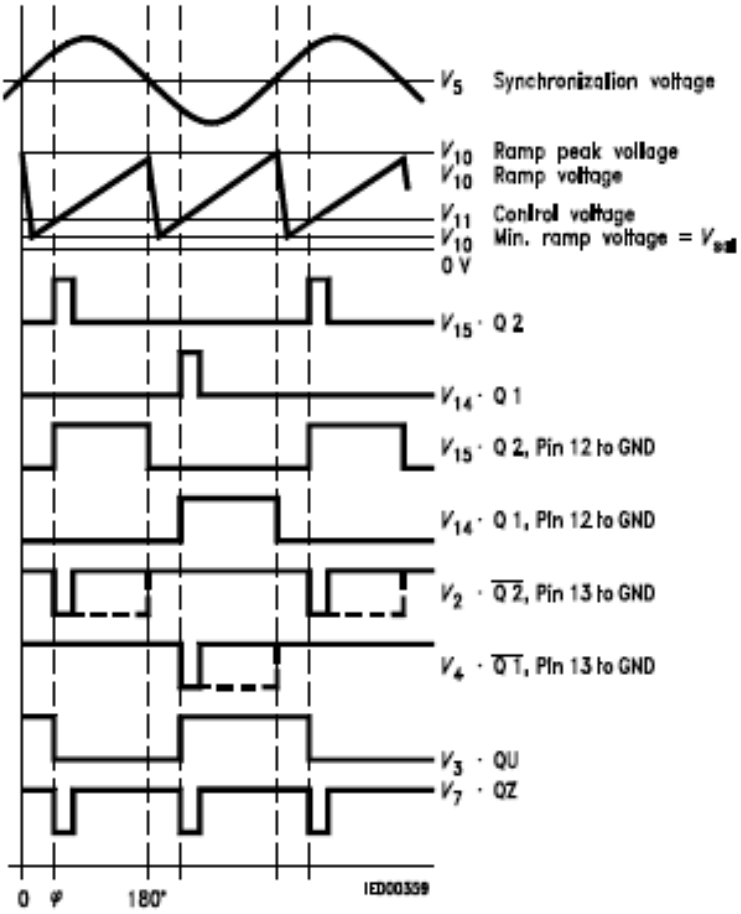
This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.



Pin Configuration
(top view)

Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2 3 4	$\overline{Q2}$ Q U $\overline{Q2}$	Output 2 inverted Output U Output 1 inverted
5	V_{SYNC}	Synchronous voltage
6 7	I Q Z	Inhibit Output Z
8	V_{REF}	Stabilized voltage
9 10	R_9 C_{10}	Ramp resistance Ramp capacitance
11	V_{11}	Control voltage
12	C_{12}	Pulse extension
13	L	Long pulse
14 15	Q 1 Q 2	Output 1 Output 2
16	V_S	Supply voltage



Pulse Diagram

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Limit Values		Unit
		min.	max.	
Supply voltage	V_S	– 0.5	18	V
Output current at pin 14, 15	I_Q	– 10	400	mA
Inhibit voltage Control voltage Voltage short-pulse circuit	V_6 V_{11} V_{13}	– 0.5 – 0.5 – 0.5	V_S V_S V_S	V V V
Synchronization input current	V_5	– 200	± 200	µA
Output voltage at pin 14, 15	V_Q		V_S	V
Output current at pin 2, 3, 4, 7	I_Q		10	mA
Output voltage at pin 2, 3, 4, 7	V_Q		V_S	V
Junction temperature Storage temperature	T_j T_{stg}	 – 55	150 125	°C °C
Thermal resistance system - air	$R_{th\ SA}$		80	K/W

Operating Range

Supply voltage	V_S	8	18	V
Operating frequency	f	10	500	Hz
Ambient temperature	T_A	– 25	85	°C

Characteristics

$8 \le V_S \le 18$ V; -25 °C $\le T_A \le 85$ °C; $f = 50$ Hz

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Supply current consumption S1 … S6 open $V_{11} = 0$ V $C_{10} = 47$ nF; $R_9 = 100$ kΩ	I_S	4.5	6.5	10	mA	1
Synchronization pin 5 Input current R_2 varied Offset voltage	 $I_{5\ rms}$ ΔV_5	 30	 30	 200 75	 µA mV	 1 4
Control input pin 11 Control voltage range Input resistance	 V_{11} R_{11}	 0.2	 15	 $V_{10\ peak}$	 V kΩ	 1 5

Characteristics (cont'd)
$8 \le V_S \le 18$ V; -25 °C $\le T_A \le 85$ °C; $f = 50$ Hz

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Ramp generator						
Charge current	I_{10}	10		1000	µA	
Max. ramp voltage	V_{10}			$V_2 - 2$	V	1
Saturation voltage at capacitor	V_{10}	100	225	350	mV	1.6
Ramp resistance	R_9	3		300	kΩ	1
Sawtooth return time	t_f		80		µs	1
Inhibit pin 6 switch-over of pin 7						
Outputs disabled	$V_{6\,L}$		3.3	2.5	V	1
Outputs enabled	$V_{6\,H}$	4	3.3		V	1
Signal transition time	t_r	1		5	µs	1
Input current $V_6 = 8$ V	$I_{6\,H}$		500	800	µA	1
Input current $V_6 = 1.7$ V	$-I_{6\,L}$	80	150	200	µA	1
Deviation of I_{10} R_9 = const. $V_S = 12$ V; $C_{10} = 47$ nF	I_{10}	-5		5	%	1
Deviation of I_{10} R_9 = const. $V_S = 8$ V to 18 V	I_{10}	-20		20	%	1
Deviation of the ramp voltage between 2 following half-waves, V_S = const.	$\Delta V_{10\,max}$		± 1		%	
Long pulse switch-over pin 13 switch-over of S8						
Short pulse at output	$V_{13\,H}$	3.5	2.5		V	1
Long pulse at output	$V_{13\,L}$		2.5	2	V	1
Input current $V_{13} = 8$ V	$I_{13\,H}$			10	µA	1
Input current $V_{13} = 1.7$ V	$-I_{13\,L}$	45	65	100	µA	1
Outputs pin 2, 3, 4, 7						
Reverse current $V_Q = V_S$	I_{CEO}			10	µA	2.6
Saturation voltage $I_Q = 2$ mA	V_{sat}	0.1	0.4	2	V	2.6

Characteristics (cont'd)
$8 \le V_S \le 18$ V; -25 °C $\le T_A \le 85$ °C; $f = 50$ Hz

Parameter	Symbol	Limit Values			Unit	Test Circuit
		min.	typ.	max.		
Outputs pin 14, 15						
H-output voltage $-I_Q = 250$ mA	$V_{14/15\,H}$	$V_S - 3$	$V_S - 2.5$	$V_S - 1.0$	V	3.6
L-output voltage $I_Q = 2$ mA	$V_{14/15\,L}$	0.3	0.8	2	V	2.6
Pulse width (short pulse) S9 open	t_p	20	30	40	µs	1
Pulse width (short pulse) with C_{12}	t_p	530	620	760	µs/ nF	1
Internal voltage control						
Reference voltage Parallel connection of 10 ICs possible	V_{REF}	2.8	3.1	3.4	V	1
TC of reference voltage	α_{REF}		2×10^{-4}	5×10^{-4}	1/K	1

Prilog 4: Podatkovna tablica tiristora TYN616

TN1625
TYN616, TYN816

16 A standard SCRs

Features

- $I_{T(RMS)}$ =16 A
- V_{DRM}/V_{RRM} = 600 to 1000 V
- I_{GT} = 25 mA

Description

The standard TN16 / TYNx16 16 A SCRs series is suitable for general purpose applications.

Using clip assembly technology, they provide a superior performance in surge current capabilities.

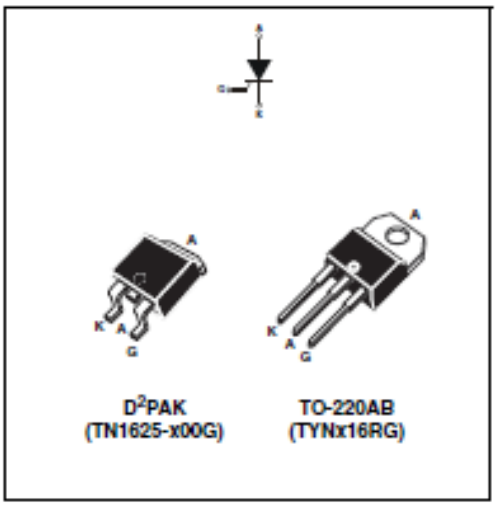


Table 1. Device summary

Parameter	TN1625-600G TYN616RG	TYN816RG	TN1625-1000G	Unit
V_{DRM}/V_{RRM}	600	800	1000	V
Sensitivity	25	25	25	mA

Prilog 5: Podatkovna tablica tranzistora BD677

BD6xxx

Complementary power Darlington transistors

Features

- Good h_{FE} linearity
- High f_T frequency
- Monolithic Darlington configuration with integrated antiparallel collector-emitter diode

Applications

- Linear and switching industrial equipment

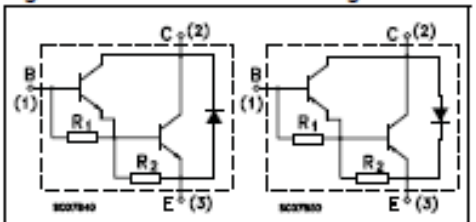
Description

The devices are manufactured in planar base island technology with monolithic Darlington configuration.



SOT-32

Figure 1. Internal schematic diagram



R1 typ.= 15 KΩ R2 typ.= 100 Ω

Table 1. Device summary

Order codes	Marking	Package	Packaging
BD677	BD677	SOT-32	Tube
BD677A	BD677A		
BD679	BD679		
BD679A	BD679A		
BD681	BD681		
BD682	BD682		

1 Absolute maximum ratings

Table 2. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter		Value			Unit
		NPN	BD677 BD677A	BD679 BD679A	BD681	
		PNP	BD678 BD678A	BD680 BD680A	BD682	
V_{CBO}	Collector-base voltage (I_E = 0)		60	80	100	V
V_{CEO}	Collector-emitter voltage (I_B = 0)					
V_{EBO}	Emitte-base voltage (I_C = 0)		5			V
I_C	Collector current		4			A
I_{CM}	Collector peak current		6			A
I_B	Base current		0.1			A
P_{TOT}	Total dissipation at T_{case} = 25°C		40			W
T_{stg}	Storage temperature		-65 to 150			°C
T_J	Max. operating junction temperature		150			°C

Note: For PNP types voltage and current values are negative