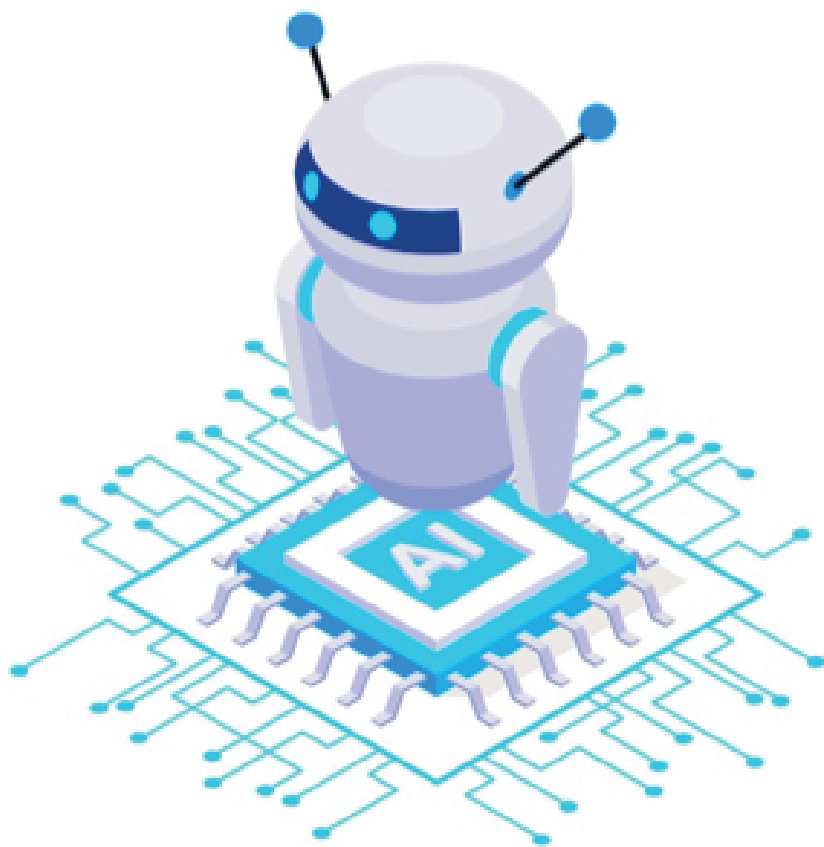




EduSplit Obrtna tehnička škola
Regionalni centar kompetentnosti Split

ENERGETSKA ELEKTRONIKA



Dr. sc. Ivan Grgić

Dr. sc. Ivan Grgić

ENERGETSKA ELEKTRONIKA



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.

Sadržaj publikacije isključiva je odgovornost Obrtne tehničke škole Split



EduSplit Obrtna tehnička škola
Regionalni centar kompetentnosti Split

Dr. sc. Ivan Grgić

ENERGETSKA ELEKTRONIKA

Split, 2023.

Autor: dr. sc. Ivan Grgić
Urednik: (za ALGEBRA d.o.o.)
Naslov: **Energetska elektronika**
Fotografija naslovnice: Freepik
Recenzent: Matea Nimac, mag. ing. el.
Lektorica: Anamarija Knezović Kaurić, prof.
Grafičko oblikovanje: ALGEBRA d.o.o.
Nakladnik: Obrtna tehnička škola Split
Odgovorna osoba: ravnatelj Milivoj Kalebić
Za nakladnika: ALGEBRA d.o.o.

Više informacija:

Obrtna tehnička škola Split
Plančićeva 21
21000 Split
e-pošta: ured@ss-obrtna-tehnicka-st.skole.hr
mrežna adresa: edusplit.eu

ISBN: 978-953-50488-8-6

Regionalni centar kompetentnosti Obrtne tehničke škole

Split, 2023.

Obrtnička tehnička škola, Plančićeva 21, 21000 Split, OIB: 43651407703, nositelj je isključivog prava iskorištavanja ovog autorskog djela, prostorno, vremenski i sadržajno neograničeno, a koje pravo obuhvaća imovinska prava autora i to osobito, ali ne isključivo, pravo reproduciranja (pravo umnožavanja), pravo distribuiranja (pravo stavljanja u promet), pravo priopćavanja autorskog djela javnosti te pravo prerade. Pojedina imovinska autorska prava treća osoba može steći isključivo na temelju pisane suglasnosti Obrtničke tehničke škole.

Sadržaj

1. ISPRAVLJAČI	9
1.1. Osnovne značajke poluvodičke diode	12
1.2. Osnovne značajke tiristora	14
1.3. Jednofazni poluvalni ispravljač	16
1.4. Jednofazni punovalni ispravljač u mosnom spoju	21
1.5. Trofazni ispravljači	26
2. IZMJENJIVAČI	29
2.1. Osnovne značajke tranzistora	32
2.2. Osnove pulsno-širinske modulacije	34
2.3. Jednofazni autonomni izmjenjivač u polumosnom spoju	35
2.4. Jednofazni autonomni izmjenjivač u mosnom spoju	37
2.5. Trofazni autonomni izmjenjivač	39
3. ISTOSMJERNI PRETVARAČI	41
3.1. Istosmjerni silazni pretvarač	44
3.2. Istosmjerni uzlazni pretvarač	47
3.3. Istosmjerni silazno-uzlazni pretvarač	49
4. IZMJENIČNI PRETVARAČI	53
4.1. Izmjenični pretvarači napona	57
4.2. Izmjenični pretvarači napona i frekvencije	59
Popis elemenata korištenih u sadržaju	60
Popis literature	62

ISHODI UČENJA PREDMETA PREMA VAŽEĆEM KURIKULU/PROGRAMU

Provjerite s autorima ishode učenja predmeta ili programa za koji se priručnik piše koji su zadani kurikulumom ili programom. Precizirajte koji se od ishoda učenja u pojedinom sadržaju poglavlja priručnika obrađuje. Jedan ishod učenja može biti naveden i više puta u više različitih poglavlja. Ovo je primjer za predmet *Audioprodukcija i videoprodukcija* prema eksperimentalnom kurikulu Tehničar za razvoj videoigara čiji udžbenik ima 5 poglavlja.

52. Komponente energetske elektronike, tip: obvezni

Ishodi učenja

Opisati osnovna svojstva pasivnih i aktivnih poluvodičkih komponenti energetske elektronike

Ispitati ispravnost pasivnih i aktivnih poluvodičkih komponenti energetske elektronike pomoću mjernog instrumenta

53. Ispravljači energetske elektronike, tip: obvezni

Ishodi učenja

Primijeniti energetski pretvarač s obzirom na valni oblik i ulogu u zadanom sustavu

Analizirati način rada, svojstva i primjenu neupravljivih i upravljivih ispravljača napona u simulacijskom programu i/ili u stvarnim uvjetima

Izvršiti mjerenja na neupravljivim i upravljivim ispravljačima napona u simulacijskom programu i/ili u stvarnim uvjetima te interpretirati rezultate

Usporediti izvedbe neupravljivih i upravljivih trofaznih ispravljača napona

1

POGLAVLJE

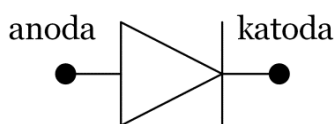
ISPRAVLJAČI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- analizirati jednostavne strujne krugove s diodama
- razumjeti načelo rada tiristora
- analizirati jednofazne poluvalne i punovalne ispravljače
- izračunati srednju vrijednost ispravljenog napona ispravljača
- razlikovati jednofazne i trofazne ispravljače
- razlikovati upravljive i neupravljive ispravljače.

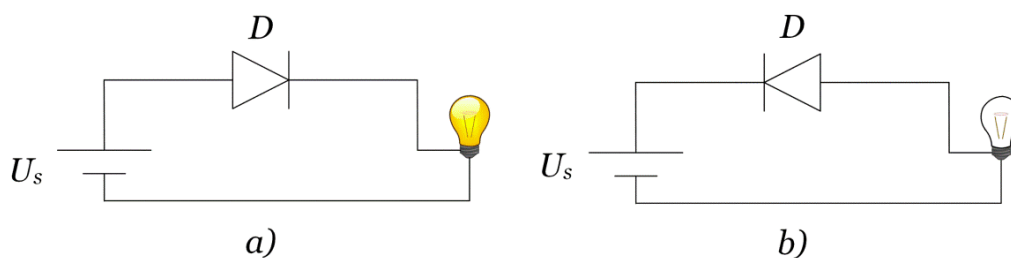
1.1. Osnovne značajke poluvodičke diode

Poluvodička dioda neupravljiva je poluvodička sklopka koja osigurava tok električne struje samo u jednom smjeru. Na slici 1 prikazan je simbol diode s označenim priključnim stezaljkama anodom i katodom. Dioda vodi struju kada je potencijal na anodi veći od potencijala na katodi i to se stanje naziva vođenje, dok u suprotnom - kada je potencijal na katodi veći od potencijala na anodi - dioda ne vodi struju i to se stanje naziva zapiranje. Stanje vođenja i zapiranja dva su stanja u kojima se poluvodička dioda može naći. U kojem će se stanju naći, ovisi isključivo o prilikama u krugu te se zbog toga dioda naziva neupravljivom poluvodičkom sklopkom.



Slika 1. Simbol diode s označenim priključnim stezaljkama

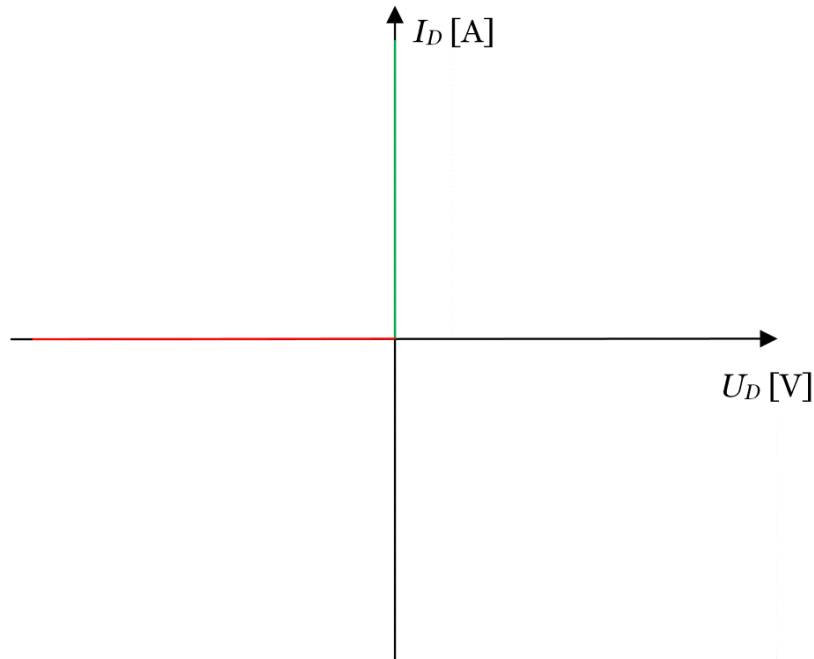
Načelo rada poluvodičke diode može se lako shvatiti na primjeru jednog jednostavnog strujnog kruga prikazanog na slici 2. Strujni krug sastoji se od istosmjernog izvora, diode i žarulje. Na slici 2a pozitivni pol istosmjernog izvora spojen je na anodu diode dok je žarulja spojena na katodu diode. Ovime je osigurano da je potencijal na anodi veći od potencijala na katodi te dioda vodi struju i žarulja svijetli. S druge strane, na slici 2b dioda je okrenuta drugačije, odnosno pozitivni pol izvora spojen je na katodu, a žarulja na anodu. U ovom slučaju potencijal na katodi veći je od potencijala na anodi te dioda zapire i ne vodi struju, a žarulja ne svijetli.



Slika 2. Strujni krug u kojem dioda vodi struju (a) i strujni krug u kojem dioda zapire (b)

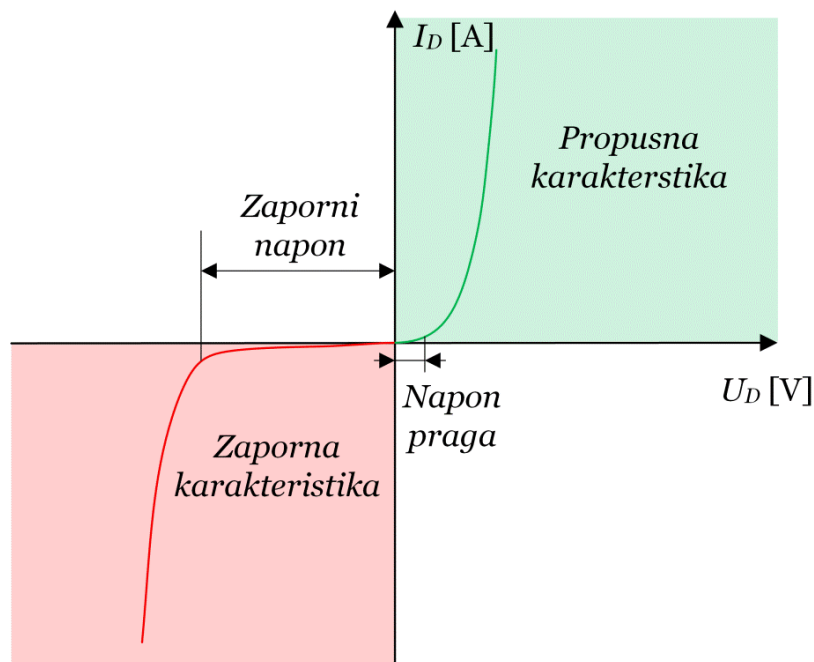
Odnos struje i napona poluvodičke diode može prikazati na strujnonaponskoj karakteristici. Slika 3 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku idealne poluvodičke diode (Kassakian, Schlecht, Verghese, 1991, str. 3). Dio karakteristike obojan zeleno, koji se nalazi na osi ordinata, predstavlja struju idealne diode u stanju vođenja. Na temelju karakteristike

može se zaključiti da, dok idealna dioda vodi, nema pada napona na njoj neovisno o iznosu struje diode. S druge strane, dio karakteristike obojan crveno predstavlja napon na idealnoj diodi u stanju zapiranja te se može zaključiti da struja u stanju zapiranja ne teče bez obzira na iznos zapornog napona.



Slika 3. Strujno-naponska karakteristika idealne diode

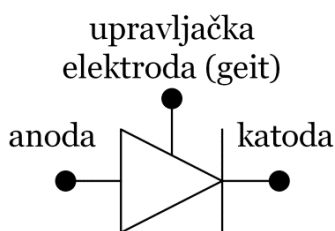
S obzirom na to da u stvarnosti ne postoje idealne diode, dobro je razmotriti i strujnonaponsku karakteristiku realne diode koja je prikazana na slici 4. Kada se realna dioda nalazi u stanju vođenja, ponaša se prema propusnoj karakteristici koja je na slici 4 obojana zeleno. Može se primijetiti da do napona praga struja diode blago raste s porastom napona na diodi te da, nakon što iznos napona prijeđe napon praga, struja diode raste jako s porastom napona na diodi. Napon praga je napon pri kojem realna dioda u potpunosti provede električnu struju, a tipičan iznos ovog napona je 0,7 V. S druge strane, kada realna dioda zapire, ponaša se prema crvenoj karakteristici. Dioda preuzima zaporni napon, pri čemu reverzna struja diode (negativna struja) blago raste s porastom zapornog napona do određenog iznosa tog napona tzv. probojnog napona. Nakon što zaporni napon diode postane po iznosu veći od probojnog napona diode, reverzna struja diode naglo raste i dioda provede struju u suprotnom smjeru. Važno je napomenuti kako je u radu potrebno osigurati da zaporni napon diode nikada ne bude po iznosu veći od probojnog napona jer, u tom slučaju, dolazi do uništavanja unutarnje strukture diode. Prethodno je spomenuto da je dioda neupravljiva poluvodička sklopka te se ona koristi za izradu neupravljivih ispravljača, dok se za izradu upravljivih ispravljača koristi tiristor čije su karakteristike dane u nastavku.



Slika 4. Strujno-naponska karakteristika realne diode

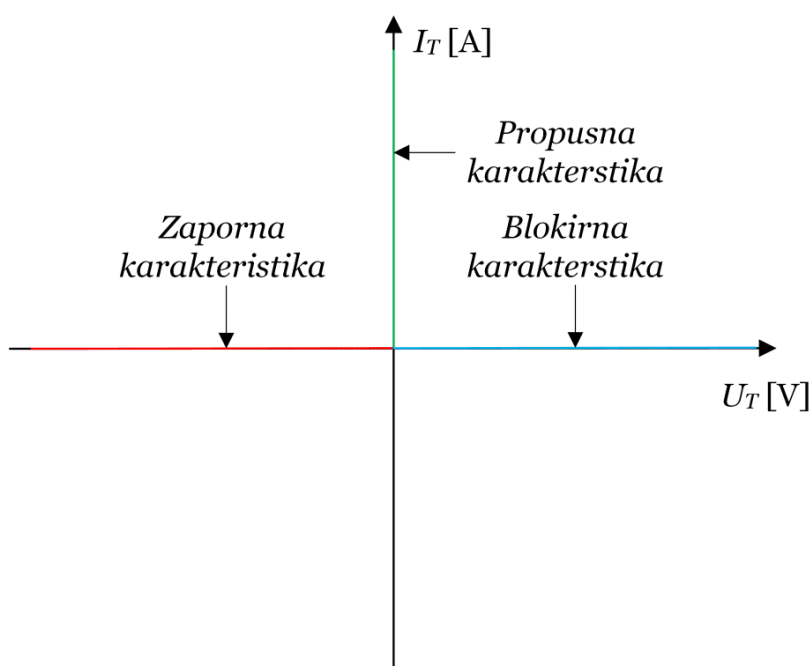
1.2. Osnovne značajke tiristora

Tiristor čiji je simbol prikazan na slici 5 poluvodička je komponenta koja ima tri priključne stezaljke koje se u ovom slučaju zovu anoda, katoda i upravljačka elektroda (geit). Osnovne značajke tiristora slične su značajkama diode, tj. tiristor može voditi struju samo od anode prema katodi, dok u suprotnom smjeru tiristor zapire. Međutim, da bi tiristor proveo potencijal na anodi, mora biti veći od potencijala na katodi te mora dobiti pozitivan strujni impuls na upravljačku elektrodu, dok dioda provede čim je potencijal na anodi veći od potencijala na katodi. Tiristor se može nalaziti u tri stabilna stanja, a to su blokiranje, vođenje i zapiranje. Tiristor se nalazi u stanju blokiranja kada je potencijal na anodi veći od potencijala na katodi, a tiristor ne dobiva pozitivan strujni impuls na upravljačku elektrodu. Dovođenjem pozitivnog strujnog impulsa, tiristor prelazi iz stanja blokiranja u stanje vođenja i ostaje u tom stanju sve dok je struja, koju tiristor vodi, veća od tzv. struje držanja. Tiristor prestaje voditi (isklapa se) kada mu struja padne ispod struje držanja. Tiristor se nalazi u stanju zapiranja kada je potencijal na katodi veći od potencijala na anodi.



Slika 5. Simbol tiristora s označenim priključnim stezaljkama

Slika 6 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku idealnog tiristora na kojoj se mogu vidjeti sva stanja tiristora. Kada je napon između anode i katode tiristora pozitivan, a nema strujnog impulsa, tiristor se ponaša u skladu s plavom karakteristikom i blokira. Dalje, nakon što tiristor dobije pozitivan strujni impuls na upravljачku elektrodu, on provede i ponaša se prema propusnoj karakteristici obojanoj zeleno. Konačno, kada napon između anode i katode postane negativan, tiristor zapire prema zapornoj karakteristici obojanoj crveno.

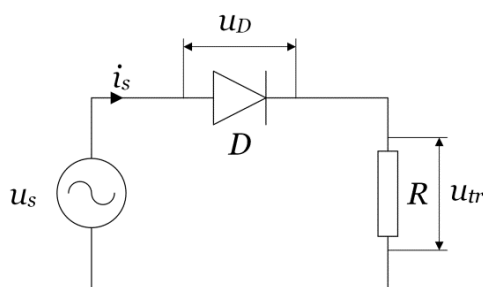


Slika 6. Strujnonaponska karakteristika idealnog tiristora

Na temelju prethodno navedenoga, može se zaključiti da je tiristor poluupravljiva poluvođička komponenta koja se uklapa snažnim strujnim impulsom na upravljачku elektrodu, a isklapa se kada joj struja padne ispod struje držanja. Važno je naglasiti da postoji i posebna vrsta tiristora koji se mogu isklapati snažnim negativnim strujnim impulsom, ali oni nisu razmatrani u ovom priručniku.

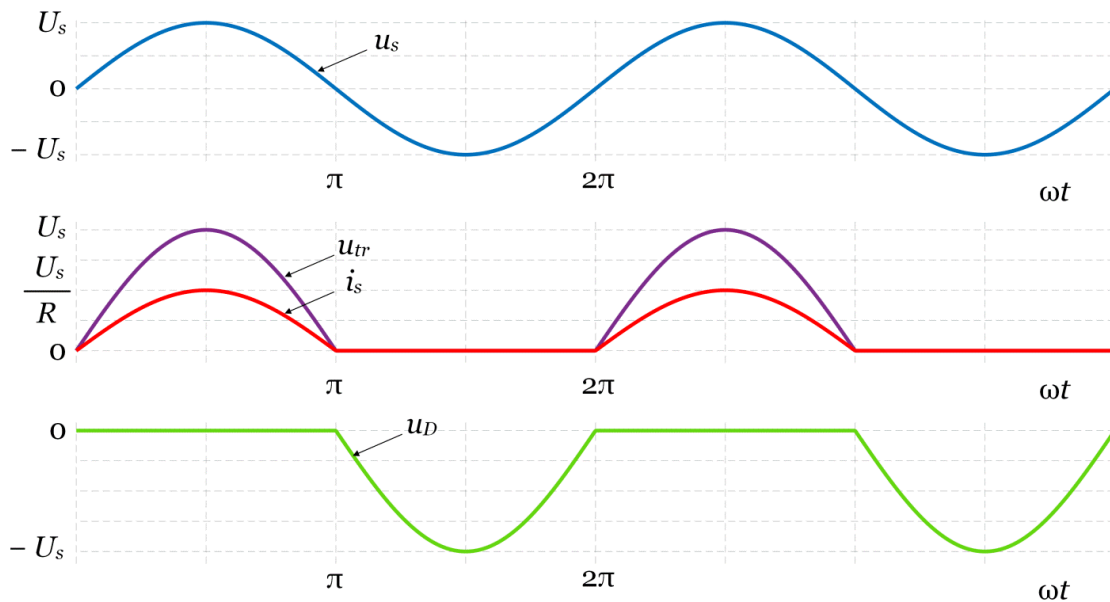
1.3. Jednofazni poluvalni ispravljač

Jednofazni neupravljivi poluvalni ispravljač, prikazan na slici 7, najjednostavniji je tip ispravljača koji ispravlja izmjenični napon korištenjem samo jedne poluvodičke diode (Kassakaian i sur., 1991, str. 29). Taj se ispravljač može rabiti za napajanje različitih tipova istosmjernih trošila, a u nastavku su analizirani slučajevi kada ispravljač napaja radno trošilo te radno-induktivno trošilo.



Slika 7. Poluvalni neupravljivi ispravljač opterećen radnim trošilom

Slika 8 prikazuje valne oblike napona izvora (u_s), napona na trošilu (u_{tr}), struje izvora (i_s) i napona na diodi (u_D) za poluvalni ispravljač opterećen radnim otporom prikazan na slici 7. Napon izvora u_s ima sinusni valni oblik i vršnu vrijednost U_s . Napon na trošilu u_{tr} ima isti valni oblik kao i napon izvora tijekom pozitivnog poluperioda napona u_s (od 0 do π), dok napon u_{tr} ima iznos nula tijekom negativnog poluperioda napona u_s (od π do 2π). Ovakav valni oblik napona na trošilu posljedica je korištenja poluvodičkom diodom D . Tijekom pozitivnog poluperioda napona u_s potencijal na anodi veći je od potencijala na katodi, što znači da je dioda propusno polarizirana i vodi struju. Uzme li se u obzir da je dioda idealna te da na njoj nema pada napona, tijekom vođenja diode napon u_{tr} jednak je naponu u_s što se vidi i na slici 8. Budući da ispravljač napaja radno trošilo, struja i_s dobije se prema Ohmovom zakonu kao omjer napona u_s i iznosa otpora R . S druge strane, tijekom negativnog poluperioda napona u_s dioda D ne vodi struju jer je potencijal na katodi veći od potencijala na anodi. To znači da je strujni krug prekinut, na trošilu nema napona i struja kroz trošilo ne teče. Što se tiče napona na diodi u_D , on iznosi nula dok dioda vodi, a kad dioda ne vodi ona na sebe preuzima zaporni napon jednak naponu u_s tj. negativni poluperiod napona u_s .



Slika 8. Valni oblici napona i struje poluvalnog neupravljivog ispravljača opterećenog radnim trošilom

Iz gornje analize može se zaključiti da se istosmjerni napon kod ovog ispravljača dobije korištenjem samo jednog poluperioda izmjeničnog napona u_s te se, zbog toga, ovaj ispravljač naziva poluvalni ispravljač. To znači da jedan poluperiod ulaznog napona ostane neiskorišten, što je nedostatak ovog ispravljača. Karakteristično svojstvo ispravljača je njegova pulsnost koja se definira kao broj pulzacija istosmjernog napona unutar jednog perioda izmjeničnog napona. Ovaj pretvarač je jednopulsni s obzirom na to da je jedna pulzacija istosmjernog napona u jednom periodu izmjeničnog.

Trenutna vrijednost napona izmjeničnog izvora (u_s), prikazanog na slici 8, može se opisati sljedećom jednačinom:

$$u_s = U_s \sin 2\pi f$$

Jednadžba 1. Napon izmjeničnog izvora

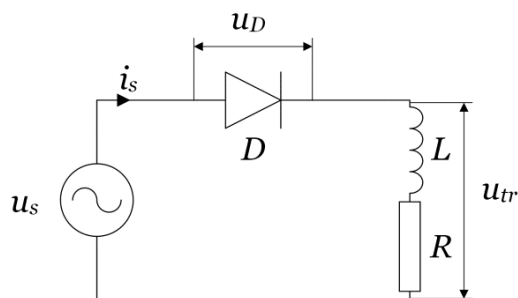
Prema jednačini 1 trenutna vrijednost napona u_s jednaka je produktu vršne vrijednosti napona (U_s) i sinusne funkcije koja ovisi o frekvenciji napona (f), koja obično iznosi 50 Hz.

Srednja vrijednost istosmjernog napona na trošilu računa se korištenjem sljedeće jednadžbe:

$$U_{tr} = \frac{U_s}{\pi}$$

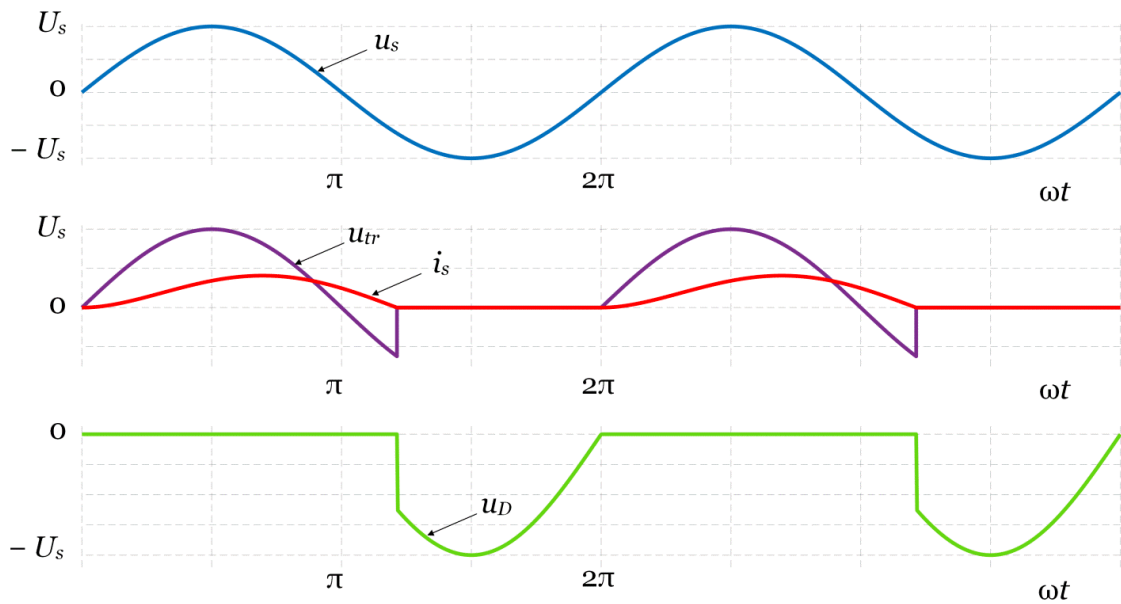
Jednadžba 2. Srednja vrijednost ispravljenog napona poluvalnog ispravljača

Slika 9 prikazuje punovalni ispravljač opterećen radno-induktivnim trošilom (Mohan, Undeland, Robbins, 2003., str. 81). Prije analize valnih oblika dobro je ponoviti bitne stvari vezane za ovaj karakter trošila. Prvo, u slučaju radno-induktivnog trošila, struja zaostaje za naponom za kut ϕ koji se kreće između 0° i 90° . Druga bitna stvar je da se struja trošila zbog induktivnog karaktera ne može trenutno promijeniti.



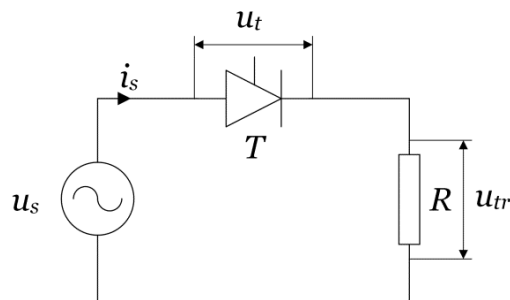
Slika 9. Poluvalni neupravljivi ispravljač opterećen radno-induktivnim trošilom

Valni oblici napona izvora u_s , napona trošila u_{tr} , struje trošila i_s te napona na diodi u_D za ispravljač opterećen radno-induktivnim trošilom prikazani su na slici 10. Valni oblik napona u_s isti je kao i na slici 8, dok se ostali valni oblici razlikuju. Primjetno je da, tijekom pozitivnog poluperioda napona u_s (od 0 do π), napon u_{tr} ima istu vrijednost kao i napon u_s što znači da dioda vodi. U tom intervalu struja i_s također raste, međutim, zbog induktivnog karaktera ta struja kasni za naponom u_{tr} i kasnije poprima vršnu vrijednost. To kašnjenje uzrokuje da na kraju pozitivnog poluperioda napona u_{tr} u trenutku π struja ima vrijednost veću od nule. S obzirom na to da se kod trošila induktivnog karaktera struja ne može trenutno promijeniti, ona nastavlja teći i nakon što napon u_{tr} postane negativan sve dok ne padne na nulu. Zbog toga dioda D nastavlja voditi struju, a napon na trošilu postane negativan. U trenutku kada struja prestane teći kroz trošilo, dioda prestaje voditi i napon na trošilu padne na nulu. Napon na diodi u_D je nula sve dok dioda vodi, odnosno do trenutka dok struja i_s ne padne na nulu, a nakon toga dioda preuzima zaporni napon izvora u_s .



Slika 10. Valni oblici napona i struje poluvalnog neupravljivog ispravljača opterećenog radno-induktivnim trošilom

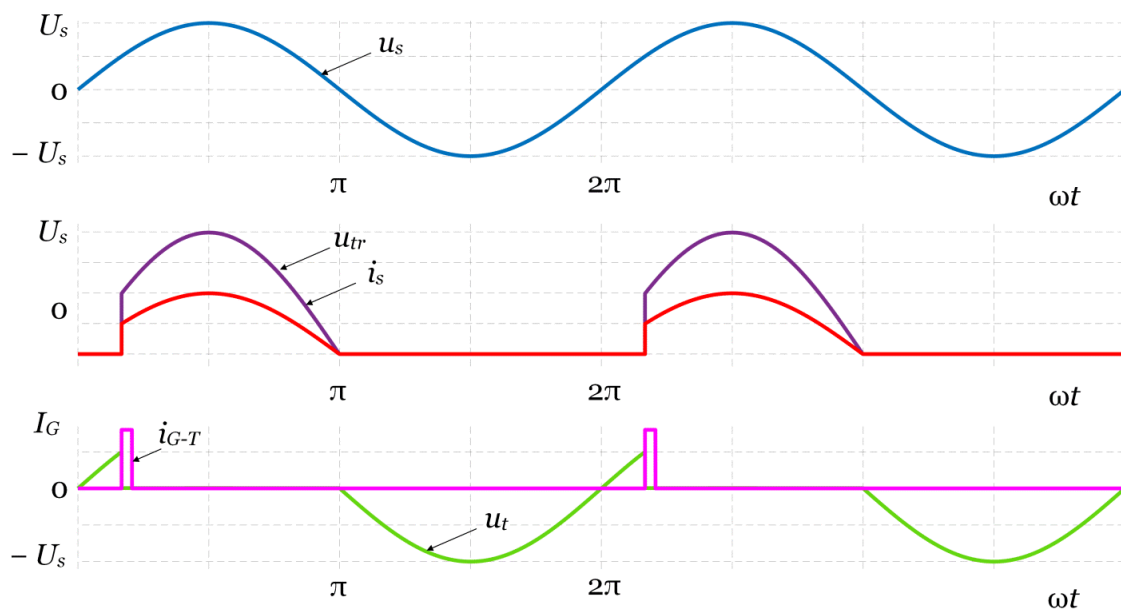
Upravljivi poluvalni ispravljač dobiva se tako što se dioda zamijeni tiristorom. Slika 11 prikazuje poluvalni upravljivi ispravljač opterećen radnim trošilom. Prethodno je navedeno da je tiristor poluupravljiva poluvodička sklopka koja se uklapa snažnim strujnim impulsom kada se nalazi u stanju blokiranja.



Slika 11. Poluvalni upravljivi ispravljač opterećen radnim trošilom

Načelo rada upravljivog poluvalnog ispravljača može se shvatiti na temelju slike 12. Napon izvora u_s ima sinusni valni oblik, dok valni oblik napona na trošilu ovisi o tzv. kutu vođenja tiristora, tj. trenutku kada će se tiristor uklopiti. Kut vođenja, ustvari, predstavlja vrijeme koje protekne od trenutka kada tiristor uđe u stanje blokiranja (pozitivan napon na tiristoru) sve dok tiristor ne provede. Promotri li se napon na tiristoru u_t , može se primijetiti da je on pozitivan i jednak naponu izvora u_s na početku periode. To znači da se tiristor nalazi u stanju blokiranja i ima uvjete za vođenje, ali ne vodi struju jer su napon u_{tr} i struja i_s tro-

šila jednaki nuli. U trenutku kada je kut iznosi $\alpha = 30^\circ (\pi/6)$, tiristor dobiva impuls na gate i trenutno provede struju. Kut α naziva se kut vođenja te se, promjenom ovog kuta, mijenja srednja vrijednost istosmjernog napona na trošilu zbog čega se ovaj ispravljač i naziva upravljivi. Tijekom vođenja tiristora napon na trošilu u_{tr} jednak je naponu izvora u_s , a struja i_s prati napon te je manja s obzirom na iznos otpora radnog trošila R . U trenutku, kada napon na trošilu postane manji od nule, tiristor prestaje voditi (π) i prelazi u stanje zapiranja (napon u_t negativan) koje traje od π do 2π nakon čega tiristor ponovno prelazi u stanje blokiranja i prethodno opisani slijed ponovno se dogodi.



Slika 12. Valni oblici napona i struje poluvalnog upravljivog ispravljača opterećenog radno-induktivnim trošilom

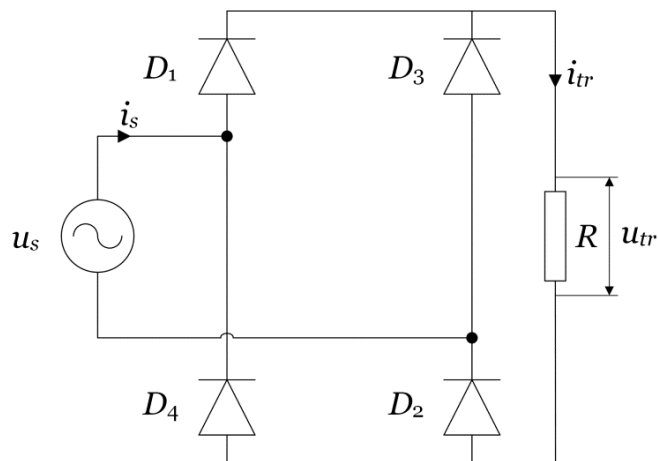
Srednja vrijednost ispravljenog napona poluvalnog upravljivog ispravljača računa se prema jednadžbi:

$$U_{tr} = \frac{U_s}{2\pi} (1 + \cos\alpha)$$

Jednadžba 3. Srednja vrijednost ispravljenog napona poluvalnog upravljivog ispravljača

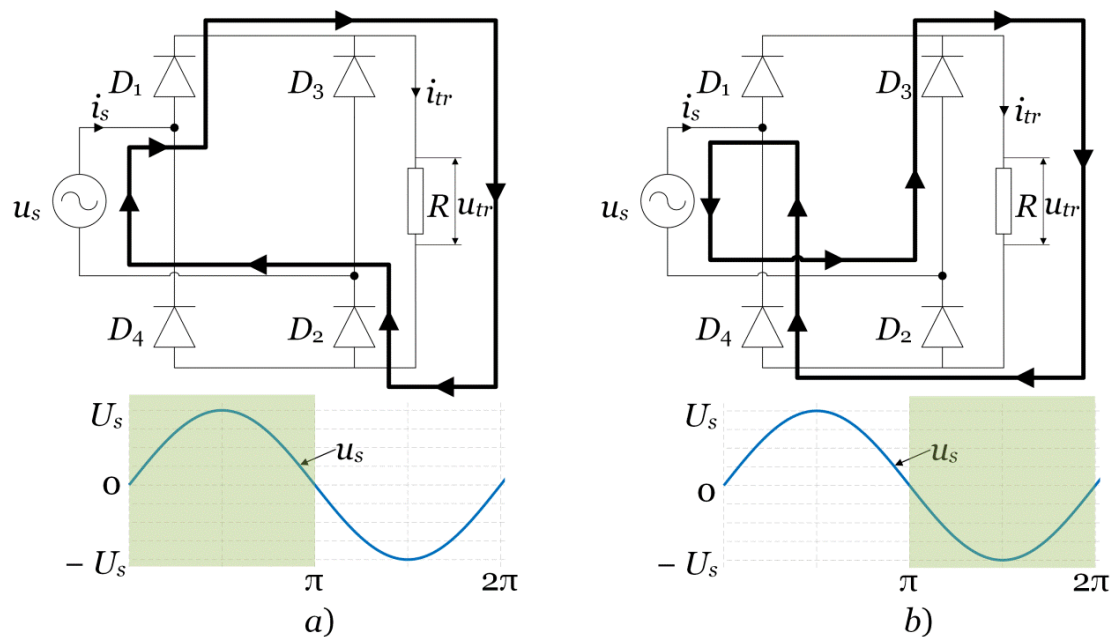
1.4. Jednofazni punovalni ispravljač u mosnom spoju

Punovalni ispravljač osigurava da se oba poluperioda izmjeničnog napona iskoriste kako bi se dobio istosmjerni napon. Postoje različite vrste punovalnih ispravljača, a jedan od najpoznatijih i najčešće korištenih je punovalni ispravljač u mosnom spoju prikazan na slici 13 (Mohan i sur., 2003., str. 84). Ovaj ispravljač sastoji se od četiri diode koje omogućavaju punovalno ispravljanje izmjeničnog napona. Često se naziva i Graetzov spoj u čast njemačkog fizičara Lea Graetza koji ga je izumio.



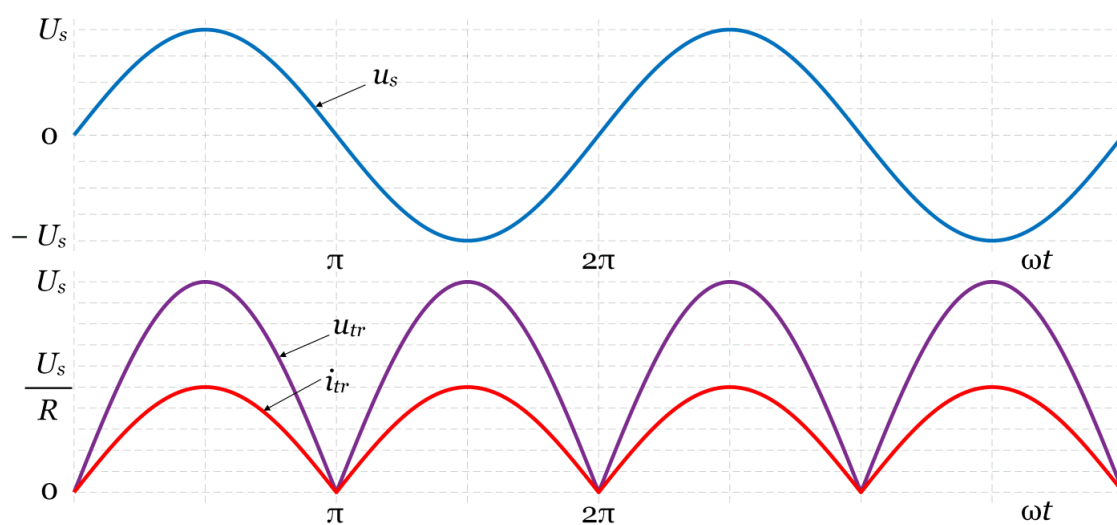
Slika 13. Punovalni neupravljivi ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom

Kod ovog ispravljača, ovisno o polaritetu izmjeničnog napona, u_s vode različiti parovi dioda. Slika 14 prikazuje tok struje punovalnog ispravljača u mosnom spoju u ovisnosti o polaritetu napona u_s . Tijekom pozitivnog poluperioda ulaznog napona vode diode D_1 i D_2 te se struja zatvara u petlji prikazanoj na slici 14a. Struja teče iz izmjeničnog izvora kroz diodu D_1 , radno trošilo, diodu D_2 i vraća se ponovno u izvor. S druge strane, tijekom negativnog poluperioda napona u_s struja se zatvara u petlji prikazanoj na slici 14b. Struja teče iz izmjeničnog izvora kroz diodu D_3 , radno trošilo, diodu D_4 i vraća se u izvor. Važno je uočiti da je smjer struje kroz radno trošilo isti u oba slučaja prikazana na slici 14.



Slika 14. Tok struje punovalnog neupravljivog ispravljača u mosnom spoju tijekom pozitivnog (a) i negativnog (b) poluperioda ulaznog signala

Slika 15 prikazuje valne oblike napona izmjeničnog izvora u_s , napona trošila u_{tr} i struje trošila i_{tr} punovalnog ispravljača sa slike 14. Tijekom pozitivnog poluperioda napona u_s vode diode D_1 i D_2 te je napon na trošilu u_{tr} jednak naponu u_s . S druge strane, tijekom negativnog poluperioda vode diode D_3 i D_4 te je napon u_{tr} ima isti iznos, ali suprotan predznak u odnosu na napon u_s . Tako se dobije istosmjerni napon na trošilu koji tjera istosmjernu struju kroz trošilo i_{tr} .



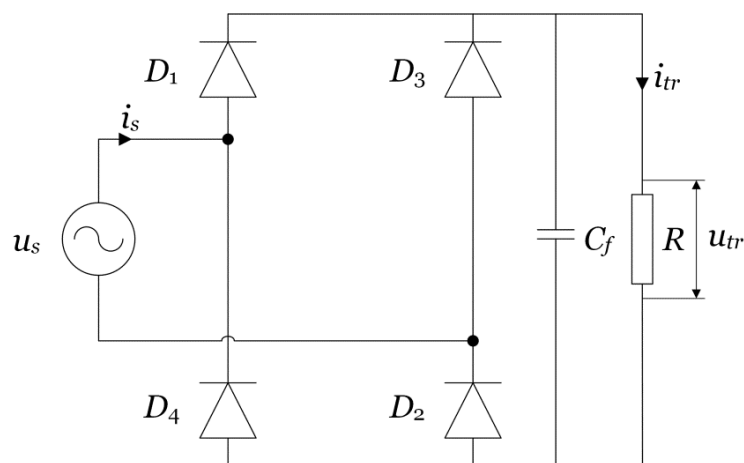
Slika 15. Valni oblici napona i struje punovalnog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom

Srednja vrijednost napona na trošilu punovalnog ispravljača u mosnom spoju računa se prema jednadžbi:

$$U_{tr} = \frac{2U_s}{\pi}$$

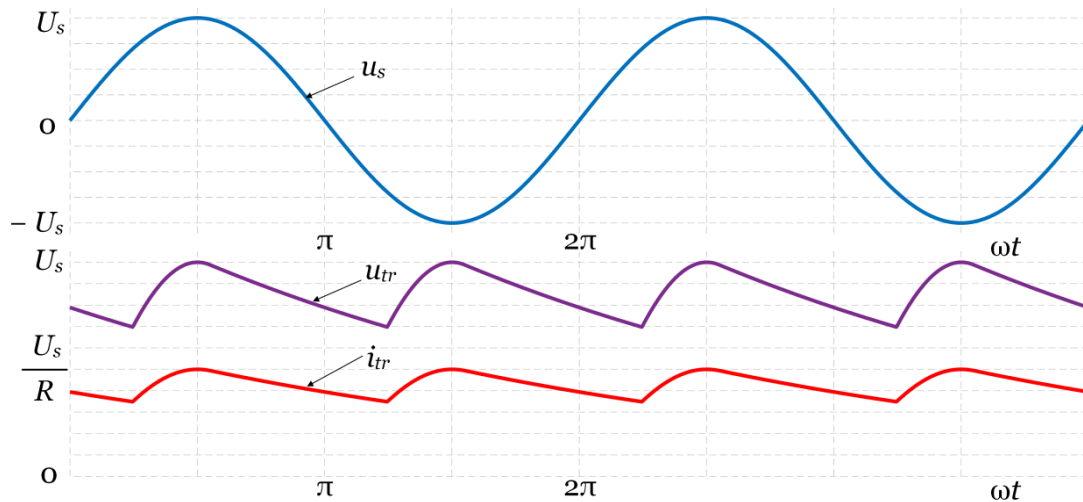
Jednadžba 4. Srednja vrijednost ispravljenog napona punovalnog ispravljača u mosnom spoju

Na temelju slike 15 može se zaključiti da je izlazni napon punovalnog ispravljača istosmjernan, ali nije konstantan kao, primjerice, napon baterije, nego sadrži i neku izmjeničnu komponentu. Pulsnost ovog pretvarača iznosi dva s obzirom na to da ima dva pulsa u izlaznom naponu unutar jednog perioda izmjeničnog napona. Ovakav oblik istosmjernog napona može biti problem za osjetljiva istosmjerna trošila koja zahtijevaju malu valovitost napona. Najjednostavniji način za rješavanje tog problema jeste dodavanje kondenzatora paralelno trošilu na izlaz sklopa što je prikazano na slici 16 (Bose, 2002., str. 105).



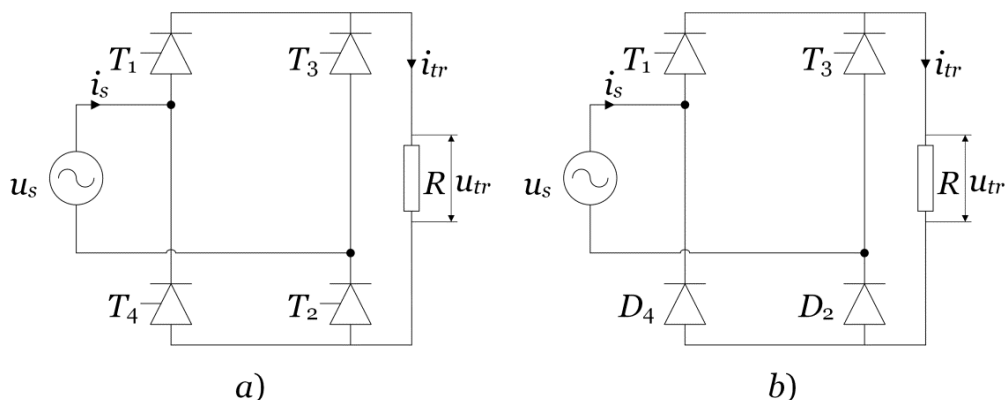
Slika 16. Punovalni ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom s izlaznim kondenzatorom

Valni oblici punovalnog ispravljača opterećenog radnim trošilom s izlaznim kondenzatorom prikazani su na slici 17. Usporede li se valni oblici na slici 17. s valnim oblicima na slici 15., primjećuje se značajno manja valovitost napona trošila. Na slici 15. napon u_{tr} se mijenja od 0 do vršne vrijednosti U_s , dok je na slici 17 raspon promjene napona manji. Manja valovitost napona rezultira manjom valovitošću struje trošila i_{tr} . Do smanjenja valovitosti dolazi zbog toga što kondenzator C_f održava određenu srednju vrijednost napona te se napon u_{tr} mijenja od te vrijednosti do maksimalne U_s .



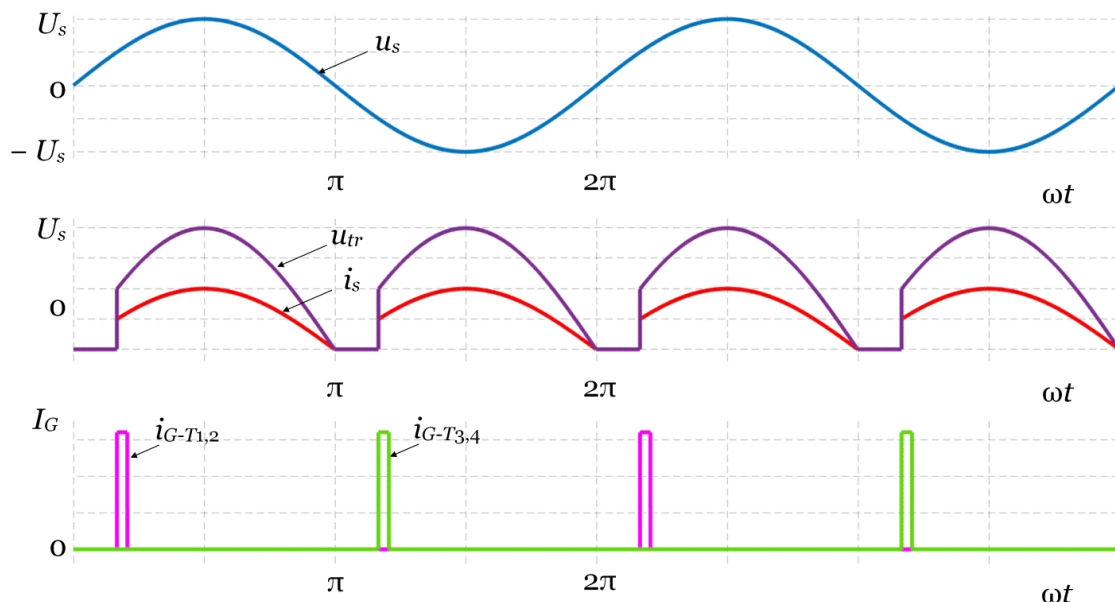
Slika 17. Valni oblici napona i struje punovalnog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom s izlaznim kondenzatorom

Punovalni upravljivi ispravljač dobije se tako što se četiri diode zamijene s četiri tiristora i taj je sklop prikazan na slici 18.a, a isto se može postići tako što se dvije diode zamijene s dva tiristora kao što je prikazano na slici 18.b. Valni oblici obaju sklopova, prikazani na slici 18, bit će isti, ali sklop na slici 18b ima prednost zbog toga što se koriste dva tiristora manje. Načelo rada ovog sklopa slično je načelu rada neupravljivog ispravljača u mosnom spoju. U svakoj poluperiodi struju trošila vode 2 poluvodičke komponente. Za sklop na slici 18a tijekom pozitivne poluperiode vode tiristori T_1 i T_2 , dok, tijekom negativne, vode tiristori T_3 i T_4 . To znači da tiristori T_1 i T_2 imaju isti upravljački signal jednako kao i tiristori T_3 i T_4 . Iz te činjenice slijedi da je moguće za ispravljanje napona kombinirati tiristor i diodu. Tako za sklop na slici 18.b tijekom pozitivne poluperiode vode tiristor T_1 i dioda D_2 , a tijekom negativne tiristor T_3 i dioda D_4 . Uklapanje diode D_2 određuje kut vođenja tiristora T_1 , isto kao što uklapanje diode D_4 određuje kut vođenja tiristora T_3 .



Slika 18. Punovalni upravljivi ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom u spoju s četiri tiristora (a) i dva tiristora i dvije diode (b)

Načelo rada pretvarača sa slike 18 može se shvatiti na temelju valnih oblika prikazanih na slici 19. Valni oblici analizirani su za sklop s četiri tiristora sa slike 18a. Očekivano, napon izvora u_s je sinusni, dok napon u_{tr} i struja i_s trošila ovise o kutu vođenja tiristora. Na početku pozitivne poluperiode tiristori T_1 i T_2 blokiraju sve do trenutka dok ne dobiju impuls na gate $i_{G-T_{1,2}}$, u ovom slučaju, kut upravljanja α iznosi 30° . Kada dobiju impuls na gate, tiristori T_1 i T_2 provedu i vode struju sve do trenutka π kada prestanu voditi. U tom trenutku, tiristori T_3 i T_4 blokiraju sve do trenutka dok ne dobiju impuls na gate $i_{G-T_{3,4}}$ za isti kut $\alpha = 30^\circ$. U tom trenutku, ovi tiristori provedu i vode sve do trenutka 2π nakon čega se cijeli postupak ponavlja.



Slika 19. Valni oblici napona i struje punovalnog upravljivog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom

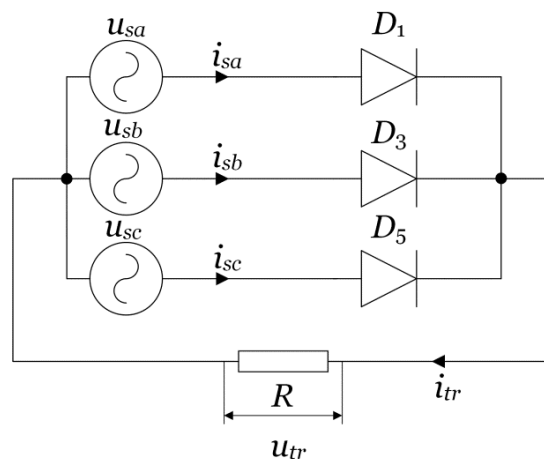
Srednja vrijednost napona poluvalnog upravljivog ispravljača u mosnom spoju računa se prema jednadžbi:

$$U_{tr} = \frac{2U_s}{\pi} \cos\alpha$$

Jednadžba 5. Srednja vrijednost ispravljenog napona punovalnog upravljivog ispravljača u mosnom spoju

1.5. Trofazni ispravljači

Prethodno razmatrani jednofazni ispravljači obično se koriste za snage do nekoliko kW. Za veće snage, koriste se trofazni ispravljači jer oni imaju mogućnost dobivanja istosmjernog napona i struje korištenjem svih triju faza trofaznog sustava. Korištenjem trofaznih ispravljača postiže se ravnomjerno opterećenje u sve tri faze čemu se uvijek teži, pogotovo kod većih snaga. Najjednostavnija izvedba trofaznog ispravljača je trofazni neupravljivi ispravljač u spoju sa srednjom točkom prikazan na slici 20. Ovaj pretvarač čine tri diode čije su anode spojene na izvore trofaznog sustava (u_{sa} , u_{sb} , u_{sc}), a katode dioda spojene su zajedno u zvjezdište. Istosmjerno trošilo kod ovog se pretvarača spaja između zvjezdišta katoda i zvjezdišta trofaznih izvora.



Slika 20. Trofazni neupravljivi ispravljač u spoju sa srednjom točkom

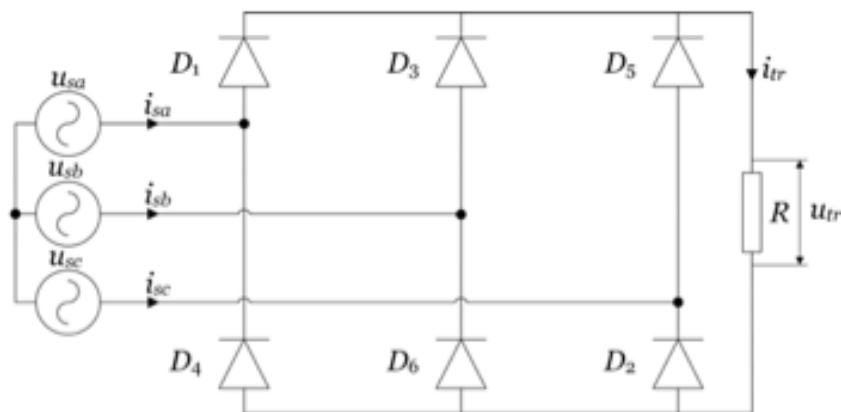
Srednja vrijednost napona na trošilu trofaznog ispravljača u spoju sa srednjom točkom računa se prema jednadžbi:

$$U_{tr} = \frac{3\sqrt{3}U_s}{2\pi}$$

Jednadžba 6. Srednja vrijednost ispravljenog napona trofaznog ispravljača u spoju sa srednjom točkom

gdje U_s predstavlja vršnu vrijednost faznog napona trošila.

U praksi se češće koristi trofazni neupravljivi ispravljač u mosnom spoju prikazan na slici 21. Ovaj ispravljač sastoji se od šest dioda koje su podijeljene u dvije grupe. Dioda D_1 , D_3 i D_5 čine katodnu grupu jer su im katode spojene zajedno, dok diode D_2 , D_4 i D_6 čine anodnu grupu jer su im anode spojene.



Slika 21. Trofazni neupravljivi ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom

Srednja vrijednost napona na trošilu ovog ispravljača može se izračunati prema jednadžbi:

$$U_{tr} = \frac{3\sqrt{3}U_s}{2\pi}$$

Jednadžba 7. Srednja vrijednost ispravljenog napona trofaznog ispravljača u mosnom spoju

Usporede li se jednadžbe 6 i 7, može se uočiti da je srednja vrijednost ispravljenog napona trofaznog ispravljača u mosnom spoju dvostruko veća u odnosu na ispravljač u spoju sa srednjom točkom.

Slika 22 prikazuje fotografiju trofaznog ispravljača u mosnom spoju. Ovaj ispravljač može napajati istosmjerna trošila velike snage jer korištene diode mogu voditi struje iznosa do 150 A.



Slika 22. Fotografija trofaznog ispravljača u mosnom spoju

Pitanja i zadatci za ponavljanje

1. Što su ispravljači?
2. Kako se ispravljači dijele?
3. Što se koristi kako bi se smanjio udio izmjenične komponente u ispravljenom naponu?
4. Objasnite tok energije kod ispravljača.
5. Što je dioda i koje su joj priključne stezaljke?
6. Kada dioda vodi struju, a kada ne? Objasnite na primjeru jednostavnog strujnog kruga.
7. Nacrtajte shemu poluvalnog ispravljača opterećenog radno-induktivnim trošilom.
8. Nacrtajte shemu punovalnog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom.

9. Na shemi iz prethodnog zadatka crvenom bojom označite smjer toka struje tijekom pozitivnog poluperioda ulaznog napona, a plavom smjer toka struje tijekom negativnog poluperioda.
10. Nacrtajte shemu punovalnog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom s izlaznim kondenzatorom. Što se postiže dodavanjem kondenzatora?
11. Istosmjerno radno trošilo napaja se iz izvora izmjeničnog napona preko poluvalnog ispravljača. Izračunajte srednju vrijednost napona na trošilu ako je izmjenični napon zadan kao $u_s = 230 \sin(2\pi \cdot 50)$.
12. Istosmjerno radno trošilo otpora 45Ω napaja se iz izvora izmjeničnog napona preko poluvalnog ispravljača. Izračunajte srednju vrijednost napona i struje trošila ako je vršna vrijednost napona izmjeničnog izvora 230 V , a frekvencija 50 Hz .
13. Izmjenični izvor napona definiran kao $u_s = 400 \sin(2\pi \cdot 50)$ napaja istosmjerno trošilo preko punovalnog ispravljača u mosnom spoju. Izračunajte srednju vrijednost napona i struje trošila ako je iznos otpora radnog trošila 100Ω .
14. Izračunajte vršnu vrijednost napona izvora koji, preko trofaznog ispravljača, u spoju sa srednjom točkom napaja istosmjerno radno trošilo otpora 30Ω kako bi srednja vrijednost napona na trošilu bila 150 V . Kolika je, u tom slučaju, struja trošila?
15. Izračunajte srednju vrijednost napona na trošilu koje se napaja iz trofazne električne mreže preko trofaznog ispravljača u mosnom spoju ako je efektivna vrijednost faznog napona mreže 240 V .

2

POGLAVLJE

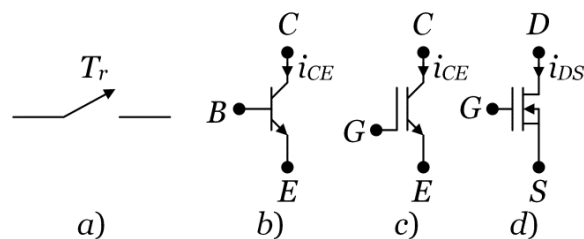
IZMJENJIVAČI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- prepoznati simbole tranzistora korištenih u energetskej elektronici
- razumjeti upravljanje tranzistorima u krugovima energetske elektronike
- prepoznati izvedbe autonomnih izmjenjivača
- shvatiti osnovna načela upravljanja autonomnim izmjenjivačima.

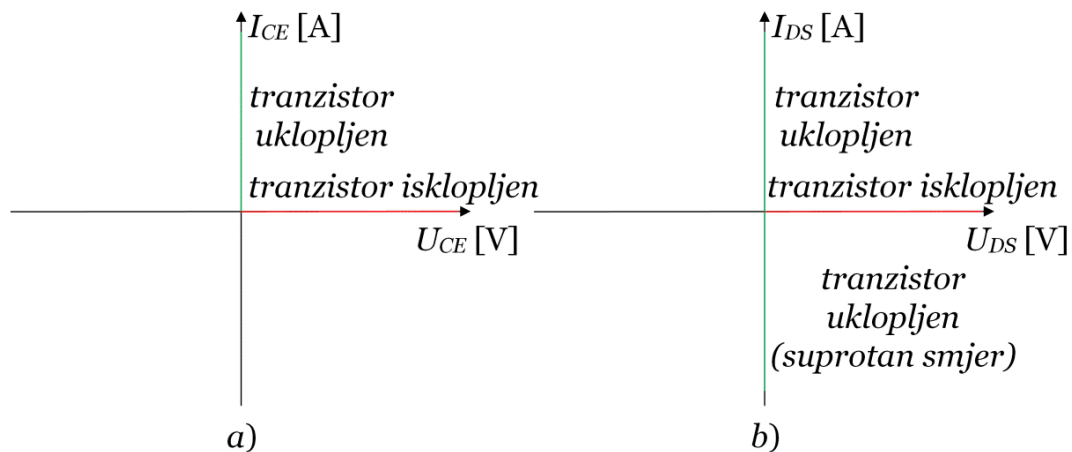
2.1. Osnovne značajke tranzistora

Tranzistor je upravljiva poluvodička sklopka koja ima tri priključne stezaljke, a najčešće se u shemama prikazuje kao sklopka prikazana na slici 23a. Postoje različite vrste tranzistora, a u energetskej elektronici najzastupljenije su tri vrste: bipolarni tranzistor, bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom (IGBT, engl. *insulated gate bipolar transistor*) i metal-oksidni poluvodič tranzistor s učinkom polja (MOSFET, engl. *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*). Svi navedeni tranzistori rade u području zasićenja.



Slika 23. Simboli: tranzistora u shemama (a), bipolarnog tranzistora (b), IGBT-a (c), MOSFET-a (d)

Simbol bipolarnog tranzistora prikazan je na slici 23b. Taj tranzistor ima tri priključne stezaljke - kolektor (C), emiter (E) i bazu (B) - te vodi struju u smjeru od kolektora prema emiteru sve dok teče pozitivna struja od baze prema kolektoru. U ovome stanju kažemo da je tranzistor uklopljen. Ako struja od baze prema kolektoru ne teče, bipolarni tranzistor ne vodi struju te kažemo da je isklopljen. Na slici 24a prikazana je idealna strujno-naponska karakteristika bipolarnog tranzistora. Kada je tranzistor uklopljen, na njemu nema pada napona i on vodi struju prema zelenoj karakteristici dok, kada je tranzistor isklopljen, nalazi se u stanju blokiranja i ponaša se prema crvenoj karakteristici ako je na njega narinut pozitivan napon. Iz karakteristike se može iščitati da bipolarni tranzistor ne može zapirati, što je važno upamtiti. Konačno, bipolarni tranzistori se u današnje vrijeme rijetko upotrebljavaju u energetskej elektronici jer su strujno upravljive sklopke (upravlja se strujom baze) što rezultira velikim gubitcima tranzistora.



Slika 24. Izlazna strujno-naponska karakteristika bipolarnog tranzistora i IGBT-a (a) te MOSFET-a (b)

Kako bi se smanjili gubici pretvarača energetske elektronike i povećala njihova korisnost, koristimo se se IGBT-ovima. Simbol ovog tranzistora prikazan je na slici 23c te on također ima kolektor i emiter, ali umjesto baze ima upravljačku elektrodu (G) gate. Strujno-naponska karakteristika IGBT-a izgleda isto kao i ona bipolarnog tranzistora prikazana na slici 24a. Međutim, IGBT se upravlja naponskim signalom koji se dovodi između upravljačke elektrode i emitera čime se postižu manji gubici u odnosu na bipolarni tranzistor. MOSFET, čiji je simbol prikazan na slici 23d tranzistor je s učinkom polja sličan IGBT-u koji ima stezaljke odvod (D), uvod (S) i upravljačka elektroda (G). Tim tranzistorom, kao i IGBT-om, upravlja naponski signal koji se dovodi između upravljačke elektrode i uvida. Iz strujno-naponske karakteristike MOSFET-a, prikazane na slici 24b primjećuje se da on može voditi struju u oba smjera. Međutim, u energetskej elektronici struja MOSFET-a teče, u pravilu, od odvoda (D) prema uvodu (S).

Važno je napomenuti da se, u praksi, često koriste tranzistori s ugrađenom porednom diodom, a ta je dioda spojena paralelno u odnosu na tranzistor, ali suprotno orijentirana. Slika 25 prikazuje IGBT s ugrađenom porednom diodom.



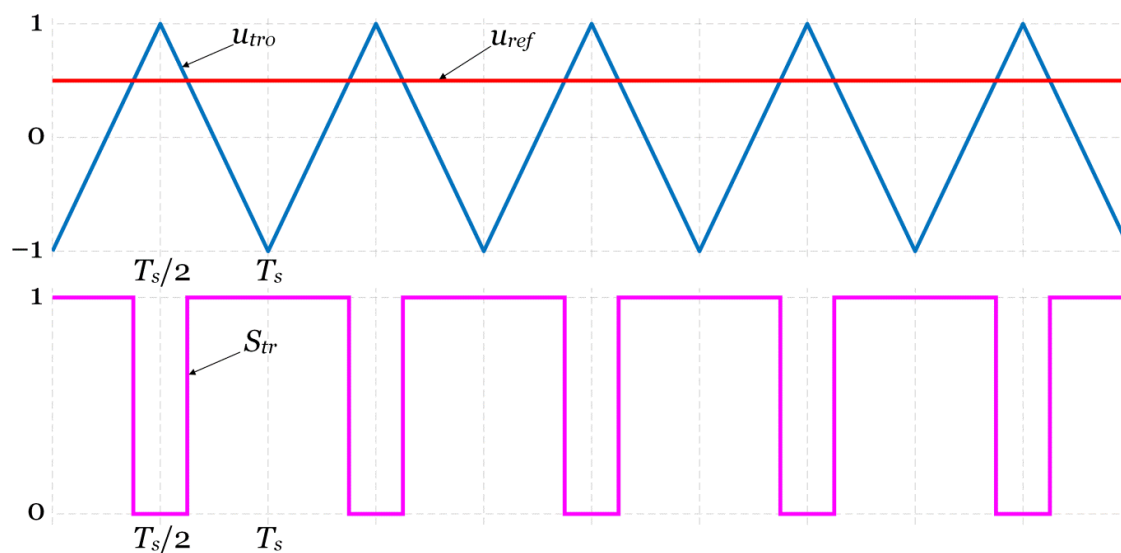
Slika 25: IGBT s porednom diodom

Za realizaciju sklopova energetske elektronike, u kojima se koriste tranzistori, potrebno je generirati upravljačke signale za tranzistore koji će osigurati željenu funkciju sklopa. Najčešće se upravljački signali generiraju korištenjem pulsnoširinske modulacije čije su osnove dane u nastavku.

2.2. Osnove pulsno-širinske modulacije

Pulsno-širinska modulacija može se definirati kao upravljanje širinom upravljačkih signala tranzistora. Tranzistor može biti uklopljen i isklopljen i to su dva stanja u kojima se on smije naći u sklopovima energetske elektronike. Pulsno-širinska modulacija definira odnos trajanja tih dvaju stanja, odnosno definira koliko će dugo tranzistor biti uklopljen, a koliko isklopljen. Slika 26 prikazuje pulsno-širinsku modulaciju na temelju koje se dobije upravljački signal za tranzistor (S_{tr}). Kada signal S_{tr} iznosi 1, tranzistor je uklopljen, a kada iznosi 0, tranzistor je isklopljen. Ovaj signal na slici 26 dobije se usporedbom trokutastog signala nosioca (u_{tro}) s referentnim signalom (u_{ref}) pri čemu vrijede pravila: ako je $u_{ref} > u_{tro}$ signal $S_{tr} = 1$, a ako je $u_{ref} < u_{tro}$ signal $S_{tr} = 0$.

Trokutasti signal u_{tro} mijenja se periodično od -1 do 1 . Jedan period promjene (od -1 do sljedećeg prolaza kroz -1) naziva se sklopni period i obilježen je na slici 26 kao T_s .



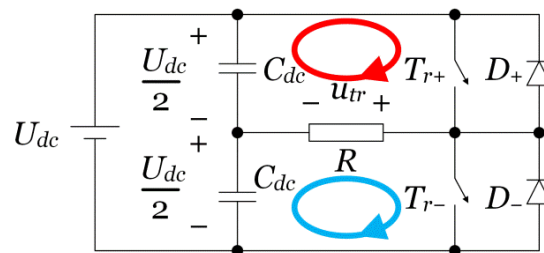
Slika 26. Pulsno-širinska modulacija

Svi izmjenjivači, razmatrani u nastavku, upravljani su korištenjem pulsno-širinske modulacije.

2.3. Jednofazni autonomni izmjenjivač u polumosnom spoju

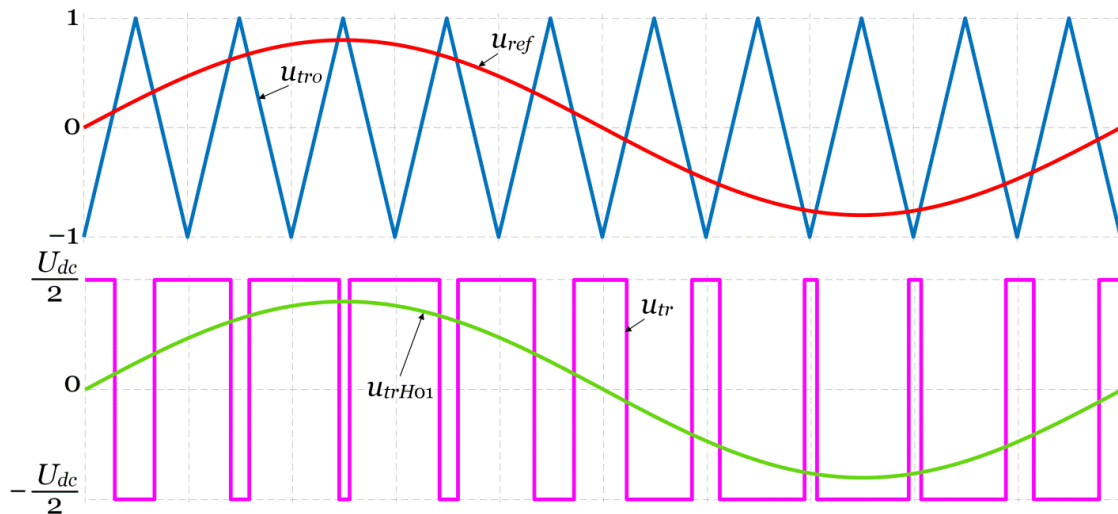
Jednofazni autonomni izmjenjivač u polumosnom spoju, prikazan na slici 27, najjednostavniji je tip izmjenjivača. Sastoji se od dvaju tranzistora T_{r+} i T_{r-} s ugrađenim porednim diodama D_+ i D_- , redom i dvaju kondenzatora C_{dc} .

Postoje dva sklopna stanja tog izmjenjivača koja se međusobno izmjenjuju. U prvom sklopnom stanju gornji tranzistor (T_{r+}) je uklopljen, a donji (T_{r-}) je isklopljen i struja se kroz trošilo zatvara u crvenoj petlji na slici 27 (Rashid, 2011, str. 359). Tijekom drugog sklopnog stanja vrijedi obratno tranzistor T_{r-} je uklopljen, a tranzistor T_{r+} je isklopljen i struja se kroz trošilo zatvara u plavoj petlji. Na slici 27 može se uočiti da su smjerovi struja trošila u crvenoj i plavoj petlji različiti, odnosno da se smjer struje mijenja čime se dobiva izmjenična struja koja na radnom otporu generira izmjenični napon. Bitno je naglasiti da nikada ne smiju oba tranzistora biti uklopljena istovremeno jer bi to značilo kratak spoj istosmjernog izvora i, u praksi, trenutno izgaranje tranzistora.



Slika 27. Jednofazni autonomni izmjenjivač u polumosnom spoju

Upravljački signali za tranzistore generiraju se usporedbom referentnog signala (u_{ref}) i trokutastog signala (u_{tro}) prema slici 28. Budući da su upravljački signali tranzistora T_{r+} i T_{r-} komplementarni logički signali 0 ili 1, dovoljno je generirati upravljački signal samo za jedan tranzistor dok se za drugi on dobije logičkim invertiranjem. Logički signali mogu imati vrijednost 0 ili 1, a signalu koji ima vrijednost 1 komplementaran je signal koji ima vrijednost 0 i obratno. To znači ako, primjerice, tranzistor T_{r+} ima signal logičke jedinice, on je uklopljen i vodi struju dok tranzistor T_{r-} ima signal logičke nule i on je isklopljen. Napon na trošilu (u_{tro}) na slici 28 mijenja se kako se mijenjaju sklopna stanja na temelju usporedbe napona u_{tro} i u_{ref} . Kada je $u_{ref} > u_{tro}$ tranzistor T_{r+} je uklopljen, a T_{r-} isklopljen, napon na trošilu $u_{tr} = U_{dc}/2$ (crvena petlja na slici 27). S druge strane, kada je $u_{ref} < u_{tro}$ tranzistor T_{r-} je uklopljen, a T_{r+} isklopljen, napon na trošilu $u_{tr} = -U_{dc}/2$ (plava petlja na slici 27).



Slika 28. Generiranje napona trošila jednofaznog autonomnog izmjenjivača u polumosnom spoju

Pulsno-širinska modulacija, prikazana na slici 28, naziva se sinusna jer referentni signal ima sinusni valni oblik. Za tu modulaciju svojstveni su parametri indeks amplitudne modulacije i indeks frekvencijske modulacije. Indeks amplitudne modulacije definira se kao omjer vršne vrijednosti referentnog signala (U_{ref}) i vršne vrijednosti trokutastog signala (U_{tro}), a dan je jednadžbom:

$$m_a = \frac{U_{ref}}{U_{tro}}$$

Jednadžba 8. Indeks amplitudne modulacije

Indeks frekvencijske modulacije definira se kao omjer frekvencije trokutastog signala (f_{tro}) i frekvencije referentnog signala (f_{ref}) te je dan jednadžbom:

$$m_f = \frac{f_{tro}}{f_{ref}}$$

Jednadžba 9. Indeks frekvencijske modulacije

Jednadžba 9, ustvari, definira koliko se perioda trokuta nalazi unutar jednog perioda sinusnog signala. Za valne oblike prikazane na slici 28 ovaj faktor iznosi $m_f = 10$. U praksi je iznos indeksa amplitudne modulacije obično manji od jedan ili jednak jedinici, dok indeks frekvencijske modulacije iznosi od nekoliko desetaka do nekoliko stotina.

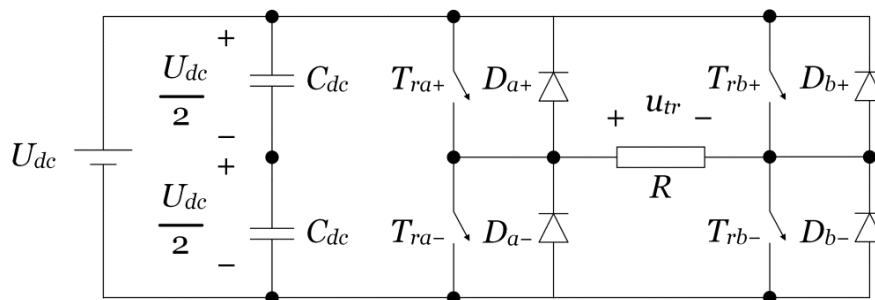
Valni oblik napona trošila u_{tr} prikazan na slici 28 nema sinusni valni oblik, no ima samo izmjeničnu komponentu. Za ovaj valni oblik moguće je, pomoću odgovarajućih matematičkih radnji, dobiti valni oblik osnovnog harmonika napona (u_{trH01}) koji je prikazan na slici 28. Može se reći da je to valni oblik napona koji bi se dobio kada bi faktor m_f težio u beskonačnost. Vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu (U_{tr}) može se izračunati ovisno o ulaznom istosmjernom naponu (U_{dc}) i indeksu m_a uporabom sljedeće formule:

$$U_{tr} = m_a \frac{U_{dc}}{2}$$

Jednadžba 10. Vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu jednofaznog autonomnog izmjenjivača u polumosnom spoju

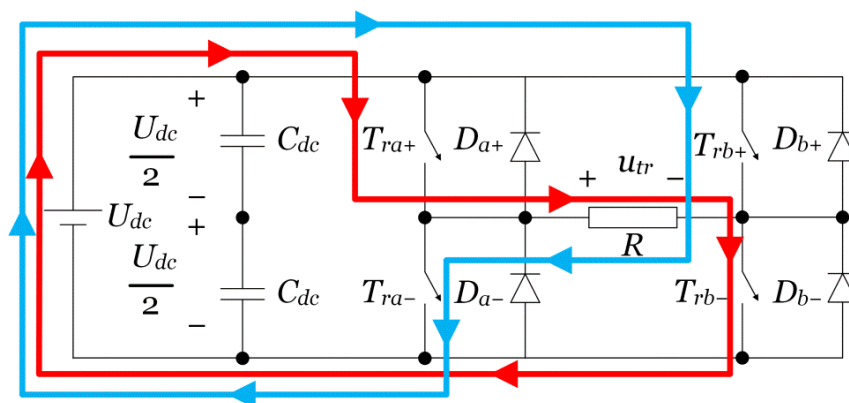
2.4. Jednofazni autonomni izmjenjivač u mosnom spoju

Jednofazni autonomni izmjenjivač u mosnom spoju, prikazan na slici 29, sastoji se od dvije tranzistorske grane a i b koje se sastoje od po dva tranzistora s pripadajućim porednim diodama (Rashid, 2011, str. 363 - 364). Trošilo se spaja između dvaju tranzistorskih grana. Načelo rada ovog izmjenjivača slično je načelu rada izmjenjivača u polumosnom spoju. Sklop prikazan na slici 29 ima dva sklopna stana, a upravljački signali dvaju nasuprotnih tranzistora isti su. To znači da tranzistori T_{ra+} i T_{rb-} imaju zajednički upravljački signal isto kao tranzistori T_{ra-} i T_{rb+} . Upravljački signali za tranzistore T_{ra+} i T_{rb-} i tranzistore T_{ra-} i T_{rb+} međusobno su komplementarni.



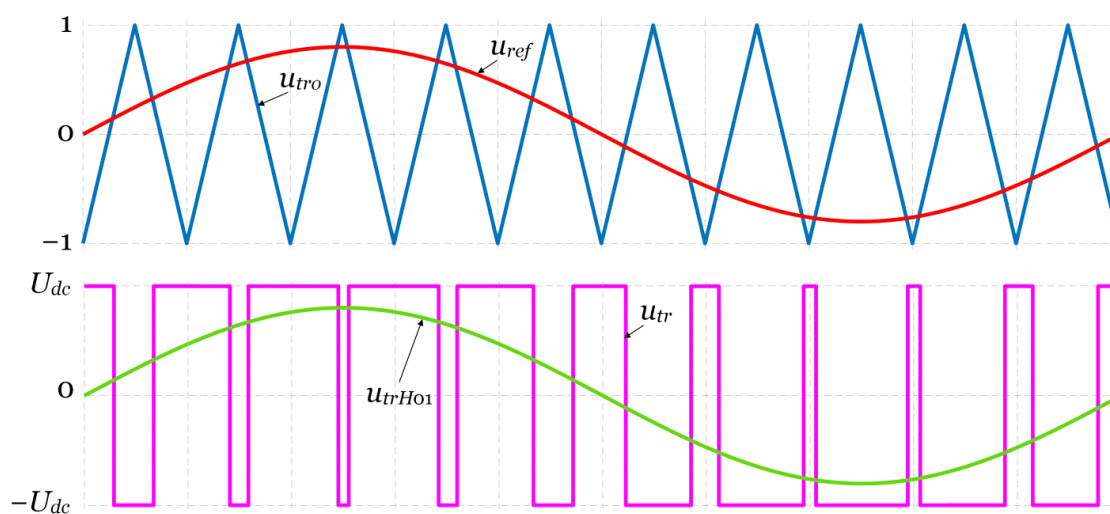
Slika 29. Jednofazni autonomni izmjenjivač u mosnom spoju

Slika 30 prikazuje smjer struje kroz trošilo za dva karakteristična sklopna stanja razmatranog izmjenjivača u mosnom spoju. Kada su tranzistori T_{ra+} i T_{rb-} uklopljeni, a tranzistori T_{ra-} i T_{rb+} isklopljeni, struja se zatvara u crvenoj petlji na slici 30 te je napon trošila jednak istosmjernom naponu $u_{tr} = U_{dc}$. Tijekom drugog sklopnog stanja, kada su tranzistori T_{ra-} i T_{rb+} uklopljeni, a tranzistori T_{ra+} i T_{rb-} isklopljeni, struja se zatvara u plavoj petlji te je napon trošila jednak negativnom iznosu istosmjernog napona $u_{tr} = -U_{dc}$.



Slika 30. Jednofazni autonomni izmjenjivač u mosnom spoju s ucrtanim smjerovima struje kroz trošilo

Slika 31 prikazuje generiranje napona trošila (u_{tr}) jednofaznog autonomnog izmjenjivača u mosnom spoju. Što se tiče pulsno-širinske modulacije, vrijedi sljedeće: kada je $u_{ref} > u_{tro}$ uklopljeni su tranzistori T_{ra+} i T_{rb-} , a isključeni T_{ra-} i T_{rb+} , te, kada je $u_{ref} < u_{tro}$, vrijedi obratno. Usporedi li se slika 31 sa slikom 28 dobivenom za polumosni izmjenjivač, primijetit ćete da je jedina razlika u valnim oblicima iznos napona na trošilu koji se kod mosnog mijenja od $-U_{dc}$ do U_{dc} dok se kod polumosnog mijenja od $-U_{dc}/2$ do $U_{dc}/2$.



Slika 31. Generiranje napona trošila jednofaznog autonomnog izmjenjivača u mosnom spoju

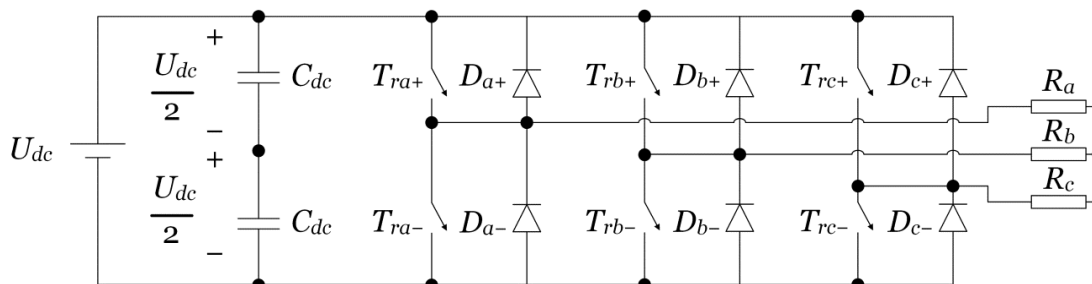
Vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu jednofaznog izmjenjivača u mosnom spoju računa se prema jednadžbi:

$$U_{tr} = m_a U_{dc}$$

Jednadžba 11. Vršna vrijednost osnovnog harmonika-napona na trošilu jednofaznog autonomnog izmjenjivača u mosnom spoju

2.5. Trofazni autonomni izmjenjivač

Trofazni autonomni izmjenjivač, prikazan na slici 32, sastoji se od triju tranzistorskih grana a, b i c koje se sastoje od dvaju tranzistora s odgovarajućim porednim diodama (Rashid, 2011, str. 367). Svaka faza trošila spaja se na jednu granu mosta, a trošila mogu biti spojena u zvijezdu ili trokut. Upravljački signali za tranzistore generiraju se usporedbom triju referentnih signala s trokutastim signalom. S obzirom na to da, kod ovog izmjenjivača, postoji 8 mogućih sklopnih stanja, generiranje upravljačkih signala za njega neće biti razmatrano u sklopu ovoga priručnika.



Slika 32. Trofazni autonomni izmjenjivač

Vršna vrijednost osnovnog harmonika-faznog napona na trošilu (U_{fa}) trofaznog izmjenjivača računa se prema jednadžbi:

$$U_{fa} = m_a \frac{U_{dc}}{2}$$

Jednadžba 12. Vršna vrijednost osnovnog harmonika-faznog napona na trošilu trofaznog autonomnog izmjenjivača

Pitanja i zadatci za ponavljanje

1. Što su izmjenjivači i koji je njihov glavni zadatak?
2. Što je tranzistor i koje su njegove priključne stezaljke?
3. Koji se vrste tranzistora rabe u energetskej elektronici?
4. Nacrtajte simbole tranzistora kojim se koristimo u energetskej elektronici.
5. Nacrtajte izlaznu strujno-naponsku karakteristiku IGBT-a.
6. Što je poredna dioda tranzistora? Nacrtajte IGBT s porednom diodom.
7. Što je pulsno-širinska modulacija?
8. Nacrtajte shemu jednofaznog autonomnog izmjenjivača u polumosnom spoju. Smiju li oba tranzistora ovog izmjenjivača biti istovremeno uklopljena? Obrazložite.
9. Nacrtajte shemu jednofaznog autonomnog izmjenjivača u mosnom spoju. Izračunajte indeks frekvencijske modulacije ako je frekvencija trokutastog signala 5000 Hz, a frekvencija referentnog signala 50 Hz.
10. Nacrtajte shemu jednofaznog autonomnog izmjenjivača u mosnom spoju i ucrtajte kako se zatvara struja trošila za dva karakteristična sklopna stanja izmjenjivača.
11. Nacrtajte trofazni autonomni izmjenjivač i izračunajte kolika je vršna vrijednost osnovnog harmonika-faznog napona na trošilu ako je na ulaz izmjenjivača spojen istosmjerni izvor od 500 V, a amplitudni indeks modulacije iznosi 0,9.



3

POGLAVLJE

ISTOSMJERNI PRETVARAČI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

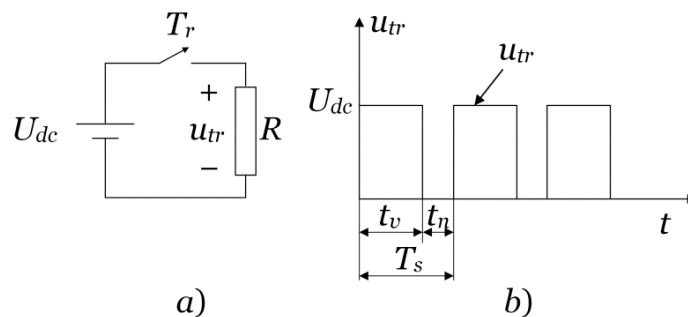
- prepoznati osnovne istosmjerne pretvarače
- razumjeti koncept rada osnovnih istosmjernih pretvarača
- razumjeti upravljanje istosmjernim pretvaračima
- izvesti osnovne proračune za istosmjerne pretvarače.

3.1. Istosmjerni silazni pretvarač

Istosmjerni silazni pretvarač koristi se želi li se dobiti manji iznos istosmjernog napona u odnosu na ulazni napon te se zbog toga i zove silazni pretvarač. Istosmjerni napon na izlazu ovog pretvarača (u_{tr}) može biti jednak ili manji od ulaznog napona (U_{dc}). Najjednostavnija izvedba istosmjernog silaznog pretvarača prikazana je na slici 33a i sastoji se od istosmjernog izvora (U_{dc}), tranzistora (T_r) i trošila (Kassakaian i sur., 1991, str. 89). Slika 33b prikazuje valni oblik napona na trošilu kod ovog pretvarača iz kojeg se može uočiti da postoje dva sklopna stanja. Tijekom prvog sklopnog stanja tranzistor T_r je uklopljen, a napon na trošilu jednak je ulaznom naponu U_{dc} i to je vrijeme označeno kao t_v na slici 33b. Tijekom drugog sklopnog stanja tranzistor T_r je isklopljen, a napon na trošilu je nula i to je vrijeme označeno kao t_n . Jedan period izmjene dvaju spomenutih sklopnih stanja označen je kao T_s te vrijedi da je $T_s = t_v + t_n$. Važna veličina svojstvena za istosmjerne pretvarače je faktor vođenja tranzistora (D) koji se definira prema jednadžbi:

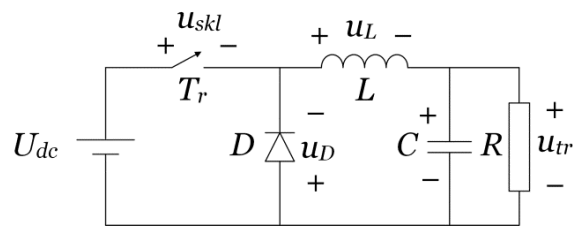
$$D = \frac{t_v}{T_s} = \frac{t_v}{t_v + t_n}$$

Jednadžba 13. Faktor vođenja tranzistora



Slika 33. Istosmjerni silazni pretvarač (a) te valni oblici izlaznog napona pretvarača (b)

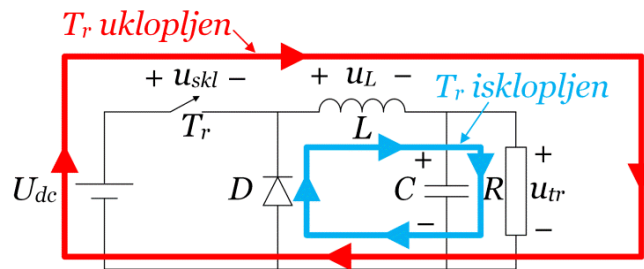
Na temelju valnog oblika napona na trošilu (u_{tr}), prikazanog na slici 33b, može se zaključiti da se ovaj napon cijelo vrijeme mijenja od nule do iznosa U_{dc} . Takvu promjenu napona osjetljiva istosmjerna trošila ne mogu podnijeti i to može dovesti do njihovog nepravilnog rada ili čak do kvara. Zbog toga se na izlaz istosmjernog pretvarača dodaje LC filter, a zbog filtra mora se dodati i dioda (Mohan i sur., 2003, str. 165). Slika 34 prikazuje shemu istosmjernog pretvarača s LC filtrom.



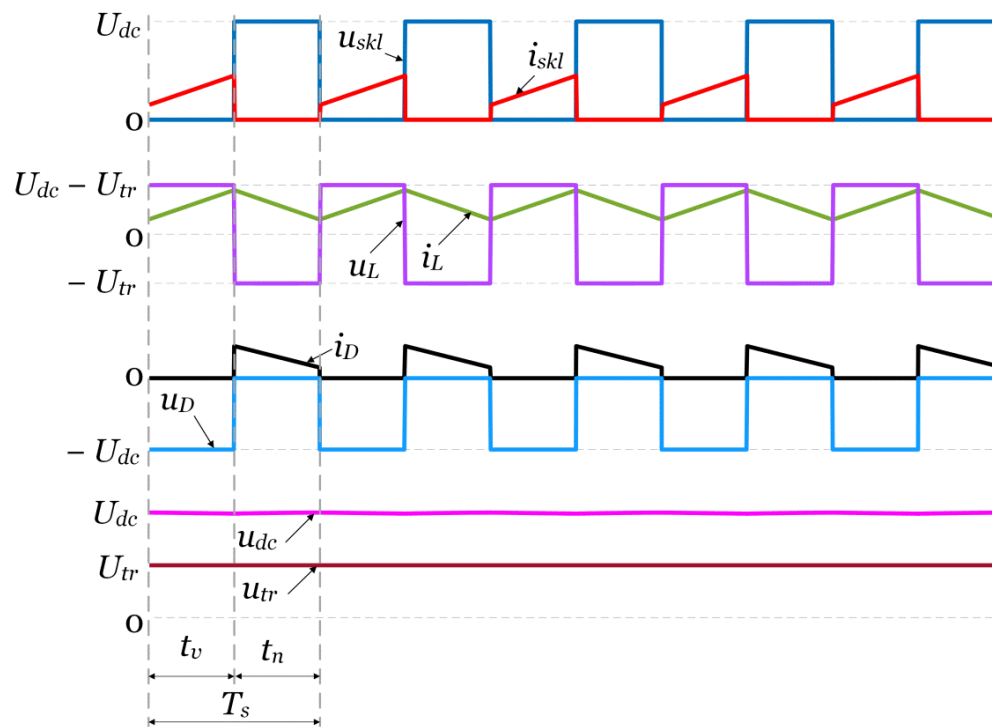
Slika 34. Istosmjerni silazni pretvarač s LC filtrom

Načelo rada sklopa na slici 34 može biti shvaćeno na temelju slika 35 i 36. Slika 35 prikazuje smjer struje u dva karakteristična sklopna stanja tranzistora, a slika 36 karakteristične valne oblike u tome slučaju. U analizi je faktor vođenja $D = 0,5$, što znači da je unutar jednog sklopnog perioda T_s vrijedi $t_v = t_n$. Na slici 36 prikazani su napon (u_{skl}) i struja (i_{skl}) tranzistora, napon (u_L) i struja (i_L) kroz prigušnicu, napon (u_D) i struja diode (i_D) te napon izvora (u_{dc}) i napon trošila (u_{tr}).

U početnom stanju tranzistor T_r je uključjen, a struja teče kroz tranzistor, prigušnicu i trošilo prema crvenoj petlji na slici 35. Što se tiče valnih oblika na slici 36, u ovom stanju napon u_{skl} je nula jer tranzistor vodi, a struja i_{skl} raste i ima isti valni oblik kao i struja i_L jer je to, u stvari, ista struja (crvena petlja). Napon u_L u ovome stanju može se dobiti pomoću II. Kirchhoffovog zakona kao $u_L = U_{dc} - U_{tr}$, ovaj napon je pozitivan te zbog toga struja i_L tijekom ovog stanja raste. Napon na diodi u_D negativan je i iznosi $-U_{dc}$ te dioda D zapire i ne vodi struju.



Slika 35. Istosmjerni silazni pretvarač s LC filtrom i ucrtanim tokovima struje



Slika 36. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog silaznog pretvarača pri $D = 0,5$

Tijekom drugog sklopnog stanja tranzistor T_r je isključen, a struja i_L nastavlja teći (jer se struja kroz prigušnicu ne može skokovito mijenjati) i zatvara se kroz trošilo i diodu D prema plavoj petlji na slici 35. Na slici 36 može se uočiti da je, u ovome stanju, struja $i_{skl} = 0$ zato što tranzistor ne vodi te on blokira napon izvora $u_{skl} = U_{dc}$. Napon u_L jednak je negativnom iznosu napona na trošilu ($-U_{tr}$) što se može dobiti analizom plave petlje. S obzirom na to da je napon u_L negativan, struja i_L pada te struja diode i_D ima isti valni oblik jer dioda vodi struju prigušnice. Napon na diodi $u_D = 0$ jer dioda vodi tijekom ovog stanja.

Na slici 36 može se uočiti da je napon u_{tr} praktički konstantan i upola manji od ulaznog napona U_{dc} . Srednja vrijednost napona na trošilu računa se prema jednadžbi:

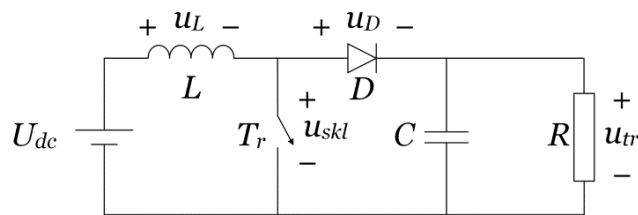
$$U_{tr} = DU_{dc} = \frac{t_v}{T_s} U_{dc}$$

Jednadžba 14. Srednja vrijednost napona na trošilu istosmjernog silaznog pretvarača

Faktor vođenja u jednadžbi 14 kreće se između 0 i 1 što potvrđuje prethodnu tvrdnju da kod istosmjernog silaznog pretvarača izlazni napon može biti manji ili jednak ulaznom naponu.

3.2. Istosmjerni uzlazni pretvarač

Istosmjernim uzlaznim pretvaračem, prikazanim na slici 37, koristi se ako se želi dobiti veći iznos napona u odnosu na iznos ulaznog napona. Sastavljen je od prigušnice, kondenzatora, diode i tranzistora odnosno ima iste komponente kao i silazni, samo su drugačije raspoređene. Uzlazni pretvarač također ima dva karakteristična sklopna stanja, prvo kada tranzistor T_r vodi te drugo kada tranzistor T_r ne vodi.

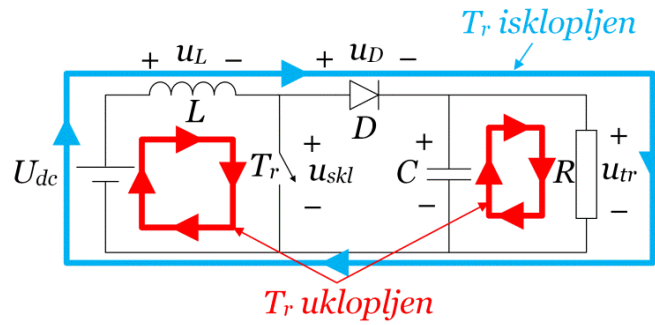


Slika 37. Istosmjerni uzlazni pretvarač

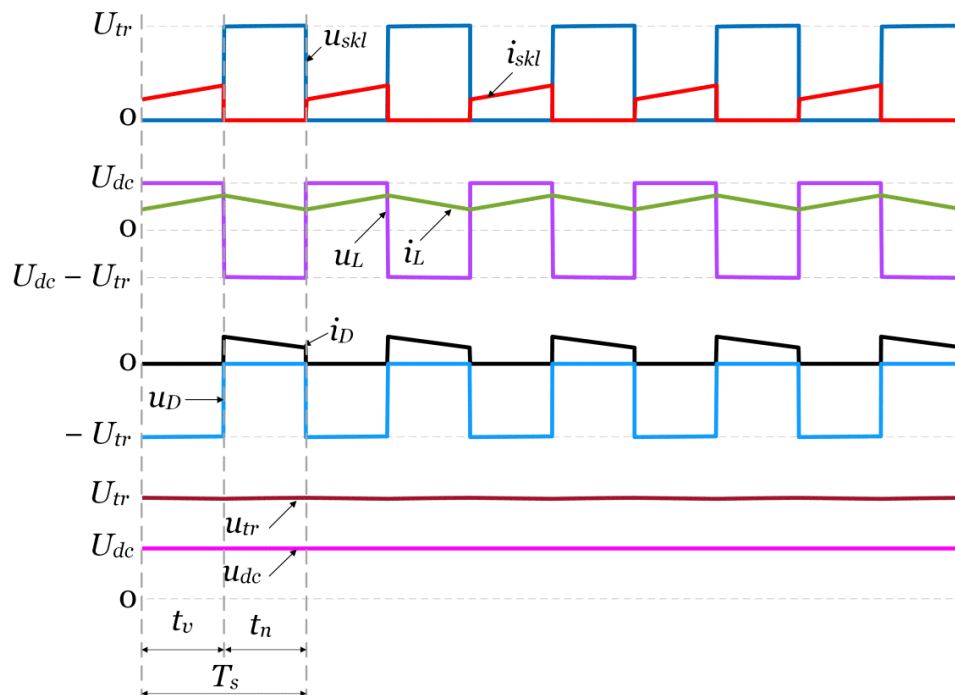
Analiza rada ovog pretvarača napravljena je na isti način kao kod istosmjernog silaznog pretvarača. Slika 38 prikazuje istosmjerni uzlazni pretvarač s ucrtanim tokovima struje za dva karakteristična sklopna stanja, a slika 33 prikazuje valne oblike odgovarajućih veličina pri faktoru vođenja sklopke $D = 0,5$. Korištene su iste oznake veličina kao kod istosmjernog silaznog pretvarača.

Tijekom prvog sklopnog stanja tranzistor T_r je uklopljen, a struja se zatvara u dvije crvene petlje prikazane na slici 38. Napon na tranzistoru u_{skl} je 0 jer on vodi, dok struja i_{skl} raste kao i struja i_L . Napon na prigušnici u_L pozitivan je i po iznosu jednak naponu izvora U_{dc} . U ovom sklopnom stanju napon na diodi u_D je negativan i po iznosu jednak naponu trošila U_{tr} stoga dioda zapire, a trošilo se napaja iz kondenzatora C .

Tijekom drugog sklopnog stanja tranzistor T_r je isklopljen te se struja zatvara u plavoj petlji prikazanoj na slici 38. Tranzistor blokira napon U_{tr} i ne vodi struju, dok struja i_L pada zbog negativnog napona u_L koji je jednak $U_{dc} - U_{tr}$. Struja i_D u ovom sklopnom stanju jednaka je struji i_L , a napon $u_D = 0$ jer dioda vodi. Trošilo se u ovom sklopnom stanju napaja iz izvora.



Slika 38. Istosmjerni uzlazni pretvarač s ucrtanim tokovima struje

Slika 39. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog uzlaznog pretvarača pri $D = 0,5$

Srednja vrijednost izlaznog istosmjernog napona uzlaznog pretvarača računa se prema jednadžbi:

$$U_{tr} = \frac{1}{1-D} U_{dc}$$

Jednadžba 15. Srednja vrijednost napona na trošilu istosmjernog uzlaznog pretvarača

Prema jednadžbi 15, kada bi faktor D težio u 1, uzlazni pretvarač teorijski bi imao beskonačno pojačanje. Međutim, u praksi se to ne može dogoditi zbog postojanja parazitnih otpora prigušnice i kondenzatora.

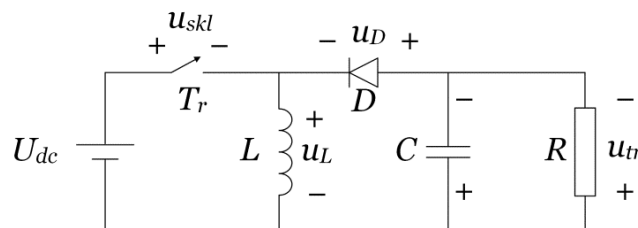
3.3. Istosmjerni silazno-uzlazni pretvarač

Istosmjerni silaznouzlazni pretvarač omogućava da iznos izlaznog napona pretvarača bude veći ili manji od iznosa ulaznog napona ovisno o iznosu faktora D . Na slici 40 prikazana je shema silaznouzlaznog pretvarača. Za realizaciju ovog pretvarača koriste se tranzistor, dioda, prigušnica i kondenzator isto kao i kod silaznog i uzlaznog. Srednja vrijednost izlaznog napona silaznouzlaznog pretvarača definirana je jednadžbom:

$$U_{tr} = \frac{D}{1-D} U_{dc}$$

Jednadžba 16. Srednja vrijednost napona na trošilu istosmjernog silaznouzlaznog pretvarača

Kada je $0 < D < 0,5$, pretvarač na slici 40 radi kao silazni pretvarač, a kada je $0,5 < D < 1$, pretvarač radi kao uzlazni. Važno je uočiti da napon na trošilu ima suprotan polaritet u odnosu na ulazni napon što znači da silaznouzlazni pretvarač mijenja polaritet napona, dok to nije bio slučaj kod silaznog i uzlaznog pretvarača.



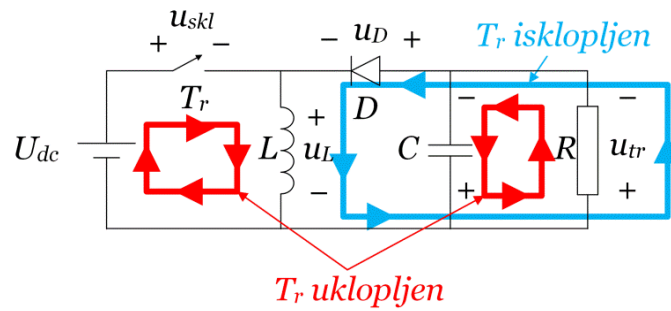
Slika 40. Istosmjerni silazno-uzlazni pretvarač

Analiza rada ovog pretvarača objašnjena je na sličan način kao i kod prethodno spomenutih pretvarača. Slika 41 prikazuje shemu pretvarača s ucrtanim smjerovima struje za dva karakteristična sklopna stanja (tranzistor T_r uključen i isključen) dok slika 42 prikazuje valne oblike veličina pretvarača pri $D = 0,3$. Na slici 42 može se uočiti da je vrijeme vođenja t_v kraće od vremena nevođenja tranzistora t_n te da izlazni napon u_{tr} ima suprotan polaritet u odnosu na ulazni i po iznosu je manji (silazni pretvarač).

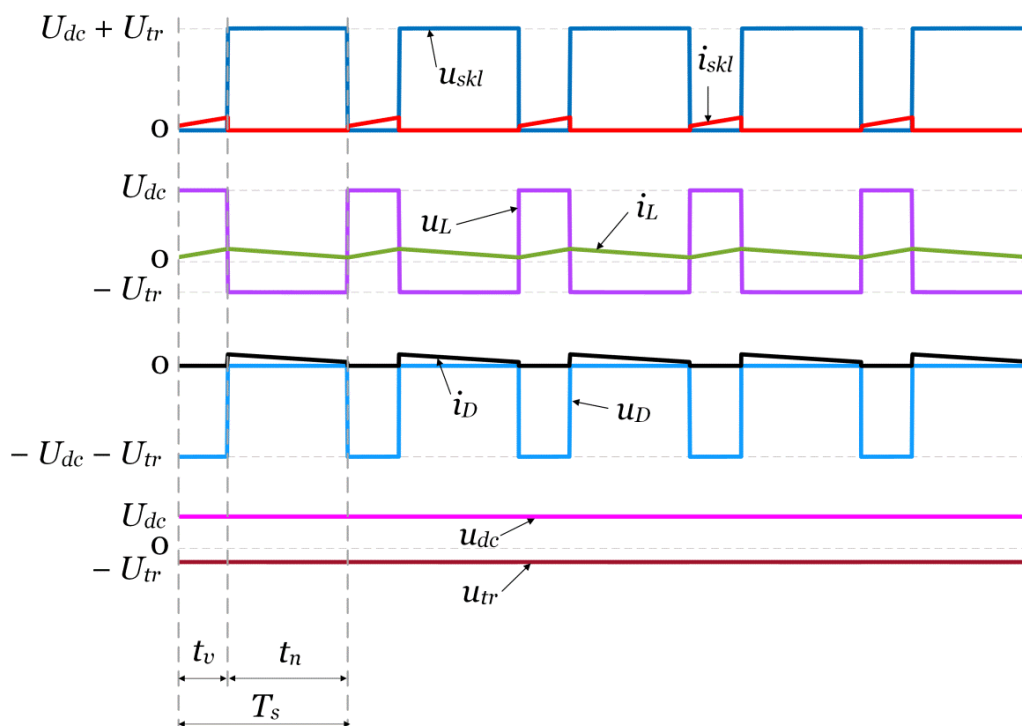
Tijekom sklopnog stanja u kojem je tranzistor T_r uklopljen (prvo na slici 42), struja se zatvara u dvije crvene petlje prikazane na slici 41. Prigušnica se puni iz izvora dok se trošilo napaja iz kondenzatora. U ovom sklopnom stanju napon $u_{skl} = 0$ jer tranzistor vodi, a struja i_{skl} jednaka je struji i_L i obje rastu. Napon u_L jednak je ulaznom naponu U_{dc} dok dioda zapire napon jednak zbroju ulaznog i izlaznog napona ($U_{dc} + U_{tr}$) i zbog toga ne vodi.

Tijekom drugog karakterističnog sklopnog stanja tranzistor T_r je iskllopljen, a struja se za-

tvara u plavoj petlji na slici 41. U ovom sklopnom stanju tranzistor blokira napon jednak zbroju napona izvora i napona trošila ($u_{skl} = U_{dc} + U_{tr}$) dok je napon $u_L = -U_{tr}$ i struja kroz prigušnicu pada. Dioda preuzima vođenje od tranzistora te je njena struja jednaka struji kroz prigušnicu ($i_D = i_L$).

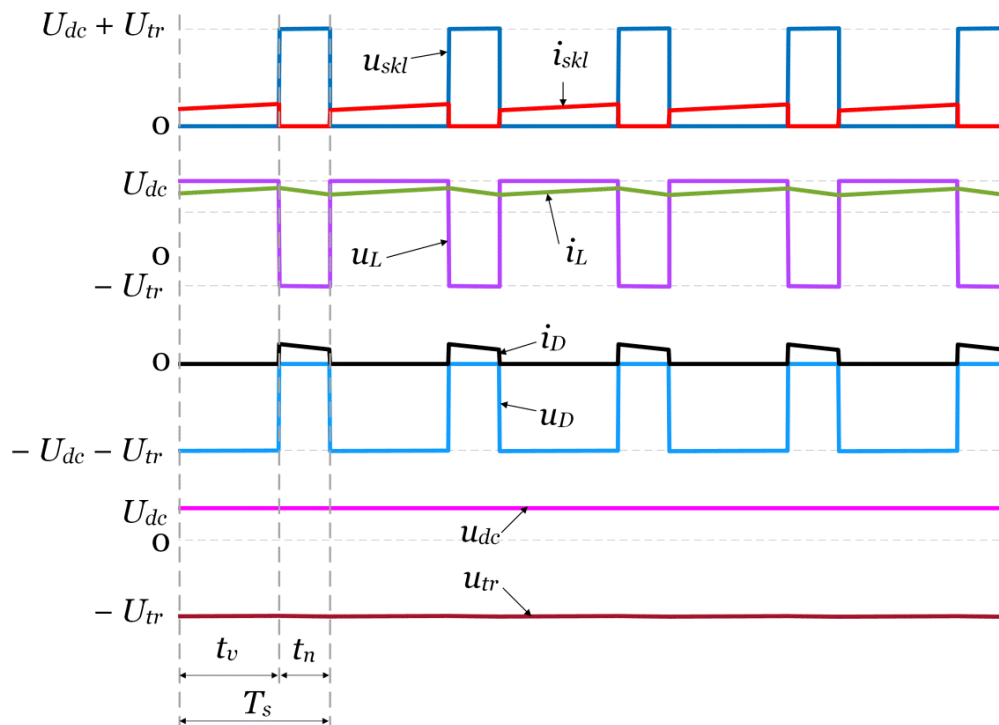


Slika 41. Istosmjerni silaznoulazni pretvarač s ucrtanim tokovima struje



Slika 42. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog silaznoulaznog pretvarača pri $D = 0,3$

Slika 43 prikazuje valne oblike veličina silaznoulaznog pretvarača pri faktoru $D = 0,7$. U ovom slučaju također vrijedi gore navedena analiza, a ono što se može vidjeti na slici 43, jest da je napon u_{tr} suprotnog polariteta u odnosu na ulazni napon i po iznosu je veći.



Slika 43. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog silaznouzlaznog pretvarača pri $D = 0,7$

Pitanja i zadatci za ponavljanje

1. Što su istosmjerni pretvarači i kako se oni dijele?
2. Nacrtajte shemu jednostavnog istosmjernog silaznog pretvarača opterećenog radnim otporom. Kako se definira faktor vođenja tranzistora?
3. Nacrtajte shemu istosmjernog silaznog pretvarača opterećenog radnim trošilom s LC filtrom i na shemi označite smjer zatvaranja struje kada je tranzistor uklopljen te smjer zatvaranja struje kada je tranzistor isklopljen.
4. Kakav - po iznosu - može biti izlazni napon istosmjernog silaznog pretvarača u odnosu na ulazni napon?
5. Nacrtajte shemu istosmjernog uzlaznog pretvarača opterećenog radnim trošilom s LC filtrom i na shemi označite smjer zatvaranja struje kada je tranzistor uklopljen te smjer zatvaranja struje kada je tranzistor isklopljen.
6. Nacrtajte shemu istosmjernog silazno-uzlaznog pretvarača opterećenog radnim trošilom s LC filtrom i na shemi označite smjer zatvaranja struje kada je tranzistor uklopljen te smjer zatvaranja struje kada je tranzistor isklopljen.
7. Koliki bi trebao biti faktor vođenja istosmjernog silaznog pretvarača kako bi se istosmjerni napon iznosa 50 V smanjio na 12 V?

8. Faktor vođenja istosmjernog silaznog pretvarača je 0,25, a ulazni napon pretvarača je 100 V. Koliko iznose izlazni napon, izlazna struja i izlazna snaga ako je pretvarač opterećen radnim otporom iznosa 400 Ω ?
9. Ulazni istosmjerni pretvarač napaja radno trošilo otpora 25 Ω iz akumulatorske baterije napona 12 V. Ako je faktor vođenja pretvarača 0,6, izračunajte izlazni napon i struju pretvarača.
10. Istosmjerno trošilo napaja se iz silazno-uzlaznog pretvarača na čiji je ulaz spojena baterija nazivnog napona 100 V. Koliko iznosi napon na trošilu za sljedeće iznose faktora vođenja tranzistora - 0,1, 0,25, 0,4, 0,6, 0,8?
11. Istosmjerno trošilo nazivnog napona 50 V napaja se iz istosmjernog izvora napona 24 V. Koliki bi trebao biti faktor vođenja istosmjernog uzlaznog pretvarača da bi se na trošilu dobila nazivna vrijednost napona? Koliki bi trebao biti faktor vođenja ako bi se, umjesto istosmjernog uzlaznog pretvarača, upotrebljavao silazno-uzlazni?



4

POGLAVLJE

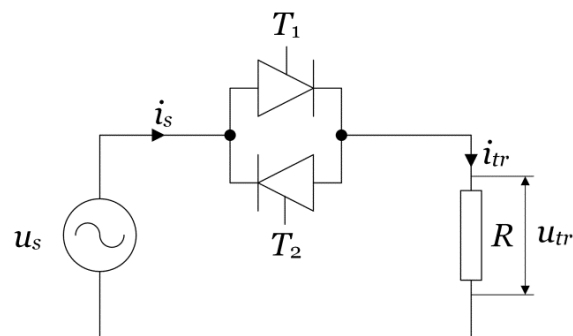
IZMJENIČNI PRETVARAČI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- prepoznati osnovne izvedbe izmjeničnog pretvarača napona
- prepoznati osnovne izvedbe izmjeničnog pretvarača napona i frekvencije
- očitati osnovne podatke s podatkovne pločice pretvarača napona i frekvencije.

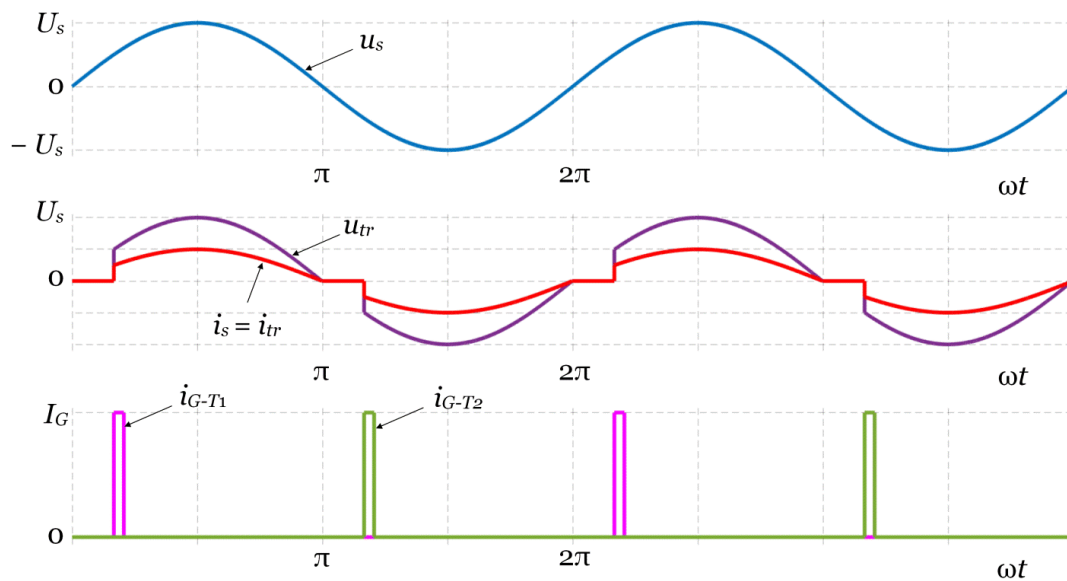
4.1. Izmjenični pretvarači napona

Najjednostavniji primjeri izmjeničnih pretvarača napona izvode se pomoću tiristora. Slika 44 prikazuje jednofazni izmjenični pretvarač napona opterećen radnim trošilom. Kod ovog se pretvarača, između izvora i trošila, spajaju dva antiparalelno spojena tiristora. Jedan tiristor služi za vođenje struje tijekom pozitivnog poluperioda ulaznog napona dok drugi služi za vođenje tijekom negativnog poluperioda toga napona (Trzynadlowski 2016, str. 197-198).



Slika 44. Jednofazni izmjenični pretvarač napona opterećen radnim trošilom

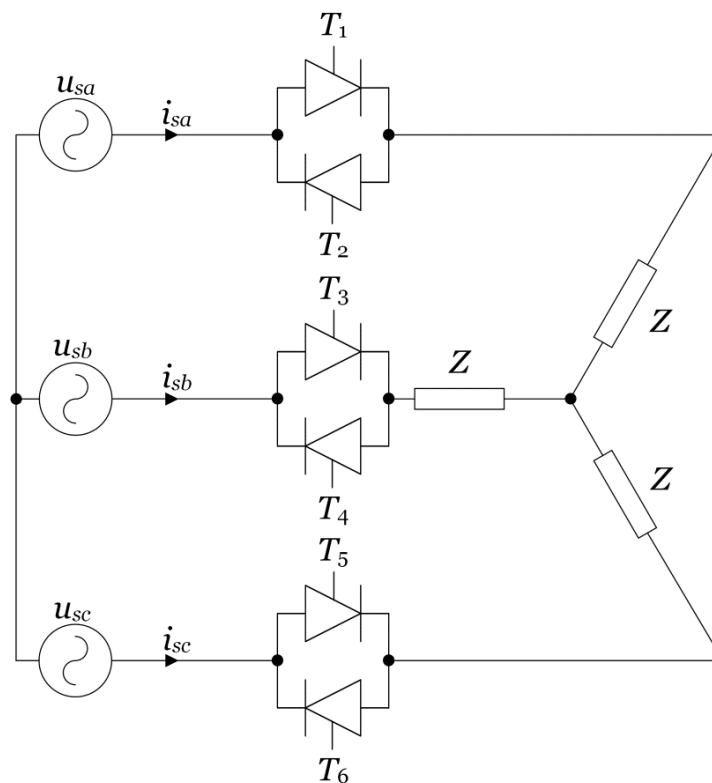
Slika 45 prikazuje valne oblike napona (u_s) i struje (i_s) izvora, napona (u_{tr}) i struje (i_{tr}) na trošilu te upravljačkog signala tiristora T_1 (i_{g-T1}) i T_2 (i_{g-T2}) jednofaznog izmjeničnog pretvarača napona opterećenog radnim trošilom. Napon izvora u_s ima sinusni valni oblik, a napon u_{tr} jednak je nuli na početku pozitivnog poluperioda. Na početku pozitivnog poluperioda tiristor T_1 nalazi se u stanju blokiranja dok se tiristor T_2 nalazi u stanju zapiranja. U trenutku kada tiristor T_1 dobije pozitivan impuls (I_g) na upravljačku elektrodu, ovaj tiristor provede i napon na trošilu postaje jednak naponu izvora. Kada će tiristor dobiti impuls, ovisi o kutu vođenja tiristora (α). To je kut od ulaska tiristora u stanje blokiranja do dobivanja impulsa na upravljačkoj elektrodi. Za primjer, na slici 45 kut upravljanja je 30° ($\pi/6$). Nakon što tiristor T_1 provede, on nastavi voditi tijekom pozitivnog poluperioda. Kada napon u_s postane negativan, tiristor T_1 zapire, a tiristor T_2 blokira. Kut upravljanja tiristora T_2 u pravilu je isti kao i kut upravljanja tiristora T_1 kako bi se izbjegla istosmjerna komponenta u izlaznom naponu. Kada tiristor T_2 dobije impuls I_g na upravljačku elektrodu, on provede i napon na trošilu jednak je naponu izvora. Struja trošila i_{tr} ima sličan valni oblik kao i napon samo skaliran s obzirom na iznos otpora trošila R .



Slika 45. Valni oblici napona i struje jednofaznog izmjeničnog pretvarača napona

Na temelju slike 45 može se zaključiti da je efektivna vrijednost napona u_{tr} niža od efektivne vrijednosti napona izvora u_s zbog blokiranja tiristora kada vrijedi $u_{tr} = 0$. Dalje, ako se izbjegne blokiranje, odnosno ako tiristori dobiju upravljački signal odmah nakon što uđu u stanje blokiranja, napon u_{tr} bio bi jednak naponu u_s . Međutim, ni u kom slučaju napon na trošilu ne može biti veći od napona na izvoru, što je karakteristika ovog pretvarača.

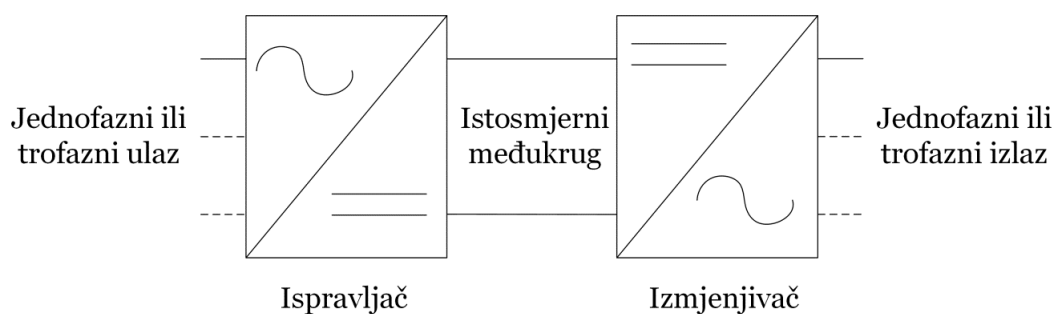
Trofazni izmjenični pretvarač u spoju zvijezda prikazan je na slici 46. Taj pretvarač sastoji se od šest antiparalelno spojenih tiristora pri čemu se po dva koriste za svaku fazu. Trošila i izvori mogu biti spojeni u zvijezdu ili u trokut.



Slika 46. Trofazni izmjenični pretvarač napona u spoju zvijezda

4.2. Izmjenični pretvarači napona i frekvencije

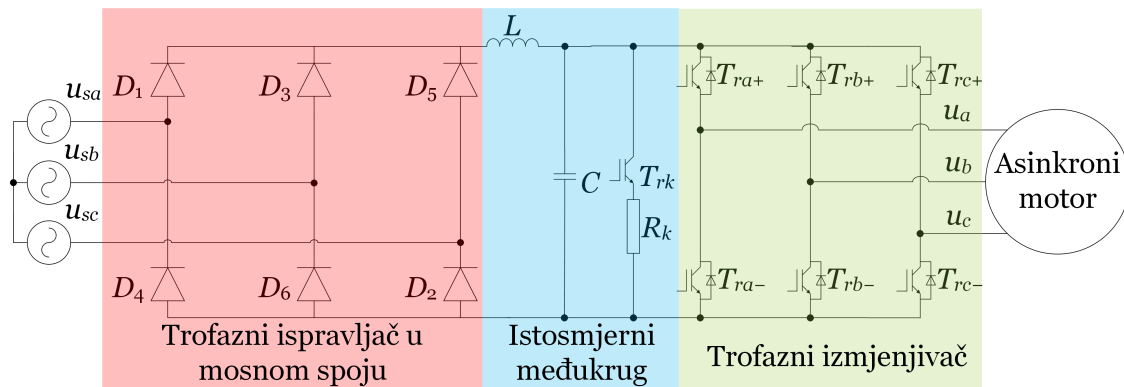
Načelna shema izmjeničnog pretvarača napona i frekvencije prikazana je na slici 47. Kod ovog pretvarača najprije se ulazni jednofazni ili trofazni napon ispravlja pomoću ispravljača te se dobije istosmjerni napon u istosmjernom međukrugu. Dalje se taj istosmjerni napon pretvara u izmjenični napon željene amplitude i frekvencije korištenjem jednofaznog ili trofaznog izmjenjivača.



Slika 47. Načelna shema izmjeničnog pretvarača napona i frekvencije

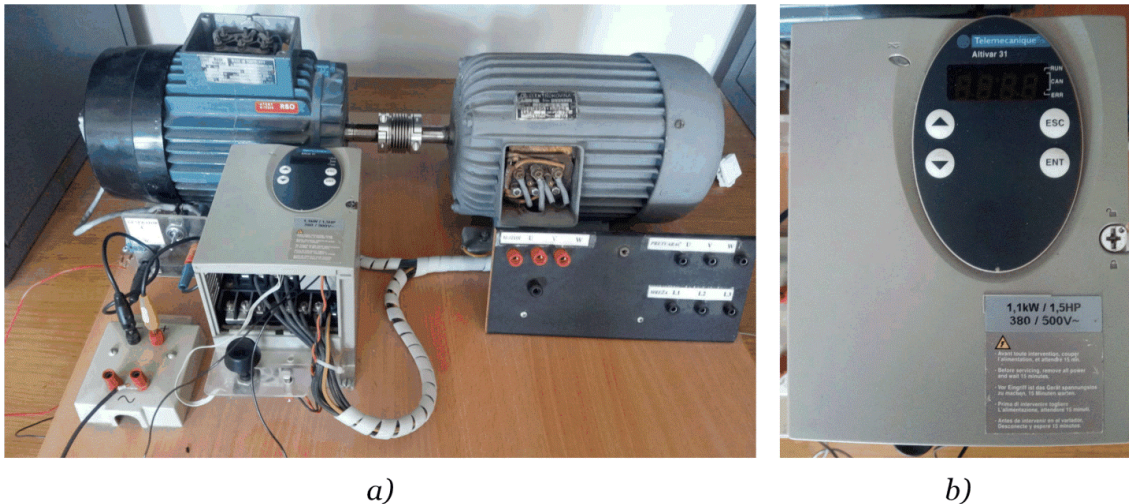
Na slici 48 prikazana je shema trofaznog pretvarača napona i frekvencije koji služi za napajanje asinkronog motora (Abu-Rub, Malinowski i Al-Haddad, 2014, str. 665). Pretvarač se napaja iz izmjenične mreže koja ima napone (u_{sa} , u_{sb} , u_{sc}) koji se ispravljaju korištenjem trofaznog ispravljača u mosnom spoju. S obzirom na to da je valovanje napona na izlazu ovog ispravljača veliko, u istosmjerni međukrug implementiran je LC filter koji filtrira ispravljeni napon. Taj filtrirani napon dovodi se na ulaz izmjenjivača, a regulacijski sustav izmjenjivača upravlja momentom ili brzinom vrtnje asinkronog motora promjenom amplitude i frekvencije napona kojim se napaja asinkroni motor.

U istosmjernom međukrugu na slici 48 postoji tranzistor T_{rk} sa serijski spojenim otpornikom R_k . Taj sklop služi za disipaciju (trošenje) energije koja nastane tijekom kočenja asinkronog motora. Tijekom kočenja motora energija se vraća iz motora u istosmjerni međukrug, međutim, kako se ona preko dioda ne može vratiti u mrežu, mora se disipirati u istosmjernom međukrugu. Tada se uklapa tranzistor T_{rk} koji je inače isklapljen, i energija kočenja disipira se na otporniku R_k .



Slika 48. Shema trofaznog pretvarača napona i frekvencije koji služi za napajanje asinkronog motora

Slika 49a prikazuje fotografiju grupe asinkroni motor-generator pri čemu se motor napaja iz pretvarača napona i frekvencije. Asinkroni motor vrti generator koji generira električnu energiju, a opterećenje motora može se povećati tako što se generator optereti pomoću npr. otpornika. Pretvarač frekvencije osigurava da brzina vrtnje asinkronog motora bude konstantna bez obzira na to koliko je opterećenje motora nastalo zbog opterećenja generatora. Slika 49b prikazuje fotografiju natpisne pločice pretvarača napona i frekvencije na kojoj se može očitati nazivna snaga pretvarača od 1,1 kW te nazivni linijski napon koji se kreće u rasponu od 380 V do 500 V.



Slika 49. Fotografija grupe asinkroni motor-generator pri čemu se motor napaja iz pretvarača napona i frekvencije (a), fotografija natpisne pločice pretvarača (b)

Pitanja i zadatci za ponavljanje

1. Koja je zadaća izmjeničnih pretvarača?
2. Što su pretvarači napona, a što pretvarači napona i frekvencije?
3. Nacrtajte simbol i označite priključne stezaljke tiristora.
4. Što je tiristor i u kojim stabilnim stanjima može biti?
5. Kolika struja teče kroz tiristor kada se on nalazi u stanju blokiranja?
6. Nacrtajte shemu jednofaznog pretvarača napona opterećenog radnim trošilom. Kako se može mijenjati iznos izlaznog napona tog pretvarača?
7. Nacrtajte shemu trofaznog izmjeničnog pretvarača napona u kojem su izvori i trošila spojena u zvijezdu.
8. Nacrtajte shemu trofaznog izmjeničnog pretvarača napona u kojem su izvori spojeni u zvijezdu, a trošila u trokut.
9. Nacrtajte načelnu shemu izmjeničnog pretvarača napona i frekvencije.
10. Koja se dva podatka u pravilu nalaze na natpisnoj pločici pretvarača napona i frekvencije?

Popis elemenata korištenih u sadržaju

Slika 1. Simbol diode s označenim priključnim stezaljkama	11
Slika 2. Strujni krug u kojem dioda vodi struju (a) i strujni krug u kojem dioda zapire (b)	11
Slika 3. Strujno-naponska karakteristika idealne diode	12
Slika 4. Strujno-naponska karakteristika realne diode	13
Slika 6. Strujnonaponska karakteristika idealnog tiristora	14
Slika 7. Poluvalni neupravljivi ispravljač opterećen radnim trošilom	15
Slika 8. Valni oblici napona i struje poluvalnog neupravljivog ispravljača opterećenog radnim trošilom	16
Slika 9. Poluvalni neupravljivi ispravljač opterećen radno-induktivnim trošilom	17
Slika 10. Valni oblici napona i struje poluvalnog neupravljivog ispravljača opterećenog radno-induktivnim trošilom	18
Slika 11. Poluvalni upravljivi ispravljač opterećen radnim trošilom	18
Slika 12. Valni oblici napona i struje poluvalnog upravljivog ispravljača opterećenog radno-induktivnim trošilom	19
Slika 13. Punovalni neupravljivi ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom	20
Slika 14. Tok struje punovalnog neupravljivog ispravljača u mosnom spoju tijekom pozitivnog (a) i negativnog (b) poluperioda ulaznog signala	21
Slika 15. Valni oblici napona i struje punovalnog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom	21
Jednadžba 4. Srednja vrijednost ispravljenog napona punovalnog ispravljača u mosnom spoju	22
Slika 16. Punovalni ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom s izlaznim kondenzatorom	22
Slika 17. Valni oblici napona i struje punovalnog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom s izlaznim kondenzatorom	23
Slika 18. Punovalni upravljivi ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom u spoju s četiri tiristora (a) i dva tiristora i dvije diode (b)	24
Slika 19. Valni oblici napona i struje punovalnog upravljivog ispravljača u mosnom spoju opterećenog radnim trošilom	24
Slika 20. Trofazni neupravljivi ispravljač u spoju sa srednjom točkom	25
Slika 21. Trofazni neupravljivi ispravljač u mosnom spoju opterećen radnim trošilom	26
Slika 22. Fotografija trofaznog ispravljača u mosnom spoju	27
Slika 23. Simboli: tranzistora u shemama (a), bipolarnog tranzistora (b), IGBT-a (c), MOSFET-a (d)	31
Slika 24. Izlazna strujno-naponska karakteristika bipolarnog tranzistora i IGBT-a (a) te MOSFET-a (b)	32
Slika 25: IGBT s porednom diodom	32
Slika 26. Pulsno-širinska modulacija	33
Slika 27. Jednofazni autonomni izmjenjivač u polumosnom spoju	34
Slika 28. Generiranje napona trošila jednofaznog autonomnog izmjenjivača u polumosnom spoju	35
Slika 29. Jednofazni autonomni izmjenjivač u mosnom spoju	36
Slika 30. Jednofazni autonomni izmjenjivač u mosnom spoju s ucrtanim smjerovima struje kroz trošilo	37
Slika 31. Generiranje napona trošila jednofaznog autonomnog izmjenjivača u mosnom spoju	37
Slika 32. Trofazni autonomni izmjenjivač	38
Slika 33. Istosmjerni silazni pretvarač (a) te valni oblici izlaznog napona pretvarača (b)	43

Slika 34. Istosmjerni silazni pretvarač s LC filtrom	44
Slika 35. Istosmjerni silazni pretvarač s LC filtrom i ucrtanim tokovima struje	44
Slika 36. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog silaznog pretvarača pri $D = 0,5$	45
Slika 37. Istosmjerni uzlazni pretvarač	46
Slika 38. Istosmjerni uzlazni pretvarač s ucrtanim tokovima struje	47
Slika 39. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog uzlaznog pretvarača pri $D = 0,5$	47
Slika 40. Istosmjerni silazno-uzlazni pretvarač	48
Slika 41. Istosmjerni silaznouzlazni pretvarač s ucrtanim tokovima struje	49
Slika 42. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog silaznouzlaznog pretvarača pri $D = 0,3$	49
Slika 43. Valni oblici karakterističnih veličina istosmjernog silaznouzlaznog pretvarača pri $D = 0,7$	50
Slika 44. Jednofazni izmjenični pretvarač napona opterećen radnim trošilom	55
Slika 45. Valni oblici napona i struje jednofaznog izmjeničnog pretvarača napona	56
Slika 46. Trofazni izmjenični pretvarač napona u spoju zvijezda	57
Slika 47. Načelna shema izmjeničnog pretvarača napona i frekvencije	57
Slika 48. Shema trofaznog pretvarača napona i frekvencije koji služi za napajanje asinkronog motora	58
Slika 49. Fotografija grupe asinkroni motor-generator pri čemu se motor napaja iz pretvarača napona i frekvencije (a), fotografija natpisne pločice pretvarača (b)	59
Jednadžba 1. Napon izmjeničnog izvora	16
Jednadžba 2. Srednja vrijednost ispravljenog napona poluvalnog ispravljača	17
Jednadžba 3. Srednja vrijednost ispravljenog napona poluvalnog upravljivog ispravljača	19
Jednadžba 5. Srednja vrijednost ispravljenog napona punovalnog upravljivog ispravljača u mosnom spoju	25
Jednadžba 6. Srednja vrijednost ispravljenog napona trofaznog ispravljača u spoju sa srednjom točkom	26
Jednadžba 7. Srednja vrijednost ispravljenog napona trofaznog ispravljača u mosnom spoju	26
Jednadžba 8. Indeks amplitudne modulacije	35
Jednadžba 9. Indeks frekvencijske modulacije	35
Jednadžba 10. Vršna vrijednost osnovnog harmonika napona na trošilu jednofaznog autonomnog izmjenjivača u polumosnom spoju	36
Jednadžba 11. Vršna vrijednost osnovnog harmonika-napona na trošilu jednofaznog autonomnog izmjenjivača u mosnom spoju	38
Jednadžba 12. Vršna vrijednost osnovnog harmonika-faznog napona na trošilu trofaznog autonomnog izmjenjivača	38
Jednadžba 13. Faktor vođenja tranzistora	43
Jednadžba 14. Srednja vrijednost napona na trošilu istosmjernog silaznog pretvarača	45
Jednadžba 15. Srednja vrijednost napona na trošilu istosmjernog uzlaznog pretvarača	47
Jednadžba 16. Srednja vrijednost napona na trošilu istosmjernog silaznouzlaznog pretvarača	48

Popis literature

- 1 Abu-Rub H., Malinowski M. i Al-Haddad K. (2014). *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- 2 Bose, K. B. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.
- 3 Kassakaian J.G., Schlecht M. F. i Verghese G. C. (1991). *Osnove učinske elektronike I. dio Topologije i funkcije pretvarača*. Boston, USA: Addison-Wesley Publishing Company.
- 4 Mohan N., Undeland T. M. i Robbins W. P. (2003). *Power electronics converters, applications and design*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- 5 Rashid M. H. (2011). *Power electronics handbook devices, circuits, and applications*. Amsterdam Netherlands: Elsevier.
- 6 Trzynadlowski A. M. (2016). *Introduction to modern power electronics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.



EduSplit Obrtna tehnička škola
Regionalni centar kompetentnosti Split



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.

Za više informacija o EU fondovima molimo pogledajte web-stranicu
Ministarstva regionalnoga razvoja i fondova Europske unije.
www.strukturnifondovi.hr