

Naponsko frekvencijski pretvarači i primjene

Katarina, Denis

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:782713>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-19**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

Naponsko frekvencijski pretvarači i primjene

Završni rad

Denis Katarina

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 25.09.2023.

Ime i prezime studenta:	Denis Katarina
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4688, 22.07.2019.
Turnitin podudaranje [%]:	13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Naponsko frekvencijski pretvarači i primjene**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Tomislav Barić

i sumentora ,

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:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 14.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Denis Katarina
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4688, 22.07.2019.
OIB Pristupnika:	76987896406
Mentor:	prof. dr. sc. Tomislav Barić
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Naponsko frekvencijski pretvarači i primjene
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	U završnom radu potrebno je izložiti i opisati način rada frekvencijskih i naponsko-frekvencijskih pretvarača i područja njihove primjene u elektromotornim pogonima. Prikazati i opisati tipične električne sheme frekvencijskih i naponsko-frekvencijskih pretvarača. Izlaganje je potrebno poduprijeti shemama konkretnih realizacija frekvencijskih i naponsko-frekvencijskih pretvarača s pojašnjenjem rada pojedinih
Prijedlog ocjene završnog rada:	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	14.09.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	24.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1 Opis zadatka.....	1
2. Električki strojevi	2
2.1. Sinkroni strojevi.....	3
2.2. Asinkroni strojevi.....	7
3. Frekvencijski pretvarači	11
3.1. Primjena frekvencijski pretvarača	12
3.2. Upravljanje frekvencijskim pretvaračima	13
3.2.1 Skalarno upravljanje	13
3.2.2. Vektorska regulacija.....	17
4. Podjela frekvencijskih pretvarača	18
4.1. Izravni pretvarači	19
4.1.1 Ciklopretvarači.....	20
4.1.2 Matrični pretvarači	25
4.2. Neizravni frekvencijski pretvarači.....	25
4.2.1. Ispravljač.....	27
4.2.1.1. Neupravljivi ispravljači	29
4.2.1.2. Punoupravljivi ispravljač	30
4.2.2. Istosmjerni međukrug.....	31
4.2.2.1. Strujni međukrug (s utisnom strujom).....	32
4.2.2.2. Naponski međukrug	32
4.2.3. Izmjenjivač.....	35
4.2.3.1. Izmjenjivači napajani istosmjernom strujom promjenjive amplitude	36
4.2.3.2. Izmjenjivač napajani konstantnim ili promjenjivim naponom istosmjernog međukruga	37
4.2.4 Modulacija širine impulsa - PWM.....	38
3.2.4.1. Sinusni PWM	39
4.2.4.2 Asinkrona i sinkrona modulacija širine impulsa	40
4.2.5 Upravljački sklop	41
5. Zaključak.....	43
Literatura:	44
SAŽETAK.....	47

1.Uvod

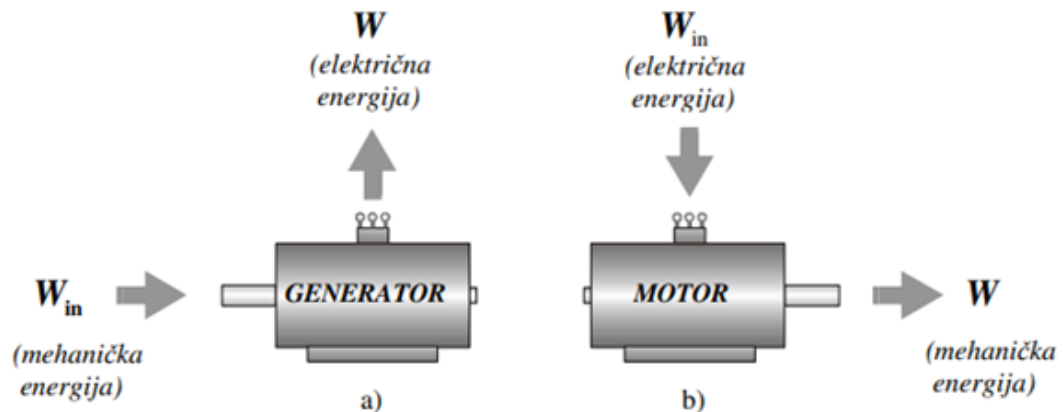
Frekvencijski pretvarači pretvaraju ulazni napon bio on izmjeničan ili istosmjernan određen svojom amplitudom i frekvencijom u napon amplitude i frekvencije koju zahtjeva trošilo koje napajamo ili mreža u koju injektiramo energiju. Primjerice pri kontinuiranom upravljanju brzine vrtnje asinkronog motora napajanog iz gradske mreže ulazni napon biti će izmjeničan jedne frekvencije i amplitude, a izlazni napon frekvencijskog pretvarača biti će također izmjeničan ali druge amplitude i frekvencije ovisno o brzini vrtnje i teretu motora. Drugi primjer su solarne panele koje generiraju istosmjerni napon, a frekvencijskim ga pretvaračem pretvaramo u izmjeničan. Tako da frekvencijski pretvarači imaju raznovrsne primjene ali mi ćemo se usredotočiti na elektromotore, točnije na trofazne asinkrone motore. Asinkroni motori pretvaraju električnu energiju u mehaničku i najrašireniji su tj. imaju najviše primjene od svih drugih vrsta motora. Sve do razvoja frekvencijskih pretvarača nije bilo moguće mijenjati brzinu vrtnje asinkronih motora na ekonomičan način što je ključ za automatizaciju proizvodnih procesa. Naime automatizacija proizvodnog procesa sa sobom donosi veću produktivnost uz smanjenje troškova proizvodnje što je cilj svakog proizvodnog procesa. Imamo dvije podjele frekvencijskih pretvarača na izravne i neizravne. Najveća je razlika osim cijene pretvarača leži u broju pretvorbi koje pretvarači obavljaju. Izravni pretvarači obavljaju jednu tj. direktnu pretvorbu, time su i jeftiniji, a neizravni pretvarači obavljaju dvije pretvorbe, prvo u istosmjerni napon pa onda u izmjenični ali su puno napredniji s obzirom na upravljanje i zaštitu motora i pretvarača. Kroz ovaj rad, točnije u drugom poglavlju, upoznati ćemo osnove električnog stroja, njegove dijelove i način rada. U trećem poglavlju povezat ćemo osnove električnih strojeva s načinima na koje možemo upravljati njima naponsko frekvencijskim pretvaračem. Cijelo četvrto poglavlje baviti će se analizom shema i formula naponsko frekvencijskih pretvarača, metodama modulacije upravljačkog sklopa i efektivnosti elektromotorskog pogona.

1.1 Opis zadatka

U završnom radu potrebno je izložiti i opisati način rada frekvencijskih i naponsko-frekvencijskih pretvarača i područja njihove primjene u elektromotornim pogonima. Prikazati i opisati tipične električne sheme frekvencijskih i naponsko-frekvencijskih pretvarača. Izlaganje je potrebno poduprijeti shemama konkretnih realizacija frekvencijskih i naponsko-frekvencijskih pretvarača s pojašnjenjem rada pojedinih komponenti. Prokomentirati valne oblike napona na izlazu iz frekvencijskih i naponsko-frekvencijskih pretvarača. Opisati upravljanje frekvencijskim i naponsko-frekvencijskim pretvaračima.

2. Električki strojevi

Električki strojevi su elektromehanički uređaji koji dovedenu električnu energiju pretvaraju u mehaničku i obratno [1]. Tako razlikujemo motor i generator. Ako je na stroj dovedena tj. ulazna energija mehanička, na primjer turbina koju pokreće protok vode, onda je izlazna energija električna i riječ je o generatoru (Slika 2.1. a)), a u slučaju dovedene električne energije onda je izlazna mehanička i riječ je o motoru (Slika 2.1. b)).



Slika 2.1. Pretvoba energije u električnom stroju: a) generator, b) motor. [2]

Rad električnog stroja kao generator ili motor ovisi o načinu uporabe samog stroja. Razlog tomu je da motori i generatori funkcioniraju na istom principu te nema velike konstrukcijske razlike između njih [1]. Pretvorba energije obavlja se preko magnetskog polja i ulazna energija je uvijek strogo manja od izlazne energije zbog postojanja gubitaka samog stroja [2]. Ekonomičnost stroja određuje se omjerom ulazne i izlazne radne snage i naziva se stupanj djelovanja [2]:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} < 1. \quad (2-1)$$

Gdje je:

P_{iz} – izlazna radna snaga

P_{ul} – ulazna radna snaga

Za pretvorbu energije u električnom stroju potrebno je relativno gibanje vodiča, kojim protječe električna struja, prema okretnom magnetskom polju. Rad svakog električnog stroja analiziramo primjenom ova tri temeljna zakona elektrotehnike, a to su [2]:

– opći zakon indukcije (Faradayev zakon)

$$e = - \frac{d\Phi(t)}{dt}. \quad (2-2)$$

Gdje je: e – inducirana elektromotorna sila [V], Φ – magnetski tok [Wb]

– zakon protjecanja (Ampereov zakon protjecanja)

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \theta. \quad (2-3)$$

Gdje je: \vec{H} – vektor jakosti magnetskog polja [A/m], \vec{l} – vektor duljine magnetske silnice [m],
 θ – protjecanje [A]

– zakon sile u magnetskom polju (Ampereov zakon sile na vodič u magnetskom polju)

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}). \quad (2-4)$$

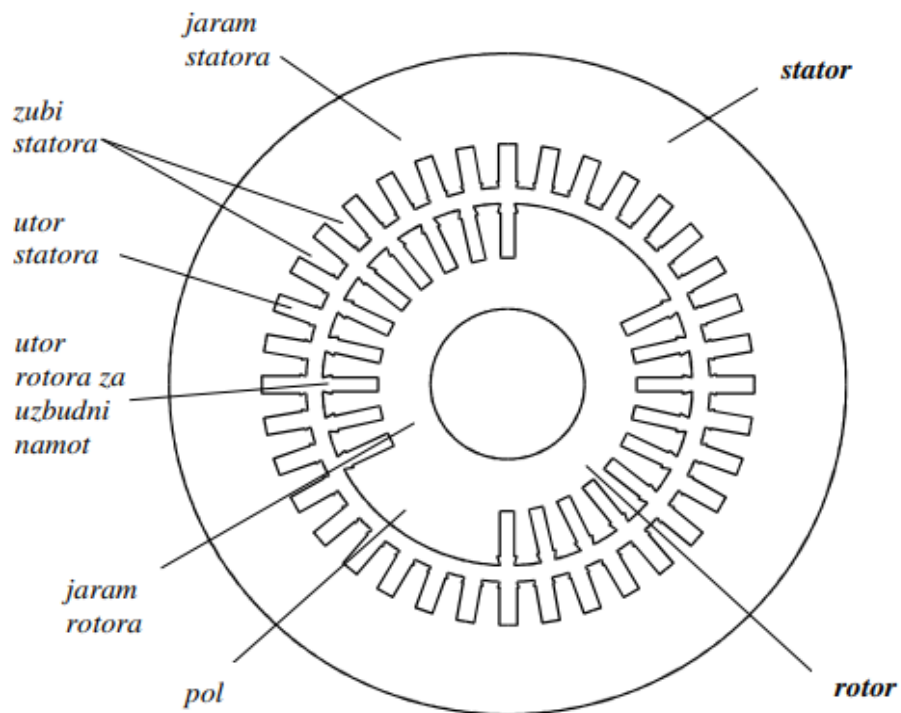
\vec{F} – vektor sile na vodič [N], I – struja, efektivna vrijednost [A], \vec{l} – vektor duljine magnetske silnice [m], \vec{B} – vektor magnetske indukcije [T]

2.1. Sinkroni strojevi

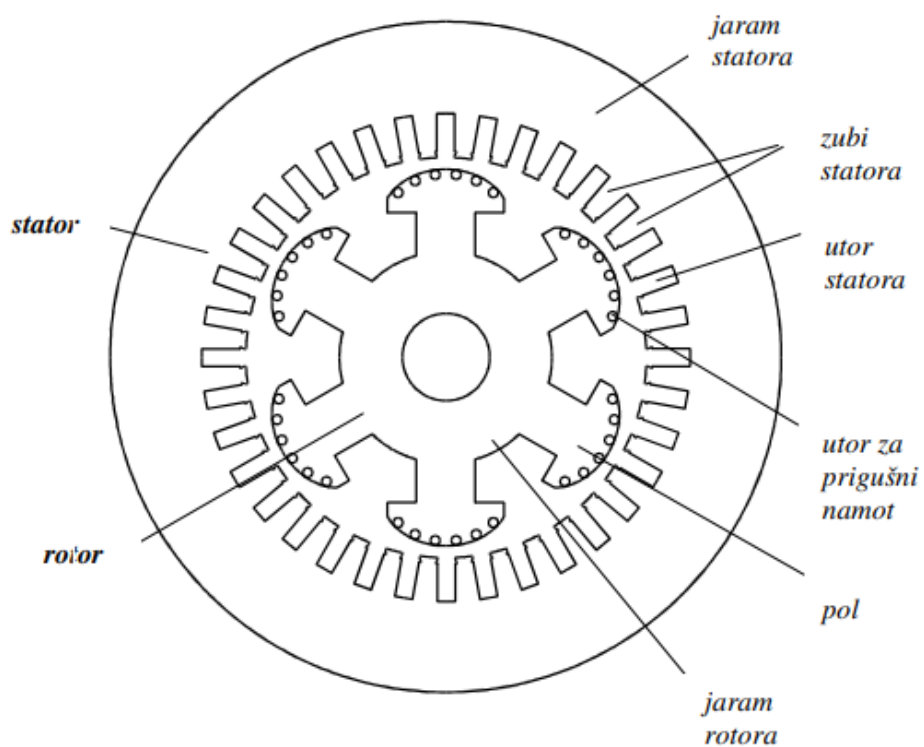
Sinkroni stroj je specifičan po tome što se kao motor ili generator može spojiti na napojnu mrežu tek onda kada rotor ostvari sinkronu brzinu tj. brzinu vrtnje okretnog magnetskog polja koje diktiraju struje statora. Sinkrona brzina n_s određena je frekvencijom napona napajanja f i brojem pari polova p stroja prema izrazu (2-5) [2].

$$n = n_s = \frac{60f}{p}. \quad (2-5)$$

Broj pari polova stroja određen je pri konstrukciji sinkronog stroja tako da najbolje odgovara pogonu u kojem će raditi. Najbolji primjer tomu jesu različite izvedbe sinkronih generatora koji se koriste kao temelj elektroenergetskog sustava današnjice, prema tome razlikujemo turbogeneratore, hidrogeneratore i dizelske generatore. Ovi sinkroni generatori dizajnirani su specifično za svoja područja rada i razlikuju se u konstrukciji da bi bili najefikasniji i sigurniji za njihov način uporabe. Turbogeneratori su tako brzohodni strojevi pogonjeni parnim ili plinskim turbinama koje se vrte velikom brzinom, stoga zbog velikih centrifugalnih sila oni se izvode s cilindričnim rotorom, slika 2.2., te su najčešće brzine takvih turbogeneratora 3000 o/min za dvopolne i 1500 o/min za četveropolne generatore [2].



Slika 2.2. Željezna jezgra sinkronog stroja s 2 pola i cilindričnim rotorom [2]



Slika 2.3. Željezna jezgra sinkronog stroja sa 6 polova i istaknutim polovima [2]

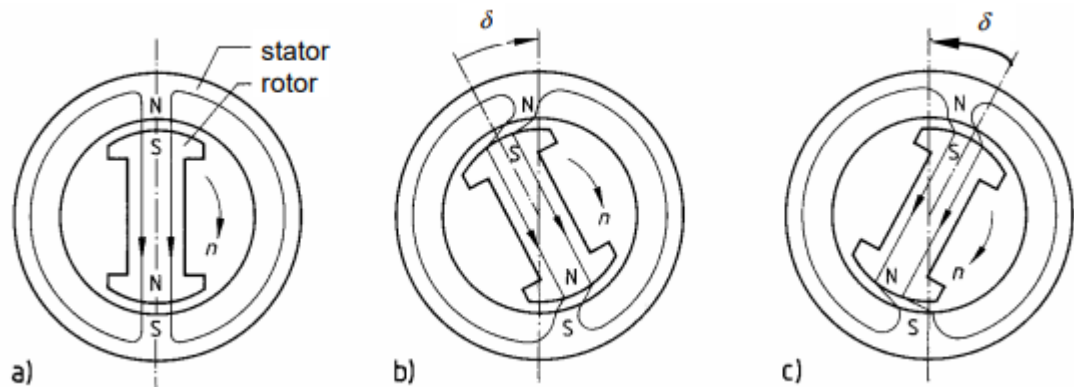
Hidrogeneratori su sporohodni strojevi s istaknutim polovima koje pogoni vodna turbina, a kako brzina vrtnje turbine ovisi o pritisku i količini vode imamo veći raspon mogućih sinkronih brzina od 50 o/min do 1000 o/min. Naravno za svaku brzinu vrtnje po izrazu (2-5) imamo drugačiji sinkroni stroj za istu frekvenciju mreže. Na primjer slučaj gdje imamo brzinu vrtnje turbine 50 o/min i za frekvenciju od 50 Hz potreban par polova hidrogeneratora prema izrazu (2-5) iznosi $p = 60$, odnosno taj sinkroni stroj mora imati 120 polova $2p = 120$ [2].

Sinkroni stroj se priključuje na mrežu konstantnog napona i frekvencije onda kada se ispune potrebni uvjeti, a to su [3]:

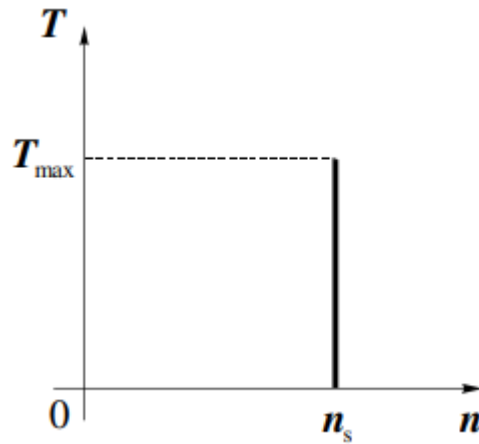
- brzina vrtnje stroja jednaka je frekvenciji mreže (sinkrona brzina),
- napon koji se inducira u stroju jednak je po iznosu naponu mreže,
- napon stroja jednak je naponu mreže po faznom položaju,
- redoslijed faza generatora odgovara redoslijedu faza mreže.

Ovaj postupak postizanja potrebnih uvjeta naziva se sinkronizacijom, a provodi se sinkronizacijskim uređajem [3].

Svaki sinkroni stroj opterećen momentom na osovini prelazi u motorski rad. Rotor će se i dalje vrtjeti sinkronom brzinom ali će zaostajati za položajem neopterećenog statora za određeni kut δ koji ovisi o momentu tereta (Slika 2.4. b)) [3].



Slika 2.4. Načelo rada sinkronog stroja: a) prazni hod, b) motorski rad, c) generatorski rad. [3]



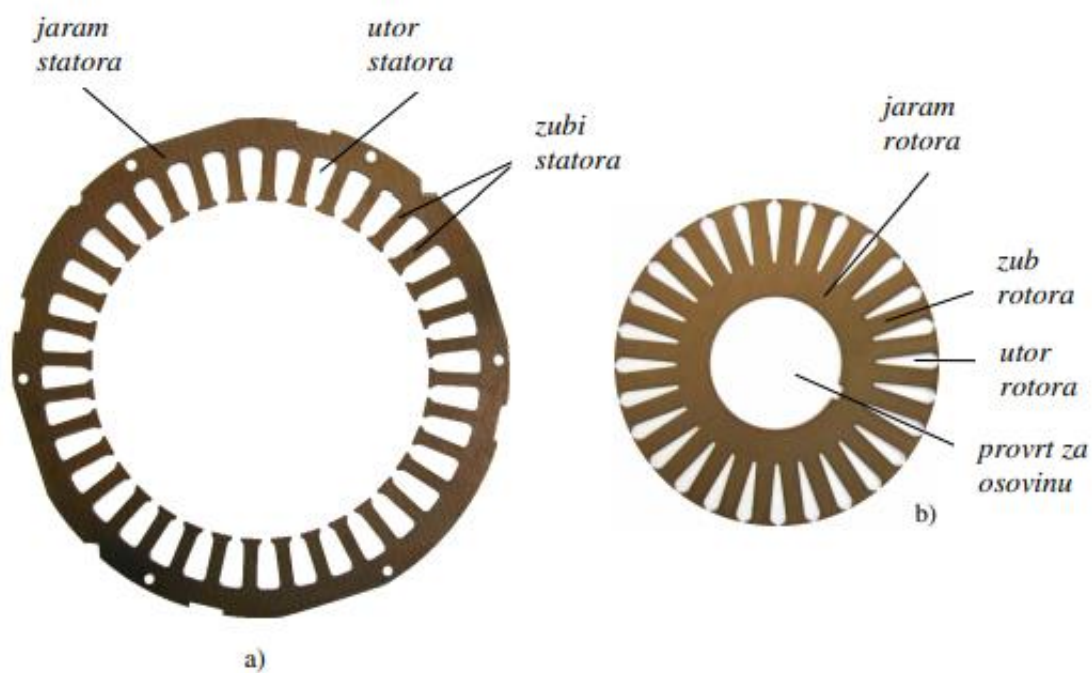
Slika 2.5. Karakteristika momenta sinkronog motora [3]

Sinkroni motor može raditi isključivo na sinkronoj brzini vrtnje n_s kao što vidimo na slici 2.5. i maksimalni teret ne smije preći T_{\max} jer u tom slučaju motor ispada iz sinkronizma [2]. Kao i kod generatora mijenjanjem struje uzbuđivanja mijenja se kut opterećenja δ uz konstantni T_{\max} . Povećanjem uzbuđivanja kut opterećenja δ opada, a smanjenjem uzbuđivanja on raste [3].

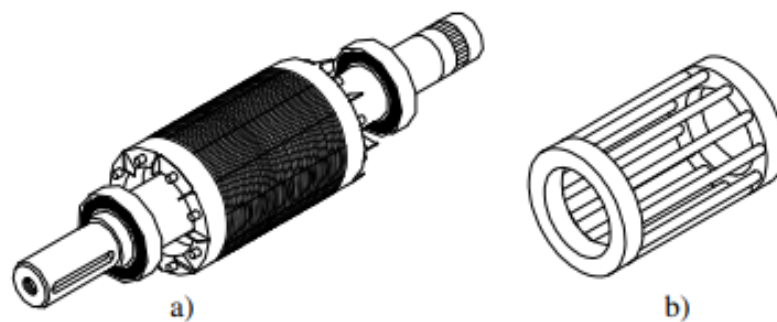
Glavna primjena pretvarača kod sinkronih strojeva je upravo sinkroni generator, gdje se punoupravljivi ispravljač koristi za napajanje uzbuđnog namota sinkronog generatora koji se nalazi na rotoru. Naime mijenjajući struju uzbuđivanja mijenjamo i jakost magnetskog polja odnosno magnetsku indukciju koja je proporcionalna induciranom naponu na armaturi sinkronog generatora. Napajanje za uzbuđivanje uzimamo sa statora tj. armature koja ima tri faze te preko punoupravljivog ispravljača dovodimo napon na rotor generatora kojega možemo modelirati jednim induktivnim trošilom. Pretvaračem mijenjamo srednju vrijednost napona, a s obzirom da se radi o induktivnom trošilu možemo pretpostaviti kako će struja biti konstantna, tako da ultimativno mijenjanjem srednje vrijednosti napona na uzbuđnom namotu reguliramo napon na statoru tj. napon sinkronog generatora [4]. Kako bi napon i frekvencija ostali približno nepromijenjeni pri promjeni opterećenja, nužna je stalna regulacija brzine vrtnje pogonskog stroja i uzbuđivanja [3].

2.2. Asinkroni strojevi

Stator asinkronog stroja gotovo je identičan sinkronome stroju, ima raspoređeni namot koji kada njime poteku trofazne struje stvara okretno magnetsko polje konstante brzine vrtnje i konstantnog iznosa [2]. Rotor asinkronog stroja je ono radi razliku između sinkronog i asinkronog stroja. Najčešće korišteni asinkroni motor je kavezni motor stoga ćemo se njime i baviti. Rotor kaveznog motora sastoji se od neizoliranih simetrično raspoređenih štapova koji su kratko spojeni prstenovima tako da kada izuzmemo željeznu jezgru rotora namot izgleda poput kaveza (Slika 2.7. b)). Rotor funkcionira na način da se u okretnom magnetskom polju u štapovima inducira struja te prema izrazu (2-4) pojavljuje se sila na vodič koja djeluje u smjeru okretnog magnetskog polja.



Slika 2.6. Presjek kaveznog asinkronog stroja: a) stator, b) rotor [2]



Slika 2.7. Kavezni rotor asinkronog stroja: a) rotor, b) kavez [2]

Asinkroni strojevi označavaju sve strojeve čija brzina vrtnje rotora nije ista sinkronoj brzini tj. brzini okretnog magnetskog polja statorskih struja. Naime kada se rotor vrti istom brzinom kao i okretno magnetsko polje nema indukcije tj. nema promjene toka tako da nema ni induciranog napona na rotoru pa je i sila na vodič jednaka nuli [5]. Drugim riječima rotor usporava i to je razlog zbog kojeg je brzina vrtnje asinkronog stroja uvijek manja od sinkrone brzine $n_a < n_s$. Ako definiramo relativnu brzinu rotora n_r u odnosu na sinkronu brzinu n_s [2]:

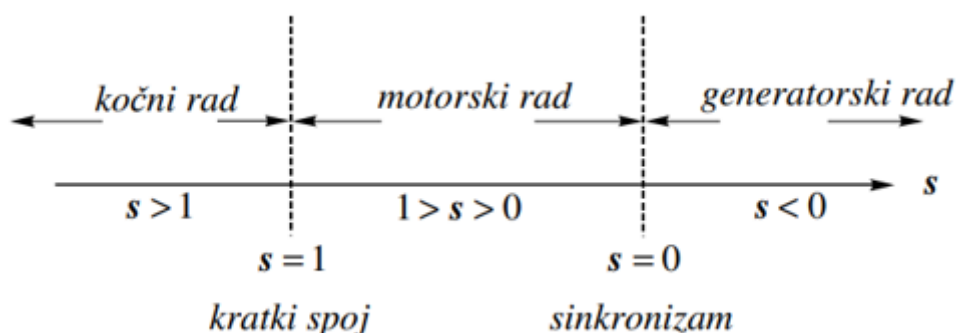
$$n_r = n_s - n_a, \quad (2-6)$$

možemo definirati klizanje s kao omjer relativne brzine rotora n_r i sinkrone brzine n_s [2]:

$$s = \frac{n_r}{n_s} = \frac{n_s - n_a}{n_s}. \quad (2-7)$$

Relativna brzina n_r određuje frekvenciju u rotoru f_r [2]:

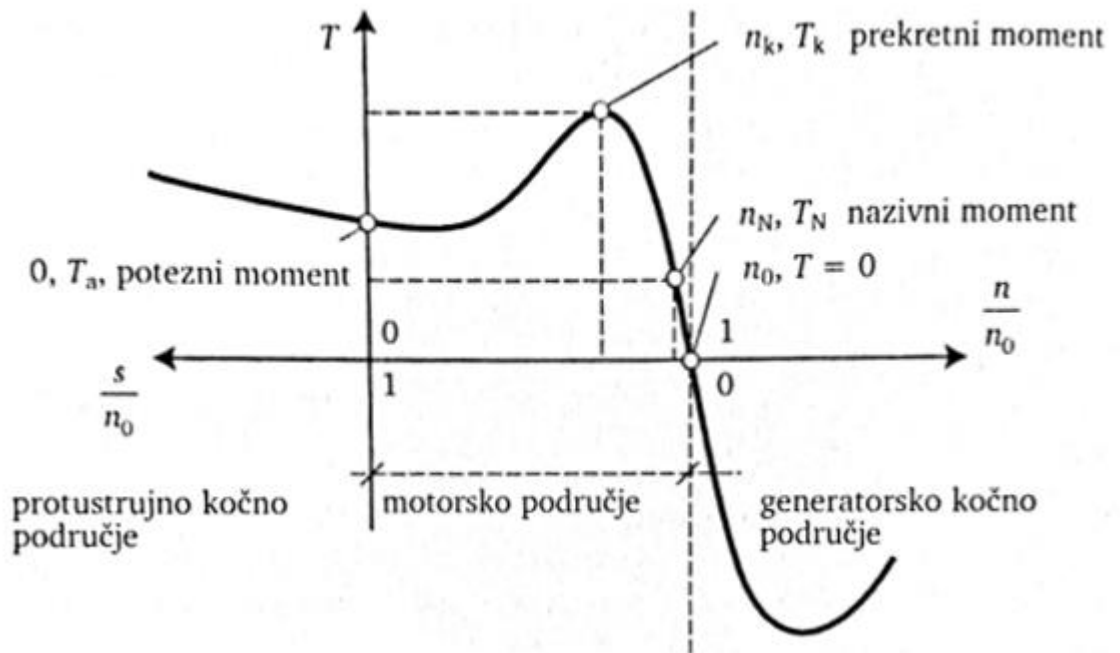
$$f_r = \frac{n_r \cdot p}{60} = \frac{(n_s - n_a) \cdot p}{60}. \quad (2-8)$$



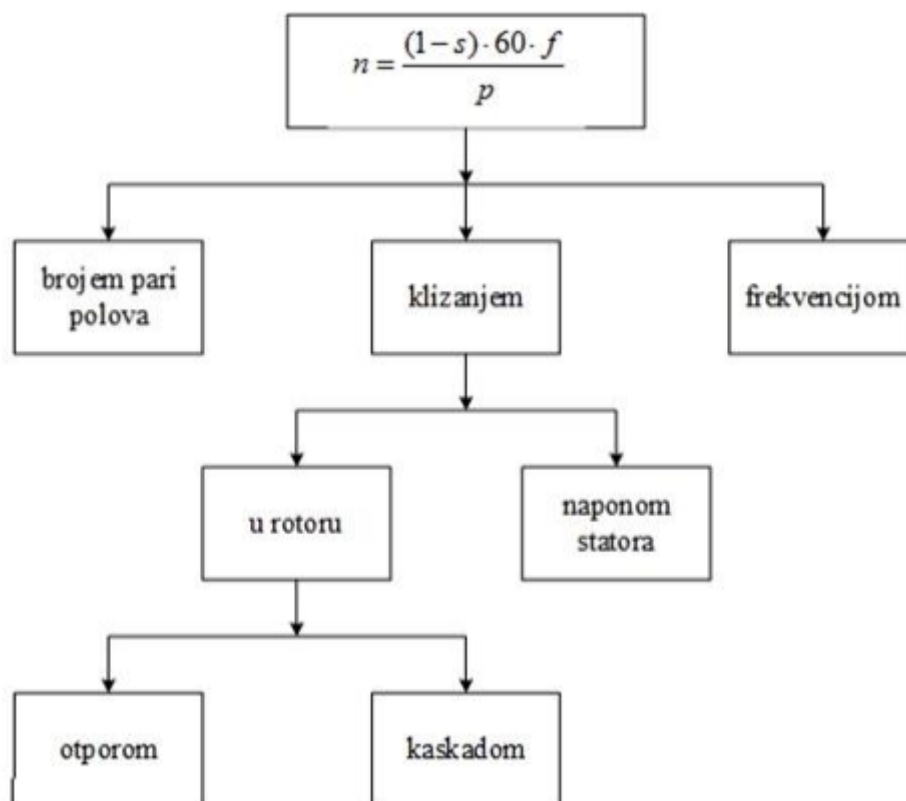
Slika 2.8. Područje rada asinkronog stroja u ovisnosti o klizanju [2]

Kada se vrijednost klizanja asinkronog stroja nalazi u intervalu $1 > s > 0$ tada je riječ o motornom režimu rada što nalazi u I kvadrantu momentne karakteristike (Slika 2.9.). Područje motorskog režima rada prestaje onoga momenta kada se rotor počne vrtjeti brže od sinkrone brzine n_s te tada prelazi u generatorski režim rada. Asinkroni stroj može preći u generatorski režim rada samo kada se vanjskim pogonskim momentom djeluje na rotor stroja i to označava negativnu vrijednost klizanja $s < 0$ te se momentna karakteristika za generatorski režim nalazi u IV kvadrantu. Zadnji režim rada asinkronog stroja predstavlja protustrujno kočenje i ono se odvija kada se rotor vrti u suprotnom smjeru od smjera okretnog polja. Tada klizanje poprima vrijednosti $s > 1$ i

momentna karakteristika se nalazi u II kvadrantu [2, 6]. Pri početku rada motora kada je klizanje $s = 1$ i brzina vrtnje rotora $n_a = 0$ motor razvija potezni moment T_a zatim prekretni moment T_k najveći je moment koji stroj može postići za određeni napon i frekvenciju napajanja i nazivni moment T_n koji motor razvija pri nazivnoj brzini vrtnje n_n [7].



Slika 2.9. Momentna karakteristika asinkronog stroja [7]



Slika 2.9. Načini upravljanja brzinom vrtnje asinkronog stroja [7]

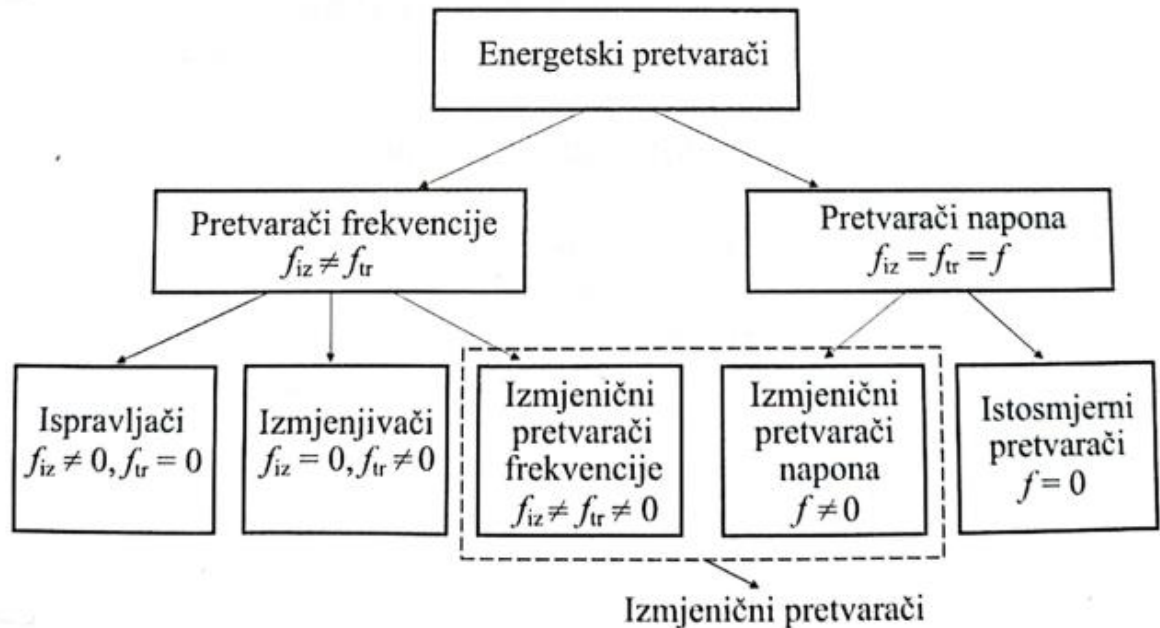
Postoje razni načini upravljanja brzine asinkronog stroja na kao što možemo vidjeti formule [1]:

$$n_a = \frac{(1-s) \cdot 60 \cdot f}{p}, \quad (2-8)$$

brzina rotora asinkronog stroja n_a ovisi o tri varijable: klizanju, brojem pari polova i frekvenciji. U ovome radu detaljno će se obraditi upravljanje brzinom vrtnje asinkronog motora frekvencijom. Upravljanje brzine vrtnje frekvencijom najrašireniji i najučinkovitiji način upravljanja asinkronim motorom zbog brojnih prednosti kao što je omogućavanje automatizacije cijelog pogona te pružanje sigurnost i stabilnosti istog.

3. Frekvencijski pretvarači

Frekvencijski su pretvarači elektronički uređaji koji služe za pretvorbu izmjeničnog napona i frekvencije konstantne vrijednosti u napon i frekvenciju promjenjive vrijednosti i te su neizostavni dio pogona, točnije za kontinuiranu promjenu brzine vrtnje elektromotora u pogonu.



Slika 3.1. Podjela energetskih pretvarača uspoređujući odnos frekvencije izvora f_{iz} i frekvencije trošila f_{tr} [8]

Ispravljači pretvaraju izmjenični napon napojne mreže u istosmjerni, a koriste se za punjače akumulatora, istosmjerni veleprijenos, regulirane istosmjerne EMP i napajanje elektroničnih trošila[8].

Izmjenjivači pretvaraju istosmjerni napon napojne mreže u izmjenični, a primjenjuje se za regulirani izmjenični EMP napajan iz istosmjerne napojne mreže i napajanje osjetljivih trošila u izmjeničnim sustavima neprekidnog napajanja [8].

Izmjenični pretvarači frekvencije pretvaraju izmjenični napon jedne frekvencije u izmjenični napon druge frekvencije, a područja primjene su regulirani izmjenični EMP napajan iz napojne mreže fiksne frekvencije i tvorba izmjeničnog sustava fiksne frekvencije iz izvora varijabilne frekvencije [8].

3.1. Primjena frekvencijski pretvarača

Izmjenični motor kojega izravno priključujemo na napojnu mrežu ima optimalne radne uvijete isključivo u nazivnoj radnoj točki, dok isti taj motor priključen preko frekvencijskog pretvarača na napojnu mrežu ima optimalne radne uvijete pri svakoj brzini vrtnje i teretu motora.[9]

Uvijek je bio cilj, ali posebno se naglašava u zadnjih par godina, da je potrebno potrošiti što je moguće manje energije za određeni proces ili djelatnost. Frekvencijski pretvarač nam pruža mogućnost da u svakom momentu koristimo točno onoliko energije koliko je potrebno za uspješan rad pogona, što je u nekim slučajevima kao što je pogon centrifugalne crpke gdje snaga raste eksponencijalno s obzirom na brzinu vrtnje znatna količina energije [6].

U svakoj proizvodnji imamo mnoštvo parametara na koje utječe kvaliteta krajnjeg proizvoda i neki od tih parametara nisu konstanti što na kraju utječe na smanjenje kvalitete ili neupotrebljivost samog proizvoda. Uvođenjem frekvencijskog pretvarača u takav pogon omogućilo bi mogućnost kontrole nekolicinu tih promjenjivih parametara te bi došlo do povećanja proizvodnje, smanjenja škarta, a time bi i potrošnja materijala bila bi manja [6].

Mekano pokretanje elektromotora s postupnim povećavanjem frekvencije znatno smanjuje naprezanje samog elektromotora. Prilikom pokretanja elektromotora struja može biti do desetak puta veća od nazivne, no uvođenjem frekvencijskog pretvarača možemo ograničiti tu struju te produžiti vijek trajanja elektromotora [10].

Frekvencijski pretvarači zahtijevaju minimalno održavanje i produljuju životni vijek cijelog postrojenja npr. u vodoopskrbnim sustavima prilikom izravnog isključivanja napajanja crpnih motora nastaje vodeni udar koji može oštetiti cjevovod [11].

3.2. Upravljanje frekvencijskim pretvaračima

Upravljanje frekvencijskim pretvaračima zapravo označava upravljanje brzinom vrtnje elektromotornih pogona i to najčešće je riječ o trofaznim izmjeničnim motorima. Osnovna su dva načela upravljanja brzinom trofaznog izmjeničnog motora [7]:

- U/f Skalarno upravljanje (indirektno upravljanje magnetskim tokom)
- Vektorska regulacija(direktno upravljanje magnetskim tokom)

3.2.1 Skalarno upravljanje

Ovaj se način upravljanja brzinom asinkronog motora realizira se na način da se dovodi napon promjenjivog iznosa amplitude i frekvencije na krajeve statorskog namota tako da vrijedi [12]:

$$\phi \approx \frac{U}{f} \approx konst.. \quad (3-1)$$

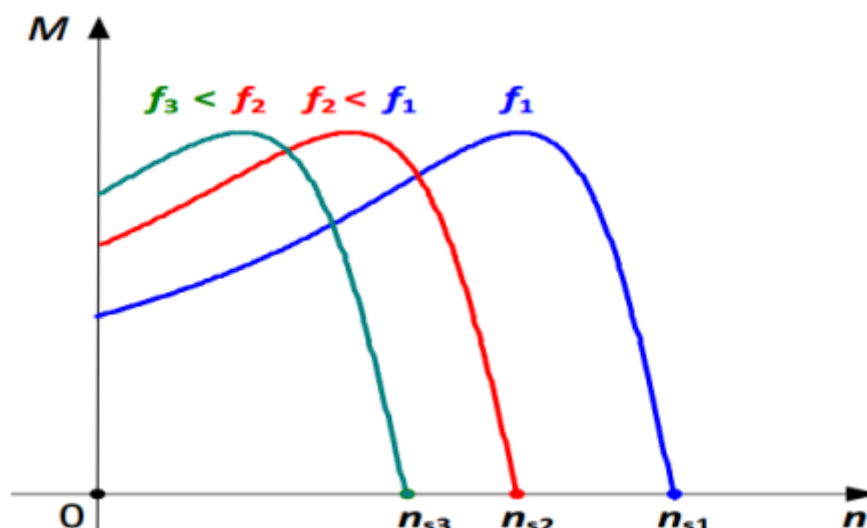
Gdje je:

U – efektivna vrijednost napona [V]

f – frekvencija napona napajanja [Hz]

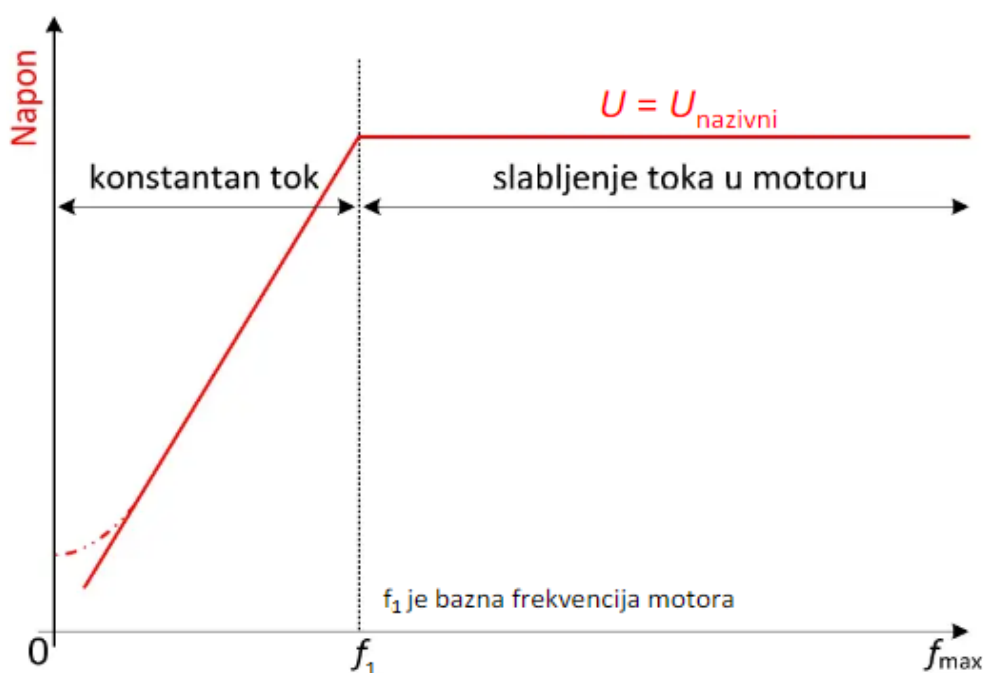
ϕ - magnetski tok [Wb]

Razlog upravljanja napona i frekvencije tako da omjer njih bude konstanta je magnetski tok koji je u tom slučaju također konstantan. Uz konstantan magnetski tok i istovremenom mijenjanju napona i frekvencije da je zadovoljen izraz (3- 1) dobivamo statičke momentne karakteristike (Slika 3.2.) [13].



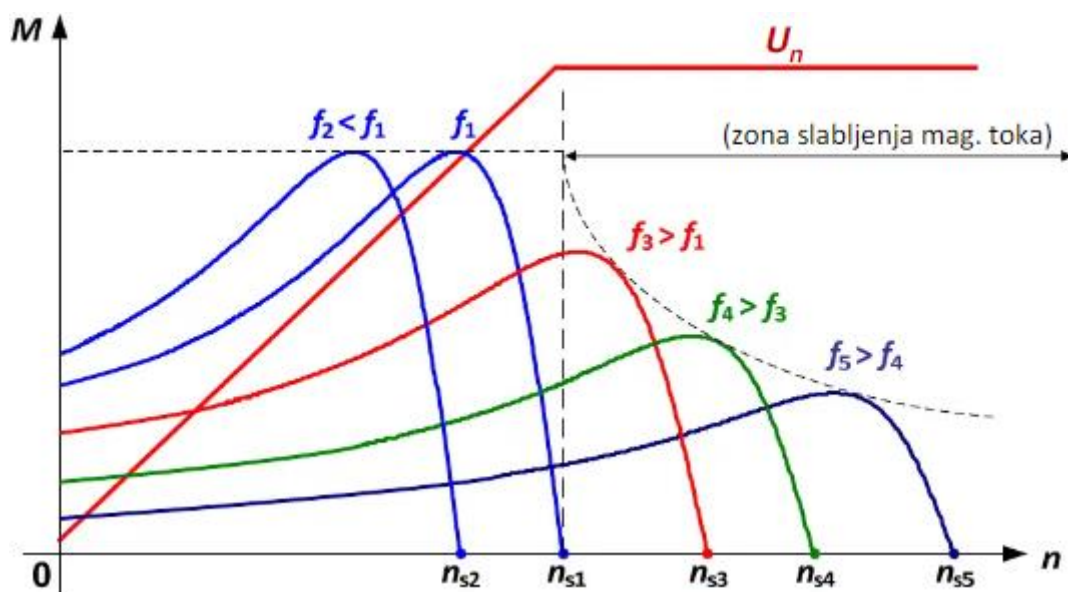
Slika 3.2. Statičke momentne karakteristike asinkronog motora $M = f(n)$; n – broj okretaja (o/min); pri različitim omjerima napona i frekvencije uz konstantan magnetski tok [13]

Vidimo kako pri različitim frekvencijama imamo jednak moment stroja (Slika 3.2.) i to sve do frekvencije f_1 (Slika 3.3.) koja se još naziva i osnovna frekvencija, pri kojoj se na motoru javlja nazivni napon [7].

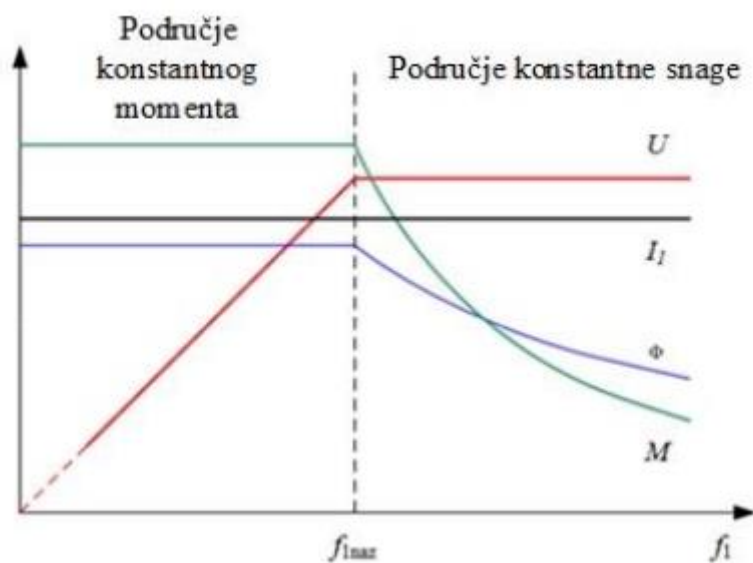


Slika 3.3. Upravljačka karakteristika skalarne regulacije [13]

Pošto ne smijemo nastaviti podizati napon iznad nazivne vrijednosti, zbog naponskih naprezanja stroja, daljnjim povećavanjem frekvencije doći će do slabljenja magnetskog toka (Slika 3.4.) te time i slabljenjem momenta stroja uz održavanje nazivne struje (Slika 3.5.) [7].



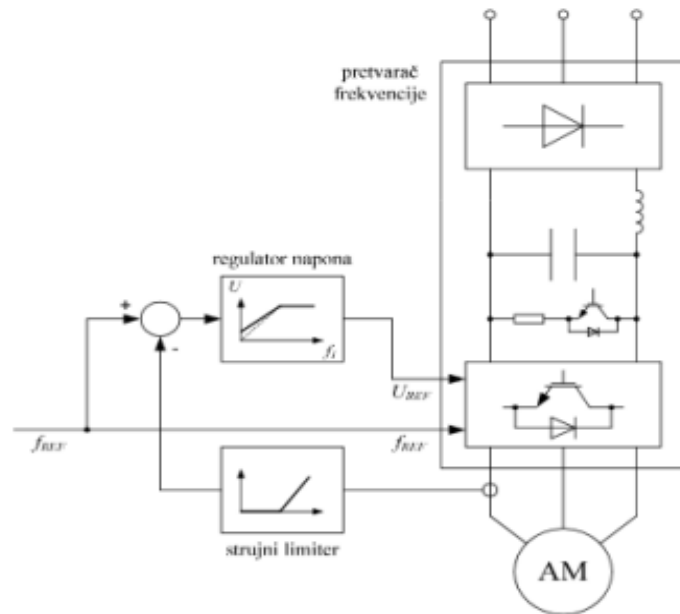
Slika 3.4. Promjena statičkih momentnih karakteristika za različite frekvencije [10]



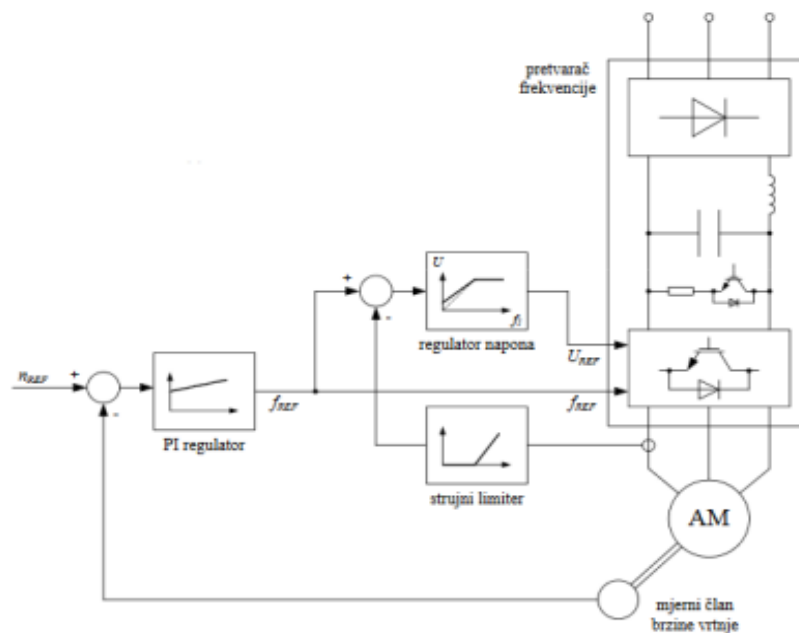
Slika 3.5. Odnos fizikalnih veličina po skalarnom upravljanju [7]

Ovo je najčešći i najekonomičniji način upravljanja brzinom vrtnje asinkronog motora ali postoje neka ograničenja. Omjer minimalne i maksimalne brzine vrtnje ograničen je na približno 1 : 20 te razlog tome kod malih brzina vrtnje moramo uvesti novu strategiju upravljanja, ograničena primjena jer su vrijednosti napona isključivo od 0V do nazivne vrijednosti [9], nemogućnost direktnog upravljanja momentom [12].

Skalarno upravljanje može se realizirati pomoću otvorene petlje (Slika 3.6.) ili zatvorene petlje (Slika 3.7.). U otvorenoj petlji brzina vrtnje motora, pošto nema povratne veze, se ne mjeri i svaka promjena tereta uzrokuje promjenu brzine vrtnje motora. Kako bi smo održali željenu brzinu vrtnje pri raznim čestim opterećenjima u radu uvesti povratnu vezu (Slika 3.7.). Za to trebamo mjerni instrument koji će cijelo vrijeme pružati informaciju danom krugu o trenutnim vrijednostima brzine vrtnje [7].



Slika 3.6. Skalarno upravljanje otvorenom petljom [7]

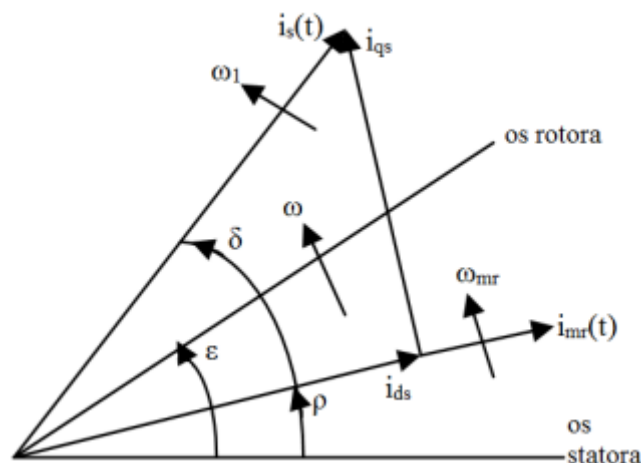


Slika 3.7. Skalarana regulacija zatvorenom petljom [7]

3.2.2. Vektorska regulacija

Vektorska regulacija je znatno kompleksnija ali tomu i preciznija od skalarne regulacije te se očekuje da će kroz neko vrijeme u potpunosti zamijeniti skalarno U/f upravljanje. Za sada namijenjen je za motore visokih performansi s zahtjevom glatkog rada u cijelom rasponu brzine, omogućuje visoki potezni moment pri pokretanju i maksimalni moment pri kočenju i ubrzanju, malo vrijeme odziva za podizanje ili spuštanje momenta i brzine vrtnje pri velikoj promjeni opterećenja i smanjuje potrošnju energije [14].

Princip vektorske regulacije leži u matematičkom modelu motora i njegovim statičkim i dinamičkim stanjima elektromagnetskih i mehaničkih pojava. Pod to spada određivanje struje rotora koja zajedno s magnetskim tokom proizvodi moment te struje magnetiziranja. Određivanje tih struja omogućuje nam upravljanje brzinom rotora i momenta. Struje i_{ds}^* i i_{qs}^* komponente su statorske struje i_s , i_{qs} predstavlja poprečnu komponentu, a i_{ds} uzdužnu komponentu statorske struje (Slika 3.8.) [15].



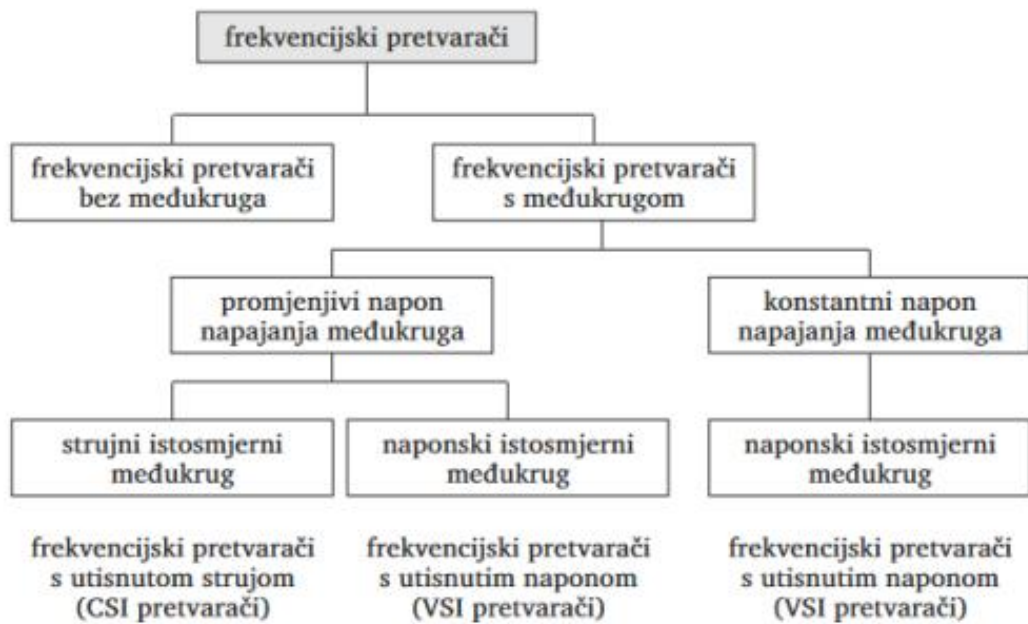
Slika 3.8. Prostorni vektor struje statora koji se nalazi u rotirajućem koordinatnom sustavu [15]

Struje i_{ds} i i_{qs} promatraju se kao predstavnici komponenata struje magnetiziranja tj. struje magnetskog toka i struje momenta koje su međusobno okomite. Vektorska regulacija je zadužena za održavanje struje i_{ds} konstantnom, a i_{qs} se mijenja zavisno o momentu rotora u određenom trenutku [15].

4. Podjela frekvencijskih pretvarača

Frekvencijski pretvarači korišteni za podešavanje brzine vrtnje trofaznih izmjeničnih motora istodobnom promjenom frekvencije i napona mogu se svrstati u dvije glavne skupine[16]:

- a) izravne pretvarače (pretvarači bez istosmjernog međukruga)
- b) neizravne pretvarače (pretvarači s istosmjernim međukrugom)

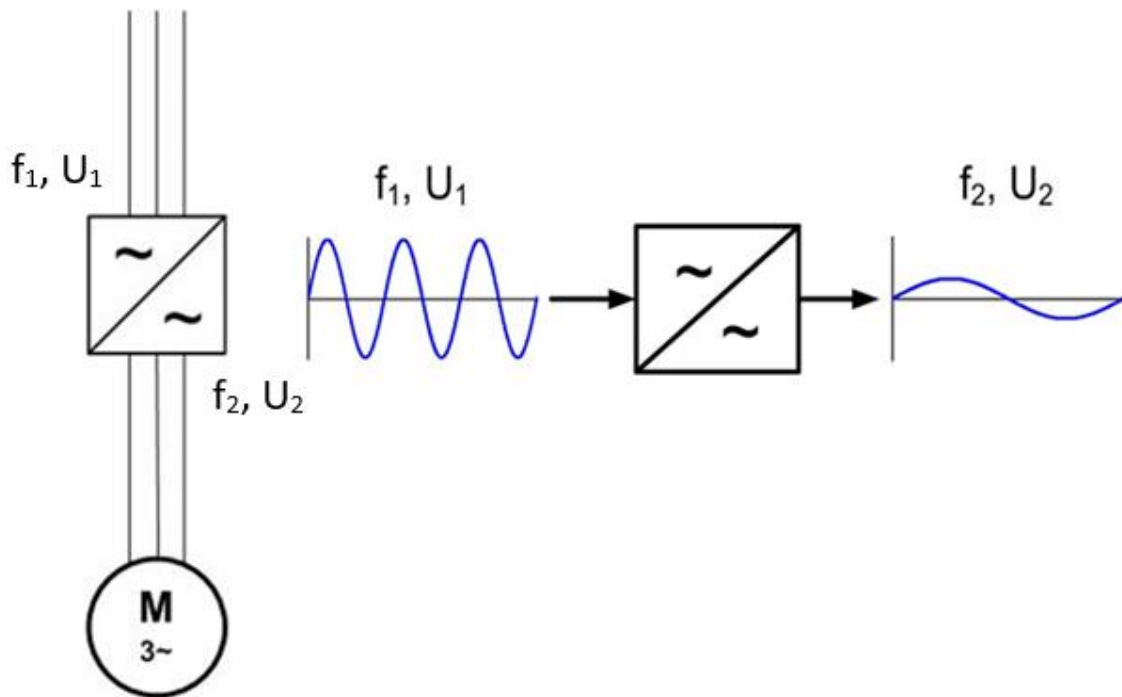


Slika 4.1. Podjela frekvencijskih pretvarača [16]

Frekvencijske pretvarače bez međukruga dijelimo na ciklopretvarače i matrične pretvarače i svrstavamo ih u izravne pretvarače. Frekvencijske pretvarače s međukrugom nazivamo još i neizravni pretvarači. Glavna razlika između izravnih i neizravnih frekvencijskih pretvarača leži u kompleksnosti njihove izvedbe. Izravni frekvencijski pretvarači imaju puno jednostavniju građu ali zbog toga su im mogućnosti rada ovelike smanjenje u usporedbi s neizravnim pretvaračima.

4.1. Izravni pretvarači

Izravni pretvarači izravno pretvaraju napon izmjenične napojne mreže određene amplitude i frekvencije u izmjenični napon promjenjive amplitude i frekvencije te pri tome nemaju istosmjerni međukrug.



Slika 4.2. Općeniti izravni pretvarač [17]

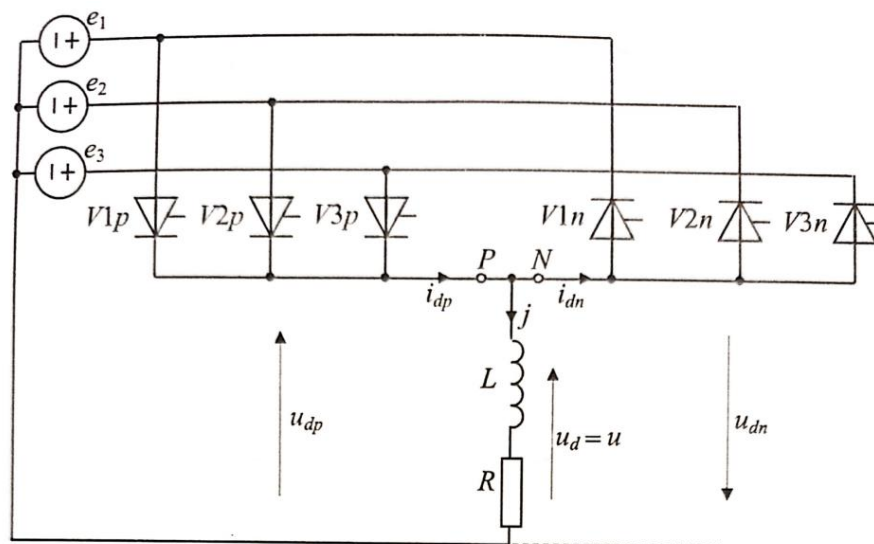
Na slici 4.2. je vidljivo da ulazna frekvencija f_1 i napon U_1 koji ulaze u izravni pretvarač se direktno mijenjaju (bez istosmjernog međukruga) u frekvenciju f_2 i napon U_2 drugačijih vrijednosti.

Postoje dvije glavne raspodjele izravnih frekvencijskih pretvarača: komutirani izmjeničnom napojnom mrežom i komutirani vlastitim komutacijskim krugovima. Do danas pretvarači komutirani vlastitim komutacijskim krugovima nisu pronašli nikakvu važnu primjenu zbog svoje cijene i složenosti. Naime sastoje se od velikog broja poluvodičkih ventila te nemaju ograničenja na maksimalnu izlaznu frekvenciju [2]. Nama korisni i dan danas u električnim pogonima jesu komutirani izmjeničnom napojnom mrežom tkz. ciklopretvarači.

4.1.1 Ciklopretvarači

Ovaj je izravni frekvencijski pretvarači pronašao svoju primjenu kod sporohodnih elektromotornih pogona većih izlaznih snaga (100kW pa do 50MW). Razlog zasto baš isključivo „sporohodnih“ je taj što je maksimalna izlazna frekvencija ciklopretvarača ograničena na 2/3 frekvencije mreže, no vrlo često koristimo samo 1/3 radi boljeg valnog oblika napona na izlazu. Uzmemo li za primjer napojnu mrežu od 50 Hz onda je maksimalna izlazna oko 30 Hz, iz čega vidimo da je izlazna frekvencija ovog tipa frekvencijskog pretvarača uvijek niža od ulazne [2]. Jedna od tipičnih primjena ovoga pretvarača je u regulaciji broja okretaja propulzijskog sinkronog motora na brodovima s elektropropulzijom, osovinskim generatorima, raznim rotacijskim pećima, prešama i slično[18].

Ciklopretvarači koriste poluupravljive dvosmjerne sklopke koje se u praksi realiziraju pomoću antiparalelnog spoja tiristora. Pošto tiristor vodi struju u jednom smjeru, pozitivna struja trošila označava vođenje prvog para tropulsnog usmjerivača i njega zovemo pozitivni usmjerivač. Vrijedi i obrnuta situacija gdje negativna struja na trošilu označava vođenje drugog para tropulsnog usmjerivača zvanog negativni usmjerivač. Time se rad ciklopretvarača svodi na funkciju pozitivnog i negativnog usmjerivača koji napajaju jedno izmjenično trošilo [8].



Slika 4.3. Shema spoja ciklopretvarača sastavljenog od dva tropulsna usmjerivača [8]

Tiristori $V1p, V2p, V3p$ čine prvi tropulzni usmjerivač te predstavljaju pozitivni usmjerivač, a $V1n, V2n, V3n$ čine drugi tropulzni usmjerivač tj. negativni usmjerivač [8]. Način na koji ćemo dobiti željenu izlaznu frekvenciju i efektivni napon jest da će svaki tiristor „rezati“ poluperiodu signala po kutu upravljanja usmjerivača α_p i α_n , i za koje vrijedi [8]:

$$\alpha_p + \alpha_n = \pi. \quad (4-1)$$

Gdje je:

α_p - kut upravljanja pozitivnog usmjerivača

α_n - kut upravljanja negativnog usmjerivača

Ovo vrijedi u slučaju da pozitivni i negativni usmjerivač rade istodobno, time se postiže da su srednje vrijednosti izlaznih napona oba usmjerivača jednaki [8],

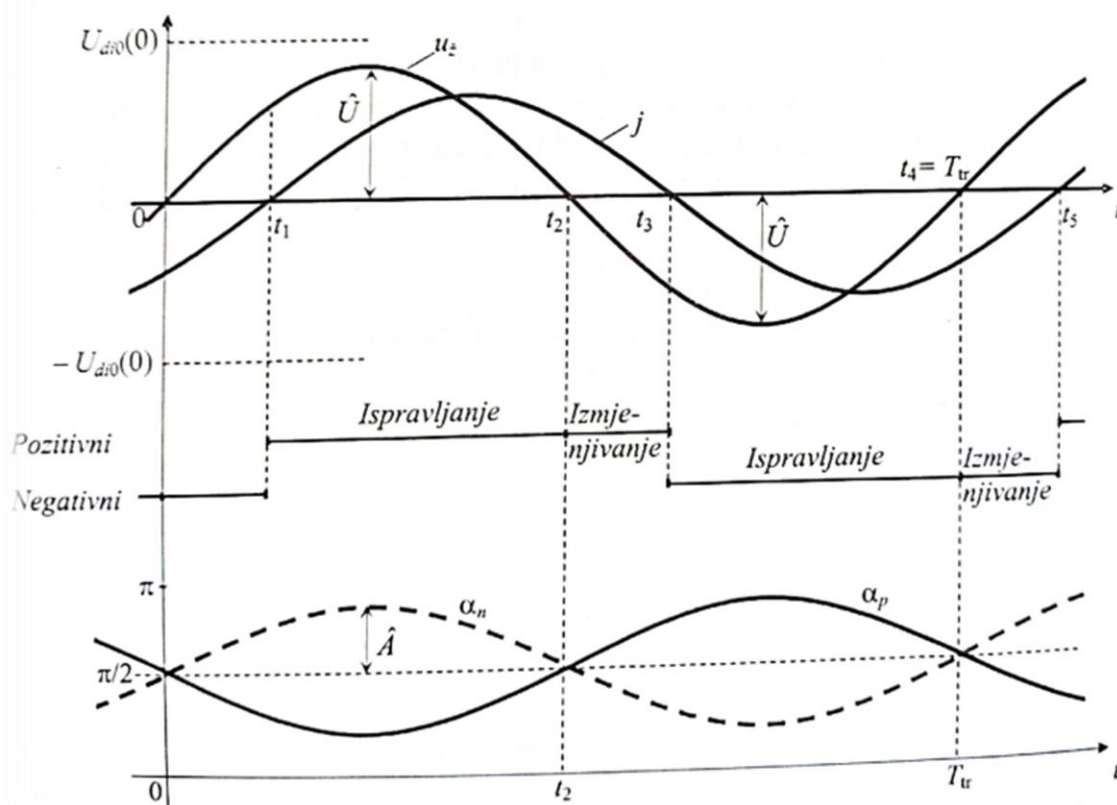
$$U(0) = U_{di0}(0) \cos \alpha_p = -U_{di0}(0) \cos \alpha_n, \quad (4-2)$$

Gdje je:

$U(0)$ – srednja vrijednost napona

U_{di0} – vršna vrijednost napona usmjerivača

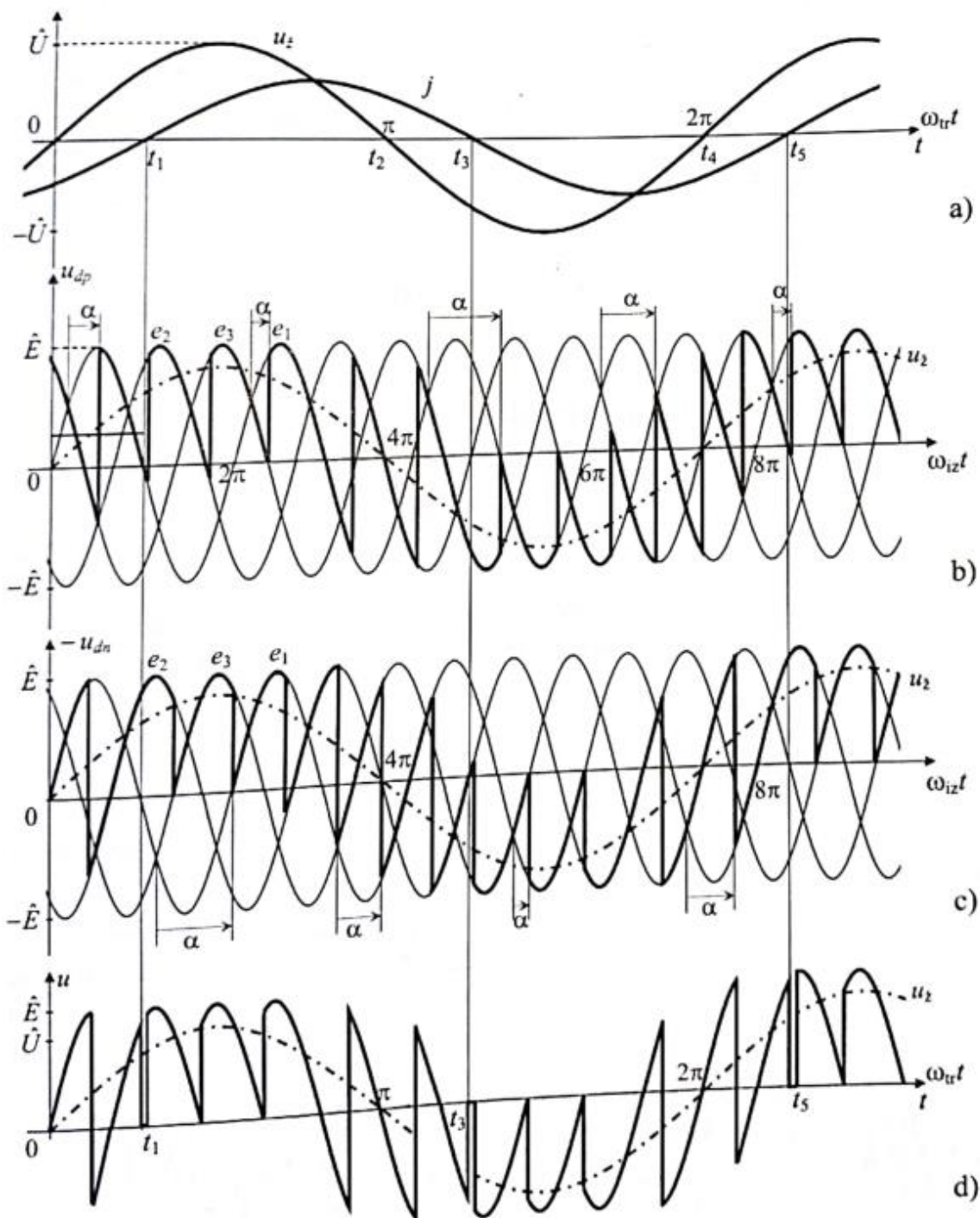
također da dok pozitivni usmjerivač radi kao ispravljač (struja i napon su oboje pozitivni ili negativni) (Slika 4.4.) $[t_1 \text{ do } t_2]$, negativni usmjerivač radi kao izmjenjivač (Slika 4.4.) $[t_2 \text{ do } t_3]$ i obratno. Na taj je način zajamčena četverokvadratnost rada ciklopretvarača, tj. nesmetani tok energije između izmjenične napojne mreže i izmjeničnog trošila [8].



Slika 4.4. Karakteristični valni oblici savršenog ciklopretvarača [8]

Iz slike 4.4. vidimo kako u intervalu $[t_1, t_3]$ struja trošila je pozitivna te ju vodi pozitivni usmjerivač i u tom intervalu gdje je struja pozitivna imamo slučaj pozitivnog napona na trošilu $[t_1, t_2]$ te pozitivni usmjerivač radi kao ispravljač ali i slučaj negativnog napona na trošilu $[t_2, t_3]$ gdje usmjerivač radi kao izmjenjivač. Analogno i negativni usmjerivač pri negativnoj struji i naponu na trošilu radi kao ispravljač, a negativnoj struji i pozitivnom naponu kao izmjenjivač [8].

A na donjem grafu na slici 4.4. vidimo kako zbroj $\alpha_p + \alpha_n$ uvijek rezultira π po sinusnoj krivulji ali to u stvarnosti nije moguće pošto je broj pulsacija usmjerivača ciklopretvarača konačan. Obično je to 6 ili 12 pulsacija i zato se kutovi upravljanja usmjerivača α_p i α_n mijenjaju diskretno [8].



Slika 4.5. a) Valni oblici struje i napona radno induktivnog trošila napajanog iz savršenog ciklopretvarača

b) Valni oblik izlaznog napona pozitivnog tropulsnog usmjerivača kad bi oba usmjerivača radila istodobno

c) Valni oblik izlaznog napona negativnog tropulsnog usmjerivača kad bi oba usmjerivača radila istodobno

d) Stvarni valni oblik napona trošila napajanog iz ciklopretvarača u tropulsnom spoju ($p=3$, $f_{tr}/f_{iz} = 3/11$) [8]

Na slici 4.5. vidimo kako pozitivni i negativni usmjerivači mijenjaju svoj kut upravljanja α i to diskretno zbog konačnog broja pulsacija usmjerivača. Bitno je spomeniti i činjenicu zašto se ciklopretvarač počeo zamjenjivati neizravnim frekvencijskim pretvaračima, a to je nepovoljni faktor snage i pojavljivanje i viših i nižih harmonika napona od osnovnog na trošilu. Prema izrazu za faktor snage savršenog ciklopretvarača [8]:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} m_a \cos \rho. \quad (4-3)$$

P – radna snaga

S – prividna

m_a - modulacijski indeks (za sinusni valni oblik iznosi maksimalno 0,75)

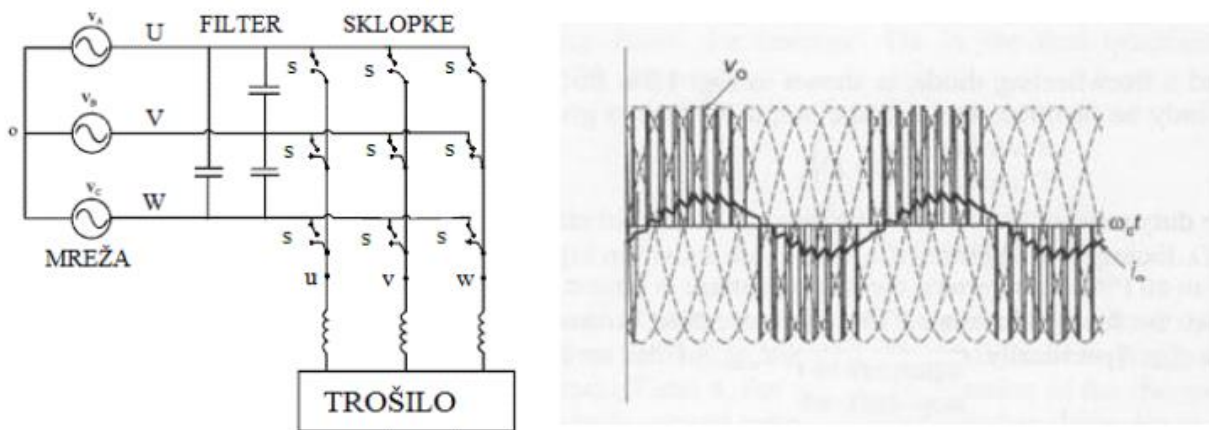
$\cos \rho$ – faktor snage trošila

λ – faktor snage ciklopretvarača

Niži faktor snage ciklopretvarača je jedan od razloga zašto se ciklopretvarač zamjenjuje neizravnim frekvencijskim pretvaračima ali također problem kod ciklopretvarača jest što je kontrola frekvencije bez grubih skokova teško ostvariva. Upravljački krug je jako kompleksan i složen isto pri nižim frekvencijama izlazni napon ciklopretvarača može biti izobličen [19].

4.1.2 Matrični pretvarači

Matrični pretvarači za povezivanje trofaznog izvora i trofaznog trošila trebaju devet bidirekcionalnih sklopki (Slika 4.6.). Elektroničke bidirekcionalne sklopke imaju mogućnost vođenja struje u oba smjera ali držanja blokirnog napona u oba smjera [6]. U bilo kojem odabranom trenutku, mora biti uključena samo jedna sklopka u svakoj grani trošila [8].



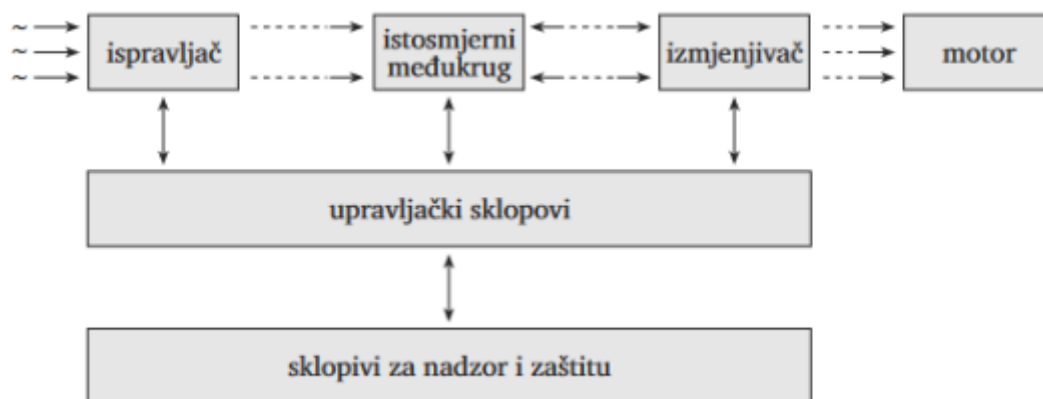
Slika 4.6. Realizacija matričnog pretvarača i njegov izlazni napon [6]

4.2. Neizravni frekvencijski pretvarači

Neizravni pretvarači ponajprije pretvaraju izmjenični napon napojne mreže u istosmjerni, a zatim taj istosmjerni napon u izmjenični napon promjenjive efektivne vrijednosti i frekvencije pri tome da maksimalna vrijednost izlaznog napona ne može biti veća od maksimalne vrijednosti ulaznog napona.

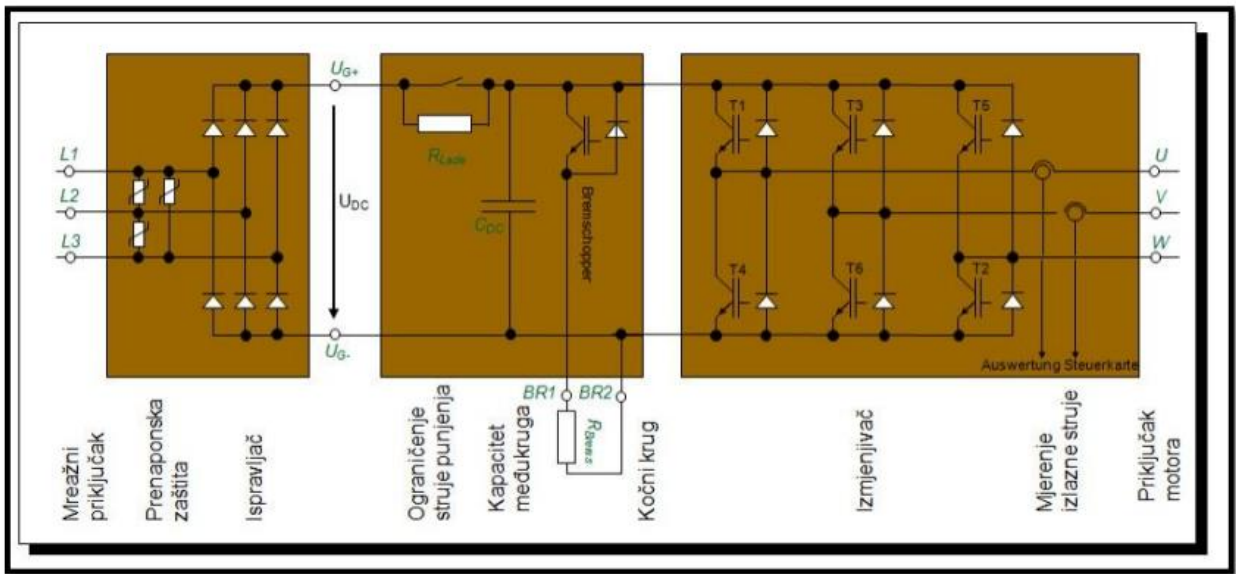
Valni oblik izmjeničnog tog izlaznog napona može biti pravokutni, kvazipravokutni, naizmjenični niz pozitivnih i negativnih pravokutnih impulsa, dok je struja trošila sinusoidalna zbog induktiviteta samoga trošila koji dovoljno prigušuje više harmonike [9].

Neizravni frekvencijski pretvarači najčešći su odabir u današnjoj industriji kod izmjeničnih elektromotornih pogona te ih možemo pronaći u elektromotorima od nekoliko [W],[kW] pa i do [MW]. Za elektromotore jače od [MW] još se uvijek preferiraju ciklopretvarači premda ih polako neizravni frekvencijski pretvarači većih snaga istiskuju i zamjenjuju [9].



Slika 4.7. Blokvska shema općeg neizravnog frekvencijskog pretvarača [16]

Rad neizravnog frekvencijskog pretvarača se temelji na dva procesa pretvorbe ulaznog napona. Prvo se odvija ispravljanje ulaznog napona u DC pa onda izmjenjivanje nazad u AC, s tim da se ta dva procesa odvijaju nezavisno jedan o drugome. Zbog dvostruke pretvorbe napona (prvo iz AC u DC pa onda iz DC u AC) stupanj djelovanja pretvarača se smanjuje što mu je bitan nedostatak [1]. Ovaj pretvarač se sastoji od tri dijela: ispravljača, DC – međukruga i izmjenjivača te za potpuno razumijevanje dovoljno je detaljno analizirati rad svakog od ova tri dijela (Slika 4.8.). Također osim tri spomenuta dijela nalazimo i kočni krug s kočnim čoperom koji služi za disipaciju viška energije pri generatorskom radu motora [20]. Pošto ispravljač nije punoupravljivi energija se ne može vraćati nazad u napojnu mrežu nego se skladišti u istosmjernom međukrugu. Kočni otpornik preuzima višak energije i štiti od prenapona i oštećenja, tako da drži napon konstantnim ali i time postiže brzo svladavanje velikih opterećenja [12]. Upravljački sklopovi zajedno sa sklopovima za nadzor i zaštitu služe za prikupljanje trenutnih podataka stanja cijeloga pretvarača pomoću kojih upravljački sklop kontrolira razne parametre pretvarača kako bi cijeli sustav, pretvarač i pogon bio siguran.



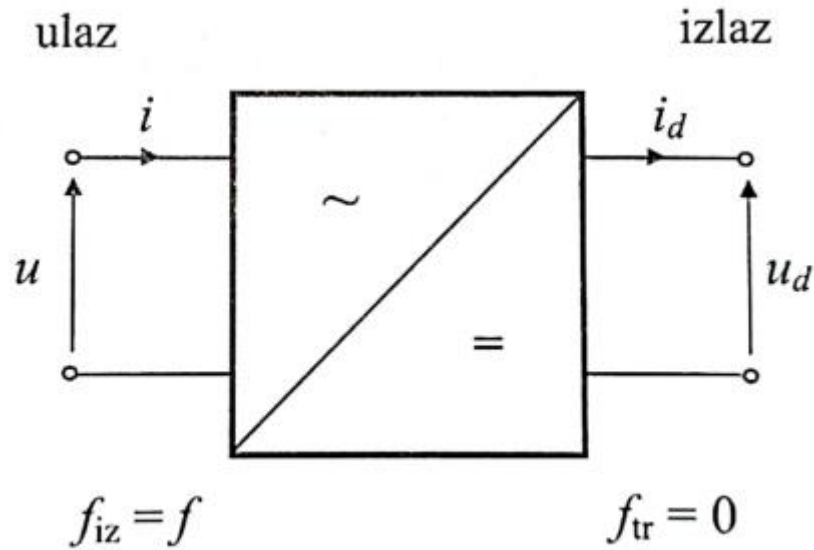
Slika 4.8. Tipični neizravni pretvarač [20]

Razlikujemo dvije vrste neizravnih frekvencijskih pretvarača:

- pretvarače sa strujnim ulazom u izmjenjivač
- pretvarače s naponskim ulazom u izmjenjivač

4.2.1. Ispravljač

Ispravljač (Slika 4.9.) je prvi od tri dijela neizravnog frekvencijskog pretvarača i njegova je zadaća povezivanje napojne mreže s DC-međukrugom na način da izmjenični napon mreže pretvori u istosmjerni. Mogu biti neupravljivi, punoupravljivi i poluupravljivi te zavisno o potrebnoj snazi možemo ih spojiti na jednofaznu (manja snaga) ili trofaznu (veća snaga) napojnu mrežu. Ispravljači koji su dijelovi neizravnih frekvencijskih pretvarača sastavljeni su od tiristora, dioda ili kombinacije istih, zavisno je li riječ o neupravljivim (ona su u pitanju isključivo diode), punoupravljive (isključivo tiristori) ili poluupravljivi (kombinacija dioda i tiristora) [9].



Slika 4.9. Simbol jednofaznog ispravljača i referentni smjerovi napona i struje na priključnicama [8]

$$u_d = U_d(0) + \tilde{u}_d = U_d(0) + \sum_{n=1}^{\infty} U_d(np) \sin(np\omega t + \varphi_{np}). \quad (4-4)$$

Gdje je:

u_d - izlazni napon [V]

$U_d(0)$ - istosmjerna komponenta napona [V]

\tilde{u}_d - izmjenična komponenta napona [V]

$f = 1/T$ – frekvencija napojne mreže [Hz]

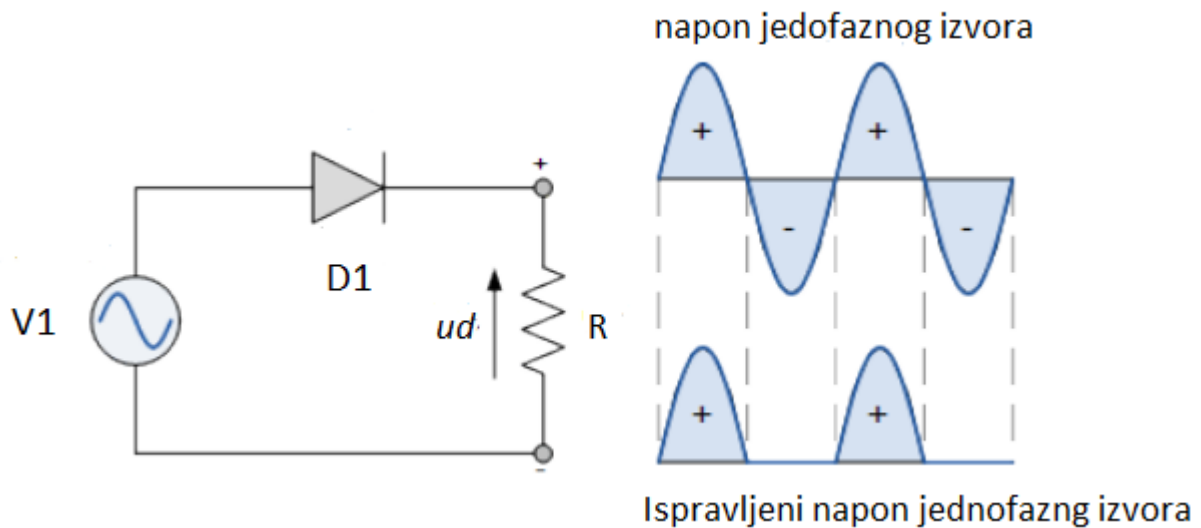
$\omega = 2\pi f$ – kružna frekvencija [rad/s]

np – harmonički članovi

Iz izraza (4-4) vidimo da je valni oblik izlaznog napona ispravljača valovit. Sastoji se od željene istosmjerne komponente $U_d(0)$ i neželjene izmjenične \tilde{u}_d komponente [8].

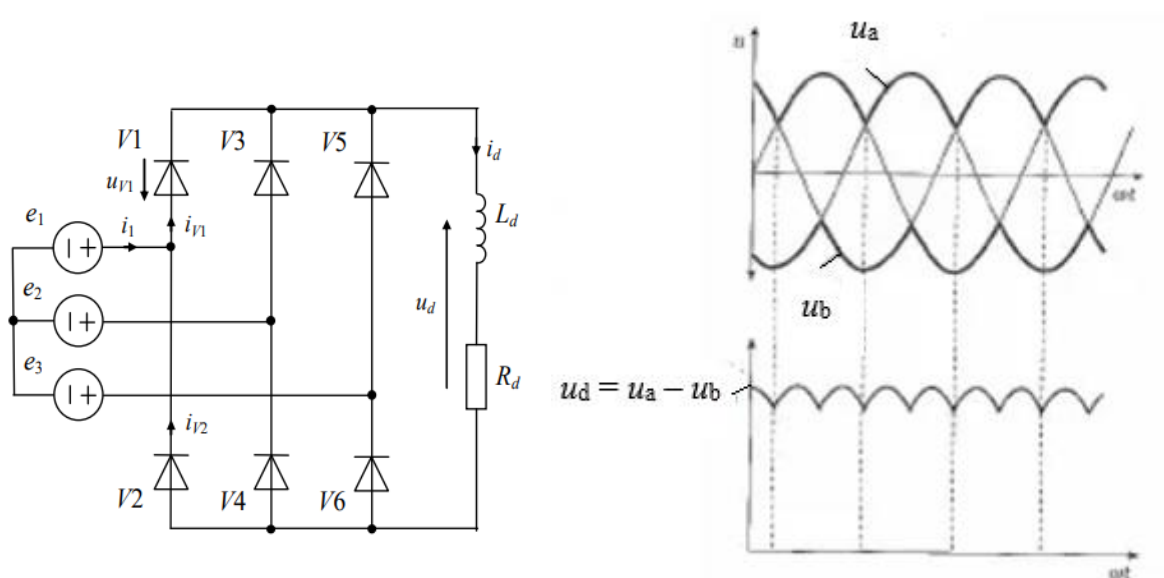
4.2.1.1. Neupravljivi ispravljači

Neupravljivi ispravljač realizira se uz pomoć neupravljivih elektroničkih ventila – dioda, koje propuštaju struju isključivo u jednom smjeru i koje ne možemo uklapati i isklapati po volji. Ima dva energetska priključka anodu (A) i katodu (K) [8].



Slika 4.10. Ispravljanje napona diodom [21]

Primijenimo li funkciju dioda na trofazni sustav te uvedemo ispravljački spoj zvan trofazni mosni spoj dobivamo (Slika 4.11.).



Slika 4.11. Induktivno opterećeni mosni spoj s valnim oblicima napona [22,9]

Trofazni mosni spoju (Slika 4.11.) smo realizirali na način da imamo dvije skupine dioda, gornju ($V1, V3, V5$) još zvanu katodna skupina i donju ($V2, V4, V6$) zvanu anodnu skupinu. Istosmjerno trošilo napajamo iz katodne i anodne skupine dioda suprotnih polariteta izlaznog napona i u svakom trenutku vodi jedna dioda iz katodne skupine te jedna dioda iz anodne skupine. Pri čemu je napon trošila (u_d) jednak razlici potencijala dioda katodne i anodne skupine $u_d = u_a - u_b$ iz čega dobivamo da napon trošila u_d odgovara formuli [8]:

$$u_d(0) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \hat{E}, \quad (4-5)$$

Gdje je:

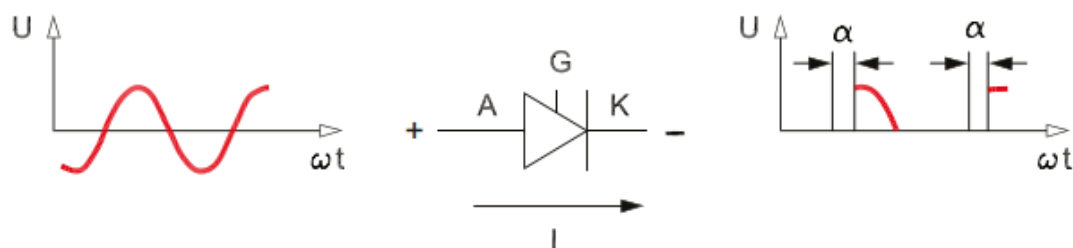
u_d – napon trošila [V]

\hat{E} – efektivna vrijednost izvora [V]

što nam govori da je napon trošila 1.65 puta veći od vršne vrijednosti faznog napona mreže. Također pošto napon u_d čine međufazni naponi $u_d = u_a - u_b$ kut između sinusnih odsječaka pomaknut je samo za 60° el. Stoga imamo 6 sinusnih odsječaka u jednoj periodi napojne mreže (Slika 4.11.) [8].

4.2.1.2. Punoupravljivi ispravljač

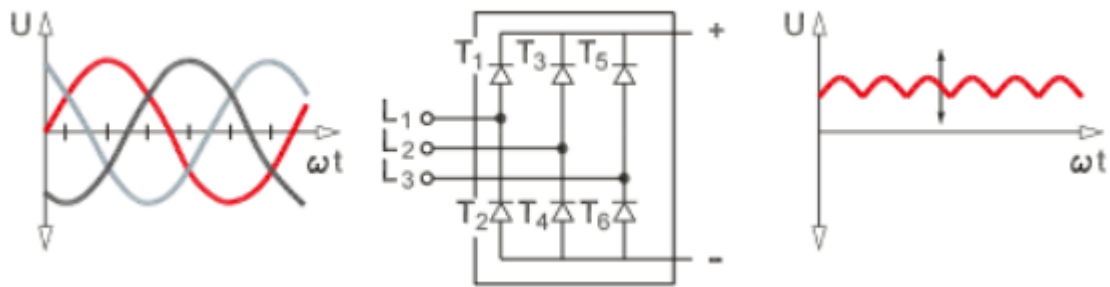
Punoupravljivi ispravljač realizira se pomoću punoupravljivih elektroničkih ventila – tiristora koji su strujno jednosmjerni kao i dioda ali za razliku od diode tiristor ima tri priključka (Slika 4.12.). Uz energetske priključke anodu (A) i katodu (K) kod tiristora nalazimo i treći upravljački priključak geit (G). Tiristor će početi voditi kada se osigura pozitivna struja geita uz prethodno narinut pozitivni napon na tiristoru. Nakon što tiristor provede ostaje u stanju vođenja sve dok se struja ne smanji na vrijednost manju od struje držanja [8].



Slika 4.12. Ispravljanje napona tiristorom [5]

Tiristor uklapa prema kutu upravljanja α , a kut upravljanja α predstavlja vrijeme za koje će se uklapanje dogoditi od trenutka kada je dobio signal sa geita. Kada je kut upravljanja između 0° i 90° tiristor radi kao ispravljač, dok između 90° i 360° kao izmjenjivač [16].

Idealni napon praznog hoda trofaznog mosnog spoja realiziranoga uz pomoć tiristora daje uvijek manji napon od idealnog napona praznog hoda neupravljivog ispravljača osim kad je kut upravljanja $\alpha = 0^\circ$, kada su isti [8].



Slika 4.13. Punoupravljivi pretvarač u trofaznom mosnom spoju [5]

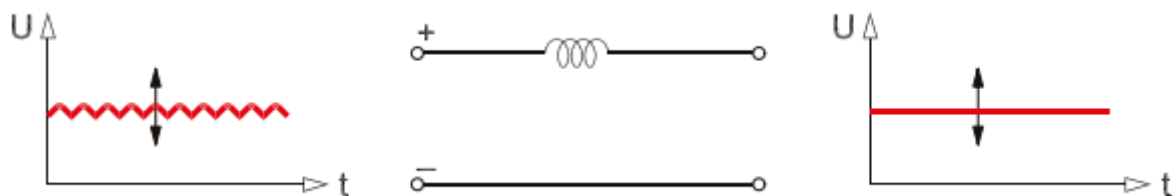
Prednost punoupravljivog pretvarača je to što omogućava četverokvadratnost rada pretvarača tj. nesmetani tok energije između izmjenične napojne mreže i izmjeničnog trošila [8].

4.2.2. Istosmjerni međukrug

Istosmjerni međukrug je drugi od tri osnovna dijela koji čine neizravni frekvencijski pretvarač i on razdvaja ispravljač i izmjenjivač. Možemo napraviti dvije glavne podijele, a to su strujni istosmjerni međukrug ili naponski. Strujni istosmjerni međukrug može biti isključivo s promjenjivom strujom, a naponski dijelimo na one s promjenjivim naponom i konstantnim naponom [9]. Možemo reći da je glavna zadaća svakog istosmjernog međukruga prilagođavanje napona ili struje da budu onakvi kakvi mi želimo na ulazu u izmjenjivač.

4.2.2.1. Strujni međukrug (s utisnom strujom)

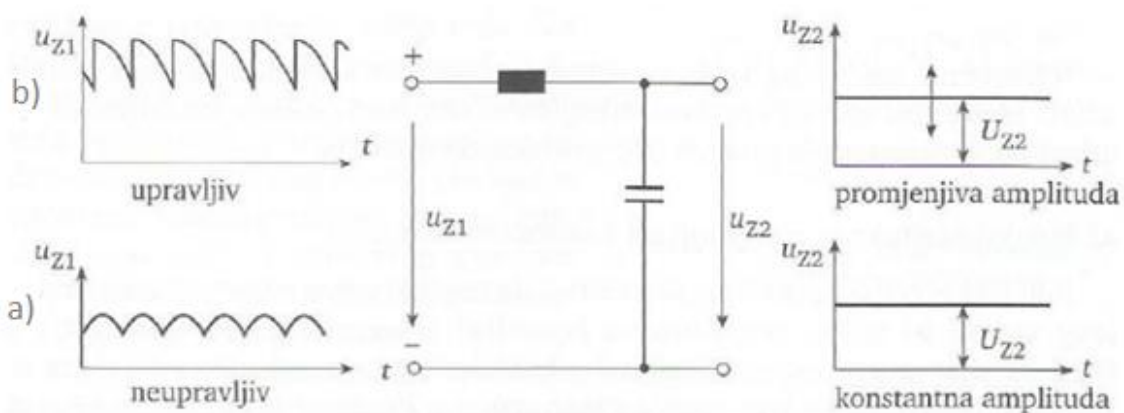
Ovakav tip istosmjernog međukruga ima zadaću izgladiti izmjeničnu komponentu izlaznog napona punoupravljivog ispravljača tako da na ulazu u izmjenjivač imamo glatki istosmjerni napon. To ostvaruje pomoću velike prigušnice, a zajedno sa punoupravljivim ispravljačem tvori promjenjivi strujni izvor tako da zapravo teret regulira napon motora. Također punoupravljivi pretvarač zajedno sa prigušnicom omogućuje da se energija kočenja vrati u napojnu mrežu [6,9].



Slika 4.14. Strujni istosmjerni međukrug (promjenjiva amplituda izlaznog napona) [5]

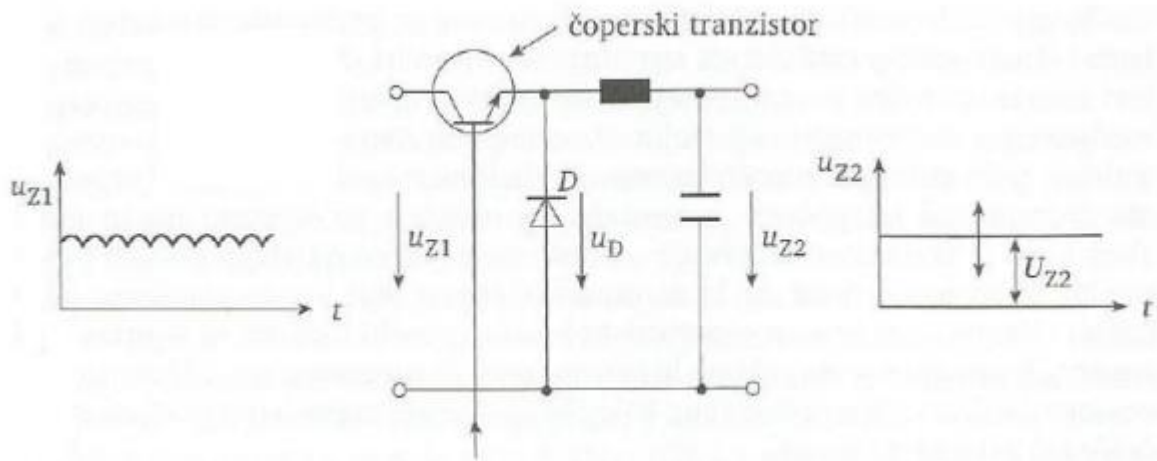
4.2.2.2. Naponski međukrug

Kod naponskog istosmjernog međukruga međukrug predstavlja niskopropusni filter kojega realiziramo prigušnicom i kondenzatorom. Filter umanjuje valovitost izlaznog napona ispravljača, smanjuje strujne harmonike ali i omogućava absorpciju strujnih udara koji se mogu pojaviti prilikom pokretanja motora. Neupravljivi ispravljač nam pruža približno konstantan ulazni napon izmjenjivača dok se kod punoupravljivog može mijenjati po volji [6].



Slika 4.15. Naponski međukrug sa: a) konstantnim i b) promjenjivim naponom napajanja [6]

Moguće je upravljati izlaznim naponom međukruga čak i ako je riječ o neupravljivom ispravljaču ali pri tome moramo uvesti čoperski tranzistor ispred filtra. Uklapanje i isklapanje čoperskog tranzistora mijenja vrijednost izlaznog napona [6].



Slika 4.16. Upravljanje naponom uz pomoć čoperskog tranzistora [6]

Uspoređivanjem napona iz filtra U_{Z2} s referentnim naponom upravljački sklop povećava ili smanjuje relativno vrijeme vođenja ($t_{on}/(t_{on}+t_{off})$) i tako prema izrazu (4-6) regulira izlazni napon filtra [5].

$$U_{Z2} = U_{Z1} * \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}} . \quad (4-6)$$

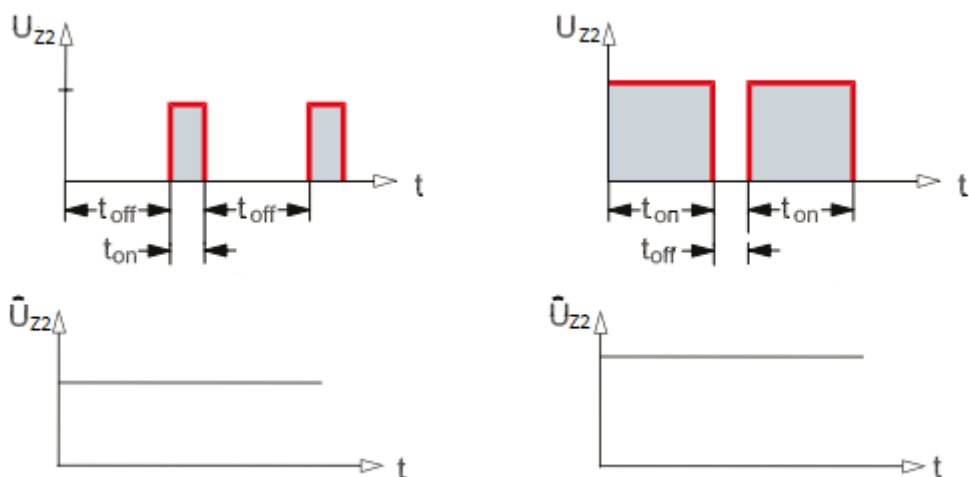
Gdje su :

U_{Z2} – srednja vrijednost izlaznog napona[V]

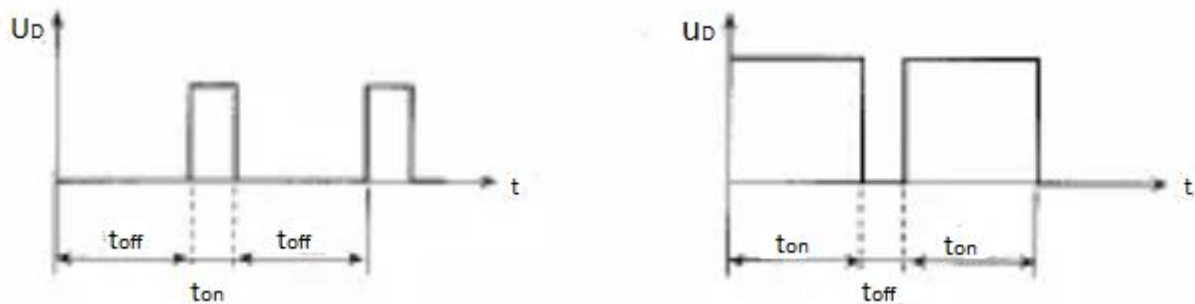
U_{Z1} – srednja vrijednost ulaznog napona [V]

t_{on} – vrijeme vođenja čoperskog tranzistora [s]

t_{off} – vrijeme nevođenja čoperskog tranzistora [s].



Slika 4.17. Regulacija napona istosmjernog međukruga čoperskim tranzistorom [5]



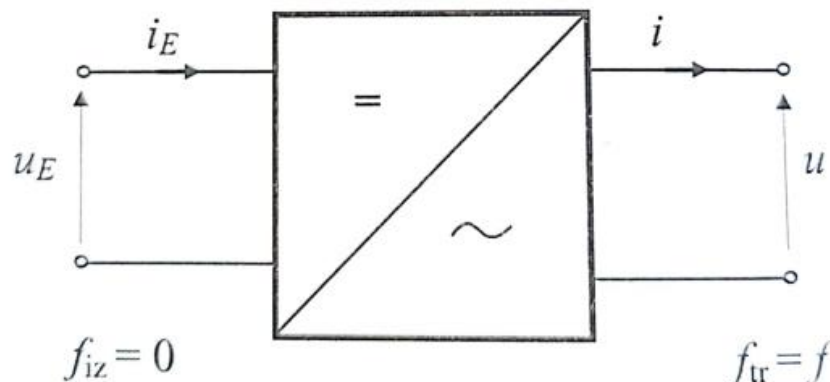
Slika 4.18. Valni oblik napona na diodi za vrijeme vođenja i nevođenja čoperskog tranzistora [9]

U trenutku kada tranzistor ne vodi dioda zatvara strujni krug kako ne bi došlo do oštećenja elektronike (Slika 4.18.) [9]. Kada je na napon na diodi $U_D > 0$ tada tranzistor vodi, a kada je napon na diodi $U_D = 0$ onda dioda vodi, a tranzistor ne vodi.

4.2.3. Izmjenjivač

Izmjenjivač (Slika 4.19.) je zadnji u nizu osnovnih dijelova od kojih se sastoji neizravni frekvencijski pretvarač te završno prilagođuje izlazni napon na priključnicama jednofaznog ili trofaznog pretvarača. Izmjenjivač uvijek ima funkciju mijenjanja frekvencije izlaznog napona (struja ili napon istosmjernog međukruga promjenjivi), a da bi ostvarili uvjet mijenjanja amplitude napon istosmjernog međukruga mora biti konstantan [6]. Prema tome razlikujemo tri načina na koji se izmjenjivač može napajati iz istosmjernog međukruga s:

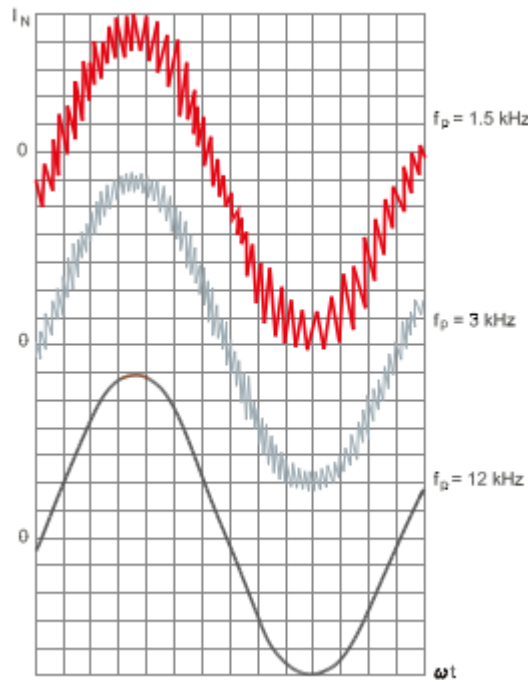
- Istosmjernom strujom promjenjive amplitude
- Istosmjernim naponom promjenjive amplitude
- Istosmjernim naponom konstantne amplitude



Slika 4.19. Simbol jednofaznog izmjenjivača i njegovi referentni smjerovi struje i napona [8]

Izmjenjivači se sklop s istosmjernom strujom promjenjive amplitude više ne koristi u današnjoj industriji te je zastarjela tehnologija [9]. Razlog tomu je razvitak boljih tranzistora koji mogu podnijeti veća opterećenja što je nužno kod izmjeničnih elektromotora. Glavne komponente potrebne za realizaciju izmjenjivača su upravljivi poluvodički ventili – tranzistori, oni imaju višestruke prednosti od prijašnje korištenih tiristora. Najveća prednost jest mogućnost uklapanja i isklapanja struje u željenom momentu, veća sklopna frekvencija tranzistora, do 10 puta veća, što dovodi da je struja motora sve glađa (Slika 4.20.) te se smanjenje magnetske buke motora [9]. No povećanje sklopne frekvencije ima i negativne strane, kao što su sklopni gubici u tranzistorima

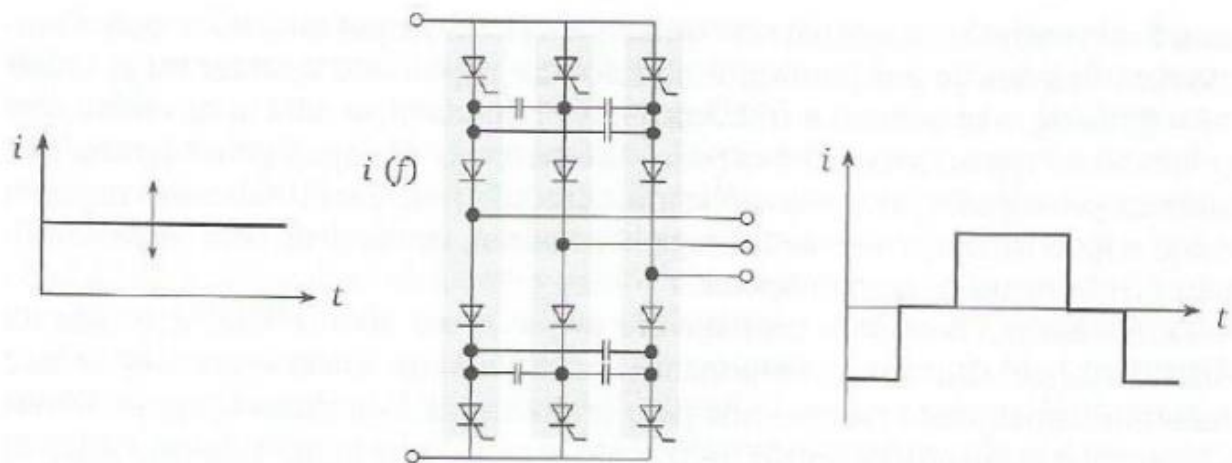
pri čemu dolazi do zagrijavanja izmjenjivača te periodičkih prenaponi na motoru što dovodi do naprežanja izolacije motora. Zaključujemo da izbor sklopne frekvencije temeljimo na kompromisu između gubitaka u izmjenjivaču, gubitaka u motoru i magnetske buke [9].



Slika 4.20. Ovisnost struje motora o frekvenciji [5]

4.2.3.1. Izmjenjivači napajani istosmjernom strujom promjenjive amplitude

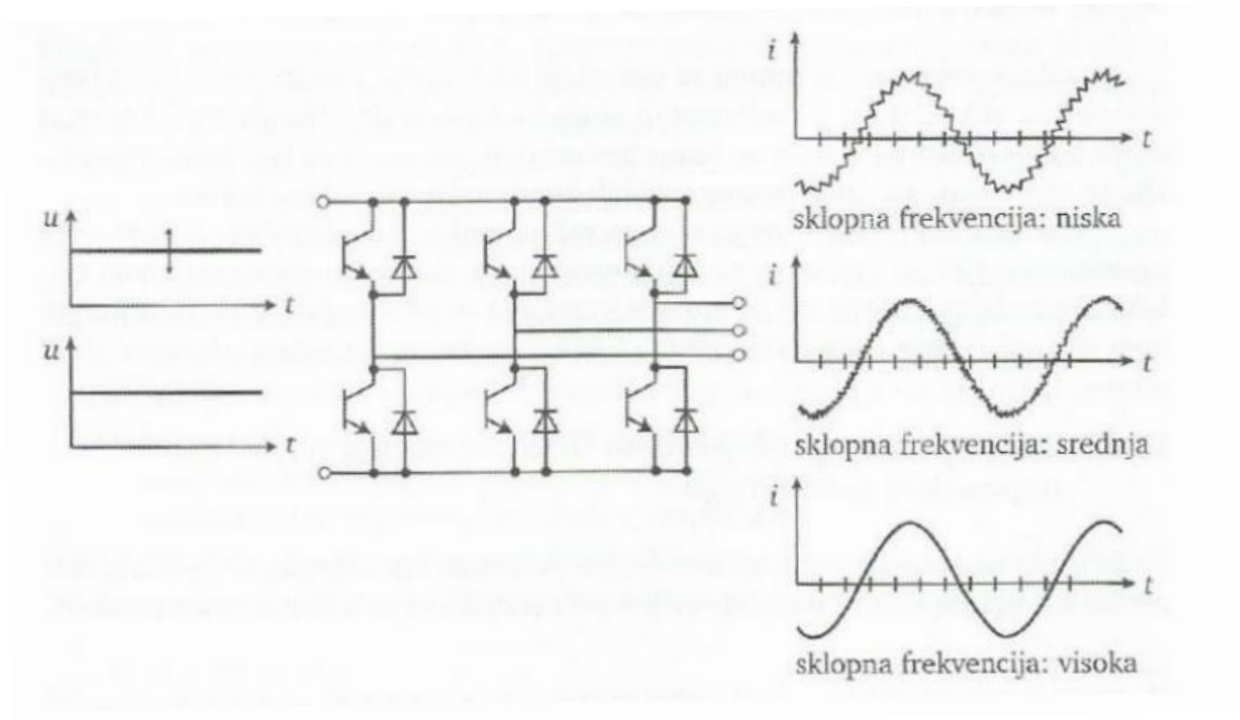
Trofazni izmjenjivač kojeg napaja strujni istosmjerni međukrug promjenjive amplitude sastoji se od šest kondenzatora, šest tiristora i šest dioda (Slika 4.21.). Kondenzatori (tzv. Komutacijski kondenzatori) u ovom slučaju služe za upravljanje, točnije za isklapanje tiristora, dok diode koristimo kako bi spriječili izbijanje komutacijskih kondenzatora putem motora. Tiristorima upravljamo naponom na izlazu koji je gotovo sinusni, a linijske struje motora su kvazipravokutne i međusobno fazno pomaknute za 120° (Slika 4.21.) [9].



Slika 4.21. Izmjenjivač s promjenjivom strujom strujnog međukruga [6]

4.2.3.2. Izmjenjivač napajani konstantnim ili promjenjivim naponom istosmjernog međukruga

Realizacija ovakvog izmjenjivača se temelji na šest istovjetnih punoupravljivih poluvodičkih ventila, od kojih se najčešće koristi IGBT, spojenih u mosnom spoju (Slika 4.22.). Na svaki IGBT je paralelno spojena zaporno polarizirana dioda koja omogućuje generatorsko kočenje motora[6]. Upravljački sklop zaslužan je za isklapanje i isklapanje punoupravljivog poluvodičkog ventila tako da na izlazu dobijemo iscjepkani napon koji sa što većom sklopnom frekvencijom sve više odgovara srednjoj vrijednosti sinusnog oblika [9]. Usprkos takvom iscjepkanom naponu linijska struja induktivnog spojenog trošila postaje sinusna [6]. Postoje različiti modulacijski postupci upravljačkog sklopa za dobivanje željenog izlaznog napona izmjenjivača ali spomenuti ćemo samo modulaciju širine impulsa (PWM).



Slika 4.22. Izmjenjivač s utisnim konstantnim ili promjenjivim naponom te utjecaj sklopne frekvencije na izlazni valni oblik struje [6]

4.2.4 Modulacija širine impulsa - PWM

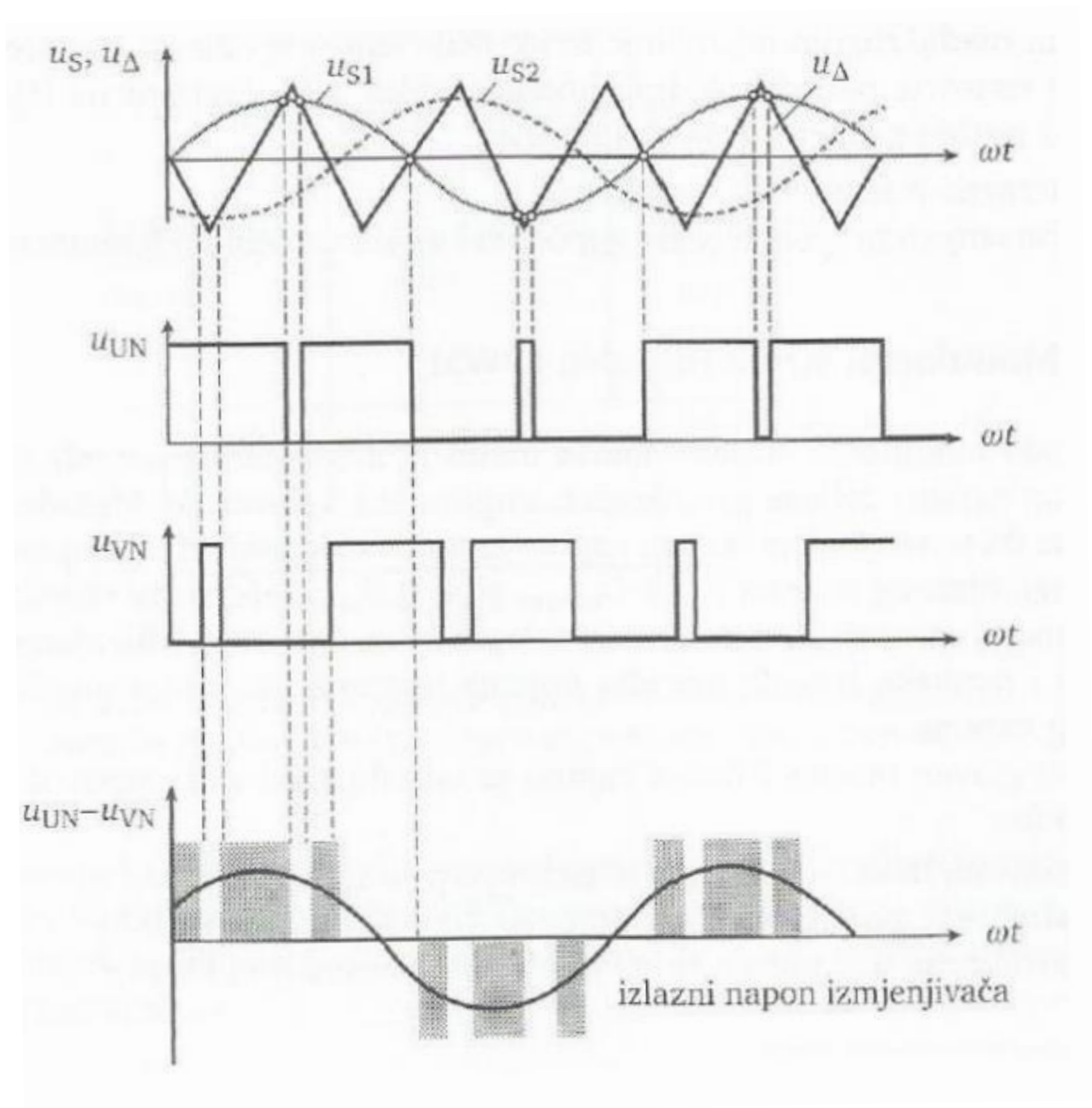
Najraširenija metoda modulacije upravljačkog sklopa korištena za dobivanje trofaznog napona na izlazu iz izmjenjivača čija je frekvencija i amplituda promjenjiva po želji [9]. Amplitudu osnovnog harmonika izlaznog izmjeničnog napona izmjenjivača kontroliramo mijenjanjem razmaka između impulsa i širine impulsa (Slika 4.23.).



Slika 4.23. Utjecaj promjene širine impulsa na amplitudu osnovnog harmonika [13]

3.2.4.1. Sinusni PWM

Trofazni izlazni napon izmjenjivača dobivamo uporabom triju sinusnih modulacijskih napona koji su međusobno pomaknuti za 120° i trokutasti napon veće frekvencije [9]. Mjesta gdje se sijeku sinusno modulacijski i trokutni napon tranzistori uklapaju ili isklapaju, točnije dok je amplituda sinusnog signala veća od amplitude trokutastog tranzistor vodi (uklapa), a onoga trenutka kada je niža onda tranzistor prestaje voditi (isklapa). Na slici 4.24. vidimo kako nastaju dva PWM fazna napona u_{UN} i u_{VN} te linijskog napona $u_{UN} - u_{VN}$ između njih. [6]



Slika 4.24. Načelo sinusne modulacije impulsa [6]

Napon istosmjernog međukruga određuje maksimalni izlazni napon izmjenjivača. Efektivna vrijednost izlaznog napona sinusnog PWN izmjenjivača može poprimiti vrijednost do najviše 86.6% efektivne vrijednosti napojne mreže na koju je priključen [9]:

$$U_{iz\ ef} = \frac{U_{ul\ ef} \sqrt{6}}{2\sqrt{2}} = 0,866 U_{ul\ ef} \quad (4-7)$$

Gdje je:

$U_{iz\ ef}$ – izlazni efektivni napon izmjenjivača

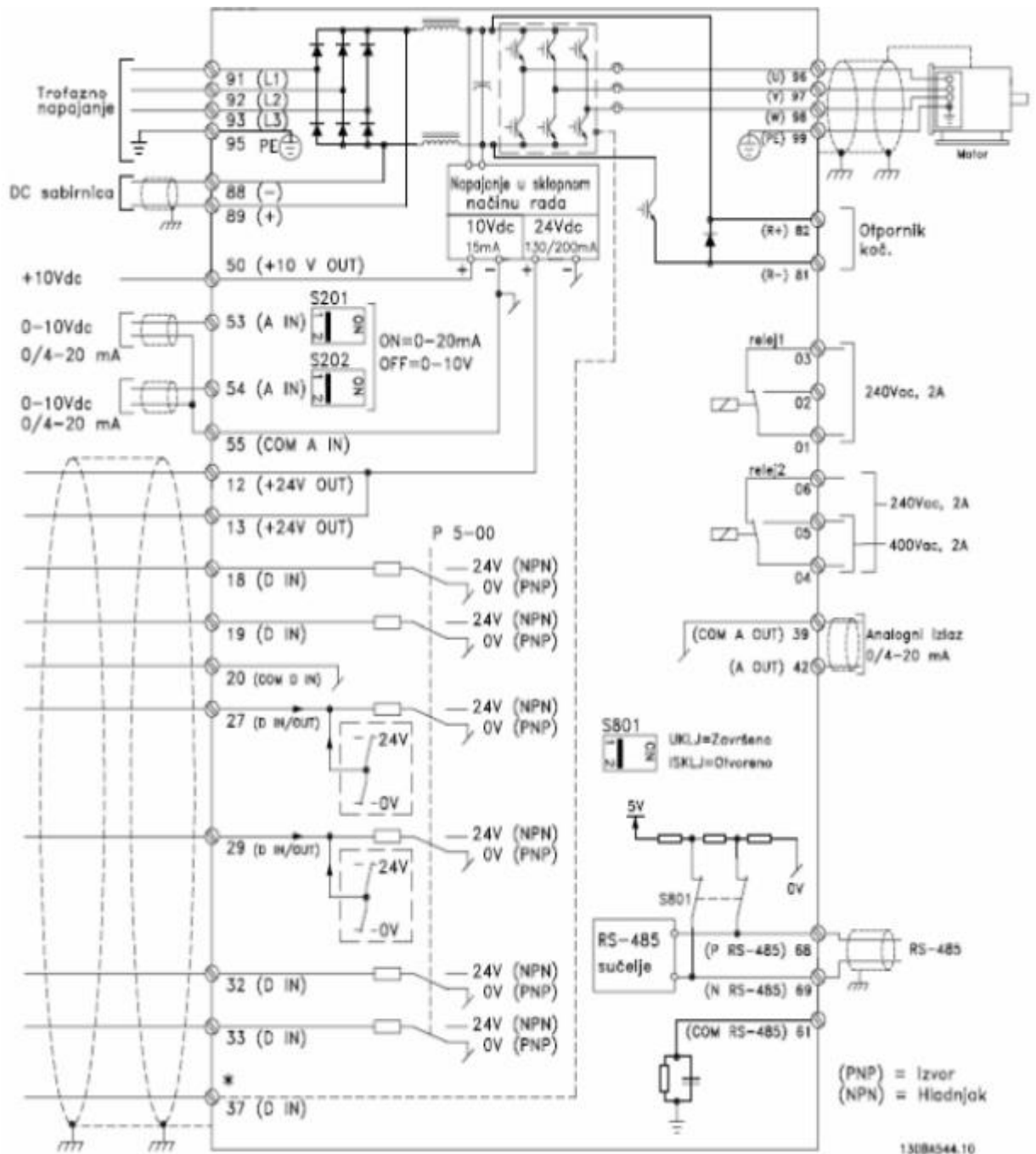
$U_{ul\ ef}$ – ulazni efektivni napon izmjenjivača

4.2.4.2 Asinkrona i sinkrona modulacija širine impulsa

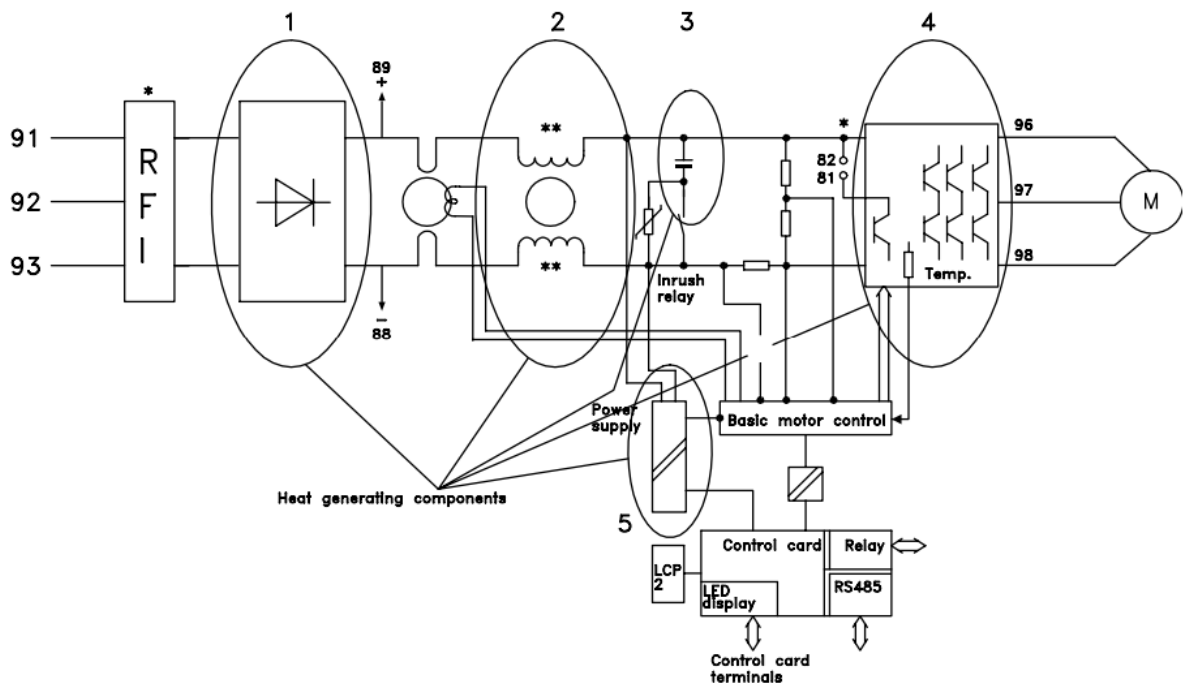
Sinkroni PWM temelji se na pronalasku optimuma između iskorištenja napona istosmjernog međukruga i frekvencijskog spektra harmonika. Održavanjem optimalnog sklopnog rasporeda, tj. uklapanjem i isklapanjem poluvodičkih sklopki u zadanom trenutku, sinkroni PWM što točnije održava fazni pomak između izlaznih faznih napona u željenom frekvencijskom području s tim da imamo najmanji frekvencijski spektar harmonika [9]. To je ostvarivo samo u ograničenom frekvencijskom području. Kada je frekvencija trokutasnog napona puno veća u odnosu na modulacijski napon onda ova dva napona smiju biti asinkrona tj. omjer frekvencija ne treba nužno biti cijeli broj, a kada je taj isti omjer blizu ili manji od 10 potrebno je sinkronizirati modulacijski i trokutni napon zbog nastanka smetajućih harmonika [7]. Sinkrona PWM se ne može upravljati smjerom magnetskog polja, u drugim riječima nemoguće je skokovito mijenjanje faznog kuta i amplitude izlaznog napona izmjenjivača. Asinkronom modulacijom optimiziramo magnetski tok statora uporabom napona statora uz kriteriji minimalne valovitosti momenta. Modulacijski ciklus sinkronizira se s ciklusom upravljanja pomoću vektora napona [7]. Ovom metodom modulacije mijenjanjem sklopnih trenutaka možemo po volji skokovito mijenjati fazni kut i amplitudu izlaznog napona izmjenjivača i time postizemo bolje dinamičke karakteristike motora [9].

4.2.5 Upravljački sklop

Upravljački sklop komunicira sa svim dijelovima frekvenzijskog pretvarača i na temelju prikupljenih informacija modulira napon na izlazu, otkriva i prikazuje pogreške, pruža zaštitu frekvenzijskom pretvaraču, razmjenjuje podatke s vanjskim sustavima (PLC) [7].



Slika 4.25. Realistična shema frekvenzijskog pretvarača [7]



Slika 4.26. Prikaz frekvencijskog pretvarača i njegovih komponenti koje stvaraju toplinu tj. gubitke [23]

Frekvencijski pretvarači imaju za trošilo predstavljaju izvor ali za energetska mrežu predstavljaju trošilo. Gubici se javljaju u ispravljaču, zavojnici, kapacitetu, sklopkama (pretežno korištenim IGBT tranzistorima i izvoru energije koji je zaslužan za upravljanjem sklopki. Najveća disipacija energije događa se na sklopkama i ona ovisi o četiri faktora: sklopnoj frekvenciji, naponu istosmjernog međukruga, dužini vodiča i izlaznoj struji [23]. Sveukupna efikasnost elektromotornog pogona tj. frekvencijskog pretvarača i asinkronog motora ovisi jako o teretu i brzini vrtnje asinkronog motora tako da se efikasnost pogona kreće u nekom intervalu od <80% – 95%> s tim da pri manjim brzinama i teretu efikasnost elektromotornog pogona je najmanja i da se povećava kako brzina vrtnje i teret rastu [24].

5. Zaključak

Frekvencijski pretvarač pruža elektromotornom pogonu nekoliko ključnih stavki kao što su optimalni radni uvjeti u svakom momentu rada motora, štednja energije i drugih resursa, povećavanje produktivnosti, duži vijek trajanja elektromotora i postrojenja, bolji uvjeti rada, pruža kontrolu i zaštitu cijelog procesa automatizacije. Lako održivi su, malih dimenzija s mogućnošću razmjene informacija s vanjskim sustavima. Automatizacijom proizvodnog procesa, što nam je omogućio frekvencijski pretvarač, uklanjamo faktor ljudske pogreške. Frekvencijske pretvarače dijelimo na izravne i neizravne, a ime kazuje glavnu razliku između njih. Tako da izravni frekvencijski pretvarač obavlja direktnu pretvorbu napona izmjenične napojne mreže određene amplitude i frekvencije u izmjenični napon promjenjive amplitude i frekvencije, a neizravni odrađuju tu istu pretvorbu ali kroz dva koraka. Frekvencijski pretvarači pronašli su svoju najveću ulogu u regulaciji asinkronih ali i sinkronih strojeva. Frekvencijski pretvarači mogu se upravljati skalarno i vektorski, skalarno je jednostavno i jeftino ali uz puno ograničenja, a vektorski je kompleksnije i skuplje ali rješava probleme skalarnog upravljanja i uvodi još veća poboljšanja pogona te će u skoroj budućnosti u potpunosti zamijeniti skalarno upravljanje. Za upravljanje asinkronih strojeva možemo koristiti ciklopretvarač ili neizravni frekvencijski pretvarač koji može mijenjati izlazni napon i frekvenciju dok za upravljanje sinkronih strojeva, za slučaj kada je uzbuda napajana iz izmjeničnog izvora, potreban je samo ispravljač s mogućnošću upravljanja izlaznog napona. Neizravni pretvarači zamjenjuju izravne u gotovo svim domenama rada zbog njihovih prednosti u upravljanju, mogućnosti komunikacije sa cijelim sustavom, nadzoru, zaštiti i sigurnosti cijelog elektromotornog pogona.

Literatura:

- [1] M. Jurica, „Sinkroni generator s istaknutim polovima“, DIPLOMSKI RAD, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017.
Dostupno na: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1292> (6.7.2023.)
- [2] I. Mandić, SINKRONI I ASINKRONI ELEKTRIČNI STROJEVI, ZAGREB, 2012.
ISBN 978-953-7048-25-9
Dostupno na: <https://bib.irb.hr/datoteka/629238.SinAsin.pdf> (5.7.2023.)
- [3] Nastavni materijali za kolegij osnove električnih pogona
Dostupno na: https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7294243/mod_resource/content/2/OEP%2007%203-Sinkroni%20strojevi.pdf (19.7.2023.)
- [4] D. Vulin, „Predavanje OEE, Trofazni upravljivi ispravljač u mosnom spoju“,
Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=iDe5qHK5Nis> (19.7.2023.)
- [5] Danfoss „Facts Worth Knowing about AC Drives“, danfoss.com
Dostupno na: https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPM403A402_FWK.pdf
(3.6.2023.)
- [6] I. ŠANTALAB, „IZRADA NEIZRAVNOG FREKVENCIJSKOG PRETVARAČA POMOĆU ARDUINA“, Završni rad, SVEUČILIŠTE SJEVER SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN, rujan 2015.
Dostupno na: <https://core.ac.uk/download/pdf/198119689.pdf> (28.5.2023.)
- [7] M. Dunković, „Naponsko-frekvencijska (skalarna) regulacija u pogonima“, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017.
Dostupno na: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1526> (11.6.2023)
- [8] I. Flegar, Elektronički energetska pretvarači 6.6.2023.
- [9] Z. Benčić, „Najvažnije o frekvencijskim pretvaračima“, Hrvatska, 2009.
Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/618721665/Najva%C5%BEnije-o-frekvencijskim-pretvara%C4%8Dima> (21.5.2023.)

-
- [10] Dostupno na: https://www.academia.edu/6183751/00_EMP_Predavanja5i6_bj (30.5.2023.)
- [11] F. Kruhek, „Frekvencijski pretvarači“, SeminarSKI rad, Veleučilište u Varaždinu
Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/143603238/Frekvencijski-pretvara%C4%8Di-seminarski-rad-UEE> (22.5.2023.)
- [12] Dostupno na: <https://www.scribd.com/document/403810928/Frekvencijski-regulator-docx> (9.6.2023.)
- [13] J. Tadić, „Naponsko frekvencijska regulacija i primjene“, Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017.
Dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1565/preview> (18.5.2023.)
- [14] Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Vector_control_\(motor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Vector_control_(motor)) (11.6.2023)
- [15] M. Barišić, „Analiza različitih načina upravljanja asinkronog motora korištenjem frekvencijskog pretvarača DANFOSS FC302“, Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017
Dostupno na: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1349/datastream/PDF/view> (19.6.2023.)
- [16] F. Koprivnjak, „Pravilan izbor frekvencijskog pretvarača ovisno o vrsti pogona“, Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2021.
Dostupno na: <https://repositorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:3246> (9.6.2023.)
- [17] D. Vučetić, „Predavanja pretvarači frekvencije“
Dostupno na:
https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20181219_080242_vucetic_Pretvaraci.frekvencije.ppt (30.5.2023.)
- [18] P. Rajaković, „Predavanje: Uvod u izmjenične pretvarače“
Dostupno na: <https://nastava.asoo.hr/wp-content/uploads/2020/03/Energetska-elektronika-IZMJENI%C4%8CNI-PRETVARA%C4%8CI.ppsx> (11.6.2023)
- [19] Dostupno na: <https://www.electricaltechnology.org/2022/08/cycloconverter.html> (19.7.2023.)

-
- [20] I. Kraljević, „Energetska učinkovitost frekvencijskog pretvarača DANFOSS FC-302“, Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017.
- Dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1420/preview> (27.5.2023.)
- [21] Dostupno na: https://aliah.ac.in/upload/media/12-05-20_1589290449.pdf (9.6.2023.)
- [22] Dostupno na: https://nastava.tvz.hr/~zstojanovic/predmeti/ep/Induktivno_opterecen_TMS.pdf (9.6.2023.)
- [23] Danfoss, dokument o hlađenju frekvencijskih pretvarača
- Dostupno na: https://files.danfoss.com/download/Drives/doc_MI28D102.pdf (25.8.2023)
- [24] Dokument „Vodič za procjenu učinkovitosti frekvencijskih pretvarača“
- Dostupno
na: https://library.e.abb.com/public/ab22cf21c367d260c12573e9004d88a4/efficiency_calc_guide.pdf (25.8.2023)

SAŽETAK

U ovome završnom radu riječ je o naponsko frekvencijskim pretvaračima i njihovoj primjeni. Na samom početku rada opisuju se područja primjene naponsko frekvencijskih pretvarača te kako su oni omogućili ili poboljšali rad istih. U drugom se poglavlju fokusira na električne strojeve kao najveće područje primjene naponsko frekvencijskih pretvarača te se opisuju osnove njihovog djelovanja kroz sheme i formule. U trećem poglavlju povezujemo osnove električnih strojeva s načinima upravljanja istih promjenom parametara napona i frekvencije. Tu spominjemo dva osnovna načina upravljanja naponsko frekvencijskim pretvaračem, skalarnom i vektorskom regulacijom. Nadalje poglavlje četiri govori o vrstama naponsko frekvencijskih pretvarača, njihovim prednostima i nedostacima, detaljno se analiziraju sheme i funkciju svakog elementa u njoj. Na poslijetku se govori o upravljačkom sklopu i efektivnosti naponsko frekvencijskog pretvarača i asinkroni stroja.

Ključne riječi: Frekvencijski pretvarači, ciklopretvarač, neizravni pretvarači, skalarna regulacija, asinkroni stroj

ABSTRACT

This final paper is about voltage-frequency converters and their application. At the very beginning of the work, the areas of application of voltage-frequency converters are described and how they enabled or improved their operation. The second chapter focuses on electrical machines as the largest area of application of voltage-frequency converters, and the basics of their operation are described through schemes and formulas. In the third chapter, we connect the basics of electrical machines with ways of controlling them by changing voltage and frequency parameters. Here we mention two basic ways of controlling the voltage-frequency converter, scalar and vector regulation. Furthermore, chapter four talks about the types of voltage-frequency converters, their advantages and disadvantages, the schemes and the function of each element in it are analyzed in detail. Finally, we talk about the control unit and the effectiveness of the voltage-frequency converter and the asynchronous machine.

Keywords: Frequency converters, cycloconverter, indirect converters, scalar regulation, asynchronous machine