Naponsko-frekvencijska (skalarna) regulacija u pogonima

Dunković, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:455547

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Preddiplomski studij

NAPONSKO-FREKVENCIJSKA (SKALARNA) REGULACIJA U POGONIMA

Završni rad

Matej Dunković

Osijek, 2017.


FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju	
Osijek,06.07.2017.	
Odboru za završne i diplomske ispite	
Prijedlog ocjene završnog rada	
Ime i prezime studenta:	Matej Dunković
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	3898, 18.07.2014.
OIB studenta:	44496488080
Mentor:	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Barić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Naponsko-frekvencijska (skalarna) regulacija u pogonima
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	06.07.2017.
Datum potvrde ocjene Odbora:	04.09.2017.

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

IZJAVA O ORIGINALNOSTIRADA

Osijek, 24.09.2017.

Ime i prezime studenta:	Matej Dunković
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	3898, 18.07.2014.
Ephorus podudaranje [%]:	4 %

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Naponsko-frekvencijska (skalarna) regulacija u pogonima**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.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:

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1 Opis zadatka 1

2. FREKVENCIJSKI PRETVARAČ 2

2.1. Izravni pretvarači 4

2.1.1. Ciklopretvarač 5

2.2. Neizravni pretvarači 5

2.2.1. Ispravljač 7

2.2.2. Istosmjerni međukrug 11

2.2.3. Izmjenjivač 14

2.2.4. Upravljački sklop 19

2.3. Vrste modulacija 20

2.3.1. Modulacija amplitude impulsa (PAM) 20

2.3.2. Modulacija širine impulsa (PWM) 21

2.4. Načini upravljanja frekvencijskim pretvaračima 23

2.5. Upotreba frekvencijskih pretvarača u industriji 25

2.5.1. Primjena frekvencijskog pretvarača na primjeru TE-TO Osijek 29

3. ASINKRONI MOTOR 34

3.1. Momentna karakteristika i nadomjesna shema motora 34

3.2. Načela upravljanja brzinom vrtnje asinkronih motora 37

3.2.1. Upravljanje mijenjanjem broja pari polova 37

3.2.2. Upravljanje mijenjanjem klizanja 38

3.2.3. Upravljanje mijenjanjem frekvencije 40

4. NAPONSKO – FREKVENCIJSKA (SKALARNA) REGULACIJA 41

5. ZAKLJUČAK 45

POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE 46

SAŽETAK 48

ABSTRACT 48

ŽIVOTOPIS 49

1. UVOD

Ekonomska i radna učinkovitost su sve više tražene te je sve veća potreba za uređajima koji olakšavaju radni proces i uklanjaju mogućnost pogreške u radnom procesu. U mnogim pogonima potrebno je precizno regulirati brzinu vrtnje i moment motora. Sve više procesa je automatizirano ukljanjajući faktor ljudske pogreške. Jedan od tih uređaja u automatizaciji je i frekvencijski pretvarač koji služi za upravljanje brzinom vrtnje izmjeničnih motora. Frekvencijski pretvarači su elektronički uređaji koji služe za pretvorbu izmjeničnog napona konstantne vrijednosti i frekvencije u napon promjenjive vrijednosti i frekvencije [1], a jedna od metoda regulacije je U/f skalarna metoda, kao najjednostavnija metoda regulacije, u kojoj se napon mijenja proporcionalno frekvenciji uz konstantan magnetski tok održavajući omjer U/f konstantnim. U završnom radu govorit će se prvo o frekvencijskim pretvaračima, o upotrebi pretvarača, načinu rada i upravljanje sa njima. Nakon frekvencijskih pretvarača bit će objašnjeno upravljanje brzinom vrtnje asinkronih motora promjenom napajanja statora i promjenom frekvencije. Promjena napon i frekvencije na kraju će biti objedinjena u naponsko-frekvencijskoj regulaciji.

1.1 Opis zadatka

U završnom radu potrebno je opisati način rada frekvencijskih pretvarača, njihovu upotrebu, upravljanje sa njima (povratne veze), razloge njihovog korištenja. Posebnu pažnju posvetiti naponsko-frekvencijskoj regulaciji. Pokazati primjere električnih shema praktičnih realizacija frekvencijskih pretvarača te objasniti rad njezinih komponenti. Shemama, tablicama ili izračunima pokazati korištenje frekvencijskih pretvarača i naponsko-frekvencijske regulacije.

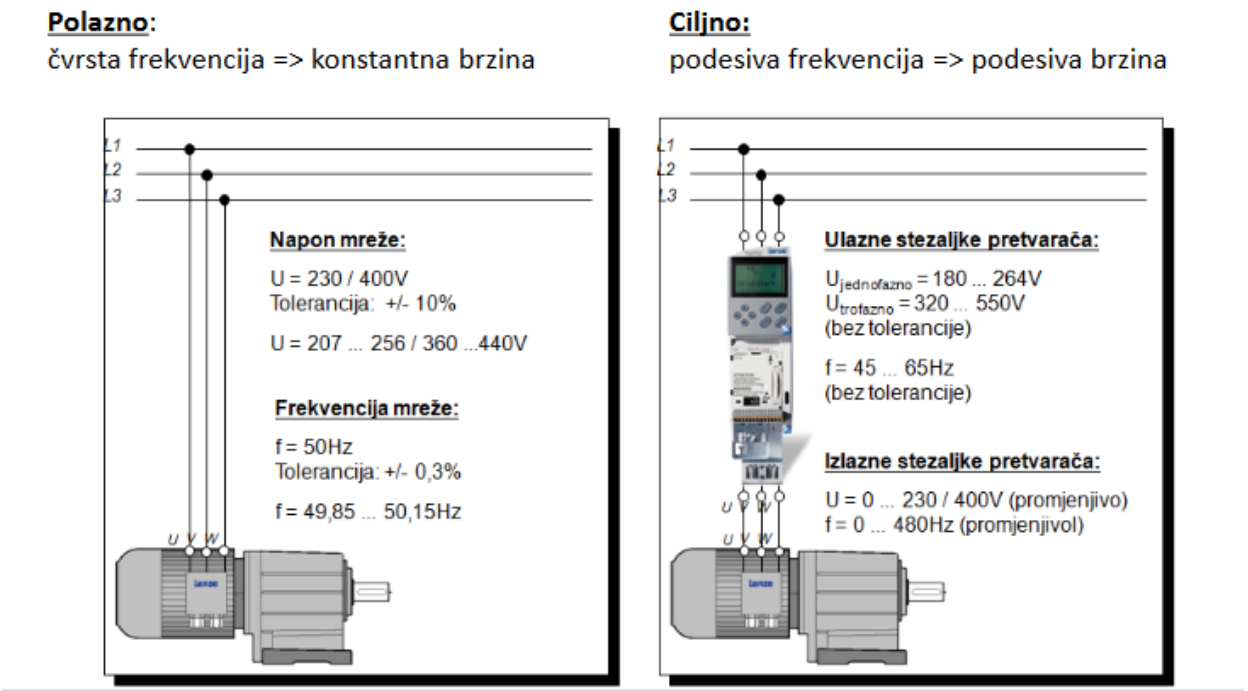
2. FREKVENCIJSKI PRETVARAČ

Frekvencijski pretvarač je uređaj koji služi za pretvorbu konstantnog izmjeničnog napona i frekvencije u napon i frekvenciju promjenjive vrijednosti. Danas sa svojim funkcijama frekvencijski pretvarač čini središte reguliranog elektromotornog pogona. Frekvencijski pretvarač omogućuje mjerenje varijabli i dijagnostiku te zaštitu, nadzor, upravljanje i regulaciju elektromotornog pogona odnosno procesnih veličina [2]. Frekvencijski pretvarač se sastoji od četiri veće cjeline, a to su: ispravljač, istosmjerni međukrug, izmjenjivač i upravljački dio. Brzina vrtnje okretnog polja statora asinkronog motora proporcionalna je frekvenciji, pri konstantnoj frekvenciji brzina vrtnje je konstantna, no za mnoge primjene u industriji potrebna je promjenjiva brzine vrtnje motora [2]. Brzina vrtnje motora dana je izrazom (2-1):

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}. \tag{2-1}$$

Pri čemu je n – brzina vrtnje motora, f – frekvencija napona i p – broj pari polova.

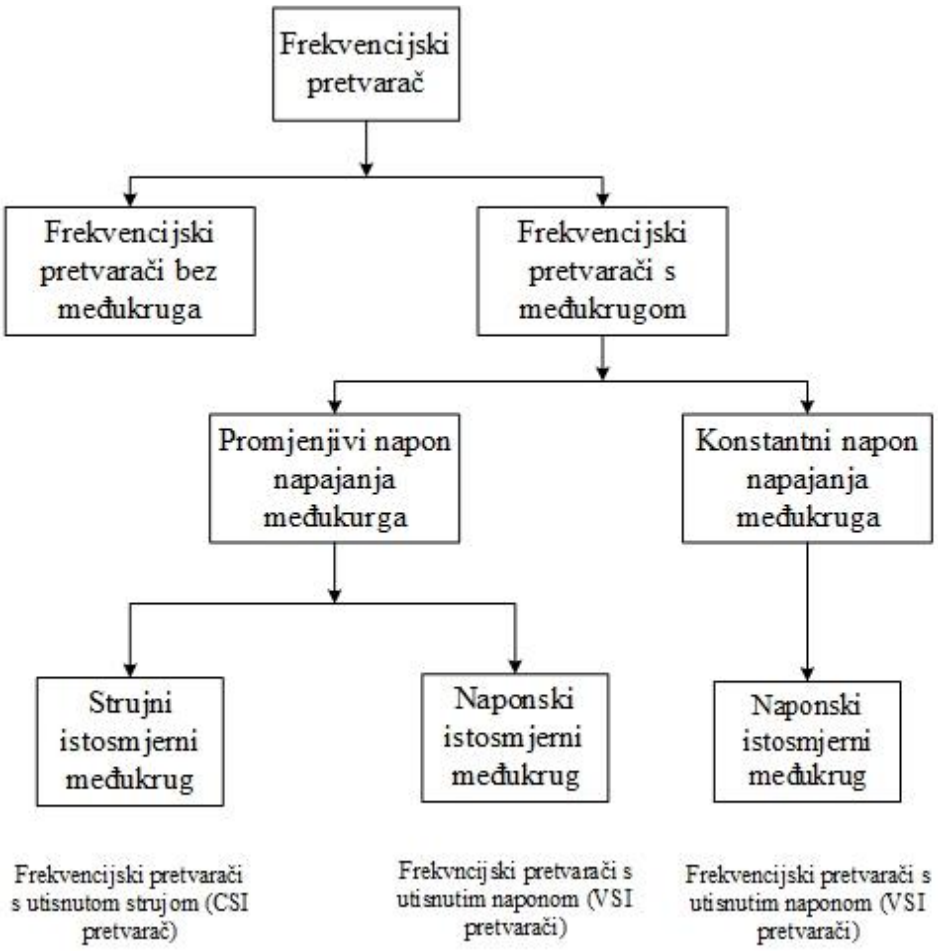
Frekvencijski pretvarači koji su u upotrebi u industriji rade na dva temeljna načela: frekvencijski pretvarači bez istosmjernog međukruga (izravni pretvarači) i pretvarači s istosmjernim međukrugom (neizravni pretvarači).



Slika 2.1. Zadaća frekvencijskog pretvarača [3]

Prema [4] mnoge su prednosti korištenja frekvencijskih pretvarača, kao što su:

1) Ušteda energije – moguće prilagođavanje brzine vrtnje motora prema potrebama pogona. Ovo je posebno izraženo u pogonima centrifugalnih crpki i ventilatora kod kojih snaga raste s trećom potencijom brzine vrtnje. Na primjer, centrifugalna crpka koja zavrtanjem ventila dovodi do smanjenja protoka. Pumpa i motor će i dalje raditi punom snagom što će dovesti do nepotrebnih gubitaka energije. No, sa regulacijom brzine vrtnje regulirana je i snaga pumpe i motora te se na taj način sprječava nepotreban gubitak snage;
2) Pokretanje i kočenje motora – za dobivanje manje struje pokretanja u odnosu na direktno pokretanje, frekvencijskim pretvaračem se postepeno podiže napon i frekvencija. Na taj način ne opterećuje se motor, odnosno to utječe na radni vijek motora;
3) Optimiziranje procesa – omogućuje se usklađivanje brzine vrtnje sa potrebama proizvodnog procesa;
4) Smanjeni troškovi održavanja – frekvencijski pretvarač zahtijeva minimalno održavanje. Frekvancijski pretvarač indirektno utječe na životni vijek pogona tako što npr. kod vodoopskrbnih sustava spriječava vodeni udar koji nastaje pri izravnom isključenju crpnih motora s pojne mreže;
5) Bolja i sigurnija radna sredina – npr. kod ventilatora se može smanjiti brzina pri čemu se smanjuje buka i strujanje zraka, podešavanje brzine pokretnih traka, itd.;
6) Mogućnost podešavanja mehaničke karakteristike – motor pomoću frekvencijskog pretvarača može razviti različite momente za različite brzine vrtnje, razvijanje momenta većeg od nazivnog prekretnog, itd.



Slika 2.2. Vrste frekvencijskih pretvarača [1]

Frekvencijski pretvarači mogu se svrstati u dvije osnovne skupine:

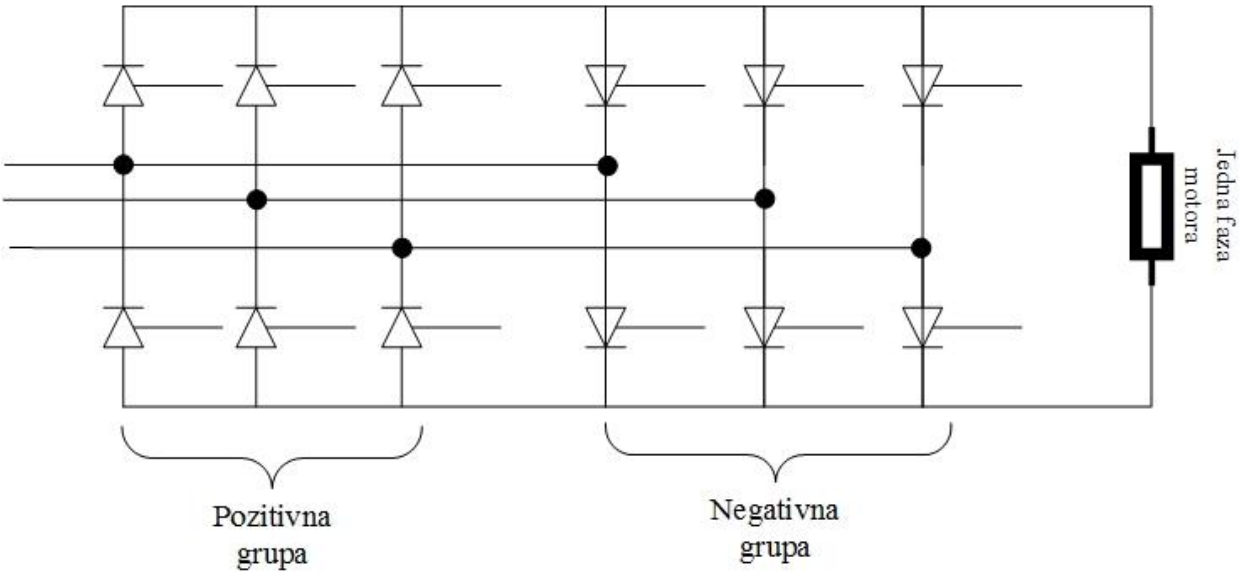
- Frekvencijski pretvarači bez međukruga (izravni pretvarači)
- Frekvencijski pretvarači s međukrugom (neizravni pretvarači)

2.1. Izravni pretvarači

Izravni pretvarači nemaju istosmjerni međukrug, oni izravno vrše pretvorbu izmjenične pojne mreže u izmjenični napon promjenjive amplitude i frekvencije [4]. Izravni pretvarači se općenito koriste gdje je zahtjevana velika snaga.

2.1.1. Cikloprevarač

Prema [5] cikloprevarači su izravni pretvarači frekvencije koji izlazni napon grade iz dijelova ulaznog napona. Trofazni cikloprevarač ima tri grane, svaka grana napaja jednu fazu i sastavljena je od po dva antiparalelno spojena tiristorska ispravljačka mosta koji se nazivaju pozitivna i negativna grupa (Slika 2.3. [5]). Cikloprevarači su komutirani pojnom mrežom te imaju izlaznu frekvenciju ograničenu na najviše 2/3 frekvencije mreže, zbog toga se uglavnom koriste za sporohodne pogone velikih snaga [1]. Cikloprevarač ne sadrži vlastita skladišta energije te je zbog toga ulazna struja nepravilnog oblika i ovisna je broju okretaja i opterećenju motora [5].

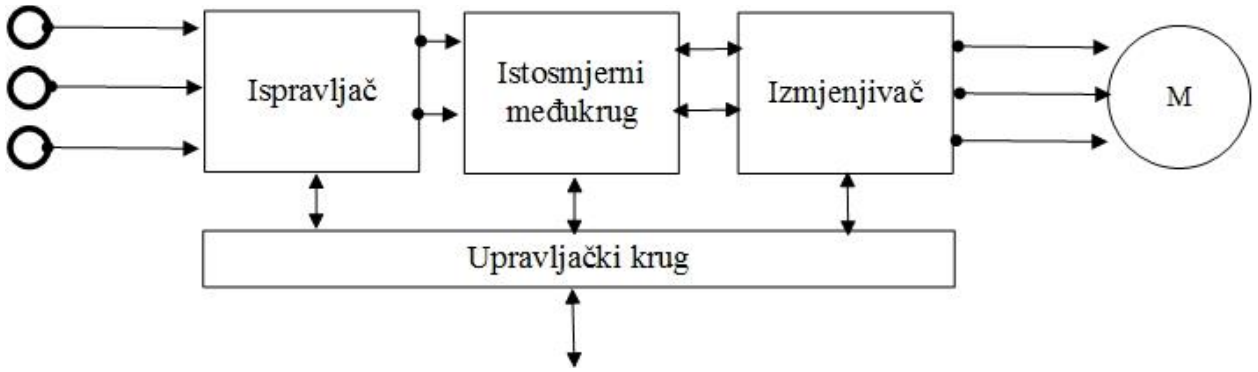


Slika 2.3. Grana trofaznog cikloprevarača [5]

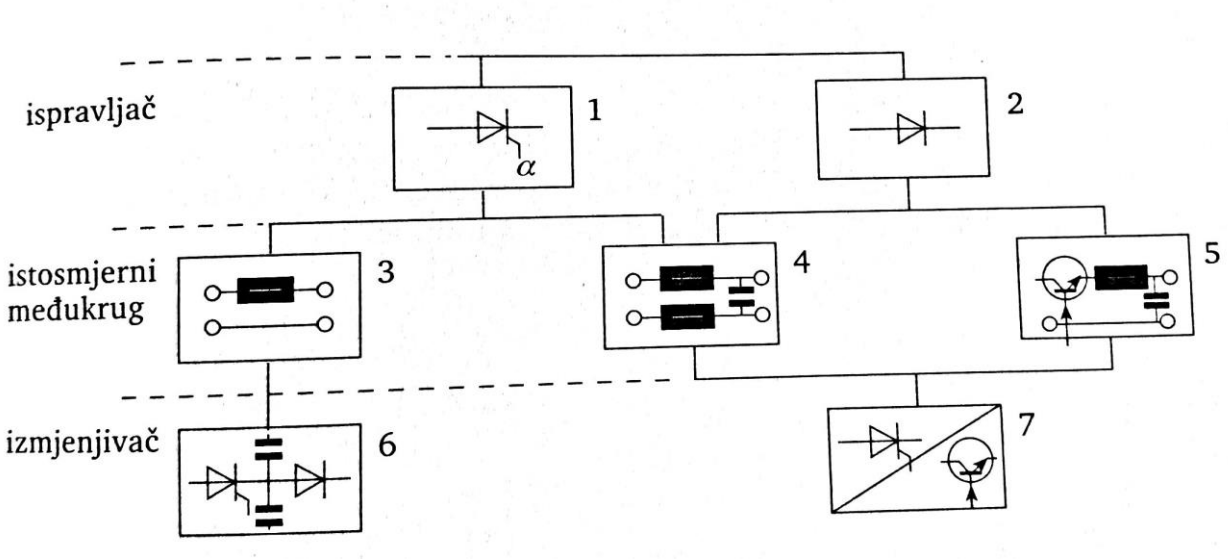
2.2. Neizravni pretvarači

Neizravni pretvarači su pretvarači koji sadrže istosmjerni međukrug. Neizravnim pretvaračima se izmjenični napon prvo pretvara u istosmjerni, te se preko izmjenjivača opet pretvara u izmjenični napon željene amplitude i frekvencije. Neizravni pretvarači mogu se podijeliti u dvije skupine [1]:

- pretvarači sa strujnim ulazom u izmjenjivač
- pretvarači sa naponskim ulazom u izmjenjivač



Slika 2.4. Pojednostavljena blok shema frekvencijskog pretvarača [1]



Slika 2.5. Strukture frekvencijskih pretvarača [1]

Komponente sa slike 2.5. :

1 – upravljivi ispravljač;

2 – neupravljivi ispravljač;

3 – strujni istosmjerni međukrug s promjenjivom strujom;

4 – naponski istosmjerni međukrug;

5 – naponski istosmjerni međukrug s regulatorom srednje vrijednosti napona (s čoperom);

6 – neupravljivi izmjenjivač;

7 – izmjenjivač na načelu modulacije širine impulsa [1].

Tablica 2.1. Načela upravljanja frekvencijskim pretvaračima [1]

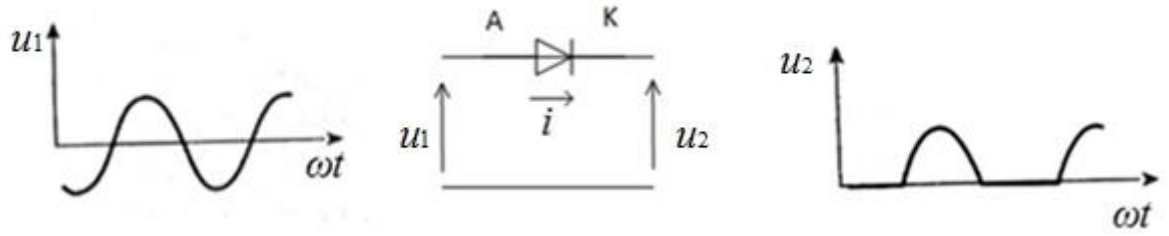
Primjer upravljanja	Skraćenica	Brojevi komponenti sa slike 2.5.
Pretvarač s naponskim ulazom u izmjenjivač na načelu modulacije širine impulsa (engl. *Pulse-width modulated converter*)	PWM	Ispravljač: 2 Međukrug: 4 Izmjenjivač: 7
Pretvarač s naponskim ulazom u izmjenjivač na načelu modulacije amplitude impulsa (engl. *Pulse-amplitude modulated converter*)	PAM	Ispravljač: 1; Ispravljač: 2 Međukrug: 4; Međukrug: 5 Izmjenjivač: 7
Pretvarač sa strujnim ulazom u izmjenjivač (engl. *Control source inverter*)	CSI	Ispravljač: 1 Međukrug: 3 Izmjenjivač: 6

2.2.1. Ispravljač

Ispravljač spaja istosmjernu pojnu mrežu i istosmjerni međukrug. Na ulaz ispravljača se priključuje jednofazna (230 V/50 Hz) ili trofazna (3x400 V/50 Hz) pojna mreža, ovisno o zahtjevanoj snazi. Dok je na izlazu ispravljača pulzirajući istosmjerni napon koji se predaje istosmjernom međukrugu [1]. Ispravljači se mogu sastojati od dioda (neupravljivi), tiristora (upravljivi) ili od kombinacije dioda i tiristora (poluupravljivi).

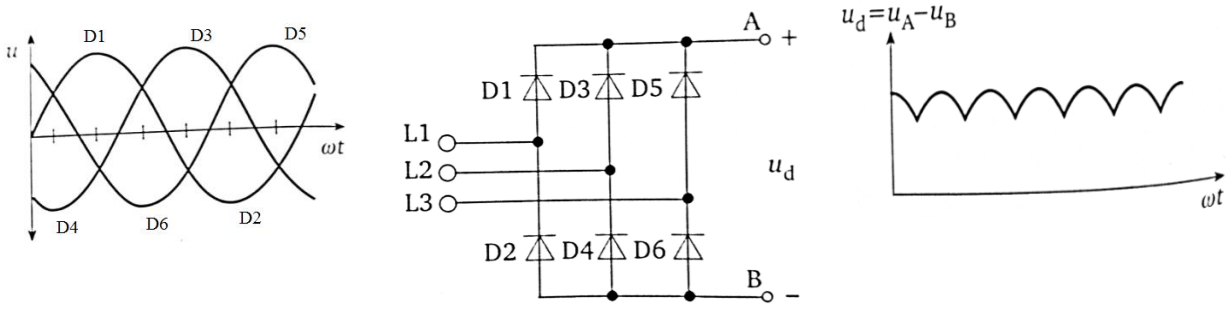
2.2.1.1. Neupravljivi ispravljač

Neupravljivi ispravljač sastoji se od dioda. Dioda je neupravljiva poluvodička komponenta jer struje i naponi odlučuju hoće li voditi ili ne. Struja anode je pozitivna kada dioda vodi, a napon anoda-katoda je negativan kada dioda ne vodi [6]. Dioda omogućuje smjer struje samo u jednom smjeru, od anode do katode i to kada je anoda na potencijalu većem nego katoda, suprotan smjer struje je blokiran. Dioda nema upravljačka svojstva pa ne može uklopiti ili isklopiti struju po volji [1].



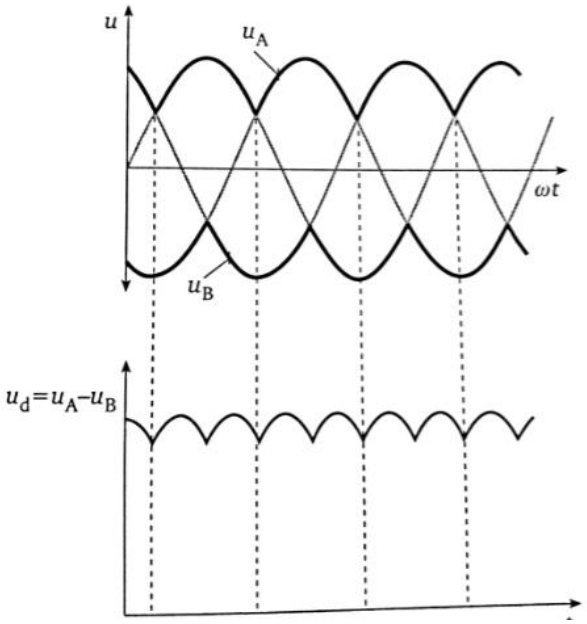
Slika 2.6. Dioda

Prema [1] na slici 2.7.[1] prikazan je neupravljivi punovalni ispravljač u trofaznom mosnom spoju i on se sastoji od katodne (diode D1, D3 i D5) i anodne (diode D2, D4, D6) skupine. Diode D1,D3 i D5 vode tijekom pozitivne poluperiode mrežnog faznog napona i svaka dioda vodi trećinu vremena periode (120^o električno). Isto trećinu vremena periode vode diode D2, D4 i D6 samo što one vode tijekom negativne poluperiode. Vremenski intervali vođenja anodne i katodne skupine međusobno su fazno pomaknuti za šestinu periode (60^o električno). Izlazni napon ispravljača je razlika napona anodne i katodne skupine.



Slika 2.7. Neupravljivi punovalni ispravljač u trofaznom mosnom spoju [1]

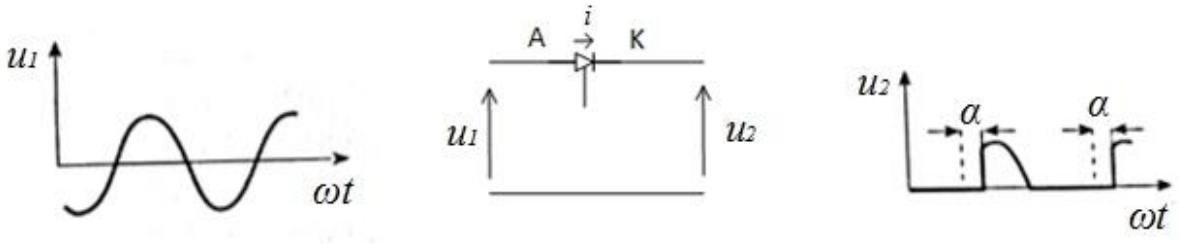
Srednja vrijednost izlaznog napona ispravljača je $1{,}35 \cdot U_{ef}$ gdje je U_{ef} efektivna vrijednost linijskog napona.



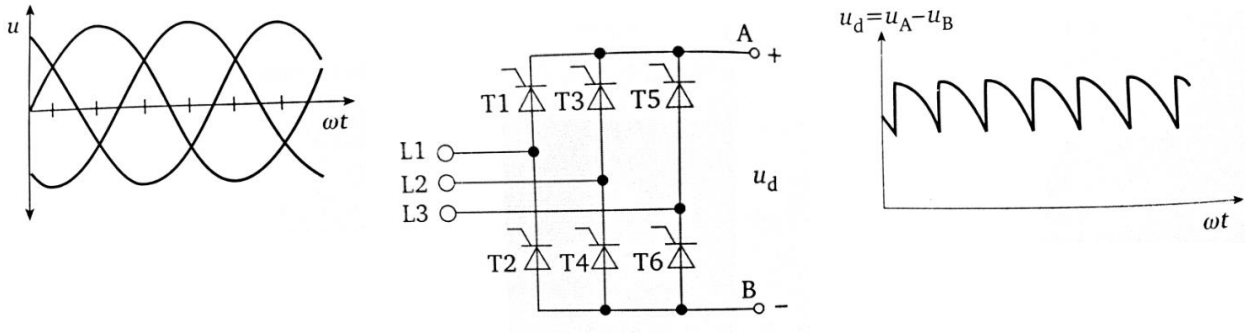
Slika 2.8. Izlazni napon neupravljivog punovalnog ispravljača u trofaznom mosnom spoju [1]

2.2.1.2. Upravljivi ispravljači

Upravljivi ispravljač sastoji se od tiristora. Prema [1] klasični tiristor propušta struju samo u jednom smjeru, slično kao i dioda, od anode do katode. Razlika između tiristora i diode je ta što tiristor ima upravljačku elektrodu, da bi tiristor proveo, na upravljačku elektrodu potrebno je dovesti napon veći od napona na katodi, potrebno je dovesti struju u tiristor. Nakon što tiristor provede više nije potrebna struja na upravljačkoj elektrodi za održavanje struje kroz tiristor, k tome tok struje kroz tiristor se ne može prekinuti strujom upravljačke elektrode, tiristor će voditi sve dok struja koja teče kroz njega ne padne na nulu.

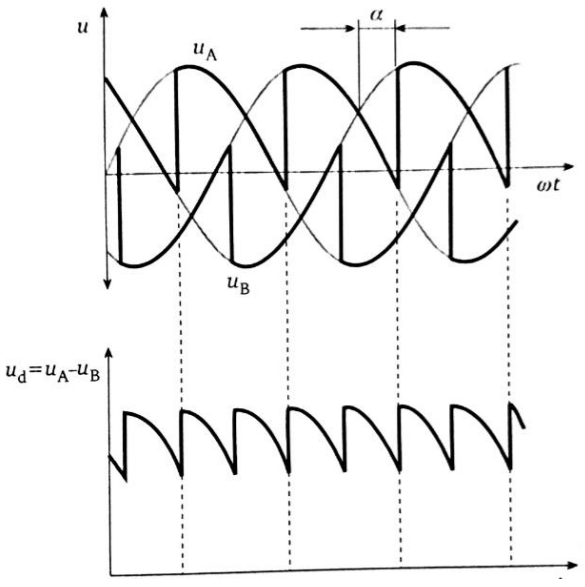


Slika 2.9. Tiristor [1]



Slika 2.10. Punoupravljivi ispravljač u trofaznom mosnom spoju [1]

Kut koji predstavlja vremensko odgađanje uklapanja tiristora zove se kut upravljanja (α) i izražava se u stupnjevima. Kašnjenje uklapanja se mjeri u odnosu na kut kod kojeg bi dioda uklopila kada bi bila umjesto tiristora [6]. Taj trenutak kod punoupravljivog ispravljača u trofaznom mosnom spoju je 30^o električno nakon prolaza faznog napona kroz nulu [1]. Ako kut upravljanja postane veći od 90^o električno upravljivi ispravljači mogu prijeći u izmjenjivački režim rada, tako ispravljač postane izmjenjivač, a istosmjerni krug predaje energiju pojnoj mreži [1].



Slika 2.11. Izlazni napon punoupravljivog ispravljača u trofaznom mosnom spoju [1]

Srednja vrijednost napona punoupravljivog tiristorskog ispravljača u trofaznom mosnom spoju dana je izrazom (2-2)[1]:

$$\bar{U} = 1,35 \cdot U_{ef} \cdot \cos\alpha \,. \tag{2-2}$$

U_{ef} u prethodnom izrazu je efektivna vrijednost linijskog napona.

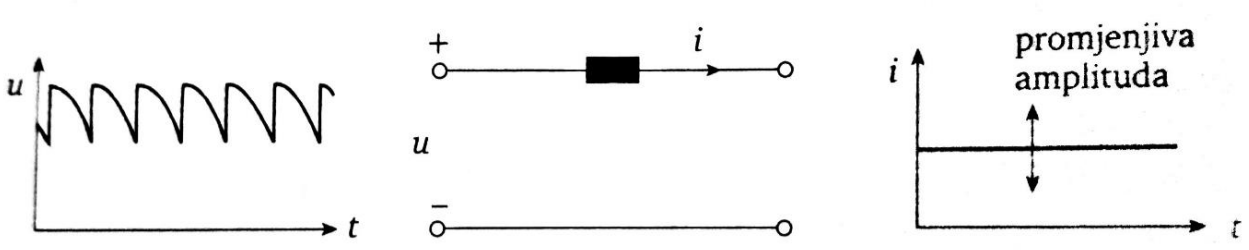
Pomoću upravljivih ispravljača moguće je slanje energije dobivene kočenjem iz istosmjernog međukruga u izmjeničnu pojnu mrežu. Upravljivi ispravljači u odnosu na neupravljive opterećuju pojnu mrežu višim harmonicima i većom jalovom komponentom struje ako je kut upravljanja veći od nule [1].

2.2.2. Istosmjerni međukrug

Preko izmjenjivača iz istosmjernom međukruga motor uzima električnu energiju, što znači da istosmjerni međukrug služi za pohranu energije. Ovisno o rješenju ispravljača i izmjenjivača dva su tipa istosmjernog međukruga: strujni i naponski [1].

2.2.2.1. **Strujni međukrug** (izmjenjivači s utisnutom strujom)

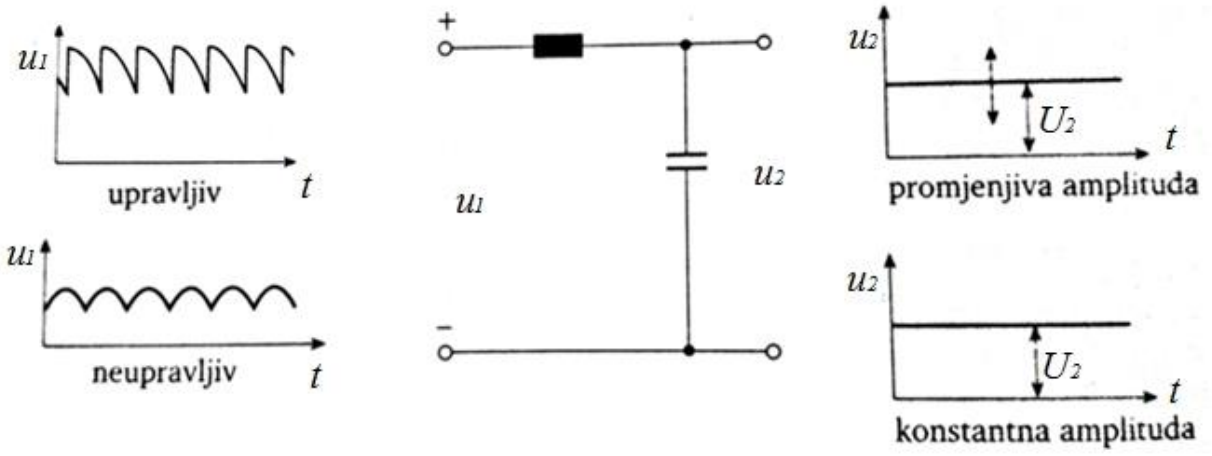
Frekvencijski pretvarač sa strujnim međukrugom ima istosmjerni međukrug koji se sastoji od prigušnice velikog induktiviteta, a u tom slučaju ispravljač je uvijek upravljiv. Takva kombinacija upravljivog ispravljača i prigušnice velikog induktiviteta tvori promjenjivi strujni izvor[1]. Teret motora određuje vrijednost napona motora. Prednost ovakvog međukruga je ta što se energija dobivena regenerativnim kočenjem može vraćati u pojnu izmjeničnu mrežu bez dodatnih komponenti [1].



Slika 2.12. Strujni istosmjerni međukrug [1]

2.2.2.2. **Naponski međukrug** (izmjenjivači s utisnutim naponom)

Frekvencijski pretvarač s naponskim međukrugom ima istosmjerni međukrug koji je niskopropusni filtar, sadrži prigušnicu i kondenzator, a u tom slučaju ispravljač može biti ili upravljiv ili neupravljiv [1]. U slučaju neupravljivog ispravljača ulazni napon izmjenjivača (u_2) približno je konstantan, a u slučaju upravljivog ispravljača ulazni napon izmjenjivača (u_2) može se mijenjati po volji. Filtar u međukrugu služi za smanjivanje valovitosti izlaznog napona ispravljača u_1 [1].



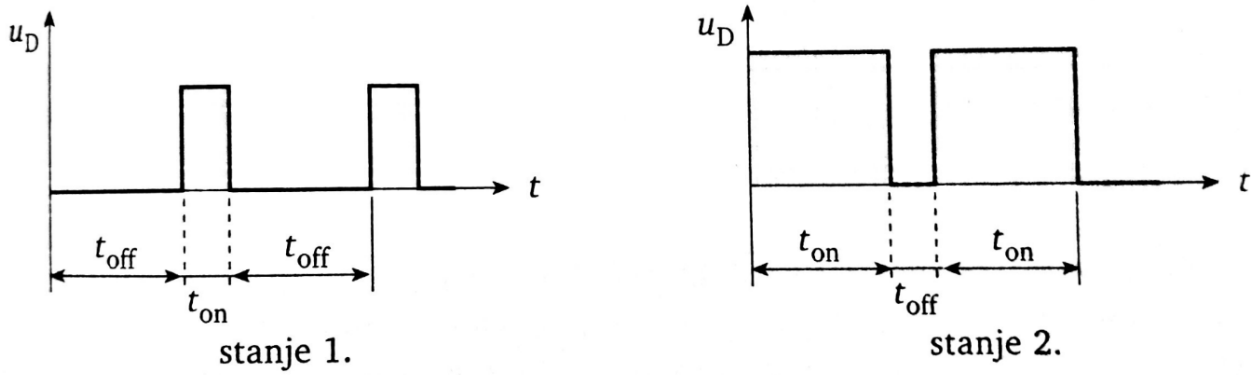
Slika 2.13. Naponski istosmjerni međukrug s promjenjivim i konstantnim naponom napajanja [1]

Mijenjanje ulaznog napona izmjenjivača može se ostvariti kombinacijom neupravljivog ispravljača i čoperom ispred filtra. Kako čoperski tranzistor periodički uklapa i isklapa, to daje na izlazu filtra srednju vrijednost koja je definirana izrazom (2-3)[1]:

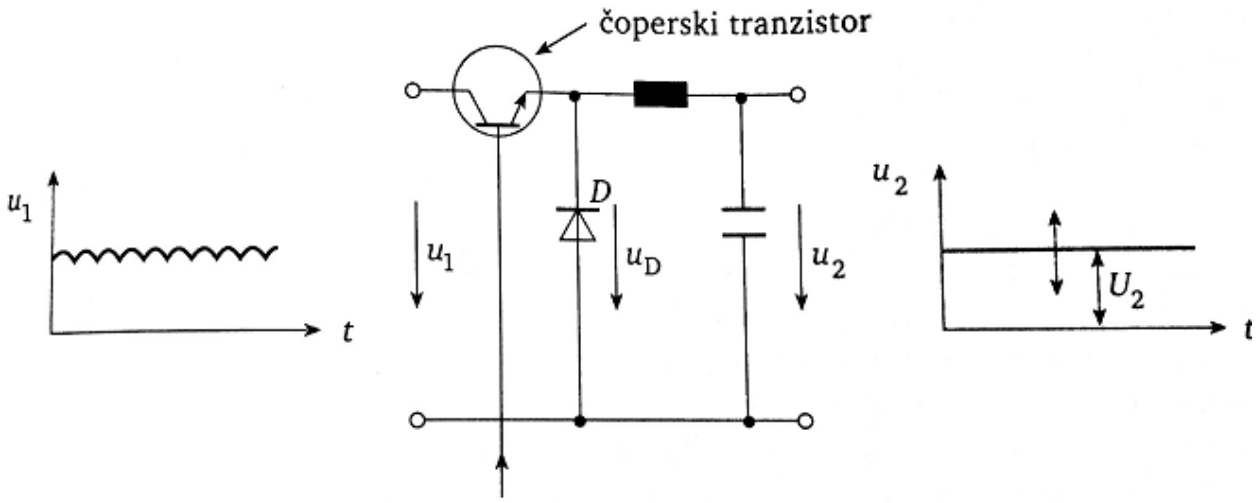
$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 \cdot \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \tag{2-3}$$

$\bar{U}_2$ - srednja vrijednost napona poslije čopera
$\bar{U}_1$ - srednja vrijednost napona prije čopera
t_{off} - vrijeme blokiranja tranzistora
t_{on} - vrijeme vođenja tranzistora

Upravljački sklop ima funkciju uspoređivanja napona iza filtra ($\bar{U}_2$) s referentnim naponom i ako postoji razlika onda se povećava ili smanjuje vrijeme vođenja tranzistora (faktor upravljanja čopera - $t_{on} / (t_{on} + t_{off})$) [1]



Slika 2.14. Regulacija napona napajanja istosmjernog međukruga čoperskim tranzistorom [1]



Slika 2.15. Naponski istosmjerni međukrug s čoperskim tranzistorom [1]

Dioda D sa slike 2.15. osigurava put struji u intervalu kad je tranzistor isklopljen, da je nema nastao bi veliki napon na prigušnici filtra [1].

Istosmjerni međukrug ima nekoliko funkcija, osim flitriranja, a to su: odvajanje izmjenjivača od ispravljača, smanjivanje strujnih harmonika pojne mreže i omogućuje udarnu preopteretivost pretvarača na račun pohranjene energije [1].

Za kondenzatore u istosmjernom međukrugu ugrađuju se elektrolitski kondenzatori velikog kapaciteta, a malog nadomjesnog serijskog otpora. Da ne bi došlo do oštećenja kondenzatora i drugih komponenti ugrađuju se otpornici između ispravljača i istosmjernog međukruga za ograničenje struje nabijanja. Nakon što se kondenzator nabije na radni otpor, poseban sklop ukapča relej koji kratko spaja otpornik da ne bi u daljnjem radu gubici na otporniku prouzročili smanjenje djelotvornosti pretvarača [1].

2.2.3. Izmjenjivač

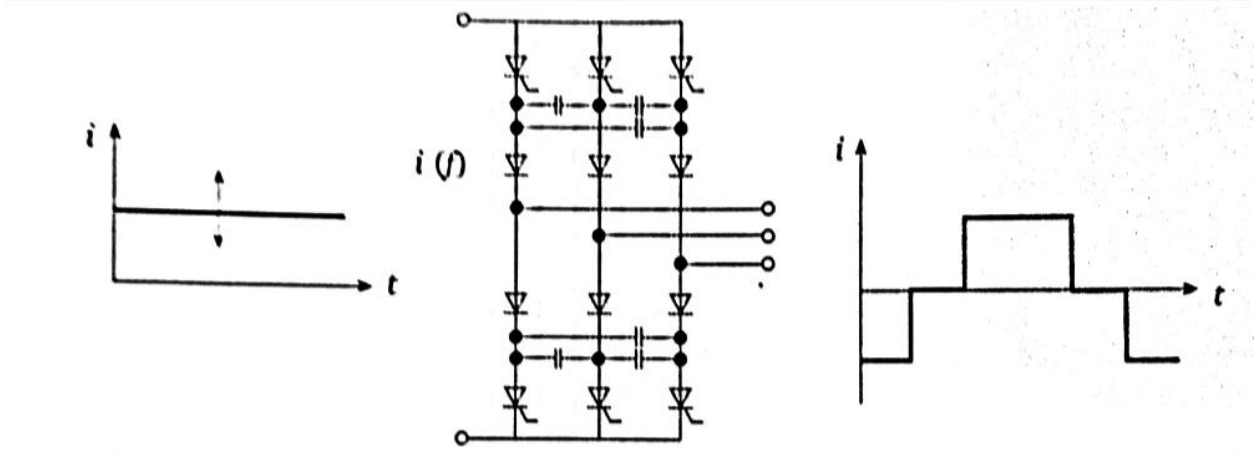
Izmjenjivač je zadnji od komponenti u frekvencijskom pretvaraču i on je direktno spojen na motor te je njegov zadatak pretvoriti napon iz istosmjernog međukruga u trofazni izmjenični napon željene amplitude i frekvencije [4]. Izmjenični motor koji je spojen direktno na izmjeničnu pojnu mrežu ima optimalne uvjete samo u nazivnoj radnoj točki, a izmjenični motor koji je priključen na pojnu mrežu frekvencijskim pretvaračem ima optimalne radne uvjete u cijelom području namještanja brzine vrtnje [1]. Napajanje izmjenjivača iz istosmjernog međukruga može biti ostvareno na nekoliko načina:

- istosmjernom strujom promjenjive amplitude;
- istosmjernim naponom promjenjive amplitude;
- istosmjernim naponom konstantne amplitude [1].

Kakvu god veličinu da izmjenjivač dobije, on mora odrediti frekvenciju izlaznog napona, a amolituda izlaznog napona može se podesiti ili istosmjernim međukrugom ili izmjenjivačem. Ako su struja ili napon istosmjernog međukruga promjenjivi onda izmjenjivač određuje samo frekvenciju izlaznog napona, no ako je napon istosmjernog međukruga konstantan onda izmjenjivač određuje i frekvenciju i amplitudu izlaznog napona [1]. Glavne komponente izmjenjivača su upravljivi poluvodički ventili koji se nalaze u tri para grana trofaznog mosnog spoja. U izmjenjivačima se upotrebljavaju bipolarni tranzistori (LTR njem. *Leistungstransistor*), unipolarni tranzistori (MOS engl. *Metal oxide semiconductor*) i tranzistori s izoliranom upravljačkom eletkrodom (IGBT engl. *Insulated gate bipolar transistor*), dok su se prije u izmjenjivačima koristili tiristori. Tranzistori mogu uklopiti i isklopiti struju u željenom trenutku signalima iz upravljačkog sklopa, dok tiristori mogu uklopiti struju u željenom trenutku no za isklapanje su potrebni posebni komutacijski krugovi [1].

2.2.3.1. Izmjenjivači s promjenjivim naponom istosmjernog međukruga

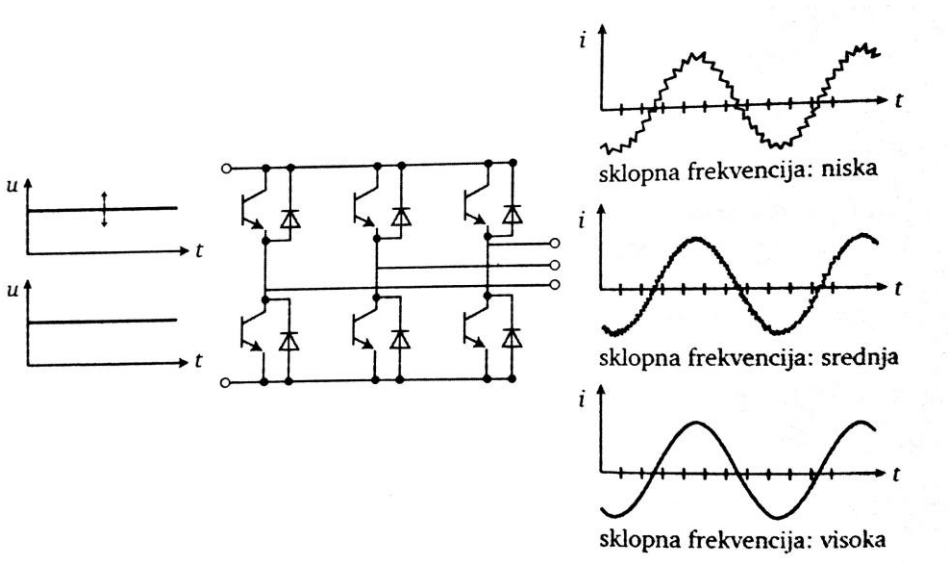
Klasični izmjenjivač se sastoji od šest dioda, tiristora i kondenzatora kako je i prikazano slikom 2.16.. Kondenzatori imaju funkciju isklapanja tiristora (komutacijski kondenzatori), a diode sprječavaju da komutacijski kondenzatori izbiju putem motora [1].



Slika 2.16. Klasični izmjenjivač s promjenjivim naponom strujog međukruga [1]

2.2.3.2. Izmjenjivači s promjenjivim ili konstantnim naponom istosmjernog međukruga

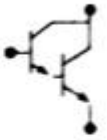
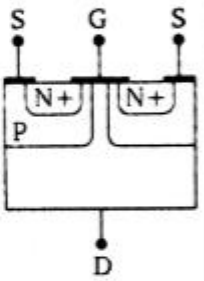
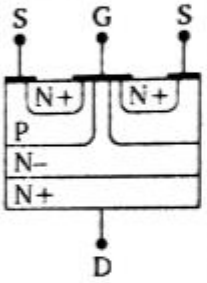
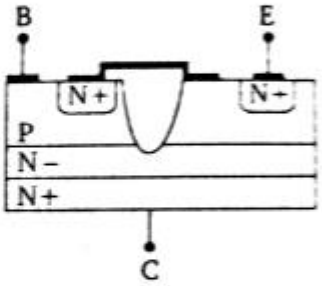
Izmjenjivač se sastoji od šest punoupravljivih poluvodičkih ventila kako je i prikazano slikom 2.17.[1]. Ventili uklapaju i isklapaju djelovanjem signala iz upravljačkog sklopa, te modulacijskim tehnikama kojima se može dobiti željeni valni oblik, među kojima su i modulacija amplitude impulsa i modulacija širine impulsa. Ako je riječ o modulaciji amplitude impulsa (PAM engl. *Pulse-amplitude modulation*), tada je istosmjerni napon na ulazu u izmjenjivač promjenjiv, a naponom upravljan oscilator određuje frekvenciju izlaznog napona[1]. Modulacijom širine impulsa (PWM engl. *Pulse-width modulation*) istosmjerni napon na ulazu u izmjenjivač je konstantan, te se svaki poluval izlaznog napona sastoji od niza impulsa. Mijenjanjem širine tih impulsa mijenja se amplituda izlaznog napona, a mijenjem polariteta mijenja se njegova frekvencija [1].



Slika 2.17. Izmjenjivač s utisnutim promjenjivim ili konstanim naponom. Desno je prikazan utjecaj sklopne frekvencije na valni oblik struje motora [1]

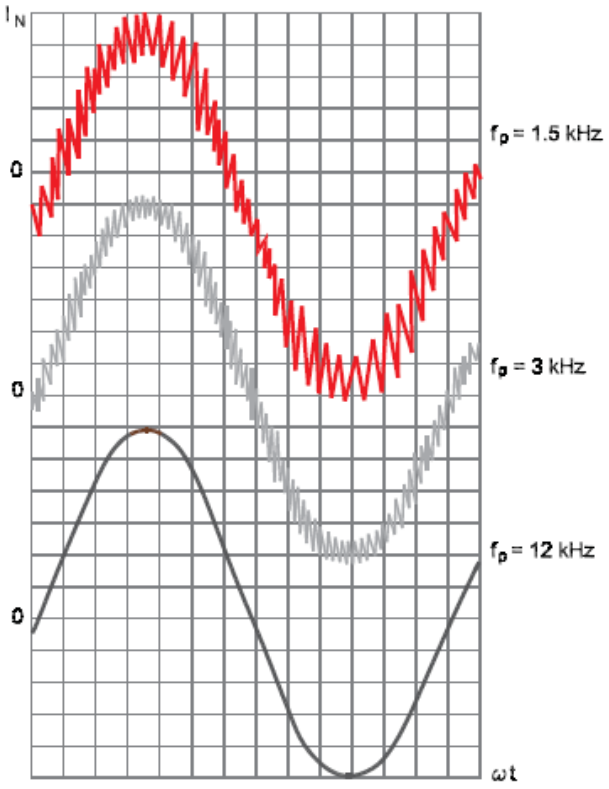
2.2.3.3. Tranzistori u izmjenjivačima

Svi tranzistori koji se upotrijebljavaju u izmjenjivačima imaju male sklopne gubitke te im je sklopna frekvencija visoka. Prednosti povećanja sklopne frekvencije su: smanjenje magnetske buke motora i približavanje struje motora sinusoidi, tj. što je veća sklopna frekvencija to je valni oblik struje sličniji sinusoidi i to znači manje gubitke u motoru [1]. Povećanjem sklopne frekvencije rasti će sklopni gubici u tranzistorima zbog zagrijavanja izmjenjivača i dolazit će do periodičkih prenapona na motoru zbog naprezanja izolacije motora. U konačnici izbor tranzistora svodit će se na kompromis između gubitaka u motoru, magnetske buke i gubitaka u izmjenjivaču [1]. Na slici 2.18.[1] dane su razlike između tri glavne skupine visokofrekvencijskih tranzistora.

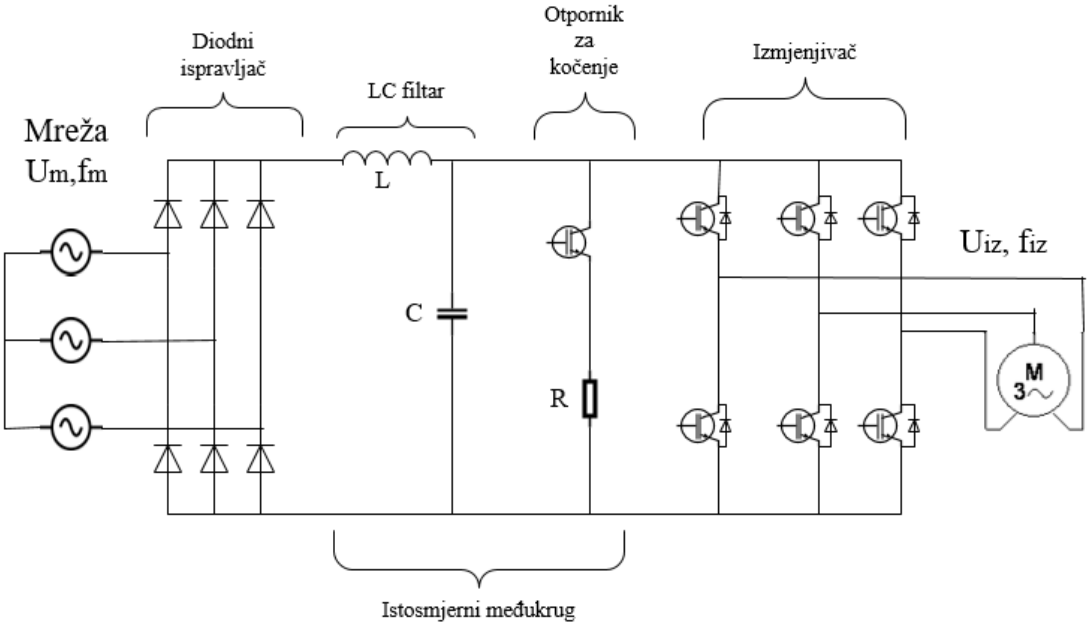
Poluvodički ventil / Svojstva	**MOSFET** (tranzistor s učinkom polja)	**IGBT** (bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom)	**LTR** (bipolarni tranzistor)
Simbol			
Raspored P- i N-slojeva			
Strujna opteretivost: – pad napona – gubici	 veliki veliki	 mali mali	 mali mali
Naponska opteretivost	niska	visoka	srednja
Sklopna svojstva: – vrijeme uklapanja – vrijeme isklapanja – gubici	 kratko kratko beznačajni	 srednje srednje srednji	 srednje dugo veliki
Pobudni stupanj: – snaga – upravljačka veličina	 mala napon	 mala napon	 velika struja

Slika 2.18. Usporedba tranzistora koji se upotrebljavaju u sklopkama izmjenjivača [1]

U današnje vrijeme najviše se upotrebljava IGBT jer ima dobru strujnu opteretivost, dobre frekvencijske karakteristike, male zahtjeve na pobudni stupanj i visoku naponsku opteretivost [1].



Slika 2.19. Utjecaj radne frekvencije izmjenjivača na valni oblik struje motora [7]

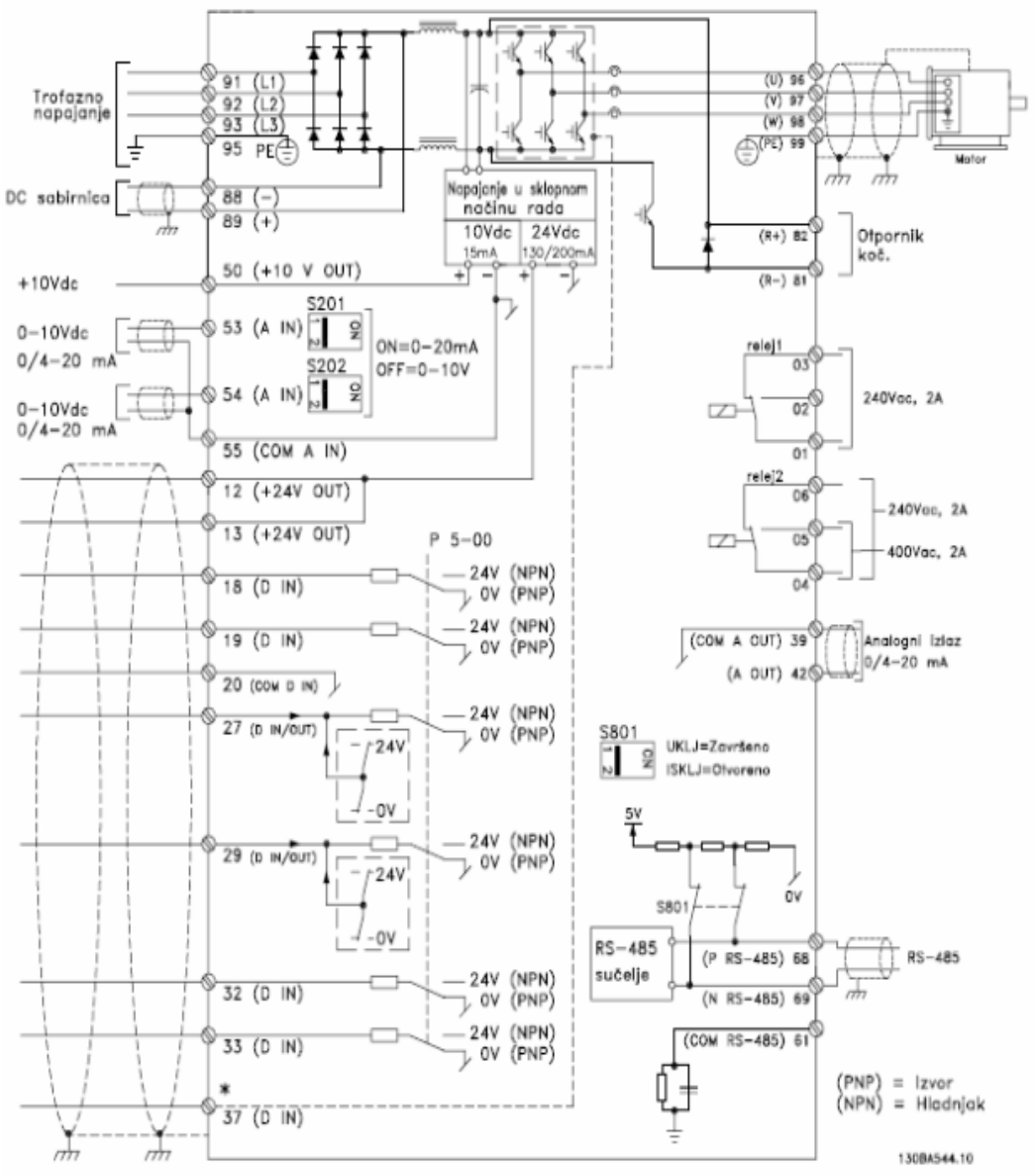


Slika 2.20. Topologija trofaznog pretvarača [8]

2.2.4. Upravljački sklop

Upravljački krug uspostavlja dvosmjernu komunikaciju, tj. šalje i prima signale od: ispravljača, istosmjernog međukruga i izmjenjivača [7]. Zadaća upravljačkog kruga je:

- Razmjena podataka između frekvencijskog pretvarača i periferije (PLC);
- Mjerenje, otkrivanje i prikazivanje grešaka, stanja pretvarača i upozorenja;
- Zaštita frekvencijskog pretvarača;
- Upravljanje poluvodičkim komponentama frekvencijskog pretvarača. Poluvodiči određuju očekivane dinamičke karakteristike i preciznost [7].

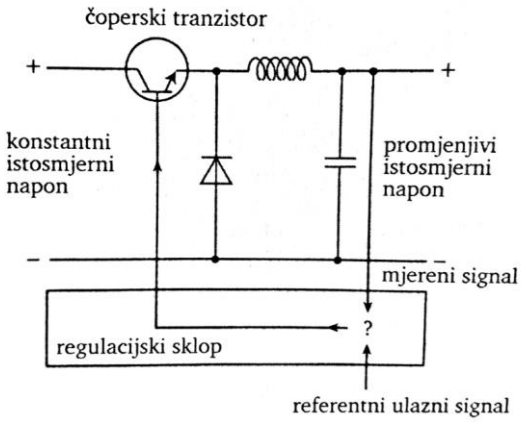


Slika 2.21. Shema spajanja frekvencijskog pretvarača [3]

2.3. Vrste modulacija

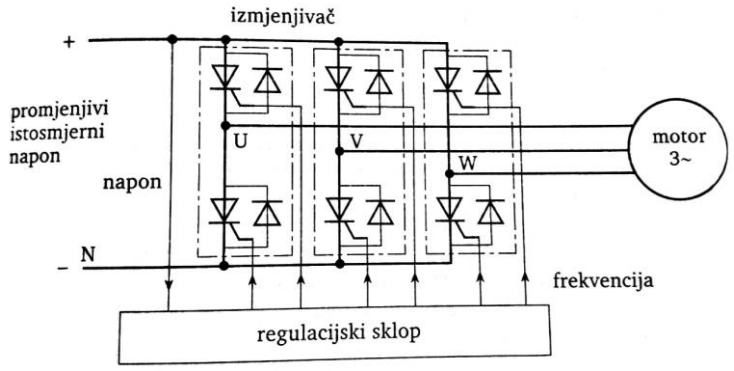
2.3.1. Modulacija amplitude impulsa (PAM)

Modulacija amplitude impulsa koristi se u frekvencijskim pretvaračima koji imaju istosmjerni međukrug s promjenjivim naponom. Upravljivi ispravljač ili kombinacija neupravljivog ispravljača i silaznog pretvarača služi za mijenjanje ulaznog napona izmjenjivača tako što regulacijski sklop upravlja uklapanjem i isklapanjem tranzistora u silaznom pretvaraču [1]. Koliki će biti omjer vođenja i nevođenja tranzistora ovisi o referentnom ili ulaznom signalu i o mjerenom signalu na kondenzatoru (stvarna vrijednost). Zadaća koju ima regulator je da izjednači razliku između referentnog signala i mjerenog signala. Svrha prigušnice i kondenzatora je da smanje valovitost izlaznog napona istosmjernog pretvarača [1].



Slika 2.22. Regulacija napona napajanja u istosmjernom međukrugu [1]

Upravljanje frekvencijom se postiže mijenjanjem osnovne periode okidnih impulsa. Trajanje periode može se mijenjati na dva načina: izravno referentnim signalom ili istosmjernim promjenjivim naponom koji je razmjeran referentnom signalu [1].



Slika 2.23. Upravljanje frekvencijom izlaznog napona [1]

2.3.2. Modulacija širine impulsa (PWM)

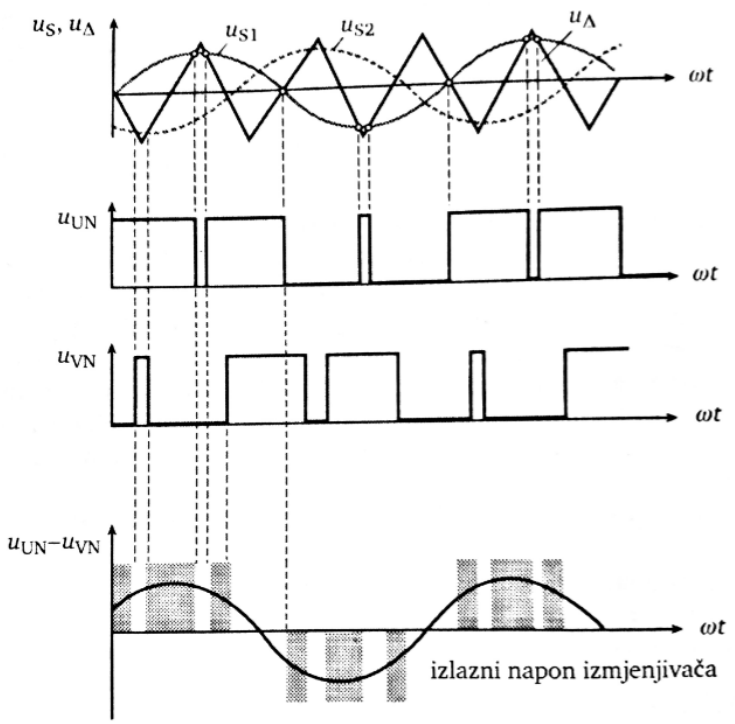
PWM je danas najraširenija metoda dobivanja trofaznog izmjenjičnog napona. Izmjenični napon se dobiva uklapanjem i isklapanjem istosmjernog ulaznog napona po određenom sklopnom obrascu. Mijenjanjem širine impulsa i mijenjanjem razmaka između impulsa mijenja se i amolituda osnovnog harmonika izlaznog napona [1].

Tri su glavne vrste PWM-a kojimse određuje sklopni raspored:

- sinusna modulacija širine impulsa (sinusni PWM);
- asinkrona modulacija širine impulsa (asinkroni PWM);
- sinkrona modulacija širine impulsa (sinkroni PWM) [1].

2.3.2.1. Sinusna modulacija širine impulsa

Prema [1] sinusna modulacija zasniva se na sinusnom modulacijskom naponu u_s. Perioda tog napona odgovara željenoj osnovnoj periodi izlaznog napona. Modulacijski naponi su pomaknuti za 120^o električno te se oni superponiraju na trokutni napon u_Δ. U sjecištima modulacijskog i trokutnog napona sklopke u izmjenjivaču uklapaju ili isklapaju. Sjecišta modulacijskog i trkoutnog napona detektiraju se elektroničkim sklopovima. Kada je amplituda trokutnog napona veća od sinusnog tada sklopka ne vodi, a kada je amplituda sinusnog veća od trokutnog tada sklopka uklopi. Mijenjanjem širine impulsa i njihova razmaka određuje se amplituda osnovnog harmonika izlaznog napona, a maksimalni izlazni napon izmjenjivača određen je izlaznim naponom istosmjernog međukruga.



Slika 2.24. Načelo sinusne modulacije širine impulsa na primjeru dvaju sinusnih referentnih napona [1]

Tjemena vrijednost osnovnog harmonika izlaznog napona dana je izrazom (2-4)[1]:

$$U_{\text{iz m}} = \frac{U_{\text{d}}}{2} \tag{2-4}$$

U_{d} - napon istosmjernog međukruga

Efektivna vrijednost dana je izrazom (2-5)[1]:

$$U_{\text{iz ef}} = \frac{U_{\text{d}}}{2\sqrt{2}} \tag{2-5}$$

Napon istosmjernog međukruga priključen na ispravljač dan je izrazom (2-6)[1]:

$$U_{\text{d}} \approx U_{\text{ul ef}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \tag{2-6}$$

$U_{\text{ul ef}}$ - efektivna vrijednost ulaznog faznog napona

Efektivna vrijednost izlaznog napona je tada dana izrazom (2-7)[1]:

$$U_{\text{iz ef}} = \frac{U_{\text{ul ef}} \cdot \sqrt{6}}{2\sqrt{2}} = 0,866 \cdot U_{\text{ul ef}} \tag{2-7}$$

Iz izraza (2-7) je vidljivo da PWM izmjenjivač sa sinusnom modulacijom može dati najviše 86,6% napona mreže na koju je priključen.

2.3.2.2. Sinkrona i asinkrona modulacija širine impulsa

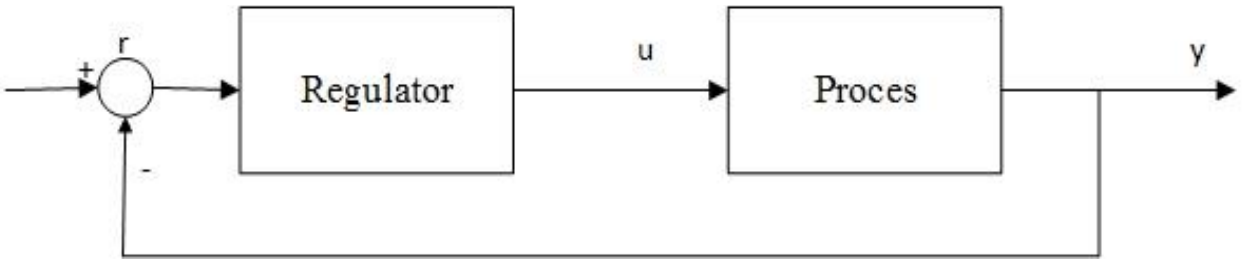
Prema [1] ako je frekvencija trokutnog napona visoka prema modulacijskom naponu, tada ta dva napona smiju biti asinkrona (omjer njihovih frekvencija nije cijeli broj). Ukoliko je omjer frekvencija oko 10 ili manja tada nastaju smetajući harmonici te je potrebno sinkronizirati trokutni i modulacijski napon, u svrhu smanjenja harmonika napona na motoru, tako da omjer frekvencija bude cijeli broj. Kod asinkrone modulacije, trokutni i modulacijski napon nisu sinkronizirani, modulacijski ciklus je sinkroniziran s ciklusom upravljanja vektorom napona na motoru, stoga trokutni napon nije više sinkroniziran s izlaznim naponom.

2.4. Načini upravljanja frekvencijskim pretvaračima

Upravljanje brzinom vrtnje trofaznih izmjeničnih motora razvilo se na osnovi dvaju načela:

- U/f upravljanje ili sklarano upravljanje;
- Vektorska regulacija [1].

Upravljanje je moguće ostvariti na dva načina. Jedan od načina je upravljanje povratnom vezom (zatvorena regulacijska petlja), a drugi način je bez povratne veze (otvorena regulacijska petlja).



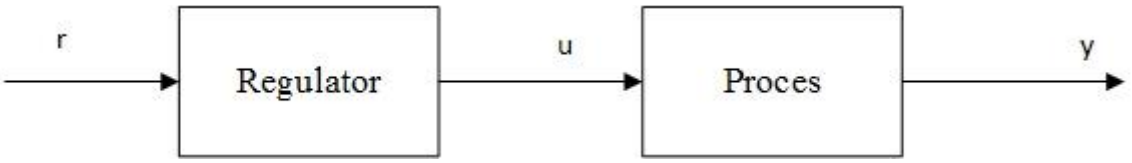
Slika 2.25. Zatvorena regulacijska petlja [9]

Prednosti zatvorene regulacijske petlje:

- Kompenzacija utjecaja vanjskih poremećaja;
- Efekt linearizacije;
- Smanjena osjetljivost na modelske neodređenosti [9].

Nedostatci zatvorene regulacijske petlje:

- Može rezultirati nestabilnim ponašanjem;
- Uvođenje senzorskog šuma u sustav [9].



Slika 2.26. Otvorena regulacijska petlja [9]

Prednosti otvorene regulacijske petlje:

- Jednostavnost;
- Strukturna stabilnost (sustav je stabilan ako su regulator i proces stabilni) [9].

Nedostatci otvorene regulacijske petlje:

- Nemogućnost kompenzacije poremećaja;
- Ne može se primjeniti na nestabilne procese [9].

Skalarno upravljanje je upravljanje momentom i brzinom vrtnje promjenom napona i frekvencije da bi magnetski tok ostao konstantan kao što je prikazano izrazom (2-8)[4][10]:

$$\phi = \frac{U}{f} = \text{konst.} \tag{2-8}$$

Prema [4] vektorsko upravljanje je metoda upravljanja koja je temeljena na upravljanju magnetskog toka motora, tj. za dobivanje željenog momenta struja se povećava ili smanjuje što onda utječe na magnetski tok u motoru. Vektorsko upravljanje puno je bolji način kontrole motora u odnosu na skalarno upravljanje. U odnosu na skalarno upravljanje vektorsko nudi brže reagiranje na promjene opterećenja motora, ubrzavanje i kočenje sa maksimalnim momentom i reguliranje momenta neovisno o brzini.

2.5. Upotreba frekvencijskih pretvarača u industriji

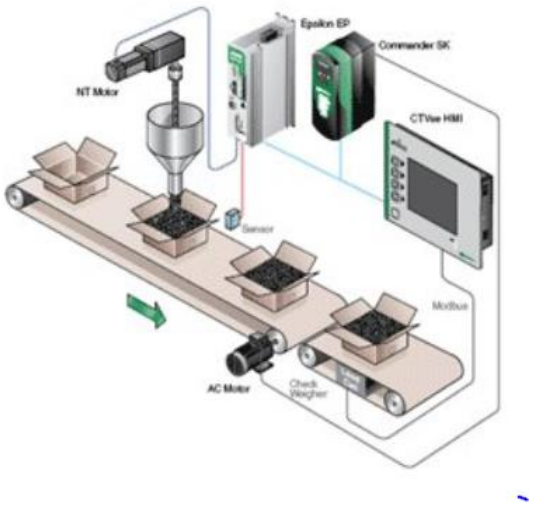
U današnje vrijeme frekvencijski pretvarači su ključna komponenta u optimiziranju radnog procesa. Frekvencijski pretvarači se koriste u širokom rasponu primjena, s ciljem:

- Poboljšanja energetske učinkovitosti;
- Automatizacije tvornica;
- Kontrola i optimizacija radnog procesa [7].

Prema [11] neki od primjera primjene frekvencijskih pretvrača u industriji su:

Punilice

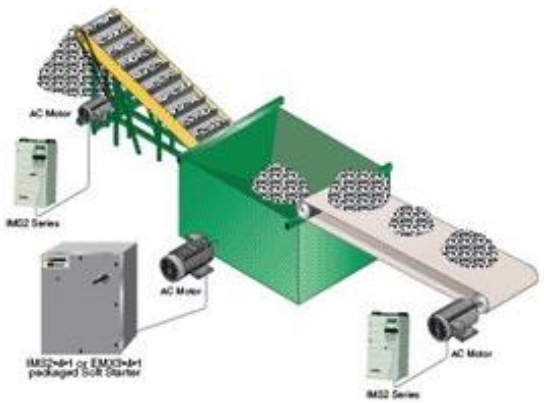
Zadatak punilica je da brzo i efikasno razdjele točnu količinu materijala u spremnike. Da bi to bilo moguće potrebna je kontrola procesa punjenja. Prilagodljive brzine koje omogućuje frekvencijski pretvarač osiguravaju od prevelikog ili premalog punjenja spremnika, također smanjuju oštećenja proizovda kojim se puni te smanjuju mehanička naprezanja u pogonu [11].



Slika 2.27. Punilica upravljana frekvencijskim pretvaračem [11]

Drobilice

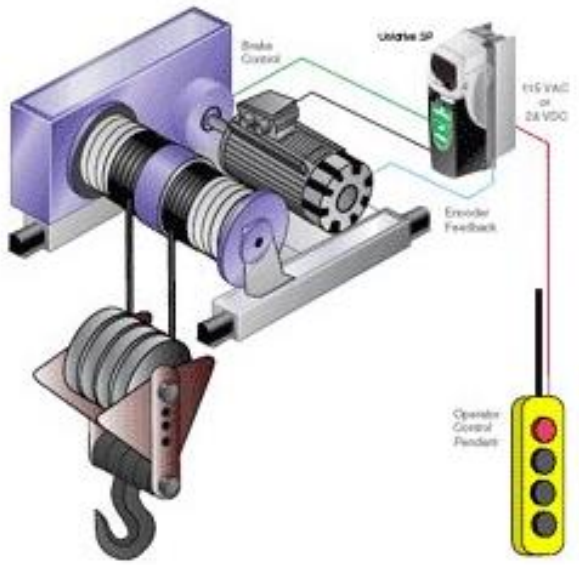
Najveći problem kod drobilica je pokretanje zbog velike inercije pogona. Drobilica koja je potpuno napunjena i prazna drobilica očekivano imaju različite zahtjeve pri pokretanju. Zbog toga je potrebno odrediti odgovarajuće profile za pokretanje drobilica pri svakom načinu rada. Troškovi zastoja zbog neuspješnog pokretanja znače zastoje u radu, te se zbog toga koriste frekvencijski pretvarači koji su pouzdani i robusni [11].



Slika 2.28. Drobilica upravljana frekvencijskim pretvaračem [11]

Dizalice

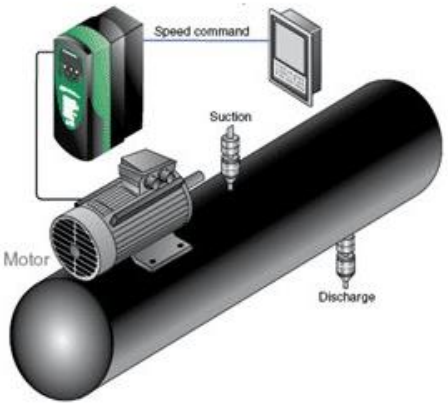
Dizalice se koriste u mnogim industrijskim područjima. Nekada su za osiguravanje pouzdanosti pogona korišteni kliznokolutni motori i kočnice specijalne namjene. Primjenom pretvarača može se postići maksimalna pouzdanost u svim režimima rada. Također uklanja se problem stalnog kočenja (a samim time i trošenja kočnica) i koriste se pretvarači za meko zaustavljanje motora, dok se kočnice koriste samo kao parkirne [11].



Slika 2.29. Dizalica upravljana frekvencijskim pretvaračem [11]

Kompresori

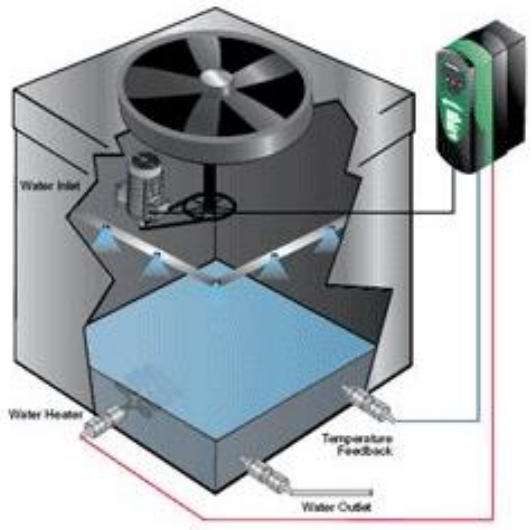
Zadatak kompresora je komprimiranje plinova za različite industrijske te komercijalne potrebe. Nekada je uobičajeno rješenje za kompresore bilo komprimiranje plinova s jednom ili dvije brzine koje su bile konstantne, no frekvencijski pretvarači nude uštede energije točnim upravljanjem procesom te smanjenjem trajanja vremena rada [11].



Slika 2.30. Kompresor upravljan frekvencijskim pretvaračem [11]

Ventilator

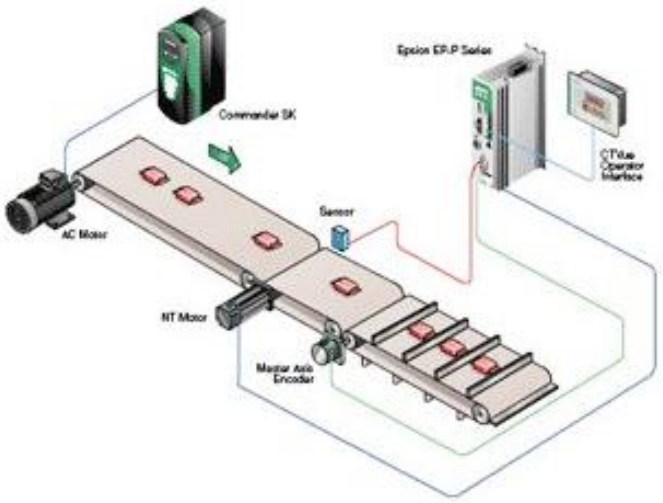
Frekvencijski pretvarači nude velike uštede energije kod reguliranja brzine ventilatora, jer snaga koja je potrebna raste s trećom potencijom brzine vjetra. Frekvencijski pretvarači nude štedljivi način rada, PID upravljanje (za konstanti protok, tlak ili temperaturu), ugrađeni PLC i povezivost putem industrijskih sabirnica [11].



Slika 2.31. Ventilator upravljan frekvencijskim pretvaračem [11]

Transporteri i pokretne trake

Mijenjanjem prijenosnih traka s fiksnim pomacima pokretnim trakama upravljanim frekvencijskim pretvaračima omogućuje se smanjenje potrebnog pogona i povećava prilagodljivost. Trake upravljane frekvencijskim pretvaračima mogu točno dostaviti proizvode na zadani način. Mogućnost sinkroniziranja s proizvodnom linijom i tehnološkim procesom omogućuje dostavu proizvoda različitim brzinama [11].



Slika 2.32. Pokretna traka upravljana frekvencijskim pretvaračem [11]

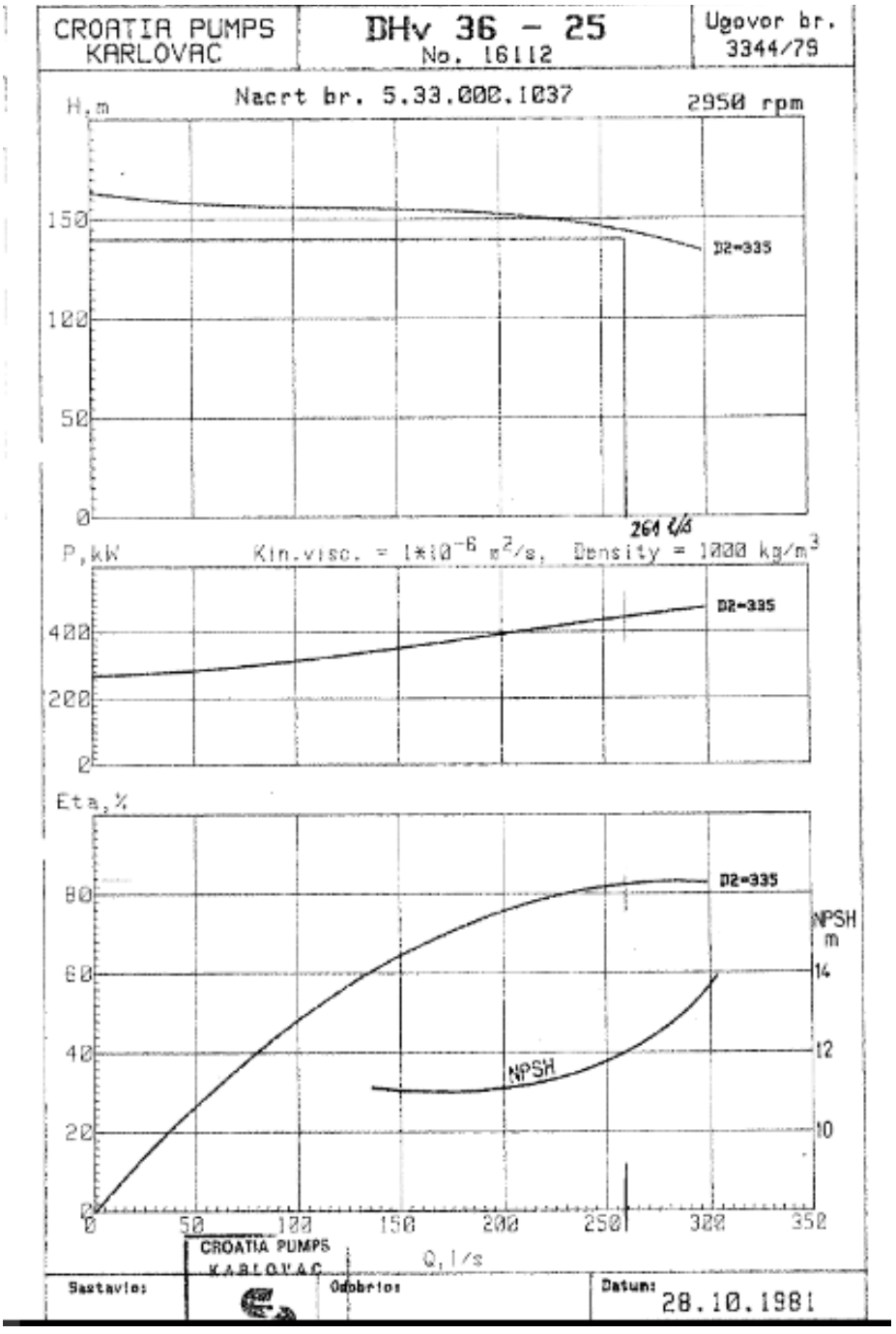
2.5.1. Primjena frekvencijskog pretvarača na primjeru TE-TO Osijek

Cirkulacijske pumpe vrelovoda u TE-TO Osijek pogone tri visokonaponska asinkrona kavezna motora 6,3 kV i 50 Hz, proizvođača Končar-GIM [12].

Tablica 2.2. Popis i podaci visokonaponskih asinkronih motora [12]

Radni stroj	Tip motora	Tvornički broj	Snaga (kW)	Napon (kV)	Brzina (o/min)	cos φ	Korisnost μ (%)	Struja (A)
CP1	6AZJ6 450S1-2	932528	480	6,3	2980	0,88	94	52
CP2	7AZJ6 454-02	945076	480	6,3	2980	0,9	96	51
CP3	9AZJ6 452-02	22369	480	6,3	2980	0,9	96	51

U TE-TO Osijek koriste se cirkulacijske pumpe proizvođača CROATIA PUMPS. Stupanj korisnosti pumpi je 82%, a karakteristike su dane na slici 2.27. [12].



Slika 2.33. Karakteristike cirkulacijske pumpe [12]

Instaliran je pretvarač frekvencije Siemens Robicon Perfect Harmony. Osnovni podaci dani su u tablicama 2.3. i 2.4. [12].

Tablica 2.3. Podaci pretvarača na mrežnoj strani [12]

Napojna mreža:	3AC 6300 V +/-10% 50 Hz
Nazivna ulazna struja:	58 A
Faktor snage na mreži:	0,95
Ispravljač:	30 pulsni ispravljački most
Gubici pri nazivnom opterećenju uključujući i transformator:	22 kW
Stupanj korisnosti:	96,5%

Tablica 2.4. Podaci na izlazu iz pretvarača [12]

Izlazni napon:	3AC 0-6300 V 10-167 Hz
Nazivna izlazna struja:	0-70 A
Vrsta pogona:	Kontinuirani
Tip opterećenja:	Asinkroni motor
THD strujni:	</= 3%

Postignuti rezultati:

- Prije uvođenja frekvencijskog pretvarača (siječanj 2012.):

Prema [12] dani su pdaci u pogonskim uvjetima rada pumpi u periodu grijanja: CP1 radi u punom opterećenju (struja motora varira oko 51,67 A), a pumpa CP3 radi u „booster funkciji“ (struja motora varira oko 36,21 A), napon na sabirnicama oko 6,3 kV, 50 Hz

- Snaga iz mreže na odvodu za pogon motora pumpi CP1 i CP3 prosječno kroz 24 sata pogona prema izrazima (2-6) i (2-7) [12].

$$P_{CP1} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 51,67 \cdot 0,95 = 535 \text{ kW} \quad (2\text{-}6)$$

$$P_{CP3} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 36,21 \cdot 0,95 = 375 \text{ kW} \quad (2\text{-}7)$$

- Obje pumpe trebaju snagu danu izrazom (2-8)[12]

$$P_{\text{nr}} = P_{\text{CP1}} + P_{\text{CP2}} = 535 + 375 = 910 \text{ kW}. \tag{2-8}$$

  - Nakon uvođenja frekvencijskog pretvarača na pumpu CP3 (veljača 2013.):

Prema [12] podaci za pumpu CP3 izvučeni su iz frekvencijskog pretvarača pomoću programa za nadzor statusa. Pumpa CP1 radi s punim opterećenjem (struja opterećenja motora varira oko 52A).

- Snaga koju uzima pumpa CP1 i snaga za regulirani pogon dani su prema izrazima (2-9) i (2-10)[12]

$$P_{\text{CP1}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 52 \cdot 0,95 = 538,5 \text{ kW} \tag{2-9}$$

$$P_{\text{CP3regulirano}} = 218,42 \text{ kW}. \tag{2-10}$$

- Sa jednom reguliranom pumpom pogon ukupno uzima prema izrazu (2-11)[12]

$$P_{\text{r}} = P_{\text{CP1}} + P_{\text{CP3regulirano}} = 538,5 + 218,42 = 756,92 \text{ kW}. \tag{2-11}$$

- Razlika prije i poslije uvođenja reguliranog pogona CP3 prema izrazu (2-12)[12] je:

$$\Delta P = P_{\text{nr}} - P_{\text{r}} = 910 - 756,92 = 153,08 \text{ kW}. \tag{2-12}$$

Broj godišnjih sati vrelovoda je oko 5040, to je oko 210 dana po 24 sata[12].

Ušteda energije nakon uvođenja reguliranog pogona CP3 dana je prema izrazu (2-13)[12]

$$W_{\text{g}} = 153,08 \cdot 5040 = 771523 \text{ kWh}. \tag{2-13}$$

Uzme li se u obzir srednja godišnja cijena električne energije u vrijeme uvođenja frekvencijskog pretvarača od 60 €/MWh, tada je ušteda energije po sezoni grijanja [12]: $C_{\text{ug}} = 60 \text{ €/MWh} \cdot 771,523 \text{ MWh} = 46291 \text{ €}$.

Prema podacima investitora, vrijednost investicije je 200000 €, tada je vrijeme otplate investicije dano prema izrazu (2-14)[12]

$$t = \frac{200000€}{46291€} = 4,32 \text{ god}. \tag{2-14}$$

Ušteda primarne energije – mazut i plin

Prema [12] pretpostavi li se da litra mazuta sadrži približno 11 kWh, da je korisnost termoelektrane na mazut 40%, te da su gubici u prijenosu do motora 12%, potrošnja mazuta smanjila bi se po danom izrazu (2-15)[12]:

$$\Delta m = \frac{771523}{11 \cdot 0,4 \cdot 0,88} = 199256 \text{ litara}. \tag{2-15}$$

U suvremenim toplanama ukupni stupanj djelovanja iznosi oko 60%, što znači da bi ušteda iznosila 132837 l/sezoni grijanja, i ako uzmemo u obzir nabavnu cijenu mazuta od 0,52 €/l dobije se ukupan iznos uštede po sezoni grijanja prema danom izrazu (2-16)[12]

$$C_{\text{ugm}} = 132837 \cdot 0,52 = 69075 \text{ €}. \tag{2-16}$$

Prirodni plin ima prosječnu ogrjevnu vrijednost od $1 \text{ Sm}^3 = 9,26 \text{ kWh}$ što za rezultat daje slijedeće uštede koje su prikazane slijedećim izrazima (2-17) i (2-19)[12].

$$\Delta pl = \frac{771523}{9,26 \cdot 0,6 \cdot 0,88} = 157798 \text{ S/m}^3 \tag{2-17}$$

$$C_{\text{ugpl}} = 157798 \cdot 0,4 = 63120 \text{ €}. \tag{2-18}$$

Kod ukupne uštede uzima se cijena plina od $0,4 \text{ €/m}^3$ [12].

Vrijeme povrata investicije za novac uštеđen korištenjem plina i mazuta dano je slijedećim izrazima (2-19) i (2-20)[12]:

$$\text{Mazut: } t = \frac{200000}{69075} = 2,9 \text{ god} \tag{2-19}$$

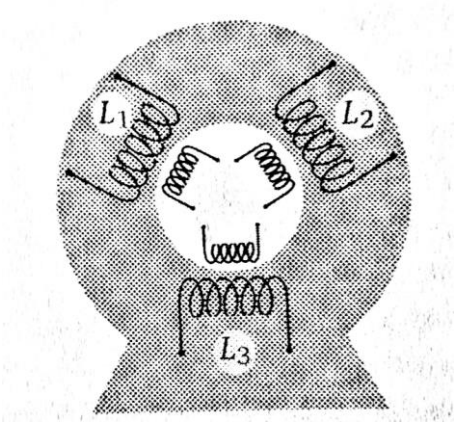
$$\text{Prirodni plin: } t = \frac{200000}{63120} = 3,17 \text{ god}. \tag{2-20}$$

Iz prikazanih podataka vidi se da je uvođenje frekvencijskih pretvarača potpuno opravdano jer je tehnološki proces poboljšan, dolazi do velikih ušteda energije na godišnjoj bazi i period povratka investicije je mali.

3. ASINKRONI MOTOR

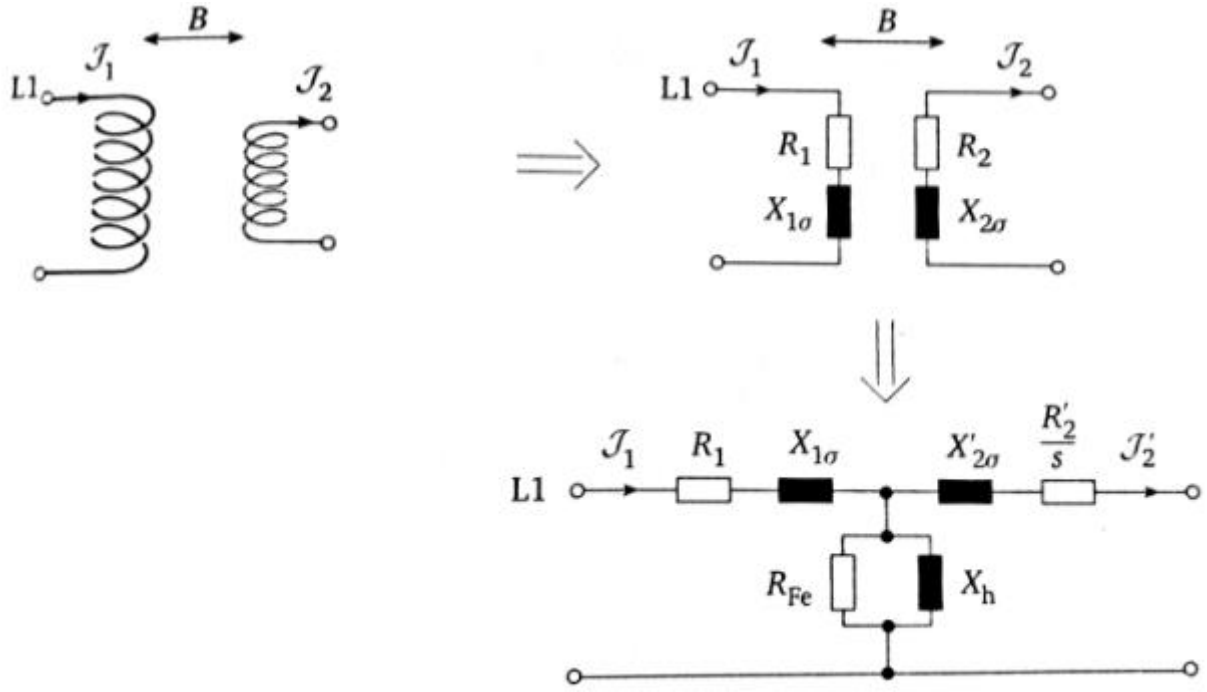
3.1. Momentna karakteristika i nadomjesna shema motora

U načelu asinkroni motor ima šest namota: tri namota na statoru i tri kratko spojena na rotoru. Analizom tih namota dobije se nadomjesna shema.



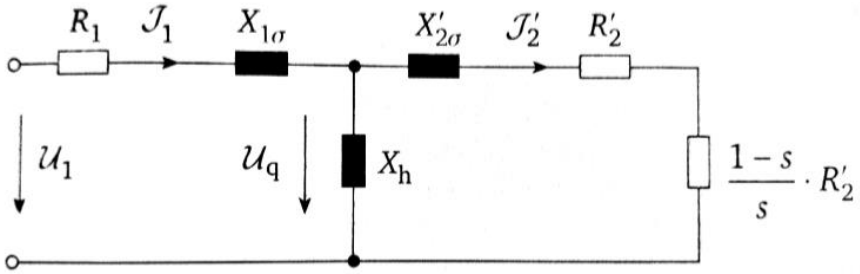
Slika 3.1. Smještaj namota asinkronog motora [1]

Sa slike 3.1. proizlazi nadomjesna shema motora



Slika 3.2. Nadomjesna shema motora za jednu fazu [1]

Namoti su međusobno magnetski vezani. Utjecaj međusobnog induciranja dvaju električkih krugova (statora i rotora) opisuje grana koja se sastoji od paralelnog spoja otpora gubitaka u željezu R_{Fe} (nadomjesni otpor za gubitke u željezu) i induktiviteta magnetiziranja X_{h} [1]. Kroz tu granu teče struja koji motor uzima za potrebe magnetiziranja statora i rotora, a napon koji se nalazi na zajedničkoj grani je inducirani protunapon motora U_{q} [1].



Slika 3.3. Nadomjesna shema opterećenog motora uz zanemarenje gubitaka u željezu [1]

Za izračun momentne karakteristike uvodi se pojednostavljenje, poprečna grana premješta se na ulaz kako struja kroz tu granu i inducirani napon ne ovise o teretu. Pomoće nadomjesne sheme moguće je izračunati moment i struju preko izraza (3-1),(3-2),(3-3)[13]:

Struja rotora:

$$I'_2 = \frac{U_1}{(R_1 + R'_2 + R'_2\frac{1-s}{s}) + j(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} = \frac{U_1}{(R_1 + \frac{R'_2}{s}) + j(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} \tag{3-1}$$

Snaga okretnog polja:

$$P_{\mathrm{okr}} = m_{\mathrm{s}} \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R'_2}{s} \tag{3-2}$$

Razvijeni moment:

$$M = \frac{P_{\mathrm{meh}}}{\omega_{\mathrm{m}}} = \frac{(1-s)P_{\mathrm{okr}}}{(1-s)\omega_{\mathrm{sm}}} = \frac{m_s \cdot I'^2_2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\omega_{\mathrm{sm}}} = \frac{m_{\mathrm{s}}}{\omega_{\mathrm{sm}}} \cdot \frac{U_1^2}{\left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2\right]} \cdot \frac{R'_2}{s} \tag{3-3}$$

Maksimalni moment dan je izrazom (3-5)[13], Derivacijom izraza (3-3) te izjednačavanjem tog izraza s nulom dobije se klizanje (izraz (3-4)[13]) kod kojeg motor razvija maksimalni moment.

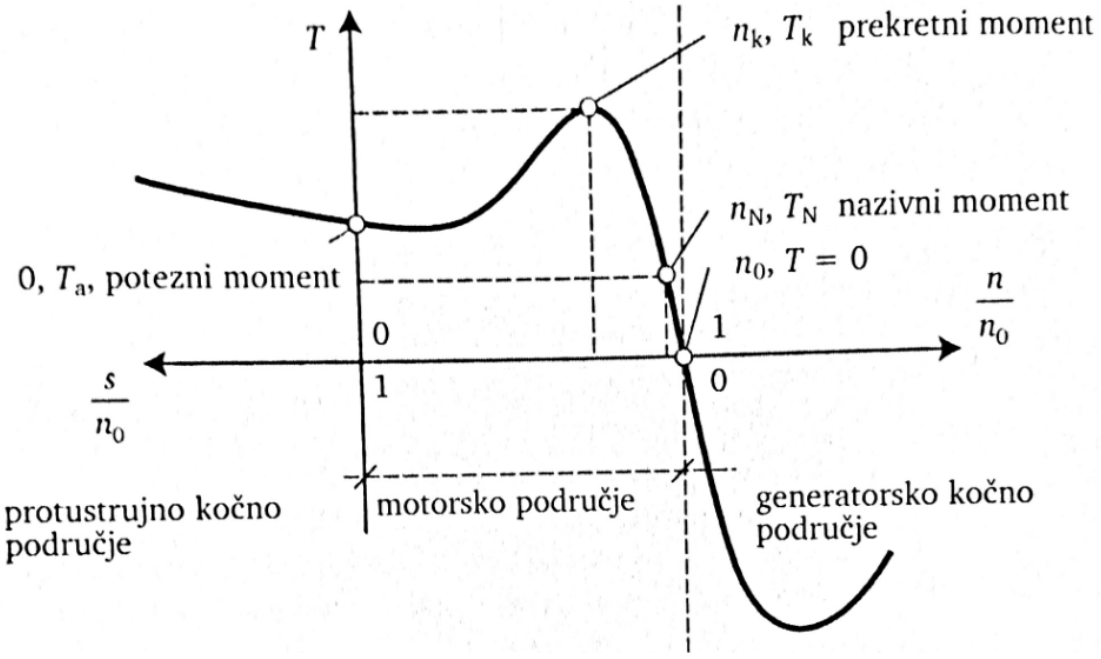
Klizanje koje odgovara maksimalnom momentu:

$$s_{\max} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} \tag{3-4}$$

Maksimalni moment:

$$M_{\max} = \frac{m_s \cdot U_1^2}{2\omega_{sm}\left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}\right]} \tag{3-5}$$

Momentna karakteristika



Slika 3.4. Momentna karakteristika asinkronog motora [1]

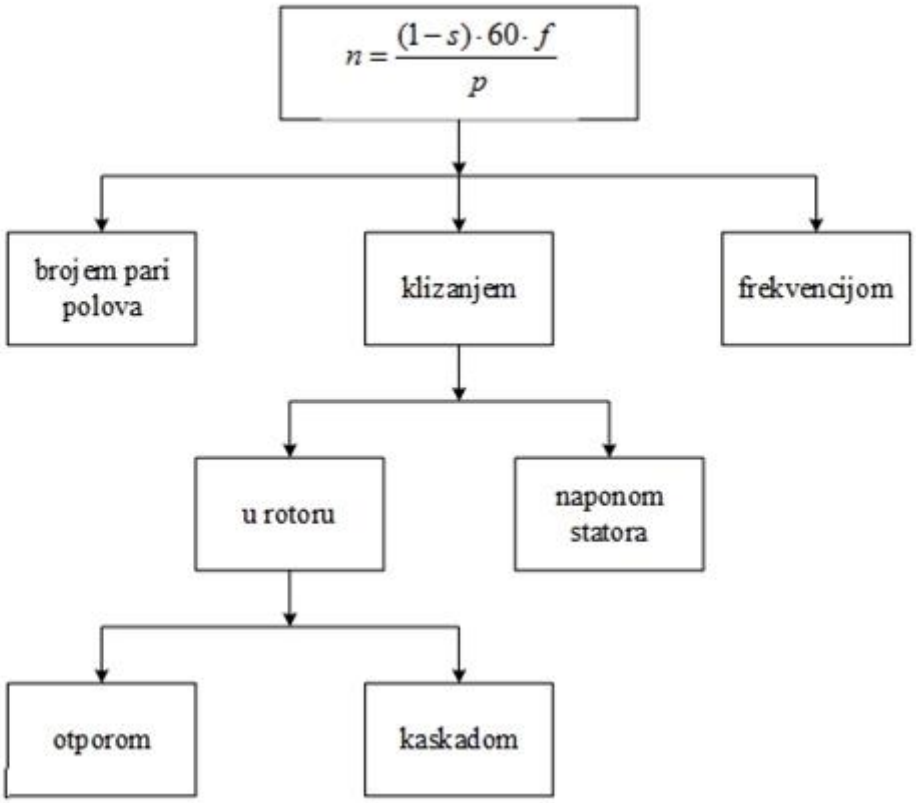
Motor ima tri radna područja: motorsko područje, generatorsko kočno područje i protustrujno kočno područje. Motorsko područje može se podijeliti na dva područja, a to su: područje pokretanja ($0 < n/n_0 < n_k/n_0$) i radno područje ($n_k/n_0 < n/n_0 < 1$)[1]. T_a označava potezni moment motora i to je moment koji motor razvija kada se na motor u mirovanju spoji napon nazivne smplitude i frekvencije. Slijedeći od važnih točaka je T_k (prekretni moment), to je najveći moment koji motor može dati spojen na napon nazivne amlitude i frekvencije. T_N je nazivni moment motora [1].

3.2. Načela upravljanja brzinom vrtnje asinkronih motora

Brzina vrtnje motora može se izraziti izrazom (3-6)[1]:

$$n = \frac{(1-s)\cdot f \cdot 60}{p} \tag{3-6}$$

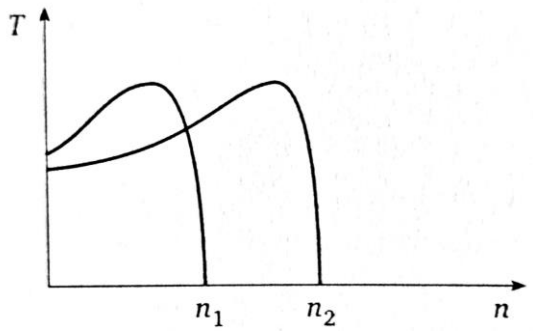
Gdje je: s – klizanje, f – frekvencija napona napajanja i p – broj pari polova



Slika 3.5. Načini upravljanja brzinom vrtnje [1]

3.2.1. Upravljanje mijenjanjem broja pari polova

Brzina okretnog pola ovisi o broju pari polova. Mijenjanje broja pari polova se radi tako da se prespoje statorski namoti. Prespajanjem od malog broja polova do većeg broja polova, brzina vrtnje okretnog magnetskog polja naglo se smanjuje (npr. 3000 okr/min (p=1), 1500 okr/min (p=2), 750 okr/min (p=4))[1].



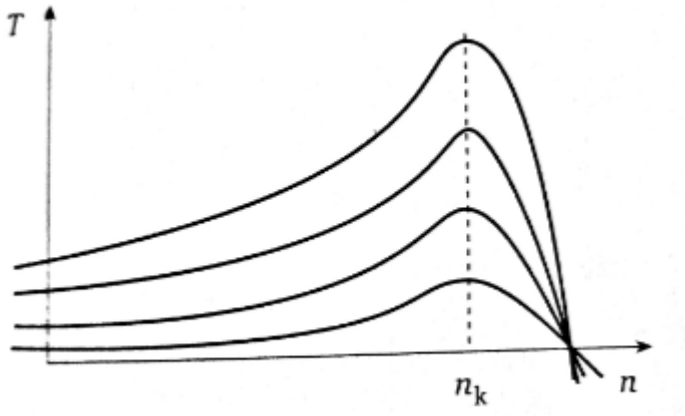
Slika 3.6. Momentne karakteristike polnopreklopivog motora [1]

3.2.2. Upravljanje mijenjanjem klizanja

Klizanje se može mijenjati na dva različita načina: mijenjanjem napona napajanja statora i djelovanjem u rotorskom krugu [1].

3.2.2.1. Mijenjanje napona napajanja statora

Ovaj tip upravljanja sastoji se samo u promjeni napona napajanja, a pri tome se frekvencija napajanja ne mijenja. Moment motora proporcionalan je kvadratu napona napajanja statora prema funkciji $M = f(U^2)$ [1]. Suvremena tehnologija omogućuje regulaciju napona u širokim granicama, no energetski gledano ovakav tip regulacije nije optimalan jer su gubici energije neizbježni [13].



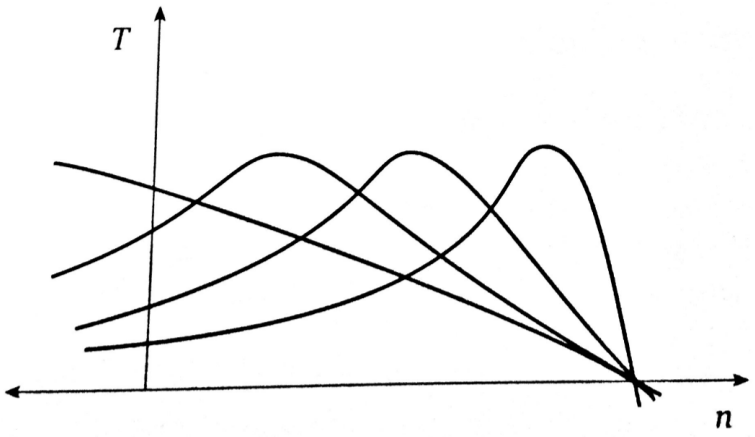
Slika 3.7. Momentne karakteristike za različite napone napajanja statora [1]

3.2.2.2. Djelovanje u rotorskom krugu

Na dva načina je moguće djelovanje u rotorskom krugu: podesivim otpornicima i kaskadnim spojem. Upravljanje u rotorskom krugu dostupno je samo kod kliznokolutnih motora jer samo oni imaju dostupne rotorske namote preko kliznokolutnih prstenova [1].

Podesivi otpornici

Dodavanjem otpornika na klizne prstenove povećava se klizanje, tj. brzina se smanjuje, a pri tome se mijenja momentna karakteristika motora prema slici 3.8. dok prekretni moment ostaje stalan. Pri konstantnom opterećenju motorasmanjuje se brzina vrtnje povećanjem otpora, a kod konstantnog otpora smanjenjem opterećenja povećava se brzina vrtnje [1].



Slika 3.8. Momentna karakteristika za različite otpore u rotorskom krugu [1]

Kaskadni spoj

Umjesto otpornika, kao što je slučaj kod podesivih otpornika, na prstenove se može spojiti istosmjerni stroj kojim se dodaje podesivi napon i mijenja se magnetiziranje rotora, a samim time i brzina vrtnje motora [1].

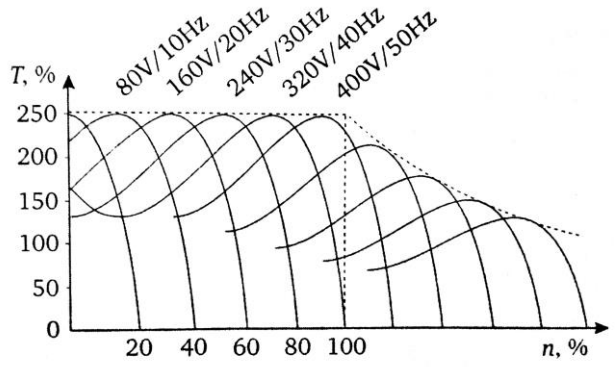
3.2.3. Upravljanje mijenjanjem frekvencije

Moguće je upravljati asinkronim motorom izvorom promjenjive frekvencije i napona. Kako brzina vrtnje motora ovisi i brzini vrtnje magnetskog polja, a brzina vrtnje polja ovisi o frekvenciji pojne mreže, to znači da za održavanje momenta motora, napon motora se mora mijenjati proporcionalno frekvenciji [1]. Prema izrazu (3-7)[1] približno vrijedi:

$$T = \frac{P \cdot 9550}{n} = \frac{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot 9550}{f \cdot \frac{60}{p}} = k \cdot \frac{U}{f} \cdot I \tag{3-7}$$

$$T \sim \frac{U}{f} \cdot I \tag{3-8}$$

Magnetski tok je konstantan ako je omjer napona napajanja i frekvencije napona napajanja konstanta [1].



Slika 3.9. Momentna karakteristika motora pri proporcionalnoj promjeni U/f [1]

Prema [1] u dva slučaja magnetiziranje nije idealno, iako vrijedi zakon U/f=konst.

a) pri pokretanju i pri malim brzinama vrtnje napon na induktivitetu magnetiziranja je premali, tada je potrebno dodatno magnetizirati, tj. potrebno je povećati napon;

b) Pri promjenjivom opterećenju motora napon na induktivitetu magnetiziranja je premali ili preveliki i tada je potrebno kompenzirati promjene magnetiziranja podešavanjem napona napajanja motora.

4. NAPONSKO – FREKVENCIJSKA (SKALARNA) REGULACIJA

Skalarnim upravljanjem upravlja se promjenom napona i frekvencije u istom omjeru kako bi magnetski tok ostao konstantan. Takvim upravljanjem pomiču se momentne karakteristike kako je i prazano slikom 4.1. [8].

Brzinu okretnog magnetskog polja u motora određuje frekvencija prema izrazu (4-1), a brzina rotora se može izraziti preko klizanja koje je dano izrazom (4-2)[8].

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \tag{4-1}$$

$$n = (1 - s) \cdot n_s \tag{4-2}$$

Ako želimo povećati brzinu onda povećavamo frekvenciju, a da bi održali isti moment povećava se i napon (povećanje ograničeno do nazivnog napona) u istom omjeru sa frekvencijom da bi U / f ostao konstantan [8].

Prema [8] Faraday-ev zakon indukcije

$$E = -\frac{d\psi}{dt} \tag{4-3}$$

govori kako je inducirani napon u nekom namotu jednak negativnoj promjeni ulančanog toka tog istog napona.Spajanjem asinkronog motora na pojnu mrežu (uz zanemarenje statorskog radnog otpora i rasipnog induktiviteta) inducirani napon E odgovara naponu mreže, a kao posljedica tog priključenog napona uspostavi se ulančani tok ψ. Derivacija se može prikazati kao množenje sa $\mathrm{j}\omega$ ukoliko su sve veličine sinusne i izraze se u fazorskoj domeni, tada Faraday-ev zakon ima oblik dan izrazom (4-4)[8]

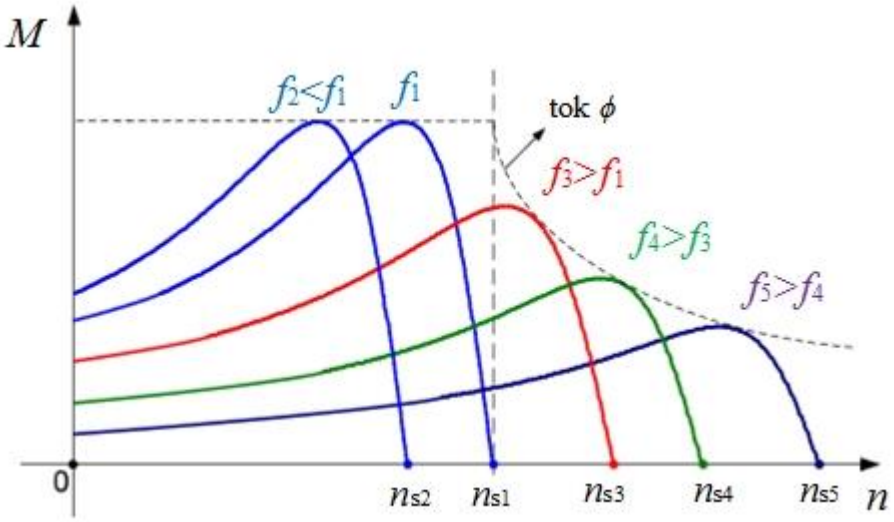
$$E = U_\mathrm{m} = -\mathrm{j}\omega\psi\,. \tag{4-4}$$

Ako se ulančani tok prikaže kao $\psi = w \cdot f_\mathrm{uk} \cdot \phi \rightarrow \psi = N \cdot \phi$ može se prikazati kao na slijedećem izrazu (4-5)[8]

$$|E| = |U_\mathrm{m}| = |\mathrm{j}\omega \cdot N \cdot \phi| = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot \phi = \mathrm{konst} \cdot f \cdot \phi \tag{4-5}$$

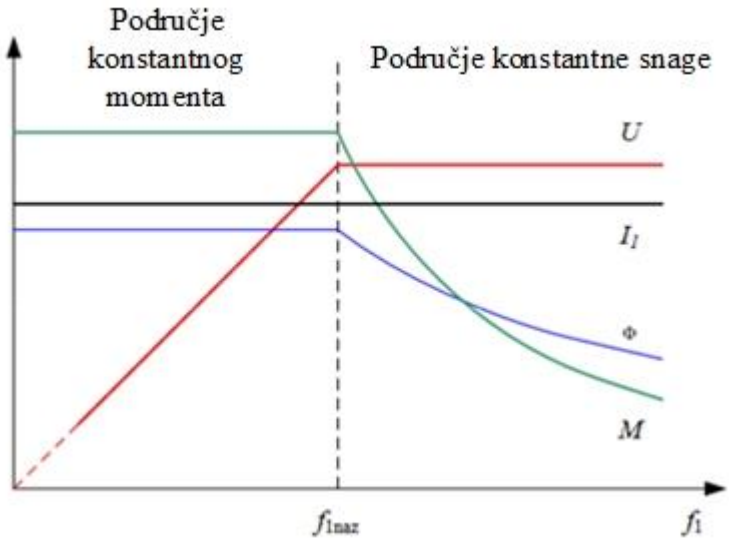
Iz prijašnjeg izraza vidi se da je napon proporcionalan umnošku frekvencije i toka, održavanjem omjera frekvencije i napona konstantnim održava si i magnetski tok konstantnim.

$$\frac{U}{f} = \mathrm{konst.} \tag{4-6}$$



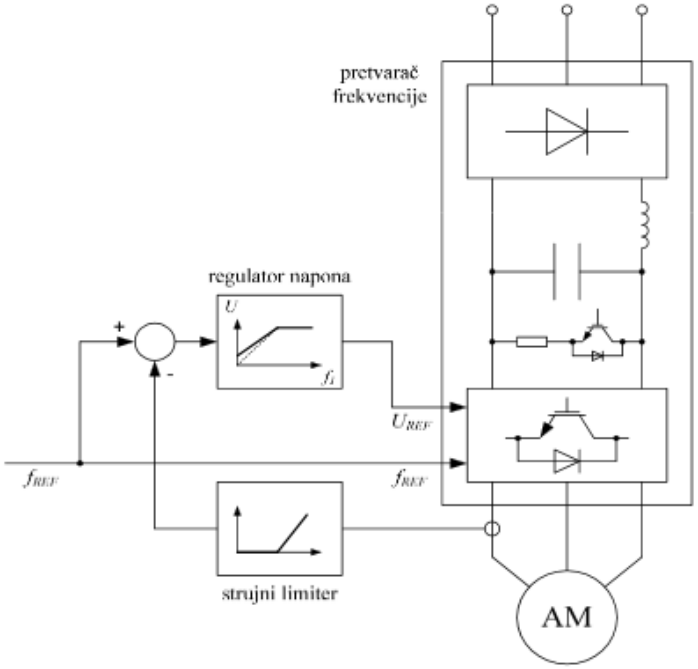
Slika 4.1. Promjena momentnih karakteristika mijenjanjem napona i frekvencije [8]

Napon se može dizati samo do nazivnoga, te daljnjim povećanjem frekvencije uz nazivni napon dolazi do smanjivanja toka u stroju i to obrnuto proporcionalno sa povećanjem frekvencije, isti slučaj je i sa momentom koji također opada povećanjem frekvencije uz održavanje nazivnog napona[8].



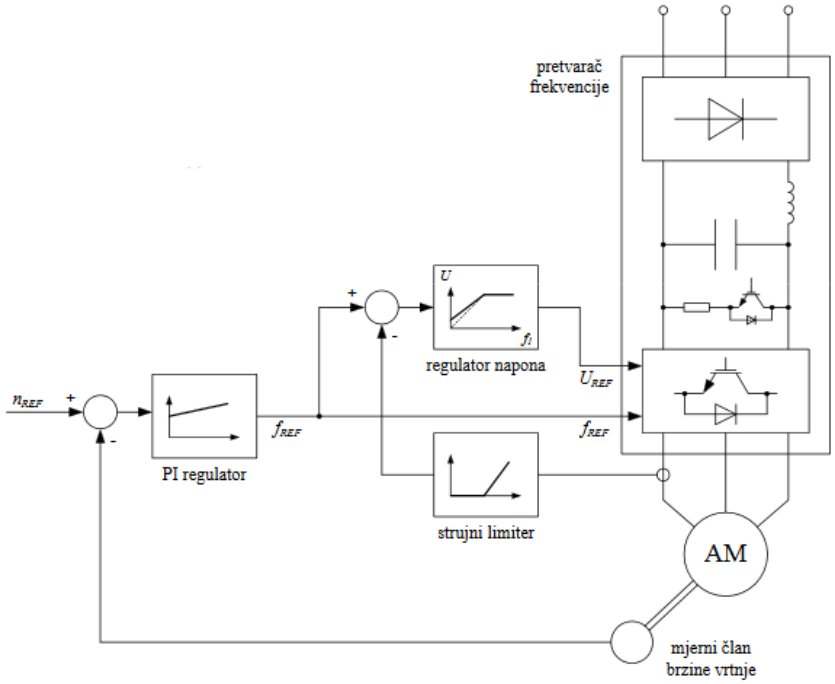
Slika 4.2. Odnos veličina upravljanjem po U/f=konst. zakonu [14]

Uobičajeno su dvije moguće izvedbe skalarnog upravljanja, a to je u otvorenoj i u zatvorenoj petlji i pri skalarnom upravljanju koristi se pretvarač frekvencije s utisnutim naponom.



Slika 4.3. Skalarno upravljanje u otvorenoj petlji [14]

Sa slike 4.3. proizlazi da se frekvencija napona statora zadaje kao referentna vrijednost, te na osnovu te referentne vrijednosti regulator napona daje odgovarajući referentni napon. Strujni limiter služi za smanjivanje napona, tj. služi za ograničavanje napona [14]. Pri skalarnom upravljanju u otvorenoj petlji svaka promjena tereta ili napona dovodi do promjene brzine vrtnje, a ako je zahtijevano održavanje željene brzine pri opterećenjima u radu tada je potrebno uvesti povratnu vezu po brzini vrtnje. U slučaju uvođenja povratne veze po brzini vrtnje potrebno je koristiti mjerni član brzine vrtnje. Otvorena petlja koristi se kod samostalnih strojeva malih malih snaga koji imaju male dinamičke performanse [14]. Na slici 4.4. dana je shema skalarne regulacije s povratnom vezom po brzini vrtnje.



Slika 4.4. Skalarna regulacija u zatvorenoj petlji [14]

5. ZAKLJUČAK

Frekvencijski pretvarači ključni su uređaji u svim pogonima kojima je potrebna regulacija. Precizno upravljanje proizvodnim procesima bilo bi nemoguće bez frekvencijskih pretvarača koji precizno mogu pratiti promjene koje se događaju u proizvodnom procesu. Frekvencijski pretvarači mogu pratiti događanja u proizvodnom procesu te vrlo brzo podesiti brzinu koja je potrebna u nekom trenutku što bi bilo nemoguće za čovjeka. Obrađeni tip regulacije je naponsko-frekvencijska ili skalarna regulacija. Skalarna regulacija je najjednostavniji tip regulacije te se ne koristi u pogonima gdje je potrebna jako precizna regulacija momenta i brzine vrtnje, već se u takvim procesima koristi vektorska regulacija koja je već spomenuta u tekstu. Skalarno upravljanje u otvorenoj petlji je moguće rješenje za samostalne strojeve malih snaga, ali za održavanje brzine vrtnje pri promjeni opterećenja potrebno je zatvoriti regulacijsku petlju. Kako se vidi na primjeru TE-TO Osijek prvotna investicija u pogon reguliran frekvencijskim pretvaračem je visoka, ali vrijeme otplate je vrlo malo kada se u obzir uzmu uštede postignute frekvencijskim pretvaračem,a uz uštedu tu je i poboljšanje tehničkog procesa.

POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE

[1] Benčić Z., Najvažnije o frekvencijskim pretvaračima, GRAPHIS Zagreb, 2009., ISBN: 978-953-279-019-1

[2] Automatika i procesi, Česta pitanja, url: http://www.aip.com.hr/cesta-pitanja/4/ (20.5.2017.)

[3] Upute za rukovanje Danfoss frekvencijskim pretvaračima, 2011., url: http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/DANFOSS_upute.pdf (23.5.2017.).

[4] Kovačević I.. Metode regulacije asinkronog motora pomoću frekvencijskog pretvarača. Diplomski rad. ETF Osijek, 2015.

[5] Vučetić Dubravko, Energetska elektronika, 2009., url: http://www.pfri.uniri.hr/~vucetic/Energetska%20elektronika.pdf (1.6. 2017).

[6] John G. Kassakian, Martin F. Schlecht, George C. Verghese, Osnove energetkse elektronike I.dio, GRAPHIS Zagreb, 2000., ISBN: 953-6647-25-7 .

[7] Danfoss, Facts worth knowing about frequency converters, 2014., url: http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/ (2.6.2017.).

[8] Gašparac Ivan, Poljugan Tanja, Hanić Zlatko, Pogon trofaznog asnikronog motora napajanog iz pretvarača napona i frekvencije korištenjem skalarne regulacije, svibanj 2014., url: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/OEP_lab_2_upute.pdf (5.6.2017.).

[9] Kolonić Fetah, Matuško Jadranko, Upravljanje u mehatroničkim sustavima, 24.10.2014., url: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/MS_predavanje4%5B1%5D.pdf (5.6.2017.).

[10] Bosović Adnan, Dinamička stanja asinhronog motora upravljanog energetskim pretvaračem napona i frekvencije ABB ACS-800, Diplomski rad, ETF Sarajevo, url: http://www.academia.edu/11229800/DIPLOMSKI_RAD_-_Dinami%C4%8Dka_stanja_asinhronog_motora_upravljanog_pretvara%C4%8Dem_napona_i_frekvencije_ABB_ACS-800 (7.6.2017.).

[11] ZIGG-PRO, Primjena u industriji, url: http://www.zigg-pro.hr/hr/primjena-u-industriji/ (9.6.2017.).

[12] Ban Drago, Puzak Milivoj, Grubišić Davor, Iličić Mario, Škarić Davor, Mogućnosti poboljšanja tehnološkog procesa i ušteda energije primjenom frekvencijski reguliranog pogona iskustva iz TE-TO Osijek, 2013., url: https://bib.irb.hr/datoteka/654752.CIGRE_A1-12_R20130060.pdf (12.6.2017.).

[13] Žarko Damir, Asinkroni strojevi i pogoni, 15.11.2010., url: https://www.fer.hr/_download/repository/EEPE_2010_2011_AM.pdf (12.6.2017.).

[14] Kolonić Fetah, Sumina Damir, Upravljanje elektromotornim pogonima s asinkronim strojem, 2014., url: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/UEP_Pred_04_14-15_AC.pdf (14.6.2017.).

SAŽETAK

U završnom radu opisan je način rada, razlozi korištenja, te upravljanje frekvencijskim pretvaračima. Još je dana i shema praktične realizacije frekvencijskog pretvarača. Na temelju nadomjesne sheme asinkronog motora izvedeni su izrazi za računanje momenta motora, te naposljetku opisana je naponsko-frekvencijska regulacija kao najjednostavniji tip regulacije, te izveden je i odnos napona i frekvencije pri konstantnom toku pomoću Faradey-evog zakona indukcije.

Ključne riječi: frekvencijski pretvarač, asinkroni motor, moment asinkronog motora, skalarna regulacija, naponsko-frekvencija regulacija, Danfoss .

ABSTRACT

The thesis describes ways to use frequency converters, reasons to use frequency converters, and control with frequency converters. Also, the scheme of practical realization of frequency converters is also presented. On the basis of substitute scheme of asynchronous motor, equations for the moment of the motor are derived. Finally scalar control, as the simplest way to regulate, is explained, and relation between voltage and frequency at constant flow is derived using Faraday's law of induction.

Key words: frequency converter, asynchronous motor, moment of asynchronous motor, scalar regulation, voltage-frequency regulation, Danfoss.

ŽIVOTOPIS

Matej Dunković rođen je u Virovitici 13.7.1995.godine. Odrasta u Sladojevcima, te u Slatini završava Osnovnu školu Josipa Kozarca. Nakon završene osnovne škole, upisuje Srednju školu u Slatinu te završava smjer opća gimnazija. Nakon završetka srednje škole upisuje se na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na preddiplomski smjer elektrotehnika, te se nakon prve godine upisuje na smjer elektroenergetika. Aktivno se služi engleskim jezikom i programskim paketima: Word, Power Point, Visio. Nakon završetka preddiplomskog studija želi upisati diplomski studij na Fakuletu, elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.

U Osijeku, 3.7.2017. Matej Dunković

Potpis: 