

# Statička i dinamička stanja asinkronih motora

---

**Tomašić, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:211149>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**Statička i dinamička stanja asinkronih  
motora**

Rijeka, rujan 2023.

Karlo Tomašić  
0069081565

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Prijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Završni rad

**Statička i dinamička stanja asinkronih  
motora**

Mentor: izv.prof.dr.sc. Rene Prenc

Rijeka, rujan 2023.

Karlo Tomašić  
0069081565

Umjesto ove stranice umetnuti zadatak  
za završni ili diplomski rad



## Izjava o samostalnoj izradi rada

Izjavljujem da sam završni rad s naslovom "Statička i dinamička stanja asinkronih motora" samostalno izradio pod mentorstvom i pomoći izv.prof.dr.sc. Rene Prenc. Rad je izrađen u skladu s pravilima koja su predočena na web stranici Tehničkog fakulteta koristeći se literaturom koja je navedena pri kraju ovog rada.

Rijeka, rujan 2023.

-----  
Karlo Tomašić

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Asinkroni motori</b>	<b>3</b>
2.1	Struktura i podjela asinkronog motora . . . . .	3
2.1.1	Kavezni motor . . . . .	4
2.1.2	Klizno kolutni motor . . . . .	5
2.2	Princip rada . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Frekvencijski pretvarač</b>	<b>8</b>
3.1	Struktura i princip rada pretvarača frekvencije . . . . .	8
3.1.1	Diodni ispravljač . . . . .	9
3.1.2	Istosmjerni međukrug . . . . .	10
3.1.3	Izmjenjivač . . . . .	11
3.1.4	Upravljački sklop . . . . .	12
3.1.5	Cjelokupna shema frekvencijskog pretvarača . . . . .	13
3.2	Prednosti i primjena frekvencijskog pretvarača u primjeni . . . . .	14
3.3	Regulacija brzine vrtnje pomoću frekvencijskog pretvarača . . . . .	15
3.3.1	Skalarna regulacija brzine vrtnje . . . . .	15
3.3.2	Vektorska regulacija brzine vrtnje . . . . .	20

## Sadržaj

<b>4</b>	<b>Statičko stanje asinkronog motora</b>	<b>26</b>
4.1	Mehaničke karakteristike . . . . .	26
4.1.1	Nadomjesna shema asinkronog motora . . . . .	27
4.1.2	Momentna karakteristika . . . . .	27
4.1.3	Klizanje i brzina vrtnje . . . . .	29
4.1.4	Ovisnost momenta tereta o brzini vrtnje . . . . .	30
4.2	Radni i kočni režimi rada . . . . .	31
4.2.1	Kočni režimi rada . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Dinamičko stanje asinkronog motora</b>	<b>34</b>
5.1	Prijelazne pojave . . . . .	34
5.2	Dinamička mehanička stanja asinkronog motora . . . . .	37
5.3	Promjene u radnim uvjetima . . . . .	39
5.3.1	Pokretanje . . . . .	39
5.3.2	Reverziranje . . . . .	41
5.3.3	Upravljanje brzine vrtnje . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Simulacija u programu PLECS</b>	<b>44</b>
6.1	Simuliranje sustava sa asinkronim motorom . . . . .	44
6.2	Simulacija statičkih i dinamičkih stanja . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Zaključak</b>	<b>52</b>
	<b>Bibliografija</b>	<b>53</b>
	<b>Sažetak</b>	<b>54</b>

# Poglavlje 1

## Uvod

U ovom radu će se pobliže opisati funkcija asinkronih motora u industrijskim i energetskim pogonima. Asinkroni motori su jedni od najiskorištenijih strojeva koji imaju znatno veliku ulogu u područjima elektromehanike i elektrotehnike. Zbog svoje jednostavne izvedbe i pouzdanosti, asinkroni motori imaju utjecaj u svim granama elektrotehnike. Mogu se koristiti u raznim elektromotornim pogonima gdje pogone ventilatore i pumpe, ali imaju i ulogu u malim mehanizmima kao što su to igračke, mašine za brijanje i bušilice.

Uvodni dio rada opisuje izvedbe asinkronih motora, te režime i osnovne principe rada koji se temelje na korištenju elektromagnetske indukcije. Nadalje promatra se kakav odnos imaju rotor i stator, time i promjena magnetskog polja statora u odnosu na rotor. Detaljno se opisuje regulacija brzine vrtnje i kakve sve vrste regulacije postoje.

Drugo poglavlje sadrži opis frekvencijskog pretvarača koji je veoma bitan za regulaciju brzine vrtnje u motoru. S obzirom na to da se sastoji od više dijelova, definira funkcija i konstrukcija svakog dijela posebno. U konačnici poglavlja se detaljno opisuje podjela između dvije glavne regulacije brzine vrtnje.

U nastavku je opisana analiza statičkog stanja asinkronog motora, što uključuje ponašanje motora kada nema ubrzavanja i usporavanja. Promatra se momentna karakteristika u ovisnosti o brzini vrtnje te pomoću Klossovih jednadžba se predočuje kako te dvije veličine međusobno rade. Bitan dio statičkih stanja su radni i kočni

## *Poglavlje 1. Uvod*

režimi rada koji su opisani i raspodijeljeni prema korisnosti i efikasnosti.

Kroz daljnju analizu, istražuje se dinamička stanja asinkronog motora, što uključuje promjenjive parametre kao što su ubrzavanje i usporavanje brzine vrtnje, promjena opterećenja, kao i promjena momentne karakteristike. Posebna pozornost se posvećuje regulaciji brzine vrtnje i njenim metodama.

U konačnici se asinkroni motor simulira u programu PLECS. Posebna pozornost se stavlja na metode regulacije brzine vrtnje i kroz primjere se grafički prikazuje statička i dinamička stanja.

U suštini, cilj je istaknuti bitne mogućnosti asinkronog motora, a time i njegova učinkovitost kroz analizu statičkih i dinamičkih stanja. S razumijevanjem principa rada, bitno je istaknuti važnost asinkronog motora i njegove optimizacije u suvremenom svijetu elektrotehnike i elektromehanike.

# Poglavlje 2

## Asinkroni motori

Asinkroni motor ili induksijski motor je električni stroj koji se koristi u gotovo svim granama elektromotornih pogona zbog svoje jednostavne izvedbe, korisnosti i niske cijene. Napaja se jednofaznim ili trofaznim izmjeničnim naponom koji omogućava stvaranje promjenjivog magnetskog polja. Promjenjivo magnetsko polje je bitno za rad asinkronog motora jer omogućava motoru beskontaktnu pretvorbu električne energije u mehanički rad. Najčešće se koristi trofazni asinkroni motor jer je pouzdaniji i jeftiniji od jednofazne varijante motora. Stroj izveden za rad u jednofaznoj mreži se u suštini koristi kod uređaja manje snage ili manje električne potrošnje što uključuje kućanske uređaje, dizala, miješalice i slično.

### 2.1 Struktura i podjela asinkronog motora

Osnovni dijelovi motora sastoje se od ležajnih štitova, ventilatorske kape, ventilatora i kućišta u kojem se nalaze stator i rotor. Stator i rotor se izrađuju od međusobno izoliranih limova kako bi smanjili vrtložne struje koje nastaju zbog promjenjivog magnetskog polja. Stator je glavni dio motora koji je stacionaran i sastoji se od statorskog paketa, statorskih namota i kućišta. U trofaznom sustavu se na stator namataju tri emajlirane bakrene ili aluminijske žice koje su prostorno pomaknute za  $120^\circ$ . Namoti se spajaju na trofazni sustav napona koji kroz njih potjera tri fazno pomaknute struje. Rotor asinkronog motora nalazi se unutar statora na kojemu se,

## Poglavlje 2. Asinkroni motori

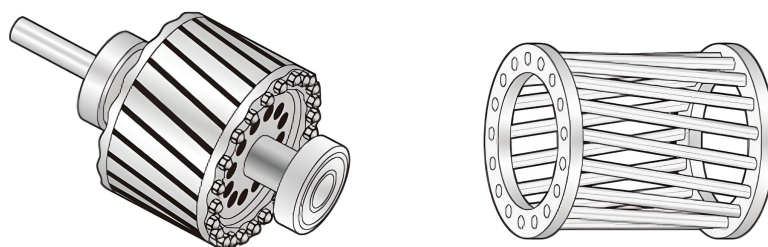
uz pomoć statora, inducira napon koji kroz rotor potiče električnu struju. Sastoji se od rotorskog paketa, rotorskih namota i osovine. Izvodi se bez istaknutih polova, s raspoređenim namotom na obodu rotora što znači da se rotor ne napaja vanjskom baterijom.

Prema vrsti namota postoje dvije vrste rotora asinkronog motora:

- kavezni rotor
- klizno kolutni rotor

### 2.1.1 Kavezni motor

**Kavezni motor** sadrži rotor koji se sastoji od prstena na svakom kraju i štapova koji su kratko spojeni na prstene te time čine višefazni rotorski namot. Ti štapovi zajedno sa prstenima izgledaju kao kavez pa otuda potječe sam naziv ovakve izvedbe rotora. Rotor radi u kratkom spoju i ako je kavez simetrično raspoređen, jedan par nasuprotnih štapova će simulirati jednu fazu. Postoje rotori s jednostrukim i dvostrukim kavezom. Kao što je prikazano na Slici 2.1, struktura kaveznog rotora je jednostavna i iz tog razloga je jeftiniji za izraditi.



Slika 2.1 Kavezni rotor asinkronog motora [1]

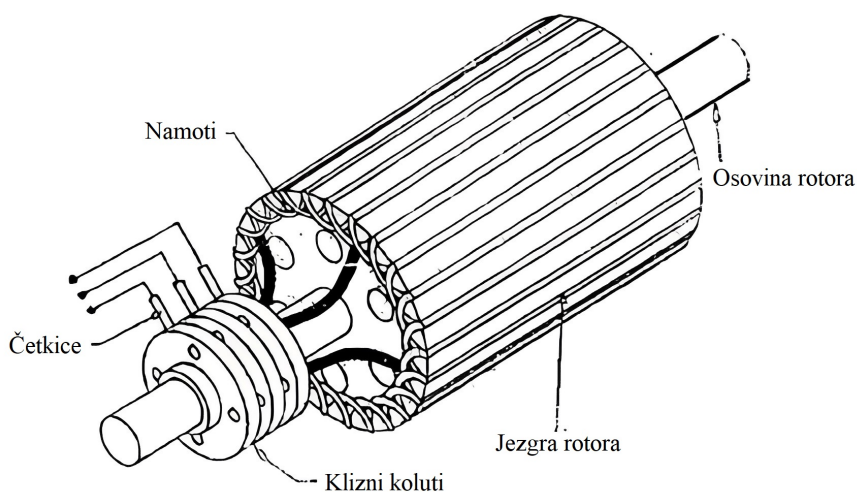
Takva jednostavna izvedba znači da nema namatanja namota i ne moraju se izolirati. Nadalje isto tako se na Slici 2.1 može uočiti da su štapovi iskrivljeni. To iskrivljenje smanjuje zujanje što osigurava tih rad motora, pomaže da ne dođe do zastajkivanja rotora i povećava otpor zbog povećane duljine štapova. Kavezni rotor

## Poglavlje 2. Asinkroni motori

nema kliznih prstenova, odnosno nema dijelova koji se mehanički troše. Postoje dvije vrste kaveznih motora, a to su uložni i lijevani. Uložni kavezni rotor ima namot koji se radi od bakrenih štapova koji se provuku kroz utore na prstenima i sa svake strane se zavare. Koristi se u motorima visoke i srednje snage. Lijevani kavezni rotor se izrađuje od aluminija koji se tlačnim lijevom ulije u paket rotora. Koristi se u motorima manje snage.

### 2.1.2 Klizno kolutni motor

**Klizno kolutni motor** ima istu izvedbu statora kao i kavezni motor. Klizno kolutni rotor u drugu ruku ima kompleksniju konstrukciju od kaveznog rotora, pa je zato skuplji. Dijelovi su prikazani na Slici 2.2. i najčešće se u tijelu rotora nalaze trofazni namoti koji se odnose na trofazno namotani stator. Krajevi namota se spajaju na klizne kolute gdje se kasnije mogu priključiti vanjski otpori ako je potrebno. Ti vanjski otpori općenito služe za pokretanje motora ili za regulaciju brzine.



Slika 2.2 Klizno kolutni rotor asinkronog motora

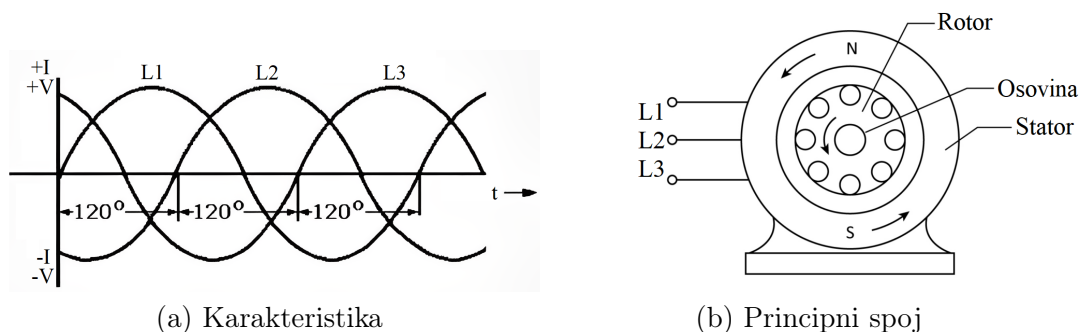
Klizni motori se najčešće koriste u pogonima gdje je potreban visoki okretni moment gdje je odličan primjer dizalo. Prednost kliznog motora nad kaveznim je što



ima visok početni zakretni moment što zahtjeva manje struje za pokretanje i moguće je kontrolirati brzinu vrtnje. Nedostaci su veliki gubici u bakru, nisu efikasni i skupi su.

## 2.2 Princip rada

Kako bi se mogao razumjeti princip rada asinkronog motora, prvenstveno je nužno shvatiti kako se magnetsko polje stvara i kakvu ulogu ima. Asinkroni strojevi su prvenstveno građeni kao trofazni jer su pouzdaniji i ekonomičniji, stoga ćemo u ovom radu većim dijelom pričati o navedenoj strukturi. Stator asinkronog motora se spaja na vanjsku trofaznu mrežu koja ga napaja. Napon potjera izmjeničnu struju u stator gdje se naizmjenično i periodično faze uključuju. Kao što sam naziv priopćuje, trofazni sustav se sastoji od tri faze koje su međusobno pomaknute za  $120^\circ$ .



Slika 2.3 Naponski izvor spojen na asinkroni motor

Magnetsko polje u statoru uvijek ima isti intenzitet, ali stalno mijenja smjer pa ga zato i nazivamo **okretno magnetsko polje**. S obzirom na to da se rotor nalazi u takvom polju, u njemu se inducira napon prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije:

$$E = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (2.1)$$

gdje je  $v$  brzina,  $B$  magnetsko polje i  $l$  duljinu vodiča. Takav inducirani napon se još može nazivati i **elektromotorna sila** ili **EMS**.

## Poglavlje 2. Asinkroni motori

Induciranjem napona, u namotaju rotora poteče izmjenična struja prema pravilu desne ruke. Prema pravilu vrijedi ako magnetsko polje ulazi u dlan, a palac pokazuje smjer gibanja vodiča, onda prsti pokazuju smjer induciranja napona. U ovom slučaju se magnetsko polje pomiče što postiže isti učinak. Struja teče u magnetskom polju što ispunjava uvjet za pojavu stvaranja sile na vodiču. Silu na vodiču određujemo Amperovim zakonom:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (2.2)$$

Vodič na koji djeluje sila, pomiče se prema pravilu lijeve ruke. To znači da postavimo ruku tako da nam silnice magnetskog polja udaraju u dlan, prsti pokazuju smjer struje, a palac smjer djelovanja sile. Prema tome se vodič počne gibati u smjeru djelovanja sile, to jest rotor se počinje okretati. Nadalje djelovanjem sile na vodiče rotora, dolazi do zakretnog momenta koji se definira kao umnožak sile  $F$  i radijusa rotora  $r$ , te ga ubrzava:

$$M = F \cdot r \quad (2.3)$$

Rotor asinkronog motora ubrzava dok ne dostigne sinkronu brzinu vrtnje magnetskog polja koje stator okreće što nije moguće iz par razloga. Kada rotor dostigne brzinu okretnog polja statora, on ne može održati tu brzinu jer iz gledišta rotora, magnetsko polje stoji. To znači da nema induciranja napona i rotor bi prestao vrtjeti. Rotor sinkronog motora rotira jednakom brzinom kao i okretno magnetsko polje. Kako bi motor postigao sinkronu brzinu, rotor je priključen na istosmjerni izvor koji održava konstantnu sinkronu brzinu vrtnje čak i nakon što se prestane inducirati napon ili koristi permanentne magnete. Još jedan razlog je klizanje koje se opisuje kao pojava koja omogućuje rotoru da se vrti brzinom vrtnje koja je uvijek manja od sinkrone. Klizanje ovisi o opterećenju osovine, veličini napona i iznosi 3-5%. O klizanju ćemo više govoriti u sljedećem poglavlju.

# Poglavlje 3

## Frekvencijski pretvarač

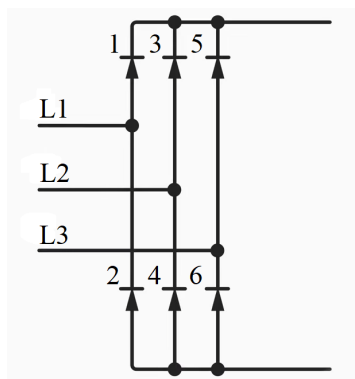
### 3.1 Struktura i princip rada pretvarača frekvencije

Napretkom tehnologije i pojeftinjenjem električkih komponenata postalo je moguće regulirati brzinu asinkronog motora uz minimalne gubitke pomoću frekvencijskih i naponskih pretvarača. Frekvencijski pretvarači (*eng. Variable Frequency Drive*) su uređaji koji služe za regulaciju brzine vrtnje asinkronog motora pretvarajući napon i frekvenciju konstantne amplitudne vrijednosti u napon i frekvenciju promjenjive amplitudne vrijednosti. Omogućuju mjerenje varijabli i dijagnostiku, te zaštitu, nadzor i upravljanje elektromotornog pogona. Pretvarač se dijeli na dva dijela, a to su **izravni** i **neizravni pretvarači** [2]. Izravni pretvarač je još poznat kao ciklopretvarač i koristi se u područjima velikih snaga i kada treba regulirati male vrijednosti brzine vrtnje. Konstruira se bez istosmjernog međukruga. Neizravni pretvarač s naponskim međukrugom uzima iz mreže energiju i pretvara ju dva puta. Jednom pomoću ispravljača pretvara energiju iz izmjenične u istosmjernu, a zatim pomoću izmjenjivača iz istosmjerne u izmjeničnu. Frekvencijski pretvarač se sastoji od četiri dijela:

- diodni ispravljač
- istosmjerni međukrug
- izmjenjivač
- upravljački dio

### 3.1.1 Diodni ispravljač

Princip rada diodnog ispravljača se bazira na funkcionalnoj karakteristici dioda. Dioda kroz sebe mogu propustiti struju samo u jednom smjeru, što znači da izmjenična struja kroz diodu vodi samo dio vremena. Stoga, cilj diodnog ispravljača je pretvaranje izmjenične struje u istosmjernu [2]. Na Slici 3.1 uočimo shemu koja karakterizira ispravljač. Radi svojstva trofaznog izmjeničnog izvora, struja periodički teče kroz diode kao što se može vidjeti na Slici 3.2a.



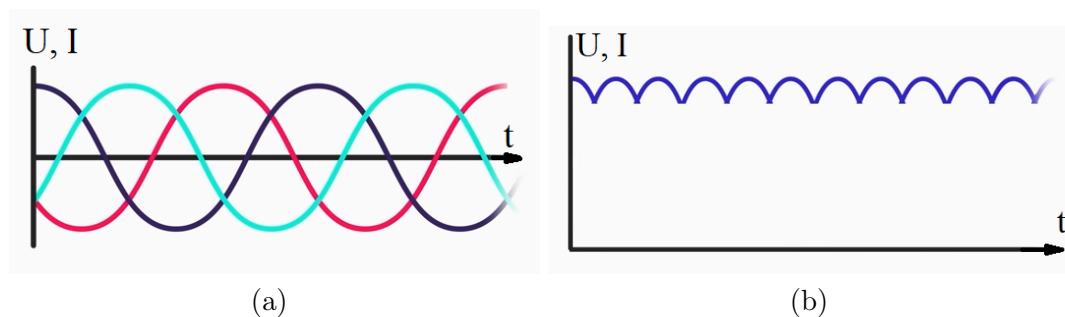
Slika 3.1 Shematski prikaz diodnog ispravljača [3]

Funkcija se odvija u sljedećim segmentima:

1. Mreža kroz fazu L1 potjera struju koja prolazi kroz diodu 1 i vraća se kroz diodu 6 nazad u fazu L3
2. Faza L1 se isključi i uključi se faza L2 koja potjera struju kroz diodu 3, te ju ponovo vraća kroz diodu 6
3. Faza L2 ostaje uključena, no ovoga puta vraća struju kroz diodu 2 u fazu L1
4. L2 se isključuje, te se uključuje L3 koji potjera struju kroz diodu 5 i vraća ju kroz diodu 2 u L1
5. L3 i dalje vodi, ali se struja vraća kroz diodu 4 u L2
6. L3 prestane voditi i mreža ponovo potjera struju kroz L1, te se vraća preko diode 4 u L2

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

Proces se ponavlja dok god mreža dovodi izmjeničnu energiju u pretvarač. Kako na izlazu ispravljača teče struja samo u jednom smjeru, rezultatna karakteristika izgleda kao na Slici 3.2b. Osim dioda, ispravljač može imati tiristore ili kombinaciju tiristora i dioda. Zamjenom dioda s tiristorima, ispravljač postane upravljiv. [3]



Slika 3.2 Karakteristika izmjenične energije: a) prije i b) poslije [3]

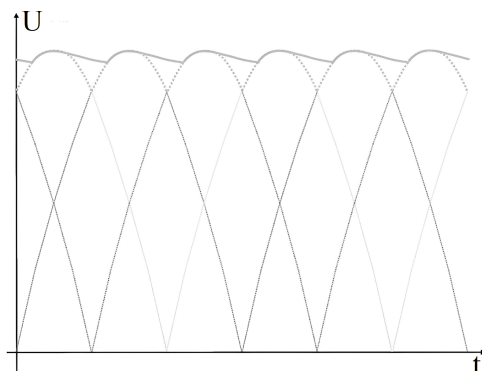
#### 3.1.2 Istosmjerni međukrug

Istosmjerni međukrug služi za efikasno i precizno pretvaranje napona i frekvencije jedne amplitude u napon i frekvenciju druge amplitude. Može se naći samo u neizravnim frekvencijskim pretvaračima jer izravni pretvarači ne koriste međukrug. Sastoji se od kondenzatora i zavojnice. Kondenzator nam omogućava zaglađivanje istosmjerni napon koji je doveo ispravljač i služi kao mali spremnik energije. Energiju koju kondenzator ne uspije uskladištiti se iskorištava u sklopu za kočenje koji je spojen paralelno s kondenzatorom. Sklop za kočenje se sastoji od čopera za kočenje i otpornika na kojem se disipira energija. S obzirom na to da se radi o neizravnom frekvencijskom pretvaraču, postupak se razlikuje prema vrsti međukruga koji se koristi. Postoje dvije vrste, a to su promjenjivi i konstantni DC međukrugovi.

**Promjenjivi DC međukrug** se sastoji od strujnog i naponskog međukruga, te je uvijek spojen na upravljivi ispravljač. Teret motora određuje vrijednost napona i koristi se kod pretvarača sa strujnim izvorom. [4]

**Nepromjenjivi DC međukrug** se sastoji od samo naponskog međukruga i može biti spojen na upravljivi ili neupravljivi ispravljač. Služi kao nisko propusni filter koji smanjuje valovitost izlaznog napona kao što je prethodno napomenuto. [4]

### Poglavlje 3. Frekvenijski pretvarač

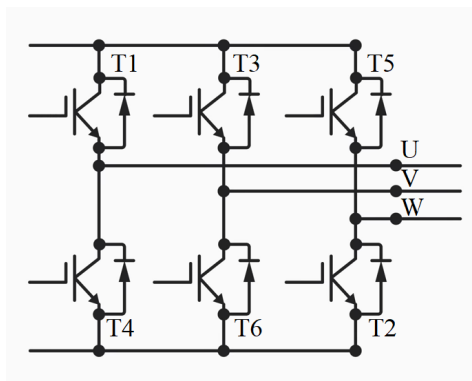


Slika 3.3 Naponska karakteristika nakon prolaska kroz međukrug

#### 3.1.3 Izmjenjivač

Izmjenjivač je komponenta u frekvenijskom pretvaraču čija je uloga pretvorba istosmjerne frekvencije i napona koju je međukrug "izgladio" u željenu frekvenciju i napon koji će koristiti asinkroni motor. S obzirom na vrstu istosmjernog međukruga, na ulaz izmjenjivača se može narinuti:

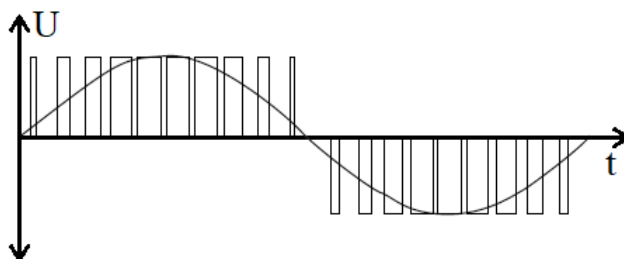
- Promjenjivi istosmjerni napon
- Konstantni istosmjerni napon
- Promjenjiva istosmjerna struja



Slika 3.4 Shematski prikaz IGBT izmjenjivača [3]

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

Kako je izmjenjivač zadnji sklop u prekidaču, u njemu se vrši prilagodba izlaznog signala uzevši u obzir opterećenje. Cilj je imati konstantan ulazni napon kako bi izmjenjivač mogao osigurati promjenjivu frekvenciju i napon. Na Slici 3.4 nalazi se izmjenjivač koji koristi IGBT (*eng. Insulated-Gate Bipolar Transistor*) tranzistore. Takva vrsta izmjenjivača se upravlja pulsno-širinskom modulacijom ili PWM (*eng. Pulse-Width Modulation*) [2].



Slika 3.5 Fazni oblik napona na izlazu pretvarača

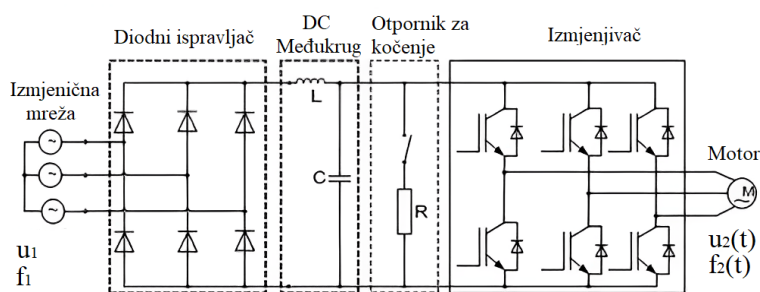
PWM se bazira na mijenjanju duljine naponskih impulsa duž vremenske osi. Na ulaz se dovodi istosmjerni napon koji se preko izmjenjivača pretvara pravokutni izlazni napon [2]. Duljina pravokutnih napona ovisi o vremenu i željenoj frekvenciji sklopa. U priču ulazi upravljački dio koji očitava napon ovisno o duljini pulsa. Napon će varirati gdje je dulji puls viši napon i kraći puls niži napon kao što je vidljivo na Slici 3.5. Taj napon se preko upravljačkog dijela konvertira u sinusoidalan napon koji motor može pročitati.

#### 3.1.4 Upravljački sklop

Kako bi motor mogao očitati napon koju je izmjenjivač pretvorio, treba nam upravljački dio koji prima i prenosi informacije pretvarača. Cilj upravljačkog dijela je upravljanje poluvodičkim komponentama kao tiristorima ili IGBT tranzistori. Nadalje uspostavlja komunikaciju između pretvarača, vanjske mreže i motora, te služi za pronalaženje i izvješćivanje o greškama. Ali najbitnija uloga upravljačkog sklopa je slanje signala u izmjenjivač tako da izmjenjivač može pretvoriti istosmjerni napon u sinusoidalni izmjenični napon. [2]

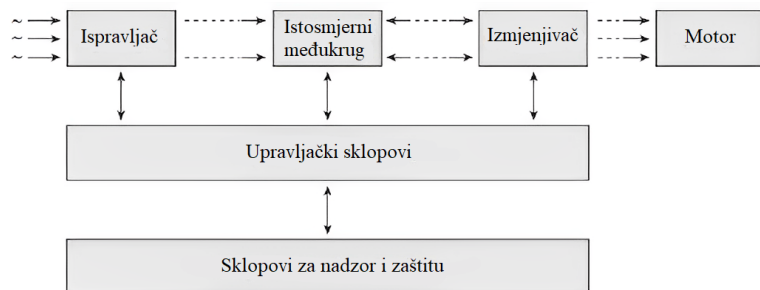
### 3.1.5 Cjelokupna shema frekvencijskog pretvarača

S obzirom na to da su glavni dijelovi frekvencijskog pretvarača opisani i njih rad je objašnjen, moguće ih je prikazati u sastavnom obliku na Slici 3.6. Uz glavne komponente ovog pretvarača, svrha otpornika za kočenje je preuzimanje topline od kočenja. Tako omogućuje veći napon pri kočenju.



Slika 3.6 Shema frekvencijskog pretvarača

Ovako strukturiran frekvencijski pretvarač je neizravne karakteristike jer se služi istosmjernim međukrugom. Paralelno s pretvaračem spojeni su upravljački sklopovi koji komuniciraju sa svim dijelovima. Takva pojednostavljena blokovska struktura se može vidjeti na Slici 3.7.



Slika 3.7 Blokovska shema neizravnog frekvencijskog pretvarača



## 3.2 Prednosti i primjena frekvencijskog pretvarača u primjeni

Frekvencijski pretvarači su uređaji bez kojih bi današnji svijet bio nezamisliv. Sadrže karakteristike zbog kojih se može koristiti u gotovo svim električnim pogonima i uređajima. Suvremeni pretvarači imaju relativno nisku cijenu, veoma su pouzdani i omogućuju dobre performanse i pouzdanost. Zbog upravljačkog sklopa, rukovanje frekvencijskim pretvaračem je jednostavno jer nudi precizno upravljanje i praćenje procesa. Također, ugradnjom frekvencijskog pretvarača u sustav umjesto ventila, štedimo energiju svaki puta kada pogon ne radi punom snagom. To je zato što zbog zavarenih ventila u pogon nastaju gubici dok motor radi punom snagom. Pretvarač još pomaže asinkronom motoru da dulje traje. To se postiže tako da frekvencijski pretvarač postepeno blago pokreće i zaustavlja motor, te time materijal ne poprima nepotrebni stres.

Prednosti frekvencijskih pretvarača je još optimiziran rad procesa i mogućnost podešavanja momentnih karakteristika. Kako svaki elektromotorni pogon teži ka tome da pojednostavi i optimizira rad svojih strojeva, frekvencijski pretvarač to ostvaruje tako da omogućava preciznu regulaciju brzine vrtnje i jednostavno prebacivanje režima rada asinkronih motora. Prema tome, čak je moguće i promjena brzine vrtnje uz konstantni moment tereta.

Uz navedene prednosti, lako je moguće zamisliti zašto se frekvencijski pretvarač koristi u gotovo svim vrstama elektromotornih pogona. Prema tome, korisno je definirati nekoliko primjera gdje je frekvencijski pretvarač korišten. Koristi se u raznim postrojenjima koji se razlikuju prema karakteristikama opterećenja i stazi.

Frekvencijski pretvarači se primjerice koriste u industrijskim postrojenjima gdje kontroliraju razne mehanizme koje asinkroni motori pogone. Takav sustav se koristi konstantnim momentom to jest konstantnim magnetskim tokom koji motor mora održati. Taj tok se može održati konstantnim samo ako je omjer napona i frekvencije konstantan što znači da ako povećamo napon, moramo ujedno povećati i frekvenciju, no o tome će se baviti sljedeće potpoglavlje.

Pretvarači se koriste još i u ventilacijama i klimatizacijama. Takav sustav se

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

još naziva i HVAC (*eng. Heating, Ventilation and Air Conditioning* gdje pretvarač precizno regulira brzinu ventilatora i kompresora koji se koristi u klimama uključujući i regulaciju protoka zraka kroz hidrauličke pumpe. U pumpama služi kako bi precizno dozirao tekućinu. Postoje još razne uporabe takvih pretvarača, kao na primjer dizala, konvejeri, pokretne stepenice, vjetroelektrane i solarne elektrane gdje omogućava kontrolu energije prema promijeni sunčeve svjetlosti ili vjetra.

## 3.3 Regulacija brzine vrtnje pomoću frekvencijskog pretvarača

Regulacija brzine vrtnje je jako bitna za asinkrone motore jer nam pomaže pri kontroliranju strojeva što ih čini dinamičnijim. Postoje skalarna i vektorska regulacija brzine vrtnje koji se zasebno koriste u određenim uvjetima. Kod asinkronih motora, regulaciju brzine vrtnje upravljanjem naponom koriste i kavezni i kolutni motori.

### 3.3.1 Skalarna regulacija brzine vrtnje

Skalarna regulacija je način upravljanja brzine vrtnje tako da se napon i frekvencija mijenjaju u istom omjeru kako ne bi došlo do promjene magnetskog toka  $\phi$ .

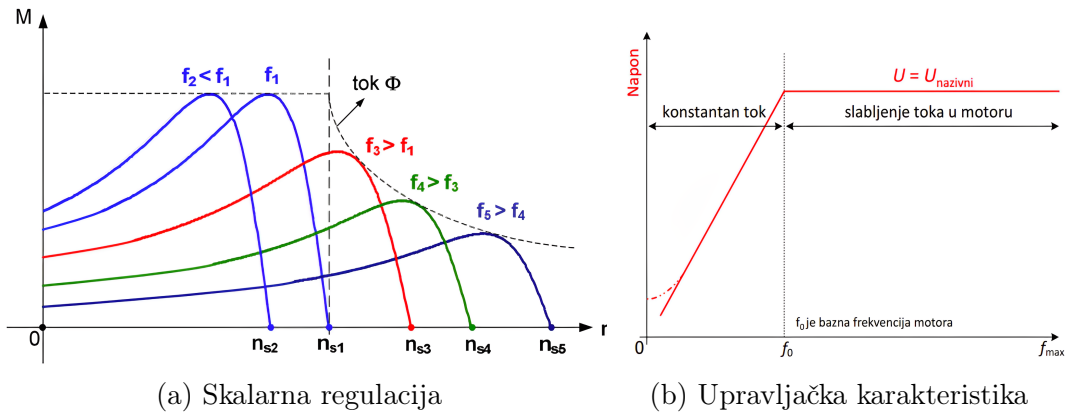
$$\phi = \frac{U}{f} = konst. \quad (3.1)$$

Magnetski tok mora ostati konstantan iz par razloga. Smanjivanjem frekvencije uz konstantan napon stvara jači magnetski tok koji predaje veću količinu silnica u željezo. Zbog povećanog broja silnica može doći do zasićenja u željezu jezgre što znači da bi došlo do velikog zagrijavanja. Povećavanjem frekvencije uz konstantan napon rezultira u manjem magnetskom toku što ujedno i smanji maksimalni moment što isto nije dopušteno. Zato se skalarnom regulacijom postupa po jednadžbi 3.1.

$$M = \phi \cdot I \quad (3.2)$$

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

Istovremenom promjenom napona i frekvencije, dolazi do promjene na momentnoj karakteristici na Slici 3.8a prema jednadžbi 3.2. Moguće je primijetiti da se u jednom trenutku prekretni moment počinje opadati. Naime, napon je moguće regulirati između nule i nazivne vrijednosti (Slika 3.8b), te ga nije dopušteno povećati iznad nazivne vrijednosti zbog naponskih naprezanja. Povećavanje frekvencije je također ograničeno zbog mehaničkih razloga i po europskom standardu iznosi 50 Hz. Stoga opadanje maksimalnog momenta i magnetskog toka nastaje kada snagu više ne možemo povećavati, ali brzina vrtnje i dalje raste. Skalarna regulacija se uglavnom koristi kod strojeva koji ne zahtijevaju veliku preciznost i dinamička svojstva kao što su ventilacija ili centrifugalne pumpe, dok se vektorsko upravljanje sve više primjenjuje s obzirom na vrhunsku učinkovitost i preciznost.



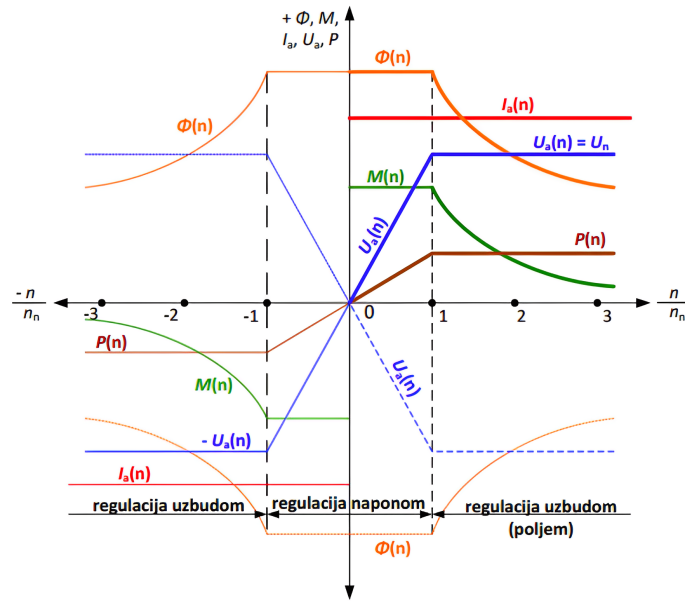
Slika 3.8 Momentna karakteristika asinkronog motora

Skalarno upravljanje asinkronog motora se može podijeliti na dva dijela, a to su s otvorenom petljom i zatvorenom petljom.

Upravljanje u otvorenoj i zatvorenoj petlji se razlikuje u mogućnostima upravljanja i primjene. Primjena oba tipa petlje se može koristiti u pogonima gdje velika preciznost kontrole brzine vrtnje nije potrebna. Razlika u strukturi otvorene i zatvorene petlje je u tome što u otvorenom petlji ne postoji povratna veza po brzini vrtnje, dok zatvorena petlja ima povratnu vezu u kojoj se može nalaziti mjerni član brzine vrtnje. Zatvorena petlja se može koristiti u skalarnoj i vektorskoj regulaciji, ali se princip rada razlikuje. [5]

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

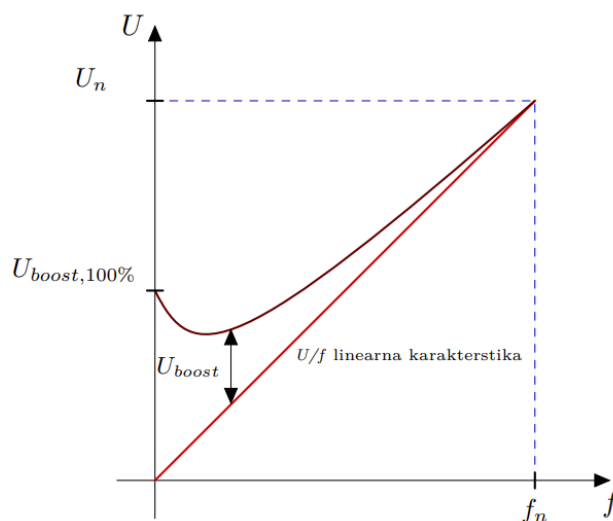
Područje upravljanja asinkronim strojem dijeli se na područje konstantnog momenta i područje konstantne snage [5]. U području konstantnog momenta se regulira naponom je proporcionalan frekvenciji uz konstantan magnetski tok i moment. U području konstantne snage, napon poprima konstantnu vrijednost dok se frekvencija i dalje povećava rezultirajući u smanjivanju magnetskog toka i momenta što je moguće vidjeti na Slici 3.9.



Slika 3.9 Područja regulacije brzine vrtnje [4]

Pri malim brzinama vrtnje vrijedi i mala frekvencija što znači da zbog otpora na statoru dolazi do velikog pada napona. Kako bi se taj pad napona kompenzirao, na statoru se mora drastično povećati napon kako bi magnetski tok ostao optimalan. Takav napon se još naziva i napon konstantnog uzdizanja i posjeduje maksimalnu vrijednost koju napon može imati dok je frekvencija jednaka nuli, te pri povećavanju frekvencije napon se smanjuje. Napon uzdizanja se računa preko nazivne struje i ukupnog otpora na statoru. Takav napon je najbolje prikazan u linearnoj karakteristici skalarne regulacije gdje karakteristika poprima zakrivljeni oblik gdje pri nultoj frekvenciji napon poprima vrijednost  $U_{boost,100\%}$  (Slika 3.10) [5]. Uz linearnu karakteristiku još postoje i kvadratna i programabilna karakteristika.

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač



Slika 3.10 Kompenzacija napona pri niskim frekvencijama [5]

Skalarno upravljanje s linearnom karakteristikom se može regulirati i strujom magnetiziranja (FCC - eng. *Flux Current Control*). Koristi se većinom kod malih strojeva koji imaju veliki otpor statora gdje služi kao sredstvo za nadoknadu pada napona na statoru. Kada je početna frekvencija postavljena na premali iznos, moguće je uzrokovati nestabilnost u radu pretvarača. Stoga dolazi do regulacije strujom magnetiziranja kako bi se spriječilo prekoračenje početne frekvencije. Prednosti FCC-a u odnosu na standardnu regulaciju je bolja dinamika, veća korisnost struje, bolje prijelazne pojave i bolja kontrola nad smetnjama. Skalarna regulacija s kvadratnom karakteristikom uzima u obzir moment tereta što u suštini rezultira u uštedi energije zbog manjeg napona potrebnog za rad. Manji napon omogućuje manje korištenje struje što ujedno i smanjuje gubitke. [5]

Skalarno upravljanje u otvorenoj petlji se zasniva na promjeni frekvencije u naponskom izmjenjivaču, a time i asinkronom motoru uz proporcionalno mijenjanje efektivne vrijednosti napona motora kako bi magnetski tok ostao konstantan. Pri tome mijenjanjem frekvencije se skoro proporcionalno mijenja i brzina vrtnje  $\omega$  pri čemu se potezni moment povisuje, a okretni moment skoro neprimjetno smanjuje. Uz navedena pravila, cilj otvorene petlje je dovesti tri napona koji su fazno pomaknuti za  $120^\circ$ .

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

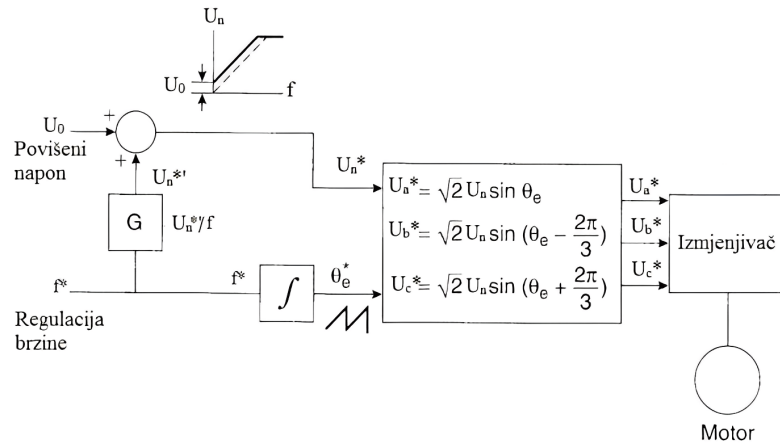
Frekvencija  $f^*$  koristi se kako bi se proizveo kut signala  $\Theta_e^*$  i tako je moguće generirati odgovarajuće sinusoidalne fazne napone:

$$U_a^* = \sqrt{2}U_n \sin \Theta_e \quad (3.3)$$

$$U_b^* = \sqrt{2}U_n \sin \left( \Theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.4)$$

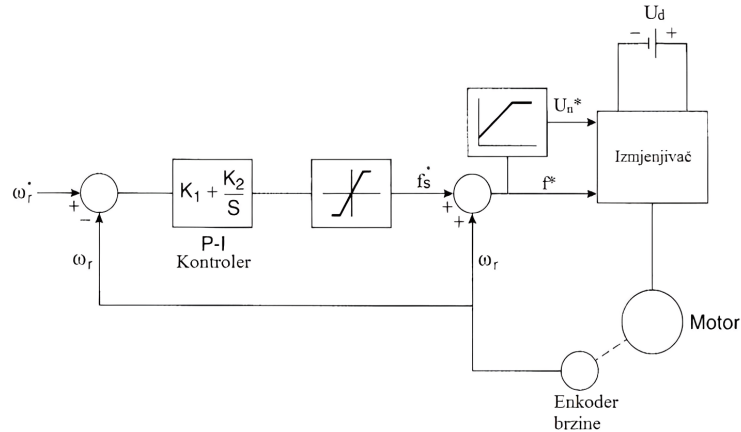
$$U_c^* = \sqrt{2}U_n \sin \left( \Theta_e + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.5)$$

koji su opisani jednadžbama međusobno pomaknutim za  $120^\circ$ . Dobivene naponske jednadžbe se predaju na upravljački sklop gdje se odvija PWM. PWM pomoću tih naponskih signala generira vrijednosti koje se prenose u izmjenjivač.



Slika 3.11 Blok shema skalarne regulacije u otvorenoj petlji [6]

Skalarno upravljanje u zatvorenoj petlji se zasniva na povratnoj vezi kroz koju motor šalje signal brzine vrtnje. Takav signal je signal greške brzine vrtnje koji je generiran klizanjem. Signal je onda sumiran s brzinom vrtnje  $\omega_r^*$  u generatoru greške koji šalje signal  $\omega_r^* - \omega_r$  u PI (proporcionalno integralni) regulator. PI regulator služi kako bi promijenio izlaznu vrijednost sve dok ulazna vrijednost greške ne iznosi nula. Izlazna vrijednost stvara željenu frekvenciju. Dobiva se frekvencija koja služi kao regulacija brzine i direktno se spaja na sklop s otvorenom petljom (Slika 3.12).



Slika 3.12 Blok shema skalarne regulacije u zatvorenoj petlji [6]

### 3.3.2 Vektorska regulacija brzine vrtnje

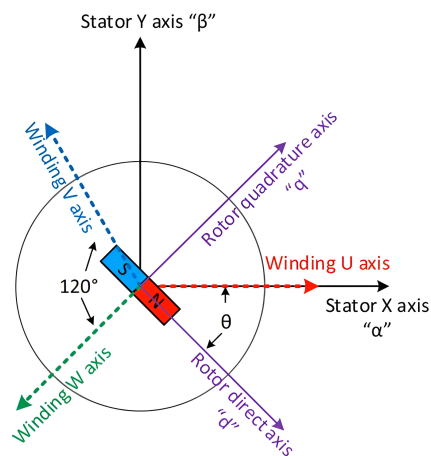
Vektorsko upravljanje brzine vrtnje služi za preciznije reguliranje brzine vrtnje u asinkronim motorima. Vektorsko upravljanje se općenito koristi u istosmjernim strojevima s nezavisnom uzбудom, no mogu se implementirati u asinkronim motorima ako se upravljanje promatra unutar referentnog okvira okretanja. Upravljanje zasnovano na ulančanom magnetskom toku se naziva FOC (*eng. Field Oriented Control*), a upravljanje bazirano na kontroli momenta DTC (*eng. Direct Torque Control*).

Upravljanjem ulančanim magnetskim tokom se zasniva na kontroli statorske struje trofaznog asinkronog motora pomoću dvije vektorske komponente koje su ortogonalno pomaknute. Te komponente definiraju magnetski tok motora i moment.

Vektorsko upravljanje se s vremenom sve više koristi u elektromotornim pogonima jer ima značajne prednosti nad skalarnim upravljanjem. Te prednosti uključuju preciznija regulacija brzine vrtnje, mogućnost pokretanja pri prekretnom momentu, stabilnost, točnost, širi raspon regulacije i brzi odziv pri promjeni opterećenja. S obzirom na te prednosti, nedostatak je što više košta od frekvencijskih pretvarača sa skalarnim upravljanjem. Kao što je ranije navedeno, u asinkronim motorima koristimo istosmjerne varijable  $I_{ds}$  i  $I_{qs}$ . Te varijable predstavljaju komponente statorske struje gdje  $I_{ds}$  poprima uzdužnu os, a  $I_{qs}$  poprečnu os. Te osi se nalaze u trofaznom

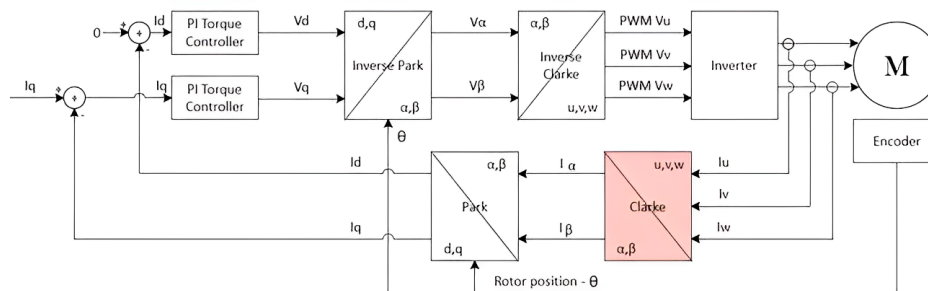
### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

strujnom sustavu kao što je moguće vidjeti na Slici 3.13.



Slika 3.13 Vektorski prikaz struje statora u rotirajućem koordinatnom sustavu

Cilj ove metode je proizvesti što veći moment čak i pri pokretanju i kočenju. To je moguće ostvariti tako da se moment zakrene za 90° s obzirom na rotor kao što je to navedeno ranije. Zbog toga, postiže se najefikasnija brzina vrtnje motora, te je ujedno smanjuje zvuk motora.



Slika 3.14 Blok shema vektorskog upravljanja brzine vrtnje

Princip rada potječe od faznih struja ( $I_u$ ,  $I_v$  i  $I_w$ ) i zakretnog kuta  $\Theta$ . Te struje se pomoću **Clarke-ove transformacije** pretvore u struje  $I_\alpha$  i  $I_\beta$ . Nakon toga se pomoću **Park-ove transformacije** koristeći  $I_\alpha$ ,  $I_\beta$  i  $\Theta$  naprave struje  $I_{ds}$  i  $I_{qs}$  koje su nam potrebne za dimenzioniranje struje statora  $I_s$ . Zatim se struje primijene



### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

u PI regulatorima gdje se d komponenta minimizira, a q komponenta maksimizira za postizanje maksimalnog momenta. Nakon toga se kroz inverzne Park i Clarke transformacije komponente nazad pretvore u varijacije u, v i w.

Clarke transformacije se definiraju preko sljedećih jednadžba:

$$\alpha = U_\alpha + V_\alpha + W_\alpha \quad (3.6a)$$

$$\alpha = U + V \cos 120^\circ + W \cos 240^\circ \quad (3.6b)$$

$$\alpha = U - \frac{1}{2}V - \frac{1}{2}W \quad (3.6c)$$

$$\beta = U_\beta + V_\beta + W_\beta \quad (3.7a)$$

$$\beta = V \sin 120^\circ + W \sin 240^\circ \quad (3.7b)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}W \quad (3.7c)$$

Koristeći se jednostavnom trigonometrijom, moguće je transformirati struje  $I_u$ ,  $I_v$  i  $I_w$  u struje  $I_\alpha$  i  $I_\beta$ . Po Slici 3.13 je vidljivo da su struje međusobno pomaknute za  $120^\circ$  i time ih je lagano moguće pretvoriti u  $\alpha$  i  $\beta$  komponente koje nam opisuju koliko se U, V i W faze nalazi u smjeru  $\alpha$  i  $\beta$ .

Park transformacije se zatim definiraju preko sljedećih jednadžba:

$$d = \alpha_d + \beta_d \quad (3.8a)$$

$$d = \alpha \cos \Theta + \beta \sin \Theta \quad (3.8b)$$

$$q = \alpha_q + \beta_q \quad (3.9a)$$

$$q = \alpha \sin \Theta + \beta \cos \Theta \quad (3.9b)$$

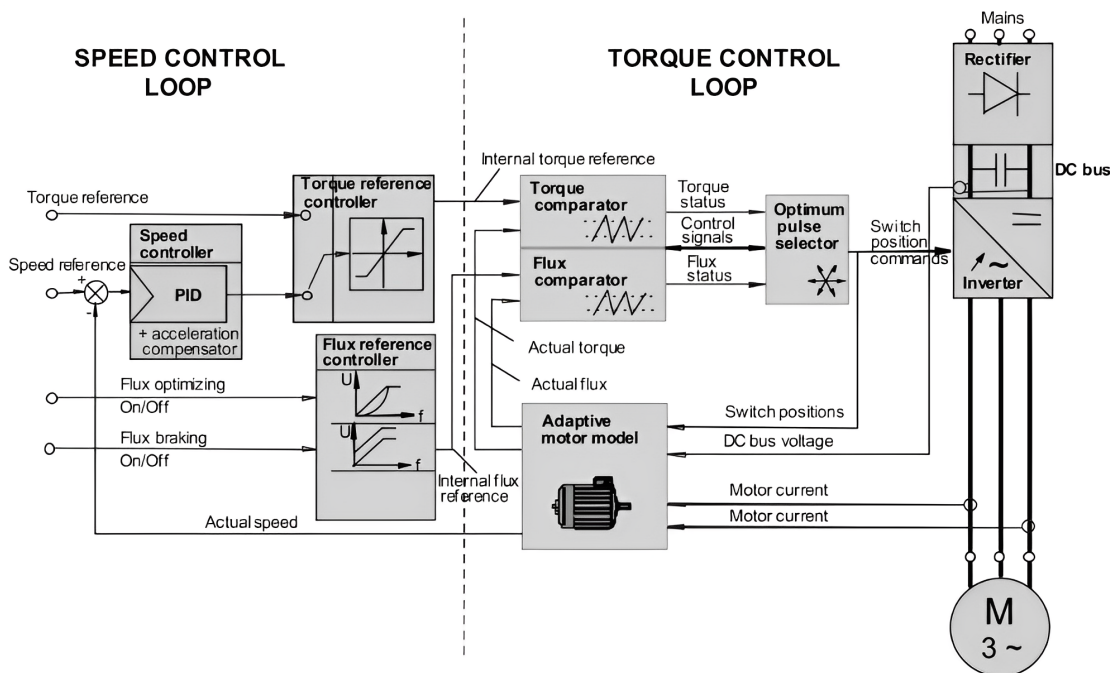
Pomoću Park-ove transformacija gledamo gdje se rotor pozicijski nalazi u ovisnosti o statorskoj  $\alpha$  i  $\beta$  komponenti. Stoga koristimo kut rotora  $\Theta$  da precizno

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

prikažemo poziciju rotora u ovisnosti o statoru i orijentaciji magnetskog polja. Koristeći se Park-ovom transformacijom možemo izračunati kolika je jačina momenta okomita na rotor. Ta okomitost se maksimizira pomoću PI kontrolera.

Prednosti FOC metode vektorske regulacije se mogu sročiti kao brz i tih rad pretvarača, velika dinamika pri punoj brzini vrtnje i odlična kontrola nad momentom. Jedini problem je što ovisi o enkoderu.

DTC (*eng. Direct Torque Control*) metoda se koristi za direktnu kontrolu momenta trofaznog asinkronog motora. Bazira se na kalkulaciji magnetskog toka i momenta bazirano na veličini napona i struje motora. Takva metoda ima puno bolji odziv momenta od FOC metode. Metoda direktne promjene momenta koristi dvije blokovske sheme za ostvarivanje svoje funkcije. Koristi se petljom za kontrolu brzine vrtnje i petljom za kontrolu momenta. Te petlje uz napredni asinkroni motor služe za precizno predviđanje magnetskog toka i momenta.



Slika 3.15 Blok shema metode direktog upravljanja momenta [7]

Operacija se izvodi tako da se uzmu dvije fazne struje motora, napon iz istos-

### Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač

mjernog međukruga i napon na izmjenjivačkim prekidačima. Sve izmjerene veličine se pripoje u prilagodljivi motorski model koji ima mogućnost očitavanja preciznih podataka iz motora gdje ih izračuna. Informacije o motoru se prikupljaju tijekom procesa koji se naziva **auto-tuning** gdje se dimenzioniraju podaci kao statorski otpor, indukcija, zasićenost kao i inercija, te se to može postići i bez vrtnje rotora. Zbog tog modela motora nije potrebno vraćati brzinu vrtnje ili poziciju rotora preko povratne veze i time omogućuje DTC metodi nisku brzinu vrtnje. Motorski model se koristi naprednim matematičkim algoritmima kako bi se izračunala točna vrijednost magnetskog toka, momenta motora i brzine vrtnje. Magnetski tok i moment motora se očitavaju u komparatorima koji uspoređuju njihove vrijednosti s referentnim vrijednostima pridonesene iz petlje za upravljanje brzinom vrtnje. Zatim se u selektoru optimalnog pulsa određuje naponski vektor iz tablice na Slici 3.16. Ovisno o vrijednosti u tablici šalje pulsne signale u izmjenjivač s namjerom da zadrži ili promijeni moment motora po potrebi. [7]

$\Phi$	$\tau$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
FI	TI	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
	T=	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	TD	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
FD	TI	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	T=	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	TD	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

Slika 3.16 Tablica koju koristi selektor optimalnog pulsa [7]

U tablici FI i FD predstavljaju povećavan i smanjivan magnetski tok. TD, T= i TI označavaju povećan, jednak i smanjen moment motora, a  $S_x$  označava sektor statorskog magnetskog toka.

Petlja upravljanja brzinom vrtnje sadrži kontroler brzine vrtnje (što je obično PID kontroler i kompenzator), kontroler referentne vrijednosti momenta motora i kontroler referentne vrijednosti magnetskog toka. Izlazna vrijednost PID kontrolera se pohranjuje u kontroler momenta gdje se određuje referentna vrijednost momenta

### *Poglavlje 3. Frekvencijski pretvarač*

motora koji je ranije spomenut, te isto vrijedi za magnetski tok. [7]

S obzirom na to da se na ovaj način moment motora i magnetski tok direktno upravljaju preko ovog sklopa, nema potrebe za dodatnom modulacijom za kontrolu frekvencije i napona kao što zahtjeva PWM upravljači. Takav način upravljanja smanjuje trajanje procesa i povećava odziv na manje od 2 ms. To znači da takav sklop može raditi i biti precizno upravljan na vrlo niskim brzinama vrtnje. Nadalje, s obzirom na to da se moment direktno upravlja, sklop nema potrebe za povratne veze.

# Poglavlje 4

## Statičko stanje asinkronog motora

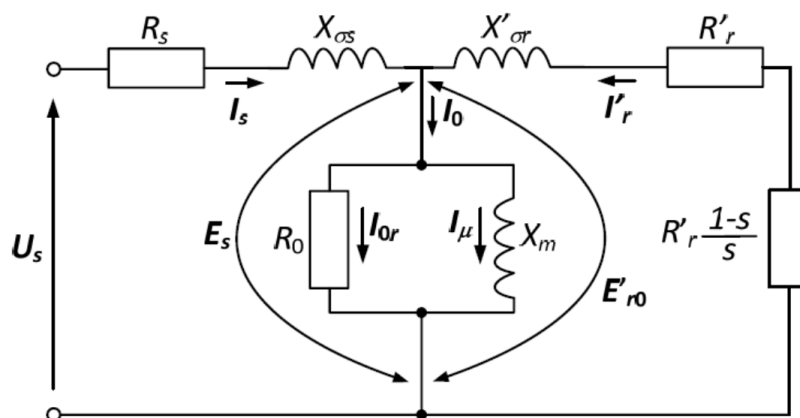
U elektromotornim pogonima je bitno izabrati pravi stroj koji zadovoljava sve potrebe. Ne samo da vrsta stroja omogućava inženjerima procijeniti kako će se stroj ponašati, već i koliko će dugo raditi. Prema tome, pri dimenzioniranju pogona se razmatraju stabilnost i učinkovitost energetskih i mehaničkih stanja koji nisu ovisni o vremenu. Takva stanja se još nazivaju **stacionarna stanja**. Takva stanja raspoložu sa statičkim parametrima kao brzina vrtnje, napon, struja, moment i slično. Ovo poglavlje će objasniti o kakvim se stacionarnim stanjima radi, koji režimi rada postoje i analiza električnih i mehaničkih parametara.

### 4.1 Mehaničke karakteristike

Za normalan rad elektromotornog pogona, uvjet je odabrati ispravni elektromotor koji je namijenjen za određeni radni mehanizam. Elektromotor je aktivni dio elektromotornog pogona i treba biti prikladan za rad cijelog sustava. Stoga prilikom odabira elektromotora, potrebno je uzeti mehaničke karakteristike u obzir jer ga one definiraju. U ovom slučaju sve mehaničke karakteristike koje će biti spominjane se svode na asinkroni motor, te će se istaknuti prednosti i nedostatke u praktičnoj uporabi.

### 4.1.1 Nadomjesna shema asinkronog motora

Kako bi se bolje predočio motor s kojim radimo, nadomjesna shema nam prikazuje aktivne i pasivne komponente kojima stroj raspolaže.



Slika 4.1 Nadomjesna shema kaveznog asinkronog motora [8]

Parametri glase:

$R_s$  i  $X_{\sigma s}$  - radni otpor i rasipna reaktancija na statoru

$R_0$  - otpor zbog gubitka u željezu

$X_m$  - reaktancija magnetiziranja

$R'_r$  i  $X'_{\sigma r}$  - radni otpor i rasipna reaktancija na rotoru svedeno na stator

$E_s$  - inducirani fazni napon statora

$E'_{r0}$  - inducirani fazni napon rotora sveden na stator

### 4.1.2 Momentna karakteristika

Najbitnija je promijena momentne karakteristike u ovisnosti o brzini vrtnje gdje je brzina vrtnje konstantna, a moment motora glasi:

$$M_m = M_u + M_t \quad (4.1)$$

#### Poglavlje 4. Statičko stanje asinkronog motora

gdje je  $M_m$  moment motora na osovini,  $M_u$  je moment ubrzanja, a  $M_t$  moment tereta kojim radni mehanizam djeluje na osovinu te se uvijek opire gibanju.[9]

S obzirom na to da u stacionarnom stanju nema promijene momenta, to znači da nema ubrzavanja:

$$M_u = 0 \quad (4.2)$$

te iz toga možemo izvesti jednadžbu za stacionarno stanje momenta:

$$M_m = M_t \quad (4.3)$$

što nam predočuje da su moment motora  $M_m$  i moment tereta  $M_t$  u ravnoteži [9].

Kako je brzina vrtnje usko povezana s momentom, možemo zaključiti da čim nema promijene momenta, ne dolazi do promijene brzine vrtnje. Drugim riječima, brzina vrtnje je konstantna.

Najvažnija karakteristika asinkronog stroja koja opisuje njegov rad je prikazana na Slici 4.3, koja opisuje ovisnost momenta stroja i brzine vrtnje rotora. U toj karakteristici postoji nekoliko bitnih parametara, a to su prekretni ili maksimalni moment  $M_p$ , potezni ili početni moment  $M_k$  i sinkrona brzina vrtnje  $n_s$ . Kako bi se mogle izračunati te varijable, predstavljaju se **Klossove jednadžbe** [4]. Te jednadžbe pojednostavljivaju vanjsku karakteristiku motora  $N = f(M)$ . Služe kako bi povezale dvije radne točke na momentnoj karakteristici. Jedna točka se proizvoljno izabire, dok je druga točka prelaska iz nestabilnog u stabilno područje rada. U ovom slučaju koristi se prekretni moment i jednadžba glasi:

$$\frac{M}{M_p} = \frac{2 + \beta}{\frac{s}{s_p} + \frac{s_p}{s} + \beta} \quad (4.4)$$

gdje je:

$$\beta = \frac{2 \cdot R_s}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + \sigma_s \cdot X'_{\sigma r})^2}} \quad (4.5)$$

#### Poglavlje 4. Statičko stanje asinkronog motora

te ove jednadžbe prikazuju omjer momenta neke proizvoljne radne točke i prekretnog momenta u ovisnosti o klizanju u toj radnoj točki i prekretnom klizanju  $s_p$ . Klossove jednadžbe se još mogu pojednostaviti za grube proračune kada više nema podataka o motoru. [9]

Nadalje jednadžba za prekretni ili maksimalni moment glasi:

$$M_p = \frac{m_s U_s^2}{2\omega_{sm}(\pm R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + \sigma_s X_{\sigma s})^2})} \quad (4.6)$$

gdje je predznak (-) za generatorski rad, a (+) za motorski rad.

Prema tome korisno je znati izvod za prekretno klizanje  $s_p$ :

$$s_p = \pm \frac{\sigma_s \cdot R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + \sigma_s X'_{\sigma r})^2}} \quad (4.7)$$

Primijetimo da se u svim jednadžbama koristi  $\sigma_s$  što određuje faktor rasipanja, te nam omogućuje preračunavanje rotorskih komponenti na statorsku stranu:

$$\sigma_s = 1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m} \quad (4.8)$$

i općenito iznosi 1,01 - 1,06 što ovisi o veličini motora gdje je manja vrijednost za veći motor. S obzirom na to da je faktor rasipanja veoma mali, u većini slučajeva se zanemaruje.

### 4.1.3 Klizanje i brzina vrtnje

U statičkim stanjima asinkronih motora, brzina vrtnje je među najbitnijim komponentama kojom možemo manipulirati i prilagođavati naš sustav. Iz tog razloga, bitno je naglasiti kako brzina vrtnje utječe na cjelokupni sustav. Rotor asinkronog motora nikada ne dosegne sinkronu brzinu vrtnje zbog prisutnosti klizanja. Klizanje je razlika između sinkrone brzine i stvarne brzine vrtnje kojom vrti rotor, a izražava se u postocima i glasi:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.9)$$



#### Poglavlje 4. Statičko stanje asinkronog motora

gdje su  $n_s$  sinkrona brzina vrtnje i  $n$  brzina vrtnje kojom rotor vrti. Sinkrona brzina vrtnje, kao što je prethodno definirano, dolazi iz okretnog magnetskog polja. Ta brzina vrtnje ovisi o frekvenciji  $f$  i broju pari polova na statoru  $p_p$ :

$$n_s = \frac{60f}{p_p} \quad (4.10)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p_p} \quad (4.11)$$

Uzevši u obzir da je frekvencija u svoj strojevima gotovo uvijek ista s iznosom od 50 Hz, brzina vrtnje ovisi primarno o broju pari polova. Prema tome ako na primjer imamo jedan par polova (tj. dva pola) onda će brzina vrtnje iznositi 3000 okretaja u minuti, a za dva para polova 1500 okr/min i tako dalje.

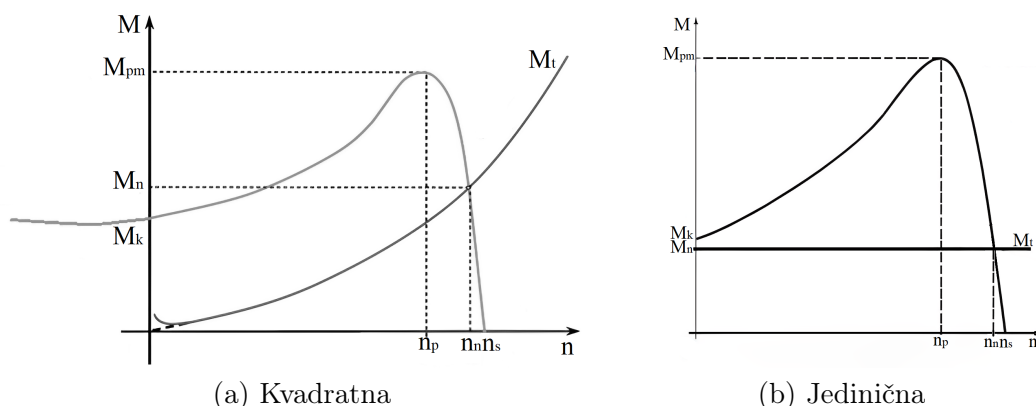
U prethodnom poglavlju se opisivala regulacija brzine vrtnje pomoću skalarne i vektorske metode regulacije. Brzina vrtnje, u asinkronim motorima, može se još regulirati promjenom napona napajanja, promjenom predotpora i broja pari polova. Ove metode se koriste u simulaciji asinkronog motora, te se pobliže opisuju u tom poglavlju.

#### 4.1.4 Ovisnost momenta tereta o brzini vrtnje

Moment tereta ovisi o vrsti opterećenja pod kojim motor radi. To znači da motor može biti pod konstantnim teretom ili se teret stalno mijenja u ovisnosti o brzini vrtnje. Način na koji se mijenja s brzinom vrtnje ovisi o vrsti tereta.

Na Slici 4.2a se nalazi kvadratna karakteristika momenta tereta koja se definira jednadžbom  $m = kn^2$  i koristi se u strojevima s ventilacijom, hidrauličkim pumpama, centrifuge i slično.

Drugi tip momenta tereta je konstantan što znači da ne ovisi o brzini vrtnje. Takav moment tereta općenito karakterizira strojeve koji pogone dizalice, liftove, transportere i tako dalje.

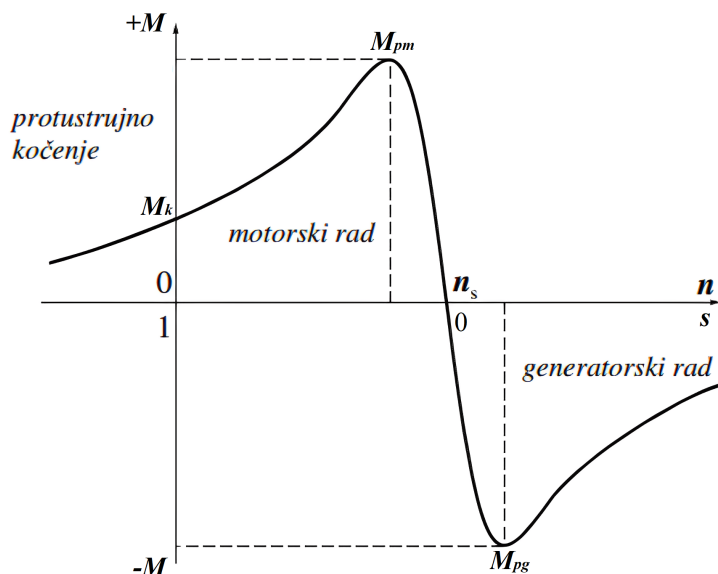


Slika 4.2 Karakteristika momenta tereta asinkronog motora

## 4.2 Radni i kočni režimi rada

Električni strojevi se mogu mijenjati po potrebi. Obično se u elektromotornom pogonu zahtijevaju različiti režimi rada. Zato je bitno za asinkroni stroj da može raditi u **motorskom** i **generatorskom režimu rada**. Prema Slici 4.3 ulazak u motorski režim rada ne počne od nule, već ima akumulirani moment kada stroj krene vrtjeti u pozitivnom smjeru. Taj moment se opisuje kao moment u praznom hodu i naziva se potezni moment  $M_k$  koji je u kaveznim strojevima dosta mali za razliku od kolutnih. Zbog toga se kolutni asinkroni stroj ne koristi za pokretanje potencijalnog tereta. Nakon što stroj dosegne potezni moment, on počne raditi u motorskom režimu rada gdje vrti dok ne dosegne sinkronu brzinu. Motorski režim rada nastaje kada moment motora djeluje u smjeru vrtnje, dok generatorski režim djeluje suprotno od smjera vrtnje.

Područje od poteznog momenta  $M_k$  do prekretnog ili maksimalnog momenta  $M_{pm}$  se još naziva i **nestabilno radno područje** jer ako usporimo motor u tom području, moment se isto mora smanjiti u odnosu na moment tereta, pa time moment tereta dalje usporava motor dok se ne zaustavi. **Stabilno radno područje** se nalazi između prekretnog momenta  $M_{pm}$  i momenta tereta  $M_t$  (koji se nalazi u točki gdje je sinkrona brzina vrtnje). U tom području rotor može usporavati ili ubrzavati jer to uvijek dovodi do momenta koji motor vraća u nazivnu radnu točku. [4]



Slika 4.3 Vanjska karakteristika asinkronog stroja [10]

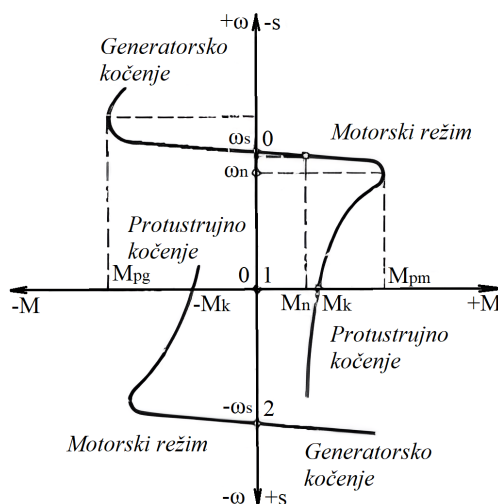
### 4.2.1 Kočni režini rada

Osim opisanih radnih pogonskih režima, elektromotori se koriste kočnim režimima koji se koriste u motorskim i generatorskim režimima rada [4]. Dijelimo ih na:

- generatorsko kočenje
- protustrujno kočenje

**Generatorsko kočenje** ili nadsinkrono kočenje nastaje kada stroj radi pri brzinama većim od sinkrone ( $n > n_s$ ,  $s < 0$ ). Prema tome, potrebno je stroj vrtjeti vanjskim momentom sve dok ne padne na nulu, te ga nastavimo vrtjeti u istom smjeru čak i nakon što karakteristika pređe sinkronu brzinu. Moment je negativan i tako motor generatorski koči gdje stroj daje u krutu mrežu radnu snagu i uzima ja-lovu [4]. Pri potencijalnom momentu tereta  $M_t$  kočenje nastaje pri spuštanju tereta dizalicom. Tijekom spuštanja tereta, kako bi motor došao u generatorsko kočenje, zajednički djeluju i moment motora  $M_m$  i moment tereta  $M_t$  dok moment ne dosegne radnu točku u negativnom smjeru. Karakteristika je glađa što je otpor u rotoru veći.

Poglavlje 4. Statičko stanje asinkronog motora



Slika 4.4 Mehanička karakteristika asinkronog motora za oba smjera kočenja [9]

**Protustrujno kočenje** je kočni režim rada koje nastaje pri klizanju  $s > 1$ . Ako stroj vrtimo u suprotnom smjeru moment je još uvijek pozitivan i djeluje suprotno na vrtnju rotora. To znači da motor uzima električnu snagu iz mreže i mehaničku snagu iz osovine i pretvara ih u gubitke i toplinu [4]. Do protustrujnog kočenja dođe kada motor vrti u jednom smjeru s pozitivnim momentom i brzinom vrtnje. Ako se motor isključi i pričekava da se zaustavi, te se ponovo uključi sa promijenjenim redosljedom faza, motor će vrtjeti u suprotnom smjeru sa suprotnim momentom. Ali ako se suprotni smjer motora uključi prije nego se motor zaustavio, onda će se nalaziti u protustrujnom kočnom režimu i doći će do gubitaka. Kada bi djelovao potencijalni moment dok se izvodi protustrujno kočenje, motor bi potjerao elektromotorni pogon kroz cijeli III. kvadrant (Slika 4.4) pa sve do IV. kvadranta gdje bi onda počeo nadsinkrono kočiti [4].

# Poglavlje 5

## Dinamičko stanje asinkronog motora

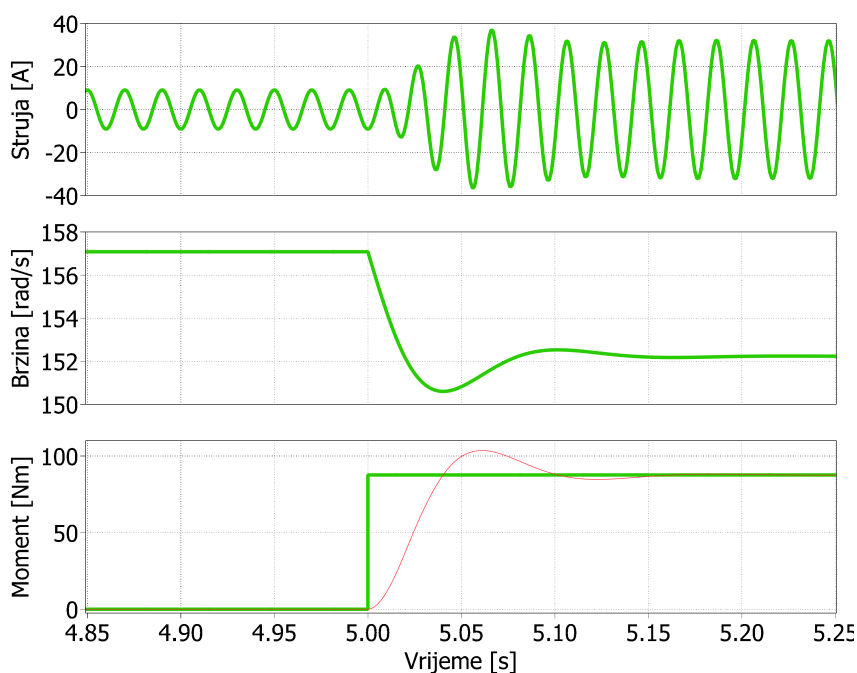
Dinamička stanja su u današnjem svijetu obuhvaćena raznim pitanjima koja moći elektrotehničare. Zbog postojanja mnogobrojnih vrsta motora, nije moguće riješiti svaki postojeći problem da bi elektromotorni pogon radio besprijekorno. Sve moguće varijacije opterećenja i upravljanja, svaka varijabla koja utječe na sam rad motora dovodi do niz problema koji se rješavanju na raznovrsne načine. S obzirom na to da postoje toliko neriješenih problema, primarni cilj elektrotehničara je pristup rješavanju tih problema. Dinamička stanja asinkronog motora manje je usmjerena prema istraživanju struja, a više prema trajanju prijelaznih pojava.

### 5.1 Prijelazne pojave

Prijelazne pojave su usko povezane s dinamičkim stanjima jer predstavljaju prijelaz iz jednog stacionarnog stanja u drugo [9]. Do prijelazne pojave dođe kada se na asinkronom motoru poveća moment tereta radnog mehanizma na osovini  $M_t$  koje onda smanjuje brzinu vrtnje. Smanjenjem brzine vrtnje dolazi do povećanja inducirane napona zbog čega dolazi do povećanja struje u namotima i do povećanja momenta motora  $M_m$  [9]. S obzirom na povećavanje struje, dolazi do gubitaka u bakru i povisuje se temperatura u namotima. Proces povećavanja momenta tereta se može vidjeti na Slici 5.1. Na početku motor radi u praznom hodu jer na njega nije priključen nikakav teret. Tada je brzina vrtnje jednaka sinkronoj i kroz motor teče

## Poglavlje 5. Dinamičko stanje asinkronog motora

struja praznog hoda. Zatim se na motor u 5. sekundi doda neki teret koji poveća moment tereta, smanji brzinu vrtnje i poveća struju. Ako pogledamo momentnu karakteristiku na Slici 5.1, crvenom crtom označena postepena ili dinamička karakteristika dodavanja teret u mrežu. Kao što je prikazano, dolazi do nekoliko oscilacija dok se karakteristika ne stabilizira. Ta crvena karakteristika označava moment tromosti  $J$  koje se opire promjeni brzine vrtnje. U električnom smislu, promjeni struje u strujnom krugu protivi se magnetsko polje  $\phi$  [9].



Slika 5.1 Karakteristika prijelazne pojave

Kao što je već spomenuto, prijelazne pojave se dijele na tri vrste, a to su termičke, mehaničke i električne prijelazne pojave. Sve tri vrste se međusobno povezuju i takva podjela olakšava promatranje sustava jer se različite veličine ne mijenjaju istom brzinom. Stoga postoje dvije mogućnosti pri promatranju sustava. Ako promatramo fizikalne veličine koje se brzo mijenjaju, možemo uzeti da su fizikalne veličine koje se znatno sporije mijenjaju konstantne. Isto tako ako gledamo fizičke veličine koje se sporo mijenjaju, veličine koje se znatno brže promjene postanu skokovite. Takav princip razmišljanja se može primijeniti i na jednu grupu veličina. [9]

## Poglavlje 5. Dinamičko stanje asinkronog motora

Kako u svakoj promjeni brzine vrtnje postoji opiranje mehaničkog momenta tromosti, dolazi do određenog trajanja prijelaznih pojava i dinamičko stanje traje stanovito vrijeme. Prijelazne pojave su posljedica tromosti elektromotornog pogona, te se takva tromost karakterizira vremenskim konstantama:

1. Toplinska vremenska konstanta nekog elektromotora:

$$T_t = \frac{mc}{Sh} \quad (5.1)$$

gdje je  $m$  masa,  $c$  specifična toplina,  $S$  površina i  $h$  koeficijent odavanja topline tijela [9].

2. Mehanička vremenska konstanta:

$$T_m = J \frac{\omega_n}{M_n} \quad (5.2)$$

gdje je  $J$  moment tromosti ili inercije elektromotornog pogona,  $\omega_n$  nazivna brzina vrtnje motora i  $M_n$  nazivni moment motora [9].

3. Električna vremenska konstanta nekog strujnog kruga:

$$T_{e1} = \frac{L}{R} \quad (5.3)$$

gdje je  $L$  induktivitet kruga i  $R$  radni otpor [9].

Generalno se u praksi umjesto momenta inercije  $J$  koristi njezina izvedba koja glasi:

$$J = mq^2 = m\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{mD^2}{4} \quad (5.4)$$

gdje je  $m$  masa, a  $q$  polumjer koji se mijenja s promjerom tromosti  $D$  [9].

Kako je promjena brzina vrtnje osnovni uzrok dinamičkim stanjima pogona, čak i statički elektromotorni pogoni moraju imati zalet i zaustavljanje. To znači da se pomoću prijelazne promjene uvode u stacionarno stanje i izlaze iz njega.

## 5.2 Dinamička mehanička stanja asinkronog motora

Dinamičko mehaničko stanje se definira kao stanje u kojem brzina vrtnje nije konstantna, već se mijenja:

$$\frac{dn}{dt} \neq 0 \quad (5.5)$$

te je zato analitička obrada dinamičkih stanja elektromotornih pogona s asinkronim motorima puno teža u odnosu na ostale motore. Stoga je bitno napomenuti da se u dinamičkim stanjima u momentnu jednadžbu dodaje ubrzanje:

$$M_m = M_t + M_u \quad (5.6)$$

gdje je  $M_m$  moment motora,  $M_t$  moment tereta i  $M_u$  moment ubrzanja [9]. Kako se dodala nova komponenta u jednadžbu, ona određuje kako motor radi. Ako je moment motora veći od momenta tereta, onda motor ubrzava, u suprotnom usporava.

Klossove jednadžbe se koriste i u proračunima dinamičkih sustava s asinkronim motorima koji nemaju izražen efekt potiskivanja struje u rotoru, te glase:

$$M_m = \frac{2M_p}{\frac{s}{s_p} + \frac{s_p}{s}} = M_t + M_u \quad (5.7)$$

gdje su  $M_p$  prekretni moment i  $s_p$  prekretno klizanje, koje u optimalnom slučaju izgleda ovako:

$$s_p = \sqrt{\frac{s_1^2 - s_2^2}{2 \ln \frac{s_1}{s_2}}} \quad (5.8)$$

gdje su  $s_1$  i  $s_2$  granice trajanja prijelazne pojave [9].

Trajanje prijelazne pojave proporcionalno je vremenskoj konstanti  $T_n$  i obrnuto proporcionalno mehaničkoj preopteretivosti motora  $\mu$ . Pomoću te dvije veličine, moguće je dobiti izraz koji se može izračunati bez teškoće.

$$t = \frac{T_n}{\mu} \left( \frac{s_p}{2} \ln \frac{s_1}{s_2} + \frac{s_1^2 - s_2^2}{4s_p} \right) \quad (5.9)$$

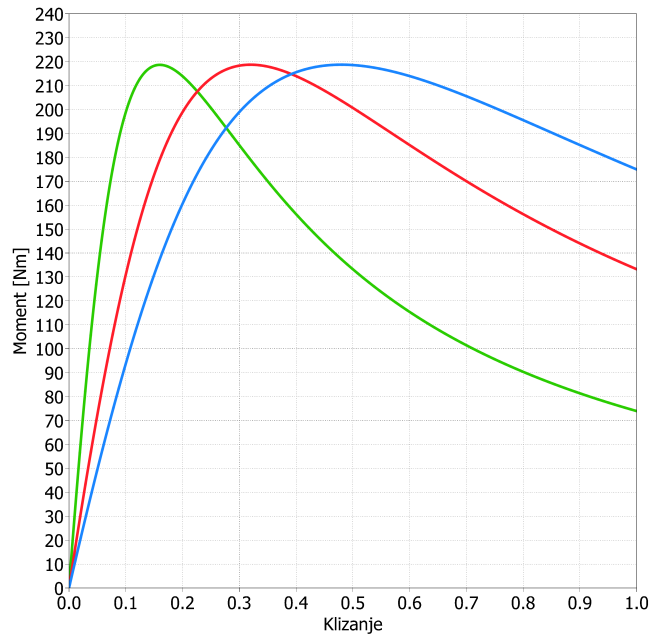


## Poglavlje 5. Dinamičko stanje asinkronog motora

Bitno je napomenuti da pri zaletu motora, ako bi granice bile  $s_1 = 1$  (mirovanje) i  $s_2 = 0$  (sinkrona brzina vrtnje), dogodila bi se nemoguća situacija gdje bi vrijeme zaleta iznosilo  $t = \inf$  [9]. Zato je veoma bitno da se takav problem zaobiđe računanjem granicama koje nisu krajnje vrijednosti. To se može popraviti tako da se umjesto stacionarne granične točke koristi niža granica koja je određena s 95% promjene brzine vrtnje. To znači da granica maksimalno može iznositi  $s = 0,05$  [9]. Kako je definirano jednadžbom 5.8, optimalno prekretno klizanje proizlazi iz potrebe za najkraćom prijelaznom pojavom. Minimalno trajanje prijelazne pojave je moguće postići jednadžbom:

$$t_{min} = \frac{T_n}{\mu} \sqrt{\frac{s_1^2 - s_2^2}{2} \ln \frac{s_1}{s_2}} \quad (5.10)$$

Najčešće prijelazne pojave elektromotornog pogona s asinkronim motorima su pri zaletu ( $s_1 = 1$  i  $s_2 = 0.05$ ), pri protustrujnom kočenju ( $s_1 = 2$  i  $s_2 = 1$ ) i pri potpunom reverziranju ( $s_1 = 2$  i  $s_2 = 0.05$ ) [9].



Slika 5.2 Zalet elektromotornog pogona za različite otpore

Prekretno klizanje ima utjecaj na trajanje prijelazne pojave. Stoga, prema jednadžbi 4.7, podešavanjem radnog otpora na rotoru  $R'_r$  moguće je postići minimalno trajanje prijelazne pojave. Takvo prilagođavanje je posebno moguće u klizno-kolutnim motorima gdje se na rotor može ubaciti dodatni predotpor. Kavezni motori nemaju tu funkciju što znači da je potrebno takav motor graditi specifično za određeni elektromotorni pogon kako bi se postigao optimalni otpor [9].

## 5.3 Promjene u radnim uvjetima

### 5.3.1 Pokretanje

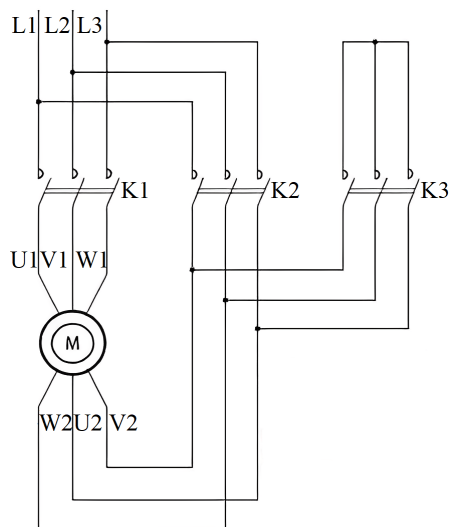
Pokretanje asinkronog motora je energetska veoma nepovoljno jer prosječno povuče 5-7 puta veću struju od nazivne. Tako velika potezna struja može uzrokovati propad napona na mreži i onemogućiti zalet. Zato je bitno da zalet bude efikasniji za elektromotorni pogon kako ne bi došlo do oštećenja motora. Kako je vidljivo na Slici 4.3, asinkroni motor se pokreće u kratkom spoju gdje je klizanje  $s = 1$  i zato sva energija dovedena u motor prelazi u gubitke ili zagrijavanje. Takva ogromna inicijalna količina topline stvara termički šok na motoru koji se zatim tijekom ostatka rada hladi. Prema tome je predviđeno da se motori gase i pale samo ako je to potrebno. Kontinuirani zaleti su dozvoljeni samo za motore koji su izgrađeni za takav način rada. Pokretanje asinkronih motora se dijeli na pokretanje klizno-kolutnih i kaveznih motora.

Klizno-kolutni motori se uglavnom uvijek pokreću preko otpornika u rotorskom krugu gdje otpor podešava struju i moment zaleta tako da se zaštiti motor i mreža.

Kavezni motori imaju nekoliko vrsta zaleta:

**Spoj zvijezda-trokut** je način pokretanja gdje se motor, koji je građen za trajni rad u trokutu, privremeno prespaja u zvijezdu. Time se postiže smanjeni udarac u mrežu jer je potezna struja u zvijezdi za 3 puta manja od trokuta. Kako je moment motora proporcionalan s kvadratom faznog napona, tako se i on u spoju zvijezda smanji za 3 puta. Iako je takav spoj veoma koristan u pokretanju motora, ne implementira se toliko često radi složenosti implementacije.

## Poglavlje 5. Dinamičko stanje asinkronog motora



Slika 5.3 Zalet asinkronog motora u spoju zvijezda-trokut

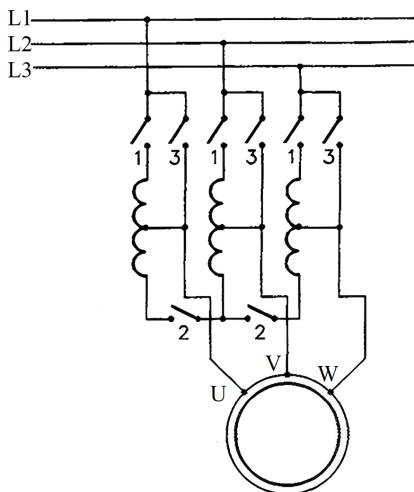
Princip rada spoja zvijezda-trokut je dosta jednostavan. Spoj se sastoji od tri startera, bimetalne zaštite od preopterećenja i osigurača za zaštitu od kratkog spoja. Prvo se uključi starter S3 u mrežu nakon čega se vremenski relej pokreće koji napaja starter K1. U tom trenutku motor radi u obliku zvijezde. Nakon pokretanja motora, relej odspaja sklopke K3 i spaja K2. Tada motor radi u spoju trokut, ali sa smanjenom snagom.

**Tiristorskog uputnik (soft starter)** je trofazni protuparalelni tiristorski spoj koji služi kao regulator napona između krute mreže i statora motora [11]. S obzirom na karakteristiku tiristorskog vođenja, na početku zaleta tiristori okidaju s velikim kutom vođenja što dovodi mali napon do motora. S vremenom kut vođenja se smanjuje i tiristori okidaju sve ranije dok ne dostignu punu brzinu motora bez kašnjenja.

**Primjenom autotransformatora** pri pokretanju asinkronog motora cilj je smanjiti poteznu struju kao i u spoju zvijezda-trokut. Pokretanje se postiže tako da se (prema Slici 5.4) pri pokretanju sklopke 1 i 2 uključe dok sklopka 3 ostane isključena. Takav spoj omogućuje pokretanje sa smanjenim naponom koji iznosi 50-70% nazivne vrijednosti gdje se postepeno povećava. Kada napon mreže i napon motora dosegnu

## Poglavlje 5. Dinamičko stanje asinkronog motora

istu veličinu, isključuju se sklopke 1 i 2 i uključuje sklopka 3.



Slika 5.4 Zalet asinkronog motora pomoću autotransformatora [1]

**Direktni uputnik** je napravljen da se koristi isključivo za male kavezne asinkrone motore (do 5kW). Prema tome se smatra da je to najjednostavnija i najjeftinija metoda pokretanja motora. Sastoji se od osigurača, bimetalne zaštite i sklopnika. Pokretanjem motora sklopka se zatvara i kroz vodiče poteče struja koja je 5-7 puta veća od nazivne, te kako se motor ubrzava tako struja pada [1]. Kako ne bi došlo do oštećenja na motoru, osigurač služi da ga zaštiti od dugotrajne potezne struje. Bimetalna zaštita služi da detektira temperaturu veću od dopuštene. Ako preopterećenje traje duže nego je dopušteno, bimetalna zaštita isključuje motor. [10]

### 5.3.2 Reverziranje

Reverziranje je u uskoj relaciji s kočnim režimima rada jer se definira kao promjena smjera vrtnje motora što se dešava pri protustrujnom kočenju. Promijeniti smjer vrtnje je dosta jednostavno i postoje par načina kako se to može postići. Princip promjene smjera vrtnje je promjena smjera okretnog magnetskog polja što je kod trofaznih motora omogućeno zamjenom redoslijeda dvije faze statorskog namota.

Reverziranje je moguće i pri korištenju reverzibilnih frekvencijskih pretvarača koji smjer vrtnje promjene pomoću upravljačke ploče.

### 5.3.3 Upravljanje brzine vrtnje

Ova tema je obrađena u poglavlju o frekvencijskim pretvaračima, no uz već navedene metode promjene brzine vrtnje postoje još vrsta upravljanja koje su nam bitne za razumijevanje simulacijskog djela. Brzina vrtnje se još može mijenjati:

- promjenom otpora na rotoru
- promjenom napona
- promjenom broja pari polova.

**Promjena otpora na rotoru** je moguća samo u klizno-kolutnim asinkronim motorima i postiže se dodavanjem predotpora u rotorski krug [10]. Dodavanjem predotpora mijenja se momentna karakteristika gdje se potezni moment povisuje što je veći predotpor. Isto tako ne dolazi do promjene prekretnog momenta i sinkrone brzine vrtnje, ali se zato prekretni moment pomiče po x-osi. Prekretni moment se zbog toga postiže pri većem klizanju iako mu se vrijednost nije promijenila što može potkrijepiti jednadžba 4.7. Ovakav tip upravljanja je nestabilan pri malim teretima i neekonomičan zbog većih električnih gubitaka u rotorskom krugu [1].

**Promjena napona** se bazira na jednadžbi 4.6 gdje vrijedi da prekretni moment ovisi o kvadratnoj vrijednosti napona. Zato možemo za primjer smanjiti napon za dva puta i time će se prekretni moment smanjiti za četiri puta. Kako se prekretni moment smanjuje tako se smanjuju i moment tereta i potezni moment. Takvo upravljanje smanjuje brzinu vrtnje, no sinkrona brzina vrtnje ostaje nepromijenjena. Dobro je napomenuti da pri konstantnom momentu tereta nema značajne promjene brzine ovom metodom. Promjenu napona se može postići pomoću tiristorskog pretvarača koji mijenja kut vođenja  $\alpha$  i time smanjuje napon [10]. Nedostatak ovakvog upravljanja je povećanje gubitaka u rotoru i usko područje regulacije s obzirom na to da se napon smije mijenjati samo od nule do nazivne vrijednosti [10]. Služi kod upravljanja brzinom vrtnje ventilatora.

**Promjenom broja pari polova** postizmo promjenu sinkrone brzine vrtnje i takva regulacija se koristi u višebrzinskim motorima. Izvodi se s više namota na statoru gdje svaki namot ima različit broj pari polova. Povećavanjem broja pari polova smanjujemo sinkronu brzinu, povećava se prekretni i potezni moment. [1]

## Poglavlje 6

# Simulacija u programu PLECS

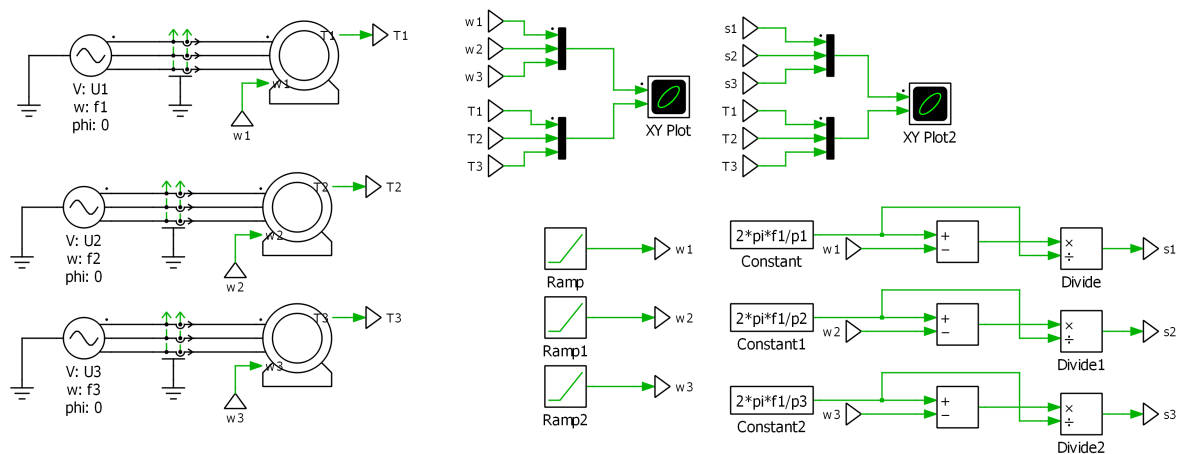
PLECS (*eng. Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation*) je programski alat koji služi za precizno simuliranje rada električkih strojeva i sustava u energetskej elektronici. PLECS se bazira na prikazivanju mehaničkih i toplinskih stanja sustava, ali primarno služi za simuliranje u područjima elektrotehnike. Postoje dvije inačice PLECS programa, a to su PLECS Blockset i PLECS Standalone. PLECS Blockset je napravljen tako da se može koristiti sa MATLAB-om, dok je PLECS Standalone napravljen tako da može izvoditi sve potrebne funkcije bez vanjskih programa. [12]

### 6.1 Simuliranje sustava sa asinkronim motorom

U ovom poglavlju će se simulirati asinkroni motor i njegova statička i dinamička stanja. Koristiti će se sve navedene regulacije brzine vrtnje te će se prikazati njihov utjecaj. Opisati će se pojedini elementi sustava i kako oni utječu na cjelokupni rad motora. Raditi ćemo sa asinkronim strojem čija je schema prikazana na Slici 4.1. te će se svi parametri definirati.

Simulacija se raspoređuje na dva dijela gdje se u prvom dijelu prikazuju prijelazne pojave ili dinamička stanja, a u drugome statička stanja asinkronog motora. Parametri koji su korišteni tijekom simulacije se nalaze na slici 6.2.

## Poglavlje 6. Simulacija u programu PLECS



Slika 6.1 Simulacijska shema za prikaz statičke karakteristike

```

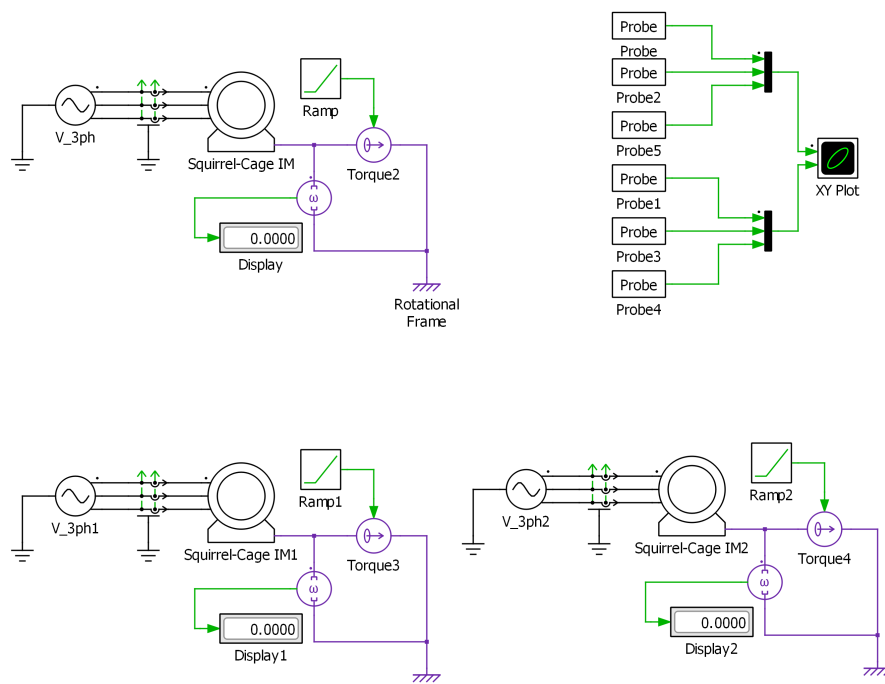
Model initialization commands

1 Rs = 0.26;
2 Lls = 3.1e-3;
3 Lm = 110e-3;
4 J = 0.3;
5 Llr = 3.1e-3;
6
7 p1 = 2;
8 p2 = 2;
9 p3 = 2;
10
11 Rr1 = 0.31;
12 Rr2 = 0.31;
13 Rr3 = 0.31;
14
15 U1 = 230*sqrt(2);
16 f1 = 50;
17 U2 = 230*sqrt(2);
18 f2 = 50;
19 U3 = 230*sqrt(2);
20 f3 = 50;
    
```

Slika 6.2 Parametri korišteni u simulaciji



Poglavlje 6. Simulacija u programu PLECS



Slika 6.3 Simulacijska shema za prikaz dinamičke karakteristike

## 6.2 Simulacija statičkih i dinamičkih stanja

Simulacijom nam je cilj prikazati regulaciju brzine vrtnje koristeći se metodama koje su opisane u prijašnjim poglavljima. U simulaciji se direktno mijenjaju parametri koji će biti podjeljeni u tri različita motora kao što je to prikazano na Slici 6.1 i Slici 6.3. Prema tome je bitno modificirati asinkroni model kako bi mogli posebno prikazati statička stanja, a posebno dinamička. Postoje četiri metode regulacije brzine i za sva četiri slučaja se promatra karakteristika brzine vrtnje i momenta.

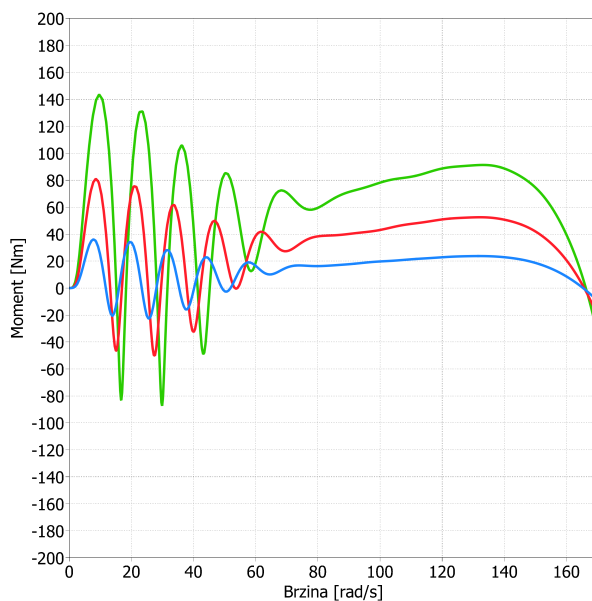
Promjena napona asinkronog motora (Slike 6.4 i 6.5) gdje je napon drugog motora 75% nazivne vrijednosti i napon trećeg motora 50% nazivne vrijednosti. Moguće je uočiti da sinkrona brzina ostaje ista u sva tri slučaja, ali zato prekretni ili maksimalni moment i potezni moment drastično opadaju što je manji napon. Takav učinak nastaje zato što moment ovisi o kvadratu napona što znači da ako smanjimo napon za dva puta, moment će se smanjiti za četiri puta.

Skalarna regulacija (Slike 6.6 i 6.7) se bazira na promjeni vrijednosti napona i frekvencije, ali pod uvjetom da njihov omjer ostane isti. Kao i u prošlom slučaju, za drugi motor se skalarna vrijednost smanjila na 75% nazivne, a za treći motor na 50% nazivne vrijednosti. Kako je vidljivo na slici 6.4, dolazi do promjene sinkrone brzine i prekretnog momenta gdje se vrijednosti smanjuju kako se frekvencija i napon smanjuju, dok se potezni moment povećava.

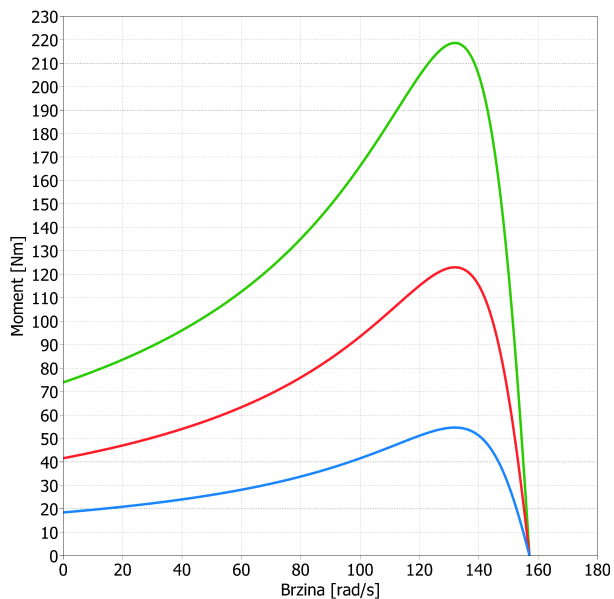
Promjenom otpora rotora (Slike 6.8 i 6.9) je jedino moguće u kolutnom asinkronom motoru jer je on jedini koji ima mogućnost spajanja dodatnog otpora na rotor. Pri povećavanju otpora dolazi do povećavanja poteznog momenta, no sinkrona brzina vrtnje i prekretni moment ostaju iste veličine. U ovom slučaju se otpor na rotoru povećao za dva puta u drugom motoru i tri puta u trećem motoru.

Zadnja regulacija brzine vrtnje (slike 6.10 i 6.11) je promjena pari polova (slika 6.6) koja ima najveći utjecaj na sam rad asinkronog motora. U ovom slučaju je broj pari polova promjenjen sa dva na tri za drugi motor i na četiri za treći motor. Prilikom povećavanja broja pari polova, moguće je uočiti povećanje prekretnog i poteznog momenta, dok se brzina vrtnje u praznom hodu smanjila. Kod ovakvog tipa regulacije jedina veličina koja ostaje nepromjenjena je klizanje koje uvijek ostaje isto.

Poglavlje 6. Simulacija u programu PLECS

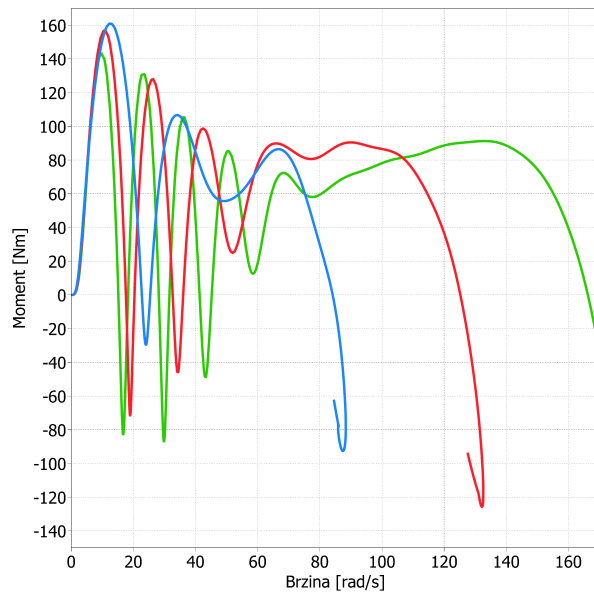


Slika 6.4 Dinamička karakteristika asinkronog motora - promjena napona

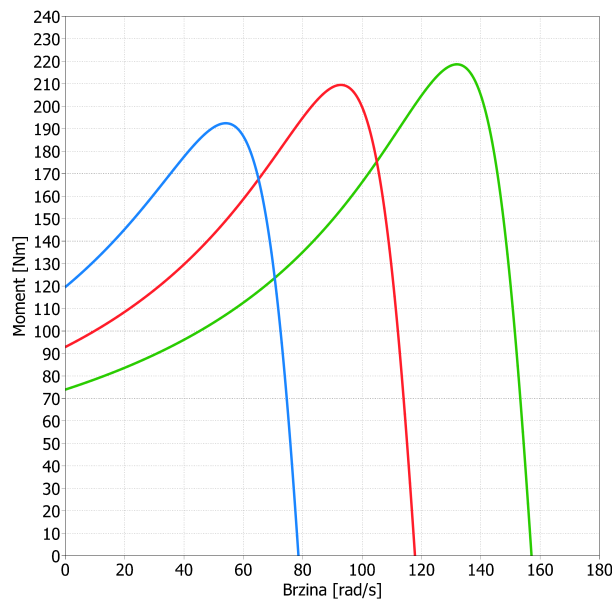


Slika 6.5 Statička karakteristika asinkronog motora - promjena napona

Poglavlje 6. Simulacija u programu PLECS

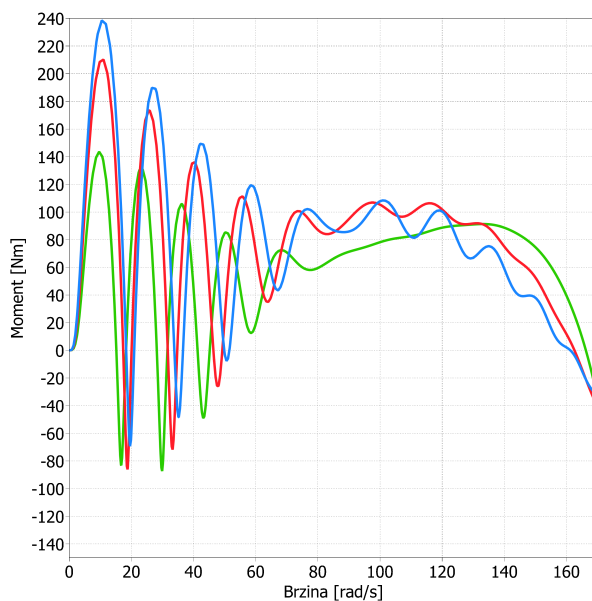


Slika 6.6 Dinamička karakteristika asinkronog motora - skalarna regulacija

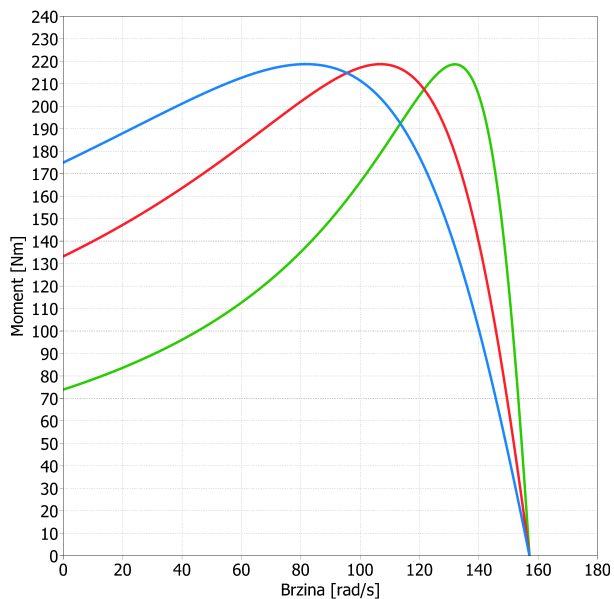


Slika 6.7 Statička karakteristika asinkronog motora - skalarna regulacija

Poglavlje 6. Simulacija u programu PLECS

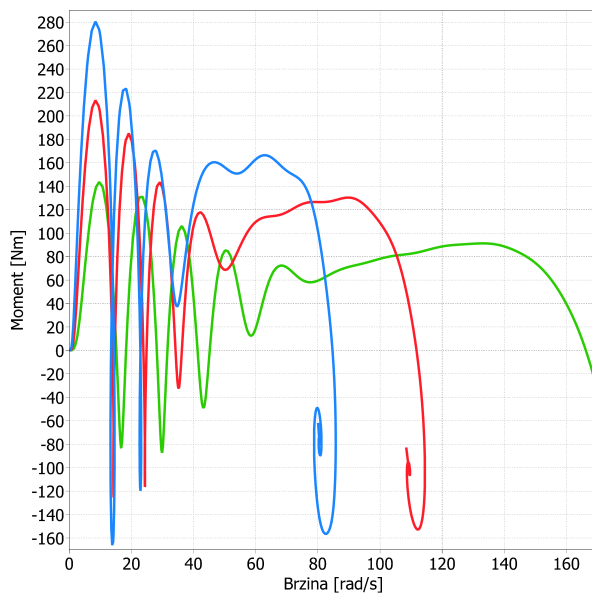


Slika 6.8 Dinamička karakteristika asinkronog motora - promjena otpora rotora

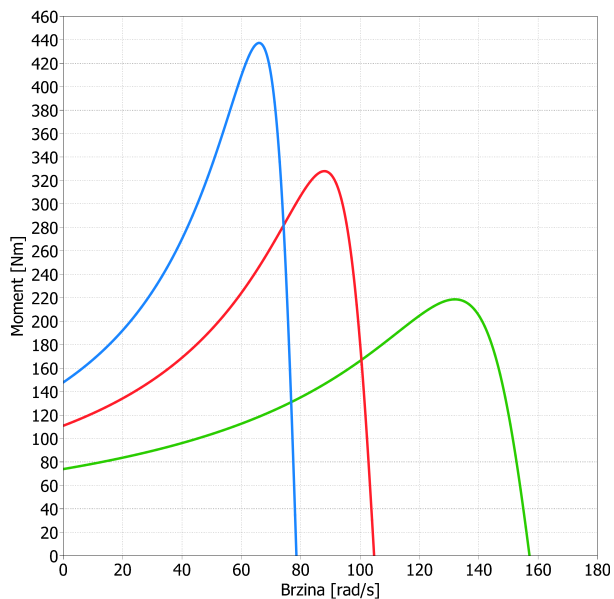


Slika 6.9 Statička karakteristika asinkronog motora - promjena otpora rotora

Poglavlje 6. Simulacija u programu PLECS



Slika 6.10 Dinamička karakteristika asinkronog motora - promjena broja pari polova



Slika 6.11 Statička karakteristika asinkronog motora - promjena broja pari polova

# Poglavlje 7

## Zaključak

Cilj rada je pobliže opisati rad asinkronog motora i njegovu ulogu u elektromotornim pogonima. Asinkroni motor je najiskorišteniji elektromotor koji je moguće upotrijebiti u bilo kakvom energetsom sustavu.

Definirao se frekvencijski pretvarač koji je veoma koristan za regulaciju brzine vrtnje asinkronog motora i koristi se u svim granama elektrotehnike. Njegova svrha je nadmašila sve ostale pretvarače zbog svoje jeftine cijene i efikasnosti. Uz to pobliže je opisano kako frekvencijski pretvarač komunicira s motorom i koje su prednosti kod korištenja te kombinacije. Pomoću statičkih i dinamičkih stanja je moguće procijeniti točan rad motora iako je to veoma komplicirana zadaća. Režimi rada koji su definirani proširili su sliku uporabe asinkronih motora u raznim sustavima. Uz sva navedena poglavlja, najbitniji čimbenik u cijelom radu je regulacija brzine vrtnje koja omogućava toliku versatilnost asinkronog stroja u elektromotornim pogonima. S obzirom na veliku uporabu i mogućnosti asinkronih motora, teško je zamisliti budućnost bez njih.

Simuliranjem asinkronog motora u programu PLECS je pobliže opisalo cjelokupni princip rad motora. Napravljena je posebna shema stroja za pregled dinamičkih stanja, a posebna za statička stanja. Promjenama raznih regulacija brzine vrtnje, lagano je bilo uočiti koristi koje te metode doprinose. Iako svaka od tih metoda ima neakve nedostatke ili limitacije, bitno je napomenuti koriste u specifičnim elektromotornim pogonima i strojevima gdje se te limitacije minimiziraju.

# Bibliografija

- [1] R. Prenc, *Električni strojevi - Asinkroni strojevi*, Tehnički Fakultet, Rijeka.
- [2] D. Srpak, *Modernizacija postrojenja ugradnjom frekvencijskih pretvarača*. Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, 2010, Stručni rad.
- [3] Variable frequency drives explained | vfd basics. , s Interneta, [https://www.youtube.com/watch?v=HayryySX\\_po](https://www.youtube.com/watch?v=HayryySX_po)
- [4] N. Bulić, *Elektromotorni pogoni 5 i 6 asinkroni*, Tehnički Fakultet u Rijeci.
- [5] L. Pravica, *Vrste skalarnog upravljanja i zatvorena regulacijska petlja skalarnog upravljanja asinkronim motorom*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb.
- [6] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drivers*. Prentice Hall. The university of Tennessee, Knoxville, 2002.
- [7] ABB Ltd, *Technical Guide No. 1 - Direct Torque Control*.
- [8] Snimanje karakteristika asinkronog motora pomoću wavebook 512 iotech-a. , s Interneta, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1566/preview>
- [9] B. Jurković, *Elektromotorni pogoni*. Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [10] Pokretanje i regulacija brzine vrtnje asinkronih motora. , s Interneta, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/riteh:3272/datastream/PDF/view>
- [11] Princip rada i funkcija soft startera. , s Interneta, <https://hr.cncontactor.com/info/the-working-principle-and-function-of-soft-sta-20436090.html>
- [12] Plexim, *The Simulation Platform for Power Electronic Systems*, <https://www.plexim.com/products/plecs>.



# Sažetak

Detaljno je opisan rad asinkronog motora i njegove izvedbe. Simulacija je izrađena u programu PLECS gdje se pokazuje različita stanja motora. U radu je definirano statičko i dinamičko stanje asinkronih motora te kako međusobno koreliraju. Opisan je frekvencijski pretvarač i njegove funkcije, te kako se on uklapa u elektromotorni pogon. Opisana je regulacija brzine vrtnje i njezina bit u modernim asinkronim motorima. Definirani su radni i kočni režimi rada.

***Ključne riječi*** — statičko stanje, dinamičko stanje, frekvencijski pretvarač, asinkroni motor, regulacija brzine vrtnje

## Abstract

Induction motor and its types were described in full detail. The simulation was made in a program called PLECS where different states of motors were shown. Static working states and dynamic working states and their correlations were defined. The frequency converter and its function and its relation with the electric drive was described. The regulation of rotational speed was defined and her use in modern induction motors. Working and braking modes of operations were described.

***Keywords*** — static working states, dynamic working states, frequency converter, induction motor, rotation speed regulation