

# Simulacijski model asinkronog motora napajanog preko frekvencijskog pretvarača

---

Ivić, Toni

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:243158>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Stručni prijediplomski studij Automatika**

**Simulacijski model asinkronog motora napajanog preko  
frekvencijskog pretvarača**

**Završni rad**

**TONI IVIĆ**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za ocjenu završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Toni Ivić
<b>Studij, smjer:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	A 4552, 19.07.2019.
<b>JMBAG:</b>	0165080719
<b>Mentor:</b>	dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	dr. sc. Krešimir Miklošević
<b>Naslov završnog rada:</b>	Simulacijski model asinkronog motora napajanog preko frekvencijskog pretvarača
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	REZERIRANO ZA STUDENTA: Toni Ivić
<b>Datum ocjene pismenog dijela završnog rada od strane mentora:</b>	17.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela završnog rada od strane mentora:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum obrane završnog rada:</b>	30.09.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela završnog rada (obrane):</b>	Izvrstan (5)
<b>Ukupna ocjena završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio stručni prijediplomski studij:</b>	02.10.2024.

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

Osijek, 02.10.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Toni Ivić
<b>Studij:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Automatika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	A 4552, 19.07.2019.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	14

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Simulacijski model asinkronog motora napajanog preko frekvencijskog pretvarača**

izrađen pod vodstvom mentora dr. sc. Željko Špoljarić

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 pristupnika:

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1 Opis zadatka .....	1
2. ASINKRONI ELEKTRIČNI STROJEVI .....	2
2.1 Vrste asinkronih motora .....	3
2.2 Princip rada asinkronog motora.....	6
2.3 Regulacija brzine vrtnje asinkronog motora .....	7
3. FREKVENCIJSKI PRETVARAČ.....	8
3.1 Izravni frekvencijski pretvarač.....	8
3.2 Neizravni frekvencijski pretvarač .....	9
4. SNIMANJE I ANALIZA KARAKTERISTIKA ASINKRONOG MOTORA NAPAJANOG FREKVENCIJSKIM PRETVARAČEM .....	11
4.1 Shema spoja i tehnički podaci.....	11
4.2 Rezultati i analiza simulacije .....	18
5. ZAKLJUČAK.....	28
LITERATURA.....	29
SAŽETAK .....	30
ABSTRACT .....	30
ŽIVOTOPIS .....	31

# 1. UVOD

Električni asinkroni motori su motori napajani izmjeničnom mrežom. Po građi su slični sinkronim motorima. Zbog njihove jednostavne konstrukcije i dobrih svojstva, imaju široku primijenjenu u industriji, proizvodnim poduzećima, kućanstvima i slično. Električna energija dobivena iz mreže pretvara se u mehaničku energiju koja se pojavljuje na osovinu rotora motora. Na osovinu se mogu priključiti razni radni strojevi poput alatnih strojeva, poljoprivrednih strojeva, crpki i drugih, koji vrše mehanički rad. Asinkroni motor svoj naziv je dobio iz razloga što brzina okretnog magnetskog polja i brzina rotora motora nisu sinkronizirane, odnosno jednake. Brzina rotora motora ne može i nikad neće postići istu brzinu okretnog magnetskog polja jer bi u tom se slučaju prestala inducirati struja u rotoru, što bi onemogućilo stvaranje okretnog momenta. Kod asinkronih motora možemo navesti nekoliko režima rada, a to su: motorski režim, generatorski režim i kočni režim rada. Asinkroni motor radi u motorskom režimu kada brzina okretnog magnetskog polja i brzina rotora rotiraju u istom smjeru s približno jednakom brzinom, pri čemu brzina rotora zaostaje u odnosu na brzinu okretnog magnetskog polja. Asinkroni motor radi u generatorskom režimu kada brzina rotora motora se okreće brže od brzine okretnog magnetskog polja, u istom smjeru. Te asinkroni motor radi u kočnom režimu kada smjer okretnog magnetskog polja i smjer okretanja rotora motora su suprotni.

Brzinu asinkronog motora možemo upravljati na nekoliko načina: promjenom pari polova motora, promjenom klizanja motora te promjenom frekvencije motora. Od ovih metoda najbolja metoda regulacije brzine vrtnje uz vrlo male gubitke energije je regulacija mijenjanjem frekvencije motora. Kako bi mijenjali frekvenciju koristi se električni uređaj zvan frekvencijski pretvarač. Frekvencijski pretvarači rade na principu pretvaranja izmjeničnog napona uz stalnu frekvenciju u izmjenični napon promjenjive frekvencije i amplitude. Prema izvedbi frekvencijske pretvarače dijelimo na izravne i neizravne pretvarače, gdje izravni su bazirani na tri grupe tiristori napajani preko složeno izvedenog transformatora, a neizravni se sastoje od tri elementa, a to su: ispravljač, istosmjerni međukrug i izmjenjivač. Frekvencijski pretvarači su našli široku primjenu u industrijama. Njima je moguće pogoniti jednofazne i trofazne motore.

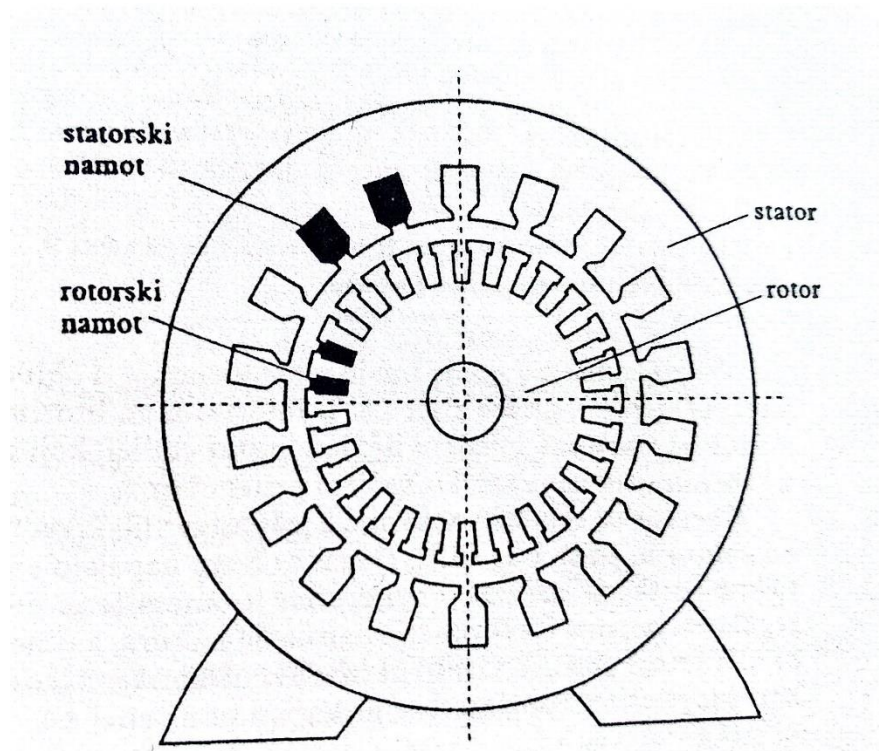
## 1.1 Opis zadatka

Zadatak završnog rada je da uz korištenje simulacijskog modela asinkronog motora izrađenog u Matlab SimPowerSystems okruženju snimiti karakteristike asinkronog motora napajanog frekvencijskim pretvaračem. Potrebno je provesti nekoliko simulacija gdje se mijenjaju iznosi napona, frekvencije, momenta tereta na motor i brzine vrtnje motora. Dobivene karakteristike je potrebno međusobno usporediti i prokomentirati.

## 2. ASINKRONI ELEKTRIČNI STROJEVI

Asinkronim strojem nazivamo stroj izmjenične struje, čija se brzina vrtnje rotora pri danoj frekvenciji struje u mreži mijenja ovisno o opterećenju [4]. Asinkroni elektromotori su najjednostavnije konstruirani i najčešće korišteni elektromotori. Asinkrone strojeve prema broju faza možemo podijeliti na jednofazne (motori manjih snaga do 3 KW) i trofazne (motori srednjih i velikih snaga, reda veličine nekoliko stotina do nekoliko MW).

Asinkroni motor sastoji se od statora (nepokretni dio) i rotora (pokretni dio). Stator je šuplji valjak (kućište) u koji je ugrađena magnetska jezgra izrađena od tankih, međusobno izoliranih dinamo limova. Statorski namot je raspodijeljen u utorima, gdje njihovi početci i krajevi su dovedeni na priključnu kutiju na kućištu motora. Statorski namoti motora se mogu spajati u zvijezdu ili trokut spoju. Rotor motora se sastoji od rotorskih paket-limova montiranih na osovinu. Rotorski namot smješten je u utorima na vanjskom obodu paket-limova. Prema građi rotor dijelimo na kavezne i klizno-prstenaste [3].



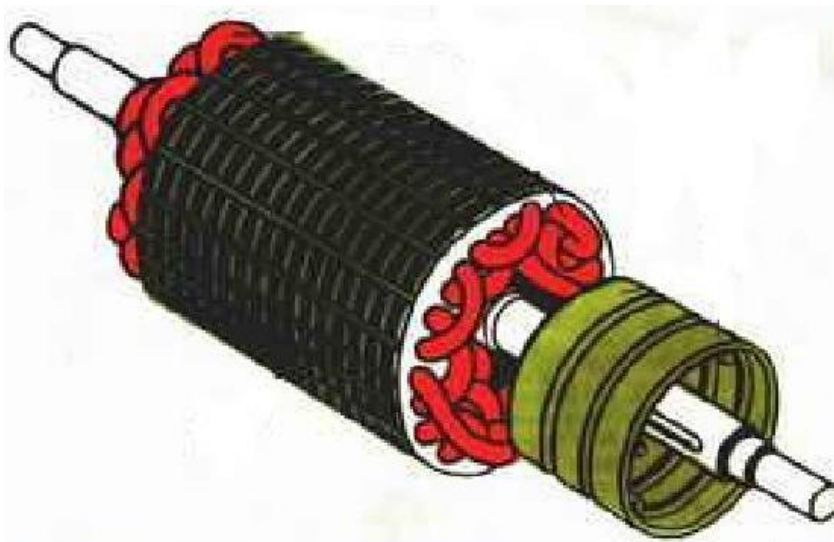
**Slika 2.1** Poprečni presjek asinkronog motora i prikaz utora za statorski i rotorski namot [5]

## 2.1 Vrste asinkronih motora

Asinkrone motore možemo podijeliti prema broju faza motora te prema izvedbi rotora. Prema broju faza dijelimo ih na jednofazne i trofazne motore, a ako promatramo izvedbu rotora, dijelimo ih na klizno-prstenaste i kavezne motore [4].

### a) Klizno-prstenasti asinkroni motor

Ima izoliran rotorski namot, najčešće izveden kao trofazni, gdje imaju jednak broj polova kao i statorski namot. Krajevi rotorskog namota su priključeni na kolutove. Na kolutovima stružu četkice koje služe kako bi mogli spajati vanjski otpor u rotorski krug svake faze. Ovim postizemo potpuno drugačiju vanjsku karakteristiku motora i povećani potezni moment motora uz smanjenu struju pokretanja. Također je i moguća regulacija brzine vrtnje mijenjanjem vanjskog otpora, ali ovakva regulacija je neekonomična i nije često u praksi korištena. Klizno-prstenasti motori skuplji su i osjetljiviji od kaveznih[3].

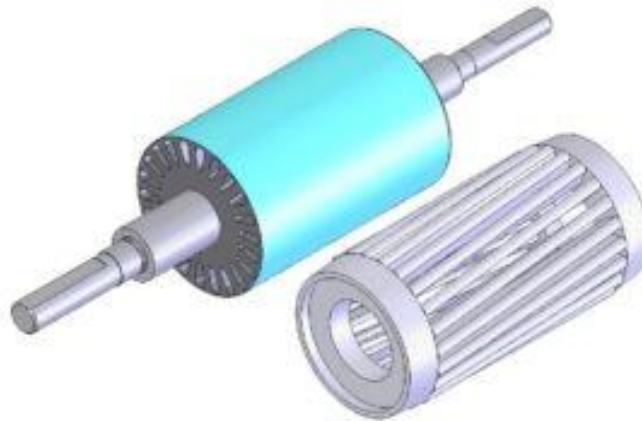


**Slika 2.2** Prikaz rotora klizno-prstenastog asinkronog motora[7]

### b) Kavezni asinkroni motor

Imaju rotorski namot u obliku kaveza. Utori rotora sadrže neizolirane bakrene ili aluminijske vodiče, čiji krajevi su kratko spojeni prstenovima. Kavezni motori imaju jednostavniju izvedbu u odnosu na klizno-prstenastih motora, te su zbog toga i jeftiniji. Kavezni motori se često napajaju statičkim pretvaračima frekvencije, čime se dobiva precizna regulacija napona i frekvencije [3].

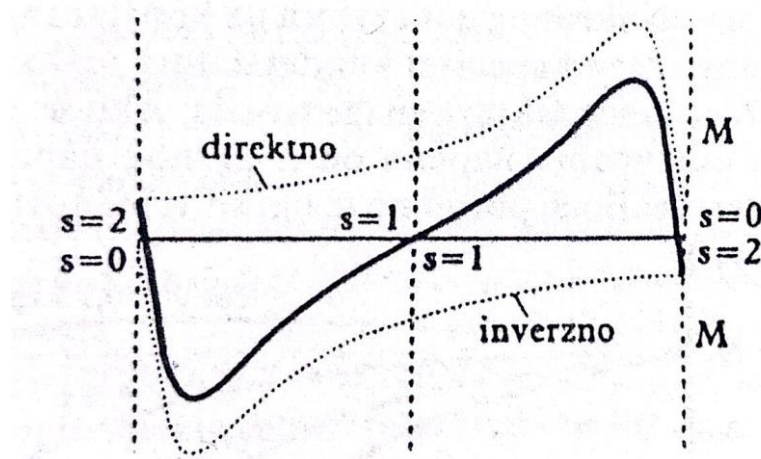




Slika 2.3 Prikaz rotora kaveznog asinkronog motora [8]

### c) Jednofazni asinkroni motor

Jednofazni motori su motori koji se koriste za pokretanje uređaja i aparata manjih snaga, te tamo gdje nije dostupna trofazna mreža. Obično se ugrađuju motori snage od nekoliko stotina vata u kućanske aparate, a rjeđe se jednofazni motori izvedu do 3 kW. Najčešće su to kavezni motori zbog svoje jednostavnije izvedbe. Jednofazni motor sastoji se od jedne faze koja, kada se spoji na mrežu, stvara pulsirajuće magnetsko polje koje se može predstaviti kao suma dvaju suprotno rotirajućih magnetskih polja iste brzine vrtnje. Ta dva polja direktno i inverzno stvaraju zakretne momente koji se međusobno poništavaju, te je tada pokretni moment jednak nuli, kao što se vidi na slici 2.1.3., odnosno rotor miruje.



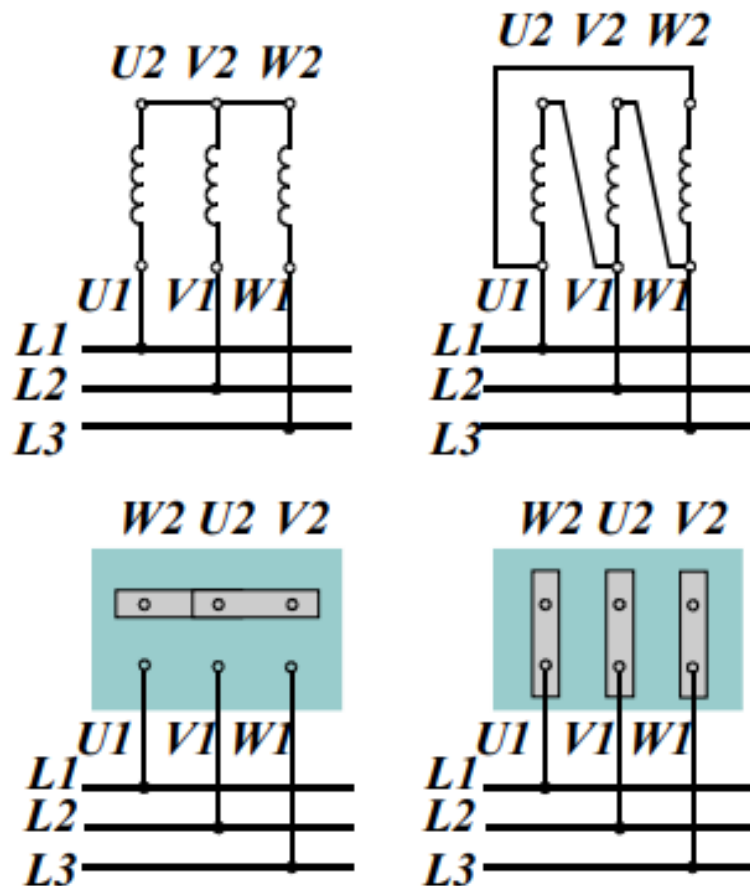
Slika 2.4 Momentna karakteristika jednofaznog motora[5]

Da bi se postigao pokretni moment, glavnom namotu se dodaje pomoćni namot. Svaki namot stvara svoj magnetski tok, a ukupni magnetski tok rotira u jednu stranu ovisno o smjeru struje kroz namot[11]. Glavni problem kod jednofaznih motora je pokretni moment, tako da postoje nekoliko

rješenja za pokretanje ovih motora. Jedni od rješenja su: motor s pomoćnom fazom za zalet i kondenzatorski motor.

#### d) Trofazni asinkroni motor

Trofazni asinkroni motor su svi motori srednjih i velikih snaga, najčešće je to indukcijski (kavezni) motor, a može biti i klizno-prstenasti motor. Trofazni motori ne zahtijevaju dodatnu fazu jer sami po sebi imaju tri faze i nemaju problem pokretnog momenta kao jednofazni motor. Struktura im je slična jednofaznom motoru, na statoru su u utore položeni namoti tri faze pomaknute električki za 120 stupnjeva, namoti statora se spajaju u spojeve zvijezda ili trokut. Namot motora je spojena na način da jedna strana namota se spaja na mrežu, dok druga se kratko spoji za spoj u zvijezdu ili unakrsno za spoj u trokut.



Slika 2.5 Prikaz spajanja statorskog namota u spojeve zvijezda i trokut na priključcima motora

[3]

## 2.2 Princip rada asinkronog motora

Kada statorski namot asinkronog motora priključimo na izmjenični napon, kroz namote poteče struja i stvara okretno magnetsko polje koja rotira brzinom:

$$n = \frac{60 f_1}{p} \quad (2 - 1)$$

Kako okretno magnetsko polje se vrti brzinom iz formule 2-1, njene silnice presijecaju vodiče statora i rotora te u njima inducira napone frekvencije  $f_1$  iznosa:

u statoru:

$$E_1 = 4,44 \phi f_1 \omega_s f_{ns} \quad (2 - 2)$$

u rotoru:

$$E_2 = 4,44 \phi f_1 \omega_r f_{nr} \quad (2 - 3)$$

Napon statora  $E_1$  jednak je narinutu naponu po fazi. Napon rotora  $E_2$  kroz kratko spojeni namot rotora će protjerati struju, te će na rotoru djelovati obodna sila i moment zbog protjecanja struje kroz vodič u magnetskom polju. Zbog djelovanja obodne sile i momenta rotor motora će se zavrtjeti do brzine pri kojoj se uspostavi ravnoteža između razvijenog momenta i momenta tereta motora. Ta brzina je nešto manja od sinkrone brzine vrtnje i izražava se klizanjem:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100 (\%) \quad (2 - 4)$$

Napon u rotoru pada porastom brzine motora, jer rotorski vodiči sporije presijecaju silnice magnetskog polja. Taj napon iznosi:

$$E_2 = s E_{20} \quad (2 - 5)$$

a frekvencija rotorskih napona i struja jest:

$$f_2 = s f_1 \quad (2 - 6)$$

U početku zaleta asinkronog motora iz mreže motor automatski povlači povećanu struju koja, osim komponente za magnetiziranje, sadrži struju koja svojim protjecanjem pokriva protjecanje rotorske struje [3].

### 2.3 Regulacija brzine vrtnje asinkronog motora

Pošto brzina vrtnje rotora je povezana s brzinom okretnog magnetskog polja, gdje se može vidjeti iz izraza:

$$n = \frac{(1-s) f}{p} \quad (2 - 7)$$

Gdje je  $s$  klizanje motora,  $f$  frekvencija napona napajanja i  $p$  broj pari polova, pa prema tome postoji nekoliko načina upravljanja brzinom vrtnje motora: pomoću broj pari polova  $p$ , klizanja  $s$ , frekvencije  $f$  napona napajanja [1].

#### a) Upravljanje mijenjanjem broj pari polova

Za razliku od frekvencijskih pretvarača koji omogućuju kontinuiranu promjenu brzine vrtnje, promjenom broja pari polova brzina vrtnje se mijenja skokovito. Broj pari polova se mogu mijenjati na dva načina: izradom statorskog namota sa dva odvojena namota svaki sa drugim brojem pari polova, promjena pari polova prespajanjem statorskog namota [1].

#### b) Upravljanje mijenjanjem klizanja

Klizanje se može mijenjati na dva načina: mijenjanjem napona napajanja statora i djelovanjem u rotorskom krugu. Prvi način se zasniva na opadanju momenta motora s kvadratom napona napajanja statora, regulacija je kontinuirana i dosta uskim granicama te vrši se autotransformatorom. Drugi način se izvodi da se doda vanjski otpor u rotorski strujni krug, time će se povećati klizanje odnosno smanjiti brzina vrtnje motora. Iako ovaj način regulacije brzine nije ekonomičan zbog gubitaka energije na vanjskim otporima, ipak se koristi radi jednostavnosti kod motora manjih snaga. Ovaj način regulacije moguć je samo kod klizno-prstenastih motora [1].

#### c) Upravljanje mijenjanjem frekvencije

Za promjenu frekvencije koristi se frekvencijski pretvarač koji se ugrađuje između mreže i motora. Pretvarač istovremeno mijenja kontinuirano frekvenciju i napon [1].

### 3. FREKVENCIJSKI PRETVARAČ

Frekvencijski pretvarači su elektronički uređaji pomoću kojih upravljamo brzinom vrtnje asinkronih motora. Samo upravljanje se izvodi tako da napon i frekvenciju mreže konstantnog iznosa pretvaramo u napon i frekvenciju promjenjivog iznosa i amplitude. Prema izvedbi frekvencijske pretvarače možemo svrstati u dvije osnovne skupine: izravne pretvarače i neizravne pretvarače [1].

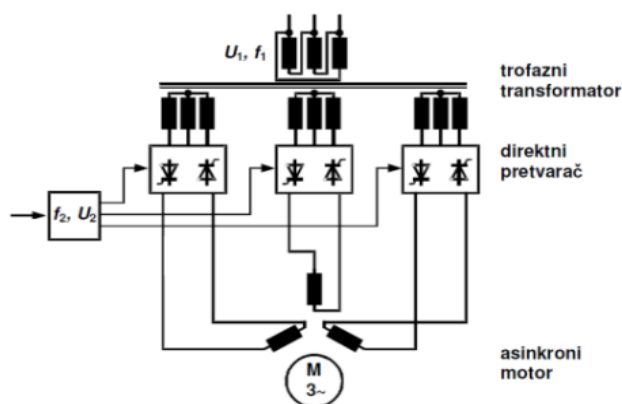
#### 3.1 Izravni frekvencijski pretvarač

Izravni pretvarači imaju tri grupe tiristora za svaku pojedinu fazu motora. Svaka faza motora napaja se iz sve tri ulazne faze preko složeno izvedenog trofaznog transformatora. Ovaj pretvarač omogućuje rad motora u sva četiri kvadranta. Ovo je moguće jer u svakoj fazi sekundara transformatora se nalazi slog antiparalelno spojenih tiristora koji omogućuju dvosmjerno vođenje struje [11].

Izravni pretvarači se mogu podijeliti u dvije skupine: komutirani izmjeničnom napojnom mrežom, komutirane vlastitim komutacijskim krugovima.

Izravni pretvarači komutirani napojnom mrežom imaju maksimalnu izlaznu frekvenciju ograničenu na najviše  $2/3$  frekvencije mreže. Zbog toga se uglavnom primjenjuju za sporohodne elektromotorne pogone velikih snaga, kao što su primjerice rotacijske peći, preše i sl.

Izravni pretvarači komutirani vlastitim komutacijskim krugovima nemaju drugih ograničenja na maksimalnu izlaznu frekvenciju osim frekvencijskih karakteristika učinkovitih poluvodičkih ventila. Sadrže velik broj poluvodičkih ventila, pa su složeni i skupi, zbog čega do danas nisu našli neku važniju primjenu [11].



Slika 3.1 Shematski prikaz direktnog pretvarača [11]

### 3.2 Neizravni frekvencijski pretvarač

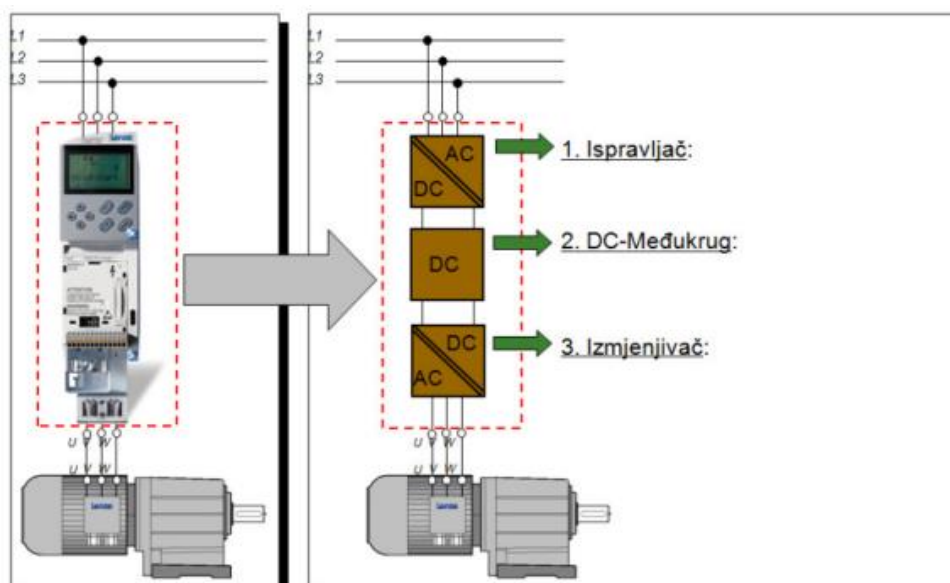
Neizravni frekvencijski pretvarači pretvaraju izmjenični napon mreže u istosmjerni, a zatim taj istosmjerni napon u izmjenični napon promjenjive efektivne vrijednosti i frekvencije. Taj izmjenični napon ima pravokutni, kvazipravokutni valni oblik ili naizmjenični niz pozitivnih i negativnih pravokutnih impulsa [11].

Neizravni pretvarači imaju dvije podjele: pretvarače sa strujnim ulazom u izmjenjivač i pretvarače s naponskim ulazom u izmjenjivač.

Pretvarači sa strujnim ulazom u izmjenjivač koriste istosmjerni izvor struje kao ulaz u izmjenjivač, naime istosmjerna struja koja dolazi iz ispravljača je gotovo konstantna, dok napon može varirati. Ovi pretvarači koriste velike indukcije u međukrugu kako bi se održala konstantna struja i indukcija pohranjuje energiju i osigurava da struja ostane stalna tijekom rada.

Pretvarači s naponskim ulazom u izmjenjivač koriste istosmjerni izvor napona kao ulaz u izmjenjivač. Ispravljač pretvara izmjenični napon u stabilni istosmjerni napon. Ovi pretvarači koriste kondenzatore koji stabiliziraju naponski izvor. Kondenzator pohranjuje energiju i osigurava stalan napon, dok se struja prilagođava opterećenju. Ovakvi pretvarači imaju dvije izvedbe: s promjenjivim naponom istosmjernog međukruga i s konstantnim naponom istosmjernog međukruga.

Neizravni frekvencijski pretvarač sastavljen je od: ispravljača, istosmjernog međukruga, izmjenjivača, upravljačkog elektroničkog sklopa [11].



Slika 3.2 Građa neizravnog frekvencijskog pretvarača [11]

#### **a) Ispravljač (upravljivi ili neupravljivi)**

Ispravljači služe kako bi izmjeničnu mrežu spojili s istosmjernim međukrugom. Na ulaze ispravljača spajamo priključke jednofazne ili trofazne izmjenične mreže, a na izlazu dobivamo ispravljeni pulsirajući valoviti istosmjerni napon [1].

#### **b) Istosmjerni međukrug**

Istosmjerni međukrug može biti strujni ili naponski. Strujni međukrug može biti samo s promjenjivom strujom, dok naponski dijelimo na: naponski istosmjerni međukrug s promjenjivim naponom ili s konstantnim naponom. Istosmjerni međukrug spajamo između ispravljača i izmjenjivača [1].

#### **c) Izmjenjivač**

Izmjenjivač služi za spajanje istosmjernog međukruga s izmjeničnim trošilom. Na izlazu izmjenjivača bude napon izmjenične promjenjive vrijednosti koji može biti za jednofazni ili trofazni motor. Svaka poluperioda izlaznog izmjeničnog napona sastoji se od niza pravokutnih impulsa različite širine i različitog razmaka ovisno o specifikacijama pogona [1].

#### **d) Upravljački elektronički sklop**

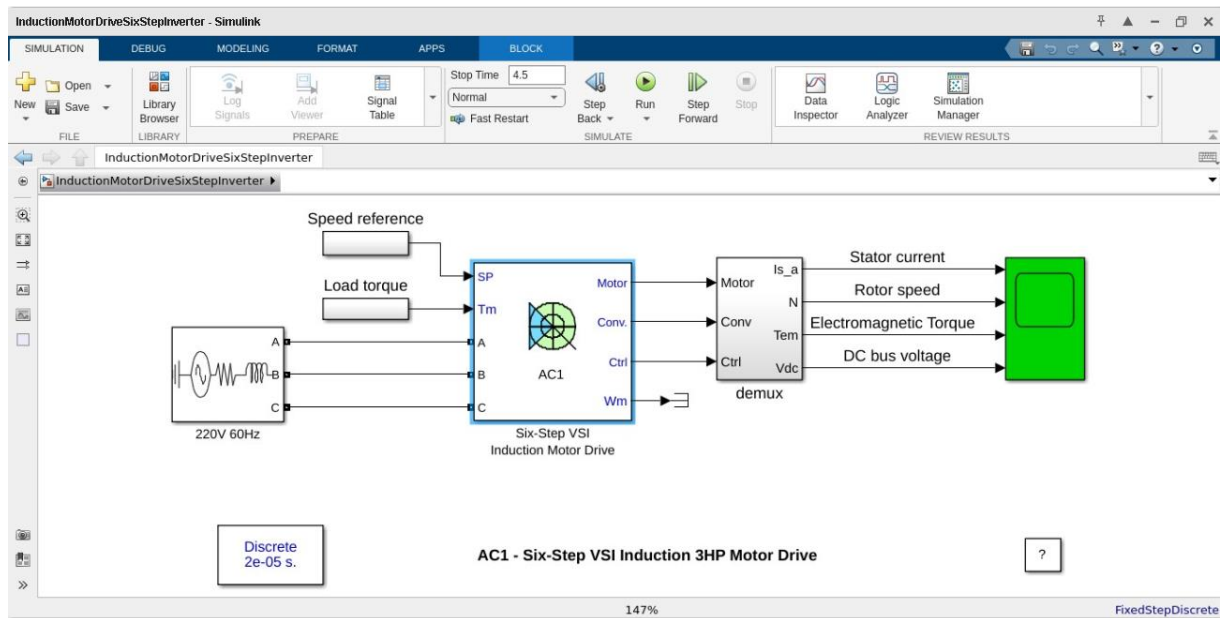
Upravljački elektronički sklop služi za upravljanje učinskim sklopovima frekvencijskog pretvarača. Drugim riječima dobiva informacije iz ispravljača, istosmjernog međukruga i izmjenjivača te ovisno o unaprijed određenim parametrima mijenja omjer napona i frekvencije, te šalje upravljačke signale za uklapanje i isklapanje poluvodičkih ventila. Dakle ukratko, uloga upravljačkog sklopa je da upravlja brzinom vrtnje motora prema predodređenim zadanim parametrima motora i postavljenim ograničenjima iznosa struje, napona i frekvencije [1].

## 4. SNIMANJE I ANALIZA KARAKTERISTIKA ASINKRONOG MOTORA NAPAJANOG FREKVENCIJSKIM PRETVARAČEM

Za provođenje snimanja karakteristika asinkronog motora napajanog frekvencijskim pretvaračem koristi se aplikacija MATLAB. MATLAB je programski jezik visoke razine i interaktivna je okolina za numeričko i matrično računanje, te za vizualizaciju i programiranje. MATLAB-ovim gotovim modelima će se simulirati rad asinkronog motora te snimiti potrebne karakteristike za analizu.

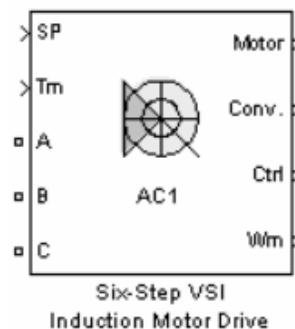
### 4.1 Shema spoja i tehnički podaci

Gotov model korišten za provođenje simulacije prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1 Prikaz AC1 bloka u MATLAB aplikaciji [12]

Osnovu ovog modela čini pogonski sklop oblikovan u bloku *Six-Step VSI Induction Motor Drive*.



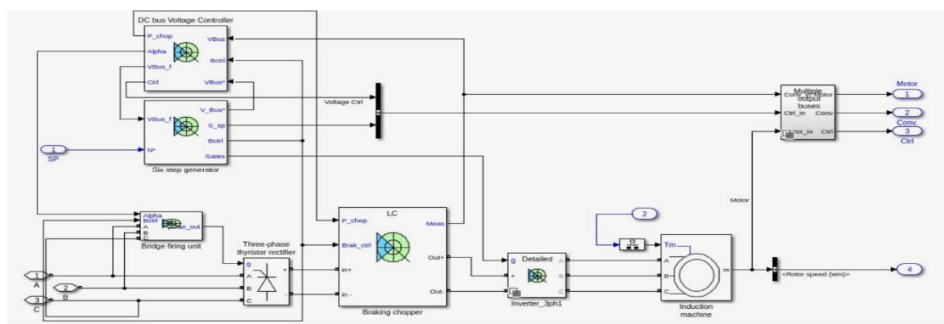
Slika 4.2 Prikaz *Six-Step VSI Induction Motor Drive* bloka [6]



*Six-Step VSI Induction Motor Drive* blok sastoji se od 9 priključaka:

- SP**: Priključak gdje zadajemo referentnu brzinu vrtnje ili okretnog momenta. Referentna se brzina može zadati i kao skokovita funkcija koja slijedi zadanu promjenu, a može sadržavati ubrzanje i usporenje kretanja. Ako moment tereta i brzina vrtnje imaju suprotne predznake, moment ubrzanja bit će jednak zbroju elektromagnetskog momenta i momenta tereta [6]
- Tm** ili **Wm**: mehanički ulaz za moment tereta  $T_m$  ili za brzinu vrtnje motora  $W_m$  [6]
- Wm** ili **Te**: mehanički izlaz za brzinu vrtnje motora  $W_m$  ili za elektromagnetski moment [6]
- A,B,C**: trofazni priključak [6]
- Motor**: izlaz vektora s mjernim podacima koji omogućava nadzor varijabli motora preko bloka Bus Selector. Naponi i struje mosnih spojeva mogu se nadzirati preko bloka Multimeter [6]
- Conv**: izlaz vektora s mjernim podacima trofaznog pretvarača. Sadrži signale ulazne struje i izlaznog napona ispravljača te izlazne struje i izlaznog napona izmjenjivača [6]
- Ctrl**: izlaz vektora s mjernim podacima regulatora koji sadržavaju tri signala: kut paljenja koji izračunava regulator struje, razlika između referente i stvarne vrijednosti brzine vrtnje, referenta vrijednost brzine vrtnje [6]

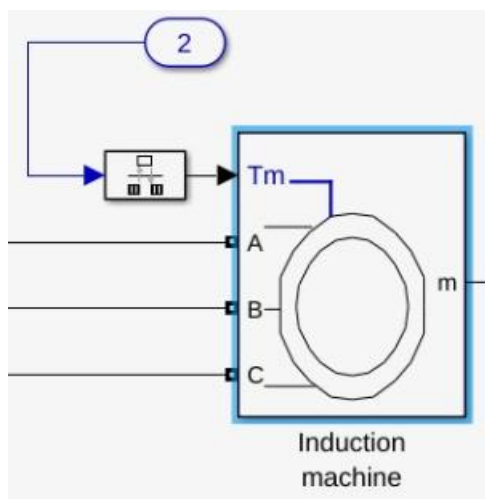
Prema slici 4.3, *Six-Step VSI Induction Motor Drive* blok je sastavljen od sedam podsklopova. Četiri njegova glavna podsklopa su: asinkroni motor (*Induction Machine*), trofazni izmjenjivač (*Three-phase inverter*), trofazni ispravljač (*Three-phase thyristor rectifier*) i jedinica za uključenje poluvodičkih ventila ispravljačkog mosta (*Bridge firing unit*). Tri preostala bloka su: regulator napona istosmjernog međukruga (*DC bus Voltage Controller*), šesteropulsni generator (*Six step generator*) i naponski filter (*DC bus voltage filter*) [6].



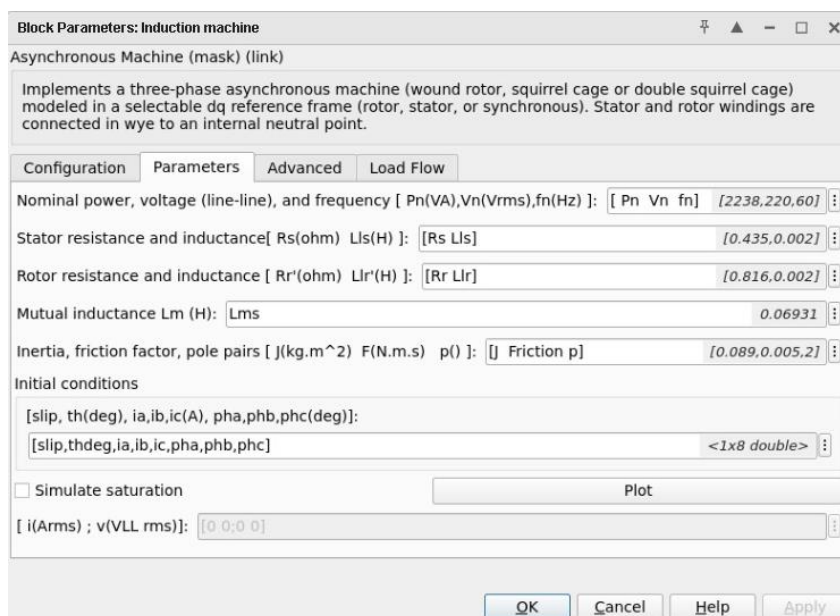
**Slika 4.3** Prikaz sklopova u *ACI* bloku [6]

#### **A. Asinkroni motor (*Induction Machine*):**

Implementira trofazni asinkroni stroj (s namotanim rotorom, kavezom ili dvostrukim kavezom) modeliran u odabranom referentnom okviru (rotor, stator ili sinkroni). Namoti statora i rotora spojeni su u zvijezdu s unutarnjom nulom.



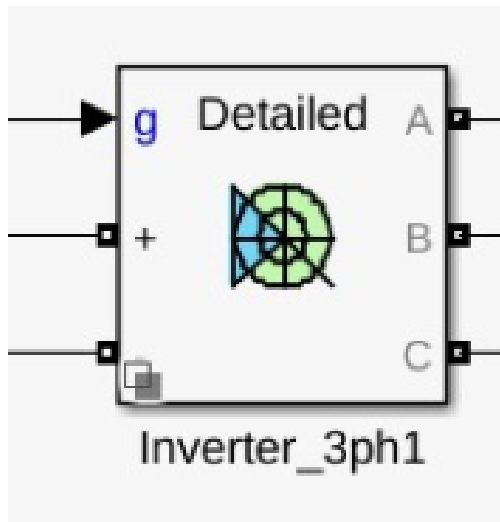
Slika 4.4 Prikaz bloka asinkronog motora [9]



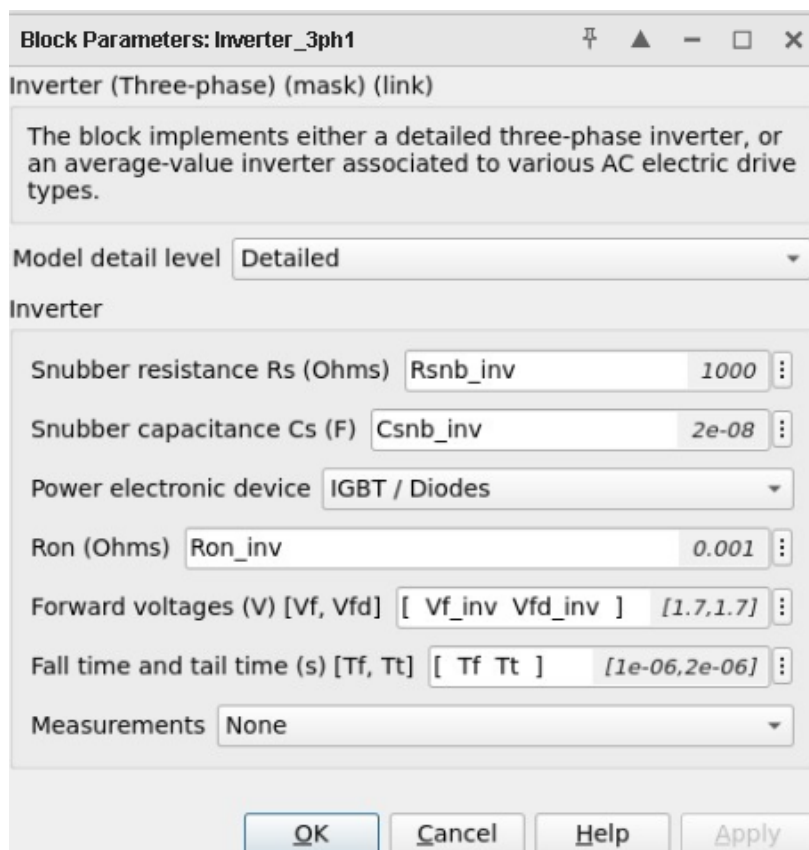
Slika 4.5 Prikaz parametara asinkronog motora [12]

### B. Trofazni izmjenjivač (*Three-phase inverter*):

Blok implementira ili detaljni trofazni pretvarač, ili pretvarač s prosječnom vrijednošću povezan s različitim vrstama AC električnih pogona.



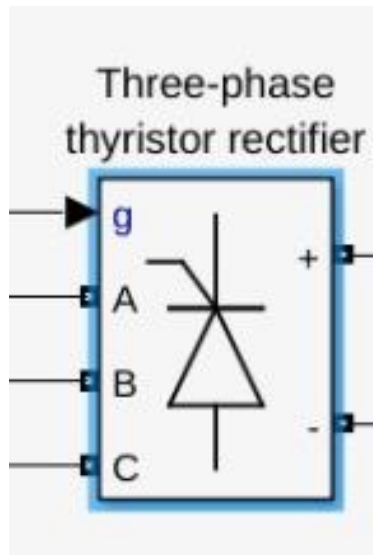
Slika 4.6 Prikaz bloka trofaznog invertera [9]



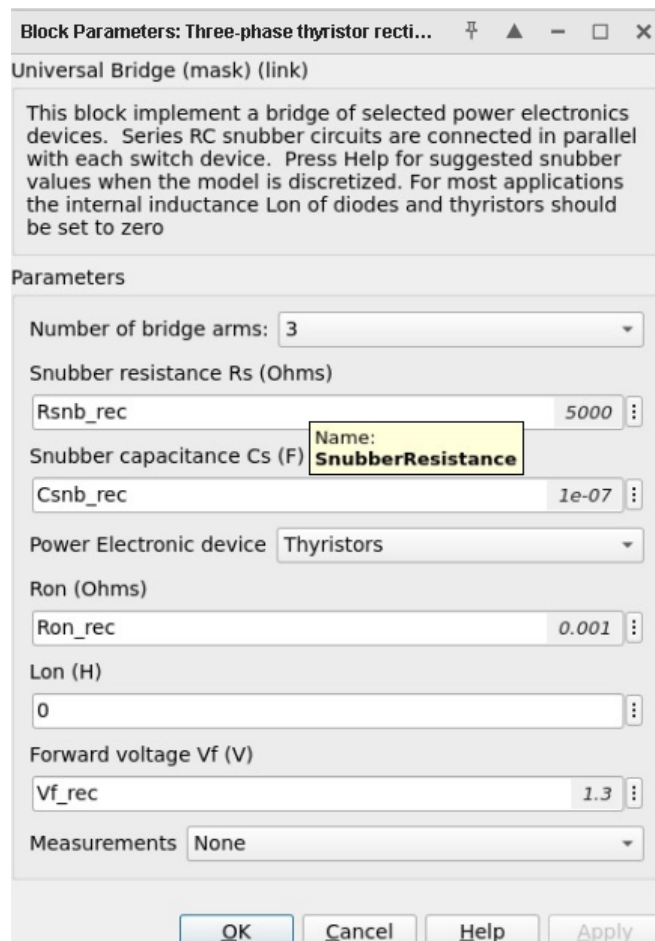
Slika 4.7 Prikaz parametara trofaznog invertera [12]

### C. Trofazni ispravljač(*Three-phase thyristor rectifier*):

Ovaj blok implementira most od odabranih energetsko-elektroničkih uređaja. Serijski RC prigušni krugovi spojeni su paralelno sa svakim sklopnim uređajem.



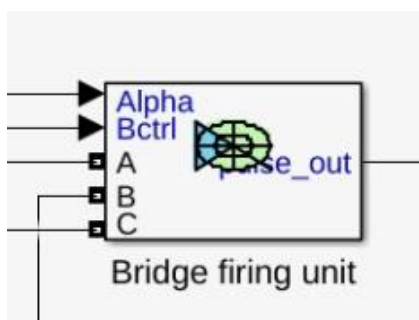
**Slika 4.8** Prikaz bloka trofaznog ispravljača [9]



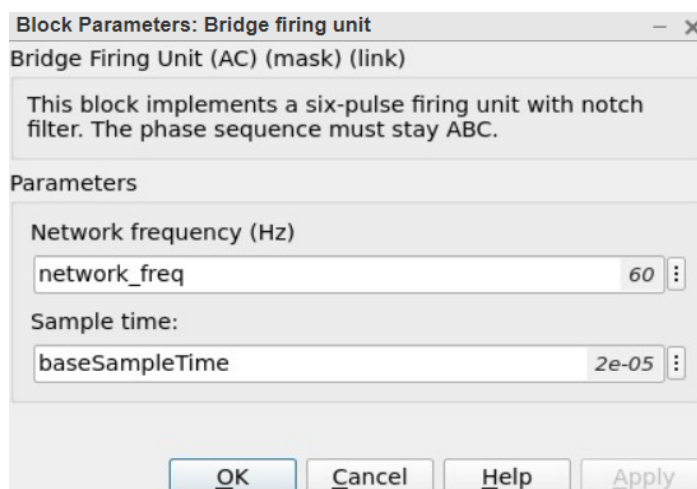
**Slika 4.9** Prikaz parametara trofaznog ispravljača [12]

#### D. Jedinica za uključenje poluvodičkih ventila ispravljačkog mosta (*Bridge firing unit*):

Ovaj blok predstavlja implementiranu šestopulsnu upravljačku jedinicu s notch filtrom. Blok se koristi za pretvaranje kuta paljenja, dobivenog od regulatora napona istosmjernog međukruga, u impulse potrebne za napajanje upravljačkih elektroda tiristora. Blok sadrži nepropusni filter za eliminiranje viših harmonika u mjeračima napona.



Slika 4.10 Prikaz bloka jedinice za uključenje poluvodičkih ventila ispravljačkog mosta [9]

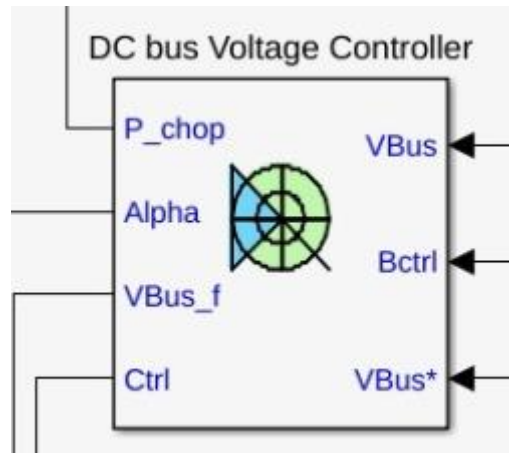


Slika 4.11 Prikaz parametara jedinice za uključenje poluvodičkih ventila ispravljačkog mosta [12]

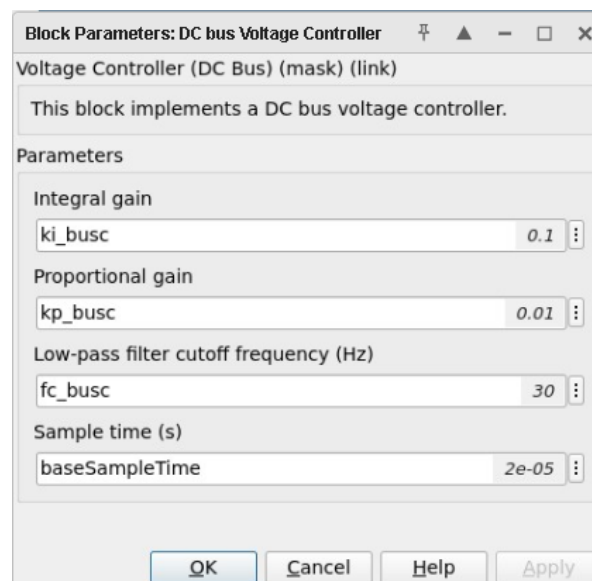
#### E. Regulator napona istosmjernog međukruga (*DC bus Voltage Controller*):

Ovaj blok predstavlja regulator napona istosmjernog međukruga koji počiva na PI regulaciji i histereznoj čoperskoj logici. Ako napon na međukrugu opada, PI regulator smanjuje kut paljenja i obratno se kut paljenja povećava. Čoperska logika počiva na histereznom upravljanju. Ako napon istosmjernog međukruga dosegne gornju histereznu granicu, regulator napona preklapa na kočni

pogon, aktivira se kočni čoper i isključuje trofazni ispravljač. U čoperskom pogonu napon na međukrug počinje opadati i kad dostigne donju histereznu granicu, kočni čoper se isključuje i trofazni ispravljač ponovno aktivira.



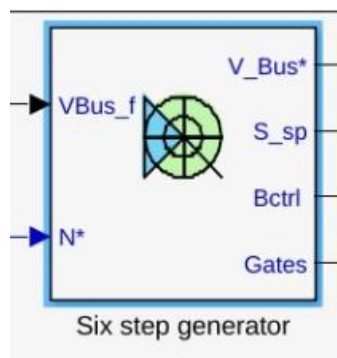
**Slika 4.12** Prikaz bloka regulatora napona istosmjernog međukruga [9]



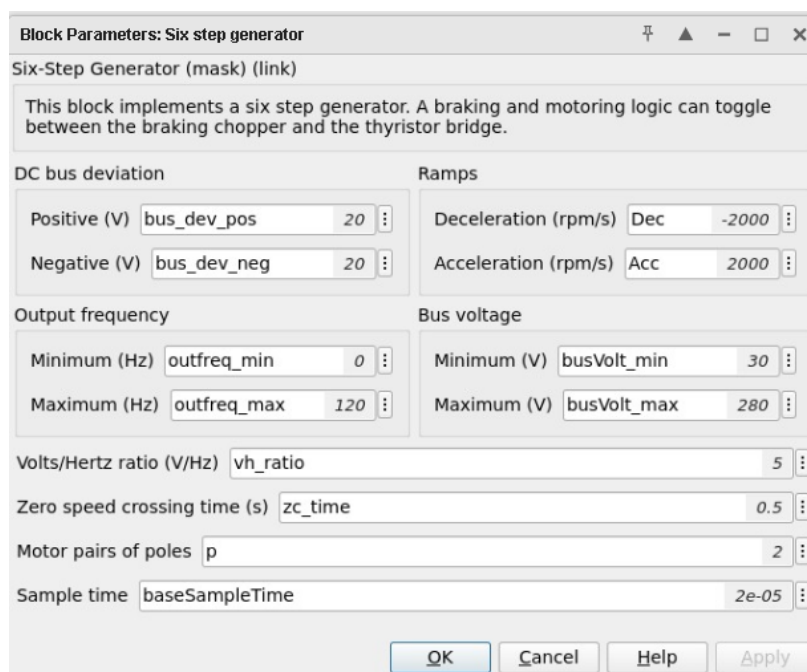
**Slika 4.13** Prikaz parametara regulatora napona istosmjernog međukruga [12]

## F. Šesteropulsni generator(*Six step generator*):

Blok šesteropulsni generator koristi se za generiranje impulsa.



Slika 4.14 Prikaz bloka šesteropulsnog generatora [9]



Slika 4.15 Prikaz parametara šesteropulsnog generatora [12]

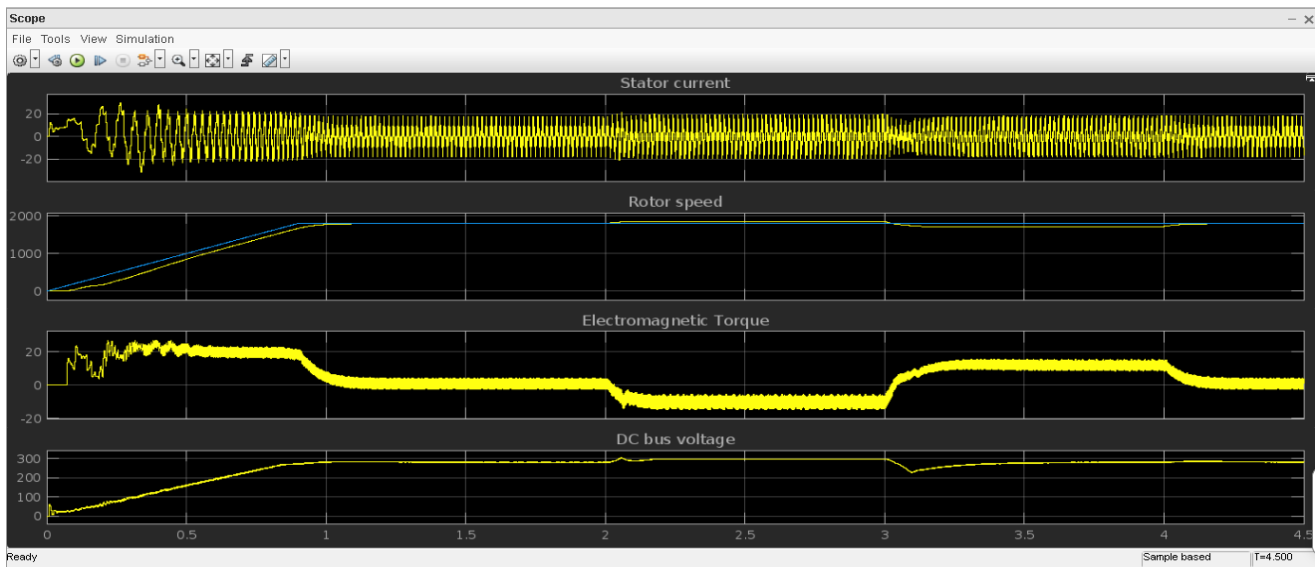
## 4.2 Rezultati i analiza simulacije

Iz slike 4.1 vidljivo je da simulacija traje 4,5 sekunde. Za prikaz karakteristika se koristio *Scope* koji prikazuje vrijednost struje statora, brzinu vrtnje motora, elektromagnetski moment i napon kočenja *DC Bus voltage*. Ovih 4,5 sekundi trajanja simulacije u stvarnom životu bi trajalo do nekoliko minuta. U blokovima *Speed reference* i *load torque* su se postavljale nazivne vrijednosti brzine vrtnje i tereta motora. Simuliranje se provodilo tako da se snimalo tri puta sa različitim vrijednostima za slučaj A. frekvencije, za slučaj B. napona, slučaj C. momenta motora i za slučaj D. brzine vrtnje.

## A. Rezultati simulacije pri različitim vrijednostima frekvencije napajanja

Redni broj simulacije	Napon napajanja U [V]	Frekvencija napajanja f [Hz]	Moment motora Tm [Nm]	Brzina vrtnje motora n [o/min]
1.	220	60	11	1800
2.	220	50	11	1800
3.	220	40	11	1800

**Tablica 4.1** Tablica sa parametrima napona, frekvencije, momenta motora i brzine vrtnje

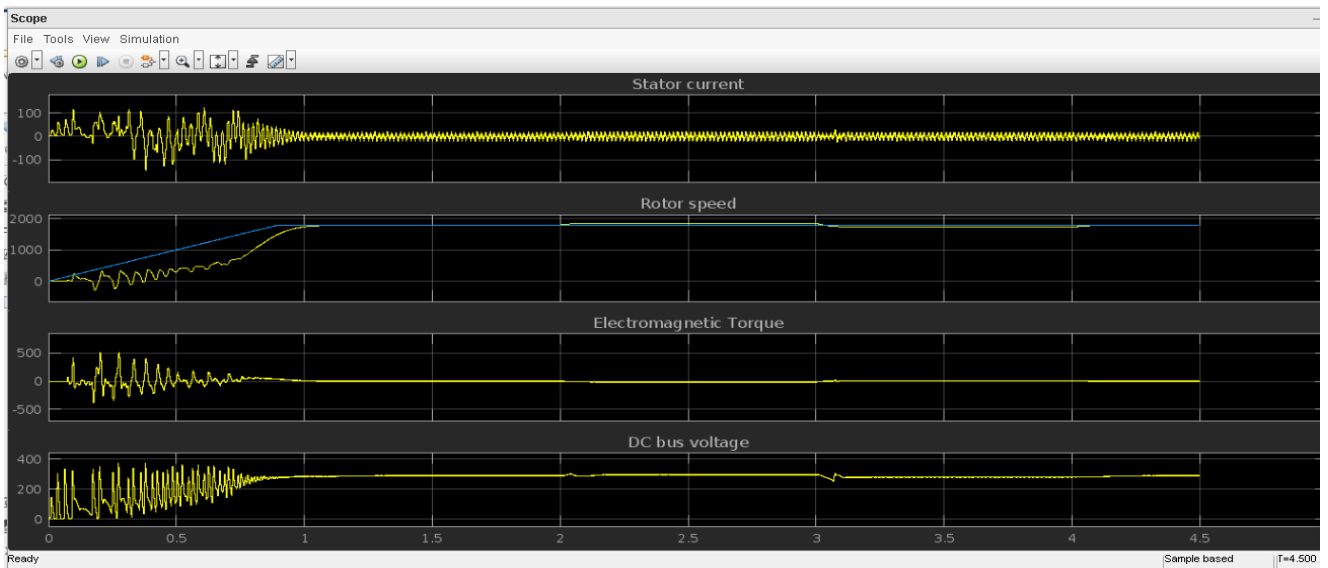


**Slika 4.16** Prikaz prve simulacije sa pred podešenim vrijednostima. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu

[13]

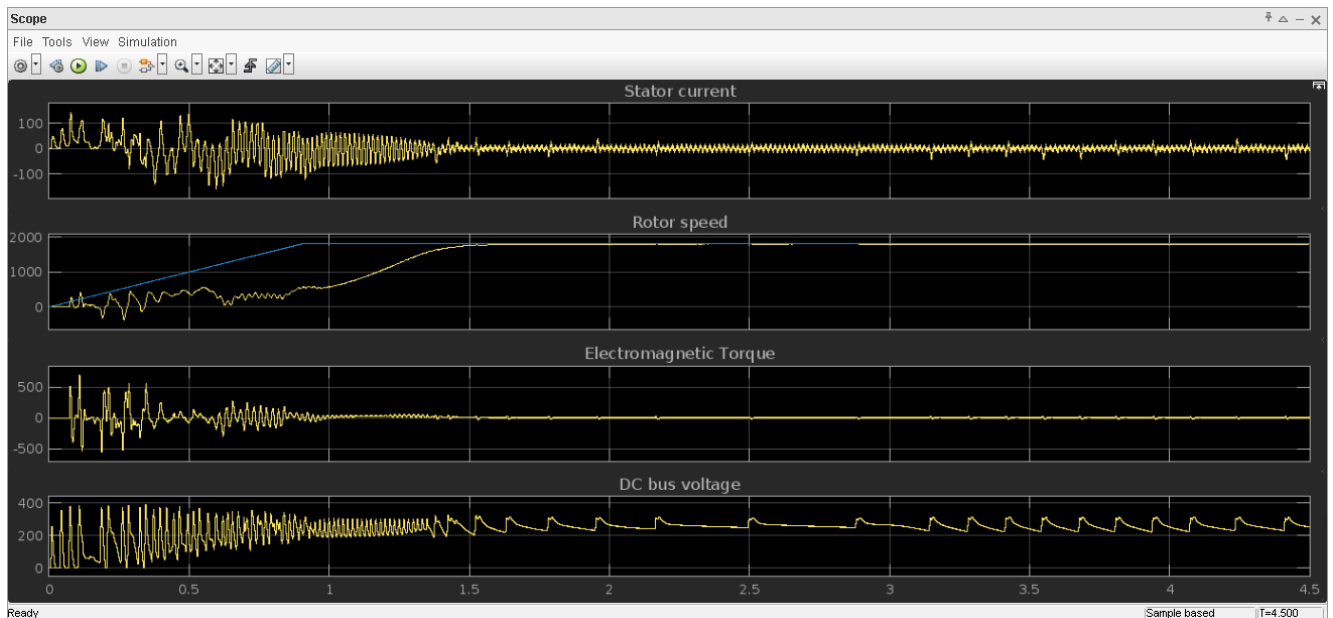
U početku simulacije je vidljivo iz slike 4.16, da referentna brzina vrtnje slijedi porast od +2000o/min sve dok ne postigne nazivnu brzinu vrtnje od +1800o/min, a zatim zadrži tu brzinu sve do kraja simulacije. Porastom referentne brzine vrtnje, raste i elektromagnetski moment motora, time i brzina vrtnje motora. Poslije 2 sekunde simulacije vidljivo je da brzina vrtnje motora veća od sinkrone, te motor ulazi u generatorski režim rada. Generatorskim režimom rada nastaje kočna energija koja se šalje na istosmjerni međukrug i na njemu poraste napon. Povećanjem napona na istosmjernom međukrugu aktivira se kočni čoper, pa se napon počinje smanjivati. Kod 3 sekunde simulacije elektromagnetski moment skače od -11Nm na +11Nm. Od toga trenutka napon na istosmjernom međukrugu opada kao i brzina vrtnje motora, a regulator napona istosmjernog međukruga prelazi iz generatorskog u motorski režim.





**Slika 4.17** Prikaz druge simulacije s smanjenom frekvencijom od 50Hz. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]

Iz slike 4.17 se vidi kako smanjivanje frekvencije napajanja utječe na ponašanje motora. Može se primijetiti da motor ima problema sa zaletom. Motor u početku zahtijeva veliku statorsku struju i moment za zalet. Zbog ovakvih zahtjeva, brzina vrtnje ima spori rast te ne može pratiti porast od 2000 o/min. Tek nakon 0,75 sekunde simulacije dolazi do stabilnog rada motora.



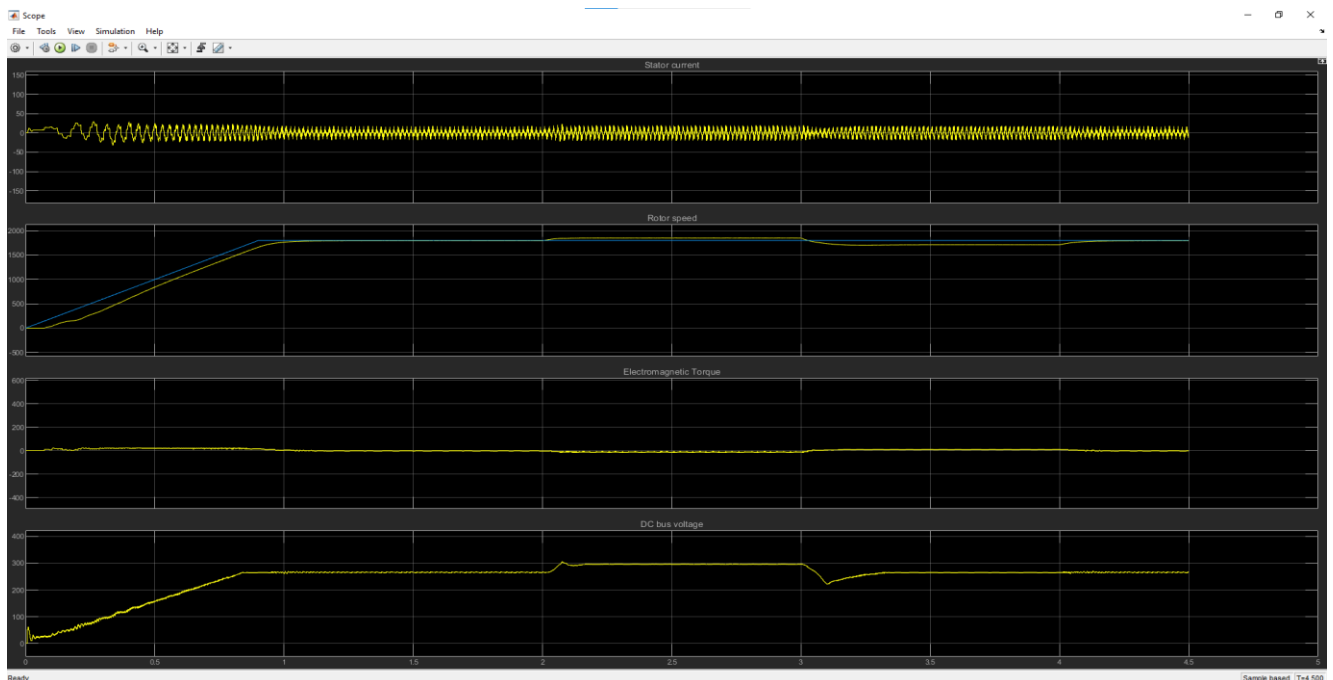
**Slika 4.18** Prikaz treće simulacije sa smanjenom frekvencijom od 40Hz. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]

Iz slike 4.18 se vidi kako smanjivanjem vrijednosti frekvencije ispod preporučene vrijednosti utječe na rad motora. U odnosu na sliku 4.17, ova simulacija ima teže zaletanje motora. Statorskoj struji treba puno da dođe do stabilnije vrijednosti. Brzina vrtnje dostiže nazivnu brzinu tek u 1,5 sekundi simulacije. Iz karakteristike kočnog napona se vidi promjena napona u istosmjernom međukrugu, kako motor često prelazi iz motorskog režima rada u generatorski te se stvaraju velike oscilacije kočne energije.

## B. Rezultati simulacije pri različitim vrijednostima napona napajanja

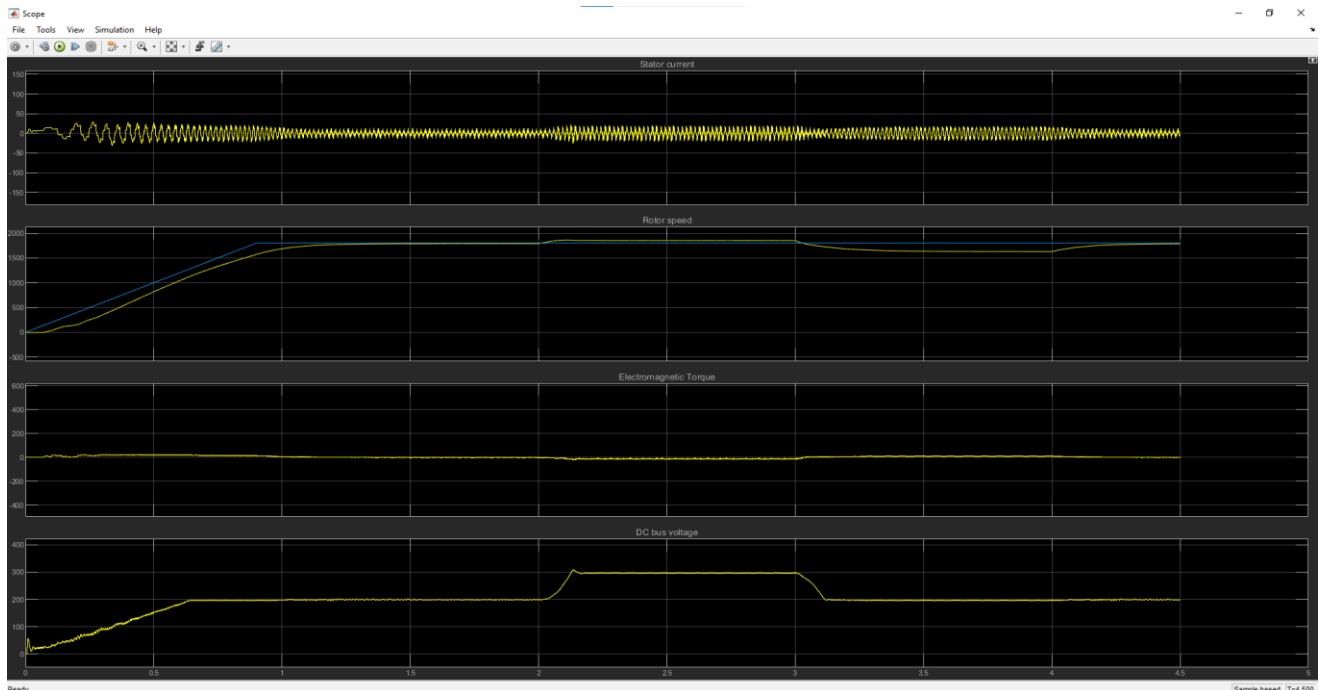
Redni broj simulacije	Napon napajanja U [V]	Frekvencija napajanja f [Hz]	Moment motora Tm [Nm]	Brzina vrtnje motora n [o/min]
1.	200	60	11	1800
2.	150	60	11	1800
3.	100	60	11	1800

**Tablica 4.2** Tablica sa parametrima napona, frekvencije, momenta motora i brzine vrtnje



**Slika 4.19** Prikaz prve simulacije sa smanjenim naponom od 200V. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu

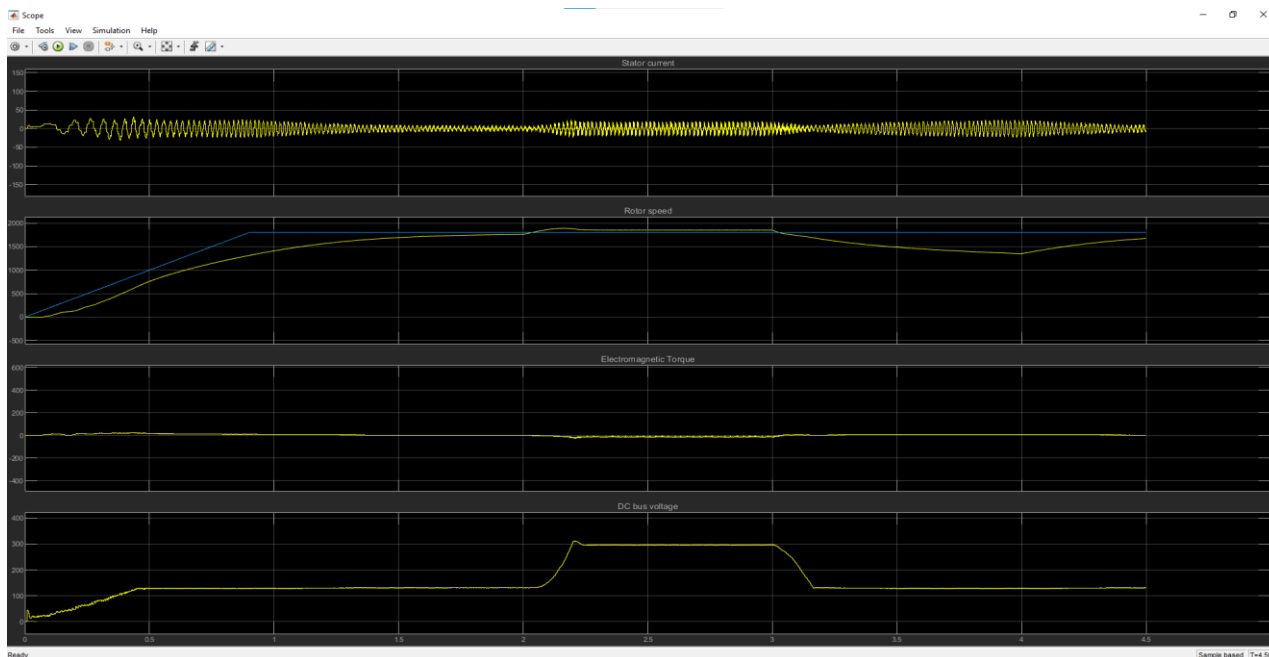
Iz slike 4.19 vidimo ponašanje motora pri smanjenom naponu. U odnosu na sliku 4.16, statorska struja je manje vrijednosti, brzina vrtnje dostiže nazivnu brinu u 1 sekundi simulacije te je konstantna uz manja odstupanja u 2 sekundi i 3 sekundi simulacije. Elektromagnetski moment ima oscilacije oko vrijednosti nula što je razlog manjoj vrijednosti statorske struje. Kočni napon skače u trenucima 2 sekunde i 3 sekunde simulacije gdje u 2 sekundi kočni napon raste što rezultira u smanjivanju brzine vrtnje gdje onda u 3 sekundi se kočni čoper gasi i brzina vrtnje dostiže nazivnu vrijednost.



**Slika 4.20** Prikaz druge simulacije sa smanjenim naponom od 150V. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu

[13]

Iz slike 4.20 vidimo kako vrijednosti više osciliraju u odnosu na sliku 4.19. . Struja statora ima blagi rast i pad vrijednosti. U Početku dostiže nazivnu vrijednost te u 1 sekundi simulacije struja pada, te poslije 2 sekunde simulacije raste. Brzina vrtnje ima veća odstupanja od nazivne vrijednosti brzine.



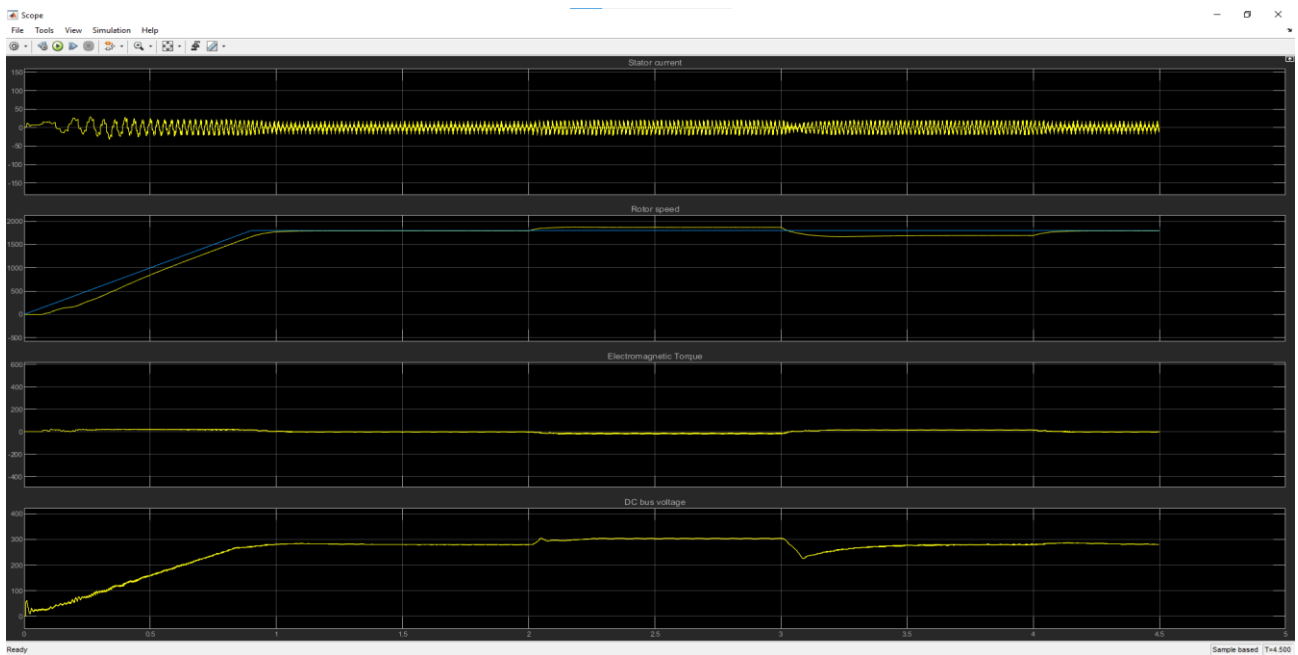
**Slika 4.21** Prikaz treće simulacije sa smanjenim naponom od 100V. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]

Iz slike 4.21 vidimo ponašanje motora na 45% napona napajanja. Smanjivanjem napona smanjuje se učinkovitost rada motora. Može se primijetiti da u odnosu na sliku 4.20 i 4.19, brzina vrtnje sporije dostiže nazivnu brzinu, dok ostale veličine se ponašaju slično. Struja statora u početku ima oscilacije uobičajeno za pokretanje motora. Elektromagnetski moment oscilira pri pokretanju, što je očekivano jer motor mora savladati početni otpor tereta. Nakon toga, moment se smiruje, što znači da je motor u stabilnom režimu rada, ali postoje manje oscilacije što može ukazivati na promjene u opterećenju.

### C. Rezultati simulacije pri različitim vrijednostima momenta motora

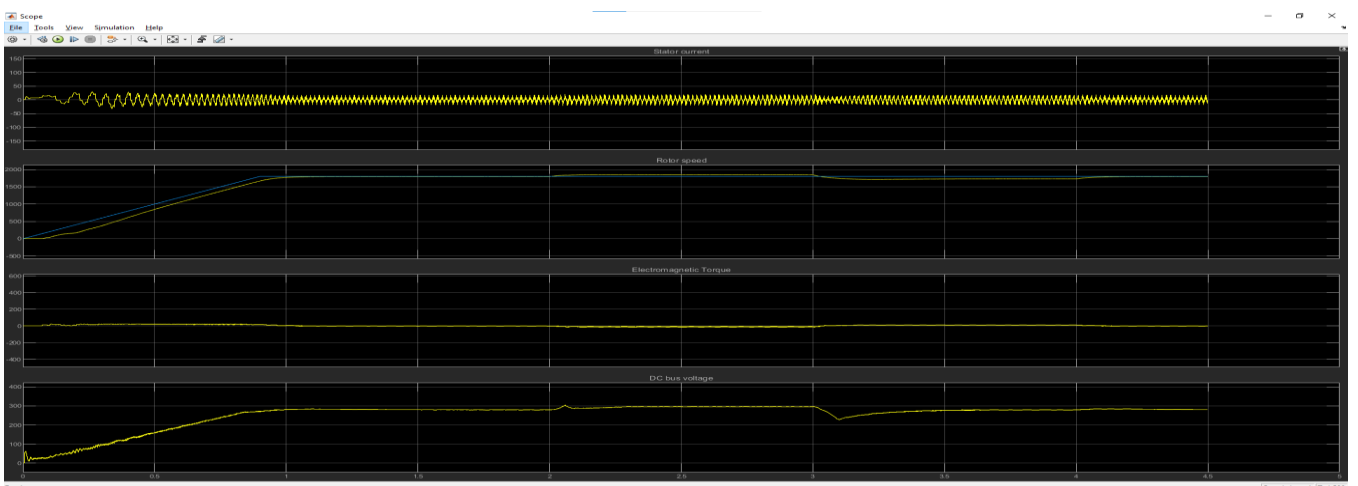
Redni broj simulacije	Napon napajanja U [V]	Frekvencija napajanja f [Hz]	Moment motora T <sub>m</sub> [Nm]	Brzina vrtnje motora n [o/min]
1.	220	60	15	1800
2.	220	60	10	1800
3.	220	60	5	1800

**Tablica 4.3** Tablica sa parametrima napona, frekvencije, momenta motora i brzine vrtnje



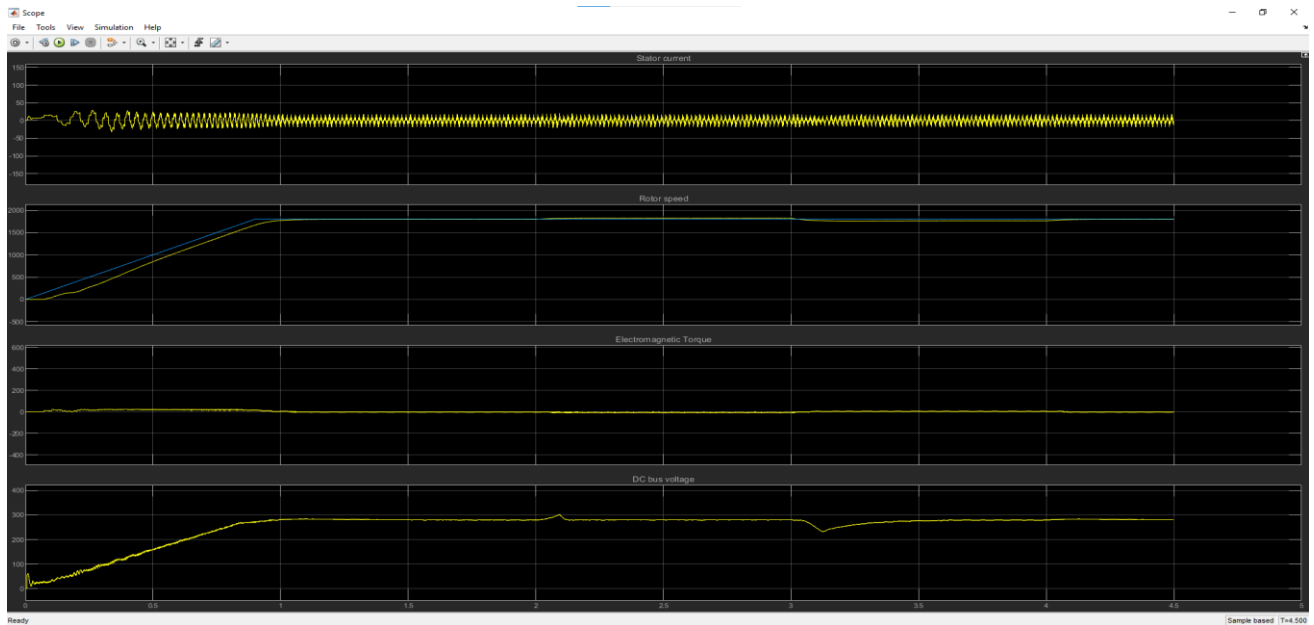
**Slika 4.22** Prikaz prve simulacije sa povećanim momentom od 15Nm. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]

Iz slike 4.22 vidimo utjecaj povećanja momenta motora na sam rad motora. Kako je povećan moment motora struja statora je manjeg iznosa. Elektromagnetski moment u početku ima male oscilacije što je karakteristično prilikom pokretanja. Brzina vrtnje brzo dostiže nazivnu brzinu vrtnje uz manja odstupanja u 2 i 3 sekundi simulacije.



**Slika 4.23** Prikaz druge simulacije sa smanjenim momentom od 10Nm. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]

Iz slike 4.23 vidimo ponašanje motora sa momentom motora iznosa 10Nm. Karakteristika ima slično ponašanje kao simulacije iz slike 4.22. Razlika je u tom što ova simulacija ima manje oscilacije.



**Slika 4.24** Prikaz treće simulacije sa smanjenim momentom od 5Nm. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu

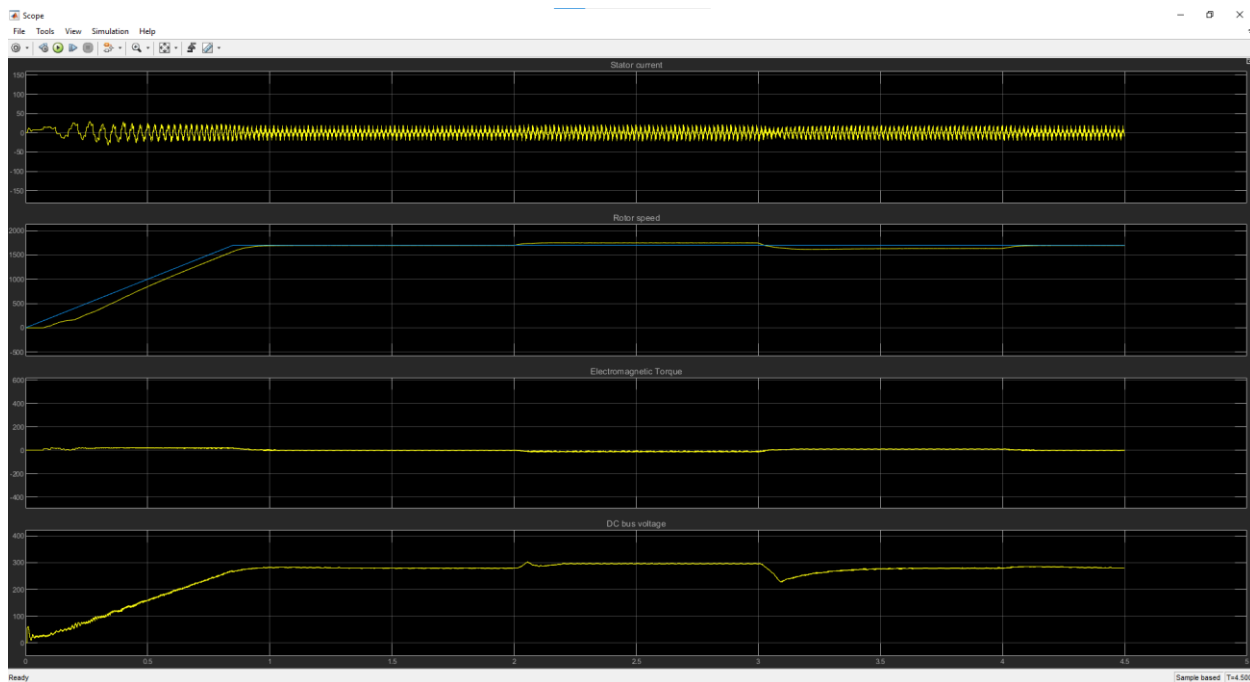
[13]

Iz slike 2.24 vidimo ponašanje motora slično režimu rada motora u praznom hodu. Razlog tome što vrijednost momenta na osovini je niska. Pošto je vrijednost momenta niska, motor brzo dolazi do nazivne brzine vrtnje. Struja statora ima oscilacije samo na početku, što je karakteristično pri pokretanju motora, te dolazi do neke stabilne vrijednosti. Elektromagnetski moment ima oscilacija samo prilikom pokretanja gdje poslije oscilira oko vrijednosti nule.

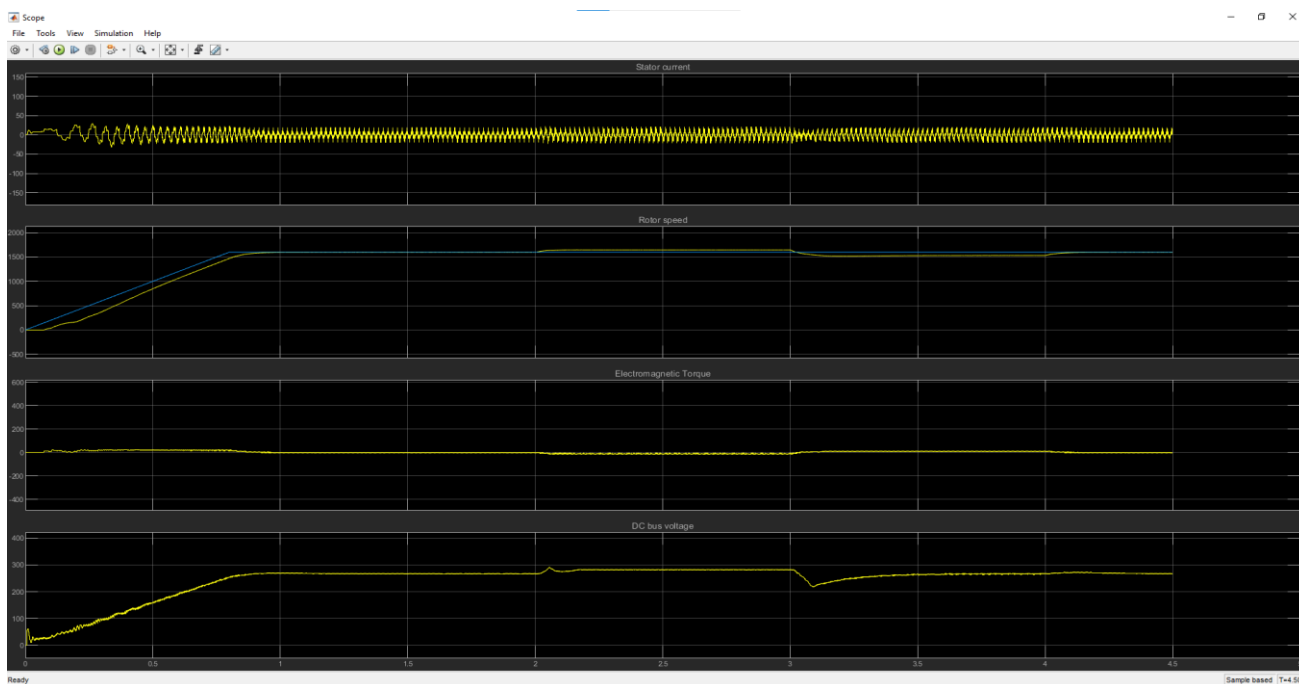
#### D. Rezultati simulacije pri različitim vrijednostima brzine vrtnje rotora motora

Redni broj simulacije	Napon napajanja U [V]	Frekvencija napajanja f [Hz]	Moment motora Tm [Nm]	Brzina vrtnje motora n [o/min]
1.	220	60	11	1700
2.	220	60	11	1600
3.	220	60	11	1500

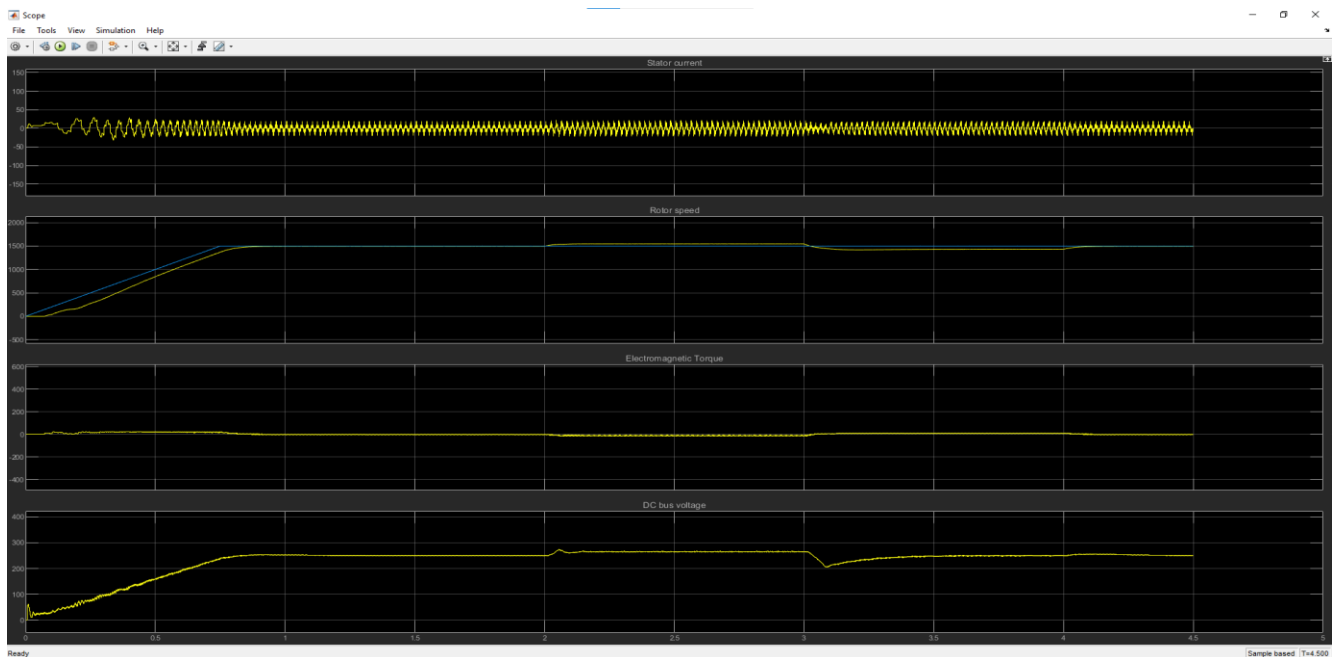
**Tablica 4.4** Tablica sa parametrima napona, frekvencije, momenta motora i brzine vrtnje



**Slika 4.25** Prikaz prve simulacije sa smanjenom brzinom od 1700o/min. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]



**Slika 4.26** Prikaz druge simulacije sa smanjenom brzinom od 1600o/min. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]



**Slika 4.27** Prikaz treće simulacije sa smanjenom brzinom od 1500o/min. Grafovi prikazuju ovisnost statorske struje, brzine vrtnje rotora, elektromagnetskog momenta i kočnog napona o vremenu [13]

Iz slika 4.25, 4.26 i 4.27 se vidi da ove tri simulacije imaju slične rezultate. Jedina razlika je brzina vrtnje koju je motor postigao. Ovisno o podešenoj brzini vrtnje motor je brže ili sporije postigao nazivnu brzinu vrtnje. Pošto podešeni moment motora je isti, karakteristike struje statora su iste, time i elektromagnetski moment motora. Pošto u prvoj simulaciji brzina vrtnje je postavljena na 1700 o/min, ova simulacija najsporije dostiže nazivnu brzinu vrtnje u 1 sekundi simulacije. U drugoj simulaciji brzina vrtnje je postavljena na 1600 o/min te nazivna brzina je postignuta u 0,90 sekundi simulacije. Zadnja simulacija je najbrža, u 0,85 sekundi simulacije, jer je postavljena brzina vrtnje motora 1500 o/min.



## 5. ZAKLJUČAK

Tema ovog završnog rada je simulacija modela asinkronog motora napajanog frekvencijskim pretvaračem što je i uspješno realizirano. Snimanje karakteristika asinkronih motora je bitno u pogonu jer na taj način se mogu utvrditi njegove veličine, provjera rada motora, te ponašanje motora pri promjeni njegovih parametara. Kao što se može vidjeti u analizi rezultata, promjena napona, frekvencije, i drugih veličina znatno utječe na ponašanje motora. Ako motor koristimo po ne predloženim parametrima, u dužem vremenskom periodu može doći do zagrijavanja motora, oštećenja dijelova i uništenja motora. U ovom radu je korišten gotov model *ac1\_example* koji omogućava testiranje i mjerenje veličina asinkronog motora mijenjanjem određenih parametara, bez korištenja fizičkih uređaja i instrumenata što znatno olakšava mjerenje. Model dolazi iz SimPowerSystems što je dodatak simulinku. SimPowerSystems sadrži gotove biblioteke sa električnim strojevima, pogonima i ostalim električnim elementima. Spajanje električnih elemenata se izvodi kao i u stvarnim strujnim krugovima, te izračun vrijednosti i crtanje karakteristika se postiže pomoću MATLAB-a. SimPowerSystems se pokazuje kao dobar simulacijski alat pomoću kojeg možemo dobiti približne rezultate stvarnih električnih pojava uz određena odstupanja. Treba uzet u obzir da je simulacija čisti matematički model bez izvora smetnji, dok kod stvarnog mjerenja djeluju pogreške, najčešće zbog nesavršenosti mjerne opreme. Mjerenje se provodilo tako što su se mijenjali iznosi napona, frekvencije na izvoru napajanja i motoru te mijenjanjem brzine vrtnje motora i tereta na motor. Može se primijetiti iz karakteristike da stabilnost rada motora najviše ovisi o dovedenom naponu i frekvenciji. Ako se ne pridržavamo parametrima motora, u simulaciji ćemo dobiti ne stabilan proces, a u stvarnom životu bi to dovelo do oštećenja motora. Također treba naglasiti da iz situacije C. gdje se mijenjao moment tereta na motor može se primijetiti da u tablici iako se mijenjao moment tereta, brzina vrtnje je ostala istog iznosa od 1800 o/min. Prema formuli za moment motora,  $M = \frac{P_{meh} 9,55}{n}$ , može se vidjeti ovisnost momenta o brzini vrtnje. Kako bi dobili željeni moment motora u simulaciji, bilo je potrebno prilagoditi brzinu vrtnje motora pomoću navedene formule. No međutim, iz karakteristika tih tri provedenih mjerenja se nije vidjela velika razlika. Nego su karakteristike bile iste. Zbog ovakvog odziva karakteristika u C. simulaciji se nije mijenjala brzina vrtnje na motoru. Iz ovog završnog rada se može zaključiti da upravljanje asinkronog motora napajanog pomoću frekvencijskog pretvarača u SimPowerSystems je efikasno i jednostavno za upotrebu za eksperimentalnu primjenu kako bi se moglo testirati specifični slučajevi motora s određenim parametrima.

## LITERATURA

- [1] Zvonko Benčić, Najvažnije of frekvencijskim pretvaračima, Danfoss Drives A/s,Dnemark,1998
- [2] Radenko Wolf , Osnove električnih strojeva, Školska knjiga,Zagreb,1991
- [3] Ivan Mandić, Veselko Tomljenović, Milica Pužar, Sinkroni i Asinkroni električni strojevi, Zagreb 2012, URL: [629238.SinAsin.pdf](#)
- [4] L.M. Piotrovskij , Električni strojevi, Tehnička knjiga Zagreb
- [5] Zlatko Maljković, Električni strojevi
- [6] Prof. dr. sc. Zdravko Valter, Električni Strojevi i Pogoni s MATLABOM, Osijek 2009., URL: [Električni strojevi i pogoni s Matlabom\\_Valter\\_2009.pdf](#)
- [7] Rotor klizno-prstenastog motora, URL:[Search \(bing.com\)](#)
- [8] Rotor kaveznog asinkronog motora, URL: [Search \(bing.com\)](#)
- [9] Bose, B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [10] Mali i specijalni električni strojevi, Jednofazni asinkroni motor, URL: [Jednofazni asinkroni električni strojevi \(1\).pdf](#)
- [11]Karlo Đaković, Ispitivanje mogućnosti frekvencijskog pretvarača VACON NXP, URL: [view \(etfos.hr\)](#)
- [12] Ispis sadržaja ekrana u Matlab-u
- [13] Ispis karakteristika bloka scope u Matlab-u

## SAŽETAK

Asinkronim motorima najveći problem bila je mogućnost podešavanja brzine vrtnje. Razvojem tehnologije došlo je do razvoja energetske elektronike što je omogućilo razvoj frekvencijskih pretvarača što je efikasno rješenje sa malo gubitaka. Zahvaljujući tome, primjena asinkronih motora u širokom spektru industrije procesa i pogona postala je moguća.

U ovom završnom radu snimao sam i analizirao karakteristike asinkronog motora napajanog frekvencijskim pretvaračem. Snimanje je obavljeno preko simulacijskog modela u MATLAB-u gdje je moguće testiranje rada motoru pri mijenjanjem određenih parametara motora. Na osnovu snimljenih grafova analizirao sam i usporedio ponašanje motora pri mijenjanjem napona, frekvencije izvora napajanja te mijenjanjem brzine vrtnje osovine motora i tereta na osovinu.

**Cljučne riječi:** Asinkroni motor, frekvencijski pretvarač, karakteristike motora, Matlab, simulacija, SimPowerSystems

## Simulation Model of Asynchronous Motor Powerd by Frequency Converter

### ABSTRACT

With asynchronous motors, the biggest problem was the ability to adjust the rotational speed. With the development of technology, there has been a development of power electronics, which has enabled the development of frequency converters, which is an efficient solution with low losses. Thanks to this, the application of induction motors in a wide range of process and drive industries has become possible.

In this final paper, I recorded and analyzed the characteristics of an asynchronous motor powered by a frequency converter. The recording was done through a simulation model in MATLAB where it is possible to test the operation of the engine when changing certain engine parameters. Based on the recorded graphs, I analyzed and compared the behavior of the motor when changing the voltage, frequency of the power source and changing the rotational speed of the motor shaft and load on the axle.

**Keywords:** Asynchronous motor, frequency converter, motor characteristics, Matlab, simulation, SimPowerSystems

## **ŽIVOTOPIS**

Toni Ivić je rođen 13.11.2000. u Osijeku. Upisuje 2007. godine osnovnu školu „Matija Petar Katančić“ u Valpovu. Osnovnu školu završava 2015. godine, te upisuje smjer elektrotehnike u srednjoj školi Valpovo. Nakon što završava srednju školu 2019. godine, upisuje stručni smjer automatike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.