

Sustav upravljanja električnim motorima preko Profibus industrijske sabirnice

Babić, Anto

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:200:608468>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni studij

**SUSTAV UPRAVLJANJA ELEKTRIČNIM MOTORIMA
PREKO PROFIBUS INDUSTRIJSKE SABIRNICE**

Diplomski rad

Anto Babić

Osijek, 2015.



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek,

Ime i prezime studenta:

Anto Babić

Studij :

Diplomski studij elektroenergetike

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-705, 2013.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

Sustav upravljanja električnim motorima preko PROFIBUS industrijske sabirnice

izrađen pod vodstvom mentora:

Izv.prof.dr.sc. Dražena Sliškovića

i sumentora:

Mr.sc. Ivice Bašića

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Zahvala!

Izv.prof.dr.sc. Draženu Sliškoviću hvala na iskazanom povjerenju, vodstvu i prihvaćanju teme diplomskog rada te na svim korisnim savjetima i uputama tijekom izrade diplomskog rada. Zahvaljujem se na vremenu i strpljenju te na tome što ste mi omogućili pristup svojoj potrebnoj opremi za izradu diplomskog rada.

Mr.sc. Ivici Bašiću zahvaljujem na predlaganju teme diplomskog rada. Hvala na izdvojenom vremenu, suradnji, savjetima, odličnim idejama, prenesenom znanju i svojoj stručnoj pomoći vezanoj za frekvencijske pretvarače. Zahvaljujem se i na ustupanju potrebne programske podrške za frekvencijske pretvarače.

Jedno veliko hvala gospodinu Bošnjaku, gospodinu Biliću, gospodinu Mandiću i gospodinu Pavloviću iz tvrtke Systec Automation na izrazitoj susretljivosti i ustupanju sve potrebne programske podrške. Zahvaljujem se na svom prenesenom znanju, korisnim savjetima i bezbroj ideja, utrošenom vremenu i nesebičnoj pomoći oko PLC-a i HMI-a. Uz Vas sam stekao puno znanja i iskustva o meni na početku nepoznatom i neistraženom djelu grane elektrotehnike.

Zahvaljujem se gospodinu Šiloviću i gospodinu Mihaljeviću te svim članovima Zaklade Rotary kluba Osijek i članovima Rotary kluba Osijek na pruženoj prilici, ukazanom povjerenju te potpori u obliku stipendije tijekom cijelog mog studiranja. Bez Vaše pomoći, moj put do željenog cilja bio bi mnogo trnovitiji.

Zahvaljujem se i svim profesorima, asistentima te djelatnicima Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku, na suradnji, ugodnom boravku i na stečenim znanjima.

Zahvalio bih se i svojoj obitelji na razumijevanju, pomoći, podršci i upućivanju na pravi put tijekom cijelog mog života.

Hvala svim mojim prijateljima, prijateljicama i djevojci, koji su bili uz mene i bez kojih cijeli tijek mog studiranja ne bi prošao tako lako i zabavno. Zahvaljujem Vam na svim druženjima, zajedničkim učenjima i lijepim trenutcima tijekom studiranja. To su zasigurno oni trenutci života, koji ostaju u najboljem sjećanju.

SADRŽAJ

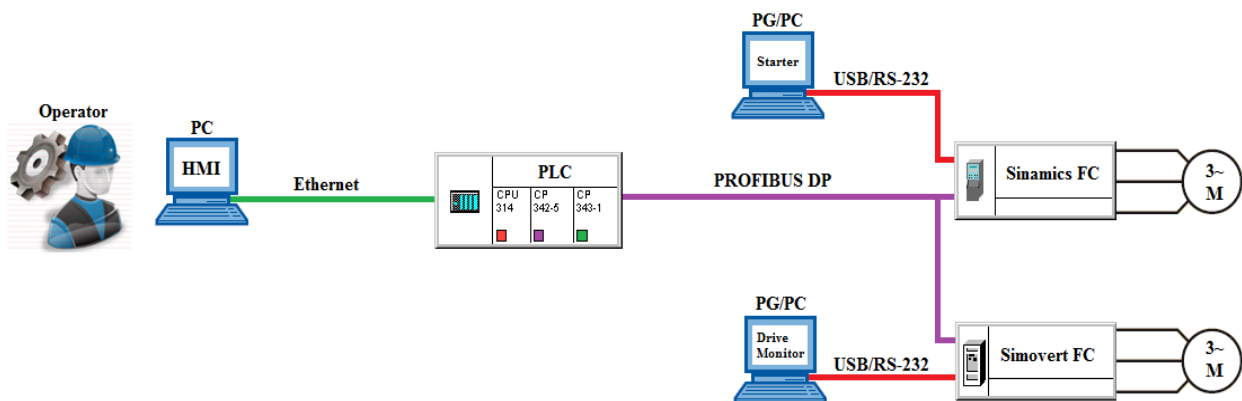
1. UVOD	1
2. LABORATORIJSKI POSTAV	3
2.1. Sustav za komunikaciju, upravljanje i nadzor.....	4
2.1.1. PLC – SIMATIC S7 300	4
2.1.2. SCADA / HMI.....	6
2.1.3. PROFIBUS DP komunikacijska sabirnica	7
2.1.4. Industrijski <i>ethernet</i>	9
2.1.5. Ostale komunikacijske pod mreže.....	10
2.2. Pretvarački uređaji – frekvencijski pretvarači.....	11
2.2.1. Siemens Sinamics G120	15
2.2.2. Siemens Masterdrives Simovert FC	16
2.3. Asinkroni motori - elektromotori	17
2.3.1. Končar asinkroni motor - 5 AZ 112M-8	19
2.3.2. Siemens asinkroni motor - 1LA5073 - 4AB10 - Z.....	20
3. OPTIMIRANJE REGULATORA I PARAMETRIRANJE FREKVENCIJSKIH PRETVARAČA POMOĆU PROGRAMSKIH PAKETA	22
3.1. Programski paket <i>Starter</i>	23
3.1.1. Komunikacija frekvencijskog pretvarača s računalom.....	23
3.1.2. Kreiranje novog projekta i uspostavljanje komunikacije	26
3.1.3. Parametriranje frekvencijskog pretvarača – parametri asinkronog motora.....	27
3.1.4. Automatsko parametriranje (Auto-tuning) regulatora frekvencijskog pretvarača ..	31
3.1.4.1. Određivanje parametara nadomjesne sheme asinkronog motora automatskim parametriranjem frekvencijskog pretvarača.....	33
3.1.4.2. Određivanje parametara nadomjesne sheme asinkronog motora matematičkim modelima iz nazivnih podataka asinkronog motora	34
3.1.5. Regulacijske petlje vektorskog sustava upravljanja	38
3.1.5.1. Regulacija frekvencije/brzine vrtnje	38
3.1.5.2. Regulacijska petlja struje	39
3.1.6. Upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću <i>Starter-a</i>	41
3.2. Programski paket <i>Drive Monitor</i>	42
3.2.1. Komunikacija frekvencijskog pretvarača s računalom.....	42
3.2.2. Kreiranje novog projekta i uspostavljanje komunikacije	44
3.2.3. Parametriranje frekvencijskog pretvarača	45
3.2.4. Parametri za upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću <i>Drive Monitor-a</i> ...	46
4. PROGRAMIBILNI LOGIČKI UPRAVLJAČ – PLC	48
4.1. STEP 7.....	48
4.2. Uspostavljanje komunikacije s osobnim računalom	49
4.3. Hardverska konfiguracija PLC-a.....	49
4.4. Programiranje PLC-a.....	51
4.4.1. Programski jezici	51
4.4.2. Korisnički blokovi.....	52
4.4.3. FC1 (DP_SEND) i FC2 (DP_RECV)	53
4.4.4. Ispitivanje dosljednosti blokova	55
4.4.5. Programski kod za postavljanje referentne brzine.....	56
4.4.6. Ciklus izvođenja upravljačkog programa PLC-a	58

4.5. Priprema frekvencijskih pretvarača za upravljanje pomoću PLC-a.....	58
4.5.1. Sinamics	59
4.5.2. Simovert	60
5. HMI SUČELJE	62
5.1. WinCC Explorer.....	62
5.2. Uspostavljanje komunikacije s PLC-om	62
5.3. Izvođenje u stvarnom vremenu	63
6. REZULTATI I ANALIZA	68
6.1. FDA programski paket	68
6.2. Vektorsko upravljanje asinkronim motorom.....	70
6.3. Skalarno upravljanje asinkronim motorom	73
6.4. Ograničenja korištene opreme.....	75
6.5. Usporedba vladanja sustava sa simulacijskim modelom	76
7. ZAKLJUČAK.....	78
LITERATURA	80
SAŽETAK.....	82
ABSTRACT	83
ŽIVOTOPIS.....	84
PRILOG	85

1. UVOD

Električni motori su ključne komponente svakog električnog pogona. Oni pretvaraju električnu energiju u mehaničku i posreduju između električne mreže kao izvora energije i radnog mehanizma kao trošila energije [1]. Velika pouzdanost, niska cijena, jednostavna konstrukcija i instalacija, širok raspon snaga te ne zahtjevno održavanje pogodovale su razvoju električnih motora u elektromotornim pogonima, posebice asinkronih električnih motora. Podatak da 80 % svih upotrijebljenih strojeva čine asinkroni strojevi upućuje na poseban značaj koji taj stroj ima u industriji. Veći dio današnjih elektromotornih pogona s asinkronim motorima nije u sustavu regulacije brzine vrtnje, a zbog sve većih zahtjeva u industrijskoj primjeni, zaštite motora i radnih mehanizama te smanjenja potrošnje električne energije, broj reguliranih elektromotornih pogona sve više raste. Procjenjuje se da je oko 20% reguliranih asinkronih pogona te taj broj iz dana u dan sve više raste [2], [23].

Razvojem energetske elektronike (frekvencijskih pretvarača) i mikroprocesorske tehnike, moguće je jeftino ostvariti sve složenije regulacijske algoritme koji se stavljaju pred pogone s asinkronim motorima. Pogoni s asinkronim motorima u potpunosti pokrivaju područje od pogona konstantne brzine vrtnje do pogona promjenjive brzine vrtnje i to u vrlo finoj gradaciji regulacijskih svojstava. Zbog širokog raspona regulacije brzine, velikog područja snaga kojeg pokrivaju, prilagodljivosti uvjetima okoline, visoke korisnosti, točnosti i visoko kvalitetne dinamike (mogućnosti visokog opterećenja i preopterećenja), pogoni s asinkronim motorima ne zaostaju za pogonima s istosmjernim pogonima, nego ih i potiskuju iz upotrebe. Istosmjerni motori su skupi, a skupo je i njihovo održavanje [1], [3].



Sl. 1.1. *Blokovski prikaz sustava upravljanja električnim motorima preko PROFIBUS industrijske sabirnice.*

Slika 1.1. prikazuje blokovski prikaz sustava upravljanja električnim motorima u PROFIBUS industrijskoj sabirnici. Potrebno je ovladati alatima za parametrisanje i upravljanje

frekvencijskim pretvaračima, alatom za programiranje PLC-a (engl. *Programmable Logic Controller*) te alatom za kreiranje grafičko-tekstualnog sučelja prigodnog za upravljanje i nadzor sustava.

Tema ovog rada odrađena je kroz šest poglavlja. U drugom poglavlju opisana je korištena oprema (komunikacijske pod mreže, PLC, frekvencijski pretvarači, asinkroni motori). Nešto veći naglasak u trećem poglavlju je na frekvencijskim pretvaračima, točnije ostvarivanju komunikacije između frekvencijskog pretvarača i računala, PG/PC sučelje (engl. *Programming device/Personal Computer Interface*). U istom poglavlju prikazano je parametriranje frekvencijskih pretvarača pomoću programskih paketa, upravljanje frekvencijskim pretvaračima te je prikazan postupak dobivanja parametara asinkronog motora pomoću automatskog parametriranja frekvencijskih pretvarača. Parametri dobiveni automatskim parametriranjem se uspoređuju s parametrima dobivenim matematičkim modelima. Četvrto poglavlje daje uvid u postavljanje *hardware* konfiguracije, komunikaciju PLC-a s računalom, programiranje PLC-a te slikovito i opisno prikazuje izmjenu podatkovnih paketa između PLC-a i frekvencijskih pretvarača. Peto poglavlje prikazuje razvoj SCADA/HMI (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition/Humane Machine Interface*) sučelja za upravljanje i nadzor nad frekvencijskim pretvaračima, odnosno asinkronim motorima, te pokretanje i izvođenje HMI sučelja u stvarnom vremenu. U šestom poglavlju prikazani su rezultati upravljanja asinkronim motorima, gdje su pomoću programskog paketa snimljeni valni oblici upravljanja asinkronim motorom. U posljednjem poglavlju dan je zaključak diplomskog rada, gdje su iznesene najvažnije činjenice vezane za sam diplomski rad.

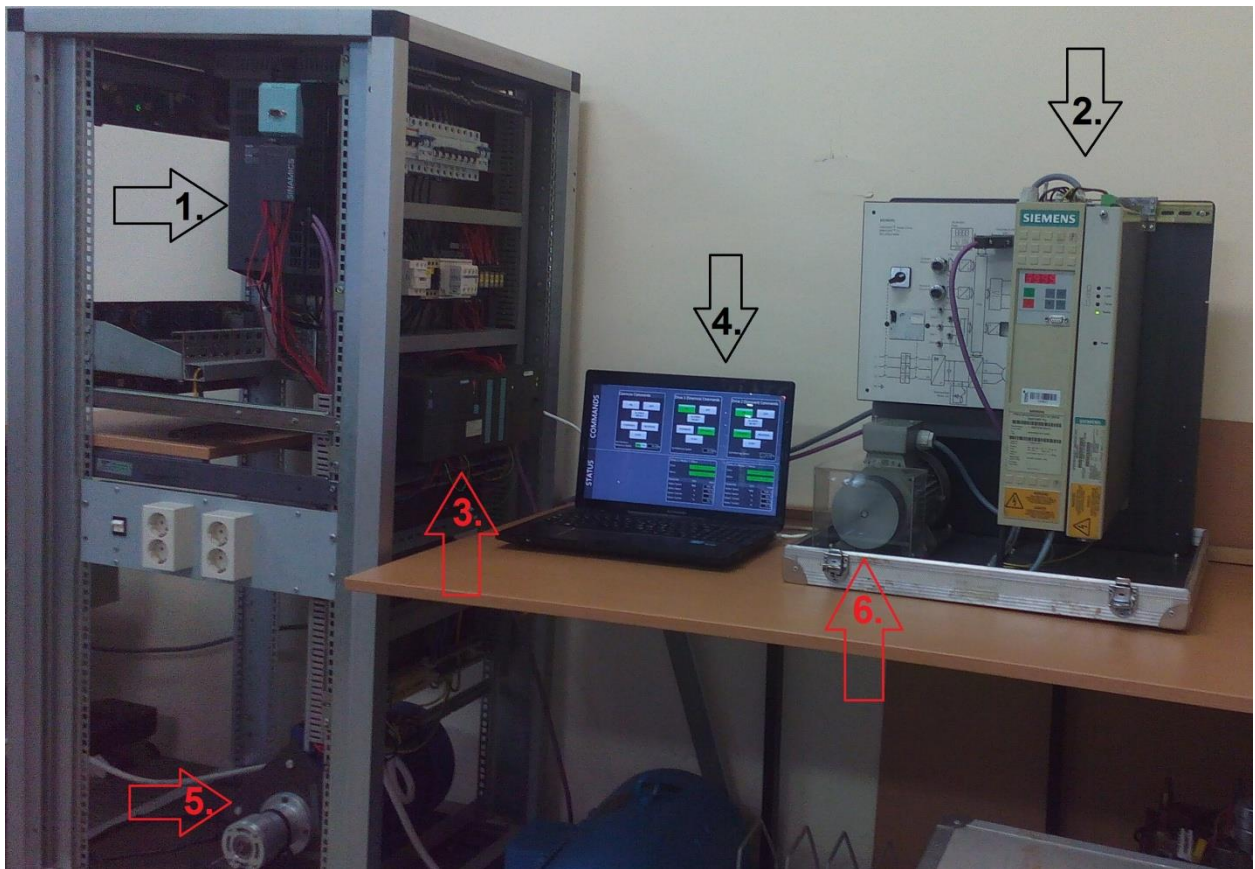
Zadatak ovog diplomskog rada je da se u laboratoriju za elektromotorne pogone realizira sustav upravljanja električnim asinkronim motorima koristeći raspoloživi programabilni logički upravljač (PLC), dva frekvencijska pretvarača s pripadnim asinkronim motorima te radnu stanicu za programiranje i nadzor sustava SCADA, koji su međusobno povezani PROFIBUS (engl. *Process Field Bus*) industrijskim komunikacijskim sustavom. Sustav za upravljanje i nadzor predstavlja vezu između operatora (čovjeka) i stroja, gdje se pomoću tekstualnih i grafičkih prikaza omogućuje jednostavniji nadzor, upravljanje i otklanjanje problema unutar postrojenja. Uz to, u programskom alatu MATLAB/Simulink potrebno je izraditi model sustava upravljanja te simulirati promjene referentne vrijednosti brzine. Osim kroz simulaciju, projektirani regulator je potrebno provjeriti i na izgrađenom sustavu upravljanja, uspoređujući vladanje modela sustava i laboratorijskog postava.

2. LABORATORIJSKI POSTAV

U laboratoriju za elektromotorne pogone, korištenjem postojeće i raspoložive opreme realiziran je sustav upravljanja električnim motorima preko PROFIBUS industrijske sabirnice.

Laboratorijski postav predstavlja električni pogon koji se može podijeliti na:

- Sustav za upravljanje i nadzor – PLC (engl. *Programmable Logic Controller*) i SCADA (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*), upravljanje i regulacija pretvaračkog uređaja s električne strane (zadavanje referentnih vrijednosti) te nadzor tehnološkog procesa pomoću računala → na slici 2.1. označeni brojevima 3. i 4.,
- Pretvarački uređaj – regulira režim rada elektromotora (frekvencijski pretvarači → promjena brzine vrtnje elektromotora) → na slici 2.1. označeni brojevima 1. i 2.,
- Elektromotor – glavni dio elektromotornog pogona, pretvara privedenu električnu energiju u mehaničku energiju radnom mehanizmu → na slici 2.1. označeni brojevima 5. i 6.,
- Prijenosni uređaj – naprave i elementi neophodni za prijenos mehaničke energije između elektromotora i radnog mehanizma (spojke, osovine, remenice i sl.) [2].



Sl. 2.1. Realizacija laboratorijskog postava.

Laboratorijski postav prikazan je slikom 2.1., na kojoj je vidljivo da se sastoji od dva frekvencijska pretvarača s pripadajućim asinkronim motorima na kojima se provodi upravljanje, jedne PLC jedinice te osobnog računala na kojem je izgrađen sustav za upravljanje i nadzor. Ono što nedostaje u laboratorijskom postavu da bi bio električni pogon u punom smislu je radni mehanizam – stroj ili strojevi koji služe za obavljanje mehaničkog rada (teret na osovinu rotora asinkronog motora) potrebnog tehnološkom procesu. Prema tome, elektromotori su neopterećeni na osovinama, točnije u praznom hodu.

2.1. Sustav za komunikaciju, upravljanje i nadzor

Sustav za upravljanje i nadzor predstavlja vezu između operatera (čovjeka) i stroja, HMI (engl. *Humane Machine Interface*). Pomoću tekstualnih i grafičkih prikaza omogućuje se operaterima jednostavniji nadzor, upravljanje te otklanjanje eventualnih problema unutar postrojenja.

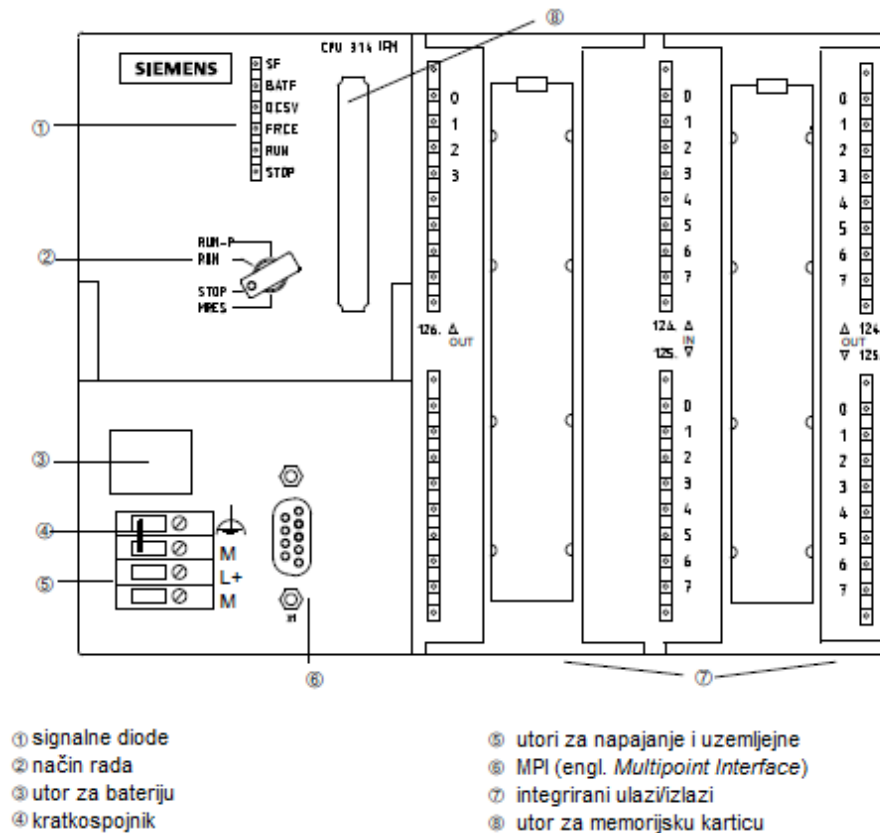
2.1.1. PLC – SIMATIC S7 300

Programabilni logički upravljači (PLC-i) su kompaktna procesna računala koja posjeduju visoku pouzdanost, znatna smanjenja dimenzija i potrošnje (gubitke) te visoku fleksibilnost u sklopovskom smislu (programirljivost), što im omogućuje vrlo široku primjenu te upravljanje mnogim različitim postrojenjima i procesima u industriji, ali i kućanstvu [27]. Funkcije upravljanja spremljene su u obliku programa u memoriji upravljačke jedinice. Zbog sve većih tehnoloških zahtjeva procesa, PLC-i potiskuju releje i sklopnike, koji su pomoću električkih veza činili automatizirani sustav upravljanja. PLC-i su sastavljeni od standardnih elektroničkih komponenata koje izvršavaju željene funkcije upravljanja s pomoću korisničkog programa, a koriste se za manje i srednje radne značajke u prerađivačkoj industriji (S7 300) [4].

Kako bi se upravljalo laboratorijskim postavom, PLC se sastoji od standardne procesorske jedinice (engl. *Central Processing Unit, CPU*) i dodatnih modula u svrhu ostvarivanja željenih funkcija. Rješenje zadatka automatizacije pohranjuje se u memoriji CPU-a u obliku programskih naredbi koje se izvode ciklički (nakon što je korisnički program u potpunosti izveden, slijedi ponovno izvođenje programa ispočetka). Kompletan PLC zajedno sa svim modulima smješten je na okvir (šina) te se naziva jedinicom, čija je jezgra CPU (slika 2.2.). Jedinicu ovog laboratorijskog postava čine:

- ✓ napajanje (engl. *Power Suplly, PS*) – PS 307 5A (6ES7 307-1EA00-0A00);
- ✓ centralna procesorska jedinica - CPU 314 IFM-MC (6ES7 314-5AE10-0AB0), V1.2;

- ✓ komunikacijski procesor PROFIBUS (engl. *Communication Processor*, CP) – CP 342-5 (6GK7 342-5DA02-0XE0), V5.0;
- ✓ komunikacijski procesor *ethernet* – CP 343-1 (6GK7 343-1EX10-0XE0), V1.0 .



Sl. 2.2. Prikaz prednje strane CPU-a 314 IFM-MC [5].

Osim navedenih modula korištenih za upravljanje i nadzor laboratorijskog postrojenja, ovaj PLC ima mogućnost proširenja sa sljedećim modulima:

- ✓ moduli sučelja (engl. *Interface Module*, IM) – međusobno povezuju okvire,
- ✓ signalni moduli (engl. *Signal Modules*, SM) – prilagođavaju signale iz upravljanog postrojenja na unutarnju razinu signala. Dostupni su kao moduli za digitalne i analogne signale,
- ✓ funkcijski moduli (engl. *Function Modules*, FM) – izvode vremenski kritične procese neovisne o CPU-u (npr. brojenje, upravljanje položajem i sl).

Kompletnu jednookvirnu konfiguraciju čine istosmjerni izvor napajanja do 24 [V] (slot 1) koji se smješta na montažnoj šini lijevo od CPU-a, zatim se smješta sam CPU (slot 2) iza kojeg se smješta IM modul (slot 3), ukoliko postoji. Nakon IM modula se smještaju ulazno/izlazni (engl. *Input/Output*, I/O) moduli (SM, CP i FM moduli) i to do maksimalno 8 modula (slotovi od 4 do 11). Ukoliko jednookvirna konfiguracija nije dovoljna, na jedan CPU se može odabrati i

dvookvirna (do 16 I/O modula) ili četverookvirna konfiguracija (do 32 I/O modula) [4], koja je prikazana slikom 2.3.



Sl. 2.3. Četverookvirna konfiguracija S7-300 PLC-a s jednim CPU-om [13.]

2.1.2. SCADA / HMI

Sve veći broj mjernih mjesta, više informacija za obradu i prijenos, te sve složenija organizacija proizvodnje zahtijevaju brzu obradu velikog broja podataka sa što većom tačnošću. Iz tog razloga se pojedine funkcije operatera zamjenjuju tehničkim uređajima, u pravilu računalima, gdje je takav pristup primijenjen u obradi podataka [27].

SCADA sustavi (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*) nisu potpuno upravljivi, nego su orijentirani na nadzor procesa u višekorisničkim sustavima. Kao takav je čisti programski paket koji je instaliran na hardveru koji je povezan s PLC-om ili nekim drugim hardverskim modulom. SCADA sustavi imaju široku primjenu u upravljanju i nadzoru industrijskih postrojenja i opreme, u elektroenergetici, telekomunikacijama, prerađivačkim industrijama i mnogim drugim tehnološkim procesima. Osnovni elementi ili podsustavi SCADA sustava su HMI, nadzorni računalni sustav (sakuplja podatke i šalje upravljačke naredbe), komunikacijska infrastruktura i RTU (engl. *Remote Terminal Unit*), jedinice koje se spojene neposredno sa sensorima unutar procesa. Vrlo važna svojstva SCADA sustava su kompatibilnost s različitim proizvođačima opreme, mogućnost prikupljanja podataka i do nekoliko stotina tisuća

ulazno/izlaznih jedinica, robusnost, mogućnost umrežavanja, pouzdanost, prikupljanje i prikaz podataka u stvarnom vremenu, pohrana podataka, upravljanje istima te mogućnost upozoravanja pomoću alarma u slučaju uočavanja bilo kakve nepravilnosti u radu procesa [15].

HMI (engl. *Humane Machine Interface*) ili sučelje čovjek-stroj predstavlja potrebne alate i uređaje za upravljanje strojem ili postrojenjem za nadziranje i upravljanje procesom. Današnji HMI uređaji (uređaji s ekranima osjetljivim na dodir, paneli s tipkama i sl.) zadovoljavaju sve zahtjeve koji se postavljaju pred njih (prikupljanje i obrada procesnih veličina, komunikacija).

HMI uređaji mogu se povezati s PLC-om preko MPI komunikacije, PROFIBUS-a ili industrijskog *etherneta*. U ovom radu komunikacija između HMI uređaja (računalo) i PLC-a ostvarena je pomoću industrijskog *etherneta* koji se spaja na komunikacijski procesor CP-343-1.

WinCC (engl. *Windows Control Center*) je inženjerski alat koji omogućava konfiguriranje i razvoj SCADA/HMI sustava. Pomoću WinCC-a omogućava se širok izbor dodatnih paketa radi što vjerodostojnije vizualizacije i funkcionalnosti prilikom upravljanja i nadzora samim procesom [4]. Konfiguriranje SCADA/HMI sučelja detaljnije je prikazano u petom poglavlju.

2.1.3. PROFIBUS DP komunikacijska sabirnica

PROFIBUS DP (engl. *Process Field Bus Decentralised Peripherals*) ili procesna sabirnica za decentraliziranu periferiju, koristi se za komunikaciju PLC-a sa sensorima, aktuatorima, drugim PLC-ima (komunikacija više procesnih računala) i izvršnim članovima (kao što su ventili, pogoni, operatorski paneli i sl.) pomoću središnjeg upravljanja u automatiziranim tehničkim procesima (PLC). Osim toga za prijenos podataka koristi se oklopljeni dvožični vod ili optički kabel od stakla i plastike. Umjesto zasebnih vodova za svaki od signala, PROFIBUS DP koristi istu sabirnicu za prijenos signala. Iz tog razloga je PROFIBUS DP jeftina i fleksibilna zamjena za prijenos signala standardnim 24 [V] i 20 [mA] vodovima. Duljina kabela izravno se odražava na brzinu prijenosa podataka, što je prikazano tablicom 2.1.

Tab. 2.1. Ovisnost brzine prijenosa podataka o duljini PROFIBUS DP kabela [12], [27].

Brzina prijenosa podataka [kbit/s]	Duljina kabela [m]
9.6 do 93.75	1200
187.5	1000
500	400
1500	200
3000 do 12000	100

PROFIBUS DP je zbog svojih visokih performansi i mogućnosti proširenja široko rasprostranjen na prostoru Europe te je međunarodno standardiziran. Karakteristike koje odlikuju PROFIBUS DP su:

- ✓ velika brzina prijenosa,
- ✓ sposobnost rada u stvarnom vremenu i s križnim prometom,
- ✓ otpornost na elektromagnetske smetnje,
- ✓ sigurnosno orijentiran protokol.

Razni zahtjevi u automatiziranim pogonima tijekom vremena doveli su do razvijanja više verzija, odnosno komponenti PROFIBUS DP-a:

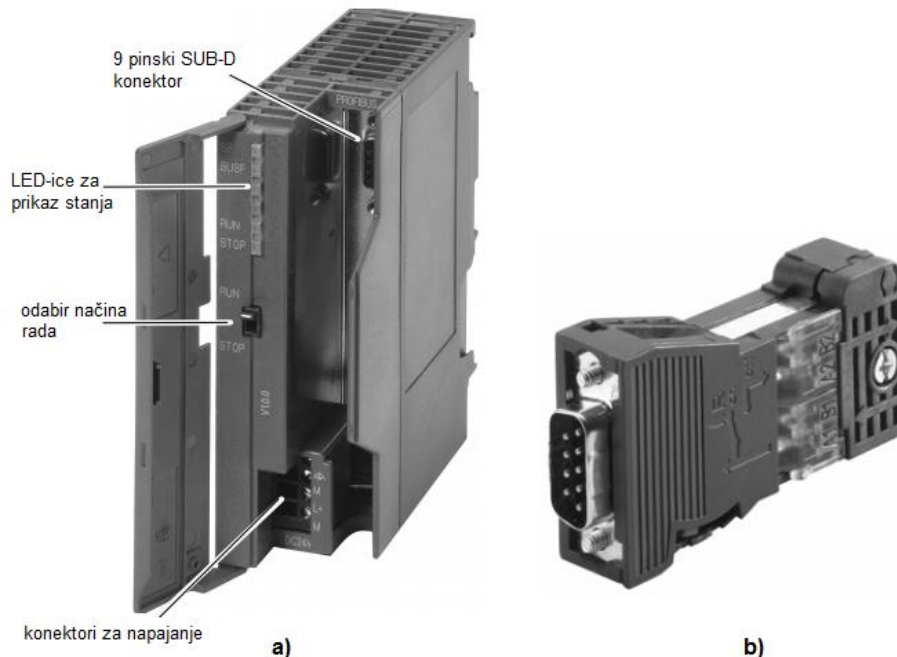
- ✓ PROFIBUS DP – koristi se za cikličku (sinkronu) izmjenu podataka i dijagnostiku,
- ✓ PROFIBUS DP-V1 – koristi se za acikličku i cikličku izmjenu podataka uz obradu alarma,
- ✓ PROFIBUS DP-V2 – koristi se za izokronu izmjenu podataka [1], [4], [7], [27].

PROFIBUS DP radi isključivo u linijskoj strukturi sa zaključnim otpornicima. Na jednu komunikacijsku sabirnicu mogu se spojiti do najviše 32 stanice (glavni i podređeni čvorovi). Glavni čvor u laboratorijskom postavu je CPU 314 IFM-MC s PROFIBUS modulom CP 342-5. Podređeni čvorovi su upravljačke jedinice frekvencijskih pretvarača (izvršni članovi) koji upravljaju asinkronim elektromotorima. Izmjena podataka konfigurira se pomoću programskog paketa STEP 7 i parametranjem frekvencijskih pretvarača, što je detaljnije opisano u trećem poglavlju. Zaključni otpornici moraju biti uključeni na konektoru ili jedinici koji su spojeni na početku i na kraju komunikacijskog kabela, kao što je prikazano slikom 2.4. (crveno označen konektor ima uključen zaključni otpornik). Ukoliko je duljina kabela ili broj sabirnica veći od dozvoljenih, koriste se RS 485 obnavljači signala ili ripiteri, koji pojačavaju i generiraju sabirničke signale. Sabirnici može pristupiti maksimalno 127 čvorova, a čvorovi mogu biti aktivni (šalju podatke i može pristupiti sabirnici) ili pasivni (prima podatke, nema odobrenje za pristup sabirnici) [4], [27].



Sl. 2.4. Zaključni otpornik na PROFIBUS DP kabeu.

Kao što je prikazano na slici 2.2., CPU 314 IFM-MC nema PROFIBUS DP konektor. Iz tog razloga je na jedinicu dodan PROFIBUS komunikacijski procesor CP 342-5 prikazan slikom 2.5.a, s pripadajućim konektorom (slika 2.5.b) . Za korištenje ovog komunikacijskog procesora, potrebno je koristiti FC1 i FC2 blokove (engl. *Function*), što je detaljnije objašnjeno u četvrtom poglavlju.



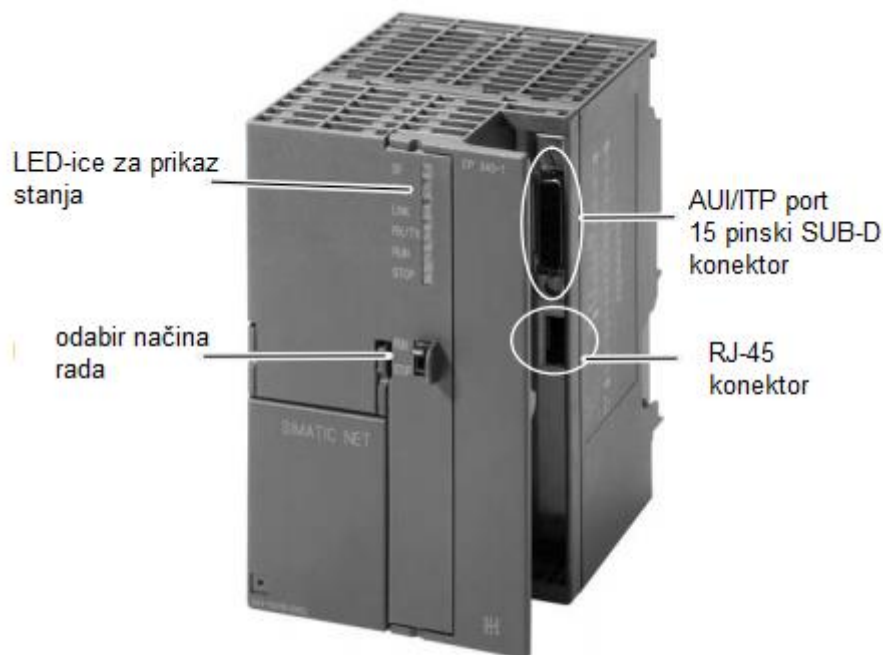
Sl. 2.5. Komunikacijski procesor CP 342-5 (a) i 9 pinski SUB-D konektor za PROFIBUS komunikaciju (b).

2.1.4. Industrijski *ethernet*

Industrijski *ethernet* (baziran je na međunarodnom standardu IEEE 802.3) koristi se za povezivanje računala i PLC-a, točnije u laboratorijskom postavu se pomoću njega omogućuje programiranje PLC-a te se upravlja i nadzire laboratorijskim postavom pomoću izvedenog HMI sučelja. Izvedba industrijskog *ethneta* može biti električna, optička ili bežična mreža. U laboratorijskom postavu korištena je električna mreža gdje se koriste upleteni parični kabeli (engl. *Fast Conenect Twisted Pair*, FC TP) s RJ-45 konektorom. Osim takve izvedbe, postoji i izvedba s industrijski upletenim paričnim kabelom (engl. *Industrial Twisted Pair*, ITP) sa SUB-D konektorom. Brzina prijenosa podataka koja se ostvaruje pomoću standardnog industrijskog *ethneta* je 10 [Mbit/s], korištenjem *Fast Ethneta* mogu se postići brzine do 100 [Mbit/s], a korištenjem *Gigabit Ethneta* mogu se postići brzine do 1 [Gbit/s]. Dodatne prednosti korištenja industrijskog *ethneta* su dobra otpornost na elektromagnetske smetnje, velika brzina s mogućnošću rada na velike udaljenosti, kompatibilnost s proizvodima raznih proizvođača, laka

integracija s podatkovnim mrežama, mogućnost nadogradnje i proširenja sustava (u jednom segmentu mreže može biti umreženo do 1024 čvora) te uštede u investiciji [4], [14], [27].

Kako CPU nema konektor za *ethernet*, koristi se komunikacijski procesor CP 343-1, prikazan slikom 2.6. s pripadajućim RJ-45 konektorom za komunikaciju. Industrijski *ethernet* omogućava brzu razmjenu velikih količina podataka između S7 jedinica i uređaja drugih proizvođača (od 10 do 100 [Mbit/s]). U korisničkom programu izmjenu podataka omogućuju komunikacijske funkcije koje su integrirane u operacijskom sustavu CPU-a, a koje se konfiguriraju pomoću programskog alata STEP 7, što je detaljnije opisano u četvrtom poglavlju.



Sl. 2.6. Komunikacijski procesor CP 343-1.

2.1.5. Ostale komunikacijske pod mreže

Sve SIMATIC S7 jedinice imaju mogućnost izmjenjivanja podataka, koju općenito samostalno obavlja CPU. Sve veći zahtjevi u tehnološkim procesima, te omogućavanje lakšeg nadziranja i upravljanja procesima zahtijevaju određene komunikacijske protokole koje CPU ne podržava. Korištenjem dodatnih komunikacijskih modula mogu se kreirati razne pod mreže. U prethodna dva poglavlja opisani su PROFIBUS standard i industrijski *ethernet*. Ovisno o zahtjevima za brzinu prijenosa i izmjenu podataka, postoje još i sljedeće pod mreže:

- ✓ MPI (engl. *Multi Point Interface*) – razvijen je za jednostavnu razmjenu podataka između S7 300/400 jedinica,

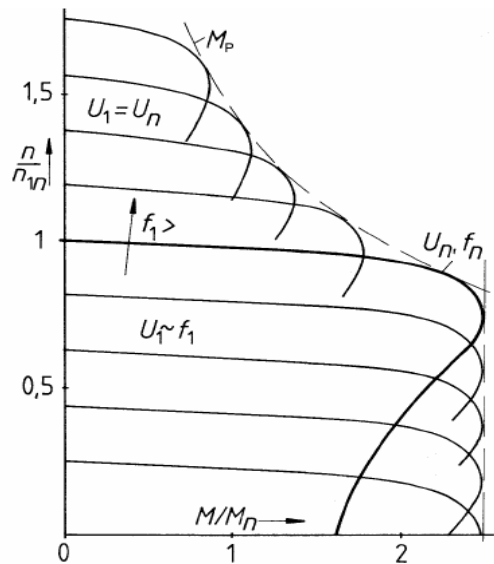
- ✓ AS sučelje (engl. *Actuators and Sensors Interface*) – koristi se za komunikaciju sa sensorima i aktuatorima na sabirničkoj razini,
- ✓ Izravna komunikacija (engl. *point to point*) – koristi se fizičkim sučeljem RS-232 ili RS-485 kako bi se povezale SIMATIC jedinice i ulazno/izlazne jedinice sa serijskom vezom [4].

2.2. Pretvarački uređaji – frekvencijski pretvarači

Prema izrazu (2-1) upravljanje brzinom n asinkronih motora može se ostvariti na sljedeće načine:

- promjenom broja para polova p – postiže se odvojenim namotima za svaki broj pari polova ili složenijom izvedbom namota čijim se prespajanjem dobije različit broj polova,
- promjenom klizanja s – postiže se smanjenjem priključenog napona ili uključivanjem dodatnog otpora u rotorski krug kod kolutnog motora (veliki gubitci),
- promjenom frekvencije f – postiže se primjenom pretvarača napona i frekvencije izvedenih pomoću energetske elektronike [6]. Ovakav oblik regulacije je jedini isplativi način regulacije koji omogućava širok opseg promjene brzine vrtnje [23],

$$n = \frac{f \cdot p}{60} (1 - s). \quad (2-1)$$



SI. 2.7. Vanjska karakteristika asinkronog motora [6].

Kod pogona koji zahtijevaju promjenjivu brzinu vrtnje, veza između asinkronog motora i mreže ostvaruje se spajanjem pretvaračkog uređaja, frekvencijskog pretvarača. U ovom diplomskom radu asinkronim motorima upravlja se preko frekvencijskih pretvarača, stoga se ostali načini promjene brzine vrtnje asinkronog motora ne razmatraju.

Na slici 2.7. prikazana je vanjska karakteristika asinkronog motora, koja ujedno predstavlja područje regulacije brzine vrtnje izmjeničnog motora promjenom frekvencije i napona statora. Do nazivne brzine vrtnje izmjeničnim motorom se upravlja promjenom napona (U) i frekvencije (f) statora uz konstantan magnetski tok (područje konstantnog momenta), a iznad nazivne brzine vrtnje promjenom frekvencije uz konstantan nazivni napon statora (područje konstantne snage). Iznad nazivne brzine vrtnje magnetski tok (Φ) motora se smanjuje, jer je amplituda napona statora konstantna, izraz (2-2). Povećanjem napona iznad nazivne vrijednosti došlo bi do zasićenja magnetskog kruga stroja, što uzrokuje preveliku struju magnetiziranja [23]:

$$\Phi_m = \frac{U}{f \cdot k} \cdot \quad (2-2)$$

Frekvencijski pretvarači u najjednostavnijem slučaju imaju tri komponente, gdje je tok energije od pojne mreže prema asinkronom motoru:

- ispravljač,
- istosmjerni međukrug,
- izmjenjivač.

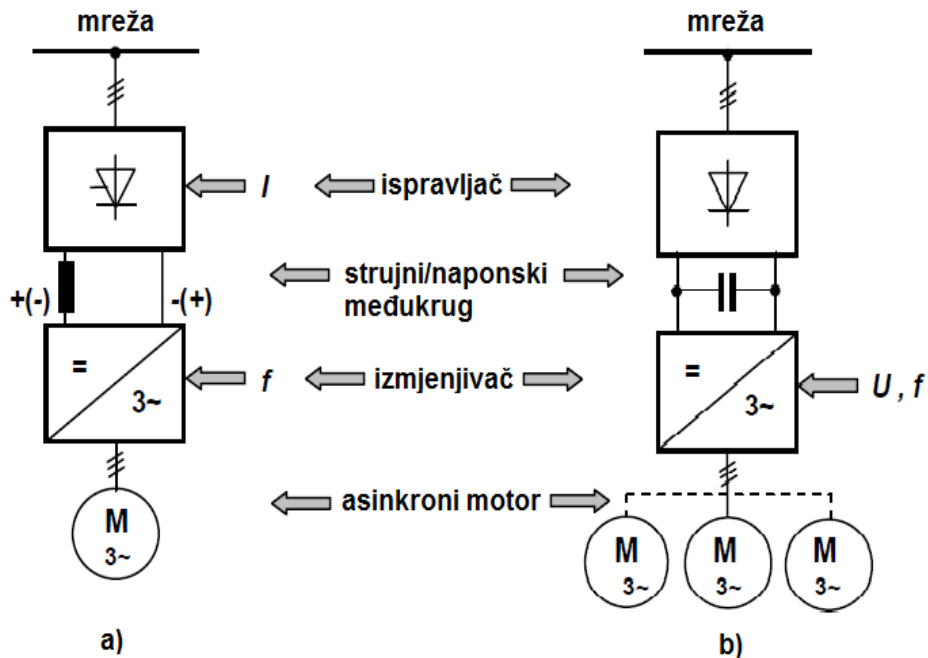
S obzirom da frekvencijski pretvarači pretvaraju izmjenični napon pojne mreže u izmjenični napon promjenjive frekvencije i promjenjiva amplitude napona, ta pretvorba se odvija u dva koraka:

- napon/struja mreže pomoću ispravljača se pretvaraju u istosmjerni napon/struju.
- istosmjerni napon/struja se u izmjenjivaču pretvaraju u izmjenični napon te predaju asinkronom motoru.

Ovisno o tome da li je bitna veličina istosmjernog međukruga napon ili struja, frekvencijski pretvarači se dijele na pretvarače s naponskim međukrugom ili strujnim međukrugom, slika 2.8.

Kod frekvencijskih pretvarača sa strujnim međukrugom koristiti se prigušnica velikih dimenzija, te se učinski dio pretvarača treba prilagoditi priključenom motoru. Iz tog razloga, te zbog toga što su frekvencijski pretvarači s naponskim međukrugom pogodni za grupne pogone (spajanje motora paralelno na jedan frekvencijski pretvarač) i mogu izdržati udarna opterećenja, frekvencijski pretvarači s naponskim međukrugom su u potpunosti potisnuli frekvencijske pretvarače sa strujnim međukrugom. Kondenzator u istosmjernom međukrugu služi kao spremnik energije te smanjuje valovitost ispravljenog napona. Istosmjerni međukrug može biti promjenjiv i konstantan, ovisno da li je ispravljač upravljiv ili neupravljiv. Kod promjenjivog

istosmjernog međukruga ispravljač je upravljiv te se u izmjenjivaču mijenja samo frekvencija. Ako je ispravljač neupravljiv, onda je istosmjerni krug konstantan te se napon i frekvencija mijenjaju u izmjenjivaču.



Sl. 2.8. Blokovski prikaz pogona promjenjive brzine vrtnje s asinkronim motorom i frekvencijskim pretvaračem sa strujnim (a) i naponskim (b) međukrugom.

Dodavanjem kočnog čopera kontrolira se iznos napona istosmjernog međukruga. Naime, kada se energija iz stroja vraća u istosmjerni međukrug, dolazi do punjenja kondenzatora i podizanja napona. Ukoliko napon dostigne granicu dopuštenog iznosa, uključuje se tranzistor u kočnom sklopu i sva energija se preusmjerava na otpornik, na kojem se troši u obliku topline. Kočnim čoperom i otpornikom u istosmjernom međukrugom, omogućava se generatorski režim rada motora, što znači da pri brzinama većim od sinkrone, motor prelazi u generatorski režim rada. Na taj način se osigurava rad pogona u sva četiri kvadranta [1]. Drugi način ostvarenja četvero kvadrantnog pogona jest vraćanje energije u mrežu (regenerativni rad ispravljača).

Promjena frekvencije f_1 i napona U_1 na statoru asinkronog motora [6] prema izrazu (2-3) mora biti istovremena i konstantna kako bi se prekretni moment M_p zadržao konstantnim i kako bi se vanjska karakteristike brzine vrtnje $n=f(M)$ zadržala u istom obliku (područje konstantnog momenta):

$$\frac{M_p}{M_{pn}} = \left(\frac{U_1}{U_n}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_n}{f_1}\right)^2. \quad (2-3)$$

Ovo je najčešći, ali ne i jedini zakon upravljanja. Povećanjem frekvencije napona statora iznad nazivne vrijednosti, brzina vrtnje stroja može se podići iznad nazivne, ali uz konstantan napon, jer povećanjem napona statora iznad nazivne vrijednosti dolazi do zasićenja magnetskog kruga stroja. U tom slučaju, prema izrazu (2-3) dolazi do opadanja prekretnog momenta s kvadratom omjera statorskog napona i frekvencije $(U_1/f_1)^2$ [23].

Prema slici 2.7., vidljivo je kako se istovremenom promjenom napona i frekvencije mreže osigurava paralelno pomicanje karakteristike $n=f(M)$ uzduž osi brzine vrtnje n te na taj način stroj radi s konstantnim prekretnim momentom M_p te može biti opterećen s nazivnim momentom M_n . Ovakav način upravljanja pogonom naziva se **U/f upravljanje ili skalarna regulacija**. Glavni nedostatak skalarne regulacije je ovisnost brzine vrtnje o opterećenju motora, zbog toga se ova metoda često koristi za manje zahtjevne pogone kao što su crpke ili ventilatori.

Drugi način upravljanja asinkronim motorima je **vektorska regulacija**. U zahtjevnijim pogonima koji se javljaju u automatiziranoj tvorničkoj proizvodnji, servo pogonima ili robotici potrebno je precizno regulirati brzinu vrtnje ili položaj rotora. Preduvjet za to je mogućnost izravnog upravljanja momentom motora, a koji se ostvaruje vektorskom regulacijom. U vektorskoj regulaciji posebno se upravlja magnetskim tokom i momentom motora [10].

Zbog složenog matematičkog opisa asinkronog motora, vektorska regulacija je ostvarena isključivo u frekvencijskim pretvaračima s digitalnim regulatorom, što je danas standardna funkcija pretvarača frekvencije. Vektorska regulacija se temelji na opisu asinkronog motora pomoću prostornih faza koji geometrijski prikazuju trenutno stanje statorskih napona, struja i magnetskih tokova motora. Svakom namotu dodjeljuje se pripadajući fazor napona, struje i magnetskog toka te se superpozicijom svakog od pojedinačnih fazora dobiva prostorni fazor određene veličine koji se okreće s frekvencijom napona napajanja. Matematički opis prostornog fazora ostvaren je koordinatnim sustavima:

- mirni koordinatni sustav – transformacija vektora iz trofaznog ($a-b-c$) sustava u dvofazni ($\alpha-\beta$) sustav, razmatra se uz pretpostavku da su ti sustavi međusobno nepomični (Clarkova transformacija signala u vremenskoj domeni). Osi koordinatnog sustava označavaju se s α i β . Komponente prostornog fazora su izmjenične veličine koje imaju sinusni tijek.
- rotirajući koordinatni sustav – orijentiran je u smjeru rotora, transformacija iz stacionarnog ($\alpha-\beta$) sustava u sinkrono rotirajući sustav (Parkova transformacija). Osi koordinatnog sustava označavaju se s d i q . Komponente prostornog fazora (naponi, struje i ulančani tokovi) su istosmjerne veličine [1].

Izrazima (2-4) i (2-5) može se opisati okretni moment M asinkronog motora, gdje je vidljivo kako okretni koordinatni sustav daje dvije komponente struje:

- i_{sd} – komponenta struje odgovorna za ulančani tok ψ_{rd} , odnosno stvara magnetsko polje u asinkronom motoru i djeluje analogno struji uzbude istosmjernog motora,
- i_{sq} – komponenta struje odgovorna za ulančani tok ψ_{rd} , odnosno za okretni moment motora i djeluje analogno struji armature istosmjernog motora:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{rd} \cdot i_{sq}, \quad (2-4)$$

$$\psi_{rd} = L_m \cdot i_{sq}, \quad (2-5)$$

gdje je:

- induktivitet magnetiziranja L_m ,
- induktivitet rotora L_r ,
- broj pari polova p .

Na ovaj način, asinkroni motor je prema regulaciji sveden na istosmjerni motor, što je ideja vektorske regulacije koja se osigurava odgovarajućim elektroničkim sklopovima. U tu svrhu potrebno je razdvojiti komponente poprečne i uzdužne osi motora te ih odvojeno regulirati. Zbog toga se regulator struje sastoji od dva regulatora, za svaku komponentu struje [8]. Pored toga regulira se i brzina vrtnje asinkronog motora. Vektorska regulacija se primjenjuje za motore svih raspona snaga, mehanička brzina vrtnje slijedi točno zadanu referentnu vrijednost brzine vrtnje, a regulacija je stabilna i prilikom udaraca tereta, što daje bolje dinamičke karakteristike u odnosu na skalarnu regulaciju [1]. Primjeri procesa i postrojenja gdje se zahtjeva promjenjiva brzina vrtnje su:

- strojevi za izradu papira,
- valjačke pruge,
- strojevi za izvlačenje žica,
- strojevi za valjanje folija,
- strojevi za izvlačenje umjetnih vlakana,
- dizala.

2.2.1. Siemens Sinamics G120

Frekvencijski pretvarač Sinamics G120 sagrađen je kao modularni sustav za male i srednje snage. Laboratorijski model sastoji se od energetske jedinice (engl. *Power Module*, PM 250) i upravljačke jedinice (engl. *Control Unit*, CU 240S-DP) s PROFIBUS sučeljem za komunikaciju. Energetska jedinica napaja asinkroni motor strujom u određenim granicama. Pouzdanost i fleksibilnost pogona osigurana je IGBT tehnologijom (engl. *Insulated Gate Bipolar*

Transistor) s pulsno-širinskom modulacijom napona motora (mijenja se srednja vrijednost izlaznog napona omjerom vremena trajanja ukapčanja/iskapčanja) i s promjenjivom frekvencijom pulsa. Upravljačka jedinica predstavlja vezu s periferijom (PLC, računala) te upravlja i nadzire modul snage na koji je priključen motor [7].

U ulaznom krugu frekvencijskog pretvarača ispravlja se trofazni izmjenični napon pomoću ispravljača. Ispravljeni istosmjerni napon se pohranjuje u kondenzatorima (istosmjerni međukrug), te se privodi izlaznom krugu u kojem se pomoću izmjenjivača pretvara u trofazni izmjenični signal promjenjive amplitude i frekvencije (slika 2.8.b).

Tab. 2.2. Značajnije tehničke karakteristike modula snage PM 250 frekvencijskog pretvarača.

Nazivni napon U_n	380-480 [V]; 3 AC
Raspon frekvencije upravljanja f	
✓ vektorska regulacija	0-200 [Hz]
✓ U/f upravljanje	0-600 [Hz]
Frekvencija pulsa	4 [kHz]
Učinkovitost invertera η	0.95-0.97 [%]
Struja	
✓ Nazivna ulazna/izlazna I_n	18 [A]
✓ Maksimalna I_{max}	26.4 [A]
Nazivna snaga P_n	5.5 [kW]

U tablici 2.2. prikazane su značajnije tehničke karakteristike energetske jedinice frekvencijskog pretvarača. Još jedna važna karakteristika energetske jedinice je preopterećenje. Energetska jedinica može izdržati opterećenje do 200 % od nazivne vrijednosti u trajanju od 3 sekunde ili opterećenje od 150 % od nazivne vrijednosti u trajanju do 57 sekundi. Pored toga, energetska jedinica ima ugrađene funkcije zaštite od podnapona, prenapona, preopterećenja, zemljospoja, kratkog spoja, dodirnog napona, blokiranja motora, pregrijavanja motora, pregrijavanja izmjenjivača te blokadu parametara. Frekvencija pulsa se može povećati do 16 [kHz], ali se time gubi na snazi energetske jedinice [9]. Više o parametranju ovog frekvencijskog pretvarača, prikazano je u trećem poglavlju.

2.2.2. Siemens Masterdrives Simovert FC

Frekvencijski pretvarač Siemens Masterdrives Simovert FC (u daljnjem tekstu samo Simovert) sastoji se od energetske jedinice, čije su karakteristike prikazane tablicom 2.3. Pored toga, ugrađen je kočni čoper s kočnim otpornikom (80 [Ω]), nazivne snage 5 [kW]. Istosmjerni međukrug kod Simovert FC-a je također naponski, što je prikazano slikom 2.8.b.

Tab. 2.3. Značajnije tehničke karakteristike frekvencijskog pretvarača Simovert.

Nazivni napon U_n ✓ U/f upravljanje	380-460 [V] 3 AC 0- U_n
Nazivna frekvencija f_n	50/60 [Hz]
Izlazna frekvencija f ✓ U/f upravljanje	0-300 [Hz]
Struja ✓ Nazivna ulazna/izlazna I_n	6.1 [A]
Nazivna snaga P_n	3 [kW]

Parametriranje, uspostavljanje komunikacije između frekvencijskog pretvarača i računala, te programski alat koji je korišten za omogućivanje istog, prikazani su u trećem poglavlju.

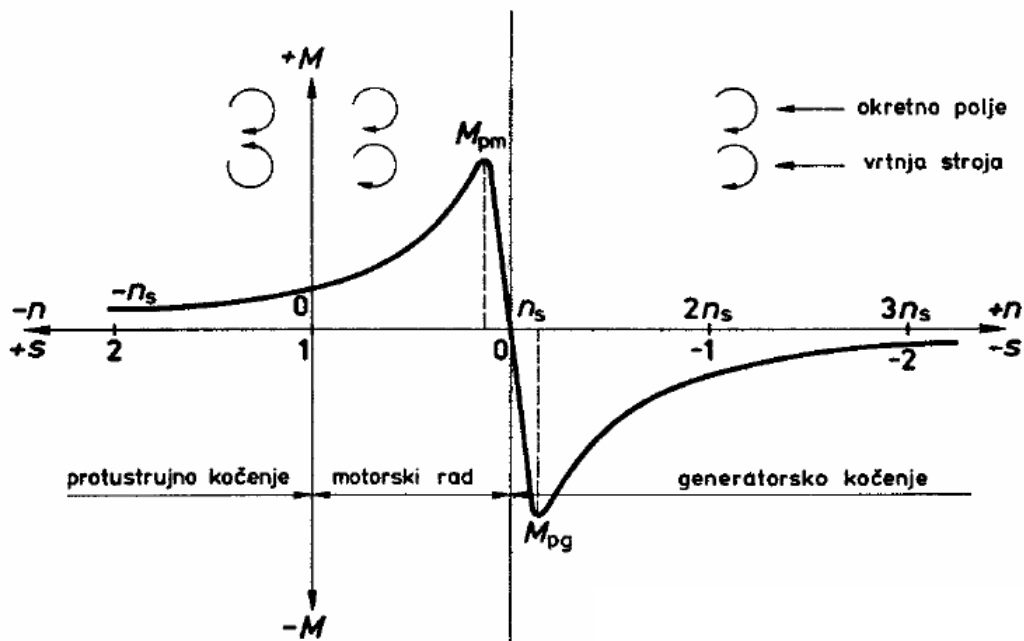
2.3. Asinkroni motori - elektromotori

Asinkroni motori ili samo elektromotori su strojevi izmjenične struje, koji pretvaraju privedenu električnu energiju u mehaničku energiju na osovini. Dobivena mehanička energija predaje se radnom mehanizmu. Asinkroni motori zbog svoje jednostavne konstrukcije, širokog raspona snaga, velike pouzdanosti, niske cijene te ne zahtjevnog održavanja imaju široku primjenu u industrijskim, elektromotornim pogonima, dizalima, ventilatorima, crpkama i td. Samim razvojem tehnologije, točnije energetskih pretvarača i programibilnih uređaja, upotreba asinkronih motora se sve više povećava. Pretežno se koriste kao trofazni motori, a samo manjih snaga kao jednofazni. Asinkroni stroj može raditi u tri područja rada:

- Motorsko područje rada
- Generatorsko područje rada
- Kočno područje rada

Područje rada asinkronog stroja korišteno u ovom diplomskom radu je motorsko područje rada. Raspon vrijednosti brzine vrtnje motora za ovo područje rada prikazan je na slici 2.9. te se kreće od nule do sinkrone brzine n_s koja je proporcionalna frekvenciji f i obrnuto proporcionalna broju pari polova p asinkronog stroja prema izrazu. Izraz za izračun sinkrone brzine vrtnje motora, točnije brzine vrtnje okretnog magnetskog polja, prikazan je izrazom (2-6):

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p}. \quad (2-6)$$



Sl. 2.9. Momentna karakteristika asinkronog stroja [8].

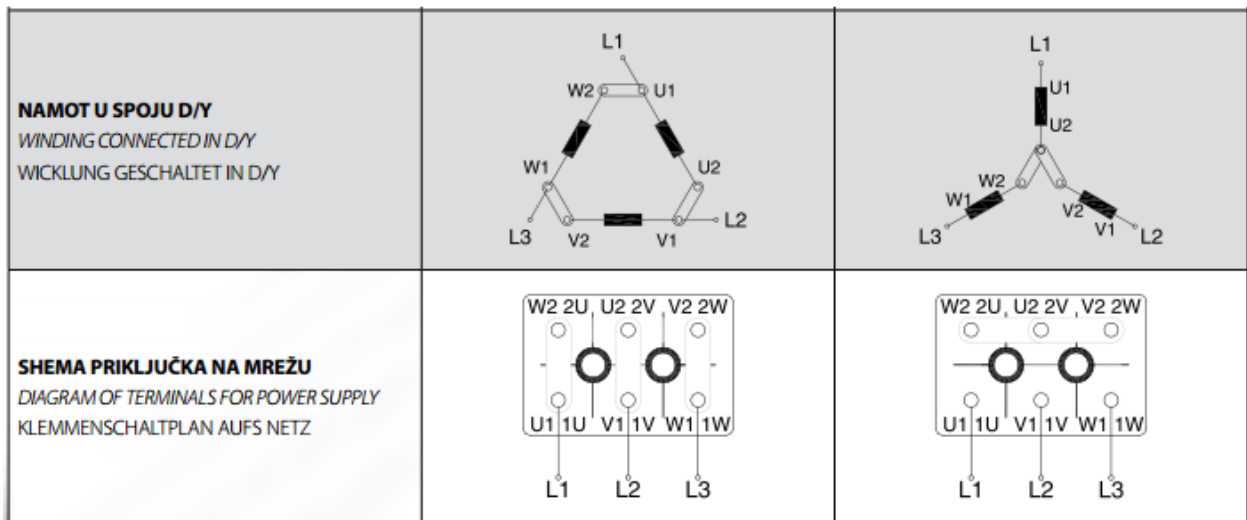
Na slici 2.9. prikazana je momentna karakteristika asinkronog stroja i moguće područje rada asinkronog stroja, gdje je M_{pm} prekretni moment motora, n_s sinkrona brzina, M_{pg} prekretni moment generatora.

Brzina vrtnje rotora asinkronog motora različita je od brzine vrtnje okretnog polja i mijenja se s promjenom opterećenja, te od tuda naziv asinkroni. Kašnjenje brzine vrtnje rotora n za okretnim magnetskim poljem (sinkrona brzina n_s), definira se izrazom (2-7) i naziva se klizanjem s [8]. Umnoškom sinkrone brzine n_s i klizanja s dobije se izraz (2-1) koji definira brzinu vrtnje asinkronog motora n :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}. \quad (2-6)$$

Magnetski krug asinkronog motora sastoji se od nepokretnog dijela, statora i pokretnog dijela, rotora. Stator se sastoji od paketa, namota i konstrukcijskih dijelova i izvodi se kao i kod sinkronih strojeva. Na provrtu cilindričnog paketa izvedeni su utori u kojima je smješten namot. Rotor se sastoji od paketa, namota i konstrukcijskih dijelova. Redovito je cilindričan, valjkasti s utorima na obodu u kojima je namot. Ovisno o vrsti stroja namot rotora može biti izoliran s krajevima izvedenim na kolute (kolutni asinkroni motor) ili neizoliran i kratko spojen (kavezni asinkroni motor) [17].

U laboratorijskom postavu korištena su dva asinkrona trofazna kavezna motora s pripadajućim frekvencijskim pretvaračem za upravljane asinkronim motorima.



Sl. 2.10. Shema spajanja motora na mrežu u spoju zvijezda i spoju trokut [17].

Slika 2.10. prikazuje shemu spajanja asinkronog motora na mrežu u ovisnosti o spoju namota asinkronih motora. Prilikom pokretanja asinkronih motora, može doći do povećanja struja koje teku samim motorom do nekoliko puta od nazivne vrijednosti, stoga se koristi spoj zvijezda za pokretanje asinkronih motora (manja nazivna vrijednost struje).

2.3.1. Končar asinkroni motor - 5 AZ 112M-8

Svaki motor označen je tipskom oznakom koja daje osnovne podatke o motoru u pogledu električke i mehaničke izvedbe. Tipaska oznaka sastoji se iz skupine slova i brojki čije je značenje određeno internim tvorničkim standardom. Motori su sukladni s IEC (engl. *International Electrotechnical Commission*) i EN (engl. *European*) standardima i direktivama. Prema podacima s pločice o nazivnim podacima, motor oznake „5 AZ 112M-8“ je trofazni asinkroni kavezni motor. Značenje pojedine oznake, uz dodatno pojašnjenje prema [16], prikazano je tablicom 2.4. Prvi stupac predstavlja podjelu tipskih oznaka Končar asinkronih motora radi lakšeg snalaženja i tumačenja. Drugi redak predstavlja oznake asinkronog motora prema Končar tipskim oznakama, koje su za ovaj asinkroni motor detaljnije pojašnjene u trećem stupcu.

Nazivni podatci trofaznog asinkronog motora prikazani su tablicom 2.5. Osnovni spoj, pa tako i u ovom slučaju, trofaznih kaveznih asinkronih elektromotora nazivnih snaga do 2.2 [kW] je spoj zvijezda (Y), koji je prikazan slikom 2.10. Industrijske primjene asinkronih motora se mogu podijeliti u pogone s konstantnom i promjenjivom brzinom. Standardna izvedba motora je

prilagođena za normalan kontinuiran pogon i normalne uvjete rada, tj. trajni pogon s konstantnim opterećenjem.

Tab. 2.4. Značenje tipskih oznaka Končar trofaznog asinkronog motora.

	Oznaka	Pojašnjenje
A	bez oznake	IE1 (engl. <i>International Efficiency</i>) standard (standardna učinkovitost)
B	5	motor je izveden u aluminijskom kućištu
C	AZ	asinkroni zatvoreni motor
D	-	dodatna opcija
E	112	IEC veličina (položaj kutije, dimenzije i dr.)
F	M	duljina paketa
G	8	broj polova (4 para polova)
H	-	prigrađeni elementi i ostalo

Trofaznim asinkronim motom Končar upravlja se pomoću Sinamics frekvencijskog pretvarača, čije su karakteristike prikazane tablicom 2.2. Nazivna snaga frekvencijskog pretvarača višestruko je veća od nazivne snage asinkronog motora.

Tab. 2.5. Podatci natpisne pločice Končar trofaznog asinkronog motora.

Spoj	Tipška oznaka	Snaga [kW]	Napon [V]	Struja [A]	cos φ	Frekv. [Hz]	Brzina [okr/min]
D/Y	5AZ 112M-8	1.5	220/380	7.4/4.3	0.71	50	700

Snaga P [kW] asinkronog motora predstavlja mehaničku snagu na osovini. Iz nazivne snage i nazivne brzine vrtnje motora n [okr/min], može se izračunati nazivni moment M [Nm] asinkronog električnog motora prema izrazu (2-8):

$$M = \frac{9550 \cdot P}{n}. \quad (2-8)$$

2.3.2. Siemens asinkroni motor - 1LA5073 - 4AB10 - Z

Prema podacima s pločice o nazivnim podacima, motor oznake „1LA5073 - 4AB10 - Z“ je trofazni asinkroni kavezni motor. Značenje pojedine oznake, uz dodatno pojašnjenje prema [18] prikazano je tablicom 2.6. Siemens asinkroni kavezni motori sukladni su s IEC (engl. *International Electrotechnical Commission*) i EN (engl. *European*) standardima i direktivama.

Tab. 2.6. Značenje tipskih oznaka Siemens trofaznog asinkronog motora.

Znamenke	Značenje	1 2 3 4 5 6 7 – 8 9 10 11 12 1 L A 5 0 7 3 – 4 A B 1 0 - Z
od 1 do 3	ugrađen ventilator na osovini motora za hlađenje	1 L A
4	tip serije	5
od 5 do 7	veličina motora (dimenzije)	0 7 3
8	broj polova	4
od 9 do 10	verzija	A B
11	napon i frekvencija	1
12	konstrukcija	0
	za dodatne karakteristike motora	- Z

Tablica 2.7. prikazuje nazivne podatke Siemens trofaznog asinkronog motora. Asinkroni motor spojen je u zvijezdu (Y) prema shemi prikazanom na slici 2.10.

Tab. 2.7. Podatci natpisne pločice Siemens trofaznog asinkronog motora.

Spoj	Tipaska oznaka	Snaga [kW]	Napon [V]	Struja [A]	cos φ	Frekv. [Hz]	Brzina [okr/min]
D/Y	1LA5073 - 4AB10 – Z	0.37	230/400	1.83/1.05	0.78	50	1370

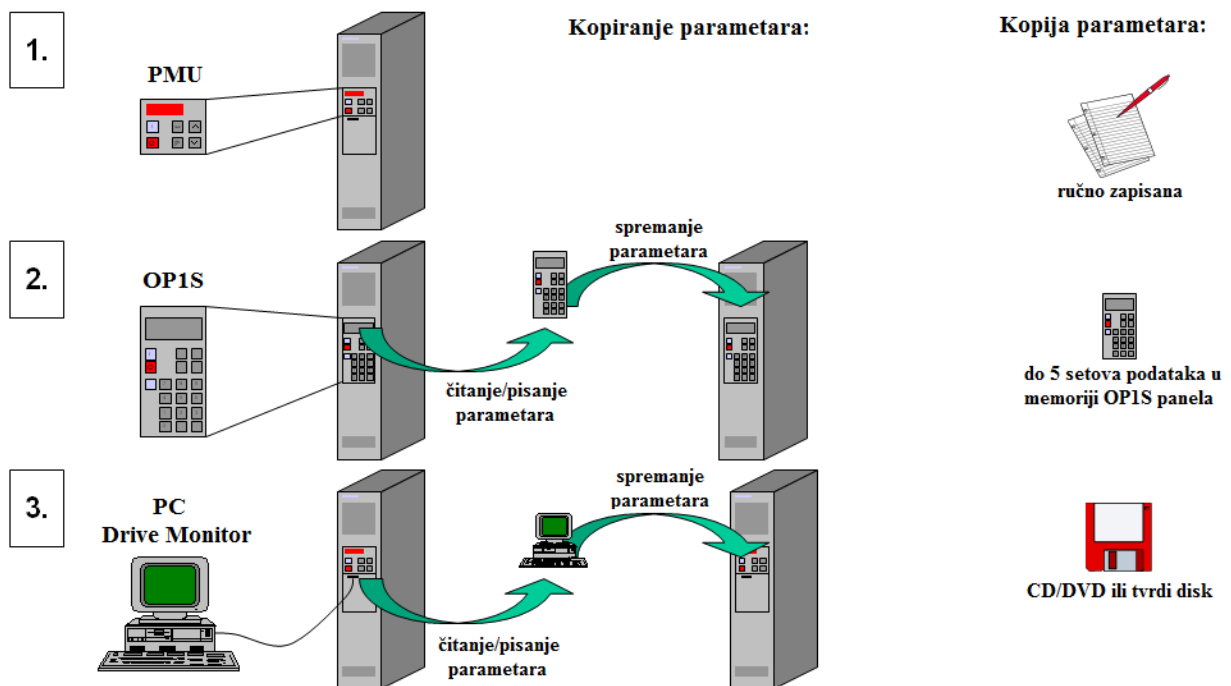
Upravljanje Siemens trofaznim asinkronim motorom izvedeno je pomoću Simovert frekvencijskog pretvarača, čije su karakteristike prikazane tablicom 2.3. Prema tablici 2.3. može se uočiti kako je nazivna snaga frekvencijskog pretvarača višestruko veća od nazivne snage asinkronog motora.

3. OPTIMIRANJE REGULATORA I PARAMETRIRANJE FREKVENCIJSKIH PRETVARAČA POMOĆU PROGRAMSKIH PAKETA

Frekvencijski pretvarači mogu se parametriti pomoću operatorskog panela. Oba pretvarača mogu imati osnovni i napredni operatorski panel. Sinamics može imati osnovni panel, BOP (engl. *Basic Operator Panel*, BOP), koji se koristi kao dodatni modul na upravljačkoj jedinici te je prikazan na slici 3.2.a. ili napredni AOP (engl. *Advance Operator Panel*). Simovert ima uvijek ugrađen osnovni panel PMU (engl. *ParaMeterizing Unit*) i kao opcija može se koristiti OP1S napredni panel [31]. U fakultetskom laboratoriju nalaze se samo osnovni operatorski paneli.

Drugi, daleko brži i jednostavniji način je parametriranje pomoću računala i specijaliziranog programskog alata, gdje se koristi univerzalna serijska sabirница (USS) RS-232 sa serijskim sučeljem i SUB-D 9 pinskim konektorom (engl. *SUBminiature*). Kako osobno računalo korišteno za izradu ovog diplomskog rada nema RS 232 sučelje, korišten je USB/RS-232 pretvarač. Serijsko sučelje šalje podatke bit po bit, gdje se brzina slanja podataka izražava u bitovima po sekundi (engl. *Bits Per Second*, bps), [bit/s].

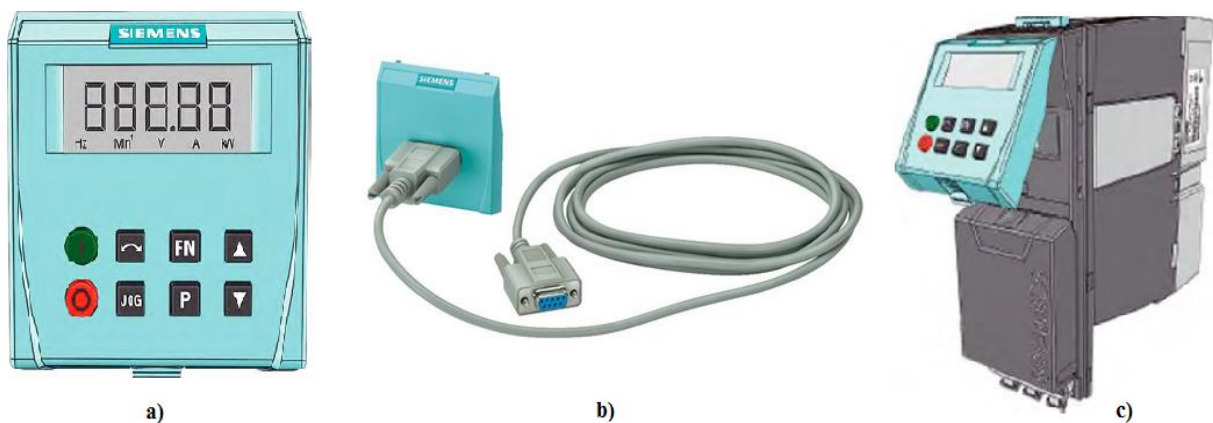
Osim serijske veze, može se koristiti veza *ethernet* – PLC – PROFIBUS, za što je potreban dodatni programski paket – DriveES (engl. *Drive Engineering System*).



Sl. 3.1. Prikaz mogućih načina parametriranja Simovert frekvencijskih pretvarača [31].

3.1. Programski paket *Starter*

Starter 4.4. je programski paket koji se koristi za parametrisiranje, puštanje u pogon, kontrolu i nadgledanje Siemens Sinamics frekvencijskih pretvarača. Sve ove funkcije *Starter* ostvaruje promjenom vrijednosti odgovarajućih parametara pretvarača. Parametri upravljačke jedinice dijele se na parametre koje je moguće samo čitati (npr. parametar „r63“ koji služi za očitavanje stvarne vrijednosti frekvencije) i parametre koje je moguće i upisati i čitati (npr. parametar „p310“ gdje se unosi nazivna vrijednost frekvencije motora).



Sl. 3.2. *Operatorski panel (a), sučelje za uspostavljanje serijske komunikacije između računala i Sinamics uređaja (b), prikaz montiranja operatorskog panela na upravljačku jedinicu [19] (c).*

Starter nudi niz funkcija, kao što su učitavanje podataka iz računala u odredišni uređaj, učitavanje podataka iz odredišnog uređaja (Sinamics) u računalo, upravljanje pogonom, vraćanje tvorničkih postavki te razne vizualizacijske funkcije (vremenski dijagram, Bodeov dijagram).

3.1.1. Komunikacija frekvencijskog pretvarača s računalom

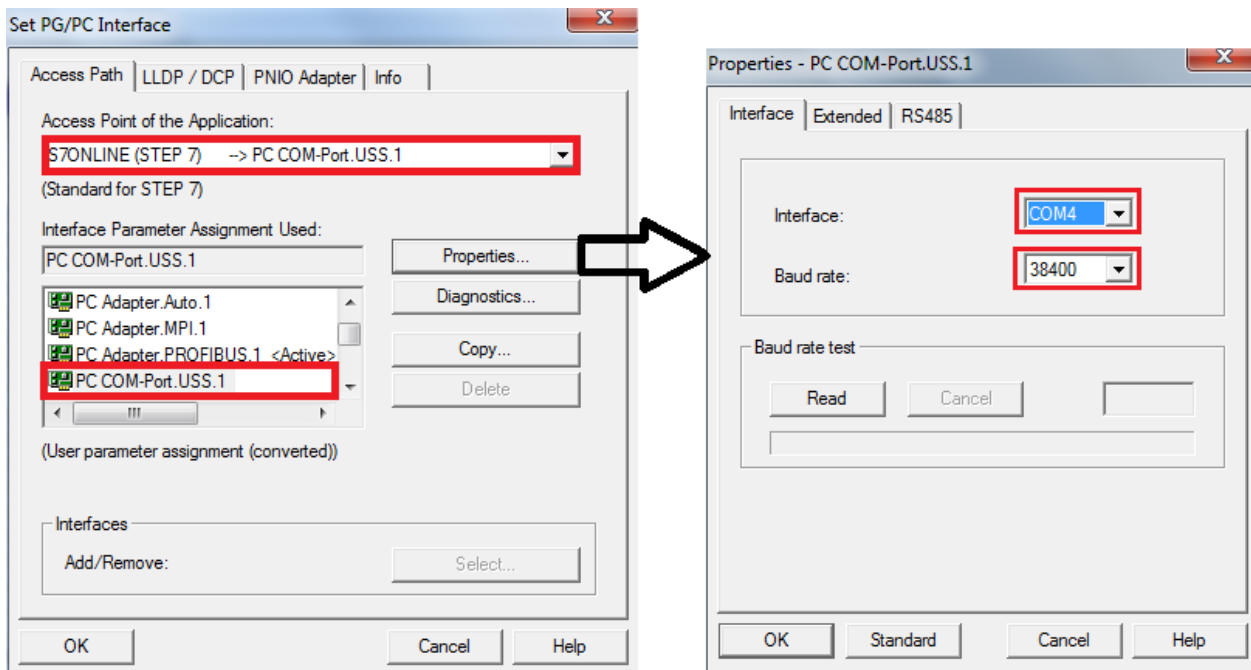
Komunikacija između frekvencijskog pretvarača i računala ostvarena je pomoću posebnog Siemens-ovog sučelja (slika 3.2.b) koje se spaja na upravljačku jedinicu (CU 240S-DP) umjesto BOP panela. Obzirom da osobno računalo korišteno za izradu ovog diplomskog rada nema RS-232 sučelje, korišten je USB/RS-232 pretvarač.

Da bi se bilo u mogućnosti parametrisirati i upravljati frekvencijskim pretvaračem pomoću računala potrebno je napraviti sljedeće:

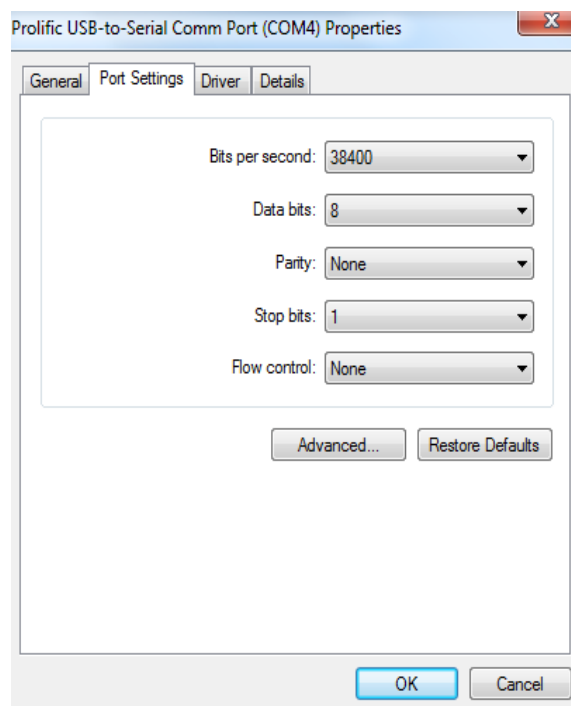
1. Instalirati *Starter 4.4.* (link za preuzimanje programskog alata pod [22]). Sljedeći minimalni zahtjevi moraju biti ispunjeni za instaliranje programskog paketa *Starter*:

- Hardver:
 - ✓ PG/PC s Pentium III mikroprocesorom (preporučeno: >1 [GHz]),
 - ✓ Glavna radna memorija 1 GB (preporučeno: 2 GB),
 - ✓ Razlučivost zaslona 1024 x 768 piksela, 16-bitna dubina boje,
 - ✓ Slobodan prostor na tvrdom disku veći od 3 GB.
 - Softver:
 - ✓ 32-bitni operacijski sustavi:
 - Microsoft Windows XP Professional SP3,
 - Microsoft Windows 7 Professional SP1,
 - Microsoft Windows 7 Ultimate SP1,
 - Microsoft Windows 7 Enterprise SP1 (Standardna instalacija).
 - ✓ 64-bitni operacijski sustavi:
 - Microsoft Windows 7 Professional SP1,
 - Microsoft Windows 7 Ultimate SP1,
 - Microsoft Windows 7 Enterprise SP1 (Standardna instalacija).
2. Instalirati softver za USB-RS-232 pretvarač (link za preuzimanje softvera za pretvarač u vlasništvu ETFOS-a: <http://dl.rotronic.ch/Web%20Client/ListDir.htm>).
 3. Montirati serijsko sučelje na upravljačku jedinicu (slika 3.2.c.).
 4. Spojiti računalo i pretvarač serijskim kabelom.
 5. Detektirati COM port koji koristi USB/RS-232 pretvarač (slika 3.4.).
 6. Pokrenuti Starter i podesiti PG/PC sučelje (slika 3.3.).
 7. Učitati postojeći ili kreirati novi projekt:
 - a. kreirati novi projekt *offline*, prijeći u *online* način rada i spremiti projekt u pretvarač (detaljnije u odjeljku 3.1.2.),
 - b. kreirati novi projekt *online* te preuzeti projekt iz pretvarača (detaljnije u odjeljku 3.1.2.),
 - c. učitati postojeći projekt (detaljnije u odjeljku 3.1.2.).

Na slici 3.3. prikazani su i označeni crvenom bojom najvažniji parametri koji se moraju postaviti kako bi komunikacija između frekvencijskog pretvarača i osobnog računala bila uspješno ostvarena. Osim toga, u kartici *Interface* potrebno je odabrati odgovarajući ulaz na koji je spojen frekvencijski pretvarač s osobnim računalom (npr. COM4). Na koji ulaz je spojen frekvencijski pretvarač s računalom, može se provjeriti na sljedeći način u osobnom računalu: *Start* → *Control Panel* → *Device Manager* → *Ports*.



Sl. 3.3. Uspostavljanje komunikacije između frekvencijskog pretvarača i osobnog računala.



Sl. 3.4. Postavke USB/RS-232 sučelja na osobnom računalu.

Na slici 3.4. prikazana je kartica s postavkama USB/RS-232 sučelja, gdje se brzina prijenosa podataka te sučelje (u kartici *Advanced*) podudaraju s podacima prikazanim slikom 3.3. Do kartice *Set PG/PC Interface* u programskom paketu *Starter* dolazi se na sljedeći način: *Options* → *Set PG/PC Interface*. Brzina prijenosa podataka između računala i frekvencijskog

pretvarača postavljena je na 38400 [bit/s], što je minimalna brzina koja se mora postaviti kako bi se ostvarila komunikaciju osobnog računala i frekvencijskog pretvarača.

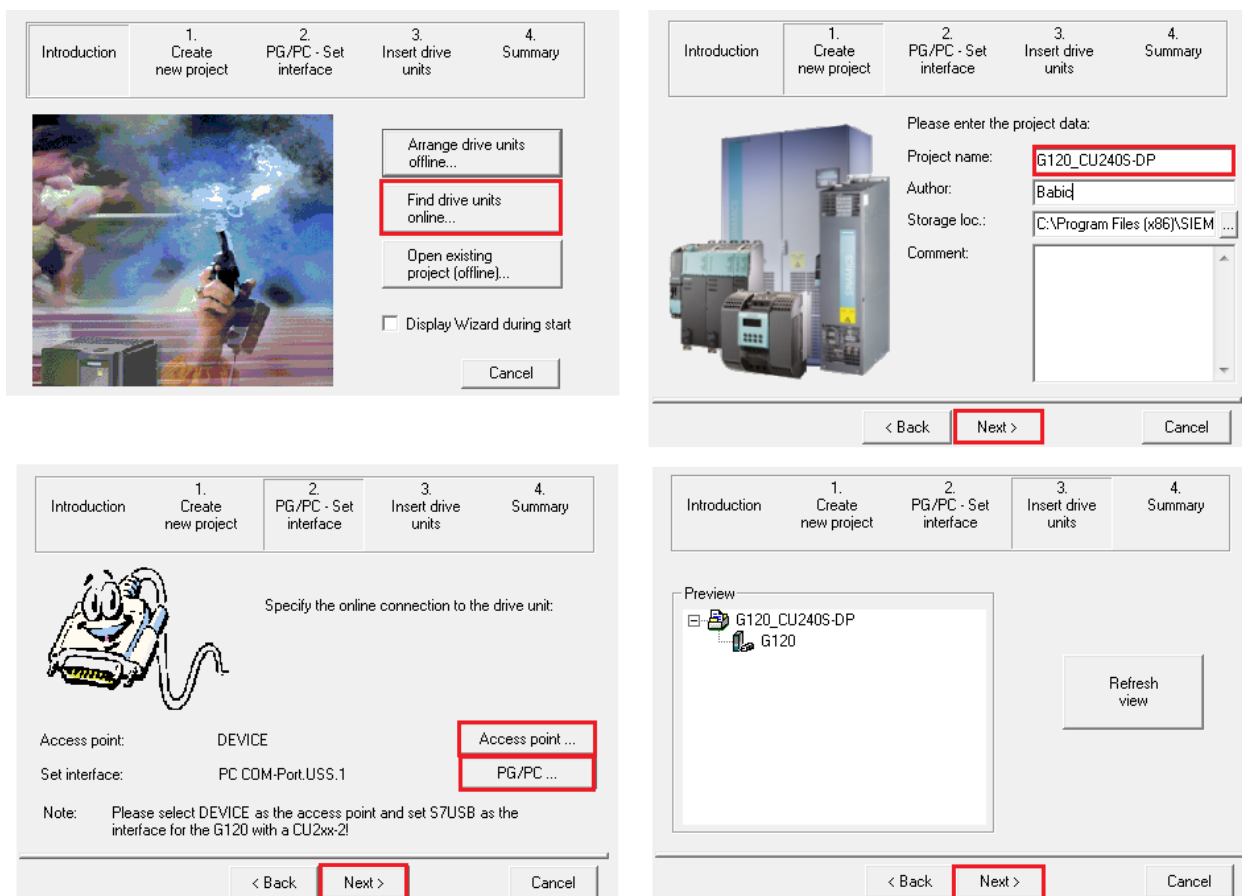
3.1.2. Kreiranje novog projekta i uspostavljanje komunikacije

Novi projekt u programskom paketu *Starter* može se kreirati na više načina. Novi projekt kreiran je uz pomoć čarobnjaka (*Starter* → *Project* → *New with wizard*) te su koraci izrade novog projekta prikazani slikom 3.5. U samom početnom koraku mogu se odabrati tri načina kreiranja novog projekta.

Prvi način odnosi se na kreiranje novog projekta u *offline* načinu rada, gdje se iz baze podataka odabire odgovarajući modul snage i upravljačka jedinica u trećem koraku. Na taj način se kreirani projekt (postavljeni parametri) može spremirati na frekvencijski pretvarač: *Connect to selected target device* → *Download project to target system*.

Drugi način, koji je ujedno i korišten, jest *online* način kreiranja projekta. Posebnu pažnju potrebno je obratiti na postavke u drugom koraku. Potrebno je prethodno postaviti parametre na računalo i u programskom paketu *Starter* prikazanim kao na slici 3.3., odnosno 3.4. Ukoliko je komunikacija uspješna, čarobnjak će sam prepoznati frekvencijski pretvarač, što je prikazano u trećoj kartici na slici 3.5. Nakon te kartice, odabirom opcije *Next* otvara se prozor gdje su prikazane konačne postavke. Ovim načinom se već postojeći projekt na frekvencijskom pretvaraču može preuzeti na računalo.

Treći način kreiranja novog projekta je također u *offline* načinu rada, gdje se otvara već prethodno kreiran projekt *Starter* → *Open existing project (offline)* → *(select project) OK* → *Connect to selected target device*. Ovakav način predstavlja najlakši način parametriranja, odnosno promjene parametara i uspostavljanja komunikacije s frekvencijskim pretvaračem.



Sl. 3.5. Kreiranje novog projekta u programskom paketu Starter.

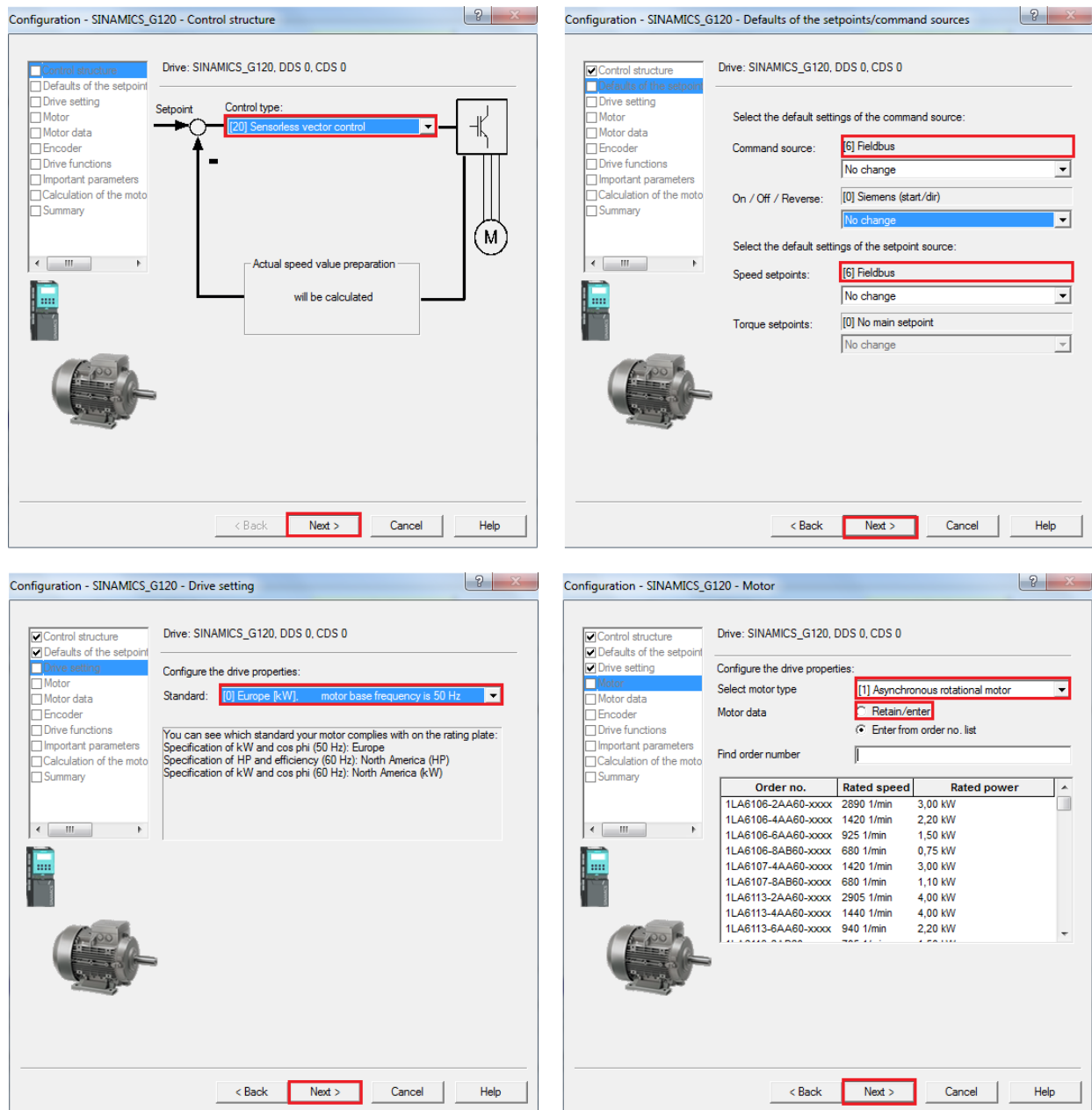
3.1.3. Parametriranje frekvencijskog pretvarača – parametri asinkronog motora

Nakon uspostavljanja komunikacije s frekvencijskim pretvaračem, potrebno ga je isparametrirati. Programski paket vizualno je prilagođen za parametriranje frekvencijskih pretvarača, što omogućava lakše snalaženje i pronalazak eventualno krivo postavljenog parametra. Parametriranje frekvencijskog pretvarača, točnije unošenje nazivnih podataka asinkronog motora provodi se u deset koraka pomoću čarobnjaka (*Starter* → *Configuration* → *Wizard*) unutar programskog paketa *Starter*, što je prikazano slikom 3.5. *Wizard* se može pokrenuti samo u *offline* načinu rada (*Configuration* → *Wizard*).

Vrlo je važno pripaziti na unos parametara. Na slikama 3.6.-3.8. prikazano je parametriranje frekvencijskog pretvarača u deset koraka pomoću *Wizard* konfiguracijskog prozora. U prvom koraku (slika 3.6.) definira se način upravljanja motorom (vektorsko, skalarno i drugi načini). Drugi korak definira način na koji se želi upravljati motorom te odakle frekvencijski pretvarač prima referentnu vrijednost brzine, što je u ovom slučaju PROFIBUS (moguće je zadavanje referentne brzine i pomoću upravljačkog panela te pomoću serijske komunikacije s računalom – *Starter*). U trećem koraku odabire se standard izrade motora

(američki ili europski), dok se u četvrtom koraku odabire tip motora (asinkroni ili sinkroni) i nazivni podatci motora. Dva su načina odabira parametara motora:

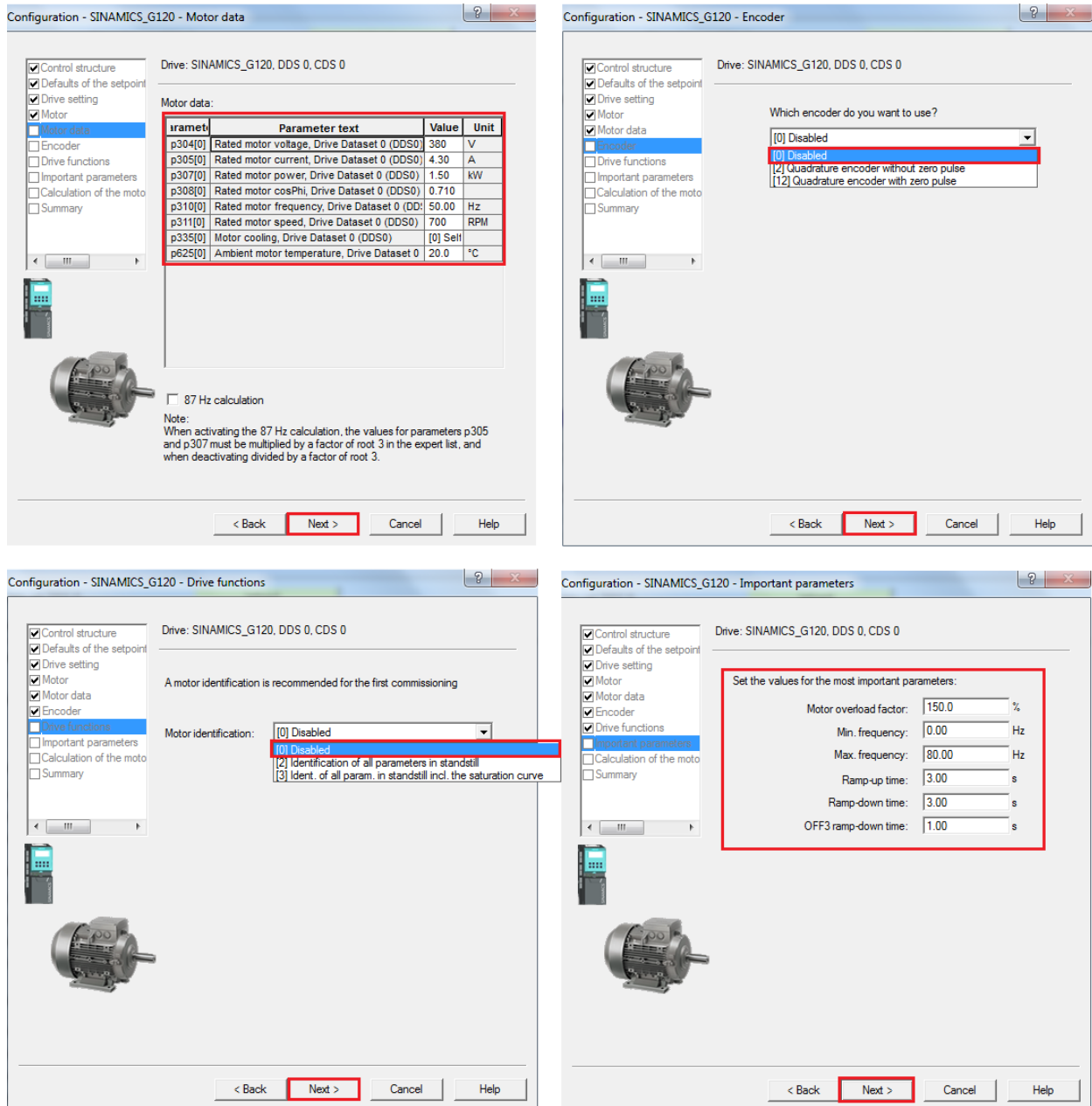
- slobodni unos parametara (peti korak, slika 3.7.),
- pronalaženje postojećeg *Siemens* motora prema tipskoj oznaci iz baze podataka.



SI 3.6. Prikaz Wizard konfiguracijskog prozora.

Ukoliko se odabere slobodni unos parametara asinkronog motora, otvara se konfiguracijski prozor prikazan petim korakom, gdje je vidljivo kako se parametri motora unutar frekvencijskog pretvarača podudaraju s nazivnim podacima trofaznog asinkronog motora, prikazanim tablicom 2.5. Također je vrlo važno utvrditi spoj trofaznog asinkronog motora. Na natpisnoj pločici prikazani su i podatci za spoj zvijezda (Y) i za spoj trokut (D) koji su prikazani

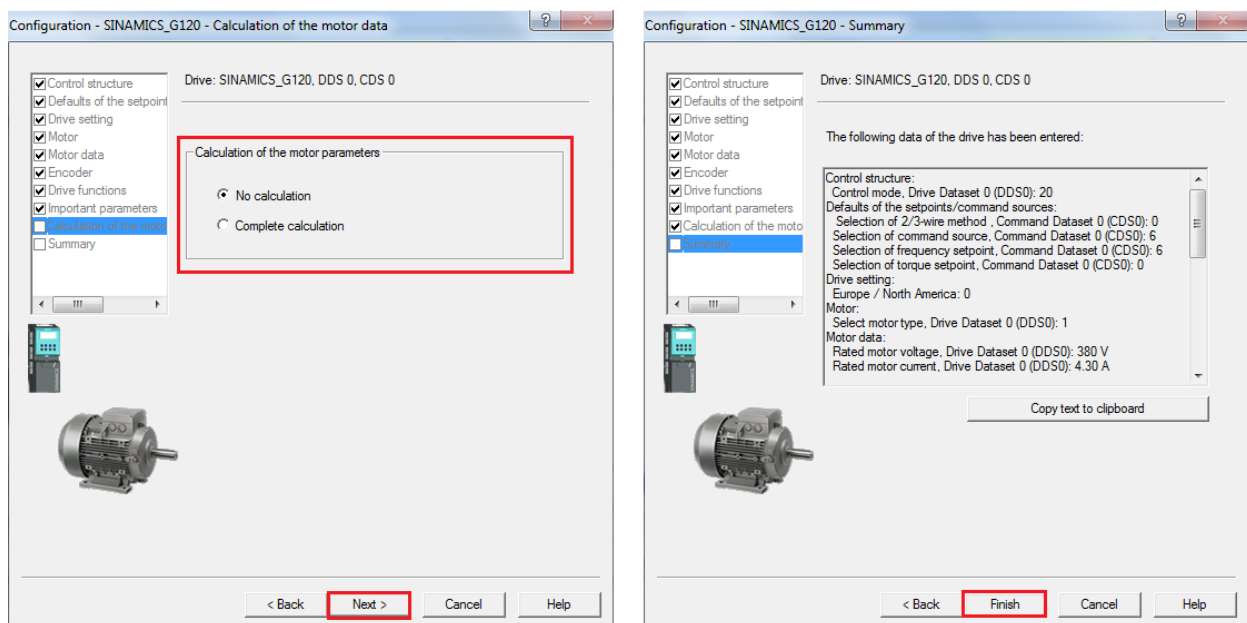
slikom 2.10. Motor treba biti spojen u spoj u kojem nazivni napon motora odgovara naponu napajanja pretvarača. U ovom slučaju motor treba biti spojen u spoj zvijezda, što je vidljivo unutar priključne kutije samog asinkronog motora. Šesti korak daje mogućnost odabira enkodera (u ovom slučaju enkodera nema), a sedmi korak omogućava identifikaciju motora – P1900 (detaljnije opisano u odjeljku 3.1.4.).



SI 3.7. Prikaz Wizard konfiguracijskog prozora.

U osmom koraku definiraju se vrijednosti parametara:

- preopterećenje – vrijednost maksimalnog iznosa struje kojim se motor smije opteretiti,
- iznos minimalne i maksimalne frekvencije – odnosi se na raspon frekvencije upravljanja asinkronim motorom, vrijedi za oba smjera vrtnje motora,
- postavljanje rampe ubrzavanja/usporavanja – odnosi se na vremenski interval ubrzanja asinkronog motora iz stanja mirovanja do maksimalne brzine asinkronog motora,
- OFF 3 (brzo zaustavljanje) rampa usporavanja – odnosi se na vremenski interval usporavanja asinkronog motora od maksimalne brzine do stanja mirovanja.



SI 3.8. Prikaz Wizard konfiguracijskog prozora.

Slika 3.8. prikazuje posljednja dva koraka parametriranja asinkronog motora pomoću Wizard konfiguracijskog prozora. Deveti korak daje mogućnost izračuna parametara asinkronog motora, koji se mogu mijenjati parametrom P340 (detaljan prikaz parametara koji se utvrđuju, prikazan je tablicom P.1. u prilogu):

- [0] – bez izračuna parametara,
- [1] – potpuno parametriranje,
- [2] – izračun parametara nadomjesne sheme,
- [3] – izračun parametara za vektorsko upravljanje asinkronim motorom,
- [4] – izračun parametara regulatora.

Posljednji korak daje prikaz unesenih parametara asinkronog motora. Nakon unosa svih parametara potrebno je spremiti projekt u pretvarač: *Connect to selected target device* → *Download project to target system*.

Frekvencijski pretvarač može se parametrirati na dva načina, u *offline* i *online* režimu rada. Najvažniji parametri mogu se parametrirati jedino u *offline* režimu rada. Ukoliko se parametri mijenjaju u *offline* režimu rada, potrebno ih je nakon izmijene spremiti te prenijeti u frekvencijski pretvarač na slijedeći način: *Starter* → *Target system* → *Load* → *Download project to target*. Ako se parametri mijenjaju u *online* načinu rada, tada se promjena parametra automatski prihvaća u samom frekvencijskom pretvaraču, te ih je moguće mijenjati ukoliko je parametar p3 postavljen u vrijednost 3, što znači da se radi o stručnom korištenju frekvencijskog parametra. U tom slučaju, izmijenjeni parametri mogu se spremiti kao projekt na slijedeći način: *Starter* → *Target system* → *Load* → *Load project to PG*.

3.1.4. Automatsko parametriranje (Auto-tuning) regulatora frekvencijskog pretvarača

Automatskim parametriranjem ili samopodešavanjem (engl. *Auto-tuning*), frekvencijski pretvarač prati kako sustav reagira na promjene u pogonu (promjena struje, napona, brzine) te na taj način određuje parametre (ovisno o tipu automatskog parametriranja) PI regulatora, kako bi što brže postigao stabilan i precizan rad elektromotornog pogona. Na ovaj način se osigurava značajna ušteda vremena kod određivanja parametara regulatora, a pogotovo u postrojenjima s velikim brojem regulatora. Postoje dva načina izvođenja automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača, gdje je uvjet prethodno brzo parametriranje asinkronog motora opisanog slikama 3.6.-3.8.

Prvi način automatskog parametriranja je djelomično opisan u prethodnom poglavlju, gdje se prilikom konfiguracije parametara pomoću *Wizard* prozora u sedmom koraku (slika 3.7.) odabire utvrđivanje parametara (P1900):

[0] – onemogućeno,

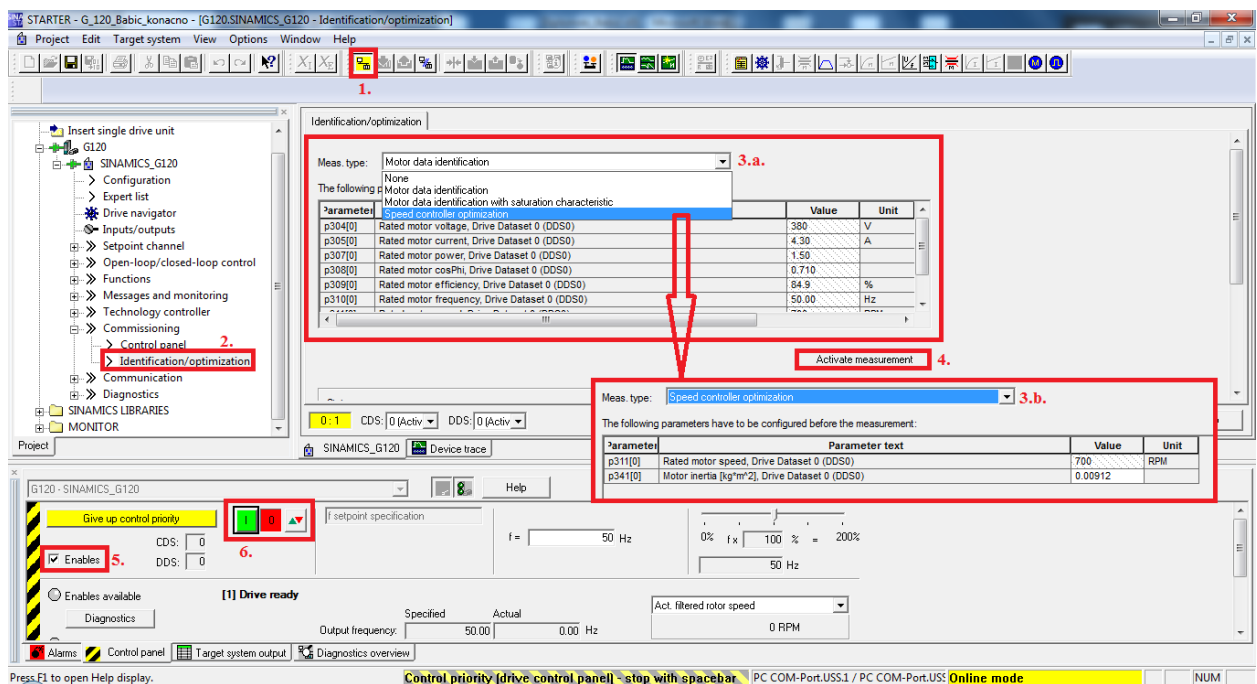
[2] – utvrđivanje parametara u stanju mirovanja motora,

[3] – utvrđivanje parametara u stanju mirovanja motora uključujući krivulju zasićenja.

Parametrom P340, prikazanim u devetom koraku pomoću *Wizard* konfiguracijskog prozora, potvrđuje se utvrđivanje parametara za automatsko parametriranje regulatora frekvencijskog pretvarača. Važno je napomenuti da se automatsko parametriranje treba provesti na hladnom motoru, a sama provedba automatskog parametriranja započinje prilikom prvog puštanja u pogon. Nakon završetka automatskog parametriranja, parametri P1900 i P340 se postavljaju u vrijednost 0.

Drugi način automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača prikazan je slikom 3.9. Parametriranje se provodi u nekoliko koraka, uz preduvjet da je ostvarena serijska komunikacija s frekvencijskim pretvaračem:

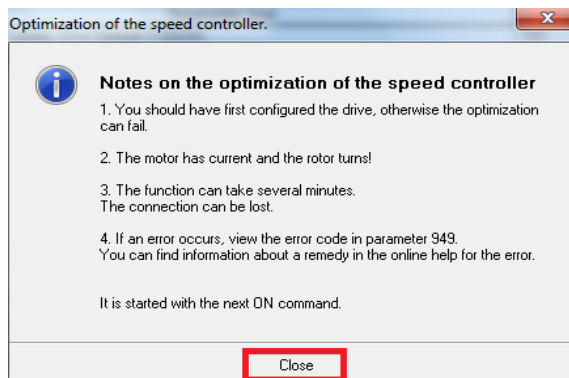
1. Potrebno se spojiti na frekvencijski pretvarač – *online* način rada.
2. Otvoriti karticu optimizacije.
3. Odabrati tip mjerenja:
 - bez mjerenja,
 - utvrđivanje parametara motora (slika 3.11.a),
 - utvrđivanje parametara motora uključujući krivulju zasićenja (slika 3.11.b.),
 - utvrđivanje parametara regulatora brzine vrtnje (slika 3.11.c.).
4. Aktivirati mjerenje – prilikom aktiviranja mjerenja, otvaraju se prozori prikazani slikom 3.10. s pripadajućim upozorenjima, ovisno o tipu mjerenja.
5. Omogućiti upravljanje pomoću *Starter-a*.
6. Pokrenuti frekvencijski pretvarač – u statusnoj traci se može pratiti tijek izvođenja automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača (slika 3.11.).



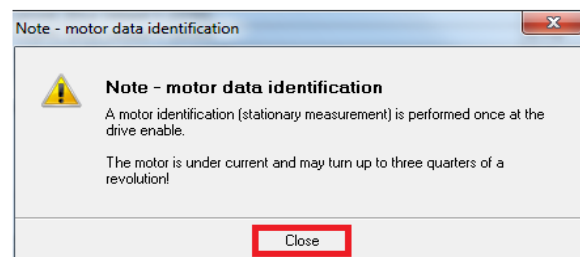
Sl. 3.9. Postavljanje parametara za automatsko parametriranje frekvencijskog pretvarača.

Slika 3.10. prikazuje poruke upozorenja ovisno o tipu parametriranja:

- slika 3.10.a. – odnosi se na optimizaciju regulatora brzine vrtnje. *Starter* upozorava da se prethodno trebaju podesiti određeni parametri (slika 3.9., korak 3.b.) te da prilikom automatskog parametriranja motorom teku struje te se rotor motora vrti,
- slika 3.10.b. – odnosi se na oba slučaja utvrđivanja parametara motora (uzimanje u obzir krivulje zasićenja i bez uzimanja u obzir krivulje zasićenja). Prethodno je potrebno podesiti određene parametre (slika 3.9., korak 3.a.) kako bi se parametri utvrdili ispravno. Prilikom provođenja automatskog parametriranja motor je u stanju mirovanja te motorom teku struje.



a)



b)

Sl. 3.10. Poruke upozorenja prilikom automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača.

3.1.4.1. Određivanje parametara nadomjesne sheme asinkronog motora automatskim parametriranjem frekvencijskog pretvarača

Proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora provodi se iz razloga da bi se postigla određena kakvoća upravljanja asinkronim motorima. Njima se provodi optimiranje parametara regulatora struje, gdje d komponenta struje statora upravlja magnetiziranjem asinkronog motora, odnosno magnetskim tokom rotora, dok se s q komponentom upravlja momentom motora [23].

Pomoću parametara nadomjesne sheme asinkronog motora, određuju se i optimalni parametri regulatora brzine. Na slici 3.11.c. vidljivo je pojačanje PI regulatora, koje je određeno automatskim određivanjem parametara asinkronog motora. Slika 3.11. prikazuje rezultate automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača s obzirom na tri vrste mjerenja navedenih u trećem koraku ovog poglavlja. Korištena metoda u diplomskom radu je identifikacija parametara nadomjesne sheme asinkronog motora, te su njeni rezultati prikazani slikom 3.11.a.

Postupak određivanja parametara PI regulatora Sinamics frekvencijskog pretvarača (slika 3.12.) nije poznat. Kod automatiziranih sustava s frekvencijskim pretvaračima (digitalnim) često se koristi **relejni postupak** određivanja parametara regulatora, koji je zasnovan na Ziegler-

Nichols-ovoj metodi ruba stabilnosti. Razlika u odnosu na Ziegler-Nichols-ovu metodu je u tome što se sustav dovodi na rub stabilnosti, ali s kontroliranim amplitudama oscilacija. Obzirom da je za vrijeme relejnog eksperimenta vladanje sustava kontrolirano, relejni postupak podešavanja parametara regulatora moguće je automatizirati pa je često korišten u praksi [24].

Status: Measurement completed			
The following parameters are determined or changed with the motor data identification:			
Parameter	Parameter text	Value	Unit
p350[0]	Stator resistance (line), Drive Dataset 0 (DDS0)	4.24910	Ohm
p354[0]	Rotor resistance, Drive Dataset 0 (DDS0)	2.87758	Ohm
p356[0]	Stator leakage inductance, Drive Dataset 0 (DDS0)	16.82722	
p358[0]	Rotor leakage inductance, Drive Dataset 0 (DDS0)	18.28548	
p360[0]	Main inductance, Drive Dataset 0 (DDS0)	211.000	

a)

Status: Measurement completed			
The following parameters are determined or changed with the motor data identification:			
Parameter	Parameter text	Value	Unit
p350[0]	Stator resistance (line), Drive Dataset 0 (DDS0)	4.26316	Ohm
p354[0]	Rotor resistance, Drive Dataset 0 (DDS0)	2.88141	Ohm
p356[0]	Stator leakage inductance, Drive Dataset 0 (DDS0)	16.85578	
p358[0]	Rotor leakage inductance, Drive Dataset 0 (DDS0)	18.31995	
p360[0]	Main inductance, Drive Dataset 0 (DDS0)	210.903	

b)

Status: Measurement completed			
The following parameters are determined or changed with the motor data identification:			
Parameter	Parameter text	Value	Unit
p342[0]	Total/motor inertia ratio, Drive Dataset 0 (DDS0)	1.680	
p1470[0]	Gain speed controller (SLVC), Drive Dataset 0 (DDS0)	2.8	

c)

Sl. 3.11. Rezultati automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača.

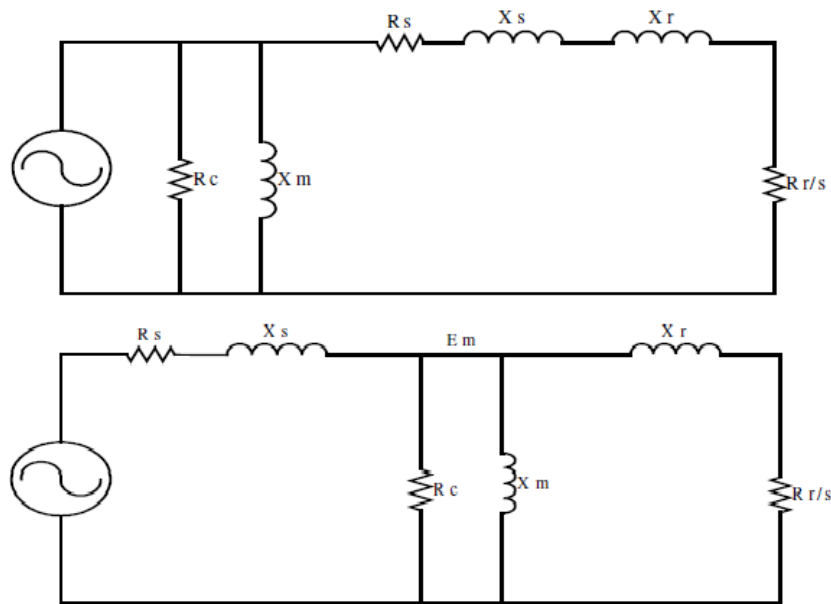
Rezultati parametara nadomjesne sheme asinkronog motora automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača koji su prikazani slikom 3.11.a., mogu se koristiti pri parametriranju simulacijskog modela asinkronog motora u programskom paketu Matlab/Simulink.

3.1.4.2. Određivanje parametara nadomjesne sheme asinkronog motora matematičkim modelima iz nazivnih podataka asinkronog motora

Pod ovim odjeljkom obrađeno je pet metoda određivanja parametara nadomjesne sheme asinkronog motora prema [25]. Proračuni se zasnivaju na poznavanju nazivnih parametara asinkronog motora (fazni napon, nazivna struja, faktor snage, nazivna snaga, frekvencija, nazivna brzina te otpor statora).

Za proračun metode 1 i 2 koristi se nadomjesna shema prikazana slikom 3.12. (gore), dok ostale tri metode (metode 3, 4 i 5) koriste nadomjesnu shemu asinkronog motora prikazanu slikom 3.12. (dolje). Pored toga, ovisno o metodi uvedene se određene pretpostavke:

- gubici trenja i ventilacije iznose 1% od nazivne snage,
- reaktancija statorskog namota i reaktancija rotorskog namota su jednake ($X_s=X_r$),
- pri proračunu X_m zanemaruje se $X_s=0 \rightarrow$ metoda 3, 4 i 5,
- uvjet ponavljanje proračuna (metoda 3 se izvodi u 3 ciklusa, dok se metoda 4 izvodi dok se ne zadovolji uvjet da je izračunati faktor snage unutar $\pm 5\%$ od nazivnog faktora snage. Ostale metode se računaju bez ponavljanja,
- pri proračunu X_s koristi se pojednostavljena nadomjesna uz zanemarenje poprečne grane \rightarrow metoda 4.



Sl. 3.12. Nadomjesne sheme korištene za proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora.

Detaljnije razlike između korištenih metoda te sami izrazi korišteni za proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora, mogu se vidjeti u [25]. Zbog složenosti matematičkih izraza, za proračun je korišten programski paket Matlab, čije su datoteke (*M-file*) s pripadajućim matematičkim izrazima i parametrima Končar asinkronog motora prikazanim priložima P3.-7. (za svaku metodu zasebno).

Rezultati proračuna prikazani su tablicom 3.1. (Končar asinkroni motor) i 3.2. (Siemens asinkroni motor). Crvenom bojom označeni su oni rezultati (metode) čiji izračuni parametara imaju najmanju pogrešku u odnosu na izračunate vrijednosti pomoću automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača. Iskazane pogreške u tablicama predstavljaju relativne postotne pogreške koje se računaju prema izrazu (3-1):

$$X_{\text{pog}} = \frac{(X_{\text{izr}} - X_{\text{fpp}})}{X_{\text{fpp}}} \cdot 100 [\%], \quad (3-1)$$

gdje je:

- X_{pog} – relativna postotna pogreška u postotcima,
- X_{jp} – rezultat dobiven automatskim parametriranjem frekvencijskog pretvarača,
- X_{izr} – rezultat dobiven eksperimentalnim metodama na temelju nazivnih podataka asinkronog motora.

U tablici su vidljivi iznosi parametara, čije oznake se koriste i na shemi prikazanoj slikom 3.12.:

- R_s – otpor statorskog kruga,
- R_r – otpor rotorskog kruga,
- $X_s = X_r$ – reaktancija rotora i statora iz kojih se računaju rasipni induktiviteti rotora i statora (L_s/L_r),
- X_m – reaktancija magnetiziranja iz koje se računa međuinduktivitet (L_m),
- R_c – nadomjesni otpor za gubitke u željezu statora.

Kako se radi o eksperimentalnim metodama, postoje velika odstupanja pri proračunu parametara nadomjesne sheme asinkronog motora. Razlika je i u tome što se prilikom proračuna parametara pomoću frekvencijskog pretvarača, zanemaruju vrtložne struje i gubitci u željezu, dok se u matematičkom modelu isti ne zanemaruju. Prema tablicama 3.1. i 3.2. metoda 5 daje rezultate s najmanjom pogreškom u odnosu na parametre oba asinkrona motora koje je izračunao Sinamics frekvencijski pretvarač.

Tab. 3.1. Izračunati parametri nadomjesne sheme Končar asinkronog motora.

	Metoda 1		Metoda 2		Metoda 3		Metoda 4		Metoda 5		Frekvencijski pretvarač
	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	
R_s [Ω]	5	18,48	5	18,48	5	18,48	5	18,48	5	18,48	4.25
R_r [Ω]	5.28	43,89	5.09	71,89	2.52	-14,83	2.07	-29,90	3.94	33,16	2.87
$X_s = X_r$ [Ω]	0	-	4.64	-	2.22	-	3.13	-	3.45	-	-
L_r [mH]	0	100,00	14.7	-19,13	7.06	-61,36	9.97	-45,44	10.9	-39,93	18.28
L_s [mH]	0	100,00	14.7	-12,16	7.06	-58,04	9.97	-40,74	10.9	-34,75	16.83
X_m [Ω]	72.65	-	72.65	-	48.86	-	49.33	-	69.01	-	-
L_m [mH]	231.3	9,31	231.3	9,31	155.6	-26,47	157.1	-25,76	219.8	3,88	211.6
R_c [Ω]	502.0	-	1257.3	-	573.9	-	528.0	-	1093.9	-	-

Tab. 3.2. Izračunati parametri nadomjesne sheme Siemens asinkronog motora.

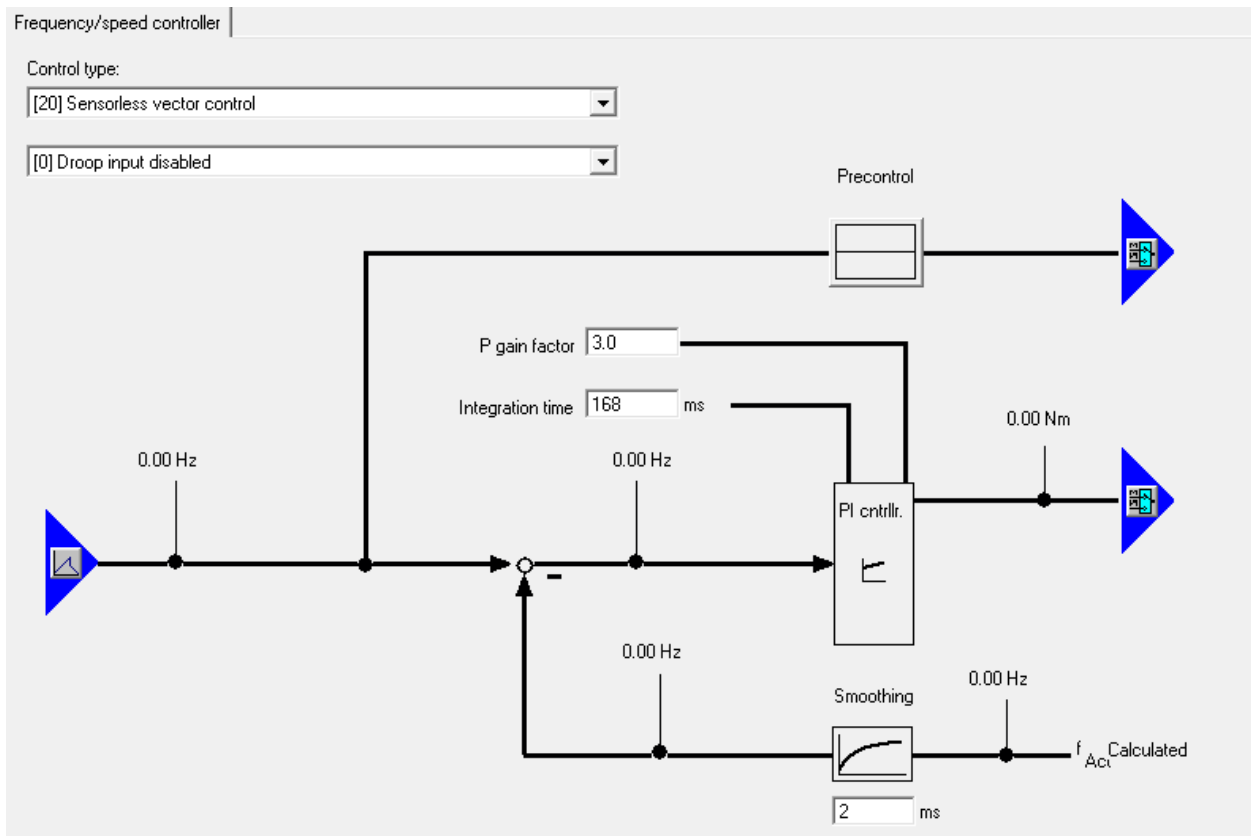
	Metoda 1		Metoda 2		Metoda 3		Metoda 4		Metoda 5		Frekvencijski pretvarač
	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	Izrač.	Pog [%]	
R_s [Ω]	29.6	2,99	29.6	2,99	29.6	2,99	29.6	2,99	29.6	2,99	28.74
R_r [Ω]	28.25	42,37	28.13	72,76	10.4	-36,12	14.7	-9,71	20.02	22,97	16.28
$X_s = X_r$ [Ω]	0	-	20.78	-	3.1	-	1.8	-	15.95	-	-
L_r [mH]	0	100,00	66.1	89,04	9.87	-71,79	5.73	-83,62	50.1	45,13	36.36
L_s [mH]	0	100,00	66.1	81,97	9.87	-72,85	5.73	-84,23	50.1	39,70	35.01
X_m [Ω]	350.03	-	350.03	-	226.2	-	252.1	-	318.67	-	-
L_m [mH]	1114.7	18,83	1114.7	18,83	720.38	-23,21	802.86	-14,42	1014.8	8,18	938.1
R_c [Ω]	1335.9	-	2717.5	-	1141.2	-	1279.6	-	2181.4	-	-

3.1.5. Regulacijske petlje vektorskog sustava upravljanja

Na slikama 3.13. i 3.14. vidljivi su dijelovi funkcijske blok sheme vektorske regulacije brzine vrtnje, odnosno struje motora, napajanog iz pretvarača frekvencije s naponskim međukrugom. Slika u prilogu P.8. daje potpuni blokovski i principijelni prikaz sheme sustava vektorske regulacije asinkronog motora napajanog iz Sinamics frekvencijskog pretvarača s pripadajućim parametrima.

3.1.5.1. Regulacija frekvencije/brzine vrtnje

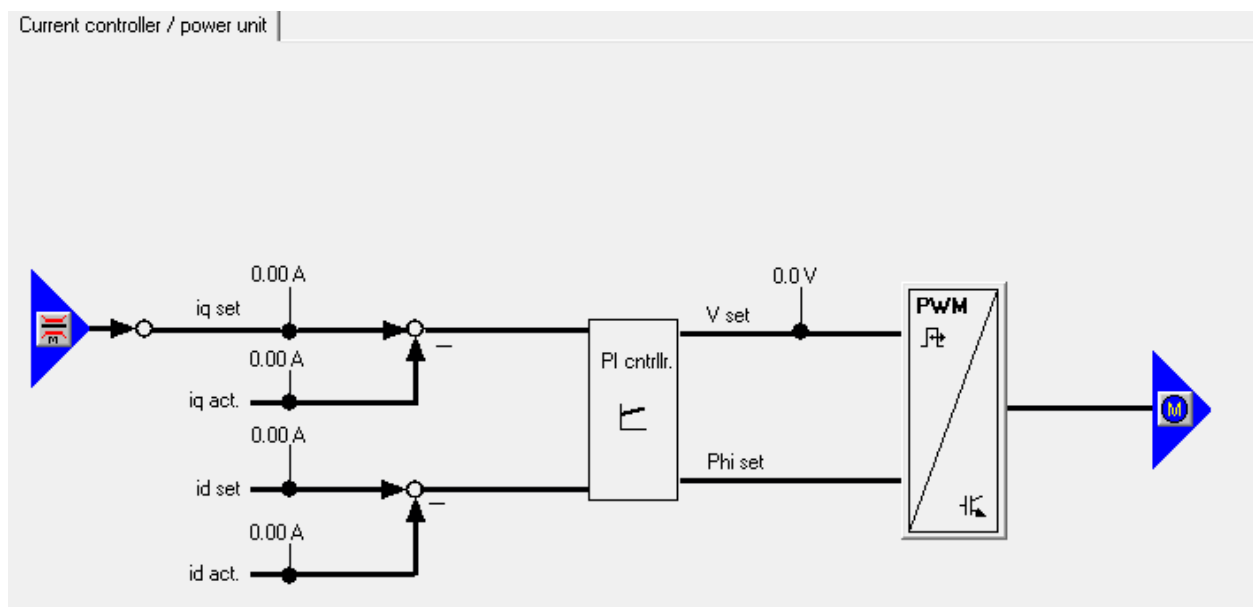
Prvi regulator je regulator brzine vrtnje, koji je vidljiv na slici 3.13. gdje se može uočiti kako se uspoređuju referentna vrijednost frekvencije (upravljački signal, parametar r62) i izmjerena regulirana vrijednost frekvencije (filtrirana, parametar r1445). Razlika ta dva signala naziva se regulacijsko odstupanje te se taj isti signal dovodi na ulaz PI regulatora. Na ovaj način zatvorena je regulacijska petlja po brzini vrtnje, odnosno po frekvenciji asinkronog motora. Zadaća ovakve vrste regulacije je da se kompenzira utjecaj smetnji, te da regulirana vrijednost što bolje slijedi referentnu vrijednost, što se osigurava parametrima PI regulatora [28]. Metoda određivanja parametara PI regulatora nije poznata za Sinamics frekvencijski pretvarač.



Sl. 3.13. Prikaz parametara PI regulatora brzine Sinamics frekvencijskog pretvarača.

3.1.5.2. Regulacijska petlja struje

Regulacijska petlja struje asinkronog motora je unutarnja regulacijska petlja, a regulacije brzine vrtnje je njoj nadređena petlja, što se može vidjeti na blokovskom prikazu u prilogu P.8. Ovom regulacijskom petljom se limitira magnetski tok, odnosno struja magnetiziranja koja je određena blokom slabljenja polja. Blok slabljenja polja određuje referencu struje magnetiziranja odnosno magnetski tok rotora. Do nazivne brzine vrtnje struja magnetiziranja je konstantna, a iznad nazivne brzine vrtnje struja magnetiziranja se smanjuje (napon ostaje konstantan, povećava se frekvencija). Prema izrazu (2-3) može se uočiti da se povećanjem frekvencije uz konstantan napon smanjuje prekretni moment, čime se utječe na momentnu karakteristiku asinkronog motora. To područje rada naziva se područje konstantne snage [23].



Sl. 3.14. Strukturna blokovska shema regulacije struje Sinamics frekvencijskog pretvarača.

Regulacijska struktura sadrži unutarnje krugove regulacije struje statora (d i q komponente) koji su prikazani slikom 3.14. Magnetskim tokom upravlja se d komponentom struje statora koja uspoređuje referentnu vrijednost ($r75$) s trenutnom vrijednošću struje ($r76$) te se razlika dovodi na PI regulator. Momentom motora upravlja q komponenta struje statora, gdje se uspoređuju referentna vrijednost ($r77$) i trenutna vrijednost ($r78$) struje te se razlika vrijednosti dovodi na PI regulator. Izlaz iz PI regulatora dovodi se na blok pulsno-širinske modulacije koji frekvencijom uzorkovanja od 4 kHz na izlazu daje sinusoidalni napon koji se dovodi na priključnice asinkronog motora. Oblik izlaznog napona je bolji što je proizvedeni magnetski tok bliži po valnom obliku onom magnetskom toku koju bi se proizveo trofaznim sinusnim

naponom. To znači da se manjim intervalom uzorkovanja, točnije većom frekvencijom uzorkovanja, dobije bolji valni oblik proizvedenog napona [23].

Metoda automatskog određivanja parametara PI regulatora struje također nije poznat, ali su poznata njegova ograničenja. Raspon integralne vremenske konstante je od 1-50 [ms], dok je raspon pojačanja od 0-5.

Prema [23] vrijednost pojačanja PI regulatora ovisna je i o parametrima frekvencijskog pretvarača (vremenska konstanta T_p i pojačanje K_p), koji je opisan prijenosnom funkcijom prvog reda (PT1 član). PI regulatori struje statora u d i q osi imaju istu karakteristiku, a određeni su prema **tehničkom optimumu** (maksimalno nadvišenje do 5%, te faktor prigušenja 0.707. Prijenosne funkcije prikazane su izrazima (3-2) i (3-3), gdje su T_{Rq} , odnosno T_{Rd} , integralne vremenske konstante regulatora struje, a K_{Rq} , odnosno K_{Rd} , pojačanja regulatora struje:

$$G_{Rq} = K_{Rq} \frac{(1 + sT_{Rq})}{sT_{Rq}}, \quad (3-2)$$

$$G_{Rd} = K_{Rd} \frac{(1 + sT_{Rd})}{sT_{Rd}}, \quad (3-3)$$

Vremenske konstante i pojačanje prikazani su izrazima (3-4) i (3-5):

$$T_{Rd} = T_{Rq} = \frac{\sigma T_s}{1 + (1 - \sigma) \frac{T_s}{T_r}}, \quad (3-4)$$

$$K_{Rd} = K_{Rq} \frac{\sigma L_s}{2T_p K_p}, \quad (3-5)$$

gdje je $T_p=L_r/R_r$ vremenska konstanta rotora, $T_s=L_s/R_s$ vremenska konstanta statora, a σ koeficijent rasipanja asinkronog motora određen izrazom:

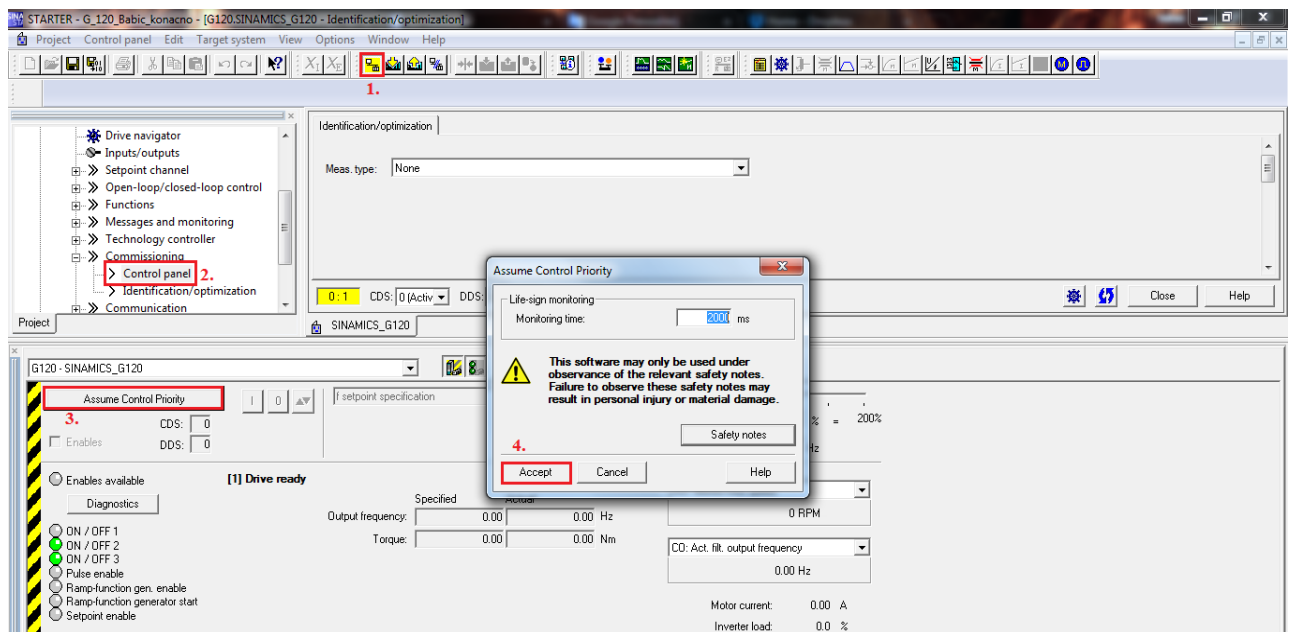
$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}. \quad (3-6)$$

Prema izrazima (3-3) do (3-6) i pomoću tablice sa slike 3.11.a, mogu se odrediti parametri integralne vremenske konstante PI regulatora, gdje je dobivena vrijednost 6 [ms], što je unutar raspona definiranim za Sinamics PI regulator struje.

3.1.6. Upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću *Starter-a*

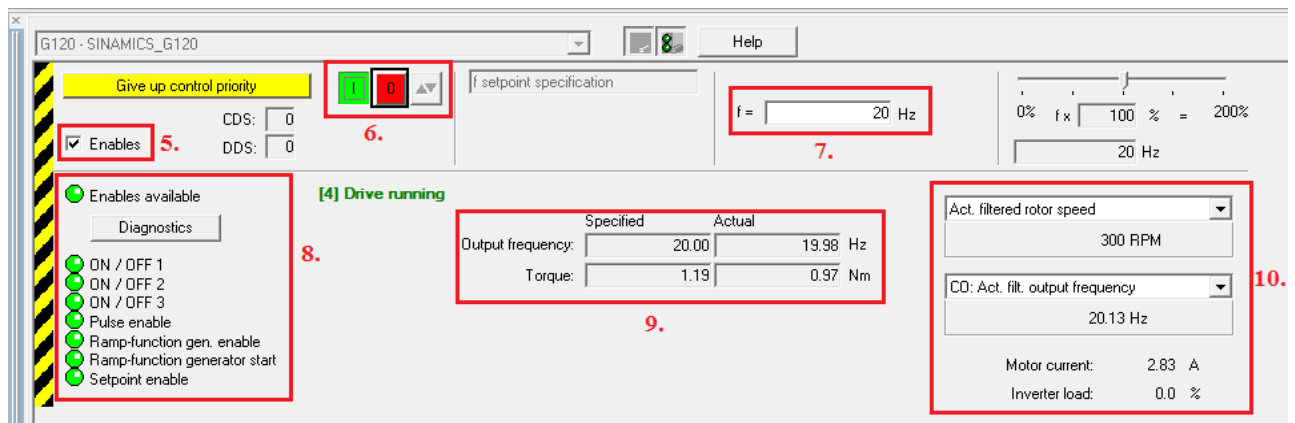
Frekvencijskim pretvaračem može se upravljati pomoću *Starter-a* u *online* načinu rada. Tada se frekvencijskim pretvaračem upravlja lokalno, točnije, sve naredbe dolaze serijskom vezom od strane programskog paketa *Starter* (slika 3.15.-16.). Kako bi se prešlo u ovaj način rada, potrebno je slijediti nekoliko koraka (uvjet je ostvarena serijska komunikacija s frekvencijskim pretvaračem) prikazanih slikama 3.15. i 3.16.:

1. Prijeći u *online* način rada.
2. Otvoriti karticu upravljačke ploče.
3. Preuzeti kontrolu nad frekvencijskim pretvaračem.
4. Podesiti vrijeme nadzora – odgovara vremenskom rasponu od zadavanja referentne vrijednosti do vraćanja povratne informacije od strane frekvencijskog pretvarača.
5. Omogućiti upravljanje frekvencijskim pretvaračem.
6. Pokretanje/zaustavljanje frekvencijskog pretvarača.
7. Zadavanje referentne vrijednosti frekvencije.



Sl. 3.15. Upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću *Starter-a*.

Na ovaj način omogućeno je preuzimanje kontrole nad frekvencijskim pretvaračem, te upravljanje istim. Oznaka 8. na slici 3.16. prikazuje statusne bitove upravljačke riječi. Pod oznakom 9. vidljiva je referentna te stvarna vrijednost frekvencije. Oznaka 10. prikazuje dva padajuća izbornika gdje se proizvoljno mogu odabrati parametri asinkronog motora koji se žele nadzirati (napon, brzina okretaja, struja i drugi parametri).



Sl. 3.16. Upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću Starter-a.

3.2. Programski paket *Drive Monitor*

Drive Monitor (V5.5) je programski paket koji se koristi za parametriranje Siemens Masterdrives frekvencijskih pretvarača (link za preuzimanje programskog paketa pod [26]). U odnosu na *Starter*, *Drive Monitor* je nešto stariji programski paket te je funkcionalan na operacijskom sustavu Microsoft Windows 2000, a ima podršku i na najnovijim verzijama Microsoft Windows operacijskih sustava.

Parametri upravljačke jedinice dijele se na parametre koje je moguće samo čitati (npr. parametar „r“ koji služi za očitavanje temperature pretvarača) i parametre koje je moguće i pisati i čitati (npr. parametar „P107“ gdje se unosi nazivna vrijednost frekvencije motora). Osim parametriranja, ovim programskim paketom se također može upravljati pogonom, vidjeti greške i alarme, te prikazivati vremenske dijagrame.

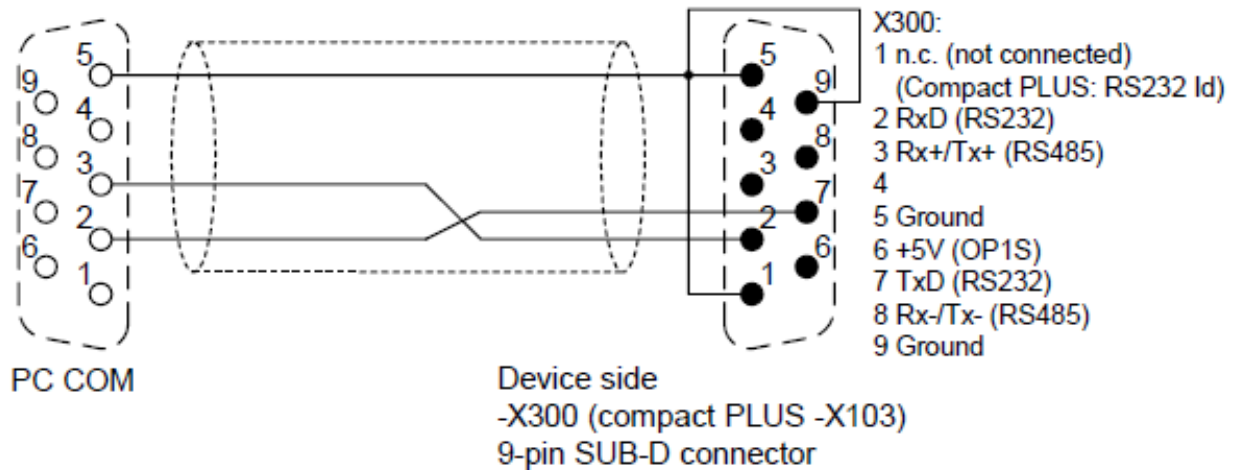
3.2.1. Komunikacija frekvencijskog pretvarača s računalom

Da bi se ostvarila komunikacija između računala i frekvencijskog pretvarača nužno je da postavke serijske veze u pretvaraču i *Drive Monitor* programskom alatu budu iste. Serijska komunikacija (SST) definirana je:

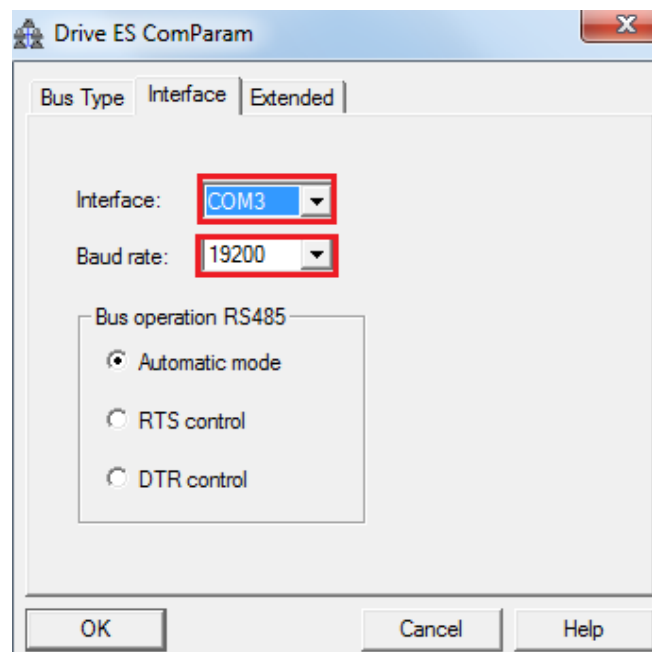
- COM portom preko koje se odvija komunikacija (broj COM porta se može vidjeti pomoću Windows alata *Device Manager* – slika 3.4.),
- brzinom prijenosa (koja može biti: 9600, 19200, 38400 [bit/s]) i definira se u pretvaraču parametrom P684,
- adresom uređaja koja je definirana u pretvaraču parametrom P683 (indeks 001).

Kada su te postavke poznate, treba ih unijeti u *Drive Monitor-u*.

Brzina prijenosa podataka između računala i frekvencijskog pretvarača postavljena je na 19200 [bit/s], a adresa pretvarača je 0. USB/RS-232 pretvarač radi preko COM porta 3, što je prikazano slikom 3.18. Komunikacija se uspostavlja preko RS-232 serijskog sučelja na operatorskom panelu koji koristi nestandardni kabel, čiji su pinovi prikazani slikom 3.17. Također se PC COM konektor spaja na USB/RS-232 pretvarač te se na taj način ostvaruje komunikacija s osobnim računalom.



SI. 3.17. Kabel za komunikaciju između računala i Simovert frekvencijskog pretvarača [11].



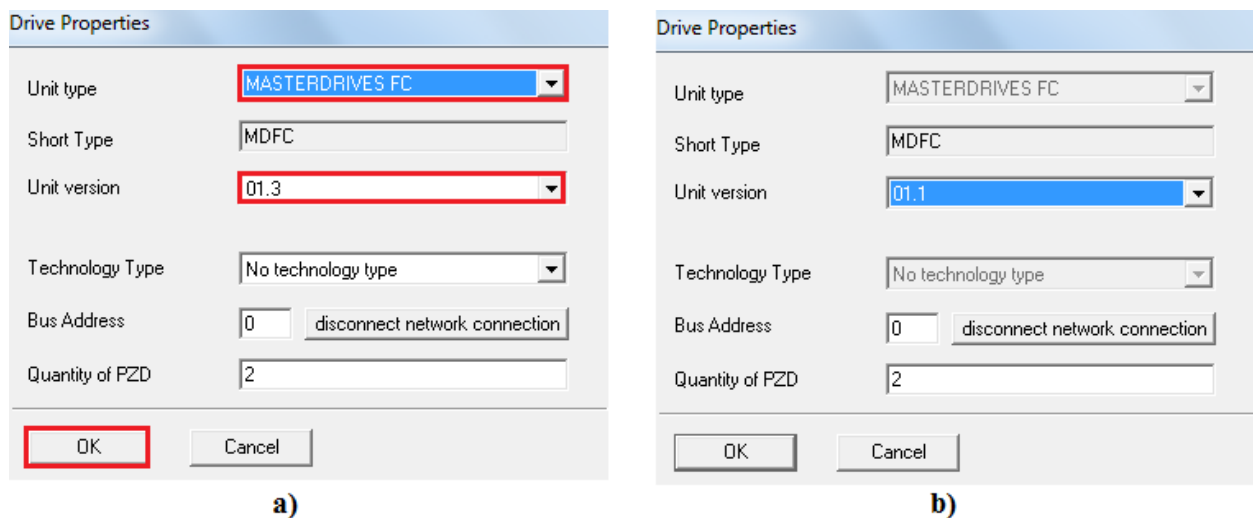
SI. 3.18. Uspostavljanje komunikacije između frekvencijskog pretvarača i osobnog računala.

Slika 3.18. prikazuje postavljene parametre unutar programskog paketa *Drive Monitor*. Parametre kartica *Bus Type* i *Extended* nije potrebno mijenjati. Do prikazane kartice dolazi se na

sljedeći način: *Drive Monitor* → *Tools* → *Online Settings*. Parametri sa slike 3.18. moraju biti isti kao i parametri USB/RS-232, koji se mogu mijenjati, a prikazani su slikom 3.4.

3.2.2. Kreiranje novog projekta i uspostavljanje komunikacije

Kako bi se kreirao novi projekt, nužno je nakon izmijenjenih parametara za uspostavljanje komunikacije, ponovno pokrenuti *Drive Monitor*. Novi projekt kreira se na sljedeći način: *Drive Monitor* → *File* → *New* → *Based on factory setting*.

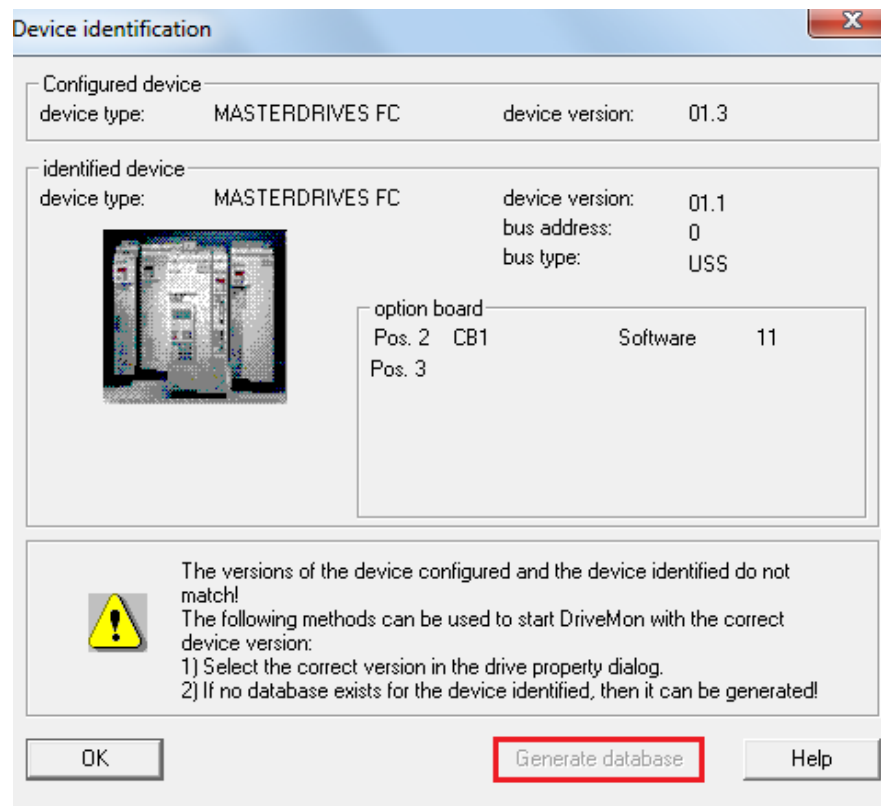


Sl. 3.19. Kreiranje novog projekta pomoću *Drive Monitor-a*.

Slika 3.19.a. prikazuje karticu za kreiranje novog projekta, gdje su crvenom bojom označeni bitni parametri. Pritiskom na naredbu OK otvara se kartica s mogućnošću naziva projekta te odabira lokacije za spremanje projekta. Da li je komunikacija između osobnog računala i frekvencijskog pretvarača uspostavljena, može se provjeriti na sljedeći način: *Drive Monitor* → *View* → *New* → *Online (Write EPROM)*. Ukoliko je komunikacija uspostavljena, status uređaja će biti ok, a ukoliko nema uspostavljene komunikacije, status uređaja će biti ne (engl. *no connection*). U tom slučaju potrebno je ručno, pomoću operatorskog panela provjeriti i izmijeniti parametre P053 (postaviti u vrijednost 7 ili 31) te parametar P684 (postaviti u vrijednost 7 – 19200 Baud-a)

Ako *Drive Monitor* ne podržava verziju firmvera 1.1. (slika 3.19.b), potrebno je generirati novu bazu podataka s pripadajućom verzijom. Prilikom uspostavljanje *online* komunikacije s frekvencijskim pretvaračem, sam *Drive Monitor* prepoznaje da su različite verzije između kreiranog frekvencijskog pretvarača te identificiranog pretvarača. U tom slučaju prikazuje se

prozor prikazan slikom 3.20., gdje je potrebno generirati novu bazu podataka. Nakon generiranja iste, moći će se odabrati nova verzija frekvencijskog pretvarača, što je prikazano slikom 3.19.b.



Sl. 3.20. Identifikacija frekvencijskog pretvarača prilikom uspostavljanja online režima rada.

Na slici 3.20. prikazano je upozorenje ukoliko nije dobro kreiran projekt, odnosno, nije odabrana odgovarajuća verzija frekvencijskog pretvarača u ovom slučaju. Kako u bazi podataka ne postoji verzija 1.1., istu je potrebno ažurirati. To je potrebno napraviti samo prilikom prvog kreiranja projekta, a nakon toga, prilikom novog kreiranja s istim frekvencijskim pretvaračem, može se odabrati odgovarajuća verzija.

3.2.3. Parametriranje frekvencijskog pretvarača

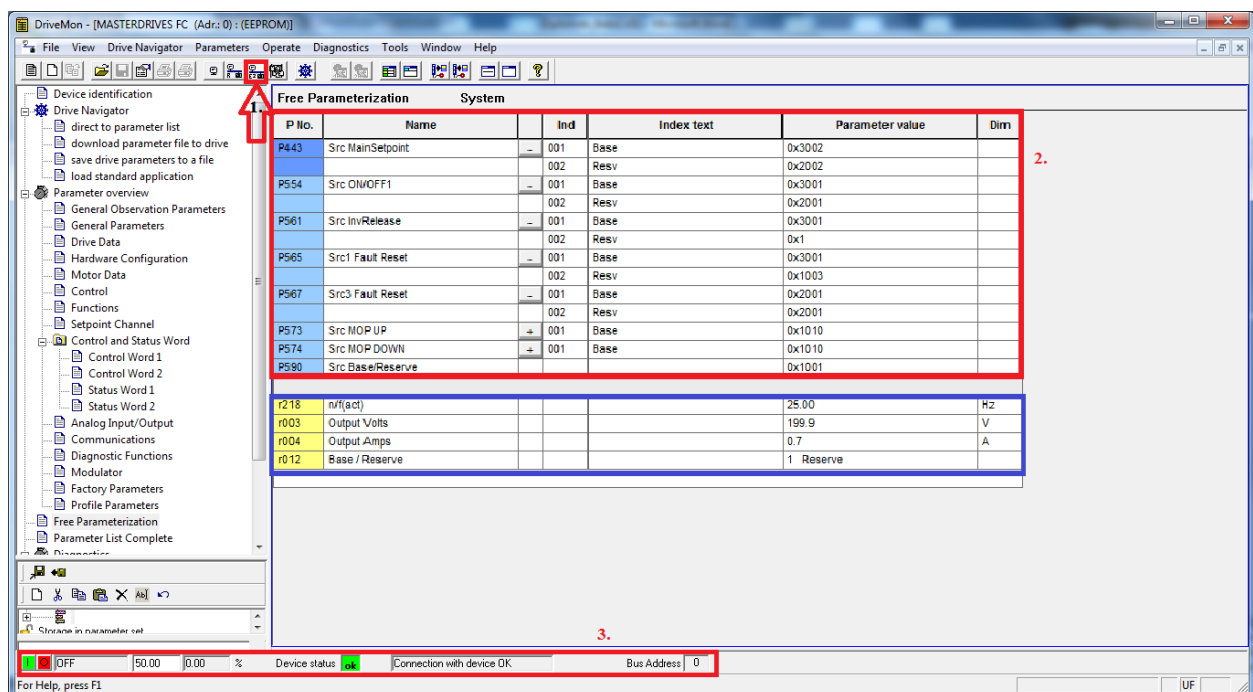
Frekvencijski pretvarač može se parametrirati na dva načina, u *offline* i *online* režimu rada. Ukoliko se parametri mijenjaju u *offline* režimu rada, potrebno ih je nakon izmjene spremi te prenijeti u frekvencijski pretvarač na slijedeći način: *Drive Monitor* → *Drive Navigator* → *Download parameter file to drive*. Ukoliko se parametri mijenjaju u *online* načinu rada, tada se promjena parametra automatski prihvaća u samom frekvencijskom pretvaraču, te ih je moguće mijenjati ukoliko je parametar P051 postavljen u vrijednost 3, što znači da se radi o stručnom korištenju frekvencijskog parametra. Treba imati na umu da se neki parametri (za svaki

parametar treba provjeriti u priručniku od pretvarača) mogu mijenjati samo u određenom stanju pretvarača i u određenom načinu rada koji je definiran vrijednošću parametra P052. U tom slučaju, izmijenjeni parametri se mogu spremiti kao projekt na slijedeći način: *Drive Monitor* → *Drive Navigator* → *Save drive parametar do file*.

Vrlo je važno pripaziti na unos parametara asinkronog motora (P100 do P109), te da se parametri postavljene unutar frekvencijskog pretvarača podudaraju s nazivnim podacima trofaznog asinkronog motora, prikazanim tablicom 2.7. Također je vrlo važno utvrditi spoj trofaznog asinkronog motora. Na samoj natpisnoj pločici prikazani su i podaci za spoj zvijezda i za spoj trokut (D) koji su prikazani slikom 2.10. Asinkroni motor u ovom slučaju u spoju zvijezda (Y), što je vidljivo unutar priključne kutije samog asinkronog motora. Simovert frekvencijski pretvarač podržava samo skalarno upravljanje (P163 i P165).

3.2.4. Parametri za upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću *Drive Monitor-a*

Simovert frekvencijskim pretvaračem se također može upravljati lokalno, pomoću programskog paketa *Drive Monitor* instaliranog na PC-u. Postizanje ovog načina rada odvija se parametriranjem frekvencijskog pretvarača.



Sl. 21. Upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću *Drive Monitor-a*.

Na slici 3.21. prikazano je upravljanje *Simovert* frekvencijskim pretvaračem pomoću *Drive Monitor-a*. Slika je podijeljena u tri djela, označena crvenom bojom. Potrebno je napraviti

upravo ta tri koraka označena crvenom bojom kako bi se frekvencijski pretvarač doveo u ovaj režim rada (uz prethodno ispunjen uvjet uspješno ostvarene serijska komunikacija frekvencijskog računala i PC-a):

1. spojiti se na Simovert frekvencijski pretvarač – *online* režim rada,
2. podesiti parametre prema drugom koraku označenom na slici,
3. pritiskom na naredbu ON preuzima se kontrola nad frekvencijskim pretvaračem.

Na slici 3.21., okvirom crvene boje prikazani su parametri s pripadnim vrijednostima parametara (detaljan opis vrijednosti parametara prikazan je slikom P.2. u prilogu). Parametar P590 definira izvor zadavanja upravljačkih riječi. Parametar ima dva stanja, a isparametrirano je da se ta dva stanja mijenjaju pomoću prvog digitalnog ulaza smještenog na frekvencijskom pretvaraču (vrijednost parametra 0x1001):

- [0] *Base*, referentna vrijednost (P443) zadaje se preko PROFIBUS komunikacijske sabirnice, CB (vrijednost parametra 0x3001),
- [1] *Reserve*, referentna vrijednost (P443) se zadaje preko serijske komunikacijske sabirnice, SST (vrijednost parametra 0x2001).

Stanje parametra P590 postavljeno je u vrijednost „1“ te je vidljivo na parametru r012. Na taj način omogućava se upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću *Drive Monitor-a*. Pod upravljanjem se podrazumijeva funkcija pokretanje/zaustavljanje frekvencijskog pretvarača (P554 vrijednost parametra 0x2001) te zadavanje referentne vrijednosti frekvencije (P443 vrijednost parametra 0x2002).

Plavo označeno bojom su neki od parametara za čitanje:

- r218 – čitanje stvarne vrijednosti frekvencije upravljanja,
- r003 – čitanje vrijednosti napona motora,
- r004 – čitanje vrijednosti struje motora.

Zadana referentna vrijednost frekvencije je 50% od nazivne vrijednosti frekvencije, stoga je iznos parametra r218 25 [Hz].

4. PROGRAMIBILNI LOGIČKI UPRAVLJAČ – PLC

SIMATIC S7-300 radna stanica sa standardnom centralnom procesorskom jedinicom, CPU, i dodatnim modulima (*ethernet* i PROFIBUS) klasično je rješenje kod proizvodnih linija u industriji i industrijskim procesima [4]. U svrhu upravljanja i nadzora nad sustavom, izgrađen je upravljački programski kod. Preduvjet za upravljanje je neprekinuta i nesmetana podatkovna komunikacija između frekvencijskog pretvarača i PLC-a, te PLC-a i osobnog računala (HMI). Blokovski prikaz sustava upravljanja, prikazan je slikom 1.1.

Uvodni dio u programibilne logičke upravljače, u daljnjem tekstu PLC, prikazan je u drugom poglavlju. Kroz ovo poglavlje detaljnije je prikazano hardversko konfiguriranje PLC-a, parametrisiranje i postavljanje adresa modula, konfiguracija komunikacijske veze, programiranje PLC-a te problemi koji su se pojavili prilikom uspostavljanja komunikacije između PLC-a i frekvencijskih pretvarača (FC 1 i FC 2 blokovi).

4.1. STEP 7

Za programiranje PLC-a korišten je Siemensov SIMATIC Manager STEP 7 (link za preuzimanje na [29]), inženjerski programski paket, koji za rad zahtjeva osobno računalo s Microsoft Windows operacijskim sustavom. SIMATIC Manager STEP 7 omogućuje:

- uspostavljanje komunikacije s PLC-om,
- kreiranje hardverske konfiguracije (mreža, moduli i sl),
- pisanje programskog koda – programiranje,
- učitavanje i prijenos podataka (spremanje i prebacivanje na PLC),
- *online* pristup PLC-u,
- podešavanje karakteristika PLC-a,
- detekciju i otklanjanje kvarova,
- praćenje toka programa,
- kreiranje tablica za praćenje toka programa i modificiranje varijabli.

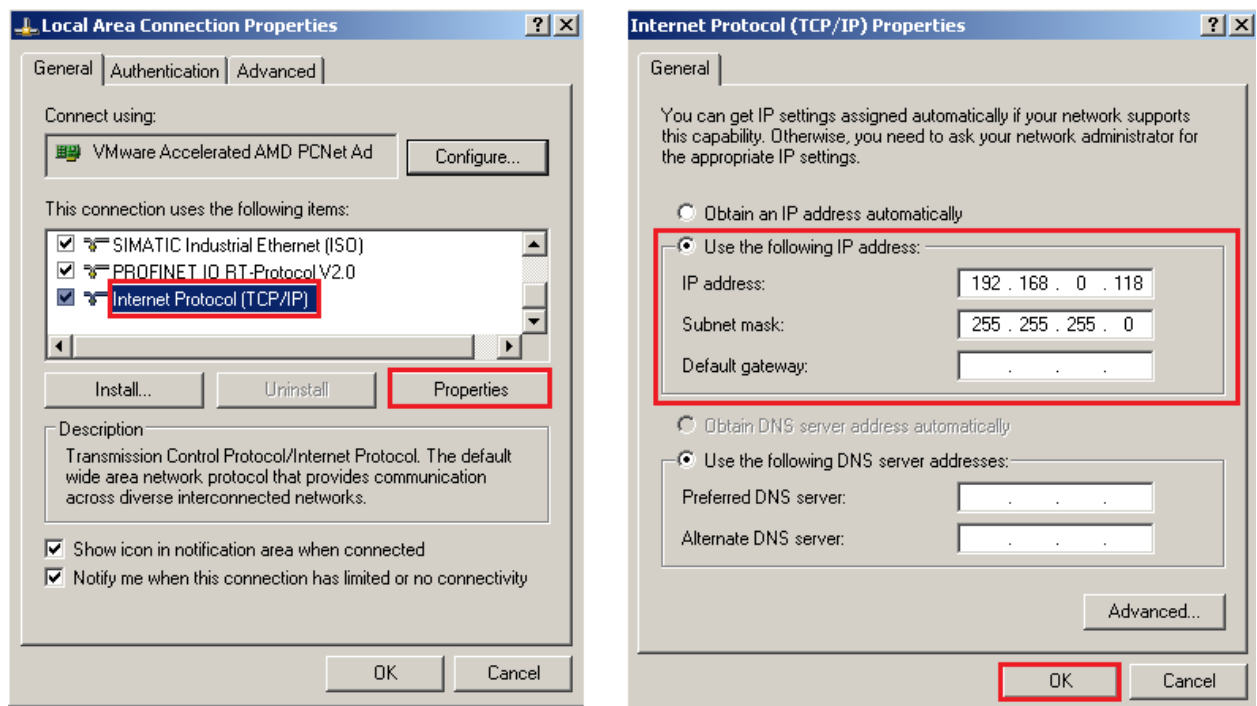
Postupak kreiranja i upravljanja s laboratorijskim postavom pomoću STEP 7 inženjerskog alata, može se prikazati sljedećim koracima:

- ✓ izrada novog projekta,
- ✓ dodavanje S7-300 jedinice,
- ✓ konfiguracija hardvera,
- ✓ konfiguracija komunikacijske mreže (PROFIBUS, *ethernet*),
- ✓ dodjela imena ulazno izlaznim signalima,
- ✓ pisanje upravljačkog programa,
- ✓ pokretanje upravljačkog programa.

4.2. Uspostavljanje komunikacije s osobnim računalom

Kako osobno računalo nema MPI sučelje, veza između osobnog računala i PLC-a ostvarena je *ethernet* kabelom preko CP343-1 modula koji je definiran u konfiguraciji PLC-a. Za uspješnu komunikaciju između osobnog računala i PLC-a potrebno je poznavati IP adresu samog *ethernet* modula (192.168.0.3.) koji je korišten. Veza između računala i *ethernet* modula može se provjeriti na dva načina. Jedan od načina je da se pokuša uspostaviti *online* način rada (*STEP 7* → *HW Configuration* → *Station* → *Open Online*) ili da se *ping-a* adresa samog *ethernet* modula preko naredbenog retka (engl. *Command Prompt*, *cmd*).

Ukoliko se ni na jedan način ne može uspostaviti komunikacija s PLC-om, u postavkama računalne mrežne kartice potrebno je postaviti parametre kao na slici 4.1.

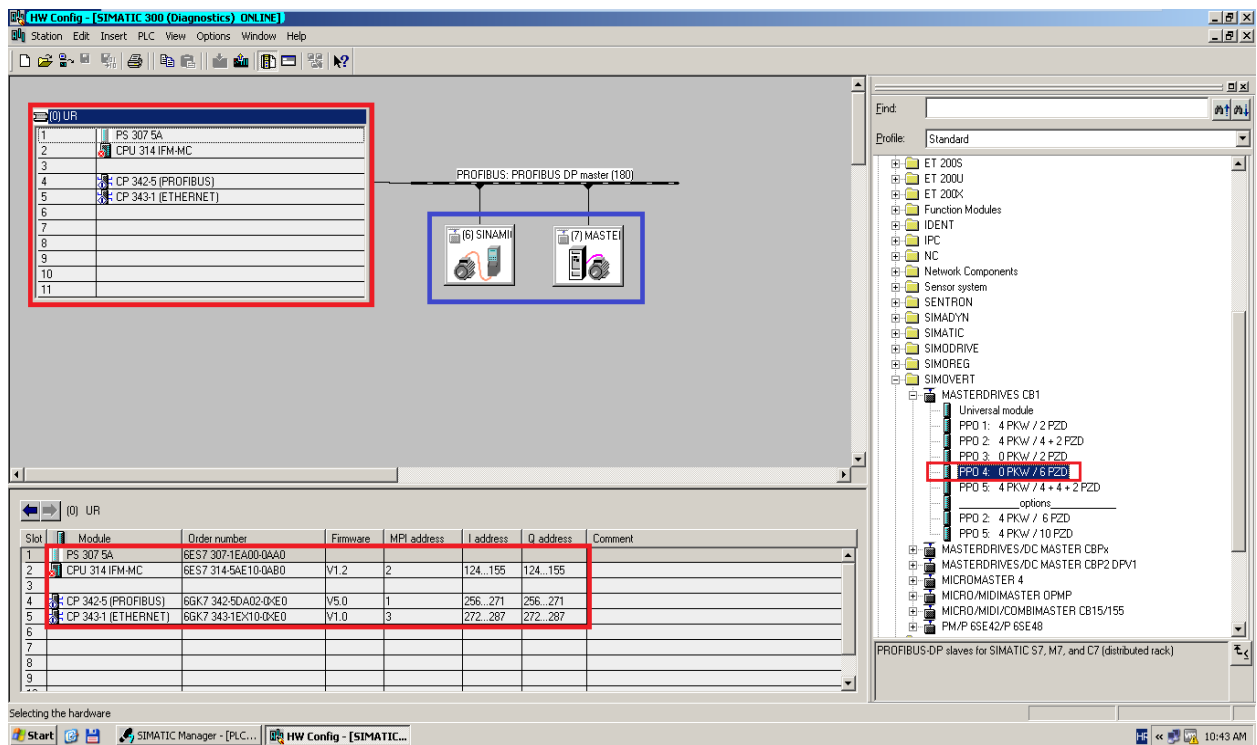


Sl. 4.1. Postavke mrežne kartice osobnog računala.

4.3. Hardverska konfiguracija PLC-a

Nakon kreiranja novog projekta (*STEP 7* → *File* → *New*), u programskom paketu *STEP 7* dodaje se nova stanica koja izvršava rad, u ovom slučaju to je *SIMATIC S7-300* stanica (desni klik na projekt → *Insert New Object* → *SIMATIC 300 Station*). Hardverska konfiguracija prikazana je slikom 4.2. u *online* načinu rada, ali se konfiguracija provodi *offline* bez komunikacijske veze s PLC-om. Iznimno je važno odabrati ispravne module i verzije modula s tipskim oznakama (engl. *Order Number*) koje se nalaze na svakom modulu. Pored toga, u

hardverskoj konfiguraciji specificiraju se ulazno izlazne adrese hardvera (broj riječi, podataka), MPI adrese, PROFIBUS adrese, brzina prijenosa podataka, te se mogu dijagnosticirati kvarovi.



Sl. 4.2. Hardverska konfiguracija – online način rada.

Na slici 4.2. prikazana je hardverska konfiguracija cijelog laboratorijskog postava. Na okviru (služe za fizički smještaj modula) je definirana S7-300 jedinica (uokvireno crvenom bojom), dok su frekvencijski pretvarači spojeni na PROFIBUS DP, gdje se mogu mijenjati njihove PROFIBUS adrese i dužina podatkovnog paketa (uokvireno plavom bojom). Frekvencijski pretvarač Sinamics s pripadajućim energetskim modulom i upravljačkom jedinicom (G120 CU240S-DP) ne postoji u bazi podataka, te je potrebno instalirati .gsd datoteku (STEP 7 → HW Configuration → Options → Install GSD File) koja se može pronaći na Siemens stranici podrške (<http://support.automation.siemens.com/WW/view/en/23450835>). Za Simovert frekvencijski pretvarač odabran je MASTERDRIVES CB1 iz baze podataka STEP 7 programskog paketa. MASTERDRIVES CB1 definira korišteno PROFIBUS sučelje, a odabran je PPO4 podatkovni paket, koji definira izmjenu podataka duljine od 6 riječi.

Online način rada omogućava i dijagnozu problema u hardverskoj konfiguraciji (komunikacija između PLC-a i frekvencijskih pretvarača, PROFIBUS Slave). Na slici 4.2. pored centralne procesorske jedinice, CPU, vidljiv je crveni simbol koji dijagnosticira pogrešku (detaljnije na slici 4.12.). U ovom slučaju, simbol je vidljiv zbog neispravne baterije na CPU modulu. Ispravan režim rada prikazan je simbolima na ethernet i PROFIBUS modulu, dok je

uspješna komunikacija s frekvencijskim pretvaračima ostvarena ukoliko su simboli u gornjem lijevom kutu pripadajućih blokova svijetlo sive boje kao na slici 4.2.

Utor 3 (engl. *Slot*) u hardverskoj konfiguraciji rezerviran je za module sučelja (engl. *Interface Module*), IM, koji međusobno povezuju okvire prilikom višeo okvirne konfiguracije. Ukoliko nema potrebe za tim modulom, tor ostaje prazan.

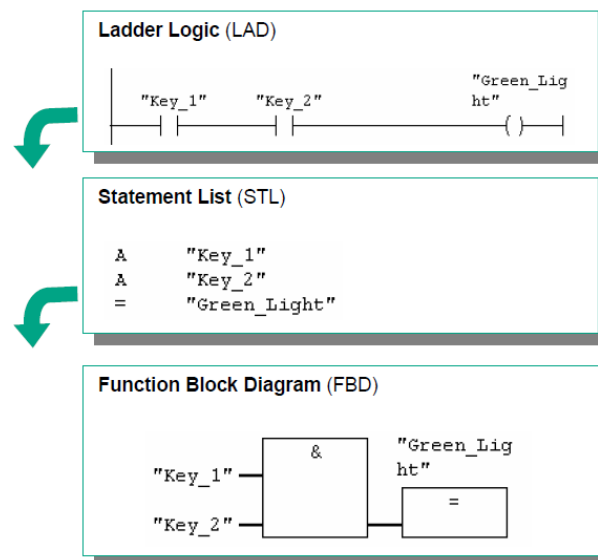
4.4. Programiranje PLC-a

Prilikom programiranja PLC-a postoji osobni izbor korisnika za programiranje. STEP 7 podržava nekoliko programskih jezika te postoji široka paleta već kreiranih korisničkih blokova. Sam upravljački program može se razdvojiti u više manjih samostalnih dijelova, što omogućava lakše snalaženje po kreiranom upravljačkom programu.

4.4.1. Programski jezici

Programski jezici koriste se za pisanje upravljačkog programa. Postoji nekoliko programskih jezika i metoda programiranja. STEP 7 podržava slijedeće programske jezike:

- LAD (engl. *Ladder Diagram*) - ljestvičasti dijagram,
- FBD (engl. *Function Block Diagram*) – funkcijsko-blokovski dijagram,
- STL (engl. *Statement List*) – lista naredbi.



Sl. 4.3. Prikaz programskih jezika [21].

LAD programiranje predstavlja najjednostavniji oblik kreiranja programa, koristeći grafičke elemente (kontakti, svitci, blokovi) koji se međusobno povezuju u obliku električne sheme (zamjena za relejne sklopove). Ovaj programski jezik ujedno je korišten za izradu

upravljačkog programa pri izradi ovog diplomskog rada. Kod FBD programiranja program se kreira spajanjem funkcijskih blokova (blokovi logičkih operacija, kompleksni blokovi za složene funkcije) na čije se ulaze dovode stanja signala. Prilikom korištenja STL programskog jezika, upravljački program kreira se unošenjem STL naredbi redak po redak. Svaki redak sadrži jednu naredbu. Zajedničko svakom programskom jeziku jest da se oni upisuju u blokove [4]. Na slici 4.3. prikazana su sva tri programska jezika gdje je prikazano izvršenje logičke operacije „I“. Ukoliko su oba ulaza (*Key 1* i *Key 2*) u stanju logičke jedinice „1“, tada će se na izlazu pojaviti stanje logičke jedinice „1“ koja pali rasvjetu (*Green Light*).

4.4.2. Korisnički blokovi

STEP 7 omogućava razdvajanje upravljačkog programa u više samostalnih dijelova koji imaju specifičnu funkciju, strukturu ili vezu sa zadatkom procesa. Takvi dijelovi nazivaju se blokovi, te je poželjno strukturiranje programa u pojedinačne blokove, pogotovo kod velikih i složenih projekata upravljačkih programa.

Object name	Symbolic name	Created in language	Size in the work me...	Type	Version (Header)	Name (Header)	Unlinked	Author	Non-Retain
System data	...	...	...	...	...	SDB	...	...	...
DB1	COM_DB_MAIN	"Main Program Sweep (Cy...	LAD	86	Organization Block	0.1	...	...	...
DB122	MOD_ERR	"Module Access Error"	LAD	38	Organization Block	0.1	...	...	...
FC1	DP_SEND	...	STL	886	Function	3.0	DP_SEND	...	...
FC2	DP_RECV	...	STL	950	Function	3.0	DP_RECV	...	...
FC96	COMMON_INTxREAL>IN...	MULTIPLIES AN INTEGE...	LAD	88	Function	0.0	...	...	...
FC100	COM_DRIVE_FC	...	LAD	904	Function	0.1	...	...	...
FC101	DRIVE1_CONTROL	DRIVE 1 CONTROL	LAD	1416	Function	0.1	...	...	...
FC103	DRIVE2_CONTROL	DRIVE 2 CONTROL	LAD	1418	Function	0.1	...	...	...
FC105	DRIVE₁_HMI	COPY DATA TO HMI	LAD	1594	Function	0.1	...	...	...
FC117	RAMP	...	LAD	418	Function	0.1	...	...	...
DB9	HMI_SETUP	...	DB	64	Data Block	0.1	...	...	...
DB10	HMI_COMMANDS	...	DB	42	Data Block	0.1	...	...	...
DB11	HMI_ALARMS	...	DB	38	Data Block	0.1	...	...	...
DB12	HMI_STATUS	...	DB	48	Data Block	0.1	...	...	...
DB15	HMI_MONITORING	...	DB	110	Data Block	0.1	...	...	...
DB100	WORK_DB	...	DB	64	Data Block	0.1	...	...	...
DB101	DRIVE1_CNTRL_DB	...	DB	70	Data Block	0.1	...	...	...
DB102	DRIVE2_CNTRL_DB	...	DB	70	Data Block	0.1	...	...	...
UDT100	DRIVE_READ_DATA	...	STL	...	Data Type	0.1	...	...	...
UDT102	DRIVE_WRITE_DATA	...	STL	...	Data Type	0.1	...	...	...
UDT104	DRIVE2_READ_DATA	...	STL	...	Data Type	0.1	...	...	...
UDT106	DRIVE2_WRITE_DATA	...	STL	...	Data Type	0.1	...	...	...
VAT_1	VAT_1	...	...	...	Variable Table	0.1	...	...	...
VAT_2	VAT_2	...	...	...	Variable Table	0.1	...	...	...
SFC20	SET_RTM	...	STL	...	System function	1.0	SET_RTM	...	...
SFC21	BLKMOV	...	STL	...	System function	1.0	BLKMOV	...	...
SFC58	FILL	...	STL	...	System function	1.0	FILL	...	...
SFC59	WR_REC	...	STL	...	System function	1.0	WR_REC	...	...
SFC59	RD_REC	...	STL	...	System function	1.0	RD_REC	...	...

SI. 4.4. Prikaz blokova upravljačkog programa.

Slika 4.4. prikazuje kreirani upravljački program, na kojem su prikazani korišteni blokovi. Izvođenje upravljačkog programa izvodi se ciklički, što znači da se prilikom završetka izvođenja upravljačkog programa, isti započinje ponovno izvoditi. Korišteni su sljedeći blokovi:

- ✓ **Organizacijski blok** (engl. *Organization Block*), OB – predstavljaju sučelje između operacijskog sustava i upravljačkog programa. Glavni program nalazi se u organizacijskom bloku OB 1, gdje se pozivaju funkcijski blokovi i funkcije.
- ✓ **Funkcijski blokovi** (engl. *Function Block*), FB - su dijelovi upravljačkog programa koji se mogu parametrirati i statički pohraniti neke od podataka svojstvenih bloku u trajno pridruženi podatkovni blok.
- ✓ **Funkcije** (engl. *Function*), FC – se najviše koriste za programiranje ponavljajućih funkcija unutar procesa. Za razliku od FB-a, FC nema pridruženi podatkovni blok. U funkcijskim blokovima FC 101 i FC 103 izvedene su naredbe za upravljanje svakim frekvencijskim pretvaračem zasebno, dok su u FC 100 definirane naredbe za upravljanje frekvencijskim pretvaračima u isto vrijeme (zadavane referentne vrijednosti, reverziranje smjera vrtnje i dr.).
- ✓ **Sistemske funkcije** (engl. *System Function*) – isprogramirane funkcije koje su dio programskog paketa STEP 7 te se nalaze u biblioteci SIMATIC Manager-a.
- ✓ **Podatkovni blokovi** (engl. *Data Block*), DB – sadržavaju podatke upravljačkog programa (statusne riječi, kontrolne riječi i dr.).
- ✓ **Korisnički podatkovni blok** (engl. *User Defined Data Type*), UDT – ima strukturu korisničkog tipa podataka koja se kreira proizvoljno. UDT se ne može pozvati u PLC-u, nego se poziva u DB-ima.
- ✓ **Tablice varijabli** (engl. *Variable Table*) – njihova funkcija je nadziranje i modificiranje željenih varijabli prilikom izvođenja programa.

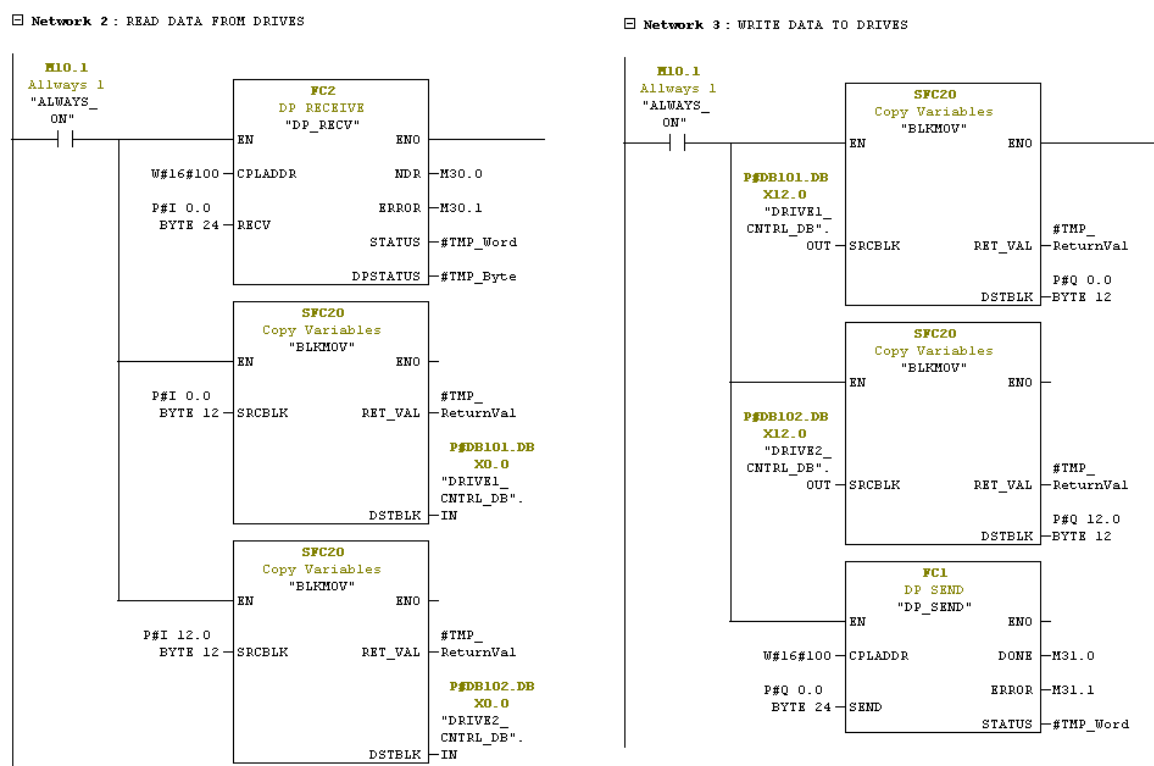
Nakon što je upravljački program kreiran, isti se može pohraniti u memoriju PLC-a. Kako PLC nema memorijsku karticu, niti ispravnu bateriju, uslijed prestanka napajanja potrebno je ponovno pohranjivanje upravljačkog programa u memoriju PLC-a (*SIMATIC Manager* → *PLC* → *Download*), što predstavlja nedostatak, odnosno onemogućuje se neprekinuti rad PLC-a.

4.4.3. FC1 (DP_SEND) i FC2 (DP_RECV)

Zbog korištenja komunikacijskog procesora CP 342-5, u upravljačkom programu neophodni su blokovi FC 1 (DP_SEND) i FC 2 (DP_RECV) za izmjenu podataka. FC 1 šalje podatke frekvencijskom pretvaraču, dok FC 2 čita podatke s frekvencijskog pretvarača. Oba bloka su u bazi STEP 7 programskog paketa.

Ono što je bitno napomenuti jest pravilno adresiranje prilikom korištenja ova dva bloka. I Sinamics i Simovert frekvencijski pretvarač koriste podatkovne pakete od šest riječi, odnosno 12

byte-a. Na Sinamics frekvencijskom pretvaraču raspon ulazne i izlazne adrese je od 0 do 11 byte-a, dok Simovert frekvencijski pretvarač ima raspon ulazne i izlazne adrese od 12 do 23, što znači da je ukupna vrijednost podataka koje PLC šalje i prima 24 byte-a. Ukoliko adresiranje ne počne od vrijednosti 0, PROFIBUS komunikacijski procesor izbacuje pogrešku, te nije moguće uspostaviti pravilnu komunikaciju. Pomoću bloka SFC 20 omogućava se zapis bitova u podatkovne blokove DB 101 (Sinamics) i DB 102 (Simovert). U lijevoj mreži (slika 4.5) prikazan je postupak čitanja podataka s frekvencijskih pretvarača, te kopiranje istih u pripadajuće podatkovne blokove. Prva riječ je statusna riječ. Desna mreža (slika 4.5.) prikazuje zapis podataka na frekvencijski pretvarač (kontrolne riječi i reference).



Sl. 4.5. Parametriranje FC 1 i FC 2 bloka.

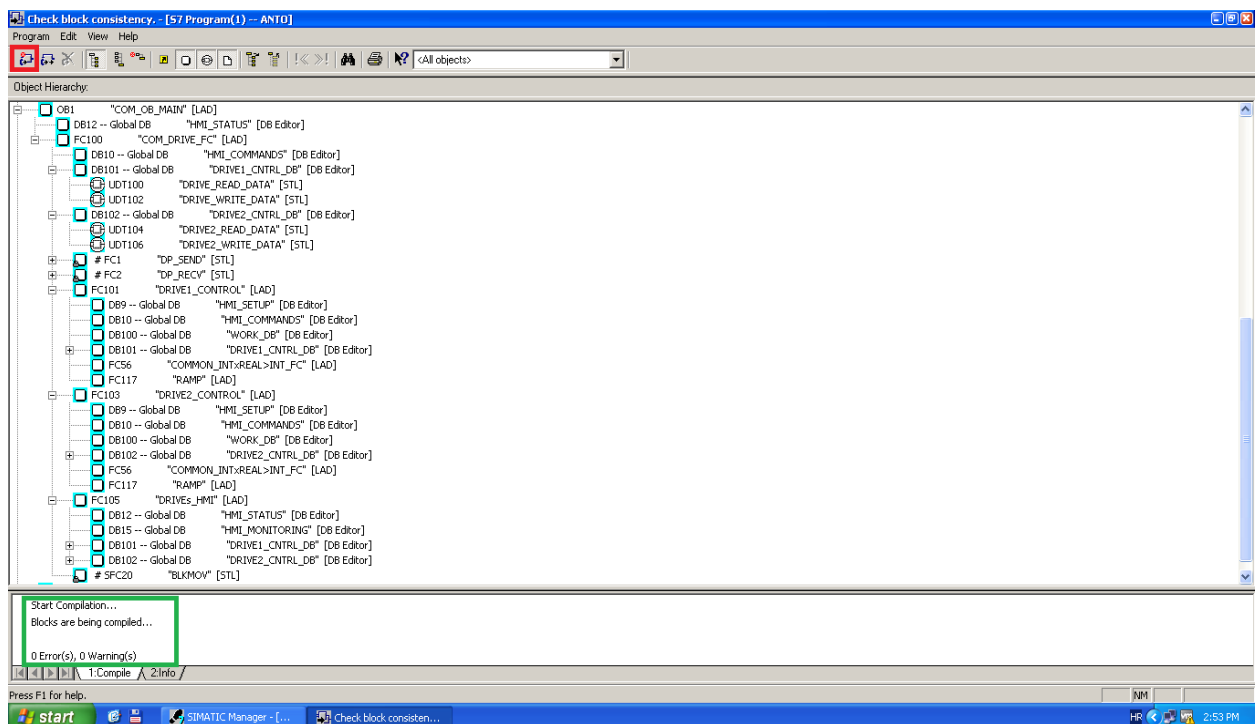
Na slici 4.5. prikazani su parametri FC 1 i FC 2 blokova. CPLADDR predstavlja početnu adresu CP 342-5 modula u heksadecimalnom obliku (početna adresa počinje s 256, što je u heksadecimalnom obliku 100). RECV i SEND počinju od vrijednosti 0 i šalju, odnosno primaju 24 byte-a. S desne strane FC 1 i FC 2 blokova su statusne riječi koje signaliziraju da li je podatak uspješno poslan (DONE) ili je podatak prekinut (ERROR).

Ukupna duljina paketa koji se prenosi je 24 byte-a, što nije zahtjevno za prijenos podataka. Samim time mogućnost zagušenja (mrtvo vrijeme) u komunikacijskom kanalu je vrlo mala, jer je laboratorijski postav izveden od PLC-a i dva frekvencijska pretvarača gdje je ukupna

dužina PROFIBUS kabela oko 3 [m], a na takvim malim duljinama kabela brzina prijenosa podataka može ići do 12 [Mbit/s]. Brzina PROFIBUS komunikacije, odnosno prijenosa podataka postavljena je na 1.5 [Mbit/s]. Trajanje izvođenja ciklusa programa je u vremenskom intervalu od 6 – 18 [ms], što čini izvođenje programa vrlo brzim.

4.4.4. Ispitivanje dosljednosti blokova

Budući da je sam programski kod poprilično velik, odnosno sadrži veći broj funkcijskih blokova koji sadrže i veći broj mreža za definiranje izvođenja zadataka, preporuča se ispitati dosljednost, odnosno povezanost funkcijskih blokova. Naredbama *STEP 7* → *Edit* → *Check Block Consistency* može se doći do prozora prikazanog slikom 4.6. Naredbom *Compile* označenom crvenom bojom, pokreće se ispitivanje dosljednosti, odnosno da li su blokovi unutar programskog paketa povezani na ispravan način. Može se dogoditi da se prilikom kreiranja programskog koda unutar nekog od funkcijskih blokova, isti ne pozove u organizacijskom bloku, koji izvršava program.

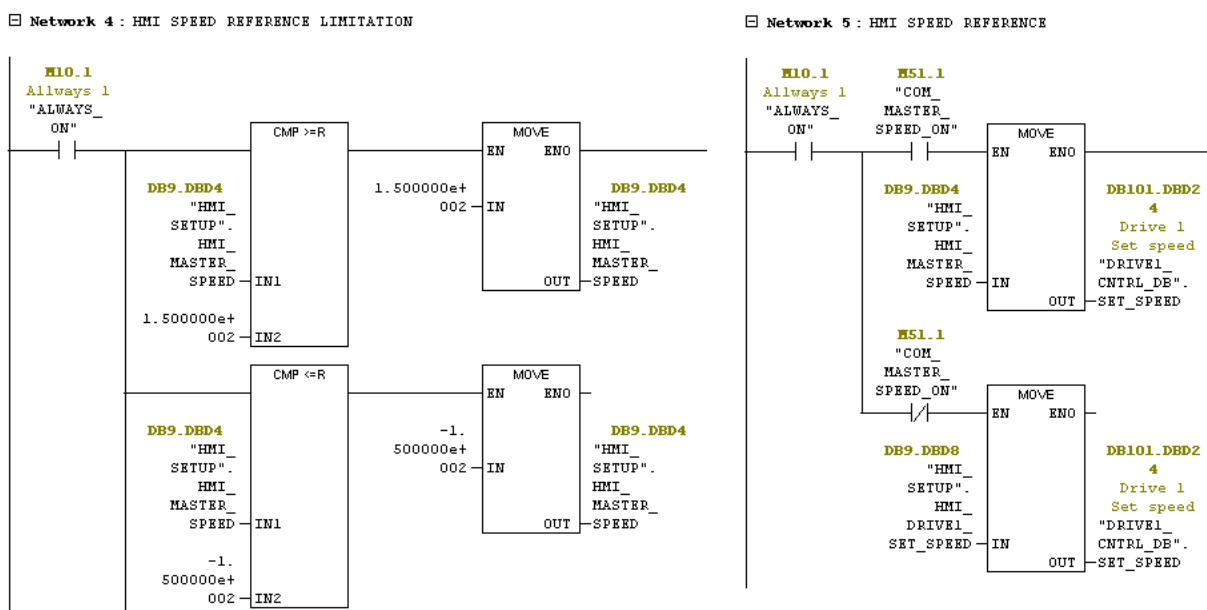


blokovi FC 101, FC 103 i FC 105. Na taj način se veći programi raščlanjuju na manje programe radi lakšeg pronalaženja grešaka. Kod podatkovnih blokova vidi se njihova povezanost s korisnički definiranim blokovima koji se ne prenose na PLC.

4.4.5. Programski kod za postavljanje referentne brzine

Ovim odjeljkom prikazani su neki dijelovi programskog koda koji su definirani za frekvencijski pretvarač Siemens. Analogno tome, isto vrijedi i za frekvencijski pretvarač Simovert, koji su u programskom kodu odvojeni radi lakšeg pronalaženja grešaka i lakšeg nadziranja.

Pored definiranja izmjene podataka pomoću FC 1 i FC 2 blokova, potrebno je definirati kojim redosljedom se riječi šalju i čitaju. Taj dio je odrađen u podatkovnom bloku DB 101 (za Sinamics frekvencijski pretvarač), gdje se pozivaju korisnički definirani blokovi za čitanje (UDT 100) i pisanje (UDT 102) podataka na frekvencijski pretvarač.



Sl. 4.7. Dio programskog koda za zadavanje referentne brzine.

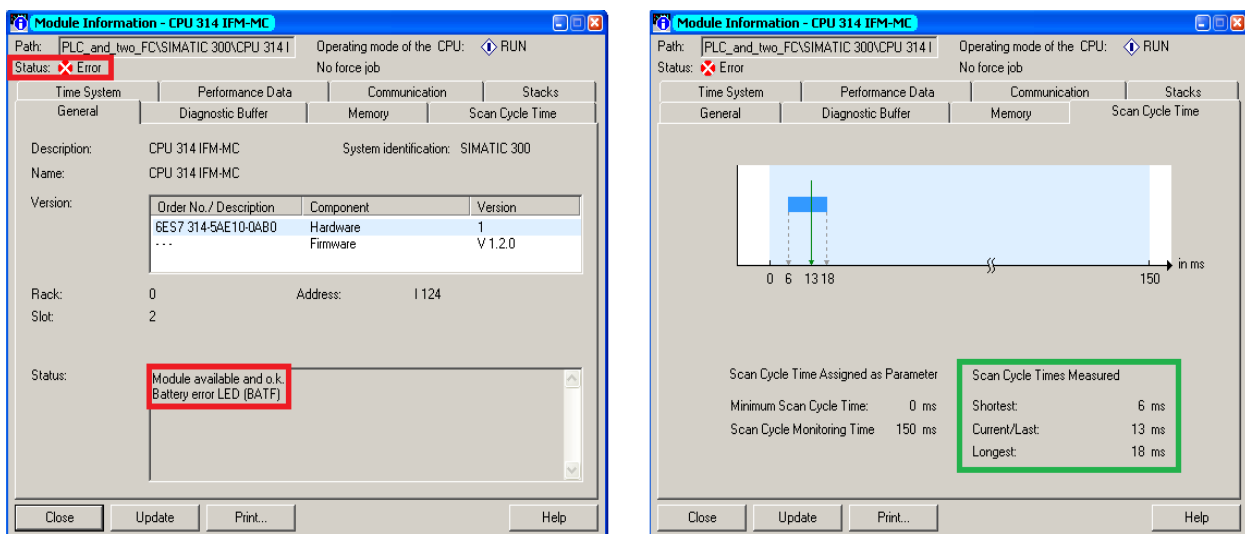
Na slici 4.7. (lijevo, mreža 4) prikazan je programski kod za limitiranje referentne brzine, gdje se referentna brzina zadana u postocima uspoređuje s limitiranom vrijednošću. Referentna brzina se zadaje u isto vrijeme za oba frekvencijska pretvarača. Napravljena je ista logika ukoliko se s frekvencijskim pretvaračima upravlja odvojeno. Ukoliko je postavljena referentna vrijednost prevelika, PLC neće izvesti program do kraja. Limitirana vrijednost brzine je na $\pm 150\%$ od nazivne vrijednosti. Ukoliko je referentna vrijednost brzine unutar granica naredba se

4.4.6. Ciklus izvođenja upravljačkog programa PLC-a

Rješenje zadatka automatizacije pohranjuje se u memoriji centralne procesorske jedinice, CPU-a, u obliku programskih naredbi koje se izvode ciklički (nakon što je korisnički program u potpunosti izveden, slijedi ponovno izvođenje programa ispočetka). Kako se sam sustav upravljanja sastoji od dva frekvencijska pretvarača s pripadajućim asinkronim motorima te jednim PLC-om (slika 1.1.), vrijeme izvođenja jednog ciklusa je u intervalu od 6 – 18 [ms].

Na slici 4.9. desno, vidljiv je podatak o vremenu trajanja izvođenja ciklusa u *online* režimu rada. Pored toga, mogu se dodatno još vidjeti i podatci o memoriji upravljačke jedinice, dijagnoza kvara i greški, način rada te trenutni status upravljačke jedinice i još mnoge druge korisne informacije.

Slika 4.9. lijevo prikazuje općenite informacije o centralnoj procesorskoj jedinici. Može se uočiti kako postoji greška CPU-a, čiji je razlog neispravna baterija (crveno uokvirena polja). Sam modul je raspoloživ i funkcionalan te je u režimu rada „RUN“, odnosno u procesu izvođenja programskog algoritma.



Sl. 4.9. Prikaz informacija za upravljačku jedinicu PLC-a u online režimu rada.

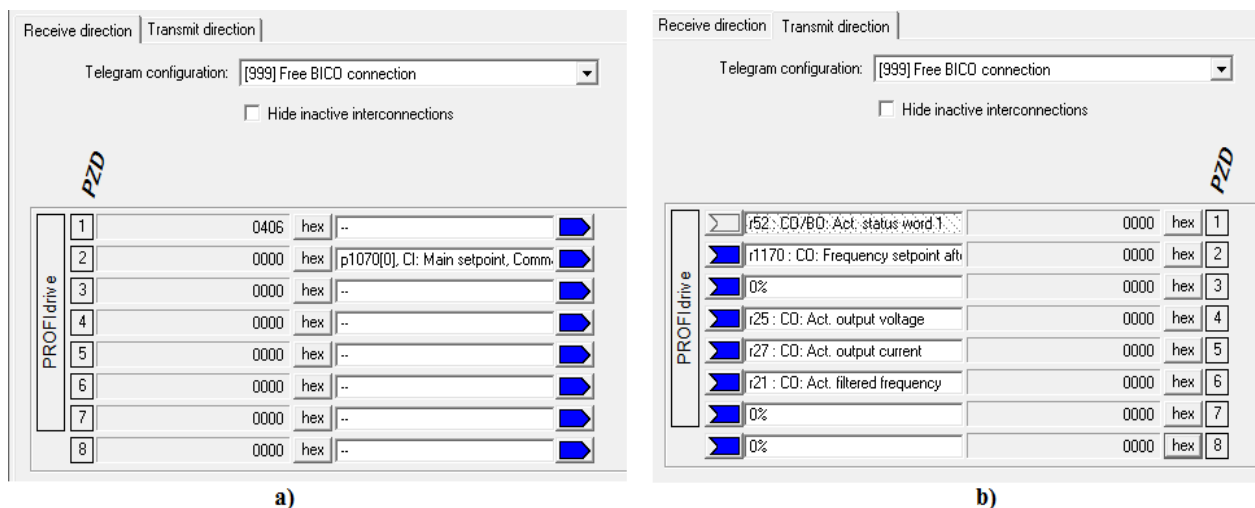
4.5. Priprema frekvencijskih pretvarača za upravljanje pomoću PLC-a

Ovim odjeljkom prikazane su naredbe kojima se omogućuje izmjena podataka frekvencijskog pretvarača s PLC-om i obrnuto. Osim toga, prikazane su duljine podatkovnih paketa koji se prenose PROFIBUS industrijskom sabirnicom, te vrijednosti koje se čitaju/pišu u frekvencijske pretvarače.

4.5.1. Sinamics

Parametar p700 definira vrstu komunikacije (PROFIBUS). Ukoliko se parametar p918 (PROFIBUS adresa), ne podudara s onom adresom koja je postavljena u *hardware* konfiguraciji koja se postavlja na PLC-u, upravljanje frekvencijskim pretvaračem pomoću PLC-a neće biti ostvareno.

Parametar p922 definira podatkovni paket koji se ciklički prenosi između PLC-a i frekvencijskog pretvarača. Pored već standardnih podatkovnih paketa 1,20, 352 i drugih, postoji mogućnost samostalnog definiranja podatkovnog paketa (engl. *Free BInector/COnnector connection*) koji će se prenositi između frekvencijskog pretvarača i PLC-a. Razlog čitanja samo ovih parametara i u tom redosljedu je iz razloga što je u samom programskom kodu PLC-a postavljen takav redosljed podatkovnog paketa. Maksimalan broj riječi koji se može prenijeti podatkovnim paketom je osam riječi. Svaka riječ se sastoji od 16 bitova, što kod statusne riječi znači da svaki bit predstavlja jedan parametar.



Sl. 4.10. Definiranje podatkovnih paketa koji se prenose PROFIBUS komunikacijskom sabirnicom.

Na slici 4.10.a. prikazane su riječi koje frekvencijski pretvarač prima od PLC-a. Prva riječ je kontrolna riječ te je ona predefiniрана i ne može se mijenjati [19]. Druga riječ omogućava zadavanje referentne brzine. Na slici 4.10.b. prikazane su riječi koje frekvencijski pretvarač šalje PLC-u. Prva riječ je također predefiniрана te je to statusna riječ. Druga riječ omogućava čitanje zadane referentne vrijednosti frekvencije, dok je peta riječ iznos struje asinkronog motora. Ove riječi korištene su u izradi HMI aplikacije, dok su četvrta riječ, izlazni napon, i šesta riječ, frekvencija, korištene za snimanje valnih oblika. Ovo je samo jednostavan primjer razmjene

podataka. Koje će se informacije razmjenjivati u praksi, ovisi o vrsti i zahtjevima strojeva koje se pogoni, potrebama PLC upravljačkog programa i HMI-a.

4.5.2. Simovert

Za uspješnu komunikaciju i razmjenu podataka između *Simovert* frekvencijskog pretvarača i PLC-a, osim neprekinute komunikacije, potrebno je podesiti parametre prikazane i objašnjene tablicom 4.1. PROFIBUS adresa u samom frekvencijskom pretvaraču mora odgovarati onoj PROFIBUS adresi koja je postavljena u hardverskoj konfiguraciji PLC-a. Pored toga, mora biti uključen PROFIBUS modul (P090) te odgovarajući način izmjene podataka, koji se mijenja parametrom P053.

Tab. 4.1. Prikaz postavljenih parametara za uspostavljanje PROFIBUS komunikacije.

Parametar	Vrijednost	Značenje
P090	1 CB	Uključivanje PROFIBUS modula
P053	7 CB+PMU+SCo1	Način izmjene podataka
P918	7	PROFIBUS adresa
P697	4	PPO4 – podatkovni paket (6 riječi) [20]

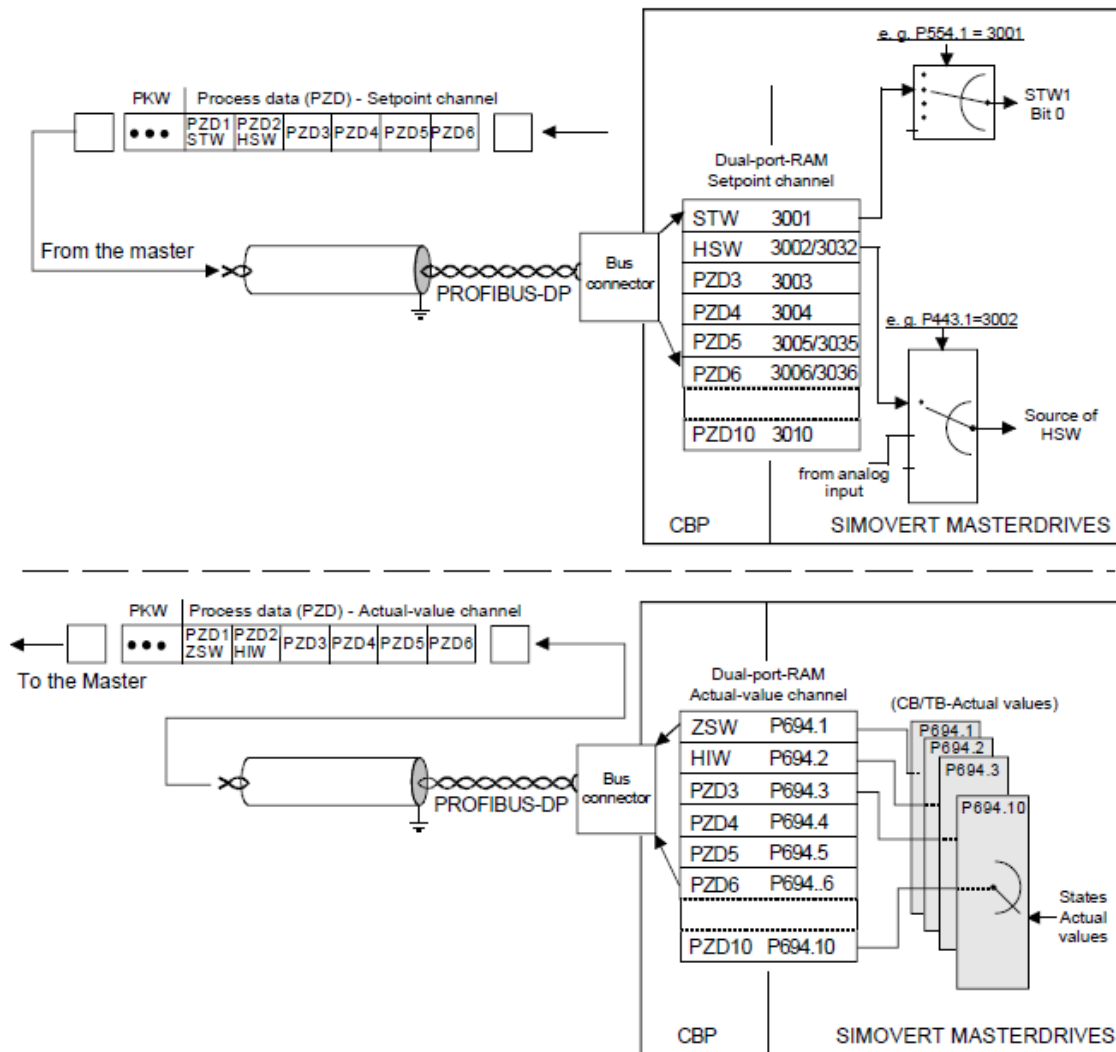
U tablici 4.2. prikazan je parametar P694 koji definira vrijednosti (riječi s odgovarajućim parametrima) koje frekvencijski pretvarač šalje PLC-u (slika 4.11. dolje). Prva riječ (W01) je statusna riječ, koja je predefiniрана u samom frekvencijskom pretvaraču. Druga riječ (W02) omogućava čitanje zadane referentne vrijednosti frekvencije (parametar r447), dok je peta riječ (W05) iznos struje asinkronog motora (parametar r179). Za potrebe snimanja valnih oblika, dodane su četvrta (parametar r3 – napon asinkronog motora) i peta riječ (parametar r218 – frekvencija motora).

Tab. 4.2. Parametar P694 – riječi koje frekvencijski pretvarač Simovert šalje PLC-u.

Parameter List Complete						
P No.	Name		Ind	Index text	Parameter value	Dim
P694	CB/TB Act Values	-	001	W01	968	
			002	W02	447	
			003	W03	0	
			004	W04	3	
			005	W05	179	
			006	W06	218	

Na slici 4.11. prikazan je princip izmjene podatkovnog paketa između PLC-a i frekvencijskog pretvarača s pripadajućim parametrima. Gornja slika prikazuje parametre koje PLC šalje frekvencijskom pretvaraču. Prva riječ je kontrolna riječ (njem. *Steuerwort*, STW),

druga riječ je referentna vrijednost (njem. *Hauptwert*, HIW), dok se ostalih osam riječi može mijenjati (njem. *Prozessdaten*, PZD 3-10) ovisno o potrebama procesa, odnosno PLC-a. Donja slika prikazuje parametre koje frekventijski pretvarač *Simovert* šalje PLC-u, odnosno vrijednosti koje PLC čita. Prva riječ je statusna riječ (njem. *Zustandswort*, ZTW), druga riječ je referentna vrijednost (njem. *Hauptsollwert*, HSW), dok se ostalih osam riječi također može mijenjati (njem. *Prozessdaten*, PZD 3-10).



Sl. 4.11. Principijelni prikaz razmjene podatkovnog paketa između PLC-a i Simovert frekventijskog pretvarača.

Postavljena duljina podatkovnog paketa u ovom primjeru je PPO4 (engl. *Parameter Process data Object*), što znači da je duljina podatkovnog paketa 6 riječi. Prva riječ je statusna riječ te se ne smije mijenjati. Maksimalna duljina podatkovnog paketa je 10 riječi [20].

5. HMI SUČELJE

HMI (engl. *Humane Machine Interface*) je osnovni element ili podsustav SCADA sustava (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition/Humane Machine Interface*), koji predstavlja sučelje čovjek – stroj, odnosno sučelje između operatera i stroja. Od najjednostavnijih tekstualnih, do nešto složenijih grafičkih prikaza, HMI sučelje omogućava nadzor nad strojem ili postrojenjem.

HMI sučelje izgrađeno je pomoću Windows upravljačkog centra (engl. *Windows Control Center*), WinCC. WinCC je inženjerski programski alat koji zahtjeva Windows operacijski sustav te omogućava konfiguriranje HMI uređaja. Budući da je WinCC programski alat koji omogućava i izvođenje programa u stvarnom vremenu (engl. *Runtime*), osobno računalo lako postaje HMI uređaj za nadzor i upravljanje.

5.1. WinCC Explorer

Postoji nekoliko verzija WinCC programskih alata, a korištena verzija je WinCC Explorer. S WinCC Explorerom može se kreirati jednokorisnički i višekorisnički projekt (*WinCC Explorer → File → New*), te konfigurirati veza prema upravljanoj sustavu.

Grafički dizajner (engl. *Graphics Designer*), unutar WinCC Explorera, koristi se za stvaranje procesnih prikaza. U svojem razumljivom i jednostavnom korisničkom sučelju s alatima i grafičkim paletama, te integriranim objektima i bibliotekom simbola, grafički dizajner omogućava kreiranje različitih specijalističkih zadataka za HMI sučelja.

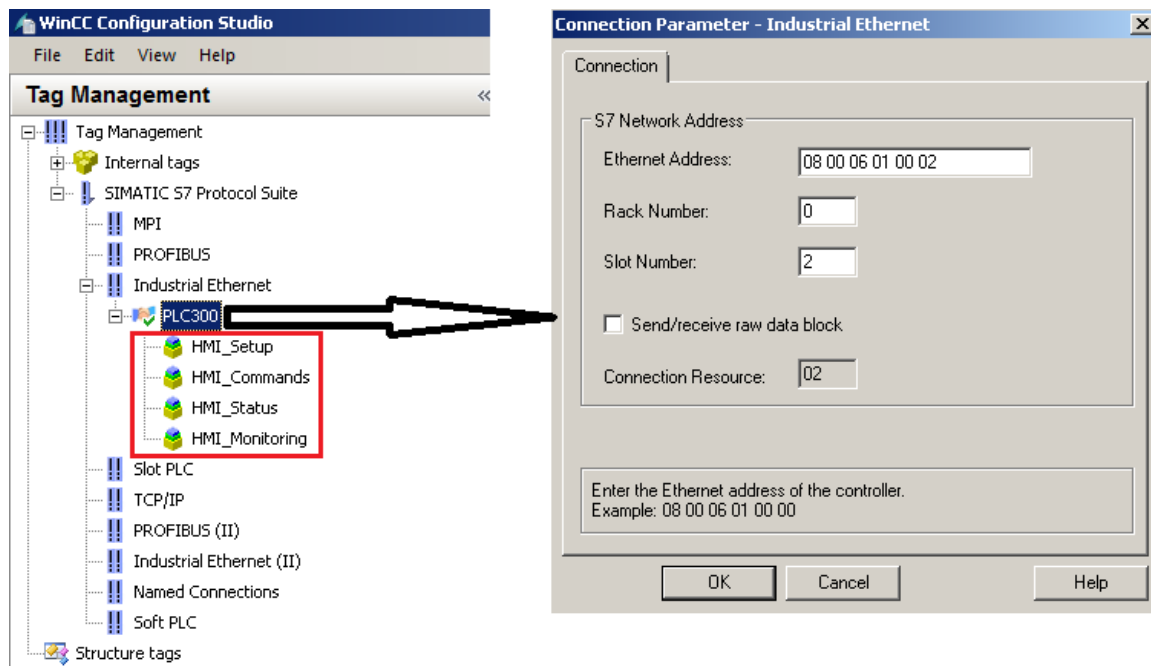
Pomoću oznaka za upravljanje (engl. *Tag Management*) u menadžeru oznaka mogu se kreirati sučelja za slanje naredbi PLC-u te se mogu vizualizirati promjene unutar laboratorijskog sustava.

5.2. Uspostavljanje komunikacije s PLC-om

Veza osobnog računala, odnosno WinCC-a s PLC-om ostvarena je pomoću *ethernet* kabela (slika 1.1.) te se konfigurira u menadžeru oznaka. Potrebno je napraviti nekoliko koraka kako bi se ostvarila uspješna komunikacija:

1. *Tag Management (desni klik) → Add New Driver → SIMATIC S7 Protocol Suite,*
2. *Industrial ethernet ili TCP/IP (desni klik) → New Connection → PLC 300,*
3. *PLC 300 (desni klik) → Connection Parameters.*

U drugom koraku prikazano je kako se komunikacija može ostvariti preko TCP/IP (engl. *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) protokola ili preko industrijskog *etherneta*. Oba načina su ispravna, u jednom slučaju se u parametre komunikacije unosi IP adresa, dok se u drugom slučaju unosi MAC adresa *ethernet* modula. Na ovaj način je uspostavljena komunikacija WinCC-a s PLC-om što je prikazano na slici 5.1., gdje je uz PLC 300 zelena oznaka s kvačicom.

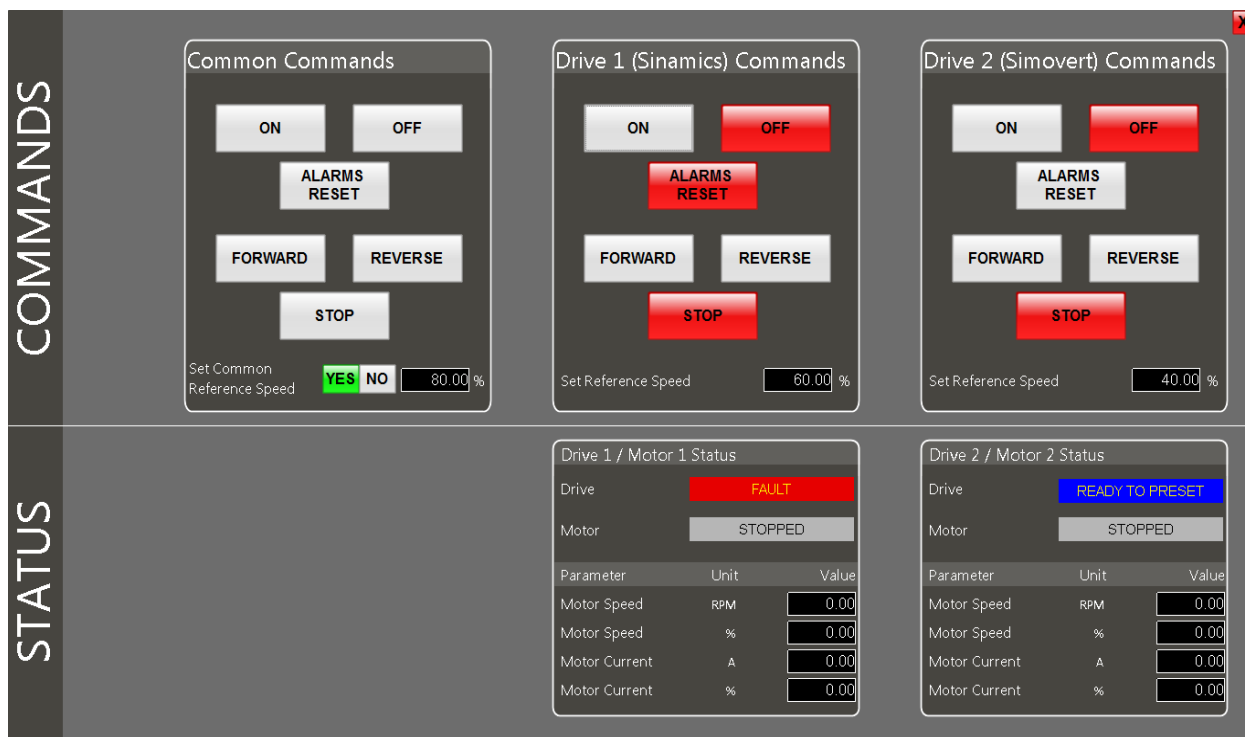


Sl. 5.1. *Uspostavljanje komunikacije između WinCC-a i PLC-a.*

Na slici 5.1. prikazan je treći korak prilikom uspostavljanja komunikacije. Ukoliko komunikacije nije uspješna, u postavkama računalne mrežne kartice potrebno je postaviti parametre kao na slici 4.1. Na slici 5.1. također su kreirane oznake za upravljanje laboratorijskim postavom, koje su označene crvenom bojom te podijeljene u četiri grupe. Kreirane grupe oznaka odgovaraju podatkovnim blokovima sa slike 4.4. (DB 9, DB 10, DB 12 i DB 15). Pomoću kreiranih grupa oznaka (naredbe, statusi) i grafičkog sučelja definira se i vizualizira sučelje operater – stroj.

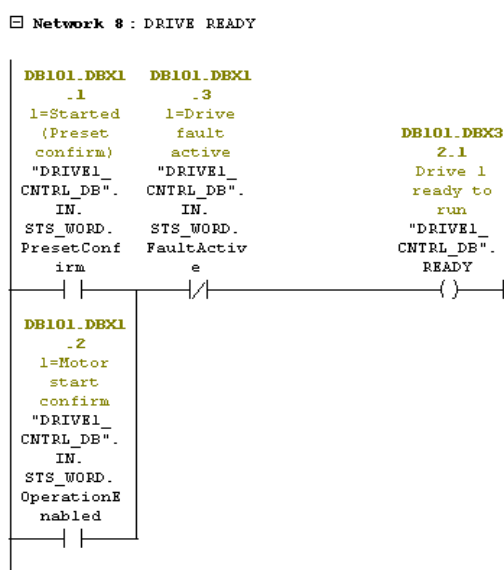
5.3. Izvođenje u stvarnom vremenu

Aktiviranjem projekta u WinCC Explorer programskom paketu, omogućava se izvođenje programa u stvarnom vremenu. Na taj način omogućuje se upravljanje laboratorijskim postavom s pomoću kreiranog grafičkog sučelja u grafičkom dizajneru, koji je povezan s oznakama za upravljanje.



Sl. 5.2. Prikaz HMI sučelja u stvarnom vremenu.

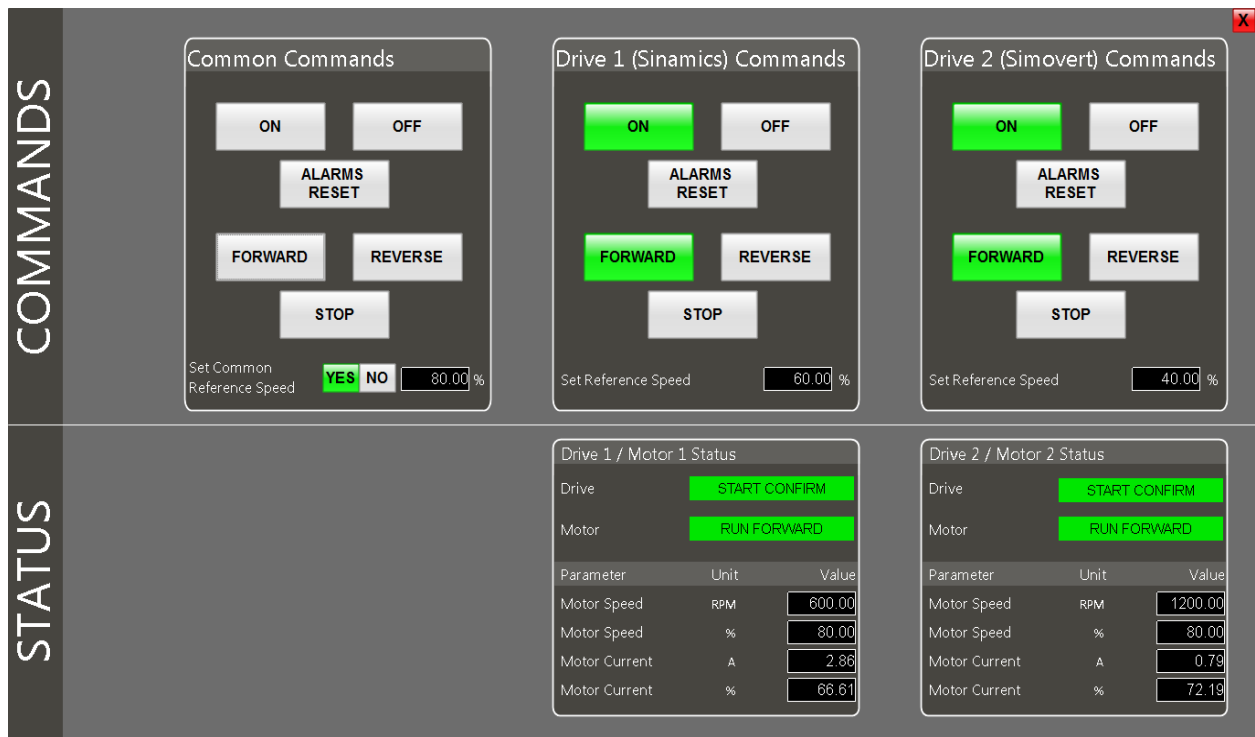
Na slici 5.2. prikazano je kreirano grafičko sučelje u grafičkom dizajneru. Naredbe se mogu zadavati za oba frekvencijska pretvarača u isto vrijeme ili se može upravljati svakim frekvencijskim pretvaračem zasebno. U statusnom dijelu HMI-a vidljivi su statusi frekvencijskih pretvarača i njima pripadajućih trofaznih asinkronih motora. Na slici je vidljivo kako je Simovert frekvencijski pretvarač spreman za upravljanje, dok Sinamics frekvencijski pretvarač ima grešku. Greška se otklanja slanjem naredbe „ALARMS RESET“.



Sl. 5.3. Programski kod za otklanjanje pogreške Sinamics frekvencijskog pretvarača.

Na slici 5.3. prikazan je dio programskog koda koji ne omogućuje pokretanje Sinamics frekvencijskog pretvarača ukoliko je aktivan statusni bit „FAULT“. Nakon resetiranja greške, bit „FAULT“ prelazi u stanje logičke nule „0“, te ukoliko se pritisne naredba „ON“, frekvencijski pretvarača će preći u stanje „READY“, odnosno u stanje pripravnosti.

Naredbom „FORWARD“ ili „REVERSE“ omogućuje se pokretanje asinkronog motora u lijevom ili desnom smjeru. „STOP“ naredba služi za zaustavljanje trofaznog asinkronog motora, dok naredba „OFF“ služi za isključivanje frekvencijskog pretvarača.



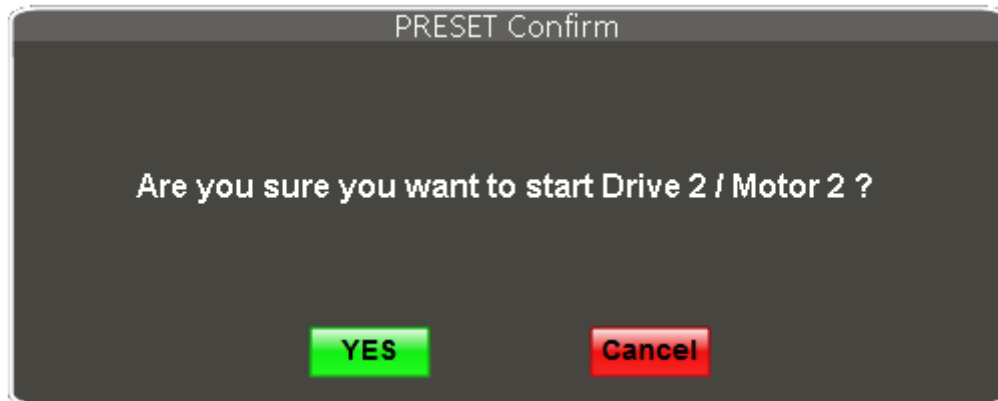
Sl. 5.4. Prikaz HMI sučelja u stvarnom vremenu.

Na slici 5.4. vidljiv je HMI prikaz kada je laboratorijski postav u pogonu. Referentna vrijednost brzine zadana je na istu vrijednost u postotcima (80.00 % od nazivne vrijednosti), što se omogućava naredbom „YES“ u prozoru sa zajedničkim naredbama. Ukoliko se uključi naredba „NO“, referentna brzina trofaznih asinkronih motora će pasti na zadane vrijednosti u pripadajućim prozorima (60 % i 40 % od nazivne brzine). Sve ove naredbe programirane su u STEP 7 programskom paketu, čiji je programski kod prikazan slikama 4.7. i 4.8.

Prikaz statusa trofaznih asinkronih motora i frekvencijskih pretvarača mijenja se ovisno o režimu rada pogona. U statusnim prozorima mogu se iščitati vrijednosti brzina trofaznih asinkronih motora u postotcima i u okretajima u minuti [okr/min] te vrijednosti struja trofaznih asinkronih motora, također u postotcima te u amperima [A]. Ukoliko se frekvencijskim

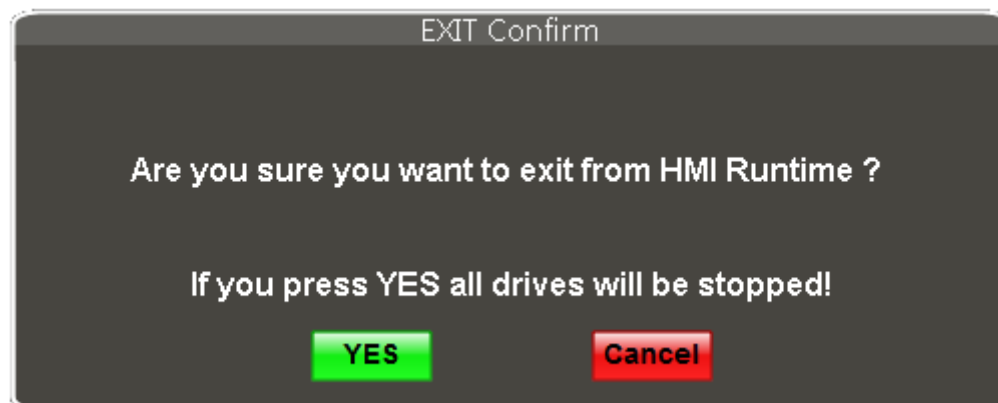
pretvaračem upravlja pomoću programskih paketa, tada se aktivira bit „LOCAL“ koji onemogućuje upravljanje nad laboratorijskim postavom pomoću HMI-a.

Kako ne bi došlo do slučajnog pokretanja pogona, prilikom pritiska bilo koje od naredbi „ON“ ili „YES“ na glavnom HMI sučelju, otvara se prozor s pripadajućom porukom, gdje se mora potvrditi akcija. Ovaj prozor prikazan je slikom 5.5.



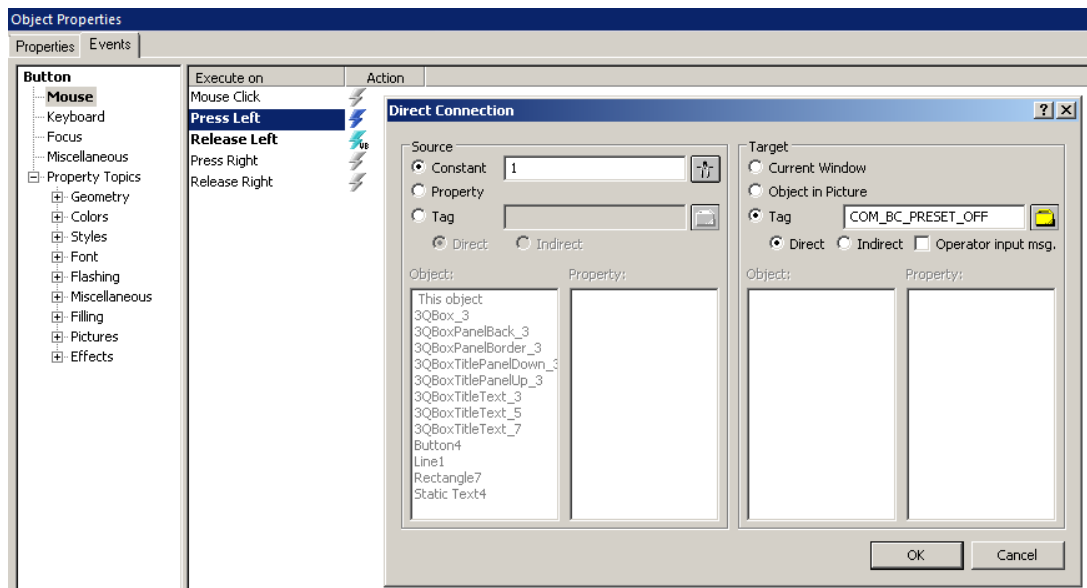
Sl. 5.5. *Skočni prozor s pripadajućom porukom za pokretanje Simovert frekvencijskog pretvarača.*

Na slici 5.5. prikazan je skočni prozor s pripadajućom porukom. Ukoliko se naredba „ON“ potvrdi („YES“), tada se šalje naredba za pokretanje frekvencijskog pretvarača, u protivnom se naredba ne izvršava „Cancel“.



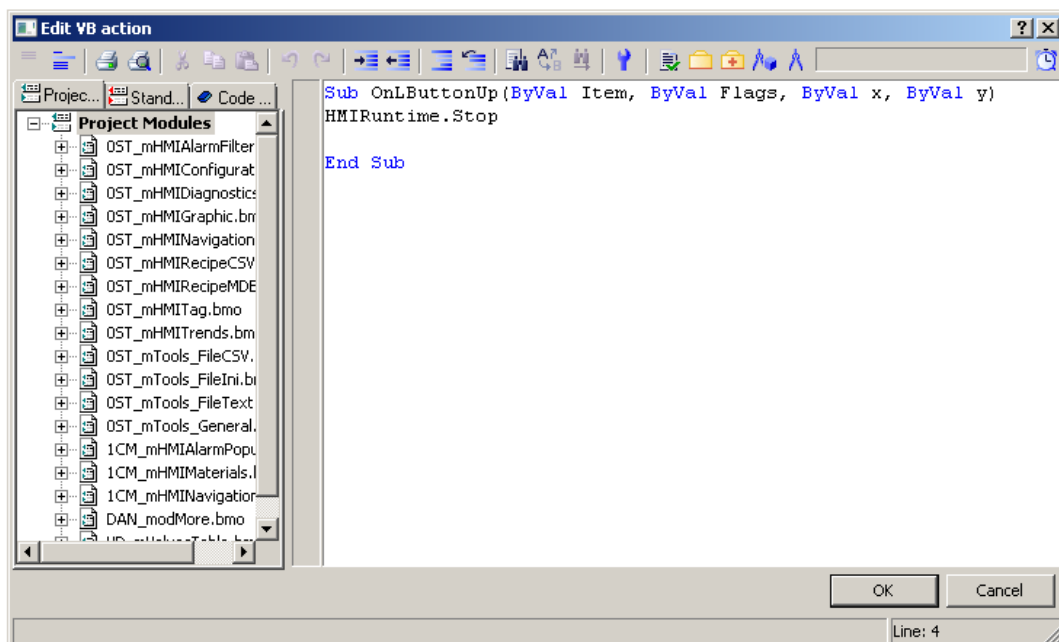
Sl. 5.6. *Skočni prozor s pripadajućom porukom za prekid izvođenja programa.*

Sličan princip izveden je s naredbom za prekid izvođenja programa u stvarnom vremenu (crvena naredba „X“ u gornjem desnom kut) što je prikazano na slici 5.6. Pritiskom na naredbu „YES“ zaustavlja se pogon, isključuju se frekvencijski pretvarači i pripadajući trofazni asinkroni motori, te se zaustavlja izvođenje programa u stvarnom vremenu. Kreiranje ovog događaja prikazano je slikama 5.7. i 5.8.



Sl. 5.7. Parametri objekta „YES“ sa slike 5.6.

Slika 5.7. prikazuje parametre objekta „YES“ sa slike 5.6. Na slici je prikazano kako su kreirana dva događaja, jedan se izvršava pritiskom lijeve tipke miša, a drugi se izvršava puštanjem lijeve tipke miša. Pritiskom lijeve tipke miša šalje se zajednička naredba za isključenje frekvencijskih pretvarača (oznaka: COM_BC_PRESET_OFF).



Sl. 5.8. VB skripta za prekid izvođenja programa u stvarnom vremenu.

Na slici 5.8. prikazana je VB skripta (engl. *Visual Basic Script*) koja se pokreće puštanjem lijeve tipke miša s naredbe „YES“ prikazane slikom 5.6. Ova VB skripta prekida izvođenje HMI sučelja u stvarnom vremenu.

6. REZULTATI I ANALIZA

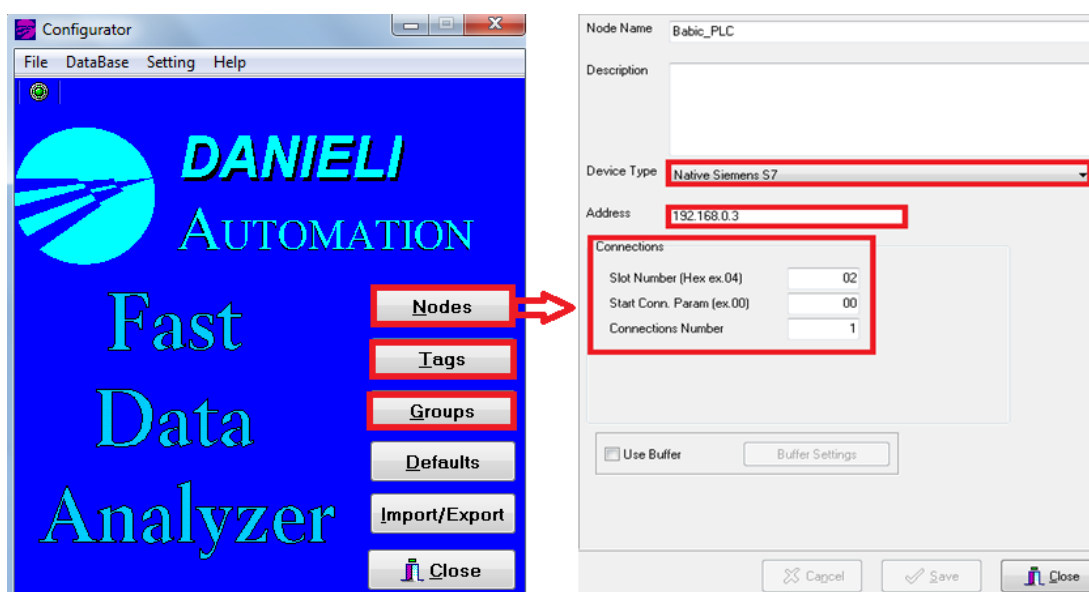
Ovim odjeljkom prikazani su rezultati upravljanja električnim motorima na dva načina, skalarno (Simovert) i vektorski (Sinamics). Skalarno upravljanje je u otvorenoj regulacijskoj petlji, ima jednostavniju upravljačku strukturu i jednostavniji algoritam upravljanja, čija je primjena na manje zahtjevnim pogonima (ventilatori, crpke). S druge strane, vektorsko upravljanje ima znatno bolje karakteristike, manje gubitke energije te se susreće u pogonima koji zahtijevaju izuzetno stroge zahtjeve na dinamiku, točnost i robusnost, što znači da je vektorsko upravljanje u zatvorenoj regulacijskoj petlji, kao što je prikazano slikom u prilogu P.8. [23]. Više o vektorskom upravljanju, prikazano je trećim odjeljkom.

Snimljeni su valni oblici efektivne vrijednosti struje statora asinkronog motora, efektivne vrijednosti napona asinkronog motora (linijski), frekvencija upravljanja te brzina vrtnje rotora asinkronog motora. Valni oblici snimljeni su pomoću programskog paketa FDA (engl. *Fast Data Analyzer*) koji se sastoji od nekoliko dijelova, te je licenca u vlasništvu tvrtke Daniela Automation.

6.1. FDA programski paket

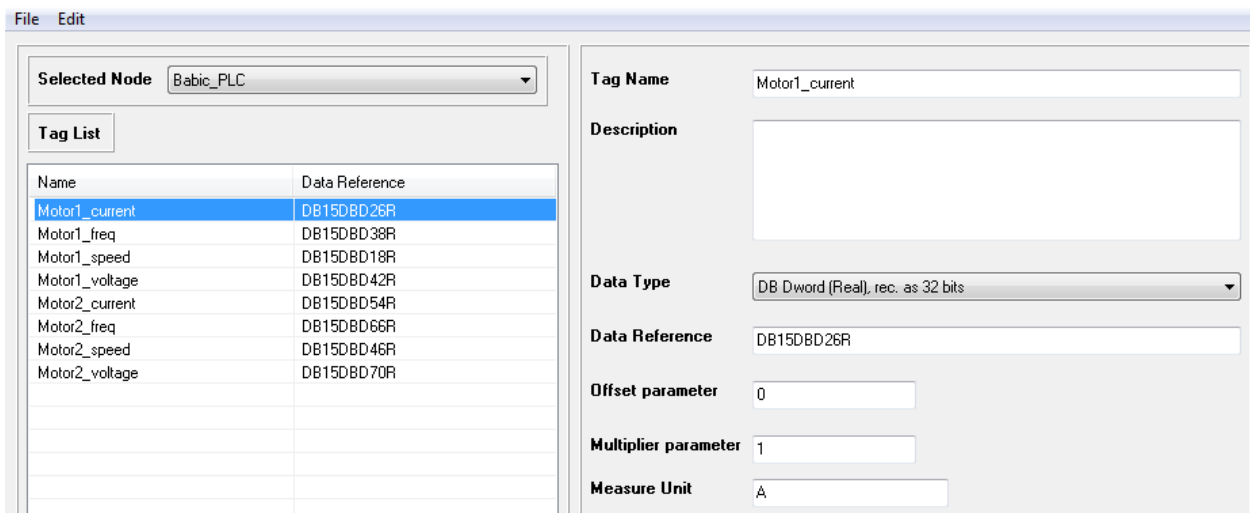
FDA programski paket služi za snimanje valnih oblika pomoću serijske komunikacije s PLC-om, u ovom slučaju *ethernet* komunikacijskim kanalom. Sastoji se od nekoliko dijelova:

- FDA konfigurator,
- FDA klijent,
- FDA *offline*.



Sl. 6.1. FDA konfigurator.

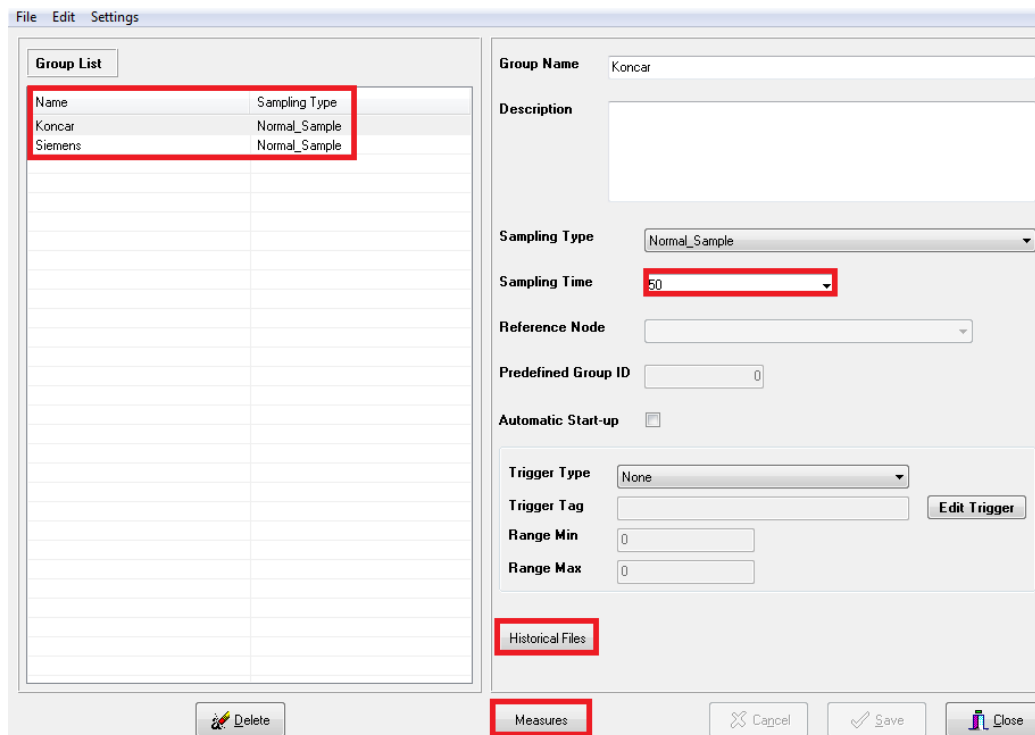
Na slici 6.1. prikazan je **FDA konfigurator** (lijevo) u kojem se definira čvor (kartica „Nodes“), odnosno definira se komunikacija s PLC-om (desno). Na slici su prikazani parametri koje je potrebno podesiti kako bi se ostvarila komunikacija, gdje je bitno da se unese ispravna IP adresa PLC-a te mjesto koje zauzima na PLC konfiguraciji (slot 2). Pod naredbom „Tags“ definiraju se adrese oznaka (engl. *tag*) željenih parametara koji se snimaju. Bitno je da se adresa parametra podudara s onom adresom definiranom u PLC-u, jer program uzima vrijednost s te adrese. Popis mjerenih veličina vidljiv je na slici 6.2., a podudara se s parametrima sa slika 4.8. i 4.10.



Sl. 6.2. Definiranje oznaka za snimanje valnih oblika.

Na slici 6.3. prikazani prikazan je prozor kartice „Groups“ u kojoj se mogu definirati grupe parametara koje se snimaju. Snimanje valnih oblika je odrađeno istovremeno za oba motora, te su pripadajući valni oblici razvrstani u dvije grupe, Končar i Siemens, s pripadajućim oznakama (*tag-ovima*). Vrijeme uzorkovanja je 50 [ms] te se ne može postići manja brzina uzorkovanja zbog vremena izvođenja ciklusa programa u samom PLC-u. Postoji mogućnost korištenja pojačivača signala, ali zbog ograničenosti PLC-a s memorijom (i uz korištenje raspoložive memorijske kartice) ni ta opcija nije izvediva. Na taj način bi se moglo smanjiti vrijeme uzorkovanja do 5 [ms] što odgovara frekvenciji uzorkovanja od 200 [Hz]. Kartica „Historical Files“ omogućava odabir mjesta za spremanje snimljenih valnih oblika.

FDA klijent omogućava odabir željenih grupa i parametara za snimanje te prikaz signala tijekom snimanja valnih oblika. Valni oblici se mogu snimati u vremenskoj domeni i u frekvencijskoj domeni (Fourier-ova analiza). Snimljeni valni oblici automatski se spremaju na mjesto odabrano u kartici „Historical Files“.



Sl. 6.3. Definiranje grupa parametara za snimanje valnih oblika.

FDA offline omogućava analiziranje i uređivanje snimljenih valnih oblika. Na istom grafu postoji mogućnost prikazivanja više valnih oblika s različitim y osima (što je korišteno u ovoj analizi) ili se signali mogu prikazivati odvojeno. Analiza se može spremiti, ali se prilikom otvaranja pozivaju datoteke koje su snimljene FDA klijentom. Ukoliko su datoteke obrisane ili premještene, analiza se neće moći ponovno prikazati.

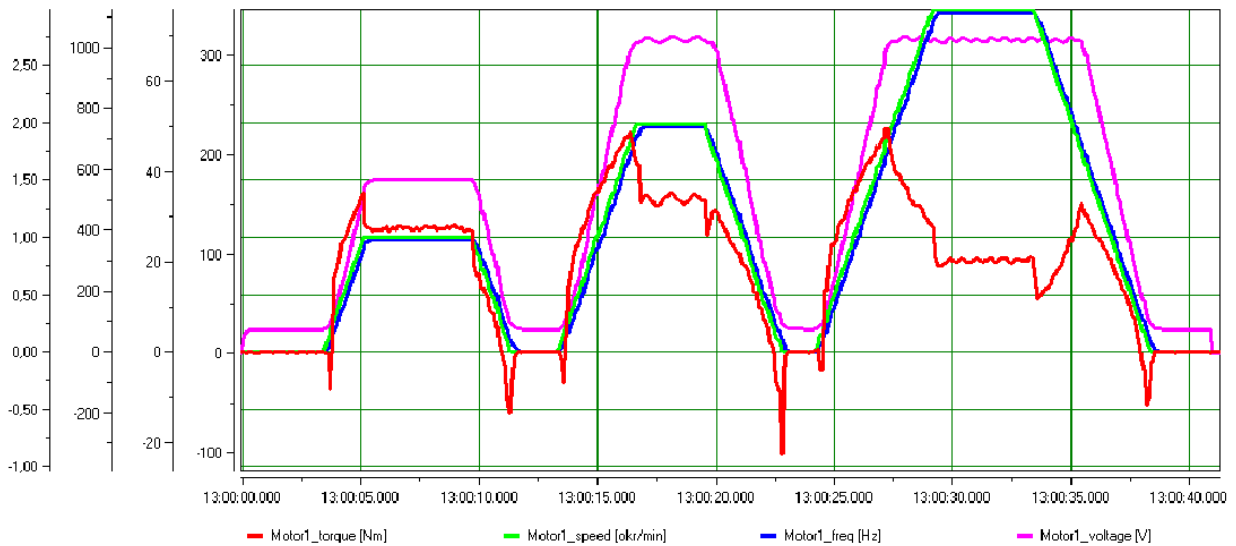
6.2. Vektorsko upravljanje asinkronim motorom

Vektorsko upravljanje Končar asinkronim motorom ostvareno je pomoću Sinamics frekvencijskog pretvarača. Snimljeni su valni oblici efektivne vrijednosti struje statora asinkronog motora, momenta, efektivne vrijednosti napona statora asinkronog motora (linijska vrijednost), frekvencija upravljanja te brzina vrtnje rotora asinkronog motora uz rampu ubrzanja/zaustavljanja (u daljnjem tekstu samo rampa) od tri sekunde. Rampa definira u kojem vremenu će asinkroni motor postići nazivnu vrijednost brzine vrtnje rotora (700 [okr/min] za Končar asinkroni motor). Snimljena su dva slučaja postavljena referentne vrijednosti brzine (zadana referentna vrijednost prikazana je u postotcima) u odnosu na nazivnu brzinu asinkronog motora. Referentna brzina mijenja se u sljedećim koracima:

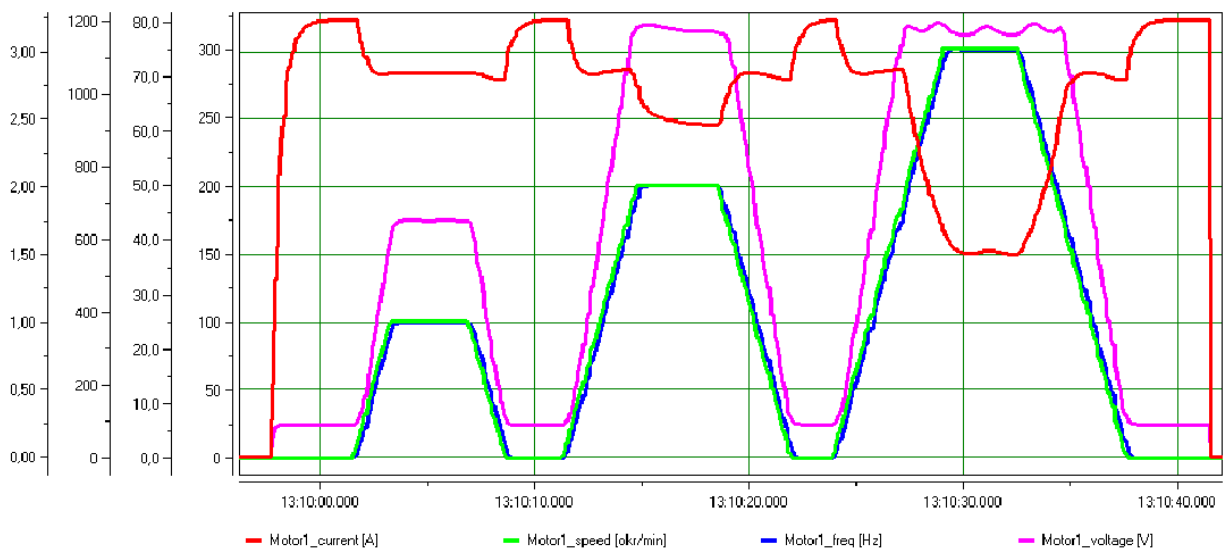
- [1.] ON → 0 → 50 → 0 → 100 → 0 → 150 → 0 → STOP (slike 6.4. i 6.5.),
- [2.] ON → 0 → 50 → 100 → 150 → 0 → STOP (slike 6.6. i 6.7.).

S lijeve strane, na slikama 6.4.-6.10., vidljive su vrijednosti na y osi, gdje su prikazane sljedeće fizikalne veličine (s lijeva na desno):

- ✓ struja statora (osim na slikama 6.4. i 6.6., gdje je prikazan moment) – crvena boja,
- ✓ brzina vrtnje rotora asinkronog motora – zelena boja,
- ✓ frekvencija – plava boja,
- ✓ napon statora – ljubičasta boja.



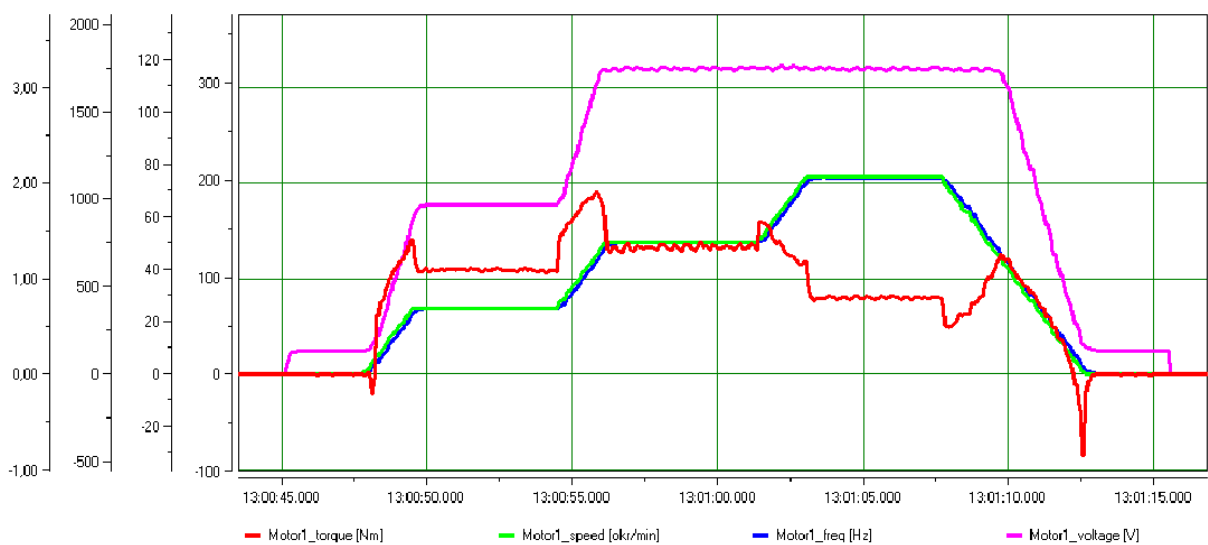
Sl. 6.4. Valni oblici momenta, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri vektorskom upravljanju.



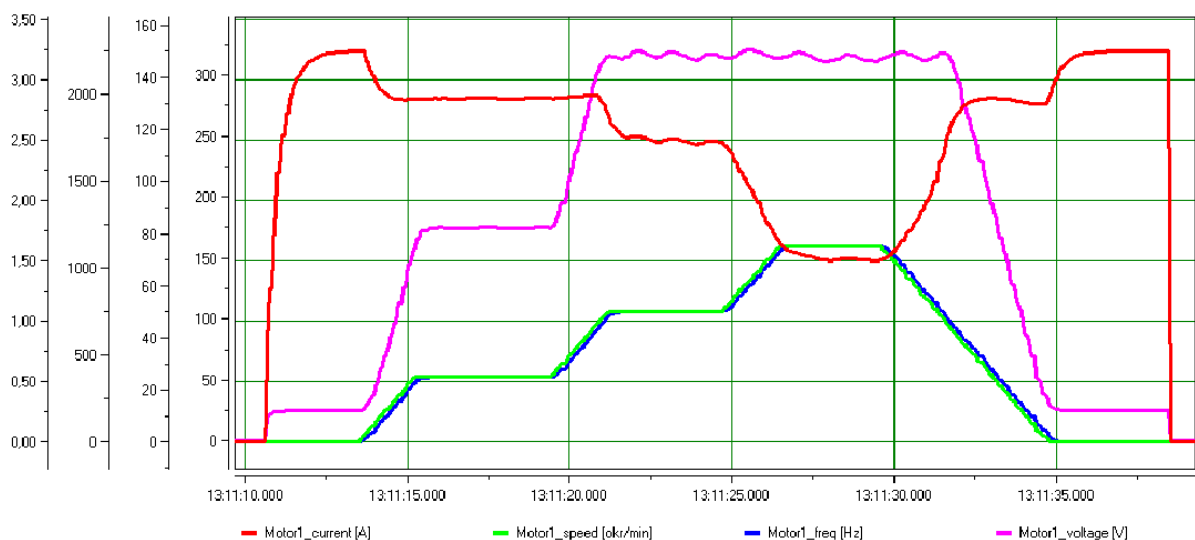
Sl. 6.5. Valni oblici struje statora, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri vektorskom upravljanju.

Kod asinkronih motora problem su velike struje pri pokretanju. Kako je asinkroni motor neopterećen, struja pokretanja je manja od nazivne brzine motora te nema nadvišenja prilikom postizanja vrijednosti zadane referentnom brzinom (crveni graf na slikama 6.5. i 6.7.). Maksimalni iznos napona statora određen je frekvencijskim pretvaračem te je njen efektivni

iznos ± 340 [V]. Ovaj napon ograničava se kako ne bi došlo do zasićenja magnetskog kruga stroja. Na slikama 6.4.-6.7. može se uočiti kako je najveći iznos struje prilikom postavljanja referentne vrijednosti brzine na nulu. U tom režimu rada, frekvencijski pretvarač koči rotor asinkronog motora. Također se može uočiti kako se prilikom povećanja frekvencije iznad nazivne vrijednosti struja statora smanjuje, odnosno dolazi do slabljenja magnetskog toka stroja (d komponenta struje statora) jer se napon statora drži na konstantnoj vrijednosti (određena nazivnom vrijednošću napona statora asinkronog motora ili parametrom frekvencijskog pretvarača). Ovaj slučaj potvrđuje i izraz (2-2). Prema tome, asinkroni motor radi u području konstantne snage [23].



Sl. 6.6. Valni oblici momenta, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri vektorskom upravljanju.



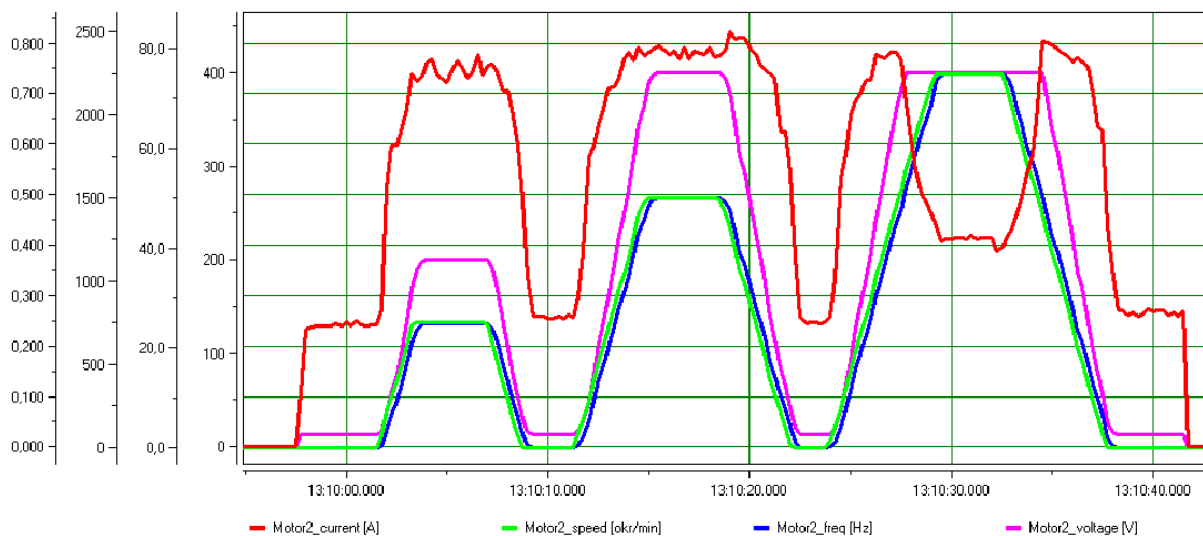
Sl. 6.7. Valni oblici struje statora, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri vektorskom upravljanju.

Prilikom postavljanja referentne vrijednost brzine na nulu, potezni moment postaje negativan (crvenom bojom označen graf na slikama 6.4. i 6.5.), odnosno dolazi do kočenja rotora asinkronog motora. Kako se radi o rampi ubrzanja od 3 [s], nema nadvišenja u postavljanju referentne vrijednosti brzine vrtnje asinkronog motora, čime se pokazuje da je određivanje parametara nadomjesne sheme asinkronog motora odrađeno pomoću automatskog parametriranja vrlo precizno za male rampe ubrzanja, što i je zahtjev kod vektorskog upravljanja asinkronim motorima u elektromotornim pogonima, a koji je ostvaren zasebnim upravljanjem magnetskim tokom i momentom asinkronog motora.

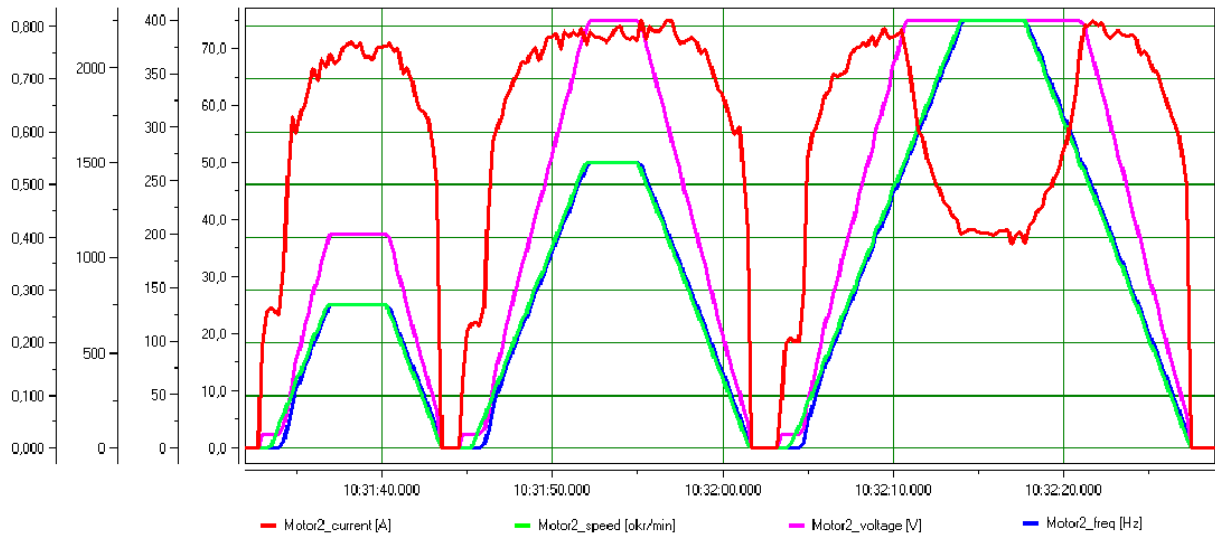
Zbog nedostatka laboratorijske opreme, asinkroni motori nisu ispitivani na promjene tereta opterećenja i na smetnje u sustavu, što bi bilo korisno za ispitivanje elektromotornog pogona, posebice vektorski upravljano elektromotornog pogona.

6.3. Skalarno upravljanje asinkronim motorom

Skalarno upravljanje Siemens asinkronim motorom ostvareno je pomoću Simovert frekvencijskog pretvarača, koji se zasniva na konstantnoj promjeni napona statora i frekvencije. Snimljeni su valni oblici efektivne vrijednosti struje statora asinkronog motora, efektivne vrijednosti napona statora asinkronog motora (linijska vrijednost), frekvencija upravljanja te brzina vrtnje rotora asinkronog motora uz rampu od tri i šest sekundi. Kao i u prethodnom odjeljku, snimljena su dva slučaja postavljanja referentne vrijednosti u odnosu na nazivnu brzinu asinkronog motora.

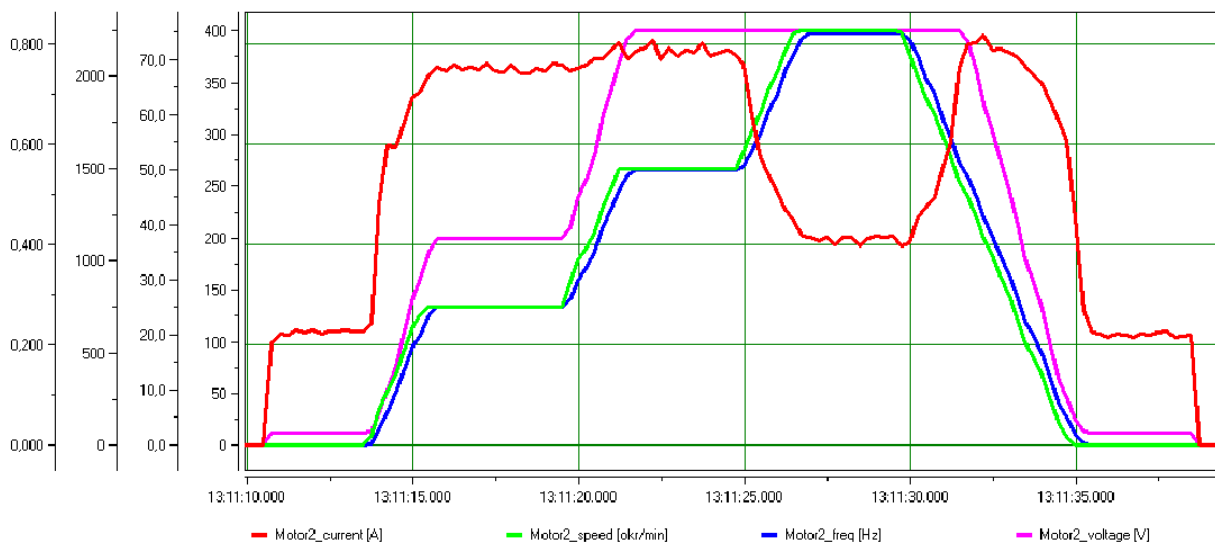


Sl. 6.7. Valni oblici struje statora, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri skalarnom upravljanju uz rampu postavljenu na 3 [s].



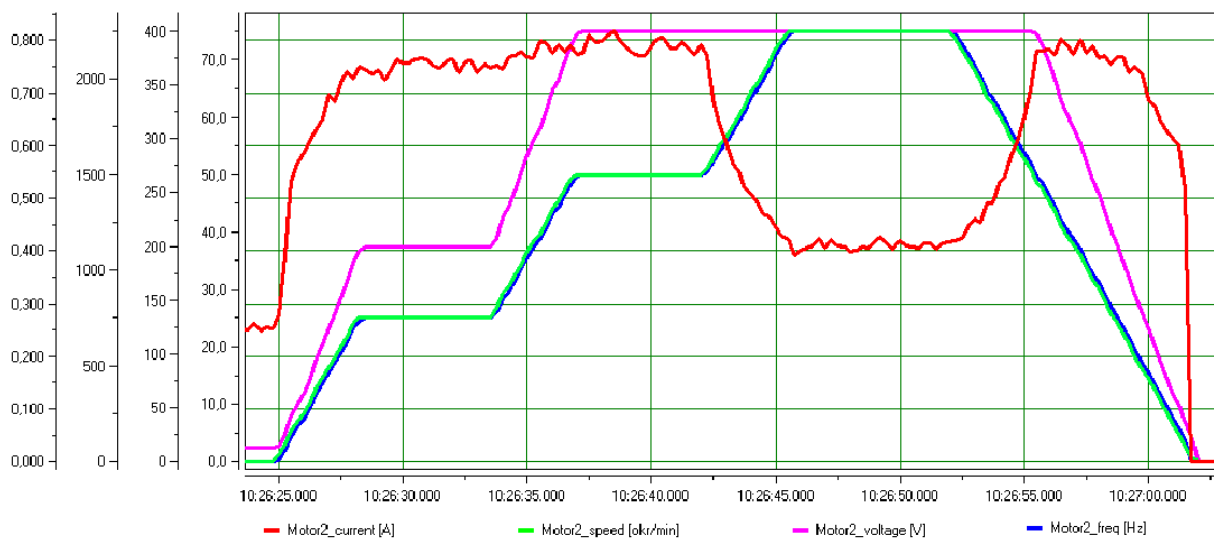
Sl. 6.8. Valni oblici struje statora, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri skalarnom upravljanju uz rampu postavljenu na 6 [s].

Stvarna brzina vrtnje rotora asinkronog motora pri skalarnom upravljanju u otvorenoj petlji odgovara željenoj sinkronoj brzini vrtnje određenoj frekvencijom napona statora samo u idealnom slučaju, a to je za slučaj idealnog praznog hoda (osovina rotora je neopterećena). Budući da u stvarnom svijetu uvijek postoji nekakav moment (otpor trenja i gubitci), to znači da postoji i klizanje izraženo razlikom brzine rotora asinkronog motora i okretnog magnetskog polja. Prema tome, što je veće opterećenje asinkronog stroja, to je veća pogreška između referentne brzine i stvarne brzine rotora.



Sl. 6.9. Valni oblici struje statora, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri skalarnom upravljanju uz rampu postavljenu na 3 [s].

Usporede li se odzivi frekvencije motora i brzine vrtnje rotora sa slika 6.7. i 6.9. (rampa postavljena na 3 [s]) sa slikama 6.8. i 6.10. (rampa postavljena na 6 [s]) može se uočiti kako pri manjim rampama (veća akceleracija) dolazi do razmicanja ta dva signala. Pri malim brzinama može se uočiti kako omjer napona i frekvencije nije isti kao i pri većim brzinama, a razlog tome je što pad napona na statorskom otporniku nije zanemariv u odnosu na inducirani napon u statoru [23]. Za kompenzaciju te pogreške nužno je uvesti i povratnu vezu po brzini rotora asinkronog motora, kao što je to slučaj kod vektorske regulacije.



Sl. 6.10. Valni oblici struje statora, brzine vrtnje stroja, frekvencije i napona statora pri skalarnom upravljanju uz rampu postavljenu na 6 [s].

Napon statora limitiran je frekvencijskim pretvaračem na 400 [V] što je nazivna vrijednost napona statora asinkronog motora. Povećanjem frekvencije iznad nazivne brzine vrtnje motora, također dolazi do slabljenja magnetskog toka u stroju, što je vidljivo prema izrazu (2-2).

6.4. Ograničenja korištene opreme

Kako je vidljivo na slici 4.12., vrijeme izvođenja ciklusa CPU-a iznosi od 6 – 18 [ms], što predstavlja problem prilikom zahtjeva procesa na brze (skokovite, trenutne) promjene. Na slici 6.3. vidljivo je vrijeme uzorkovanja FDA programskog paketa, koje iznosi 50 [ms], te se zbog vremena izvođenja ciklusa CPU-a ne može ići s manjim vremenom uzorkovanja. Prilikom jednog uzorkovanja FDA programskog paketa, sam CPU odradi od dva do osam ciklusa, ovisno o trajanju ciklusa. Na taj način u rezultate mjerenja unosi se pogreška, jer se u tom vremenskom intervalu mogu dogoditi značajnije promjene mjenog signala, što programski paket neće

zabilježiti. Na primjer, prilikom postavljanja rampe ubrzanja na 10 [ms], FDA programski paket će zabilježiti rezultat tek nakon 50 [ms], dok se u intervalu do prvog uzorkovanja mogu izgubiti značajni podatci o dinamičkom vladanju sustava, kao što su nadvišenje, vrijeme porasta, vrijeme smirivanja, vrijeme prvog maksimuma i drugi parametri koji određuju kvalitetu upravljanja.

Ovaj problem uzorkovanja može se riješiti pohranjivanjem dodatnog programskog koda (kreiranog od strane tvrtke Danieli Automation) na CPU, gdje se vrijeme uzorkovanja može smanjiti na 5 [ms], međutim, zbog ograničenog memorijskog prostora CPU-a korištenog PLC-a, to nije moguće. U zgradi fakulteta postoje i memorijske kartice (32 [kB]), međutim niti one nisu dovoljne za pohranu dodatnog programskog koda. Rješenje ovog problema može se ostvariti korištenjem novijih generacija SIMATIC PLC-a te proširenjem memorijskog prostora CPU-a (memorijske kartice s većim memorijskim prostorom).

Testiranje sustava upravljanja na promjenu tereta nije moguće, jer u laboratoriju ne postoje kočnice, niti radni mehanizmi za opterećenje asinkronog motora. Ovaj režim rada bitan je za analizu parametara PI regulatora brzine vrtnje, jer se mogu uočiti važne regulacijske karakteristike (nadvišenje, vrijeme smirivanja, otpornost na smetnje) i kvalitete upravljanja elektromotornim pogonom.

6.5. Usporedba vladanja sustava sa simulacijskim modelom

Matlab (engl. *MATrix LABoratory*) je napredni programski paket, koji objedinjava računanje, vizualizaciju i programiranje u lako uporabljivoj okolini u kojoj su problem i rješenje definirani poznatom matematičkom notacijom. Simulink je grafički alat unutar Matlab programskog paketa koji omogućuje modeliranje, simulaciju i analizu dinamičkih sustava [30].

Dio zadatka ovog diplomskog rada je izraditi model sustava upravljanja te simulirati promjene referentne brzine vrijednosti brzine u programskom alatu MATLAB/Simulink. Ideja je izgraditi model na temelju već gotovih blokova unutar *SimPowerSystems* alata unutar Simulinka. *SimPowerSystems* predviđen je za simulacije u području električnih pogonskih sustava u kojima su pored električnih strojeva prisutni i elementi energetske i upravljačke elektronike (frekvencijski pretvarači).

Za simulaciju sustava upravljanja, korišten je već postojeći primjer unutar Matlab-a, koji se može pozvati upisivanjem naredbe `ac3_example` (prikazan slikom u prilogu P.11.) na radnu površinu Matlab-a. Primjer predstavlja vektorski način upravljanja asinkronim motorom, čiji je glavni dio, blok „*Field-Oriented Control Induction Motor Drive*“, unutar kojeg je realiziran

pogon s vektorskim upravljanjem prikazan slikom u prilogu P.12. [30]. Izvršene su promjene unutar primjera, kako bi sam model bio što vjerodostojniji sustavu upravljanja.

Parametri nadomjesne sheme asinkronog motora dobiveni automatskim parametriranjem frekvencijskog pretvarača mogu se koristiti za parametriranje asinkronog motora unutar Matlab-a. Uz parametre nadomjesne sheme asinkronog motora, za unos parametara potrebno je znati još i podatke s nazivne pločice asinkronog motora (snaga, napon, frekvencija).

Ovaj primjer se nije pokazao kao dobar za modeliranje sustava upravljanja, jer su uočena značajnija odstupanja mjernih veličina, ponajviše struje statora, koja ima početni skok koji je dva puta veći nego na stvarnom modelu. Na promjene referentne brzine (100 i 150 % od nazivne vrijednosti), struja statora ostaje nepromijenjena, odnosno, ne vidi se slabljenje magnetskog polja. Razlog ovakvih odstupanja leži u tome što je stvarni model frekvencijskog pretvarača daleko složeniji (prilog P.8.), te neki parametri frekvencijskog pretvarača nisu poznati.

Pored toga, asinkroni motor ima već predefinirane modele (koji su modelirani na temelju nadomjesne sheme sa slike 3.12. dolje), čija je najmanja snaga 4 [kW], što su manje snage nego za korištene asinkrone motore (1.5 i 0.37 [kW]). Pretpostavka je da je modelirani asinkroni motor definiran za nešto veće snage, te za manje snage ne prikazuje dobre rezultate.

Da bi se postigli kvalitetniji rezultati, potrebno je ući u detaljniju analizu matematičkog modela asinkronog motora i frekvencijskog pretvarača, te na temelju toga modelirati matematički model sustava upravljanja.

7. ZAKLJUČAK

Podatak da 80 % svih upotrijebljenih strojeva čine asinkroni strojevi upućuje na poseban značaj koji taj stroj ima u industriji. Veći dio današnjih elektromotornih pogona s asinkronim motorima nije u sustavu regulacije brzine vrtnje, a zbog sve većih zahtjeva u industrijskoj primjeni, zaštite motora i radnih mehanizama te smanjenja potrošnje električne energije, broj reguliranih elektromotornih pogona sve više raste. Procjenjuje se da je oko 20% reguliranih asinkronih pogona.

U ovom diplomskom radu prikazan je laboratorijski postav s dva frekvencijska pretvarača s pripadajućim asinkronim motorima. Sinamics frekvencijski pretvarač asinkronim motorom upravlja vektorski, što znači da je regulacijska petlja zatvorena, dok Simovert frekvencijski pretvarač ima mogućnost samo skalarnog upravljanja. Skalarno upravljanje ima jednostavniju upravljačku strukturu i jednostavniji algoritam upravljanja, čija je primjena na manje zahtjevnim pogonima (ventilatori, crpke). S druge strane, vektorsko upravljanje ima znatno bolje karakteristike, manje gubitke energije te se susreće u pogonima s većim zahtjevima na dinamiku, točnost i robusnost.

Frekvencijski pretvarači su isparametrirani pomoću programskih paketa *Starter* i *Drive Monitor*. Sinamics frekvencijski pretvarač ima opciju automatskog parametriranja PI regulatora brzine vrtnje motora i PI regulatora struje, na način da izračuna parametre nadomjesne sheme asinkronog motora. Parametri koje je odredio frekvencijski pretvarač uspoređeni su s rezultatima dobivenih pomoću pet matematičkih metoda. Matematičke metode zasnivaju se na poznavanju nazivnih podataka asinkronih motora, a najbolji rezultati su dobiveni metodom 5 (za oba asinkrona motora) koja je imala najmanja odstupanja rezultata u odnosu na rezultate koje je odredio frekvencijski pretvarač. Metoda određivanja parametara nadomjesne sheme pomoću automatskog parametriranja Sinamics frekvencijskog pretvarača nije poznata, ali daje rezultate pogodne za parametriranje asinkronog motora u programskom paketu Matlab/Simulink.

Frekvencijskim pretvaračima se pristupa pomoću programskog koda razvijenog u programskom paketu STEP 7, koji je spremljen u radnu memoriju PLC-a. Kreiranim grafičkim sučeljem, HMI, i razvijenim programskim kodom za PLC omogućeno je upravljanje (zadavanje referente brzine, pokretanje, reverziranje, zaustavljanje) i nadzor laboratorijskog postava (pomoću statusnih riječi i parametara koji se izmjenjuju između frekvencijskog pretvarača i PLC-a). PLC i frekvencijski pretvarači povezani su komunikacijskom sabirnicom PROFIBUS.

Trajanje izvođenja ciklusa programskog koda je u vremenskom intervalu od 6 – 18 [ms], što čini izvođenje programa vrlo brzim. Ukupna duljina paketa koji se prenosi je 24 byte-a, što je

vrlo mala količina podataka s obzirom na brzinu prijenosa. Samim time mogućnost zagušenja (mrtvo vrijeme) u komunikacijskom kanalu je vrlo mala, jer je laboratorijski postav izveden od PLC-a i dva frekvencijska pretvarača gdje je ukupna dužina PROFIBUS kabela oko 3 [m], a na takvim malim duljinama kabela brzina prijenosa podataka može ići do 12 [Mbit/s]. Brzina PROFIBUS komunikacije, odnosno prijenosa podataka postavljena je na 1.5 [Mbit/s].

Pomoću programskog paketa FDA, snimljeni su valni oblici efektivne vrijednosti struje statora asinkronog motora, efektivne vrijednosti napona asinkronog motora (linijski), frekvencija upravljanja te brzina vrtnje rotora asinkronog motora u vremenu uzorkovanja od 50 [ms]. S obzirom na ciklus izvođenja programa samog PLC-a, ovaj vremenski interval je prevelik, te se unose određene pogreške u mjerni signal. Manje vrijeme uzorkovanja nije moguće ostvariti zbog relativno zastarjele opreme te nedostatka radne memorije korištenog PLC-a, što znači da je potrebno koristiti memorijske kartice.

Kod asinkronih motora problem su velike struje pri pokretanju. Kako je asinkroni motor neopterećen, struja pokretanja je manja od nazivne brzine motora te nema nadvišenja prilikom postizanja vrijednosti zadane referentnom brzinom. Maksimalni iznos napona statora određen je frekvencijskim pretvaračem i nazivnom vrijednošću koja je definirana za svaki asinkroni motor. Na snimljenim valnim oblicima vidljivo je kako se prilikom povećanja frekvencije iznad nazivne vrijednosti struja statora smanjuje, odnosno dolazi do slabljenja magnetskog toka. Prilikom postavljanja referentne vrijednosti brzine na nulu, potezni moment postaje negativan, odnosno dolazi do zaustavljanja rotora asinkronog motora. Kako se radi o rampi (rampa definira u kojem vremenu će asinkroni motor postići nazivnu vrijednost brzine vrtnje rotora) ubrzanja od 3 [s], nema nadvišenja u postavljanju referentne vrijednosti brzine vrtnje asinkronog motora, čime se pokazuje da je optimiranje PI regulatora odrađeno pomoću automatskog parametiranja vrlo precizno, što je i zahtjev vektorskog upravljanja asinkronim motorima u elektromotornim pogonima.

Kod skalarnog upravljanja pri malim brzinama vrtnje asinkronog motora može se uočiti kako omjer napona i frekvencije nije isti kao i pri većim frekvencijama, a razlog tome je što pad napona na statorskom otporniku nije zanemariv u odnosu na inducirani napon u statoru. Eventualnim povećanjem tereta asinkronog motora prilikom skalarnog upravljanja, pogreška bi se povećavala, jer je regulacijska petlja otvorena. Stoga je primjena skalarnog upravljanja na manje zahtjevnim pogonima, kao što su ventilatori i crpke.

Vektorska regulacija se primjenjuje za motore svih raspona snaga, mehanička brzina vrtnje slijedi točno zadanu referentnu vrijednost brzine vrtnje, a regulacija je stabilna i prilikom udaraca tereta, što daje bolje dinamičke karakteristike u odnosu na skalarnu regulaciju.

LITERATURA

1. J. Weidauer, Električna pogonska tehnika, Graphis d.o.o., Zagreb, 2013.
2. G. Erceg, M. Mehmedović, Električni pogoni, ETFOS, predavanja 2013./2014.
3. B. Jurković, Elektromotorni pogoni, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
4. H. Berger, SIMATIC automatizacijski sustavi, Graphis d.o.o., Zagreb, 2013.
5. SIEMENS priručnik, S7-300 Programmable Controller Hardware and Installation
http://home.hit.no/~mortenp/A289/Manualer/Simatic/S73bhb_e.pdf, 16.04.2015.
6. Z. Valter, Električni strojevi, ETF Osijek, 2008.
7. SIEMENS, FER, Training for Automation and Industrial Solutions, 2008.
8. Končar - Tehnički priručnik, peto izdanje, Zagreb, 1991.
9. SINAMICS G120, Inverter chassis units, Siemens, 2008.
<http://www.paratrasnet.ro/pdf/motoare-si-actionari/SINAMICS%20G120.pdf>, 16.04.2015.
10. FER, Elektromotorni pogoni
https://www.fer.hr/download/repository/EMP_lab_2_upute.pdf, 28.05.2015.
11. SIEMENS priručnik, SIMOVERT MASTERDRIVES, 2004.
12. http://www.profibus.com/uploads/media/pxddamkey%5B9233%5D_FA_2010_Oct_2_Successful_Profibus_Project_XiuJi.pdf, 29.05.2015.
13. SIEMENS priručnik, S7-300 Programmable Controller Hardware and Installation,
http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/assignaturas/78322/s7300_hard_instal.pdf,
29.05.2015.
14. SIEMENS priručnik, S7-CPs for Industrial Ethernet, 29.05.2015.
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/308/8777308/att_39695/v1/ghb3431_e.pdf
15. https://www.fer.unizg.hr/download/repository/RIP_SCADA%5B2%5D.pdf, 30.05.2015.
16. KONČAR – MES katalog, http://www.koncar-mes.hr/wp-content/uploads/katalozi/katalog_elektromotori_hr_en_de.pdf, 23.08.2015.
17. Ž. Špoljarić, M. Pužar, Laboratorijske vježbe, Asinkroni motori – kratki spoj i prazni hod, ETF, Osijek, 2009.
18. SIEMENS katalog, http://www.rkcontrols.com/pdf/D811_1007_en.pdf, 23.08.2015.
19. SIEMENS priručnik, SINAMICS G120 – Operating Instructions, 2009.
20. SIEMENS priručnik, SIMOVERT MASTERDRIVES, 10.2004.
21. SIEMENS priručni, Working with STEP 7, 2006.
22. <http://support.automation.siemens.com/WW/view/en/26233208>, 12.09.2015.

23. G. Erceg, Upravljanje elektromotornim pogonima, FER, Zagreb, 2006.
24. I. Petrović, Računalno upravljanje sustavima, FER, Zagreb, https://www.fer.unizg.hr/download/repository/RUS_04_Sinteza_u_vremenskom_podrucju_2012-13.pdf, 12.09.2015.
25. C.H. Özyrut, PARAMETER AND SPEED ESTIMATION OF INDUCTIONS MOTORS FROM MANUFACTURERS DANA AND MEASUREMENTS, Middle East Technical University, Turska, 2005.
26. <https://support.industry.siemens.com/cs/document/11769381/drivemonitor-version-v5.5-sp2-for-simovolt-masterdrives-micromaster-and-simoreg?dti=0&lc=en-WW>, 12.09.2015.
27. D. Slišković, Procesna automatizacija – predavanja, ETF, Osijek, 2009.
28. N. Perić, Automatsko upravljanje – predavanja, FER, Zagreb, 2005.
29. <https://support.industry.siemens.com/cs/document/52336451/service-pack-1-for-step-7-v5.5-and-step-7-professional-2010?dti=0&lc=en-WW>, 13.09.2015.
30. Z. Valter, Električni strojevi i pogoni s Matlabom, ETFOS, Osijek, 2009.
31. I. Bašić, Siemens Simovolt MasterDrives, Danieli Automation, prezentacija

SAŽETAK

Diplomski rad prikazuje realizaciju sustava upravljanja električnim motorima preko PROFIBUS industrijske sabirnice korištenjem programibilnog logičkog upravljača te dva frekvencijska pretvarača s pripadnim asinkronim motorima. Frekvencijski pretvarač Sinamics parametriran je pomoću programskog paketa *Starter*, dok je frekvencijski pretvarač Simovert parametriran pomoću programskog paketa *Drive Monitor*. Rezultati određivanja parametara nadomjesne sheme asinkronog motora pomoću automatskog parametriranja frekvencijskog pretvarača uspoređeni su s rezultatima dobivenim matematičkim metodama (pet metoda) na temelju nazivnih podataka asinkronog motora. Upravljački program za korišteni PLC 300 napisan je u programskom paketu STEP 7. Naredbe (promjena brzine vrtnje, reverziranje, puštanje u pogon) i algoritmi za upravljanje pogonom ostvareni su pomoću kreiranog upravljačkog programa. Komunikacija između osobnog računala i PLC-a ostvarena je *ethernet* kabelom. HMI sučelje za nadzor i upravljanje realizirano je pomoću programskog paketa WinCC Explorer, gdje se pomoću grafičkih i tekstualnih prikaza daje uvid u status frekvencijskih pretvarača i pripadajućih asinkronih motora te se omogućava upravljanje istim. Rezultati upravljanja asinkronim motorima analizirani su pomoću valnih oblika struja, momenta, napona, frekvencije i brzine vrtnje stroja. Valni oblici snimljeni su pomoću programskog paketa FDA *Configurator*.

Ključne riječi: frekvencijski pretvarač, HMI, PLC, STEP 7, WinCC Explorer, PROFIBUS, asinkroni motor, *ethernet*, *Starter*, *Drive Monitor*, *Sinamics*, *Simovert*, upravljanje

ABSTRACT

Electric motor control system via PROFIBUS fieldbus

This Master thesis shows the implementation of electric motor control systems via PROFIBUS Fieldbus by using a programmable logic controller and two frequency converters associated with asynchronous machines. The frequency converter Sinamics and the frequency converter Simovert are configured by using the Starter and the Drive Monitor software package, respectively. Parameter results of an induction motor equivalent circuit using auto-tuning of the frequency converter are compared with the results obtained by mathematical methods (five methods) based on the nominal data of the induction motor. Software used for the PLC 300 is written in the STEP 7 programming package. Commands (i.e., speed reference, reversing, commissioning) and algorithms to control the drives were achieved by using the created software. Communication between the PC and the PLC is realised via an Ethernet cable. HMI interface for monitoring and control is achieved by using the WinCC Explorer software package. Graphical and textual display gives an insight into the status of frequency converters associated with asynchronous machines and allows their control. Control of induction motors is analysed by current, torque, voltage, frequency and speed waveforms of the induction motor. Waveforms are recorded with the FDA Configurator software package.

Keywords: frequency converter, HMI, PLC, STEP 7, WinCC Explorer, PROFIBUS, induction machine, Ethernet, Starter, Drive Monitor, Sinamics, Simovert, control

ŽIVOTOPIS

Anto Babić, sin Slavka i Ivanke, rođen je 18. prosinca 1990. godine u Slavonskom Brodu. Trenutno živi u Klokočevcima, u ulici Braće Radića 65.

Osnovnu školu u Klokočevcima upisao je 1997. godine koju pohađa do četvrtog razreda, dok ostatak osnovnoškolskog obrazovanja nastavlja u Đurđenovcu. Kroz osnovnoškolsko obrazovanje sudjelovao je na školskim i županijskim natjecanjima iz matematike i kemije, a svih osam razreda osnovne škole završava s prosjekom ocjena 5,00.

Godine 2005. upisuje se u prvi razred srednje četverogodišnje škole Isidora Kršnjavoga u Našicama, smjer tehničar za elektroniku. Kroz srednjoškolsko obrazovanje sudjelovao je na županijskim natjecanjima iz osnove elektrotehnike I. i II. Četverogodišnje srednjoškolsko obrazovanje završava 2009. godine, te dobiva zvanje tehničar za elektroniku. Kroz sve četiri godine srednjoškolskog obrazovanja ostvario je odličan uspjeh zbog čega je bio oslobođen polaganja završnog ispita.

Godine 2009. upisuje stručni studij Elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku, smjer Elektroenergetika. Stipendist je od strane Zaklade Rotary kluba i Rotary kluba Osijek od 2010. godine. Njihova očekivanja ubrzo ispunjava te ostvaruje pravo stipendiranja do kraja studiranja. Godine 2011. dobitnik je nagrade za najboljeg studenta druge godine stručnog studija Elektrotehnike, smjera Elektroenergetika, s prosjekom ocjena 4,73. Stručni studij Elektrotehnike završava 2013. godine s prosjekom ocjena 4,82 te postaje stručni prvostupnik (baccalaureus) inženjer elektrotehnike. Tema završnog rada je „Analiza kratkog spoja i tokova snaga u IEEE RTS sustavu s 24 čvora“.

Nakon završenog stručnog studija, upisuje studij Razlikovnih obveza na Elektrotehničkom fakultetu, koji završava 2013. godine s prosjekom ocjena 4,50 te stječe uvjete za kandidiranje za upis sveučilišnog diplomskog studija Elektrotehnike.

Godine 2013. upisuje sveučilišni diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, gdje je 2015. godine dobitnik nagrade za najboljeg studenta druge godine sveučilišnog diplomskog studija Elektrotehnike, smjera Elektroenergetika, s prosjekom ocjena 4,88.

Anto Babić

PRILOG

P. 1. Prikaz parametara koji se određuju pri automatskom parametriranju frekvencijskog pretvarača Sinamics, ovisno o vrijednosti parametra P340.

	P0340 = 1	P0340 = 2	P0340 = 3	P0340 = 4
P0341[3] Motorträgheitsmoment [kg*m ²]	x			
P0342[3] Trägheitsverhältnis Gesamt/Motor	x			
P0344[3] Motorgewicht	x			
P0346[3] Magnetisierungszeit	x		x	
P0347[3] Entmagnetisierungszeit	x		x	
P0350[3] Ständerwiderstand (Phase-Phase)	x	x		
P0352[3] Kabelwiderstand	x	x		
P0354[3] Läuferwiderstand	x	x		
P0356[3] Ständerstreuinduktivität	x	x		
P0358[3] Läuferstreuinduktivität	x	x		
P0360[3] Hauptinduktivität	x	x		
P0362[3] Magnetisierungskennlinie Fluss 1	x	x		
P0363[3] Magnetisierungskennlinie Fluss 2	x	x		
P0364[3] Magnetisierungskennlinie Fluss 3	x	x		
P0365[3] Magnetisierungskennlinie Fluss 4	x	x		
P0366[3] Magnetisierungskennlinie Strom 1	x	x		
P0367[3] Magnetisierungskennlinie Strom 2	x	x		
P0368[3] Magnetisierungskennlinie Strom 3	x	x		
P0369[3] Magnetisierungskennlinie Strom 4	x	x		
P0492[3] Zulässige Drehzahl Differenz	x			
P0494[3] Verzög Drehzahlverlustreaktion	x			
P0625[3] Umgebungstemperatur Motor	x	x		
P1253[3] Regler Ausgangsbegrenzung	x		x	
P1316[3] Endfrequenz Spannungsanhebung	x		x	
P1338[3] Resonanzdämpfung Verstärkung U/f	x		x	x
P1341[3] I _{max} Regler Integrationszeit	x		x	x
P1345[3] I _{max} Spannungsregler K _p	x		x	x
P1346[3] I _{max} Spannungsregler T _i	x		x	x
P1460[3] Verstärkungsfaktor Drehzahlregl.	x		x	x
P1462[3] Integrationszeit Drehzahlregler	x		x	x
P1470[3] Verstärkung Drehzahlregl. (SLVC)	x		x	x
P1472[3] Integrationszeit Drehz. r. (SLVC)	x		x	x
P1520[3] CO: Oberer Drehmoment-Grenzwert	x			
P1521[3] CO: Unterer Drehmoment-Grenzwert	x			
P1530[3] Grenzwert motorische Leistung	x			
P1531[3] Grenzw. generatorische Leistung	x			
P1715[3] Verstärkungsfaktor Stromregler	x		x	x
P1717[3] Integrationszeit Stromregler	x		x	x
P1764[3] K _p n-Adaption (SLVC)	x		x	x
P1767[3] T _n n-Adaption (SLVC)	x		x	x
P2002[3] Bezugsstrom	x			
P2003[3] Bezugsdrehmoment	x			
P2174[3] Oberer Drehmoment-Schwellwert 1	x			
P2178[3] Verzögerungszeit für Motor gekippt	x		x	
P2185[3] Oberer Lastmomentschwelle M _{o1}	x			
P2187[3] Oberer Lastmomentschwelle M _{o2}	x			
P2189[3] Oberer Lastmomentschwelle M _{o3}	x			

P. 2. Prikaz vrijednosti parametara za parametrisiranje frekvencijskog pretvarača Simovert.

Table X (external pins)

1001	BE1 Pin -X101:16
1002	BE2 Pin -X101:17
1003	BE3 Pin -X101:18
1004	BE4 Pin -X101:19
1005	BE5 Pin -X101:20
4101	SCI, Slave1, Pin 01
4102	SCI, Slave1, Pin 02
4103	SCI, Slave1, Pin 03
4104	SCI, Slave1, Pin 04
4105	SCI, Slave1, Pin 05
4106	SCI, Slave1, Pin 06
4107	SCI, Slave1, Pin 07
4108	SCI, Slave1, Pin 08
4109	SCI, Slave1, Pin 09
4110	SCI, Slave1, Pin 10
4111	SCI, Slave1, Pin 11
4112	SCI, Slave1, Pin 12
4113	SCI, Slave1, Pin 13
4114	SCI, Slave1, Pin 14
4115	SCI, Slave1, Pin 15
4116	SCI, Slave1, Pin 16
4201	SCI, Slave2, Pin 01
4202	SCI, Slave2, Pin 02
4203	SCI, Slave2, Pin 03
4204	SCI, Slave2, Pin 04
4205	SCI, Slave2, Pin 05
4206	SCI, Slave2, Pin 06
4207	SCI, Slave2, Pin 07
4208	SCI, Slave2, Pin 08
4209	SCI, Slave2, Pin 09
4210	SCI, Slave2, Pin 10
4211	SCI, Slave2, Pin 11
4212	SCI, Slave2, Pin 12
4213	SCI, Slave2, Pin 13
4214	SCI, Slave2, Pin 14
4215	SCI, Slave2, Pin 15
4216	SCI, Slave2, Pin 16
5001	TSY, Pin 1

Table A

0000	constant value 0
1010	PMU
2001	SST1 word 1
3001	CB/TB word 1
4501	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

Table B

0001	constant value 1
1010	PMU
2001	SST1 word 1
3001	CB/TB word 1
4501	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

Table C

0000	constant value 0
2001	SST1 word 1
3001	CB/TB word 1
4501	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

Table D

0001	constant value 1
2001	SST1 word 1
3001	CB/TB word 1
4501	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

P. 2. Prikaz vrijednosti parametara za parametriranje frekvencijskog pretvarača Simovert.

Table E

0000	constant value 0
0001	constant value 1
1010	PMU
2001	SST1 word 1
3001	CB/TB word 1
4501	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

Table I

0000	constant value 0
0001	constant value 1
2004	SST1 word 4
3004	CB/TB word 4
4501	SCB1/2 peer-to-peer, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

Table F

0000	constant value 0
0001	constant value 1
2001	SST1 word 1
3001	CB/TB word 1
4501	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

Table G

0001	constant value 1
2004	SST1 word 4
3004	CB/TB word 4
4501	SCB1/2 peer-to-peer, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, SCB2 USS, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

Table H

0001	No HS checkback sig.
4501	SCB1/2 peer-to-peer, word 1
4502	SCB1/2 peer-to-peer, word 2
4503	SCB1/2 peer-to-peer, word 3
4504	SCB1/2 peer-to-peer, word 4
4505	SCB1/2 peer-to-peer, word 5

P. 3. *M-file za proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora prema metodi 2.*

```
Rs=5;
V=220;
I=4.3;
f=50;
pf=0.71;
p=8;
n=700;
Pout=1500;
fi=acos(pf);
ns=120*f/p;
s=(ns-n)/ns;
Pfw=0.01*Pout;
Prcl=(Pout+Pfw)*s/(1-s);
a=Prcl/s^2;
b=(2*Rs*Prcl/s)-(3*V^2);
c=Prcl*Rs^2;
delta=b^2-4*a*c;
Rr=(-b+sqrt(delta))/(2*a);
Pscl=3*V^2*Rs/(Rs+Rr/s)^2;
Ploss=(3)*V*I*pf-Pout;
Pcore=Ploss-Pscl-Prcl-Pfw;
Rc=3*V^2/Pcore;
Xm=V/(I*sin(fi));
aa=4*(1/Xm-tan(fi)/Rc);
bb=2;
cc=((Rs+Rr/s)^2*(1/Xm-tan(fi)/Rc)-tan(fi)*(Rs+Rr/s));
delta=bb^2-4*aa*cc;
Xs1=(-bb+sqrt(delta))/(2*aa);

axr=1;
bxr=2*Xs1;
cxr=3*Xs1^2;
xr=[(-bxr+sqrt(4*axr*cxr-bxr^2))/2*axr];
```

P. 4. *M-file za proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora prema metodi 2.*

```
Rs=5;
V=220;
I=4.3;
f=50;
pf=0.71;
p=8;
n=700;
ns=750;
Pout=1500;
s=(ns-n)/ns;
fi=acos(pf);
Rs=Rs;
Pfw=0.01*Pout;
Prcl=(Pout)*s/(1-s);
Pscl=3*I^2*Rs;
Ploss=(3)*V*I*pf-Pout;
Pcore=Ploss-Pscl-Prcl-Pfw;
Rc=3*V^2/Pcore;
Xm=V/(I*sin(fi));
a=(tan(fi))^2/s^2+(3*V^2/Prcl)^2*(tan(fi)/Rc-
1/Xm)^2+6*V^2*(tan(fi)/(s*Prcl))*(tan(fi)/Rc-1/Xm)+1/s^2;
b=2*Rs*(tan(fi))^2/s+6*V^2*Rs*tan(fi)/Prcl*(tan(fi)/Rc-1/Xm)+2*Rs/s-
3*V^2/Prcl;
c=(Rs*tan(fi))^2+Rs^2;
delta=b^2-4*a*c;
Rr=(-b+sqrt(delta))/(2*a);
Xs=sqrt((3*V^2*Rr/Prcl-(Rs+Rr/s)^2)/4);

axr=1;
bxr=2*Xs;
cxr=3*Xs^2;
xr=[(-bxr+sqrt(4*axr*cxr-bxr^2))/2*axr];
```


P. 5. *M-file za proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora prema metodi 3.*

```
R1=5;
V=220;
I=4.3;
f=50;
pf=0.71;
p=8;
n=700;
ns=750;
Pout=1500;
Pfric=0.01*Pout;
fi=acos(pf);
tn1=tan(fi)
s=(ns-n)/ns;
Prcl=(Pout+Pfric)*(s/(1-s));
Pin=3*V*I*pf;
Pcore=Pin-Pout-(3*I^2*R1)-Prcl-Pfric;
Pgap=Pout+Pfric+Prcl;
n=20;
X1=0;
tum_sonuc=[];
while (n>0)
E=(V-(R1+X1*i)*(I*cos(fi)-I*sin(fi)*i));
E=abs(E);
a=Prcl/(s^2);
b=(-3)*E^2;
c=Prcl*X1^2;
delta=b^2-4*a*c;
if delta<0
disp('kökler imajiner')
else
R2=(-b+sqrt(delta))/(2*a);
end
Rc=(3*E^2/Pcore);
Xm=E/(I*sin(fi));
aa=R2^2/s^2;
bb=(2*R1*R2*Xm^2/s)-(3*V^2*R2*Xm^2/(s*Pgap));
cc=R1^2*Xm^4;
delta2=bb^2-4*aa*cc;
if delta2<0
disp('kökler imajiner')
else
dd=(-bb+sqrt(delta2))/(2*aa);
end
X1=(sqrt(dd)-Xm);
a=(Xm*R2/s+Rc*X1+Rc*Xm);
b=(X1*Xm-Rc*R2/s);
tn=(X1*(a^2+b^2)+a*(X1*Xm*Rc)-
b*(Rc*Xm*R2/s))/(R1*(a^2+b^2)+a*(Rc*Xm*R2/s)+b*(X1*Xm*Rc));
n=n-1;
sonuc=[R1 R2 X1 Xm Rc tn];
tum_sonuc=[tum_sonuc; sonuc];
end

axr=1;
bxr=2*tn;
cxr=3*tn^2;
xr=(-bxr+sqrt(4*axr*cxr-bxr^2))/2*axr;
```

P. 6. M-file za proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora prema metodi 4

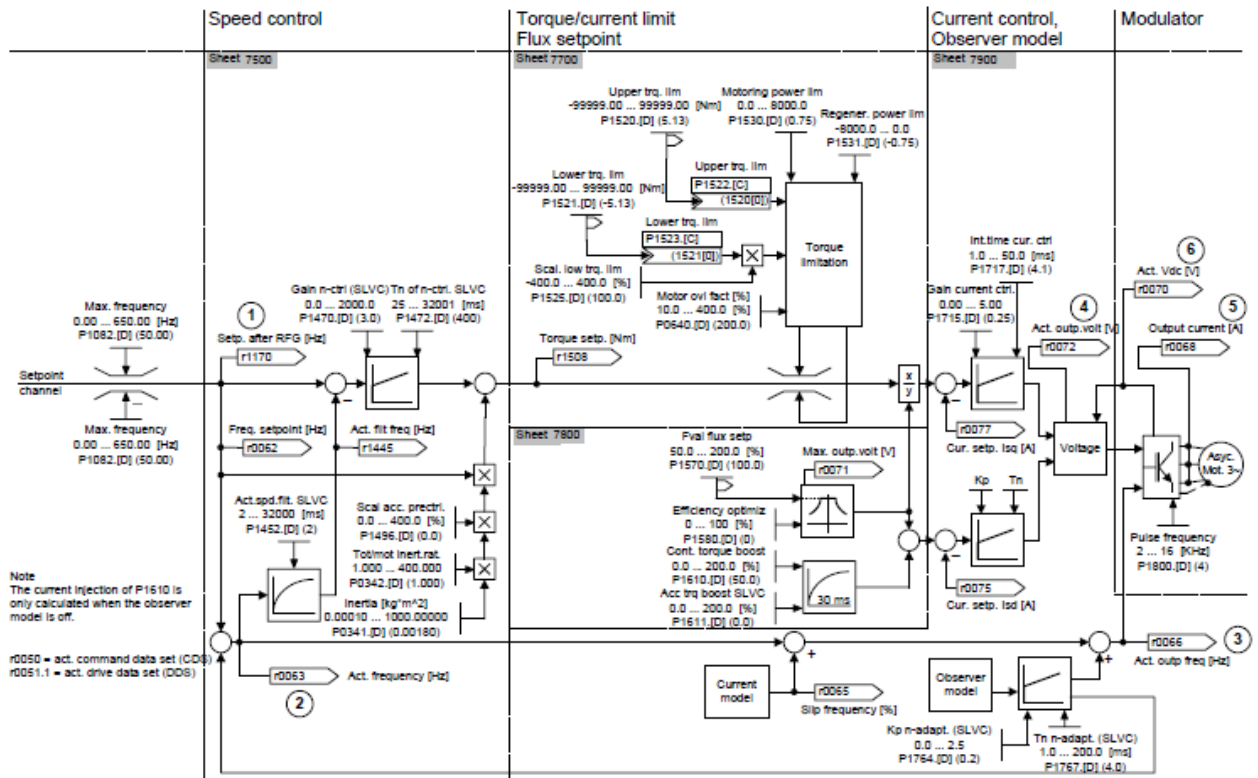
```
R1=5;
V=220;
I=4.3;
f=50;
pf=0.71;
p=8;
n=700;
ns=750;
Pout=1500;
Pfric=0.01*Pout;
fi=acos(pf);
tn1=tan(fi)
s=(ns-n)/ns;
Prcl=(Pout+Pfric)*(s/(1-s));
Pin=3*V*I*pf;
Pcore=Pin-Pout-(3*I^2*R1)-Prcl-Pfric;
Pgap=Pout+Pfric+Prcl;
n=20;
X1=0;
tum_sonuc=[];
while (n>0)
E=(V-(R1+X1*i)*(I*cos(fi)-0.95*I*sin(fi)*i));
E=abs(E);
a=Prcl/(s^2);
b=(-3)*E^2;
c=Prcl*X1^2;
delta=b^2-4*a*c;
if delta<0
disp('kökler imajiner')
else
R2=(-b+sqrt(delta))/(2*a);
end
Rc=(3*E^2/Pcore);
Xm=E/(0.95*I*sin(fi));
aa=R2^2/s^2;
bb=(2*R1*R2*Xm^2/s)-(3*V^2*R2*Xm^2/(s*Pgap));
cc=R1^2*Xm^4;
delta2=bb^2-4*aa*cc;
if delta2<0
disp('kökler imajiner')
else
dd=(-bb+sqrt(delta2))/(2*aa);
end
X1=(sqrt(dd)-Xm);
a=(Xm*R2/s+Rc*X1+Rc*Xm);
b=(X1*Xm-Rc*R2/s);
tn=(X1*(a^2+b^2)+a*(X1*Xm*Rc)-
b*(Rc*Xm*R2/s))/(R1*(a^2+b^2)+a*(Rc*Xm*R2/s)+b*(X1*Xm*Rc));
n=n-1;
sonuc=[R1 R2 X1 Xm Rc tn];
tum_sonuc=[tum_sonuc; sonuc];
end

axr=1;
bxr=2*tn;
cxr=3*tn^2;
xr=[(-bxr+sqrt(4*axr*cxr-bxr^2))/2*axr];
```

P. 7. *M-file za proračun parametara nadomjesne sheme asinkronog motora prema metodi 5.*

```
v=220;
Is=4.3;
rs=5;
Pout=1500;
pole=8;
f=50;
nm=700;
n=750;
pf=0.71;
sonuc=[];
tumsonuc=[];
n=120*f/pole;
w=4*pi*f/pole;
s=(n-nm)/n;
fi=acos(pf);
Pin=3*v*Is*pf;
eff=Pout/Pin;
Im=0.95*Is*sin(fi);
xm=(v-rs*Is)/Im;
Ir=sqrt(Is^2-(Im)^2);
xs=(3*v*Is*sin(fi)-3*xm*(Im)^2)/(3*Is^2+3*Ir^2);
Piron=Pin*(1-eff/(1-s))-3*rs*Is^2;
rc=3*v^2/Piron;
i=1;
while i>0
    Ir=sqrt(Is^2-(Im)^2)-(v-rs*Is)/rc;
    xs=(3*v*Is*sin(fi)-3*xm*(Im)^2)/(3*Is^2+3*Ir^2);
    Pmec=0.005*Pout;
    Pstr=0.005*Pout;
    Tem=(Pout+Pmec)/((1-s)*w);
    rr=Tem*s*w/(3*Ir^2);
    Piron=Pin-3*rs*Is^2-Pstr-3*(rr/s)*Ir^2;
    i=i-1;
    Em=v-(rs+xs*i)*Is*(cos(fi)-sin(fi)*i);
    Em=abs(Em);
    rc=3*Em^2/Piron;
    sonuc=[rr xs xm rc];
    tumsonuc=[tumsonuc; sonuc];
end
```

P. 8. Blokovska shema sustava vektorske regulacije asinkronog motora.



P. 9. Prikaz korisničkog bloka za čitanje podataka sa Sinamics frekvencijskog pretvarača.

LAD/STL/FBD - [UDT100 -- "DRIVE_READ_DATA" -- ANTO\S7 Program(1)\...\UDT100]

File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	STS_WORD	STRUCT		
+0.0	SpeedDeviationActive	BOOL	FALSE	1=Setpoint/Actual value within tolerance
+0.1	DriveControl	BOOL	FALSE	1=Drive control on (PLC control disabled)
+0.2	NotZeroSpeed	BOOL	FALSE	1=Not zero speed
+0.3	TorqueLimitReached	BOOL	FALSE	1=Torque limit reached
+0.4	BrakeOpen	BOOL	FALSE	1=Motor brake open
+0.5	MotOvertemperature	BOOL	FALSE	0=Alarm, motor overtemperature
+0.6	MotorRotation	BOOL	FALSE	1=Clockwise 0=Counterclockwise
+0.7	InverterOverload	BOOL	FALSE	0=Alarm, inverter thermal overload
+1.0	ReadyToStart	BOOL	FALSE	1=Ready to switch ON (Preset)
+1.1	PresetConfirm	BOOL	FALSE	1=Started (Preset confirm)
+1.2	OperationEnabled	BOOL	FALSE	1=Motor start confirm
+1.3	FaultActive	BOOL	FALSE	1=Drive fault active
+1.4	OFF2_Inactive	BOOL	FALSE	1=No pulse disable
+1.5	OFF3_Inactive	BOOL	FALSE	1=No quick stop
+1.6	ClosingLockoutActive	BOOL	FALSE	1=Switch On inhibit
+1.7	AlarmActive	BOOL	FALSE	1=Alarm from Drive active
=2.0		END_STRUCT		
+2.0	SpeedFeedback	INT	0	Speed feedback from Drive
+4.0	Alarms	INT	0	Alarms word (not used)
+6.0	Frequency	INT	0	Actual frequency
+8.0	Current	INT	0	Actual current
+10.0	Voltage	INT	0	Actual voltage
=12.0		END_STRUCT		

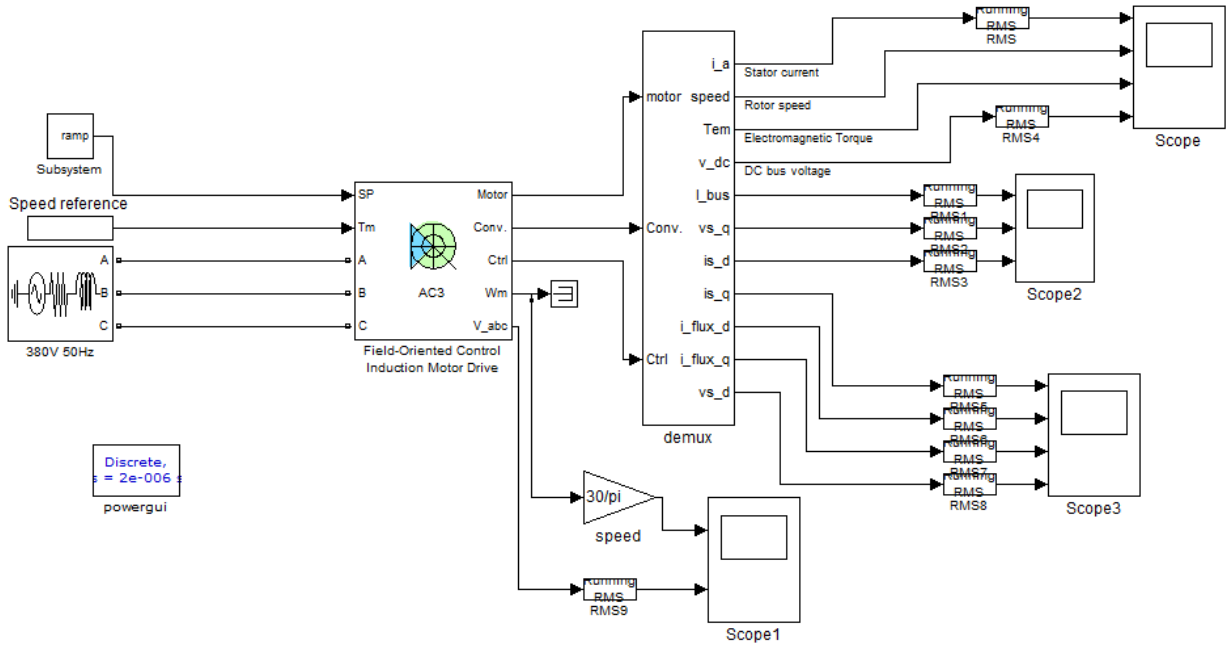
P. 10. Prikaz korisničkog bloka za pisanje podataka na Sinamics frekvencijski pretvarač.

LAD/STL/FBD - [UDT102 -- "DRIVE_WRITE_DATA" -- ANTO\S7 Program(1)\...\UDT102]

File Edit Insert PLC Debug View Options Window Help

Address	Name	Type	Initial value	Comment
0.0		STRUCT		
+0.0	COMMAND_WORD	STRUCT		
+0.0	Bit8	BOOL	FALSE	Reserved
+0.1	Bit9	BOOL	FALSE	Reserved
+0.2	PLCControl	BOOL	TRUE	PLC Control (always 1)
+0.3	DirectionReversed	BOOL	FALSE	0=Direction reversed
+0.4	Bit12	BOOL	FALSE	Not used
+0.5	Bit13	BOOL	FALSE	Not used
+0.6	Bit14	BOOL	FALSE	Not used
+0.7	Bit15	BOOL	FALSE	Not used
+1.0	PresetOn	BOOL	FALSE	0->1 Preset On command
+1.1	OFF2	BOOL	FALSE	1= No Coast stop active (Pulse disable)
+1.2	OFF3	BOOL	FALSE	1= No Quick stop active
+1.3	Start	BOOL	FALSE	Start command
+1.4	RFG_Disabled	BOOL	FALSE	0=Ramp-function generator disabled
+1.5	RFG_Stop	BOOL	FALSE	0=Ramp-function generator stopped at actual value
+1.6	EnableSetopint	BOOL	FALSE	1=Reference enable
+1.7	ResetFaults	BOOL	FALSE	1=FaultsReset
=2.0		END_STRUCT		
+2.0	SpeedReference	INT	0	Speed reference to drive
+4.0	SpareWord1	INT	0	
+6.0	SpareWord2	INT	0	
+8.0	SpareWord3	INT	0	
+10.0	SpareWord4	INT	0	
=12.0		END_STRUCT		

P. 11. ac3_example u programskom paketu Matlab



P. 12. blok „Field-Oriented Control Induction Motor Drive“

