Istosmjerni regulirani pogon s pretvaračem Siemens Simoreg

Lastavica, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:523282

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij elektrotehnike

ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON S PRETVARAČEM SIEMENS SIMOREG

Diplomski rad

Bruno Lastavica

Osijek, 2017.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 22.09.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Bruno Lastavica
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 945, 12.10.2015.
OIB studenta:	35287231573
Mentor:	Doc.dr.sc. Marinko Barukčić
Sumentor:	Tin Benšić
Sumentor iz tvrtke:	Zoran Jelić dipl.inž.
Predsjednik Povjerenstva:	Izv.prof.dr.sc. Denis Pelin
Član Povjerenstva:	Tin Benšić
Naslov diplomskog rada:	Istosmjerni regulirani pogon s pretvaračem Siemens Simoreg
Znanstvena grana rada:	**Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	Istosmjernim elektromotornim pogonom s pretvaračem i senzorom brzine vrtnje može se postići vrlo precizna regulacija brzine vrtnje u širokom rasponu parametara istosmjernog motora kao i uvjeta tereta. Upravljanje se može vršiti u četverokvadrantnom režimu rada. U okviru diplomskog rada potrebno je obraditi regulirane istosmjerne elektromotorne pogone. U laboratoriju fakulteta potrebno je osposobiti postojeći uređaj sa Siemens Simoreg pretvaračem za ispitivanje motora, proučiti Siemens Simoreg pretvarač, izraditi elektrotehničku dokumentaciju izvedenog stanja i izraditi upute za rukovanje. Potrebno je povezati pretvarač na računalo u svrhu parametriranja i izraditi kratke upute za parametriranje. Treba proučiti na koje se sve načine može upravljati i nadzirati predmetni Simoreg pretvarač s PLC uređaja. S
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	22.09.2017.

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

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 04.10.2017.

Ime i prezime studenta:	Bruno Lastavica
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 945, 12.10.2015.
Ephorus podudaranje [%]:	0

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Istosmjerni regulirani pogon s pretvaračem Siemens Simoreg**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Marinko Barukčić

i sumentora Tin Benšić

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1 UVOD **1**

2 TEORIJA ISTOSMJERNOG POGONA **2**
2.1 Pogonski stroj - istosmjerni motor . . . 3
2.1.1 Matematički model . . . 4
2.1.2 Statički režimi rada . . . 6
2.2 Dinamičko vladanje istosmjernog motora . . . 8
2.3 Regulacija istosmjernih motora . . . 16
2.4 Sinteza regulatora . . . 19
2.5 Simulacija reguliranog istosmjernog pogona . . . 23
2.5.1 Rezultati simulacije s novim parametrima regulatora brzine vrtnje . . . 30

3 REGULACIJSKI UREĐAJ **36**
3.1 Mjerni članovi . . . 36
3.2 Digitalna elektronika . . . 38
3.3 Energetska elektronika . . . 38

4 IZVEDBA ISTOSMJERNOG LABORATORIJSKOG POGONA **48**
4.1 Mjerni postav . . . 48
4.1.1 Istosmjerni motor . . . 48
4.1.2 Mjerni član brzine vrtnje . . . 48
4.1.3 Regulacijski uređaj . . . 49
4.1.4 Teret - sinkroni generator . . . 54
4.1.5 Određivanje parametara . . . 55
4.2 Analiza rada reguliranog istosmjernog pogona . . . 56

5 ZAKLJUČAK **62**

Literatura **64**

Popis slika **65**

Popis tablica **66**

Sažetak **67**

Abstract **68**

Životopis **69**

PRILOG 1 **70**

PRILOG 2 **72**

PRILOG 3 **73**

PRILOG 4 **85**

PRILOG 5 **86**

PRILOG 6 **89**

PRILOG 7 **90**

1. UVOD

U samim početcima industrije, korišteni su motori na parni pogon. Otkrićem električnih motora, industrija počinje koristiti električne motore umjesto parnih. Sama tranzicija je znatno povećala učinkovitost i znatno smanjila troškove krajnjih procesa. Kroz povijesni razvoj istosmjernih motora, oni su postepeno implementirani u industriju. Razvojem istosmjernog motora s konstantnom brzinom vrtnje postaju standardom u industriji. Razvojem relejne tehnike, počinje automatizacija industrijskih pogona pogonjenih električnim motorima. Razvojem izmjeničnih motora, točnije asinkronih, počinje zamjena istosmjernih motora asinkronim. Zbog kompleksnosti upravljanja izmjeničnim motorima, istosmjerni motori su imali prednost nad izmjeničnim dok nisu razvijene kvalitetnije metode regulacije izmjeničnih motora. Sve metode regulacije izmjeničnih motora se temlje na regulaciji istosmjernih motora. Zbog toga je neophodno poznavati princip regulacije istosmjernih motora. Problematika regulacije istosmjernih motora obuhvaća određivanje parametara motora, te samih parametara regulacijskog sustava. Proces određivanja parametara motora nije nimalo jednostvan. Moderni regulacijski uređaji imaju mogućnost automatskog identificiranja podataka motora kojim upravljaju. No da bi to bilo moguće, bilo je neophodno razviti modele za određivanje parametara. Sama problematika određivanja parametara motora, obuhvaća niz raznih mjerenja i pokusa, pomoću kojih se pokušava matematičkim modelima i optimizacijskim alatima doći do što bližeg opisa stvarnog vladanja motora. Stoga je neophodno poznavati osnovne principe i zakone u elektrotehnici, kako bi se korištenjem analitke mogli uspostaviti matematički modeli motora. Regulacijom električnog motora se ostavuje regulacija pogona koji pogoni električni motor.
Upravljanje električnih pogona povećava proizvodnu učinkovitsot procesa, na način da se bilo kakav unešeni poremećaj može kompenzirati djelovanjem regulatora. Tema ovog diplomskog rada je analiza rada reguliranog istosmjernog pogona. Kroz rad će biti objašnjene osnovne pojave u istosmjernim motorima, te upravljanje istosmjernim motorom. Također će biti objašnjena funkcionalnost regulacijskog uređaja, te izvedena izvedba istosmjernog laboratorjiskog pogona za koji je napravljena tehnička dokumentacija. Tehnička dokumentacija sadrži opis i svrhu svih članova pogona, električne sheme, te ostale podatke neophodne za shvaćanje izvedenog laboratorijskog pogona.
U drugom poglavlju će biti sadržan osnovni fizikalni opis istosmjernog stroja i raspisan matematički model kojim se on opisuje. Na osnovu postavljenog matematičkog modela će se izvesti dinamika i regulacija, te u svrhu dinamičke regulacije, neke osnovne metode sinteze regulatora, i na kraju samog poglavlja simulacija istosmjernog reguliranog motora.
Treće poglavlje će biti sastavljeno od opisa osnovnih principa mjernih članova koji se mogu koristiti u svrhu povratne veze regulacijskim uređajima. Bit će detaljnije opisan izvršni član, odnosno ispravljač napona i struje preko kojega se napaja istosmjerni motor. Unutar tog opisa će biti sadržan opis osnovnog načina rada ispravljača, te načini rada s kojima se može susresti.
Posljednje poglavlje će biti posvećeno analizi rada reguliranog istosmjernog pogona izvedenog u laboratoriju koja će se temeljiti na provedenim mjerenjima. Unutar ovog poglavlja će biti predstavljen mjerni podstav, odnosno tehnički podatci pogona kojim se regulira, te analiza rada pomoću izmjerenih trenutnih vrijednosti napona i struja armature i uzbude, te brzine vrtnje. U svrhu izvedbe električnih shema, detaljno je proučen svaki dio izvedenog pogona, te su ispitane sve izvedene veze.
U prilogu će biti dani podatci koji su potrebni za izvođenje simulacija, podatci natpisnih pločica opreme, potpune specifikacije Simoreg-a, električne sheme nacrtane u EPLAN-u, te krakte upute za korištenje Simoreg-a i njemu srodnog softvera Drive Monitor-a.

2. TEORIJA ISTOSMJERNOG POGONA

Svrha električnog pogona je pretvorba električne energije u mehaničku [1]. On predstavlja vezu između električne mreže i radnog stroja koji pogoni. Zbog toga su danas ključni dio u industriji, transportu, te u široj upotrebi u svakodnevnici. Osnovni dio elektromotornog pogona je električni motor, koji može biti može biti napajan istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Ovisno o tome kakvom strujom je napajan, definira se o kojoj vrsti motora se radi: istosmjerni motor ili izmjenični motor. Isto tako vrstu električnog pogona definira vrsta pogonskog stroja, odnosno električnog motora. Dakle, električni pogon sa istosmjernim strojem se naziva istosmjernim električnim pogonom. Osim električnog stroja, električni pogon se sastoji i od sljedećih dijelova [1]:

- mjerni član na motoru - služi za trenutno mjerenje brzine vrtnje, ubrzanja ili polažaja radnog stroja, te prosljeđuje te podatke upravljačkoj elektronici. Moderni pretvarači imaju mogućnost rada bez povratne veze (sensorless);
- kočnica - električni pretvarači imaju mogućnost rada u kočnom režimu, te tako omogućavaju kočenje motora. Kočnica služi kao pomoćni element prilikom kočenja, te ne dopušta daljnje kretanje motora kod isključenog pretvarača (naročito važno kod tereta koji vise kao što su: robotske ruke, dizala, dizalice);
- spojka - ima ulogu kao mehanički pretvarač prilagoditi brzinu i moment (mehaničke veličine) zahtjevima radnog stroja, a osim toga služi i za pretvorbu rotacijskog gibanja motora u linearno gibanje;
- sklopni i zaštitni uređaji - služe za razdvajanje električnog pogona i električnih vodova od pojne mreže u slučaju kvara (razna preopterećenja);
- izvršni uređaj - elektroenergetski pretvarač sadrži energetski i upravljački dio (signalnu elektroniku). Energetski dio upravlja dovedenom električnom energijom motoru. U današnjici se zasniva na energetskim poluvodičkim ventilima (npr. tiristori) koji rade u sklopnom režimu rada. Uklapanjem i isklapanjem ovih sklopki se upravlja tokom el. energije prema motoru, a mjerni sustav šalje izmjerene napone i struje signalnoj elektronici. Signalna elektronika definira upravljačke signale, te njima upravlja učinskim dijelom.

Električni pogoni se mogu razvrstati prema [1]:

- mogućnosti podešavanja brzine vrtnje (pogoni konstantne i podesive brzine vrtnje),
- vrsti motora i izvršnom uređaju (istosmjerni ili izmjenični),
- tehničkim podatcima (npr. tip motora, nazivni napon, nazivna struja, nazivna snaga, faktor snage, nazivna frekvencija, nazivna brzina vrtnje, nazivni okretni moment).

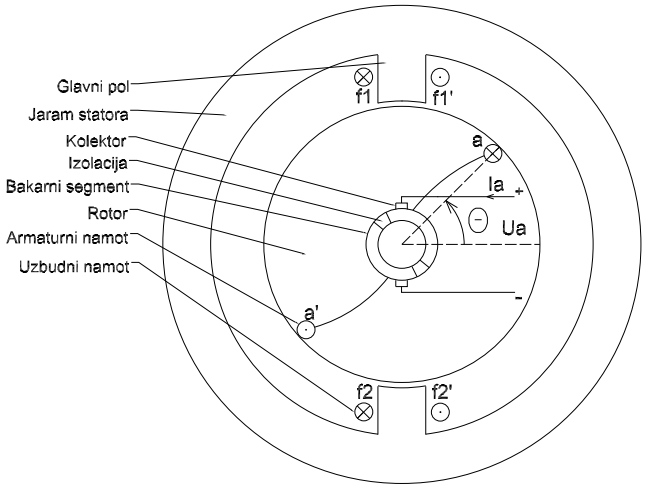
Većina današnjih pogona koriste izmjenične pogone, ali postoje i pogoni koji još uvijek imaju istosmjerne pogone (npr. stari valjaonički pogoni). Osim te činjenice, dobro je napomenuti da se danas upravljanje izmjeničnim pogonima zasniva na upravljanju istosmjernim pogonima, te je zbog toga nužno poznavati upravljanje istosmjernim pogonima.

2.1. Pogonski stroj - istosmjerni motor

Osim istosmjernih motora s nezavisnom uzbudom postoje još istosmjerni motori sa serijskom, paralelnom uzbudom, te kompaundni istosmjerni motori. Osnovni dijelovi istosmjernog motora su [1]:

- rotor - sadrži armaturni namot (univerzalne oznake A1 i A2, ili a i a'), kolektor zajedno s četkicama i lamelama, namot pomoćnih polova (B1 i B2), te kompenzacijski namot (C1 i C2),
- stator - sadrži uzbudni namot (univerzalne oznake F1 i F2 - nezavisna uzbuda, E1 i E2 - paralelna uzbuda, te D1 i D2 - serijska uzbuda).

Na slici 2.1 je prikazana konstrukcija osnovnog modela motora koji služi za razmatranje načina rada motora.



Sl. 2.1: *Konstrukcija osnovnog modela motora*

Princip rada svakog motora se zasniva na zakonu Lorentzove sile, koji u diferencijalnom zapisu glasi [2]:

$$\mathrm{d}\overrightarrow{F} = i(\mathrm{d}\overrightarrow{l} \times \overrightarrow{B}) \tag{2-1}$$

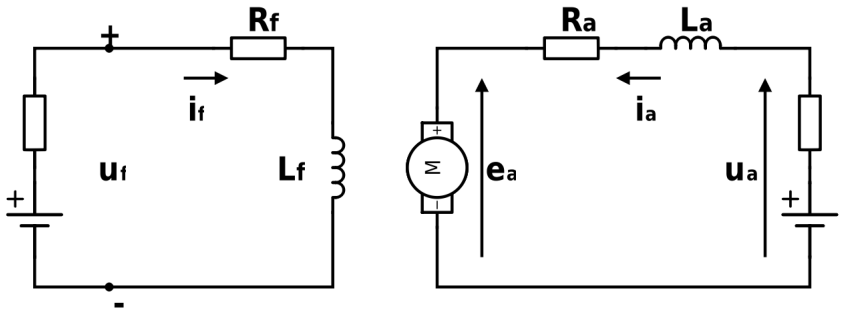
gdje vektor $\overrightarrow{l}$ ima smjer u pravcu vodiča kroz koji protječe struja iznosa i, a orijentacija ovisi o predznaku struje. Stoga se iz prethodne jednadžbe može zaključiti da sila $\overrightarrow{F}$ ima okomiti smjer djelovanja na vodič u odnosu na ravninu određenu smjerom pravca vodiča i smjerom elektromagnetskog polja elektromagnetske indukcije $\overrightarrow{B}$.
Sila na obod rotora je isto što i sila na krak, a to je zapravo moment:

$$\overrightarrow{M} = \overrightarrow{F} \times \overrightarrow{r} \tag{2-2}$$

gdje $\overrightarrow{M}$ predstavlja elektromagnetski moment motora, $\overrightarrow{F}$ silu na namot na rotoru (obod rotora), te $\overrightarrow{r}$ polumjer rotora koji ima smjer od središta ka obodu rotora. Potpuni izvod jednadžbi (2-1) i (2-2) se može pronaći u literaturi [2], Kod istosmjernih motora se sila na obod rotora ostvaruje na način da istosmjerna struja koja protječe kroz uzbudni namot na statoru stvara istosmjerno elektromagnetsko polje, odnosno uzbudni namoti na statoru predstavljaju magnetski sjeverni i južni pol. Ako se u to elektromagnetsko polje postavi rotor s namotom priključenim na istosmjerni napon preko komutatora, prema (2-1) će sila djelovati na namote na rotoru, zatim prema (2-2) će doći do razvoja momenta, odnosno do početka zakretanja rotora [3].

2.1.1 Matematički model

Kako bi se odredio matematički opis, potrebno je poznavati električnu nadomjesnu shemu istosmjernog motora s nezavisnom uzbudom. Budući da je za potpunu regulaciju pogona potrebno poznavati dinamičko ponašanje motora, koristi se potpuna nadomjesna shema nezavisno uzbuđenog istosmjernog motora prikazana na slici 2.2 [3]:



Sl. 2.2: *Električna potpuna nadomjesna shema istosmjernog motora*

Oznake elemenata na shemi predstavljaju:

- R_a - otpor armature
- L_a - induktivitet armature
- u_a - trenutna vrijednost napona na armaturi
- i_a - trenutna vrijednost struje na armaturi
- e_a - trenutna vrijednost elektromotorne sile
- R_f - otpor uzbude
- L_f - induktivitet uzbude
- u_f - trenutna vrijednost napona uzbude
- i_f - trenutna vrijednost struje uzbude

Primjenom Kirchhofovih zakona i Faraday - Lenzovog pravila na nadomjesnu shemu 2.2 se može odrediti matematički model istosmjernog stroja koristeći literaturu [3]. Detaljniji izvodi Kirchhofovih zakona i Farady - Lenz pravila se mogu pronaći u literaturi [4].

$$u_f = R_f i_f + \frac{\mathrm{d}\Psi_f}{\mathrm{d}t} \tag{2-3}$$

$$u_a = R_a i_a + \frac{\mathrm{d}\Psi_a}{\mathrm{d}t} + e_a \tag{2-4}$$

Veze između tokova armature i uzbude se mogu prikazati na sljedeći način:

$$\Psi_f = L_{ff} i_f + L_{fa} i_a \tag{2-5}$$

$$\Psi_a = L_{af} i_f + L_{aa} i_a \tag{2-6}$$

gdje se međuinduktiviteti između uzbudnog i armaturnog namota mogu izraziti sinusoidalnom funkcijom ovisnom o položaju rotora θ_r [3]:

$$L_{af} = L_{fa} = -L \cos \theta_r \tag{2-7}$$

gdje je L konstantan. Kako se rotor okreće, svrha komutatora je izmjenjivati stacionarne priključke s jednog priključka armaturnog namota na drugi. U slučaju kao na slici 2.1 komutacija se događa u položajima $\theta_r = 0, \pi, 2\pi$.
Izraz za inducirani napon se može napisati na sljedeći način [3]:

$$e_a = \omega_r L_{af} i_f \tag{2-8}$$

Uvrštavanjem jednadžbi (2-5) i (2-6) u jednadžbe (2-3) i (2-4), te koristeći i jednadžbu (2-8), može se izvesti matematički model električnog dijela motora u matričnom zapisu. U naponskim jednadžbama u matričnom obliku nema pada napona međuinduktivne veze. Armaturni namot se rotira u elektromagnetskom polju koje je proizvela uzbudna struja protjecanjem kroz uzbudni namot. Rad komutatora uzrokuje prividno stanje armaturnog namota kao stacionarnog čiji je smjer elektromagnetskog polja okomit na smjer elektromagnetskog pola uzbudnog namota. Stoga se napon koji se inducira u uzbudnom namotu prilikom vremenske promjene struje u armaturnom namotu u praksi može zanemariti, iako se on u numerici ne ignorira [3].

$$\begin{bmatrix} u_f \\ u_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f + L_{ff}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} & 0 \\ \omega_r L_{af} & r_a + L_{aa}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \tag{2-9}$$

gdje su L_{ff} i L_{aa} samoinduktiviteti uzbudnog i armaturnog namota. Brzina vrtnje rotora je $\omega_r = \dfrac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{d}t}$, a L_{af} predstavlja međuinduktivitet između armaturnog i uzbundog namota.
Prema [3] se elektromagnetski moment kod istosmjernih motora se uz konstantnu uzbudnu struju i_f može izraziti kao:

$$m_e = i_a i_f L_{af} \tag{2-10}$$

Ovisnost momenta motora i kutne brzine vrtnje motora se može iskazati na sljedeći način [3]:

$$m_e = J\frac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}t} + m_t \tag{2-11}$$

gdje je J moment inercije motora ovisan o veličini njegovog rotora, izraz $J\dfrac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}t}$ predstavlja moment ubrzanja, m_t moment tereta priključenog na osovinu motora, a u proširenom obliku se može koristiti i koeficijent viskoznog trenja, ali je on u većini slučajeva zanemariv.
Energija kojom se napaja motor iz izvora je [3]

$$W_e = \int ui\mathrm{d}t \tag{2-12}$$

Ako se uvrsti (2-4) u (2-12), dobije se:

$$W_e = \int r_a i_a^2 \mathrm{d}t + \int i_a \mathrm{d}\Psi_a + \int e_a i_a \mathrm{d}t \tag{2-13}$$

gdje prvi član predstavlja toplinske gubitke u namotu, drugi član predstavlja uskladištenu elektromagnetsku energiju, a treći član energiju koja se prenosi na osovinu. Energija koja se prenosi na osovinu je mehanička energija W_m, pomoću koje se može dobiti mehanička snaga motora.
Izraz za mehaničku snagu je:

$$P_m = \frac{\mathrm{d}W_m}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int e_a i_a \mathrm{d}t = e_a i_a \tag{2-14}$$

Stacionarno stanje je stanje u kojem nema promjena ulaznih, ni izlaznih veličina. To znači da su u matematičkom modelu derivacije izjednačene s nulom, odnosno nema promjena. Budući da se radi o stacionarnom stanju, odnosno nema promjena veličina, koriste se velika slova (konstante vrijednosti). Jednadžbe stacionarnog stanja istosmjernog motora nezavisnog su:

$$U_f = R_f I_f \tag{2-15}$$

$$U_a = R_a I_a + E_a \tag{2-16}$$

$$E_a = k_e \Phi_f \omega \tag{2-17}$$

$$M_e = I_a k_m \Phi_f \tag{2-18}$$

$$M_e = M_t \tag{2-19}$$

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = 0 \tag{2-20}$$

$$P_m = E I_a \tag{2-21}$$

gdje su k_e i k_m konstrukcijske konstante motora. Φ_f je uzbudni tok prouzrokovan protjecanjem struje uzbude kroz jedan zavoj uzbudnog namota.

2.1.2 Statički režimi rada

Prednost nezavisno uzbuđenog istosmjernog motora je postojanje dobro razvijenog regulacijskog modela [5]. U ostatku potpotpoglavlja će biti dokazana jednostavnost upravljanja nezavisno uzbuđenog istosmjernog motora koristeći njegov matematički model. Budući da je moment direktno proporcionalan sa strujom armature, koja u stacionarnom stanju ovisi o razlici narinutog napona i elektromotorne sile, iz jednadžbe (2-16) slijedi:

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a} \tag{2-22}$$

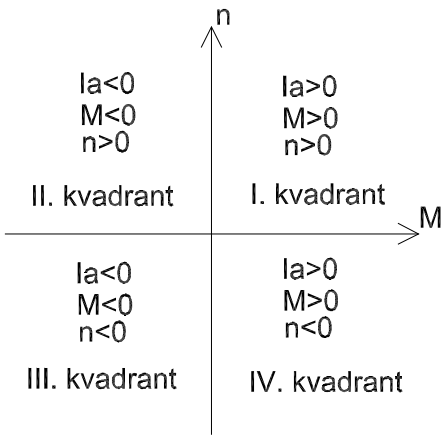
Iz prethodne jednažbe se može zaključiti da se smjer razvijenog momenta, odnosno struje koja ga uzrokuje, može mijenjati promjenom polariteta narinutog napona U_a. Osim toga ovisi i odnosu U_a i Ea. Dakle, ako je $E_a < U_a$, onda će stuja imati pozitivan polaritet u odnosu na narinuti napon, tj. motor će se ponašati kao motor (razvijen motorski moment). Ako je taj odnos obrnut ($E_a > U_a$), onda će struja imati negativan polaritet u odnosu na narinuti napon, odnosno motor će se ponašati kao generator (razvijen generatorski moment). Na osnovu ovih činjenica se može zaključiti da istosmjerni motor može raditi u motroskom režimu i

generatorskom režimu rada. Ovo je zgodno prikazati u $\omega - M$ ravnini, pa se zbog toga izvodi funkcija ovisnosti brzine vrtnje o momentu motora u stacionarnom stanju $\omega = \mathrm{f}(M_e)$ tako što se jednadžbe (2-17) i (2-18) uvrste u (2-16):

$$U_a = \frac{R_a}{k_m \Phi_f} M_e + k_e \Phi_f \omega$$

$$\omega = \frac{U_a}{k_e \Phi_f} - \frac{R_a}{k_e k_m \Phi_f^2} M_e \tag{2-23}$$

Ova karakteristika je vrlo bitna, jer se na osnovu nje može zaključiti kojim sve veličinama se može upravljati mehaničkom karakteristikom motora, odnosno na koji sve način motor može postići radnu točku, koliko brzo i koliko sigurno. Kada se motor zalijeće, u početku nema razvijenog momenta, pa je drugi član jednadžbe (2-23) jednak nuli. Dakle, prilikom zaleta motora, brzina vrtnje će ovisiti isključivo od narinutom naponu i uzbudnom toku. To znači da će konačna brzina vrtnje biti definirana amplitudom narinutog napona i uzbudnog toka. Ukoliko tok ima prenisku vrijednost, postoji opasnost od prevelike brzine vrtnje. Kako se motor zalijeće, počinje protjecati struja, te se počinje razvijati elektromagnetski moment. U drugom članu jednadžbe (2-23), promjena brzine vrtnje $(\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t})$ ovisi o otporu armature, te o kvadratu uzbudnog toka. Dakle, što veći otpor armature to brže smanjenje brzine vrtnje. Budući da brzina vrtnje ovisi obrnuto proporcionalno o uzbudnom toku, motor nesmije izgubiti uzbudni tok ni u kojem trenu, jer smanjenjem uzbudnog toka raste rizik od prevelikih brzina vrtnje motora, te postoji mogućnost da se motor razleti. Budući da razvijeni moment ovisi o struji armature, kada se motor zalijeće, bitno je prvo narinuti nazivni napon uzbude, a potom postepeno povećavati armaturni napon, jer se na taj način postepeno povećava armaturna struja.
Iz ove karakteristike se može zaključiti da ako su moment motora i njegova brzina vrtnje pozitivni, onda se motor nalazi u prvom kvadrantu $\omega - M$ ravnine, odnosno radi u motorskom režimu. Promijeni li se preznak momentu, a brzini vrtnje ostane isti, tada će se nalaziti u drugom kvadrantu, odnosno u generatorskom režimu rada. Isto tako vrijedi i za treći i četvrti kvadrant. Ovo je prikazano na slici 2.3.



Sl. 2.3: *Režimi rada motora*

U prvom kvadrantu su brzina vrtnje i moment pozitivni, odnosno imaju smjer obrnut od smjera vrtnje kazaljke na satu. Narinuti napon je pozitivan i veći od elektromotorne sile:

$$U_a = R_a I_a + E_a \tag{2-24}$$

Snaga koju motor vuče iz mreže je pozitivna u ovom kvadrantu.

$$P_e = U_a I_a \tag{2-25}$$

Snaga koja se pretvara iz električne u mehaničku je jednaka $E_a I_a$, a toplinski gubitci u namotu su jednaki $I_a^2 R_a$.
U početku potpotpoglavlja je objašnjeno da polaritet struje ovisi o odnosu narinutog i induciranog napona. Prema tome, ako je $U_a < E_a$, onda će struja imati negativan polaritet u odnosu na narinuti napon:

$$U_a = -R_a I_a + E_a$$

$$E_a = U_a + R_a I_a \tag{2-26}$$

Također će se promijeniti smjer momenta motora u suprotan smjer. Ovo može biti dokazano koristeći jednadžbu (2-10). Budući da struja sada teče u suprotnom smjeru, (2-10) će izgledati ovako:

$$M_e = -I_a I_f L_{af} \tag{2-27}$$

gdje minus predstavlja negativan iznos struje, a to znači obrnuta orijentacije momenta. U ovom slučaju motor neće uzimati snagu iz mreže, nego će ju vraćati, odnosno, ponašat će se kao generator, pa se može zaključiti da motor radi u drugom kvadrantu [5]. Ukoliko se motoru priključi teret, čiji je moment većeg iznosa od razvijenog momenta motora na osovini, moment tog tereta će nadvladati razvijeni moment motora, te će početi zaustavljati motor. Nakon zaustavljanja će se, ovisno o vrsti priključenog tereta, motor započeti vrtjeti u suprotnu stranu ako mu je priključen aktivni teret, ili će se za priključen reaktivni teret nastaviti vrtjeti određenom brzinom vrtnje (moment reaktivnog tereta manji od momenta kočenja motora) ili zaustaviti (moment reaktivnog tereta je veći od momenta kočenja motor). To znači da će moment motora promijeniti orijentaciju, pa će motor biti u generatorskom režimu rada.
Mijenjanjem polariteta napona na armaturi, motor će se u potpunosti zaustaviti, a potom započeti vrtjeti u suprotnu stranu ako se ne otpoji s napajanja. Tada će se nalaziti u trećem kvadrantu. Iz prethodnog objašnjenja prelaska iz prvog u drugi kvadrant se može napraviti analogija s prelaskom iz trećeg u četvrti. Razlika je orijentacija djelovanja momenta i brzine vrtnje koji su suprotni zbog suprotno narinutog napona, odnosno protjecanja struje u suprotnom smjeru.

2.2. Dinamičko vladanje istosmjernog motora

Prema [6], dinamičko vladanje sustava je vremenska promjena izlazne veličine sustava kao reakcije na ulaznu ili poremećajnu veličinu sustava. Veličine koje opisuju stanje sustava su varijable stanja. U slučaju dinamičkih prijelaznih pojava, varijable stanja su veličine koje se mijenjaju kada se promjeni ulazna ili poremećajna veličina. Stoga vrijedi da je dinamička prijelazna pojava vladanje sustava koje nastupa između dva stacionarna stanja prilikom promjene ulazne ili poremećajne veličine. Ta prijelazna pojava se matematički opisuje pomoću diferencijalnih jednadžbi, a zavisne varijable tih diferencijalnih jednadžbi su varijable stanja, a u slučaju istosmjernog motora su to električne struje ili tokovi, kao električne varijable stanja, i brzina vrtnje motora, kao mehanička varijabla stanja. Ključno je poznavanje promjena ovih veličina prilikom upravljanja istosmjernih pogona, kako se nebi dogodio kvar(npr. prevelika struja ili prevelika brzina vrtnje).
U nastavku potpoglavlja će na primjeru biti opisane osnovne dinamičke pojave. Osnovne dinamičke pojave motora su: zalet, kočenje, terećenje i reverziranje [7]. Dinamička prijelazna pojava se računa kao rješenje sustava diferencijalnih jednadžbi matematičkog modela. Kako bi

se lakše mogao riješiti sustav diferencijalnih jednadži, koristit će se MATLAB Simulink. Na temelju matematičkog se izrađuje simulacijski model. Podatci koji su korišteni su zasnovani na podatcima stvarnog motora koji se nalazi u laboratoriju. Prije obavljanja simulacije u ovom potpoglavlju će biti objašnjeno odakle su podatci preuzeti.
Ako se promotri matrični prikaz (2-9), vidi se da armaturna struja ne utječe na uzbudni krug. Zbog toga je moguće postaviti uzbudu konstantnom, te tako olakšati izradu simulacijskog modela. Ovime je uvjetovano da se simulacija može vršiti samo do nazivne brzine motora, pa će matematički model biti sljedeći:

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} + e_a \tag{2-28}$$

$$e_a = k_e \Phi_f \omega = k_{e\Phi} \omega \tag{2-29}$$

$$m_e = k_m \Phi_f i_a = k_{m\Phi} i_a \tag{2-30}$$

$$J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = m_e - m_t \tag{2-31}$$

gdje su $k_{e\Phi}$ i $k_{m\Phi}$ konstante ovisne o konstrukciji motora. Ako je moment izražen u [Nm], te kružna brzina vrtnje u [s^{-1}], onda će konstante $k_{e\Phi}$ i $k_{m\Phi}$ imati jednake iznose [3]. Ako se (2-29) uvrsti u (2-28) i (2-30) u (2-31), primjeni Laplace-ova transformacija, matematički model će imati sljedeći izgled:

$$I_a(s) = \frac{M_t(s)}{k_{m\Phi}} + Js \frac{\Omega(s)}{k_{m\Phi}} \tag{2-32}$$

$$U_a(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + k_{e\Phi} \Omega(s) \tag{2-33}$$

Uvrštavanjem (2-32) u (2-33) se može dobiti prijenosna funkcija sustava istosmjernog motora gdje će ulazna veličina biti napon armature $U_a(s)$, izlazna veličina kružna brzina vrtnje $\Omega(s)$, te poremećajna veličina moment tereta $M_t(s)$, pa će prijenosna funkcija istosmjernog motora imati sljedeći oblik:

$$\Omega(s) = U_a(s) \frac{1}{k_{e\Phi} + R_a \frac{J}{k_{m\Phi}} s + L_a \frac{J}{k_{m\Phi}} s^2} - M_t(s) \frac{R_a + sL_a}{k_{m\Phi} k_{e\Phi} + R_a J s + L_a J s^2} \tag{2-34}$$

Ako se uvedu vremenska konstanta armaturnog kruga T_a, te vremenska konstanta elektromagnetskog kruga T_{mn}:

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}; \qquad T_{mn} = \frac{J R_a}{k_{m\Phi} k_{e\Phi}}, \tag{2-35}$$

onda će prijenosne funkcije s obzirom na vodeću veličinu $U_a(s)$ i poremećajnu veličinu $M_t(s)$ imati sljedeći oblik:

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{1}{k_{e\Phi}}}{T_a T_{mn} s^2 + T_{mn} s + 1} \tag{2-36}$$

$$\frac{\Omega(s)}{M_t(s)} = \frac{R_a}{k_{e\Phi} k_{m\Phi}} \frac{1 + sT_a}{T_a T_{mn} s^2 + T_{mn} s + 1} \tag{2-37}$$

Budući da se radi o sustavu drugog reda, iz prijenosne funkcije (2-36) se mogu izračunati prirodna frekvencija, te konstanta prigušenja odziva. Prije nego se odrede, potrebno je prilagoditi oblik prijenosne funkcije [6]:

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{1}{T_a T_{mn} k_{e\Phi}}}{s^2 + \frac{1}{T_a} s + \frac{1}{T_a T_{mn}}} \tag{2-38}$$

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{1}{T_a T_{mn} k_{e\Phi}}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{2-39}$$

Prirodna frekvencija neprigušenih oscilacija odziva je ω_n, a relativni koeficijent prigušenja odziva ζ [6]:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{T_a T_{mn}}} \tag{2-40}$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{1}{T_a}$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{T_{mn}}{4T_a}} \tag{2-41}$$

Za svrhe simulacije se neće koristiti (2-34), nego će se izvoditi novi model koji je pogodniji za primjenu regulacije. Prijenosna funkcija za armaturnu struju se dobije uvrštavanjem (2-29) u (2-28), pa onda primjenom Laplace-ove transformacije na dobivenu jednadžbu u kojoj je vodeća veličina armaturni napon, a poremećajna inducirani napon.

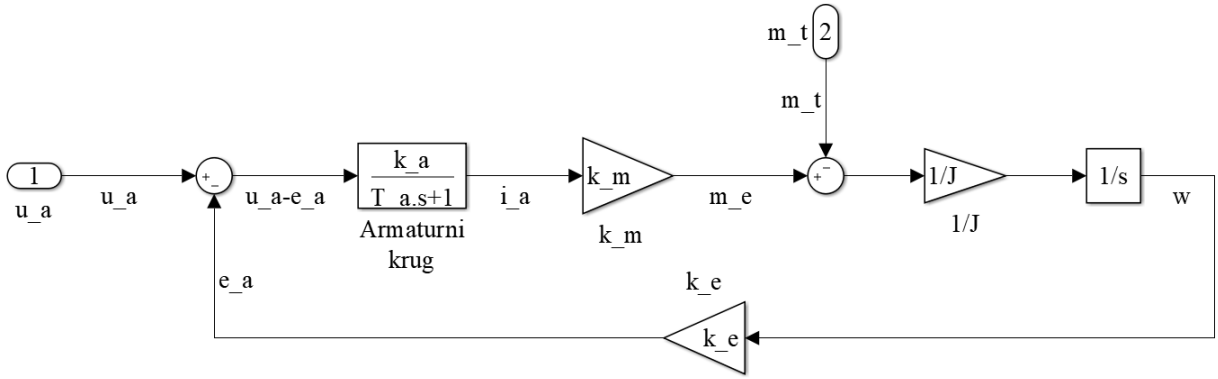
$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{\mathrm{di_a}}{\mathrm{dt}} + k_e\omega$$

$$I_a(s) = \frac{R_a}{1 + sT_a}(U_a(s) - k_e\Omega(s)). \tag{2-42}$$

Nakon struje se elektromagnetski moment dobije jednostavno pomoću (2-30), a nakon njega pomoću (2-31) se može u konačnici dobiti stvarna brzina vrtnje:

$$\Omega(s) = \frac{1}{Js}(I_a(s)k_m - M_t(s)). \tag{2-43}$$

Na slici 2.4, temeljen na (2-42) i (2-43), je prikazan blok dijagram nereguliranog istosmjernog motora.

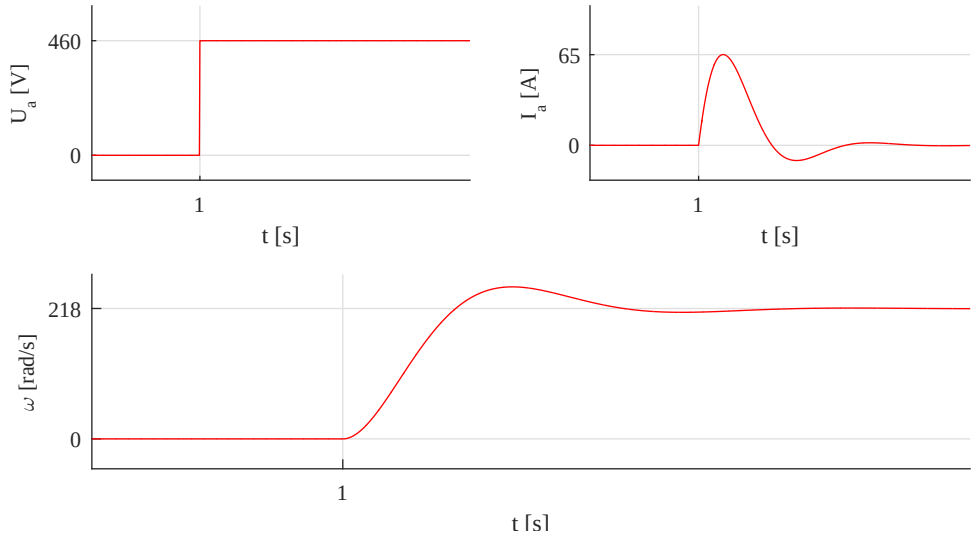


Sl. 2.4: *Blok dijagram nereguliranog istosmjernog motora*

U sljedećim paragrafima će biti napravljene simulacije osnovnih dinamičkih pojava nereguliranog istosmjernog motora. Simulacija je napravljena koristeći simulacijski model sa slike 2.4. Za simulaciju su potrebni parametri motora, od kojih je dio prikupljan sa natpisne pločice koja se nalazi u prilogu (Tablica P1.2), a ostatak, zajedno sa svim ostalim parametrima, (Tablica P1.1) je određen pomoću metoda koje će biti objašenje u potpoglavlju 4.1. Skripta sa kodom za simulaciju se nazali u prilogu.

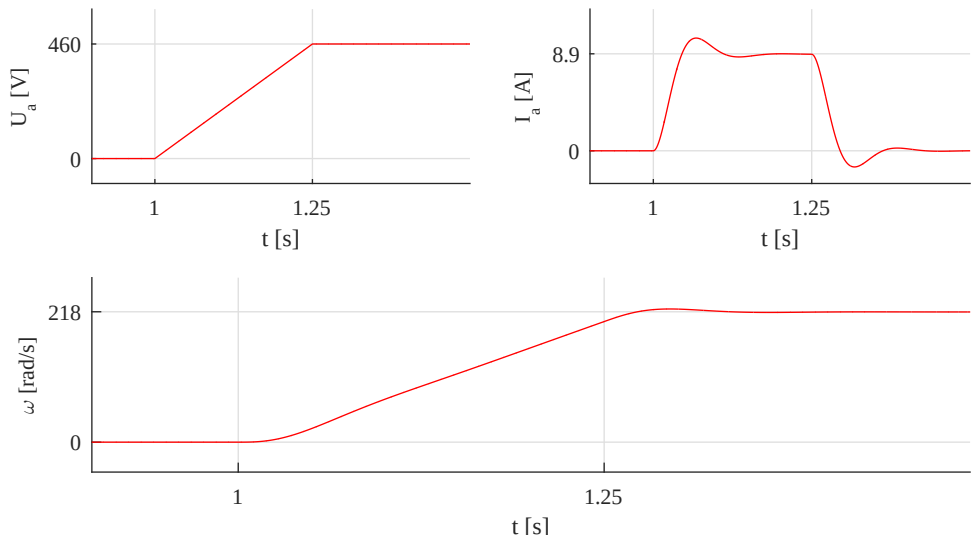
Zalet motora

U stanju mirovanja, brzina vrtnje motora ω jednaka je nuli, a zbog toga i elektromotorna sila e_a. Kada se narine nazivni napon na armaturni namot, kroz njega će poteći prevelika struja u iznosu od oko 65 A, što je do 5 puta veća struja od nazivne struje motora. Ovolika struja bi uzrokovala kvar, odnosno izgaranje namota. Na slici 2.5 su prikazani valni oblici trenutnih veličina napona, struje i brzine vrtnje za zalet u praznom hodu sa skokovitom promjenom ulazne veličine (napona).



Sl. 2.5: *Zalet motora u praznom hodu sa skokovitom promjenom ulazne veličine*

Razlog prevelikoj struji u ovom slučaju je što se promjeni napona suprostavljaju samo pad napona na otporu i induktivitetu armaturnog namota [7]. Jedan od načina rješavanja ovog problema je dodavanje otpora u armaturni krug. Ovo rješenje dovodi do velikih gubitaka (toplinski gubitci na otpornicima), pa je problem zaleta učinkovitije riješiti dodavanjem regulatora struje.
Osim skokovite promjene ulazne veličinie, razmatra se i linearni porast ulazne veličine, kako bi se usporedili rezultati sa skokovitom promjenom ulazne veličine. Rezultati simulacije su prikazani na slici 2.6.

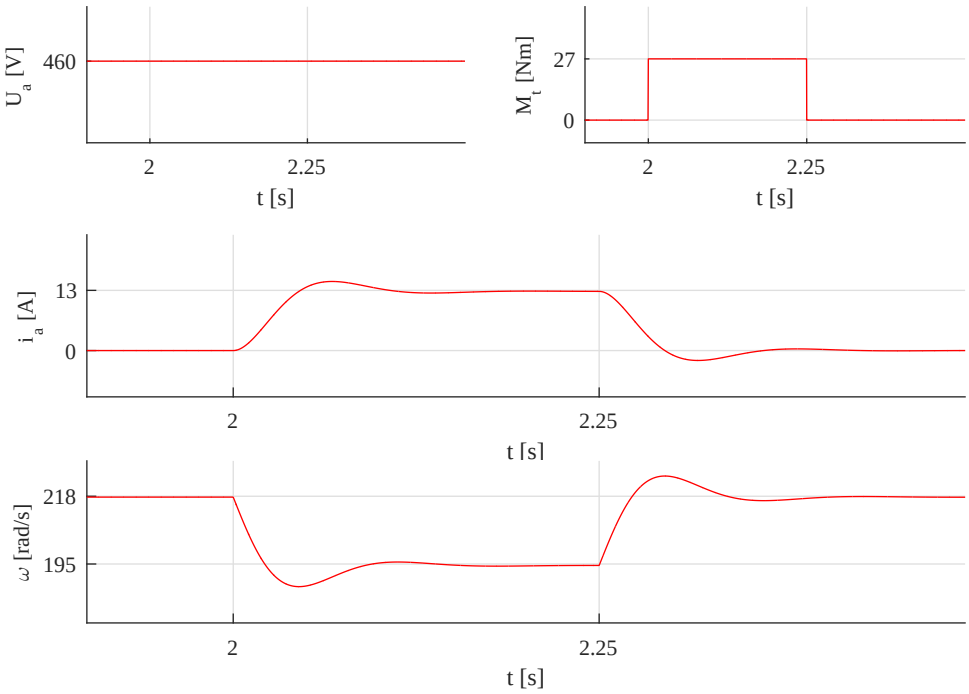


Sl. 2.6: *Zalet motora u praznom hodu s linearnom promjenom ulazne veličine*

U slučaju linearnog porasta se može primjentiti da za vrijeme zaleta od 250 milisekundi sekunde struja ne prelazi preko 8.9 A u stacionarnom stanju. Za razliku od zaleta sa skokovitom promjenom ulazne veličine, prilikom linearnog zaleta se također vidi da nema nadvišenja kod brzine prilikom postizanja nazivne brzine. Nedostatak ovakog zaleta, je zalet pri sniženom momentu. Stoga je potrebno paziti da moment tereta ne nadmaši razvijeni moment motora, jer onda zalet motora neće biti izvediv. Nadvišenje prilikom zaleta sa skokovitom promjenom iznosi 14% nazivne vrijednosti brzine vrtnje. Kod linearnog porasta napona armature se može pojaviti nadvišenje prilikom zaleta, ovisno o nagibu. Povećavanjem nagiba se valni oblik linearne promjene približava skokovitom valnom obliku.

Terećenje

Motor se može opteretiti na način da mu se bilo kakav radni stroj mehanički spoji na osovinu. To može biti, valjaonički valjak, pokretna traka, ventilator ili bilo koji drugi radni stroj. U simulacijama se terećenje vrši skokovitom promjenom, te su na slici 2.7 prikazani napon i struja armature, te brzina vrtnje.

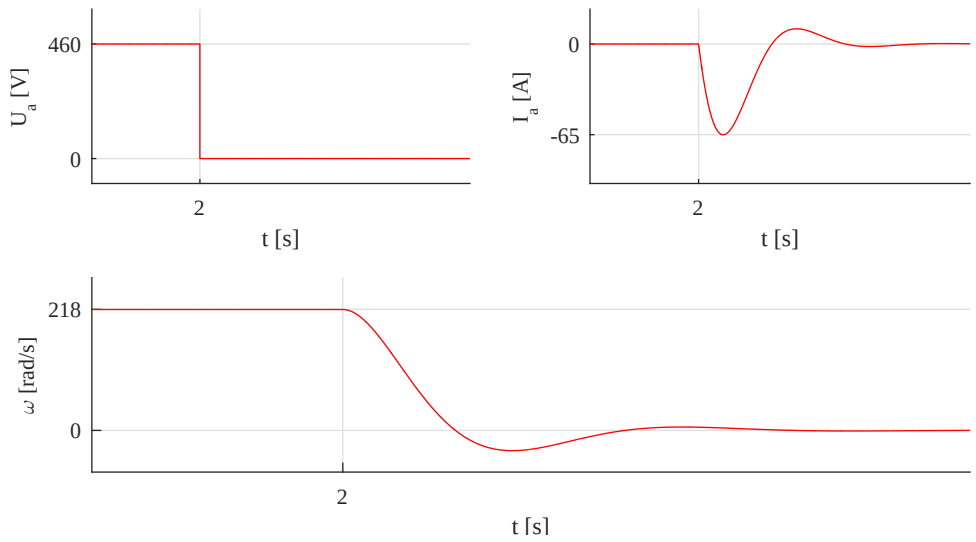


Sl. 2.7: *Skokovito terećenje i rasterećenje motora*

U simulaciji je motor skokovito nazivno opterećen, a dokaz tome je da kroz njega teče nazivna struja (13 A). Nadvišenje struje iznosi 13%. U trenutku terećenja brzina vrtnje ima trajno odstupanje u iznosu od -10.5%. Ukoliko se želi održati konstantna brzina vrtnje, onda bi se prije regulatora struje mora dodati regulator brzine vrtnje.

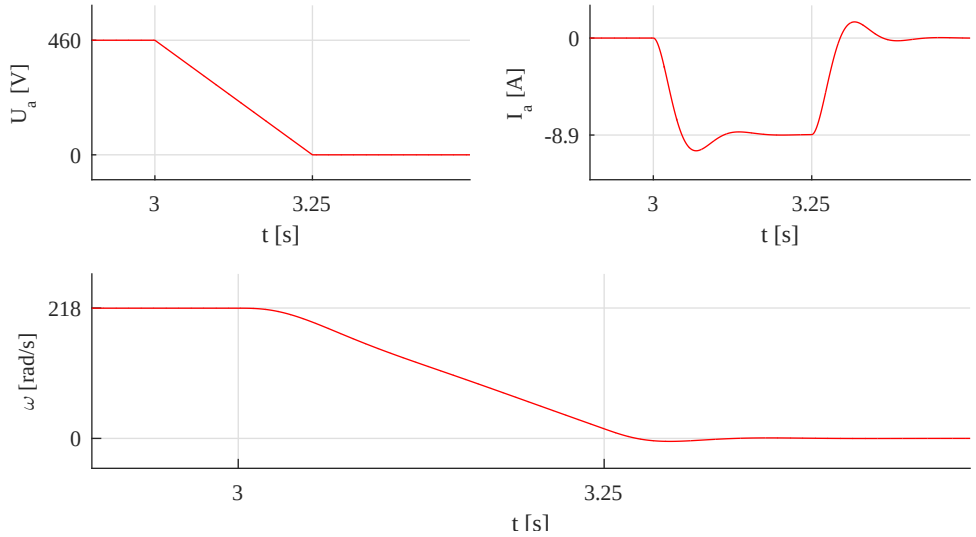
Kočenje motora

Jednostavno i jeftino rješenje kočenja motora se može ostvariti pomoću disipiranja kinetičke energije motora na otpornik. Ovo rješenje se koristi i kod modernih pretvarača koji nemaju mogućnost regenerativnog kočenja (vraćanje energije u mrežu). Kočenje se vrši na način da se armatura otpoji s napajanja i spoji na otpornik za kočenje. Iznos elektromotorne sile postaje veći od narinutog napona, te struja armature počinje teći u suprotnom smjeru. Zbog promjene smjera struje i moment motora mijenja smjer, što rezultira kočenjem motora. Kako brzina opada, smanjuju se elektromotorna sila, struja armature i moment kočenja. U konačnici se sva kinetička energija pretvorila u toplinsku energiju na armaturnom namotu i otporniku za kočenje [5].
U simulacija neće biti izvođeno elektrodinamičko kočenje (kočenje preko dodatnih otpora), nego će biti simulirano protustrujno kočenje. Na slici 2.8 je prikazano protustrujno kočenje iz praznog hoda.



Sl. 2.8: *Protustrujno kočenje motora iz praznog hoda sa skokovitom promjenom ulazne veličine*

Budući da motor sa protustrujnim kočenjem, može stvoriti veliku struju (do 70 A, odnosno 5 do 6 puta veća od nazivne), zbog usporedbe je također simulirano linearno smanjenje ulazne veličine, što je prikazano na slici 2.9.



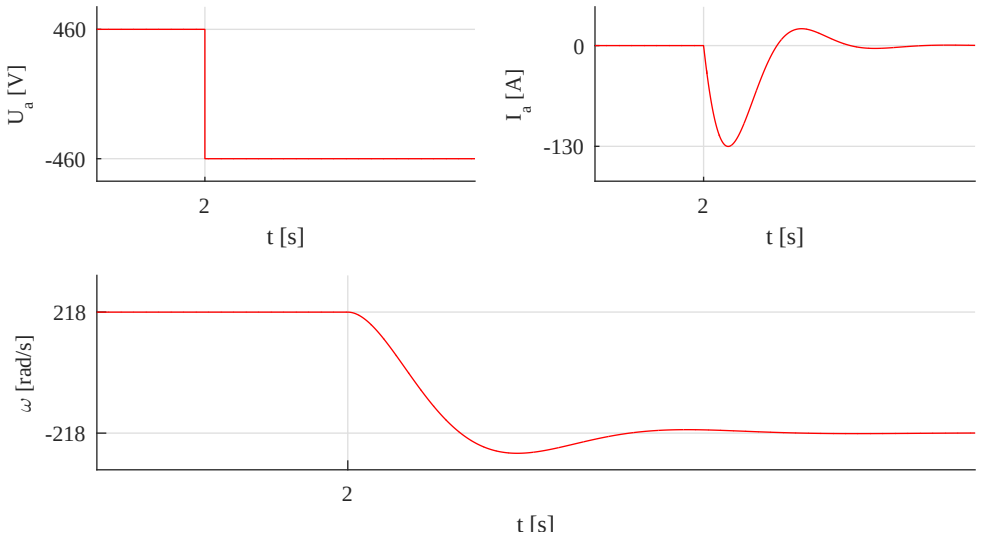
Sl. 2.9: *Protustrujno kočenje motora iz praznog hoda s linearnom promjenom ulazne veličine*

Prilikom linearnog protusrujnog kočenja u trajanju od 4 sekunde se vidi na slici da je struja kontantna cijelo vrijeme.

Reverziranje

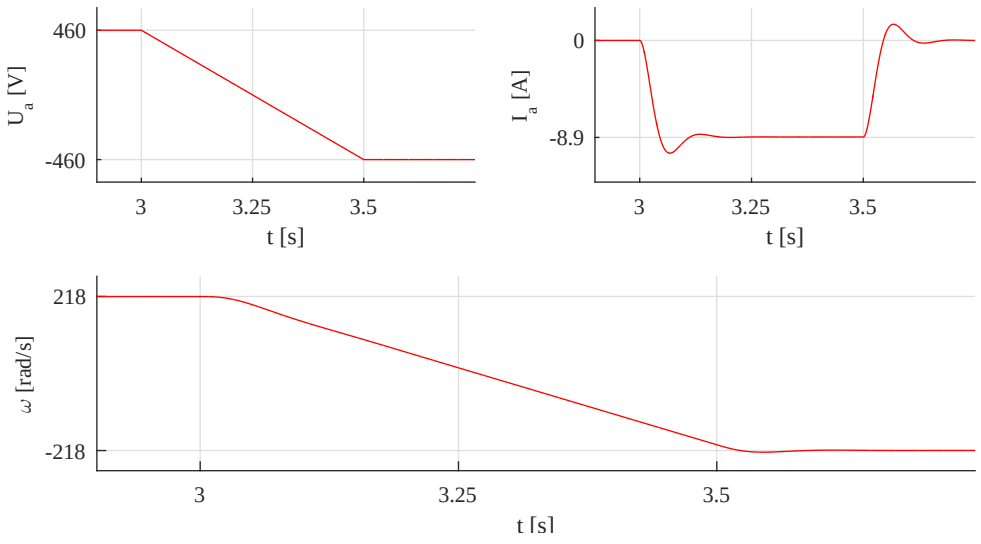
Zbog lakšeg objašnjenja kako napraviti reverziranje, ono će biti opisano u praznom hodu motora. Pri maksimalnoj brzini, narinuti napon na armaturnom namotu je pozitivnog polariteta i nazivne vrijednosti. Budući da se radi o praznom hodu, struja armature će biti jako mala, odnosno elektromotorna sila je približno jednaka narinutom naponu na armaturi. Da bi se promijenio smjer vrtnje (reverzirao), potrebno je promijeniti polaritet napona na armaturi. Kako

elektromotorna sila ima približno jednaku vrijednost kao napon armature, u trenutku zamjene polariteta će doći do velike razlike napona na armaturi i elektromotorne sile, a samim time i prevelike struje armature [5]. Rezultati simulacije ovakvkog reverziranja su prikazani na slici 2.10.



Sl. 2.10: *Reverziranje motora iz praznog hoda sa skokovitom promjenom ulazne veličine*

U trenutku skokovitok reverziranja, struja skače na 130 A, što znači da je ona u tom trenu 10 puta veća od nazivne. Zbog toga se ovakvo reverziranje ne izvodi, zato što bi se onda uništio motor, odnosno njegovi namoti.
Kako bi se reverziranje izvršilo bez štete, potrebno je spuštati napon tako da struja armature bude ograničena na bilo koju vrijednost do nazivne vrijednost. Ako se želi usporiti što je brže moguće, struja armature mora imati negativan polaritet na nazivnoj vrijednosti čitav period kočenja i zaleta u suprotnom smjeru. To će rezultirati konstantnim momentom u reverziranom smjeru vrtnje, te će se brzina vrtnje mijenati jednoliko [5]. Rezultati simulacije su prikazani na slici 2.11.



Sl. 2.11: *Reverziranje motora iz praznog hoda sa linearnom promjenom ulazne veličine*

Na slici s linearnim reverziranjem, kod kojeg kočenje traje 25 milisekundi i zalet u suprotnu stranu traje 25 milisekundi, je ovavkim načinom održana konstatna struja koja je manja od nazivne. To znači da se reverziranje moglo obaviti još brže. Bitno je paziti na brzinu promjene napona, kako namotima ne bi potekla prevelika struja.

2.3. Regulacija istosmjernih motora

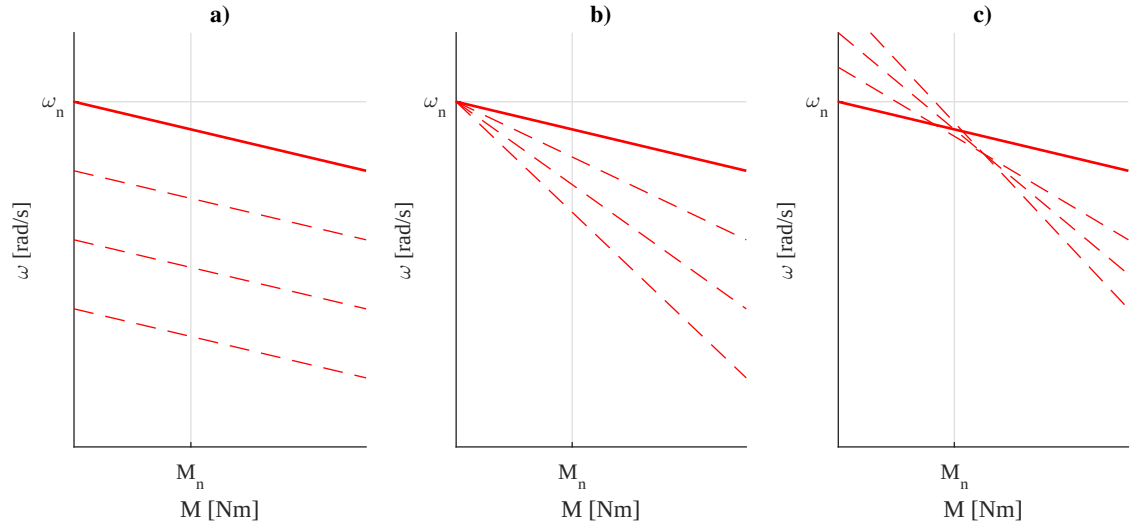
Regulacija istosmjernog motora se može vršiti za vrijeme prijelaznih pojava i u stacionarnom stanju. Regulacija za vrijeme prijelaznih pojava će biti razrađena u dijelu poglavlja u kojem će se opisivati dinamička regulacija. Za određivanje načina regulacije u stacionarnom stanju, iz jednadžbi stacionarnog stanja je potrebno izvesti ovisnost brzine vrtnje o momentu motora. Ako se jednadžbe (2-17) i (2-18), uvrste u (2-16), može se odrediti ovisnost brzine vrtnje o momentu motora (mehanička karakteristika).

$$\omega = \frac{U_a}{k_e \Phi_f} - \frac{R_a}{k_e k_m \Phi_f^2} M_e \tag{2-44}$$

Brzinom vrtnje istosmjernog motora se može upravljati na tri načina, a to su [1]:

- upravljanje promjenom napona armature U_a,
- upravljanje promjenom otpora armaturnog kruga R_a,
- upravljanje promjenom uzbudnog toka Φ_f, odnosno promjenom uzbudne struje I_f.

Promjenom napona armature, mehanička karakteristika motora se može pomjerati paralelno. Nagib karakteristike ostaje ne promijenjen. Maksimalna vrijednost brzine vrtnje, koja se može ostvariti, je određena maksimalnom vrijednošću armaturnog napona. Karakteristika je prikazana na slici 2.12*a*.



Sl. 2.12: *Mehaničke karakteristike istosmjernog motora s regulacijom brzine vrtnje*

Upravljanje promjenom otpora armaturnog kruga dovodi do promjene nagiba karakteristike. Brzina vrtnje u praznom hodu ostaje ista [1]. Brzina vrtnje ovisna o promjeni tereta se smanjuje povećanjem otpora armature. Karakteristika za ovu metodu upravljanja je prikazana na slici 2.12*b*.

Uzbudni tok se može mijenjati promjenom uzbudne struje. Smanjenjem uzbude, brzina vrtnje u praznom hodu se povećava, a brzina vrtnje pod opterećenjem se smanjuje. Stoga smanjenje brzine lako opterećenog motora je moguće samo velikim povećanjem struje uzbude. Budući da će željezo u magnetskom krugu motora brzo otići u zasićenje, povećanje sturje uzbude ne bi rezultiralo očekivanim povećanjem uzbudnog toka [1]. Karakteristika ovakve metode regulacije brzine je prikazana na slici 2.12*c*.
Ako je na motoru narinut nazivni napon, uzbuđen nazivnim tokom i kroz namote teče nazivna struja (nazivno opterećen), onda se može reći da se motor vrti nazivnom brzinom vrtnje. Kombinirano upravljanje promjenom armaturnog napona i uzbudne struje se naziva slabljenje polja. Ovisnosti brzine vrtnje o mehaničkoj snazi i momentu se mogu izvesti koristeći jednadžbe stacionarnog stanja. Slijedi izvod ovisnosti brzine vrtnje o momentu motora u stacionarnom stanju koristeći izraze (2-16), (2-17) i (2-18):

$$E = k_e \Phi_f \omega \tag{2-45}$$

$$M_e = k_m \Phi_f I_a \rightarrow I_a = \frac{M_e}{k_m \Phi_f} \tag{2-46}$$

$$U_a = I_a R_a + E \rightarrow U_a = R_a \frac{M_e}{k_m \Phi f} + k_e \Phi_f \omega \tag{2-47}$$

$$\omega[\text{rad/s}],\ \text{M}_\text{e}[\text{Nm}] \rightarrow \text{k}_\text{e} = \text{k}_\text{m} = \text{k} \tag{2-48}$$

$$\omega = \frac{U_a}{k \Phi_f} - \frac{R_a}{k^2 \Phi_f^2} M_e \tag{2-49}$$

Nakon izvoda ovisnosti brzine vrtnje o momentu, izvodi se ovisnost brzine vrtnje o mehaničkoj snazi koristeći izraze (2-17), (2-18) i (2-21):

$$E = k_e \Phi_f \omega \tag{2-50}$$

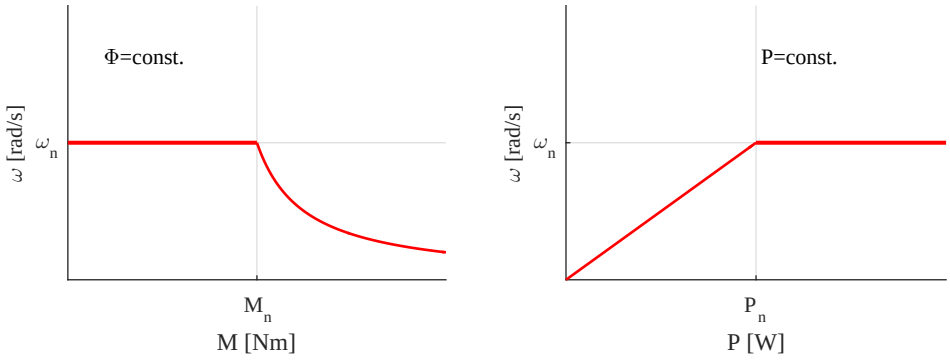
$$M_e = k_m \Phi_f I_a \rightarrow I_a = \frac{M_e}{k_m \Phi_f} \tag{2-51}$$

$$P_m = EIa = k_e \Phi_f \omega \frac{M_e}{k_m \Phi f} \tag{2-52}$$

$$\omega[\text{rad/s}],\ \text{M}_\text{e}[\text{Nm}] \rightarrow \text{k}_\text{e} = \text{k}_\text{m} \tag{2-53}$$

$$P_m = M_e \omega \rightarrow \omega = \frac{P_m}{M_e} \tag{2-54}$$

Na slici 2.13 su prikazani dijagrami ovisnosti brzine vrtnje o mehaničkoj snazi i elektromagnetskom momentu u stacionarnom stanju za upravljanje motorom pomoću slabljenja polja za što se može naći detaljnije objašnjenje u literaturi [5].



Sl. 2.13: *Brzina vrtnje sa slabljenjem polja*

Motor može raditi u pri bilo kojem momentu, brzini i struji do nazivnih vrijednosti. To područje se naziva područje konstantnog momenta (odnosno konstantnog toka), a na slici 2.13 je to područje površina kvadrata između nazivnog momenta i nazivne brzine vrtnje. Budući da je snaga jednaka umnošku momenta i brzine vrtnje motora, u tom području snaga raste linearno s porastom brzine do nazivne vrijednosti. Kako bi se motor vrtio brže od nazivne brzine vrtnje, potrebno je smanjiivati uzbudni tok (smanjivanjem uzbudne struje). Razlog smanjivanju toka je sljedeći: ako bi se snaga povećavala iznad nazivne, bilo bi potrebno povećati ili napon ili struju pri kojoj motor radi. Budući da napon mora biti konstantan, povećavala bi se struja armature, a to bi u konačnici dovelo do pregrijavanja namota, odnosno kvara motora.

Dinamička regulacija

Prema literaturi [8] se općenito smatra da je za najučinkovitije upravljanje istosmjernim elektromotornim pogonima koristiti kaskadnu strukturu regulacije. Također je navedeno da su sustavi sa više regulacijskih petlji veoma fleksibilni. Lako se može dodati dodatna regulacijska petlja, bila ona dodatna vanjska (npr. regulacija položaja) ili dodatna unutarnja (npr. regulacija ubrzanja). Ako bi se koristili regulatori za struju, ubrzanje, brzinu i položaj, onda bi oni takvim redoslijedom bili postavljenu u regulacijskoj shemi od untar prema van. U literaturi [1] je navedeno kako je kaskadna struktura transparentna, te omogućava optizimizaciju svakog regulatora zasebno.Prema [6], ako bi se koristila kaskadna regulacija sa dva regulacijska kruga, unutarnji krug predstavlja pomoćni regulacijski krug, dok vanjski predstavlja glavni regulacijski krug. U takvoj strukturi, glavni (vanjski) regulator definira referentnu (vodeću) vrijednost za pomoćni (unutarnji) regulator. Budući da stabilnost odziva ovisi i o podređenom (unutarnjem) regulacijskom krugu, u praksi je prvi korak pri sintezi kaskadnog sustava regulacije sinteza unutarnjeg regulacijskog kruga, a zatim sinteza vanjskog regulacijskog kruga [6]. Kaskadna regulacija služi za izolaciju primarnog kruga od poremećaja, nelinearnosti i problema vezanih s izvršnim članom. Koristi od primjene kaskadne regualcije su sljedeće [9]:

- kompenzacija poremećaja - odziv unutarnjeg kruga znatno je brži od vanjskog, a unutarnji krug kompenzira poremećaje na upravljanom toku koji utječu na vanjski krug;
- brži odziv - u nekim slučajevima unutarnji krug će brže mijenjati varijablu stanja (npr. struja), nego što to radi vanjski krug. Brži odziv smanjuje mrtvo vrijeme vanjskog kruga, pa se vanjski krug može podešavati za brži odziv.

Danas je za regulaciju istosmjernih pogona najprihvaćiniji način kaskadna regulacije. Jedan primjer takve regulacije se nalazi Simoregu, a način na koji ju Simoreg primjenjuje s može

naći u njegovom priručniku [10]. Za postizanje bolje radne karakteristike istosmjernog motora, promatrajući rezultate dobivene simulacijama nereguliranog istosmjernog motora u potpoglavlju 2.2, prepreku predstavlja struja. Zbog prevelike struje prilikom pokretanja istosmjernog motora direktnim uklopom može doći uništenja namota motora, a prilikom pokertanja s linearnom promjenom narinutog napona je ta struja ograničena, ovisno brzini promjene ulaznog napona. Osim prevelike struje, brzina vrtnje nakon terećenja motora ostaje snižena. Stoga je potrebno regulirati struju i brzinu vrtnje. U većini slučajeva se postavlja referentna brzina vrtnje ω_{Ref} koju bi motor trebao držati dokle god nije preopterećen [8]. Osim kutne brzine vrtnje, također se referentnim modelom može postaviti referentna vrijednost kutnog položaja θ_{Ref}, kutnog ubrzanja α_{Ref}, te referentna struje $i_{a,Ref}$ [8].

Regulatori

Regulator struje regulira struju armature na način da poništava djelovanje induciranog napona na motoru te tako pruža najbrži mogući odziv u regulacijskom sustavu. Ograničavanjem referentne vrijednosti struje $i_{a,Ref}$, unutarnja regulacijska petlja također ima ulogu nadstrujne zaštite na način da ograničava trenutne poraste struje, za razliku od prekidača i osigurača, koji se aktiviraju ovisno o njihovoj karakteristici.
Regulator brzine vrtnje upravlja zatvorenom unutarnjom regulacijskom petljom, te proizvodi referentnu vrijednost za regulator struje [8]. Zbog uvjeta o stabilnosti sustava u literaturi [6] je potrebno da djelovanje unutarnjeg regulacijskog struja ima manju vremensku konstantu od djelovanja vanjskog regulacijskog kruga.

2.4. Sinteza regulatora

Za primjenu kaskadne regulacije u ovom diplomoskom radu će se za sintezu regulatora koristiti tehnički optimum i simetrični optimum. Postoje i mnoge druge metode za sintezu regulatora (npr. metoda prema Ziegler i Nichols koja je detaljnije opisana u literaturi [6]).

Tehnički optimum

Osnovna pretpostavka za primjenu tehničkog optimuma je da se radi o sustavu bez astatizma. Tehnički optimum se zasniva na zahtjevima da amplitudno-frekvencijska karakteristika zatvorenog regulacijskog kruga mora imati konstantnu vrijednost u što širem frekvencijskom području i da u pravilu nesmije imati rezonantno uzdizanje [6]. Ovakvim zahtjevima se postiže brz, približno aperiodski odziv. Pretpostavit će se sustav koji se sastoji od jednog aperiodskog člana s dominantnom vremenskom konstantnom, te u njemu u seriju dodanih aperiodskih članova s nedominantnom vremenskom konstantnom:

$$G(s) = \frac{K_s}{1+sT_1}\frac{1}{1+sT_2}\frac{1}{1+sT_3}...\frac{1}{1+sT_n} \tag{2-55}$$

Ukoliko je:

$$T_1 >> T_2 + T_3 + ... + T_n \tag{2-56}$$

onda se može primjeniti sljedeća aproksimacija [6]:

$$\frac{1}{1+sT_2}\frac{1}{1+sT_3}...\frac{1}{1+sT_n} = \frac{1}{1+sT_\Sigma} \tag{2-57}$$

gdje je T_Σ zbroj svih nedominantnih vremenskih konstanti $T_2 + T_3 + ... + T_n$. Tada prijenosna funkcija sustava ima oblik:

$$G(s) = \frac{K_s}{1 + sT_1} \frac{1}{1 + sT_\Sigma}. \tag{2-58}$$

Ako se odabere PI regulator, on bi prema tehničkom optimumu trebao imati sljedeću prijenosnu jednadžbu:

$$G_R(s) = K_R(1 + \frac{1}{sT_I})$$

$$G_R(s) = K_R \frac{1 + sT_I}{sT_I}. \tag{2-59}$$

Kao integralna vremenska konstanta se odabire dominantna vremenska konstanta sustava [6]:

$$T_I = T_1. \tag{2-60}$$

Prijenosna funkcija otvorenog regulacijskog sustava glasi:

$$G_o(s) = K_R \frac{1 + sT_I}{sT_I} \frac{K_s}{1 + sT_1} \frac{1}{1 + sT_\Sigma} = \frac{K_o}{sT_I(1 + sT_{\Sigma)}} \tag{2-61}$$

gdje je kružno pojačanje $K_o = K_R K_s$. Prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog kruga će imati oblik:

$$G_x(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{\frac{K_o}{sT_I(1+sT_{\Sigma)}}}{1 + \frac{K_o}{sT_I(1+sT_{\Sigma)}}} = \frac{K_o}{K_o + sT_I + s^2 T_I T_\Sigma}. \tag{2-62}$$

Ako se (2-62) svede na opći oblik, onda se mogu izračunati prigušenje i prirodna frekvencija sustava:

$$G_x(s) = \frac{\frac{K_o}{T_I T_\Sigma}}{\frac{K_o}{T_I T_\Sigma} + s\frac{1}{T_\Sigma} + s^2} \tag{2-63}$$

pa se po uzoru na (2-39) daju izvesti ζ i ω_n iz (2-63):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_o}{T_I T_\Sigma}} \tag{2-64}$$

$$2\zeta\omega_n = \frac{1}{T_\Sigma} \rightarrow \zeta = \frac{1}{2T_\Sigma}\sqrt{\frac{T_I T_\Sigma}{K_o}}$$

$$\zeta = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_I}{T_\Sigma K_o}}. \tag{2-65}$$

Iz (2-65) slijedi:

$$K_o = \frac{T_I}{T_\Sigma} \frac{1}{4\zeta^2}$$

$$K_R = \frac{1}{K_s} \frac{T_I}{T_\Sigma} \frac{1}{4\zeta^2} \tag{2-66}$$

Prema literaturi [6] se preporuča uzeti $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$, pa će pojačanje regulatora imati sljedeći iznos:

$$K_R = \frac{1}{2} \frac{1}{K_s} \frac{T_I}{T_\Sigma}. \tag{2-67}$$

Uz odabrani $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$, prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog sustava s PI regulatorom čiji su parametri, određeni prema tehničkom optimumu, (2-63) će izgledati ovako:

$$G_x(s) = \frac{1}{1 + s2T_\Sigma + s^2 2T_\Sigma^2}. \tag{2-68}$$

U literaturi [6] je izveden analitički izraz za prijelaznu funkciju zatvorenog sustava s obzirom na referentnu vrijednost:

$$h_x(\frac{t}{T_\Sigma}) = 1 - e^{-\frac{1}{2T_\Sigma}}(\cos\frac{t}{2T_\Sigma} + \sin\frac{t}{2T_\Sigma}). \tag{2-69}$$

Iz odziva prijelazne funkcije (2-69) se mogu odrediti sljedeće vrijednosti:

$$t_u \approx 4,7T_\Sigma$$
$$t_m \approx 2\Pi T_\Sigma$$
$$t_{2\%} \approx 8,4T_\Sigma$$
$$\sigma_m \approx 4,3\%$$

gdje su t_u ulazno vrijeme, odnosno vrijeme porasta $(0 - 100\%)$, t_m vrijeme prvog maksimuma, $t_{2\%}$ vrijeme ustaljivanja ($\varepsilon = 2\%$) i σ_m maksimalno nadvišenje odziva.
Ukoliko sustav ima dvije dominatne vremenske konstante, te sljedeću prijenosnu funkciju:

$$G(s) = \frac{K_s}{1 + sT_1}\frac{1}{1 + sT_2}\frac{1}{1 + sT_\Sigma} \tag{2-70}$$

onda se, prema literaturi [6], koristi PID regulator. Dodavanjem PDT člana PI regulatoru se može dobiti PID regulator [8]:

$$G_R(s) = K_R\frac{1 + sT_I}{sT_I}\frac{1 + sT_D}{1 + sT_V}, \tag{2-71}$$

gdje je parazitna vremenska konstanta $T_V << T_D$. Odabere li se da je $T_I = T_1$ i $T_D = T_2$, K_R prema (2-67) i parazitna vremenska konstanta T_V pridoda u T_Σ, dobije se prijenosna jednadžba sustava istog oblika kao i (2-68):

$$G_x(s) = \frac{1}{1 + s2T_\Sigma + s^2 2T_\Sigma^2}. \tag{2-72}$$

Simetrični optimum

Kako bi se simetrični optimum mogao primjeniti, pretpostavka je da se radi o procesu sa astatizmom prvog reda [6]. Neka prijenosna funkcija procesa ima sljedeći oblik:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{1 + sT_\Sigma}\frac{1}{sT_1}. \tag{2-73}$$

Ako se primjeni PI regulator (2-59) na ovaj proces, dobije se sljedeća prijenosna funkcija otvorenog kruga:

$$G_o(s) = K_R\frac{1 + sT_I}{sT_I}\frac{K_s}{1 + sT_\Sigma}\frac{1}{sT_1} = K_o\frac{1}{s^2 T_I T_1}\frac{1 + sT_I}{1 + sT_\Sigma}. \tag{2-74}$$

Budući da u prijenosnoj funkciji postoji član s faznim prethođenjem, neophodan je sljedeći uvjet da bi sustav bio stabilan [6]:

$$T_I > T_\Sigma \tag{2-75}$$

Izraz fazno-frekvencijske karakteristike sustava prijenosne funkcije (2-74) glasi [6]:

$$\varphi_o(\omega) = -180^\circ + \text{arctg}\omega T_I - \text{arctg}\omega T_\Sigma. \tag{2-76}$$

Maksimalna vrijednost fazno-frekvencijske karakteristike se može dobiti na sljedeći način:

$$\frac{\mathrm{d}\varphi_o(\omega)}{\mathrm{d}\omega} = \frac{T_I}{1+(\omega T_I)^2}\frac{T_\Sigma}{1+(\omega T_\Sigma)^2} = 0 \rightarrow \omega_m = \frac{1}{\sqrt{T_I T_\Sigma}}, \tag{2-77}$$

a ako se ω_m uvrsti u izraz za fazno-frekvencijsku karakteristiku sustava, dobije se:

$$\varphi_o(\omega_m) = -180^\circ + \text{arctg}\sqrt{\frac{T_I}{T_\Sigma}} - \text{arctg}\sqrt{\frac{T_\Sigma}{T_I}}. \tag{2-78}$$

Ako se kao presječna frekvencija ω_c odabere maksimalna vrijednost fazno-frekvencijske karakteristike ω_m, onda se može odrediti maksimalno fazno osiguranje. Neka je integralna vremenska konstanta PI regulatora:

$$T_I = \alpha^2 T_\Sigma \tag{2-79}$$

Koristeći (2-76), (2-77) i (2-79), te ako se odabere $\omega_c = \omega_m$, proizlazi izraz za fazno osiguranje:

$$\gamma = \varphi_o(\omega_c) + 180^\circ = \text{arctg}\sqrt{\frac{T_I}{T_\Sigma}} - \text{arctg}\sqrt{\frac{T_\Sigma}{T_I}}$$

$$\gamma = \text{arctg}\alpha - \text{arctg}\frac{1}{\alpha} = \text{arctg}\frac{1}{2}(\alpha - \frac{1}{\alpha}) \tag{2-80}$$

Iz (2-80) se može izraziti α:

$$\alpha = \text{tg}\gamma + \frac{1}{\cos\gamma} = \frac{1+\sin\gamma}{\cos\gamma} \tag{2-81}$$

Kako bi se odredilo pojačanje regulazora K_R, polazi se od uvjeta da je vrijednost amplitude odziva prijenosne funkcije (2-74) jednaka jedan [6]:

$$|G_o(j\omega_c)| = \frac{K_o}{\omega_c^2 T_I T_1}\frac{\sqrt{1+(\omega_c T_I)^2}}{\sqrt{1+(\omega_c T_\Sigma)^2}} = 1. \tag{2-82}$$

Uz $\omega_c = \omega_m$, koristeći (2-77) i (2-79) u (2-82) se može odrediti K_R. Budući da vremenska konstanta T_Σ počinje djelovati nakon presječne frekvencije, ona se može zanemariti, a $(\omega_c T_I)^2 >> 1$, pa se iz sljedećeg izraza dobije pojačanje regulatora:

$$\frac{K_R K_s}{\omega_c^2 T_I T_1}\omega_c T_I = 1,$$

$$K_R = \frac{1}{\alpha}\frac{1}{K_s}\frac{T_1}{T_\Sigma}. \tag{2-83}$$

Ako se uvrste (2-79) i (2-83) u (2-74), dobije se prijenosna funkcija zatvorenog sustava:

$$G_x(s) = \frac{G_o(s)}{1+G_o(s)} = \frac{1+s\alpha^2 T_\Sigma}{1+s\alpha^2 T_\Sigma + s^2\alpha^3 T_\Sigma^2 + s^3\alpha^3 T_\Sigma^2}. \tag{2-84}$$

Odabere li se $\alpha = 2$, iz (2-84) se dobije prijelazna funkcija [6]:

$$h_s(\frac{t}{T_\Sigma}) = 1 - e^{-\frac{1}{2T_\Sigma}} - 2e^{-\frac{t}{4T_\Sigma}}\sin\frac{\sqrt{3}}{4T_\Sigma}t. \tag{2-85}$$

Iz analize prijelazne funkcije se mogu odrediti sljedeće vrijednosti:

$$\begin{aligned} t_u &\approx 3,1T_\Sigma \\ t_m &\approx 6T_\Sigma \\ t_{2\%} &\approx 16,5T_\Sigma \\ \sigma_m &\approx 43,4\% \end{aligned}$$

Iz očitanih vrijednosti se vidi da je regulacijsko nadvišenje preveliko (σ_m=43,4%), ono se može kompenzirati ugradnjom prefiltra u granu referentne vrijednosti. Njim se kompenzira djelovanje nule u (2-84) [6]:

$$G_{PF}(s) = \frac{1}{1 + s\alpha^2 T_\Sigma} \tag{2-86}$$

Primjenom ovog prefiltra na (2-84), prijenosna funkcija zatvorenog sustava dobije sljedeći izgled:

$$G_x(s) = \frac{1}{1 + s\alpha^2 T_\Sigma + s^2\alpha^3 T_\Sigma^2 + s^3\alpha^3 T_\Sigma^2}. \tag{2-87}$$

Za prijenosnu funkciju (2-87) se dobije sljedeća prijelzna funkcija [6]:

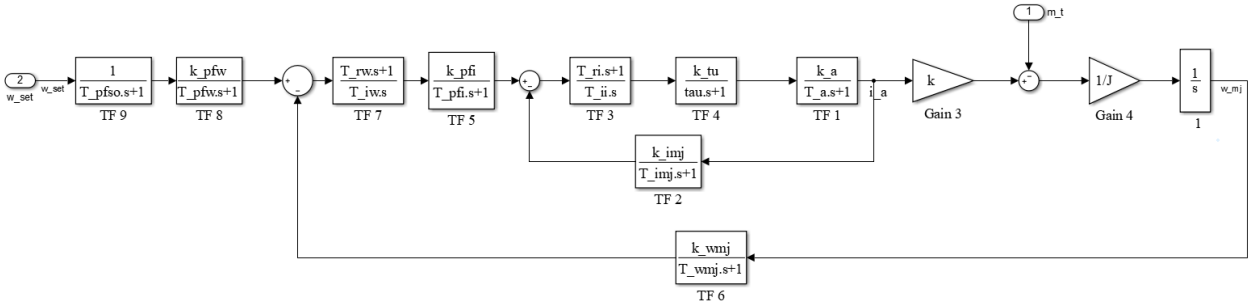
$$h_s(\frac{t}{T_\Sigma}) = 1 - e^{-\frac{1}{2T_\Sigma}} - \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-\frac{t}{4T_\Sigma}} \sin\frac{\sqrt{3}}{4T_\Sigma} t. \tag{2-88}$$

Iz prijlazne funkcije se mogu očitatit vrijednosti:

$$\begin{aligned} t_u &\approx 7,6T_\Sigma \\ t_m &\approx 10T_\Sigma \\ t_{2\%} &\approx 13,3T_\Sigma \\ \sigma_m &\approx 8,1\% \end{aligned}$$

2.5. Simulacija reguliranog istosmjernog pogona

U ovom potpoglavlju će biti prikazani rezultati simulacije reguliranog istosmjernog pogona. Podatci motora i svih ostalih vremenskih i pojačanja filtra, mjernih članova su dani u prilogu. Vremenske konstante regulatora će biti određene za regulator struje (PI regulator) pomoću tehničkog optimuma, te za regulatro brzine vrtne (PI regulator) pomoću simetričnog optimuma. Također će sukladno obrazloženju u paragrafu potpoglavlja 2.4 biti ugrađen i prefiltar za kompenzaciju nadvišenja zbog korištenja simetričnog optimuma. Koristeći literaturu [6], napravljena je strukturna shema sustava regulacije istosmjernog motora s nezavisnom i konstantnom uzbudom (Slika 2.14 koja se može izvesti dodavanjem regulacijskih i pomoćnih članova u blok dijagram nereguliranog istosmjernog motora prikazanog na slici 2.4.



Sl. 2.14: *Strukturna shema regulacije istosmjernog motora*

Na slici 2.14, prijenosne funkcije predstavljaju sljedeće članove, počevši od unutarnjeg regulacijskog kruga prema vanjskom:

- TF 1 - armaturnog dijela motora
- TF 2 - pojačanje i filtar mjernog člana struje
- TF 3 - PI regulator struje
- TF 4 - izvršni član, tiristorski ispravljač
- TF 5 - prefiltar povratne veze mjernog člana struje
- TF 6 - pojačanje i filtar mjernog člana brzine vrtnje
- TF 7 - PI regulator brzine vrtnje
- TF 8 - prefiltar povratne veze mjernog člana brzine vrtnje
- TF 9 - prefiltar za kompenzaciju nadvišenja uzrokovanog primjenom simetričnog optimuma

Procesi pretvorbi energije u motoru se mogu podijeliti na dio u kojem se odvija elektromagnetski potproces (električni dio motora) odakle je izlazna veličina razvijeni moment M_m. Dio u kojem se odvija mehanički potproces (mehanički dio motora), razvijeni moment koji rezultira zakretanjem, odnosno vrtnjom osovine motora [6].

Sinteza regulatora struje

Za sintezu regulatora struje po tehničkom optimumu je potrebno odrediti koje vremenske konstante su dominantne u regulacijskoj petlji struje, a koje nedominantne. Ako se uvrsti (2-43) u (2-42), može se izvesti prijenosna funkcija odziva struje s obzirom na vodeću veličinu napon armature i poremećajnu veličinu moment tereta:

$$I_a(s) = \frac{sT_{mn}/R_a}{s^2T_aT_{mn} + sT_{mn} + 1}U_a(s) + \frac{1}{k_ek_m}\frac{1}{s^2T_aT_{mn} + sT_{mn} + 1}M_t(s) \tag{2-89}$$

Na slici 2.14 se vidi da u regulacijsku petlju struje ulaze tiristorski usmjerivač, mjerni član i filtar povratne veze, te prijenosna funkcija odziva struje s obzirom na vodeću veličinu $U_a(s)$, te

povratnu veličinu slučaju $E(s)$. $E(s)$ se za svrhe regulacije u tom dijelu zanemaruje i pridodaje mjernom članu brzine vrtnje. Pa iz (2-42) slijedi:

$$\frac{I_a(s)}{U_a(s)} = \frac{k_a}{sT_a + 1} \tag{2-90}$$

gdje je $k_a = \frac{1}{R_a}$. Iz slike 2.14 se može odrediti prijenosna funkcija procesa kojim se upravlja, uz zanemarenje $E(s)$ [6]:

$$G_1(s) = \frac{k_{tu}}{s\tau + 1} \frac{k_{imj}}{sT_{imj} + 1} \frac{k_a}{sT_a + 1} \tag{2-91}$$

gdje su:

- τ - nadomjesno mrtvo vrijeme tiristorskog usmjerivača
- T_{imj} - vremens konstanta povratne veze struje, odnosno mjernog člana struje
- k_{tu} - pojačanje tiristorskog usmjerivača i generatora impulsa
- k_{imj} - pojačanje povratne veze struje.

Nadomjesno mrtvo vrijeme tiristorskog usmjerivača se računa pomoću broja impulsa usmjerivača m i frekvencije napojne mreže f:

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{1}{mf} \tag{2-92}$$

Budući da je u (2-91) T_a jedina dominantna vremenska konstanta, strukturnim pojednostavljenjem se može dobiti:

$$G_1(s) = \frac{k_1}{(sT_a + 1)(sT_\Sigma + 1)} \tag{2-93}$$

Pojačanje k_1 i vremenska konstanta T_Σ se dobiju na sljedeći način:

$$k_1 = k_{tu} k_{imj} k_a$$
$$T_\Sigma = \tau + T_{imj}.$$

Nakon ovih manipulacija, struktura procesa je pogodna za primjenu tehničkog optimuma. Stoga je moguće odraditi sintezu PI regulatora čija prijenosna funkcija je (2-59), a prema (2-60) i (2-66) se odabire:

$$T_{ri} = T_a \tag{2-94}$$

$$k_{ri} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_1} \frac{T_a}{T_\Sigma} \tag{2-95}$$

Prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog kruga struje uz prethodno definirane paremetre PI regulatora glasi:

$$\frac{I_a(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{sT_{imj} + 1}{k_{imj}} \frac{1}{2s^2 T_\Sigma^2 + 2sT_\Sigma + 1} \tag{2-96}$$

gdje je I_{ref} signal referentne vrijednosti struje.
Ako se u granu referentne vrijednosti struje stavi prefiltar s prijenosno funkcijom $G_{pfi}(s)$, može se kompenzirati djelovanje člana $(sT_{imj} + 1)$ [6]:

$$G_{pfi}(s) = \frac{1}{sT_{imj} + 1} \tag{2-97}$$

pa se za prijenosnun funkciju zatvorenog regulacijskog kruga struje dobije:

$$\frac{I_a(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{1}{k_{imj}} \frac{1}{2s^2T_\Sigma^2 + 2sT_\Sigma + 1} \tag{2-98}$$

U litraturi [6] se također napominje da je zgodno strukturno pojednostaviti prethodno napisana prijenosna funkcija, zato što je regulacijski krug armature podređen regulacijskm krugu brzine vrtnje. Stoga se ona nadomješta prijenosnom funkcijom:

$$\frac{I_a(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{1}{k_{imj}} \frac{1}{sT_S + 1} \tag{2-99}$$

gdje je T_S nadomjesna vremenska konstanta. Ova konstanta se prema [6] može odrediti na dva načina, ali će zbog nepotrenog ponavljanja biti napisan samo jedan način. T_S se može odrediti kao:

$$T_S = \frac{1}{\omega_{ci}} \tag{2-100}$$

gdje je ω_{ci} presječna frekvencija otvorenog regulacijskog kruga struje armature $G_{0i}(j\omega)$. Iz $|G_{0i}(j\omega) = 1|$ se može dobiti:

$$\omega_{ci} = \frac{1}{T_\Sigma} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{1 + \frac{1}{4\zeta^2 - 1}}}. \tag{2-101}$$

Budući da se prema tehničkom optimumu odabire $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2}$, implicira:

$$\omega_{ci} = \frac{0,46}{T_\Sigma} \Rightarrow T_S = 2,2T_\Sigma \tag{2-102}$$

Sinteza regulatora brzine vrtnje

Sinteza regulatora brzine se obavlja tek nakon pojednostavljenja strukture zatvorenog regulacijskog kruga armature (2-99). Stoga će prijenosna funkcija procesa kojim upravlja regulator brzine vrtnje biti:

$$G_2(s) = \frac{1}{k_i mj} \frac{1}{2,2sT_\Sigma} k_m \frac{k_w mj}{sT_{wmj} + 1} \frac{1}{k_a k_e k_m sT_{mn}} \tag{2-103}$$

gdje su k_{wmj} pojačanje mjernog člana brzine vrtnje i T_{wmj} vremenska konstanta filtra mjernog člana brzine vrtnje. Prethodna jednadžba se stoga može zapisati:

$$G_2(s) = \frac{k_2}{1 + sT'_\Sigma} \frac{1}{sT_{mn}} \tag{2-104}$$

gdje su:

$$T'_\Sigma = 2T_\Sigma + T_{wmj} \tag{2-105}$$

$$k_2 = \frac{k_{wmj}}{k_{imj} k_a k_m}. \tag{2-106}$$

Prema [6], ovakva struktura procesa je prigodna za primjenu simetričnog optimuma. Stoga se za regulator brzine koristi PI regulator (2-59), pa se prema (2-79) i (2-83) odabiru:

$$T_{rw} = 4T'_\Sigma \tag{2-107}$$

$$k_{rw} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_2} \frac{T_{mn}}{T'_\Sigma} \tag{2-108}$$

Prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje uz parametre regulatora će glasiti:

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{sT_{wmj}+1}{k_{wmj}} \frac{4sT'_{\Sigma}}{8s^3T'^3_{\Sigma} + 8s^2T'^2_{\Sigma} + 4sT'_{\Sigma} + 1}. \tag{2-109}$$

Potrebno je kompenzirati polove zbog člana u povratnoj vezi $(sT_{wmj}+1)$, te zbog primjene simetričnog optimuma $(4sT_{\Sigma}+1)$ tako što će se dodati prefiltar u grani referentne vrijednosti brzine vrtnje:

$$G_{pfw}(s) = \frac{1}{(sT_{wmj}+1)(4sT'_{\Sigma}+1}, \tag{2-110}$$

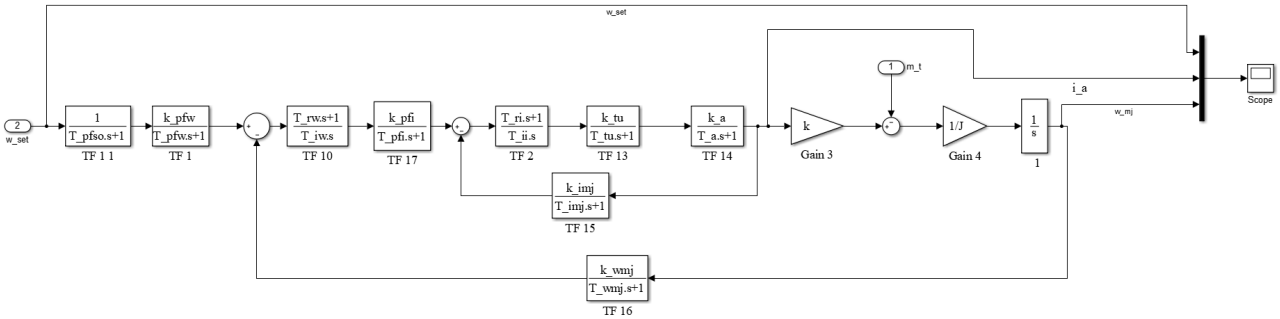
pa se u konačnici dobije prijenosna funkcija:

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{1}{k_{wmj}} \frac{1}{8s^3T'^3_{\Sigma} + 8s^2T'^2_{\Sigma} + 4sT'_{\Sigma} + 1} \tag{2-111}$$

gdje je Ω_{ref} signal referentne vrijednosti brzine vrtnje.
Prije obavljanja simulacije reguliranog istosmjernog motora, potrebno je odabrati parametre filtra u povratnoj vezi, zbog filtriranja nepoželjnih harmonika frekvencije u signalu. U potpoglavlju 4.1 je ovo u potpunosti napravljeno, pa taj dio neće biti izvođen ovdje.

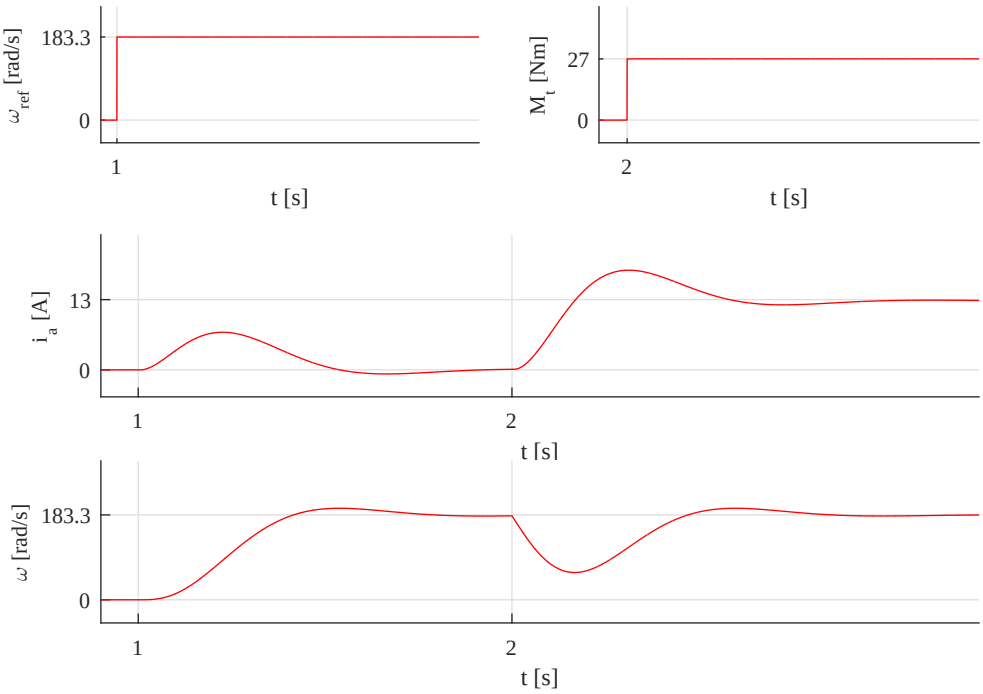
Rezultati simulacije

Primjenom prethodno odabranih regulatora, napravljene su simulacije reguliranog istosmjernog motora pomoću kojih su određeni valni oblici napona i struje armature, te valni oblik brzine vrtnje. Na slici 2.15 je prikazan simulacijski model prema kojem je napravljena simulacija reguliranog istosmjernog motora. MATLAB skripta pomoću koje je napravljena simulacija se nalazi u prilogu.



Sl. 2.15: *Simulacijski model reguliranog istosmjernog motora*

Prilikom simulacije sa podatcima danim u prilogu (Tablica P1.1) je napravljen zalet sa skokovitom promjenom ulazne veličine, te linearnom promjenom ulazne veličine. U simulacijama se postavlja referentna vrijednsot brzine vrtnje, kao što se to radi i kod upravljanja stvarnim motorom.
Na slici 2.16 je prikazan rezultat simulacije reguliranog nezavisnog istosmjernog motora.

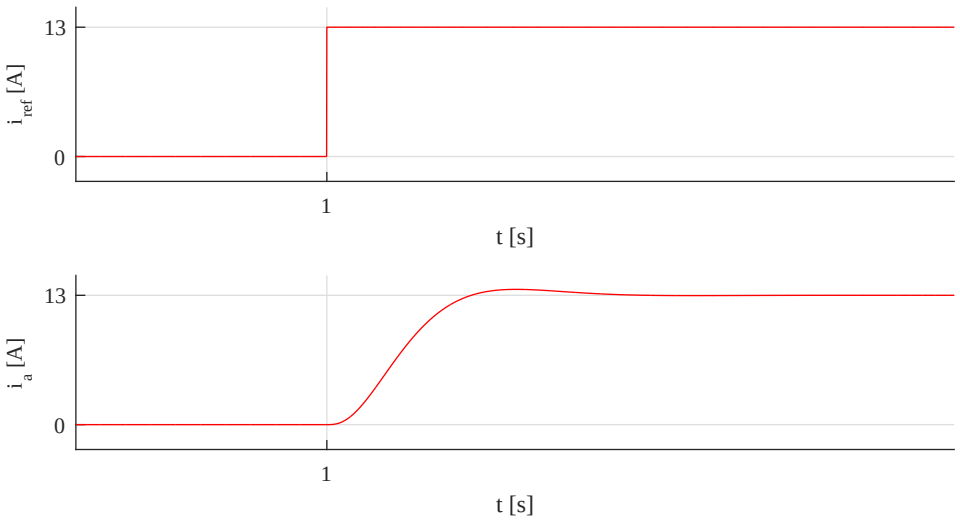


Sl. 2.16: *Rezultati simulacije reguliranog istosmjernog motora*

Budući da je regulator brzine vrtnje parametriran prema simetričnom optimumu, propad brzine vrtnje iznosi 67.8% pri nazivnom opterećenju nezadovoljava simetrični optimum, pa je potrebno prvo ispitati valjanost parametara regulacijskih krugova. Prvo će biti provjerena ispravnost unutarnjeg regulacijskog kruga sa svim filtrima i prefiltrima, jer je on polazište pri sintezi regulacijskih krugova.

Ispitivanje unutarnjeg regulacijskog kruga

Ispitivanje unutarnjeg regulacijskog kruga se provodi na način da se skokovitom promjenom referentne veličine koja ulazi u prefiltar unutarnjeg kruga dobiju rezultati na osnovu kojih se može zaključiti valjanost. Rezultati simulacije za ovaj slučaj su prikazani na slici 2.17.

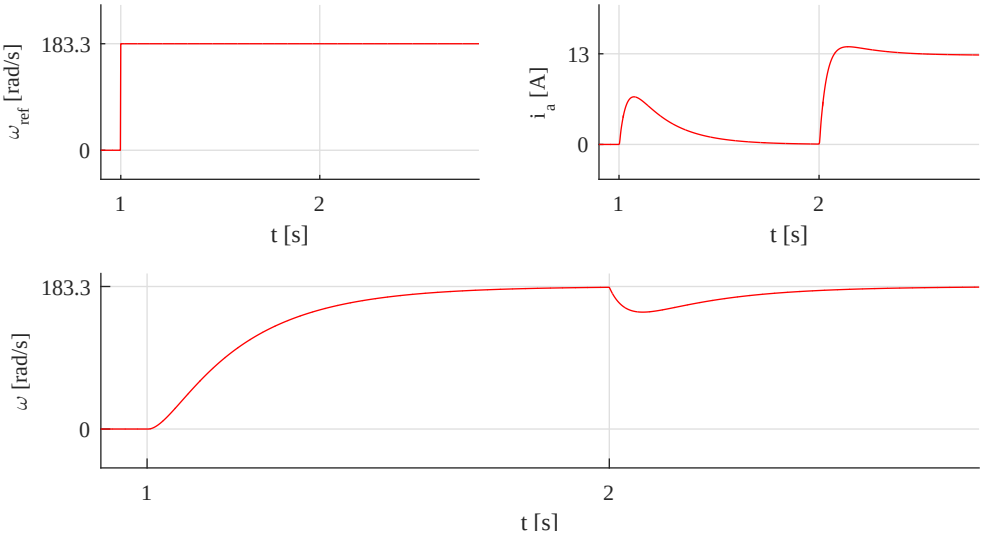


Sl. 2.17: *Provjera ispravnosti unutarnjeg regulacijskog kruga*

Rezultati simulacije dokazuju da je unutarji regulacijski krug ispravno parametriran (nadvišenje struje 4.4%). Budući da je unutarnji regulacijski krug ispravno parametriran, ispitat će se valjanost vanjskog regulacijskog kruga s jediničnim povratnim vezama.

Ispitivanje vanjskog regulacijskog kruga s jediničnom povratnom vezom

Ispitivanje vanjskog regulacijskog kruga se može izvesti zamjenom postojećih povratnih veza i njima odgovarajućih predfitlera, jediničnim povratnim vezama. Nakon ovoga ispitivanja će biti uključene sve povratne veze kako bi se ustanovilo u kojem dijelu je problem. Na slici 2.18 se nalaze rezultati simulacije.

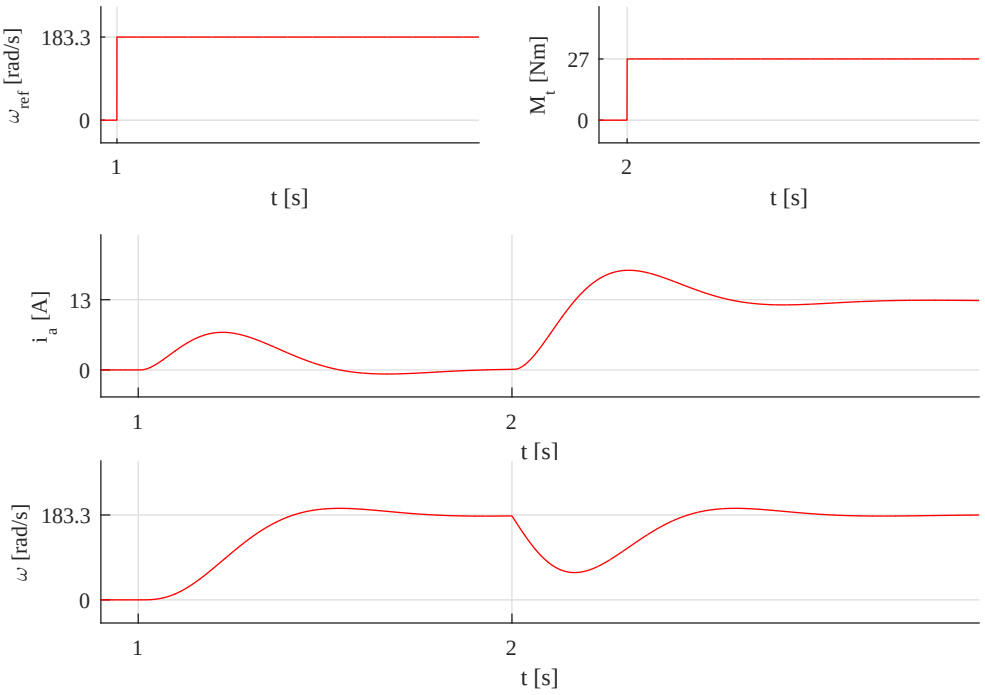


Sl. 2.18: *Rezultati ispitivanja vanjskog regulacijskog kruga*

Rezultati simulacije dokazuju da je vanjski regulacijski krug pravilno parametriran s jediničnim povratnim vezama. Sljedeći korak je provjera vanjskog regulacijskog kruga s uključenom povratnom vezom i prefiltrom.

Ispitivanje vanjskog regulacijskog kruga s uključenom povratnom vezom

Nakon provedene simulacije se dobiju isti rezultati (Slika 2.19) kao u prvom pokušaju simuliranja reguliranog istosmjernog motora.



Sl. 2.19: *Rezultati ponovljene simulacije reguliranog istosmjernog motora s uključenim povratnim vezama*

Na osnovu ovih dokaza može se zaključiti, da je prilikom simulacije zaleta i terećenja, razlog prevelikog propada bio filtar povratne veze brzine vrtnje. Budući da se radi o niskopropusnom filtru, graničnu frekvenciju prigušenja je Simoreg postavio nakon automatskog podešavanja na 20 Hz. Svrha tog filtra je otklanjanje harmonika frekvencije 25 Hz u mjerenom signalu koji nastaje zbog ekscentričnosti tahogeneratora pri brzini od 1500 [min^{-1}]. Amplituda signala ovisi o brzini vrtnje tahogeneratora, pa je ona pri nižim brzinama ne utječe znatno na mjerni signal, dok pri višim brzinama od 1500 min^{-1} može znatno utjecati na izobličenje mjernog signala. Možda se može pojaviti harmoni frekvencije više od 25 Hz, ali ova pojava nije dovoljno istraživana, kako bi se donio siguran zaključak. Budući da je postavljena vrijednost granične frekvencije prigušenja 20 Hz, odnosno ako se preračuna u vremensku konstantu 50 ms, može se primjetiti da je ona veća od trenutne dominante vremenske konstante koju predstavlja moment inercije ($T_m = 21.5\,\text{ms}$). Stoga se može zaključiti da je ovakva postavka direktan uzrok propada brzine vrtnje od 67.8% prilikom nazivnog terećenja motora. Budući da parametriranje regulatora brzine vrtnje prema simetričnom optimumu, za tako postavljen filtar povratne veze brzine vrtnje, ne daje dobre rezultate, potrebno je ponovno parametriranje regulatora brzine vrtnje.

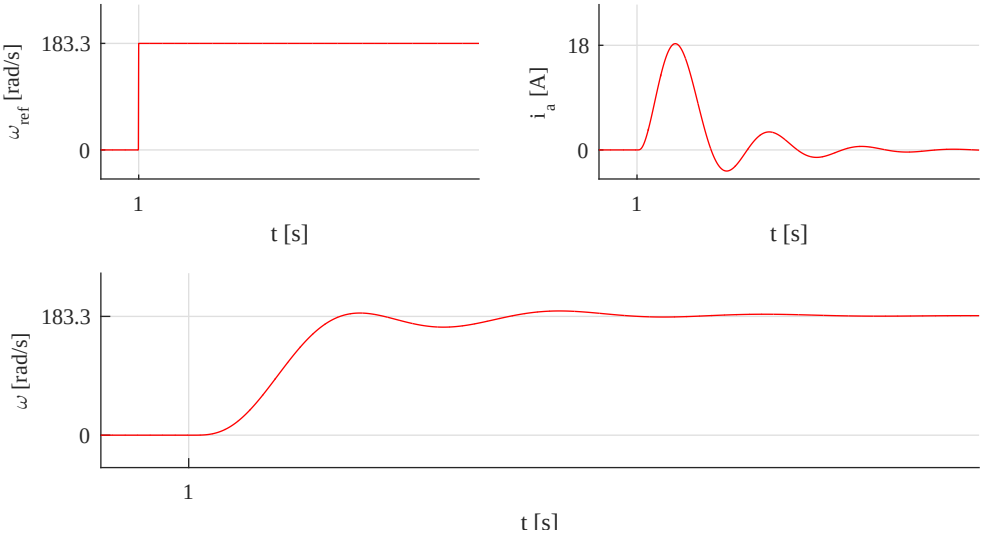
2.5.1 Rezultati simulacije s novim parametrima regulatora brzine vrtnje

Odabir novih parametara regulatora brzine vrtnje je izveden iskustveno empirijskim postupcima, s ciljem dobivanja najboljih mogućih rezultata. Najbolji mogući rezultati podrazumije-

vaju minimalno nadvišenje prilikom zaleta, te što brže vrijeme ustaljivanja brzine vrtnje $t_{\pm 2\%}$. Prilikom parametriranja je bilo neophodno paziti da prilikom odabiranja integralne vremenske konstante onda ne bude manja od sume nedominantnih vremenskih konstanti podređenog regulacijskog kruga (regulacijski krug struje)i da integracijska vremenska konstanta ne bude veća od vremenske konstante regulatra, jer je onda narušen osnovni uvjet stabilnosti sustava, odnosno odziv sustava za takve parametre ima beskonačnu vrijednost.
Novi iznosi vremenskih konstanti regulatora brzine vrtnje su za integralnu $T_{iw} = 200\,\text{ms}$ i za vremensku konstantu regulatora $T_{rw} = 280\,\text{ms}$, te za vremensku konstantu prefiltra regulatora brzine vrtnje $T_{pfso} = 100\,\text{ms}$. Parametri regulatora su odabirani stohastički, promatrajući odzive sustava, pa se prilagođavajući pojedine konstante mijenjao odziv sustava.

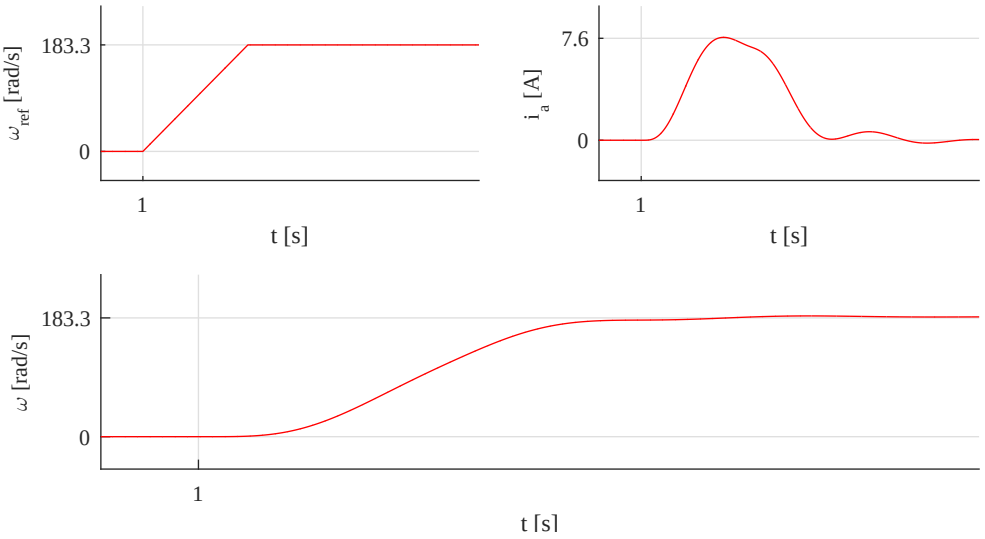
Zalet

Na slici 2.20 su prikazani valni oblici postavljene referentne vrijednosti brzine vrtnje, struje armature, te stvarne brzine vrtnje za skokovitu promjenu referentne veličine.



Sl. 2.20: *Rezultati simulacije zaleta reguliranog istosmjernog motora za skokovitu promjenu referne veličine*

Za skokovitu promjenu referentne veličine struja armature ima skok na oko 18 A, što je oko 1.5 puta više od nazivne brzine vrtnje. Ova vrijednost je rezultat regulacije. Zato se u praksi njčešće motor zalijeće linearnom promjenom ulazne veličine. Kod regulacijskih uređaja, tu funkciju ima generator rampe (eng. *Ramp Function Generator*). Na osnovu referentne i mjerene vrijednosti brzine vrtnje, generator rampe podiže napon brzinom koja je definirana unaprijed, generirajući tako referencu za regulator struje. Na slici 2.21 su rezultati simulacije zaleta motora linearnom promjenom referentne veličine.

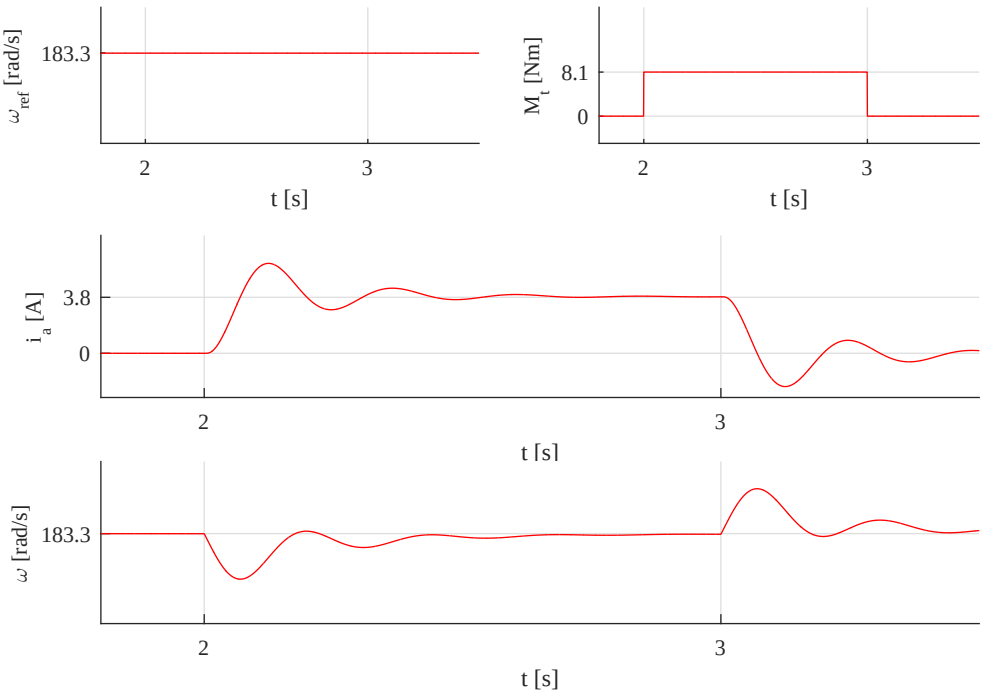


Sl. 2.21: *Rezultati simulacije zaleta reguliranog istosmjernog motora za linearnu promjenu referne veličine*

Za zalet u trajanju od 250 milisekundi linearnom promjenom referentne veličine, struja za vrijeme zaleta postiže tek 7.6 A. Također se može primjetiti utjecaj regulacije.

Terećenje i rasterećenje

Terećenje i rasterećenje je simulirano za trećinu nazivnog opterećenja motor, kako bi se dobivene vrijednosti mogle usporediti sa stvarnim mjerenjima. Na slici 2.22 su prikazani rezultati simualcije skokovitog terećenja i rasterećenja reguliranog nezavisnog istosmjernog motora.

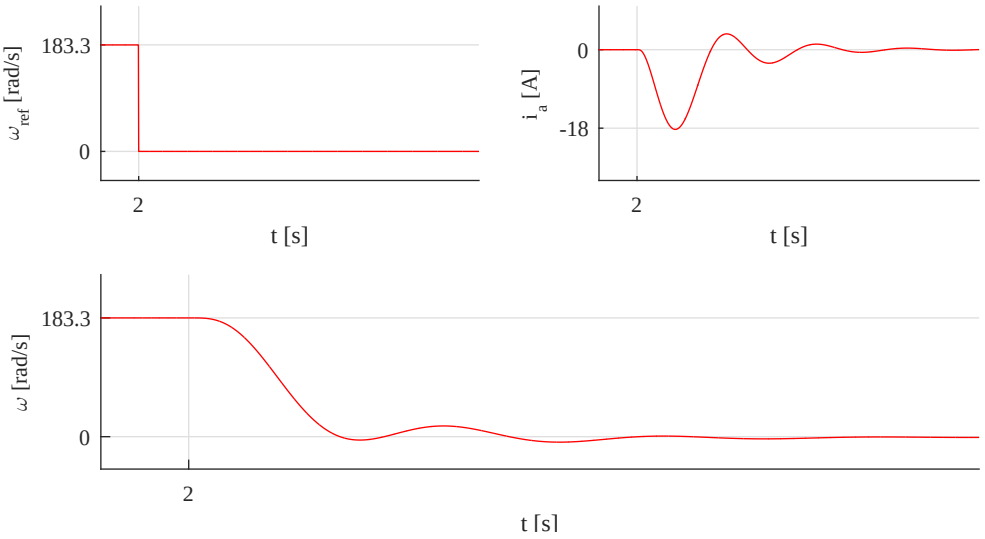


Sl. 2.22: *Rezultati simulacije skokovitog terećenja i rasterećenja reguliranog istosmjernog motora*

U trenutku terećenja $t = 2\,\mathrm{s}$ struja armature skače na oko 4 A. Može se primjetiti da brzina vrtnje ostaje nepromijenjena u stacinarnom stanju. Propad brzine vrtnje u trenutku terećenja iznosi 9%.

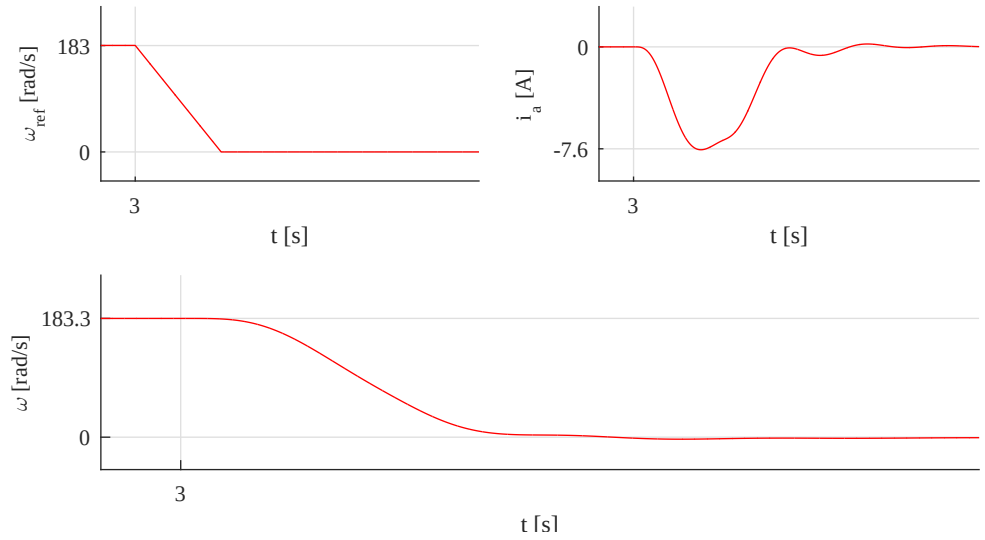
Kočenje

Simulacija protustrujnog skokovitog kočenja je prikazana na slici 2.23.



Sl. 2.23: *Rezultati simulacije kočenja reguliranog istosmjernog motora za skokovitu promjenu referne veličine*

U trenutku skokovitog kočenja $t = 2\,\mathrm{s}$, struja ima skoka na -18 A zbog utjecaja regulatora. Potrebno je kao i kod zaleta kočenje vršiti linearnom promjenom refrentne vrijednosti. Unutar regulacijskih uređaja u bloku generatora rampe se također može namjestiti vrijeme kočenja motora. Na slici 2.24 je prikazano kočenje linearnom promjenom ulazne veličine.

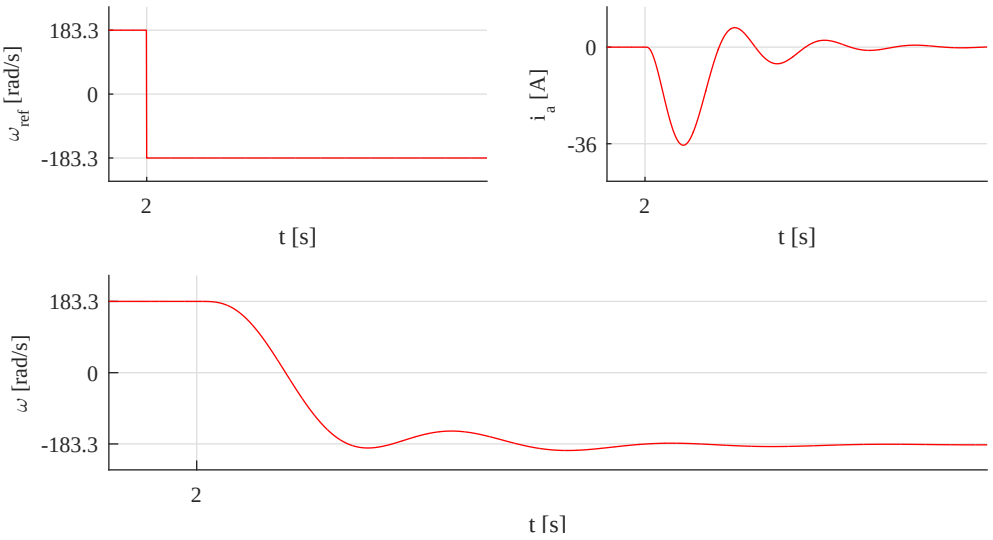


Sl. 2.24: *Rezultati simulacije kočenja reguliranog istosmjernog motora za linearnu promjenu referne veličine*

Prilikom kočenja linearnom promjenom u trajanju od 250 milisekundi, je isti slučaj kao i kod zaleta linearnom promjenom referentne veličine. Struja je ograničena, zbog spore promjene ulazne veličine.

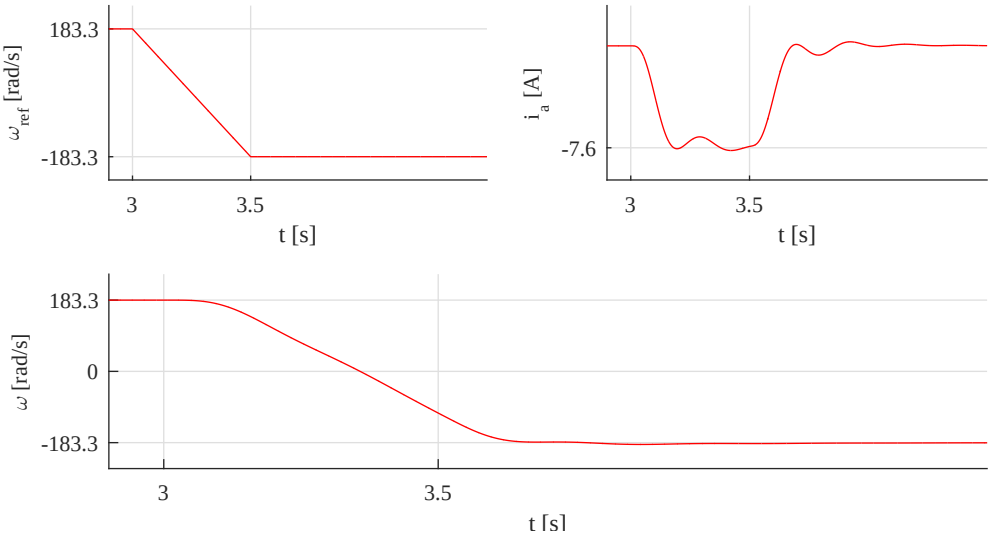
Reverziranje

Pri reverziranju sa skokovitom promjenom referentne vrijednosti, struja poraste na -36 A, što je dokazano u rezultatima simulacije prikazanim na slici 2.25.



Sl. 2.25: *Rezultati simulacije reverziranja reguliranog istosmjernog motora za skokovitu promjenu referne veličine*

Brzom promjenom referentne vrijednosti i uzrokovanjem struje struje iznosa 36 A postoji mogućnost oštećenja namota. Potrebno je linearno reverzirati motor (Slika 2.26).



Sl. 2.26: *Rezultati simulacije reverziranja reguliranog istosmjernog motora za linearnu promjenu referne veličine*

Prilikom linearne promjene referentne veličine, struja je ograničena i konstantna, a namot ostaje neoštećen.

3. REGULACIJSKI UREĐAJ

U ovom poglavlju će biti pisano o funkcionalnosti Siemens Simoreg-a, o njegovim dijelovima i načinu rada pojedinih dijelova. Kako bi se moglo razlučiti što sve Simoreg može, potrebno je proučiti njegov priručnik u literaturi [10]. Simoreg je regulacijski uređaj sastavljen iz više logičkih cjelina. Svaka cjelina ima svoju funkciju, a one se mogu podijeliti kao cjelina za prikupljanje podataka, cjelina za prijenos i obradu podataka zajedno s izvršnim članom, cjelina za analizu i primjenu podataka. Cjelina za prikuplanje podataka sadrži mjerne članove i filtre. Cjelina za prijenos i obradu podataka sadrži digitalnu elektroniku uglavnom za manipuliranje signalima, odnosno pretvorbe digitalnih u analogne i obrnuto, te razne logičke operacije. Cjelina za analizu i primjenu obrađenih podataka se sastoji od raznih regulatora koji uza sebe imaju potrebne filtre za pročišćavanje signala. Kao izvršni član se koristi poluvodički pretvarač, u slučaju Simorega je to tiristorski usmjerivač u trofaznom antiparalelnom mosnom spoju.
U osnovi se Simoreg može podijeliti na tri dijela:

- na mjerne članove,
- digitalnu elektroniku i
- energetsku elektroniku.

Ovo poglavlje je uvod u izvedbu regulacijskih uređaja i sto je sve neophodno za rad jednog regulacijskog uređaja. U sljedećem poglavlju će se dati detaljan prikaz funkcija.

3.1. Mjerni članovi

U ovom potpoglavlju su opisani osnovni principi i funkcionalnost mjernih članova.
Mjerni članovi su mjerni uređaji sa mjerenje promjenjivih veličina reguliranog uređaja. U praksi se za mjerenje brzine vrtnje najčešće tahogenerator koji daje analogni signal brzine vrtnje. Spaja se na osovinu motora. Najuobičajenija izvedba tahogeneratora je istosmjerni tahogenerator. Konstrukcijski je sličan istosmjernom motoru. Funkcionira tako što se namotane zavojnice rotiraju u magnetskom polju koje proizvode permanentni magneti. Ovisno o smjeru rotacije i brzine rotacije se prema tome inducira napon u zavojnicama koji se potom preko komutatora i četkica šalje pretvaraču. Tahogenerator ne zahtijeva napajanje, a signalni kabeli su dva oklopljena vodiča. Prilikom priključivanja tahogeneratora je bitno paziti na polaritet [1].
Vrijednost i polaritet naponskog signala na priključcima tahogeneratora predstavljaju brzinu i smjer rotacije. Veza između brzine i izlaznog napona je linearna. Napon nije ideala zbog ograničenog broja zavoja i komutatorskih lamela. Zbog toga je podložan cikličkim promjenama [1]. Mjera tih promjena je faktor valovitosti. Valovitost signala izmjerene brzine vrtnje može dovesti do oscilacija regulatora brzine vrtnje. To dalje može dovesti, zajedno s unešenim smetnjama, do nestabilnosti odziva. Zbog ovoga se taj signal uglađuje u pretvaraču pomoću niskopropusnih filtara. Oni propuštaju samo određene frekvencije, a sve ostale filtriraju. Amplituda i kašnjenje upravljačke elektronike pretvarača stoga mora biti podešena prema tahogeneratoru [1].
Ako se zahtijeva veća preciznost, onda se preferira digitalno rješenje gdje se signal brzine vrtnje dobije pomoću magnetskog ili optičkog senzora koji generiraju impulse za svaki inkrement kuta položaja (inkrementalni enkoder) [8]. Frekvencija impulsnih signala je jednaka brzini vrtnje motora, dok je suma individualnih impulsa mjera promjene kuta položaja. Kako bi se mogao odrediti smjer vrtnje, enkoder daje dva signala, A i B koji su fazno pomaknuti za 90°. Smjer

rotacije se stoga može odrediti iz slijeda visokih i niskih impulsa A i B signala. Uz A i B signale se dodaje i nul signal koji se emitira jednom po okretu. Što više impulsa po okretu enkoder daje, to će preciznije moći obraditi regulator brzine. Ovo je naročito važno na nižim brzinama vrtnje, gdje broj impulsa enkodera ima veliki utjecaj na koncentrična svojstva pogona [1].
Optički enkoderi imaju signalni disk napravljen od stakla na kojem se nalazi pravilan raspored prozirnih linija. Paralelno ovom disku je maska napravljena od stakla koja ima istu podjelu linija. Iza maske se nalazi fotoelement koji mjeri intenzitet svjetlosti. Ovisno o reltivnoj poziciji signalnog diska u odnosu na masku, svjetlosni intenzitet na fotoelementu se mijenja između minimuma i maksimuma. Ako postoji kretanje između signalnog diska i maske, fotoelement će dati sinusoidalni signal kojeg elektronika enkodera pretvara u pravokutni signal. Svaki period tog signala je ekvivalentan jednoj liniji kretanja. Za generiranje A, B i nul signala, optički enkoder ima više maski i fotoelemenata koji su postavljeni paralelno. Linije na staklenim linijama se stoga mogu primjeniti s vrlo visokom preciznošću. Zbog toga optički enkoderi imaju visok stupanj preciznosti [1].
Druga varijanta, magnetski enkoder, sadrži senzor i signalni disk. Senzor sadrži elemente koji mjere jačinu magnetskog polja na površini signalnog diska i pretvara ju u električni signal. Signalni disk je sastavljen od serije permanentnih magneta sa izmjeničnim magnetiziranjem ili od metalnog elementa s cikličkom promjenom permeabilnosti. Kod enkodera s izmjeničnom magnetizacijom, senzor izravno mjeri jačinu magnetskog polja koje proizvode permanentni magneti signalnog diska. Signalni disk je napravljen od feritnog materijala koji se magnetizira i demagnetizira. Područja magnetizacije se ne mogu smanjivati po želji, pa je zbog toga ostvariva rezolucija ograničena. Enkoderi promjenjive permeabilnosti imaju površinu s cikličkom promjenom izbočina i ureza. Zbog ovoga se pojavljuje ciklička promjena zračnog raspora, što rezultira cikličkom promjenom magnetskog otpora. Ako je signalni disk izložen magnetskom polju, stvara se karakteristična distribucija gustoće magnetskog toka na površini signalnog diska. Signalni disk s promjenjivom permeabilnošću se može proizvoditi s raznim stupnjevima preciznosti. Najjednostavnija primjena je korištenje zubastih diskova kao nosaša informacija, a zahtjevnije primjene koriste čelične trake sa urezanom površinom. Preciznost magnetskih enkodera je manja nego optičkih. Uobičajeno su jeftinij i robusniji [1].
Za mjerenje struje, Simoreg ima unutarnje strujne mjerne transormatore kojim mjeri stvarnu struju. Strujni mjerni transformatori se koriste za transformaciju mjerene struje u stalnom omjeru i što manjem faznom pomaku na instrumentima mjerljivu razinu. Nazivni omjer transformacije se definira kao omjer nazivne primarne struje i nazivne sekundarne struje, odnosno kao omjer broja zavoja sekundarnog namota i broja zavoja primarnog namota [11]:

$$K_n = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1}. \tag{3-1}$$

Strujni mjerni transformati su u radu približno jednakih karakteristika kao idealni kod kojih su amperzavoji primara jednaki amperzavojima sekundara. Ovakav rad nije u potpunosti moguće postići, zato što je za protjecanje sekundarne struje potreban napon induciran na sekundaru koji služi za pokrivanje pada napona u sekundarnom namotu i mjerne opreme. Budući da je za induciranje tog napona potreban određen dio amperzavoja na primaru, koji nije kompenziran amperzavojima na sekundaru, taj dio amperzavoja služi za magnetiziranje jezgre transformatora i izravan je uzrok strujne i fazne pogreške strujnih mjernih transformatora [12]. Kako bi se smanjila pogreška, potrebno je smanjiti struju magnetiziranja. To se kod strujnih mjernih transformatora realizira na način da se upotrebljavaju jezgre s visokom magnetskom permeabilnošću, te s niskom magnetskom indukcijom. Relativna strujna pogreška strujnih mjernih transformatora se računa prema [11]:

$$p_i = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} 100\%. \tag{3-2}$$

Otpor priključenog tereta nebi smio prelaziti određenu nisku vrijednost. Teret se modelira kao prividna imedancija koja se priključuje na sekundar s pripadajućim faktorom $\cos\varphi$ [11].

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \tag{3-3}$$

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X^2}{R^2}}} \tag{3-4}$$

Osim modela kao privine impedancije, može se prikazati i pomoću prividne snage s impedancijom priključenom na sekundarne stezaljke pri nazivnoj struji sekundara s faktorom snage $cos\varphi$:

$$S = I_{2n}^2 Z. \tag{3-5}$$

Ako su strujnom mjernom transformatoru kratko spojene sekundarne stezaljke onda je impedancija tereta jednaka nuli. Nazivna snaga tereta se iskazuje u VA, te se određuje pomoću nazivne impedancije i nazivne struje sekundara:

$$S_n = I_{2n}^2 Z_n. \tag{3-6}$$

Fazna razlika između fazora primarne i sekundarne stuje predstavlja pogrešku δ_i, te je ona pozitivna ako fazor sekundarne struje prethodi fazoru primarne struje [11].
Strujni mjerni transformatori su uobičajeno razvrstani po razinama točnosti prema IEC normama u šest klasa: 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3 i 5. Oznaka klase točnosti predstavlja predstavlja apsolutnu granicu strujne pogreške u postotcima pri nazivnom teretu i 120% nazivne struje primara [12].

Filtri

Budući da stabilnost sustava ovisi o mjerenim veličinama, potrebno je koristiti filtre koji kompenziraju djelovanje smetnji u mjernom signalu. Smetnje se mogu unijeti u sustav na različite načine. Na taj način se osigurava kvalitetan signal koji ne unosi smetnje u sustav. Zbog toga se na ulazu u pretvarač, mjerni signali filtriraju pomoću filtara. Svaki regulator ima svoj filtar koji dodatno sprječava unošenje smetnje u sustav. Filtar u grani refenetne vrijednosti regulatora se koristi za kompenziranje kašnjenja mjenih članova. Odabir filtra ovisi o vrsti djelovanja koje se filtrira. U potpoglavlju 2.5 je obrađen način odabira filtra.

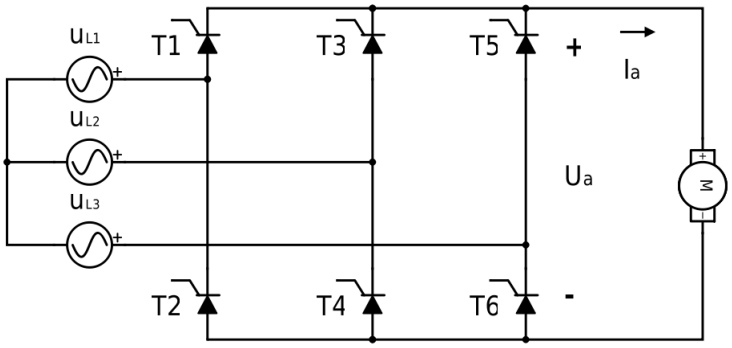
3.2. Digitalna elektronika

Od digitalne elektronike, unutar Simorega se nalaze članovi za pretvorbu digitalnih u analogne signale i obrnuto, članovi za ograničavanje naponske razine dovedenih digitalnih signala (naponsko djelilo), članovi za davanje apsolutne vrijednosti signala, za invertiranje signala, za kašnjenje signala, za množenje signala, članove za uspoređivanje, pojačala, te ostali članovi koji služe za međusobnu komunikaciju pojedinih dijelova pretvarača. Ovaj dio neće biti detaljnije opisivan zato što to nije dio područja struke unutar koje je sadržan ovaj diplomski rad.

3.3. Energetska elektronika

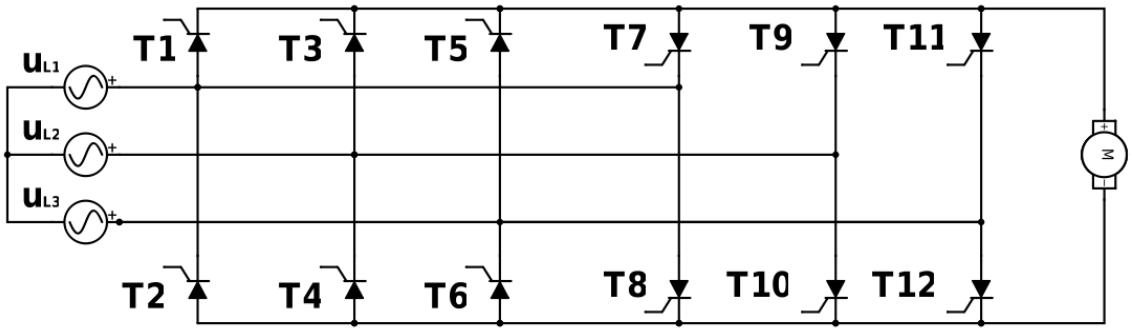
Kako bi se moglo upravljati pogonima promjenjive brzine vrtnje, potrebno je postaviti pretvarač između motora i njegovog napajanja [1]. Pretvarači koji se mogu koristiti za upravljanje istosmjernim motorima su: ispravljači (ac/dc pretvarači) i istosmjerni pretvrači (dc/dc pretvarači). Ispravljači se dijele na poluvalne, punovalne poluupravljive, punovalne punoupravljive i dualne

pretvarače. Ovisno o potrebnoj snazi mogu biti jednofazni ili trofazni. Istosmjerni pretvarači se dijele na jedno-, dvo- i četverokvadrante pretvarače. Ispravljač je sastavljen od tiristora u mosnom spoju koji se u jednofaznom sustavu sastoji od 4 tiristora, a u trofaznom sustavu od 6. Jedan trofazni tiristorski ispravljač u mosnom spoju je prikaza na slici 3.1.



Sl. 3.1: *BC6 spoj tiristora*

Jedna grana mosta se sastoji od 2 tiristora između kojih se dovodi faza. Budući da tiristori mogu provoditi struju u samo jednom smjeru, mosni spoj se može podijeliti na dva polumosta. Da bi tiristori proveli struju, moraju dobiti okidni signal na *Gate*. Red dovođenja okidnih signala se odabire tako da aktiviranjem jednog tiristora u polumostu isključuje tiristor koji je bio prethodno aktivan u istom polumostu [1]. Ovakav način uključivanja tiristora ovisi o tome je li potencijal na anodi tiristora, kojeg je potrebno okinuti, u trenutku okidanja veći od potencijala na anodi tiristora kojeg je potrebno isključiti. Ako je tiristor okinut, tok struje kroz prethodno aktivan tiristor se prekida, te struja protiče kroz okinuti tiristor.
Potencijal na anodama tiristora je određen periodičkim signalom napona pojedine faze. Stoga, trenutak okidanja tiristora mora biti sinkroniziran s valnim oblicima ostalih faznih napona. Sinkronizacija se odvija pomoću upravljačke signalne elektronike [1].
Srednja vrijednost napona armature koji proizvodi tiristorski most se može prilagođavati mijenjanjem trenutka okidanja tiristora. Varijabla koja se koristi u tu svrhu se naziva okidni kut kašnjenja α [1]. Mjeri se u stupnjevima, te se može postaviti u dometu od 0° do 180°.
Okidni kut kašnjenja definira kašnjenje okidnog signala u odnosu na trenutak kada potencijal ima najpovoljniju vrijednost za okidanje signala. Napon armature ima najveću vrijednost kada je okidni kut kašnjenja postavljen na 0°. Ako bi se tiristor okinuo s kutem kašnjenja 180° ili više, fazni vodiči bi onda bili kratko spojeni. To je nepoželjno stanje tiristorskog mosta, te se ono mora izbjegavati. U praksi se okidni kut kašnjenja ograničava na 150° [1]. Tiristorski most može provoditi struju u samo jednom smjeru, pa se može zaključiti da se moment može ostvariti u samo jednu stranu. Ovo se može vidjeti i iz jednadžbe (2-10). Ako je struja pozitivna, onda je i ostvareni moment pozitivan. Stoga je moguć rad samo u prvom i četvrtom kvadrantu, što se vidi na slici 2.3.
Pretvarači mogu raditi u motorskom i generatorskom režimu, te mogu tako vraćati energiju u mrežu. Ovo je izrazita prednost ispravljača u odnosu na frekvencijske pretvarače, zato što su frekvencijski pretvarači daleko kompleksniji od ispravljača [1]. Nedostatak ovakvog pretvarača prikazanog na slici 3.1 je ne mogućnost kočenja primjenom negativnog momenta. Ovaj problem se može riješiti dodavanjem još jednog tiristorskog mosta u antiparaleli postojećem. Ovakav pretvarač je prikazan na slici 3.2.

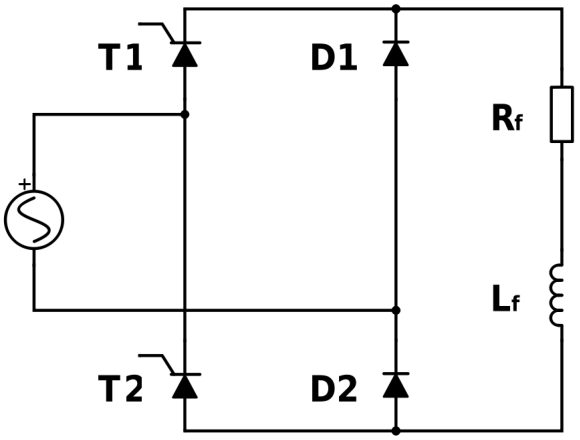


Sl. 3.2: *BC6 spoj tiristora u antiparaleli*

Jedan tiristorski most omogućava smjer struje u pozitivnom smjeru, a drugi u negativnom smjeru. Oba mosta nesmiju biti uključena istovremeno zato što bi to dovelo do kratkog spoja. Kada se struja želi reverzirati, signalna elektronika prilagođava okidni kut kašjenja α aktivnog mosta tako da zaustavi tok struje i_a u njemu. Nakon kratkog sigurnosnog intervala (takozvani $torque - free$ interval) [1], signalna elektronika šalje okidne signale na prethodno ne aktivan tiristorski most. Struja tada poteče u suprotnom smjeru, te primjerice ako bi motor bio zaletit u prvom kvadrantu, onda bi nakon ovih radnji motor prešao u drugi kvadrant i počeo kočiti.

Pretvarač za uzbudni krug

Prethodno opisan ispravljač se koristi u armaturnom krugu. Za uzbudni krug se koristi jednofazni poluupravljivi mosni ispravljač. Sastavljen je od tiristorske i diodne grane. Takav ispravljač se koristi u pretvaraču Simoreg, te je prikazan na slici 3.3.



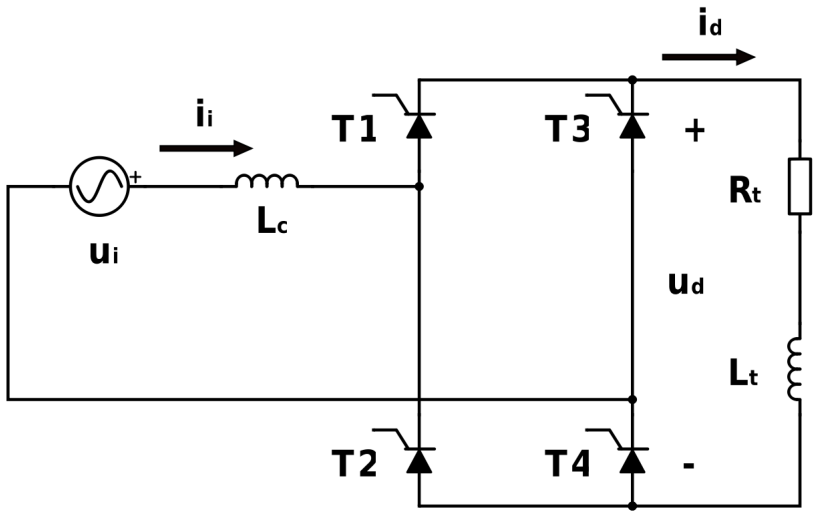
Sl. 3.3: *Ispravljač B2HZ za uzbudni krug*

Načini rada punoupravljivog mosnog ispravljača

U literaturi [3] i [5] je matematički objašnjen način rada ispravljača. Zbog jednostavnosti opisa, bit će obrađen samo dvopulsni tiristorski ispravljač u mosnom spoju prikazanog na slici

3.4, gdje su U_i i I_i napon i struja napajanja, L_c komutacijski induktivitet, $T1 - T4$ tiristori. Pretpostavke za pojednostavljenje opisa rada su sljedeće [3]:

- izmjenični izvor napajanja ima samo jednu frekvenciju,
- izlazna struja i_d je konstantna,
- tiristori imaju beskonačnu impedanciju kada im se obnuto narine napon (pozitivni potencijal na katodu) ili kada na *Gate* nije doveden okidni signal da tiristor provede struju,
- i kada provodi struju, pad napona na tiristoru je zanemarivo mal.



Sl. 3.4: *Dvopulsni tiristorski ispravljač*

Rad tiristorskog pretvarača se može opisati za 4 načina rada, a to su rad bez okidnog kašnjenja i bez komutacijskog induktiviteta, rad bez okidnog kašnjenja s komutacijskim induktivitetom, rad s okidnim kašnjenjem bez komutacijskog induktiviteta i rad s okidnim kašnjenjem s komutacijskim induktivitetom.

Uvjet rada: $\alpha = 0$, $L_c = 0$

Rad ispravljača pri konstantnoj struji i_d, $L_c = 0$ i bez okidnog kašnjenja ima iste karakteristike kao i diodni mosni ispravljač. Kako bi se mogla napraviti analiza, pretpostavit će se da je napon napajanja opisan na sljedeći način:

$$u_i = \sqrt{2}U\cos(\omega t + \varphi) = \sqrt{2}U\cos\xi \tag{3-7}$$

gdje je ω kružna frekvencija napajanja, a φ fazni pomak.
Za interval $-\frac{\pi}{2} \leq \xi \leq \frac{\pi}{2}$ vrijedi [3]:

$$u_d = u_i. \tag{3-8}$$

gdje je u_d valni oblik ispravljenog napona. Kako bi se odredila srednja vrijednost napona u_d u stacionarnom stanju, potrebno je izračunati sljedeći integral:

$$U_d = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} u_d \mathrm{d}\xi \tag{3-9}$$

Korištenjem jednadžbi (3-7), (3-9) i (3-8), se rješavanjem integrala (3-9) može odrediti srednja vrijednost izlaznog napona za interval $-\frac{\pi}{2} \leq \xi \leq \frac{\pi}{2}$:

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} U\sqrt{2}\cos\xi \mathrm{d}\xi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \tag{3-10}$$

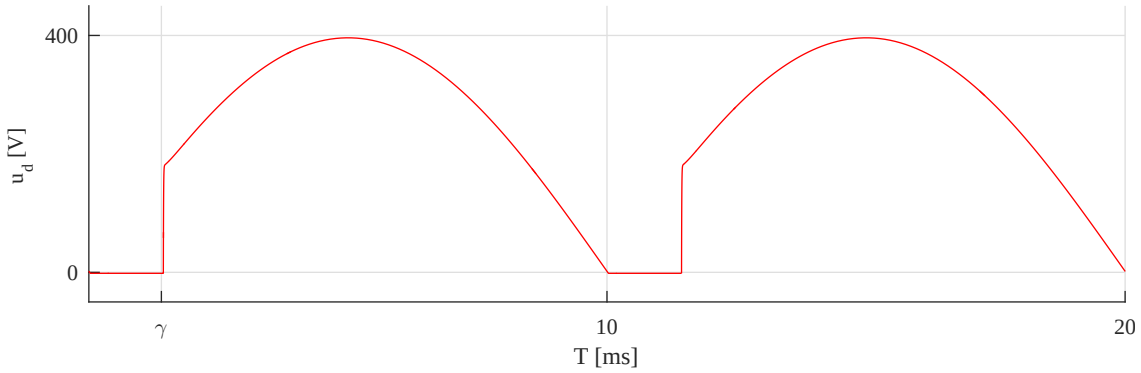
gdje je U efektivna vrijednost napona napajanja, a U_{d0} srednja vrijednost izlaznog napona bez okidnog kuta kašnjenja i komutacijske zavojnice.

Uvjet rada: $\alpha = 0$, $L_c > 0$

U slučaju rada s komutacijskim induktivitetom, nije moguća trenutna komutacija, odnosno proces prebacivanja struja iz jednog tiristora u drugi, bilo da se radi o gornjoj ili donjoj grani. Za vrijeme komutacije, napajanje je istovremeno kratkospojeno kroz tiristore $T1$ i $T3$ i kroz $T2$ i $T4$. Razmatrajući komutaciju sa $T1$ na $T3$ i $T2$ na $T4$, uz pretpostavku da je u trenutku komutacije struja kroz $T3$ pozitivna, vrijedi [3]:

$$u_i = L_c \frac{\mathrm{d}i_3}{\mathrm{d}t} \tag{3-11}$$

gdje je i_3 struja koja protječe kroz tiristor $T3$. Za ovakav način rada se dobije valni oblik ispravljenog napona prikazan na slici 3.5.



Sl. 3.5: *Valni oblik napona pri* $\alpha = 0$ *i* $L_c > 0$

Uvrsti li se (3-7) u (3-11) i riješi integral za struju i_3, dobije se:

$$i_3 = -\frac{1}{L_c} \int U\sqrt{2}\cos\xi \mathrm{d}t = -\frac{U\sqrt{2}}{\omega L_c}\sin\xi + A. \tag{3-12}$$

Pri $\xi = \frac{\pi}{2}$, $i_3 = 0$, pa se može izračunati A (konstanta općeg rješenja diferencijalne jednadžbe):

$$A = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L_c} \tag{3-13}$$

pa slijedi

$$i_3 = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L_c}(1 - \sin\xi). \tag{3-14}$$

Na kraju komutacije u trenutku $\xi = \frac{\pi}{2} + \gamma$, je $i_3 = I_d$ [3], pa vrijedi:

$$I_d = \frac{U\sqrt{2}}{\omega L_c}(1 - \cos\gamma) \tag{3-15}$$

gdje je γ komutacijski kut. Promatranjem (3-10) se vidi da bez komutacijskog induktiviteta, U_{d0} je izlazna srednja vrijednost izlaznog napona ispravljača. S komutacijskim induktivitetom L_c, taj napon je za vrijeme komutacije jednak nuli. Stoga se srednja vrijednost izlaznog napona smanjuje zbog komutacije, pa se ona može odrediti pomoću:

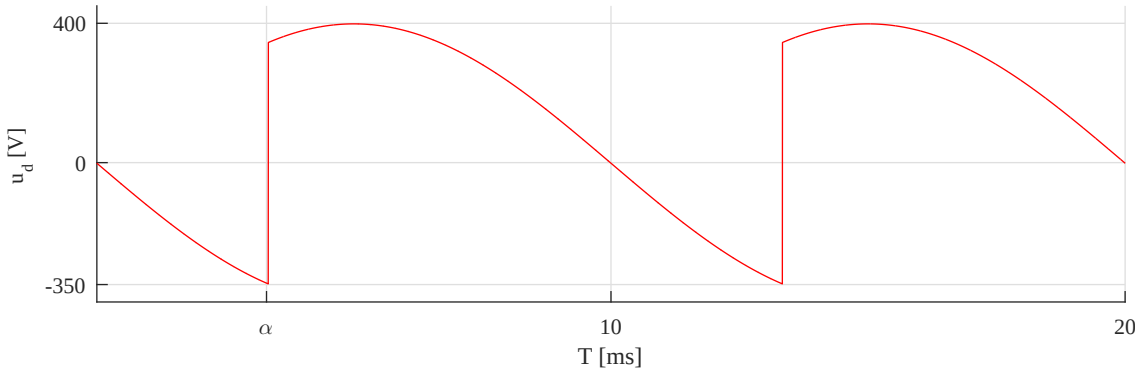
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\gamma}^{\frac{\pi}{2}} U\sqrt{2}\cos\xi \mathrm{d}\xi = \frac{U_{d0}}{2}(1 + \cos\gamma). \tag{3-16}$$

Ako se iz (3-15) izluči $\cos\gamma$ i uvrsti u rješenje integrala (3-16), srednja vrijednost izlaznog napona ispravljača postaje:

$$U_d = U_{d0} - \frac{\omega L_c}{\pi} I_d. \tag{3-17}$$

Uvjet rada: $\alpha > 0$, $L_c = 0$

Ako se na *Gate* tiristora okidni signal dovede s kutnim kašnjenjem, bez komutacijskog induktiviteta se dobije valni oblik izlaznog napona prikazan na slici 3.6.

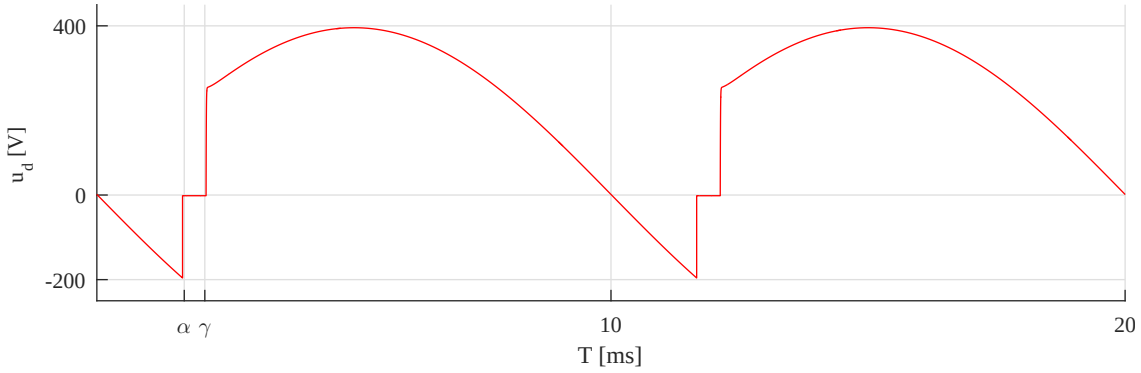


Sl. 3.6: *Valni oblik napona pri* $\alpha = 60°$ *i* $L_c = 0$

Stoga se može odrediti srednja vrijednost izlaznog napona prema [3]:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} U\sqrt{2}\cos\xi \mathrm{d}\xi = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U\cos\alpha = U_{d0}\cos\alpha \tag{3-18}$$

gdje je α okidni kut kašnjenja. Ako se struja drži konstantnom, srednja vrijednost napona će postati negativna $\alpha > 90°$. Ovo se naziva izmjenjivački režim, gdje se srednja snaga iz istosmjernog dijela kruga vraća u izmjenični dio.



Sl. 3.7: *Valni oblik napona pri* $\alpha = 30°$ *i* $L_c > 0$

Uvjet rada: $\alpha > 0$, $L_c > 0$

Rad ispravljača s komutacijskim induktivitetom i okidnim kutem kašnjejna je prikazan na slici 3.7.

Koristenjem granica $-\frac{\pi}{2} + \gamma \leq \xi \leq \frac{\pi}{2} + \alpha$ po uzoru na (3-11) do (3-16), za $i_3 = 0$ vrijedi:

$$A = \frac{2\sqrt{2}}{\omega L_c} U \cos\alpha. \tag{3-19}$$

Komutacija završava u trenutku $\xi = \frac{\pi}{2} + \alpha + \gamma$, pa za $I_d = i_3$ vrijedi:

$$I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\omega L_c} U[\cos\alpha - \cos\xi]. \tag{3-20}$$

Prema jednadžbi (3-18) se dobije:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\alpha+\gamma}^{\frac{\pi}{2}} U\sqrt{2}\cos\xi \mathrm{d}\xi = \frac{U_{d0}}{2}[\cos\alpha + \cos(\alpha+\gamma)]. \tag{3-21}$$

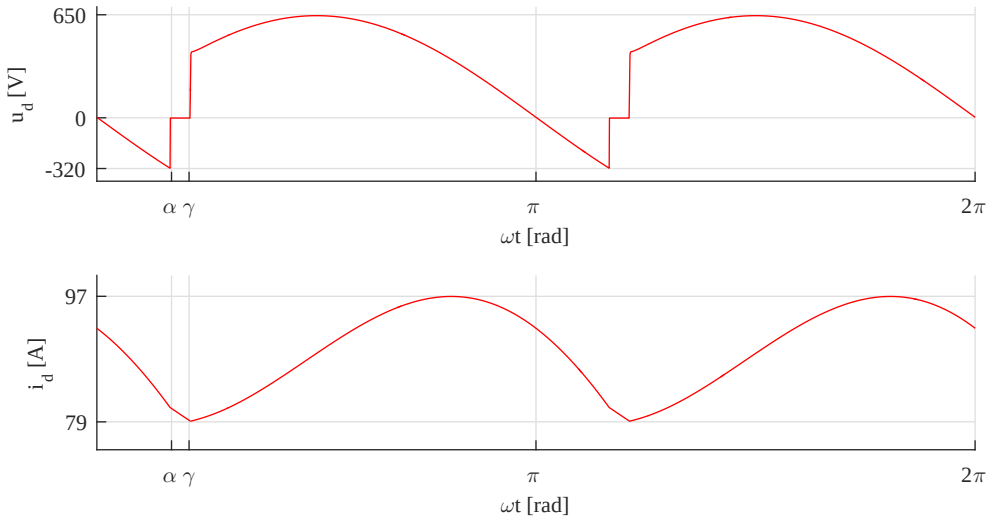
Izlučivanjem $\cos(\alpha + \gamma)$ iz (3-20) i uvrštavanjem u (3-21) se dobije izraz za srednju vrijednost izlaznog napona ispravljača za način rada s okidnim kutem kašnjenja i s komutacijskim induktivitetom.

$$U_d = U_{d0}\cos\alpha - \frac{\omega L_c}{\pi} I_d. \tag{3-22}$$

Način rada s kontinuiranom strujom

U prethodnom paragrafu so objašnjeni načini rada s raznim kombinacijama komutacjiskog induktiviteta i okidnog kuta kašnjenja. Valni oblik napona sastoji od istosmjerne komponente i superponirane pulsirajuće komponente ili valovitosti koja je nazvana izmjeničnom komponentom. Ako je nazivna frekvencija napajanja kojim se napaja ispravljač 50 Hz, onda bi u slučaju dvopulsnog ispravljača, frekvencija izmjenične komponente bila 100 Hz. Za trofazni šesteropulsni ispravljač frekvencija izmjenične komponente će iznositi 300 Hz. Istosmjerna kompnenta napona koji izlazi iz ispravljača može mijenjati okidnim kutem kašnjenja, koji isto tako utječe i na izmjeničnu komponentu. Izmjenična komponenta napona uzrokuje valovitost struje

koja teče armaturnim namotom, ali je ona ublažena zbog induktiviteta armaturnog namota. Ovaj efekt uglađivanja valovitosti je prikazan na slici (3.8), na kojoj se vidi da je valovitost struje primjetljivo manja od valovitosti napona.



Sl. 3.8: *Valni oblik napona i kontinuirane struje pri* $\alpha = 30°$ *i* $L_c > 0$

Zbog lakšeg shvaćanja rada pretvarača u načinu rada s kontinuiranom i diskontinuiranom strujom u sljedećem poglavlju, ovaj dio će biti objašnjen na istosmjernom motoru.
Srednja vrijednost izmjenične komponente valnog oblika struje je jednaka nuli, pa ona nema nikakvog utjecaja na moment. Ipak postoji mala promjena momenta svakog polu-ciklusa, ali je ona male amplitude i visoke frekvencije, pa je njen utjecaj na brzinu vrtnje, odnosno na inducinrani napon, neprimjetan [5]. Budući da je struja na kraju svakog impulsa ista kao i na početku, slijedi da je pad napona na induktivitetu armature jednak nuli. Stoga se srednja vrijednost ispravljenog napona, koja ima isti učinak kao i ona sa istosmjernog napajanja, narinutog na armaturu istosmjernog motora, može računati pomoću elektromotorne sile i srednje vrijednosti pada napona na otporu armature:

$$U_d = E + I_d R_a \tag{3-23}$$

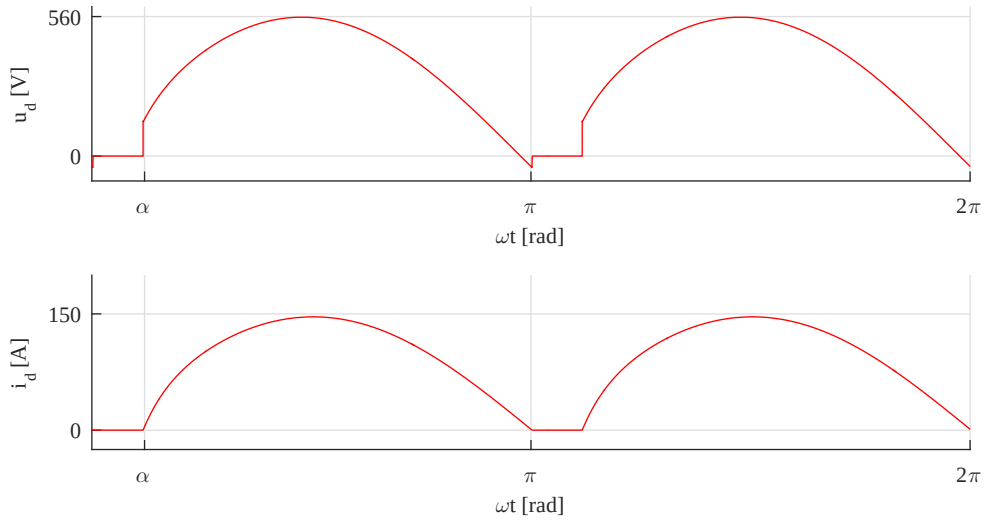
Ako se u prethodnu jednadžbu uvrste izrazi (3-22) i (2-17) uz konstantan tok uzbude, te izvede brzina iz izraza, dobije se:

$$\omega = \frac{U_{d0}}{k_{e\Phi}} \cos\alpha - \frac{I_d}{k_{e\Phi}} (R_a + \frac{\omega_m}{\pi} L_c) \tag{3-24}$$

gdje je ω_m kružna frekvencija napajanja. Iz prethodno dobivenog izraza se može primjetit da se upravljanje brzinom vrtnje istosmjernog motora sada može vršiti pomoću okidnog kuta kašnjenja α.
Valni oblik struje na slici 3.8 se naziva kontinuiranom strujom, zato što nema trenutka kada struja ne teče. Kontinuirana struja je poželjna kod istosmjernih motora, zato što pod tim uvjetom srednja vrijednost napona ovisi samo o okidnom kutu kašnjenja i neovisna je o struji koju uzrokuje teret [5].

Način rada s diskontinuiranom strujom

Na slici 3.8 je valni oblik struje prikazan za opterećen motor, ali kako se motor rastereće, ta će struja padati. Postoji trenutak kada izmjenična komponenta struje biti jednaka nuli, odnosno kada struja dolazi na granicu kontinuiranosti i diskontinuiranosti. Opterećenost motora pri kojoj se ovo događa ovisi i o induktivitetu armaturnog namota, zato što će veći induktivitet dati veću uglađenost struje. Stoga je način rada s diskontinuiranom strujom vrlo vjerojatan kod manjih strojeva s manjim induktivitetom, te kada je motor ne opterećen [5]. Na slici 3.9 su prikazani valni oblici napona i struje za način rada s diskontinuiranom strujom.



Sl. 3.9: *Valni oblik napona i diskontinuirane struje pri* $\alpha = 30°$ *i* $L_c > 0$

Valni oblik struje se može dobiti, ako se zanemari otpor, iz jednadžbe (2-16):

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L}(u - e) \tag{3-25}$$

iz čega se vidi da je brzina promjene struje određena trenutnom razlikom narinutog napona i induciranog napona. Stoga se može zaljučiti da struja raste dokle god vrijedi $u > e$, a opada kada je $u < e$.
Najbitnija razlika između rada s kontinuiranom i diskontinuiranom strujom je da je srednja vrijednost napona pri radu s diskontinuiranom strujom veća nego li ona pri radu s kontinuiranom strujom. Pri radu s kontinuiranom strujom, povećanje tereta će rezultirati povećanjem struje, ali će napon ostati nepromijenjen, dok to nije slučaj kod rada s diskontinuiranom strujom. Jedini način da srednja vrijednost struje poraste je da brzina, odnosno inducirani napon opadne. Zbog ovoga je rad motora pri diskontinuirnoj struji nepoželjan, zato što porastom tereta, dolazi do velikog opadanja brzine [5].

Šesteropulsni tiristorski ispravljač

U ovom paragrafu će biti samo prikazani valni oblici struje i napona na izlazu šeteropuslnog tiristorskog ispravljača u svrhu lakše analize mjerenih veličina koje će biti obrađene u sljedećem

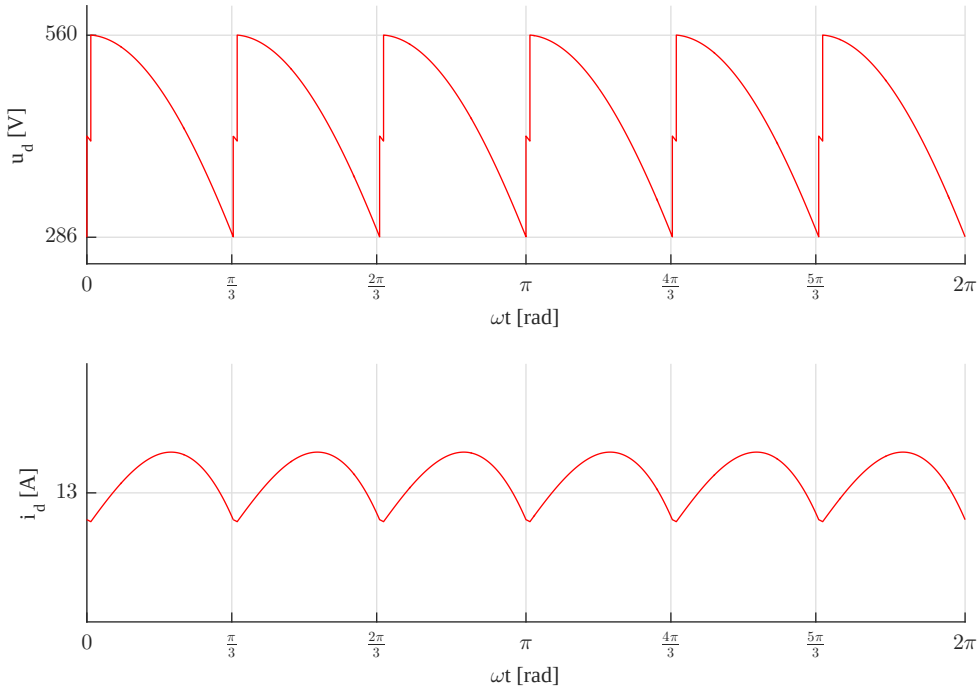
poglavlju. Neka su trenutne vrijednosti napona pojedine faze zadane:

$$u_{L1} = 230\sqrt{2}\cos\xi \tag{3-26}$$

$$u_{L2} = 230\sqrt{2}\cos(\xi - \frac{2\pi}{3}) \tag{3-27}$$

$$u_{L3} = 230\sqrt{2}\cos(\xi + \frac{2\pi}{3}). \tag{3-28}$$

Na svaku je fazu dodana komutacijska prigušnica induktiviteta $L = 1.05\text{mH}$, te je na izlaz pretvarača priključen RL član otpora $R = 3.8\Omega$ i induktiviteta $L = 72.8\text{mH}$ i s obrnutim polaritetom priključen istosmjerni izvor napajanja napona $E = 410\text{V}$. RL član sa ovim podatcima predstavlja armaturu istosmjernog motora, a istosmjerni izvor napajanja prestavlja inducirani napon. Istosmjerni motor je nazivno opterećen. Na slici 3.10 su prikazani valni oblici napona i struje kojima se napaja ovaj istosmjerni motor.



Sl. 3.10: *Valni oblik napona i struje pri* $\alpha = 30°$ *i* $L_c = 1.05\text{mH}$

4. IZVEDBA ISTOSMJERNOG LABORATORIJSKOG POGONA

4.1. Mjerni postav

Istosmjerni pogon u Laboratoriju za električne strojeve i pogone na fakultetu sadrži sljedeće dijelove:

- objekt regulacije - istosmjerni motor
- mjerni član brzine vrtnje - tahogenerator
- regulacijski uređaj - Siemens Simoreg DC - Master zajedno sa svom zaštitnom opremom
- teret - sinkroni generator na čije stezaljke armature su spojena 4 stupnja otpornika za terećnje u spoju zvijezda.

Osim ovih dijelova za prikupljanje mjernih podataka je korišten *data aqusition* proizvođača IOtech.
Upravljački ormar u sklopu kojeg se nalazi regulacijski uređaj Simoreg se priključuje izoliranim žicama presjeka 4mm^2 na trofazno napajanje s nulom i uzemljenjem preko rednih stezaljki. Odatle se dalje razvodi napajanje do ispravljača za armaturni krug preko rastalnih osigurača 20 A, gS karakteristike, zatim preko energetskih kontakata sklopnika, iza kojih su prije ulaza u Simoreg postavljene komutacijske prigušnice induktiviteta $L = 1.05\text{mH}$. Sa izlaza sklopnika su uzete prva i treća faza, te preko rastalnih osigurača 16 A, gG karakteristike na ispravljač za napajanje uzbude. Napajanje upravljačke elektronike unutar Simoreg-a je izvedeno priključkom na fazu i nulu preko automatskih prekidača. Na izlazu ispravljača za armaturni krugi, postavljen je rastalni osigurač 16 A, karakteristike gG za zaštitu armature motora na koji se priključuje. Također su izvedeni kontakti za priključak tahogeneratora na redne stezaljke. Napajanje zavojnica je izvedeno preko na upravljačkom naponu 230 V AC preko releja za kašnjenje i automatskog prekidača, te se one uključuju preko pomoćnih upravljačkih releja. Izdvojen je trofazni izlaz na redne stezaljke preko motorne zaštitne sklopke i energetskih kontakata sklopnika. I na kraju je na trofazno napajanje spojen ispravljač preko automatskih prekidača, čiji izlaz 24 V DC i M služe kao sabirnica za upravljački dio. Na 24 V DC sabirnicu je spojena zavojnica releja za kašnjenje, te njegov kontrolni kontakt preko pomoćnog kontakta upravljačkog releja. Također je 24 V DC spojena zaštitna gljiva, koja uključuje zavojnicu upravljačkog releja. Svrha pojedinih terminala Simorega će biti detaljno opisana u narednom potpotpoglavlju posvećenom regulacijskom uređaju.

4.1.1 Istosmjerni motor

Izvedba istosmjernog motora je s nezavisnom uzbudom, koji je mehanički spojen sa sinkronim generatorom, te je na njega postavljen tahogenerator. Snaga motora je 4.95 kW, armaturni nazivni napon 460 V i nazivna struja 13 A, a uzbudni nazivni napon 180 V i nazivna struja 1.2 A. Na armaturni namot je spojen izlaz iz Simoreg-a, točnije kontakti Simoreg-a 1C1 i 1D1, s tim da je 1C1 spojen preko prethodno opisanog rastalnog osigurača. Na uzbuni namot je doveden izlaz B2HZ ispravljača iz Simoreg-a, čija je shema prikazana na 3.3.

4.1.2 Mjerni član brzine vrtnje

Mjerni član brzine vrtnje, koji je postavljen na istosmjerni motor, je tahogenerator sa prijenosnim omjerom $\frac{30\text{V}}{1000\text{min}^{-1}}$. Bitna stvar kod ovoga ispravljača je da daje samo apsolutnu

vrijednost, što će se u narednom potpoglavlju primjetit na mjerenju reverziranja.

4.1.3 Regulacijski uređaj

Kao regulacijski uređaj se koristi Siemens, model Simoreg DC-Master, tip 6RA7013-6DV62-0-Z, koji je opisan u prethodnom poglavlju i čiji su podatci dani u prilogu. Iz uputa u priručniku [10] se može saznati što ovaj regulacijski uređaj sadrži. Kao aktuator na armaturni krug koristi šesteropulsni tiristorki ispravljač u antiparaleli (Slika 3.2) sastavljen od 6 tiristorskih modula. Može vršti regulaciju digitalno u sva 4 kvadranta. Za uzbudni krug koristi poluupravljivi ispravljač s jednom tiristorskom i jednom diodnom granom (Slika3.3). Nazivne struje izlazne struje su u rasponu $\geq 14,5... < 16,5$. Ima prirodno zračno hlađenje, te mu je radna temperatura 45°C. Također ima mogućnost upravljanja uzbudom. Osim ovih specifikacija, može se nadograditi dodatna oprema. Standardi koji su primjenjivi na ovom pretvaraču su:

- VDE 0106-100
- EN 50178
- EN60146 T1-1 / VDE 0558 T11
- DIN EN50178 / VDE 0160
- EN61800-3
- DIN IEC 60068-2-6 do koeficijenta štetnosti 12 (SN29010 dio 1)
- UL 508 C

Za napajanje signalne elektronike, ima ulaze na rednoj stezaljci oznake -XP, na kojoj preko kratkospojenih terminala 5W1 i 5U1 se dovodi 230 V AC, a na terminal 5N1 se dovodi nula. Simoreg se također može spojiti na osobno računalo putem serijskih standarda za komunikaciju RS232 ili RS485. Na računalu se u softveru Drive Monitor može u potpunosti parametrirati. Parametriranje Siemens Simoreg DC-Mastera je opisano u prilogu unutar uputa za korištenje. Osim mogućnosti spajanja na računalo, može se spojiti i na PLC. Simoreg ima 8 binarnih i 5 analognih ulaza i 4 binarna i analogna izlaza. Preko ovih ulaza i izlaza se može upravljati Simoregom putem PLC-a. Način na koji se to radi je da se upravljanje 24 V DC koje PLC šalje ili prima od Simorega na svoj *interface modul*. Na osnovu proučenih funkcijskih dijagrama u priručniku se može steći uvid o tome na koji način Simoreg funkcionira i koje sve procese odrađuje, te kakvu vrstu regulacije koristi. Kao ulaz uzima referentnu vrijednost brzine vrtnje u postotcima, koju dobija s potenciometra. Referentni signal se potom može filtrirati. Potom slijedi obrada referentnog signala, koji prolazi kroz limiter, a onda dolazi na ulaz generatora rampe. Prilikom parametriranja se odrede vrijeme zaleta po rampi, te vrijeme kočenja po rampi. Sa izlaza generatora rampe, kroz još jedan limiter i preko predfitera dovodi da sumator, na kojem se prije ulaza u PI regulator brzine vrtnje od nje oduzima mjerena stvarna vrijednost brzine vrtnje, koja također prolazi kroz niz filtara. Parametri regulatora brzine vrtnje se mogu ručno unostiti, ili ih Simoreg sam odredi pomoću optimizacijskih "vožnji" (eng. *optimization runs*. Izlazni signal regulatora brzine vrtnje prolazi kroz limitere momenta i struje, pa se tako generira referentna vrijednost struje. Njena apsolutna vrijednost se dovodi na sumator PI regulatora struje od koje se oduzima apsolutna vrijednost mjerene unutarnje struje. Simoreg unutar sebe sadrži na ulazu prije tiristorskog upravljača dva strujna mjerna transformatora pomoću kojih se mjeri struja. Također se apsolutna vrijednost signala reference struje dovodi na član za prekontrolu, unutar kojeg se definira, nalazi li se struja u kontinuiranom ili diskontinuiranom načinu rada, pa na izlazu po potrebi daje korekcijski dio koji se pribraja izlazu regulatora

struje. Također se može dodati prefiltar u granu referentne vrijednosti, i to jedan prije ulaza u regulator i jedan prije ulaza u član za prekontrolu. Mjerenu struju nije moguće filtrirati, te ona već prolazi kroz član s PT1 vladanjem. Izlazni signal struje preko limitera, čije granice su definirane minimalnim i maksimalnim okidnim kutem kašnjenja, dolazi do generatora impulsa koji generira upravljačke impulse tiristorskog ispravljača za armaturu. Za upravljanje induciranim naponom, Simoreg stvarnu vrijednost induciranog napona elektromotorne sile računa pomoću armaturnog napona, struje i otpora i induktiviteta koje izračuna pomoću optimizacijskih "vožnji". Iz nazivnih vrijednosti napona i struje, te otpora armature, računa referentnu vrijednost induciranog napona, od koje se prije ulaz regulatora oduzima mjerena. Isto tako se referenca dovodi na član za prekontrolu, u kojem se definira trebali motor raditi u režimu slabljenja polja, zbog brzina viših od nazivne ili ne. Zbroj izlaza regulatora induciranog napona i člana za prekontrolu se preko limitera struje dovodi kao referenca regulatora struje uzbude. Mjerenu struju uzbude dobija unutarnjim mjerenjem. Referenca struje uzbude se također dovodi na član za prekontrolu. Zbroj izlaznih signala regulatora i člana za prekontrolu uzbude se preko limitera dovodi na generator impulsa za tiristore na ispravljaču uzbudnog dijela. Ovime je u potpunosti opisan rad regulacijskog uređaja Simoreg.
U nastavku će biti objašnjen svrha pojedinih terminala Simoreg-a. Terminali su razvrstani po rednim stezaljkama.

Terminali

Svi iskorišteni terminali će biti opisani kako su poredani na shemi upravljačkog dijela u prilogu. Svi opisi se mogu pronaći u priručniku [10].
Redna stezaljaka oznake X171 ima terminale koji su opisani u tablici 4.1.

Tab. 4.1: *Terminali redne stezaljke X171*

Terminal	Opis
34	24 V DC izlaz
36	M- binarnog ulaza 1 na koji je priljkučen pomoćni kontak releja K53 - hitno isključenje
37	Prosljeđuje logiku u Simoreg ovisno o signalu koji je dobio, za uključenje i isključenje glavnog sklopnika
38	Uključuje i isključuje regulatore
39	Binarni ulaz - priključen pomoćni kontakt glavnog sklopnika K1
46	L+ binarnog izlaza 2 sa 20 do 26 V DC - priključen glavni kontakt releja K12
47	M- binarnog izlaza 2 na 0 do 2 V DC

Terminali redne stezaljke X173 su prikazani u tabici 4.2.
Terminali redne stezaljke X174 su prikazani u tablici 4.3.

Tab. 4.2: *Terminali redne stezaljke X173*

Terminal	Opis
26	Napajanje pulsnog enkodera (+13.7 V do +15.2 V)
27	M- pulsnog enkodera
28	Prvi signal - pozitivni terminal
29	negativni terminal
30	Drugi signal - pozitivni terminal
31	negativni terminal
32	Nul signal - pozitivni terminal
33	negatinvi terminal

Tab. 4.3: *Terminali redne stezaljke X174*

Terminal	Opis
1	M-
2	Pozitivni kontakt potenciometra
3	Negativni kontakt potenciometra
4	Regulacijski kontakt potenciometra za postavljanje reference brzine vrtnje
5	M regulacijskog kontakta potenciometra
6	Pozitivni kontakt analognog ulaza 1
7	Negativni kontakt analognog ulaza 1
22	ulaz za PTC sondu
23	za mjerenje temperature

Terminali redne stezaljke X175 su prikazani u tablici 4.4.

Terminali redne stezaljke X161 su prikazani u tablici 4.5.

Tab. 4.4: *Terminali redne stezaljke X175*

Terminal	Opis
14	0 - ±10V analognog izaza 1 spojeng na terminal 52 vanjske redne stezaljke X1
15	M- analognog izaza 1 spojeng na terminal 53 vanjske redne stezaljke X1
16	0 - ±10 V analognog izaza 2 spojeng na terminal 54 vanjske redne stezaljke X1
17	M- analognog izaza 2 spojeng na terminal 55 vanjske redne stezaljke X1

Tab. 4.5: *Terminali redne stezaljke X161*

Terminal	Opis
210	Napajanje 24 V DC sa izlazom na terminal 35 vanjske redne stezaljke X1
211	Binarini ulaz na koji je priključena grebenasta sklopka S1
212	Binarini ulaz na koji je priključena grebenasta sklopka S2
213	Binarini ulaz na koji je priključena grebenasta sklopka S3
214	Binarni ulaz priključen na terminal 36 vanjske redne stezaljke X1
216	Uzemljenje za binarne ulaze
217	M-

Terminali redne stezaljke X163 su prikazani u tablici 4.6.

Terminali redne stezaljke X164 su prikazani u tablici 4.7.

Tab. 4.6: *Terminali redne stezaljke X163*

Terminal	Opis
44	Napajanje 24 V DC sa izlazom na terminal 41 vanjske redne stezaljke X1
40	Binarini ulaz 1 spojen na terminal 42 vanjske redne stezaljke X1
43	Binarini ulaz 6 na koji serijski spojeni pomoćni kontakti motorne zaštitne sklopke Q5 i sklopnika K4
50	L+ binarnog izlaza 3 spojenog na terminal 37 vanjske redne stezaljke X1
51	M- binarnog izlaza 3 spojenog na terminal 38 vanjske redne stezaljke X1
52	L+ binarnog izlaza 4 spojenog na terminal 39 vanjske redne stezaljke X1
53	M- binarnog izlaza 4 spojenog na terminal 40 vanjske redne stezaljke X1

Tab. 4.7: *Terminali redne stezaljke X164*

Terminal	Opis
8	±10V analognog ulaza 2 spojeng na terminal 45 vanjske redne stezaljke X1
9	M- analognog iulaza 2 spojeng na terminal 46 vanjske redne stezaljke X1
18	±10V analognog izlaza 3 spojeng na terminal 43 vanjske redne stezaljke X1
19	±10V analognog izaza 3 spojeng na terminal 44 vanjske redne stezaljke X1

Terminali redne stezaljke X490 su prikazani u tablici 4.8.

Terminali redne stezaljke koja nije označena u Simoreg-u su prikazani u tablici 4.9.

Tab. 4.8: *Terminali redne stezaljke X490*

Terminal	Opis
EB2-2	L+ binarnog izlaza spojen na sabirnicu L24
EB2-1	M- binarnog izlaza na koji je spojena LED H1
44	L+ binarnog izlaza spojen na sabirnicu L24
43	M- binarnog izlaza na koji je spojena LED H2
46	L+ binarnog izlaza spojen na sabirnicu L24
45	M- binarnog izlaza na koji je spojena LED H3
47	terminal nepoznate svrhe spojen na terminal 47 vanjske rednje stezaljke X1
48	terminal nepoznate svrhe spojen na terminal 48 vanjske rednje stezaljke X1
49	terminal nepoznate svrhe spojen na terminal 47 vanjske rednje stezaljke X1

Tab. 4.9: *Terminali redne stezaljke bez oznake*

Terminal	Opis
38	terminal nepoznate svrhe spojen na terminal 56 vanjske rednje stezaljke X1
EB2-1	terminal nepoznate svrhe spojen na terminal 57 vanjske rednje stezaljke X1
52	Napajanje 24 V DC
53	M- binarnog ulaza na koji je spojeno tipkalo S4
54	M- binarnog ulaza na koji je spojeno tipkalo S5

4.1.4 Teret - sinkroni generator

Sinkronom generator snage 8 kVa, s faktorom snage 0.8, su na armaturni namot priključeni otpornici za terećenje s 4 stupnja, te je svaki stupanj snage snage 1.5 kW u spoju zvijezda. Ako se želi teretiti istosmjerni motor, prvo se zaleti, pa se podiže uzbuda generatora do željene vrijednosti, a potom se tereti uklapanjem otpornika na armaturni namot sinkronog generatora. Motor se ne može teretiti sa sva 4 stupnja, zato što bi bio preopterećen, te se ne smije dizati uzbuda generatora na nazivnu vrijednost, jer bi i onda motor bio preopterećen.

4.1.5 Određivanje parametara

Za potrebe simulacije je bilo potrebno odrediti dodatne parametre u odnosu na one koji se mogu naći na natpisnoj pločici. Korisni podatci koji se mogu očitati s nazivne pločice su nazivni napon armature, nazivna struja armature, nazivna brzina vrtnje i nazivna snaga. Budući da su za simulacije potrebni i otpor i induktivitet armturnog namota, elektromotorna konstanta ovisna o konstrukciji motora i moment inercije motora. Za simulaciju reguliranog istosmjernog motora je također bilo potrebno odrediti konstante pojačanja mjernih članova, te filtre kojima se filtrira mjerni signal zbog neželjenih harmonika frekvencije.
Otpor i induktivitet armaturnog namota su određeni pomoću Simoreg-a, nakon što je odradio optimizacije, te odredio te parametre. Pojačanje i filtar mjernog člana su pronađeni u priručniku [10], a pojačanje mjernog člana brzine je očitano s tahogeneratora, dok je filtar mjernog člana brzine također odredio Simoreg.
Određivanje elektromotorne konstante je napravljeno mjerenjem napona i struje armature i brzine vrtnje uz konstantan uzbudni tok, za nekoliko radnih točaka u praznom hodu do nazivne brzine vrtnje. Budući da je tok postavljen na konstantnu vrijednost održavanjem konstantne struje uzbude tokom mjerneja, te poznavajući da se motor neće vrtiti brzinom većom od nazivne, na ovaj način će se odrediti konstnta $k_{e\Phi}$ unutar koje je uračunat i tok kao konstanta. Nakon provedenih mjerenja, budući da se radi o praznom hodu, neće biti velikih promjena struje, pa se može zanemariti inducirani napon zbog induktivieta, te će izvođenjem koeficijenta $k_{e\Phi}$ koristeći jednadžbe (2-16) i (2-17) biti dobiven sljedeći rezultat:

$$k_{e\Phi} = \frac{U_a - I_a R_a}{n}. \tag{4-1}$$

Budući da se simulacije vrše s brzinom vrtnje u [s^{-1}], potrebno je prebaciti brzinu vrtnje n u ω:

$$k_{e\Phi} = \frac{30(U_a - I_a R_a)}{n\pi}. \tag{4-2}$$

Iz jednadžbe (4-2) se može za svaku izmjerenu radnu točku iz izmjerenih podataka može izračunati $k_{e\Phi}$. MATLAB skripta pomoću koje je određivana ova konstanta se može pronaći u prilogu.
Određivanje momenta inercije osovinskog sklopa je malo kompliciranije. Korišteni su isti podatci izmjereni za razne radne točke, a osim toga je bilo potrebno i snimiti valni oblik brzine vrtnje kada pri nazivnoj brzini vrtnje u praznom hodu isključi napajanje, te se pusti da se motor zbog inercije zaustavi. Budući da je isključeno napajanje, motor više ne proizvodi moment, pa jednadžba ravnoteže snaga, odnosno momenta (2-31) ima sljedeći izgled:

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = -M_{tr,v} \tag{4-3}$$

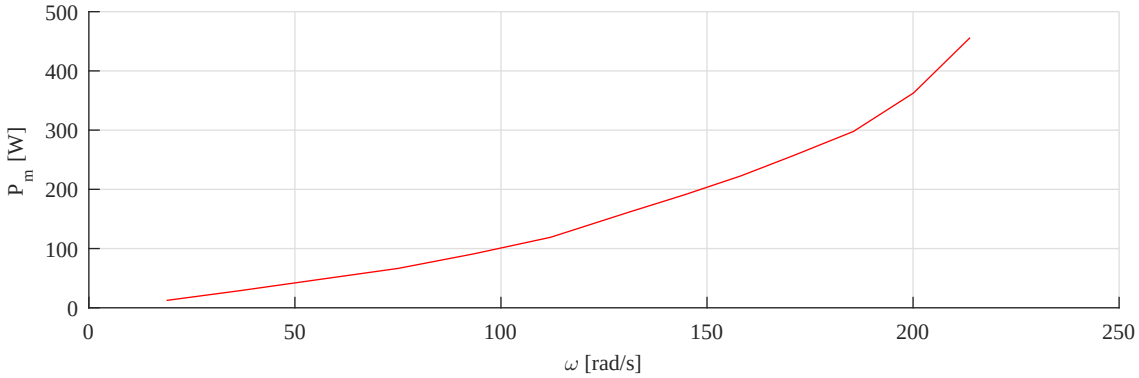
gdje je $M_{tr,v}$ moment viskoznog trenja. Momenta motora nema zato što je motor isključen s napajanja, a momenta tereta nema zato što je prazni hod. Ako se jednadžba podijeli sa J, dobije se diferencijalna jednadžba:

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{-M_{tr,v}}{J}. \tag{4-4}$$

Kako bi se ova diferencijalna jednadžba riječila, potrebno je odrediti ovisnost momenta viskoznog trenja o brzini vrtnje. Ovo je moguće napraviti pomoću izmjerenih vrijednosti napona i stuje armature, te brzne vrtnje za razne radne točke u praznom hodu. Koristeći jednadžbe (2-14) i (2-16), može se izračunati snaga:

$$P_m = ei = (U_a - I_a R_a) I_a. \tag{4-5}$$

Na slici 4.1 se vidi da je ovisnost snage o brzini vrtnje kvadratna.



Sl. 4.1: *Ovisnost snage o brzini vrtnje*

U MATLAB-u se korištenjem naredbe *polyfit* može iz zadanog seta podataka odrediti funkcija međusobne ovisnosti tih parametara, pa se tako mogu uzeti podatci brzine snage i brzine vrtnje, te odrediti ovisnost snage o brzini vrtnje. Ako se iz snage želi dobiti ovisnost momenta o brzini vrtnje, ovisnost snage podijeliti s brzinom vrtnje. Prema tome će ovisnost momenta o brzini vrtnje biti linearna. Na osnovu te jednadžbe i diferencijalne jednažbe kojom je opisano zaustavljanje motora zbog inercije, kada se riješi ta diferencijalna jednadžba, se može pomoću snimljenog valnog oblika brzine vrtnje odrediti moment inercije tako što će se korištenjem optimizacijskog alata genetski algoritam u MATLAB-u (naredba *ga*) za riješenu diferencijalnu jednadžbu prilagđavati njeni parametri dokle god se ne postigne podudaranje sa snimljenim valnim oblikom brzine vrtnje. Nakon što su određeni ti koeficijenit, koristeći njih i podatke ovisnosti momenta o brzini vrtnje se može izračunati moment inercije osovinskog sklopa. MATLAB skripta prema kojoj je ovo rađeno se nalazi u prilogu.

4.2. Analiza rada reguliranog istosmjernog pogona

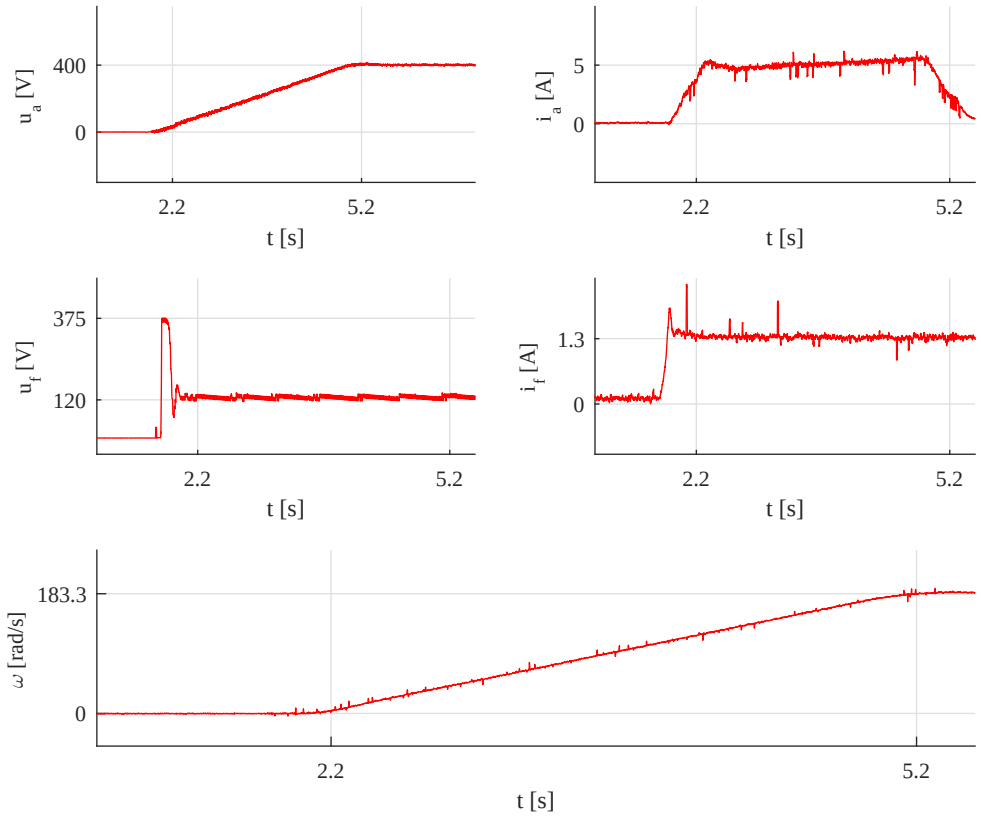
Ovo potpoglavlje će biti posvećeno analizi rada stvarnog pogona. Bit će odrađene sljedeće pojave:

- zalet,
- terećenje i rasterećenje,
- reverziranje
- i kočenje.

Valni oblici su snimljeni pomoću sustava za prikupljanje podataka IOtech, a potom obrađeni programskom paketu MATLAB. Osim analize prikupljenih podataka, usporedit će se sa podatcima dobivenim iz simulacija u MATLAB-u. Prije analize izmjerenih signala, bitno je napomenuti da su svi signali filtrirani u matlabu, pa je na kraju potpoglavlja dan uvećani izgled struje i napona armature, kako bi se mogao primjetiti rad tiristorskih ispravljača.

Zalet

U generatoru rampe u Simoreg-u je zalet postavljen na 3 sekunde. Snimljeni su valni oblici napona i struja armature i uzbude, te valni oblik kružne brzine vrtnje (Slika 4.2).

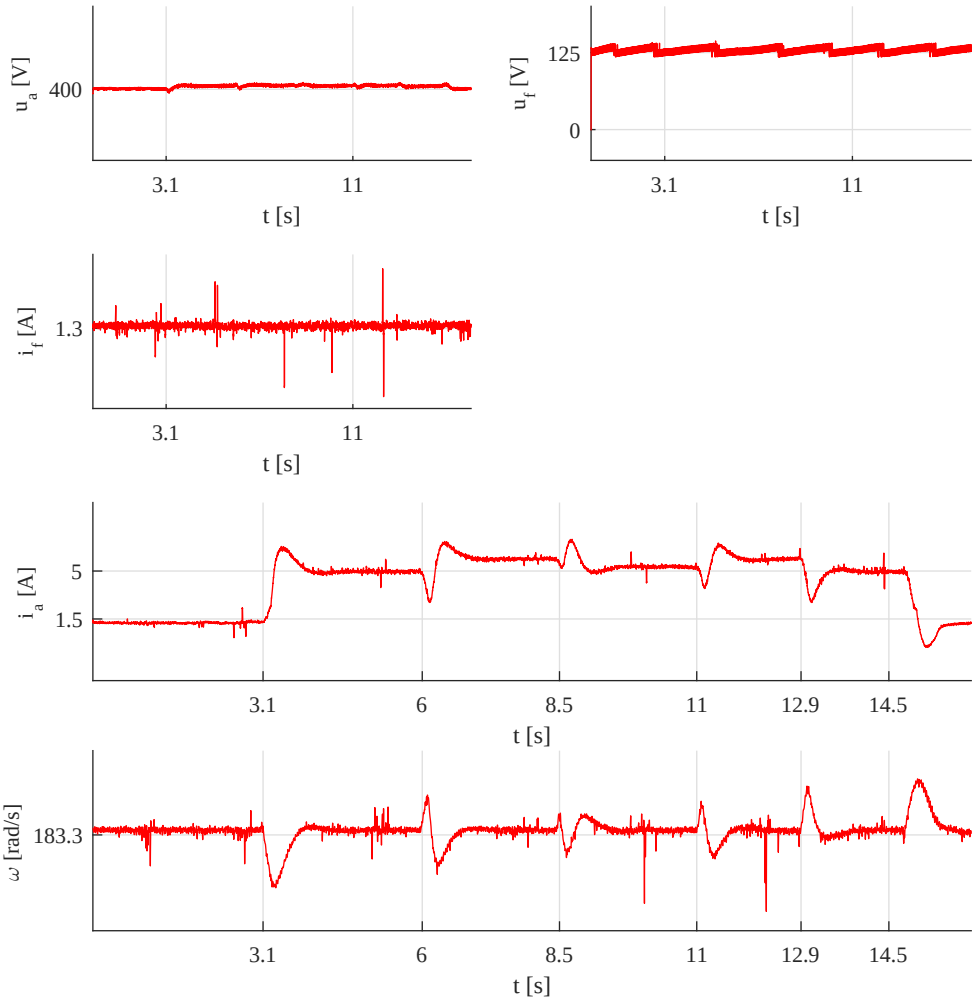


Sl. 4.2: *Snimljeni valni oblici za zalet reguliranog istosmjernog motora*

U trenutku $t = 2.$s se motor počinje zalijetati, te nakon 3 sekunde postiže nazivnu brzinu. Može se primjetiti da se prije narine napon uzbude u odnosu na napon armature. U potpoglavlju 2.3 je ovo objašnjeno, te je razlog tome obrunto proporcionalna ovistnost brzine vrtnje o promjeni uzbudnog toka. To znači, da ako se narine napon na armaturu bez prethodno priključene uzbude, onda bi se motor teoretski zaletio u beskonačnost. U praksi bi se motor pod ovakvim uvjetima razletio. Zanimljivo je primjetit na snimljenom valnom obliku brzine vrtnje da nema nadvišenja prilikom postizanja nazivne brzine vrtnje. To je rezultat dobre regulacije brzine vrtnje. Može se primjetit da valni oblici struja i napona imaju isjeckan izgled, a to je rezultat rada ispravljača. Na kraju potpoglavlja će biti uvećani valni oblici napona i struja za slučaj kada je motor opterećen i ne opterećen na samo jednu periodu frekvencije 50 Hz, odnosno vremenski izraženo u trajanju od 20 ms. Teško je odrediti točnu vrijednost srednje vrijednosti napona i struje, samo promatranjem valnih oblika. No može se vidjeti da se vrijednost struje kreće oko 5 A za vrijeme zaleta. Ovime je pokazana još jedna velika prednost regulacije motora, a to je ograničavanje struje, te samim time i produljenje životnog vijeka motora.

Terećenje i rasterećenje

Nakon zaleta se motor tereti preko sinkronog generatora. Uključenjem uzbude generatoru se motor malo optereti, zbog induciaranja napona u armaturnom namotu generatora. Na armaturu generatora su priključena 4 stupnja otpornika za terećenje u spoju zvijezda, koji su postepeno uključivani. Na slici 4.3 su prikazani valni oblici napona i struja armature i uzbude, te brzine vrtnje.



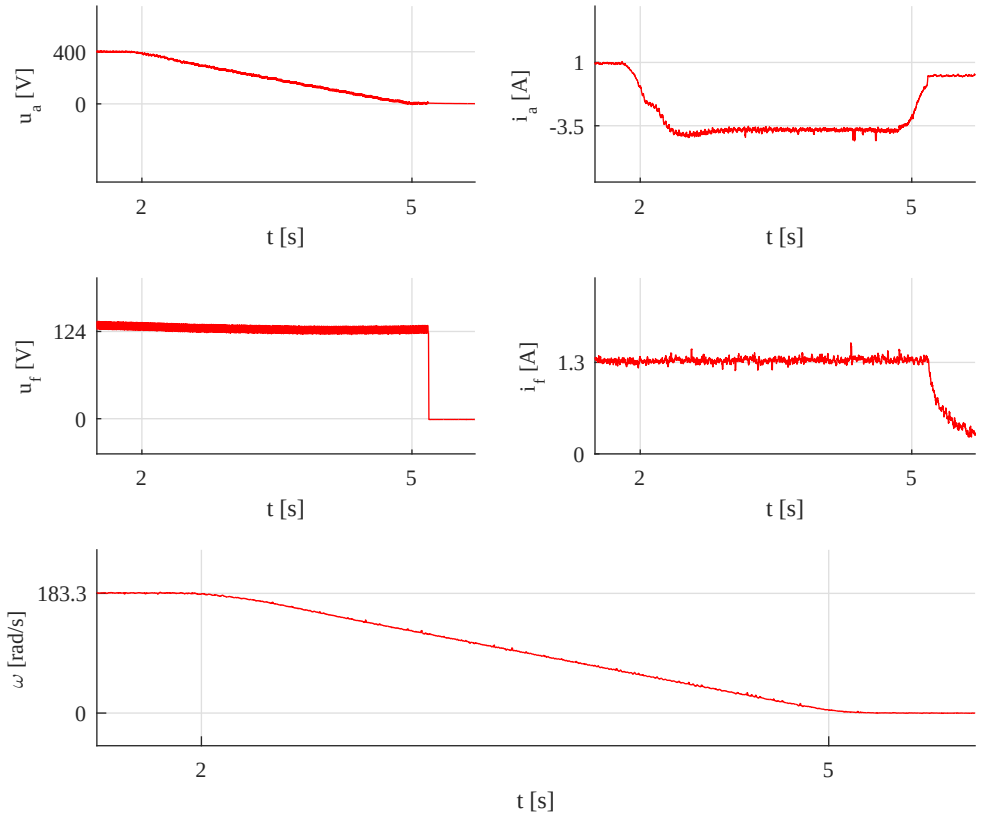
Sl. 4.3: *Snimljeni valni oblici za terećenje i rasterećenje reguliranog istosmjernog motora*

Na slici se vidi da je motor opterećen prvim stupnjem otpornika u trenutku $t = 3.1$s, drugim stupnjem u trenutku $t = 6$s i trećim u trenutku $t = 8.5$s. Motor nije terećen četvrtim stupnjem zato što bi onda bio preopterećen (svaki stupanj je snage 1.5 kW). Propad brzine vrtnje u trenutku terećenja 3.98%. Budući da motor ima regulaciju brzine vrtnje, regulator vraće brzinu vrtnje na nazivnu vrijednost. To je osnovna zadaća regulatora brzine, odnsno održati brzinu vrtnje motora konstantnom, dokle god on nije preopterećen. Isto tako se se motor rasterećuje postepeno u trenutcima $t = 11$s, $t = 12.9$s i $t = 14.5$s. Prilikom posljednjeg rasterećenja, brzina vrtnje ima nadvišenje 3.93%. Prilikom simulacije reguliranog istosmjernog stroja je dobiven propad oko 9% za 30% nazivnog opterećenja. Razlog tome su loši parametri regulatora, koji je ručno podešavan kako bi se postigao što bolji rezultat u odnosu na onoga koji je parametriran prema simetričnom optimumu.

Kočenje

Kao i kod zaleta motora, u generatoru rampe u Simoreg-u se može namjestit i vrijeme za koje će se motor zaustaviti. Za ovo mjerenje, to vrijeme je postavljeno na 3 sekunde. Snimljeni su

valni oblici napon i struja armature i uzbude, te brzine vrtnje koji su prikazani na slici 4.4.



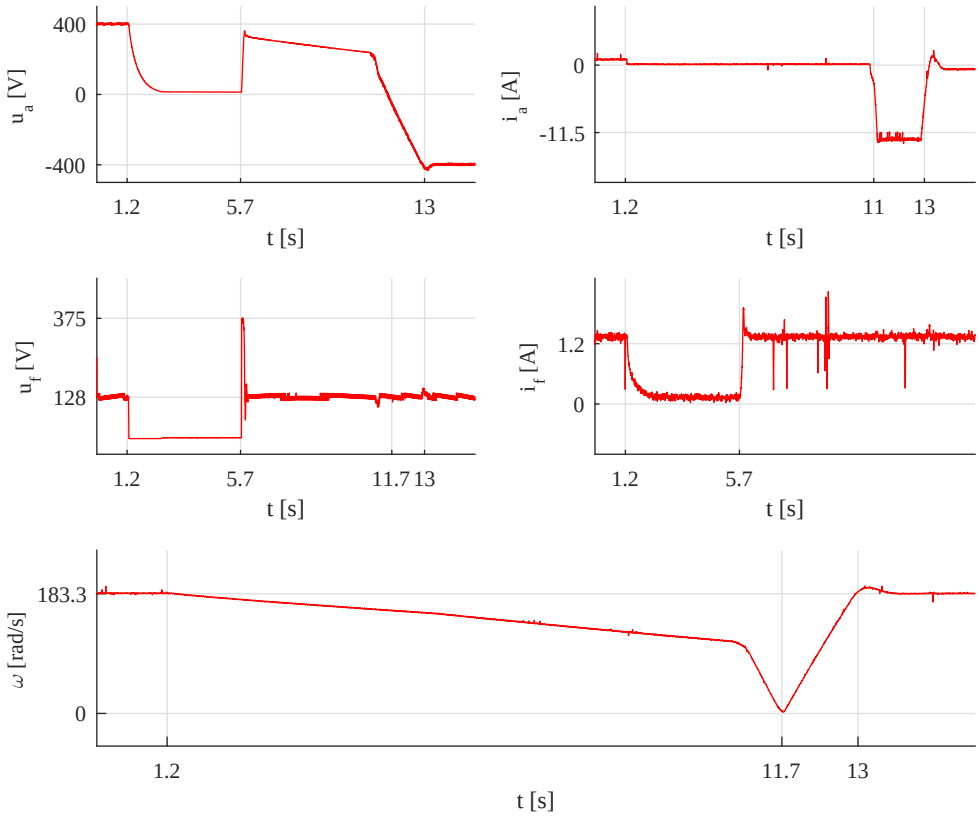
Sl. 4.4: *Snimljeni valni oblici za kočenje regulirano istosmjernog motora*

Na slici se može vidjeti da je trenutak početka kočenja u $t = 2$s. Struja armature za vrijeme koćenja ima vrijednost oko -3 A. Radi se o protustrujnom kočenju. Nakon što je isključeno napajanje armaturnog namota, isključuje se napajanje uzbude. Razlog je isti kao i onaj prilikom zaleta, a to je ovisnost brzine vrtnje o uzbudnom toku.

Reverziranje

Unutar Simoreg-a postoji set parametara kojim se može izvesti reverziranje motora. Budući da tahogenerator daje samo ispravljenu vrijednost, snimljeni valni oblik brzine vrtnje na slici 4.5 neće imati negativnu brzinu, dok je ona u stvarnosti bila negativna, odnosno, motor se vrtio u suprotnom smjeru.

Reverziranje počinje u trenutku $t = 1.2$s. U tom trenu se motoru isključi napajanje. Razlog tome je postavljno vrijeme kočenja motora. Budući da je vrijeme kojim se protustrujno koči, te zalijeće u suprotnu stranu, postavljeno na 2 s, Simoreg u svrhu zaštite motora ograničava struju. Prema tome, motor se prvih 9.8 sekundi zaustavlja zbog inercije osovinskog sklopa, a potom u trenutku $t = 11$s Simoreg počinje spuštati napon do nazivne vrijednosti suprotnog polariteta, prilikom koje je motor zaletit na nazivnu vrijednost. Na valnom obliku brzine vrtnje se vidi da prilikom postizanja nazivne brzine vrtnje, ona ima nadvišenje 5.4%.

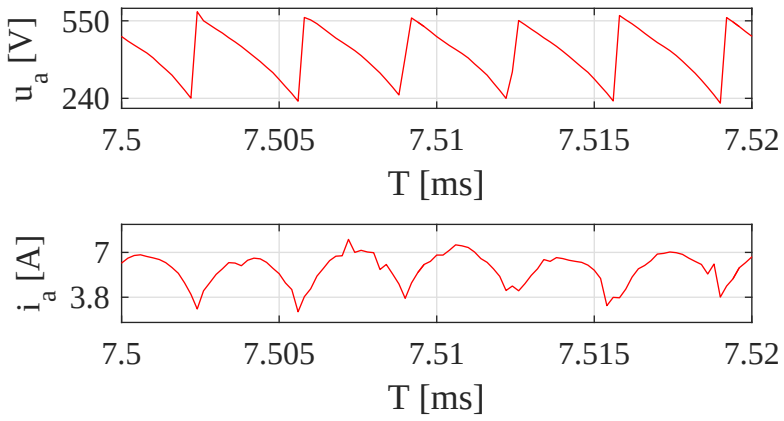


Sl. 4.5: *Snimljeni valni oblici za reverziranje reguliranog istosmjernog motora*

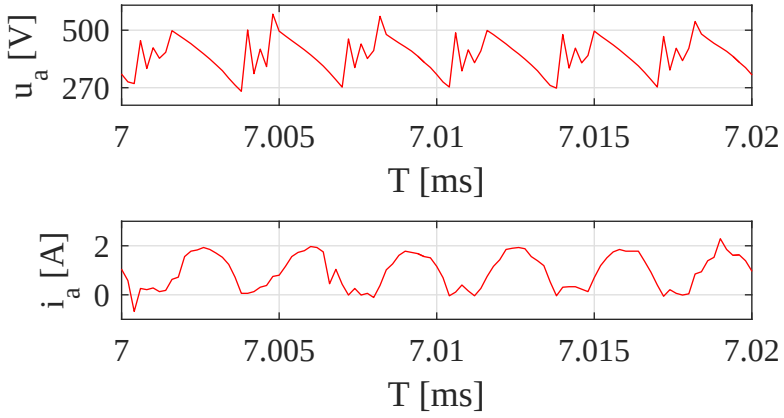
Uvećani valni oblici napona i struje armature

U prvom paragrafu ovog potpoglavlja je primjećeno kako su valni oblici napona i struja isječeni, odnosno valoviti. Uzrok tome je rad šesteropulsnog tiristorkog ispravljača, čiji rad je opisan u potpoglavlju 3.3. Bit će prikazani valni oblici napona i struje armature za opterećen motor, te za neopterećen motor. Valni oblici napona i struje armature za opterećen motor su prikazani na slici 4.6.

Ako se na slici prebroji broj impulsa napona i struje, može se uvidjeti da se uistinu radio šesteropulsnom ispravljaču. Za ovakavu struju je definirano kako je ona kontinuirana. Razlog ovome je objašnjen u potpoglavlju 3.3 u paragrafu načina rada s kontinuiranom strujom. Može se primjetiti mala distorzija valnog oblika struje i napona u odnosu na one prikazane u teoriji. Razlog tome su smetnje koje su unešene prilikom mjerenja. Struja koju Simoreg mjeri je unutarnja struja, te na nju nesmije biti utjecaja smetnji zato što je ona povratna veza regulacijskog kruga struje. Koristeći jednadžbu (3-22) se može izračunati okidni kut kašnjenja, koji u ovom slučaju iznosi $\alpha = 31.7°$. Uvećani valni oblici struje i napona armature za ne opterećeni istosmjerni motor su prikazani na slici 4.7.



Sl. 4.6: *Uvećani valni oblik struje i napona opterećenog istosmjernog motora na jednu periodu u trajanju od* $T = 20\text{ms}$



Sl. 4.7: *Uvećani valni oblik struje i napona ne opterećenog istosmjernog motora na jednu periodu u trajanju od* $T = 20\text{ms}$

Na slici se može primjetiti da sada struja diskontinuirana, zato što određeni dio perioda ima vrijednost 0. Uzrok ovome je što je motor neopterećen i mala razlika napona armature i induciranog napona uz induktivitet armaturnog namota. Valni oblik napona je u ovome slučaju izobličen, zbog utjecaja induktiviteta armarutornog namota i komutacijskog induktiviteta. Budući da je sada struja mala, za ovoliki induktivitet je to velika promjena napona, dok za razliku kod opterećenog motora to nije slučaj.

5. ZAKLJUČAK

Diplomski rad daje uvid o radu istosmjernog pogona reguliranog sa Siemens Simoreg. Kroz 3 poglavlja je u potpunosti opisana funkcionalonosz i prikupljeni tehnički podatci izvedene makete koja se nalazi u Laboratoriju za električne strojeve i pogone. Opisana je teorija istosmjernih pogona, dijelovi regulacijskog uređaja, te izvedba istosmjernog reguliranog pogona u laboratoriju. Prilikom izrade simulacijskih modela, zbog nedostatka podataka, osim onih koji se nalaze na natpisnoj pločici, bilo je potrebno dodatno odrediti parametre koji su potrebni u modelima kako bi se vjerodostojno simulirao stvarni rad motora laboratorijskog pogona. Parameti su određivani nizom raznih mjerenja i pokusa, pomoću kojih je se optimizacijskim algoritmom određivao moment tromosti osovinskog sklopa. Ova problematika je prisutna kod svih motora, naročito ako proizvođač nije dao te podatke. Ako se razmotri korisit od ovog diplomskog rada, stiče se veliko znanje o radu regulacijskih uređaja, te o njihovom parametriranju. Stiče se uvid na koji način tumačiti tehničke priručnike za korištenje takvih uređaja. Na osnovu sječenih znanja o regulaciji istosmjernih motora, lako se može shvatiti i regulacija asinkronih motora, čija se regulacija zasniva na regulaciji istosmjernih motora.

U poglavlju teorije istosmjernih pogona su objašnjene osnovne fizikalne pojave unutar motora u svrhu boljeg shvaćanja regulacije istosmjernih motora. Za simulacije je izveden matematički model istosmjernog motora za dinamičko vladanje, te za stacionarno vladanje sustava. Na osnovu matematičkog modela je izvedena ovisnost brzine vrtnje o armaturnom naponu, otporu armaturnog namota, te uzbudnom toku. Motor može raditi u motorskom ili generatorskom radu u 4 kvadranta $\omega - M$ ravnine. Za pozitivan smjer vrtnje u motorskom režimu rada je potrebno narinuti veći napon armature od induciranog napona. Ako bi se želio postići generatorski režim rada, potrebno je motoru smanjiti napon armature ispod razine induciranog napona ili mu priključiti neki teret koji ima veći moment od razvijenog momenta motora. U tom slučaju će struja poteći u suprotnom smjeru, te će se motor ponašati kao generator. Shvaćanje ovoga je nužno za regulaciju istosmjernog motora u četiri kvadranta pomoću regulacijskog uređaja. Brzina vrtnje motora se kod reguliranih pogona najčešće upravlja razinom armutrnog napona i uzbude. Promjena brzine vrtnje je zastarjeli način zbog velikih Joule-ovih gubitaka na otpornicima. Kod reguliranih pogona se upravljanje napona i uzbude vrši promjenom okidnog kuta kašnjenja kod pretvarača preko kojih se napaja motor. Unutar regulacijskih uređaja kao što je Simoreg, postoje optimizacijski alati pomoću kojih sam regulacijski uređaj određuje koja je najučinkovitija kombinacija pojačanja regulatora za što kvalitetnije upravljanje pogonom. Kod nereguliranih istosmjernih motora, direktnim priključkom na mrežu se može uništiti motor. Dokaz ovome se nalazi u simulacijama nereguliranog istosmjernog motora. Za razliku od direktnog priključka, linearno povećavanje napona armature će rezultirati strujom unutar dozvoljenih granica, ali smanjenim momentom. Zbog ovoga se u praksi za zalet motora koristi linearno povećanje ulaznog napona. U stoga je potrebno paziti na moment tereta koji se priključuje motoru u zaletu. Svakom regulacijskom uređaju postoji blok generator rampe (eng. *Ramp Function Generator*) koji na osnovu postavljenih vrijednosti daje određene vrijednosti signala regulatorima koji potom definiraju okidne impulse za pretvarače. Još jedan razlog korištenja regulacijskih uređaja, kao što je Simoreg, je održavanje postavljene brzine vrtnje konstantnom dokle god motor nije preopterećen. U simulaciji nereguliranog istosmjernog motora se vidi u trenutku terećenja, brzina vrtnje ima trajno odstupanje u stacionarnom stanju.

U potpoglavlju posvećenom regulacijskom uređaju je najviše vremena posvećeno samoj energetskoj elektronici, odnosno pretvaračima. Simoreg sadrži šesteropulsni tiristorski ispravljač u antiparalelnom spoju za napajanje armaturnog namota motora, te poluupravljivi mosni ispravljač s tiristorskom i diodnom granom za napajanje uzbudnog namota. Kroz analizu se da zaključiti da se brzinom vrtnje istosmjernih motora može upravljati okidnim kutem kašnjenja

tiristorskog ispravljača. Jedna bitna stvar kod ispravljača je da se zbog njih motor može naći u radu s diskontinuiranom strujom, koji nije poželjan zato što sa porastom tereta dolazi do velikog opadanja brzine vrtnje. Zbog ovoga se uvodi član za prekontrolu struje koji izlaznom signalu struje pridodaje malu vrijednost struje kako bi spriječio rad s diskontinuiranom strujom.
U posljednjem poglavlju je opisana izvedba reguliranog istosmjernog pogona u laboratoriju. Tehnički su opisani svi članovi. Praktično je prikupljana dokumentacija za izrađivanje električnih shema, tako što su ispitivani pojedini spojevi između svakog elementa makete. Ovaj posao zahtjeva pažnju i dobre organizacijske vještine. Napravljena je analiza rada reguliranog istosmjernog motora u kojoj su prikazani snimljeni valni oblici struja i napona armature i uzude, te valni oblik brzine vrtnje. Kod valnih oblika struja i napona se može primjetiti da su "isječeni". Uzrok toga je rad pretvarača, koji na ovaj način upravljaja srednjom vrijednošću armatrunog napona, odnosno okidnim kutem kašnjejna. Valovitost struje ne utječe na razvijeni moment, a tako ni na brzinu vrtnje motora zbog komutacije uzrokovane induktivitetom armaturnog namota.

Literatura

[1] Weidauer, J., & Messer, R. (2014). Electrical Drives: Principles, Planning, Applications, Solutions.

[2] Juha, P., Hrabovcova, V., & Semken, R. S. (2016). Elecrtical Machine Drives Control: An introduction. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley.

[3] Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (2002). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Power Engineering.

[4] Pinter, V. (1994). Osnove elektrotehnike. Zagreb: Tehnička knjiga.

[5] Hughes., A. (2013). Electric motors and drives fundamentals, types and applications. Electric motors and drives fundamentals, types and applications.

[6] Perić, N., (2004.). Automatsko upravljanje: Predavanja. Zagreb: FER.

[7] Jadrić, M., & Frančić, B. (1995). Dinamika električnih strojeva. (2. izdanje). Zagreb: Graphis, 2004.

[8] Leonhard, W. (1996). Control of Electrical Drives. (2. izdanje) . Berlin: Springer, 1996.

[9] Bolf, N. (2016). Mjerna i regulacijska tehnika, 65, 665–666.

[10] Siemens Energy & Automation. (2007.). SIMOREG DC-MASTER 6RA70 Series, Operating Instructions.
URL: www.cache.industry.siemens.com/dl/files/212/22220212/att_26325/v1/C98130-A1256A002147619.pdf

[11] Leniček, I. (2016). Elektrotehnička mjerenja 1. dio. Zagreb: FER.

[12] Bego, V. (1979). Mjerenja u elektrotehnici (4. izdanje). Zagreb: Tehnička knjiga.

Popis slika

2.1 Konstrukcija osnovnog modela motora . . . 3
2.2 Električna potpuna nadomjesna shema istosmjernog motora . . . 4
2.3 Režimi rada motora . . . 7
2.4 Blok dijagram nereguliranog istosmjernog motora . . . 10
2.5 Zalet motora u praznom hodu sa skokovitom promjenom ulazne veličine . . . 11
2.6 Zalet motora u praznom hodu s linearnom promjenom ulazne veličine . . . 12
2.7 Skokovito terećenje i rasterećenje motora . . . 13
2.8 Protustrujno kočenje motora iz praznog hoda sa skokovitom promjenom ulazne veličine . . . 14
2.9 Protustrujno kočenje motora iz praznog hoda s linearnom promjenom ulazne veličine . . . 14
2.10 Reverziranje motora iz praznog hoda sa skokovitom promjenom ulazne veličine . 15
2.11 Reverziranje motora iz praznog hoda sa linearnom promjenom ulazne veličine . . 15
2.12 Mehaničke karakteristike istosmjernog motora s regulacijom brzine vrtnje . . . 16
2.13 Brzina vrtnje sa slabljenjem polja . . . 18
2.14 Strukturna shema regulacije istosmjernog motora . . . 24
2.15 Simulacijski model reguliranog istosmjernog motora . . . 27
2.16 Rezultati simulacije reguliranog istosmjernog motora . . . 28
2.17 Provjera ispravnosti unutarnjeg regulacijskog kruga . . . 29
2.18 Rezultati ispitivanja vanjskog regulacijskog kruga . . . 29
2.19 Rezultati ponovljene simulacije reguliranog istosmjernog motora s uključenim povratnim vezama . . . 30
2.20 Rezultati simulacije zaleta reguliranog istosmjernog motora za skokovitu promjenu referne veličine . . . 31
2.21 Rezultati simulacije zaleta reguliranog istosmjernog motora za linearnu promjenu referne veličine . . . 32
2.22 Rezultati simulacije skokovitog terećenja i rasterećenja reguliranog istosmjernog motora . . . 33
2.23 Rezultati simulacije kočenja reguliranog istosmjernog motora za skokovitu promjenu referne veličine . . . 34
2.24 Rezultati simulacije kočenja reguliranog istosmjernog motora za linearnu promjenu referne veličine . . . 34
2.25 Rezultati simulacije reverziranja reguliranog istosmjernog motora za skokovitu promjenu referne veličine . . . 35
2.26 Rezultati simulacije reverziranja reguliranog istosmjernog motora za linearnu promjenu referne veličine . . . 35
3.1 BC6 spoj tiristora . . . 39
3.2 BC6 spoj tiristora u antiparaleli . . . 40
3.3 Ispravljač B2HZ za uzbudni krug . . . 40
3.4 Dvopulsni tiristorski ispravljač . . . 41
3.5 Valni oblik napona pri $\alpha = 0$ i $L_c > 0$ . . . 42
3.6 Valni oblik napona pri $\alpha = 60°$ i $L_c = 0$ . . . 43
3.7 Valni oblik napona pri $\alpha = 30°$ i $L_c > 0$ . . . 44
3.8 Valni oblik napona i kontinuirane struje pri $\alpha = 30°$ i $L_c > 0$ . . . 45
3.9 Valni oblik napona i diskontinuirane struje pri $\alpha = 30°$ i $L_c > 0$ . . . 46
3.10 Valni oblik napona i struje pri $\alpha = 30°$ i $L_c = 1.05$mH . . . 47
4.1 Ovisnost snage o brzini vrtnje . . . 56

4.2 Snimljeni valni oblici za zalet reguliranog istosmjernog motora 57
4.3 Snimljeni valni oblici za terećenje i rasterećenje reguliranog istosmjernog motora 58
4.4 Snimljeni valni oblici za kočenje regulirano istosmjernog motora 59
4.5 Snimljeni valni oblici za reverziranje reguliranog istosmjernog motora 60
4.6 Uvećani valni oblik struje i napona opterećenog istosmjernog motora na jednu periodu u trajanju od $T = 20$ms 61
4.7 Uvećani valni oblik struje i napona ne opterećenog istosmjernog motora na jednu periodu u trajanju od $T = 20$ms 61
P4.1 Operaterski panel 82
P4.2 Podešavanje komunikacije 82
P4.3 Podešavanje komunikacije 83
P4.4 Korisničko sučelje Drive Monitor-a 83
P6.1 Izvedba reguliranog pogona 89
P6.2 Simoreg priključen na panel sa izvedenim kontaktima reguliranog motora 89
P7.1 Mjerna oprema korištena za prikupljanje podataka 90
P7.2 Detaljniji prikaz sa korištenim mjernim sondama 90

Popis tablica

4.1 Terminali redne stezaljke X171 50
4.2 Terminali redne stezaljke X173 51
4.3 Terminali redne stezaljke X174 51
4.4 Terminali redne stezaljke X175 52
4.5 Terminali redne stezaljke X161 52
4.6 Terminali redne stezaljke X163 53
4.7 Terminali redne stezaljke X164 53
4.8 Terminali redne stezaljke X490 54
4.9 Terminali redne stezaljke bez oznake 54
P1.1 Podatci istosmjernog motora za simulaciju 70
P1.2 Natpisna pločica istosmjernog motora 70
P1.3 Natpisna pločica sinkronog generatora 71
P2.1 Potpune specifikacije Simoreg-a 72

Sažetak

U sklopu ovog diplomskog rada je detaljno opisan matematički model istosmjernog motora s nezavisnom uzbudom, kojim je u potpunosti opisano dinamičko vladanje motora. Na osnovu provedenih mjerenja i pokusa, prikupljeni su podatci za simulaciju, pomoću kojih su po tehničkom i simetričnom optimumu paramterirani regulatori struje i brzine vrtnje istosmjernog motora. Napravljene su simulacije nereguliranog i reguliranog istosmjernog motora i mjerenja na istosmjernom motoru, pa su svi rezultati uspoređeni. Opisana je funkcionalnost rada regulacijskog uređaja Siemens Simoreg, te je napravljena tehnička dokumentacija. Na osnovu odrađenih simulacija i mjerenja se donose zaključci zbog čega je važno upravljati radom jednog istosmjernog motora.

Ključne riječi: Istosmjerni motor, Nezavisna uzbuda, Siemens Simoreg, matematički model, regulator struje, regulator brzine vrtnje, dinamičko vladanje.

Abstract

DC drive governed via Siemens Simoreg converter
Detailed description of mathematical model of separately excited DC motor, by which dynamic behavior of such system is fully described is a part of this masters thesis. Simulation data is gathered on basis of carrying out measurements and experiments, and are used for parametrisation of current and angular velocity of the motor via magnitude and symmetrical optimum. Simulations of nonregulated and regulated and measurements for DC motor are made, whose results are then compared. Regulation device Siemens Simoreg operation is functionally described, and technical documentation is made. Using the simulations and measurements, conclusions are made why to govern the operation of one DC motor.

Keywords: DC Motor, separate excitation, Siemens Simoreg, mathematical model, current governor, angular velocity governor, dynamic behavior.

Životopis

Bruno Lastavica je rođen 06.10.1993. u Vinkovcima. Osnovnu školu završava u Orašju u Osnovnoj Školi Orašje i upisuje Srednju Školu Fra. Martin Nedić u Orašju, smjer Elektrotehnika. Po završetku srednje škole, 2012. godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku na Sveučiilištu Josipa Jurja Strossmayera. Odabire svečilišni preddiplomski studij elektrotehnike, koji završava 2015. upisuje sveušilišni diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, izborni blok industrijska elektroenergetika DEC na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Slobodno vrijeme voli provoditi s društvom, u teretani i igrajući računalne igrice.

Bruno Lastavica

PRILOG 1 - Podatci o motoru i generatoru

Podatci motora za simulacije

Za simulaciju nereguliranog i reguliranog istosmjernog motora su korišteni podatci u tablici P1.1.

Tab. P1.1: *Podatci istosmjernog motora za simulaciju*

U_n [V]	460	L_a [mH]	72.55
I_n [A]	13	R_f [Ω]	103
n_n [min$^-$1]	1750	J [kgm^2]	0.0215
P_n [kW]	4.95	k_{imj} [V/A]	0.333
$k_{e\Phi}$ [Vs]	2.113	T_{imj} [ms]	1
R_a [Ω]	3.839	τ [ms]	1.667
T_{wmj} [ms]	50	k_{tu}	1
k_{wmj} [Vs]	0.2865		

Natpisne pločice

Istosmjerni motor proizvođača Siemens, čiji su podatci s natpisne pločice prikazani u tablici P1.2.

Tab. P1.2: *Natpisna pločica istosmjernog motora*

V	A	min^{-1}	kW
Armatura			
77 - 460	13 - 13	50 - 1750	0,145 - 4,95
460	13	2250	4,95
Uzbuda			
180	1,2		

Sinkroni generator proizvođača Končar, čiji su podatci dani u tablici P1.3.

Tab. P1.3: *Natpisna pločica sinkronog generatora*

V	A	min^{-1}	kVA	$\cos\varphi$
Armatura				
440/231	11,5/19,9	1500	8	0,8
Uzbuda				
40	1,75			

PRILOG 2 - Specifikacije Siemens Simoreg DC-Master

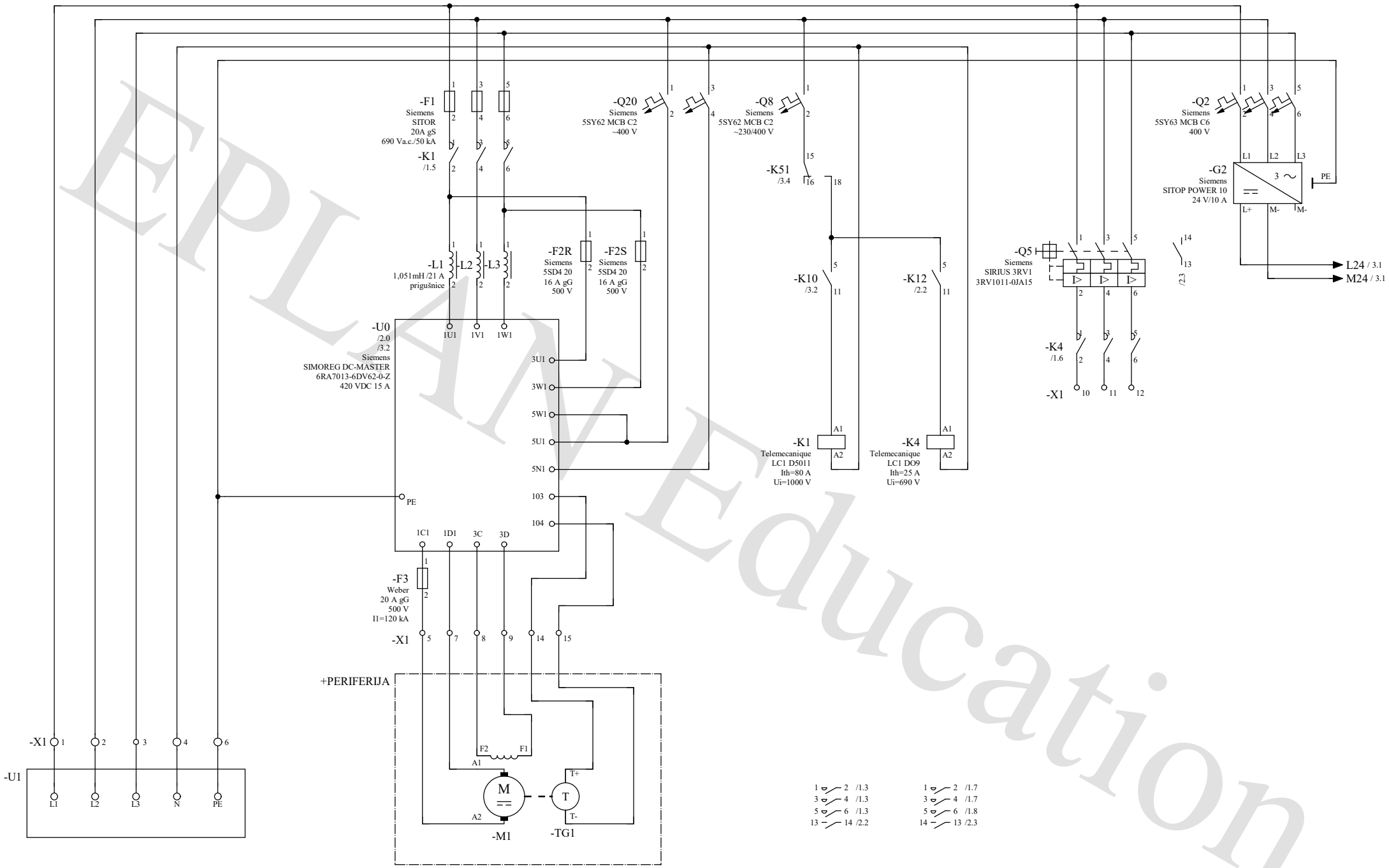
U tablici P2.1 se nalaze specifikacije Simoreg-a koje se mogu pronaći u [10].

Tab. P2.1: *Potpune specifikacije Simoreg-a*

Tip	6RA7013-6DV62
Nazivni ulazni napon armature [V]	3AC 400 $(+15\%/-20\%)$
Nazivna ulazna struja armature [A]	13
Nazivni napon za napajanje elektronike [V]	2AC 380 (-25%) do 460 $(+15\%)$ I_n =1A ili 1AC 190 (-25%) do 230 $(+15\%)$ I_n =2A
Nazivni ulazni napon uzbude [V]	2AC 400 $(+15\%/-20\%)$
Nazivna frekvencija [Hz]	45 do 60
Nazivni DC napon [V]	420
Nazivna DC sturja [A]	15
Kapacitet preopterećenja	maksimalno 180% nazivne DC struje
Nazivna izlazna snaga [kW]	6.3
Gubitci snage pri nazivnoj DC struji [W]	117
Nazivni DC napon uzbude [V]	maksimalno 325
Nazivna DC struja uzbude [A]	3
Radna temperatura okoline [C°]	0 do 45 pri I_n
Temperatura skladištenja i transporta [C°]	-25 do +70
Upravljačka stabilnost	$\Delta n = 0.006\%$ nazivne brzine motora, vrijedi za pulsni enkoder i digitalnu referencu $\Delta n = 0.1\%$ nazivne brzine motora, vrijedi za tahogenerator ili analognu referencu
Ekološka klasa DIN IEC 60 721-3-3	3K3
Stupanj zaštite DIN EN 60529	IP00

PRILOG 3 - Električne sheme

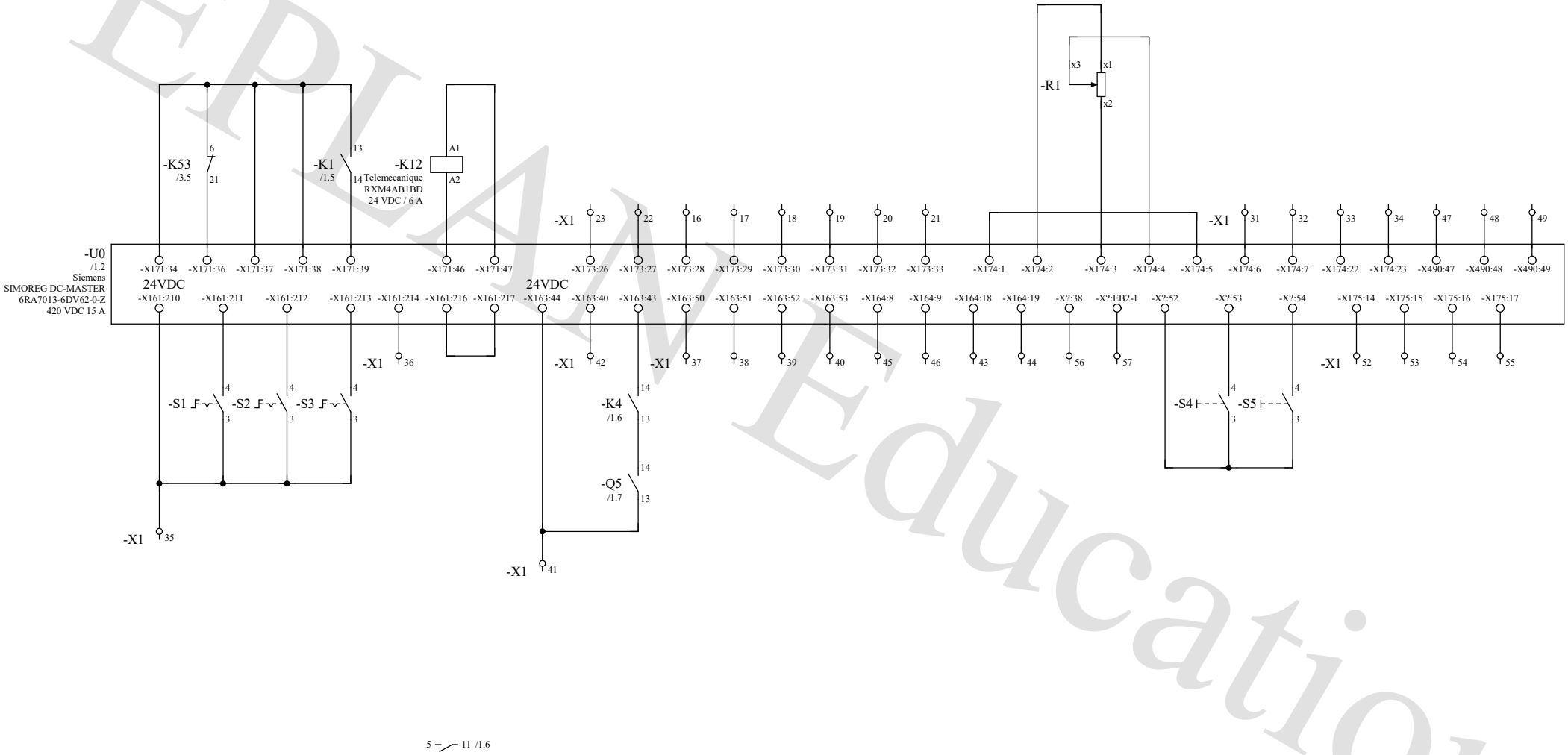
U ovom prilogu su pikazane električne sheme izvedbe reguliranog istosmjernog pogona koje se sastoje od napajanja regulacijskog uređaja i motora, napajanja ispravljača i zavojnica sklopnika, upravljačkog dijela koji na shemama sadrži terminale Simoreg-a, te ostatak upravljačkog dijela. Na kraju je također napravljne dijagram terminala i lista konekcija.
Podatci na osnovu kojih su nacrtane sheme su prikupljani na različite načine. Prikupljani su korištenjem priručnika [10] i ispitivanje spojeva svih kontakata pomoću digitalnog multimetra. Za ispitivanje s multimetrom je bilo potrebno prethodno isključit sve automatske prekidače, povaditi sve rastalne osigurače i releje. Nakon toga je na multimetru postavljeno na područje zvučnog signala, te tako ispitano koji su sve kontakti u spoju. Osim toga su ručno popisani svi dijelovi i oznake koji su korišteni.



EPLAN Education

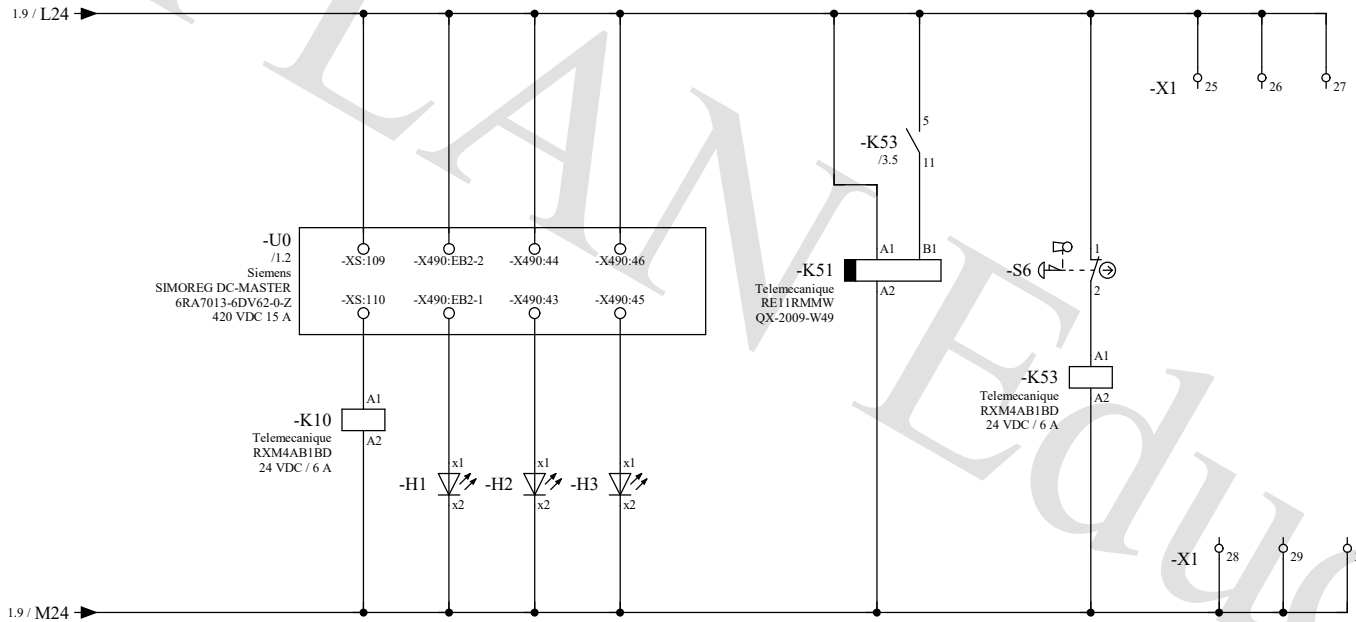
2

			Date	17.9.2017.			Napajanje i motor	= LAB	
			Ed	DIE HARD				+ RO	
			Appr		ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON				
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by		IEC_tpl001	Page 1
									Page 1 / 8



EPLAN Education

			Date	17.9.2017.	ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON		Logika upravljanja/1	= LAB	
			Ed	DIE HARD				+ RO	
			Appr					IEC_tpl001	Page 2
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by			Page 2 / 8



5 — 11 /1.5

18 — 16 — 15 /1.5

5 — 11 /3.4
6 — 21 /2.1

EPLAN Education

2 4

			Date	10.9.2017.			Logika upravljanja/2	= LAB	
			Ed	DIE HARD				+ RO	
			Appr		ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON			IEC_tpl001	Page 3
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by			Page 3 / 8

Terminal diagram

F13_001

Strip

=LAB+RO-X1

Function text	Cable name	Cable type	Target designation	Connection point	Terminal	Jumper	Target designation	Connection point	Cable type	Cable name	Page / column
			L1		1						/1.0
			L2		2						/1.0
			L3		3						/1.1
			N		4						/1.1
			-F3	2	5		+PERIFERIJA-M1	A2			/1.3
			PE		6						/1.1
			-U0	1D1	7		+PERIFERIJA-M1	A1			/1.3
			-U0	3C	8			F2			/1.3
			-U0	3D	9			F1			/1.3
			-K4	2	10						/1.7
			-K4	4	11						/1.7
			-K4	6	12						/1.8
			-U0	103	14		+PERIFERIJA-TG1	T+			/1.3
			-U0	104	15		+PERIFERIJA-TG1	T-			/1.4
24VDC					16		-U0-X173	28			/2.4
=					17		-U0-X173	29			/2.4
=					18		-U0-X173	30			/2.4
=					19		-U0-X173	31			/2.5
=					20		-U0-X173	32			/2.5
=					21		-U0-X173	33			/2.5
=					22		-U0-X173	27			/2.3
=					23		-U0-X173	26			/2.3
					25		-S6	1			/3.6
					26						/3.6
					27						/3.6
			-K53	A2	28						/3.6
					29						/3.6
					30						/3.6
24VDC					31		-U0-X174	6			/2.7
=					32		-U0-X174	7			/2.7
=					33		-U0-X174	22			/2.8
=					34		-U0-X174	23			/2.8
=			-U0-X161	210	35						/2.1
			-S1	3							
24VDC			-U0-X161	214	36						/2.2

EPLAN Education

			Date	16.9.2017.		Terminal diagram =LAB+RO-X1	= LAB
			Ed	DIE HARD			+ RO
			Appr		ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON		IEC_tpl001
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by	

Terminal diagram

F13_001

Strip

=LAB+RO-X1

Function text	Cable name	Cable type	Target designation	Connection point	Terminal	Jumper	Target designation	Connection point	Cable type	Cable name	Page / column
24VDC			-U0-X163	50	37						/2.4
=			-U0-X163	51	38						/2.4
=			-U0-X163	52	39						/2.4
=			-U0-X163	53	40						/2.5
=			-U0-X163	44	41						/2.3
			-Q5	13							
24VDC			-U0-X163	40	42						/2.3
=			-U0-X164	18	43						/2.5
=			-U0-X164	19	44						/2.6
=			-U0-X164	8	45						/2.5
=			-U0-X164	9	46						/2.5
=					47		-U0-X490	47			/2.8
=					48		-U0-X490	48			/2.8
=					49		-U0-X490	49			/2.9
=			-U0-X175	14	52						/2.8
=			-U0-X175	15	53						/2.8
=			-U0-X175	16	54						/2.8
=			-U0-X175	17	55						/2.9
=			-U0-X?	38	56						/2.6
=			-U0-X?	EB2-1	57						/2.6

EPLAN Education

4 5

			Date	16.9.2017.			= LAB
			Ed	DIE HARD			+ RO
			Appr		ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON		
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by	IEC_tpl001

Terminal diagram =LAB+RO-X1

Connection list

F27_001

Connection	Source	Target	Cross-section	Color	Length	Page / column 1	Page / column 2	Function definition
	-F1:3	-X1:2				/1.3	/1.0	Conductor / wire
	-F1:1	-X1:1				/1.3	/1.0	Conductor / wire
	-F1:5	-X1:3				/1.3	/1.1	Conductor / wire
	-L1:2	-U0:1U1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-L2:2	-U0:1V1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-L3:2	-U0:1W1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-F2R:2	-U0:3U1				/1.4	/1.3	Conductor / wire
	-F3:1	-U0:1C1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-U0:5U1	-U0:5W1				/1.3	/1.3	Wire jumper
	-F2S:2	-U0:3W1				/1.4	/1.3	Conductor / wire
	-F1:2	-K1:1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-K1:2	-L1:1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-F1:4	-K1:3				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-K1:4	-L2:1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-F1:6	-K1:5				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-K1:6	-L3:1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-F3:2	-X1:5				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-U0:1D1	-X1:7				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-U0:3C	-X1:8				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-U0:3D	-X1:9				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-U0:103	-X1:14				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-U0:104	-X1:15				/1.3	/1.4	Conductor / wire
	-X1:5	+PERIFERIJA-M1:A2				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-X1:7	+PERIFERIJA-M1:A1				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	F2	-X1:8				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	F1	-X1:9				/1.3	/1.3	Conductor / wire
	-K4:2	-X1:10				/1.7	/1.7	Conductor / wire
	-K4:4	-X1:11				/1.7	/1.7	Conductor / wire
	-K4:6	-X1:12				/1.8	/1.8	Conductor / wire
	-K4:A1	-K12:11				/1.6	/1.6	Conductor / wire
	-F2R:1	-L1:1				/1.4	/1.3	Conductor / wire
	-F2S:1	-L3:1				/1.4	/1.3	Conductor / wire
	-Q20:2	-U0:5W1				/1.4	/1.3	Conductor / wire
	-Q20:4	-U0:5N1				/1.5	/1.3	Conductor / wire
	-F1:3	-Q20:1				/1.3	/1.4	Conductor / wire
	-Q20:3	-X1:4				/1.5	/1.1	Conductor / wire
	-F1:1	-Q5:1				/1.3	/1.7	Conductor / wire
	-F1:5	-Q5:5				/1.3	/1.7	Conductor / wire
	-K4:1	-Q5:2				/1.7	/1.7	Conductor / wire
	-K4:3	-Q5:4				/1.7	/1.7	Conductor / wire
	-K4:5	-Q5:6				/1.8	/1.7	Conductor / wire
	-G2:PE	-X1:6				/1.9	/1.1	Conductor / wire
	-U0:PE	-X1:6				/1.2	/1.1	Conductor / wire
	-K53:21	-U0-X171:36				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-K53:6	-U0-X171:34				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-K53:6	-U0-X171:37				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-U0-X171:37	-U0-X171:38				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-K1:14	-U0-X171:39				/2.2	/2.2	Conductor / wire
	-K1:13	-U0-X171:38				/2.2	/2.1	Conductor / wire
	-K12:A2	-U0-X171:46				/2.2	/2.2	Conductor / wire
	-K12:A1	-U0-X171:47				/2.2	/2.3	Conductor / wire
	-S1:4	-U0-X161:211				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-S2:4	-U0-X161:212				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-S1:3	-S2:3				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-S3:4	-U0-X161:213				/2.2	/2.2	Conductor / wire
	-S2:3	-S3:3				/2.1	/2.2	Conductor / wire
	-U0-X161:210	-X1:35				/2.1	/2.1	Conductor / wire

EPLAN Education

4.a 5.a

			Date	18.9.2017.			= LAB	
			Ed	DIE HARD			+ RO	
			Appr		ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON		IEC_tpl001	Page 5
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by		Page 6 / 8

Connection list : -

Connection list

F27_001

Connection	Source	Target	Cross-section	Color	Length	Page / column 1	Page / column 2	Function definition
	-S1:3	-X1:35				/2.1	/2.1	Conductor / wire
	-U0-X161:214	-X1:36				/2.2	/2.2	Conductor / wire
	-U0-X161:216	-U0-X161:217				/2.2	/2.3	Conductor / wire
	-R1:x2	-U0-X174:3				/2.6	/2.6	Conductor / wire
	-R1:x3	-U0-X174:4				/2.6	/2.6	Conductor / wire
	-U0-X174:1	-U0-X174:5				/2.6	/2.7	Conductor / wire
	-U0-X174:23	-X1:34:35				/2.8	/2.8	Conductor / wire
	-U0-X174:22	-X1:33:35				/2.8	/2.8	Conductor / wire
	-U0-X174:7	-X1:32:35				/2.7	/2.7	Conductor / wire
	-U0-X174:6	-X1:31:35				/2.7	/2.7	Conductor / wire
	-Q5:13	-X1:41				/2.3	/2.3	Conductor / wire
	-K4:13	-Q5:14				/2.3	/2.3	Conductor / wire
	-U0-X164:8	-X1:45				/2.5	/2.5	Conductor / wire
	-U0-X164:9	-X1:46				/2.5	/2.5	Conductor / wire
	-U0-X164:18	-X1:43				/2.5	/2.5	Conductor / wire
	-U0-X164:19	-X1:44				/2.6	/2.6	Conductor / wire
	-U0-X163:44	-X1:41				/2.3	/2.3	Conductor / wire
	-U0-X163:40	-X1:42				/2.3	/2.3	Conductor / wire
	-K4:14	-U0-X163:43				/2.3	/2.3	Conductor / wire
	-U0-X163:50	-X1:37				/2.4	/2.4	Conductor / wire
	-U0-X163:51	-X1:38				/2.4	/2.4	Conductor / wire
	-U0-X163:52	-X1:39				/2.4	/2.4	Conductor / wire
	-U0-X163:53	-X1:40				/2.5	/2.5	Conductor / wire
	-U0-X173:26	-X1:23:35				/2.3	/2.3	Conductor / wire
	-U0-X173:27	-X1:22:35				/2.3	/2.3	Conductor / wire
	-U0-X173:28	-X1:16:35				/2.4	/2.4	Conductor / wire
	-U0-X173:29	-X1:17:35				/2.4	/2.4	Conductor / wire
	-U0-X173:30	-X1:18:35				/2.4	/2.4	Conductor / wire
	-U0-X173:31	-X1:19:35				/2.5	/2.5	Conductor / wire
	-U0-X173:32	-X1:20:35				/2.5	/2.5	Conductor / wire
	-U0-X173:33	-X1:21:35				/2.5	/2.5	Conductor / wire
	-U0-X?:38	-X1:56				/2.6	/2.6	Conductor / wire
	-U0-X?:EB2-1	-X1:57				/2.6	/2.6	Conductor / wire
	-S4:4	-U0-X?:53				/2.7	/2.7	Conductor / wire
	-S4:3	-U0-X?:52				/2.7	/2.7	Conductor / wire
	-S4:3	-S5:3				/2.7	/2.7	Conductor / wire
	-S5:4	-U0-X?:54				/2.7	/2.7	Conductor / wire
	-U0-X175:17	-X1:55				/2.9	/2.9	Conductor / wire
	-U0-X175:16	-X1:54				/2.8	/2.8	Conductor / wire
	-U0-X175:15	-X1:53				/2.8	/2.8	Conductor / wire
	-U0-X175:14	-X1:52				/2.8	/2.8	Conductor / wire
	-R1:x1	-U0-X174:2				/2.6	/2.6	Conductor / wire
	-Q2:1	-Q5:1				/1.8	/1.7	Conductor / wire
	-G2:L1	-Q2:2				/1.8	/1.8	Conductor / wire
	-Q2:3	-Q5:3				/1.8	/1.7	Conductor / wire
	-G2:L2	-Q2:4				/1.8	/1.8	Conductor / wire
	-Q2:5	-Q5:5				/1.9	/1.7	Conductor / wire
	-G2:L3	-Q2:6				/1.8	/1.9	Conductor / wire
	-G2:L+	-U0-XS:109				/1.8	/3.2	Conductor / wire
	-K10:A1	-U0-XS:110				/3.2	/3.2	Conductor / wire
	-G2:M-	-K10:A2				/1.8	/3.2	Conductor / wire
	-U0-X490:47	-X1:47:35				/2.8	/2.8	Conductor / wire
	-U0-X490:48	-X1:48:35				/2.8	/2.8	Conductor / wire
	-U0-X490:49	-X1:49:35				/2.9	/2.9	Conductor / wire
	-H1:x2	-K10:A2				/3.2	/3.2	Conductor / wire
	-H1:x2	-H2:x2				/3.2	/3.3	Conductor / wire
	-H2:x2	-H3:x2				/3.3	/3.3	Conductor / wire

EDA Evaluation

5

5.b

			Date	18.9.2017.		Connection list : -	= LAB
			Ed	DIE HARD			+ RO
			Appr		ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON		IEC_tpl001 Page 5.a
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by	Page 7 / 8

Connection list

F27_001

Connection	Source	Target	Cross-section	Color	Length	Page / column 1	Page / column 2	Function definition
	-H3:x1	-U0-X490:45				/3.3	/3.3	Conductor / wire
	-H2:x1	-U0-X490:43				/3.3	/3.3	Conductor / wire
	-H1:x1	-U0-X490:EB2-1				/3.2	/3.2	Conductor / wire
	-U0-X490:EB2-2	-U0-XS:109				/3.2	/3.2	Conductor / wire
	-U0-X490:44	-U0-X490:EB2-2				/3.3	/3.2	Conductor / wire
	-U0-X490:44	-U0-X490:46				/3.3	/3.3	Conductor / wire
	-H3:x2	-K51:A2				/3.3	/3.4	Conductor / wire
	-K51:15	-Q8:2				/1.5	/1.5	Conductor / wire
	-Q8:1	-Q20:1				/1.5	/1.4	Conductor / wire
	-Q5:3	-Q8:1				/1.7	/1.5	Conductor / wire
	-K10:5	-K51:18				/1.5	/1.5	Conductor / wire
	-K10:5	-K12:5				/1.5	/1.6	Conductor / wire
	-K1:A2	-Q20:3				/1.5	/1.5	Conductor / wire
	-K1:A1	-K10:11				/1.5	/1.5	Conductor / wire
	-K1:A2	-K4:A2				/1.5	/1.6	Conductor / wire
	-K51:B1	-K53:11				/3.4	/3.4	Conductor / wire
	-K51:A1	-U0-X490:46				/3.4	/3.3	Conductor / wire
	-K51:A1	-K53:5				/3.4	/3.4	Conductor / wire
	-K51:A2	-K53:A2				/3.4	/3.5	Conductor / wire
	-K53:5	-S6:1				/3.4	/3.5	Conductor / wire
	-K53:A1	-S6:2				/3.5	/3.5	Conductor / wire
	-S6:1	-X1:25				/3.5	/3.6	Conductor / wire
	-X1:25	-X1:26				/3.6	/3.6	Wire jumper
	-X1:26	-X1:27				/3.6	/3.6	Wire jumper
	-K53:A2	-X1:28				/3.5	/3.6	Conductor / wire
	-X1:28	-X1:29				/3.6	/3.6	Wire jumper
	-X1:29	-X1:30				/3.6	/3.6	Wire jumper
	-X1:14	+PERIFERIJA-TG1:T+				/1.3	/1.4	Conductor / wire
	-X1:15	+PERIFERIJA-TG1:T-				/1.4	/1.4	Conductor / wire
	L1	-X1:1				/1.0	/1.0	Conductor / wire
	L2	-X1:2				/1.0	/1.0	Conductor / wire
	L3	-X1:3				/1.1	/1.1	Conductor / wire
	N	-X1:4				/1.1	/1.1	Conductor / wire
	PE	-X1:6				/1.1	/1.1	Conductor / wire

EPLAN Education

5.a

			Date	18.9.2017.		Connection list : -	= LAB
			Ed	DIE HARD			+ RO
			Appr		ISTOSMJERNI REGULIRANI POGON		IEC_tpl001
Modification	Date	Name	Original		Replacement of	Replaced by	

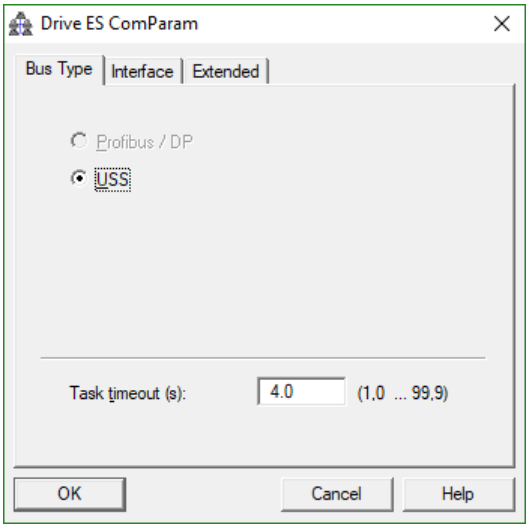
PRILOG 4- Upute za korištenje Simoreg-a i Drive Monitor-a

Ove upute će biti napisanje za lakše korištenje Simoreg-a i njemu srodnog softvera Drive Monitor-a. Kako bi se Simoreg uključio, potrebno je dovesti napajanje njegovoj elektronici preko automatskog prekidača Q20. Zbog lakšeg parametriranja se preporuča da se Simoreg spoji na računalo RS 232 kabela. Prije uspostavljanja komunikacije s računalom je na Simoreg-u potrebno postaviti *baud rate*, kojim će komunicirati s računalom. To se može izvršiti postavljanjem parametra P783. Po defaultu je ta vrijednost postavljena na 6, ali se zbog brže komunikacije s računalom preporuča 7. Postavljanje ovog parametra se na Simoreg-u može izvršiti na preko preko operaterskog panela koji je prikazan na slici P4.1.



Sl. P4.1: *Operaterski panel*

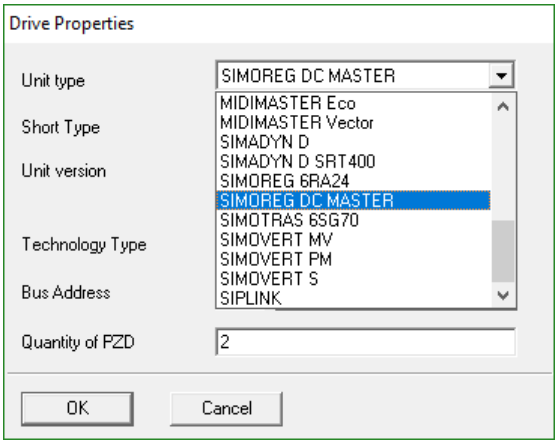
Kako bi se pristupilo RS-232 portu, potrebno je skinuti operaterski panel i priljučiti računalo. Postoji i drugi port koji zahtjeva otvaranje Simoreg-a. Nakon toga se na računalu pristupi programu Drive Monitor. Odabirom na $Tools \rightarrow ONLINE\ settings...$ u padajućem izborniku se otvara prozor na slici P4.2.



Sl. P4.2: *Podešavanje komunikacije*

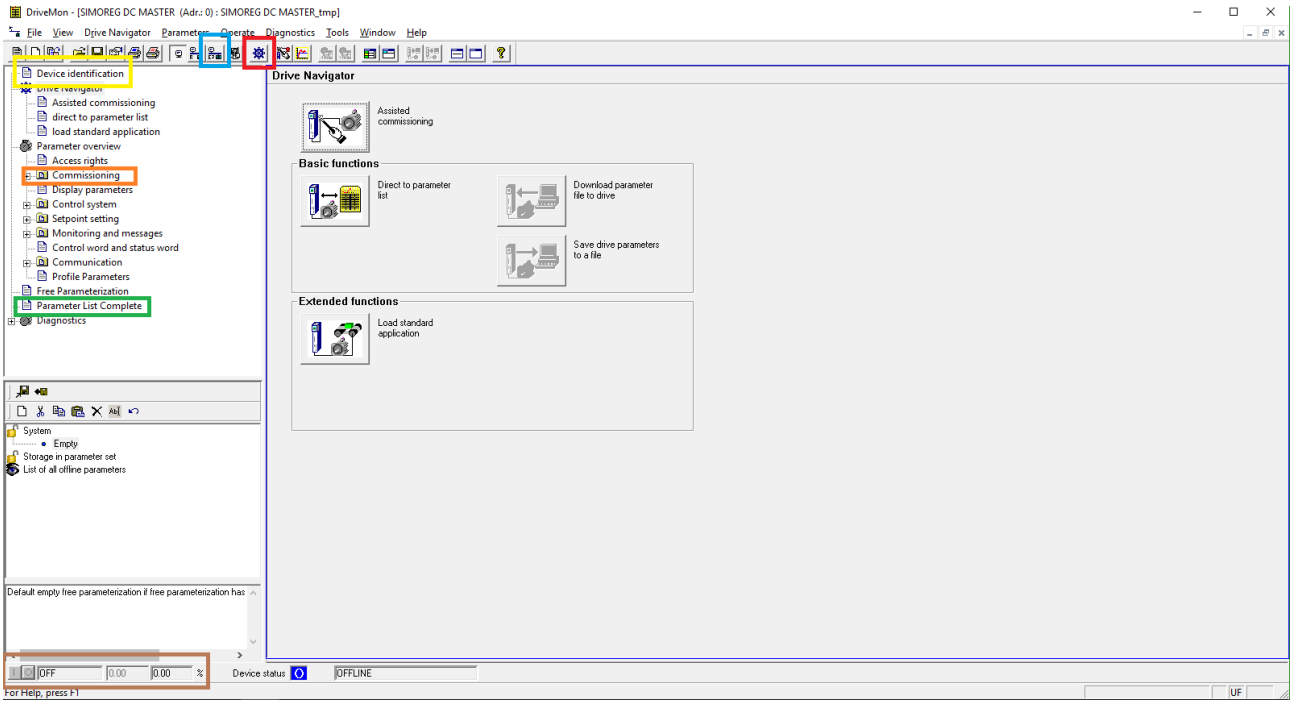
Na prvoj kartici se odabire USS standard, a na drugoj katici $Interface$ se baud rate postavlja na 19200, te ako se Drive Monitor ne poveže sa Simoreg-om, potrebno je promijeniti port (COM 1 ili neki drugi). Nakon toga je potrebno otići na $File \rightarrow Set\ up\ an\ ONLINE\ connection...$ te kliknuti lijevom tipkom miša na start. Ako je postavljanje komunikacije obavljeno kako treba, Drive Monitor bi trebao prepoznati Simoreg, te ukoliko je to slučaj dvostrukim klikom

odabrati Simoreg. Drugi način na koji se također može započeti nova lista parametara je odabirom tvornički postavljene liste parametara. NAPOMENA: ovaj način neće uspjeti ako komunikacija nije ispravno podešena. Može se odabrati padajućeg izbornika *File* → *File* → *Based on factory setting*.... Nakon povezivanja sa Simoreg-om, otvara se prozor na kojem je potrebno odabrati model (Slika P4.3).



Sl. P4.3: *Podešavanje komunikacije*

U padajućem izborniku je potom potrebno odabrati SIMOREG DC MASTER i kliknuti na OK. Nakon ovoga će se otvoriti lista parametara Simoreg-a u korisničkom sučelju Drive Monitor-a (Slika P4.4). Kako bi Drive Monitor prepoznao o kojem modelu Simoreg-a se radi, može se odabrati *Device Identification* unutar žutog pravokutnika. Nakon toga je potrebno provjeriti je li parametar P051 postavljen na vrijednost 40 kojem se može pristupiti odabirom na karticu *Access rights* na lijevoj strani sučelja u dijelu s padajućim karticama. Ako nije postavljena, potrebno je postaviti tu vrijednost.



Sl. P4.4: *Korisničko sučelje Drive Monitor-a*

Na slici je crvenim kvadratićem označena ikona kojom se pristupa $Drive\,Navigator - u.$ čija je svrha lakše snalaženje u Drive Monitor-u. Odabirom $Parameter\,List\,Complete$, označen zelenim pravokutnikom na slici, može se pristupiti listi svih parametara. Ovime je objašnjeno osnovno korištenje Drive Monitor-a.

Parametriranje

U ovom potpoglavlju će biti obrađeno parametriranje Simoreg-a. Unutar njega će biti sadržano parametriranje motora koji se upravlja, te optimizacija regulatora, te podešenja logike upravljanja putem grebenastih sklopki i tipkala koja su ugrađena u upravljački ormar.

Parametriranje motora i optimizacija

Odabirom na karticu $Commissioning \rightarrow Def.\,of\,a\,Motor$ (narančasti pravokutnik na slici P4.4) se može pristupiti listi parametara motora. U parametrima P100 do P103 se definiraju nazivni napon i struja armature, te nazivna i minimalna vrijednost struje uzbude. Parametrima P104 do P108 se definira mehanička karakteristika motora. Ostale parametre će u ovom dijelu Simoreg odrediti putem optimizacija. Prije optimizacije je potrebno prebaciti Drive Monitor u online način rada klikom na ikonu u plavom kvadratiću na slici P4.4. Nakon toga se nakon otvaranja $Drive\,Navigator - a$ odabire $Assisted\,commissioning$ ili odabirom na karticu ispod kartice $DriveNavigator$. Prvo se odabire set podataka funkcijskih dijagrama. Odabire se FDS1 i $Next$. Sljedeći dio je podešenje nazivnih struja pretvarača u kojem se reducira nazivna izlazna struja pretvarača na nazivne struje motora kojim se upravlja. Ovaj korak se može preskočiti ukoliko je zadovoljen uvjet da je omjer nazivna vrijednost struje motora i nazivne vrijednosti struje pretvarača veći od 0.5. Nakon toga slijedi odabir napona kojima će se napajati armaturni i uzbudni krug upravljanog motora. Za vrijednost armaturnog napona se može postaviti nazivna vrijednost napona motora, ali to nije nužno. Za uzbudni napon se isto tako može podesiti, a može se i ostaviti default vrijednost (400 V). Sljedeći korak je određivanje nazivnih podataka motora. Ovaj dio je samoobjašnjen. Temperaturna vremenska konstanta se može ostaviti na 10 min. Nakon toga se odabire mjerni član brzine vrtnje. Ovdje je potrebno provjeriti o kojoj vrsti mjernog člana se radi. Ako je to analogni tahogenerator, onda je potrebno njega odabrati, a ako je to pulsni enkoder, onda njega itd. Kada je izrađivan ovaj diplomski rad, korišten je analogni tahogenerator. Dalje je potrebno unijeti koji tahogenerator daje pri nazivnoj brzini vrtnje. Prilikom izračuna je potrebno paziti na pad napona na kabelima. Preporuča se mjerenje napona na panelu koji tahogenerator daje pri brzini vrtnje na koju se planira motor zavrtiti. Izmjerena vrijednost tog napona je bila 43.75 V. Idući korak je određivanje podataka o uzbudi. Prvo se odabire regulacija polja ovisno o tome što se želi raditi. Preporuča se odabir *The field is switched together with the line contactor*. To znači da će se uzbuda uključivati tek prilikom pokretanja motora, a ne biti u mirovanjo i nakon davanja komande za pokretanje, nakon odabranog kašnjenja uključiti uzbudu kako je postavljeno po defaultu. Može se također odabrati da uzbuda bude konstantno aktivna. Ispod toga se odabire želi li se vršiti rad sa slabljenjem polja ili ne. Ovo je također samoobjašnjeno. Na kraju ovog koraka se odabire napon kojim će se napajati uzbuda. U koraku prije početka optimizacija se postavljaju limiti na struju i moment koji se mogu ostaviti na default vrijednostima, te parametriranje generatora rampe. Tu se podešava vrijeme zaleta i zaustavljanja, i zaokruživanje vrijednosti donjeg i gornjeg dijela prijelazne pojave. Ovime su postavljene osnovne postavke, te je moguće započeti s optimizacijom. Optimizacije se izvode redoslijedom kako su postavljene. U slučaju da nije odabran način rada sa slabljenjem polja, optimizacija za slabljenje polja se može preskočiti. Prije odabira optimizacije, potrebno je kliknuti na *Control via SIMOVIS*, te

se Simoreg potom treba automatski prebaciti u radno stanje o7.1. Ukoliko se dogodi greška prilikom optimizacije, Simoreg će vratit oznaku pogreške koja je, te broj "jake riječi". Alarm se prihvaća i resetira pritiskom na tipku *Reset control*. Ukoliko se greška nije otklonila, potrebno je u priručniku provjeriti o kakvoj se grešci radi, te riješiti taj problem.
Ako se želi ručno postavljati filtre povaratnih veza ili prije ulaska u regulator, to se može obaviti za regulator brzine vrtnje, odabirom na karticu $Control\,system \rightarrow Speed\,controler$. Ovdje se na parametru P200 može postaviti vremenska konstanta filtra povratne veze, a na P228 se može postaviti vremenska konstanta filtra reference. Također se može odabirom kartice $Speed\,limiting\,controller$ podesiti positivni i negativni maksimalni postotak. Ovime je dovršeno parametriranje i optimizacija regulatora.

Postavljanje digitalnih ulaza i izlaza

Kako bi se lakše postavili digitalni ulazi i izlazi, preporuča se korištenje električne sheme upravljačkog dijela sa terminalima Simoreg-a. Tu se može steći uvid na koji terminal su spojene grebenaste sklopke kojima se mogu dodijeliti razne funkcije. Ako se na parametar P654 postavi vrijednost parametra na binektor B40, odnosno Terminal 211, onda će se grebenastoj sklopci S1 dodijeliti funkcija uključenja i isključenja motora. Ovakvom logikom se može i sklopkama S2 i S3, te tipkalima S4 i S5 dodijeliti bilo koja funkcija. Ukoliko se želi dodijeliti neka funkcija sklopci, može se koristiti help pomoću F1, i u kartici *Search* upisati traženi pojam. Help će izbaciti sve vezano za traženi pojam, te parametre koji su vezani za zaj pojam.

PRILOG 5 - MATLAB skripte

MATLAB skripta za određivanje momenta inercije osovniskog sklopa istosmjernog motora i sinkronog generatora

```
close all
clear all
%% podatci
U_a=[40 80 120 160 200 240 280 310 340 370 400 430 460];
I_a=[0.32 0.37 0.40 0.42 0.46 0.50 0.58 0.62 0.66 0.70 0.75 0.85 1.00];
n_mj=[180 352 530 717 893 1070 1250 1380 1511 1633 1772 1911 2042];
R_a=3.839;
%% racunanje
P=(U_a-R_a*I_a).*I_a;
p=polyfit(n_mj,P,2);
load kocenje_nereg.mat
n=n(44940:210500);
a=length(n);
n=n*2042/100;
w=n*pi/30;
t=t(1:a);
% %GENETSKI ALGORITAM KOD
%
% %Parametri genetskog algoritma
%
 DD=[-200 -30 0 ];              %Lower boundry for optimization
 GG=[200 30 1000];              %Upper boudnry for optimization
%
BRv=size(DD,2);                              %Broj varijabli
BRg=500;                                     %Broj generacija
BRj=1250;                                     %Broj jedinki
%
%Generiranje polazne popolacije slucajno:
POPpol=[];
for i=1:BRj
    POPpol=[POPpol;DD+rand(1,size(DD,2)).*(GG-DD)];
end

if BRj<=5
    dod=2;
```

```
else
    dod=1;
end

%Postavke za GA
pos=gaoptimset('Generations',BRg,'InitialPopulation',POPpol,'PopulationSize'...
    ,BRj,'Vectorized','off','UseParallel',true...
    ,'SelectionFcn',{@selectiontournament,round(0.1*BRj)+dod},'CrossoverFcn',...
    {@crossoverscattered},'EliteCount',round(BRj/3));

FV=[];

[RJ,FV,EXf2,IZL2,POP2]=ga(@(par)fun(par,t,w),BRv,[],[],[],[],DD,GG,[],pos);
figure
plot(t,w,'ko')
hold on
x=RJ(1)+RJ(3)*exp(RJ(2)*t);
plot(t,x,'r')

J=p(2)/(RJ(1)*RJ(2));
```

MATLAB skripta funkcije za genetski algoritam

```
function[r]=fun(par,t,ydata)
A=par(1);
B=par(2);
C=par(3);
y=A+C*exp(B*t);
r=sum((y-ydata).^2);
```

MATLAB skripta za određivanje koeficijenta $k_{e\Phi}$ iz mjerenih podataka

```
close all
clear all
%% podatci
U_a=[40 80 120 160 200 240 280 310 340 370 400 430 460];
```

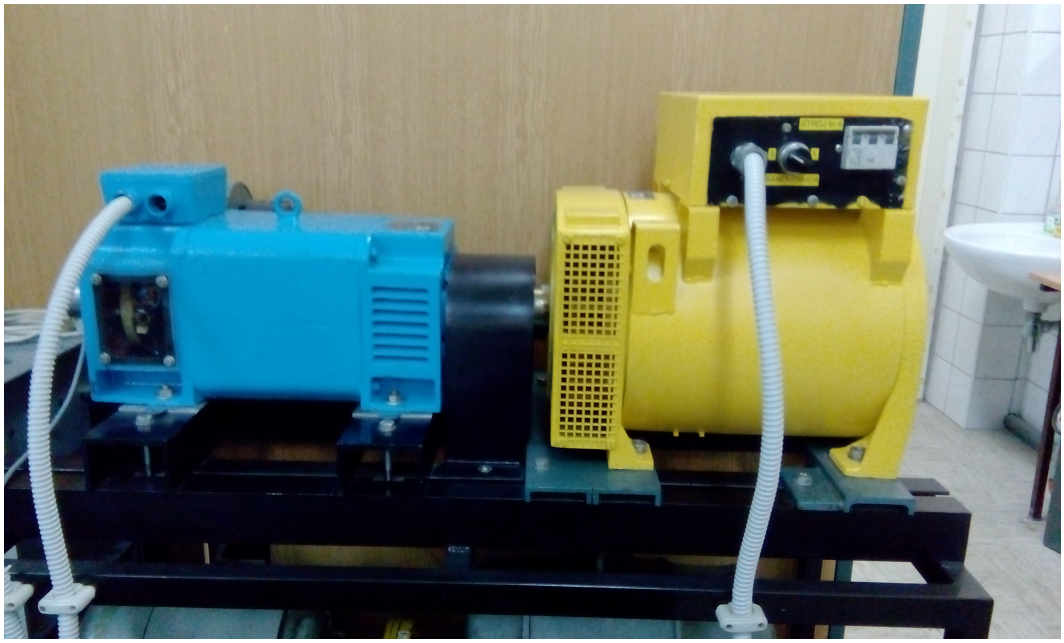
```
I_a=[0.32 0.37 0.40 0.42 0.46 0.50 0.58 0.62 0.66 0.70 0.75 0.85 1.00];
n_mj=[180 352 530 717 893 1070 1250 1380 1511 1633 1772 1911 2042];
R_a=3.839;
%% racunanje
k=(U_a-I_a*R_a)*30/n_mj/pi;
```

MATLAB skripta za određivanje mehaničke snage iz mjerenih podataka

```
close all
clear all
%% podatci
U_a=[40 80 120 160 200 240 280 310 340 370 400 430 460];
I_a=[0.32 0.37 0.40 0.42 0.46 0.50 0.58 0.62 0.66 0.70 0.75 0.85 1.00];
n_mj=[180 352 530 717 893 1070 1250 1380 1511 1633 1772 1911 2042];
R_a=3.839;
%% racunanje
P=(U_a-I_a*R_a).*I_a;
w=n_mj*pi/30;
plot(w,P,'r')
xlabel('\omega [rad/s]');
ylabel('P_{m} [W]');
grid on
```

PRILOG 6 - Izvedba laboratorijskog reguliranog pogona

Na fotografiji P6.1 se nalazi pogon koji je korišten za izradu ovog diplomskog rada. Reguliran je plavi stroj (istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom) na koji je spojen mehanički žuti stroj (sinkroni generator). Na fotografiji P6.2 je prikazana izvedba regulacije pogona, na način da je Simoreg izvedenim žicama sa redne stezaljke spojen na panel na kojem su izvedeni kontakti motora.



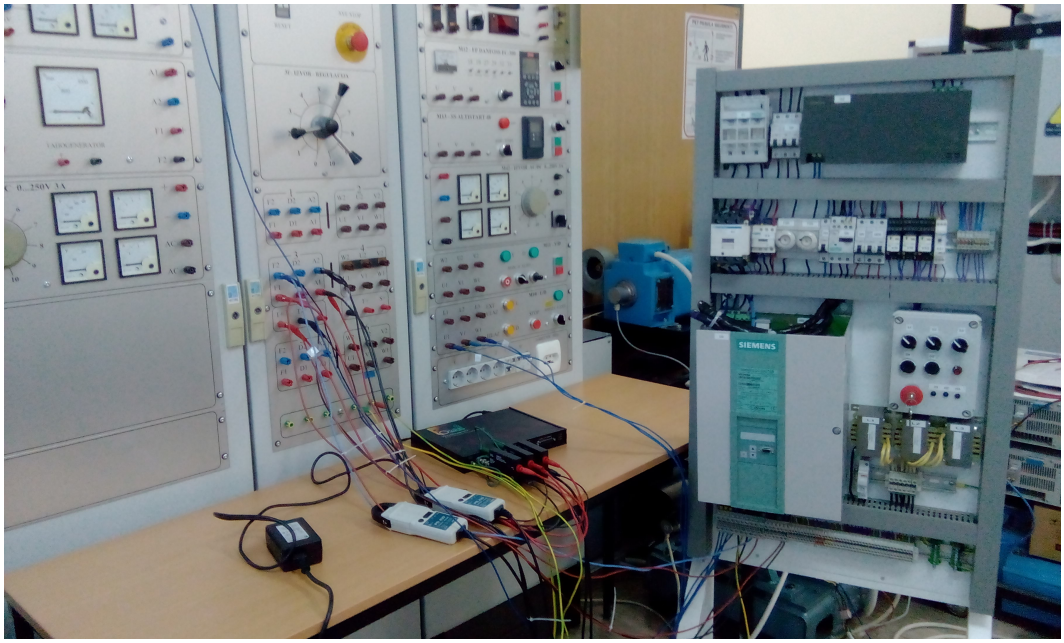
Sl. P6.1: *Izvedba reguliranog pogona*



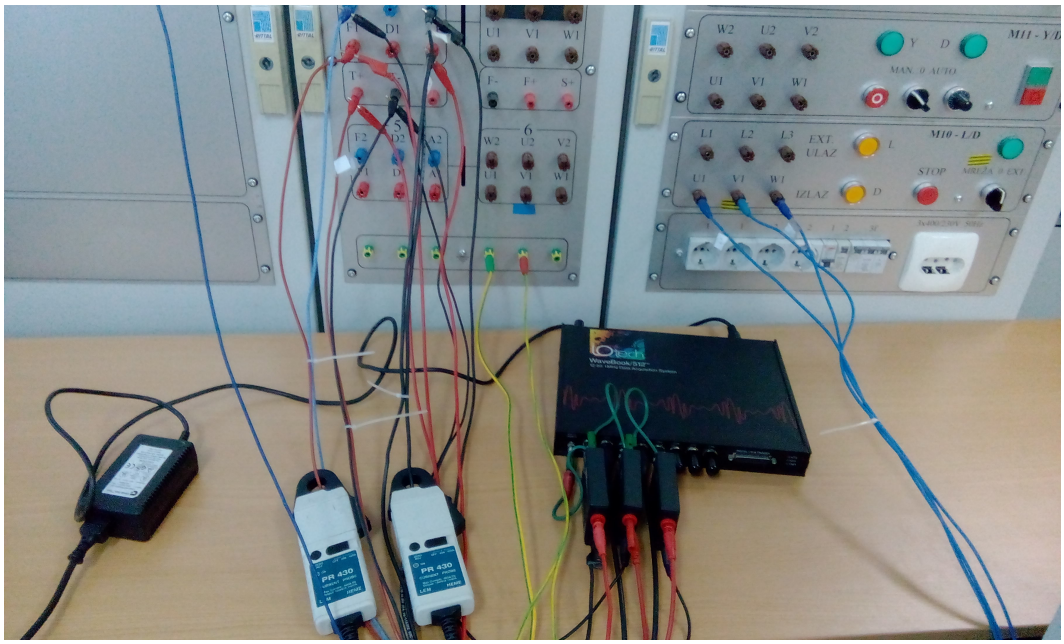
Sl. P6.2: *Simoreg priključen na panel sa izvedenim kontaktima reguliranog motora*

PRILOG 7 - Mjerni postav

Na fotografiji P7.1 je prikazan mjerni postav koji su prikupljani podatci mjerenja. Korišten je sustav za prikupljanje podataka proizvođača IOtech. Na fotografiji P7.2 je dan detaljniji pregled mjernog postava. Korištene su 3 naponske mjerne sodne (2 za napon armature i uzbude i 1 za napon tahogeneratora, odnosno za mjerneje brzine) i 2 strujna mjerna kliješta (struja armature i uzbude). Za skladištenje podataka je korišteno računalo, koje se ne vidi na fotografiji zbog bolje preglednosti mjernog postava.



Sl. P7.1: *Mjerna oprema korištena za prikupljanje podataka*



Sl. P7.2: *Detaljniji prikaz sa korištenim mjernim sondama*