

UNIVERZITET CRNE GORE

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA

MSc Martin Čalasan

**Upravljanje
prekidačkim reluktantnim generatorom
i topologije energetskog pretvarača
za rad u kontinualnom režimu**

- Doktorska disertacija -

Podgorica, 2016. godine

UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

MSc Martin Čalasan

**Control of
Switched Reluctance Generator
and power converter topologies
for Continuous Conduction Mode**

- Doctoral dissertation -

Podgorica, 2016. year

PODACI O DOKTORANDU, MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

PODACI O DOKTORANDU:

Ime i prezime: Martin Čalasan
Datum i mjesto rođenja: 05.10.1986. godine, Plužine, Crna Gora
**Naziv završenog
studijskog programa:** Energetika i Automatika, Industrijska elektrotehnika
Godina završetka: 2009.

MENTOR:

dr Vladan Vujičić, redovni profesor,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

KOMISIJA ZA ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE

Prof. dr Emil Levi,
Liverpool John Moores University,
Faculty of Engineering and Technology, predsjednik

Prof. dr Vladan Vujičić,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, mentor

Prof. dr Gojko Joksimović,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Prof. dr Božo Krstajić,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Prof. dr Saša Mujović,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Datum odbrane: 15. 06. 2017. godine

ZAHVALNICA

Ova doktorska disertacija je urađena na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, pod mentorstvom prof. dr Vladana Vujičića, redovnog profesora ETF-a. Profesoru Vujičiću se najiskrenije zahvaljujem što mi je omogućio da sarađujem sa njim i da se bavim ovom veoma aktuelnom problematikom. Posebno mu dugujem neizmjernu zahvalnost za brojne naučne i stručne savjete, ideje i sugestije tokom izrade ove doktorske disertacije.

Ogromnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima, sestri i bratu na stalnoj i bezrezervnoj podršci, a čija razumijevanja i ohrabrivanja su mi, umnogome, olakšala da završim doktorsku disertaciju.

PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija:	Doktorske studije elektrotehnike Upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom
Naslov doktorske disertacije:	i topologije energetskog pretvarača za rad u kontinualnom režimu
Datum prijave disertacije:	20. oktobar 2011. godine
Ključne riječi:	SRM, SRG, CCM, DCM, bezsenzorsko upravljanje, topologije pretvarača, vjetrogeneratorski sistem
Naučna oblast:	Industrijska elektrotehnika
Uža naučna oblast:	Električne mašine i energetska elektronika

REZIME

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije jeste razvoj novih metoda upravljanja prekidačkim reluktantnim generatorom (*Switched Reluctance Generator* - SRG), pri kontinualnom režimu faznih struja, tj. u kontinualnom režimu provođenja (*Continuous Conduction Mode* - CCM). U disertaciji je predložen modifikovani klasični metod upravljanja SRG-om u CCM-u koji zahtijeva upotrebu klasičnog pretvarača, ali koji, za razliku od postojećih, ne zahtijeva mjerenje fazne struje. Osim toga, u disertaciji su predložena i dva bezsenzorska metoda upravljanja SRG-om. Prvi predloženi metod bezsenzorskog upravljanja SRG-om zahtijeva upotrebu klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera. Strujni kontroler, u zavisnosti od razlike trenutne i referentne vrijednosti fazne struje, vrši uključivanje i isključivanje prekidačkih elemenata u posmatranoj grani pretvarača. Drugi predloženi metod upravljanja podrazumijeva upotrebu novih topologija poluprovodničkog pretvarača. U disertaciji su predložene dvije topologije pretvarača, koje ne sadrže prekidačke elemente već samo diode. Osim simulacionih, u disertaciji su prikazani i rezultati eksperimentalnog ispitivanja rada SRG-a sa predloženim topologijama pretvarača. Takođe, predložena su i rješenja za primjenu svih novih metoda upravljanja SRG-om u vjetrogeneratorskom sistemu.

UDK:

INFORMATION ON DOCTORAL DISSERTATION

Doctoral studies:	Doctoral study of electrical engineering
Dissertation title:	Control of switched reluctance generator and power converter topologies for Continuous Conduction Mode
Date of thesis registration:	20. october 2011. year
Key words:	SRM, SRG, CCM, DCM, sensorless control, converter topologies, windgenerator system
Scientific area:	Industrial electrotechnics
Specific scientific area:	Electrical machines and power electronics

ABSTRACT

The development of new control for Switched Reluctance Generator – SRG, for continuous regime of the phase currents, ie. in Continuous Conduction Mode – CCM, is the subject of research in this doctoral dissertation. In the dissertation the modified classic method for SRG control, which requires the use of classical converter, but which, unlike the existing ones, requires no current sensors, is proposed. In addition, in the dissertation two methods for sensorless control of SRG are proposed. The first proposed SRG sensorless control method requires the usage of classical converter and current controller. Current controller, depending on the difference between current and reference value of the phase current, performs switching on and off power switch elements in the branch that powers the observed phase. The second method for SRG sensorless control implies the use of new converter topologies. Two converter topologies which do not include power switches but only diodes are proposed in the thesis. Besides simulation results, in the thesis the results of the experimental testing of the SRG when it operates with the proposed converter topologies are also presented. Also, proposals for the applications of the proposed SRG control methods in the wind-generator system are presented.

UDK:

Predgovor

Rezultati istraživanja predstavljeni u ovoj doktorskoj disertaciji proistekli su iz višegodišnjeg naučno-istraživačkog rada sprovedenog u okviru **Laboratorije za Energetsku Elektroniku i Specijalne Električne Mašine** na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore.

Osnovnu motivaciju za naučno-istraživački rad u oblasti prekidačkih reluktantnih mašina (engl. *Switched Reluctance Machine* - SRM) predstavljala je činjenica da pomenute električne mašine nalaze sve veći broj primjena u raznim električnim pogonima. Osim toga, broj naučnih radova koji opisuje ovu mašinu je u konstantnom porastu. Pošto ova mašina ima robustnu konstrukciju i visoku efikasnost, posebno su zastupljena istraživanja vezana za njen generatorski režim rada (engl. *Switched Reluctance Generator* - SRG). Međutim, u dosadašnjim istraživanjima vezanim za SRG dominantno je analiziran njen rad u diskontinualnom režimu faznih struja, tj. u diskontinualnom režimu provođenja (engl. *Discontinuous Conduction Mode* - DCM). Ova doktorska disertacija se bavi razvojem novih metoda upravljanja SRG-om pri kontinualnom režimu faznih struja, tj. u kontinualnom režimu provođenja (engl. *Continuous Conduction Mode* - CCM).

Dosadašnja istraživanja rada SRM-a u CCM-u su bila bazirana na analizi motornog režima rada ove mašine. Zbog toga je pravi izazov prilikom izrade ove doktorske disertacije bio da krene u jedno sasvim novo polje naučnog istraživanja – generatorski režim rada SRM-a u CCM-u. Motiv za istraživanje rada SRG-a u CCM-u bili su impresivni rezultati motornog režima rada ove mašine u CCM-u. Naime, pri radu ovog motora u CCM-u postiže se izuzetno povećanje snage i momenta pri velikim brzinama obrtanja. Štaviše, njegove izlazne karakteristike u CCM-u, pri velikim brzinama obrtanja, postaju značajno bolje od karakteristika asinhronog ili sinhronog motora.

Posvećena, istrajna i uporna istraživanja u oblasti analize rada SRG-a u CCM-u sprovedena su u dva pravca, pa je i sama razmatrana problematika ove doktorske disertacije

podijeljena u dvije cjeline. U prvoj, manjoj, cjelini izvršena je analiza rada i predložen novi modifikovani metod klasičnog upravljanja SRG-om u CCM-u (klasično upravljanje podrazumijeva upotrebu senzora pozicije). U drugoj, većoj, cjelini pažnja je posvećena bezsenzorskim metodama upravljanja SRG-om (kod bezsenzorskog upravljanja ne zahtijeva se upotreba senzora pozicije). Konkretno, u disertaciji su predložena dva nova metoda bezsenzorskog upravljanja SRG-om. Po prvom predloženom metodu, bezsenzorsko upravljanje se ostvaruje korišćenjem klasičnog pretvarača i strujnog regulatora, dok se po drugom metodu, bezsenzorsko upravljanje ostvaruje upotrebom neke od novih topologija pretvarača predloženih u disertaciji.

Uzimajući u obzir prethodno navedenu motivaciju za rad i istraživanje, kao i ideju i podsticaj za bavljenje ovim poljem nauke, osim simulacionog ispitivanja, poseban zahtjev i izazov pri izradi disertacije predstavljalo je i eksperimentalno ispitivanje rada SRG-a sa predloženim topologijama pretvarača za rad u CCM-u. Sva istraživanja na odgovarajućoj eksperimentalnoj postavci sprovedena su u gore navedenoj laboratoriji na Elektrotehničkom fakultetu.

Na kraju, naučno-istraživački rad koji je opisan u ovoj disertaciji predstavlja bogatu osnovu za brojna dalja istraživanja u ovoj oblasti. Stoga, ova disertacija predstavlja samo početak budućih istraživanja, usavršavanja i učenja.

U Podgorici, decembar 2016.

Izvod teze

Rad prekidačke reluktantne mašine (engl. *Switched Reluctance Machine* - SRM) pri kontinualnom režimu faznih struja, tj. u kontinualnom režimu provođenja (engl. *Continuous Conduction Mode* – CCM), iako je poznat više od 30 godina, postao je interesantan za ozbiljnija naučna istraživanja tek u posljednjoj deceniji. Međutim, u tim istraživanjima dominantno je analiziran motorni režim rada SRM-a, kao i klasično upravljanje SRM-om (zahtijeva se senzor pozicije). U ovoj doktorskoj disertaciji pažnja je posvećena razvoju novih bezsenzorskih metoda (ne zahtijeva se senzor pozicije) i modifikaciji klasične metoda upravljanja prekidačkim reluktantnim generatorom (engl. *Switched Reluctance Generator* - SRG) pri radu u CCM-u.

Postojeći metodi upravljanja SRM-om pri radu u CCM-u zahtijevaju, osim senzora pozicije, upotrebu strujnih senzora, kao i upotrebu *look-up* tabela kojima se vrši definisanje kontrolnih parametara u funkciji brzine obrtanja i momenta. Za razliku od postojećih metoda, u ovoj doktorskoj disertaciji predložen je modifikovani klasični metod upravljanja SRG-om kod koga se kontrolni uglovi mijenjaju u funkciji brzine obrtanja mašine, dok se regulacija snage ostvaruje promjenom referentne vrijednosti napona međukola. Regulacija jednosmjernog napona međukola, a samim tim i regulacija faznih struja i napona, ostvaruje se upotrebom DC/DC pretvarača. U disertaciji je predloženo rješenje za primjenu predloženog metoda upravljanja SRG-om u vjetrogeneratorskom sistemu. Rezultati simulacija su potvrdili stabilnost i visoku efikasnost SRG-a pri radu u vjetrogeneratorskom sistemu, bez obzira da li se vrši regulacija ugla zakretanja lopatica. Osim toga, analiziran je i uticaj promjene otpornosti namotaja faze na stabilnost cjelokupnog vjetrogeneratorskog sistema. Međutim, i u ovom slučaju pokazana je stabilnost vjetrogeneratorskog sistema, dok je vrijednost izlazne snage generatora veoma blizu optimalne vrijednosti za tu vrijednost brzine vjetra.

Glavni dio ove disertacije posvećen je bezsenzorskim metodama upravljanja SRG-om u CCM-u. Naime, u disertaciji su predložena dva bezsenzorska metoda upravljanja SRG-om. Prvi metod upravljanja podrazumijeva upotrebu klasičnog pretvarača i strujnog (on/off ili histerezisnog) kontrolera. Kod ovog metoda upravljanja SRG-om, uključivanje i isključivanje prekidača u pretvaračkom mostu se vrši u zavisnosti od vrijednosti struje faze, tj. u zavisnosti od toga da li je trenutna vrijednost fazne struje manja ili veća od neke komandne (referentne) vrijednosti. Drugi metod bezsenzorskog upravljanja SRG-om baziran je na upotrebi novih topologija energetskog pretvarača za rad u CCM-u. Naime, u disertaciji su predložene dvije topologije energetskog pretvarača koje ne sadrže upravljive prekidačke elemente, nego samo diode. Primjenom ovih topologija regulacija izlazne snage SRG-a se ostvaruje podešavajući vrijednost napona pobudnog izvora. U radu je pokazano da se pri optimalnom upravljanju SRG-om sa predloženim topologijama pretvarača postiže gotovo ista vrijednost izlazne snage kao i pri optimalnom klasičnom i predloženom bezsenzorskom upravljanju (baziranom na upotrebi strujnog kontrolera). Međutim, u poređenju sa ostalim pretvaračima za napajanje SRG-a, predloženi pretvarači su jeftiniji, robustniji i efikasniji.

U cilju potvrđivanja rada SRG-a sa predloženim topologijama pretvarača, u disertaciji su prikazani i rezultati eksperimentalnog ispitivanja rada korišćenog SRG-a sa predloženim topologijama, kao i njihovo poređenje sa simulacionim rezultatima. Pokazano je izuzetno dobro poklapanje eksperimentalnih i simulacionih rezultata, kako sa stanovišta poređenja izlaznih (snaga-brzina) karakteristika, tako i sa stanovišta poređenja talasnih oblika pojedinih veličina. Svi ti rezultati su pokazali primjenjivost predloženog bezsenzorskog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u, kao i stabilnost i visoku efikasnost rada SRG-a.

Thesis overview

SRM (Switched Reluctance Machine) operation in continuous regime of the phase currents CCM, ie. in Continuous Conduction Mode - CCM, although it has been known for more than 30 years, became popular for serious science investigation in the last decade. However, the investigation has been mostly focused on motor operation as well as on classic control (a position sensor is required). In this doctoral dissertation attention is paid to the development of the new sensorless control methods (no position sensor is required), as well as to an improvement of the classical method for output power control of the SRG (Switched Reluctance Generator).

The existing methods of SRM control in CCM, besides position sensor, require current sensors, as well as the usage of the look-up tables or current-flux-torque dependencies. Unlike existing methods, in this doctoral dissertation the modified classical method for SRG control, in which the control angles vary with speed, while the regulation of power accomplished by changing reference value of the DC link voltage, is proposed. The regulation of the DC link voltage, as well as regulation of the phase voltage and current, is accomplished by using DC/DC converter. In the dissertation an implementation of the proposed control method in the wind-generator system is also proposed. The simulations results confirmed the stability as well as high SRG efficiency when operated in the proposed wind-generator system, regardless of whether pitch angle control is used. Besides that, the impact of the phase resistance change on the wind-generator system stability is also analyzed. However, even in this case, the system stability is exhibited, while the output power is very close to the optimal one for the specific wind speed.

The main part of this dissertation is dedicated to the development of the sensorless control methods for SRG operation in CCM. Namely, in the dissertation two methods for sensorless control of SRG are presented. The first method for SRG control requires the usage of the classic converter and of the current controller (On/Off or

hysteresis controller). In this method, the activation and deactivation of the switches in the converter circuit depends on the value of the phase current i.e. whether the phase current is lower or higher than some command (referent) phase current value. The second method for SRG control is based on the usage of the novel power converter topologies. In the dissertation, two novel converter topologies, which do not require switch elements then only diodes, are proposed. By using these topologies, the SRG output power control can be obtained by changing the excitation voltage. In the dissertation it is shown that the SRG optimal control with proposed converters enables obtaining almost the same power as optimal control when the SRG operates with classic converter in classic control, as well as when it operates with classic converter with the proposed sensorless controls. However, in comparison with the other known converters, the proposed converters are cheaper, more robust and more efficient.

In order to validate the SRG operation with proposed converter topologies, the experimental results as well as its comparison with results obtained by simulations are presented in dissertation. A very good agreement between experimental and simulated result, in terms of output (power-speed) characteristics as well as in terms of waveforms of the certain variables, is shown. All these results show the applicability of the proposed sensorless control of SRG in CCM, as well as stability and high efficiency of SRG.

SADRŽAJ

UVOD	1
------------	---

POGLAVLJE 1

Princip rada i osobine SRM-a	11
------------------------------------	----

1.1 Najvažnije konstrukcijske karakteristike SRM-a	11
1.2 Usaglašena i neusaglašena pozicija rotora SRM-a	12
1.3 Princip rada SRM-a	13
1.4 Kontrolni parametri SRM-a	15
1.5 Naponska jednačina SRM-a	15
1.6 Kontinualni i diskontinualni režim rada SRM-a	17
1.7 Elektromagnetni moment SRM-a	18
1.8 Motorni i generatorski režim rada SRM-a	21
1.9 Promjena smjera obrtanja SRM-a	22
1.10 Klasično upravljanje SRM-om	23
1.11 Eliminacija senzora pozicije	24
1.12 Prednosti i nedostaci pogona sa SRM-om	26

POGLAVLJE 2

Nelinearni modeli za simulaciono utvrđivanje karakteristika SRM-a	28
---	----

2.1 Podjela nelinearnih modela	28
2.2 Modeli zasnovani na upotrebi FEM-a	29
2.3 Modeli zasnovani na matematičkom opisu fluks-struja krivih dobijenih mjerenjem ili upotrebom FEM metoda	29
2.3.1 <i>Ilić-Spong</i> model SRM-a	30
2.3.2 <i>Torrey</i> -ov model SRM-a	30
2.3.3 <i>Chan</i> -ov model SRM-a	31
2.4 Analitički modeli zasnovani na rješavanju jednačina koje opisuju magnetno kolo mašine	32
2.4.1 <i>Radun</i> -ov model SRM-a	32
2.4.2 <i>Miller</i> -ov model SRM-a	34
2.4.3 <i>Vujičić</i> -ev model SRM-a	37

POGLAVLJE 3**Energetski pretvarači za napajanje SRM-a.....42**

3.1	Uopšteno o energetskim pretvaračima za SRM	42
3.2	Klasični pretvarač	43
3.3	<i>Miller</i> -ov pretvarač.....	44
3.4	<i>C-dump</i> pretvarač.....	46
3.5	<i>Buck-Boost</i> pretvarač.....	47
3.6	<i>Sood</i> -ov pretvarač.....	49
3.7	<i>Derishzadeh</i> -ov pretvarač	51
3.8	Poređenje najvažnijih karakteristika pretvarača za napajanje SRM-a.....	53

POGLAVLJE 4**Klasično upravljanje SRG-om – optimalne radne karakteristike u DCM-u i u CCM-u.....56**

4.1	Mehanička karakteristika SRM-a u DCM-u	56
4.2	Region konstantne snage SRM-a	60
4.3	Postupak za utvrđivanje optimalnih vrijednosti kontrolnih parametara SRG-a	61
4.4	Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a.....	63
4.4.1	Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a u DCM-u.....	63
4.4.2	Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a u CCM-u	65
4.5	Poređenje optimalnih karakteristika korišćenog SRG-a u DCM-u i u CCM-u.....	67

POGLAVLJE 5**Modifikovani klasični metod upravljanja SRG-om u CCM-u.....71**

5.1	Kratak osvrt na postojeće metode upravljanja SRM-om u CCM-u	71
5.2	Osnova novog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u baziranog na regulaciji napona jednosmjernog međukola	73
5.3	Novi metod upravljanja SRG-om u CCM-u baziran na regulaciji napona jednosmjernog međukola	76
5.4	Primjena novog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u ostvarenog regulacijom napona međukola u vjetrogeneratorskom sistemu.....	77
5.4.1	Kontrola izlazne snage vjetrogeneratorskih sistema	78
5.4.2	Blok dijagram predloženog vjetrogeneratorskog sistema.....	79

5.4.3	Analiza stabilnosti predloženog vjetrogeneratorskog sistema u slučaju promjene otpornosti namotaja faze SRG-a.....	85
5.4.4	Simulacioni rezultati	87

POGLAVLJE 6

Novi metod upravljanja SRG-om u CCM-u bez upotrebe senzora pozicije.....		93
6.1	Osnova novog metoda za bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u	93
6.2	Novi metod bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u.....	95
6.3	Upotreba klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera za realizaciju novog metoda bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u	100
6.3.1	CCM - On/Off - CC metod upravljanja SRG-om	100
6.3.1.1	Postupak za utvrđivanje optimalne vrijednosti komandne struje kod CCM - On/Off - CC metoda upravljanja SRG-om.....	101
6.3.1.2	Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa CCM - On/Off - CC metodom upravljanja	102
6.3.2	CCM - Hist - CC metod upravljanja SRG-om.....	104
6.3.2.1	Postupak za utvrđivanje optimalnih vrijednosti I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} kod CCM - Hist - CC metoda upravljanja SRG-om.....	105
6.3.2.2	Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa CCM - Hist - CC metodom upravljanja	107
6.3.3	Poređenje izlaznih karakteristika SRG-a u CCM-u, u DCM-u i pri CCM - On/Off - CC i CCM - Hist - CC upravljanjima.....	109
6.3.4	Primjena novog bezsenzorskog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u, realizovanog upotrebom klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera, u vjetrogeneratorskom sistemu.....	111
6.3.4.1	Blok dijagram predloženog vjetrogeneratorskog sistema.....	115
6.3.4.2	Simulacioni rezultati	116
6.4	Nove topologije energetskog pretvarača za realizaciju bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u.....	119
6.4.1	PCT1.....	120
6.4.1.1	Postupak za utvrđivanje optimalne vrijednosti pobudnog napona pri radu SRG-a sa PCT1.....	122
6.4.1.2	Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa PCT1.....	123
6.4.1.3	Karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa PCT1 u slučaju konstantne vrijednosti pobudnog napona.....	126
6.4.2	PCT2.....	128
6.4.2.1	Postupak za utvrđivanje optimalne vrijednosti pobudnog napona pri radu SRG-a sa PCT2.....	130
6.4.2.2	Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa PCT2.....	131
6.4.2.3	Karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa PCT1 u slučaju konstantne vrijednosti pobudnog napona.....	133
6.4.3	Poređenje optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a u CCM-u, u DCM-u i pri radu sa PCT1 i PCT2	135

6.4.4	Poređenje optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a u CCM-u, u DCM-u, pri CCM - On/Off – CC i CCM - Hist – CC upravljanjima i pri radu sa PCT1 i PCT2	137
6.4.5	Kvantitativno poređenje predloženih topologija pretvarača sa klasičnim, <i>C-dump</i> , <i>Buck-Boost</i> , <i>Miller</i> -ovim, <i>Sood</i> -ovim i <i>Derishzadeh</i> -ovim pretvaračem.....	140
6.4.6	Primjena novog bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u, realizovanog upotrebom novih topologija energetskog pretvarača, u vjetrogeneratorskom sistemu.....	141
6.4.6.1	Blok dijagram predloženog vjetrogeneratorskog sistema povezanog sa DC mrežom	143
6.4.6.2	Simulacioni rezultati	145
POGLAVLJE 7		
Eksperimentalni rezultati		148
7.1	Eksperimentalna postavka	148
7.2	Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje	150
7.3	Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a dobijeni primjenom novih topologija energetskih pretvarača	152
7.3.1	Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a dobijeni primjenom PCT1.....	152
7.3.2	Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a dobijeni primjenom PCT2.....	161
ZAKLJUČAK		165
LITERATURA		170
PRILOG A		
Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u		180
PRILOG B		
Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u.....		183
PRILOG C		
Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri CCM - On/Off - CC metodu upravljanja.....		187
PRILOG D		
Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri CCM - Hist - CC metodu upravljanja.....		189
PRILOG E		
Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača		191
PRILOG F		
Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača		195

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Poprečni presjek 6/4 SRM-a.	11
Slika 1.2 Trofazni SRM. a) Usaglašena i b) Neusaglašena pozicija za par polova P_1 i P_2	13
Slika 1.3 Zavisnost induktivnosti jedne faze motora od međusobnog položaja rotora i statora 6/4 SRM-a. a) Jednaka širina statorskih i rotorskih polova. b) Širina polova rotora je veća od širine polova statora.	13
Slika 1.4 Princip rada SRM-a. a) Krajnji položaj rotora pri napajanju faze A. b) Krajnji položaj rotora pri napajanju faze B.	14
Slika 1.5 Tipične zavisnosti obuhvatnog fluksa od struje za različite pozicije rotora.	16
Slika 1.6 Ekvivalentno električno kolo jedne faze SRM-a.	17
Slika 1.7 a) Diskontinualni i b) Kontinualni režim fazne struje.	17
Slika 1.8 Magnetna energija i koenergija za određeni položaj rotora SRM-a.	19
Slika 1.9 Grafička predstava oblasti motornog i generatorskog režima rada SRM-a.	21
Slika 1.10 Idealizovani oblik induktivnosti i fazne struje SRM-a za a) Motorni i b) Generatorski režim rada u DCM-u.	22
Slika 1.11 Nekoliko pozicija rotora prekidačkog reluktantnog motora pri obrtanju u smjeru: a) kazaljke na satu i b) suprotnom od smjera obrtanja kazaljke na satu.	23
Slika 1.12 Blok šema upravljanja SRM-om primjenom strujne regulacije.	24
Slika 1.13 Blok šema upravljanja SRM-om primjenom naponske regulacije.	24
Slika 2.1 Međusobni položaj polova rotora i statora, sa oznakama bitnim za <i>Radun</i> -ov model SRM-a.	33
Slika 2.2 Određivanje fluksa u intervalu kada postoji djelimično preklapanje polova statora i rotora.	33
Slika 2.3 Fluks-struja i fluks-pozicija karakteristike SRM-a. a) Usaglašena i neusaglašena fluks- struja zavisnost. b) Oblik fluks-pozicija ($\Phi-\theta$) krive za konstantnu vrijednost struju.	35
Slika 2.4 Podjela oblasti sa reluktansom R_{oek} na tri podoblasti.	39
Slika 2.5 Izmjerene i simulirane karakteristike posmatranog SRM-a. (a) Krive magnećenja. (b) Statičke krive momenta (45° odgovara necentriranoj poziciji, a 90° centriranoj poziciji).	41
Slika 3.1 Klasični pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.	43
Slika 3.2 a) Magnetizacija faze, b) <i>Hard chopping</i> i c) <i>Soft chopping</i> tehnika kod klasičnog pretvarača za napajanje SRM-a.	43
Slika 3.3 <i>Miller</i> -ov pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.	45
Slika 3.4. a) Magnetizacija faze, b) <i>Soft chopping</i> i c) <i>Hard chopping</i> tehnika kod <i>Miller</i> -ovog pretvarača za napajanje SRM-a.	45
Slika 3.5 <i>C-dump</i> pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.	46
Slika 3.6. a) Magnetizacija faze, b) Demagnetizacija faze sa uključenim prekidačem <i>Buck</i> čopera i c) Demagnetizacija faze sa isključenim prekidačem <i>Buck</i> čopera kod <i>C-dump</i> pretvarača za napajanje SRM-a.	47
Slika 3.7 <i>Buck-Boost</i> pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.	48
Slika 3.8. a) Magnetizacija faze, b) Demagnetizacija faze sa uključenim prekidačem <i>Buck-Boost</i> čopera i c) Demagnetizacija faze sa isključenim prekidačem <i>Buck-Boost</i> čopera kod <i>Buck-Boost</i> pretvarača za napajanje SRM-a.	48

Slika 3.9 <i>Sood</i> -ov pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.....	50
Slika 3.10. a) Magnetizacija faze preko ulaznog napona, b) Magnetizacija faze preko napona kondenzatora, c) Režim održavanje struje faze i d) Demagnetizacija faze preko kondenzatora kod <i>Sood</i> -ovog pretvarača za napajanje SRM-a.....	50
Slika 3.11 <i>Derishzadeh</i> -ov pretvarač za napajanje SRM-a.....	51
Slika 3.12 a) Magnetizacija faze, b) Demagnetizacija faze i c) Kratak spoj faze preko grane magnećenja kod <i>Derishzadeh</i> -ovog pretvarača za napajanje SRM-a.....	52
Slika 4.1 Mehanička karakteristika SRM-a u DCM-u.....	57
Slika 4.2 Talasni oblik fazne struje, napona, fluksa, momenta i kontrolnog signala SRG-a u zoni konstantnog momenta za idealizovan oblik induktivnosti.....	58
Slika 4.3 Talasni oblik fazne struje, napona, fluksa, momenta i kontrolnog signala SRG-a u zoni konstantne snage za idealizovan oblik induktivnosti.....	59
Slika 4.4 Talasni oblik fazne struje, napona, fluksa, momenta i kontrolnog signala SRG-a u zoni prirodne karakteristike SRM-a za idealizovan oblik induktivnosti.....	59
Slika 4.5 Mehaničke karakteristike SRM-a u DCM-u i u CCM-u.....	60
Slika 4.6 Algoritam za optimizaciju kontrolnih parametara SRG-a.....	62
Slika 4.7 Rezultati optimizacije rada SRG-a u DCM-u ($V_{dc_potr}=270V$; $I_{ef_ref}=2A$ - zvjezdica, $I_{ef_ref}=1.75A$ - kružić i $I_{ef_ref}=1.5A$ - kvadratić).....	64
Slika 4.8 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova ($n=8000ob/min$; $V_{dc_potr}=270V$; $I_{ef}=2A$ - puna linija, $I_{ef}=1.75A$ - crta-crta linija i $I_{ef}=1.5A$ - tačka-tačka linija).....	65
Slika 4.9 Rezultati optimizacije rada SRG-a u CCM-u ($V_{dc_potr}=270V$; $I_{ef_ref}=2A$ - zvjezdica, $I_{ef_ref}=1.75A$ - kružić i $I_{ef_ref}=1.5A$ - kvadratić).....	66
Slika 4.10 Simulacioni rezultati rada SRG-a u CCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova ($n=10000ob/min$; $V_{dc_potr}=270V$; $I_{ef}=2A$ - puna linija, $I_{ef}=1.75A$ - crta-crta linija i $I_{ef}=1.5A$ - tačka-tačka linija).....	66
Slika 4.11 Optimalne $\theta_{on} - n$ i $\theta_{off} - n$ karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).....	67
Slika 4.12 Optimalne $P-n$ karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).....	68
Slika 4.13 Optimalne $M-n$ karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).....	68
Slika 4.14 Optimalne $\eta-n$ karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).....	69
Slika 4.15 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u i u CCM-u, za optimizovane vrijednosti kontrolnih uglova ($n=10000ob/min$, $V_{dc_potr}=270V$, $I_{ef}=2A$).....	69
Slika 4.16 Fluks-struja petlje SRG-a u DCM-u i u CCM-u, za optimizovane vrijednosti kontrolnih uglova ($n=10000ob/min$, $V_{dc_potr}=270V$, $I_{ef}=2A$).....	70
Slika 5.1 Blok dijagram kontrole brzine SRM-a pri radu u CCM-u [64-65].....	72
Slika 5.2 Blok dijagram kontrole momenta SRM-a pri radu u CCM-u [66-67].....	72
Slika 5.3 Šema povezivanja SRM-a, energetskog pretvarača, DC/DC pretvarača i DC mreže.....	73
Slika 5.4 Optimalne $\theta_{on} - n$, $\theta_{off} - n$ i $P_{meh} - n$ karakteristike SRG-a u CCM-u za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref}	74
Slika 5.5 Simulacioni rezultati rada SRG-a u CCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} ($n=10000ob/min$).....	75

Slika 5.6	Fluks-struja petlje SRG-a u CCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} ($n=10000ob/min$).....	75
Slika 5.7	Optimalne i aproksimativne a) $\theta_{on} - n$, $\theta_{off} - n$ i b) $P_{meh} - n$ karakteristike SRG-a u CCM-u za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref}	76
Slika 5.8	Blok dijagram modifikovanog klasičnog upravljanja SRG-om u CCM-u.	77
Slika 5.9	Karakteristike vjetroturbine. (a) Izlazna snaga turbine u funkciji brzine turbine za razne brzine vjetra. (b) Izlazna snaga turbine u funkciji brzine turbine.....	79
Slika 5.10	Vjetrogeneratorski sistem sa predloženim modifikovanim klasičnim upravljanjem SRG-om u CCM-u [130]. a) Konfiguracija Sistema. b) Kontrolni blok dijagram.	80
Slika 5.11	Definisanje referentne vrijednosti mehaničke snage (P_{meh}^*).....	82
Slika 5.12	a) Proračunate zavisnosti P_{opt} , n_{opt} , k_1 i k_2 u funkciji brzine vjetra.	84
Slika 5.13	Mehanička snaga i brzina u slučaju kada je otpornost namotaja faze a) Jednaka nominalnoj vrijednosti, b) Veća od nominalne vrijednosti i c) Manja od nominalne vrijednosti.....	86
Slika 5.14	Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I dobijeni primjenom predloženog modifikovanog klasičnog upravljanja.....	88
Slika 5.15	Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, dobijeni primjenom predloženog modifikovanog klasičnog upravljanja.	89
Slika 5.16	Uticaj povećanja i smanjenja otpornosti namotaja faze na $P_{meh} - n$ karakteristike,.....	90
Slika 5.17	Dinamički odziv vjetrogeneratorskog sistema izazvan trenutnim promjenama otpornosti namotaja faze ($v_w=8m/s$).	91
Slika 6.1	a) V-C generator [131]. b) Šema povezivanja V-C generatora sa potrošačem. c) Pobuđivanje V-C generatora. d) Napajanje potrošača V-C generatora.	94
Slika 6.2	Objašnjenje novog bezsenzorskog metoda upravljanja SRG-om [129]. a) Prosto kolo. b) Talasni oblici idealizovane induktivnosti, fazne struje, struje potrošača i napona potrošača. c) Obuhvatna fluks – struja petlja.....	96
Slika 6.3	Rezultati simulacije rada SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje ($n=10000ob/min$, $I_{dc}=1.05A$, $V_{dc_potr}=270V$).....	99
Slika 6.4	Bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u koristeći On/Off strujni kontroler [129].	100
Slika 6.5	Algoritam za optimizaciju komandne struje I_{dc} kod CCM - On/Off - CC metoda upravljanja SRG-om.....	102
Slika 6.6	Optimalne $I_{dc_kom} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef}	103
Slika 6.7	Simulacioni rezultati rada SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} ($n=10000ob/min$).....	104
Slika 6.8	Bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u koristeći histerezisni strujni kontroler. (a) Histerezisno upravljanje. b) Blok dijagram. (c) Fluks struja petlja.	105
Slika 6.9	Algoritam za optimizaciju I_{dc_kom} i ΔI_{dc_kom} kod CCM - Hist - CC metoda upravljanja SRG-om.	106
Slika 6.10	Optimalne $I_{dc_kom} - n$, $\Delta I_{dc_kom} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri CCM – Hist - CC upravljanju, za razne efektivne vrijednosti fazne struje i vrijednosti napona međukola.	107
Slika 6.11	Simulacioni rezultati rada SRG-a pri CCM – Hist - CC upravljanju, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} ($n=10000ob/min$).....	108

Slika 6.12 Optimalne $P - n$ i $\eta - n$ karakteristike SRG-a u DCM-u, CCM-u i pri CCM – On/off – CC i CCM – Hist – CC upravljanju ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$).....	110
Slika 6.13 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u, CCM-u i pri CCM – On/off – CC i CCM – Hist – CC upravljanju ($n=10000ob/min$, $I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$).....	111
Slika 6.14 Optimalne i aproksimativne $I_{dc_kom} - n$ i $P_{meh} - n$ karakteristike SRG-a pri CCM – On/Off - CC upravljanju, za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref}	113
Slika 6.15 Optimalne i aproksimativne $I_{dc_kom} - n$, $\Delta I_{dc_kom} - n$ i $P_{meh} - n$ karakteristike SRG-a pri CCM – Hist - CC upravljanju, za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref}	113
Slika 6.16 Blok dijagram bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u realizovanog upotrebom klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera.....	114
Slika 6.17 Konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema sa SRG-om pri bezsenzorskom upravljanju sa strujnim kontrolerom.....	115
Slika 6.18 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I dobijeni primjenom CCM - On/Off - CC upravljanja.....	116
Slika 6.19 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, dobijeni primjenom CCM - On/Off - CC upravljanja.	117
Slika 6.20 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I dobijeni primjenom CCM - Hist - CC upravljanja.	118
Slika 6.21 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, dobijeni primjenom CCM - Hist - CC upravljanja.....	119
Slika 6.22 PCT1 pretvarač [129]. a) Šema povezivanja. b) Magnetizacija faze. c) Generisanje energije. d) Povezivanje SRG-a na DC mrežu.....	120
Slika 6.23 Simulacioni rezultati rada SRG-a sa PCT1 ($n=10000ob/min$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p \rightarrow \infty$, $I_{dc}=1.35A$).....	122
Slika 6.24 Algoritam za optimizaciju pobudnog napona SRG-a pri radu sa PCT1.....	123
Slika 6.25 Optimalne $I_{dc} - n$, $V_{dc} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref}	124
Slika 6.26 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=10000ob/min$; $L_p \rightarrow \infty$; $I_{ef}=2A$ i $V_{dc_mk}=270V$ - puna linija; $I_{ef}=1.5A$ i $V_{dc_mk}=202.5V$ - crta-tačka-crta linija; $I_{ef}=1A$ i $V_{dc_mk}=135V$ - crta-crta linija).	125
Slika 6.27 Optimalne $V_{dc} - n$ i $P - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korišćenog kalema u kolu pobude ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$).....	125
Slika 6.28 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korišćenog kalema u kolu pobude ($n=10000ob/min$; $I_{ef}=2A$; $V_{dc_mk}=270V$; $L_p \rightarrow \infty$ - puna linija, $L_p=450mH$ - crta-tačka-crta linija, $L_p=300mH$ - crta-crta linija i $L_p=150mH$ - tačka-tačka linija).	126
Slika 6.29 $V_{dc} - n$, $P - n$ i $I_{ef} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za optimizovanu i konstantnu vrijednost napona pobude ($V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$).....	127
Slika 6.30 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za optimizovanu (puna linija) i konstantnu (isprekidana linija) vrijednost napona pobude ($n=10000ob/min$, $I_{ef}=2A$, $L_p=450mH$, $V_{dc_mk}=270V$).....	128
Slika 6.31 PCT2 pretvarač [129]. a) Šema povezivanja. b) Povezivanje SRG-a na DC mrežu.....	129

Slika 6.32 Simulacioni rezultati rada SRG-a sa PCT2 ($n=10000\text{ob/min}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$, $L_p \rightarrow \infty$, $I_{dc}=1.35\text{A}$).	129
Slika 6.33 Algoritam za optimizaciju pobudnog napona SRG-a pri radu sa PCT2.	130
Slika 6.34 Optimalne $I_{dc} - n$, $V_{dc} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref}	131
Slika 6.35 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($n=10000\text{ob/min}$; $I_{ef}=2\text{A}$ i $V_{dc_mk}=270\text{V}$ - puna linija; $I_{ef}=1.5\text{A}$ i $V_{dc_mk}=202.5\text{V}$ - crta-tačka-crta linija; $I_{ef}=1\text{A}$ i $V_{dc_mk}=135\text{V}$ - crta-crta linija).	132
Slika 6.36 Optimalne $V_{dc} - n$ i $P - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korišćenog kalema u kolu pobude ($I_{ef}=2\text{A}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).	133
Slika 6.37 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korišćenog kalema u kolu pobude ($n=10000\text{ob/min}$; $I_{ef}=2\text{A}$; $V_{dc_mk}=270\text{V}$; $L_p \rightarrow \infty$ - puna linija, $L_p=450\text{mH}$ - crta-tačka-crta linija, $L_p=300\text{mH}$ - crta-crta linija i $L_p=150\text{mH}$ - tačka-tačka linija).	133
Slika 6.38 $V_{dc} - n$, $P - n$ i $I_{ef} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za optimizovanu i konstantnu vrijednost napona pobude ($V_{dc_mk}=270\text{V}$, $L_p=450\text{mH}$).	134
Slika 6.39 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za optimizovanu (puna linija) i konstantnu (isprekidana linija) vrijednost napona pobude ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{ef}=2\text{A}$, $L_p=450\text{mH}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).	134
Slika 6.40 Optimalne $P - n$ i $\eta - n$ karakteristike SRG-a u DCM-u, u CCM-u i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($I_{ef}=2\text{A}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$, $L_p \rightarrow \infty$).	136
Slika 6.41 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u, u CCM-u i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{ef}=2\text{A}$, $L_p \rightarrow \infty$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).	137
Slika 6.42 Optimalne $P - n$ i $\eta - n$ karakteristike SRG-a u DCM-u, u CCM-u, pri CCM – On/Off – CC upravljanju, pri CCM – Hist – CC upravljanju i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($I_{ef}=2\text{A}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$, $L_p \rightarrow \infty$).	138
Slika 6.43 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u, u CCM-u, pri CCM – On/Off – CC upravljanju, pri CCM – Hist – CC upravljanju i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{ef}=2\text{A}$, $L_p \rightarrow \infty$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).	139
Slika 6.44 Optimalne i aproksimativne $P_{meh} - n$ i $I_{dc} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref} ($L_p \rightarrow \infty$).	142
Slika 6.45 Konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema sa SRG-om pri upotrebi PCT1 pretvarača, povezanog na DC mrežu.	143
Slika 6.46 Konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema, povezanog na DC mrežu, sa SRG-om pri upotrebi PCT2 pretvarača.	144
Slika 6.47 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I pri upotrebi PCT1 pretvarača.	146
Slika 6.48 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, pri upotrebi PCT1 pretvarača.	147
Slika 7.1 Izgled eksperimentalne postavke.	149
Slika 7.2 Blok dijagram eksperimentalne postavke.	149
Slika 7.3 Izgled korišćenog 4-kanalnog analizatora.	150

Slika 7.4 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje ($n=7500\text{ob/min}$, $V_{dc}=5\text{V}$, $R_{pot}=100\Omega$, $L_p=146\text{mH}$).....	151
Slika 7.5 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje ($n=9375\text{ob/min}$, $V_{dc}=5\text{V}$, $R_{pot}=100\Omega$, $L_p=146\text{mH}$).....	151
Slika 7.6 $P - n$, $V_{dc} - n$, $I_{dc-sr} - n$ i $I_{potr-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić.....	154
Slika 7.7 $P - n$ i $V_{dc} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić, za različite vrijednosti induktivnosti ($V_{dc_potr}=135\text{V}$; $I_{ef}=1\text{A}$; $L_p=345\text{mH}$ - tačka-tačka linija, $L_p=220\text{mH}$ - puna linija i $L_p=145\text{mH}$ - crta-crta linija).....	154
Slika 7.8 $P - n$ i $I_{dc-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($V_{dc}=15\text{V}$; $L_p=345\text{mH}$; $R_{pot}=100\Omega$ - crta-crta linija, $R_{pot}=300\Omega$ - tačka-tačka linija).....	155
Slika 7.9 $P - n$ i $I_{dc-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($R_{pot}=200\Omega$; $L_p=345\text{mH}$; $V_{dc}=15\text{V}$ - tačka-tačka linija i $V_{dc}=20\text{V}$ - crta-crta linija).....	155
Slika 7.10 $P - n$, $I_{dc-sr} - n$ i $I_{potr-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($L_p=345\text{mH}$; $V_{dc}=10\text{V}$ i $U_{ef}=100\text{V}$ - crta-crta linija, $V_{dc}=15\text{V}$ i $U_{ef}=150\text{V}$ - crta-tačka-crta linija i $V_{dc}=20\text{V}$ i $U_{ef}=200\text{V}$ - puna linija).....	156
Slika 7.11 $P - n$ i $I_{dc-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($V_{dc_potr}=75\text{V}$ i $I_{dc-sr}=0.75\text{A}$ - crta-crta linija, $V_{dc_potr}=100\text{V}$ i $I_{dc-sr}=1\text{A}$ - crta-tačka-crta linija, $V_{dc_potr}=125\text{V}$ i $I_{dc-sr}=1.25\text{A}$ - tačka-tačka linija; $L_p=345\text{mH}$).....	156
Slika 7.12 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=11730\text{ob/min}$, $I_{ef}=1\text{A}$, $V_{dc_potr}=135\text{V}$ i $L_p=345\text{mH}$).....	157
Slika 7.13 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=10070\text{ob/min}$, $R_{pot}=300\Omega$, $V_{dc}=20\text{V}$ i $L_p=345\text{mH}$).....	157
Slika 7.14 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=13500\text{ob/min}$, $V_{dc}=20\text{V}$ i $V_{dc_potr}=200\text{V}$ i $L_p=345\text{mH}$).....	158
Slika 7.15 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=10700\text{ob/min}$, $I_{dc-sr}=1.5\text{A}$ i $V_{dc_potr}=150\text{V}$ i $L_p=345\text{mH}$).....	158
Slika 7.16 Talasni oblici struje pobude SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača određeni mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - crta-crta linija i koristeći simulacije - puna linija, za različite vrijednosti induktivnosti kalema korišćenog u kolu pobude ($n=12750\text{ob/min}$, $V_{dc_potr}=135\text{V}$, $I_{ef}=1\text{A}$).....	159
Slika 7.17 Eksperimentalni rezultati rada SRG-a sa PCT1 pri step promjeni komandne brzine obrtanja od 8750ob/min do 12500ob/min ($V_{dc_potr}=135\text{V}$).....	160

Slika 7.18 Eksperimentalni rezultati rada SRG-a sa PCT1 pri promjeni napona potrošača od $\pm 10V$ ($n=12500\text{ob/min}$).	160
Slika 7.19 $P - n$ i $V_{dc} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije – kružić ($V_{dc_potr}=135V$; $I_{ef}=1A$; $L_p=345mH$ - puna linija, $L_p=220mH$ - crta-crta linija i $L_p=145mH$ - crta-tačka-crta linija).....	162
Slika 7.20 $P - n$, $I_{dc_sr} - n$ i $I_{potr_sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($L_p=345mH$; $R_{pot}=300\Omega$; $V_{dc}=30V$ - crta-crta linija i $V_{dc}=40V$ - puna linija).....	162
Slika 7.21 $P - n$, $I_{dc_sr} - n$ i $I_{potr_sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($L_p=345mH$; $R_{pot}=200\Omega$, $V_{dc}=30V$ - crta-crta linija i $V_{dc}=40V$ - puna linija).....	163
Slika 7.22 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($n=12000\text{ob/min}$, $I_{ef}=1A$, $V_{dc_potr}=135V$, $L_p=345mH$).	163
Slika 7.23 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($n=10500\text{ob/min}$, $V_{dc}=30V$, $R_{pot}=300\Omega$, $L_p=345mH$).	164
Slika P-C.1 a) Izgled realizovanog MATLAB/Simulink modela. b) Blok za definisanje pozicije rotora. c) Blok za definisanje induktivnosti. d) Blok koji vrši proračun induktivnosti faze.	185
Slika P-C.2 Maskirani izgled MATLAB/Simulink modela faze SRG-a.	186
Slika P-C.3 MATLAB/Simulink model prostog kola za bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u.	187
Slika P-E.1 Izgled realizovanog MATLAB/Simulink modela trofaznog SRG-a sa PCT1.	191
Slika P-F.1 Izgled realizovanog MATLAB/Simulink modela trofaznog SRG-a sa PCT2.	194

POPIS TABELA

Tabela 2-1 Parametri korišćenog SRM-a	41
Tabela 3-1 Poređenje energetskih pretvarača za napajanje SRM-a.....	54
Tabela 6-1 Poređenje predloženih topologija pretvarača sa klasičnim, <i>C-dump</i> , <i>Buck-Boost</i> , <i>Miller</i> -ovim, <i>Sood</i> -ovim i <i>Derishzadeh</i> -ovim pretvaračem	140
Tabela P-A.1 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)	180
Tabela P-A.2 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u ($I_{ef}=1.75A$, $V_{dc_mk}=270V$)	181
Tabela P-A.3 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=270V$)	182
Tabela P-B.1 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)	183
Tabela P-B.2 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1.75A$, $V_{dc_mk}=270V$)	183
Tabela P-B.3 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=270V$)	184
Tabela P-B.4 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$)	184
Tabela P-B.5 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$)	184
Tabela P-C.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa CCM - On/Off - CC metodom upravljanja ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)	187
Tabela P-C.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa CCM - On/Off - CC metodom upravljanja ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$)	188
Tabela P-C.3 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa CCM - On/Off - CC metodom upravljanja ($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$)	188
Tabela P-D.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa CCM - Hist - CC metodom upravljanja ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)	189
Tabela P-D.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa CCM - Hist - CC metodom upravljanja ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$)	189
Tabela P-D.3 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa CCM - Hist - CC metodom upravljanja ($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$)	190
Tabela P-E.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p \rightarrow \infty$)	191
Tabela P-E.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1 ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$, $L_p \rightarrow \infty$)	192
Tabela P-E.3 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1 ($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$, $L_p \rightarrow \infty$)	192
Tabela P-E.4 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$)	192
Tabela P-E.5 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=300mH$)	192
Tabela P-E.6 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=150mH$)	193
Tabela P-E.7 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1 a pri radu sa konstantnim naponom pobude ($V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$)	193

Tabela P-F.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT2 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p \rightarrow \infty$).....	195
Tabela P-F.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT2 ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$, $L_p \rightarrow \infty$).....	195
Tabela P-F.3 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT2 ($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$, $L_p \rightarrow \infty$).....	195
Tabela P-F.4 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT2 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$)	196
Tabela P-F.5 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT2 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=300mH$)	196
Tabela P-F.6 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT2 ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=150mH$)	196
Tabela P-F.7 Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT2 pri radu sa konstantnim naponom pobude ($V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$).....	196

AKRONIMI

CCM (<i>Continuous Conduction Mode</i>)	- Kontinualni režim struje (struja neprekidno protiče kroz namotaj faze)
CCM - Hist - CC (<i>Continuous Conduction Mode - Hysteresis - Current Control</i>)	- Histerezisna strujna kontrola kod kontinualnog režima provođenja
CCM - On/Off - CC (<i>Continuous Conduction Mode - On/Off - Current Control</i>)	- On/Off strujna kontrola kod kontinualnog režima provođenja
CFPP (<i>Current Fed Push Pull</i>) pretvarač	- Strujno napajani <i>push-pull</i> pretvarač
DCM (<i>Discontinuous Conduction Mode</i>)	- Diskontinualni režim struje (postoje intervali kada je vrijednost struje kroz namotaj faze jednaka nuli)
DTC (<i>Direct Torque Control</i>)	- Direktna kontrola momenta
EMF (<i>Electromotive Force</i>)	- Kontraelektromotorna sila
FEM (<i>Finite Element Method</i>)	- Metod konačnih elemenata
HVDC (<i>High Voltage Direct Current</i>)	- Visokonaponski jednosmjerni sistemi
MPPT (<i>Maximum power point tracking</i>) metod	- Metod praćenja maksimalne snage turbine
NZS	- Najmanji zajednički sadržalac
PCT1 (<i>Proposed Converter Topology 1</i>)	- Predložena topologija pretvarača 1
PCT2 (<i>Proposed Converter Topology 2</i>)	- Predložena topologija pretvarača 2
PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	- Širinsko-impulsna modulacija
SRM (<i>Switched Reluctance Machine</i>)	- Prekidačka reluktantna mašina
SRG (<i>Switched Reluctance Generator</i>)	- Prekidački reluktantni generator
TSF (<i>Torque-Sharing Function</i>)	- Funkcija raspodjele momenta
VA karakteristike	- Volt-amperске karakteristike
VC (<i>Variable Capacitance</i>) generator	- Generator sa promjenljivom kapacitivnošću

OZNAKE

A_i	- Amplituda i -te sinusoidalne komponente vjetra
B	- Magnetna indukcija
B_{nom}	- Nominalna vrijednost magnetne indukcije
C	- Kapacitivnost
C_p	- Koeficijent snage (ili efikasnost rotora) turbine
$C_{p\text{-opt}}$	- Optimalni koeficijent snage (ili efikasnost rotora) turbine
G	- Prenosni odnos mjenjačke kutije
g	- Dužina vazdušnog procjepa
H	- Jačina magnetnog polja
H_{nom}	- Nominalna vrijednost magnetnog polja
i	- Trenutna vrijednost struje faze
I_{ef}	- Efektivna vrijednost struje faze
$I_{\text{ef_max}}$	- Maksimalna efektivna vrijednost struje faze
$I_{\text{ef_nom}}$	- Nominalna efektivna vrijednost struje faze
$I_{\text{ef_ref}}$	- Referentna efektivna vrijednost struje faze
I_{ref}	- Referentna vrijednost struje
ΔI_{porast}	- Porast struje faze
I_s	- Vrijednost struje faze pri potpunom poklapanju polova statora i rotora, ali u početku zasićenja
I_M	- Vrijednost struje faze pri potpunom poklapanju polova rotora i statora
I_{potr}	- Trenutna vrijednost struje potrošača
$I_{\text{potr-sr}}$	- Srednja vrijednost struje potrošača
$\Delta I_{\text{potr_porast}}$	- Porast struje potrošača

I_{dc}	- Struja pobude
ΔI_{dc}	- Promjena struje pobude
I_{dc-sr}	- Srednja vrijednost struje pobude
I_{dc-min}	- Minimalna vrijednost struje pobude
I_{dc-max}	- Maksimalna vrijednost struje pobude
I_{dc-kom}	- Komandna vrijednost struje faze
I_{dc-kom_korak}	- Optimizacioni korak struje I_{dc-kom}
I_{dc-kom_min}	- Minimalna vrijednost I_{dc-kom}
I_{dc-kom_max}	- Maksimalna vrijednost I_{dc-kom}
ΔI_{dc-kom}	- Promjena komandne vrijednosti struje faze
ΔI_{dc-kom_korak}	- Optimizacioni korak promjene struje I_{dc-kom}
ΔI_{dc-kom_min}	- Minimalna vrijednost ΔI_{dc-kom}
ΔI_{dc-kom_max}	- Maksimalna vrijednost ΔI_{dc-kom}
J	- Moment inercije generatora i turbine
L	- Induktivnost faze
L_a	- Nezasićena vrijednost induktivnosti faze u usaglašenoj poziciji polova statora i rotora
L_{al}	- Zasićena vrijednost induktivnosti faze u usaglašenoj poziciji polova statora i rotora
L_{un}	- Induktivnost faze u neusaglašenoj poziciji polova statora i rotora
L_p	- Induktivnost kalema korišćenog u kolu pobude
L_s	- Dužina jarma statora
l_{stk}	- Dužina motora
l_{fe}	- Efektivna dužina poprečnog presjeka željeza
l_{feok}	- Dužina poluobima jarma statora
l_{fes}	- Dvostruka vrijednost pola statora

l_{fer}	- Prečnik rotora
M	- Elektromagnetni moment
M_{turb}	- Moment turbine
N	- Broj faza
N_r	- Broj polova rotora
N_s	- Broj polova statora
N_{pre}	- Broj prekidača
N_{nav}	- Broj navojaka po polu
n	- Brzina obrtanja generatora [ob/min]
n_{min}	- Minimalna vrijednost brzine obrtanja generatora
n_{max}	- Maksimalna vrijednost brzine obrtanja generatora
n_{opt}	- Optimalna vrijednost brzine obrtanja generatora
p	- Trenutna vrijednost snage faze
P_{dc}	- Snaga pobudnog izvora
P	- Izlazna (električna) snaga
P_M	- Snaga vjetra koju prihvataju lopatice turbine
P_{meh}	- Mehanička snaga generatora
P_{meh}^*	- Referentna vrijednost mehaničke snage generatora
P_{opt}	- Optimalna vrijednost snage
P_{pot}	- Snaga potrošača
R_s	- Najmanji poluprečnik statora
R_{gub}	- Otpornost priključnih kontakata V-C generatora
R_{ph}	- Otpornost namotaja faze
$R_{\text{ph_nom}}$	- Nominalna otpornost namotaja faze
R_{pot}	- Otpornost potrošača
r_r	- Veći poluprečnik statora

r_{ss}	- Spoljašnji poluprečnik statora
r_{us}	- Unutrašnji poluprečnik statora
$S_{vv}(\omega_i)$	- Spektralna gustina snage vjetra
stf	- Faktor popunjenosti željeza
S_{fe}	- Efektivna površina poprečnog presjeka željeza
t_s	- Širina pola statora
U	- Trenutna vrijednost napona faze
$U_{srednje}$	- Srednja vrijednost napona faze
V_{dc}	- Napon pobude
V_{dc_mk}	- DC napon međukola
$V_{dc_mk}^*$	- Referentna vrijednost DC napona međukola
ΔV_{dc}	- Promjena napona pobude
V_{dc_min}	- Minimalna vrijednost napona pobude
V_{dc_max}	- Maksimalna vrijednost napona pobude
V_{dc_potr}	- Jednosmjerni napon potrošača
V_{dc_nom}	- Nominalna vrijednost napona potrošača
$V_{dc_mreže}$	- Jednosmjerni napon DC mreže
W_m	- Magnetna energija
W'_m	- Magnetna koenergija
β	- Ugao zakretanja lopatica
β_s	- Širina polova statora
β_r	- Širina polova rotora
δ	- Minimalna širina vazdušnog procjepa
θ	- Pozicija rotora
θ_{on}	- Ugao uključenja
θ_{on_min}	- Minimalna vrijednost ugla uključenja

$\theta_{\text{on_max}}$	- Maksimalna vrijednost ugla uključenja
θ_{off}	- Ugao isključenja
$\theta_{\text{off_min}}$	- Minimalna vrijednost ugla isključenja
$\theta_{\text{off_max}}$	- Maksimalna vrijednost ugla isključenja
θ_{p}	- Ugao provođenja
θ_{demag}	- Ugao demagnetizacije
θ_{mag}	- Ugao magnetizacije
θ_3	- Položaj u kome pol rotora u potpunosti prekriva površinu pola statora
$\Delta\theta$	- Korak promjene kontrolnih uglova
$d\theta$	- Ugaoni pomjeraj
λ	- Odnos brzine turbine i brzine vjetra
μ	- Permeabilnost željeza
μ_0	- Permeabilnost vakuuma
μ_{ppoc}	- Permeabilnost magnetnog materijala pri nultoj vrijednosti magnetne indukcije
v_w	- Brzina vjetra
v_{w_nom}	- Nominalna brzina vjetra
$\bar{v}_w$	- Srednja brzina vjetra
ρ	- Gustina vazduha
σ	- Intenzitet turbulencije vjetra
Φ	- Obuhvatni fluks faze
Φ_{al}	- Zasićena vrijednost fluksa pri usaglašenoj poziciji polova rotora i statora
Φ_{S}	- Vrijednost fluksa pri potpunom poklapanju polova statora i rotora, ali u početku zasićenja
Φ_{M}	- Vrijednost fluksa pri potpunom poklapanju polova rotora i

	statora, a pri vrijednosti struje I_M kroz namotaje
φ_i	- Fazni ugao i -te sinusoidalne komponente vjetra
η	- Efikasnost generatora
ω	- Brzina obrtanja generatora [rad/s]
ω_b	- Osnovna brzina obrtanja SRM-a
ω_{turb}	- Brzina obrtanja turbine
$\omega_{\text{turb_opt}}$	- Nominalna brzina obrtanja turbine
ω_{v_i}	- Frekvencija i -te sinusoidalne komponente vjetra

Uvod

Reluktantne mašine (engl. *Reluctance machines*) su vrste električnih mašina kod kojih se obrtni moment javlja kao rezultat težnje rotora da zauzme položaj u odnosu na pobuđenu fazu statora u kojem bi induktivnost te pobuđene faze bila maksimalna, odnosno reluktansa minimalna [1]. Ove električne mašine se mogu podijeliti na:

- Prekidačke Reluktantne Mašine (engl. *Switched Reluctance Machine*) i na
- Sinhronne Reluktantne Mašine (engl. *Synchronous Reluctance Machine*).

Za razliku od sinhronih reluktantnih mašina, koje imaju glatku strukturu statora, prekidačke reluktantne mašine imaju istaknute polove i na statoru i na rotoru [1-5]. Ova doktorska disertacija se bavi prekidačkom reluktantnom mašinom - SRM-om.

Prvi SRM konstruisao je *Davidson* 1838. godine. Međutim, iako je ova mašina predstavljala jednu od prvih otkrivenih električnih mašina, njena primjena je izostala usled nemogućnosti da se na efikasan način riješi problem njenog napajanja i upravljanja. Sa druge strane, 40-ak godina kasnije, Nikola Tesla je pronašao asinhronu mašinu koja je, zbog prostog upravljanja, postala mnogo interesantnija za primjenu u odnosu na SRM i sve ostale električne mašine. Zbog toga je i interesovanje za SRM-om nestalo u sljedećih 130 godina, tj. sve do razvoja elemenata energetske elektronike koji su omogućili da SRM postane predmet intenzivnog istraživanja [6]. Naime, od kraja 70-ih godina prošlog vijeka počela je ozbiljnija analiza rada SRM-a [6-8], modelovanje SRM-a primjenom metoda konačnih elemenata (engl. *Finite Element Method* - FEM) [9-10], dizajn SRM-a [11], modifikacije postojećih i razvoj novih energetskih pretvarača za napajanje SRM-a [12-14], razvoj novih načina upravljanja SRM-om [15] i slično.

Od 90-ih godina prošlog vijeka počela je nagla ekspanzija naučnih istraživanja i primjene SRM-a, kao i pogona sa SRM-om. Svi prezentovani pravci naučnih istraživanja koji se tiču SRM-a mogu se kategorisati u neku od sljedećih oblasti:

→ Modelovanje SRM-a i pogona sa SRM-om [16-49]

SRM karakteriše izražena nelinearna zavisnost između fazne struje i fluksa, koja je posledica činjenice da materijal od koga je napravljena ova mašina, u normalnom režimu rada, zalazi duboko u zasićenje. Zbog toga, da bi se sproveda detaljna i kvalitetna analiza rada SRM-a, potrebno je karakteristike magnećenja (krive fluks-struja) što tačnije predstaviti. To se najjednostavnije može uraditi direktnim mjerenjem fluksa i struje, ili mjerenjem induktivnosti, kao što je pokazano u [16-19]. Međutim, direktno mjerenje na konkretnoj mašini zahtijeva veliko vrijeme, veliki broj instrumenta, odgovarajuću tačnost instrumenata i sl.

Osim direktnog mjerenja fluks – struja karakteristike SRM-a se mogu odrediti i upotrebom FEM-a, kao što je pokazano u [20-28]. Međutim, upotreba FEM-a zahtijeva veliki broj ulaznih podataka, posebno o geometriji mašine.

U novije vrijeme, pojavljuje se niz matematičkih modela SRM-a kod kojih se fluks-struja zavisnosti definišu na osnovu interpolacije podataka sa fluks-struja karakteristika određenih mjerenjem ili upotrebom FEM-a [29-35]. Osim njih, postoje i modeli kod kojih se fluks-struja karakteristike određuju polazeći od fizičkih jednačina koje opisuju samu mašinu [36-42]. Ove metode se, prije svega, baziraju na jednačinama koje opisuju magnetno kolo mašine i putanju fluksa. Međutim, za ove metode je, veoma često, potrebno imati na raspolaganju nekoliko podataka sa prethodno izmjerenih, ili upotrebom FEM-a utvrđenih, fluks-struja karakteristika same mašine.

Bitno je napomenuti da se simulacija rada SRM-a, kao i pogona sa SRM-om, najčešće vrši implementiranjem jednačina koje opisuju ovu mašinu u programskim paketima MATLAB/Simulink [43-46] i SPICE [47-49].

→ Pogonski pretvarači (konvertori) za napajanje SRM-a [50-62]

Najvažnija razlika SRM-a u odnosu na većinu drugih mašina jeste u tome što je za njeno napajanje, a samim tim i za upravljanje, neophodan energetska pretvarač. Međutim, zbog unipolarnog karaktera faznih struja SRM-a ne mogu se koristiti standardni poluprovodnički pretvarači.

Klasifikacija pogonskih pretvarača za napajanje SRM-a, uzimajući u obzir tehnički aspekt, prikazana je u [50-55], a uzimajući u obzir ekonomski aspekt u [56-59]. U nekoliko istraživanja je analiziran uticaj parametara mašine na volt-amperne (V-A) zahtjeve

prekidačkih elemenata koji umnogome definišu cijenu pretvarača [51-52]. Osim njih, bitno je istaći i da su veoma zastupljena istraživanja koja se bave modifikacijom postojećih pretvarača i minimizacijom broja prekidača u pretvaračkom mostu [59-60]. U novije vrijeme, istraživanja su usmjerena ka razvoju poluprovodničkih pretvarača za kontinualni režim fazne struje (engl. *Continuous Conduction Mode* - CCM) [61-62].

→ Upravljanje SRM-om [63-74]

Kao što je već napomenuto, za upravljanje SRM-om neophodno je postojanje energetskog pretvarača. Međutim, zajednička odlika svih energetskih pretvarača za upravljanje SRM-om jeste u tome da oni zahtijevaju složene upravljačke algoritme [1-6].

Generalno, svi metodi upravljanja SRM-om mogu se podijeliti u dvije kategorije. Prva kategorija obuhvata klasične metode upravljanja (klasične metode upravljanja zahtijevaju upotrebu senzora pozicije), dok u drugu spadaju metode kod kojih se pozicija ili estimira ili se informacija o poziciji uopšte i ne koristi (bezsenzorsko upravljanje – upravljanje bez upotrebe senzora pozicije [1 – strana 108]). Konkretni primjeri primjene klasičnog upravljanja SRM-om prikazani su u [63-67], a bezsenzorskog upravljanja u [68-69].

U današnje vrijeme veoma često se koriste upravljanja koja se zasnivaju na upotrebi neuralnih mreža i *fuzzy* logike [70-72]. Sa druge strane, postoje i istraživanja koja su usmjerena ka razvoju algoritama upravljanja koji imaju mogućnost samopodešavanja upravljačkih parametara u cilju optimizacije željenih performansi [73]. Takođe, postoje i istraživanja koja su usmjerena ka primjeni metoda upravljanja koja se koriste kod asinhronih mašina za upravljanje SRM-om [74]. Međutim, najveći nedostatak ovih metoda upravljanja SRM-om jeste u složenosti upravljačkog dijela energetskog pretvarača.

→ Talasnost momenta SRM-a [75-81]

SRM, zbog konstrukcije rotora i statora sa isturenim polovima, poseduje veliku talasnost momenta. Ova talasnost se ispoljava u vidu uvala u trenucima komutacije, tj. u trenucima isključenja jedne a uključenja druge faze. Talasnost momenta je naročito nepoželjna pri malim brzinama, jer tada može usloviti oscilacije same brzine. Zbog toga, gotovo svi metodi upravljanja SRM-om imaju za cilj smanjenje, ili pak eliminisanje, talasnosti momenta.

Smanjenje talasnosti momenta SRM-a, a samim tim i rešavanje problema buke i vibracija koje ova talasnost izaziva, danas se prije svega rješava odgovarajućim metodama upravljanja. Najrasprostranjenije metode za smanjenje talasnosti momenta zasnivaju se na primjeni širinsko-impulsne modulacije (engl. *Pulse Width Modulation* - PWM) napona napajanja [75]. Takođe, postoje i metode koje se zasnivaju na generisanju odgovarajućeg napona napajanja u cilju formiranja željenog oblika struje [76], kao i metode koje vrše adaptivnu kontrolu talasnosti momenta u cilju poništavanja viših harmonika koji se pojavljuju u talasnom obliku momenta [77]. Isto tako, postoje i metode koje vrše smanjenje talasnosti momenta kompenzacijom nelinearnosti [15], kao i metode koje osim smanjenja talasnosti momenta ostvaruju i povećanje dijapazona konstantne brzine [78].

U posljednje vrijeme pojavljuju se i tzv. TSF metode (engl. *Torque-Sharing Function* - funkcija raspodjele momenta), kod kojih se referentna vrijednost momenta direktno prevodi u referentni oblik struje koristeći analitički izraz, ili koristeći podatke iz *look-up* tabela [79-80]. Osim glavnog cilja, tj. eliminacije talasnosti momenta, sekundarni cilj upotrebe TSF metoda je najčešće minimizacija gubitaka, kao što je pokazano u [80].

Sa druge strane, potrebno je naglasiti da postoje i radovi koji se bave određivanjem optimalnih parametara magnetnog kola SRM-a u cilju minimizacije pulsacija momenta [81].

→ **Buka i vibracije SRM-a [82-84]**

Talasnost momenta uzrokuje buku i vibracije SRM-a, jer se zbog neujednačenog momenta javljaju neujednačene radijalne sile na rotor ove mašine. Prema tome, smanjivanjem talasnosti momenta, indirektno se rešava i ovaj problem.

Buka se kod SRM-a javlja prije svega zbog deformacija i promjena u željezu. Inače, buka se pojavljuje u slučaju kada periodično pobuđivanje faza SRM-a pobudi prirodne vibracije lamela željeza [82-83]. Jedan od konstrukcijskih načina za smanjenje buke i vibracija SRM-a, koji podrazumijeva upotrebu rama (okvira) oko statora mašine, opisan je u [84].

→ **Gubici i efikasnost SRM-a [85-90]**

Odsustvo električnih provodnika na rotoru SRM-a čini ovu mašinu veoma jednostavnom i, istovremeno, veoma pogodnom za brojne primjene. Naime, kod ove

mašine se najveći dio gubitaka formira (proizvodi) na statoru odakle se relativno jednostavno otklanjaju.

Gubici kod SRM-a nijesu konstantni i značajno variraju u zavisnosti od efektivne vrijednosti struje i brzine [85-87]. U dostupnoj literaturi se mogu pronaći različiti načini za određivanje gubitaka u SRM-u: analizom talasnog oblika fluksa [88], mjerenjem momenta opterećenja [89] i mjerenjem B-H krivih [90]. Takođe, treba naglasiti da se minimizacija gubitaka najčešće ostvaruje kao sekundarni cilj, dok je primarni cilj eliminacija talasnosti momenta [80].

→ Rad SRM-a u uslovima kvara [91-94]

Kod pogona sa SRM-om, prekidači jedne grane pretvaračkog mosta su međusobno odvojeni fazom mašine. Zbog toga, kod ovih pogona praktično je nemoguća pojava kratkog spoja neke od grana pretvaračkog mosta. Štaviše, ako se desi kratak spoj, ili prekid neke od faza, ili kvar na nekom od prekidača u pretvaračkom mostu, SRM može da nastavi da radi neko vrijeme i pod punim opterećenjem [91-93].

Sa druge strane, bitno je napomenuti da se kod trofaznih SRM-a, za razliku od gotovo svih drugih mašina, međusobne induktivnosti faza mogu zanameriti [94]. Samim tim, vrijednost struje u jednoj fazi nema uticaja na vrijednost struje u drugim fazama. Zbog toga je upravljanje fazama ove mašine u potpunosti nezavisno, a što je posebno značajno u slučajevima kvara na nekoj od faza.

Upravo zbog ovih karakteristika SRM ima veliku primjenu u aplikacijama gdje se zahtijeva velika sigurnost i pouzdanost rada (nuklearne elektrane, aeronautičke aplikacije, medicinske aplikacije itd.).

→ Generatorski režim rada SRM-a [95-118]

SRM, kao i svaka električna mašina, može da radi i kao motor i kao generator (engl. *Switched Reluctance Generator* - SRG) [95-96]. SRG ima nekoliko prednosti u odnosu na druge električne generatore. Ova mašina na rotoru nema namotaja, a ni stalnih magneta, pa je moment inercije rotora mali. Samim tim ova mašina može da ostvari nagle promjene brzine. Isto tako, ova mašina može da ostvari i široke dijapazone promjene brzine, kao i rad u širokom temperaturnom opsegu.

U literaturi postoji veliki broj radova koji se bave različitim metodama upravljanja SRG-om [71-72, 97-99]. Osim njih, posebno su zastupljena istraživanja mogućnosti primjene SRG-a u sistemima vjetroelektrana [71-72, 100-107], sistemima aeronautičkih aplikacija [108-110], kod električnih vozila [111-113] i u sistemima za punjenje baterija [114]. Nedvosmislen zaključak istraživanja prezentovanih u [71-72, 100-114] jeste taj da je primjena SRM-a u sistemima za proizvodnju električne energije veoma opravdana i efikasna.

Na kraju, treba istaći da se simulacija rada SRG-a, isto kao i SRM-a, najčešće vrši implementiranjem matematičkog modela, tj. jednačina koje opisuju ovu mašinu u programskim paketima, kao što su MATLAB/Simulink [115-117] i SPICE [118].

Na osnovu ovog pregleda dosadašnjih pravaca naučnih istraživanja koji se tiču SRM-a, jasna je njegova veoma velika zastupljenost. Takođe, evidentan je sve veći broj primjera primjene SRM-a u različitim električnim pogonima, a posebno u pogonima za proizvodnju električne energije [71-72, 100-118].

Ova doktorska disertacija, naslova: “*Upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom i topologije energetskog pretvarača za rad u kontinualnom režimu*”, bavi se jednim od najaktuelnijih pravaca naučnog istraživanja u oblasti SRM – generatorskim režimom rada, kako sa stanovišta klasičnih, tako i sa stanovišta bezsenzorskih metoda upravljanja.

Dosadašnji metodi upravljanja SRG-om dominantno su bili bazirani na rad ove mašine sa diskontinualnom strujom, tj. u diskontinualnom režimu provođenja (engl. *Discontinuous Conduction Mode* - DCM) [100-118]. Naime, pri radu SRM-a (SRG-a) u DCM-u struja u svakom namotaju, nakon aktivacije faze, počinje da raste od nulte vrijednosti, a na kraju perioda provođenja njena vrijednost opet postaje jednaka nuli. Međutim, osim u DCM-u, SRM može da radi i sa kontinualnom strujom kroz fazne namotaje, tj. u CCM-u [61-62, 64-67, 119-130]. Cilj ove doktorske disertacije jeste razvoj novih metoda upravljanja SRG-om u CCM-u.

Rad SRM-a u CCM-u poznat je već preko dvije decenije, ali se u posljednjih deset godina pojavilo više radova koji detaljnije opisuju rad SRM-a u ovom režimu [61-62, 64-67, 119-130]. Nedvosmislen zaključak svih radova koji opisuju rad SRM-a u CCM-u jeste taj da

se pri radu SRM-a u CCM-u, u odnosu na rad SRM-a u DCM-u, povećava vrijednost momenta i snage mašine pri većim brzinama obrtanja. Međutim, bitno je naglasiti da postojeći metodi upravljanja SRM-om pri radu u CCM-u, opisani u [64-67], spadaju u grupu klasičnih metoda upravljanja, jer se kod njih zahtijeva upotreba senzora pozicije. Osim toga, postojeći metodi zahtijevaju mjerenje i regulaciju struje faze, uz upotrebu *look-up* tabela za definisanje kontrolnih parametara. Prema tome, postojeći metodi upravljanja SRM-om u CCM-u, osim što su dominantno orijentisani ka motornom režimu rada, veoma su i složeni za primjenu. Cilj ove disertacije jeste razvoj modifikovane klasične metode upravljanja, koja neće zahtijevati mjerenje struje, a koja će biti prilagođena za generatorski režim rada SRM-a u CCM-u. Osim toga, cilj je i da se predloži rješenje primjene te modifikovane metode klasičnog upravljanja SRG-om u vjetrogeneratorskom sistemu. Samim tim, potrebno je ispitati, prije svega, stabilnost i efikasnost rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu, kako za normalne uslove rada tako i u uslovima npr. promjene otpornosti namotaja faze. Djelimični rezultati istraživanja vezani za ovu cjelinu disertacije publikovani su u [130].

Međutim, važno je napomenuti da je u [64-65] naglašen jedan veoma veliki nedostatak klasičnog upravljanja SRM-om u CCM-u. Naime, pri radu SRM-a u CCM-u, pri velikim brzinama obrtanja, mala greška u pozicioniranju kontrolnih signala, ili mala greška u tačnosti mjerenja pozicije rotora, može dovesti do naglih i velikih oscilacija u talasnom obliku fazne struje. Samim tim, veoma lako može doći do pregrijavanja i pregorijevanja faznog namotaja. Zbog toga je cilj ove disertacije i da se predlože novi bezsenzorski metodi upravljanja SRG-om u CCM-u, a koji bi doprinijeli povećanju robustnosti, povećanju sigurnosti, smanjenju veličine i olakšanoj primjeni SRG-a u različitim generatorskim sistemima.

U cilju razvoja novih bezsenzorskih metoda upravljanja SRG-om u disertaciji će se posmatrati šema povezivanja V-C generatora (engl. *Variable Capacitance generator*) sa DC-mrežom [131-135]. Naime, u [131] je razmatrana primjena V-C mašine u sistemima *off-shore* vjetroelektrana i predložen energetski poluprovodnički pretvarač, baziran na upotrebi samo dioda, koji omogućava kontinualan tok naelektrisanja kroz V-C generator.

V-C mašina i SRG imaju jednu veoma važnu sličnost. Kod V-C mašine se u zavisnosti od položaja rotora u odnosu na stator mijenja kapacitivnost između ploča statora i rotora, dok se kod SRM-a u zavisnosti od položaja rotora u odnosu na stator mijenjaju

induktivnosti faza. Zbog toga, cilj je da se predložena šema povezivanja V-C generatora i DC mreže iskoristi kao osnova za razvoj bezsenzorskog upravljanja SRG-om. Štaviše, cilj je upotrijebiti klasični pretvarač za napajanje SRG-a za bezsenzorsko upravljanje SRG-om. To se može odraditi uz npr. dodatnu upotrebu On/Off strujnog kontrolera, kao što je i opisano u [129]. Međutim, cilj je pokušati i primijeniti histerezisni kontroler struje za realizaciju bezsenzorskog upravljanja SRG-om. Sa druge strane, cilj je razviti i nove topologije poluprovodničkog pretvarača za upravljanje SRG-om, bazirane na upotrebi samo dioda, analogno pretvaraču za V-C generator. Osim ovoga, cilj disertacije jeste i da se prikažu potencijalna rješenja primjene predloženih upravljanja u vjetrogeneratorskom sistemu sa SRG-om. Štaviše, potrebno je sagledati mogućnost direktnog priključenja vjetrogeneratorskog sistema na DC-mrežu i uporediti predloženo rješenje sa postojećim. Djelimični rezultati istraživanja vezani za razvoj novih topologija pretvarača publikovani su u [129].

Osim prethodno navedenog, cilj ove doktorske disertacije jeste poređenje optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a (izlazna snaga i efikasnost SRG-a u funkciji brzine obrtanja) pri radu sa svim predloženim metodama upravljanja. S tim u vezi, u disertaciji je potrebno ustanoviti odgovarajući optimizacioni algoritam, uz pomoć koga će se moći određivati optimalne izlazne karakteristike SRG-a za bilo koju vrijednost napona na fazama i bilo koju vrijednost struje kroz faze. Bitno je napomenuti da ni u jednom od radova koji se tiču CCM režima rada SRM-a [61, 64-67, 119-128] nije predložen kompletan optimizacioni algoritam.

Takođe, zadatak disertacije jeste i da se izvrši kvantitativno poređenje predloženih topologija pretvarača sa drugim najznačajnijim topologijama energetskih pretvarača za napajanje i upravljanje SRG-om. U tom cilju, potrebno je odabrati odgovarajuće kriterijume i uvesti normalizaciju pojedinih posmatranih veličina (npr. napona na prekidačima, struja kroz prekidače i sl.). Upravo zbog toga, u jednom od početnih poglavlja disertacije biće dat pregled postojećih najznačajnijih energetskih pretvarača za napajanje SRM-a.

Da bi se ispitale karakteristike SRG-a pri radu sa svim predloženim metodama upravljanja potrebno je koristiti odgovarajući program baziran na provjerenom matematičkom modelu SRM. Zbog toga će u ovoj disertaciji biti opisani najznačajniji matematički modeli SRM-a, ali i navedeno njihovo međusobno poređenje sa stanovišta tačnosti i primjenjivosti.

Osim simulacionog ispitivanja predloženih topologija pretvarača, potrebno je izvršiti i eksperimentalnu verifikaciju rada SRG-a sa predloženim topologijama pretvarača. Štaviše, cilj je da se rezultati eksperimentalne verifikacija rada SRG-a sa predloženim topologijama pretvarača uporede sa simulacionim rezultatima, kako sa stanovišta talasnih oblika pojedinih veličina (vremenski oblici napona i struja faza, struja i napona potrošača) tako i sa stanovišta izlaznih karakteristika generatora.

Da bi se na adekvatan način prikazao cilj rada i opisali dobijeni rezultati, ova doktorska disertacija je organizovana na sljedeći način:

Prvo poglavlje sadrži osnovne informacije o SRM-u: konstrukcija, princip rada, veza fluksa, struje i pozicije rotora, kontrolni parametri, naponska jednačina, talasni oblici struje, elektromagnetni moment, motorni i generatorski režim rada, promjena smjera obrtanja, upravljanje, kao i najvažnije prednosti i nedostaci pogona sa SRM-om.

U **drugom poglavlju** dat je pregled najznačajnijih matematičkih modela za simulaciono ispitivanje karakteristika SRM-a. Akcenat je stavljen na analitičke modele SRM-a kod kojih se fluks-struja zavisnosti određuju na osnovu jednačina magnetnog kola mašine.

U **trećem poglavlju** prikazani su najčešće korišćeni energetske pretvarači za napajanje SRM-a. U ovom poglavlju dato je i njihovo kvantitativno poređenje sa stanovišta broja prekidača, broja dioda, broja reaktivnih komponenti i sl.

U **četvrtom poglavlju** su prikazani rezultati analize rada SRG-a u DCM-u i u CCM-u. U ovom poglavlju je predložen postupak za određivanje optimalnih kontrolnih parametara koji obezbjeđuje maksimizaciju izlazne snage SRG-a u DCM-u i u CCM-u. Predloženi postupak je primijenjen za određivanje optimalnih izlaznih karakteristika korišćenog SRG-a u DCM-u i u CCM-u.

U **petom poglavlju** je predložen modifikovani klasični metod upravljanja SRG-om, koji je baziran na upotrebi klasičnog pretvarača, a koji ne zahtijeva ni mjerenje ni regulaciju struje SRG-a. Osim toga, u ovom poglavlju je prikazana i primjena predloženog metoda upravljanja SRG-om pri radu u vjetrogeneratorskom sistemu. Štaviše, analizirana je i stabilnost vjetrogeneratorskog sistema pri promjeni otpornosti namotaja faze SRG-a.

U **šestom poglavlju** su predloženi bezsenzorski metodi upravljanja SRG-om, bazirani na upotrebi klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera i na upotrebi novih topologija energetskih pretvarača. Posebna pažnja je posvećena poređenju izlaznih karakteristika SRG-a u CCM-u, DCM-u i pri upotrebi predloženih bezsenzorskih metoda upravljanja. Takođe, prikazane su i primjene svih predloženih bezsenzorskih metoda upravljanja SRG-om u vjetrogeneratorskom sistemu.

Eksperimentalna verifikacija predloženih topologija energetskih pretvarača za rad SRG-a u CCM-u opisana je u **sedmom poglavlju**. U ovom poglavlju je prikazana eksperimentalna postavka i izvršeno poređenje simuliranih i izmjerenih talasnih oblika pojedinih veličina, kao i izlaznih karakteristika korišćenog SRG-a.

U **zaključku** je naglašen doprinos rada i dati pravci budućeg istraživanja.

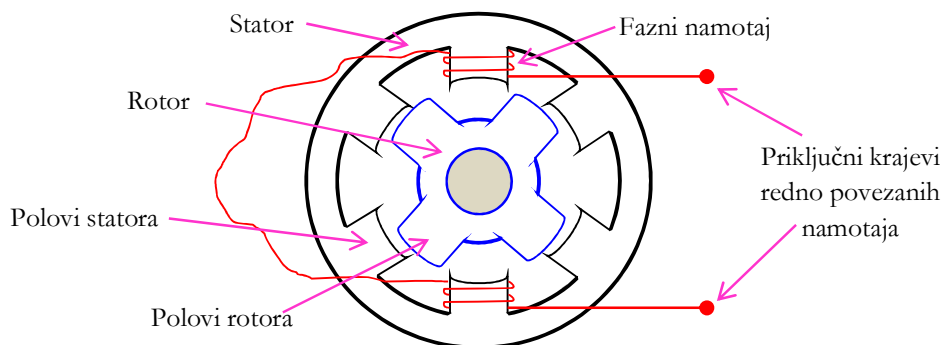
POGLAVLJE 1

Princip rada i osobine SRM-a

U ovom poglavlju date su osnovne informacije o SRM-u: konstrukcijske karakteristike, princip rada, naponska jednačina, moment, režimi rada, promjena smjera obrtanja, upravljanje, buka i vibracije. Takođe, navedeni su mogući talasni oblici fazne struje SRM-a, kao i veza fazne struje, obuhvatnog fluksa i pozicije rotora. Na kraju poglavlja navedene su prednosti i nedostaci pogona sa SRM-om.

1.1 Najvažnije konstrukcijske karakteristike SRM-a

Konstrukcija SRM-a je veoma jednostavna [1-6]. Rotor i stator, sa svojim istaknutim polovima, sastavljeni su od limova, kao kod konvencionalnih mašina. Međutim, ova mašina ima namotaje, navučene oko istaknutih polova, samo na statoru. Namotaj jedne faze je sastavljen iz dva dijela, koja mogu biti povezana redno ili paralelno, a nalaze se oko dijametralno suprotno postavljenih polova. Na slici 1.1 prikazan je poprečni presjek 6/4 SRM-a. Oznaka 6/4 znači da motor ima 6 polova na statoru i 4 pola na rotoru, pri čemu ima tri faze.



Slika 1.1 Poprečni presjek 6/4 SRM-a.

Generalna veza broja faza, broja polova rotora i broja polova statora SRM-a je:

$$\begin{aligned} NZS(N_s, N_r) &= N \cdot N_r, \\ NZS(N_s, N_r) &> N_s > N_r, \end{aligned} \quad (1-1)$$

gdje je NZS – najmanji zajednički sadržalac, N - broj faza ($N > 2$), N_r – broj polova rotora, N_s – broj polova statora, (N_r i N_s su parni brojevi) [2]. Najčešće korišćene konfiguracije za trofaznu mašinu su 6/4, 6/2, 12/8 i 12/10, za četvorofaznu 8/6 i 8/10, za petofaznu 10/8, itd. Bitno je napomenuti da se povećavanjem broja faza SRM-a postiže smanjenje talasnosti momenta, ali se povećava složenost izrade. Zbog toga se u cilju smanjenja talasnosti momenta danas primjenjuju prije svega odgovarajuće upravljačke tehnike [75-80].

Sa druge strane, da bi se omogućilo startovanje motora iz bilo koje pozicije i u bilo kom smjeru, potrebno je da važe sljedeće nejednakosti:

$$\begin{aligned} \min(\beta_r, \beta_s) &\geq \frac{2\pi}{N \cdot N_r}, \\ \beta_s &< \frac{2\pi}{N_r} - \beta_r. \end{aligned} \quad (1-2)$$

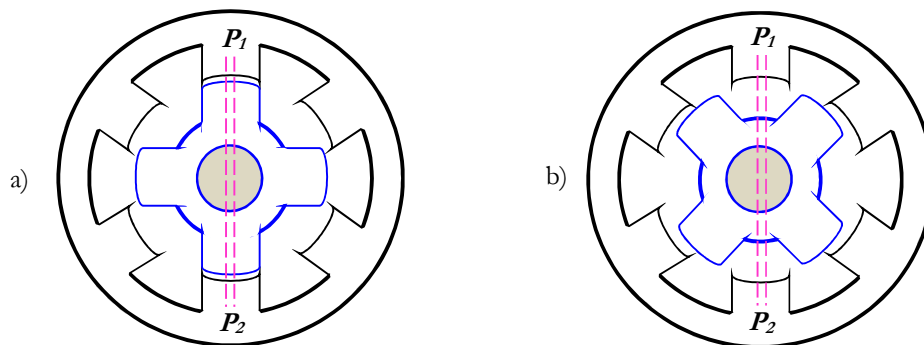
gdje je sa β_s označena širina polova statora, a sa β_r širina polova rotora [2, 6].

1.2 Usaglašena i neusaglašena pozicija rotora SRM-a

Dva ključna položaja rotora u odnosu na polove statora su tzv. usaglašena pozicija (engl. *aligned position*), prikazana na slici 1.2a i neusaglašena pozicija (engl. *unaligned position*), prikazana na slici 1.2b [1-6].

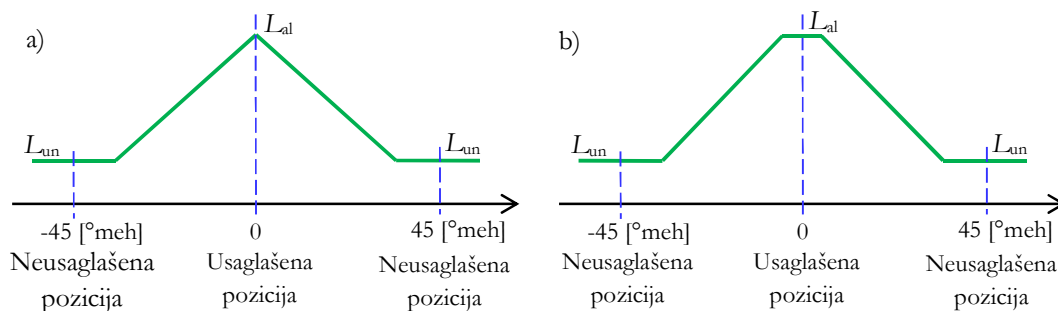
Kada se rotor nalazi u usaglašenom položaju sa statorom, vazdušni procjep između pola statora i pola rotora je najmanji. U ovom slučaju, induktivnost faze kojoj pripadaju usaglašeni polovi statora i rotora je maksimalna. Sa druge strane, kada se posmatrani pol rotora nalazi u neusaglašenoj poziciji sa označenim polovima jedne faze statora vazdušni procjep između statora i rotora je najveći, pa je induktivnost pomenute faze minimalna. Prema tome, kada se rotor kreće od neusaglašene ka usaglašenoj poziciji induktivnost

posmatrane faze se povećava, dok se reluktansa putanje kuda se fluks zatvara smanjuje. Sa druge strane, ako se rotor kreće od usaglašene ka neusaglašenoj poziciji, induktivnost posmatrane faze se smanjuje, a reluktansa putanje kuda se fluks zatvara se povećava.



Slika 1.2 Trofazni SRM. a) Usaglašena i b) Neusaglašena pozicija za par polova P_1 i P_2 .

Za SRM sa jednakom širinom statorskih i rotorskih polova idealizovan dijagram zavisnosti induktivnosti faze od međusobnog položaja rotora i statora prikazan je na slici 1.3a. Ista zavisnost, ali u slučaju kada je širina polova rotora veća od širine polova statora, prikazana je na slici 1.3b.



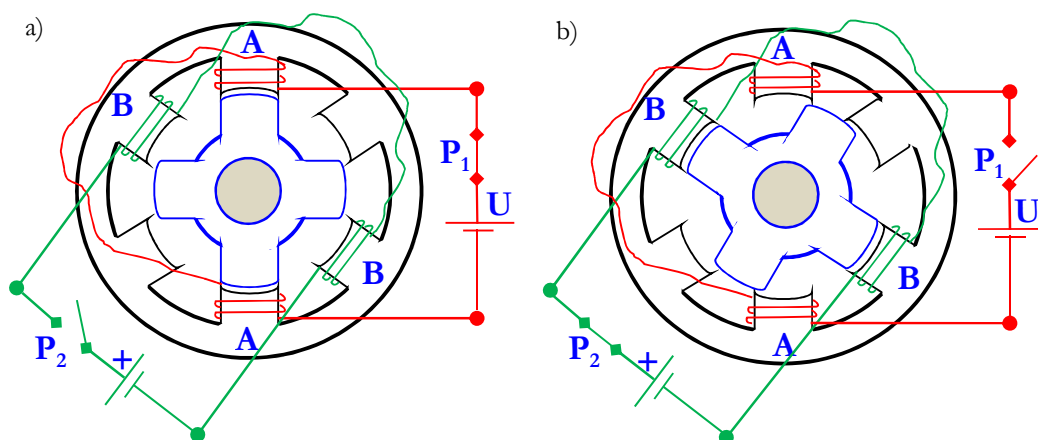
Slika 1.3 Zavisnost induktivnosti jedne faze motora od međusobnog položaja rotora i statora 6/4 SRM-a. a) Jednaka širina statorskih i rotorskih polova. b) Širina polova rotora je veća od širine polova statora.

1.3 Princip rada SRM-a

Princip rada SRM-a je veoma prost. Naime, proticanje struje kroz fazni namotaj dovodi do formiranja momenta koji teži da postavi rotor u položaj najmanje reluktanse pobuđene faze, tj. u položaj najveće induktivnosti faze. Zbog toga, ako se dovede napon na

fazu čiji polovi se nalaze u usaglašenoj poziciji sa polovima rotora, vrijednost momenta koji djeluje na rotor će biti jednaka nuli. Međutim, ako rotor nije u usaglašenoj poziciji, javiće se moment koji će da teži da vrati rotor u položaj maksimalne induktivnosti, tj. u položaj minimalne reluktanse.

Isto tako, ako se dovede napon na fazu čiji se polovi nalaze u neusaglašenoj poziciji sa polovima rotora, vrijednost momenta koji djeluje na rotor će biti jednaka nuli. Razlog za to jeste u tome što privlačna sila pobuđene faze statora djeluje na dva susjedna pola rotora, ali je njihov rezultanтни moment jednak nuli. Kada se rotor izvede iz neusaglašene pozicije, javlja se moment koji teži da dovede rotor u usaglašenu poziciju.



Slika 1.4 Princip rada SRM-a. a) Krajnji položaj rotora pri napajanju faze A. b) Krajnji položaj rotora pri napajanju faze B.

Prema tome, da bi se vršilo pravilno upravljanje SRM-om, tj. okretanje rotora, potrebno je vremenski definisano, usklađeno i naizmjenično napajati pojedinačne faze. Dovođenje i regulacija vrijednosti napona na fazi se ostvaruje upotrebom energetskih pretvarača, od kojih će najvažniji biti opisani u Poglavlju 3. Prosta ilustracija kontrole napona prikazana je na slici 1.4. Na ovoj slici je prikazana trofazna SRM, sa naznačenim namotajima faza A i B. Na slici 1.4a prikazana je situacija kada je prekidač P_1 zatvoren, a prekidač P_2 otvoren, pa se rotor nalazi u usaglašenoj poziciji za polove faze A. Ako se sada prekidač P_1 otvori, a prekidač P_2 zatvori, rotor će se zaokrenuti tako da polovi faze B zauzmu usaglašenu poziciju (slika 1.4b). Međutim, za regulaciju brzine obrtanja potrebno je imati informaciju o poziciji rotora i u zavisnosti od nje vršiti uključivanje (isključivanje) odgovarajućih prekidača, tj. vršiti magnetizaciju (demagnetizaciju) faza.

1.4 Kontrolni parametri SRM-a

Interval u kome se vrši magnetizacija faze, u toku jednog ciklusa, naziva se *ugao magnetizacije* (engl. *dwell angle* – θ_{mag}). U toku ovog intervala napon na fazi je pozitivan (+U). Početak procesa magnetizacije u toku jednog ciklusa predstavlja *ugao uključjenja* θ_{on} , a kraj *ugao isključenja* θ_{off} . Prema tome ugao magnetizacije θ_{mag} je jednak razlici uglova uključjenja i isključenja ($\theta_{\text{mag}} = \theta_{\text{on}} - \theta_{\text{off}}$). Međutim, struja kroz namotaj faze, osim u toku intervala magnetizacije, protiče i nakon ovog intervala, koji se naziva period demagnetizacije. U toku perioda demagnetizacije, koji je opisan uglom demagnetizacije θ_{demag} , napon na fazi je negativan (-U) ili jednak nuli, a što zavisi od tehnike upravljanja. Zbir ugla magnetizacije (θ_{mag}) i ugla demagnetizacije predstavlja ugao provođenja θ_p ($\theta_p = \theta_{\text{mag}} + \theta_{\text{demag}}$).

Osim dva prethodno navedena kontrolna parametra (ugao uključjenja θ_{on} i ugao isključenja θ_{off}) u kontrolne parametre SRM-a spada i referentna vrijednost struje I_{ref} (u cilju ograničenja maksimalne struje). Ograničenje struje faze je neophodno pri malim brzinama obrtanja, a može se postići upotrebom histerezisnog kontrolera ili primjenom PWM tehnika.

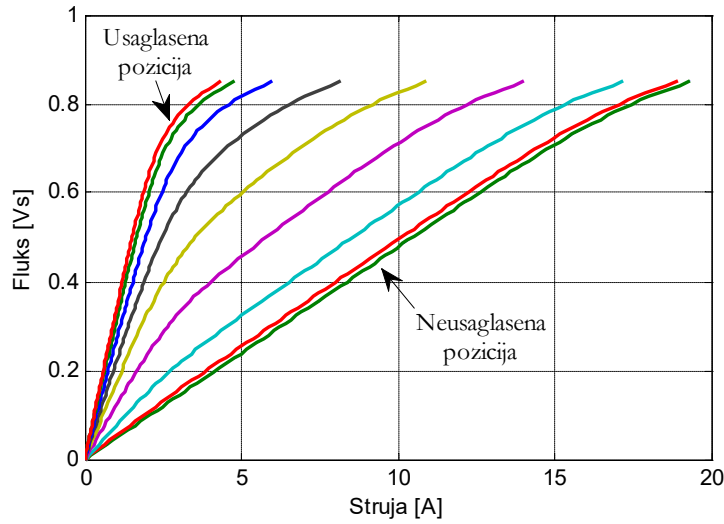
Podešavanjem vrijednosti kontrolnih parametara mogu se postići različite performanse SRM pogona. Uglavnom, u praksi se ovi parametri biraju tako da se ostvare neke željene, najčešće optimalne, performanse čitavog sistema (npr. maksimalna izlazna snaga, maksimalna efikasnost i slično) [64-67, 97, 99].

1.5 Naponska jednačina SRM-a

Dovođenjem napona U na fazni namotaj kroz isti će proteći struja i koja će formirati fluks Φ ($\Phi = N_{\text{nav}} \cdot \phi$, gdje je N_{nav} broj navojaka, a ϕ fluks jednog navojka) u magnetnom kolu. Naponska jednačina za jednu fazu SRM-a je:

$$U = R_{ph}i + \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1-3)$$

U normalnom režimu rada materijal od koga je napravljen SRM, ulazi u veće ili manje zasićenje, a što zavisi od međusobnog položaja polova statora i rotora i od vrijednosti struje kroz fazni namotaj [1-6]. Samim tim, vrijednost induktivnosti faze L ($L=\Phi/i$) je funkcija kako pozicije rotora u odnosu na stator tako i vrijednosti struje $L=L(\theta, i)$. Tipične zavisnosti obuhvatnog fluksa u funkciji struje, za različite pozicije rotora SRM-a, prikazane su na slici 1.5.

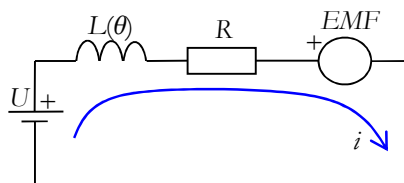


Slika 1.5 Tipične zavisnosti obuhvatnog fluksa od struje za različite pozicije rotora.

Ako se efekat zasićenja zanemari $L(\theta, i) \approx L(\theta)$, izraz (1-3) se svodi na oblik:

$$\begin{aligned}
 U &= R_{ph}i + \frac{d(L(\theta) \cdot i)}{dt} \\
 U &= R_{ph}i + L(\theta) \frac{di}{dt} + \underbrace{i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}}_{EMF}, \\
 U &= R_{ph}i + L(\theta) \frac{di}{dt} + EMF
 \end{aligned} \tag{1-4}$$

gdje EMF predstavlja kontraelektromotornu silu. Odgovarajuće ekvivalentno električno kolo pobuđene faze SRM-a prikazano je na slici 1.6.

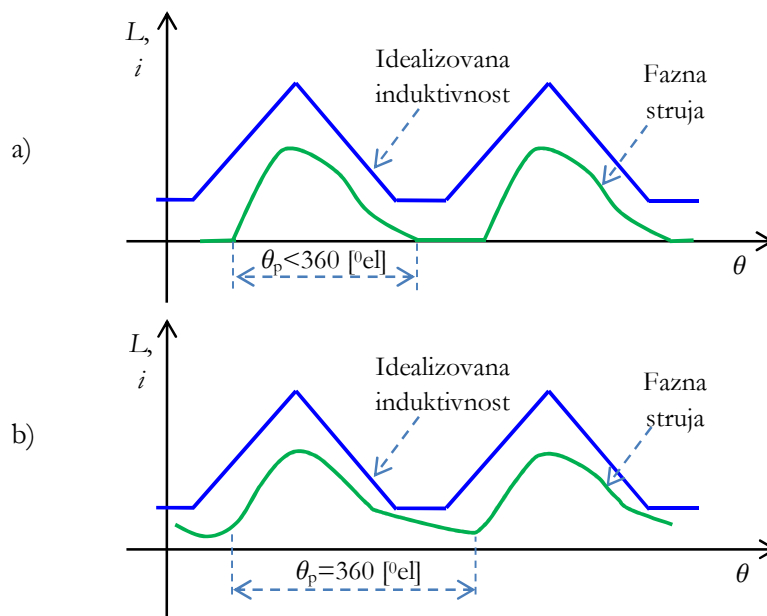


Slika 1.6 Ekvivalentno električno kolo jedne faze SRM-a.

1.6 Kontinualni i diskontinualni režim rada SRM-a

U zavisnosti od talasnog oblika struje u toku jednog ciklusa, SRM može da radi u:

- diskontinualnom (*Discontinuous Conduction Mode* - DCM) ili u
- kontinualnom režimu (*Continuous Conduction Mode* - CCM).



Slika 1.7 a) Diskontinualni i b) Kontinualni režim fazne struje.

DCM predstavlja konvencionalni metod rada SRM-a, kod koga struja u određenoj fazi mašine, nakon njene aktivacije (dovođenja napona), polazi od vrijednosti nula i nakon isteka perioda provođenja opet se vraća na vrijednost nula (slika 1.7a). Samim tim, ugao provođenja faze je manji od $360 [^\circ\text{el}]$. Za razliku od DCM-a, kod CCM-a struja kontinualno protiče kroz fazne namotaje motora (Slika 1.7b), pa je ugao provođenja faze $360 [^\circ\text{el}]$ [61-62, 64-67, 119-130].

1.7 Elektromagnetni moment SRM-a

Izraz za elektromagnetni moment SRM-a najlakše se može dobiti primjenjujući zakon o održanju energije. Naime, zakon o održanju energije kod SRM-a nalaže da je priraštaj ulazne električne energije (dW_{el}) jednak zbiru priraštaja magnetne energije (dW_m) i priraštaja mehaničke energije (dW_{meh}):

$$dW_{el} = dW_m + dW_{meh} \quad (1-5)$$

Priraštaj električne energije je opisan izrazom:

$$dW_{el} = (u - R_{ph}i) \cdot i \cdot dt = \frac{d\Phi}{dt} \cdot i \cdot dt = i \cdot d\Phi, \quad (1-6)$$

dok je priraštaj mehaničke energije:

$$dW_{meh} = M \cdot d\theta, \quad (1-7)$$

gdje je M elektromagnetni moment a $d\theta$ priraštaj ugaonog pomjeraja. Prema tome, (1-5) se može napisati u obliku:

$$M \cdot d\theta = i \cdot d\Phi - dW_m. \quad (1-8)$$

Za određeni položaj rotora (vidi sliku 1.8) vrijednost magnetne energije se definiše kao:

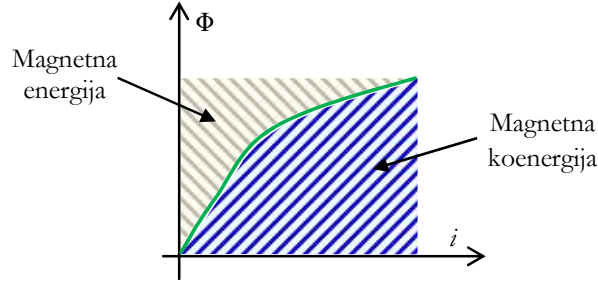
$$W_m = \int i(\theta, \Phi) \cdot d\Phi, \quad (1-9)$$

a vrijednost magnetne koenergije kao:

$$W'_m = \int \Phi(\theta, i) \cdot di, \quad (1-10)$$

pri čemu je:

$$\Phi \cdot i = W_m + W'_m. \quad (1-11)$$



Slika 1.8 Magnetna energija i koenergija za određeni položaj rotora SRM-a.

Ako se struja “ i ” i pozicija rotora “ θ ” izaberu kao nezavisne promjenjive, tj. da je

$$\Phi = \Phi(\theta, i) \text{ i } W_m = W_m(\theta, i), \text{ tada je } d\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial i} di + \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} d\theta \text{ i } dW_m = \frac{\partial W_m}{\partial i} di + \frac{\partial W_m}{\partial \theta} d\theta,$$

izraz (1-8) se svodi na:

$$\begin{aligned} M \cdot d\theta &= i \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial i} di + \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} d\theta \right) - \left(\frac{\partial W_m}{\partial i} di + \frac{\partial W_m}{\partial \theta} d\theta \right), \\ M \cdot d\theta &= \left(i \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial i} - \frac{\partial W_m}{\partial i} \right) \cdot di + \left(i \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{\partial W_m}{\partial \theta} \right) \cdot d\theta. \end{aligned} \quad (1-12)$$

Sa druge strane, koristeći (1-11) i (1-10), vrijednost $\frac{\partial W_m}{\partial i}$ se svodi na:

$$\frac{\partial W_m}{\partial i} = \frac{\partial (\Phi \cdot i - W'_m)}{\partial i} = \Phi \frac{\partial i}{\partial i} + i \frac{\partial \Phi}{\partial i} - \frac{\partial W'_m}{\partial i} = i \frac{\partial \Phi}{\partial i}, \quad (1-13)$$

pa se izraz za elektromagnetni moment (1-12) svodi na:

$$M(i, \theta) = i \cdot \frac{\partial \Phi(i, \theta)}{\partial \theta} - \frac{\partial W_m(i, \theta)}{\partial \theta}, \quad (1-14)$$

odnosno na:

$$M(i, \theta) = \frac{\partial W'_m(i, \theta)}{\partial \theta}. \quad (1-15)$$

Sličnim postupkom, ako se uzme da su fluks “ Φ ” i pozicija rotora “ θ ” nezavisne

promjenjive, tj. da je $i = i(\theta, \Phi)$ i $W_m = W_m(\theta, \Phi)$, tada je $dW_m = \frac{\partial W_m}{\partial \Phi} d\Phi + \frac{\partial W_m}{\partial \theta} d\theta$, pa

se zamjenom u (1-8) dobija da je:

$$M \cdot d\theta = i \cdot d\Phi - \frac{\partial W_m}{\partial \Phi} d\Phi - \frac{\partial W_m}{\partial \theta} d\theta. \quad (1-16)$$

Međutim, koristeći (1-9) vrijednost $\frac{\partial W_m}{\partial \Phi} d\Phi$ se svodi na:

$$\frac{\partial W_m}{\partial \Phi} d\Phi = \frac{\partial \left(\int i(\theta, \Phi) \cdot d\Phi \right)}{\partial \Phi} d\Phi = i(\theta, \Phi) \cdot d\Phi, \quad (1-17)$$

pa se izraz za momet (1-16) svodi na:

$$M(\theta, \Phi) = - \frac{\partial W_m(\theta, \Phi)}{\partial \theta}, \quad (1-18)$$

odnosno, koristeći (1-11) na:

$$M(\theta, \Phi) = \frac{\partial W'_m(\theta, \Phi)}{\partial \theta} - \Phi \cdot \frac{\partial i(\theta, \Phi)}{\partial \theta} \quad (1-19)$$

Ako se zanemari efekat zasićenja ($L(\theta, i) \approx L(\theta)$, $\Phi(\theta, i) = L(\theta) \cdot i$), magnetna koenergija je

$W'_m = \frac{1}{2} L(\theta) i^2$, pa se na osnovu (1-15) može napisati da je vrijednost momenta:

$$M(\theta, i) = \frac{dW'_m(\theta, i)}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}. \quad (1-20)$$

Na osnovu ove jednačine jasno je da vrijednost momenta zavisi od vrijednosti struje i izvoda induktivnosti, pri čemu njegov znak (pozitivan ili negativan) definiše izvod induktivnosti.

Izraz (1-20) se može dobiti i posmatrajući bilans snaga. Naime, trenutna vrijednost snage faze SRM-a, koristeći (1-4), se može napisati u sljedećem obliku:

$$p = ui = Ri^2 + Li \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL}{d\theta} \omega. \quad (1-21)$$

Određenim matematičkim modifikacijama, izraz (1-21) se može napisati u obliku:

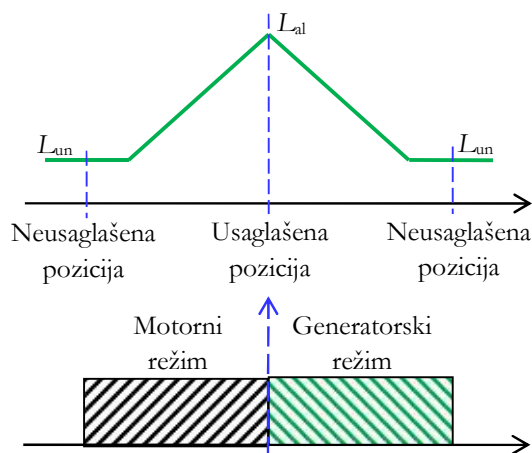
$$p = Ri^2 + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} Li^2 \right] + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \omega, \quad (1-22)$$

gdje prvi član predstavlja snagu koja se troši na gubitke usled otpornosti faze, drugi predstavlja akumulisanu snagu, a treći član predstavlja snagu na vratilu mašine (mehaničku snagu). Pošto je mehanička snaga jednaka proizvodu mehaničkog momenta i brzine na vratilu, izraz za moment ima oblik (1-20).

Sa druge strane, potrebno je naglasiti da SRM, zbog konstrukcije rotora i statora sa istaknutim polovima, posjeduje veliku talasnost (pulsacije) momenta, a koje se javljaju u trenucima uključenja jedne, a isključenja druge faze. Talasnost momenta uzrokuje oscilacije brzine obrtanja, a sa druge strane izaziva i pojavu buke i vibracija. Problem talasnosti momenta, a samim tim i buka i vibracija kod SRM-a, danas se prvenstveno rješava odgovarajućim metodama upravljanja [75-76, 80].

1.8 Motorni i generatorski režim rada SRM-a

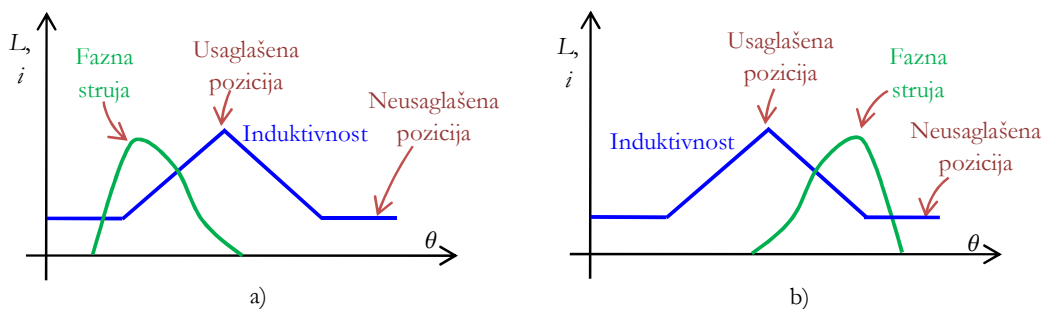
Na osnovu izraza za moment SRM-a (1-20), može se zaključiti da smjer momenta zavisi od izvoda induktivnosti, dok vrijednost momenta zavisi kako od vrijednosti struje tako i od izvoda induktivnosti.



Slika 1.9 Grafička predstava oblasti motornog i generatorskog režima rada SRM-a.

Kada se rotor kreće od neusaglašene ka usaglašenoj poziciji, induktivnost posmatrane faze se povećava (izvod induktivnosti je pozitivan), pa je i moment pozitivan. Sa druge strane, ako se rotor kreće od usaglašene ka neusaglašenoj poziciji, induktivnost

posmatrane faze se smanjuje (izvod induktivnosti je negativan), pa je moment suprotnog znaka u odnosu na prethodno pomenuti. Prema tome, ako se želi ostvariti motorni, odnosno generatorski režim rada, potrebno je dovesti napon na posmatranu fazu (aktivirati fazu) u intervalu kada induktivnost raste, odnosno opada, respektivno. Za idealizovanu zavisnost $L(\theta)$ grafička predstava oblasti motornog i generatorskog režima rada prikazana je na slici 1.9. Idealizovani oblici induktivnosti i fazne struje kada SRM radi u motornom i generatorskom režimu u DCM-u prikazani su na slici 1.10.

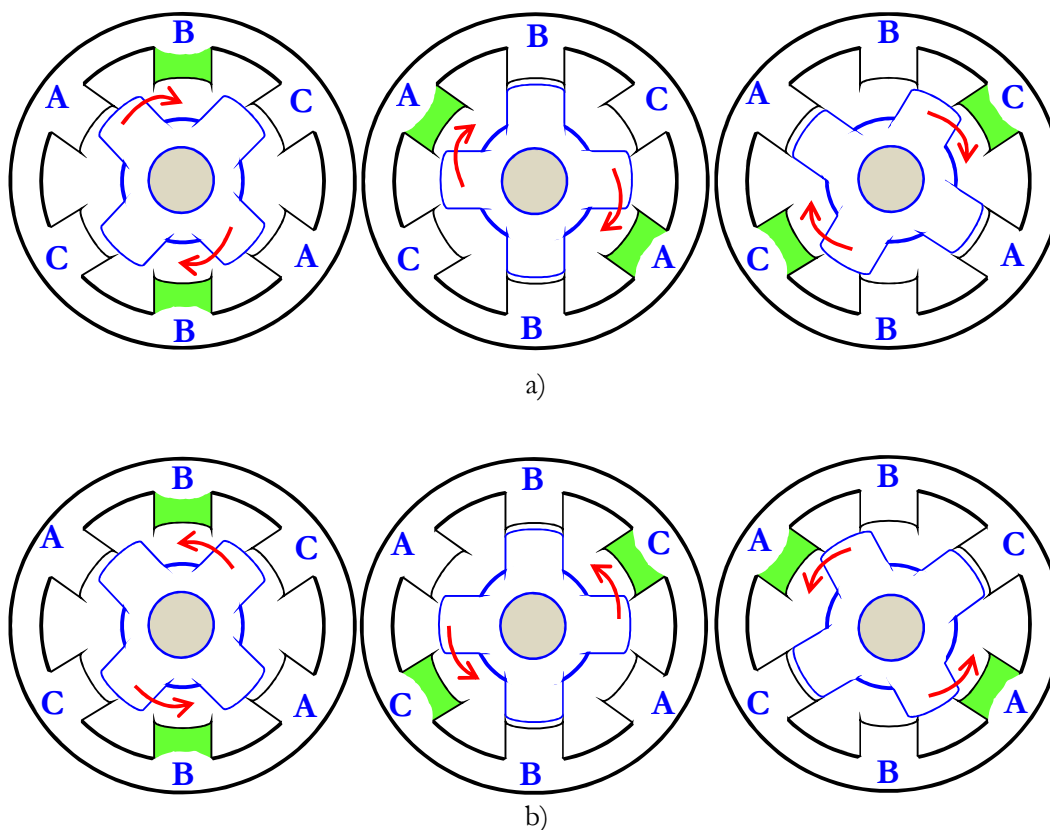


Slika 1.10 Idealizovani oblik induktivnosti i fazne struje SRM-a za a) Motorni i b) Generatorski režim rada u DCM-u.

1.9 Promjena smjera obrtanja SRM-a

Promjena smjera obrtanja SRM-a u motornom režimu rada vrši se promjenom redosljeda uključivanja pojedinih faza. Na slici 1.11a je prikazano nekoliko uzastopnih pozicija rotora prekidačkog reluktantnog motora pri obrtanju u smjeru kazaljke na satu, a na slici 1.11b pri smjeru obrtanja suprotnom od smjera obrtanja kazaljke na satu. Na ovim slikama zatamnjeni polovi statora predstavljaju pobuđene faze mašine, dok strelice pokazuju smjer obrtanja rotora.

Kod generatorskog režima rada SRM-a, nakon promjene smjera obrtanja rotora potrebno je izvršiti i promjenu aktiviranja faza.



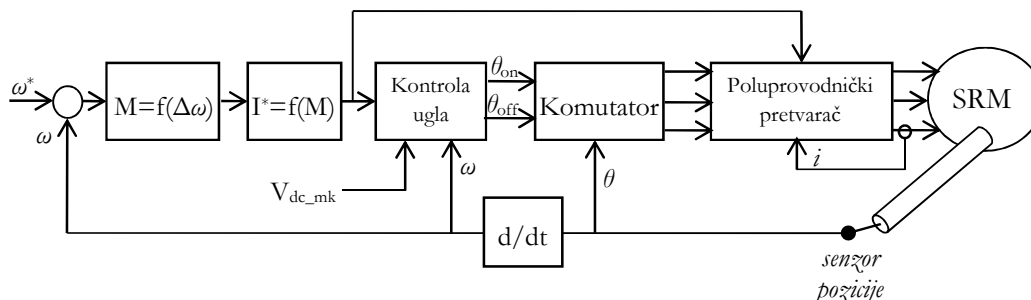
Slika 1.11 Nekoliko pozicija rotora prekidačkog reluktantnog motora pri obrtanju u smjeru: a) kazaljke na satu i b) suprotnom od smjera obrtanja kazaljke na satu.

1.10 Klasično upravljanje SRM-om

Klasični metodi upravljanja SRM-om podrazumijevaju regulaciju brzine obrtanja kod motornog režima, i regulaciju izlazne (električne) snage kod generatorskog režima, podešavanjem vrijednosti kontrolnih uglova i referentne vrijednosti struje. Naime, uz pomoć ovih upravljačkih veličina vrši se regulacija kako trenutne tako i efektivne vrijednosti struje mašine. Međutim, za pravilno pozicioniranje kontrolnih uglova potrebno je poznavati poziciju rotora, što je glavna odlika klasičnog načina upravljanja SRM-om.

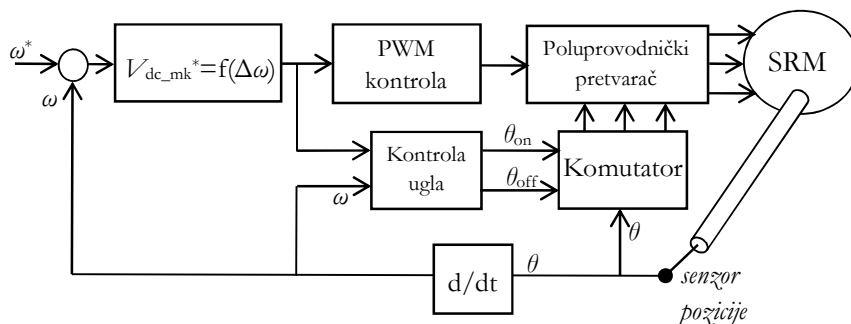
Regulacija vrijednosti fazne struje može se ostvariti strujnom ili naponskom kontrolom. Ako se zahtijevaju visoke performanse pogona, upotrebljava se kontrola sa strujnom regulacijom (slika 1.12). Glavna odlika ovog tipa upravljanja jeste mogućnost

brzog odziva struje (puni napon napajanja je dostupan za forsiranje struje), kao i dobijanje konstantnog momenta u širokom opsegu brzina. Međutim, glavni nedostatak ovoga algoritma upravljanja jeste zahtjev za senzorom struje u svakoj fazi.



Slika 1.12 Blok šema upravljanja SRM-om primjenom strujne regulacije.

Sa druge strane, ako se ne zahtijevaju visoke performanse pogona koriste se algoritmi sa naponskom širinsko-impulsnom modulacijom (*Pulse Width Modulation* - PWM). Blok šema upravljanja SRM-om primjenom naponske regulacije prikazana je na slici 1.13. Širinsko-impulsnom regulacijom napona postiže se postepen, ali kontrolisan, rast struje uz spor odziv sistema [2].



Slika 1.13 Blok šema upravljanja SRM-om primjenom naponske regulacije.

1.11 Eliminacija senzora pozicije

Kao što je već napomenuto, klasični metodi upravljanja SRM-om zahtijevaju poznavanje pozicije rotora [63]. Informacija o poziciji rotora se može dobiti direktnim

mjerenjem, tj. upotrebom nekog od davača ugaonog položaja (npr. apsolutnog rotacionog pozicionog enkodera). Isto tako, ako se SRM koristi u pozicionim servo sistemima, za mjerenje pozicije rotora može se iskoristiti i senzor servo sistema. Primjeri klasičnog metoda upravljanja SRM-om pri radu u CCM-u, bazirani na direktnom mjerenju pozicije rotora, opisani su u [64-67].

Međutim, brojni se naponi ulažu u cilju eliminacije senzora pozicije kod SRM-a (tzv. bezsenzorsko upravljanje – upravljanje bez senzora pozicije [1 – strana 108]), što bi doprinijelo povećanju robustnosti, pojednostavljenju, smanjenju veličine i njegovoj primjeni u okruženju visokih temperatura i vibracija. Zbog toga su razvijeni i metodi kod kojih se vrši procjena pozicije rotora na osnovu informacije o vrijednosti induktivnosti ili na osnovu informacija o vrijednosti fluksa i/ili struje [68, 69]. Međutim, kod upravljanja baziranih na informaciji o poziciji rotora izuzetno je važna tačnost izmjerene (estimirane) pozicije rotora. Naime, kod velikih brzina obrtanja SRM-a, vrijednost kontraelektromotorne sile je srazmjerna priključenom naponu, pa mala greška u mjerenju (estimaciji) pozicije rotora, ili mala varijacija u pozicioniranju kontrolnih uglova, može dovesti do naglog povećanja struje pogotovo pri radu u CCM-u [64-65]. Konkretno, povećanje regiona magnetizacije (θ_{mag}) smanjuje interval demagnetizacije (θ_{demag}), jer je $\theta_{\text{mag}} + \theta_{\text{demag}} = 360^\circ$, pa struja počinje da raste i pri veoma malim promjenama kontrolnih uglova. Upravo je ovo glavni razlog ograničene primjene SRM-a pri radu u CCM-u, pa postojeći metodi upravljanja SRM-om u CCM-u zahtijevaju i dodatne senzore (npr. senzore struje) [64-67]. Međutim, treba napomenuti da velika tačnost mjerenja (estimacije) pozicije rotora, kao i velika tačnost podešavanja kontrolnih uglova, nije toliko važna kod malih brzina obrtanja. Naime, kod malih brzina obrtanja vrijednost kontraelektromotorne sile je mala, pa nakon dovođenja napona na fazu, struja veoma brzo raste. Zbog toga se za male brzine obrtanja vrši regulacija struje (npr. upotrebom histerezisnog kontrolera).

Na kraju treba takođe napomenuti da, za razliku od metoda upravljanja kod kojih se vrši direktno mjerenje pozicije rotora, svi ostali algoritmi za upravljanje SRM-om, bez obzira da li vrše estimaciju pozicije ili se informacija o poziciji uopšte i ne koristi, usložnjavaju upravljački dio energetskog pretvarača. Takvi algoritmi upravljanja često su bazirani na upotrebi neuralnih mreža i *fuzzy* logike [70-72].

1.12 Prednosti i nedostaci pogona sa SRM-om

SRM, kao i pogoni sa SRM-om, ima veliki broj nedostataka, ali i veliki broj prednosti u odnosu na druge električne mašine i njihove pogone. Konkretno, glavni nedostaci pogona sa SRM-om su:

- istaknuta struktura statora i rotora [1-6],
- nelinearna zavisnost struje i momenta [1-6],
- formiranje buke [82-84],
- poseban pretvarač za napajanje [1-6, 50-62],
- zahtjev za senzorom pozicije [1-6, 63-67],
- veći broj kontrolnih parametara [1-6, 63-67, 97-99],
- složenost kontrolnih šema u odnosu na kontrolne šeme drugih električnih mašina [1].

Nasuprot njima, glavne prednosti pogona sa SRM-om su:

- Prosta i robustna konstrukcija [1-6]:
 - Na rotoru se ne nalaze namotaji,
 - Na rotoru se ne nalaze stalni magneti,
 - Na rotoru se ne nalaze četkice,
 - Namotaj na statoru je koncentrisan samo oko istaknutih polova,
- Gubici u mašini koncentrisani na statoru [1, 85-90],
- Lako hlađenje mašine [1, 85-90],
- Visoka efikasnost mašine [1-6, 80, 89-90],
- Moment inercije rotora je mali [1, 95-96],
- Brz start mašine [1, 95-96],
- Unipolarne struje kroz namotaje [1-6],
- Vrijednosti međusobnih induktivnosti namotaja su zanemarljive [94],
- Moguć rad pri velikim brzinama obrtanja [62, 64-67, 119-130],
- Moguć rad u velikom opsegu brzina [61-62, 120, 129-130],
- Moguć rad u uslovima kvara na nekoj od faza [91-94].

Razvoj energetske elektronike doprinio je i velikom razvoju energetskih pretvarača za napajanje SRM-a. Sa druge strane, razvoj mikrokontrolera doprinio je olakšanoj

implementaciji različitih metoda upravljanja SRM-om. Sve ovo je doprinijelo povećanju broja primjena pogona sa SRM-om, pa se SRM danas može naći u velikom broju aplikacija: u kućanskim aparatima, u industrijskim postrojenjima, u vjetrogeneratorskim sistemima, u aeronautičkim aplikacijama i slično. U nekim aplikacijama primjena SRM-a je u potpunosti superiorna u odnosu na primjenu drugih električnih mašina. Konkretno, za aplikacije kod kojih se zahtijeva velika brzina obrtanja, primjena SRM-a, pri radu u CCM-u, je efikasnija i opravdanija od primjene asinhronih ili primjene sinhronih mašina [66-67].

POGLAVLJE 2

Nelinearni modeli za simulaciono utvrđivanje karakteristika SRM-a

U ovom poglavlju navedena je generalna podjela nelinearnih modela za simulaciono utvrđivanje karakteristika SRM-a. Za svaku grupu modela navedene su njihove osnovne karakteristike, kao i mogućnosti korišćenja. Posebna pažnja je posvećena analitičkim modelima kod kojih se fluks-struja zavisnosti određuju na osnovu jednačina magnetnog kola mašine.

2.1 Podjela nelinearnih modela

Veza fluksa, struje i pozicije rotora SRM-a je izuzetno nelinearna pošto u toku rada materijal od koga je napravljena ova mašina ulazi u veće ili manje zasićenje. Zbog toga SRM spada u grupu mašina sa izraženim nelinearnim karakteristikama, pa je u cilju ispitivanja i određivanja njegovih karakteristika, potrebno koristiti simulacije zasnovane na nelinearnim modelima. Danas se simulacija rada SRM-a, kao i pogona sa SRM-om, najčešće vrši implementacijom jednačina koje opisuju ovu mašinu u programskim paketima MATLAB/Simulink [43-46, 115-117] i SPICE [47-49, 118].

U literaturi se može naći veći broj nelinearnih modela SRM-a. Generalno, svi ovi modeli se mogu podijeliti u tri grupe:

- modeli zasnovani na upotrebi metoda konačnih elemenata (FEM-a),
- modeli zasnovani na matematičkom opisu fluks-struja zavisnosti i
- modeli kod kojih se matematičke fluks-struja zavisnosti određuju rješavanjem jednačina magnetnog kola mašine.

2.2 Modeli zasnovani na upotrebi FEM-a

FEM predstavlja jedan od najzastupljenijih numeričkih postupaka za rješavanje inženjerskih problema koji se odlikuju izraženim nelinearnostima. Upravo zbog toga, FEM je veoma zastupljen kod proračuna fluks-struja karakteristika SRM-a, jer se uz pomoć njega mogu uzeti u obzir i brojna lokalna zasićenja koja su veoma bitna za rad mašine [23]. Isto tako, FEM je zastupljen i kod proračuna optimalnih geometrijskih parametara SRM-a [24], porasta temperature u SRM-u [25], ekscentriciteta rotora [26], talasnosti momenta [27] i sl.

Glavna prednost upotrebe FEM-a jeste u tome što ovaj metod obezbjeđuje visok stepen tačnosti u poređenju sa eksperimentalnim rezultatima [23]. Međutim, glavni nedostatak upotrebe FEM-a jeste u tome što ovaj metod zahtijeva veliki broj ulaznih podataka, posebno o geometriji mašine i karakteristikama materijala. Samim tim, njegova primjena je veoma složena. Isto tako, nedostatak upotrebe FEM-a jeste i u neophodnosti velikog broja izračunavanja, što ga čini sporim i nepodesnim za brojne primjene (npr. za projektovanje mašine).

2.3 Modeli zasnovani na matematičkom opisu fluks-struja krivih dobijenih mjerenjem ili upotrebom FEM metoda

Glavna prednost upotrebe modela koji se zasnivaju na matematičkom opisu fluks-struja krivih, koje su dobijene mjerenjem ili upotrebom FEM metoda, jeste u njihovoj maloj računarskoj kompleksnosti. Upravo zbog toga su veoma zastupljeni u analizi rada SRM-a i električnih pogona sa SRM-om. Međutim, ako su ovi modeli bazirani na izmjerenim podacima njihova tačnost zavisi od tačnosti sprovedenog mjerenja [2].

Jedan od prvih otkrivenih modela SRM-a, koji pripada ovoj mnogobrojnoj grupi, prikazan je u [15] i poznat je kao *M. Ilić-Spong* model. Osim njega često se koristi i *Torrey-ev* model [12], koji u suštini predstavlja modifikovani *M. Ilić-Spong* model.

Osim modela u kojima je predstavljena matematička veza fluksa i struje, postoje i modeli koji definišu direktnu, analitičku, fluks-struja-pozicija zavisnost. Karakterističan predstavnik ove grupe analitičkih modela SRM-a jeste *Chan-ov* model [29].

2.3.1 Ilić-Spong model SRM-a

Prema *M. Ilić-Spong* analitičkom modelu SRM-a [15], veza fluksa Φ , pozicije θ i fazne struje i može se prikazati na sljedeći način:

$$\Phi(i_f, \theta) = \Phi_{al} \left(1 - e^{-i_f F_{2f}(\theta)} \right), \quad i \geq 0, \quad (2-1)$$

gdje indeks “ f ” predstavlja fazu mašine, Φ_{al} je vrijednost fluksa u zasićenju pri usaglašenoj poziciji polova rotora i statora, a F_2 je funkcija koja opisuje poziciju rotora. Prema ovom modelu, funkcija F_2 je data u obliku Furijeovog niza:

$$F_{2f}(\theta) = a + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ b_n \sin \left(nN_r \theta - (f-1) \frac{2\pi}{N} \right) + c_n \cos \left(nN_r \theta - (f-1) \frac{2\pi}{N} \right) \right\}, \quad (2-2)$$

gdje je N_r – broj polova rotora, a N ukupan broj faza mašine, dok se koeficijenti a_n , b_n i c_n određuju na osnovu izmjerenih fluks-struja-pozicija vrijednosti. Na kraju, prema ovom modelu, izraz za elektromagnetni moment SRM-a je:

$$M = \sum_{f=1}^m M_f(\theta, i_f), \quad (2-3)$$

$$M_f(\theta, i_f) = \frac{\Phi_{al}}{F_f^2(\theta)} \cdot \frac{dF_{2f}(\theta)}{d\theta} \left(1 - (1 + i_f F_{2f}(\theta)) e^{-i_f F_{2f}(\theta)} \right).$$

2.3.2 Torrey-ov model SRM-a

Torrey i *Lang* [12] su testirali veliki broj SRM-a i ustanovili da *M. Ilić-Spong* model SRM-a nije generalno prihvatljiv za sve SRM. Zbog toga su razvili sljedeću funkcionalnu zavisnost fluksa, struje i pozicije mašine:

$$\Phi(i, \theta) = a_1(\theta) \left(1 - e^{-i a_2(\theta)} \right) + a_3(\theta) \cdot i, \quad i \geq 0, \quad (2-4)$$

gdje su a_1 , a_2 i a_3 koeficijenti koji zavise od pozicije mašine. Po ovom modelu, koeficijenti a_1 , a_2 i a_3 se mogu predstaviti preko sljedeće formule:

$$a_j = \sum_{k=0}^{\infty} A_{pk} \cos(kN_r \theta), \quad (2-5)$$

gdje indeks “ j ” predstavlja broj 1, 2 ili 3, a $\mathcal{A}_{pk}$ predstavlja konstante koje se određuju na osnovu izmjerenih fluks-struja-pozicija vrijednosti. Prema tome, kod modela *M. Ilić-Spong* koeficijent Φ_{al} je konstantan i ne zavisi od pozicije rotora, dok je po *Torrey*-ovom modelu ovaj koeficijent funkcija pozicije.

Na kraju, izraz za elektromagnetni moment SRM-a, prema ovom modelu, dat je u sljedećem obliku:

$$\begin{aligned}
 M &= \sum_{f=1}^m M_f(i_f, \theta) \\
 M_f(i_f, \theta) &= \left[i_f + \frac{1}{a_{2f}} \left(1 - e^{-i_f \cdot a_2(\theta)} \right) \right] \frac{da_{1f}}{d\theta} \\
 &\quad - \left[\frac{a_{1f}}{a_{2f}^2} \left(1 - e^{i_f \cdot a_2(\theta)} \right) + \frac{a_{1f} i_f}{a_{2f}} e^{i_f \cdot a_2(\theta)} \right] \frac{da_{2f}}{d\theta} \\
 &\quad + \frac{1}{2} i_f^2 \frac{da_{3f}}{d\theta}
 \end{aligned} \tag{2-6}$$

2.3.3 Chan-ov model SRM-a

Za razliku od metoda *Torrey*-a i *M. Ilić Spong*, *Chan* je predložio direktnu 3-D formulaciju predstavljanja fluks-struja-pozicija zavisnosti (tzv. *Chan-ov niz*) [29]. Matematički oblik fluks-struja-pozicija zavisnosti prema ovom modelu je:

$$\Phi(\theta, i) = \sum_{n=1}^Q c_{0n} \left[\frac{1}{1 + e^{c_{1n} \cdot \theta - c_{2n}}} + \frac{1}{1 + e^{-c_{1n} \cdot \theta - c_{2n}}} - c_{3n} \right] \left[\frac{2}{1 + e^{c_{3n} \cdot i}} - 1 \right], \tag{2-7}$$

gdje su c_{1n} , c_{2n} , c_{3n} i c_{4n} konstante koje se određuju na osnovu izmjerenih fluks-struja-pozicija vrijednosti, dok Q predstavlja proizvoljan broj (poželjno je da bude što veći broj). Izraz za elektromagnetni moment, po ovom modelu SRM-a, je:

$$M(\theta, i) = \sum_{n=1}^Q c_{0n} \left[\frac{-c_{1n} \cdot e^{c_{1n} \cdot \theta - c_{2n}}}{\left(1 + e^{c_{1n} \cdot \theta - c_{2n}} \right)^2} + \frac{c_{1n} \cdot e^{-c_{1n} \cdot \theta - c_{2n}}}{\left(1 + e^{-c_{1n} \cdot \theta - c_{2n}} \right)^2} \right] \left[\frac{2 \ln(2) - 2 \ln(1 + e^{c_{4n} \cdot i})}{c_{4n}} + i \right]. \tag{2-8}$$

2.4 Analitički modeli zasnovani na rješavanju jednačina koje opisuju magnetno kolo mašine

Analitički modeli zasnovani na rješavanju jednačina koje opisuju magnetno kolo mašine, u većoj ili manjoj mjeri, kombinuju fizičke relacije, kojima se opisuje magnetno kolo mašine tj. putanja fluksa, sa iskustvenim relacijama [2, 40].

Jedan od najpoznatijih predstavnika ove grupe analitičkih modela jeste *Radun*-ov model [38]. *Radun*-ov model SRM-a uzima u obzir složeno magnetno kolo mašine, ali u cilju određivanja fluks-struja zavisnosti uvodi zanemarivanje efekta zasićenja magnetnog materijala u položajima kada počinje preklapanje polova statora i rotora. Zbog toga je veoma pogodan za utvrđivanje statičkih, ali ne i dinamičkih, karakteristika motora. Veoma pogodan model za utvrđivanje i statičkih i dinamičkih karakteristika motora jeste *Miller*-ov model [39]. Rezultati koji se dobijaju primjenom *Miller*-ovog modela su izuzetno tačni jer ovaj model uključuje sve važnije efekte lokalnih zasićenja u magnetnom kolu mašine. Međutim, ovaj model, kao i mnogi drugi modeli ove grupe, osim podataka o geometriji mašine i karakteristikama materijala, zahtijeva i nekoliko podataka sa fluks-struja karakteristika koji se trebaju odrediti ili kroz eksperimente, ili upotrebom FEM-a. Za razliku od svih njih, *Vujičić*-ev model SRM-a, opisan u [40], osim podataka o geometriji mašine i karakteristikama materijala, zahtijeva samo još, kao neophodan podatak, vrijednost induktivnosti pri neusaglašenom položaju polova statora i rotora. Ovu vrijednost je relativno lako eksperimentalno odrediti pošto u neusaglašenom položaju rotora i statora magnetni materijal ne ulazi u zasićenje. Sa druge strane, ovaj model obezbjeđuje određivanje i statičkih i dinamičkih karakteristika motora.

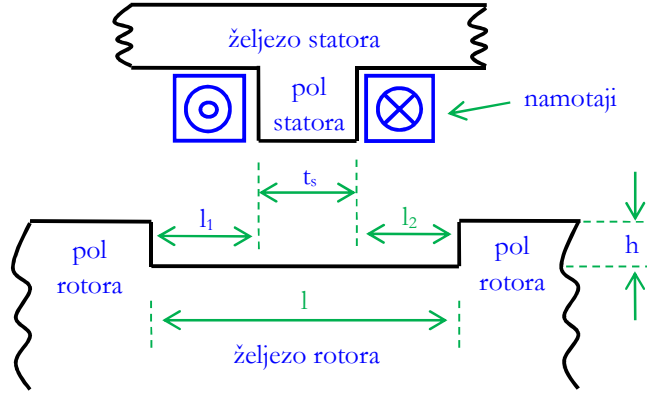
2.4.1 *Radun*-ov model SRM-a

Jedan od prostijih analitičkih modela SRM-a, kod koga se vrijednosti fluksa, odnosno struje faze, određuju rješavanjem jednačina magnetnog kola mašine, razvio je *Arthur Radun* [38].

Radun-ov metod se zasniva na analizi dva položaja rotora – kada postoji i kada ne postoji poklapanje polova statora i rotora. U slučaju kada ne postoji preklapanje polova rotora i statora, induktivnost faze se izračunava preko sljedećeg izraza:

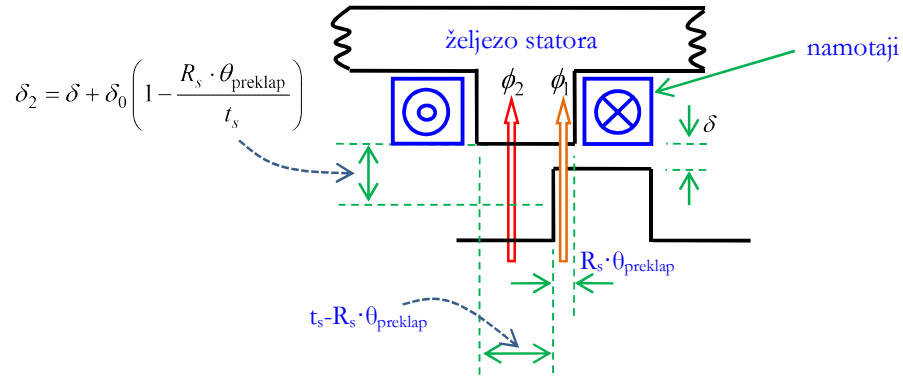
$$L = 8\mu_0 N_{nav}^2 l_{stk} l \sum_{n-\text{neparno}} \frac{\frac{\sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{l_1}{l}\right)}{l_1} + \frac{\sin\left(n \cdot \pi \cdot \frac{l_2}{l}\right)}{l_2}}{(\pi n)^2 \tanh\left(n\pi \frac{h}{l}\right)} \quad (2-9)$$

gdje je N_{nav} broj navojaka po polu, l_{stk} dužina motora, μ_0 permeabilnost vazduha, dok su h , l , l_1 i l_2 definisani na slici 2.1.



Slika 2.1 Međusobni položaj polova rotora i statora, sa oznakama bitnim za *Radun*-ov model SRM-a.

Za slučaj kada postoji preklapanje polova, *Radun* je predložio da se vrijednost obuhvatnog fluksa računa kao zbir flukseva kroz dvije paralelne putanje (slika 2.2).



Slika 2.2 Određivanje fluksa u intervalu kada postoji djelimično preklapanje polova statora i rotora.

Za vrijednost fluksa prve putanje Φ_1 , *Radun* je predložio sljedeću formulu:

$$\Phi_1 = \Phi_0 \frac{R_s \theta}{\delta} \left[\frac{N_{\text{nav}} \cdot i \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\delta}{l_{\text{fe}}} \right) + \frac{l_1 \cdot B_{\text{sat}}}{2\mu} - \sqrt{\left(\frac{l_1 \cdot B_{\text{sat}}}{2\mu} \right)^2 + \frac{\left(l_{\text{fe}} - \frac{l_1}{2} \right) \cdot N_{\text{nav}} \cdot i \cdot B_{\text{sat}}}{\mu} + \frac{N_{\text{nav}}^2 \cdot i^2}{4 \left(1 + \frac{\delta}{l_{\text{fe}}} \right)^2}}}{1 + \frac{\delta}{l_{\text{fe}}}} \right] \quad (2-10)$$

gdje je R_s najmanji poluprečnik statora, stf faktor popunjenosti željeza i l_{fe} dužina segmenta u željezu (dvostruka visina polova statora i rotora), dok je $\Phi_0 = 2\mu_0 N_{\text{nav}} l_{\text{stk}} stf$, a

$$l_1 = l_{\text{fe}} + \frac{\mu \delta}{\mu_0 \left(1 + \frac{\delta}{l_{\text{fe}}} \right)}.$$

Vrijednost fluksa druge putanje (Φ_2) data je sljedećim izrazom:

$$\Phi_2 = \Phi_0 \frac{t_s - R_s \theta}{\delta} \left[N_{\text{nav}} \cdot i \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\delta}{l_{\text{fe}}} \right) + \frac{l_1 B_{\text{sat}}}{2\mu} - \sqrt{\left(\frac{l_2 \cdot B_{\text{sat}}}{2\mu} \right)^2 + \frac{\left(l_{\text{fe}} - \frac{l_2}{2} \right) \cdot N_{\text{nav}} \cdot i \cdot B_{\text{sat}}}{\mu} + \frac{N_{\text{nav}}^2 \cdot i^2}{4}} \right] \quad (2-11)$$

$$\text{gdje je } l_2 = l_{\text{fe}} + \frac{\mu \delta}{\mu_0}.$$

Glavna odlika *Radun*-ovog modela je ta da ovaj model uključuje efekte zasićenja magnetnog kola, dok, sa druge strane, zahtijeva samo podatke o geometriji mašine i karakteristikama materijala. Međutim, osim što je neprecizan za intervale u kojima počinje preklapanje polova statora i rotora, nedostatak upotrebe ovog modela je i taj što ovaj model ne pruža mogućnost analitičkog predstavljanja veze struje faze, fluksa i položaja rotora.

2.4.2 *Miller*-ov model SRM-a

Miller-ov model SRM-a je zasnovan na kombinaciji jednačina koje opisuju magnetno kolo mašine sa iskustvenim relacijama [39]. Prema ovome modelu za potpuno definisanje fluks-struja karakteristika neophodni su podaci o vrijednosti induktivnosti pri potpunom nepoklapanju polova rotora i statora L_{un} , kao i podaci o vrijednosti fluksa Φ_s i struje I_s , odnosno induktivnosti L_a , pri potpunom poklapanju polova statora i rotora u početku zasićenja, kao i vrijednost fluksa Φ_M pri potpunom poklapanju polova rotora i statora, a pri nominalnoj vrijednosti struje I_M kroz namotaje (slika 2.3a).

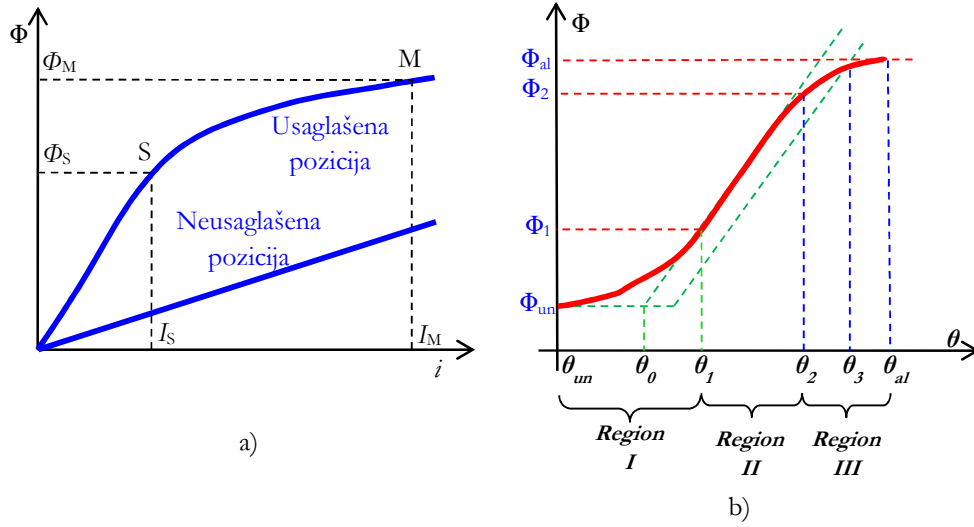
Po *Miller*-ovom modelu, fluks u neusaglašenom položaju se može predstaviti kao

$$\Phi_{un}(i) = L_{un} \cdot i \quad (2-12)$$

dok se u neusaglašenom položaju kriva fluks-struja može podijeliti na linearni i nelinearni dio

$$\Phi_a(i) = \begin{cases} L_a \cdot i, & i \leq I_s \\ \Phi_{s0} + \sqrt{4a(i - I_{s0})}, & i > I_s \end{cases} \quad (2-13)$$

gdje je $I_{s0} = I_s - \frac{a}{L_a^2}$, $\Phi_{s0} = \Phi_s - \frac{2a}{L_a}$, $a = \frac{\Phi_{MS}^2}{4 \left(I_{MS} - \frac{\Phi_{MS}}{L_a} \right)}$, $\Phi_{MS} = \Phi_M - \Phi_s$ i $I_{MS} = I_M - I_s$.



Slika 2.3 Fluks-struja i fluks-pozicija karakteristike SRM-a. a) Usaglašena i neusaglašena fluks-struja zavisnost. b) Oblik fluks-pozicija (Φ - θ) krive za konstantnu vrijednost struje.

Miller je sagledavajući eksperimentalne rezultate izvršene na velikom broju SRM-a primijetio da Φ - θ zavisnosti imaju približno isti oblik za bilo koju vrijednost struje faze. Zbog toga je predložio sljedeću formulu:

$$\Phi(\theta) = \begin{cases} \Phi_1 + \frac{A(\theta - \theta_1)}{B - (\theta - \theta_1)}, & \theta_{un} \leq \theta \leq \theta_1 \\ \Phi_{un} + k_a(\theta - \theta_0), & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ \Phi_2 + \frac{A_1(\theta - \theta_2)}{B_1 + (\theta - \theta_2)}, & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_{al} \end{cases} \quad (2-14)$$

pri čemu je $k_a = \frac{\Phi_{al} - \Phi_{un}}{\theta_3 - \theta_1}$ i $\theta_3 = \theta_{al} - \frac{\beta_r - \beta_s}{2}$, a gdje su Φ_{al} i Φ_{un} vrijednost flukseva u usaglašenoj i neusaglašenoj poziciji, respektivno, β_r i β_s uglovi polova rotora i statora, respektivno, θ_3 je položaj u kome pol rotora u potpunosti prekrije površinu pola statora, a ostale oznake su date na slici 2.3b. *Miller* je koristeći eksperimente utvrdio da je:

$$\theta_0 = \theta_1 - \frac{\Phi \theta_{al}}{12\Phi_M} \quad (2-15)$$

Koeficijenti A , B , A_1 i B_1 , iz (2-14), se određuju na osnovu činjenice da je funkcija Φ - θ neprekidna i diferencijabilna u tačkama $\theta=\theta_1$ i $\theta=\theta_2$ i na osnovu vrijednosti funkcije u neusaglašenoj i usaglašenoj poziciji $\Phi(\theta_{un})=\Phi_{un}$ i $\Phi(\theta_{al})=\Phi_{al}$. Prema tome, *Miller* je podijelio Φ - θ zavisnost na tri regiona:

- ✓ Region I – obuhvata položaje rotora od neusaglašene pozicije (θ_{un}) do početka preklapanja polova rotora i statora (θ_1);
- ✓ Region II – obuhvata položaje rotora od θ_1 pa do položaja θ_2 u kome rotor prekriva polovinu površine pola statora i
- ✓ Region III – obuhvata preostali dio položaja rotora od pozicije θ_2 pa do usaglašene pozicije θ_{al} .

Izraz za elektromagnetni moment SRM-a prema *Miller*-ovom modelu je:

$$M = \begin{cases} \frac{AB}{(B - (\theta - \theta_1))^2} \cdot i, & \theta_{un} \leq \theta \leq \theta_1, \\ k_a \cdot i, & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2, \\ \frac{A_1 B_1}{(B_1 + (\theta - \theta_2))^2} \cdot i, & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_{al}. \end{cases} \quad (2-16)$$

Glavna prednost *Miller*-ovog modela jeste u tome što on obezbjeđuje veliku tačnost rezultata i dobijanje dinamičkih karakteristika. Međutim, glavni nedostatak upotrebe *Miller*-ovog modela je u tome što on zahtijeva određeni broj podataka dobijenih ili eksperimentalno ili putem FEM-a.

2.4.3 Vujičić-ev model SRM-a

Model *Vujičić*-a polazi od pretpostavke da se magnetno kolo mašine može ekvivalentirati sa dva redno vezana magnetna otpora – jedan otpor obuhvata cjelokupnu reluktansu željeza rotora i statora (isključujući uske djelove uz površine gdje se polovi rotora i statora preklapaju), dok drugi otpor obuhvata reluktansu vazdušnih djelova između polova statora i rotora aktivne faze, kao i uske željezne djelove podložne zasićenju, koje ne obuhvata prvi otpor [2, 40].

Magnetni otpor željeza rotora i statora se lako može odrediti iz sljedeće jednačine:

$$R_{Fe} = \frac{l_{fe}}{\mu S_{fe}}, \quad (2-17)$$

pri čemu je $S_{fe} = t_s L_s$, $t_s = 2(r_r + g) \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right)$, $l_{fe} = l_{fes} + l_{feok} + l_{fer}$, $l_{fes} = 2(r_{us} - r_r)$,

$l_{feok} = \pi \frac{r_{ss} + r_{us}}{2}$ i $l_{fer} = 2r_r$, a gdje je μ - permeabilnost željeza, l_{fe} i S_{fe} efektivna dužina i efektivna površina poprečnog presjeka željeza, respektivno, t_s – širina pola statora, L_s – dužina jarma statora, β_s – ugao pola statora, r_r – veći poluprečnik statora, g – dužina vazdušnog procjepa, l_{feok} – dužina poluobima jarma statora, l_{fes} – dvostruka vrijednost pola statora, l_{fer} – prečnik rotora, r_{ss} – spoljašnji poluprečnik statora, r_{us} – unutrašnji poluprečnik statora.

Za određivanje vrijednosti magnetne otpornosti vazdušnih djelova između polova statora i rotora aktivne faze, kao i uskih željeznih djelova podložnih zasićenju, *Vujičić* je pošao od pretpostavke da ekvivalentna površina koju zahvataju polovi statora i rotora ima isti talasni oblik u funkciji položaja kao i fluks, pa je definisao na sljedeći način:

$$S_{0ek} = \begin{cases} S_{\min} + A_1 \frac{\theta - \theta_{un}}{B_1 - \theta}, & \theta_{un} \leq \theta \leq \theta \\ S_1 + k_a (\theta - \theta_1), & \theta_{un} \leq \theta \leq \theta_1 \\ S_2 + A_2 \frac{\theta - \theta_2}{B_2 + \theta}, & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_{al} \end{cases} \quad (2-18)$$

pri čemu je $\theta_{un} = \frac{2\pi}{2N_r}$, $\theta_{al} = \frac{2\pi}{N_r}$, $\theta_1 = \theta_{al} - \frac{\beta_r + \beta_s}{2}$, $\theta_2 = \frac{\theta_1 + \theta_3}{2}$, $\theta_3 = \theta_{al} - \frac{\beta_r - \beta_s}{2}$ i

$k_a = \frac{S_2 - S_1}{\theta_2 - \theta_1}$, a gdje je N_r – broj polova rotora, N_s – broj polova statora, β_r – ugao pola

rotora i β_s – ugao pola statora. Konstante A_1 , A_2 , B_1 i B_2 se određuju iz uslova neprekidnosti i diferencijabilnosti funkcije $S_{\theta_{ek}}$ na čitavom intervalu $\theta_{un} < \theta < \theta_{al}$. Njihove vrijednosti su:

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\theta_{un}(S_1 - S_{\min}) - \theta_1 k_a (\theta_1 - \theta_{un})}{(S_1 - S_{\min}) - k_a (\theta_1 - \theta_{un})}, \\ A_1 &= \frac{(S_1 - S_{\min})(B_1 - \theta_1)}{(\theta_1 - \theta_{un})}, \\ B_2 &= \frac{\theta_{al}(S_{\max} - S_2) - \theta_2 k_a (\theta_{al} - \theta_2)}{k_a (\theta_{al} - \theta_2) - (S_{\max} - S_2)}, \\ A_2 &= \frac{(S_{\max} - S_2)(B_2 + \theta_{al})}{(\theta_{al} - \theta_2)}, \end{aligned} \quad (2-19)$$

pri čemu je $S_{\max} = S_{fe}$, $S_{\min} = \frac{2\delta L_{un}}{N^2 \mu_0}$, $S_1 = S_{\min} + 0.266 \cdot (\theta_1 - \theta_{un})(S_{\max} - S_{\min})$ i

$S_2 = \frac{S_1 + S_{\max}}{2} + S_{\min}$, a gdje je L_{un} induktivnost faze u neusaglašenoj poziciji polova statora

i rotora, a δ minimalna širina vazdušnog procjepa.

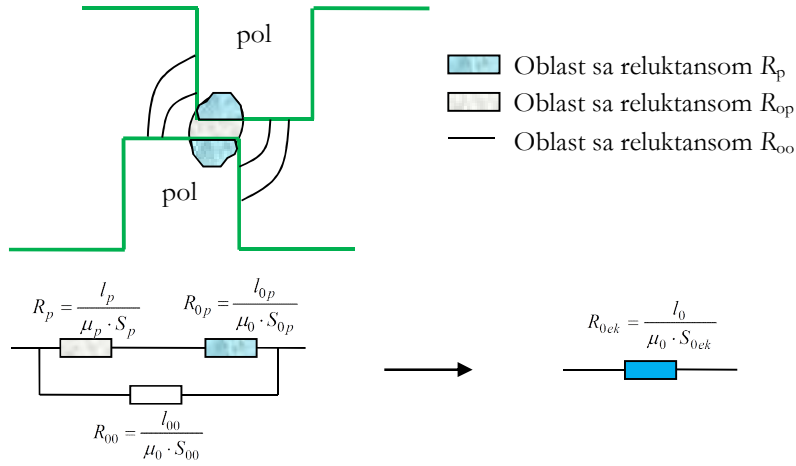
Po ideji *Vujić-a*, drugi dio magnetne otpornosti mašine se sastoji iz tri otpornosti, kao što je prikazano na slici 2.4. Naime, podoblast sa reluktansom R_{0p} je uski vazdušni procjep širine δ između polova statora i rotora na njihovom preklopljenom dijelu; podoblast sa reluktansom R_p je uski željezni dio na polovima rotora i statora koji ulazi u zasićenje značajno ranije od ostalih djelova magnetnog kola mašine, dok podoblast R_{00} obuhvata sve vazdušne djelove kroz koje prolazi fluks u vazduhu isključujući dio obuhvaćen reluktansom R_{op} . Ove magnetne otpornosti se mogu definisati na sljedeći način:

$$\left. \begin{aligned} R_{0p} &= \frac{l_{0p}}{\mu_0 S_{0p}} \\ R_p &= \frac{l_p}{\mu_p S_p} \\ R_{00} &= \frac{l_{00}}{\mu_0 S_{00}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_{\theta_{ek}} = \frac{l_0}{\mu_0 S_{\theta_{ek}}} \quad (2-20)$$

gdje su l_{op} , l_{00} i l_p efektivne dužine kroz kojih protiče fluks, S_{op} , S_{00} i S_p njihove ekvivalentne površine, dok je μ permeabilnost željeza. Prema modelu Vujičića, uzeto je da je

$l_{00} = l_{op} = 2\delta$ dok je, radi definisanja dužine l_p , uveden i sljedeći parametar $\xi = \frac{l_p \mu_0}{2\delta \mu_{ppoc}}$, gdje

je sa μ_{ppoc} definisana vrijednost permeabilnosti magnetnog materijala pri vrijednosti magnetne indukcije jednako nula. Vujičić je na osnovu eksperimentalnih rezultata zaključio da je vrijednost parametra ξ konstantna i veoma mala (u opsegu 0.02 do 0.05).



Slika 2.4 Podjela oblasti sa reluktansom R_{0ek} na tri podoblasti.

Na osnovu prethodnog, posmatrajući ekvivalentnu otpornost R_{0ek} , zavisnost površine u funkciji pozicije rotora i vrijednosti fluksa se može izraziti na sljedeći način:

$$S_{0ek}(\theta, \Phi) = S_{00} + \frac{S_{0ek}(\theta, \Phi = 0) - S_{\min}}{1 + \frac{l_p \mu_0}{2\delta \mu}}, \quad (2-21)$$

tj.

$$S_{0ek}(\theta, \Phi) = S_{00} + \frac{S_{0ek}(\theta, \Phi = 0) - S_{\min}}{1 + \xi \frac{\mu_{ppoc}}{\mu}}, \quad (2-22)$$

gdje je

$$S_{00} = S_{\min} + \frac{\xi \cdot S_{0ek}(\theta, \Phi = 0)}{1 + \xi}. \quad (2-23)$$

Na kraju, prema modelu *Vujičić*-a, izraz za ukupnu struju faze je:

$$\begin{aligned} i(\Phi, \theta) &= i_0(\Phi, \theta) + i_{fe}(\Phi) \\ i_{fe}(\Phi) &= c_{fe1}\Phi + c_{fe2}\Phi^\alpha \\ i_0(\Phi, \theta) &= c_{05} \left[(1 - c_{01})\Phi - c_{01}c_{03} + c_{01}\sqrt{(\Phi - c_{03})^2 + c_{04}^2} \right] \end{aligned} \quad (2-24)$$

gdje je α koeficijent koji uzima vrijednost ili 7 ili 9, što zavisi od vrste željeza, dok je

$$c_{fe1} = \frac{l_{fe}\beta H_{nom}}{B_{nom}N^2S_{fe}} \text{ i } c_{fe2} = \frac{l_{fe}(1-\beta)H_{nom}}{B_{nom}^\alpha N^{\alpha+1}S_{fe}^\alpha}. \text{ Vrijednosti } B_{nom} \text{ i } H_{nom} \text{ su vrijednosti pri kojima}$$

počinje da se drastično "krivi" B - H karakteristika željeza (B_{nom} se kreće oko 1.2T do 1.5T a H_{nom} od 50 do 500 A/m). U prethodnoj jednačini koeficijenti c_{0j} , $j=1\dots4$, se mogu izračunati kao:

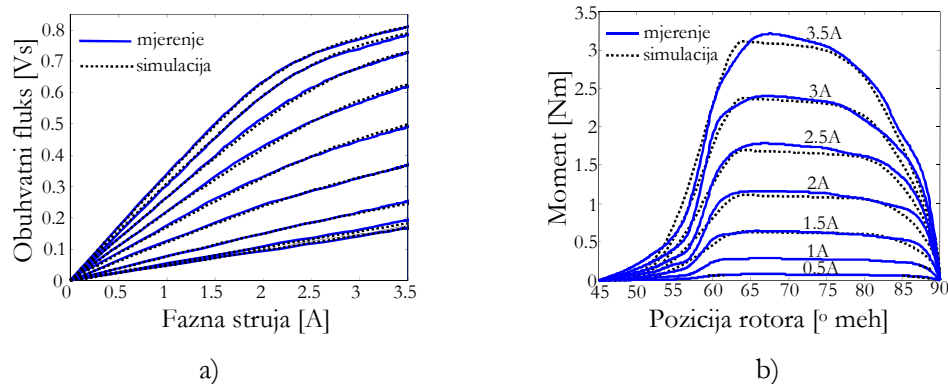
$$\begin{aligned} c_{01} &= \frac{S_{0p}}{2(S_p + S_{00})}, \\ c_{02} &= aN[S_p + (1 + \xi)S_{00}], \\ c_{03} &= aN[S_p + (1 - \xi)S_{00}], \\ c_{04} &= \sqrt{c_{02}^2 + c_{03}^2}. \end{aligned} \quad (2-25)$$

Posmatrajući jednačinu za elektromagnetni moment SRM-a (1-15), a uzimajući u obzir vezu struje, fluksa i pozicije izraženu preko (2-24) izraz za elektromagnetni moment je:

$$\begin{aligned} M = -\frac{\partial}{\partial \theta} & \left[c_{05} \left(\frac{1 - c_{01}}{2} \Phi^2 - c_{01}c_{02}\Phi + \frac{c_{01}}{2} (\Phi - c_{03}) \sqrt{(\Phi - c_{03})^2 + c_{04}^2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{c_{01}c_{02}c_{03}}{2} + \frac{c_{01}c_{04}^2}{2} \ln \left(\frac{\Phi - c_{03} + \sqrt{(\Phi - c_{03})^2 + c_{04}^2}}{c_{02} - c_{03}} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (2-26)$$

Vjerodostojnost i tačnost *Vujičić*-evog modela pokazana je u [2, 40-41] poređenjem fluks-struja krivih, kao i statičkih krivih momenta, dobijenih koristeći simulacije i eksperimentalno (slika 2.5), za SRM čiji su podaci dati u Tabeli 2-1. Pošto *Vujičić*-ev model SRM-a obezbjeđuje dobijanje izuzetno tačnih rezultata, a za razliku od drugih modela

zahtijeva minimalan broj ulaznih podataka, u ovoj doktorskoj disertaciji će se upravo ovaj model SRM-a koristiti.



Slika 2.5 Izmjerene i simulirane karakteristike posmatranog SRM-a. (a) Krive magnećenja. (b) Statičke krive momenta (45° odgovara necentriranoj poziciji, a 90° centriranoj poziciji).

Tabela 2-1 Parametri korišćenog SRM-a

Broj polova rotora	4
Broj polova statora	6
Broj navojaka po fazi	590
Ugao pola statora	32°
Ugao pola rotora	30°
Vazdušni procjep	0.5mm
Aksijalna dužina magnetnog kola	4.8cm
Manji poluprečnik rotora	1.85cm
Veći poluprečnik rotora	2.9cm
Manji poluprečnik statora	4.7cm
Veći poluprečnik statora	5.8cm
Otpornost faze	6.9Ω
Nominalni napon faze	270V
Nominalna struja faze	2A

POGLAVLJE 3

Energetski pretvarači za napajanje SRM-a

U ovom poglavlju prikazane su najčešće korišćene topologije energetskih pretvarača za napajanje SRM-a. Navedene su njihove osnovne karakteristike, objašnjen princip magnetizacije i demagnetizacije faze i naglašena (ne)mogućnost rada u CCM-u. Na kraju poglavlja, izvršeno je poređenje navedenih pretvarača kako sa stanovišta V-A zahtjeva, gubitaka, zahtijevanog broja prekidača, dioda i reaktivnih komponenti, tako i sa stanovišta mogućnosti rada u CCM-u.

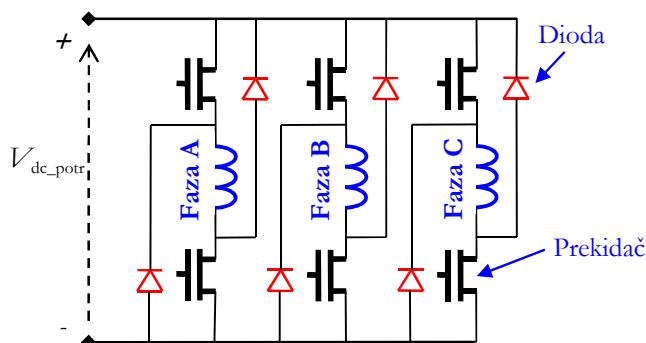
3.1 Uopšteno o energetskim pretvaračima za SRM

Najvažnija razlika SRM-a u odnosu na druge tipove električnih mašina je u tome što je za funkcionisanje SRM-a neophodan energetski pretvarač. Međutim, iako su fazne struje SRM-a unipolarnog karaktera, energetski pretvarači za napajanje SRM-a su složeniji od energetskih pretvarača za druge električne mašine, a posebno u odnosu na energetske pretvarače za asinhronu mašinu. Isto tako, složenija su i upravljačka kola za upravljanje samim pretvaračima [2, 4-5, 50-62].

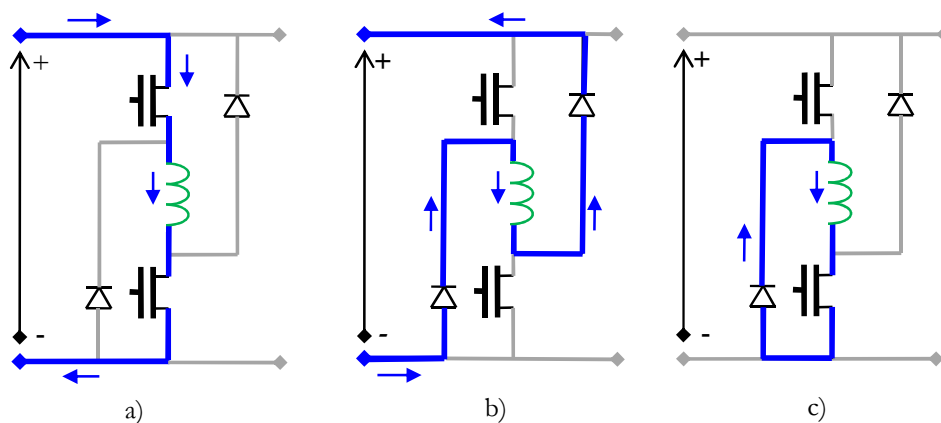
Od svih energetskih pretvarača za napajanje SRM-a najveću primjenu ima klasični (asimetrični) pretvarač. Međutim, osim njega, često se koriste i *Miller*-ov, *C-dump*, *Buck-Boost* i *Sood*-ov pretvarač [2, 4-5, 50, 56]. Za razliku od *Miller*-ovog pretvarača, koji predstavlja modifikaciju klasičnog pretvarača, *C-dump*, *Buck-Boost* i *Sood*-ov pretvarač su bazirani na upotrebi DC/DC pretvarača. Osim već pomenutih pretvarača, u ovom poglavlju biće prikazan i energetski pretvarač koji striktno omogućava rad SRM-a u CCM-u, a poznat je pod nazivom *Derishzadeh*-ov pretvarač [61-62].

3.2 Klasični pretvarač

Na slici 3.1 prikazana je šema klasičnog (asimetričnog) pretvarača za napajanje trofaznog SRM-a. U kolu pretvarača koriste se dva energetska prekidača i dvije diode po fazi motora.



Slika 3.1 Klasični pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.



Slika 3.2 a) Magnetizacija faze, b) *Hard chopping* i c) *Soft chopping* tehnika kod klasičnog pretvarača za napajanje SRM-a.

Magnetizacije faze upotrebom klasičnog pretvarača vrši se uključivanjem oba prekidača. Naime, uključivanjem oba prekidača, napon na krajevima faze mašine postaje jednak naponu napajanja V_{dc_potr} , što doprinosi forsiranju struje kroz namotaj faze (slika 3.2a). Kada je potrebno zaustaviti proticanje struje kroz fazu (tzv. proces demagnetizacije) neophodno je isključiti oba prekidača. U ovom intervalu struja protiče kroz diode, dok je napon na fazi $-V_{dc_potr}$ (slika 3.2b). Ova tehnika istovremenog uključivanja/isključivanja oba prekidača naziva se *hard chopping* ili *bipolar switching*. Međutim, ako je cilj postići sporije

opadanje struje, moguće je isključiti samo jedan prekidač, pri čemu onda struja cirkuliše kroz drugi prekidač i jednu diodu (slika 3.2c). Ovakav način regulacije fazne struje, poznat kao *soft chopping*, osim što omogućava značajno sporije opadanje struje kroz namotaj faze, doprinosi i smanjenju gubitaka u prekidačima.

Klasični pretvarač omogućava kompletnu i nezavisnu kontrolu svake od faza, bez obzira na stanje u ostalim fazama. Samim tim, ovaj pretvarač omogućava rad SRM-a, osim u DCM-u, i u CCM-u. Osim toga, ovaj pretvarač pruža mogućnost brze demagnetizacije faze, kao i smanjenje prekidačkih gubitaka (primjena *soft* tehnike). Isto tako, svaka komponenta ovoga pretvarača ima iste strujno naponske karakteristike. Sa druge strane, potpuna nezavisnost faza sa po dva prekidača po fazi obezbjeđuje da pogon može nastaviti sa radom, mada sa smanjenim performansama, i u slučaju „pogrešnog stanja“ bilo koje komponente ili faze mašine.

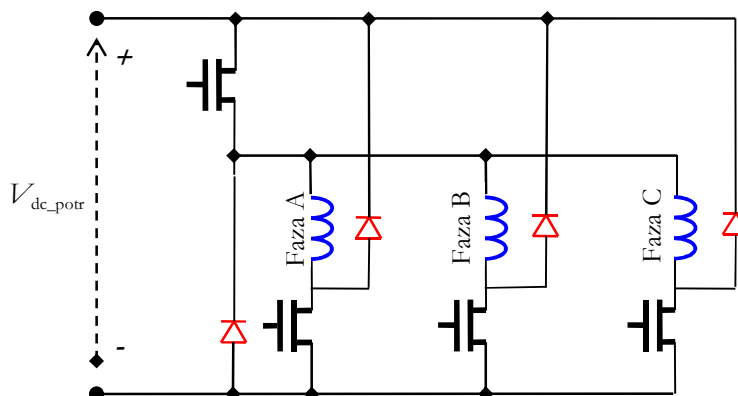
Međutim, glavni nedostatak upotrebe ovog pretvarača jeste u upotrebi velikog broja poluprovodničkih komponenti. Takođe, veliki broj prekidača zahtijeva veliki broj kontrolnih signala, kao i složenije kontrolne algoritme.

3.3 *Miller-ov pretvarač*

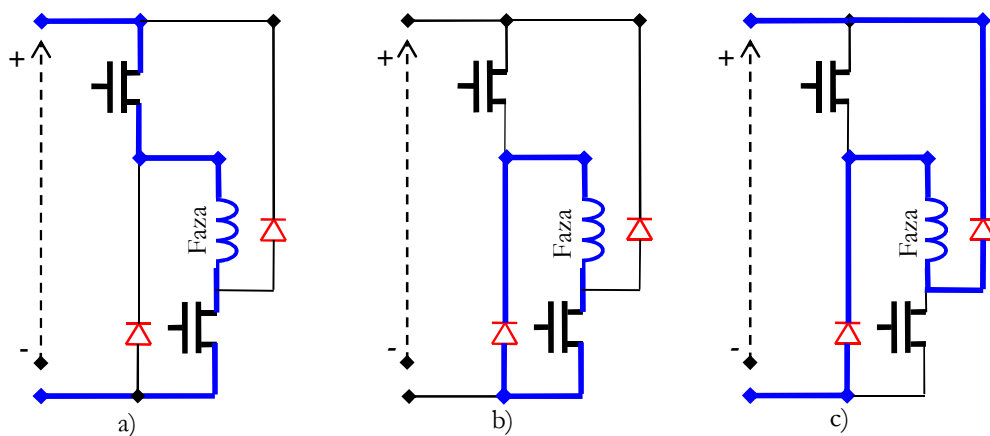
Miller-ov pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a prikazan je na slici 3.3 [1-3]. Ako se posmatra N -fazna mašina, ovaj pretvarač zahtijeva $N+1$ poluprovodničkih prekidača, kao i $N+1$ diodu.

Kod *Miller-ovog* pretvarača pobuđivanje faze SRM-a vrši se aktiviranjem zajedničkog prekidača i prekidača koji je u seriji sa fazom (fazni prekidač). U tom slučaju napon na fazi je jednak naponu napajanja V_{dc_potr} (slika 3.4a). Ako se fazni prekidač isključi, struja faze nastavlja da provodi kroz zajednički prekidač i odgovarajuću faznu diodu. U ovom slučaju napon na fazi je nula (slika 3.4b). Sa druge strane, ako se i fazni i zajednički prekidač isključe, struja nastavlja da provodi ka izvoru kroz faznu diodu i zajedničku diodu za sve faze. U ovom slučaju napon na fazi je $-V_{dc_potr}$ (slika 3.4c). Prema tome, *Miller-ov* pretvarač, kao i klasični pretvarač, omogućava *hard* i *soft* regulaciju struje.

Međutim, pošto zajednički prekidač provodi kada god provodi neka od faza, on mora biti snažniji, ili mora imati poboljšano hlađenje, pošto su gubici u njemu N puta veći od pojedinačnih gubitaka u ostalim prekidačima kod N -fazne mašine. Takođe, zajednička dioda, u odnosu na ostale diode, mora biti ili snažnija ili sa poboljšanim hlađenjem.



Slika 3.3 Miller-ov pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.

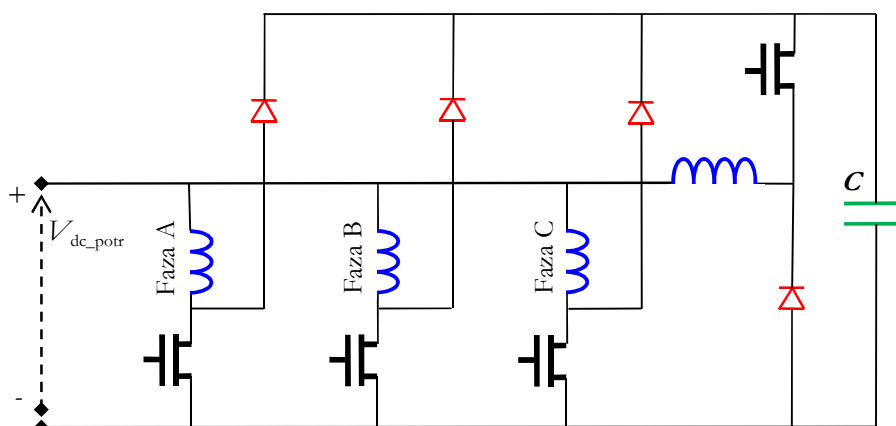


Slika 3.4. a) Magnetizacija faze, b) *Soft chopping* i c) *Hard chopping* tehnika kod Miller-ovog pretvarača za napajanje SRM-a.

Prednost Miller-ovog pretvarača jeste u tome što se kod ovog pretvarača koristi manji broj prekidača u odnosu na klasični pretvarač. Međutim, glavni nedostatak upotrebe ovoga pretvarača jeste u tome što on ne obezbeđuje nezavisnost kontrole svih faza. Naime, ako se žele ostvariti kontinualni režim struje kroz fazne namotaje, potrebno je na jednu fazu dovesti pozitivan napon napajanja, a na drugu fazu negativan, što je nemoguće ovom konfiguracijom pretvarača. Isto tako, pravilno funkcionisanje ovoga pretvarača zavisi od zajedničkog prekidača. Kvar na zajedničkom prekidaču dovodi do prekida funkcionisanja cjelokupnog pretvarača.

3.4 *C-dump* pretvarač

C-dump pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a prikazan je na slici 3.5 [2, 51-52, 56]. Ovaj pretvarač, za N -faznu SRM, zahtijeva, kao i *Miller*-ov pretvarač, $N+1$ prekidač i $N+1$ diodu. Međutim, za razliku od *Miller*-ovog pretvarača ovaj pretvarač ima dodatni kalem i kondenzator. Konfiguracija dodatnog prekidača i jedne diode (koji nijesu direktno vezani sa fazom mašine) je takva da oni, zajedno sa kalemom i kondenzatorom, čine *Buck* čoper.

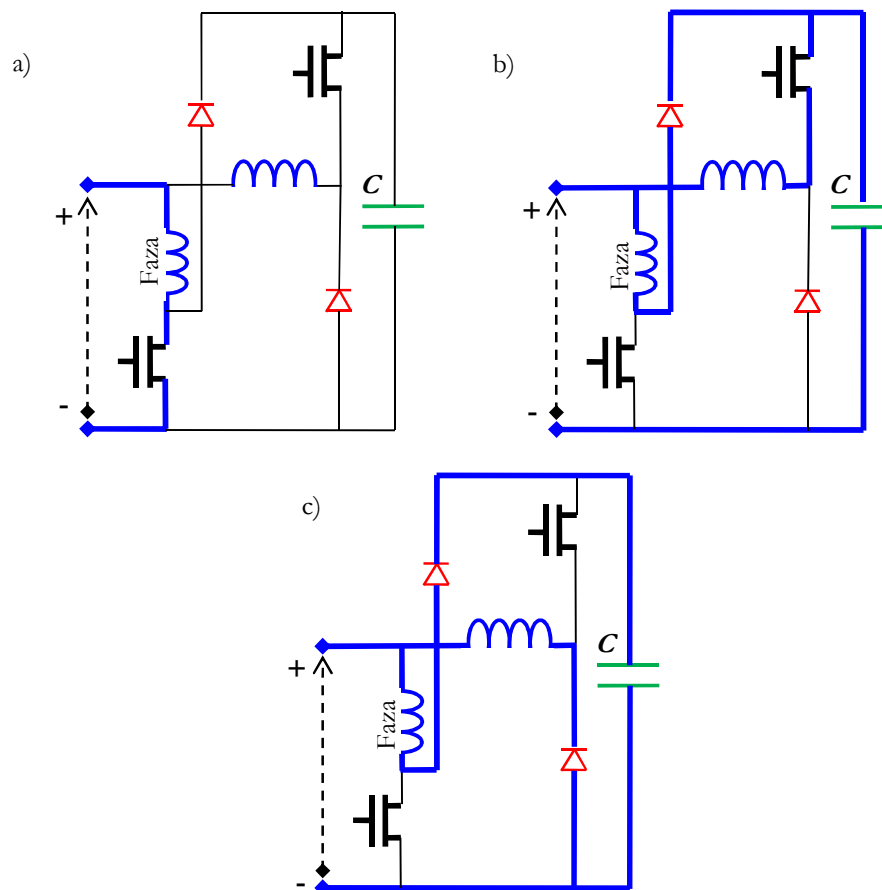


Slika 3.5 *C-dump* pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.

U toku magnetizacije faze vrši se aktiviranje prekidača koji je redno vezan sa fazom mašine (fazni prekidač). U tom slučaju napon na fazi je jednak ulaznom naponu V_{dc_potr} (slika 3.6a). Ako se fazni prekidač isključi, strujno kolo se zatvara preko diode posmatrane faze i kondenzatora (proces demagnetizacije). Međutim, kontrolom napona na kondenzatoru može se kontrolisati postupak demagnetizacije. Naime, ako se aktivira prekidač *Buck* čopera, energija iz kondenzatora se preko *Buck*-ovog prekidača i kalema vraća u jednosmjerno međukolo (slika 3.6b). Isto tako, ako je prekidač *Buck* čopera isključen, energija iz kalema *Buck* čopera se vraća u jednosmjerno međukolo preko diode *Buck* čopera (slika 3.6c). Prema tome, kontrolom *Buck*-ovog prekidača kontroliše se vrijednost napona na izlazu *Buck* čopera (napon na kondenzatoru), a samim tim i napon demagnetizacije faze SRM-a.

Glavna prednost *C-dump* pretvarača u odnosu na *Miller*-ov pretvarač jeste u tome što se on može koristiti i u uslovima kontinualnog režima struje. Sa druge strane, glavni

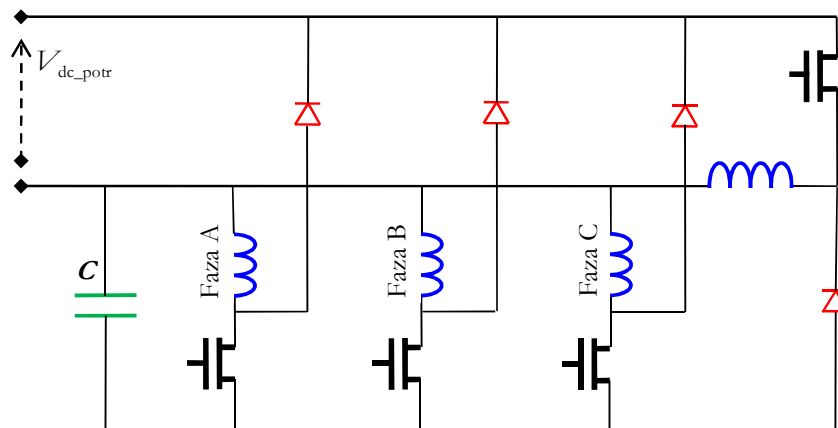
nedostatak upotrebe ovoga pretvarača jeste u tome što on zahtijeva upotrebu reaktivnih elemenata, u kojima se javljaju dodatni gubici koji umanjuju efikasnost pretvarača. Isto tako, kvar na bilo kom elementu *Buck* čopera dovodi do totalnog kvara na pretvaraču.



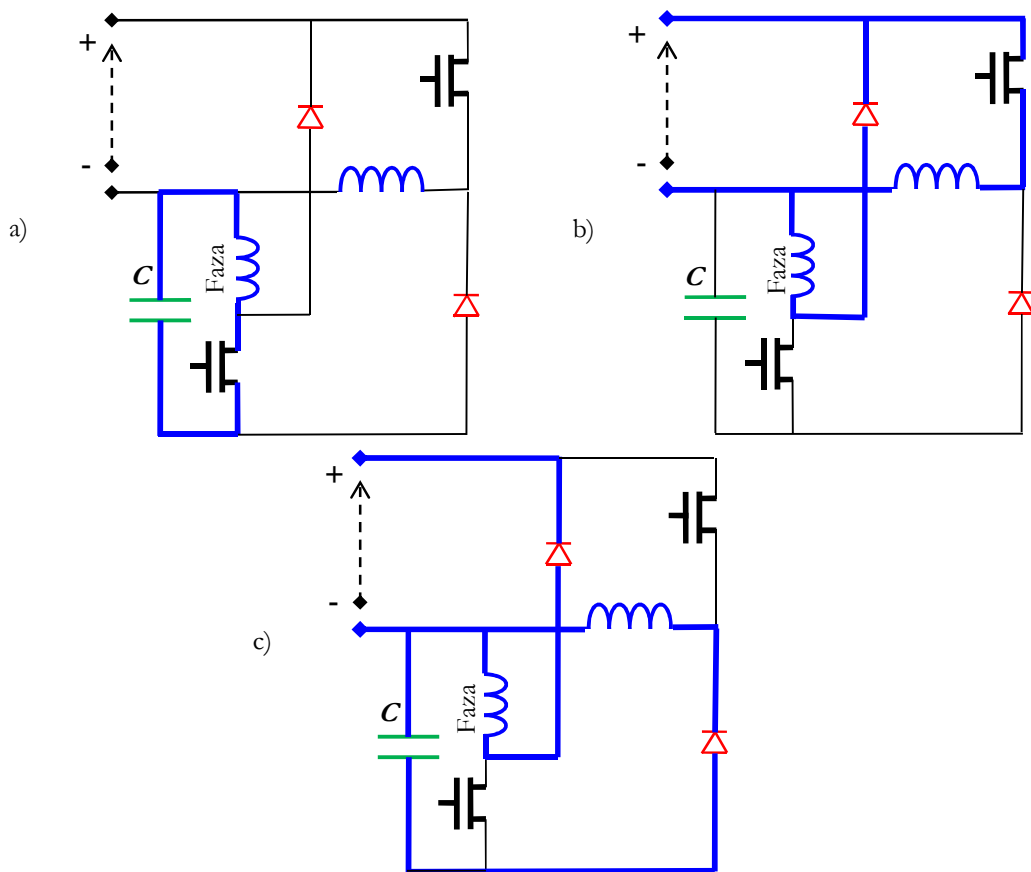
Slika 3.6. a) Magnetizacija faze, b) Demagnetizacija faze sa uključenim prekidačem *Buck* čopera i c) Demagnetizacija faze sa isključenim prekidačem *Buck* čopera kod *C-dump* pretvarača za napajanje SRM-a.

3.5 *Buck-Boost* pretvarač

Buck-Boost pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a prikazan je na slici 3.7 [2]. Ovaj pretvarač, kao i *C-dump* i *Miller*-ov pretvarač, za N -fazni SRM zahtijeva $N+1$ prekidač, kao i $N+1$ diodu. Osim njih, u kolu ovoga pretvarača se nalazi i jedan kondenzator i kalem, koji sa jednim prekidačem i jednom diodom, a koji nijesu vezani sa fazama mašine, predstavljaju *Buck-Boost* čoper.



Slika 3.7 Buck-Boost pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.



Slika 3.8. a) Magnetizacija faze, b) Demagnetizacija faze sa uključenim prekidačem Buck-Boost čopera i c) Demagnetizacija faze sa isključenim prekidačem Buck-Boost čopera kod Buck-Boost pretvarača za napajanje SRM-a.

U toku magnetizacije faze aktivira se prekidač koji je vezan redno sa njom (fazni prekidač). Tada je napon na fazi jednak izlaznom naponu Buck-Boost čopera (slika 3.8a). U

toku demagnetizacije (isključenje faznog prekidača) napon na fazi je jednak ulaznom naponu. Uključenjem prekidača *Buck-Boost* čopera, energija iz jednosmjernog kola se transformiše u energiju kalema čopera (slika 3.8b). Ako je prekidač čopera isključen, energija kalema se prenosi na kondenzator (slika 3.8c).

Velika prednost *Buck-Boost* čopera jeste u mogućnosti regulacije napona magnetizacije. Naime, pri malim vrijednostima brzine obrtanja, napon magnetizacije se može držati na manjoj vrijednosti od napona jednosmjernog međukola (što je poželjno jer pri malim brzinama obrtanja struja brzo raste). Pri velikim brzinama obrtanja, radi postizanja veće vrijednosti fazne struje, moguće je povećati napon magnetizacije da bude i veći od ulaznog napona jednosmjernog međukola.

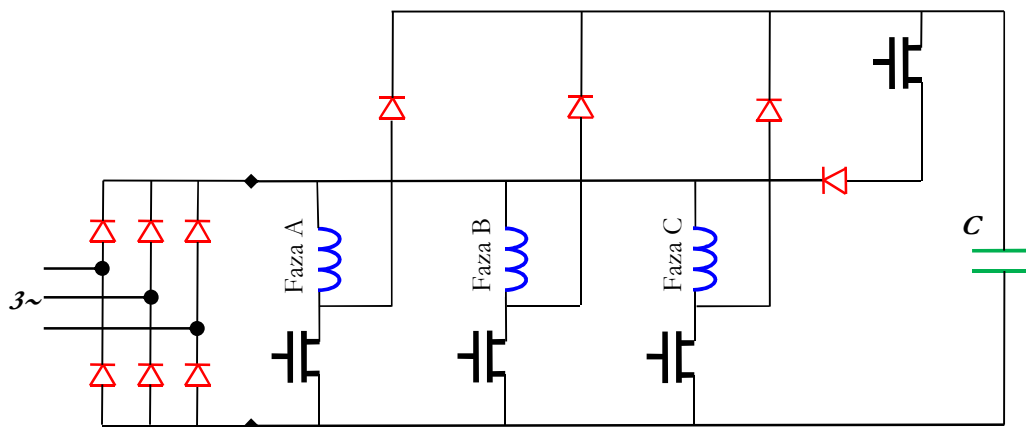
Međutim, kao i kog *C-dump* pretvarača, glavni nedostatak upotrebe *Buck-Boost* pretvarača jeste u tome što ovaj pretvarač zahtijeva upotrebu reaktivnih komponenti. Takođe, kvar zajedničkog prekidača dovodi do kvara cjelokupnog pretvarača.

3.6 *Sood-ov* pretvarač

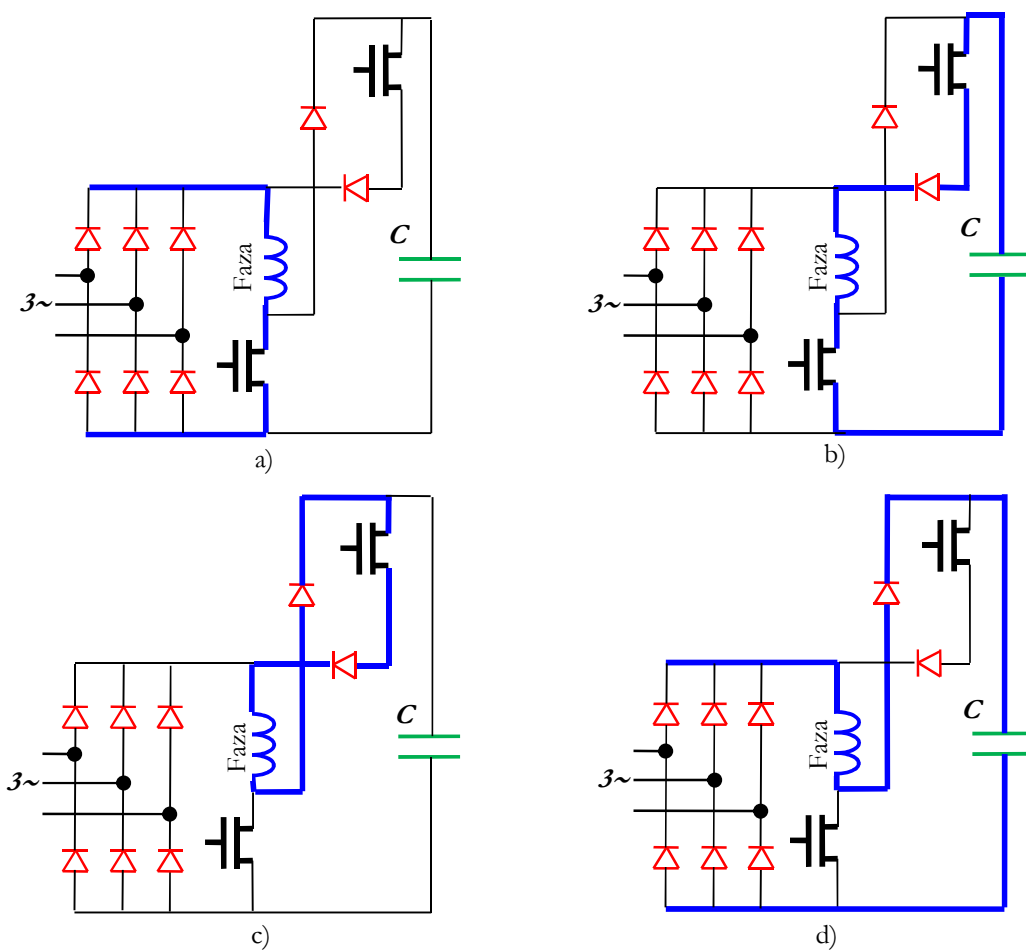
Sood-ov pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a veoma je sličan *C-dump* i *Buck-Boost* pretvaraču. Njegova konfiguracija prikazana je na slici 3.9 [2, 5]. Osnovna karakteristika *Sood-ovog* pretvarača, za razliku od ostalih topologija pretvarača, jeste u eliminaciji ulaznog LC filtra. Takođe, princip rada *Sood-ovog* pretvarača se razlikuje od principa rada *C-dump* i *Buck-Boost* pretvarača [1-2]. Naime, kod ovog pretvarača magnetizacija faze SRM-a se može ostvariti na dva načina:

1. aktivacijom prekidača redno vezanog sa fazom (faznog prekidača), ili
2. istovremenim uključivanjem faznog i dodatnog prekidača.

Aktivacijom prekidača redno vezanog sa fazom napon na fazi mašine postaje jednak naponu napajanja (slika 3.10a). Sa druge strane, istovremenim uključivanjem faznog i dodatnog prekidača, uz uslov da je napon na kondenzatoru veći od napona napajanja, napon na fazi postaje jednak naponu na kondenzatoru (slika 3.10b). Međutim, u ovom drugom slučaju, ako je ulazni napon veći od napona na kondenzatoru, magnetizacija se vrši pomoću ulaznog napona napajanja.



Slika 3.9 Sood-ov pretvarač za napajanje trofaznog SRM-a.



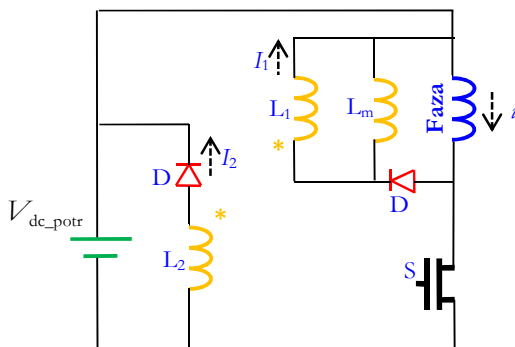
Slika 3.10. a) Magnetizacija faze preko ulaznog napona, b) Magnetizacija faze preko napona kondenzatora, c) Režim održavanje struje faze i d) Demagnetizacija faze preko kondenzatora kod Sood-ovog pretvarača za napajanje SRM-a.

Ako je uključen samo dodatni prekidač, strujna kontura se zatvara preko dodatne diode i kroz diodu posmatrane faze (slika 3.10c). U ovom slučaju vrši se održavanje struje faze. Isto tako, ako su svi prekidači isključeni akumulirana energija posmatrane faze se vraća u kondenzator, tj. vrši se proces demagnetizacije, preko diode posmatrane faze (slika 3.10d).

Na kraju treba istaći da je glavni nedostatak upotrebe *Sood*-ovog pretvarača u tome što ovaj pretvarač zahtijeva upotrebu posebno dimenzionisanog kondenzatora. Sa druge strane, njegova glavna prednost je u tome što zahtijeva minimalan broj prekidača po fazi mašine.

3.7 Derishzadeh-ov pretvarač

Derishzadeh-ov pretvarač za napajanje faze SRM-a prikazan je na slici 3.11 [61, 62]. Kao što se može vidjeti, ovaj pretvarač zahtijeva jedan prekidač, jedan transformator i dvije diode po fazi mašine. Na slici 3.11 sa L_1 označen je primarni namotaj, sa L_2 sekundarni namotaj, a sa L_m grana magnećenja transformatora (grana magnećenja transformatora je dominantno induktivnog karaktera).

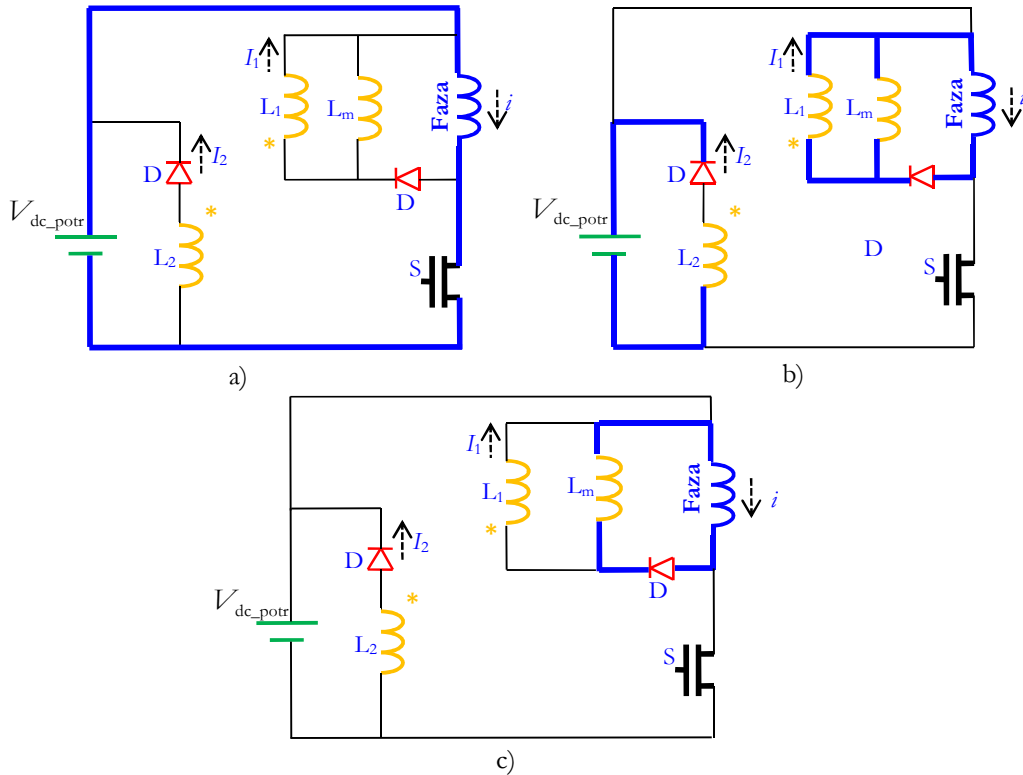


Slika 3.11 *Derishzadeh*-ov pretvarač za napajanje SRM-a.

Period magnetizacije faze počinje kada se uključi prekidač S . Tokom ovog intervala pobudni izvor napona V_{dc_potr} predaje energiju fazi, pa, pošto je napon na fazi jednak naponu pobudnog izvora V_{dc_potr} , struja faze raste (slika 3.12a).

Proces demagnetizacije faze počinje nakon isključivanja prekidača S . Naime, isključivanjem prekidača S , polaritet napona faze se mijenja, a pošto se struja faze zatvara

kroz primarni kalem, napon na fazi postaje $-aV_{dc_potr}$, gdje je a je prenosni odnos transformatora (slika 3.12b). Prema tome, vrijednost napona na fazi zavisi od vrijednosti prenosnog odnosa transformatora. U toku ovog perioda struja faze protiče kroz primarni namotaj L_1 , pa samim tim struja I_2 protiče kroz sekundarni namotaj L_2 . Prema tome, u ovom intervalu faza predaje energiju pobudnom izvoru V_{dc_potr} . Međutim, uporedo sa proticanjem struje kroz primarni namotaj, struja faze protiče i kroz granu magnećenja transformatora. Naime, pošto je napon na namotaju primara transformatora pozitivan, struja kroz granu magnećenja raste. Kada vrijednost struje magnećenja postane jednaka vrijednosti struje faze, struja I_1 , a samim tim i struja I_2 , će postati jednaka nuli. U tom slučaju napon na fazi je nula, dok se struja faze kompletno zatvara kroz granu magnećenja transformatora (slika 3.12c). Pošto je induktivnost magnećenja transformatora značajno veća u odnosu na induktivnost faze, struja faze će biti konstantna. Prema tome, kada SRG radi sa *Derishzadeh*-ovim pretvaračem, struja faze ima kontinualan talasni oblik. Odnosno, *Derishzadeh*-ov pretvarač omogućava rad SRG-a u CCM-u.



Slika 3.12 a) Magnetizacija faze, b) Demagnetizacija faze i c) Kratak spoj faze preko grane magnećenja kod *Derishzadeh*-ovog pretvarača za napajanje SRM-a.

3.8 Poređenje najvažnijih karakteristika pretvarača za napajanje SRM-a

Za ocjenu, kao i za međusobno poređenje, energetskih pretvarača za napajanje SRM-a ne postoji jedinstven kriterijum. Zbog toga se uglavnom koriste neki od sljedećih kriterijuma: broj poluprovodničkih komponenti - broj prekidača/broj dioda, broj komponenti po strujnom krugu, broj reaktivnih komponenti - broj kalemova/broj kondenzatora, volt-amperski zahtjevi prekidača, vrijednost gubitaka u diodama i prekidačima, vrijednost napona (de)magnetizacije i slično.

Volt-amperski (VA) zahtjevi prekidača predstavljaju veoma važan kriterijum za definisanje cijene pretvarača. Naime, ukupni VA zahtjevi prekidača se definišu kao proizvod $N_{pre} \times V_{ef_max} \times I_{ef_max}$, gdje je V_{ef_max} maksimalna efektivna vrijednost napona na prekidaču u intervalu kada je on isključen, I_{ef_max} maksimalna efektivna vrijednost struje u periodu njegovog provođenja, dok je N_{pre} broj prekidača. Ako se za maksimalnu efektivnu vrijednost napona na prekidaču uzme vrijednost napona napajanja faza mašine V_{dc_potr} , a za maksimalnu efektivnu vrijednost struje prekidača uzme nominalna efektivna vrijednost struje faze mašine (I_{ef_nom}), vrijednost VA zahtjeva se može normalizovati.

Sa druge strane, u cilju lakšeg poređenja pretvarača sa stanovišta gubitaka u prekidačima i diodama, uzima se normalizovana vrijednost ovih gubitaka. Naime, gubici u prekidaču (najčešće su to IGBT prekidači) izazvani njihovim uključivanjem i isključivanjem (prekidački gubici, engl. *switching losses*), u slučaju kada je maksimalna efektivna vrijednost napona na prekidaču, u intervalu kada je on isključen, jednaka V_{dc_potr} , a maksimalna efektivna vrijednost struje u periodu njegovog provođenja jednaka I_{ef_nom} , imaju vrijednost 1r.j. Gubici u prekidačima i diodama usled njihove unutrašnje otpornosti (gubici provođenja, engl. *conduction losses*), ako kroz njih protiče struja čija je maksimalna vrijednost struje jednaka I_{ef_nom} , imaju takođe vrijednost 1r.j.

Osim ukupnih VA zahtjeva prekidača i gubitaka u prekidačima i diodama i ostali kriterijumi itekako utiču na odlike pogona sa SRM-om. Konkretno, osim VA zahtjeva prekidača, broj poluprovodničkih komponenti, kao i broj reaktivnih komponenti, utiče na cijenu pretvarača. Sa druge strane, osim gubitaka u diodama i prekidačima, na efikasnost pogona sa SRM-om utiče i broj komponenti po strujnom krugu, upotreba reaktivnih komponenti, kao i vrijednosti napona (de)magnetizacije.

Poređenje prikazanih pretvarača za napajanje SRM-a dato je u Tabeli 3-1. Slična poređenja nekih od ovih prekidača mogu se naći u [50].

Tabela 3-1 Poređenje energetskih pretvarača za napajanje SRM-a

	Klasični pretvarač		<i>Miller</i> -ov pretvarač	<i>C-dump</i> pretvarač*	<i>Buck-Boost</i> pretvarač**	<i>Sood</i> -ov pretvarač*	<i>Derishzadeh</i> -ov pretvarač***
	<i>Hard switching</i>	<i>Soft switching</i>					
Broj prekidača	2N	2N	N+1	N+1	N+1	N+1	N
Broj dioda	2N	2N	N+1	N+1	N+1	N+1	2N
Broj kalemova	0	0	0	1	1	0	2N induktivno spregnutih (transformator)
Broj kondenzatora	0	0	0	1	1	1	0
Ukupni VA zahtjevi prekidača	2N	2N	2N	2(N+1)	2(N+1)	2(N+1)	2N
IGBT prekidački gubici (r.j.)	2N	N	2N	2(N+1)	2(N+1)	2(N+1)	2N
IGBT gubici usljed provođenja (r.j.)	2N	3N	2N	N+1	N+1	N+1	N
Gubici u diodama (r.j.)	N	N	2N	N+1	N+1	N+1	2N
Mogućnost rada u CCM-u	DA	DA	NE	DA	DA	DA	DA

* Uzeto je da je napon na kondenzatoru $2V_{dc_potr}$.

** Uzeto je da je napon na kondenzatoru jednak ulaznom naponu V_{dc_potr} .

*** Uzeto je da je prenosni odnos transformatora jednak 1.

Iz Tabele 3-1 se jasno vidi da najveći broj prekidača zahtijeva klasični pretvarač (čak duplo više od *Derishzadeh*-ovog pretvarača). Međutim, klasični i *Derishzadeh*-ov pretvarač zahtijevaju najveći broj dioda po fazi mašine. Sa druge strane *Miller*-ov, *Sood*-ov, *C-dump* i *Buck-Boost* pretvarač zahtijevaju jednak broj i prekidača i jednak broj dioda po fazi mašine.

Što se tiče reaktivnih komponenti, klasični i *Miller*-ov pretvarač ne zahtijevaju upotrebu ni kalema ni kondenzatora, za razliku od *C-dump* i *Buck-Boost* pretvarača. Za razliku od ostalih, *Sood*-ov pretvarač zahtijeva samo dodatni kondenzator, dok *Derishzadeh*-ov pretvarač zahtijeva dodatni transformator (induktivno spregnute kalemове).

Ukupni VA zahtjevi prekidača, kao i gubici u prekidačima (prekidački gubici i gubici usljed provođenja) i diodama kod *C-dump*, *Buck-Boost* i *Sood*-ovog prekidača u velikoj mjeri zavise od maksimalne vrijednosti napona na korišćenom kondenzatoru. Slično, VA zahtjevi

prekidača i vrijednost gubitaka u prekidačima i diodama kod *Derishzadeh*-ovog pretvarača zavisi od prenosnog odnosa transformatora. Zbog toga se ne može izvesti generalan zaključak o poređenju pretvarača sa stanovišta VA zahtjeva.

Na kraju, od svih navedenih topologija pretvarača, jedino *Miller*-ov pretvarač ne pruža mogućnost kontinualnog toka struje pošto kod njega postoji zajednički prekidač koji služi za magnetizaciju svih faza mašine. Bitno je napomenuti da su u dosadašnjim istraživanjima rada SRM-a u CCM-u jedino korišćeni klasični [64-67, 120-128, 130] i *Derishzadeh*-ov [61-62] pretvarač.

POGLAVLJE 4

Klasično upravljanje SRG-om – optimalne radne karakteristike u DCM-u i u CCM-u

U ovom poglavlju analizirane su karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u. Najprije je opisana mehanička karakteristika ove mašine i ukazano na značaj regiona konstantne snage. Nakon toga opisan je postupak za određivanje optimalnih kontrolnih parametara koji obezbjeđuju maksimizaciju električne snage SRG-a u DCM-u i u CCM-u. Predloženi postupak je primijenjen za određivanje optimalnih izlaznih karakteristika korišćenog SRG-a u DCM-u i CCM-u. Poređenje dobijenih izlaznih karakteristika korišćenog SRG-a prikazano je na kraju poglavlja.

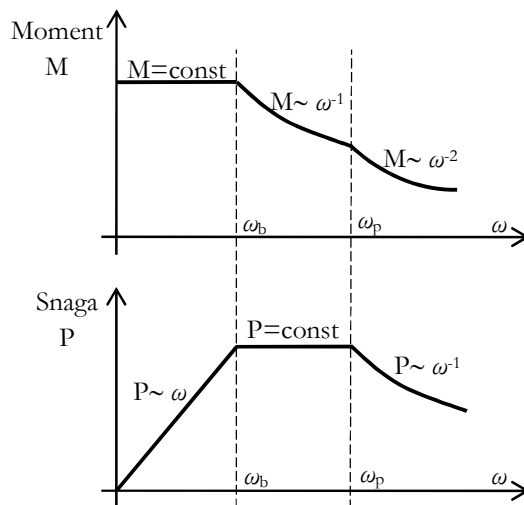
4.1 Mehanička karakteristika SRM-a u DCM-u

Najvažnija karakteristika svake električne mašine, posebno značajna kod projektovanja pogona, jeste njihova mehanička karakteristika. Mehanička karakteristika SRM-a, tj. zavisnost elektromagnetnog momenta u funkciji brzine obrtanja, kao i zavisnost snage u funkciji brzine obrtanja, prikazana je na slici 4.1.

Mehanička karakteristika SRM-a sastoji se iz tri dijela:

- Region konstantnog momenta,
- Region u kome je moment obrnuto srazmjeran brzini obrtanja (region konstantne snage) i
- Region u kome je moment obrnuto srazmjeran kvadratu brzine obrtanja (prirodna karakteristika SRM-a).

Pri malim brzinama obrtanja (ω) vrijednost EMF je mala, pa se za vrijeme koje odgovara uglu magnetizacije θ_{mag} ne može primjenjivati nominalni napon na fazu. Naime, pri malim brzinama, za nominalnu vrijednost napona, struja veoma brzo raste i dostiže velike vrijednosti. Zbog toga je, da bi se zadovoljio termički limit mašine, kao i limit poluprovodničkih komponenti, vrijednost struje potrebno ograničiti. To se može postići primjenom PWM ili strujne regulacije.



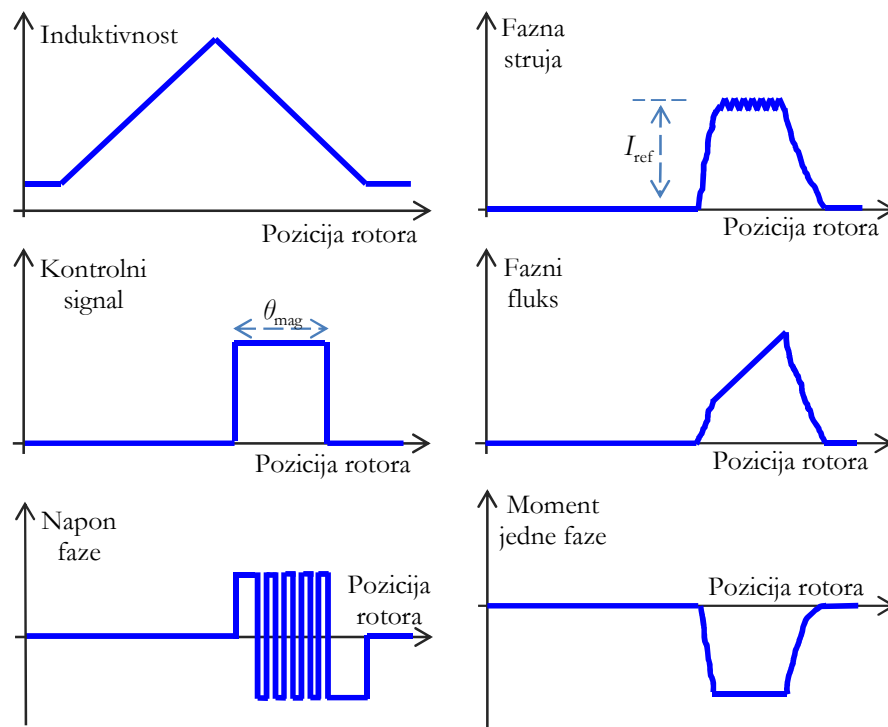
Slika 4.1 Mehanička karakteristika SRM-a u DCM-u.

Ograničavanjem struje ograničava se i vrijednost momenta mašine. Kada se brzina poveća do vrijednosti pri kojoj EMF dostiže vrijednost napona $V_{\text{dc_potr}}$, pa samim tim struju nije potrebno ograničavati, riječ je o osnovnoj brzini ω_b . Prema tome, sve do osnovne brzine, srednji moment mašine približno ima konstantnu vrijednost, snaga linearno raste sa rastom brzine, dok je struju potrebno ograničavati.

Dijagrami fazne struje, napona, fluksa, kontrolnog signala, kao i momenta jedne faze mašine za idealizovan oblik induktivnosti SRG-a pri radu u ovoj zoni, prikazani su na slici 4.2. Za regulaciju struje iskorišćen je histerezisni komparator sa *hard chopping* tehnikom.

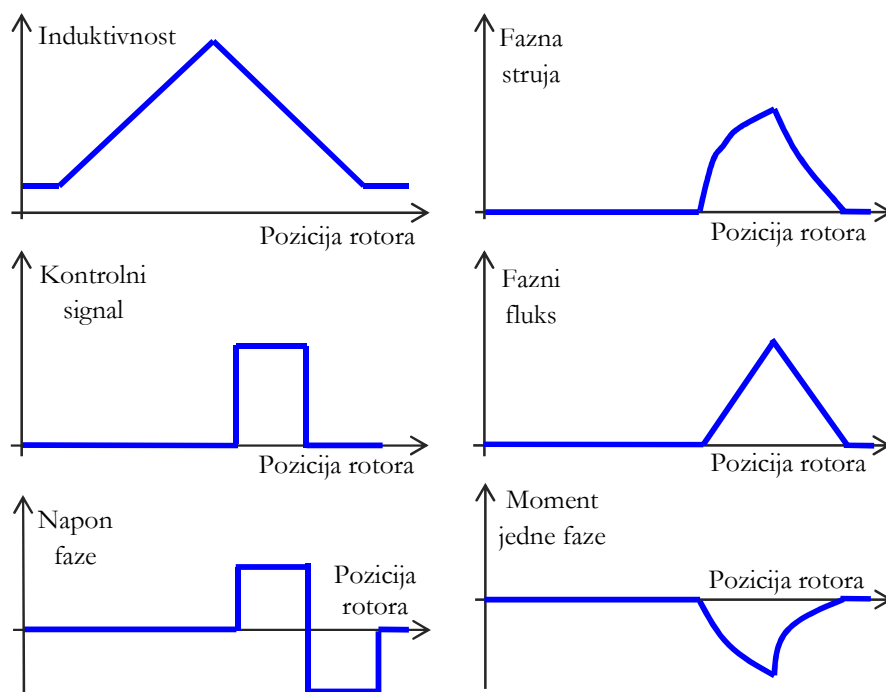
Za brzine obrtanja veće od osnovne brzine (slika 4.1), snaga se može održavati na konstantnoj vrijednosti promjenom kontrolnih uglova. Naime, ako bi se brzina obrtanja povećavala, a kontrolni parametri držali na konstantnim vrijednostima, vrijeme koje odgovara uglu magnetizacije bi se smanjivalo, pa bi i vrijednost fluksa u mašini opadala. Samim tim, moment mašine bi opadao srazmjerno kvadratu brzine. Zbog toga se

povećavanjem ugla magnetizacije povećava vrijeme za koje se vrši magnećenje faze, pa se sprečava linearan pad fluksa sa povećanjem brzine. Ako je cilj imati konstantnu snagu za određeni dijapazon brzina, potrebno je moment održavati inverzno brzini ($\sim \omega^{-1}$). Da bi se to ostvarilo, kontrolne uglove treba mijenjati tako da se dobije da je fluks faze srazmjeran sa $\omega^{-1/2}$. Ovakvo održavanje promjene fluksa moguće je samo do određene vrijednosti brzine ω_p pri kojoj ugao provođenja ima toliku vrijednost da struja i fluks počinju stalno da rastu. Talasni oblici fazne struje, napona, fluksa i momenta za idealizovan oblik induktivnosti, u ovom režimu rada, prikazani su na slici 4.3.

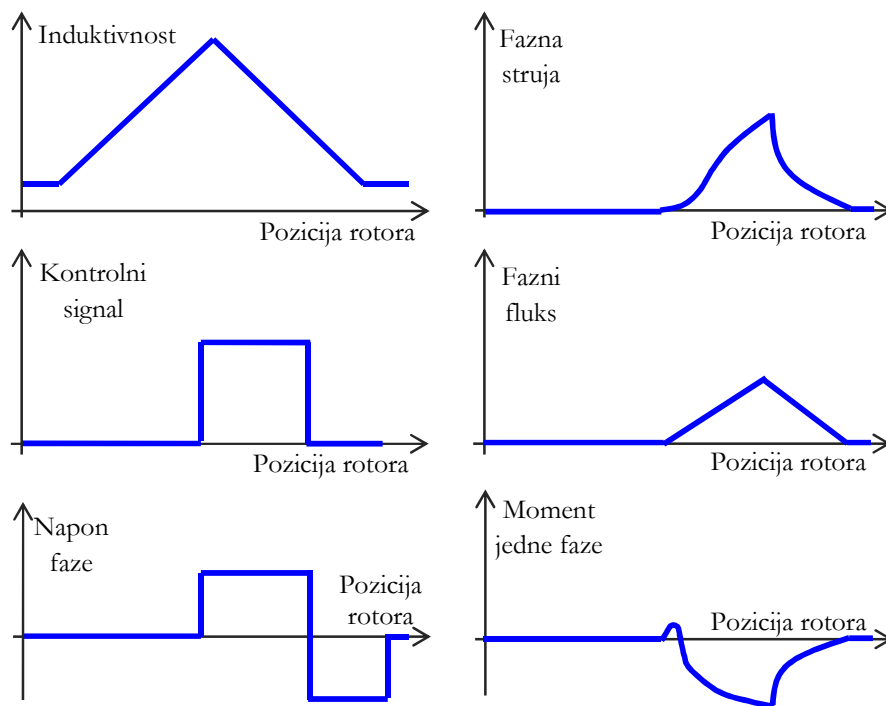


Slika 4.2 Talasni oblik fazne struje, napona, fluksa, momenta i kontrolnog signala SRG-a u zoni konstantnog momenta za idealizovan oblik induktivnosti.

Za brzine obrtanja veće od maksimalne brzine za režim konstantne snage (ω_p) više nije moguće vršiti podešavanja uglova provođenja, pa mašina prelazi na tzv. prirodnu karakteristiku. Naime, za brzine obrtanja veće od ω_p , moment je obrnuto srazmjeran kvadratu brzine, a snaga obrnuto srazmjerna brzini obrtanja (slika 4.1). Ovakva zavisnost momenta (snage) mašine od brzine obrtanja je analogna mehaničkoj karakteristici rednog motora jednosmjerne struje. Idealizovani talasni oblici induktivnosti, fazne struje, napona, fluksa, kontrolnog signala, kao i momenta jedne faze SRM-a pri radu u ovoj zoni prikazani su na slici 4.4.



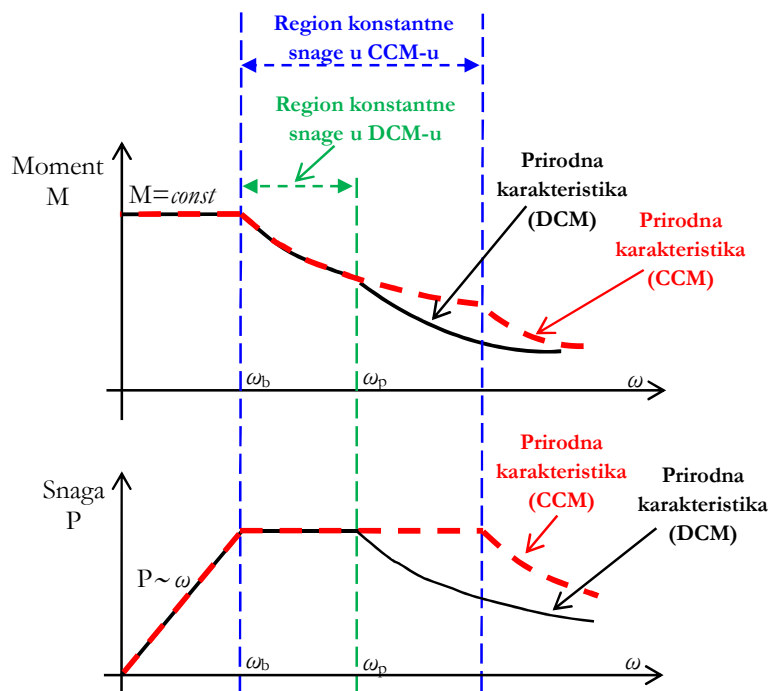
Slika 4.3 Talasni oblik fazne struje, napona, fluksa, momenta i kontrolnog signala SRG-a u zoni konstantne snage za idealizovan oblik induktivnosti.



Slika 4.4 Talasni oblik fazne struje, napona, fluksa, momenta i kontrolnog signala SRG-a u zoni prirodne karakteristike SRM-a za idealizovan oblik induktivnosti.

4.2 Region konstantne snage SRM-a

Potreba za korišćenjem električnog pogona koji razvija konstantnu snagu u širokom dijapazonu brzina javlja se u velikom broju različitih aplikacija. Tipični primjeri potrebe za ovakvim pogonom su u oblasti električne vuče, kada mašina radi kao motor, kao i u oblasti vjetroelektrana, kada mašina radi kao generator. Naime, kod električne vuče potrebno je obezbijediti širok opseg konstantne snage kako bi se omogućilo postizanje potrebnih i brzina i ubrzanja, a da se pri tom izbjegne upotreba mehaničkih prenosnika [2]. Sa druge strane, kod vjetroelektrana je izuzetno važno, radi stabilnosti energetskeg sistema, mreži isporučivati istu, ali što je moguće veću, vrijednost snage za različite brzine vjetra, tj. za različite brzine turbine.



Slika 4.5 Mehaničke karakteristike SRM-a u DCM-u i u CCM-u.

Kao što je i u Uvodu naglašeno, SRM je mašina koja je veoma pogodna za upotrebu gdje se javljaju zahtjevi za velikim opsegom brzina. Međutim, rezultati istraživanja prikazani u [112], u kojima se analizira rad SRM-a u DCM-u, pokazuju da vrijednost snage značajno varira u opsegu teorijskog regiona konstantne snage u funkciji brzine. Proširenje regiona konstantne snage može se ostvariti asimetričnim napajanjem ili formiranjem

asimetrične konfiguracije motora [41]. Međutim, na taj način se smanjuje maksimalna snaga koju ova mašina može da razvije.

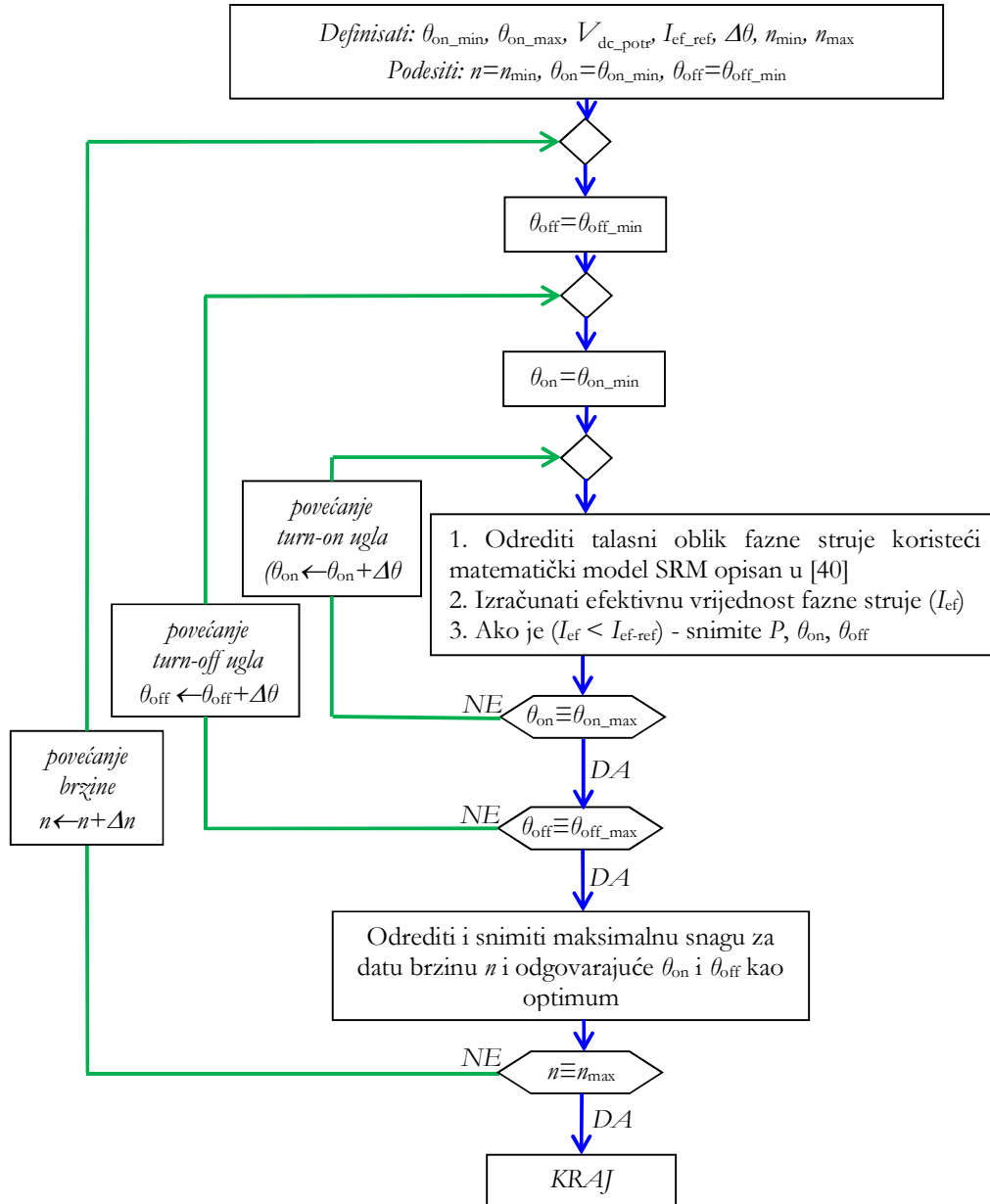
Proširenje regiona konstantne snage, odnosno povećanje snage, pri velikim brzinama obrtanja, može se ostvariti radom SRM-a u CCM-u [64-67, 119-130]. Štaviše, u slučaju rada SRM-a u CCM-u može se postići povećanje zone konstantne snage i više od deset puta [120]. Sa druge strane, pogoni sa SRM-om pri radu u CCM-u postaju neuporedivo efikasniji u poređenju sa pogonima sa asinhronim ili sinhronim mašinama [66-67]. Moment-brzina i snaga-brzine zavisnosti za DCM i CCM režim rada upoređene su na slici 4.5.

4.3 Postupak za utvrđivanje optimalnih vrijednosti kontrolnih parametara SRG-a

U cilju što efikasnijeg i ekonomičnijeg iskorišćenja električnih mašina potrebno je poznavati njihove optimalne karakteristike, tj. odrediti optimalne kontrolne parametre za određene uslove i režime rada (motor/generator, male brzine/velike brzine, konstantan napon napajanja/promjenjiv napon napajanja, i slično). Pošto se ova disertacija tiče generatorskog režima rada SRM-a pri velikim brzinama obrtanja, potrebno je odrediti kolika maksimalna vrijednost snage se može dobiti na izlazu ove mašine, vodeći računa da mašina ne bude ni termički ni naponski preopterećena. Algoritam za određivanje optimalnih kontrolnih parametara SRG-a u cilju maksimizacije izlazne (električne) snage prikazan je na slici 4.6 [130]. Predloženi algoritam podrazumijeva upotrebu kompjuterskih simulacija razvijenog programa baziranog na Vujičićevom nelinearnom matematičkom modelu SRM-a, opisanom u Poglavlju 2.4.3 [40].

Prema predloženom algoritmu, kompjuterske simulacije se vrše za određeni, unaprijed definisani, dijapazon brzina ($n_{\max}$ – maksimalna brzina, $n_{\min}$ – minimalna brzina, Δn – korak promjene brzine). Za svaku od definisanih brzina vrši se varijacija kontrolnih parametara između minimalnih ($\theta_{\text{on_min}}$ i $\theta_{\text{off_min}}$) i maksimalnih ($\theta_{\text{on_max}}$ i $\theta_{\text{off_max}}$) vrijednosti, respektivno, sa odgovarajućim korakom $\Delta\theta$. U svakoj iteraciji se određuje vrijednost izlazne (električne) snage, vrijednost momenta, kao i efektivna vrijednost fazne struje (I_{ef}), dok se

analizom talasnog oblika struje određuje njen kontinualni, odnosno, diskontinualni oblik. Za svaku brzinu obrtanja, u toku ovoga optimizacionog postupka, određuju se optimalne vrijednosti kontrolnih parametara (optimalni uglovi uključenja θ_{on} i isključenja θ_{off} za datu referentnu efektivnu vrijednost fazne struje I_{ef_ref}) koji omogućavaju dobijanje maksimalne vrijednosti izlazne (električne) snage. Na kraju, za poznate parametre mašine (koji su bitni za matematički model), napon potrošača V_{dc_potr} , unaprijed definisani dijapazon brzina i referentnu efektivnu vrijednost fazne struje dobijaju se optimalne karakteristike SRG-a.



Slika 4.6 Algoritam za optimizaciju kontrolnih parametara SRG-a.

4.4 Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a

Postupak za optimizaciju kontrolnih parametara SRG-a opisan u prethodnom Potpoglavlju primijenjen je na SRG, napajan iz klasičnog pretvarača, čiji su podaci dati u Tabeli 2-1. Iako se ovaj postupak može primijeniti za bilo koju vrijednost napona potrošača V_{dc_potr} i referentnu efektivnu vrijednost struje I_{ef_ref} , u ovom Potpoglavlju prikazani su rezultati optimizacije za nominalnu vrijednost napona mašine, ali za različite struje I_{ef_ref} (2A, 1.75A i 1.5A). Optimizacija je sprovedena za rad SRG-a u DCM-u i u CCM-u. Uzeto je da je korak promjene kontrolnih uglova $\Delta\theta=0.1$ [° meh].

4.4.1 Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a u DCM-u

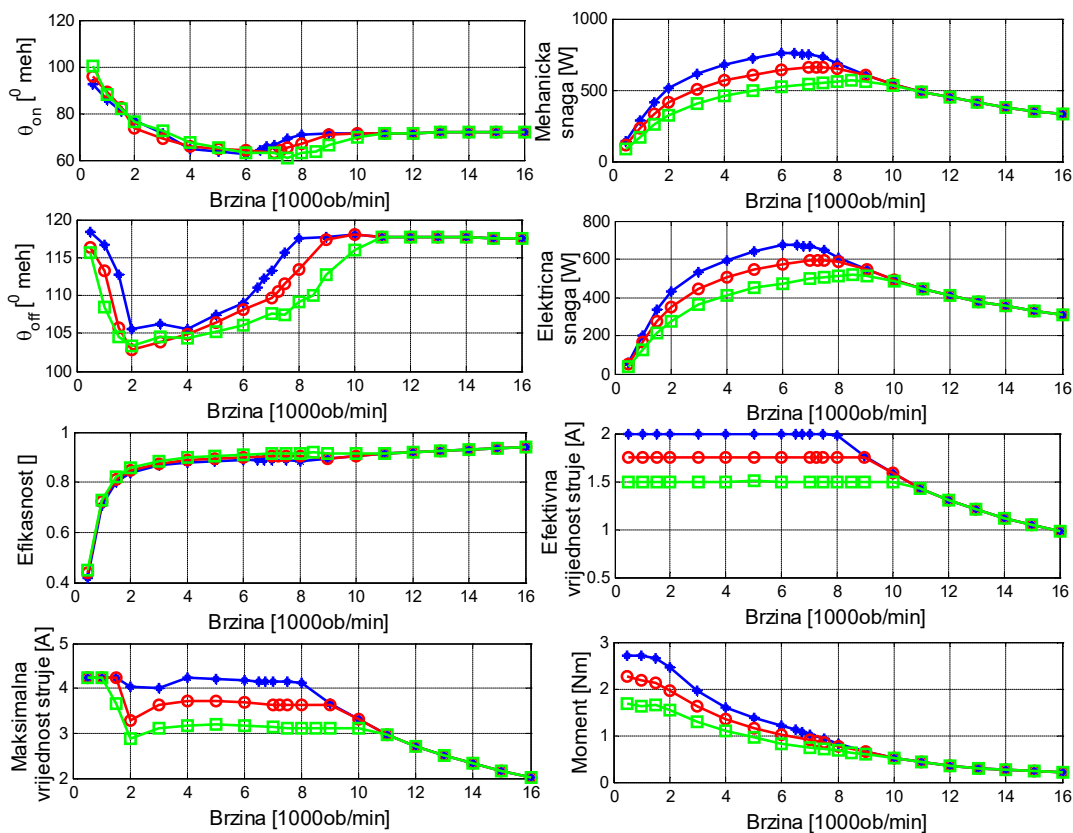
Optimizacija rada korišćenog SRG-a u DCM-u izvršena je za opseg brzina od 500ob/min do 16000ob/min sa maksimalnim korakom od 1000ob/min. Rezultati optimizacije prikazani su na slici 4.7, kao i u PRILOGU A, u Tabelama P-A.1 – P-A.3.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 4.7 se vidi da, nakon određene brzine obrtanja, vrijednost struje postaje manja od njene referentne vrijednosti zbog velike vrijednosti EMF. Pri velikim brzinama obrtanja, uporedo sa smanjenjem efektivne vrijednosti struje, dolazi i do smanjenja momenta, a samim tim i snage SRG-a.

Posmatrajući optimizovanu moment-brzina krivu, kao i snaga-brzina krivu, dobijenu za $I_{ef_ref}=2A$ i $V_{dc_potr}=270V$ uočava se da je:

- zona konstantnog momenta u opsegu brzina od 0 do 1500ob/min,
- zona konstantne snage u opsegu brzina od 1500 do 8000ob/min i
- prirodna karakteristika za brzine veće od 8000ob/min.

Prema tome, sa ove slike je jasno da u teorijskoj zoni konstantne snage vrijednost snage nije konstantna, što potvrđuje zaključke izvedene u [112]. Međutim, evidentno je da se smanjivanjem struje I_{ef_ref} region konstantne snage proširuje. Maksimalna vrijednost snage SRG-a se postiže pri brzini obrtanja od 6500ob/min. Nakon ove brzine snaga počinje da opada i pri brzini od 16000ob/min njena vrijednost je oko 350W.

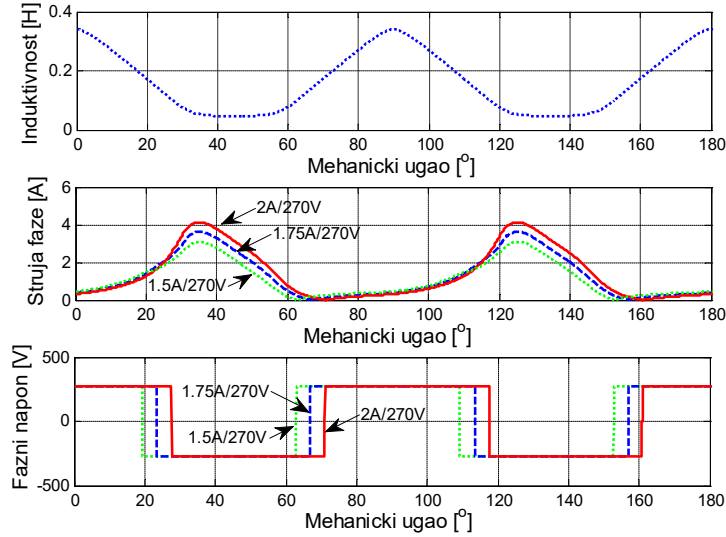


Slika 4.7 Rezultati optimizacije rada SRG-a u DCM-u ($V_{dc_potr}=270V$; $I_{ef_ref}=2A$ - zvjezdica, $I_{ef_ref}=1.75A$ - kružić i $I_{ef_ref}=1.5A$ - kvadratić).

Efikasnost (η) SRG-a, za brzine veće od 4000ob/min, je veća od 90%. U regionu prirodne karakteristike efikasnost počinje da raste sa povećanjem brzine, ali se tada vrijednost električne snage smanjuje. Takođe, u ovom regionu brzina i maksimalna trenutna vrijednost struje se smanjuje sa povećanjem brzine obrtanja.

Na kraju, može se zaključiti da dobijeni rezultati optimalnih kontrolnih uglova takođe potvrđuju poznatu teoriju o SRM mašini. Naime, vrijednost ugla magnetizacije u zoni konstantnog momenta je skoro konstantna, u zoni konstantne snage se povećava sa povećanjem brzine, dok je u regionu prirodne karakteristike konstantna i približno jednaka 45 [°meh].

Talasni oblici induktivnosti, fazne struje i faznog napona korišćenog SRG-a pri radu u DCM-u, za optimizovane vrijednosti kontrolnih parametara, a za različite struje I_{ef_ref} pri brzini obrtanja od 8000ob/min, prikazani su na slici 4.8. Sa ove slike se vidi da je interval u kome je vrijednost napona na fazi jednaka nuli izuzetno kratak (optimizacija je izvršena u cilju maksimizacije izlazne snage), pa fazna struja ima granični diskontinualni karakter.

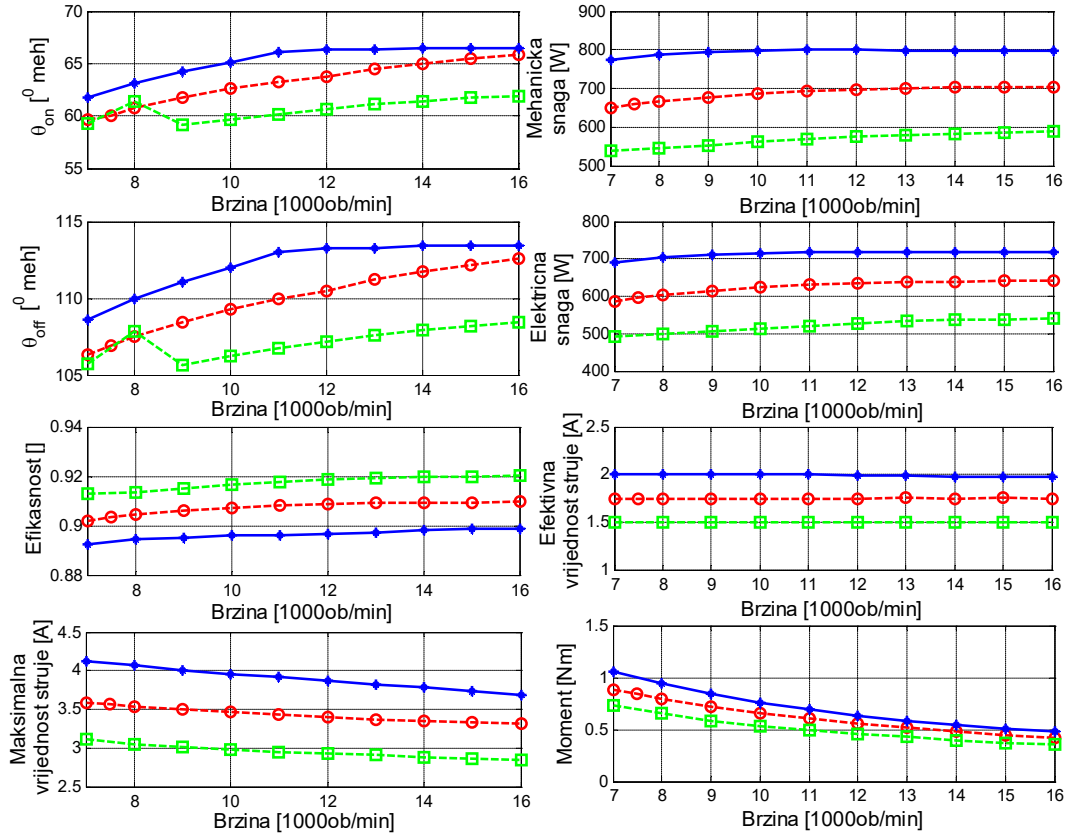


Slika 4.8 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova ($n=8000\text{ob/min}$; $V_{\text{dc_potr}}=270\text{V}$; $I_{\text{ef}}=2\text{A}$ - puna linija, $I_{\text{ef}}=1.75\text{A}$ - crta-crta linija i $I_{\text{ef}}=1.5\text{A}$ - tačka-tačka linija).

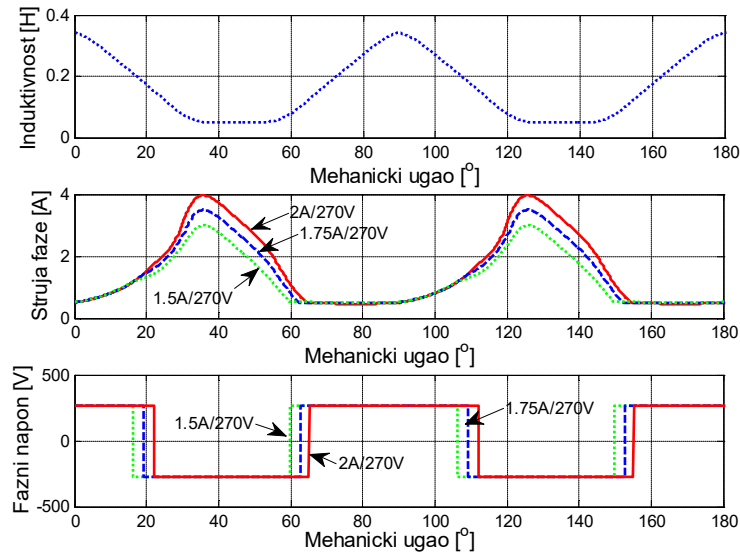
4.4.2 Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a u CCM-u

Rad SRG-a u CCM je jedino efikasan pri velikim brzinama obrtanja [66-67]. Zbog toga je optimizacija rada korišćenog SRG-a u CCM-u izvršena za opseg brzina od 7000ob/min do 16000ob/min (sa korakom od 1000ob/min). Rezultati sprovedene optimizacije prikazani su na slici 4.9, kao i u PRILOGU B, u Tabelama P-B.1 – P-B.3. Međutim, važno je napomenuti da je rad SRG-a u CCM-u moguć i pri manjim brzinama obrtanja, ali tada vrijednost napona mora biti manja od nominalne vrijednosti, ili mora biti regulisana *soft-switching* tehnikom.

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 4.9 vidi se da je vrijednost ugla provođenja, u čitavom dijapazonu posmatranih brzina, ali i za sve razmatrane vrijednosti struje $I_{\text{ef_ref}}$, konstantna. Takođe, zavisnosti mehaničke snage u funkciji brzine obrtanja, za različite vrijednosti struje $I_{\text{ef_ref}}$ su međusobno paralelne linije. Isti zaključak važi i za moment-brzina, efikasnost-brzina, maksimalna vrijednost struje-brzina zavisnosti. Takođe, sa ove slike se vidi da se za optimalne vrijednosti kontrolnih uglova, u čitavom dijapazonu brzina, dobija gotovo konstantna vrijednost snage. Konkretno, pri nominalnoj vrijednosti struje faze od 2A i napona od 270V , vrijednost snage na izlazu SRG-a je oko 720W , što je za oko 40W veće od maksimalne vrijednosti snage koja se dobija pri radu SRG-a u DCM-u, a pri brzini obrtanja od 6500ob/min .



Slika 4.9 Rezultati optimizacije rada SRG-a u CCM-u ($V_{dc_potr}=270V$; $I_{ef_ref}=2A$ - zvjezdica, $I_{ef_ref}=1.75A$ - kružić i $I_{ef_ref}=1.5A$ - kvadratić).

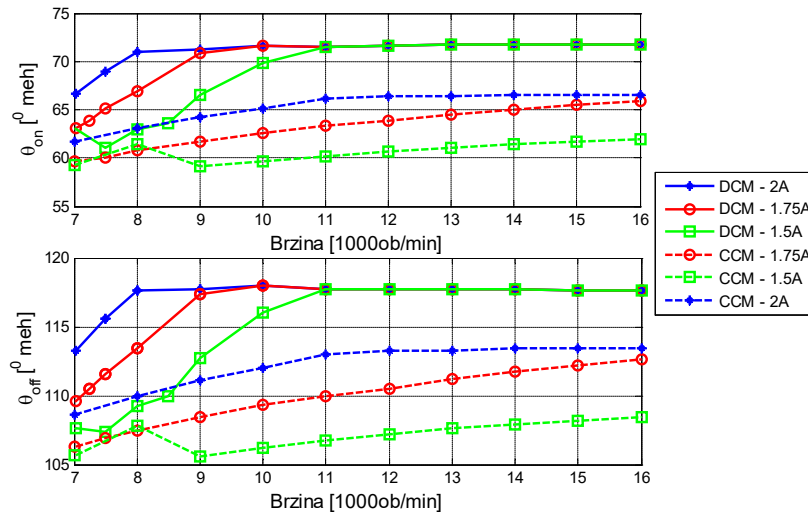


Slika 4.10 Simulacioni rezultati rada SRG-a u CCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova ($n=10000ob/min$; $V_{dc_potr}=270V$; $I_{ef}=2A$ - puna linija, $I_{ef}=1.75A$ - crta-crta linija i $I_{ef}=1.5A$ - tačka-tačka linija).

Talasni oblici induktivnosti, fazne struje i faznog napona SRG-a pri radu u CCM-u, za optimizovane vrijednosti kontrolnih parametara i za različite I_{ef_ref} pri brzini obrtanja od 10000ob/min, prikazani su na slici 4.10. Iako su talasni oblici i napona i struja veoma slični, njihove male međusobne razlike, kao i male razlike u kontrolnim uglovima, uslovljavaju velike razlike u vrijednostima električne snage (slika 4.9). Zbog toga je za efikasno, ali i stabilno, upravljanje SRG-om izuzetno važno tačno odrediti optimalnu vrijednost kontrolnih uglova.

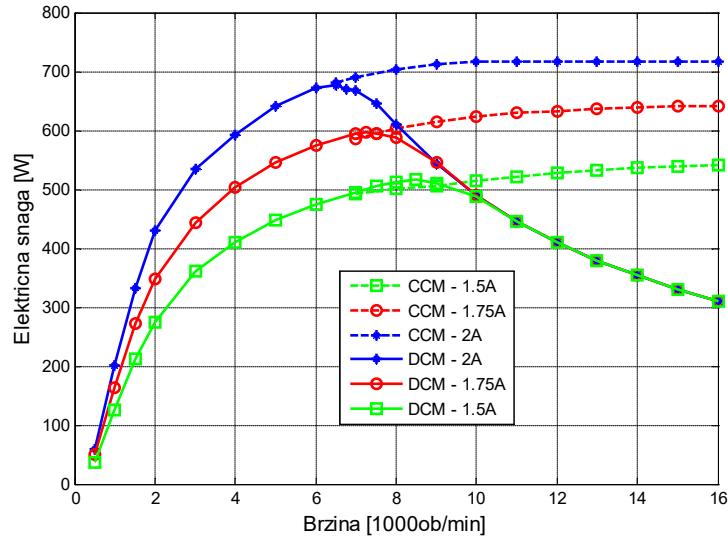
4.5 Poređenje optimalnih karakteristika korišćenog SRG-a u DCM-u i u CCM-u

Izlazne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu u DCM-u i u CCM-u upoređene su na slikama 4.11-4.14. Osim toga, na slici 4.15 upoređeni su talasni oblici fazne struje, napona i momenta SRG-a, a na slici 4.16 fluks-struja petlje, pri radu u DCM-u i u CCM-u.

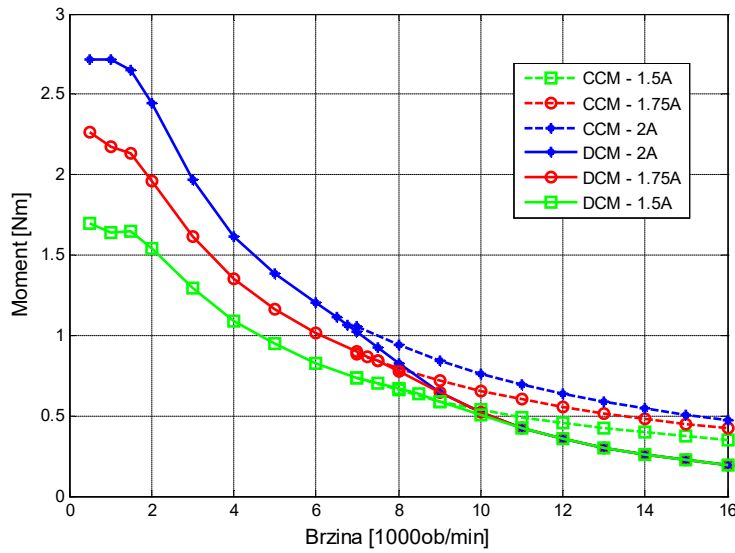


Slika 4.11 Optimalne $\theta_{on} - n$ i $\theta_{off} - n$ karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).

Na osnovu prikazanih rezultata je jasno da se pri radu SRG-a u CCM-u, za optimalne kontrolne parametre (slika 4.11), dobija veća vrijednost električne snage (slika 4.12), kao i veća vrijednost momenta (slika 4.13) u odnosu na rad SRG-a u DCM-u. Međutim, efikasnost SRG-a (slika 4.14) pri radu u CCM-u je neznatno manja u odnosu na efikasnost SRG-a pri radu u DCM-u.



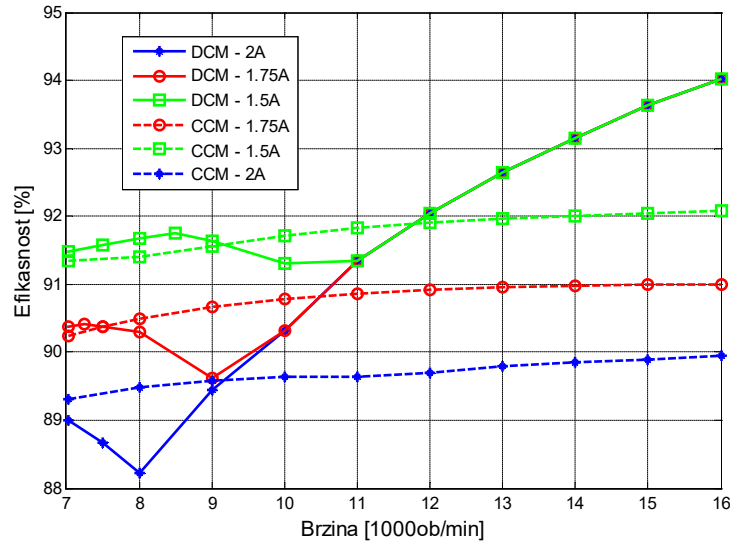
Slika 4.12 Optimalne P - n karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).



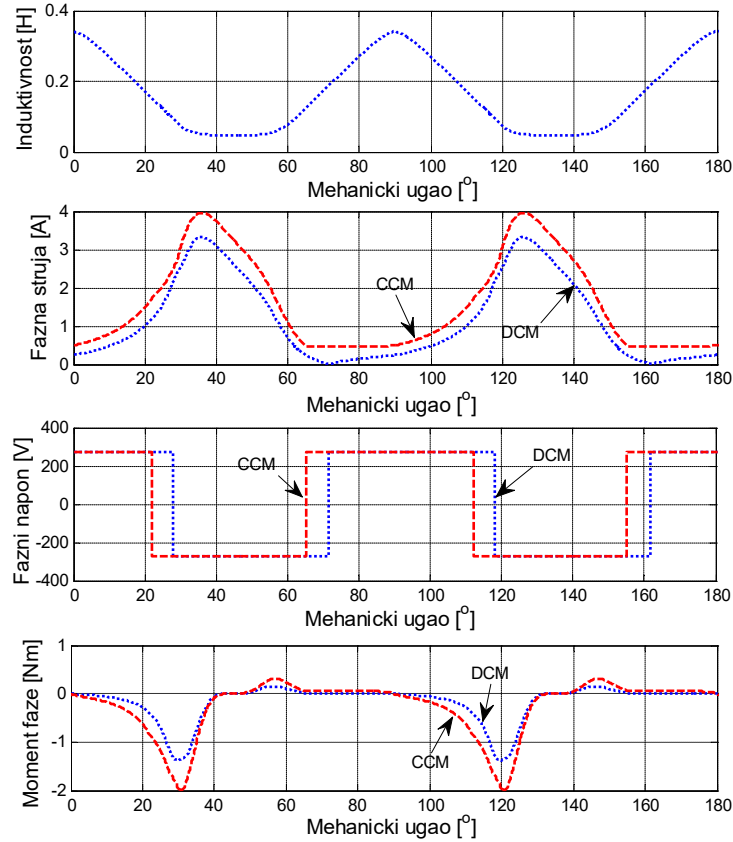
Slika 4.13 Optimalne M - n karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 4.15 se vidi da maksimalna trenutna vrijednost fazne struje ima veću vrijednost pri radu u CCM-u u odnosu na rad u DCM-u, za istu vrijednost brzine obrtanja. Takođe, sa ove slike se vidi da pri radu SRG-a u CCM-u dolazi do formiranja veće vrijednosti i pozitivnog i negativnog momenta u odnosu na rad SRG-a u DCM-u. Međutim, srednja vrijednost momenta SRG-a, za određenu brzinu obrtanja, je veća pri radu u CCM-u u odnosu na rad u DCM-u. Na kraju, na osnovu

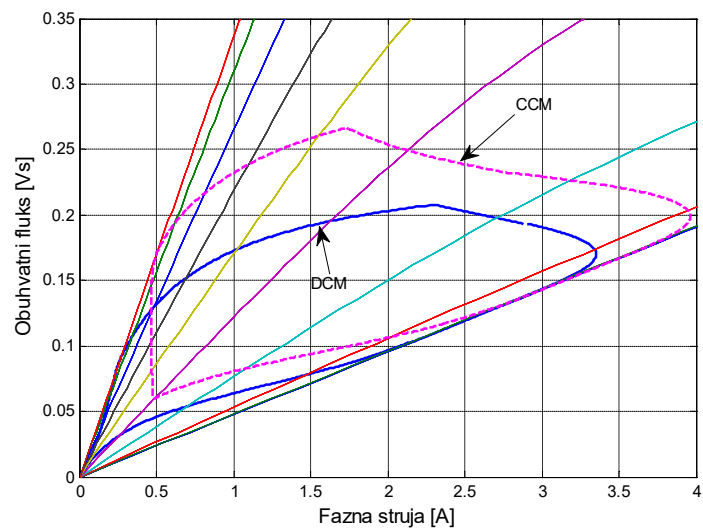
rezultata prikazanih na slici 4.16 se vidi da je površina petlje, a samim tim i vrijednost električne snage, veća pri radu SRG-a u CCM-u u odnosu na rad SRG-a u DCM-u.



Slika 4.14 Optimalne η - n karakteristike SRG-a u DCM-u i u CCM-u za različite I_{ef_ref} ($V_{dc_potr}=270V$).



Slika 4.15 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u i u CCM-u, za optimizovane vrijednosti kontrolnih uglova ($n=10000ob/min$, $V_{dc_potr}=270V$, $I_{ef}=2A$).



Slika 4.16 Fluks-struja petlje SRG-a u DCM-u i u CCM-u, za optimizovane vrijednosti kontrolnih uglova ($n=10000\text{ob/min}$, $V_{\text{dc_potr}}=270\text{V}$, $I_{\text{ef}}=2\text{A}$).

POGLAVLJE 5

Modifikovani klasični metod upravljanja SRG-om u CCM-u

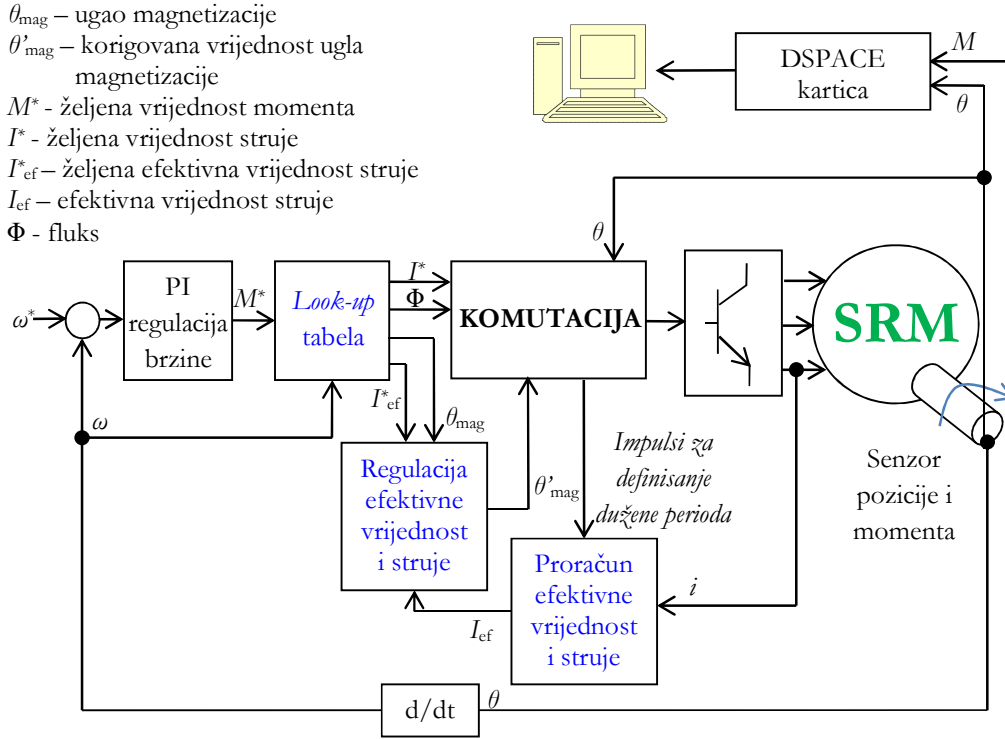
U ovom poglavlju predložen je modifikovani metod upravljanja SRG-om u CCM-u. Predloženi metod je baziran na upotrebi klasičnog pretvarača, ali, za razliku od postojećih metoda, ne zahtijeva ni mjerenje ni regulaciju struje SRG-a. U poglavlju je prikazana i primjena predloženog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u u vjetrogeneratorskom sistemu.

5.1 Kratak osvrt na postojeće metode upravljanja SRM-om u CCM-u

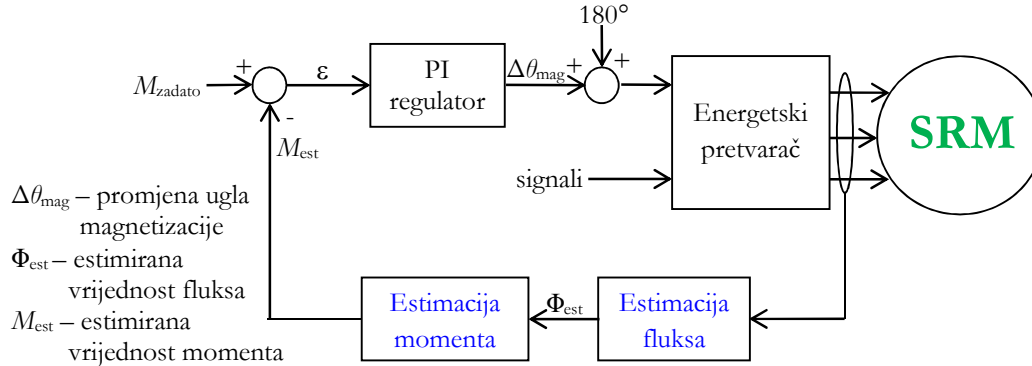
Analiza rada SRM-a u CCM-u postala je aktuelna tek u posljednjoj deceniji [64-67, 119-130], pa samim tim ne postoji veliki broj naučnih radova koji se bave ovom problematikom. Međutim, bitno je napomenuti da je u većini tih radova dominantno analiziran motorni režim rada SRM-a [64-67, 119-128].

U Potpoglavlju 1.11 naglašeno da mala promjena kontrolnih uglova pri radu u SRM-a CCM-u može uzrokovati velike promjene vrijednosti fazne struje. Zbog toga postojeće kontrolne strategije za upravljanje SRM-om u CCM-u [64-67], a koje su inače bazirane na mjerenju pozicije rotora, zahtijevaju i mjerenje fazne struje. Štaviše, kontrolna strategija predložena u [64-65] zahtijeva i regulaciju fazne struje, dok se u cilju definisanja kontrolnih uglova koriste *look-up* tabele (slika 5.1). Sa druge strane, kontrolna strategija za upravljanje SRM-om, predložena u [66-67], zahtijeva poznavanje moment-fluks-struja zavisnosti. Naime, kod ove kontrolne strategije se u zavisnosti od izmjerene vrijednosti struje i pozicije vrši estimacija fluksa, a zatim estimacija momenta (slika 5.2). Prema tome,

kontrolne strategije predložene u [64-67] su složene za implementaciju i, samim tim, ograničene za široku primjenu i jeftine aplikacije.



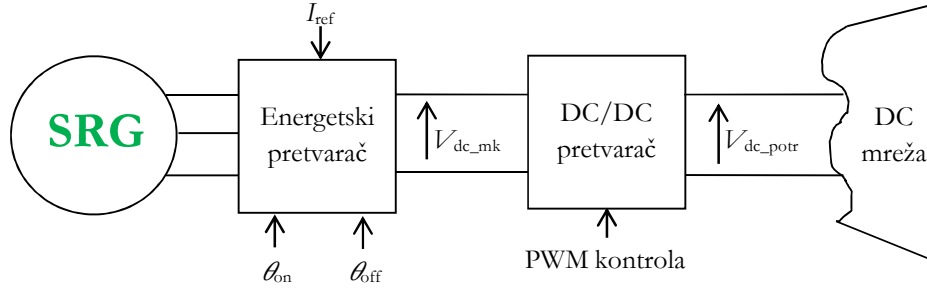
Slika 5.1 Blok dijagram kontrole brzine SRM-a pri radu u CCM-u [64-65].



Slika 5.2 Blok dijagram kontrole momenta SRM-a pri radu u CCM-u [66-67].

U ovom poglavlju opisan je novi modifikovani metod klasičnog upravljanja SRM-om u CCM-u, sa implementacijom u vjetrogeneratorskom sistemu, a koji je publikovan u [130]. Ovaj metod se bazira na promjeni napona na fazama SRG-a. Naime, upotrebom DC/DC pretvarača može se vršiti regulacija napona na fazama, a samim tim se može i

regulisati vrijednost električne snage. Šema povezivanja SRG-a, klasičnog pretvarača i DC/DC pretvarača sa DC mrežom prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3 Šema povezivanja SRG-a, energetskog pretvarača, DC/DC pretvarača i DC mreže.

5.2 Osnova novog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u baziranog na regulaciji napona jednosmjernog međukola

Cilj razvoja nove metode upravljanja SRG-om u CCM-u jeste da se elimiše upotreba *look-up* tabela i da se kontrolni parametri definišu preko jednostavnih relacija.

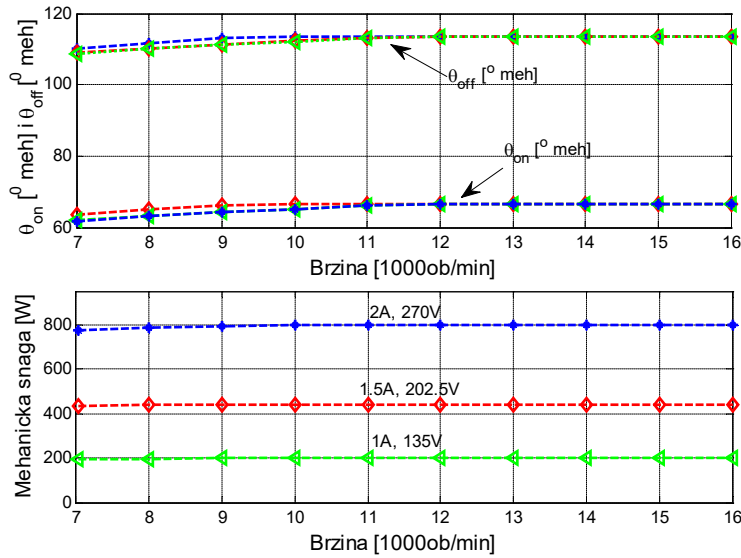
Ako se zanemari otpornost namotaja statora, trenutna vrijednost napona jedne faze SRM-a (1-4) u toku magnetizacije ima oblik:

$$U = V_{dc_mk} \approx \frac{d\Phi}{dt} = \omega \frac{d\Phi}{d\theta} = \omega \frac{d(L \cdot i)}{d\theta}. \quad (5-1)$$

Posmatrajući ovu aproksimativnu jednačinu može se zaključiti da, za određenu brzinu obrtanja i određene vrijednosti kontrolnih uglova, smanjivanje-povećanje napona međukola V_{dc_mk} (slika 5.3) uslovljava proporcionalno smanjivanje-povećanje fluksa u mašini. Na primjer, ako se vrijednost napona međukola smanji „ k “ puta, vrijednost fluksa će se smanjiti takođe „ k “ puta. Osim toga, efektivna vrijednost struje će se smanjiti „ k “ puta, dok bi se vrijednost snage smanjila „ k^2 “ puta. Prema tome, za očekivati je i obrnuta situacija - za određenu brzinu obrtanja, vrijednost optimalnih kontrolnih uglova će biti ista ako se proporcionalno smanjuje i vrijednost napona međukola i efektivna vrijednost struje faze.

U cilju provjere tačnosti predložene ideje iskorišćena je optimizaciona procedura, predložena u Potpoglavlju 4.3. Naime, izvršena je optimizacija kontrolnih parametara SRG-

a, u cilju maksimizacije izlazne (električne) snage, uzimajući različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i različite I_{ef_ref} , pri čemu je odnos napona V_{dc_mk} i I_{ef_ref} bio konstantan. Konkretno, optimizacijska procedura je, osim za $V_{dc_mk}=270V$ i $I_{ef_ref}=2A$ (slika 4.9, Tabela P-B.1), sprovedena i za $V_{dc_mk}=202.5V$ i $I_{ef_ref}=1.5A$, kao i za $V_{dc_mk}=135V$ i $I_{ef_ref}=1A$ (PRILOG B, Tabele P-B.4 – P-B.5).

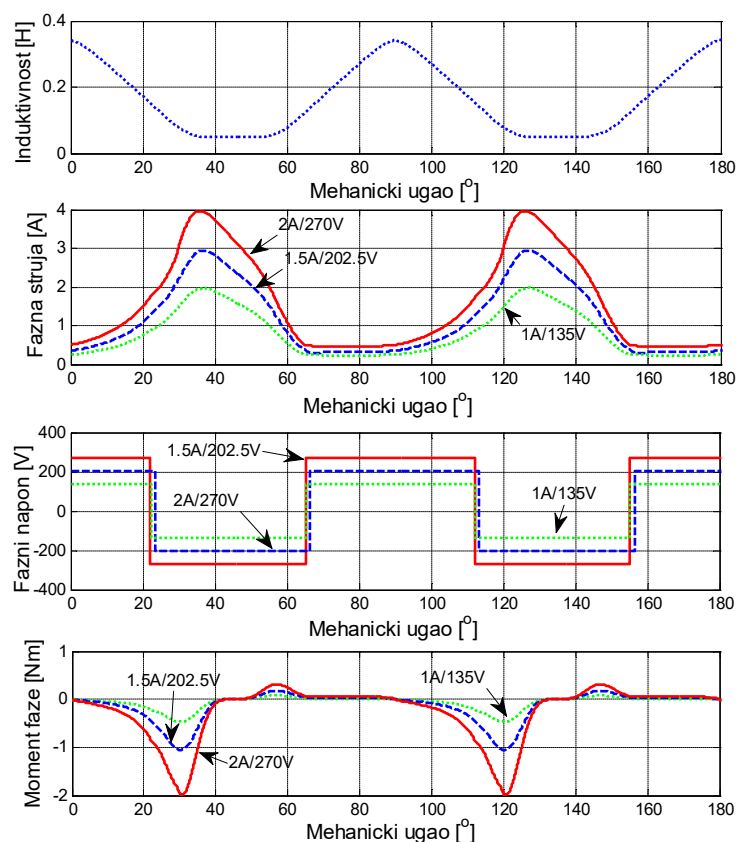


Slika 5.4 Optimalne θ_{on} - n , θ_{off} - n i P_{meh} - n karakteristike SRG-a u CCM-u za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref} .

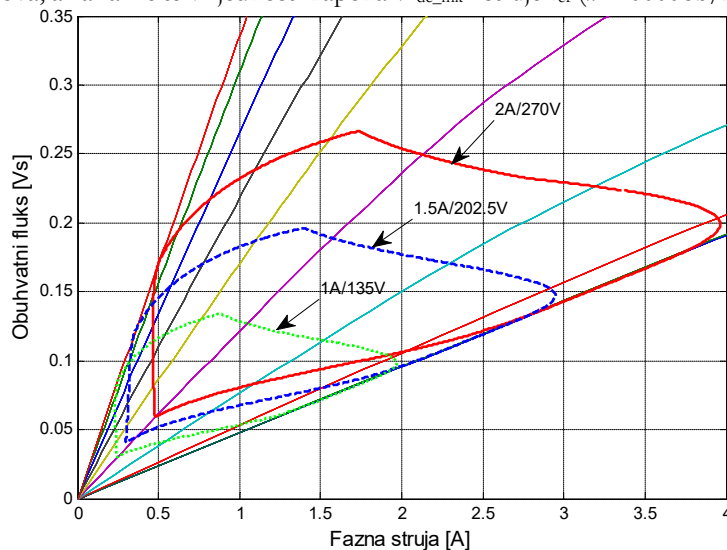
Zavisnosti optimalnih kontrolnih uglova i mehaničke snage u funkciji brzine, za odabrane vrijednosti V_{dc_mk} i I_{ef_ref} , prikazane su na slici 5.4. Sa ove slike se jasno vidi da su optimalne vrijednosti kontrolnih uglova, za brzine obrtanja veće od 11000ob/min, za sve razmatrane kombinacije napona V_{dc_mk} i I_{ef_ref} identične. Takođe, vidi se da su zavisnosti mehaničke snage u funkciji brzine obrtanja, za razmatrane kombinacije napona V_{dc_mk} i I_{ef_ref} , međusobno paralelne. Prema tome, može se zaključiti da se kontrolni uglovi ne mijenjaju sa promjenom snage, dok se veoma malo mijenjaju, i to po linearnoj zavisnosti, u funkciji brzine obrtanja.

Na slici 5.5 prikazani su talasni oblici induktivnosti, fazne struje, faznog napona i faznog momenta SRG-a pri radu u CCM-u, za optimalne kontrolne parametre, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} . Odgovarajuće obuhvatni fluks-struja petlje prikazane su na slici 5.6. Na osnovu talasnih oblika napona vidi se da su uglovi uključenja i isključenja

skoro identični. Takođe, sa prikazanih rezultata se vidi da se maksimalne vrijednosti fazne struje, za ovako odabrane vrijednosti V_{dc_mk} i I_{ef_ref} , postižu u istoj poziciji rotora.



Slika 5.5 Simulacioni rezultati rada SRG-a u CCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} ($n=10000\text{ob/min}$).



Slika 5.6 Fluks-struja petlje SRG-a u CCM-u pri optimizovanim vrijednostima kontrolnih uglova, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} ($n=10000\text{ob/min}$).

5.3 Novi metod upravljanja SRG-om u CCM-u baziran na regulaciji napona jednosmjernog međukola

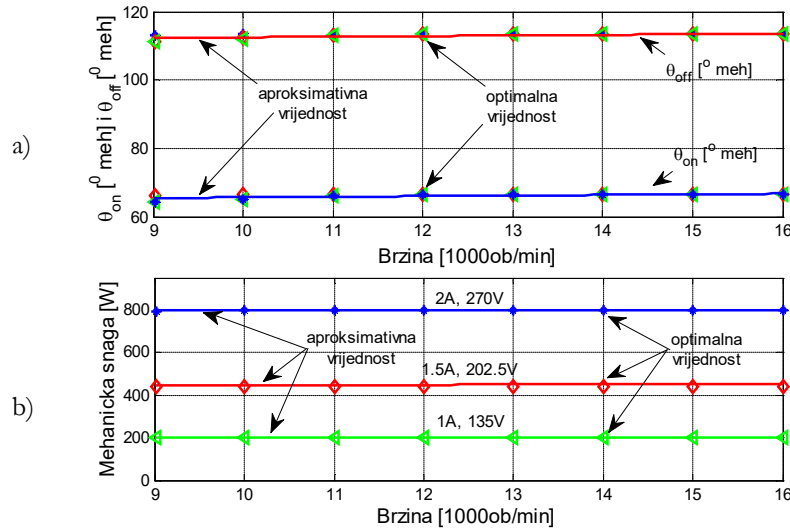
Posmatrajući rezultate prikazane na slici 5.4, a primjenjujući metod najmanjih kvadrata, zavisnosti kontrolnih uglova u funkciji brzine obrtanja su linearizovane na sljedeći način:

$$\begin{aligned}\theta_{on}(n) &= K_{1on} \cdot n + K_{2on} [^\circ \text{meh}], \\ \theta_{off}(n) &= \theta_{on}(n) + 46.85 [^\circ \text{meh}],\end{aligned}\quad (5-2)$$

gdje n predstavlja brzinu obrtanja u [ob/min], $K_{1on}=0.00018 [^\circ \text{meh} \cdot \text{min/r}]$ i $K_{2on}=63.85 [^\circ \text{meh}]$. Optimalne i aproksimirane zavisnosti kontrolnih uglova prikazane su na slici 5.7a. Slično prethodnom, primjenjujući metod najmanjih kvadrata, karakteristike mehanička snaga-brzina obrtanja su aproksimirane na sljedeći način:

$$P_{meh} = (a + b \cdot n) \cdot V_{dc_mk}^2 [W], \quad (5-3)$$

gdje je P_{meh} mehanička snaga generatora, V_{dc_mk} napon međukola, $a=0.0109 [W/V^2]$, $b=2.26 \cdot 10^{-9} [W \cdot \text{min}/V^2/r]$ (slika 5.7b).

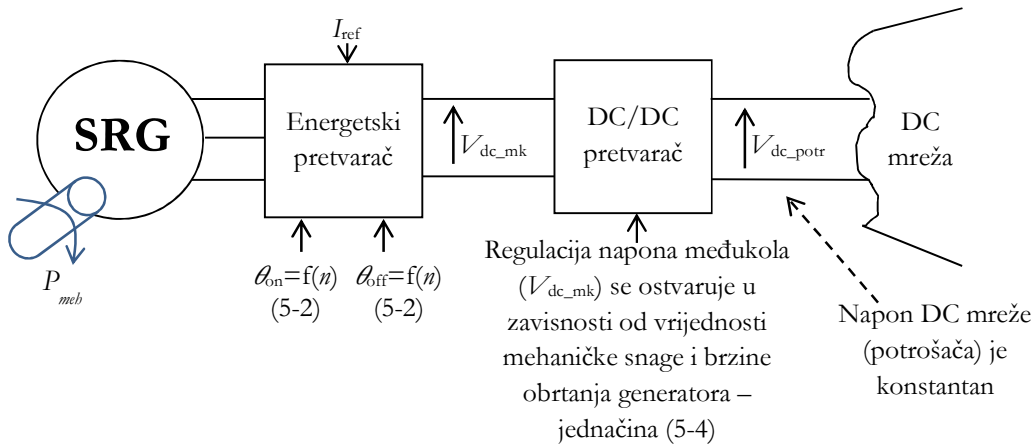


Slika 5.7 Optimalne i aproksimativne a) $\theta_{on} - n$, $\theta_{off} - n$ i b) $P_{meh} - n$ karakteristike SRG-a u CCM-u za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref} .

Prema tome, mehanička snaga, a samim tim i električna (izlazna) snaga, SRG-a u CCM-u se može regulisati promjenom napona napajanja [130]. Koristeći (5-3) vrijednost napona međukola se može odrediti na osnovu sljedeće formule:

$$V_{dc_mk} = \sqrt{\frac{P_{meh}}{a+b \cdot n}} [V]. \quad (5-4)$$

Sa druge strane, kontrolni uglovi se jednostavno podešavaju u zavisnosti od vrijednosti brzine obrtanja. Samim tim, za definisanje kontrolnih uglova nije potrebno koristiti *look-up* tabele, kao što se zahtijeva u [64-65]. Štaviše, ovako definisane vrijednosti napona međukola i kontrolnih uglova osiguravaju da maksimalna i efektivna vrijednost struje budu u granicama dozvoljenih. Prema tome, ne postoji potreba za mjerenjem i regulacijom struje za razliku od metoda prikazanih u [64-65]. Shodno prethodnom, blok dijagram predloženog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u, sa regulacijom napona jednosmjernog međukola, prikazan je na slici 5.8.



Slika 5.8 Blok dijagram modifikovanog klasičnog upravljanja SRG-om u CCM-u.

5.4 Primjena novog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u ostvarenog regulacijom napona međukola u vjetrogeneratorskom sistemu

Kao što je i u Uvodu naglašeno, SRG ima niz prednosti koje ga čine veoma interesantnim za primjenu u brojnim električnim pogonima. Zbog male inercije rotora, velike efikasnosti i velike robustnosti SRG je izuzetno pogodan za rad u vjetrogeneratorskim sistemima [71-72, 100-107]. Međutim, u dosadašnjim istraživanjima dominantno je analiziran rad SRG-a u DCM-u, pri čemu predložene kontrolne strategije zahtijevaju mjerenje i regulaciju fazne struje. U ovom poglavlju će biti predložena primjena novog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u ostvarenog regulacijom napona međukola u vjetrogeneratorskom sistemu.

5.4.1 Kontrola izlazne snage vjetrogeneratorskih sistema

Vjetroturbine pretvaraju energiju vjetra u električnu energiju. Matematički izraz za snagu vjetra koju prihvataju lopatice vjetroturbine je:

$$P_M = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 v_w^3, \quad (5-5)$$

gdje je R poluprečnik lopatica [m], ρ gustina vazduha [kg/m^3], $C_p(\lambda, \beta)$ je koeficijent snage (efikasnost rotora) i v_w brzina vjetra [m/s]. Koeficijent snage $C_p(\lambda, \beta)$ je funkcija tzv. odnosa brzina λ (engl. *tip speed ratio*) i ugla zakrivljenja lopatica β [°]. Njegova matematička formulacija je [136]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda, \quad (5-6)$$

gdje je $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$. Koeficijenti c_i , $i=1...6$ imaju sljedeće vrijednosti: $c_1=0.5176$,

$c_2=116$, $c_3=0.4$, $c_4=5$, $c_5=21$ i $c_6=0.0068$. Odnos brzina λ se definiše kao

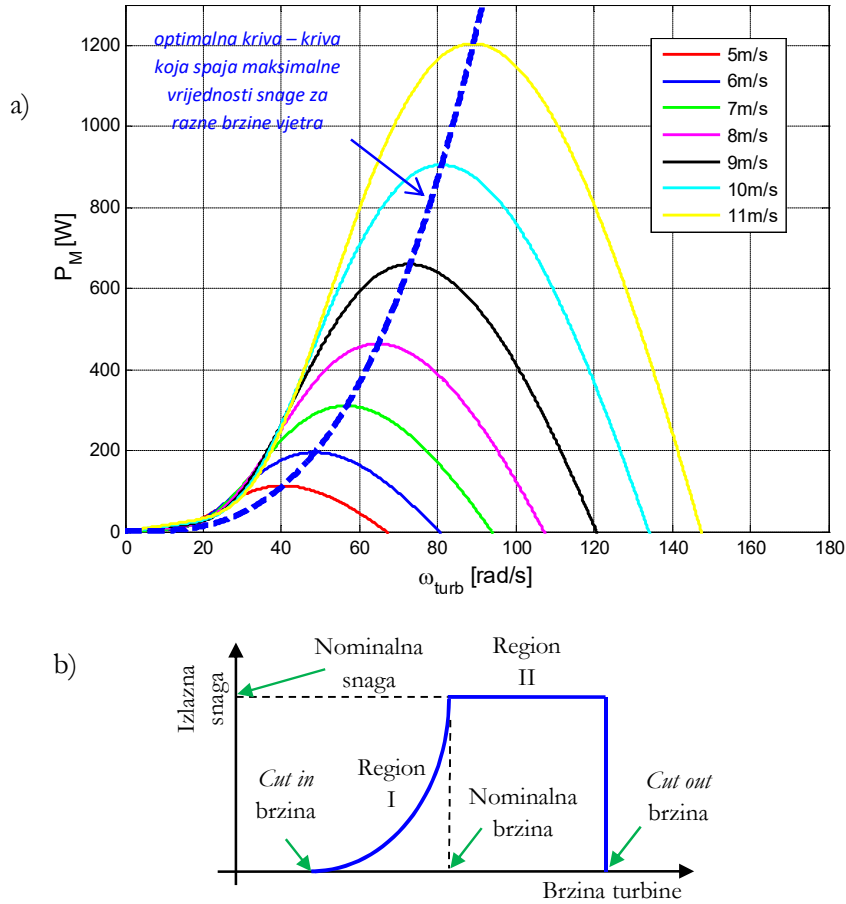
$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_{turb}}{v_w} \quad (5-7)$$

gdje je ω_{turb} ugaona brzina turbine [rad/s]. Treba napomenuti da se osim (5-6) i drugi matematički izrazi za koeficijent C_p mogu naći u literaturi [136].

Kod vjetrogeneratorskih sistema proizvedena aktivna energija (snaga) direktno zavisi od koeficijenta snage C_p . Za svaku vrijednost brzine vjetra postoji tačno određena vrijednost brzine turbine pri kojoj je snaga koju turbina može da proizvede maksimalna. Izlazna snaga turbine, poluprečnika rotora 1m, u funkciji brzine turbine, za razne brzine vjetra i zajedno sa krivom koja spaja maksimalne vrijednosti snage za te brzine vjetra, prikazana je na slici 5.9a.

Kontrola brzine i snage kod vjetrogeneratorskih sistema analizirana je u mnogim radovima (na primjer [71-72]). Ispod nominalne brzine turbine (Region I na slici 5.9b), izlazna snaga turbine se kontroliše u cilju njene maksimizacije za razne vrijednosti brzine

vjetra. Sa druge strane, za brzine turbine veće od nominalne brzine izlazna snaga se održava na konstantnoj, nominalnoj, vrijednosti (Region II sa slike 5.9b).

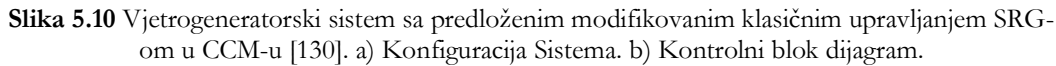


Slika 5.9 Karakteristike vjetroturbine. (a) Izlazna snaga turbine u funkciji brzine turbine za razne brzine vjetra. (b) Izlazna snaga turbine u funkciji brzine turbine.

Turbina se isključuje i diskonektuje sa energetskeg sistema ako je brzina turbine manja od minimalne brzine rada (engl. *cut-in turbine speed*) ili je veća od maksimalne moguće brzine turbine (engl. *cut-out turbine speed*). Za brzine turbine veće od nominalne vrijednosti vrši se aktiviranje kontrolera ugla zakretanja lopatica (engl. *pitch angle controller*) u cilju kontrole izlazne snage.

5.4.2 Blok dijagram predloženog vjetrogeneratorskog sistema

Konfiguracija predloženog vjetrogeneratorskog sistema sa SRG-om za rad u CCM-u prikazana je na slici 5.10a, dok je njen kontrolni blok dijagram prikazan na slici 5.10b.



Kontrola izlazne snage predloženog vjetrogeneratorskog sistema sa SRG-om se bazira na mjerenju pozicije rotora i brzine vjetra. Mjerenjem pozicije rotora i njenim diferenciranjem određuje se brzina obrtanja rotora, na osnovu koje se definišu vrijednosti kontrolnih uglova, shodno (5-2). Sa druge strane, na osnovu brzine vjetra proračunava se optimalna brzina turbine pri kojoj je izlazna snaga turbine maksimalna.

Električna snaga SRG-a se reguliše promjenom napona međukola V_{dc_mk} i promjenom kontrolnih uglova, kao što je objašnjeno u Potpoglavlju 5.3 (vidi sliku 5.8). Napon međukola V_{dc_mk} se dobija sa DC strane potrošača, koristeći DC/DC pretvarač. DC/DC pretvarač treba da radi u dvokvadrantnom režimu rada [137]. Naime, u procesu startovanja, tok struje je od strane potrošača (V_{dc_potr}) ka DC naponu V_{dc_mk} , što obezbjeđuje pobuđivanje generatora. U toku normalnog režima rada SRG se samopobuđuje i generiše električnu snagu ka potrošaču. Za regulaciju rada DC/DC pretvarača koristi se PWM kontroler, čiji su ulazni signali referentna $V_{dc_mk}^*$ i stvarna V_{dc_mk} vrijednost napona međukola.

U cilju proračunavanja referentne vrijednosti napona međukola $V_{dc_mk}^*$ koristi se informacija o referentnoj vrijednosti mehaničke snage P_{meh}^* i brzine obrtanja n , shodno (5-4), kao što slijedi:

$$V_{dc_mk}^* = \sqrt{\frac{P_{meh}^*}{a + b \cdot n}}. \quad (5-8)$$

U cilju obezbjeđivanja sigurnog rada vjetrogeneratorskog sistema u Regionu I, (vidi Sliku 5.9b), odabrana je sljedeća zavisnost referentne vrijednosti mehaničke snage P_{meh}^* u funkciji brzine obrtanja turbine:

$$P_{meh}^* = k_1 \cdot \omega_{turb} + k_2 \quad (5-9)$$

Koeficijenti k_1 i k_2 su odabrani tako da referentna mehanička snaga turbine (5-9), prolazi kroz optimalnu tačku N_O mehaničke karakteristike turbine (slika 5.11). Naime, optimalna tačka N_O je jedina zajednička tačka prave (5-9) i krive (5-5).

Koeficijent k_1 se računa tako da bude ispunjen uslov

$$k_1 = \max \left(\frac{\partial P_M(\omega_{turb}, v_w)}{\partial \omega_{turb}} \right), \quad (5-10)$$

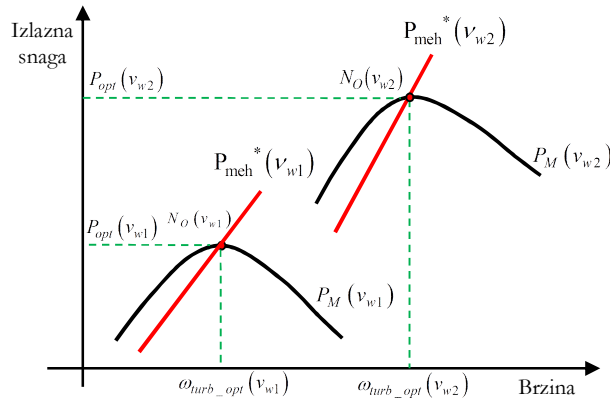
kako bi se obezbijedilo da prava (5-9) i kriva (5-5) imaju samo jednu zajedničku tačku i da prava (5-9) ima minimalan nagib u odnosu na krivu (5-5). Analitički izraz za k_1 se nalazi iz

uslova $\frac{\partial^2 P_M(\omega_{turb}, v_w)}{\partial \omega_{turb}^2} = 0$ i ima sljedeći oblik:

$$k_1 = 0.5 \cdot \rho \cdot \pi R^2 \cdot v_w^3 \cdot C_{pk1}. \quad (5-11)$$

gdje je:

$$C_{pk1} = \left[\frac{c_1 c_2 c_5 \frac{R}{v_w} \times e^{\frac{0.035 c_5}{\beta^3 + 1}}}{\frac{R}{v_w} \omega_{k1} + 0.08 \beta} - \frac{R}{v_w} c_1 \times e^{\frac{0.035 c_5}{\beta^3 + 1}} \times \left(c_2 + c_5 \times \left(\frac{0.035 c_2}{\beta^3 + 1} + c_3 \beta + c_4 \right) \right) \right] \times \frac{e^{\frac{c_5}{\frac{R}{v_w} \omega_{k1} + 0.08 \beta}}}{\left(\frac{R}{v_w} \omega_{k1} + 0.08 \beta \right)^2} + \frac{R}{v_w}.$$



Slika 5.11 Definisanje referentne vrijednosti mehaničke snage (P_{meh*}).

Analitički izraz za ω_{k1} je:

$$\omega_{k1} = \frac{\left(\frac{b_\omega - \sqrt{b_\omega^2 - 4a_\omega c_\omega}}{2a_\omega} - 0.08\beta \right)}{\frac{R}{v_w}}, \quad (5-12)$$

gdje je

$$\begin{aligned}
 a_{\omega} &= 2c_1 \left(\frac{R}{v_w} \right)^2 \times \exp \left(\frac{0.035c_5}{\beta^3 + 1} \right) \times \left(c_2 + c_5 \left(\frac{0.035c_2}{\beta^3 + 1} + c_3\beta + c_4 \right) \right), \\
 b_{\omega} &= \frac{R}{v_w} \left(3c_1c_2c_5 \frac{R}{v_w} \times \exp \left(\frac{0.035c_5}{\beta^3 + 1} \right), \right. \\
 &\quad \left. + c_1c_5 \frac{R}{v_w} \times \exp \left(\frac{0.035c_5}{\beta^3 + 1} \right) \times \left(c_2 + c_5 \times \left(\frac{0.035c_2}{\beta^3 + 1} + c_3\beta + c_4 \right) \right) \right), \\
 c_{\omega} &= c_1c_2c_5^2 \left(\frac{R}{v_w} \right)^2 \times \exp \left(\frac{0.035c_5}{\beta^3 + 1} \right).
 \end{aligned}$$

Koeficijent k_2 se računa kao

$$k_2 = P_{opt} - k_1 \cdot \omega_{turb_opt}, \quad (5-13)$$

gdje je

$$P_{opt} = \max(P_M), \quad (5-14)$$

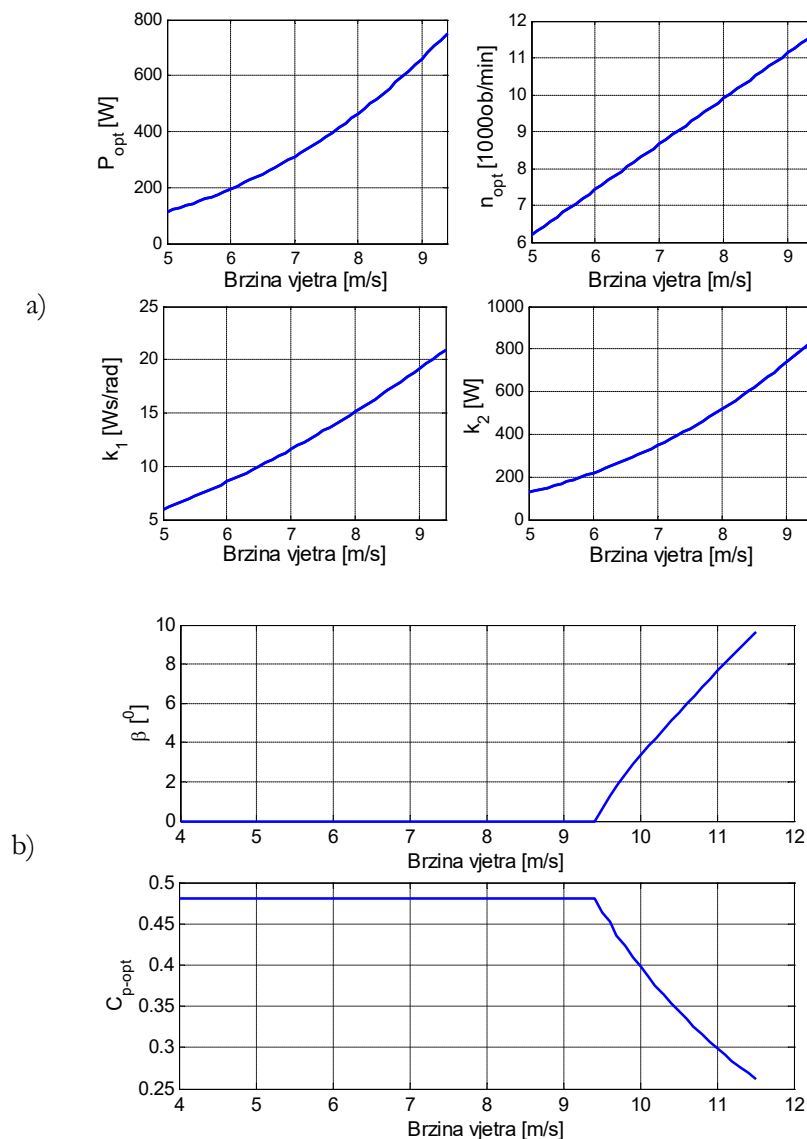
dok se ω_{turb_opt} izračunava iz uslova $\frac{\partial P_M(\omega_{turb}, v_w)}{\partial \omega_{turb}} = 0$. Za koeficijent k_2 ne postoji analitički izraz, pa se mora numerički određivati.

Na ovaj način odabrane vrijednosti koeficijenata k_1 i k_2 obezbjeđuju, prije svega, stabilnost vjetrogeneratorskog sistema. Osim toga, obezbjeđuju da referentna vrijednost mehaničke snage uvijek uslovljava promjenu napona faze (napona međukola) tako da se generator ubrzava ili usporava, ali uvijek ka optimalnoj vrijednosti brzine obrtanja, a samim tim i optimalnoj vrijednosti snage turbine. Na taj način postiže se veoma brzo i sigurno praćenje maksimalne snage turbine. Zbog toga, ovakav način definisanja referentne vrijednosti mehaničke snage obezbjeđuje MPPT (engl. *maximum power point tracking*) regulaciju, ali bez upotrebe velikog broja senzora, dodatnih petlji regulacije ili komplikovane upravljačke regulacije kao klasični MPPT regulatori [138]. Potrebno je naglasiti i da bi svaka druga odabrana vrijednost koeficijenta k_1 uzrokovala da generator uspostavi ustaljeno stanje u nekoj neoptimalnoj tački, ili bi uslovila nagla usporenja

$$k_1 < \max \left(\frac{\partial P_M(\omega_{turb}, v_w)}{\partial \omega_{turb}} \right) \quad \text{ili} \quad \text{nagla ubrzanja} \quad k_1 > \max \left(\frac{\partial P_M(\omega_{turb}, v_w)}{\partial \omega_{turb}} \right) \quad \text{cjelokupnog}$$

vjetrogeneratorskog sistema.

Vrijednosti koeficijenata k_1 i k_2 se mijenjaju u zavisnosti od vrijednosti brzine vjetra, shodno jednačinama (5-10)-(5-14). Za posmatranu vjetroturbinu, čija je karakteristika prikazana na slici 5.9a, zavisnosti P_{opt} , n_{opt} , k_1 i k_2 u funkciji brzine vjetra prikazane su na slici 5.12a.



Slika 5.12 a) Proračunate zavisnosti P_{opt} , n_{opt} , k_1 i k_2 u funkciji brzine vjetra.
b) Zavisnost ugla β i optimalna vrijednost koeficijenta snage C_p u funkciji brzine vjetra.

Za brzine turbine manje od optimalne vrijednosti za određenu brzinu vjetra, referentna vrijednost mehaničke snage i trenutna mehanička snaga generatora su manjih vrijednosti od trenutne snage turbine, pa će turbina da se ubrza. Međutim, ako je brzina

turbine veća od optimalne vrijednosti, turbine će da se uspori, pošto je referentna vrijednost mehaničke snage, a i mehanička snaga generatora, veća od trenutne vrijednosti snage turbine.

Ako je brzina obrtanja turbine veća od nominalne vrijednosti, potrebno je zarotirati lopatice (vršiti regulaciju ugla zakretanja lopatica) u cilju limitiranja snage koja se “uzima” od vjetra (Region II sa slike 5.9b). Treba napomenuti da se ugao zakretanja lopatica ne može podešavati trenutno, već sa određenim kašnjenjem [138]. Zahtijevana promjena ugla zakretanja lopatica β , koja limitira mehaničku snagu turbine na nominalnu vrijednost (za SRM čiji su podaci dati u Tabeli 5-1 vrijednost te snage je 800W), kao i odgovarajuća optimalna vrijednost C_p u funkciji brzine vjetra, prikazana je na slici 5.12b. Za brzine vjetra manje od nominalne vrijednosti (za posmatranu turbine sa slike 5.9a njena vrijednost je $v_{w_nom}=9.4\text{m/s}$), ugao zakretanja lopatica je nula, dok je optimalna vrijednost koeficijenta $C_p=0.48$. Sa druge strane, za brzine vjetra veće od nominalne vrijednosti, ugao zakretanja lopatica raste, dok se optimalna vrijednost koeficijenta C_p smanjuje sa povećanjem brzine vjetra.

5.4.3 Analiza stabilnosti predloženog vjetrogeneratorskog sistema u slučaju promjene otpornosti namotaja faze SRG-a

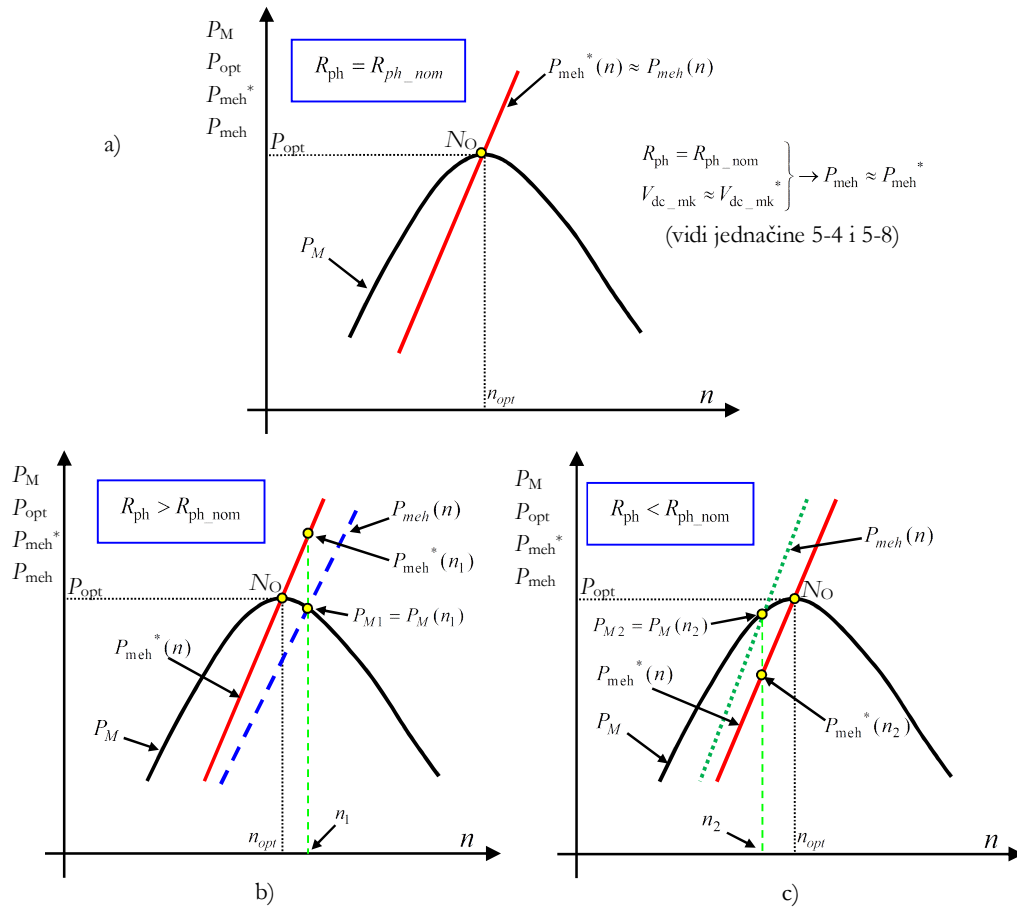
U cilju ispitivanja stabilnosti rada SRG-a u predloženom vjetrogeneratorskom sistemu, neophodno je analizirati i uticaj promjene otpornosti namotaja faza. Naime, tokom rada SRG-a, varijacije otpornosti namotaja faza, izazvane, prije svega, promjenom temperature, mogu dostići i do 30% nominalne vrijednosti [139].

Ako se, zbog jednostavnosti, pretpostavi da je brzina vjetra konstantna, tada je, u slučaju nominalne vrijednosti otpornosti namotaja faze, trenutna brzina obrtanja generatora jednaka optimalnoj brzini n_{opt} . Shodno tome, mehanička snaga generatora će biti jednaka optimalnoj vrijednosti tj. $P_{meh}=P_{opt}$ (Slika 5.13a - tačka N_O). Izlazna (električna) snaga generatora će takođe biti optimalna.

Ako se otpornost faze poveća, fazna struja, kao i mehanička snaga generatora (P_{meh}) i elektromagnetni moment ($M=P_{meh}/\omega$), će se smanjiti. Posmatrajući momentu jednačinu generatora

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{turb}} - M = \frac{P_M - P_{\text{meh}}}{\omega}, \quad (5-15)$$

jasno je da će se generator ubrzati. Povećanje brzine će usloviti povećanje snage P_{meh}^* (vidi (5-9)), a takođe i povećanje referentne vrijednosti napona napajanja $V_{\text{dc_mk}}^*$ (vidi (5-8)). Međutim, P_{meh} neće idealno pratiti P_{meh}^* , jer koeficijenti a i b u (5-8) odgovaraju nominalnoj otpornosti faze. Karakteristika $P_{\text{meh}}(n)$ će biti ispod karakteristike $P_{\text{meh}}^*(n)$, kao što je prikazano na slici 5.13b. U ustaljenom režimu, brzina obrtanja n_1 će biti veća od n_{opt} , referentna snaga $P_{\text{meh}}^*(n_1)$ će biti veća od P_{opt} , ali $P_{\text{meh}}(n_1)$ i snaga turbine $P_{M1} = P_M(n_1)$ će biti nešto manjih vrijednosti od P_{opt} .



Slika 5.13 Mehanička snaga i brzina u slučaju kada je otpornost namotaja faze a) Jednaka nominalnoj vrijednosti, b) Veća od nominalne vrijednosti i c) Manja od nominalne vrijednosti.

S druge strane, smanjenje otpornosti faze će dovesti do povećanje struje i , samim tim, do povećanje snage generatora (P_{meh}) i momenta ($M = P_{\text{meh}}/\omega$). Kao posledica toga, brzina će se smanjiti (vidi (5-15)). Smanjenje brzine će izazvati smanjenje snage P_{meh}^* (vidi

(5-9)) i napona $V_{dc_mk}^*$ (vidi (5-8)). U ovom slučaju, karakteristika $P_{meh}(n)$ će biti iznad karakteristike $P_{meh}^*(n)$ (slika 5.13c). Prema tome, vrijednost brzine n_2 , u ustaljenom stanju, će biti manja od n_{opt} , dok će referentna vrijednost mehaničke snage $P_{meh}^*(n_2)$ biti manja od P_{opt} . Isto tako, $P_{meh}(n_2)$ i snaga turbine $P_{M2}=P_{M2}(n_2)$ će biti malo manjih vrijednosti od P_{opt} .

Na kraju, može se zaključiti da za nominalnu vrijednost otpornosti namotaja faze generator obezbjeđuje maksimalnu izlaznu snagu. Međutim, promjena otpornosti namotaja faze izaziva malu razliku između referentne (P_{meh}^*) i razvijene mehaničke snage P_{meh} . Kao posledica toga stvarna brzina turbine, u ustaljenom stanju, neće biti jednaka optimalnoj, dok će stvarne P_{meh} i P_M biti malo manjih vrijednosti od P_{opt} . Da bi se obezbijedila optimalna snaga u svim uslovima, parametre a i b , definisane u (5-8), treba mijenjati u funkciji temperature namotaja faze.

5.4.4 Simulacioni rezultati

U cilju potvrde ispravnosti i efikasnosti rada predloženog vjetrogeneratorskog sistema sa SRG-om izvršene su brojne računarske simulacije. U simulacijama je korišćen matematički model vjetra opisan u [136, 140]. Prema ovom modelu, brzina vjetra se aproksimira kao superpozicija srednje brzine vjetra $\bar{v}_w$ i K sinusoidalnih komponenti koje imaju amplitudu A_i , frekvenciju ω_{v_i} i proizvoljnu fazu φ_{v_i} :

$$v_w(t) = \bar{v}_w + \sum_{i=0}^K A_i \cos(\omega_{v_i} t + \varphi_{v_i}). \quad (5-16)$$

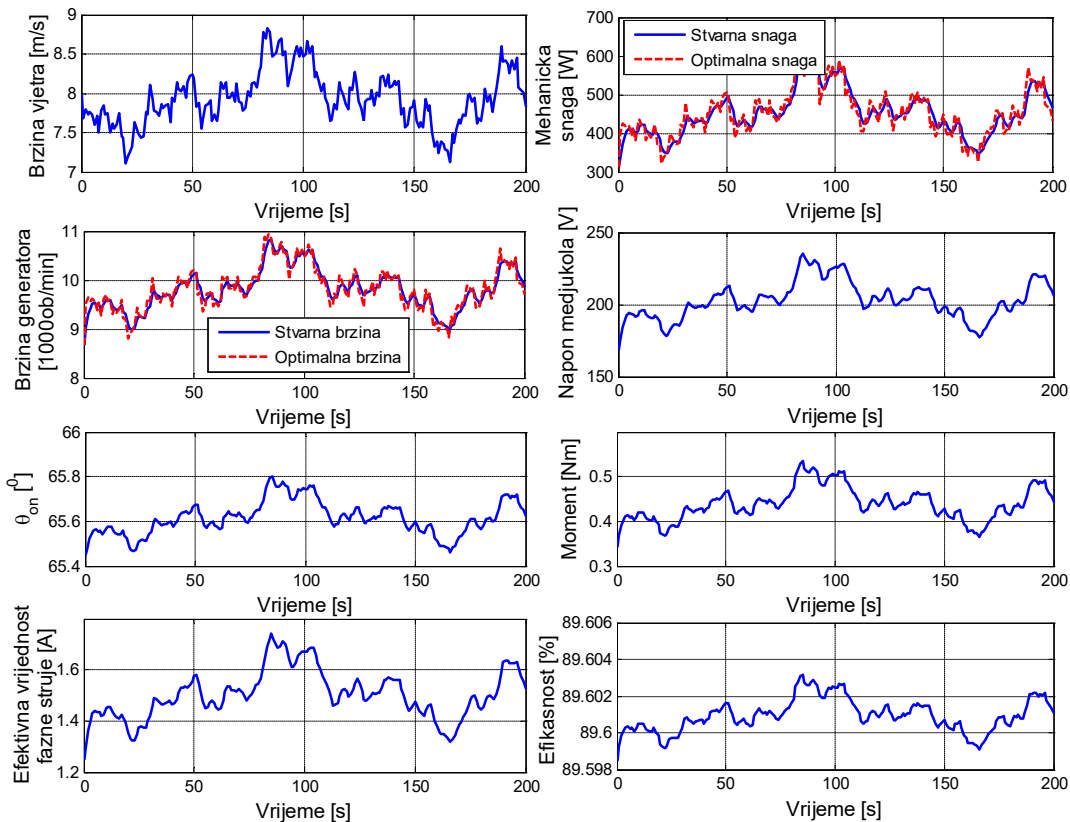
Amplitude A_i određuju se koristeći *von Karman*-ov spektar [140] kao što slijedi:

$$A_i(\omega_{v_i}) = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [S_{vv}(\omega_{v_i}) + S_{vv}(\omega_{v_i+1})] \cdot [\omega_{v_i+1} - \omega_{v_i}]}$$

$$S_{vv}(\omega_{v_i}) = \frac{0.475 \sigma^2 \left(\frac{L_u}{\bar{v}_w} \right)}{\left(1 + \left(\omega_{v_i} \frac{L_u}{\bar{v}_w} \right)^2 \right)^{\frac{5}{6}}} \quad (5-17)$$

gdje σ predstavlja intenzitet turbulencije vjetra, L_u dužinu turbulencije i $S_{vv}(\omega)$ spektralnu gustinu snage vjetra. Konkretno, vrijednosti koeficijenata σ , L_u i frekvencija ω_i mogu se naći u [140].

Pošto CCM režim korišćenog SRG-a počinje pri brzinama obrtanja većim od 7000 ob/min (slika 5.4), u simulacijama je pretpostavljena upotreba mjenjačke kutije prenosnog odnosa 1:16. U praksi, mjenjačke kutije sa velikim prenosnim odnosom se takođe veoma često koriste [141]. Međutim, prenosni odnos mjenjačkih kutija se može značajno smanjiti upotrebom drugačijih SRM konfiguracija, za koje CCM počinje pri manjim brzinama obrtanja. Na primjer, za 1.2kW 6/8 SRM, koji je korišćen u [64-65], kontinualni režim struje počinje pri brzini od 1400 ob/min.

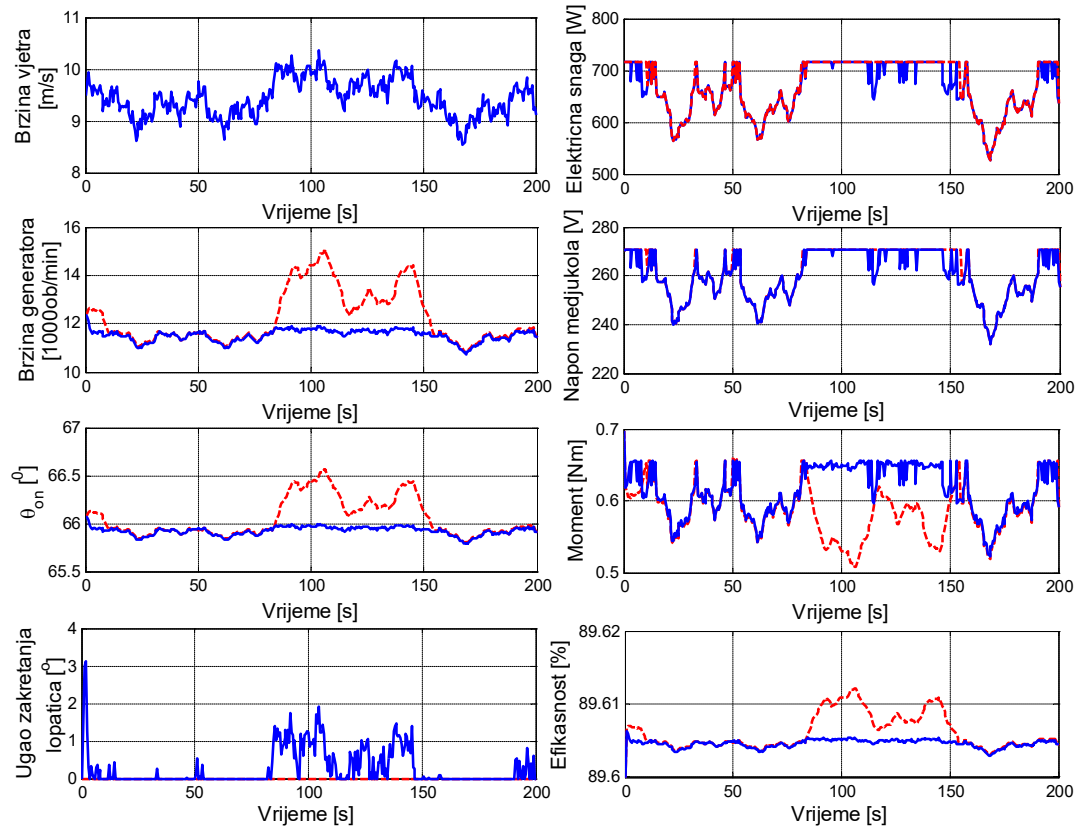


Slika 5.14 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I dobijeni primjenom predloženog modifikovanog klasičnog upravljanja.

Za rad turbine u Regionu I, simulacioni rezultati brzine vjetra, brzine generatora, napona međukola, efektivne vrijednosti fazne struje, ugla uključenja, mehaničke snage, momenta i efikasnosti SRG-a prikazani su na slici 5.14. Na istoj slici prikazane su i optimalna brzina rotora i optimalna vrijednost ulazne mehaničke snage. Sa ove slike se jasno vidi da brzina obrtanja generatora i ulazna snaga veoma dobro prate optimalnu brzinu i optimalnu snagu. Takođe, jasno se vidi visoka efikasnost SRG-a (oko 89.6%). U

razmatranom slučaju ugao zakretanja lopatica je jednak nuli pošto je mehanička snaga manja od nominalne mehaničke snage turbine. Takođe, vrijednost napona međukola i efektivna vrijednost struje su manje od njihovih nominalnih vrijednosti.

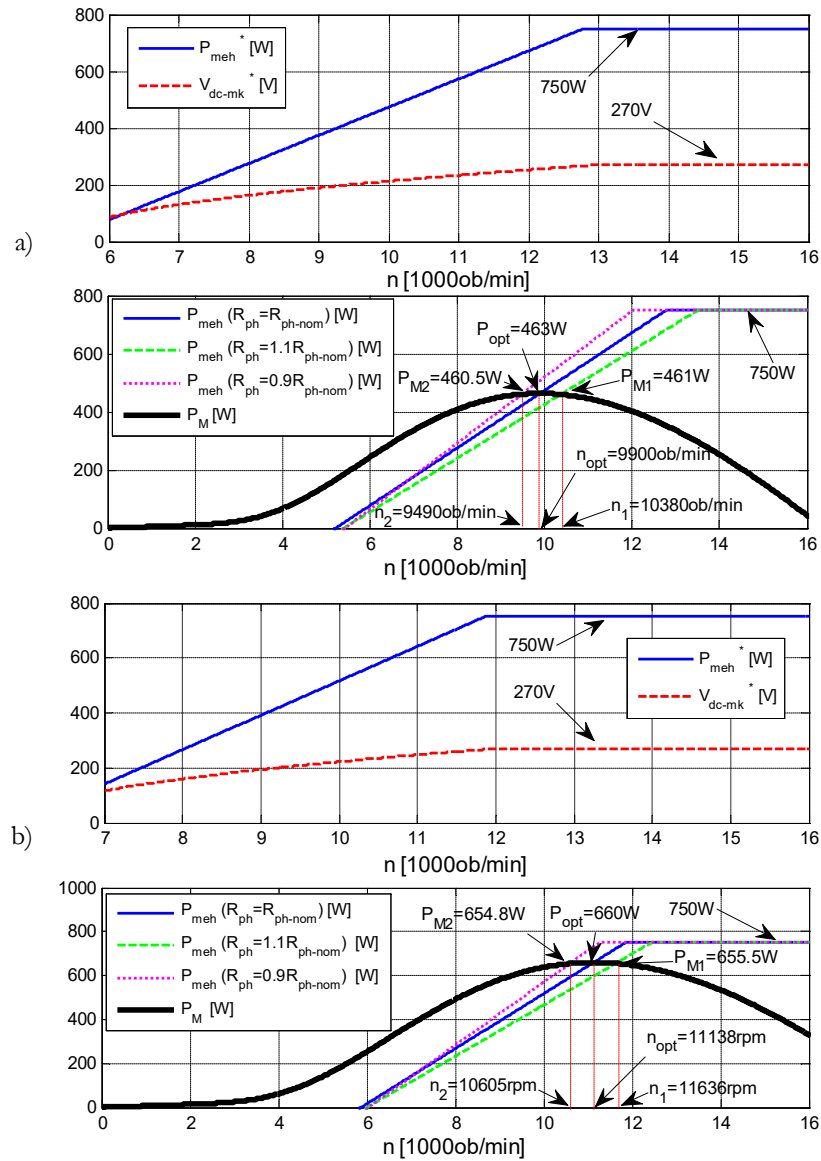
Simulacioni rezultati za rad turbine u Regionu II prikazani su na slici 5.15. Na ovoj slici su prikazani rezultati sa i bez regulacije ugla zakretanja lopatica. U simulaciji je iskorišćen regulator zakretanja ugla lopatica opisan u [142], čija je maksimalna brzina zakretanja lopatica $3^\circ/\text{s}$.



Slika 5.15 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, dobijeni primjenom predloženog modifikovanog klasičnog upravljanja.

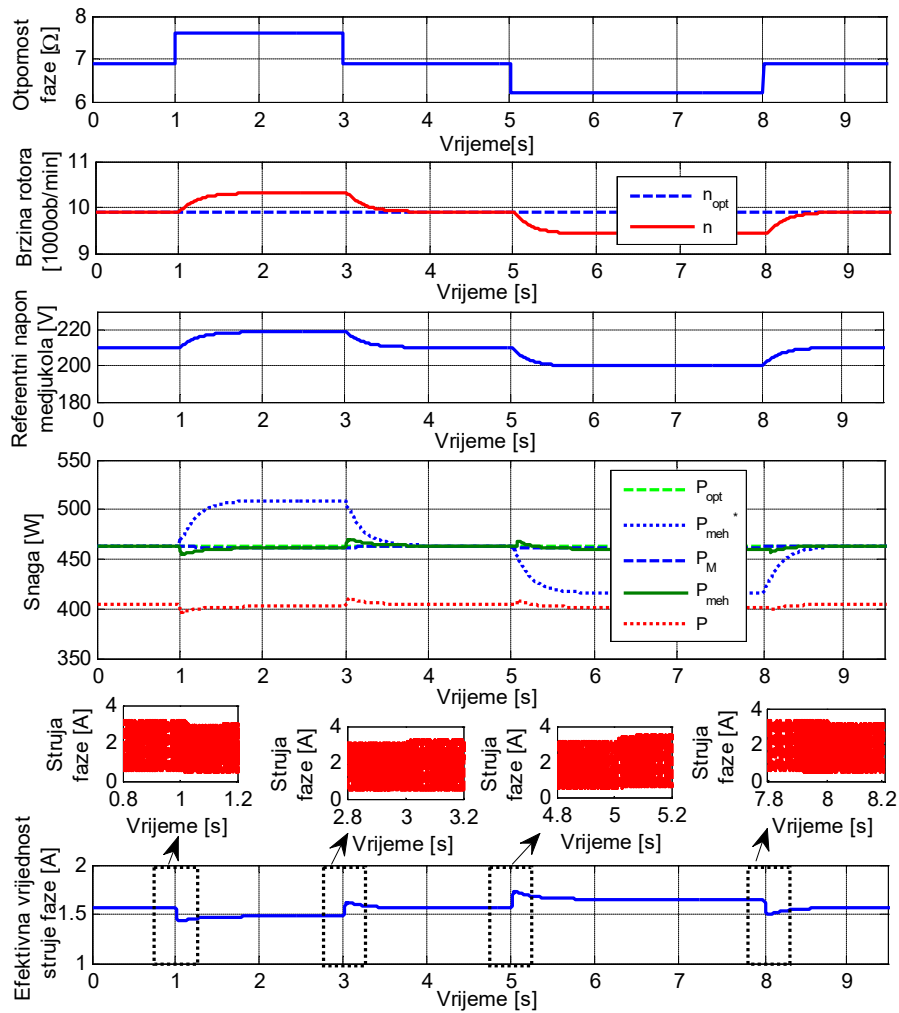
Kao što se i očekivalo, varijacije brzine generatora su manje ako se koristi regulator ugla zakretanja lopatica. U posmatranom slučaju, maksimalna vrijednost ugla zakretanja lopatica je 3.1° , dok je maksimalna brzina promjene ugla zakretanja lopatica $1.2^\circ/\text{s}$, što je značajno manje od maksimalno dozvoljene promjene ugla zakretanja korišćenog regulatora.

U slučaju da se ne vrši regulacija ugla zakretanja lopatica, varijacije brzine generatora su velike (u posmatranom slučaju iznose oko 45% nominalne brzine generatora). Kao posledica toga, varijacije kontrolnih uglova i momenta generatora su veće nego u slučaju kada se vrši regulacija ugla zakretanja. Međutim, efikasnost SRG-a je nešto veća u slučaju kada se ne vrši regulacija ugla zakretanja lopatica jer je efikasnost SRG-a veća pri većim brzinama obrtanja (slika 4.9). Ako je brzina obrtanja generatora veća od nominalne vrijednosti, izlazna (električna) snaga generatora je konstantna, dok su vrijednosti napona međukola i efektivne vrijednosti fazne struje nominalne.



Slika 5.16 Uticaj povećanja i smanjenja otpornosti namotaja faze na $P_{meh} - n$ karakteristike, za a) $v_w=8\text{m/s}$ i b) $v_w=9\text{m/s}$.

U cilju potvrde stabilnosti predloženog vjetrogeneratorskog sistema u slučaju promjene otpornosti namotaja faze najprije je analiziran uticaj smanjenja i povećanja otpornosti faze na mehaničke karakteristike generatora. Naime, za brzine vjetra (v_w) od 8m/s i 9m/s formirane su referentna snaga – brzina karakteristike ($P_{meh}^*(n)$), kao i referentni napon - brzina karakteristike ($V_{dc_mk}^*(n)$). Nakon toga, uzimajući u obzir formirane $V_{dc_mk}^*(n)$ karakteristike, a znajući da napon međukola veoma brzo prati referentnu vrijednost ($V_{dc_mk} \approx V_{dc_mk}^*$) [137], formirane su i odgovarajuće mehanička snaga - brzina karakteristike ($P_{meh}(n)$), za otpornosti faze $0.9R_{ph_nom}$ i $1.1R_{ph_nom}$ i za obje razmatrane brzine vjetra. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 5.16.



Slika 5.17 Dinamički odziv vjetrogeneratorskog sistema izazvan trenutnim promjenama otpornosti namotaja faze ($v_w=8m/s$).

Dobijeni rezultati za otpornost faza od $1.1R_{ph_nom}$ (Slika 5.16) pokazuju da je brzina rotora u ustaljenom stanju, za razmatrane brzine vjetra od 8m/s i 9m/s, 4.8% i 4.4% veća u odnosu na optimalne vrijednosti brzine rotora, respektivno. Međutim, mehanička snaga generatora, za brzine vjetra od 8m/s i 9m/s, je samo 0.43% i 0.68% manja od P_{opt} , respektivno. Slično, razlike između optimalne i stvarne brzine obrtanja rotora, kao i između optimalne i stvarne mehaničke snage, u stacionarnom stanju, su veoma male za otpornost faze od $0.9R_{ph_nom}$. Samim tim, može se zaključiti da promjena otpornosti faze izaziva veoma male razlike između optimalne i stvarne mehaničke snage.

Rezultati simulacija dinamičkog odziva sistema ($I_{c\bar{p}}$, i , n , $V_{dc_mk}^*$, P_{meh}^* , P_M , P , P_{opt} i P_{meh}), pri trenutnoj promjeni otpornosti faze, a pri konstantnoj brzini vjetra od 8m/s, prikazani su slici 5.17. U ovoj simulaciji, otpornost faza je promijenjena sa početne R_{ph_nom} na $1.1R_{ph_nom}$ posle 1s, a onda nakon 3s na R_{ph_nom} , nakon 5s na $0.9 \cdot R_{ph_nom}$, i, konačno, posle 8s, ponovo na vrijednost R_{ph_nom} . Rezultati dinamičkog odziva su u potpunosti u skladu sa rezultatima prikazanim na slici 5.16. Prema tome, prikazani rezultati potvrđuju stabilnost vjetrogeneratorskog sistema, čak i u slučaju iznenadnih i velikih promjena otpornosti namotaja faze.

POGLAVLJE 6

Novi metod upravljanja SRG-om u CCM-u bez upotrebe senzora pozicije

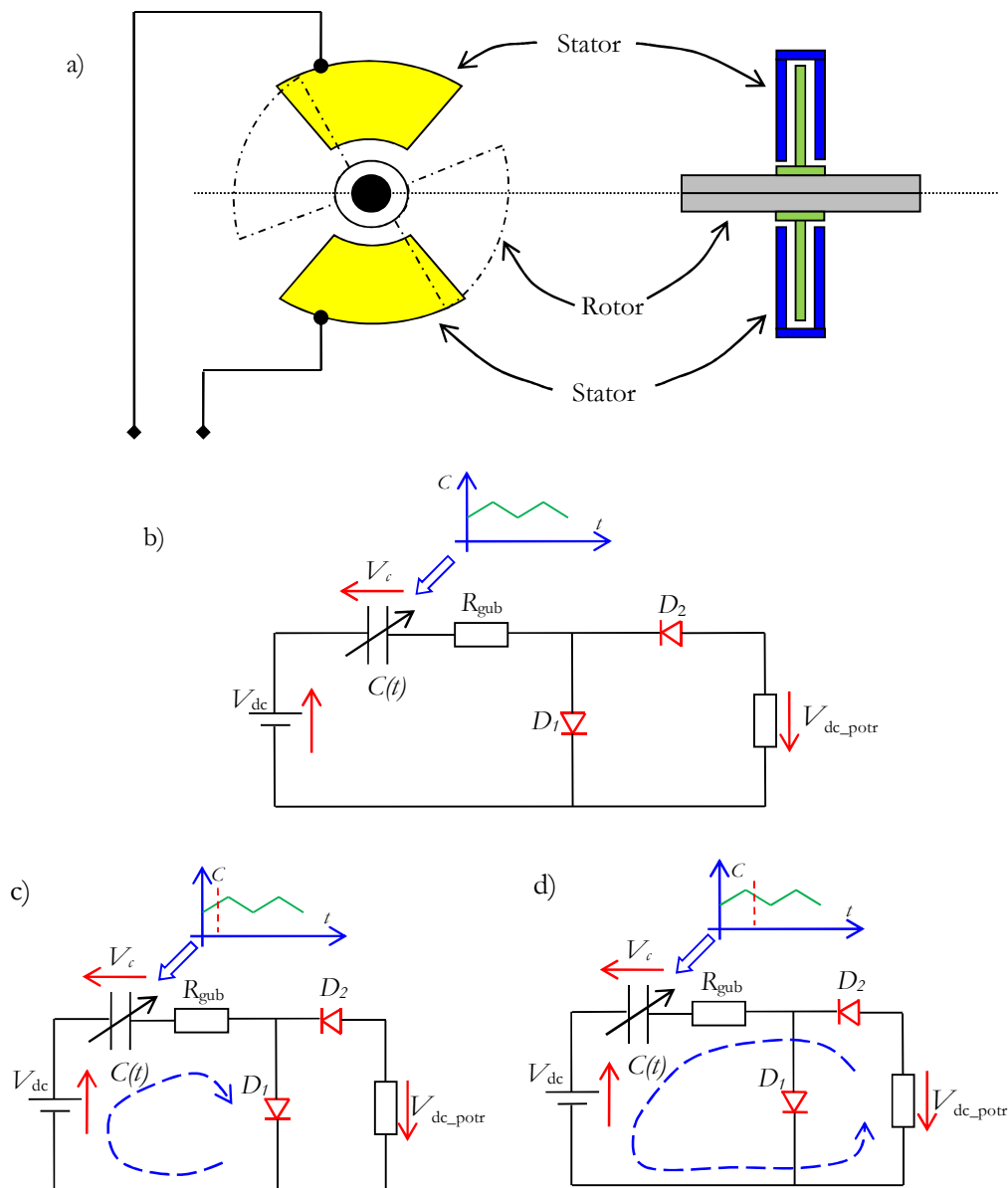
U ovom poglavlju predložen je novi metod upravljanja SRG-om u CCM-u bez upotrebe senzora pozicije (bezsenzorsko upravljanje). Realizacija predloženog metoda može se ostvariti na dva načina: koristeći klasični pretvarač i strujni kontroler ili koristeći nove energetske pretvarače. Svi predloženi načini realizacije bezsenzorskog upravljanja detaljno su opisani i međusobno upoređeni sa stanovišta optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a. Takođe, predložene su i primjene predloženih metoda za bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u u vjetrogeneratorskom sistemu.

6.1 Osnova novog metoda za bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u

Kao što je i u Potpoglavlju 1.11 naglašeno, glavni nedostatak metoda upravljanja koji se baziraju na informaciji o poziciji rotora jeste u tome što osim mjerenja (estimacije) pozicije rotora zahtijevaju i dodatne regulacione petlje. Razlog tome jeste u činjenici da mala promjena kontrolnih uglova uzrokuje velike promjene u vrijednosti fazne struje [64-65]. Samim tim, široka upotreba i jeftina implementacija SRM-a, u različitim električnim pogonima, sa postojećim metodama upravljanja je ograničena.

U ovom poglavlju je predstavljena nova metoda bezsenzorskog upravljanja SRG-om kod koje se ne zahtijeva informacija o poziciji rotora. Ideja novog načina realizacije bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u proistekla je iz [131]. Naime, u ovom radu autori razmatraju primjenu *Variable-Capacitance* (V-C) mašine (slika 6.1a) u sistemima *off-shore* vjetroelektrana, prema šemi povezivanja sa potrošačem prikazanoj na slici 6.1b.

Predložena šema povezivanja V-C generatora i potrošača (slika 6.1b) koncipirana je tako da u periodu kada kapacitivnost generatora raste (slika 6.1c) generator apsorbira energiju, tj. naelektrisanje (od naponskog izvora koji je vezan redno sa generatorom, a koji ima funkciju pobude), dok u periodu kada kapacitivnost generatora opada (slika 6.1d) generator proizvodi električnu energiju koju predaje potrošaču, zatim pokriva gubitke i vraća prethodno uzetu energiju pobudi [131-135].



Slika 6.1 a) V-C generator [131]. b) Šema povezivanja V-C generatora sa potrošačem.
c) Pobuđivanje V-C generatora. d) Napajanje potrošača V-C generatora.

U [131] autori kroz simulacije i eksperimente analiziraju rad ove mašine kada napaja potrošač konstantne otpornosti. Osim toga, autori analiziraju mogućnost upotrebe energetskog filtra u cilju povećanja snage potrošača. Pošto ova mašina može da radi sa izuzetno velikim naponima, autori smatraju da bi se ovi generatori kada rade u *off-shore* vjetroelektranama mogli direktno povezati na visokonaponske energetske sisteme jednosmjerne struje (engl. *High Voltage Direct Current* - HVDC), jer je njihova efikasnost veća, a dimenzije manje nego u slučaju kada se koriste klasični naizmjenični generatori u kombinaciji sa transformatorom i ispravljačem.

V-C generator i SRG imaju jednu veoma važnu sličnost. Okretanjem rotora V-C generatora mijenja se kapacitivnost kondenzatora kojeg čine ploče statora i rotora, dok se kod SRG-a u zavisnosti od položaja rotora u odnosu na stator mijenja induktivnost faze. Zbog toga, šema povezivanja V-C generatora i potrošača (slika 6.1b) predstavlja ideju vodilju za razvoj nove bezsenzorske metode upravljanja SRG-om u CCM-u.

6.2 Novi metod bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u

Osnovni princip bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u može se objasniti posmatrajući kolo prikazano na slici 6.2a, a koje je analogno šemi povezivanja V-C generatora i potrošača (slika 6.1a). Prema ovoj šemi povezivanja, krajevi faze su spojeni paralelno sa DC strujnim generatorom (pobudnim izvorom) koji omogućava kontinualan tok struje kroz fazu mašine, a samim tim i rad SRG-a u CCM-u [129].

Zanemarujući otpornost faze, trenutna vrijednost faznog napona SRG-a se može napisati u sljedećem obliku:

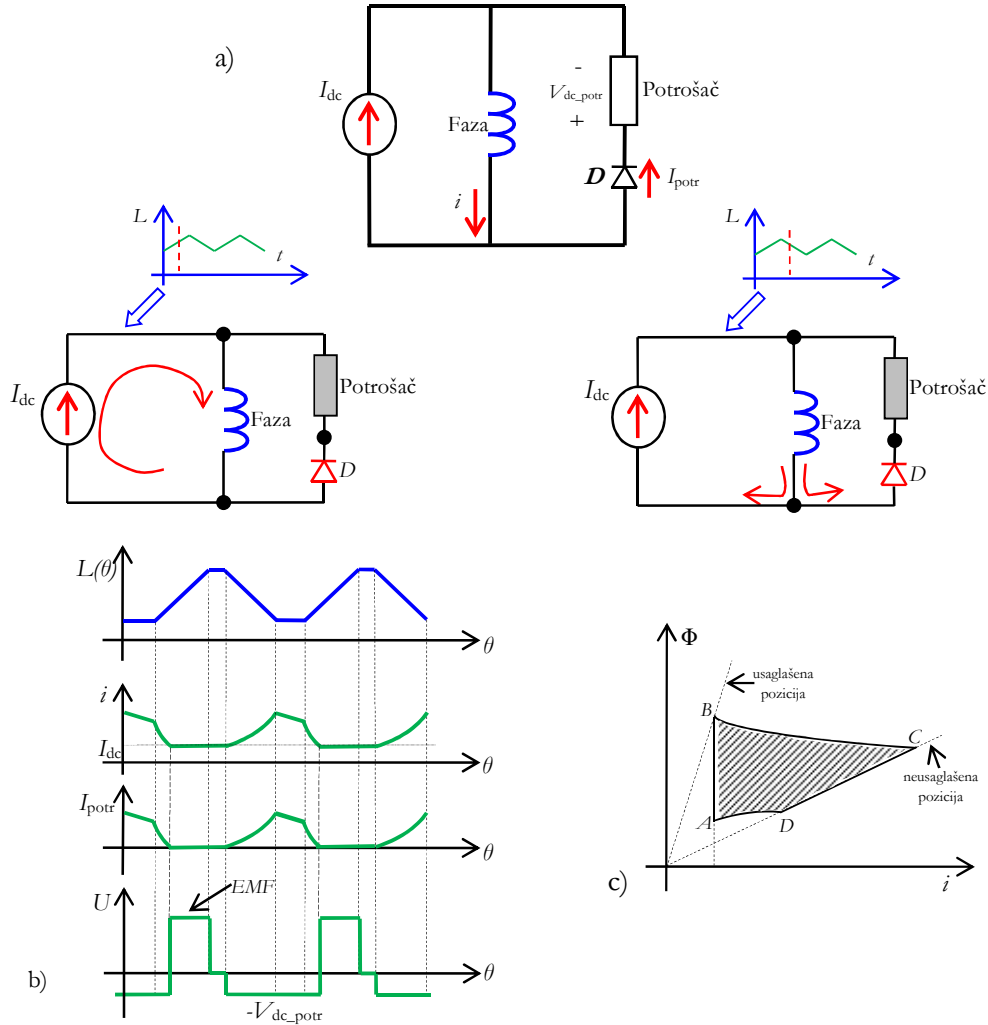
$$U = L \frac{\partial i}{\partial t} + i \cdot \omega \frac{\partial L}{\partial \theta}, \quad (6-1)$$

gdje je i fazna struja, $L=L(i, \theta)$ induktivnost faze i ω ugaona brzina rotora. Ako se, zbog prostije analize, zanemari efekat zasićenja, induktivnost L zavisi samo od pozicije rotora, tj. $L=L(\theta)$.

Struja potrošača I_{potr} uvijek ima pozitivnu vrijednost i jednaka je razlici struje faze i i struje strujnog generatora I_{dc} :

$$I_{\text{potr}} = i - I_{\text{dc}} \quad (6-2)$$

Talasni oblici fazne struje, struje potrošača i faznog napona, za idealizovan oblik induktivnosti, prikazani su na slici 6.2b. Podrazumijevano je da je napon potrošača V_{dc_potr} konstantan, dok je brzina ω dovoljno velika da obezbjeđuje da je EMF veća od vrijednosti napona V_{dc_potr} . Odgovarajuća fluks-struja petlja prikazana je na slici 6.2c.



Slika 6.2 Objašnjenje novog bezsenzorskog metoda upravljanja SRG-om [129]. a) Prosto kolo. b) Talasni oblici idealizovane induktivnosti, fazne struje, struje potrošača i napona potrošača. c) Obuhvatna fluks – struja petlja.

U početnom dijelu intervala u kome induktivnost raste, EMF brzo smanjuje vrijednost fazne struje do vrijednosti struje strujnog generatora. Nakon toga, dioda D je inverzno polarisana, pa je struja potrošača jednaka nuli. Posmatrajući (6-1), može se zaključiti da je fazni napon jednak EMF, pošto je struja faze i konstantna ($di/dt = 0$). Ako se posmatra fluks-struja petlja sa slike 6.2c, radna tačka se pomjera od radne tačke A do radne tačke B .

U toku kratkog intervala u kome je induktivnost konstantna i jednaka induktivnosti u usaglašenoj poziciji ($L=L_{al}$), EMF i fazni napon su jednaki nuli, pa radna tačka ostaje u tački B .

Kada induktivnost faze opada, EMF mijenja znak, pa, kao posledica toga, struja faze raste. Pošto dio struje faze protiče kroz potrošač, napon na fazi je $-V_{dc_potr}$. Fluks-struja radna tačka se pomjera iz radne tačke B u radnu tačku C . Nakon toga, u toku intervala kada je vrijednost induktivnosti minimalna (induktivnost pri neusaglašenoj poziciji), radna tačka se pomjera iz radne tačke C u tačku D (EMF je jednaka nuli, ali struja faze i opada jer je $U=-V_{dc_potr}$). Na početku sljedećeg intervala (početak rasta induktivnosti), fazna struja i brzo opada do vrijednosti struje strujnog generator I_{dc} pa se radna tačka pomjera iz radne tačke D u radnu tačku A .

Energija koja je predata potrošaču srazmjerna je površini fluks-struja petlje (šrafirana površina sa slike 6.2c). Prema tome, rad SRG-a u CCM-u je omogućen bez upotrebe senzora pozicije i bez upotrebe tehnika za estimaciju pozicije rotora.

Srednja snaga potrošača P_{potr} jednaka je sumi srednje snage SRG-a P_i i srednje snage DC strujnog izvora P_{dc} :

$$P_{potr} = P_{dc} + P \quad (6-3)$$

Ako je struja strujnog izvora I_{dc} konstantna, snaga P_{dc} je proporcionalna srednjoj vrijednosti napona faze $U_{srednje}$ u toku jednog perioda T :

$$P_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I_{dc} dt = I_{dc} \cdot U_{srednje} \quad (6-4)$$

U ustaljenom stanju, napon $U_{srednje}$ je jednak nuli pošto je promjena fluksa u toku jednog ciklusa jednaka nuli. Prema tome, na osnovu (6-4) snaga strujnog izvora koja se predaje potrošaču je jednaka nuli, pa je na osnovu (6-3):

$$P_{potr} = P \quad (6-5)$$

Isto tako, ako je napon potrošača V_{dc_potr} konstantan, snaga P_{potr} se može napisati u obliku:

$$P_{\text{potr}} = I_{\text{potr-sr}} \cdot V_{\text{dc_potr}} \quad (6-6)$$

Prema tome, na osnovu (6-5) i (6-6) snaga SRG-a i snaga potrošača su proporcionalne srednjoj vrijednosti struje potrošača $I_{\text{potr-sr}}$, a koja se može kontrolisati preko struje strujnog izvora I_{dc} . Za datu brzinu ω i napon potrošača $V_{\text{dc_potr}}$, snaga SRG-a raste sa porastom struje strujnog izvora I_{dc} , kao što pokazuje sljedeća analiza. Naime, porast struje strujnog izvora I_{dc} za vrijednost ΔI_{dc} uslovljava porast fluksa u radnoj tački B ($\Delta \Phi_B = L_{\text{al}} \Delta I_{\text{dc}}$). Pošto je interval u kome se radna tačka pomjera iz radne tačke B u radnu tačku C približno konstantan, povećanje fluksa u radnoj tački C će biti jednako povećanju fluksa u radnoj tački B , tj. $\Delta \Phi_C = L_{\text{un}} \Delta I_C = \Delta \Phi_B$. Prema tome, porast fazne struje je:

$$\Delta I_{\text{porast}} = \Delta I_C = \Delta I_{\text{dc}} \cdot \frac{L_{\text{al}}}{L_{\text{un}}} \quad (6-7)$$

Samim tim, na osnovu (6-7) i (6-2) porast struje potrošača $\Delta I_{\text{potr_porast}}$ je:

$$\Delta I_{\text{potr_porast}} = \Delta I_{\text{porast}} - \Delta I_{\text{dc}} = \Delta I_{\text{dc}} \cdot \left(\frac{L_{\text{al}}}{L_{\text{un}}} - 1 \right) \quad (6-8)$$

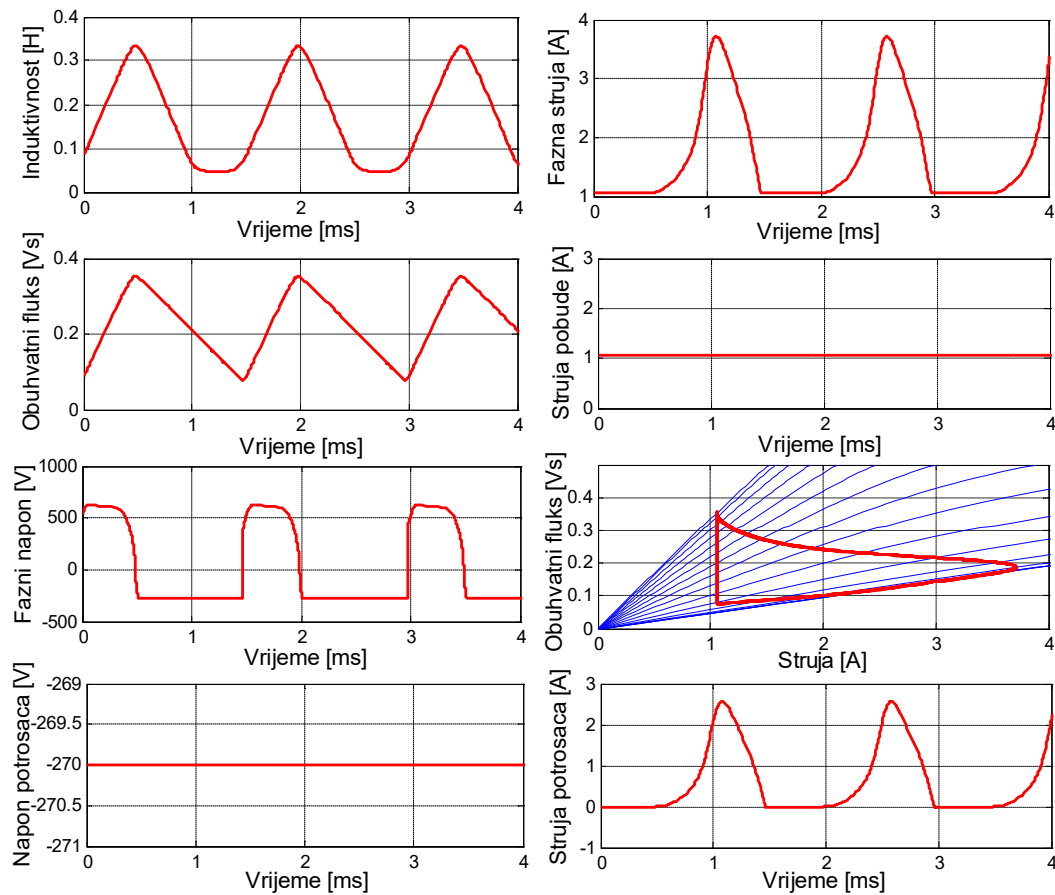
Jednačine (6-7) i (6-8) pokazuju da amplitude struje faze i struje potrošača rastu sa povećanjem struje I_{dc} . Porast struje I_{dc} takođe rezultira i porastom EMF u toku magnetizacije, u toku koga se radna tačka pomjera iz tačke A u tačku B . Prema tome, sa porastom struje I_{dc} napon magnetizacije raste, dok je napon demagnetizacije konstantan (jednak naponu potrošača). Sa druge strane, uslov $U_{\text{srednje}} = 0$ uslovljava i rast vremenskog intervala demagnetizacije ($B-C-D-A$ interval). Kao rezultat toga, promjena fluksa ($\Delta \Phi_{BA} = \Phi_B - \Phi_A$), kao i vremenski interval trajanja struje potrošača u toku jednog ciklusa, takođe raste. Na kraju, povećanje amplitude potrošača, kao i povećanje vremenskog intervala trajanja struje potrošača u toku jednog ciklusa, uslovljava povećanje srednje vrijednosti struje $I_{\text{potr-sr}}$. Isto tako, površina fluks-struja petlje je proširena povećanjem amplitude struje potrošača.

Na kraju, bitno je napomenuti da je vrijednost snage koja se može dobiti ovim načinom povezivanja faze generatora i potrošača veoma mala. Glavni razlog za to jeste činjenica da vrijednost napona faze u toku pobuđivanja generatora dostiže izuzetno velike

vrijednosti i pri malim vrijednostima struje pobude. Pošto je, osim struje faze, izuzetno bitna i vrijednost napona faze generatora, limitirajući napon faze u toku pobuđivanja limitira se i vrijednost snage potrošača.

U svrhu simulacionog ispitivanja rada SRG-a u programskom paketu MATLAB/Simulink realizovan je model SRG-a baziran na jednačinama *Vujičić*-evog nelinearnog modela SRM-a (PRILOG C, Slike P-C.1 – P-C.4).

Talasni oblici induktivnosti, obuhvatnog fluksa, napona faze, struje faze, struje pobude, kao i fluks-struja petlja SRG-a pri radu sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje SRG-om (slika 6.2a), pri brzini od 10000ob/min, naponu potrošača od 270V i efektivnoj vrijednosti struje 2A, prikazani su na slici 6.3. Simulacije su izvršene za SRG čiji su parametri dati u Tabeli 2.1. Na osnovu talasnog oblika napona faze vidi se da u toku rasta induktivnosti napon na fazi dostiže i nekoliko puta veću vrijednost od nominalne vrijednosti napona generatora (270V).



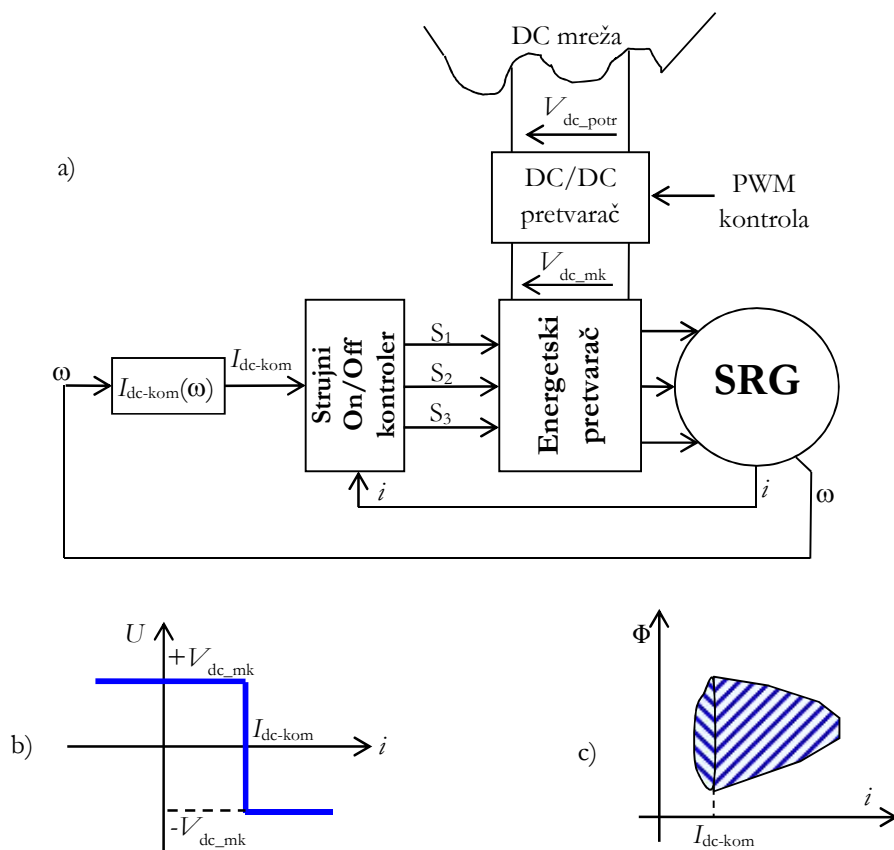
Slika 6.3 Rezultati simulacije rada SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{dc}=1.05\text{A}$, $V_{dc_potr}=270\text{V}$).

6.3 Upotreba klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera za realizaciju novog metoda bezsenzorskog upravljanje SRG-om u CCM-u

Klasični pretvarač, prikazan na slici 3.1, može se koristiti za implementaciju predloženog bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u. U zavisnosti od toga da li se koristi On/Off ili histerezisni kontroler struje, moguće je realizovati CCM - On/Off - CC (*Continuous Conduction Mode – On/Off - Current Control*) [129] ili CCM - Hist - CC (*Continuous Conduction Mode – Hysteresis - Current Control*).

6.3.1 CCM - On/Off - CC metod upravljanja SRG-om

Kontrolni blok dijagram SRG-a sa CCM - On/Off - CC metodom upravljanja prikazan je na slici 6.4a.



Slika 6.4 Bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u koristeći On/Off strujni kontroler [129].

a) Blok dijagram. b) On/Off upravljanje. c) Fluks-struja petlja.

Umjesto upotrebe DC strujnog generatora, strujni kontroler reguliše vrijednost struje oko komandne vrijednosti I_{dc-kom} . U toku intervala kada induktivnost opada, vrijednost fazne struje postaje veća od komandne vrijednosti I_{dc-kom} i oba prekidača u grani faze se isključuju (napon je negativan, slika 6.4b). Prema tome, u ovom intervalu struja faze protiče kroz diode i predaje energiju potrošaču. Sa druge strane, u toku intervala kada induktivnost raste povratna EMF smanjuje faznu struju ispod vrijednosti I_{dc-kom} i oba prekidača u grani faze se uključuju (napon je pozitivan, slika 6.4b). Prema tome, oba prekidača u odgovarajućoj grani pretvarača se isključuju ($S=0$) ili uključuju ($S=1$) u skladu sa sljedećim uslovom:

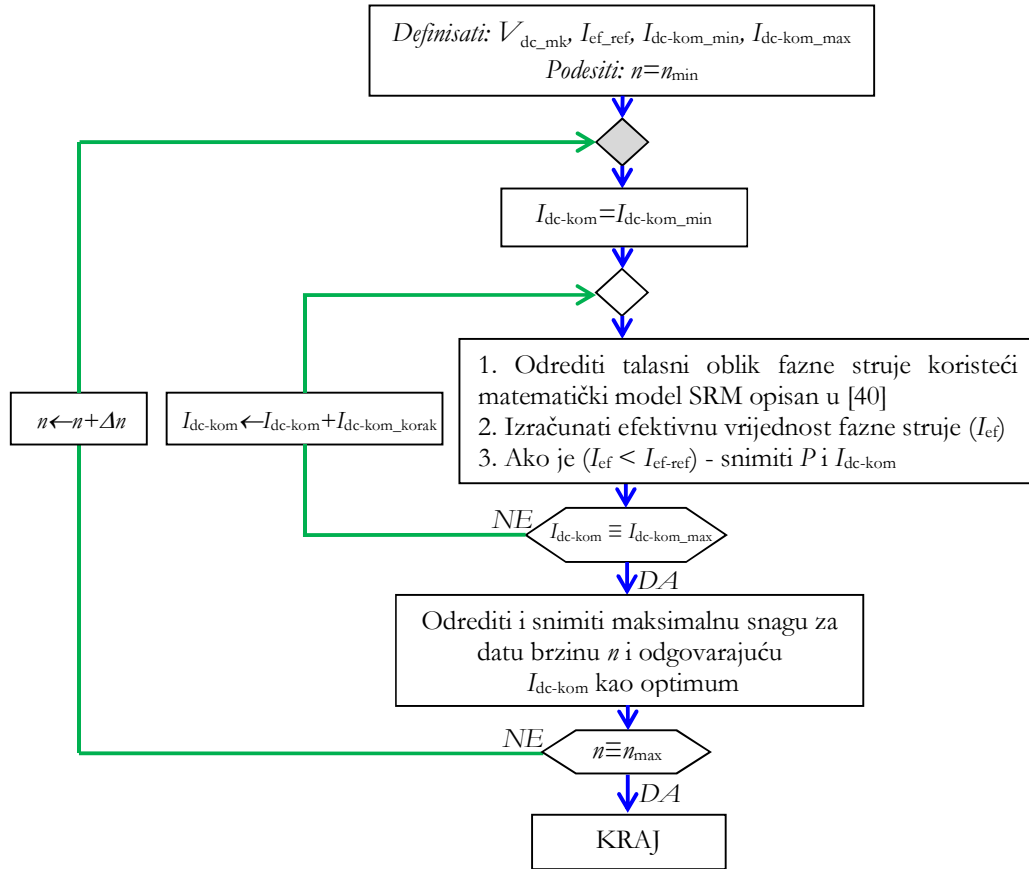
$$\begin{aligned} S &= 0, \quad \text{za } i > I_{dc-kom} \\ S &= 1, \quad \text{za } i < I_{dc-kom}. \end{aligned}$$

Na ovaj način je energetska fluks-struja petlja sa slike 6.2 proširena na oblast lijevo od prave $i=I_{dc}$, kao što je prikazano na slici 6.4c.

6.3.1.1 Postupak za utvrđivanje optimalne vrijednosti komandne struje kod CCM - On/Off - CC metoda upravljanja SRG-om

Za svaku brzinu, željena vrijednost snage se može dobiti preko odgovarajuće vrijednosti komandne struje I_{dc-kom} . Ako se zahtijeva maksimalna moguća snaga, I_{dc-kom} treba optimizovati tako da efektivna vrijednost fazne struje ne pređe definisanu referentnu vrijednost I_{ef-ref} . Algoritam za optimizaciju komandne struje I_{dc-kom} kod CCM - On/Off - CC metoda upravljanja prikazan je na slici 6.5.

Prema predloženom algoritmu, kompjuterske simulacije se vrše za određeni dijapazon brzina (n_{max} – maksimalna brzina, n_{min} – minimalna brzina, Δn – korak promjene brzine). Za svaku od definisanih brzina vrši se varijacija komandne vrijednosti struje I_{dc-kom} između minimalne I_{dc-kom_min} i maksimalne vrijednosti I_{dc-kom_max} , sa odgovarajućim korakom I_{dc-kom_korak} . U svakoj iteraciji se određuje vrijednost električne snage, vrijednost momenta, kao i efektivna vrijednost fazne struje (I_{ef}). Za svaku brzinu obrtanja u toku ovoga optimizacionog postupka određuje se optimalna vrijednost komandne struje koja omogućava maksimalnu električnu snagu za uzeto I_{ef-ref} . Na taj način, za poznate parametre mašine, određeni napon jednosmjernog međukola (V_{dc_mk}), unaprijed definisani dijapazon brzina i referentnu efektivnu vrijednost struje dobijaju se optimalne karakteristike SRG-a.

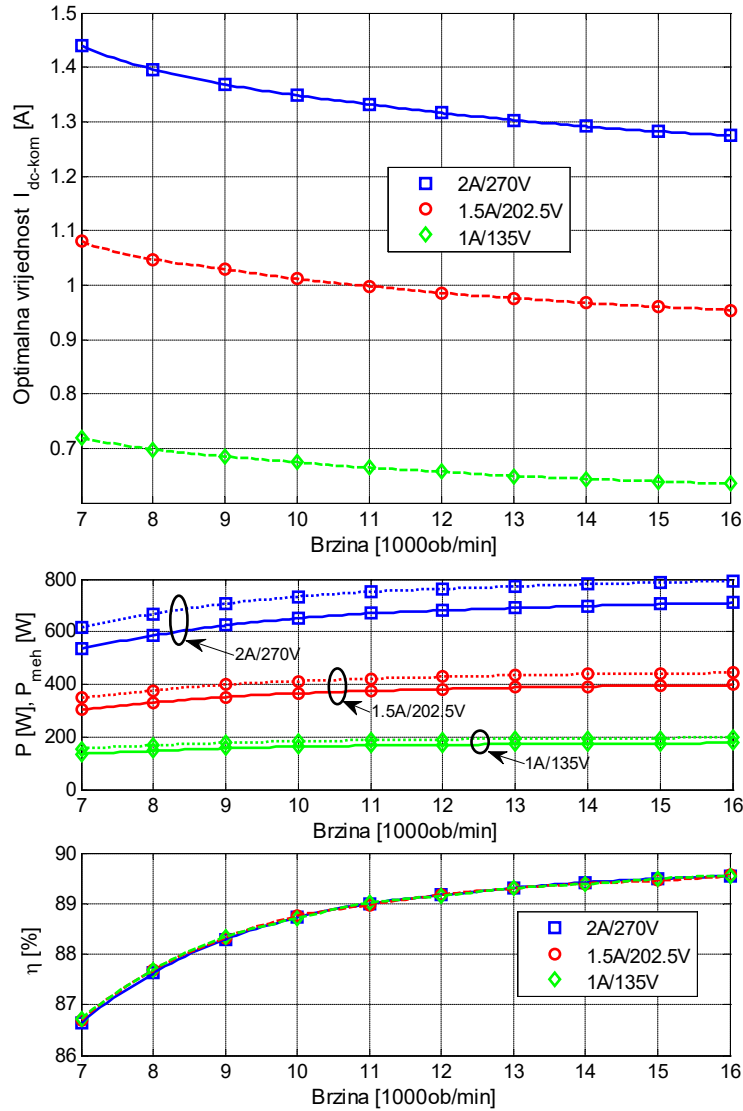


Slika 6.5 Algoritam za optimizaciju komandne struje I_{dc} kod CCM - On/Off - CC metoda upravljanja SRG-om.

6.3.1.2 Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa CCM - On/Off - CC metodom upravljanja

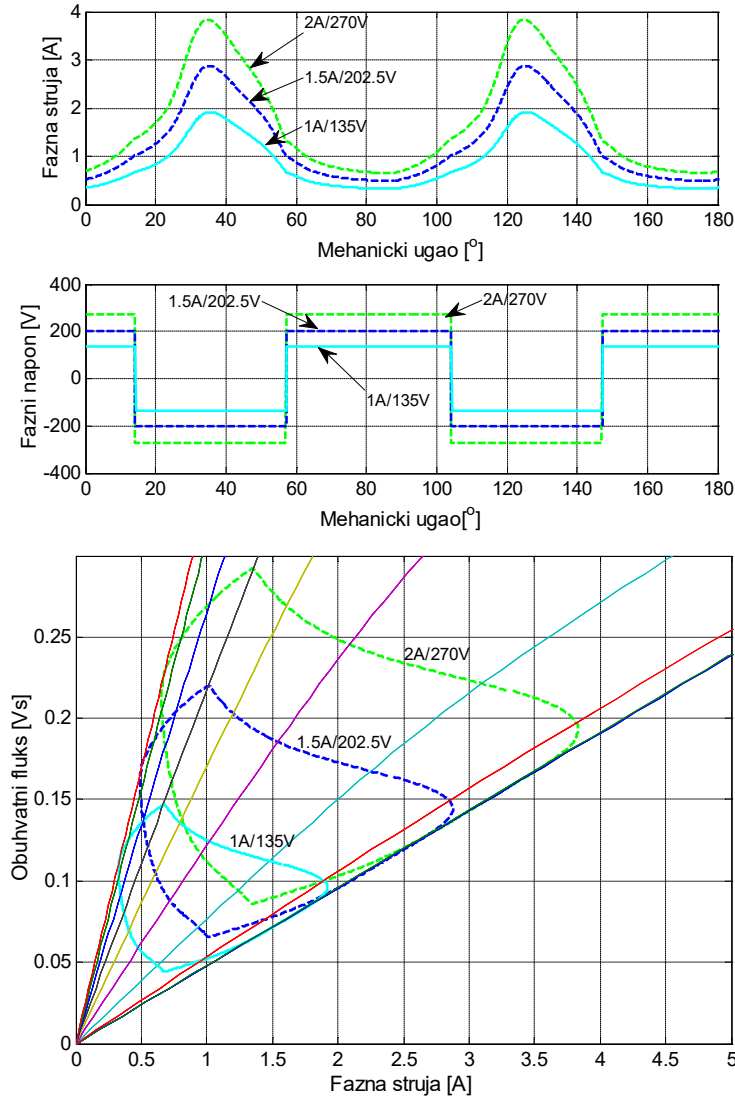
Predloženi optimizacioni postupak (slika 6.5) može se primijeniti za bilo koju vrijednost napona međukola i za bilo koju komandnu vrijednost struje.

Optimalne zavisnosti komandne struje I_{dc-kom} u funkciji brzine obrtanja kod CCM - On/Off - CC metoda upravljanja SRG-om, za razne efektivne vrijednosti fazne struje i faznog napona, prikazane su na slici 6.6, kao i u PRILOGU C, u Tabelama P-C.1 – P-C.3. Na slici 6.6 prikazane su i odgovarajuće optimizovane vrijednosti mehaničke (P_{meh}), električne snage (P) i efikasnosti (η) u funkciji brzine obrtanja. Sa ove slike se vidi da je pri manjim vrijednostima brzine obrtanja potrebna veća vrijednost komandne struje. Međutim, optimizovana vrijednost komandne struje omogućava formiranje široke zone konstantne snage, kao i veliku efikasnost SRG-a.



Slika 6.6 Optimalne $I_{dc-kom} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju, a za različite vrijednosti napona V_{dc-mk} i struje I_{ef} .

Talasni oblici fazne struje i napona, kao i odgovarajuće fluks-struja petlje, pri brzini obrtanja od 10000 ob/min i optimizovanim vrijednostima struje I_{dc-kom} , kod CCM - On/Off - CC metoda upravljanja, za razne efektivne vrijednosti fazne struje i faznog napona, prikazani su na slici 6.7. Sa ove slike se vidi da su ekvivalentni uglovi uključenja i isključenja, za ovako odabrane vrijednosti napona međukola i efektivne vrijednosti struje, isti. Takođe, vidi se da minimalna i maksimalna vrijednost fluksa, u toku jednog ciklusa, nastaju pri istoj vrijednosti struje (komandnoj vrijednosti struje). Takođe, jasno se vidi da se maksimalne vrijednosti struje, za ovako odabrane V_{dc-mk} i struje I_{ef} , postižu u istoj poziciji rotora.

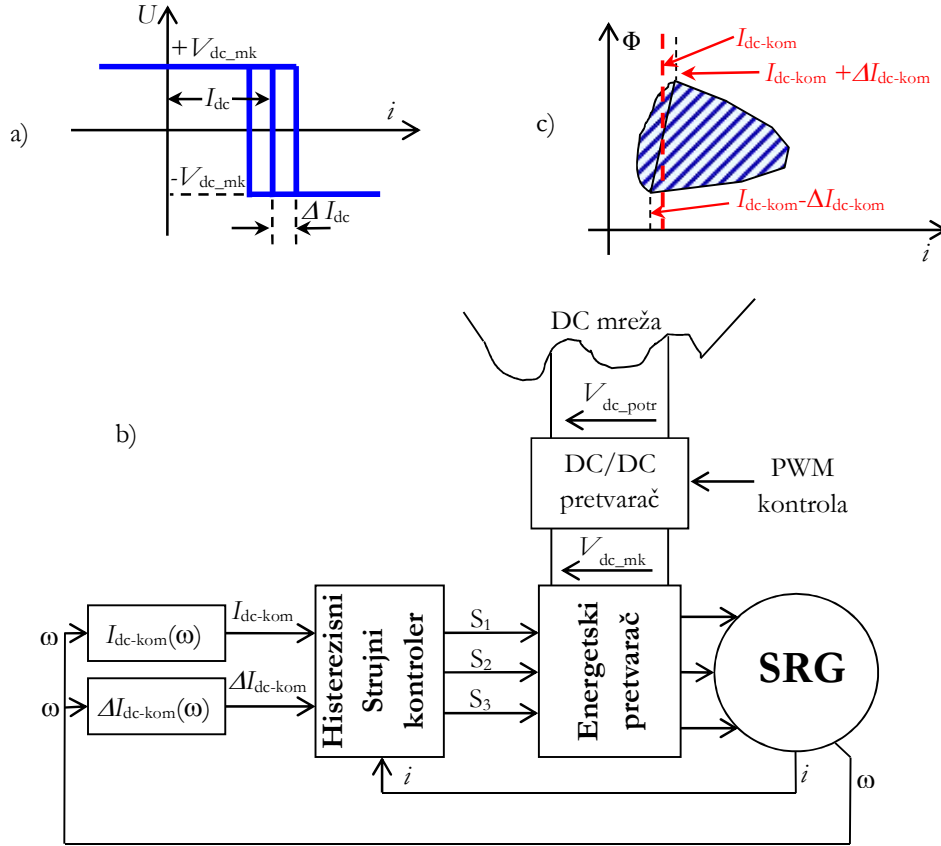


Slika 6.7 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef} ($n=10000ob/min$).

6.3.2 CCM - Hist - CC metod upravljanja SRG-om

Za razliku od On/Off metoda kontrole struje, kod histerezijsne kontrole prekidači u odgovarajućoj grani pretvaračkog mosta se isključuju ako vrijednost fazne struje postane veća od $I_{dc_kom} + \Delta I_{dc_kom}$, i, suprotno, uključuju se ako vrijednost fazne struje postane manja od $I_{dc_kom} - \Delta I_{dc_kom}$ (I_{dc_kom} predstavlja komandnu vrijednost struje, dok ΔI_{dc_kom} predstavlja širinu histerezijske kontrole). Kontrolni blok dijagram bezsenzorskog upravljanja SRG-om sa histerezijsnim kontrolerom (CCM - Hist - CC) prikazan je na slici 6.8b. Pošto intervali

magnećenja i demagnećenja ne počinju u trenutku kada je $i=I_{dc}$, ekvivalentni uglovi uključanja i isključenja su pomjereni, a što utiče i na fluks-struja petlju (slika 6.8c).



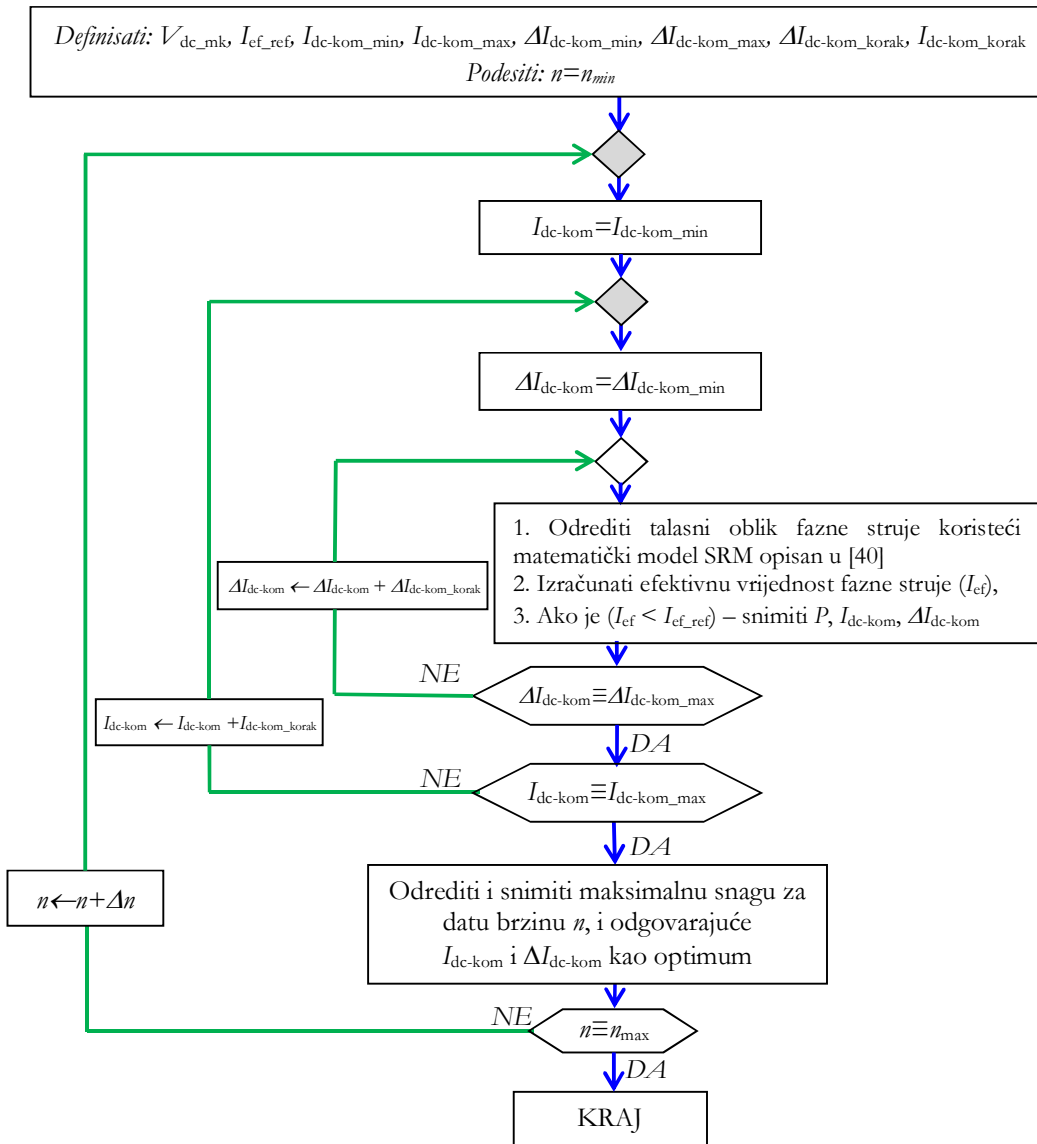
Slika 6.8 Bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u koristeći histerezisni strujni kontroler.
(a) Histerezisno upravljanje. (b) Blok dijagram. (c) Fluks struja petlja.

6.3.2.1 Postupak za utvrđivanje optimalnih vrijednosti I_{dc_kom} i ΔI_{dc_kom} kod CCM - Hist - CC metoda upravljanja SRG-om

Za svaku vrijednost brzine obrtanja, željena vrijednost snage se može dobiti preko odgovarajućih vrijednosti I_{dc_kom} i ΔI_{dc_kom} . Ako se zahtijeva maksimalna moguća snaga, I_{dc_kom} i ΔI_{dc_kom} treba optimizovati na taj način da efektivna vrijednost fazne struje ne pređe referentnu vrijednost. Algoritam za optimizaciju I_{dc_kom} i ΔI_{dc_kom} kod CCM - Hist - CC metoda upravljanja prikazan je na slici 6.9.

Prema predloženom algoritmu, kompjuterske simulacije se vrše za unaprijed definisani dijapazon brzina od n_{min} (minimalna brzina) do n_{max} (maksimalna brzina), sa korakom Δn (korak promjene brzine). Za svaku od definisanih brzina vrši se varijacija I_{dc_kom}

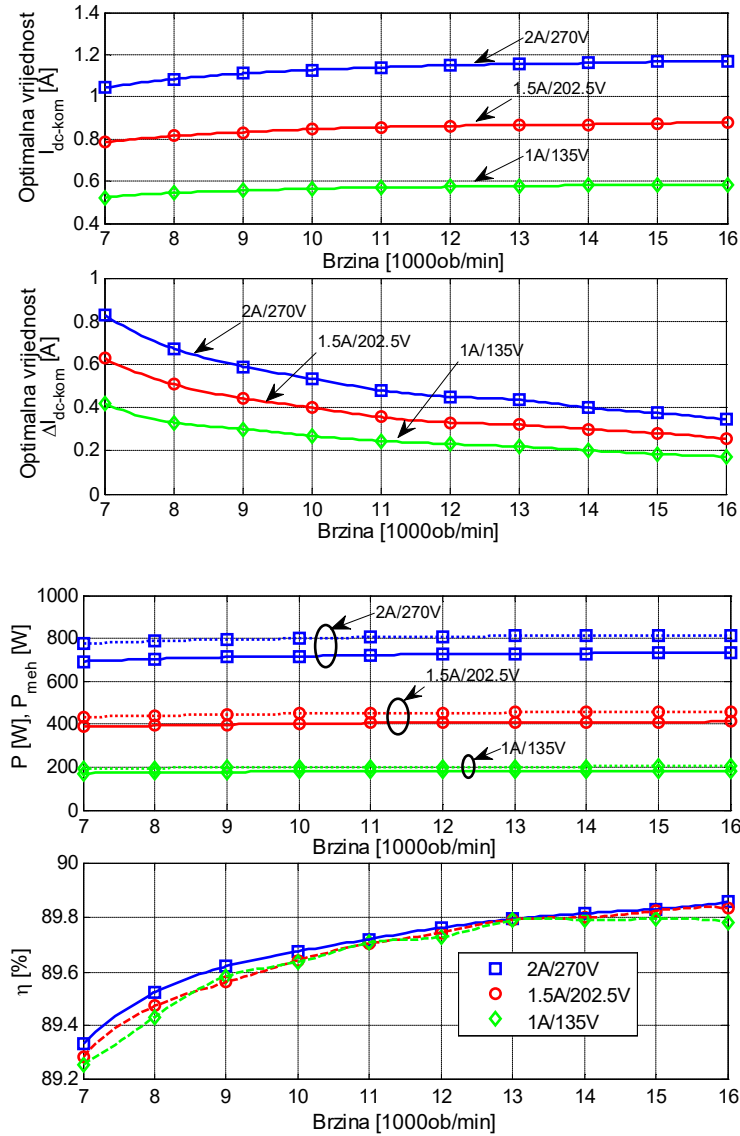
i ΔI_{dc-kom} između minimalnih I_{dc-kom_min} i ΔI_{dc-kom_min} i maksimalnih vrijednosti I_{dc-kom_max} i ΔI_{dc-kom_max} , sa odgovarajućim korakom I_{dc-kom_korak} i ΔI_{dc-kom_korak} , respektivno. U svakoj iteraciji se određuje vrijednost električne snage, vrijednost momenta, kao i efektivna vrijednost fazne struje (I_{ef}). Za svaku brzinu obrtanja u toku ovoga optimizacionog postupka određuju se optimalne vrijednosti I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} koje obezbjeđuju maksimalnu električnu snagu uz uslov da je efektivna vrijednost struje manja od referentne vrijednosti. Prema tome, za definisani dijapazon brzina, određeni napon međukola i referentnu efektivnu vrijednost struje, dobijaju se optimalne karakteristike SRG-a.



Slika 6.9 Algoritam za optimizaciju I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} kod CCM - Hist - CC metoda upravljanja SRG-om.

6.3.2.2 Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa CCM - Hist - CC metodom upravljanja

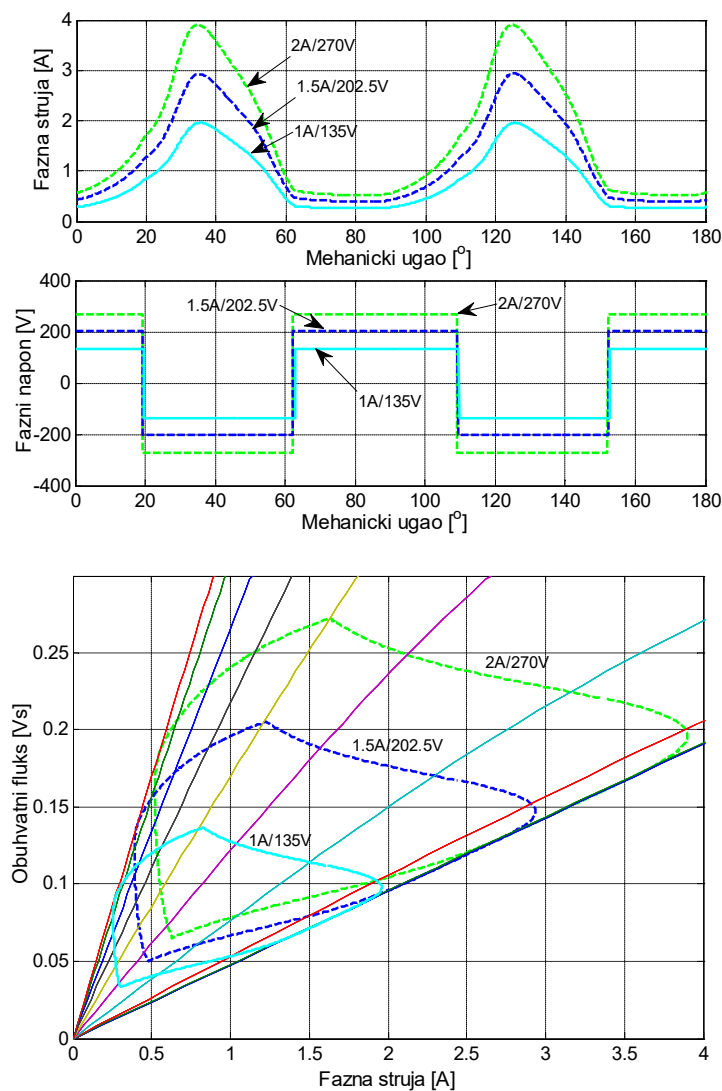
Optimizaciona procedura za određivanje optimalnih vrijednosti I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} može biti primijenjena za bilo koju vrijednost napona međukola i za bilo koju željenu efektivnu vrijednost fazne struje.



Slika 6.10 Optimalne $I_{dc-kom} - n$, $\Delta I_{dc-kom} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri CCM – Hist - CC upravljanju, za razne efektivne vrijednosti fazne struje i vrijednosti napona međukola.

Optimalne vrijednosti I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} korišćenog SRG-a pri radu sa CCM - Hist - CC metodom upravljanja, u funkciji brzine obrtanja, za različite vrijednosti napona

međukola i efektivne vrijednosti struje, prikazana je na slici 6.10. Na istoj slici su prikazane i odgovarajuće zavisnosti mehaničke snage, električne snage i efikasnosti SRG-a u funkciji brzine obrtanja. Svi prikazani rezultati dati su u PRILOGU D, u Tabelama P-D.1 – P-D.3. Sa prethodno pomenute slike se vidi da optimizovane vrijednosti I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} omogućavaju da promjena snage SRG, u čitavom posmatranom dijapazonu brzina, bude manja od 0.5%.



Slika 6.11 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri CCM – Hist - CC upravljanju, a za različite vrijednosti napona V_{dc-mk} i struje I_{ef} ($n=10000ob/min$).

Talasni oblici fazne struje i napona, kao i odgovarajuće fluks-struja petlje SRG-a pri radu sa CCM - Hist - CC metodom upravljanja, za razne vrijednosti fazne struje i napona međukola, a pri brzini obrtanja od 10000 ob/min i optimizovanim vrijednostima I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} , prikazani su na slici 6.11. Sa ove slike se vidi da su ekvivalentni uglovi uključenja i isključenja, za ovako odabrane vrijednosti napona međukola i faze, isti. Takođe, jasno se vidi da se maksimalna i minimalna vrijednost fluksa, u toku jednog ciklusa, ostvaruju pri različitim vrijednostima struje faze, za razliku od rezultata prikazanih na slici 6.7.

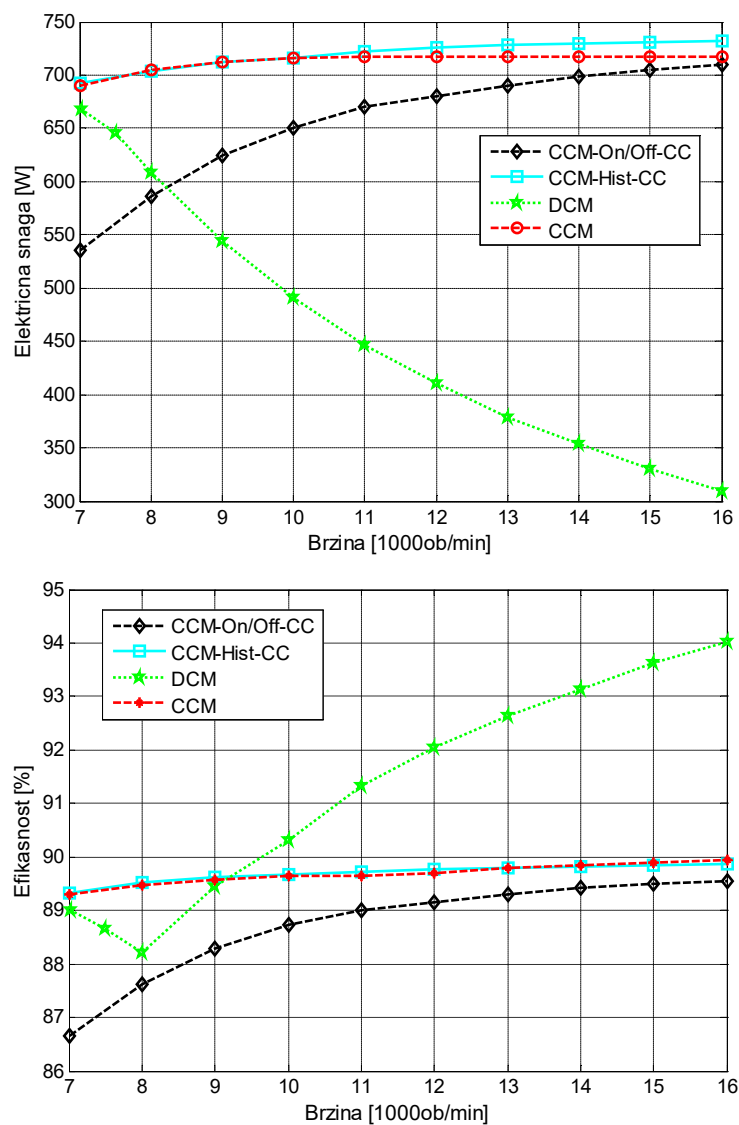
6.3.3 Poređenje izlaznih karakteristika SRG-a u CCM-u, u DCM-u i pri CCM - On/Off – CC i CCM - Hist - CC upravljanjima

Karakteristike električne snage i efikasnosti SRG-a u funkciji brzine obrtanja, pri optimizovanom CCM - On/Off - CC, CCM - Hist - CC i klasičnom upravljanju u CCM-u i u DCM-u upoređene su na slici 6.12. Sa ove slike se jasno vidi da se najveća snaga dobija ako se primjenjuje CCM - Hist - CC upravljanja. Vrijednost električne snage koja se dobija primjenom klasičnog upravljanja u CCM-u je pri velikim brzinama obrtanja nešto manja od vrijednosti električne snage koja se dobija primjenom CCM - Hist - CC upravljanja. Razlog ove razlike je posledica odabranog koraka kontrolnih uglova od 0.1° u optimizacionoj proceduri pri klasičnom upravljanju u CCM-u. Sa druge strane, vidi se da se razlika između vrijednosti električne snaga SRG-a pri klasičnom upravljanju u CCM-u (ili pri CCM - On/Off - CC upravljanju) i pri CCM - Hist - CC upravljanju smanjuje sa povećanjem brzine obrtanja. Najveća efikasnost SRG-a se postiže pri radu u DCM-u, dok je efikasnost SRG-a pri radu sa klasičnim upravljanjem u CCM-u, kao i pri CCM - On/Off - CC i CCM - Hist - CC metodama upravljanja gotovo identična (međusobna razlika je oko 0.3%).

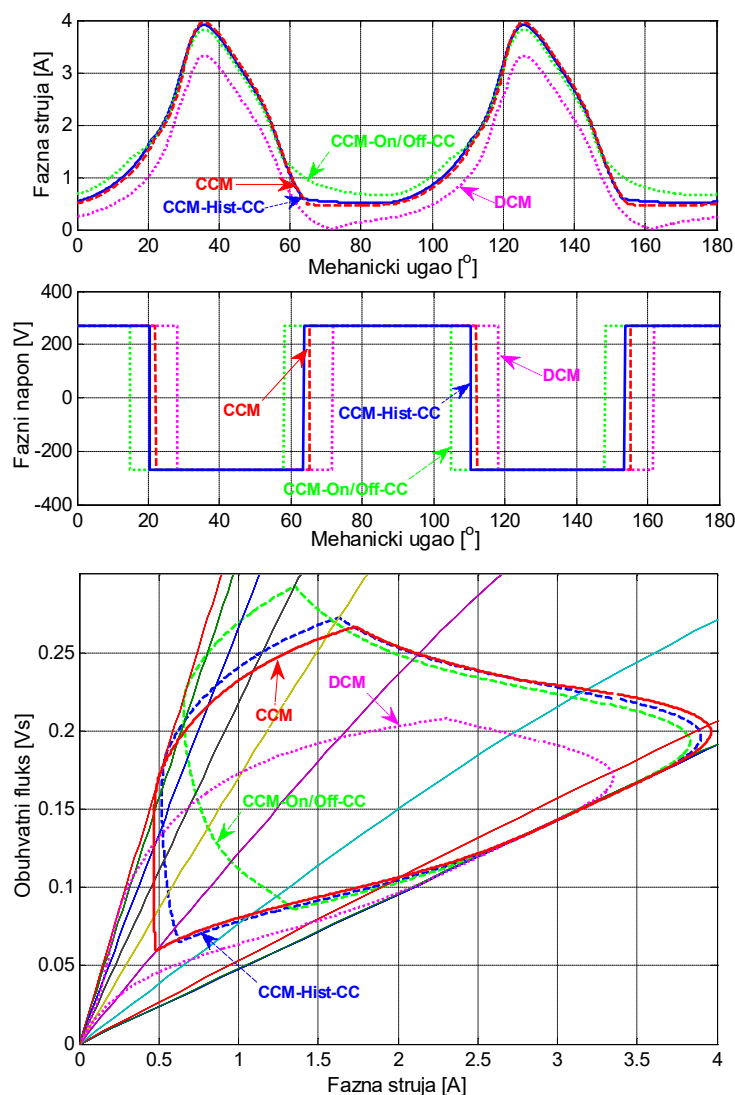
Talasni oblici fazne struje, faznog napona, kao i fluks-struja petlje, pri radu SRG-a sa optimalnim CCM - Hist - CC i CCM - On/Off - CC upravljanjima, kao i pri radu sa optimalnim klasičnim upravljanjima u CCM-u i u DCM-u, pri brzini obrtanja od 10000ob/min, naponu 270V i efektivnoj vrijednosti struje 2A, upoređeni su na slici 6.13.

Fluks-struja petlja pri CCM - Hist - CC upravljanju SRG-om je veoma slična fluks-struja petlji koja se dobija pri klasičnom upravljanju u CCM-u, što potvrđuje činjenicu da su snage koje se dobijaju primjenom ovih upravljanja približno jednake. Takođe, može se uočiti i sličnost talasnih oblika napona i struje SRG-a. Isto tako, sa ove slike se vidi da je fluks-struja petlja pri CCM - Hist - CC upravljanju SRG-om (a i pri klasičnom upravljanju u

CCM-u) pomjerena ka koordinatnom početku, što znači da prilikom generisanja energije vrijednosti struje faze i fluksa dostižu manje vrijednosti u odnosu na one koje se dobijaju pri upotrebi CCM - On/Off - CC upravljanja. Samim tim, snaga koju SRG razvija pri CCM - Hist - CC upravljanju i klasičnom upravljanju u CCM-u je veća u odnosu na snagu koja se dobija pri upotrebi CCM - On/Off - CC, i pri klasičnom upravljanju u DCM-u.



Slika 6.12 Optimalne $P - n$ i $\eta - n$ karakteristike SRG-a u DCM-u, CCM-u i pri CCM - On/off - CC i CCM - Hist - CC upravljanju ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$).



Slika 6.13 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u, CCM-u i pri CCM – On/off – CC i CCM – Hist – CC upravljanju ($n=10000$ ob/min, $I_{ef}=2$ A, $V_{dc_mk}=270$ V).

6.3.4 Primjena novog bezsenzorskog metoda upravljanja SRG-om u CCM-u, realizovanog upotrebom klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera, u vjetrogeneratorskom sistemu

Posmatrajući rezultate prikazane na slikama 6.6 i 6.10, dobijene za različite efektivne vrijednosti struje faze i napona jednosmjernog međukola (pri čemu je odnos efektivnih vrijednosti struje faze i napona međukola održavan na konstantnoj vrijednosti), može se uočiti da se vrijednosti P_{meh} , I_{dc-kom} i ΔI_{dc-kom} mogu predstaviti kao funkcije napona međukola (V_{dc_mk}) i brzine obrtanja (n):

$$\begin{aligned}
 P_{\text{meh}} &= f_1(V_{\text{dc_mk}}, n) \\
 I_{\text{dc-kom}} &= f_2(V_{\text{dc_mk}}, n) \\
 \Delta I_{\text{dc-kom}} &= f_3(V_{\text{dc_mk}}, n)
 \end{aligned} \tag{6-9}$$

Koristeći rezultate prikazane na slikama 6-6 i 6-10, zavisnost $P_{\text{meh}} = f_1(V_{\text{dc_mk}}, n)$ kod CCM – On/Off – CC i kod CCM – Hist – CC upravljanja aproksimirana je funkcijom:

$$P_{\text{meh}} = \left(\frac{V_{\text{dc_mk}}}{V_{\text{dc_nom}}} \right)^2 (k_1 \cdot n^{k_2} + k_3) [\text{W}], \tag{6-10}$$

zavisnost $I_{\text{dc-kom}} = f_2(V_{\text{dc_mk}}, n)$ kod CCM - Hist - CC upravljanja funkcijom:

$$I_{\text{dc-kom_CC-On/Off-CC}} = \frac{V_{\text{dc_mk}}}{V_{\text{dc_nom}}} \cdot \left(\frac{p_1 \cdot n + p_2}{n + p_3} \right) [\text{A}], \tag{6-11}$$

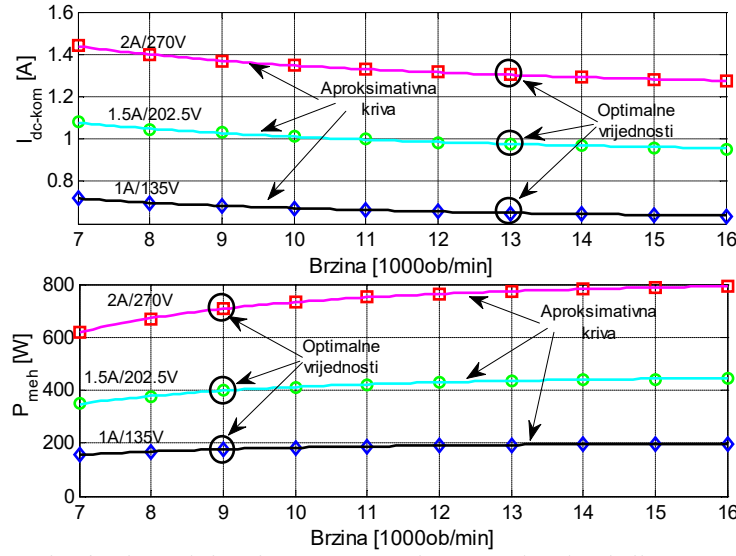
a $I_{\text{dc-kom}} = f_2(V_{\text{dc_mk}}, n)$ kod CCM - Hist - CC upravljanja funkcijom:

$$I_{\text{dc-kom_CC-Hist-CC}} = \left(\frac{V_{\text{dc_mk}}}{V_{\text{dc_nom}}} \right) (t_1 \cdot n^{t_2} + t_3) [\text{A}]. \tag{6-12}$$

Na kraju, zavisnost $\Delta I_{\text{dc-kom}} = f_3(V_{\text{dc_mk}}, n)$ kod CCM - Hist - CC upravljanja je aproksimirana funkcijom oblika:

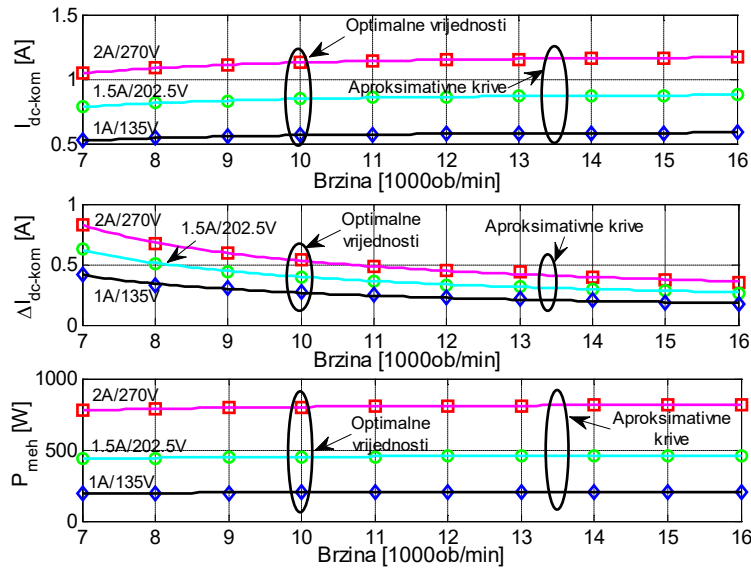
$$\Delta I_{\text{dc-kom_CC-Hist-CC}} = \frac{V_{\text{dc_mk}}}{V_{\text{dc_nom}}} \cdot \left(\frac{m_1 \cdot n + m_2}{n + m_3} \right) [\text{A}]. \tag{6-13}$$

Primjenjujući metod najmanjih kvadrata, određene su vrijednosti svih nepoznatih koeficijenata k_i , t_i , p_i , i m_i , $i=1,2,3$. Kod CCM - On/Off - CC upravljanja vrijednosti koeficijenata k_i su: $k_1 = -1.342 \cdot 10^{11}$, $k_2 = -2.292$ i $k_3 = 823.6$, a kod CCM - Hist - CC upravljanja $k_1 = -3.909 \cdot 10^9$, $k_2 = -2.056$ i $k_3 = 824.5$. Vrijednosti koeficijenata p_i su: $p_1 = 1.167$, $p_2 = 463.4$ a $p_3 = -992.6$, koeficijenata t_i su: $t_1 = -9.204 \cdot 10^8$, $t_2 = -2.551$ i $t_3 = 1.186$ i koeficijenata m_i su $m_1 = 0.1724$, $m_2 = 1796$ i $m_3 = -3357$. U prethodnim jednačinama $V_{\text{dc_nom}}$ predstavlja nominalnu vrijednost napona potrošača ($V_{\text{dc_nom}} = 270\text{V}$).



Slika 6.14 Optimalne i aproksimativne $I_{dc-kom} - n$ i $P_{meh} - n$ karakteristike SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju, za različite vrijednosti napona V_{dc-mk} i struje I_{ef-ref} .

Optimalne i aproksimirane karakteristike I_{dc-kom} i P_{meh} u funkciji brzine obrtanja, kod CCM - On/Off - CC upravljanja SRG-om, upoređene su na slici 6.14. Analogno, na slici 6.15 upoređene su optimalne i aproksimirane vrijednosti I_{dc-kom} , ΔI_{dc-kom} i P_{meh} kod CCM - Hist - CC upravljanja SRG-om. Sa ovih slika se vidi veoma dobro poklapanje optimalnih i aproksimiranih vrijednosti svih posmatranih veličina.

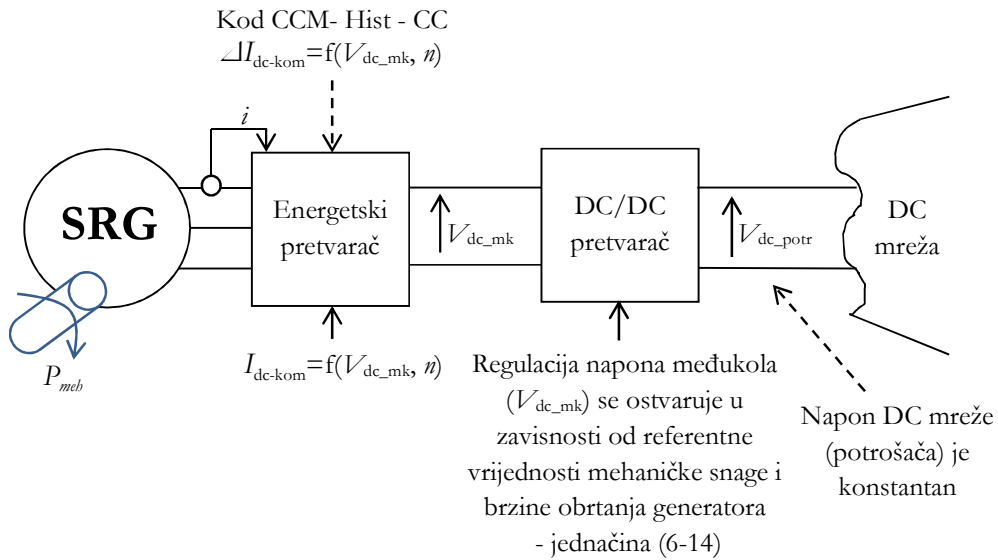


Slika 6.15 Optimalne i aproksimativne $I_{dc-kom} - n$, $\Delta I_{dc-kom} - n$ i $P_{meh} - n$ karakteristike SRG-a pri CCM - Hist - CC upravljanju, za različite vrijednosti napona V_{dc-mk} i struje I_{ef-ref} .

Na osnovu (6-10) može se napisati izraz za optimalnu vrijednost napona međukola kod CCM - On/Off - CC i CCM - Hist - CC upravljanja u obliku:

$$V_{dc_mk}^* = V_{dc_nom} \cdot \sqrt{\frac{P_{meh}^*}{k_1 \cdot n^{k_2} + k_3}}, \quad (6-14)$$

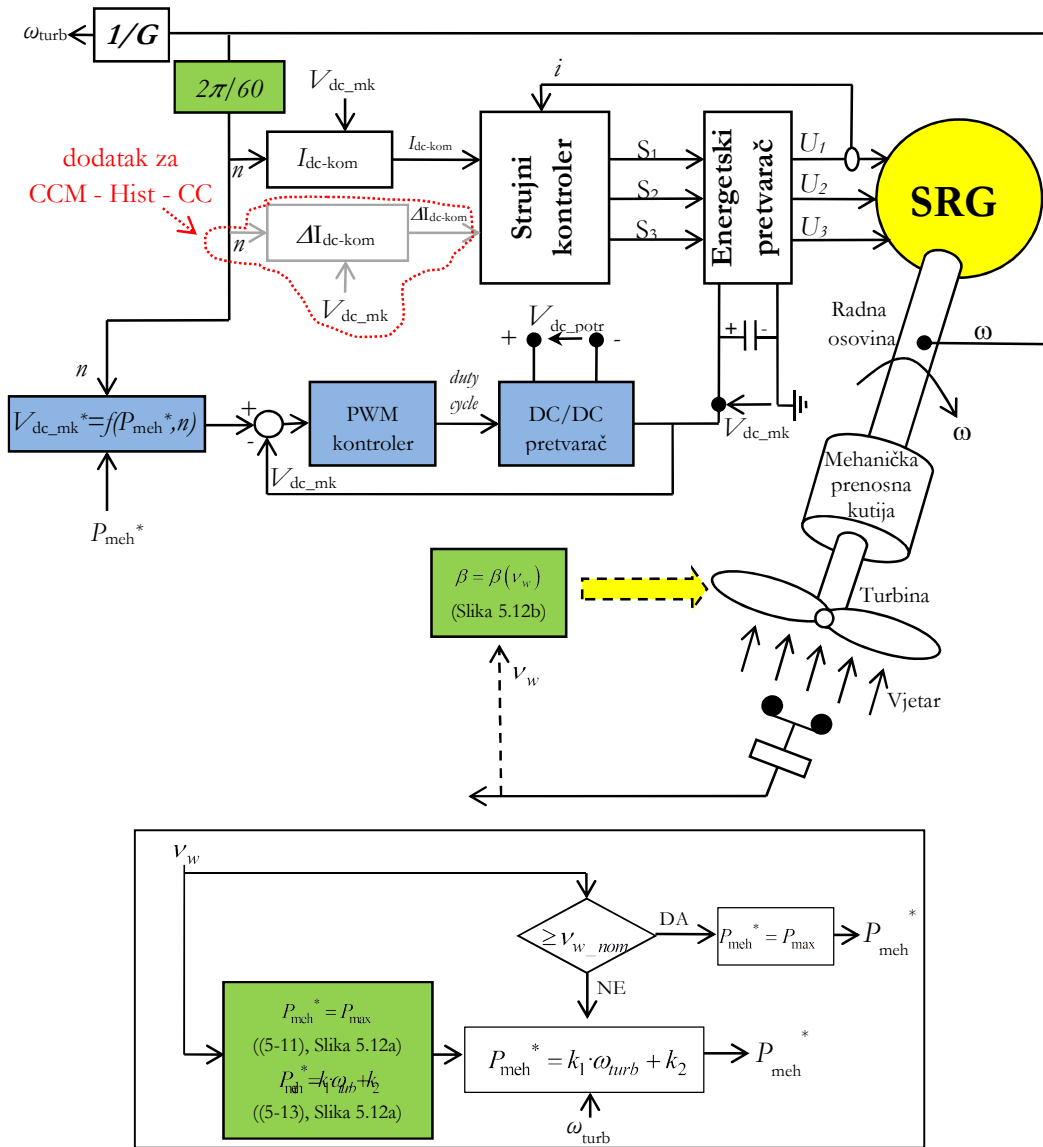
Prema tome, na osnovu prethodne jednačine je jasno da se za svaku vrijednost brzine obrtanja i optimalnu vrijednost mehaničke snage može odrediti optimalna vrijednost napona međukola. Sa druge strane, za svaku vrijednost optimalnog napona međukola i brzine obrtanja može se odrediti i optimalna vrijednost I_{dc_kom} kod CCM - On/Off - CC upravljanja ili optimalne vrijednosti I_{dc_kom} i ΔI_{dc_kom} kod CCM - Hist - CC upravljanja SRG-om. Ograničavanjem vrijednosti mehaničke snage (zakretanjem lopatica turbine) ograničava se i vrijednost napona na fazi, pa ne postoji mogućnost pojave prevelike vrijednosti napona na fazi koja bi mogla oštetiti izolaciju namotaja. Isto tako, ograničavanjem napona međukola ograničena je i efektivna vrijednost fazne struje, pa ne postoji mogućnost pregrijavanja faze. Blok dijagram bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u realizovanog upotrebom klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera prikazan je na slici 6.16.



Slika 6.16 Blok dijagram bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u realizovanog upotrebom klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera.

6.3.4.1 Blok dijagram predloženog vjetrogeneratorskog sistema

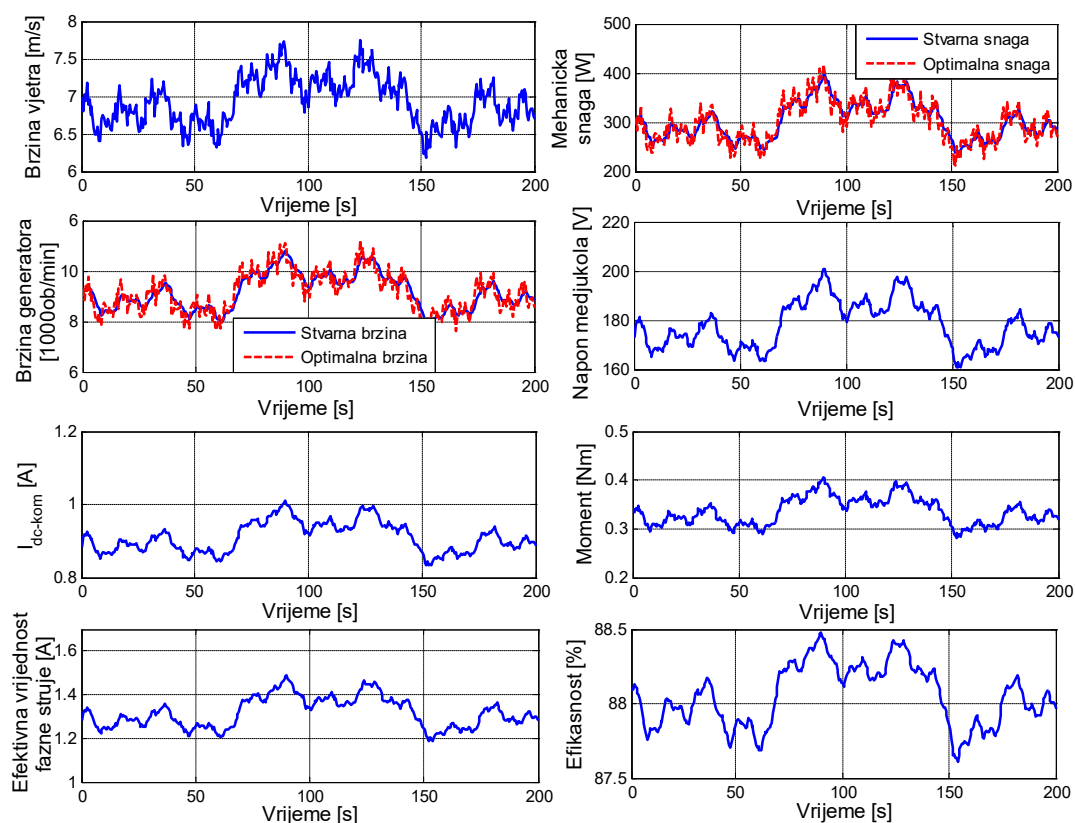
Predložena konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema za upravljanje SRG-om bez upotrebe senzora pozicije, realizovana preko strujnog kontrolera, prikazana je na slici 6.17. Kao što se sa ove slike vidi, predložena konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema zahtijeva mjerenje brzine vjetra, brzine generatora i struje faze. Analiza rada predloženog vjetrogeneratorskog sistema analogna je analizi rada vjetrogeneratorskog sistema sa slike 5.10.



Slika 6.17 Konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema sa SRG-om pri bezsenzorskom upravljanju sa strujnim kontrolerom.

6.3.4.2 Simulacioni rezultati

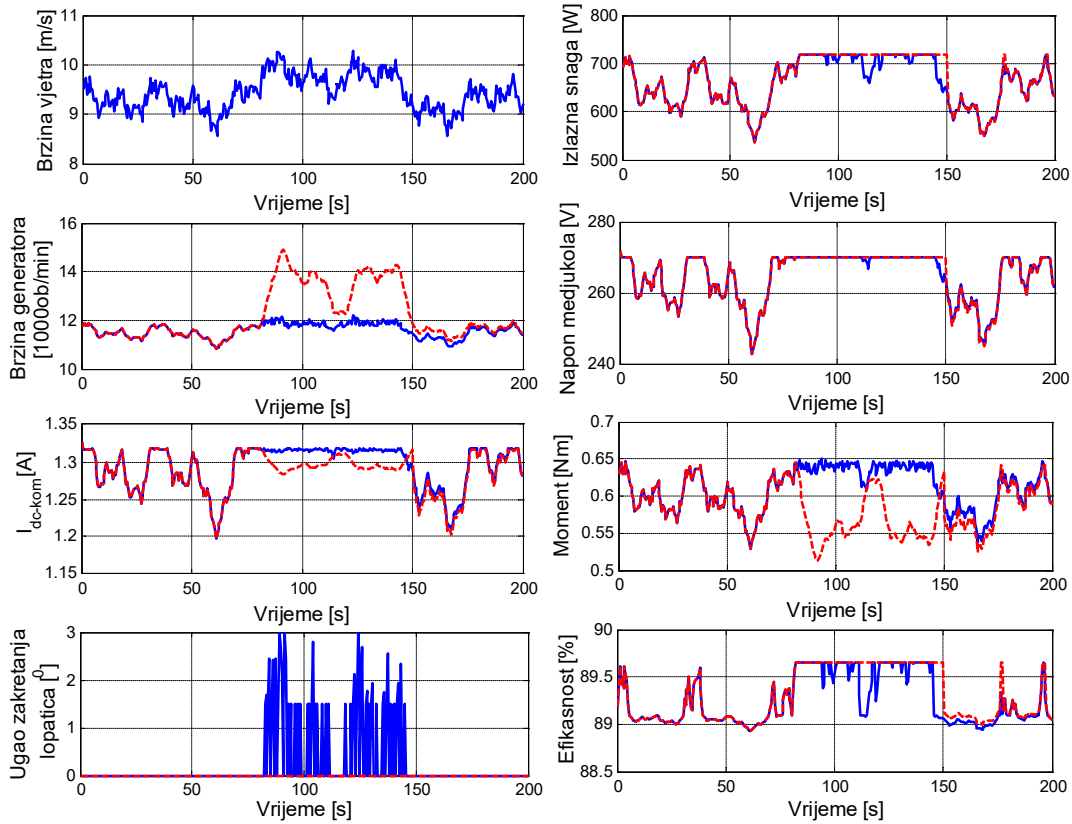
Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu, sa predloženim bezsenzorskim metodom upravljanja sa slike 6.17, prikazani su na slikama 6.18-6.21. U simulacijama je korišćen matematički model vjetra opisan jednačinama (5-16) i (5-17), kao i vjetroturbina opisana u Potpoglavlju 5.4.1. Uzeto je da se regulator ugla zakretanja lopatica uključuje ako brzina obrtanja generatora postane veća od 11884ob/min, što odgovara mehaničkoj snazi od 800W prema mehaničkoj karakteristici turbine sa slike 5.9a.



Slika 6.18 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I dobijeni primjenom CCM - On/Off - CC upravljanja.

Na slikama 6.18 i 6.19 prikazani su rezultati simulacije rada SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju u vjetrogeneratorskom sistemu sa slike 6.17. Analogno, rezultati simulacije rada SRG-a pri CCM - Hist - CC upravljanju prikazani su na slikama 6.20 i 6.21.

Simulacioni rezultati za rad turbine u Regionu I (vidi sliku 5.9b) prikazani su na slikama 6.18 i 6.20. Sa ovih slika se jasno vidi da brzina obrtanja generatora i ulazna snaga veoma dobro prate optimalnu brzinu i optimalnu referentnu snagu, respektivno. U konkretnom slučaju ugao zakretanja lopatica je nula; mehanička snaga je manja od nominalne mehaničke snage turbine, pa su efektivne vrijednosti faznog napona i struje manje od njihovih nominalnih vrijednosti.



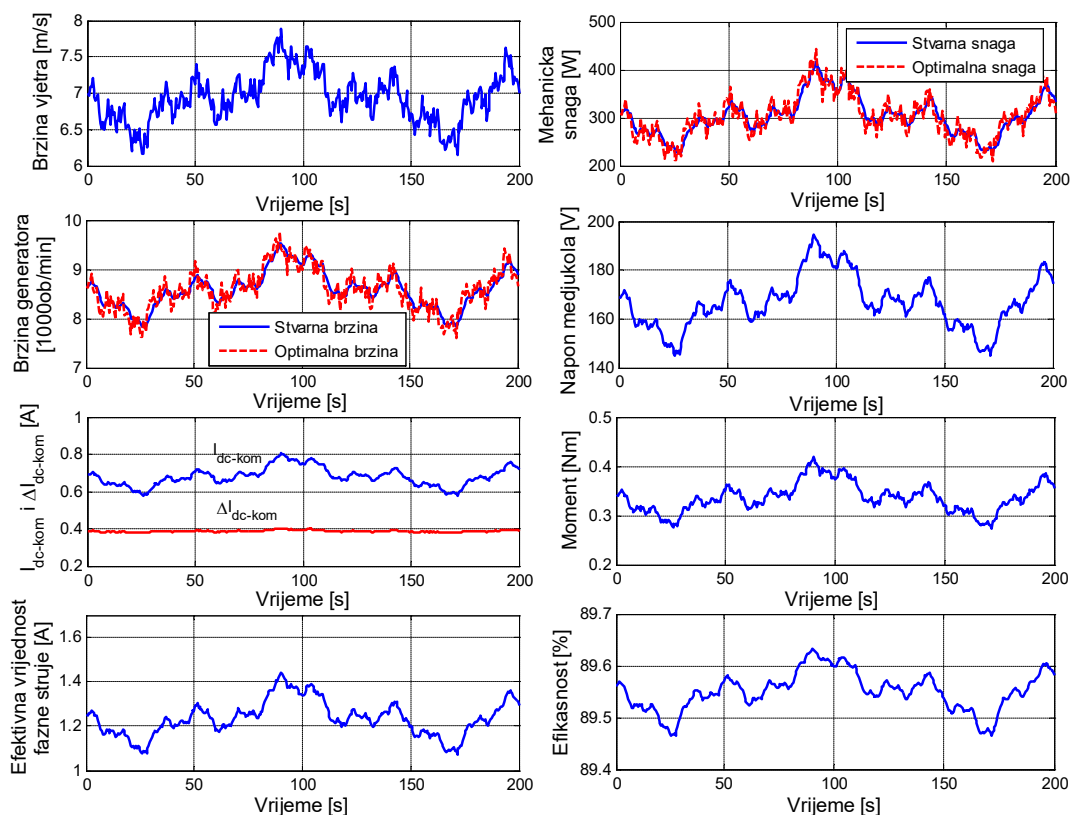
Slika 6.19 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, dobijeni primjenom CCM - On/Off - CC upravljanja.

Simulacioni rezultati rada SRG-a u Regionu II (vidi sliku 5.9b) prikazani su na slikama 6.19 i 6.21. Na ovim slikama prikazani su i rezultati sa i bez regulacije ugla zakretanja lopatica. U simulaciji je korišćen regulator zakretanja ugla lopatica opisan u [142].

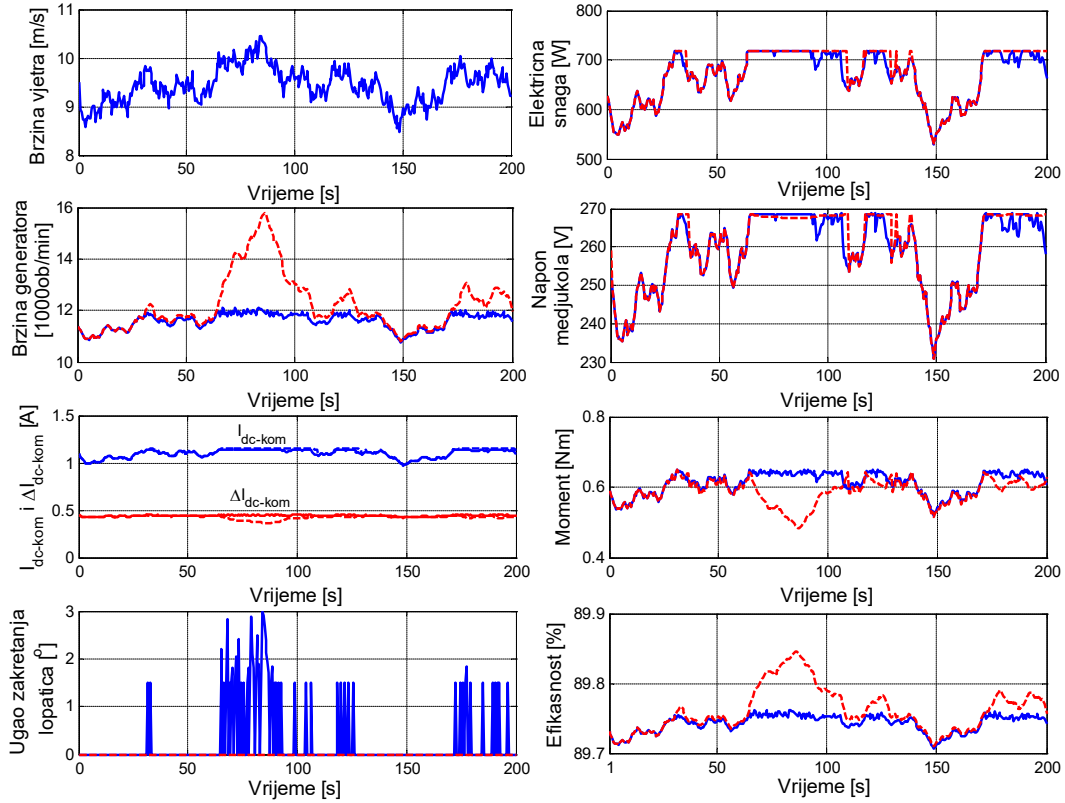
Na osnovu rezultata prikazanih na slikama 6.19 i 6.21 je jasno da su varijacije brzine obrtanja generatora manje ako se koristi regulator ugla zakretanja. U posmatranom

slučaju, maksimalna vrijednost ugla zakretanja lopatica je 3° dok je maksimalna brzina promjene ugla zakretanja lopatica $1.5^{\circ}/s$, što je značajno manje od maksimalno dozvoljene promjene ugla zakretanja lopatica (dozvoljena promjena ugla zakretanja lopatica je $3^{\circ}/s$, [142]).

Međutim, ako se ne vrši regulacija ugla zakretanja lopatica, varijacije brzine generatora su izuzetno velike (u konkretnom slučajevima one iznose i do 30% nominalne brzine generatora). Ako je brzina obrtanja generatora veća od nominalne vrijednosti, električna snaga generatora je konstantna, dok fazni napon i fazna struja imaju nominalne vrijednosti.



Slika 6.20 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I dobijeni primjenom CCM - Hist - CC upravljanja.



Slika 6.21 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, dobijeni primjenom CCM - Hist - CC upravljanja.

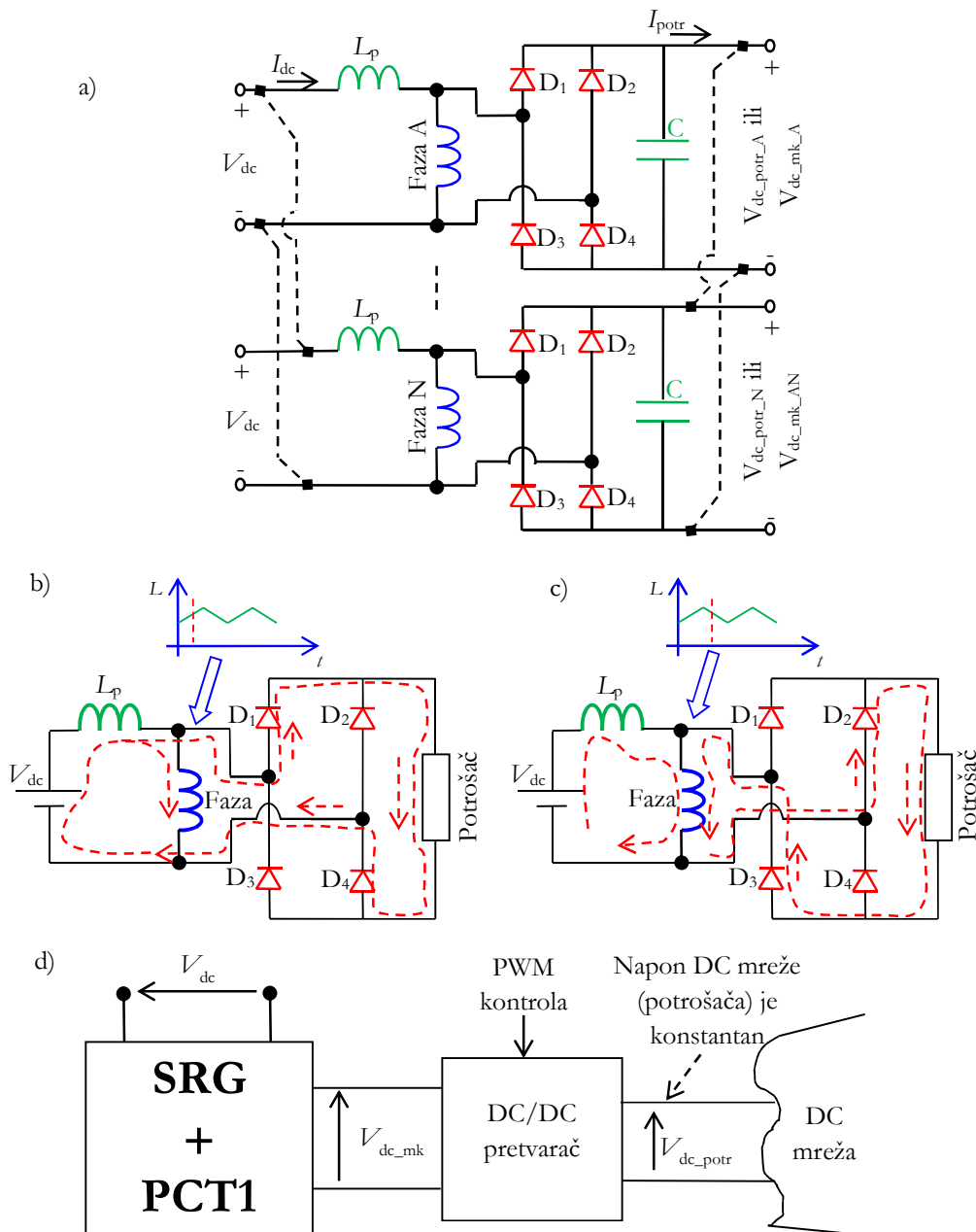
6.4 Nove topologije energetskog pretvarača za realizaciju bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u

Glavni nedostatak rada SRG-a primjenom bezsenzorskog upravljanja realizovanog na bazi prostog kola sa slike 6.2 jeste u tome što se dobija izuzetno mala vrijednost električne snage. Razlog za to jeste posledica neograničenosti napona na fazi u periodu magnetizacije faze.

U ovoj doktorskoj disertaciji, predložene su dvije topologije pretvarača za rad SRG-a u CCM-u kod kojih je napon na fazi, u toku magnetizacije i u toku generisanja energije, u potpunosti ograničen. Predložene topologije pretvarača, kao i analiza rada SRG-a sa istim, publikovane su u [129].

6.4.1 PCT1

Na slici 6.22 prikazana je predložena topologija pretvarača za rad SRG-a u CCM-u, koja omogućava povezivanje faze/faza SRG-a sa potrošačem/potrošačima. Predložena topologija pretvarača je nazvana **PCT1** (Proposed Converter Topology 1).



Slika 6.22 PCT1 pretvarač [129]. a) Šema povezivanja. b) Magnetizacija faze. c) Generisanje energije. d) Povezivanje SRG-a na DC mrežu.

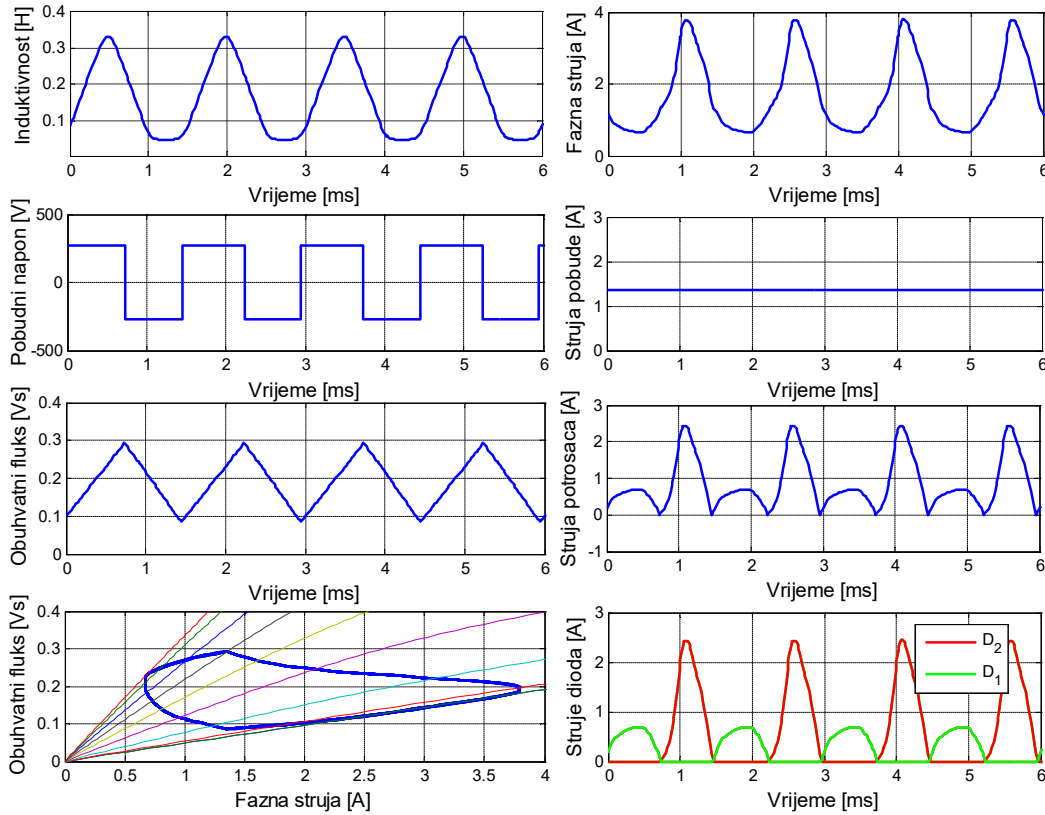
Za izradu ovog pretvarača (PCT1 pretvarač) koriste se po četiri diode i po jedan kalem po fazi mašine, pa je realizacija ovog pretvarača krajnje jednostavna [129]. Strujni izvor sa slike 6.2a zamijenjen je rednom vezom naponskog izvora V_{dc} i kalema L_p . Na ovaj način, snaga SRG-a se kontroliše preko napona V_{dc} . Napon V_{dc} se može dobiti pomoću kontrolisanog ispravljača, koji je spojen na AC napajanje, ili koristeći DC/DC pretvarač sa izolovanim terminalima koji se napaja sa strane potrošača. Kod ove topologije svaka faza može imati poseban pobudni izvor, ili se može koristiti jedan pobudni izvor za sve faze. Takođe, svaka faza može napajati posebne potrošače, ili sve faze mogu napajati samo jedan potrošač. Povezivanje SRG-a sa DC mrežom prikazano je na slici 6.22d.

Upravljanje SRG-om pomoću PCT1 pretvarača je analogno upravljanju SRG-om koristeći prosto kolo sa slike 6.2. Naime, u toku intervala u kome induktivnost raste, povratna EMF smanjuje vrijednost struje faze, pa kroz diode D_1 i D_4 protiče struja jednaka razlici struja pobude i struje faze. U ovom intervalu napon faze je V_{dc_mk} . Sa druge strane, u toku intervala u kome induktivnost opada, povratna EMF mijenja znak i utiče na povećanje struje faze. Pošto struja faze postaje veća od struje pobude, razlika te dvije struje protiče kroz diode D_2 i D_3 , dok je napon na fazi $-V_{dc_mk}$. Prema tome, diodni most omogućava tok struje ka potrošaču, ali istovremeno omogućava da trenutna vrijednost napona U na fazi ne prelazi vrijednost napona potrošača $\pm V_{dc_mk}$. Struja potrošača (slika 6.22a) je uvijek pozitivna i jednaka je apsolutnoj vrijednosti razlike struja faze i struje potrošača

$$i_{potr} = |i - I_{dc}|. \quad (6-15)$$

Tok struja pri magnetizaciji faze i generisanju električne energije prikazan je na slikama 6.22b i 6.22c, respektivno.

Za potrebe simulacionog ispitivanja rada SRG-a sa PCT1 u programskom paketu MATLAB/Simulink realizovan je model trofaznog SRG-a sa PCT1 (PRILOG E, Slika P-E.1). Talasni oblici induktivnosti, fluksa, napona faze, struje faze, struje pobude, struje diode, struje potrošača kao i fluks-struja petlja, pri brzini obrtanja od 10000ob/min, a pri radu jedne faze korišćenog SRG-a (Tabela 2.1) sa PCT1, prikazani su na slici 6.23. Sa ove slike se jasno vidi da PCT1 topologija omogućava kontinualan tok struje, kao i ograničavanje vrijednosti napona na fazi. U simulaciji je korišćen filter koji vrši idealno peglanje pobudne struje ($L_p \rightarrow \infty$ - idealan filter).



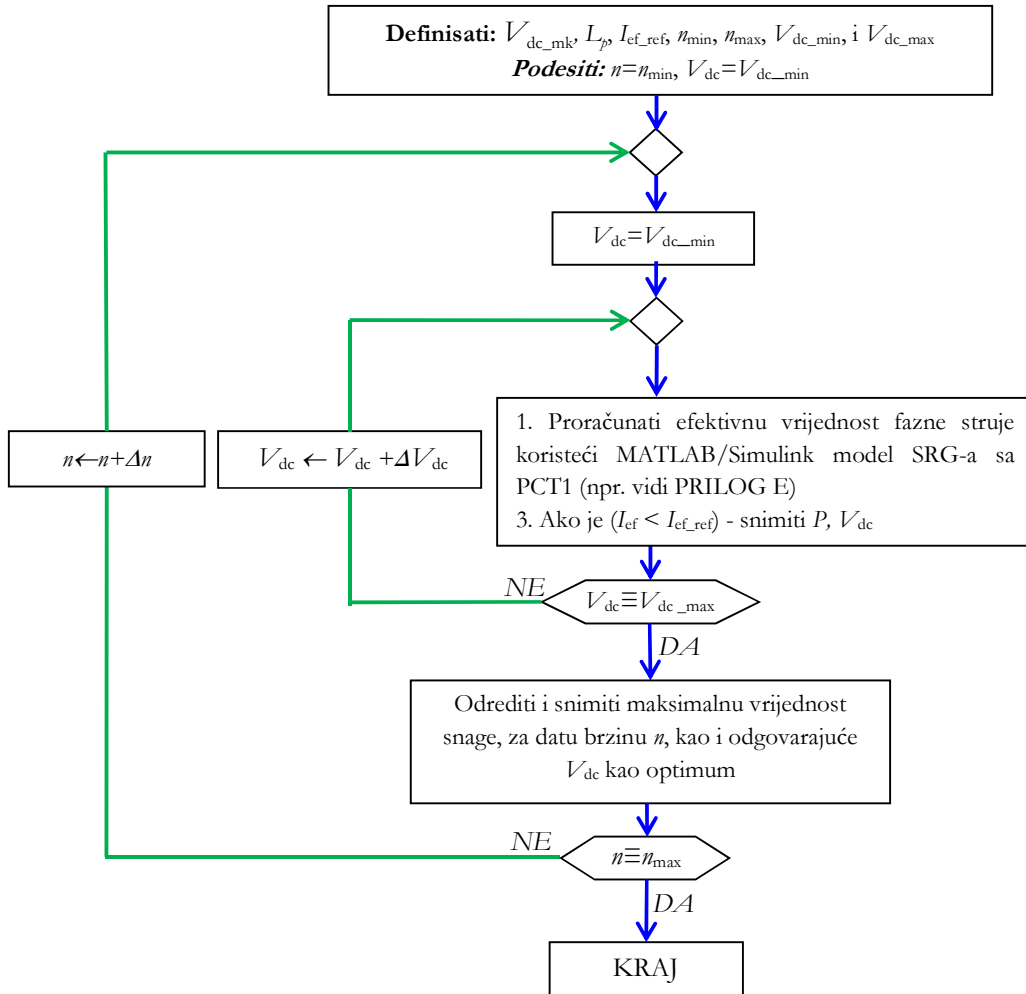
Slika 6.23 Simulacioni rezultati rada SRG-a sa PCT1 ($n=10000\text{ob/min}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$, $L_p \rightarrow \infty$, $I_{dc}=1.35\text{A}$).

6.4.1.1 Postupak za utvrđivanje optimalne vrijednosti pobudnog napona pri radu SRG-a sa PCT1

Pri radu SRG-a sa PCT1, za svaku vrijednost brzine obrtanja, željena vrijednost snage se može dobiti preko odgovarajuće vrijednosti pobudnog napona V_{dc} . Ako se zahtijeva maksimalna moguća snaga, V_{dc} treba optimizovati na taj način da efektivna vrijednost fazne struje ne pređe referentnu vrijednost. Algoritam za optimizaciju pobudnog napona SRG-a pri radu sa PCT1 prikazan je na slici 6.24.

U predloženom algoritmu koristi se realizovani MATLAB/Simulink model SRG-a sa PCT1 (vidi PRILOG E). Najprije se definiše dijapazon brzina ($n_{\max}$ – maksimalna brzina, $n_{\min}$ – minimalna brzina, Δn – korak promjene brzine) i referentna efektivna vrijednost fazne struje. Za svaku od definisanih brzina vrši se simulacija rada SRG-a sa PCT1 za različite vrijednosti napona pobude u opsegu od V_{dc_min} do V_{dc_max} sa korakom ΔV_{dc} . U svakoj iteraciji se određuje vrijednost električne snage i efektivna vrijednost fazne struje I_{ef} .

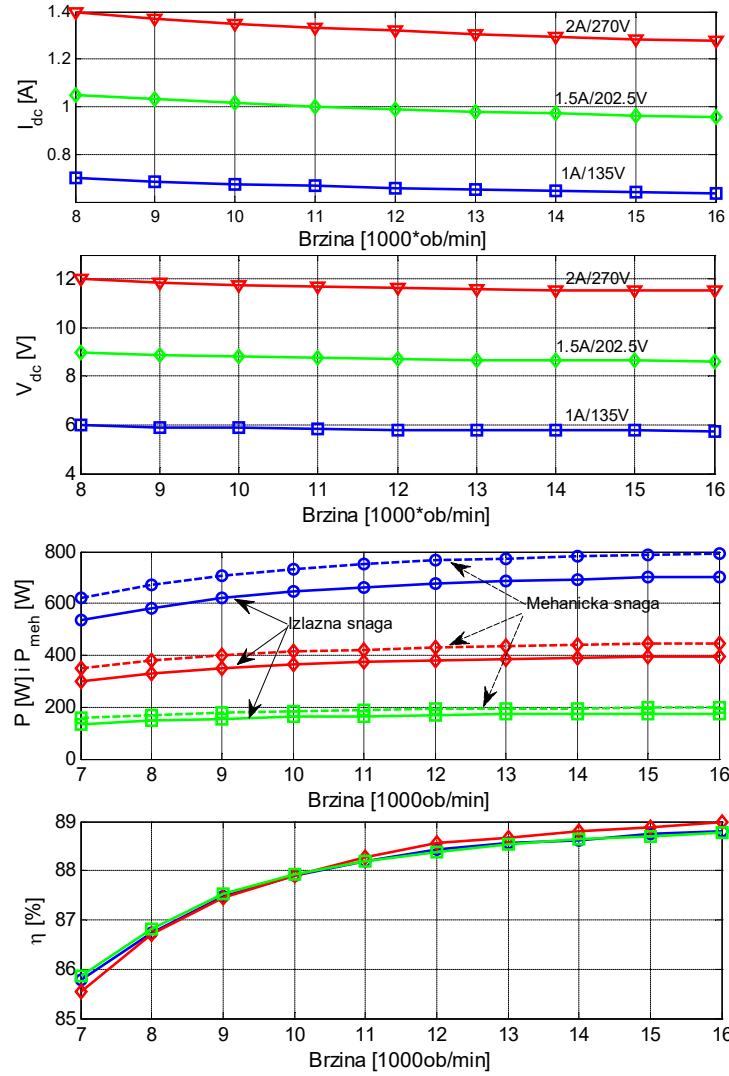
Takođe, za svaku brzinu obrtanja u toku ovoga optimizacionog postupka određuje se optimalna vrijednost napona pobude koja omogućava dobijanje maksimalne električne snage generatora, uz uslov da efektivna vrijednost struje ne pređe definisanu referentnu vrijednost. Na kraju, za unaprijed definisani dijapazon brzina obrtanja i referentnu efektivnu vrijednost struje dobijaju se optimalne karakteristike SRG-a.



Slika 6.24 Algoritam za optimizaciju pobudnog napona SRG-a pri radu sa PCT1.

6.4.1.2 Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa PCT1

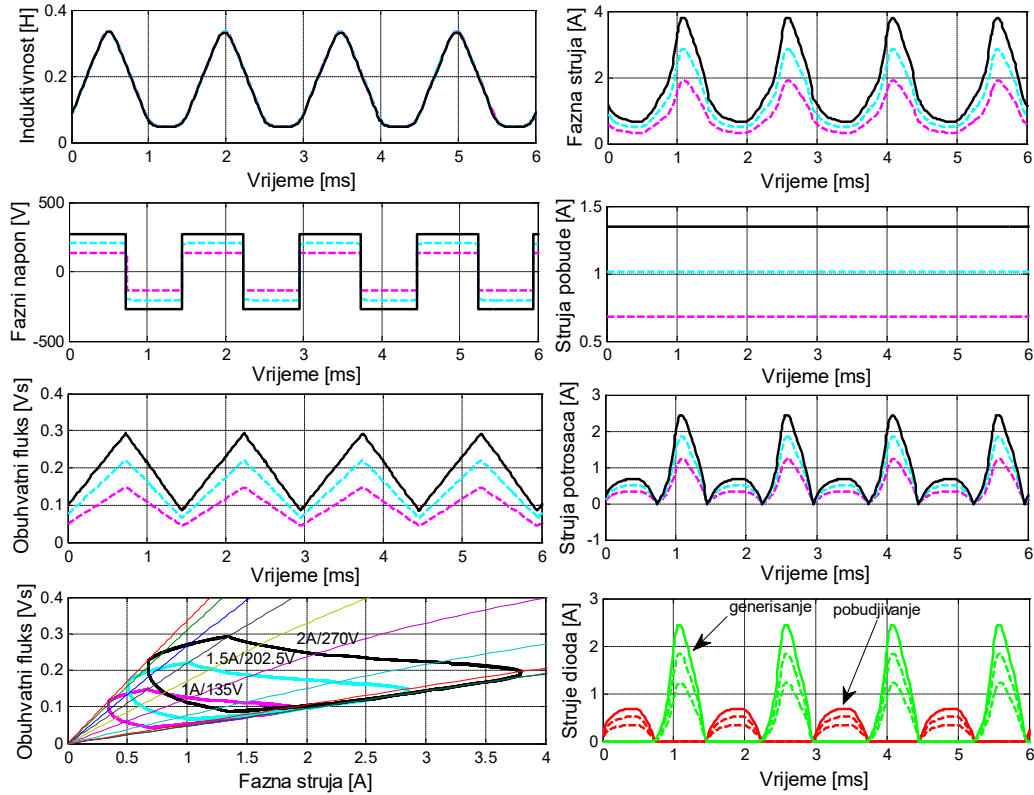
Predložena optimizaciona procedura za određivanje optimalnih vrijednosti pobudnog napona može se primijeniti za bilo koju vrijednost induktivnosti kalema u kolu pobude, bilo koju vrijednost napona na potrošaču (ili generalno napona međukola), kao i za bilo koju referentnu efektivnu vrijednost fazne struje.



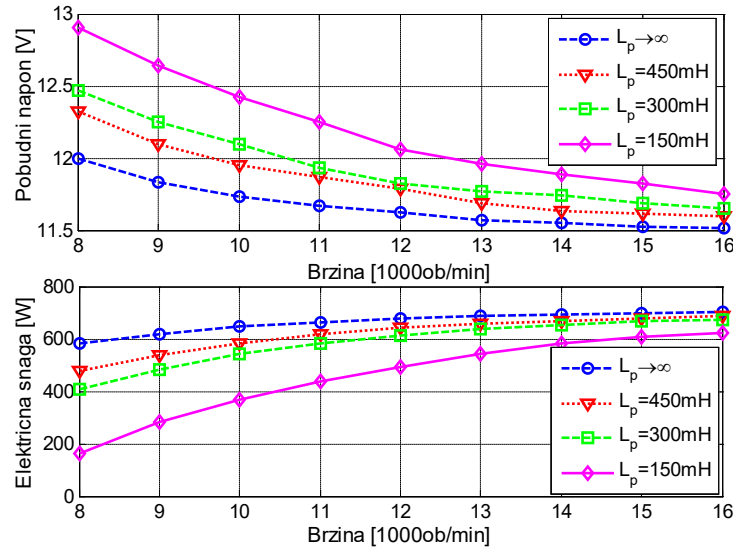
Slika 6.25 Optimalne $I_{dc} - n$, $V_{dc} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje $I_{ef_ref.}$.

Rezultati optimizacije rada SRG-a sa PCT1, pri upotrebi idealnog filtra ($L_p \rightarrow \infty$), za različite efektivne vrijednosti fazne struje i napona međukola, prikazani su na slici 6.25, kao i u PRILOGU E, u Tabelama P-E.1 – P-E.3. Sa ove slike se jasno vidi da se pri povećanju brzine obrtanja smanjuje optimalna vrijednost pobudnog napona (struje). Odnosno, za manje brzine obrtanja potrebna je veća vrijednost pobudnog napona (struje). Takođe, vidi se da su za ovako odabrane vrijednosti napona međukola i efektivnu vrijednost struje vrijednosti efikasnosti, za određenu brzinu obrtanja, jednake. Talasni oblici induktivnosti, fazne struje, faznog napona, struje pobude, struje potrošača, fluksa, kao i fluks-struja petlja

pri optimizovanim vrijednostima pobudnog napona, a pri upotrebi idealnog filtra u kolu pobude, prikazani su na slici 6.26.

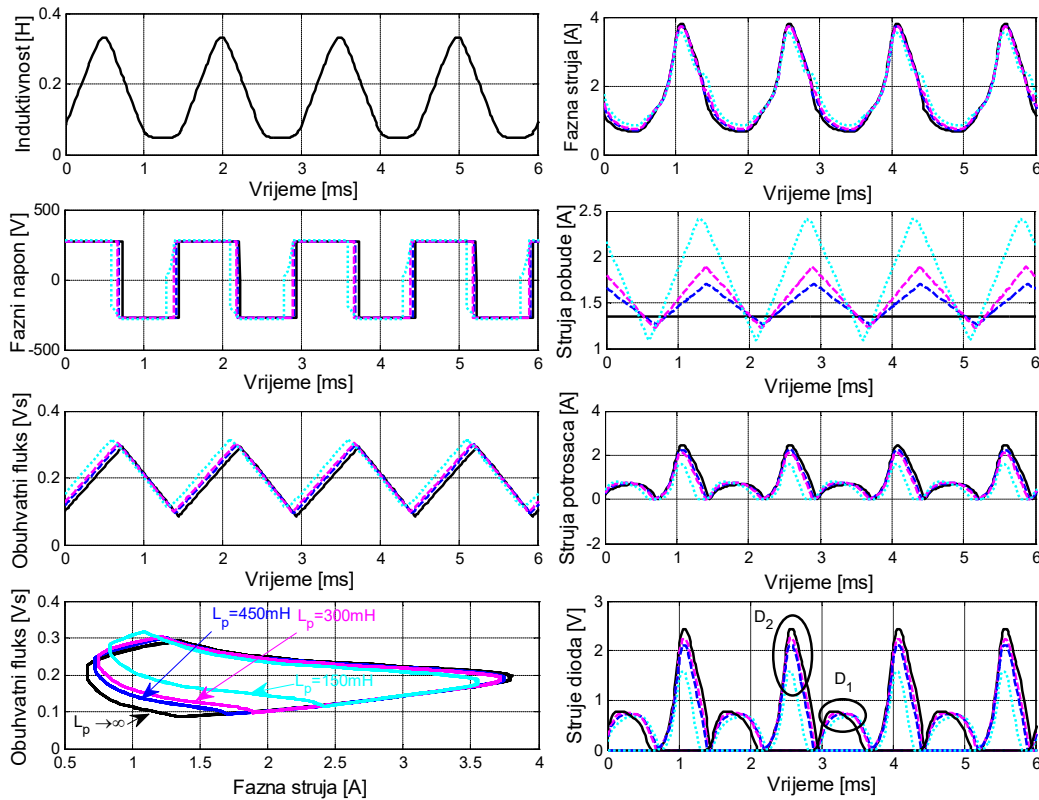


Slika 6.26 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=10000\text{ob/min}$; $L_p \rightarrow \infty$; $I_{ef}=2\text{A}$ i $V_{dc_mk}=270\text{V}$ - puna linija; $I_{ef}=1.5\text{A}$ i $V_{dc_mk}=202.5\text{V}$ - crta-tačka-crta linija; $I_{ef}=1\text{A}$ i $V_{dc_mk}=135\text{V}$ - crta-crta linija).



Slika 6.27 Optimalne $V_{dc} - n$ i $P - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korištenog kabela u kolu pobude ($I_{ef}=2\text{A}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).

Uticaј vrijednosti induktivnosti kalema na vrijednost pobudnog napona i izlazne snage, pri efektivnoj vrijednosti fazne struje od 2A i napona potrošača od 270V, prikazan je na slici 6.30, kao i u PRILOGU E, u Tabelaма P-E.4 – P-E.6. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 6.27 se vidi da upotreba kalema veće induktivnosti omogućava dobijanje veće električne snage. Talasni oblici induktivnosti, fazne struje, faznog napona, struje pobude, struje potrošača, fluksa kao i fluks struja petlje pri optimizovanim vrijednostima pobudnog napona, a pri upotrebi kalemova različitih induktivnosti, prikazani su na slici 6.28. Upotreba kalema veće induktivnosti smanjuje pulsacije pobudne struje, dok sa druge strane, povećava površinu oivičenu fluks-struja petljom (tj. električnu snagu generatora).

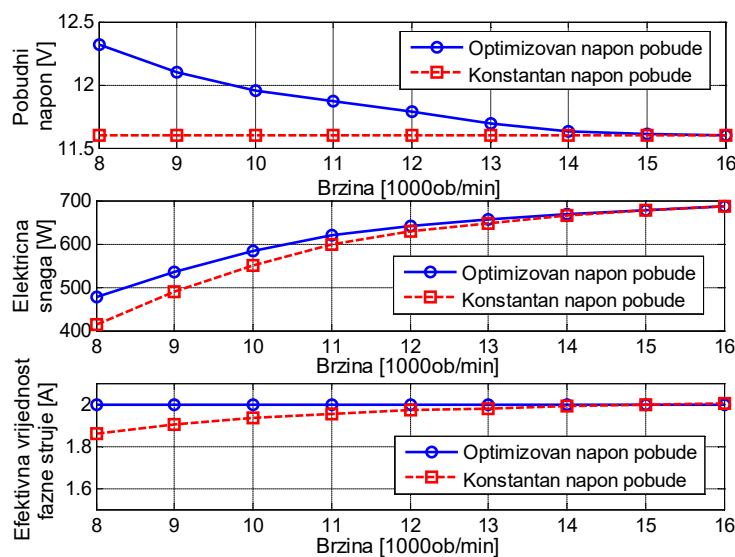


Slika 6.28 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korišćenog kalema u kolu pobude ($n=10000$ ob/min; $I_{ef}=2$ A; $V_{dc,mk}=270$ V; $L_p \rightarrow \infty$ - puna linija, $L_p=450$ mH – crta-tačka-crta linija, $L_p=300$ mH – crta-crta linija i $L_p=150$ mH – tačka-tačka linija).

6.4.1.3 Karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa PCT1 u slučaju konstantne vrijednosti pobudnog napona

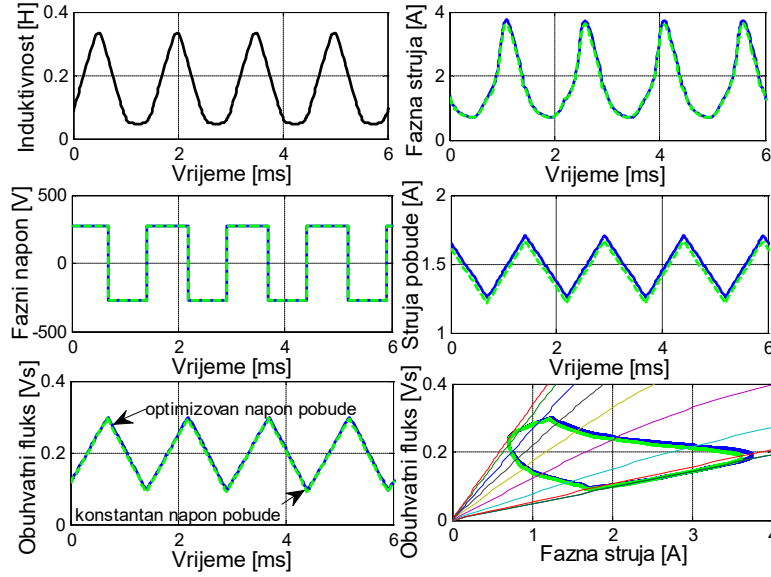
Posmatrajući rezultate prikazane na slici 6.27 vidi se da se optimalna vrijednost pobudnog napona veoma malo mijenja u posmatranom dijapazonu brzina. Konkretno, u

slučaju upotrebe kalema induktivnosti 450mH, promjena pobudnog napona, za dijapazon brzina od 8000ob/min do 16000ob/min, je reda 0.7V. Upravo zbog toga su formirane i izlazne karakteristike SRG-a u slučaju konstantne vrijednosti pobudnog napona i upoređene sa karakteristikama koje se dobijaju pri upotrebi optimizovanih vrijednosti pobudnog napona (slika 6.29, PRILOG E, Tabela P-E.7). U konkretnom slučaju, za konstantnu vrijednost napona pobude je uzeta ona vrijednost za koju je, pri maksimalno dopuštenoj brzini obrtanja od 16000ob/min, efektivna vrijednost struje faze 2A. Kao što se sa slike 6.29 jasno vidi, optimizacijom pobudnog napona povećava se vrijednost električne snage pri manjim brzinama obrtanja, dok je pri većim brzinama obrtanja razlika električnih snaga pri konstantnoj i optimizovanoj vrijednosti napona pobude veoma mala. Takođe, iz prikazanih rezultata se vidi da se i za istu brzinu obrtanja i istu vrijednost napona potrošača može dobiti veća vrijednost snage ako se poveća vrijednost napona pobude. Isto tako, što je veća brzina obrtanja, veća je i vrijednost električne snage generatora.



Slika 6.29 $V_{dc} - n$, $P - n$ i $I_{ef} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za optimizovanu i konstantnu vrijednost napona pobude ($V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$).

Uticaji napona pobude na talasne oblike fazne struje, faznog napona, struje pobude, kao i na fluks-struja petlju, pri brzini obrtanja od 10000ob/min, a pri upotrebi kalema od 450mH, prikazani su na slici 6.30. Sa ove slike se jasno vidi da mala promjena u vrijednosti pobudnog napona ne utiče značajno na promjene talasnih oblika posmatranih veličina.



Slika 6.30 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača za optimizovanu (puna linija) i konstantnu (isprekidana linija) vrijednost napona pobude ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{ef}=2\text{A}$, $L_p=450\text{mH}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).

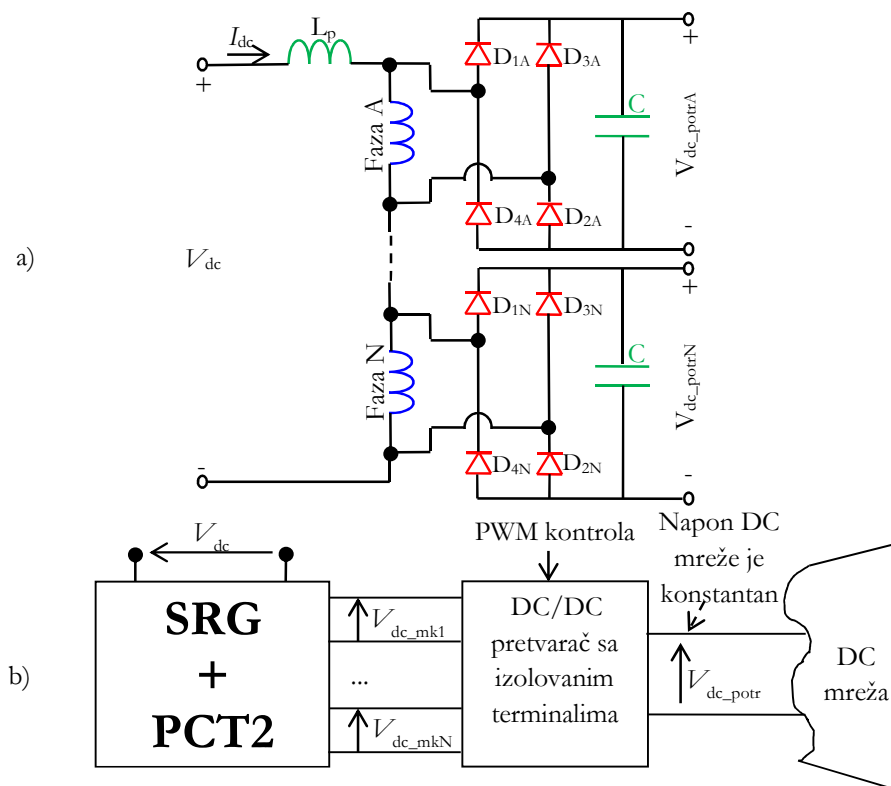
6.4.2 PCT2

Na slici 6.31a prikazana je druga predložena topologija pretvarača, nazvana **PCT2** (**P**roposed **C**onverter **T**opology **2**). Za razliku od PCT1 pretvarača, koji zahtijeva upotrebu N kalemova u kolu pobude za N-fazni SRG, PCT2 pretvarač zahtijeva samo jedan kalem u kolu pobude za N-fazni SRG. Međutim, ovaj pretvarač, kao i PCT1 pretvarač, zahtijeva 4 diode po fazi mašine [129].

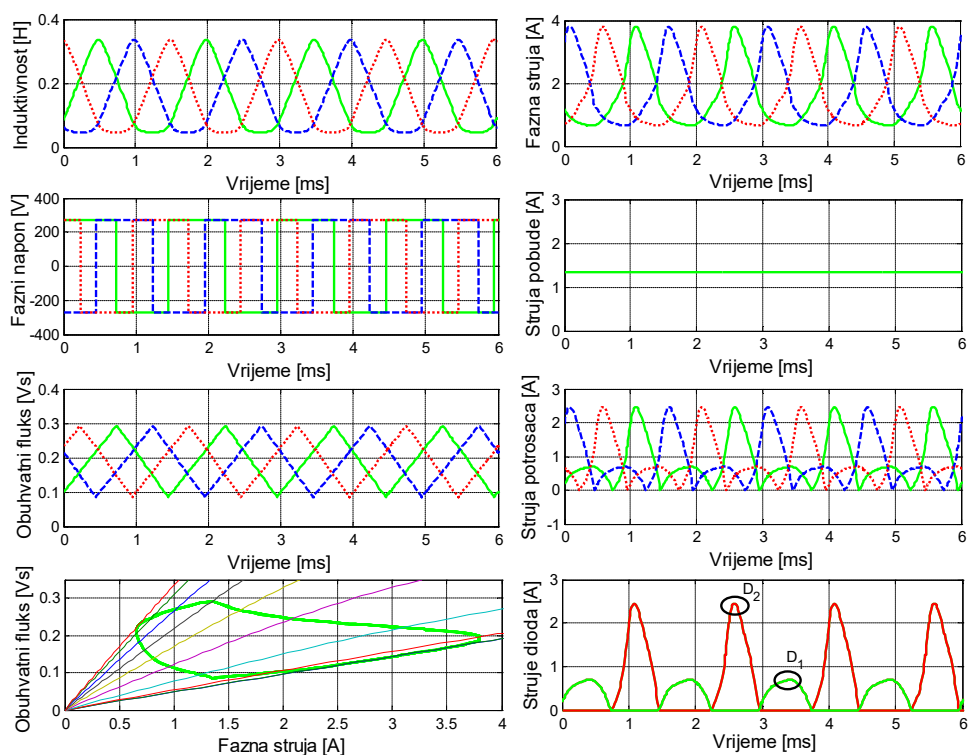
Kod predložene topologije PCT2 sve faze mašine se vezuju na red, pa se njihove sopstvene induktivnosti sabiraju, što doprinosi povećanju ukupne induktivnosti. Pošto se koristi ista kombinacija dioda u pretvaračkom kolu, upravljanje SRG-om sa PCT2 je isto kao i upravljanje SRG-om sa PCT1.

Pri radu SRG-a sa PCT2 pretvaračem faze mašine napajaju međusobno nezavisne potrošače. Ako se želi napajati samo jedan potrošač, ili vršiti povezivanje sa DC mrežom, potrebno je koristiti DC/DC pretvarač sa izolovanim terminalima (slika 6.31b).

Realizovani MATLAB/Simulink model trofaznog SRG-a sa PCT2 prikazan je u PRILOGU F, slika P-F.1. Talasni oblici induktivnosti, fluksa, napona faze, struje faze, struje pobude, struje diode, struje potrošača, kao i fluks-struja petlja SRG-a (Tabela 2.1) pri radu sa PCT2, pri brzini obrtanja od 10000ob/min , prikazani su na slici 6.32.



Slika 6.31 PCT2 pretvarač [129]. a) Šema povezivanja. b) Povezivanje SRG-a na DC mrežu.

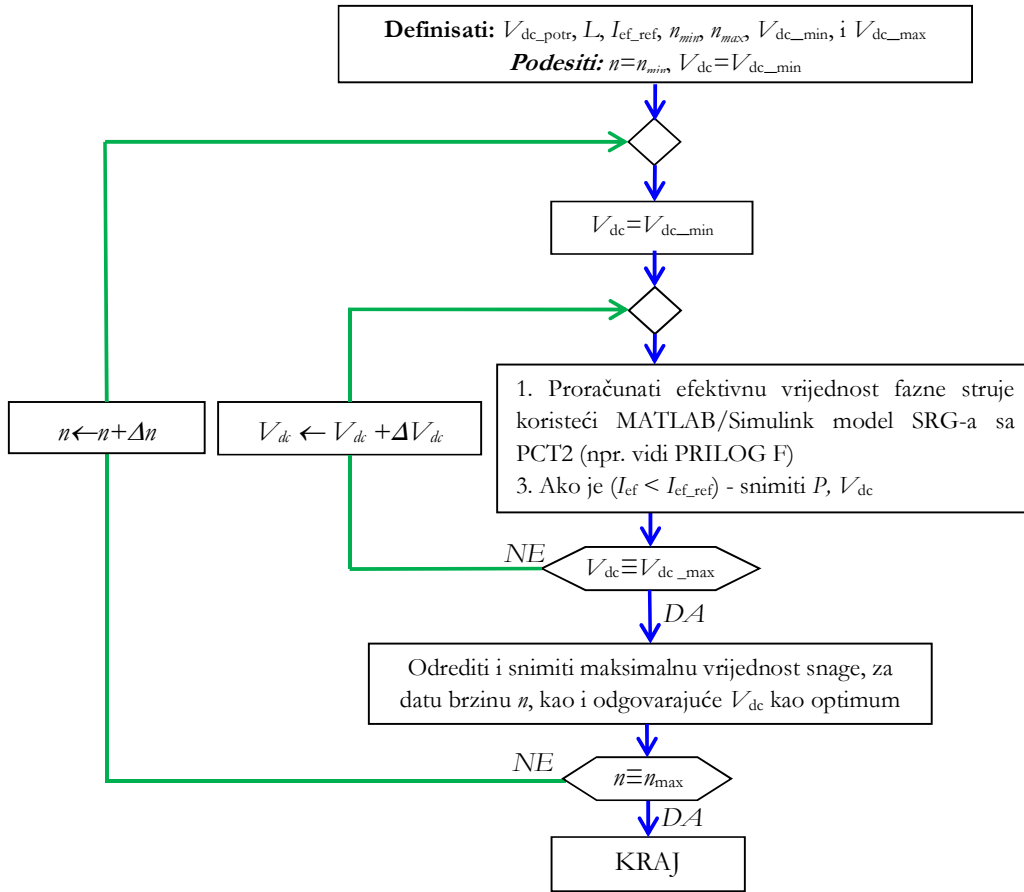


Slika 6.32 Simulacioni rezultati rada SRG-a sa PCT2 ($n=10000\text{ob/min}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$, $L_p \rightarrow \infty$, $I_{dc}=1.35\text{A}$).

Sa slike 6.32 se jasno vidi da PCT2, kao i PCT1, topologija pretvarača omogućava ograničavanje vrijednosti napona na fazi, uz kontinualan tok fazne struje. U simulaciji je korišćen idealan filter u kolu pobude.

6.4.2.1 Postupak za utvrđivanje optimalne vrijednosti pobudnog napona pri radu SRG-a sa PCT2

Optimizacija rada SRG-a sa PCT2, kao i pri radu sa PCT1, podrazumijeva pronalaženje optimalne vrijednosti pobudnog napona (pri određenoj vrijednosti brzine obrtanja, određenoj vrijednosti napona na potrošaču i određenoj vrijednosti induktivnosti kalema u kolu pobude) u cilju maksimizacije električne snage.

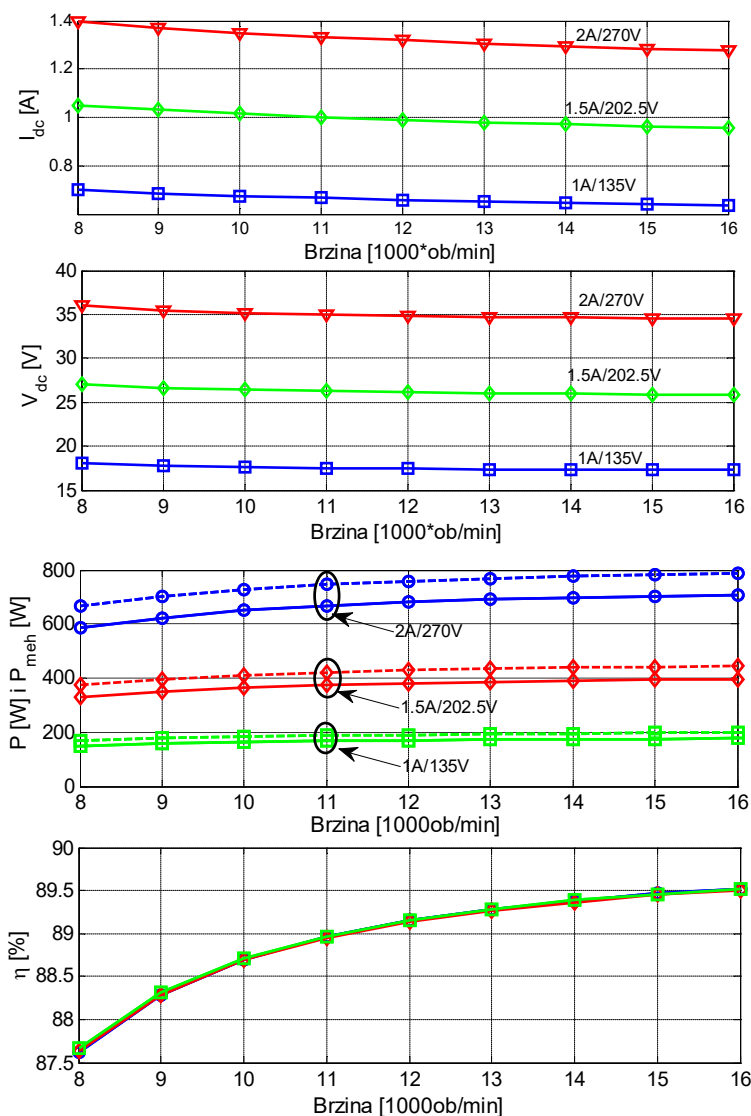


Slika 6.33 Algoritam za optimizaciju pobudnog napona SRG-a pri radu sa PCT2.

Algoritam za optimizaciju pobudnog napona SRG-a pri radu sa PCT2 prikazan je na slici 6.33. Funkcionisanje predloženog optimizacionog algoritma je analogno funkcionisanju optimizacionog algoritma sa slike 6.24.

6.4.2.2 Optimalne karakteristike korišćenog SRG-a pri radu sa PCT2

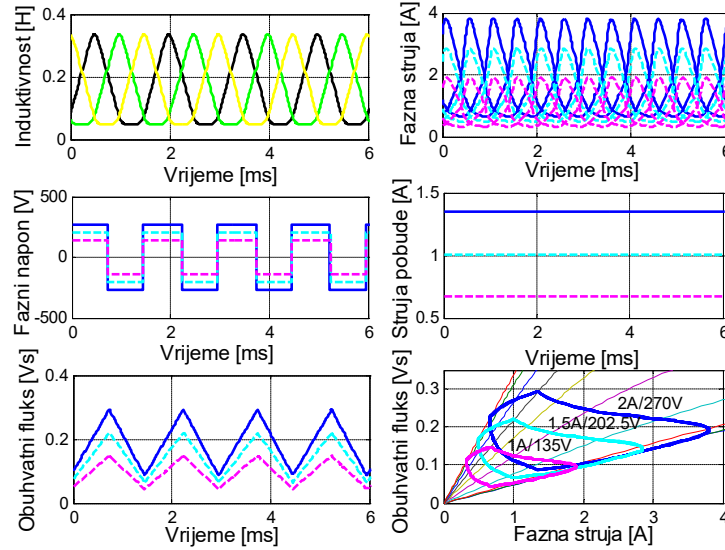
Primjenom optimizacionog postupka prikazanog na slici 6.33 moguće je odrediti optimalne karakteristike SRG-a pri radu sa PCT2 za različite vrijednosti induktivnosti u kolu pobude, napona na potrošaču, željene efektivne vrijednosti fazne struje itd. Optimalne karakteristike SRG-a pri radu sa PCT2, u slučaju upotrebe idealnog filtra u kolu pobude, za različite vrijednosti napona međukola i efektivne vrijednosti struje faze, prikazane su na slici 6.34.



Slika 6.34 Optimalne $I_{dc} - n$, $V_{dc} - n$, $P_{meh} - n$ (isprekidana linija), $P - n$ (puna linija) i $\eta - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača, a za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref} .

Kao i u slučaju rada SRG-a sa PCT1, i pri radu SRG-a sa PCT2 zahtijeva se veća vrijednost napona pobude (struje pobude) pri manjim brzinama obrtanja. Međutim, promjena napona pobude u posmatranom intervalu brzina, od 8000ob/min do 16000ob/min, je manja u poređenju sa promjenom optimalnog napona pobude pri radu SRG-a sa PCT1.

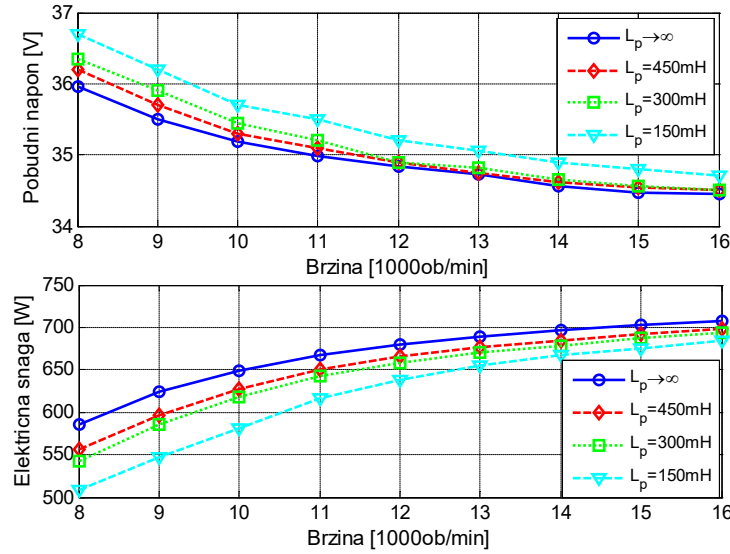
Talasni oblici induktivnosti, obuhvatnih flukseva, napona faza, struja faza, struje pobude, kao i fluks-struja petlja pri radu SRG-a sa PCT2, za različite vrijednosti napona međukola i efektivne vrijednosti struje faze, prikazani su na slici 6.35.



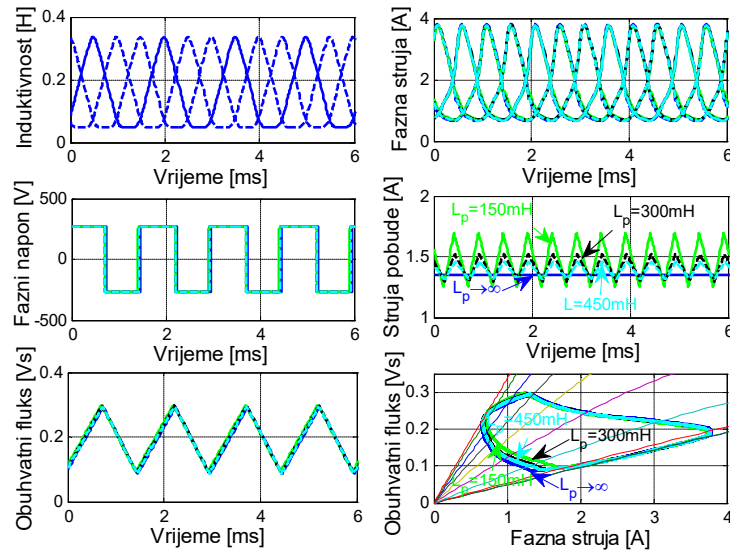
Slika 6.35 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($n=10000\text{ob/min}$; $I_{ef}=2\text{A}$ i $V_{dc_mk}=270\text{V}$ - puna linija; $I_{ef}=1.5\text{A}$ i $V_{dc_mk}=202.5\text{V}$ - crta-tačka-crta linija; $I_{ef}=1\text{A}$ i $V_{dc_mk}=135\text{V}$ - crta-crta linija).

Uticaj induktivnosti kalema korišćenog u kolu pobude na optimalne vrijednosti napona pobude i odgovarajuće vrijednosti električne snage i efikasnosti SRG-a pri radu sa PCT2, a pri efektivnoj vrijednosti fazne struje od 2A i napona potrošača od 270V, prikazan je na slici 6.36 (PRILOGU F, Tabele P-F.4 – P-F.6). Kao što se vidi sa ove slike, povećavanje induktivnosti kalema u kolu pobude ima manji uticaj na vrijednost električne snage SRG-a u poređenju sa njegovim uticajem pri radu SRG-a sa PCT1.

Talasni oblici induktivnosti, fluksa jedne faze, napona jedne faze, struja faze, struje pobude, kao i fluks-struja petlja, pri radu SRG-a sa PCT2 za različite vrijednosti induktivnosti kalema u kolu pobude prikazani su na slici 6.37. Veća vrijednost induktivnosti kalema u kolu pobude izaziva manje pulsacije struje pobude i dobijanje veće površine fluks-struja petlje (veće vrijednosti električne snage).



Slika 6.36 Optimalne $V_{dc} - n$ i $P - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korištenog kabela u kolu pobude ($I_{ef}=2\text{A}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).

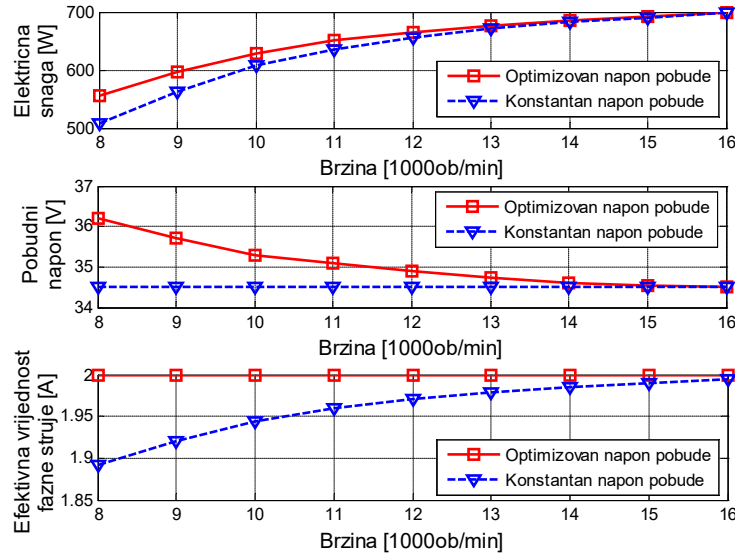


Slika 6.37 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za različite vrijednosti induktivnosti korištenog kabela u kolu pobude ($n=10000\text{ob/min}$; $I_{ef}=2\text{A}$; $V_{dc_mk}=270\text{V}$; $L_p \rightarrow \infty$ – puna linija, $L_p=450\text{mH}$ – crta-tačka linija, $L_p=300\text{mH}$ – crta-crta linija i $L_p=150\text{mH}$ – tačka-tačka linija).

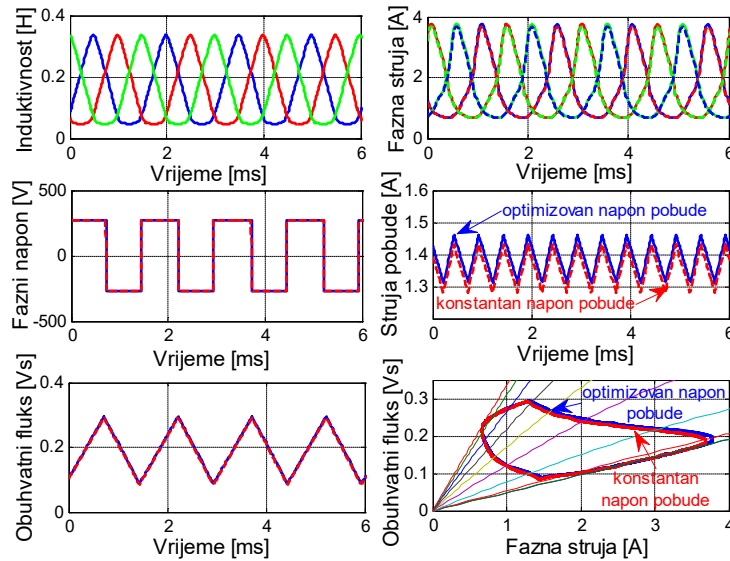
6.4.2.3 Karakteristike korištenog SRG-a pri radu sa PCT1 u slučaju konstantne vrijednosti pobudnog napona

Kao i kod optimalnih karakteristika SRG-a pri radu sa PCT1, i na osnovu rezultata sa slike 6.36 jasno se vidi da je promjena optimalne vrijednosti pobudnog napona u posmatranom dijapazonu brzina izuzetno mala. Zbog toga su formirane i izlazne

karakteristike SRG-a pri radu sa PCT2 u funkciji brzine obrtanja pri konstantnoj vrijednosti napona pobude, a za $L_p=450\text{mH}$. Formirane karakteristike su upoređene sa karakteristikama koje se dobijaju pri optimizovanoj vrijednosti napona pobude na slici 6.38 (PRILOG F, Tabela P-F.7). Za konstantnu vrijednost napona pobude uzeta je ona vrijednost pri kojoj je, za maksimalno dozvoljenu brzinu obrtanja (16000ob/min), efektivna vrijednost fazne struje jednaka nominalnoj vrijednosti (2A).



Slika 6.38 $V_{dc} - n$, $P - n$ i $I_{ef} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za optimizovanu i konstantnu vrijednost napona pobude ($V_{dc_mk}=270\text{V}$, $L_p=450\text{mH}$).



Slika 6.39 Simulacioni rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača za optimizovanu (puna linija) i konstantnu (isprekidana linija) vrijednost napona pobude ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{ef}=2\text{A}$, $L_p=450\text{mH}$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).

Sa prikazane slike 6.38 jasno se vidi da je za brzine obrtanja veće od 12000ob/min razlika karakteristika snage, pri optimizovanoj i konstantnoj vrijednosti napona pobude, zanemarljiva. To praktično znači da u čitavom dijapazonu brzina ne treba vršiti regulacija napona pobude u funkciji brzine obrtanja.

Uticaji napona pobude na talasne oblike fazne struje, faznog napona, struje pobude i fluksa, kao i na fluks-struja petlju, pri brzini obrtanja od 10000ob/min, a pri upotrebi kalema induktivnosti 450mH, prikazani su na slici 6.39. Uočava se veoma mala razlika u talasnim oblicima prikazanih veličina što potvrđuje prethodno izvedene zaključke o vrijednostima električne snage pri upotrebi konstantne i optimizovane vrijednosti napona pobude. Ovaj zaključak važi generalno i za druge vrijednosti induktivnosti korišćenog kalema u kolu pobude, posebno imajući u vidu da vrijednost induktivnosti kalema ne utiče značajno na karakteristike električna snaga-brzina (vidi sliku 6.36).

6.4.3 Poređenje optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a u CCM-u, u DCM-u i pri radu sa PCT1 i PCT2

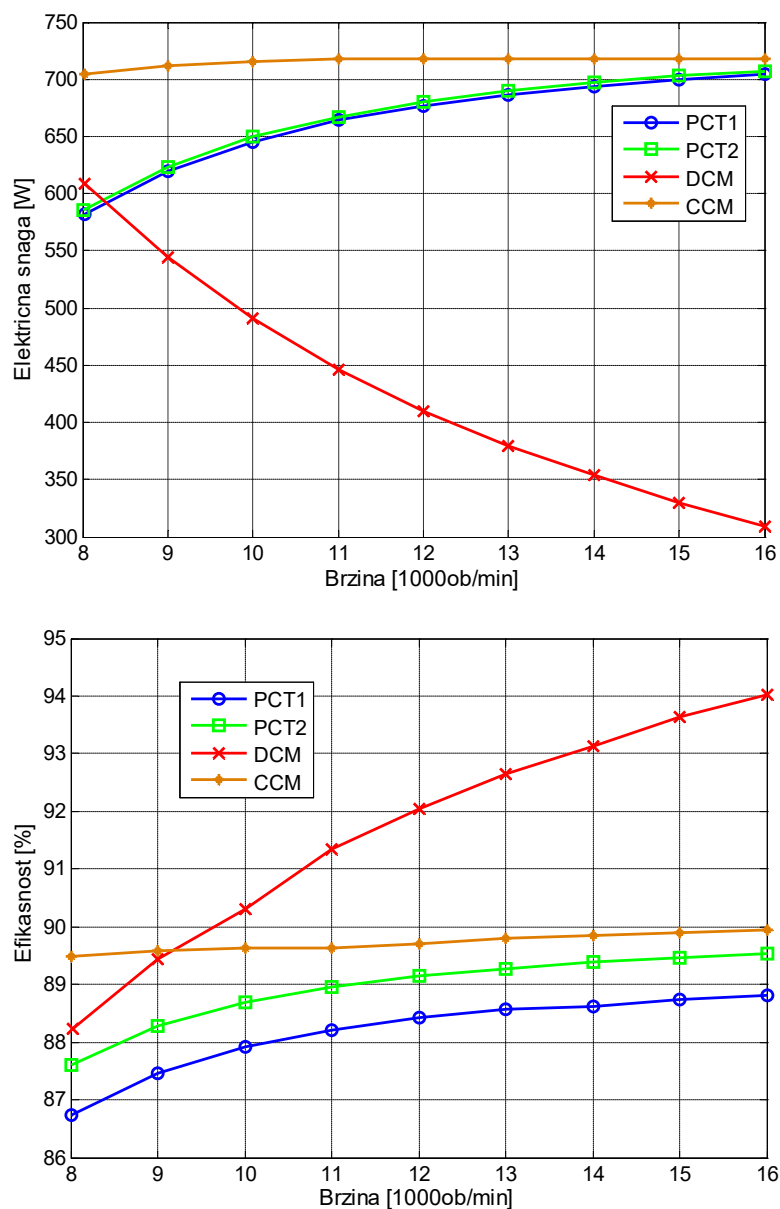
Optimalne karakteristike električne snage i efikasnosti SRG-a pri upotrebi PCT1 i PCT2, a i pri klasičnom upravljanju u CCM-u i u DCM-u, prikazane su na slici 6.40.

Optimalna vrijednost električne snage SRG-a pri radu sa PCT1 jednaka je optimalnoj električnoj snazi SRG-a pri radu sa PCT2. Vrijednost električne snage pri klasičnom upravljanju SRG-om u CCM-u je veća 120W pri 8000ob/min i 10W pri 16000ob/min u odnosu na vrijednost snage pri radu SRG-a sa PCT1 ili sa PCT2. Pri povećanju brzine obrtanja vrijednost električne snage SRG-a pri radu sa PCT1 ili sa PCT2 raste i približava se vrijednosti snage koja se može ostvariti pri klasičnom upravljanju u CCM-u.

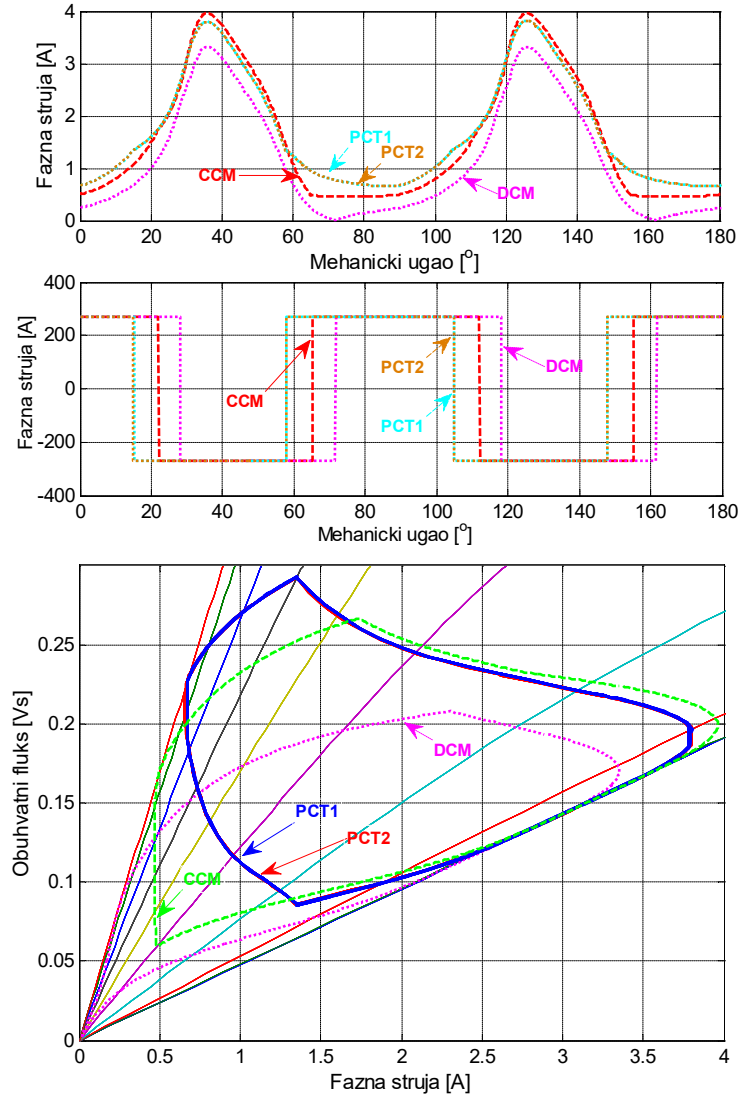
Vrijednosti efikasnosti SRG-a pri optimalnom upravljanju u CCM-u i pri radu sa PCT1 i PCT2 su skoro jednake u čitavom dijapazonu posmatranih brzina (razlika je manja od 2.5%). U posmatranom dijapazonu brzina, efikasnost SRG-a pri radu u DCM-u je najveća, ali je vrijednost električne snage SRG-a najmanja.

Na slici 6.41 izvršeno je poređenje talasnih oblika fazne struje, faznog napona, kao i fluks-struja petlji pri radu SRG-a u DCM-u, CCM-u i pri upotrebi PCT1 i PCT2. Sa ove slike se vidi da je maksimalna vrijednost struje SRG-a pri upotrebi PCT1 ili PCT2 pretvarača manja od maksimalne vrijednosti struje SRG-a pri radu u CCM-u. Takođe,

maksimalna vrijednost fluksa faze SRG-a je manja pri radu u CCM-u u odnosu na rad SRG-a pri upotrebi PCT1 ili PCT2 pretvarača. Međutim, maksimalna vrijednost i fluksa i struje SRG-a je najmanja ako SRG radi u DCM-u.



Slika 6.40 Optimalne P - n i η - n karakteristike SRG-a u DCM-u, u CCM-u i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($I_{cr}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p \rightarrow \infty$).



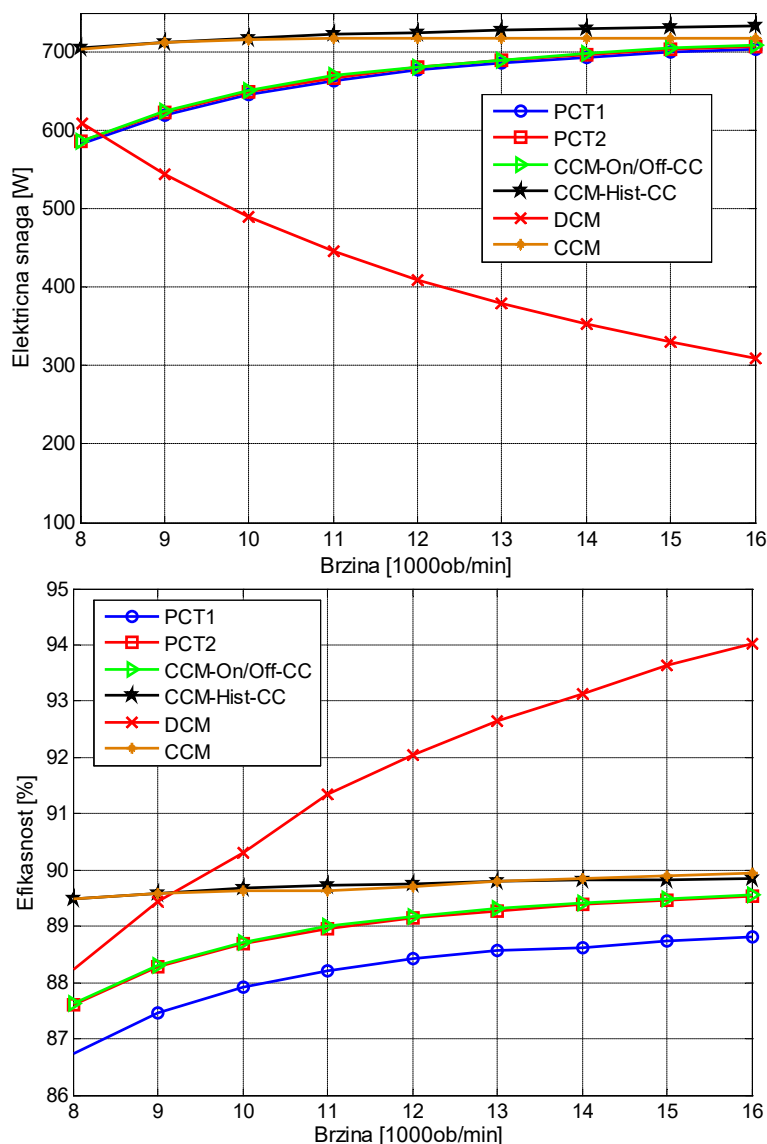
Slika 6.41 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u, u CCM-u i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{ef}=2\text{A}$, $L_p \rightarrow \infty$, $V_{dc_mk}=270\text{V}$).

6.4.4 Poređenje optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a u CCM-u, u DCM-u, pri CCM - On/Off – CC i CCM - Hist – CC upravljanjima i pri radu sa PCT1 i PCT2

Optimalne karakteristike električne snage i efikasnosti SRG-a u funkciji brzine obrtanja pri CCM - On/Off – CC, CCM - Hist – CC, klasičnom upravljanju u CCM-u i DCM-u, kao i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača prikazane su na slici 6.42.

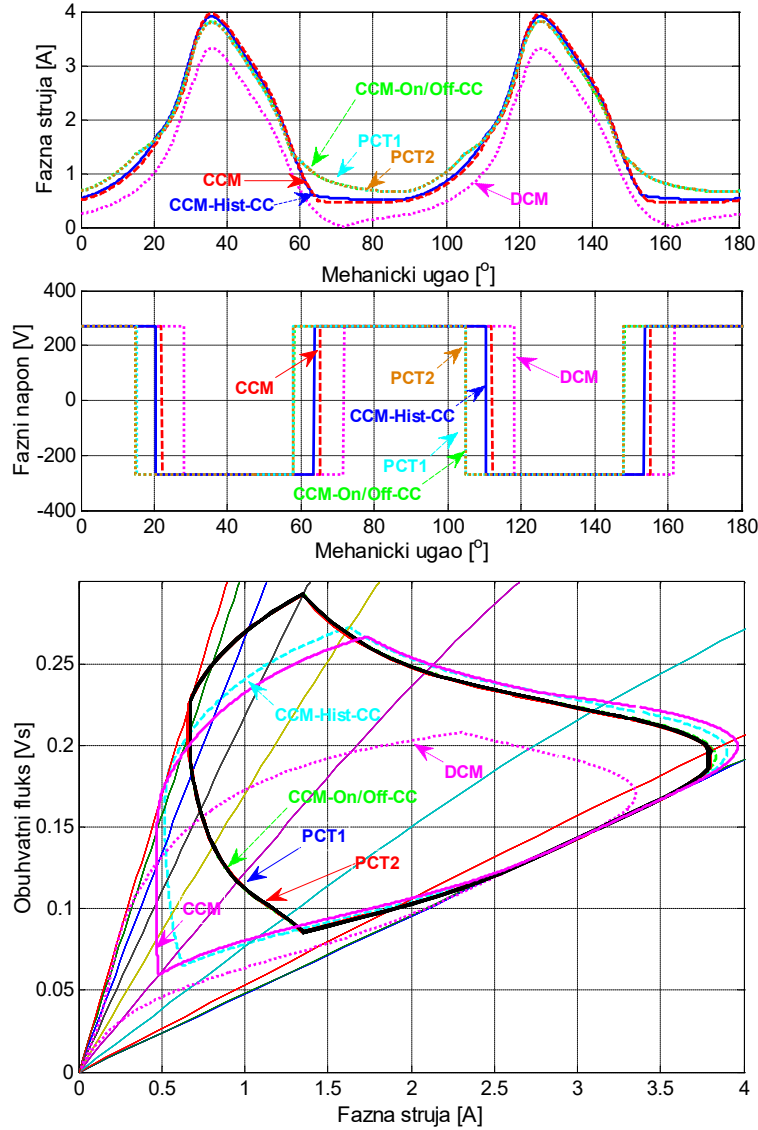
Na osnovu rezultata prikazanih na slici 6.42 se jasno vidi da predložene topologije PCT1 i PCT2 omogućavaju dobijanje iste vrijednosti električne snage SRG-a kao i pri CCM - On/Off - CC upravljanju, a nešto manju snagu nego pri CCM - Hist - CC i klasičnom

upravljanju u CCM-u (pri 8000ob/min ta razlika je 120W ili 17%, a pri 16000ob/min ta razlika je manja od 20W ili 3%). Prema tome, za velike brzine obrtanja, vrijednost električne snage koja se dobija pri upotrebi predloženih topologija pretvarača i pri upotrebi svih razmatranih upravljanja, osim pri radu u DCM-u, je skoro identična.



Slika 6.42 Optimalne $P - n$ i $\eta - n$ karakteristike SRG-a u DCM-u, u CCM-u, pri CCM – On/Off – CC upravljanju, pri CCM – Hist – CC upravljanju i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($I_{cf}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p \rightarrow \infty$).

Efikasnost SRG-a u DCM-u, u odnosu na rad u CCM-u i u odnosu na rad pri ostalim upravljanjima, je najveća. Sa druge strane, efikasnost SRG u CCM-u je identična efikasnosti SRG-a pri radu sa PCT1 i PCT2, kao i pri primjeni CCM - On/Off – CC i CCM - Hist – CC upravljanja (međusobne razlike su manje od 1%).



Slika 6.43 Simulacioni rezultati rada SRG-a u DCM-u, u CCM-u, pri CCM – On/Off – CC upravljanju, pri CCM – Hist – CC upravljanju i pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača ($n=10000\text{ob/min}$, $I_{\text{ef}}=2\text{A}$, $L_p \rightarrow \infty$, $V_{\text{dc_mk}}=270\text{V}$).

Talasni oblici fazne struje, faznog napona i fluks-struja petlje SRG-a pri upotrebi PCT1 i PCT2, pri CCM - On/Off - CC i CCM - Hist - CC upravljanju, kao i pri klasičnom upravljanju u CCM-u i u DCM-u upoređeni su na slici 6.43. Fluks-struja petlje, kao i talasni oblici napona i struje, SRG-a koje se dobijaju pri upotrebi PCT1 i PCT2, kao i pri CCM - On/Off - CC upravljanju su identične. Sa druge strane, talasni oblici struje i napona faze, kao i odgovarajuće fluks struja petlje, koji se dobijaju pri CCM – Hist – CC upravljanju i klasičnom upravljanju u CCM-u su jednake. Za razliku od svih njih, površina fluks-struja petlji pri klasičnom upravljanju u DCM-u je najmanja.

Sa slike 6.43 se takođe vidi da je maksimalna vrijednost struje faze SRG-a pri CCM – Hist-CC upravljanju manje vrijednosti od maksimalne vrijednosti struje SRG-a u CCM-u. Takođe, vidi se da su maksimalna i minimalna vrijednost fluksa SRG-a u CCM-u i pri CCM – Hist-CC upravljanju malo međusobno pomjerene (vidi fluks-struja petlju, ili talasni oblik napona). Takođe, jasno se vidi da se najveća vrijednost fluksa postiže pri radu SRG-a sa PCT1 (ili sa PCT2 ili pri CCM – On/Off – CC upravljanju).

6.4.5 Kvantitativno poređenje predloženih topologija pretvarača sa klasičnim, *C-dump*, *Buck-Boost*, *Miller*-ovim, *Sood*-ovim i *Derishzadeh*-ovim pretvaračem

Kvantitativno poređenje predloženih topologija pretvarača sa klasičnim, *C-dump*, *Buck-Boost*, *Miller*-ovim, *Sood*-ovim i *Derishzadeh*-ovim pretvaračem prikazano je u Tabeli 6-1.

Tabela 6-1 Poređenje predloženih topologija pretvarača sa klasičnim, *C-dump*, *Buck-Boost*, *Miller*-ovim, *Sood*-ovim i *Derishzadeh*-ovim pretvaračem

	Klasični pretvarač		<i>Miller</i> -ov pretvarač	<i>C-dump</i> pretvarač*	<i>Buck-Boost</i> pretvarač**	<i>Sood</i> -ov pretvarač*	<i>Derishzadeh</i> -ov pretvarač***	PCT1	PCT2
	<i>Hard switching</i>	<i>Soft switching</i>							
Broj prekidača	2N	2N	N+1	N+1	N+1	N+1	N	0	0
Broj dioda	2N	2N	N+1	N+1	N+1	N+1	2N	4N	4N
Broj kalemova	0	0	0	1	1	0	2N induktivno spregnutih (transformator)	N	1
Broj kondenzatora	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Ukupni VA zahtjevi prekidača	2N	2N	2N	2(N+1)	2(N+1)	2(N+1)	2N	0	0
IGBT prekidački gubici (r.j.)	2N	N	2N	2(N+1)	2(N+1)	2(N+1)	2N	0	0
IGBT gubici usljed provođenja (r.j.)	2N	3N	2N	N+1	N+1	N+1	N	0	0
Gubici u diodama (r.j.)	N	N	2N	N+1	N+1	N+1	2N	4N	4N
Mogućnost rada u CCM-u	DA	DA	NE	DA	DA	DA	DA	DA	DA
Zahtjev za senzorom pozicije	DA****	DA	DA	DA	DA	DA	DA	NE	NE

* Uzeto je da je napon na kondenzatoru $2U$.

** Uzeto je da je napon na kondenzatoru jednak ulaznom naponu U .

*** Uzeto je da je prenosni odnos transformatora jednak 1.

**** Pri CCM – On/Off – CC i CCM – Hist – CC upravljanju nije potrebno koristiti senzor pozicije.

U odnosu na ostale topologije, predložene topologije pretvarača imaju najveću vrijednost gubitaka u diodama, a zahtijevaju i upotrebu kalema u kolu pobude. Međutim, predložene topologije energetskih pretvarača, osim što omogućavaju rad u CCM-u, ne zahtijevaju prekidačke elemente, a samim tim ni upotrebu senzora pozicije. Sve to doprinosi jednostavnijem upravljanju SRG-om i povećava robustnost cjelokupnog sistema.

6.4.6 Primjena novog bezsenzorskog upravljanja SRG-om u CCM-u, realizovanog upotrebom novih topologija energetskog pretvarača, u vjetrogeneratorskom sistemu

U slučaju upotrebe kalema velike induktivnosti u kolu pobude vrijednost električne snage SRG-a pri radu sa PCT1 i pri radu sa PCT2 je ista. Međutim, optimalne vrijednosti pobudnog napona pri radu sa SRG-a sa PCT2 su tri puta veće od optimalnih vrijednosti pobudnog napona pri radu SRG-a sa PCT1 (vidi slike 6.25 i 6.34). Na osnovu ovoga, a posmatrajući optimizovane zavisnosti mehaničke snage i pobudnog napona u funkciji brzine obrtanja, za različite vrijednosti napona međukola i efektivne vrijednosti struje faze (slika 6.28 i 6.39), može se uočiti da se mehanička snaga i napon pobude mogu predstaviti kao funkcije napona međukola V_{dc_mk} i brzine obrtanja n :

$$P_{meh-P_{CT1}} = P_{meh-P_{CT2}} = f_{P_{meh}}(V_{dc_mk}, n) \quad (6-16)$$

$$V_{dc-P_{CT1}} = \frac{1}{3} V_{dc-P_{CT2}} = f_{V_{dc}}(V_{dc_mk}, n). \quad (6-17)$$

Konkretno, zavisnosti mehaničke snage u funkciji brzine obrtanja, aproksimirane su funkcijom oblika:

$$P_{meh-P_{CT1}} = P_{meh-P_{CT2}} = \left(\frac{V_{dc_mk}}{V_{dc_nom}} \right)^2 (r_1 \cdot n^{r_2} + r_3) \text{ [W]}, \quad (6-18)$$

a zavisnost napona pobude u funkciji napona međukola i brzine obrtanja funkcijom oblika:

$$V_{dc-P_{CT1}} = \frac{1}{3} V_{dc-P_{CT2}} = \left(\frac{V_{dc_mk}}{V_{dc_nom}} \right) (s_1 n^{s_2} + s_3) \text{ [V]}. \quad (6-19)$$

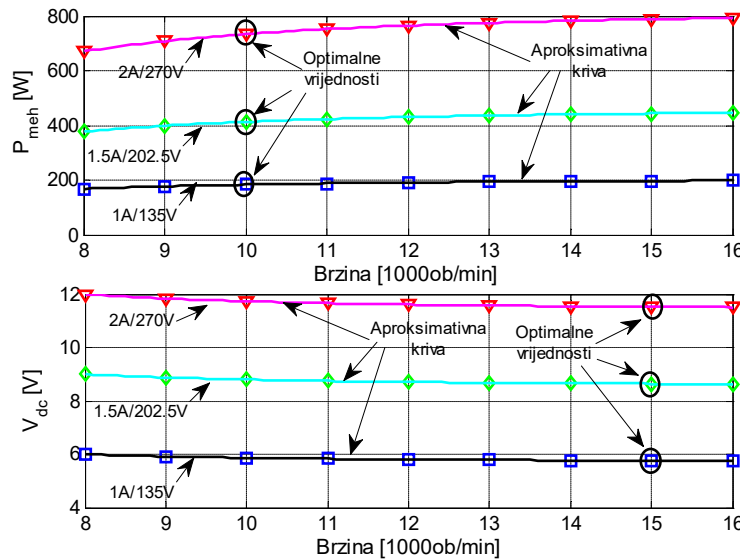
Posmatrajući rezultate prikazane na slikama 6.25 i 6.34, a koristeći metod najmanjih kvadrata, određene su vrijednosti svih nepoznatih koeficijenta: $r_1 = -6.582 \cdot 10^{11}$, $r_2 = -2.471$, $r_3 = 819.9$, $s_1 = 2.93 \cdot 10^{10}$, $s_2 = -2.774$ i $s_3 = 11.42$. Optimalne i aproksimativne vrijednosti pobudnog napona i mehaničke snage, pri radu SRG-a sa PCT1, upoređene su na slici 6.44. Sa ove slike se jasno vidi dobro poklapanje optimalnih i aproksimiranih vrijednosti posmatranih veličina.

Na osnovu prethodnog, ako je poznata vrijednost brzine obrtanja, kao i vrijednost napona međukola lako se može odrediti optimalna vrijednost pobudnog napona:

$$V_{dc_PCT1}^* = \frac{1}{3} V_{dc_PCT2}^* = \left(\frac{V_{dc_mk}}{V_{dc_nom}} \right) (s_1 n^{s_2} + s_3) \text{ [V]}. \quad (6-24)$$

Sa druge strane, ako je poznata referentna vrijednost mehaničke snage i brzina obrtanja može se odrediti i referentna vrijednost napona međukola:

$$V_{dc_mk}^* = V_{dc_nom} \cdot \sqrt{\frac{P_{meh}^*}{(r_1 \cdot n^{r_2} + r_3)}} \text{ [V]}. \quad (6-25)$$

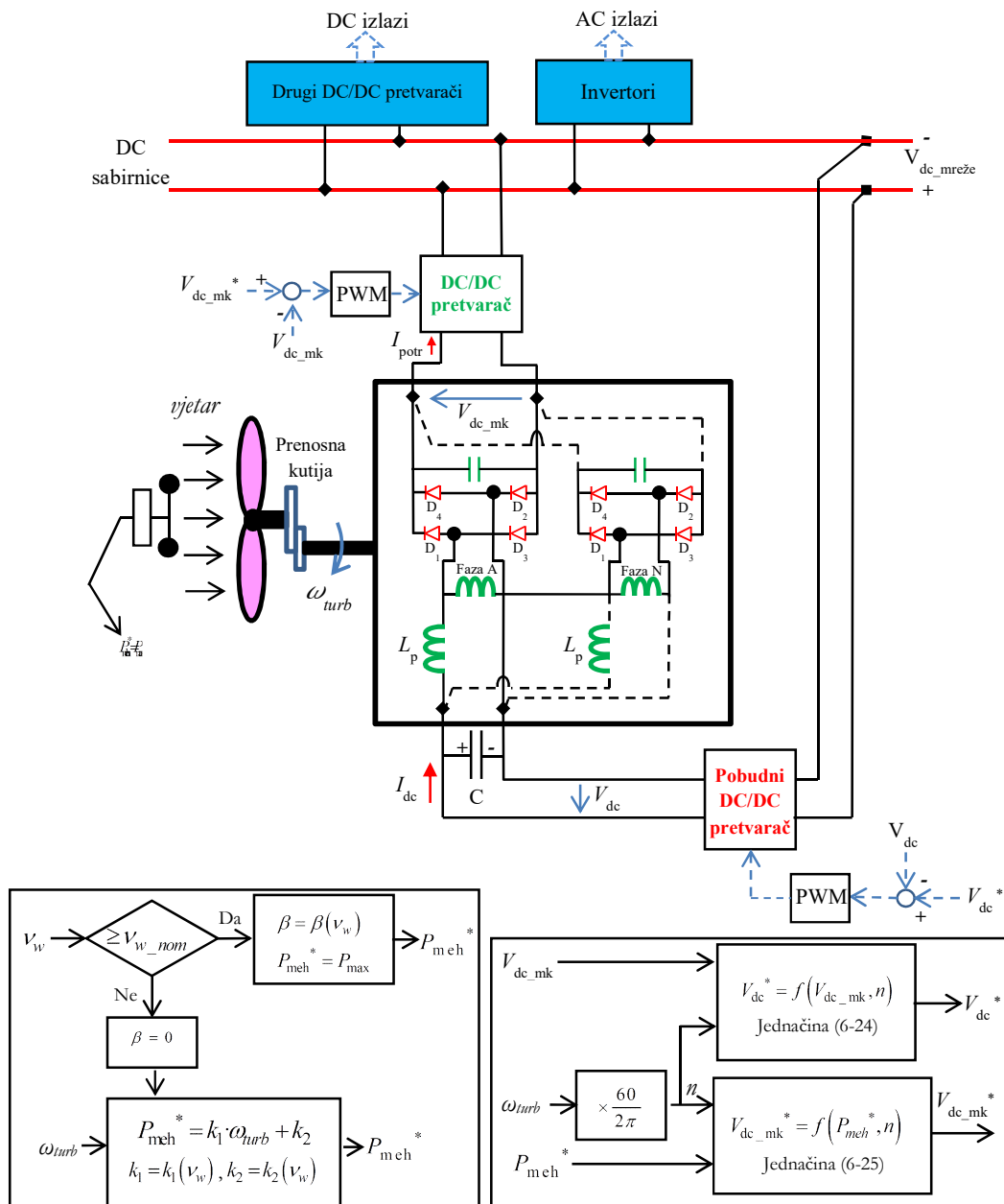


Slika 6.44 Optimalne i aproksimativne $P_{meh} - n$ i $V_{dc} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, za različite vrijednosti napona V_{dc_mk} i struje I_{ef_ref} ($L_p \rightarrow \infty$).

Prema tome, za poznatu vrijednost brzine obrtanja i mehaničke (ulazne) snage generatora može se proračunati i optimalna vrijednost napona međukola, a indirektno i napon pobude.

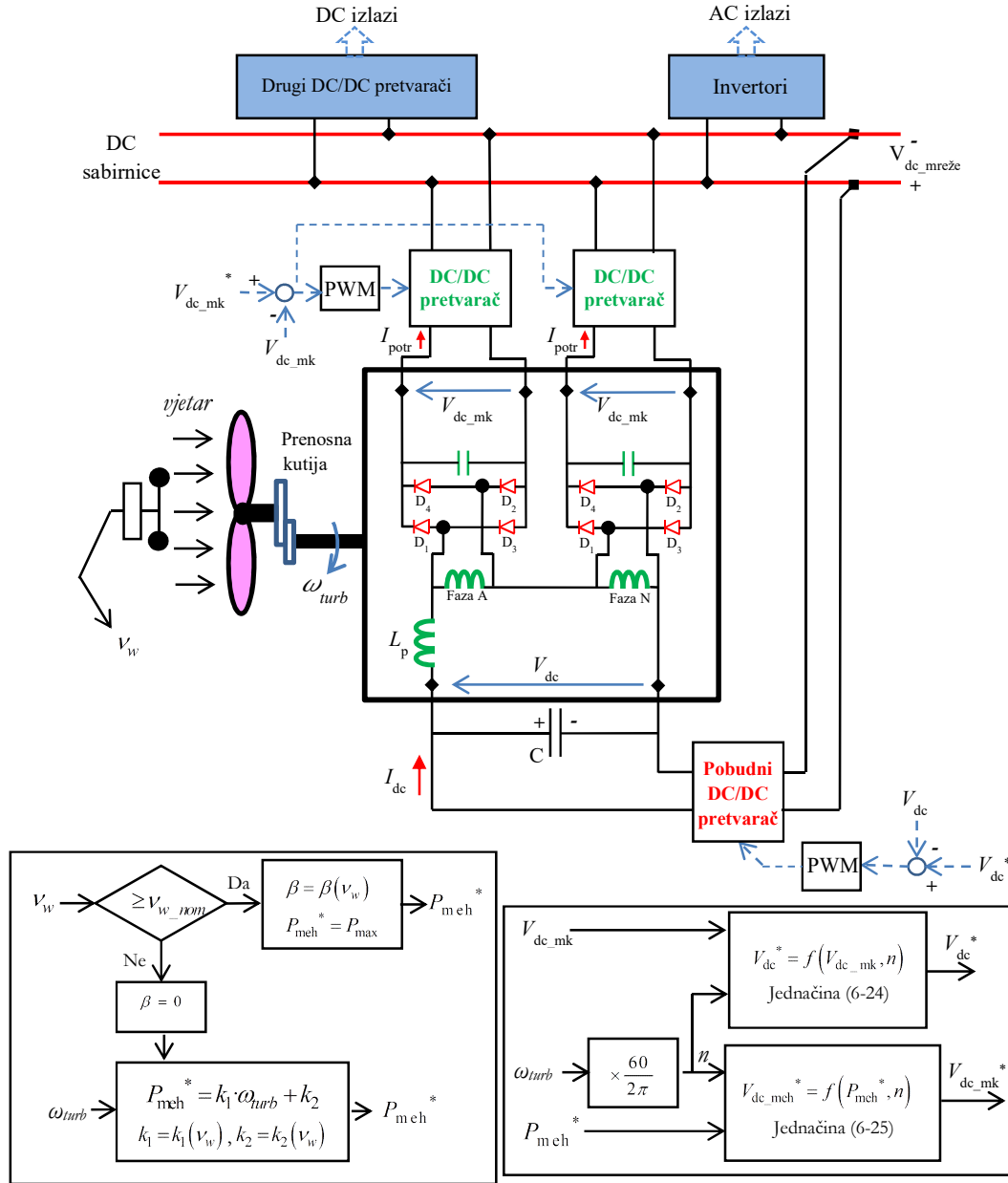
6.4.6.1 Blok dijagram predloženog vjetrogeneratorskog sistema povezanog sa DC mrežom

Rad SRG-a u vjetrogeneratorskim sistemima povezanim na DC mrežu bio je predmet nekoliko istraživanja [143-144]. Međutim, u tim radovima je analiziran rad SRG-a u DCM-u.



Slika 6.45 Konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema sa SRG-om pri upotrebi PCT1 pretvarača, povezanog na DC mrežu.

Konfiguracije vjetrogeneratorskih sistema sa SRG-om, za rad sa predloženim topologijama pretvarača i sa konekcijom na DC mrežu, prikazane su na slikama 6.45 i 6.46. U cilju osiguravanja stabilnog rada SRG-a, definisanje referentne vrijednosti mehaničke snage je isto kao i kod prethodno predloženih konfiguracija vjetrogeneratorskih sistema (slike 5.10 i 6.17).



Slika 6.46 Konfiguracija vjetrogeneratorskog sistema, povezanog na DC mrežu, sa SRG-om pri upotrebi PCT2 pretvarača.

Predloženi vjetrogeneratorski sistem sa SRG-om za rad sa PCT1 i sa konekcijom na DC mrežu (slika 6.45) zahtjeva upotrebu dva DC/DC pretvarača: jedan pretvarač služi za regulaciju napona pobude, a drugi za regulaciju napona međukola. Međutim, kod vjetrogeneratorskog sistema sa N -faznim SRG-om za rad sa PCT2 (slika 6.46) zahtijeva se upotreba $N+1$ pretvarača: N pretvarača za regulaciju napona međukola i jedan pretvarač za regulaciju napona pobude.

DC/DC pretvarač za regulaciju napona pobude radi u *step-down* režimu pošto se napaja sa DC mreže. Za optimalno upravljanje SRG-om, napon pobude treba mijenjati u skladu sa (6-24), koja definiše referentnu vrijednost napona pobude. Razlika između stvarne vrijednosti napona pobude (izlaz iz pobudnog DC/DC čopera) i referentne vrijednosti napona pobude predstavlja kontrolni signal za PWM kontrolu rada DC/DC pretvarača.

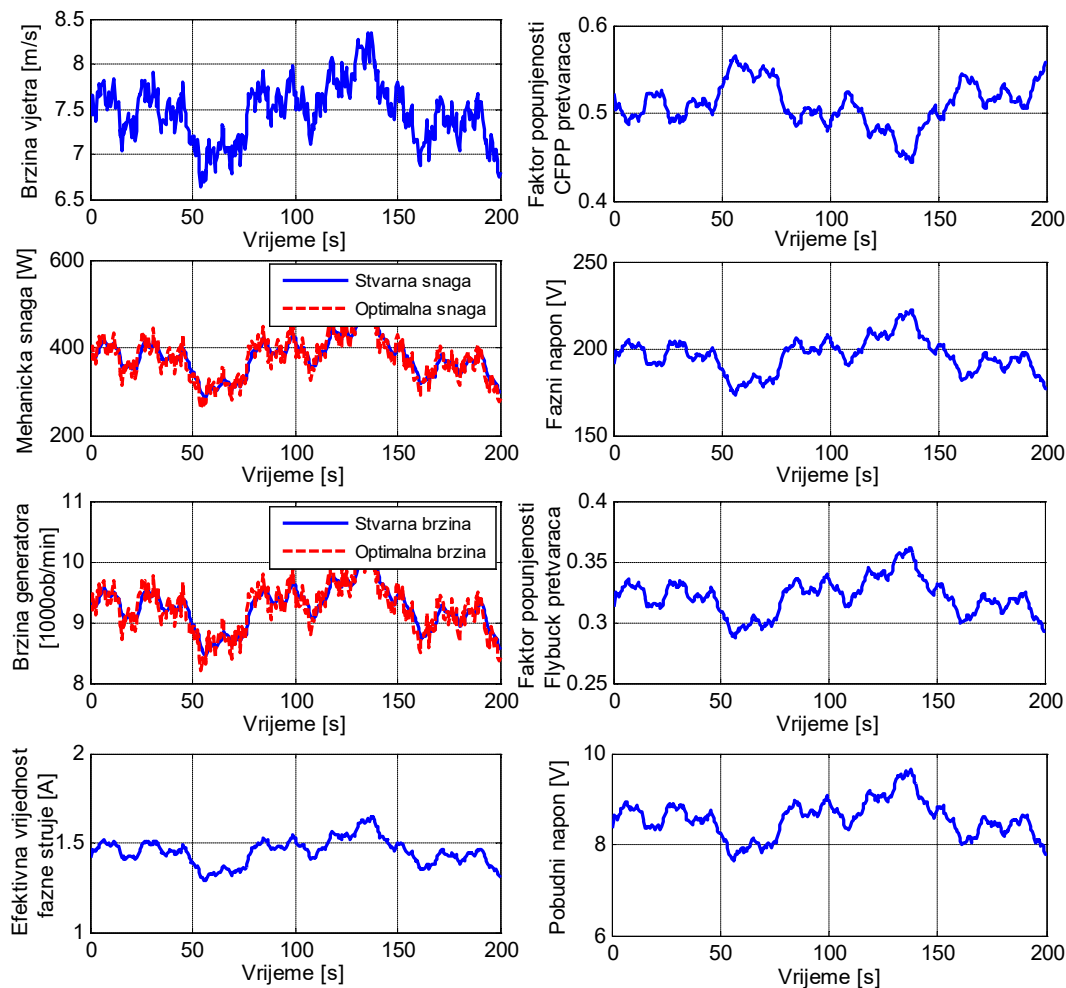
Sa druge strane, za regulaciju napona na fazama se koristi ili jedan ili više (u zavisnosti od topologije pretvarača) drugih DC/DC pretvarača. Naime, kako izlazni napon SRG-a fluktuiraju potrebno je ostvariti njegovu regulaciju u cilju maksimizacije izlazne (električne) snage, shodno (6-25). U tu svrhu se mogu iskoristiti različiti DC/DC pretvarači: neizolovani *boost* pretvarači [145], bidirekciono *Boost* pretvarači [146] ili strujno napajani *push-pull* pretvarači (engl. *Current fed push pull* - CFPP) [144]. CFPP pretvarači predstavljaju veoma dobar izbor jer oni omogućavaju male pulsacije ulazne struje, visok stepen konverzije napona, dok su i veoma pouzdani [144].

6.4.6.2 Simulacioni rezultati

Predložene konfiguracije vjetrogeneratorskih sistema sa SRG-om za rad pri upotrebi PCT1 i PCT2 pretvarača su veoma slične. Zbog toga su u ovom dijelu Poglavlja prikazani samo simulacioni rezultati rada SRG-a sa PCT1 u vjetrogeneratorskom sistemu sa slike 6.45. U simulacijama je posmatrana 400V DC mreža [143-144]; u kolu pobude iskorišćen je *Flybuck* DC/DC pretvarač (odnos broja navojaka namotaja je 5), a za povezivanje faze sa DC mrežom CFPP pretvarač (odnos broja navojaka namotaja je 2) [142-143].

Kao i kod ispitivanja prethodnih vjetrogeneratorskih sistema, u simulacijama je uzeto da se regulator ugla zakretanja lopatica uključuje ako brzina obrtanja generatora postane veća od 11884ob/min. Ova brzina obrtanja generatora odgovara mehaničkoj snazi od 800W (slika 5.9).

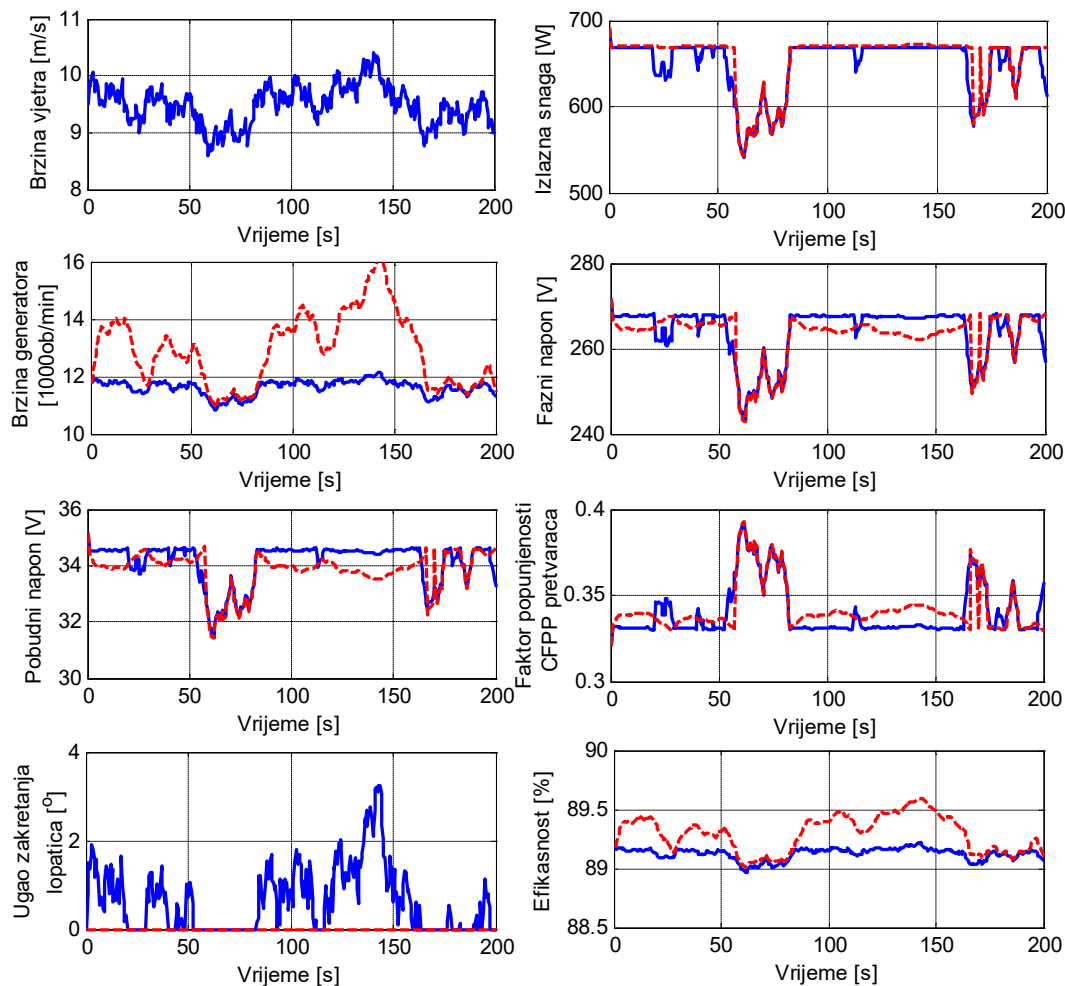
Simulacioni rezultati za rad turbine u Regionu I prikazani su na slici 6.47. Brzina turbine i ulazna snaga veoma dobro prate optimalnu brzinu i optimalnu snagu. U razmatranom slučaju vrijednost napona na fazi i efektivna vrijednost struje su manje od njihovih nominalnih vrijednosti. Izborom prenosnog odnosa transformatora postignuto je da faktor popunjenosti čopera bude u optimalnim granicama [143].



Slika 6.47 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu I pri upotrebi PCT1 pretvarača.

Simulacioni rezultati, sa i bez regulacije ugla zakretanja pri radu turbine u Regionu II, prikazani su na slici 6.48. U posmatranom slučaju, maksimalna vrijednost ugla zakretanja lopatica je 3.1° , dok je maksimalna brzina promjene ugla zakretanja lopatica $1.5^\circ/\text{s}$, što je značajno manje od maksimalno dozvoljene promjene ugla okretanja korišćenog regulatora.

U slučaju da se ne vrši regulacija ugla zakretanja lopatica, varijacije brzine generatora su velike. U posmatranom slučaju varijacije brzine generatora iznose oko 30% nominalne brzine generatora. Međutim, ako je brzina obrtanja generatora veća od nominalne vrijednosti, električna snaga generatora, fazni napon, kao i pobudni napon su konstantni i jednaki nominalnim vrijednostima.



Slika 6.48 Simulacioni rezultati rada SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u Regionu II, sa (puna linija) i bez (isprekidana linija) regulacije ugla zakretanja lopatica, pri upotrebi PCT1 pretvarača.

POGLAVLJE 7

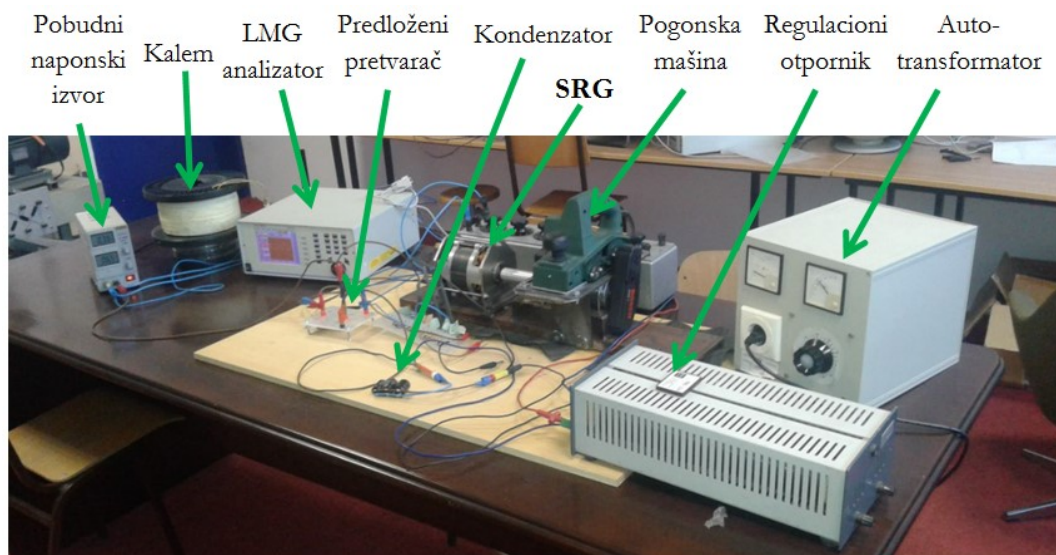
Eksperimentalni rezultati

U ovom poglavlju prikazani su rezultati eksperimentalnog ispitivanja predloženih topologija energetskih pretvarača za rad SRG-a u CCM-u. U prvom dijelu poglavlja date su karakteristike eksperimentalne postavke, kao i rezultati eksperimentalnog ispitivanja rada SRG-a prema osnovnoj šemi povezivanja koja zahtijeva upotrebu jedne diode po fazi mašine. Nakon toga, za svaku predloženu topologiju pretvarača prikazani su eksperimentalno i koristeći simulacije određeni talasni oblici različitih promjenjivih, kao i električna snaga-brzina karakteristike.

7.1 Eksperimentalna postavka

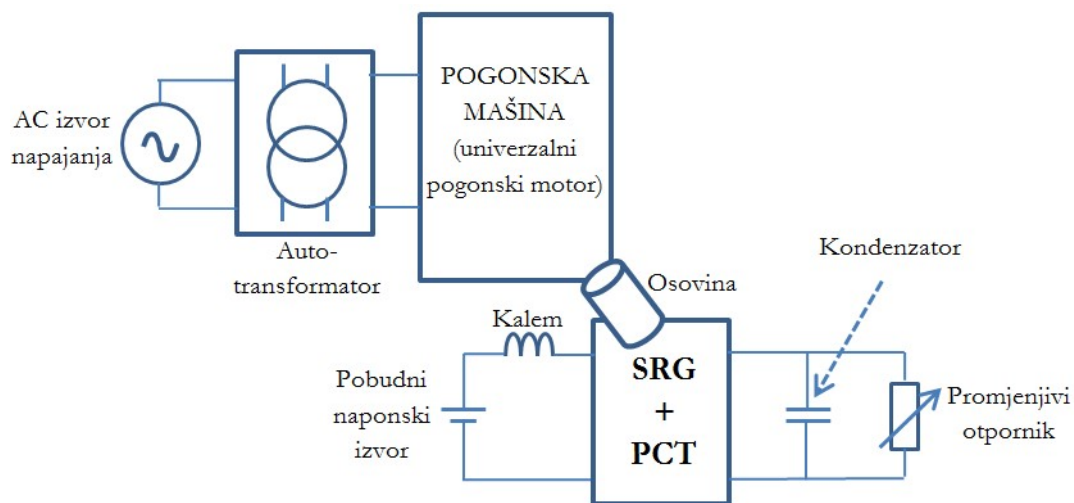
U cilju validacije predloženih topologija energetskih pretvarača za rad SRG-a u CCM-u realizovana je električna postavka prikazana na slici 7.1. Električna postavka je sastavljena od SRG-a, energetskog pretvarača (PCT1 ili PCT2 pretvarač), pobudnih elemenata (izvor jednosmjernog napona i kalem), potrošača (regulacioni otpornik zajedno sa kondenzatorom), pogonske mašine i autotransformatora za napajanja pogonske mašine. Blok dijagram realizovane postavke prikazan je na slici 7.2.

Korišćeni SRG, čiji su podaci dati u Tabeli 2.1, je preko zajedničke osovine spojen sa pogonskom mašinom, univerzalnim AC motorom (0-230V, 50Hz, 500W, maksimalna brzina 20000ob/min) koji se napaja iz autotransformatora (0-500V, 50Hz). Pomoću autotransformatora se reguliše vrijednost napona napajanja pogonske mašine, a samim tim i brzina obrtanja SRG-a.



Slika 7.1 Izgled eksperimentalne postavke.

Za pobudu SRG-a korišćen je podesivi DC izvor napajanja i kalem. Korišćeni laboratorijski DC izvor napajanja ima naponski opseg od 0-18V i strujni opseg od 0-3A. U cilju postizanja većeg napona pobude izvršeno je redno povezivanje više ovakvih naponskih izvora. U ispitivanju su korišćeni projektovani kalemovi, sa vazdušnim jezgrom, čije su izmjerene induktivnosti (otpornosti) 146mH (9.8Ω), 220mH (13.7Ω) i 345mH (22.8Ω).



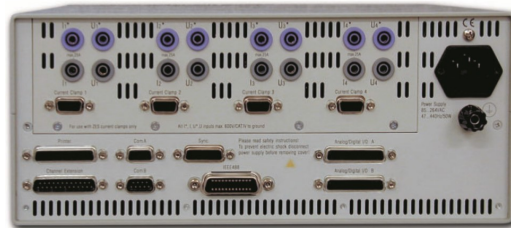
Slika 7.2 Blok dijagram eksperimentalne postavke.

Kao potrošač generatora korišćen je promjenjivi otpornik maksimalnog opsega $1\text{k}\Omega$. Korišćeni otpornik pruža mogućnost finog podešavanja vrijednosti otpora uz maksimalnu dozvoljenu struju od 2A. Paralelno otporniku, u cilju peglanja napona potrošača, korišćen je kondenzator kapacitivnosti $660\mu\text{C}$, 500V.

Za mjerenje struja, napona i snaga korišćen je 4-kanalni analizador (engl. *4-Channel Power Analyzer LMG450, Universal meter for motors, Power Electronics and Energy Analysis*) proizvod ZES ZIMMER-a. Ovaj instrument, osim što ima izuzetno veliku tačnost mjerenja od 0.1%, pruža i mogućnost grafičkog prikazivanja promjenjivih, kao i mogućnost komunikacije sa računarom. Izgled prednje i zadnje strane korišćenog analizatora prikazan je na slici slici 7.3.



Izgled prednje strane LMG analizatora

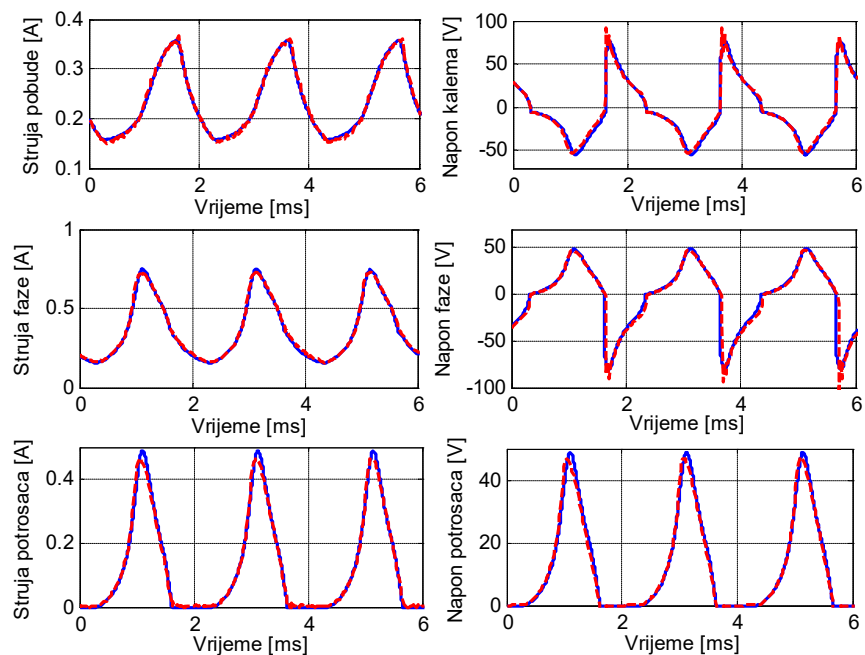


Izgled zadnje strane LMG analizatora

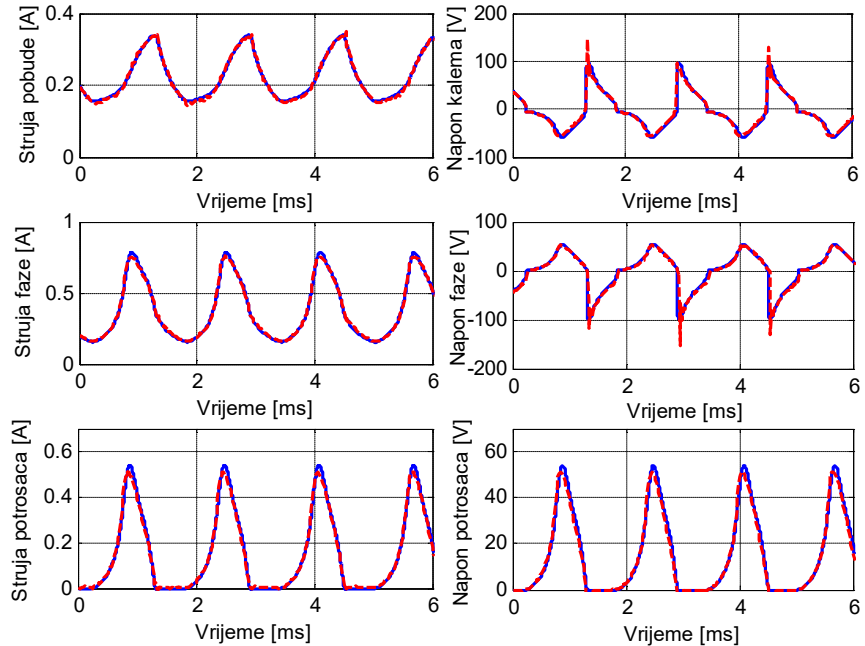
Slika 7.3 Izgled korišćenog 4-kanalnog analizatora.

7.2 Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje

Osnovna šema za bezsenzorski rad SRG-a u CCM-u prikazana je na slici 6.2. Kao što je već naglašeno, ova šema povezivanja faze SRG-a i potrošača omogućava kontinualan režim struje, ali ne obezbjeđuje ograničenje vrijednosti napona na fazi. U cilju provjere navedenih zaključaka izvršeno je eksperimentalno testiranje rada jedne faze korišćenog SRG-a prema predloženoj šemi povezivanja. Za pobudu je iskorišćen DC izvor napona od 5V i kalem od 146mH (9.1Ω). Kao potrošač korišćen je otpornik od 100Ω .



Slika 7.4 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje ($n=7500\text{ob/min}$, $V_{dc}=5\text{V}$, $R_{pot}=100\Omega$, $L_p=146\text{mH}$).



Slika 7.5 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a sa prostim kolom za bezsenzorsko upravljanje ($n=9375\text{ob/min}$, $V_{dc}=5\text{V}$, $R_{pot}=100\Omega$, $L_p=146\text{mH}$).

Talasni oblici pobudne struje, fazne struje, struje potrošača, napona faze, napona potrošača i napona kalema, određeni mjerenjem na eksperimentalnoj postavci i koristeći simulacije, pri brzinama obrtanja od 7500ob/min i 9375ob/min, prikazani su na slikama 7.4 i 7.5, respektivno. Sa prikazanih slika se jasno vidi veoma dobro poklapanje talasnih oblika posmatranih veličina, dobijenih mjerenjem na eksperimentalnoj postavci i koristeći simulacije, što potvrđuje validnost izvedenih zaključaka o upotrebi osnovnog kola za bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u. Takođe, na ovaj način se potvrđuje i validnost korišćenog analitičkog modela SRM-a i njegova korektna implementacija.

7.3 Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a dobijeni primjenom novih topologija energetskih pretvarača

Cilj eksperimentalnog testiranja rada SRG-a sa predloženim topologijama energetskih pretvarača je da se potvrde karakteristike predloženih topologija i da se potvrde izvedeni zaključci, bazirani na simulacionim rezultatima, o opravdanosti primjene predloženih topologija. Zbog toga je, za obje predložene topologije pretvarača, izvršeno poređenje izmjerenih i simuliranih talasnih oblika struja i napona faza, kao i struje pobude i struje potrošača. Takođe, izvršeno je poređenje simuliranih i izmjerenih izlazna (električna) snaga-brzina karakteristika.

7.3.1 Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a dobijeni primjenom PCT1

Šema povezivanja SRG-a i potrošača koristeći PCT1 prikazana je na slici 6.22. Za rad SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača izvršeno je:

- ✓ Poređenje električna snaga-brzina karakteristika, određenih eksperimentalno i koristeći simulacije, za slučaj kada su:
 - efektivna vrijednost struje faze i napon potrošača konstantni,
 - otpornost potrošača i pobudni napon konstantni,
 - napon pobude i napon potrošača konstantni,

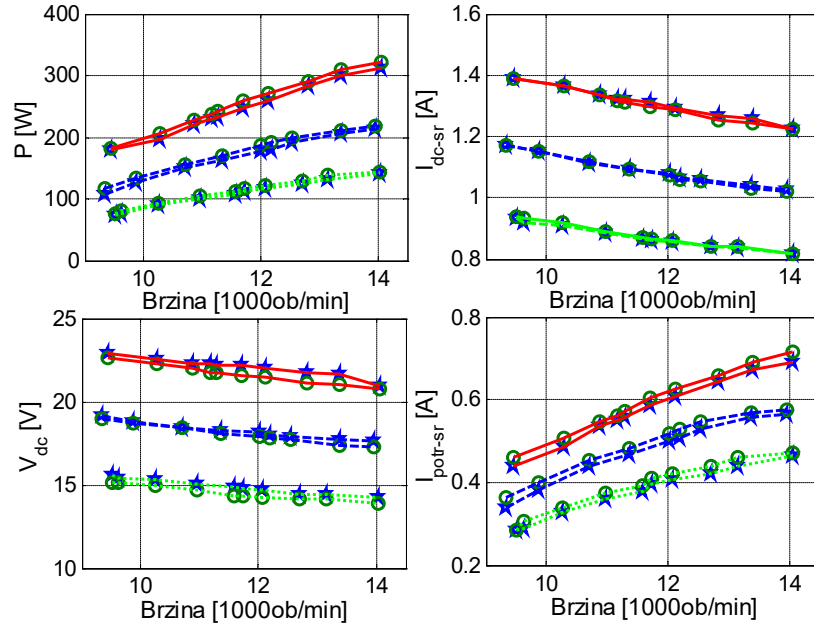
- srednja vrijednost struje pobude i napon potrošača konstantni.
- ✓ Poređenje izmjerenih i simuliranih talasnih oblika struje faze, struje pobude, struje potrošača (na izlazu iz diodnog mosta) i napona faze SRG-a.
- ✓ eksperimentalno testiranje stabilnosti rada SRG-a sa predloženom topologijom
 - pri nagloj promjeni brzine obrtanja, a pri konstantnom naponu pobude i konstantnoj vrijednosti napona potrošača,
 - pri nagloj promjeni napona potrošača, a pri konstantnoj vrijednosti brzine obrtanja i napona pobude.

Zavisnosti izlazne (električne) snage P , napona pobude V_{dc} , srednje vrijednosti struje pobude I_{dc-sr} i srednje vrijednosti struje potrošača $I_{potr-sr}$ u funkciji brzine obrtanja, za različite vrijednosti napona potrošača $V_{dc-potr}$ i efektivne vrijednosti struje faze I_{ef} , određene eksperimentalno i koristeći simulacije, prikazane su na slici 7.6. Uticaj induktivnosti korišćenog kalema u kolu pobude na vrijednost električne snage i napona pobude prikazan je na slici 7.7.

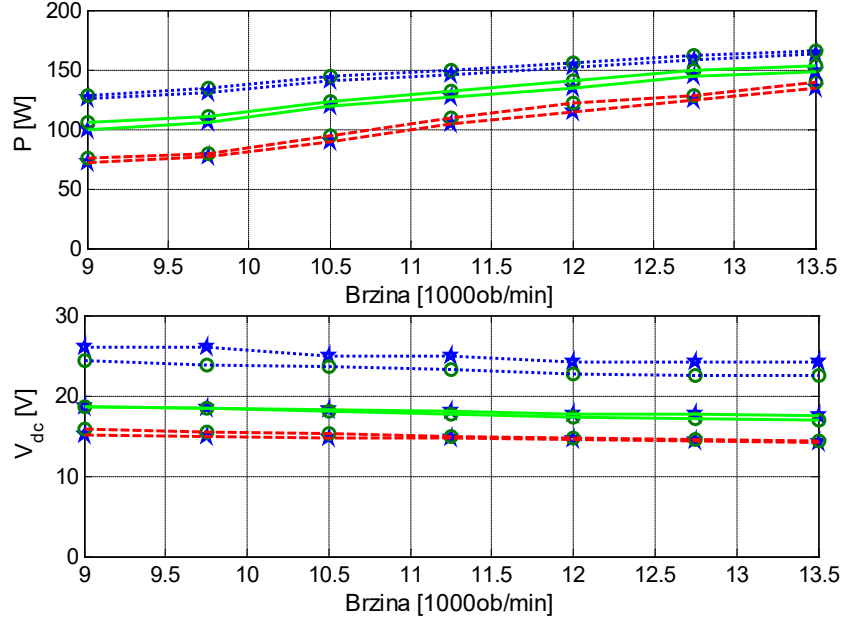
Zavisnosti P i I_{potr} u funkciji brzine obrtanja, određene eksperimentalno i koristeći simulacije, za različite vrijednosti otpornosti potrošača R_{potr} , a u slučaju konstantne vrijednosti V_{dc} , prikazane su na slici 7.8. Uticaj V_{dc} na P i $I_{potr-sr}$, u slučaju kada SRG napaja potrošač konstantne otpornosti, prikazan je na slici 7.9.

Zavisnosti P , I_{dc-sr} i $I_{potr-sr}$ u funkciji brzine obrtanja, za različite $V_{dc-potr}$ i V_{dc} , pri čemu je odnos $V_{dc-potr}$ i V_{dc} konstantan, određene eksperimentalno i koristeći simulacije, prikazane su na slici 7.10. Na kraju, na slici 7.11 prikazane su zavisnosti P i $I_{potr-sr}$ u funkciji brzine obrtanja, za različite vrijednosti I_{dc-sr} i $V_{dc-potr}$, pri čemu je odnos I_{dc-sr} i $V_{dc-potr}$ konstantan.

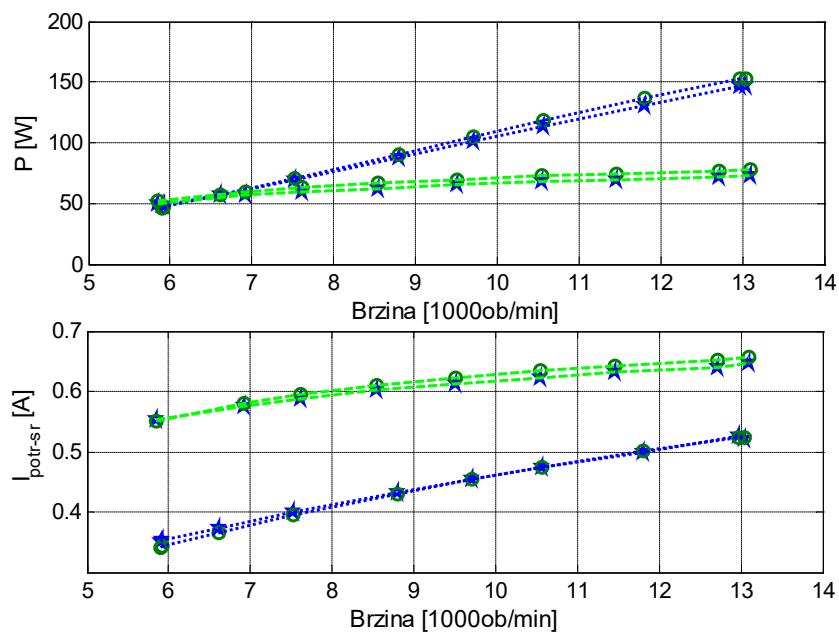
Poređenje talasnih oblika pojedinih veličina, određenih mjerenjem na eksperimentalnoj postavci i koristeći simulacije, prikazano je na slikama 7.12 – 7.16. Konkretno, na slikama 7.12-7.15 prikazano je poređenje talasnih oblika struje faze, struje pobude, napona faze i struje potrošača. Na slici 7.16 prikazani su talasni oblici struje pobude za različite vrijednosti induktivnosti kalema u kolu pobude.



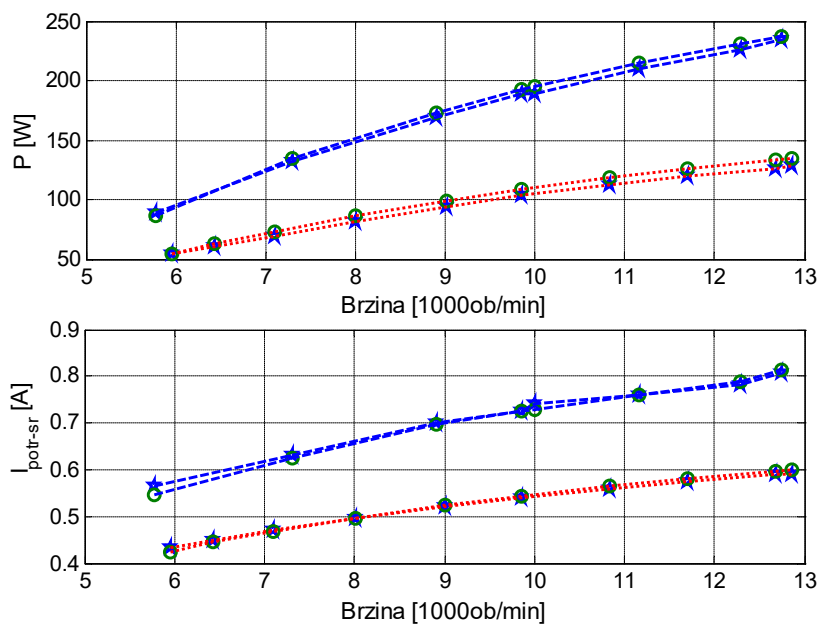
Slika 7.6 $P - n$, $V_{dc} - n$, $I_{dc-sr} - n$ i $I_{potr-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($L_p=345\text{mH}$; $V_{dc_potr}=135\text{V}$ i $I_{ef}=1\text{A}$ - tačka-tačka linija, $V_{dc_potr}=168.75\text{V}$ i $I_{ef}=1.25\text{A}$ - crta-crta linija i $V_{dc_potr}=202.5\text{V}$ i $I_{ef}=1.5\text{A}$ - puna linija).



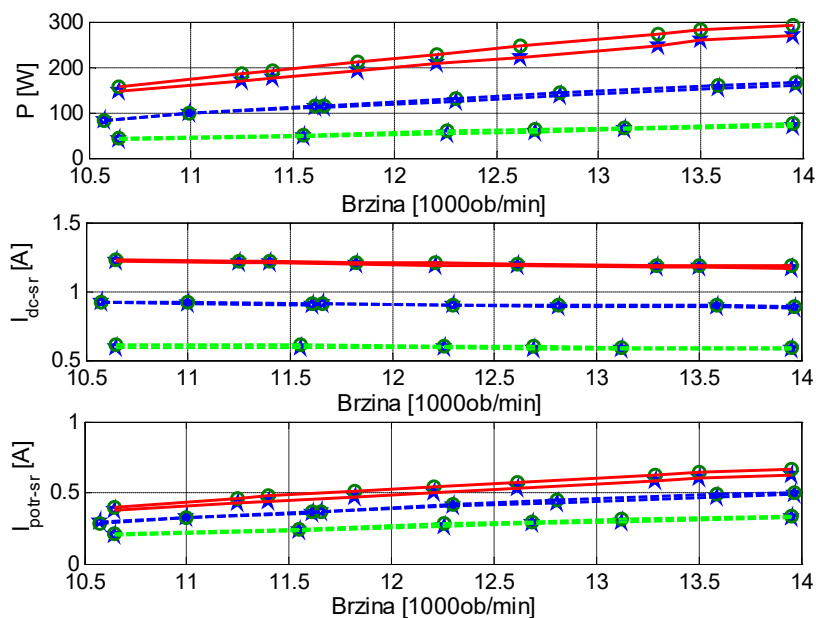
Slika 7.7 $P - n$ i $V_{dc} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić, za različite vrijednosti induktivnosti ($V_{dc_potr}=135\text{V}$; $I_{ef}=1\text{A}$; $L_p=345\text{mH}$ - tačka-tačka linija, $L_p=220\text{mH}$ - puna linija i $L_p=145\text{mH}$ - crta-crta linija).



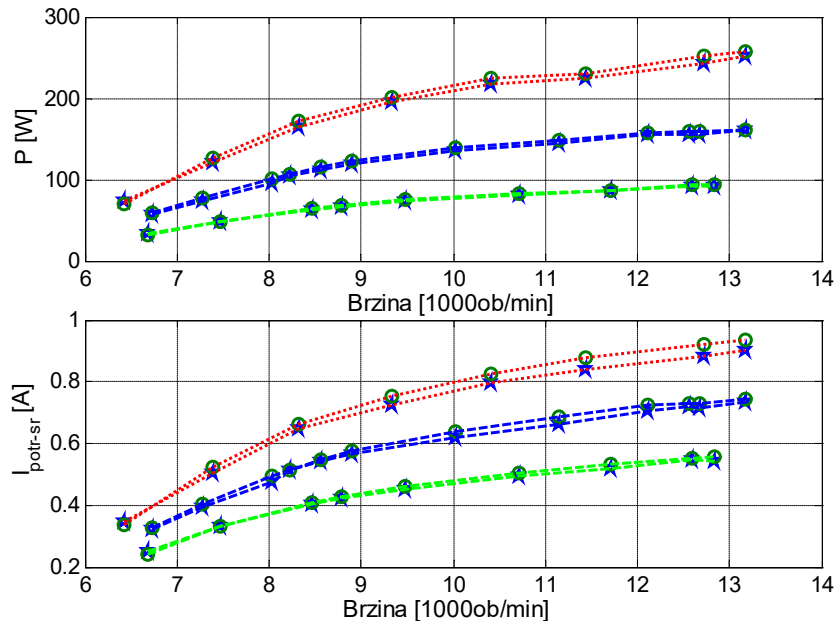
Slika 7.8 $P - n$ i $I_{dc-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($V_{dc}=15V$; $L_p=345mH$; $R_{pot}=100\Omega$ - crta-crta linija, $R_{pot}=300\Omega$ - tačka-tačka linija).



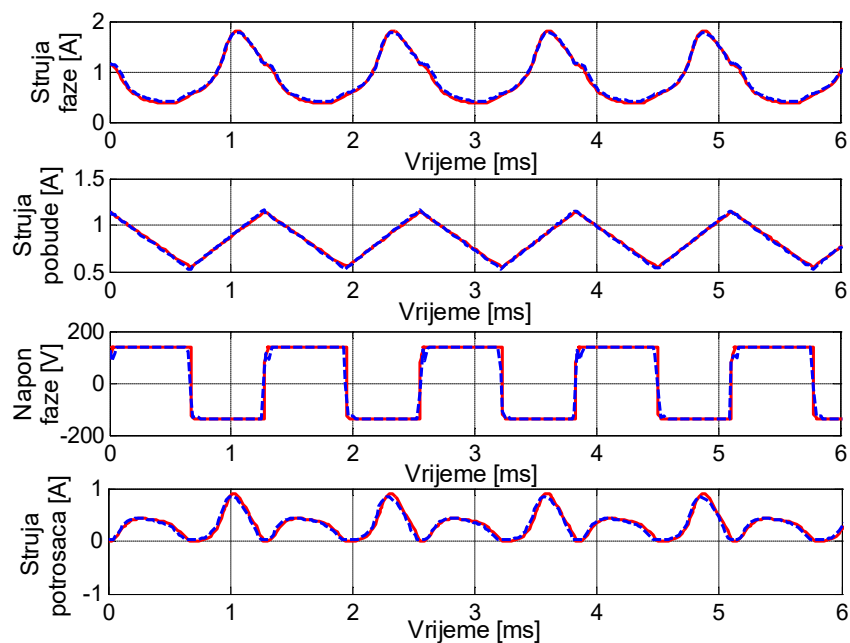
Slika 7.9 $P - n$ i $I_{dc-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($R_{pot}=200\Omega$; $L_p=345mH$; $V_{dc}=15V$ - tačka-tačka linija i $V_{dc}=20V$ - crta-crta linija).



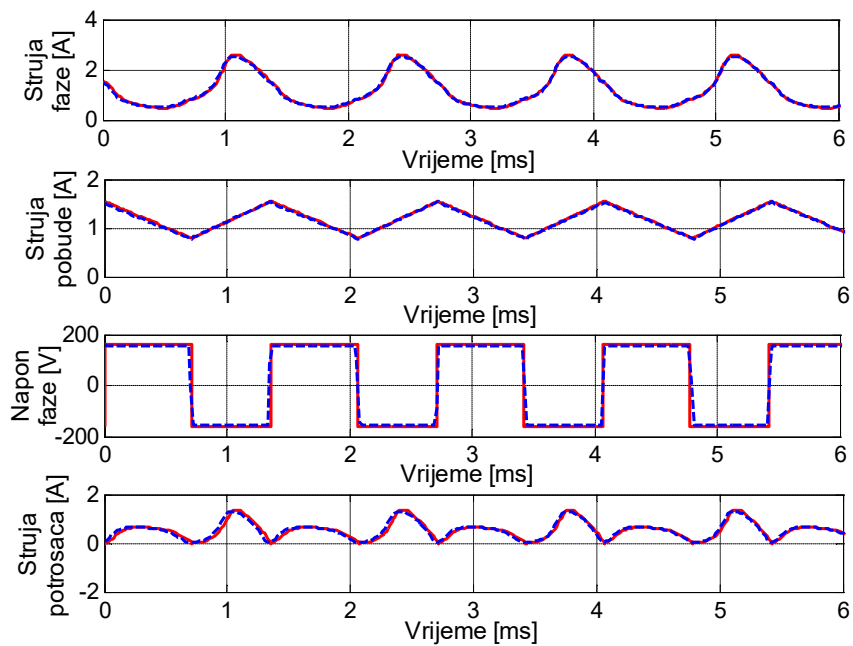
Slika 7.10 $P - n$, $I_{dc-sr} - n$ i $I_{potr-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci – zvjezdica i koristeći simulacije – kružić ($L_p=345\text{mH}$; $V_{dc}=10\text{V}$ i $U_{ef}=100\text{V}$ - crta-crta linija, $V_{dc}=15\text{V}$ i $U_{ef}=150\text{V}$ - crta-tačka-crta linija i $V_{dc}=20\text{V}$ i $U_{ef}=200\text{V}$ - puna linija).



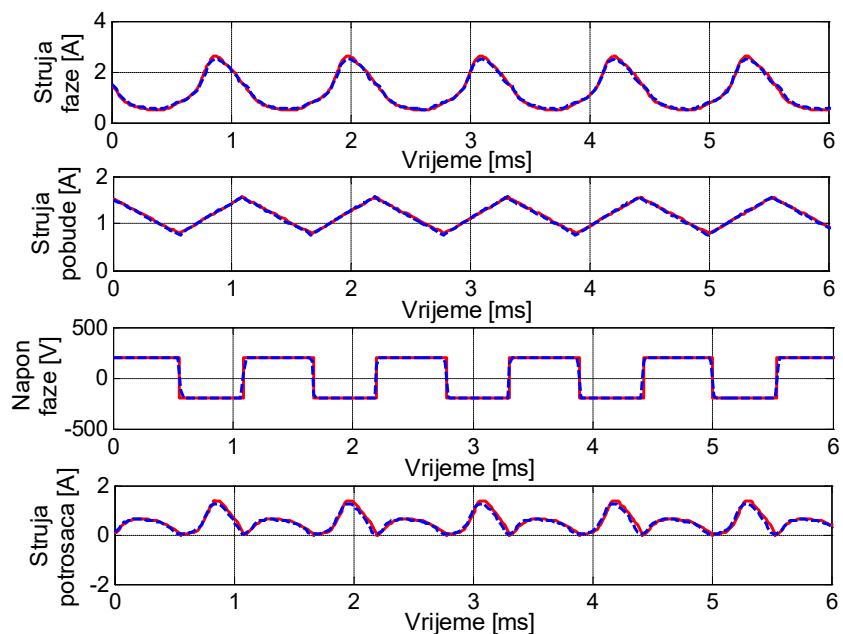
Slika 7.11 $P - n$ i $I_{dc-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci – zvjezdica i koristeći simulacije – kružić ($V_{dc_potr}=75\text{V}$ i $I_{dc-sr}=0.75\text{A}$ - crta-crta linija, $V_{dc_potr}=100\text{V}$ i $I_{dc-sr}=1\text{A}$ - crta-tačka-crta linija, $V_{dc_potr}=125\text{V}$ i $I_{dc-sr}=1.25\text{A}$ - tačka-tačka linija; $L_p=345\text{mH}$).



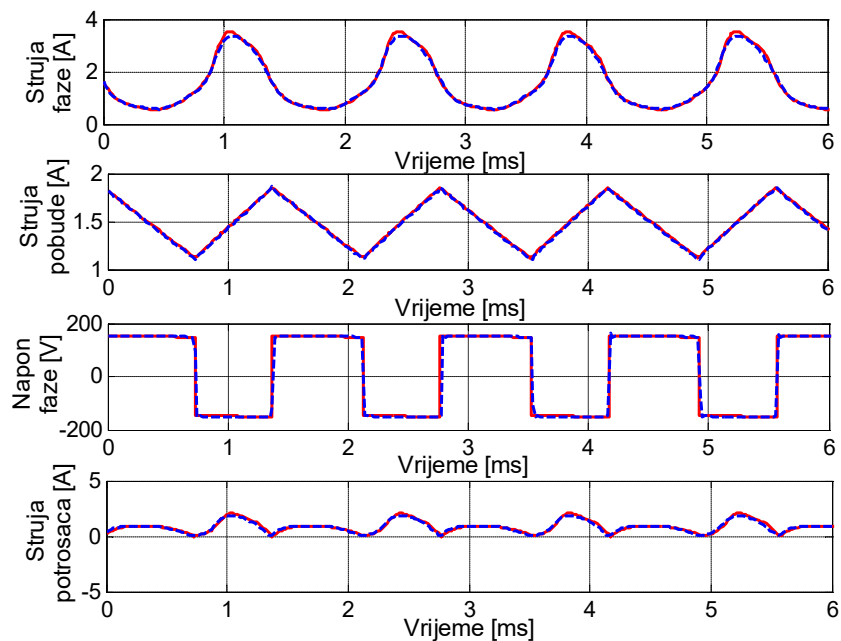
Slika 7.12 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=11730\text{ob/min}$, $I_{\text{ef}}=1\text{A}$, $V_{\text{dc_potr}}=135\text{V}$ i $L_p=345\text{mH}$)



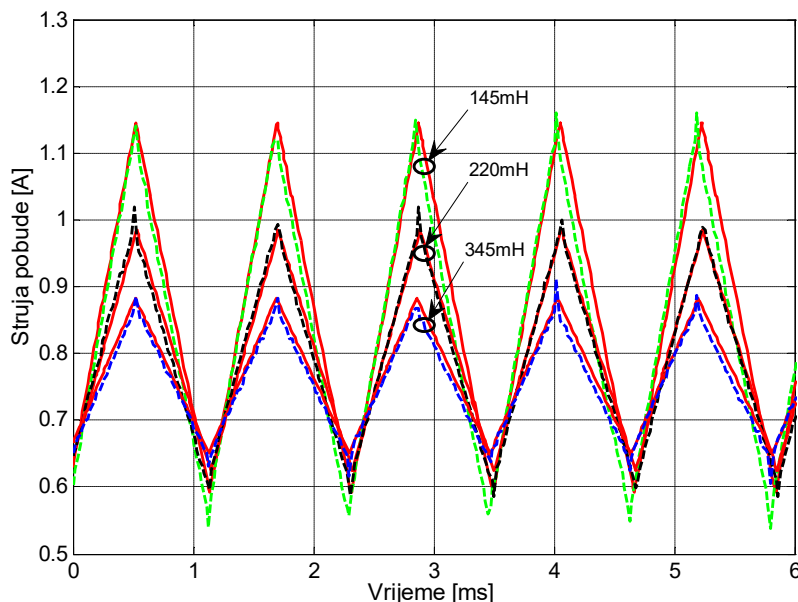
Slika 7.13 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=10070\text{ob/min}$, $R_{\text{pot}}=300\Omega$, $V_{\text{dc}}=20\text{V}$ i $L_p=345\text{mH}$)



Slika 7.14 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=13500$ ob/min, $V_{dc}=20$ V i $V_{dc_potr}=200$ V i $L_p=345$ mH)



Slika 7.15 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($n=10700$ ob/min, $I_{dc_sr}=1.5$ A i $V_{dc_potr}=150$ V i $L_p=345$ mH)

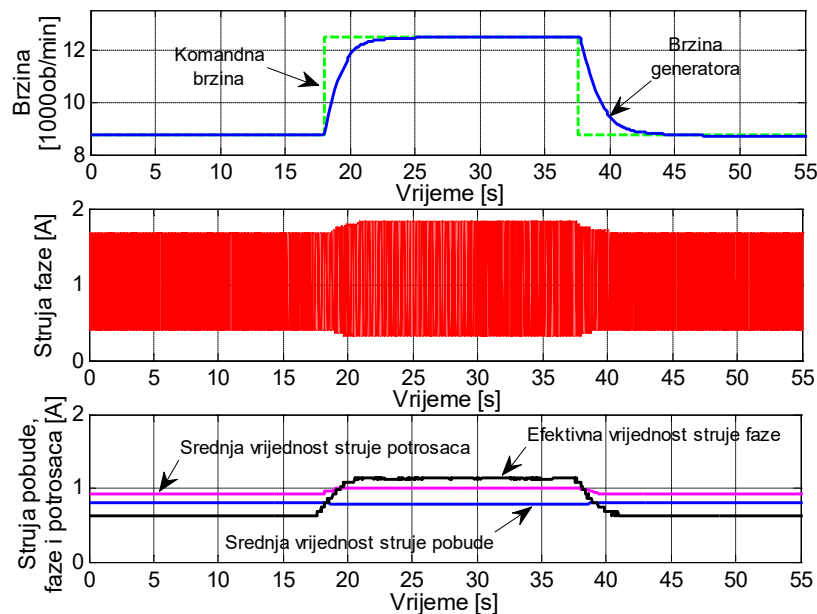


Slika 7.16 Talasni oblici struje pobude SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača određeni mjerenjem na eksperimentalnoj postavi - crta-crta linija i koristeći simulacije - puna linija, za različite vrijednosti induktivnosti kalema korišćenog u kolu pobude ($n=12750\text{ob/min}$, $V_{dc_potr}=135\text{V}$, $I_{ef}=1\text{A}$).

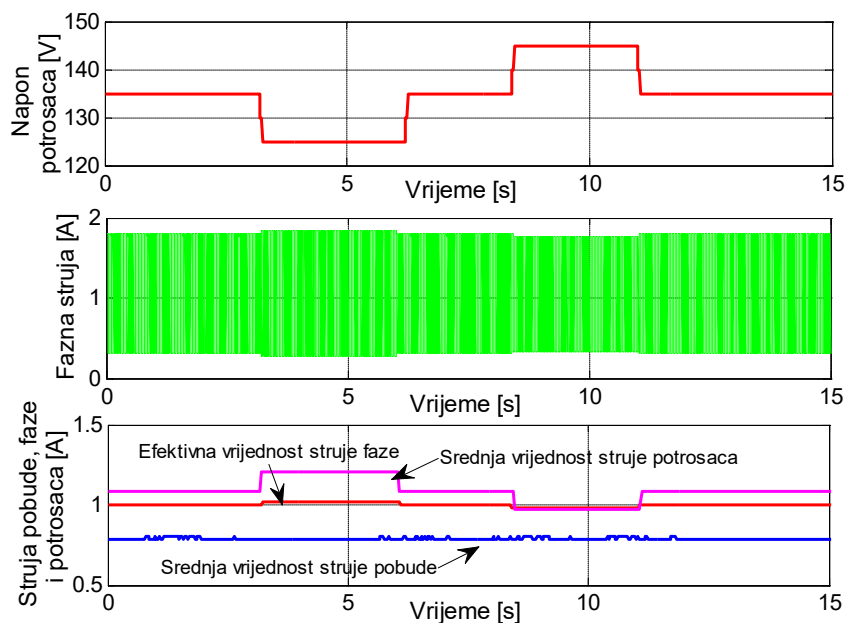
Maksimalna razlika između eksperimentalno izmjerenih vrijednosti električne snage generatora i odgovarajućih vrijednosti određenih kroz simulacije, u svim prikazanim primjerima, je manja od 3%. Takođe, maksimalna razlika između eksperimentalno izmjerenih srednjih vrijednosti struje pobude, ali i struje potrošača, i njihovih odgovarajućih vrijednosti određenih kroz simulacije je manja od 2%, za obje posmatrane veličine. Prema tome, evidentno je veoma dobro poklapanje karakteristika SRG-a određenih eksperimentalno i koristeći simulacije. Osim toga, evidentno je i izuzetno dobro poklapanje talasnih oblika različitih veličina dobijenih mjerenjem i koristeći simulacije (slike 7.12 – 7.16). Prema tome, svi prikazani rezultati potvrđuju zaključke o efikasnosti i sigurnosti rada SRG-a sa PCT1, izvedene u Potpoglavlju 6.4.1. Takođe, ovi rezultati potvrđuju zaključke o uticaju napona pobude, vrijednosti kalema u kolu pobude i brzine obrtanja na izlazne karakteristike SRG-a pri radu sa PCT1.

Uticaj step promjene komandne brzine obrtanja SRG-a, pri konstantnom naponu potrošača, prikazan je na slici 7.17. U konkretnom slučaju, formirana je skokovita promjena brzine sa 8750 ob/min na 12500 ob/min, pri naponu potrošača od 135V. Kao što se vidi sa ove slike, povećanje brzine obrtanja uzrokuje povećanje vrijednosti struje potrošača od

oko 8%, povećanje efektivne vrijednosti struje faze od oko 45% i zanemarljivo smanjenje pobudne struje.



Slika 7.17 Eksperimentalni rezultati rada SRG-a sa PCT1 pri step promjeni komandne brzine obrtanja od 8750ob/min do 12500ob/min ($V_{dc_potr}=135V$).



Slika 7.18 Eksperimentalni rezultati rada SRG-a sa PCT1 pri promjeni napona potrošača od $\pm 10V$ ($n=12500ob/min$).

Uticaj promjene napona potrošača od $\pm 10V$, pri brzini obrtanja od 12500ob/min, a pri konstantnom naponu pobude, prikazani su na slici 7.18. Kao što se vidi na osnovu rezultata sa ove slike, struja faze i struja potrošača rastu sa smanjenjem napona potrošača. U konkretnom slučaju, promjena napona potrošača od 10V uzrokuje promjenu efektivne vrijednosti struje faze od 2% i promjenu srednje vrijednosti struje potrošača od 9%, dok je vrijednost struje pobude skoro konstantna. Prema tome, posmatrajući rezultate prikazane na slikama 7.17 i 7.18, može se zaključiti da je rad SRG-a pri promjeni brzine obrtanja i napona potrošača stabilan.

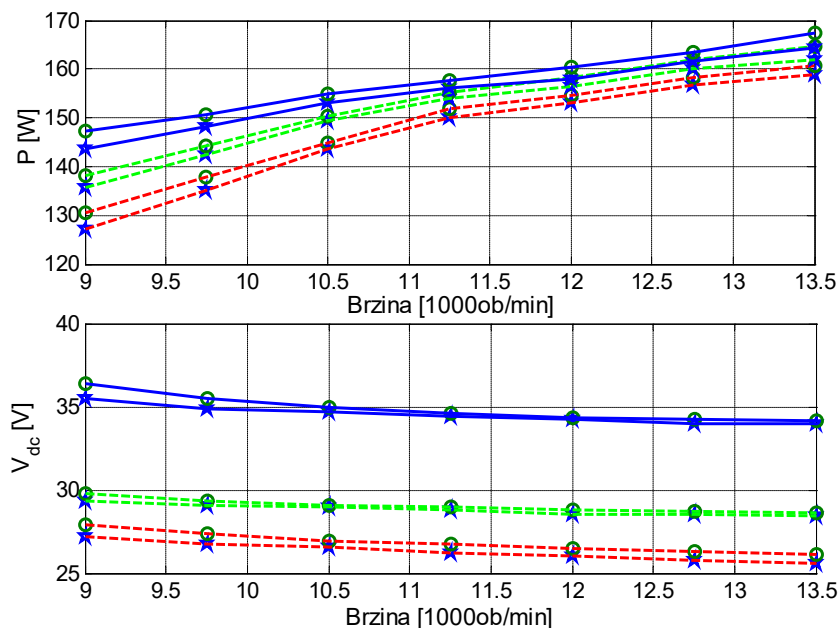
7.3.2 Eksperimentalni rezultati rada korišćenog SRG-a dobijeni primjenom PCT2

U cilju validacije rada SRG-a sa PCT2 (slika 6.31), izvršeno je poređenje električna snaga-brzina karakteristika SRG-a određenih eksperimentalno i koristeći simulacije u slučaju kada su:

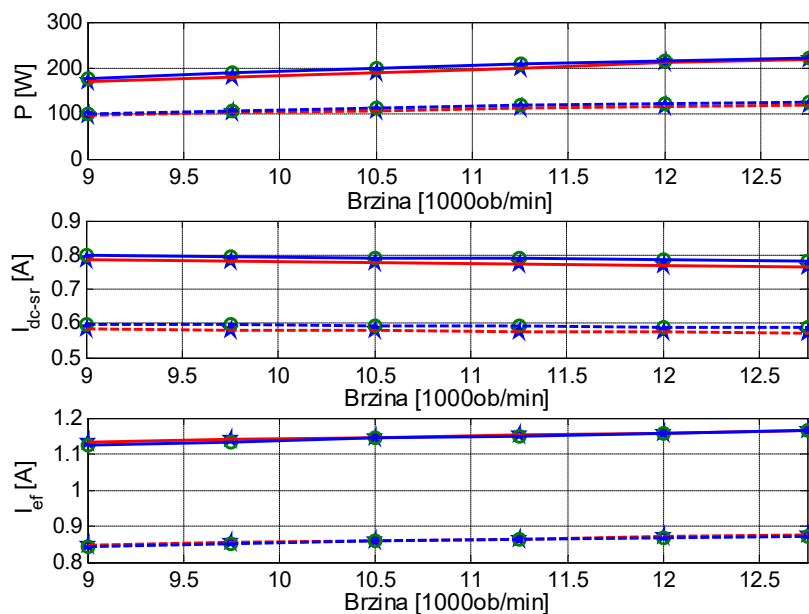
- efektivna vrijednost struje faze I_{ef} i napon potrošača V_{dc_potr} konstantni, za različite vrijednosti induktivnosti kalema L_p u kolu pobude (slika 7.19), i
- otpornost potrošača R_{pot} i pobudni napon V_{dc} konstantni, (slike 7.20 i 7.21).

Osim toga izvršeno je i poređenje talasnih oblika struje faze, struje pobude i napona faze dobijenih mjerenjem na eksperimentalnoj postavci i koristeći simulacije (slike 7.22 i 7.23).

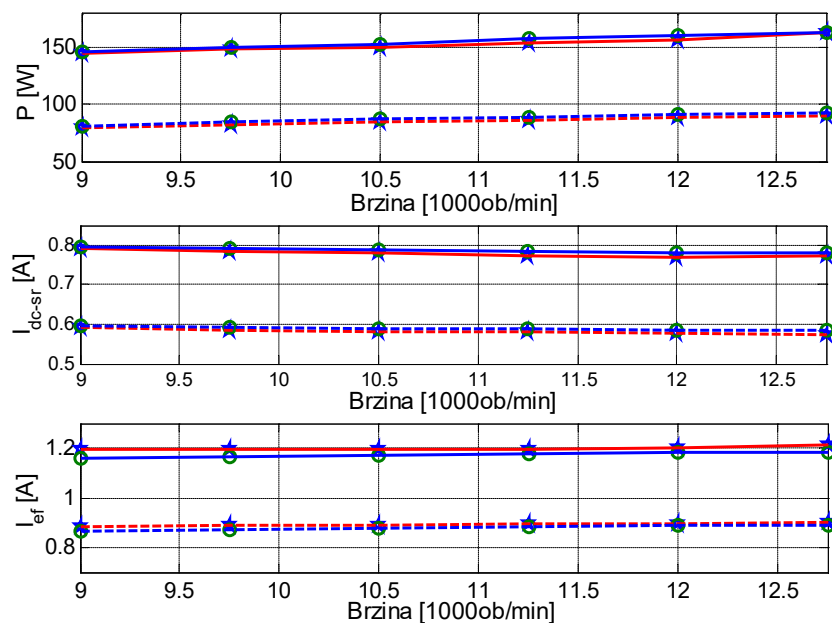
Maksimalna razlika između eksperimentalno izmjerenih i određenih kroz simulacije vrijednosti električne snage generatora u razmatranim primjerima je manja od 5% (slika 7.19). Sa druge strane, maksimalna razlika između eksperimentalno izmjerenih srednjih vrijednosti struje pobude i efektivne vrijednosti struje faze i njihovih odgovarajućih vrijednosti određenih kroz simulacije je manja od 1%, odnosno manja od 1.5%, respektivno.



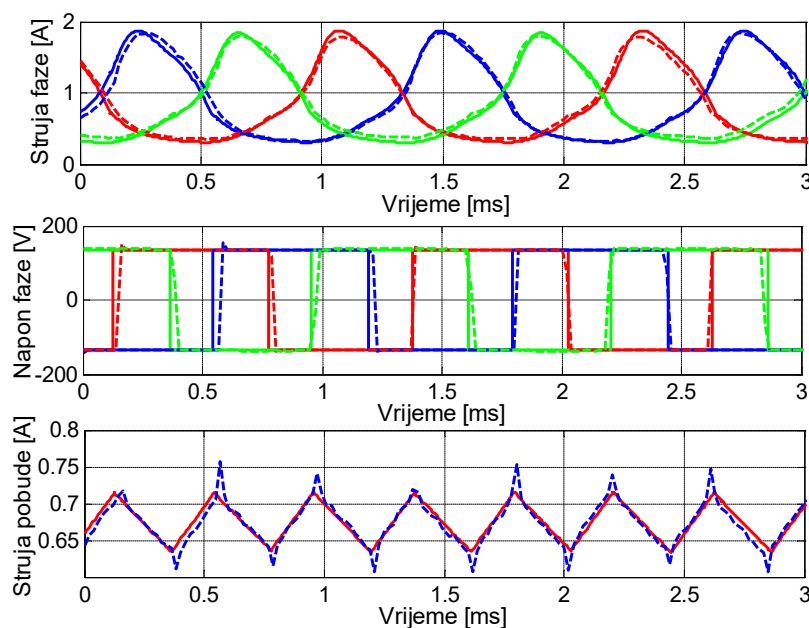
Slika 7.19 $P - n$ i $V_{dc} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije – kružić ($V_{dc_potr}=135V$; $I_{ef}=1A$; $L_p=345mH$ - puna linija, $L_p=220mH$ - crta-crta linija i $L_p=145mH$ - crta-tačka-crta linija).



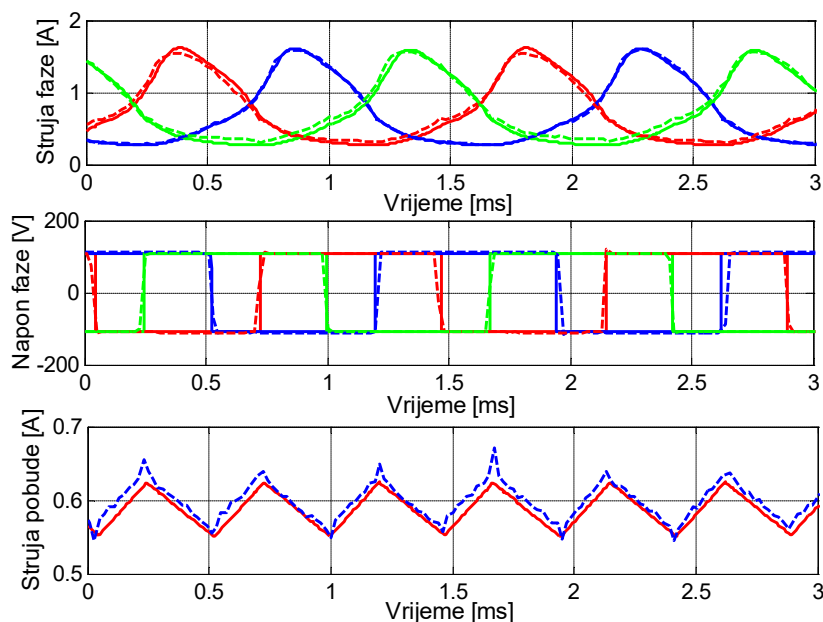
Slika 7.20 $P - n$, $I_{dc-sr} - n$ i $I_{potr-sr} - n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($L_p=345mH$; $R_{potr}=300\Omega$; $V_{dc}=30V$ - crta-crta linija i $V_{dc}=40V$ - puna linija).



Slika 7.21 $P-n$, $I_{dc-sr}-n$ i $I_{potr-sr}-n$ karakteristike SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača, određene mjerenjem na eksperimentalnoj postavci - zvjezdica i koristeći simulacije - kružić ($L_p=345mH$; $R_{pot}=200\Omega$, $V_{dc}=30V$ - crta-crta linija i $V_{dc}=40V$ - puna linija).



Slika 7.22 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($n=12000ob/min$, $I_{ef}=1A$, $V_{dc-potr}=135V$, $L_p=345mH$).



Slika 7.23 Eksperimentalni (isprekidana linija) i simulacioni (puna linija) rezultati rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($n=10500\text{ob/min}$, $V_{\text{dc}}=30\text{V}$, $R_{\text{pot}}=300\Omega$, $L_p=345\text{mH}$).

Na osnovu poređenja talasnih oblika fazne struje, faznog napona i struje pobude (slike 7.22 i 7.23) vidi se veoma dobro poklapanje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih kroz simulacije. Prema tome, rezultati prikazani na slikama 7.19-7.23 potvrđuju zaključke o uticaju napona pobude, induktivnosti kalema u kolu pobude i brzine obrtanja na izlazne karakteristike SRG-a pri radu sa PCT2, izvedene u Poglavlju 6.4.2. Na kraju, može se zaključiti da prikazani rezultati potvrđuje efikasnost i pouzdanost rada SRG-a sa PCT2.

ZAKLJUČAK

Mogućnost rada u uslovima kvara, velika robustnost, rad u širokom dijapazonu brzina i visoka efikasnost su glavne odlike SRM-a. Upravo te odlike preporučuju ovu mašinu za primjenu u različitim pogonima, a posebno u generatorskim sistemima.

U dosadašnjim istraživanjima vezanim za upravljanje SRM-om, a samim tim i sa SRG-om, dominantno je analiziran njen rad u DCM-u. Predmet naučnog istraživanja u ovoj disertaciji jeste razvoj novih metoda upravljanja SRG-om pri radu u CCM-u. Kao rezultat istraživanja modifikovan je klasični i predložena dva nova bezsenzorska metoda upravljanja SRG-om. Takođe, predložena su i rješenja za primjenu razmatranih metoda upravljanja SRG-om u vjetrogeneratorskom sistemu.

Postojeći klasični metodi upravljanja SRM-om zahtijevaju mjerenje i regulaciju struje, kao i upotrebu složenih kontrolnih algoritama (npr. upotrebu *look-up* tabela za definisanje kontrolnih parametara). U ovoj doktorskoj disertaciji je predložena modifikacija klasičnog metoda upravljanja SRG-om pri radu u CCM-u. Predloženi modifikovani klasični metod upravljanja SRG-om ne zahtijeva ni mjerenje ni regulaciju struje faze, već se bazira na regulaciji napona jednosmjernog međukola. Regulacijom napona jednosmjernog međukola, koja se ostvaruje koristeći DC/DC pretvarače, definiše se vrijednost napona na fazama i vrijednost faznih struja. Za definisanje referentne vrijednosti napona međukola predložena je veoma prosta matematička jednačina, dobijena optimizacijom kontrolnih uglova u cilju maksimizacije električne snage SRG-a, koja daje vezu referentne vrijednosti napona međukola, mehaničke snage i brzine obrtanja generatora. Takođe, za definisanje optimalnih vrijednosti kontrolnih uglova, u disertaciji je predložena prosta matematička formula, dobijena već pomenutom optimizacijom, a koja definiše njihovu vrijednost u zavisnosti od brzine obrtanja. U cilju određivanja optimalnih kontrolnih uglova za maksimizaciju električne snage, tj. optimalnih izlaznih karakteristika, predložen je originalni optimizacioni algoritam. Predloženi optimizacioni algoritam omogućava određivanje

optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a za rad u DCM-u i u CCM-u. Štaviše, predloženi optimizacioni algoritam se može primijeniti za bilo koju vrijednost napona međukola i referentnu efektivnu vrijednost fazne struje SRG-a.

U disertaciji je predloženo rješenje za primjenu ovog modifikovanog klasičnog metoda upravljanja SRG-om u vjetrogeneratorskom sistemu. U tom cilju predstavljena je struktura i izvršena analiza kompletnog vjetrogeneratorskog sistema, kojeg čine SRG, klasični pretvarač i vjetroturbina. Upravljanje predloženim vjetrogeneratorskim sistemom se bazira na mjerenju brzine vjetra i pozicije rotora, a na osnovu koje se određuje vrijednost brzine generatora i turbine. Predložena je i matematička formula za određivanje referentne vrijednosti mehaničke snage, a koja zahtijeva informacije o brzini vjetra i brzini generatora. Predloženo definisanje referentne vrijednosti mehaničke snage omogućava veoma brzo praćenje maksimalne snage turbine za datu brzinu vjetra. Zbog toga, može se reći da je u disertaciji predložen novi MPPT metod. Sa druge strane, na osnovu referentne vrijednosti mehaničke snage vrši se definisanje referentne vrijednosti napona međukola, shodno prethodnom objašnjenju modifikovanog upravljanja SRG-om. Simulacioni rezultati su potvrdili stabilnost rada i visoku efikasnost SRG-a pri radu sa i bez regulacije ugla zakretanja lopatica turbine. Osim toga, u disertaciji su prikazani i rezultati ispitivanja stabilnosti SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu u slučaju trenutnih i velikih promjena otpornosti namotaja faze. Pokazano je da čak i pri nagloj promjeni otpornosti faze rad SRG-a ostaje stabilan, dok vrijednost izlazne snage veoma malo odstupa od optimalne vrijednosti, za tu brzinu vjetra.

Međutim, glavni doprinos ove disertacije jeste u razvoju novih bezsenzorskih metoda upravljanja SRG-om u CCM-u. Naime, u radu su predložena dva metoda bezsenzorskog upravljanja SRG-om. Prvi metod podrazumijeva upotrebu klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera, a drugi podrazumijeva upotrebu novih topologija energetskih pretvarača predloženih u ovoj disertaciji.

Predloženi metod upravljanja, koji se bazira na upotrebi klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera, podrazumijeva kontinualno praćenje vrijednosti struje faze. Ako vrijednost struje faze postane veća od neke komandne vrijednosti, isključuju se poluprovodnički prekidački elementi u odgovarajućoj grani pretvaračkog mosta i suprotno, ako je vrijednost fazne struje manja od neke komandne vrijednosti, vrši se uključivanje prekidačkih elemenata u odgovarajućoj grani pretvaračkog mosta. U zavisnosti od toga da li

se uključivanje ili isključivanje prekidača vrši za istu, ili za različite vrijednosti komandne struje u disertaciji su predloženi CCM – On/Off – CC i CCM – Hist – CC metodi upravljanja, respektivno. Primjenom predloženih metoda upravljanja mogu se ostvariti iste izlazne karakteristike SRG-a kao kod primjene klasičnog upravljanja u CCM-u, a koje zahtijeva upotrebu senzora visoke rezolucije. Takođe, predloženi su i optimizacioni postupci za određivanje optimalnih izlaznih karakteristika SRG-a pri ovim upravljanjima. Osim toga, u radu su predložena i rješenja za primjenu CCM – On/Off – CC i CCM – Hist – CC upravljanja SRG-om u vjetrogeneratorskom sistemu. Simulacioni rezultati su pokazali stabilnost vjetrogeneratorskog sistema, brzo praćenje optimalnih vrijednosti snage i brzine, kao i visoku efikasnost SRG-a.

Poseban i najznačajniji dio rada posvećen je razvoju novih pretvaračkih topologija za bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u. Naime, predstavljene su dvije topologije pretvarača, koje ne zahtijevaju upotrebu poluprovodničkih prekidačkih elemenata, već samo upotrebu dioda i kalemova. Obje topologije pretvarača za N -fazni SRG zahtijevaju $4N$ dioda. Jedna od predloženih topologija, nazvana PCT1, zahtijeva posebne kalemove za svaku fazu mašine, pri čemu se može koristiti jedan, ili za svaku fazu posebni, pobudni naponski izvor. Ista situacija je i sa potrošačem – može se napajati jedan potrošač, ili svaka faza može da napaja poseban potrošač. Međutim, kod druge topologije, nazvane PCT2, koristi se jedan pobudni izvor i jedan kalem u kolu pobude, jer su sve faze redno vezane. Kod ove topologije svaka faza napaja poseban potrošač, a ako je cilj napajati samo jedan potrošač potrebno je koristiti DC/DC pretvarač sa izolovanim terminalima.

Predložene topologije pretvarača omogućavaju veoma prosto upravljanje SRG-om i jednostavnu regulaciju električne snage. Naime, regulacijom napona pobude vrši se regulacija električne snage generatora, pri čemu se ne zahtijeva ni mjerenje pozicije rotora ni mjerenje struje faze. U disertaciji su predloženi i optimizacioni postupci za određivanje izlaznih karakteristika SRG-a pri radu sa predloženim topologijama pretvarača. Sa druge strane, kao i kod prethodno predloženih bezsenzorskih metoda upravljanja, predložena je primjena ovih topologija za rad SRG-a u vjetrogeneratorskom sistemu. Štaviše, predložena je kompletna šema vjetrogeneratorskog sistema sa direktnim povezivanjem na DC mrežu. Simulacioni rezultati, kao i kod prethodno predloženih vjetrogeneratorskih sistema, pokazali su stabilnost sistema i visoku efikasnost rada SRG-a.

U disertaciji je izvršeno poređenje optimalnih izlaznih karakteristika korišćenog SRG-a pri radu u DCM-u i u CCM-u, pri bezsenzorskim metodama upravljanja, koje zahtijevaju upotrebu klasičnog pretvarača i strujnog kontrolera (CCM – On/Off – CC i CCM – Hist – CC) i pri radu sa predloženim topologijama pretvarača. Pokazano je da se pri velikim brzinama obrtanja, pri optimalnom klasičnom upravljanju SRG-om u CCM-u, kao i pri optimalnim bezsenzorskim CCM – On/Off – CC i CCM – Hist – CC upravljanjima, dobijaju gotovo iste vrijednosti izlazne snage i efikasnosti, kao i pri radu sa predloženim topologijama pretvarača. Pri velikim brzinama obrtanja, najmanja vrijednost izlazne snage, ali i najveća efikasnost, dobija se pri radu SRG-a u DCM-u. Sa druge strane, analizom optimalnih karakteristika pobudnog napona, pri radu sa predloženim topologijama pretvarača, uočeno je da se vrijednost pobudnog napona veoma malo mijenja. Zbog toga su u disertaciji prikazane i analizirane izlazne karakteristike SRG-a i za konstantne vrijednosti napona pobude. Uočeno je da, pri konstantnoj vrijednosti napona pobude, generator radi sa velikom efikasnošću, dok je izlazna snaga veoma blizu optimalne vrijednosti.

Osim poređenja izlaznih karakteristika SRG-a, ostvarenih pri različitim metodama upravljanja, u radu je izvršeno i kvantitativno poređenje predloženih topologija pretvarača sa ostalim postojećim topologijama pretvarača za napajanje SRG-a. Predložene topologije pretvarača ne zahtijevaju prekidačke elemente, kao ni senzor pozicije (informaciju o poziciji rotora) za upravljanje SRG-om, ali omogućavaju rad u CCM-u. Zaključeno je da upotreba predloženih topologija pretvarača doprinosi povećanju robustnosti sistema i pojednostavljivanju upravljanja SRG-om, u odnosu na rad SRG-a pri upotrebi postojećih topologija pretvarača.

U disertaciji su prikazani rezultati eksperimentalne verifikacije rada SRG-a sa predloženim topologijama pretvarača. U tu svrhu je realizovana eksperimentalna postavka sa korišćenim SRG-om, predloženim pretvaračem (PCT1 ili PCT2 pretvarač), pobudnim elementima (naponski izvor i kalem) i potrošačima. Korišćenjem eksperimentalne postavke sprovedena su brojna ispitivanja, koja su upoređivana sa rezultatima dobijenim kroz simulacije. Posmatranjem dobijenih rezultata, pokazano je veoma dobro poklapanje izlaznih karakteristika SRG-a, određenih mjerenjem na eksperimentalnoj postavci i koristeći simulacije. Takođe, pokazano je veoma dobro poklapanje talasnih oblika pojedinih veličina dobijenih kao rezultat simulacija i onih izmjerenih na realizovanom pogonu. Osim toga,

eksperimentalno je pokazano, da nagle promjene brzine obrtanja i napona na potrošaču, pri radu SRG-a sa PCT1, ne utiču na stabilnost sistema. Prema tome, rezultati sprovedenih eksperimenata potvrdili su teorijska razmatranja i rezultate dobijene simulacijama.

Istraživanja opisana u ovoj doktorskoj disertaciji inicirala su i brojne ideje za buduća istraživanja. Naime, jedan od pravaca budućih istraživanja može biti usmjeren ka ispitivanju mogućnosti primjene CCM – On/Off – CC i CCM – Hist – CC metoda upravljanja u motornom režimu rada SRM-a. Isto tako, buduće istraživanje se može usmjeriti i ka ispitivanju mogućnosti primjene CCM – Hist – CC metoda upravljanja SRG-om za manje vrijednosti brzina obrtanja. Sa druge strane, potencijalno buduće istraživanje može biti usmjereno i ka razvoju novih topologija pretvarača za napajanje SRG-a zasnovanih na upotrebi dioda. Konkretno, cilj je smanjiti broj dioda po fazi mašine u odnosu na predložene topologije, ili smanjiti (a možda i eliminisati) induktivnost kalema u kolu pobude, a uz uslov dobijanja približno istih izlaznih karakteristika SRG-a. Stoga, može se zaključiti da ova disertacija predstavlja i odličnu osnovu za brojna buduća istraživanja.

LITERATURA

- [1] T.J.E. Miller, “*Switched Reluctance Motors and Their Control*,” first ed., Magna Physics and Clarendon, Oxford, New York, 1993.
- [2] V.P. Vujičić, “*Proširenje eksploatacione karakteristike pogona sa prekidačkim reluktantnim motorom primjenom nesimetrične konfiguracije motora i pogonskog pretvarača*”, Doktorska disertacija, Beograd, maj 2000. godine
- [3] T.J.E. Miller, “*Electronic control of switched reluctance machines*,” Newness, UK, 2001.
- [4] R. Krishnan, “*Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*,” CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [5] Ž.J. Grbo, “*Energetski pretvarači za prekidački reluktantni motor*”, Doktorska disertacija, Beograd, 2007. godine
- [6] J. M. Stephenson, J. Čorda, “Computation of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetisation data,” *IEE Proceedings*, Vol. 126, No. 5, pp. 393-396, 1979.
- [7] P.J. Lawrenson, *et.al.*, “Variable-speed switched reluctance motors,” *IEE Proceedings*, Vol. 127, pp. 253–265, 1980.
- [8] P. Lawrenson, “Switched-reluctance motor drives,” *Electronics and Power*, Vol. 29, Issue 2, pp. 144-147, Feb. 1983.
- [9] J.F. Lindsay, R. Arumugam, R. Krishnan, “Finite-element analysis characterization of a switched reluctance motor with multitooth per stator pole,” *IEE Proceedings*, Pt. B, Vol. 133, No. 6, pp. 347-353, Nov. 1986.
- [10] G.E. Dawson, A.R. Eastham, J. Mizia, “Switched-Reluctance Motor Torque Characteristics: Finite-Element Analysis and Test Results,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-23, No. 3, pp. 532-537, May/June 1987.
- [11] R. Krishnan, R. Arumugam, J.F. Lindsay, “Design procedure for Switched-reluctance Motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 24, No. 3, pp. 456-461, May/June 1988.
- [12] D.A. Torrey, J. H. Lang, “Modeling a nonlinear variable-reluctance motor drive,” *IEE Proceedings*, pt. B, Vol. 137, No. 5, pp. 314–326, Sept. 1990.
- [13] R. M. Davis, “Inverter drive for switched reluctance motor: circuits and component ratings,” *IEE Proceedings*, Vol. 128. pt. B, No. 2, pp. 126-136, March 1981.
- [14] T.J.E. Miller, “Converter Volt-Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive,” *IEEE Tran. Ind. Appl.*, Vol. IA-21. No. 5, pp. 1136-1144, Sept./Oct. 1985.
- [15] M. Ilić-Spong, *et. al.*, “Feedback Linearizing Control of Switched Reluctance Motors,” *IEEE Trans Automatic Control*, Vol. AC-32, No. 5, pp. 371-379, May 1987.
- [16] C. Cossar, M. Popescu, T.J.E Miller, M. McGilp, “*On-line phase measurements in switched reluctance motor drives*,” 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Sept. 2007, DOI: 10.1109/EPE.2007.4417358

-
- [17] J. Zhang, A.V. Radun, "A New Method to Measure the Switched Reluctance Motor's Flux," *IEEE Trans. Ind. App.*, Vol. 42, No. 5, pp. 1171-1176, Sept./Oct. 2006.
- [18] N. Radimov, N. Ben-Hail, R. Rabinovici, "Inductance Measurements in Switched Reluctance Machines," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 41, No. 4, pp. 1296-1299, April 2005.
- [19] P. Zhang, P. A. Cassani, S.S. Williamson, "An Accurate Inductance Profile Measurement Technique for Switched Reluctance Machines," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, Vol. 57, No. 9, pp. 2972-2979, Sept. 2010.
- [20] T.S. Low, H. Lin, S.X. Chen, "Analysis and Comparison of Switched Reluctance Motors With Different Physical Sizes Using A 2D Finite Element Method," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 3503-3505, Nov. 1995.
- [21] Y. Ohdachi, "Optimum Design of Switched Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2033-2036, March 1997.
- [22] J.H. Choi, *et. al.*, "The Finite Element Analysis of Switched Reluctance Motor Considering Asymmetric Bridge Converter and DC Link Voltage Ripple," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 41, No. 5, pp. 1640-1643, May 2005.
- [23] B. Parreira, *et. all*, "Obtaining the magnetic characteristics of an 8/6 switched reluctance machine: from FEM analysis to the experimental tests," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 52, Issue 6, pp. 1635 – 1643, Dec. 2005.
- [24] K. Koibuchi, T. Ohno, K. Sawa, "A basic study for optimal design of switched reluctance motor by finite element method," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, Issue 2, pp. 2077 – 2080, March 1997.
- [25] S. Inamura, T. Sakai, K. Sawa, "A temperature rise analysis of switched reluctance motor due to the core and copper loss by FEM," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 39, issue 3, pp. 1554 – 1557, May 2003.
- [26] J.Li, D.Choi, Y. Cho, "Analysis of Rotor Eccentricity in Switched Reluctance Motor With Parallel Winding Using FEM," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 45, Issue 6, pp.2851 – 2854, June 2009.
- [27] J.W. Lee, *et. al.*, "New rotor shape design for minimum torque ripple of SRM using FEM," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 40, Issue 2, pp. 754-757, March 2004.
- [28] Y. Sofiane *et. all*, "Study of head winding effects in a switched reluctance machine," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 38, issue 2, pp. 989 – 992, March 2002.
- [29] W.M. Chan, W.F. Weldon, "Development of a Simple Nonlinear Switched Reluctance Motor Model using Measured Flux Linkage Data and Curve Fit," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 5-9. October, 1997. DOI: 10.1109/IAS.1997.643044
- [30] S. Mir, I. Husain, M. Elbuluk, "Switched Reluctance Motor Modeling with On-Line Parameter Identification," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 34, No. 4, pp. 776-783, July/August 1998.

-
- [31] D.N. Essah, S. D. Sudhoff, "An Improved Analytical Model for the Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 18, No. 3, pp. 349-356, Sept. 2003.
 - [32] B.P. Loop, S.D. Sudhoff, "Switched Reluctance Machine Model Using Inverse Inductance Characterization," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 39, No. 3, pp. 743-751, May/June 2003.
 - [33] M. Stiebler, K. Liu, "An Analytical Model of Switched reluctance Machines," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 18, No. 3, pp. 1100-1107, Dec. 1999.
 - [34] I. Husain, S.A. Hossain, "Modeling, Simulation, and Control of Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 52, No. 6, pp. 1625-1634, Dec. 2005.
 - [35] J.W. Ahn, *et. al.*, "A Three-Phase Switched Reluctance Motor With Two-Phase Excitation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 5, pp. 1067-1075, Sept./Oct. 1999.
 - [36] A. Radun, "Analytical Calculation of the Switched Reluctance Motor's Unaligned Inductance," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 6, pp. 4473-4481, Nov. 1999.
 - [37] A. Michaelides, C. Pollock, C. Jolliffe, "Analytical Computation of Minimum and Maximum Inductances in Single and Two Phase Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2037-2040, March 1997.
 - [38] A.V. Radun, "Design considerations for the switched reluctance motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1079-1087, Sept./Oct. 1995.
 - [39] T.J.E. Miller, M.McGilp, "Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design," *IEE Proceedings*, Vol. 137, Pt. B, No. 6, pp. 337-347, Nov. 1990.
 - [40] V.P. Vujičić, S.N. Vukosavić, "A Simple Nonlinear Model of the Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 15, No. 4, pp. 395-400, Dec. 2000.
 - [41] V.P. Vujičić, S.N. Vukosavić, M. B. Jovanović, "Asymmetrical Switched Reluctance Motor for a Wide Constant Power Range," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 21, No. 1, pp. 44-51, March 2006.
 - [42] V.P. Vujičić, "Modeling of a Switched Reluctance Machine Based on the Invertible Torque Function," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 44, No. 9, pp. 2186-2194, Sept. 2008.
 - [43] M. Nagrial, J. Rizk, W. Aljaism, "Dynamic Simulation of Switched Reluctance Motor using Matlab and Fuzzy Logic," Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, pp. 819-824, Paper ID 291, Dec. 19-21, 2010.
 - [44] F. Soares, P.J.C. Branco, "Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on MATLAB/Simulink Environment," *IEEE Trans. Aerospace and Electr. Syst.*, Vol. 37, No. 3, pp. 989-1009, July 2001.
 - [45] C.C. Kim, J. Hur, D.S. Hyun, "Simulation of a switched reluctance motors using Matlab/M-file," IEEE 28th Annual Conference of Industrial Electronics Society - IECON 02, Vol. 2, pp. 1066 – 1071, 5-8 Nov. 2002. DOI: 10.1109/IECON.2002.1185420
 - [46] S. Song, W. Liu, "A Novel Method for Nonlinear Modeling and Dynamic Simulation of a Four-phase Switched Reluctance Generator System Based on MATLAB/Simulink," 2nd

- IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications - ICIEA 2007. pp. 1509-1514, 2007. DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318659
- [47] O. Ichinokura, *et. al.*, "A New Calculation Model of Switched Reluctance Motor for Use on Spice," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 2834-2836, July 2001.
 - [48] J. Mahdavi, *et. al.*, "Dynamic modeling of non-linear srm drive with PSpice," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, pp. 661-667, 5-9 Oct. 1997.
 - [49] O. Ichinokura, *et. al.*, "Analysis of Dynamic Characteristics of Switched Reluctance Motor Based on SPICE," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 34, No 4, pp. 2147- 2149, July 1998.
 - [50] J. Ye, A. Emadi, "Power electronic converters for 12/8 switched reluctance motor drives: A comparative analysis," IEEE Transportation Electrification Conference and Expo – ITEC 2014, Dearborn, MI, June 2014, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ITEC.2014.6861763
 - [51] S. Vukosavic, V.R. Stefanovic, "SRM inverter topologies: a comparative evaluation", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 6, No. 27, pp. 1034-1047, 1991.
 - [52] R.M. Davis, *et al.*, "Inverter drive for switched reluctance motor: circuits and component ratings", *Proc. Inst. Elec. Eng.*, Vol. 128, No. 2, pp. 126-135, 1981.
 - [53] M. Krishnamurthy, *et. al.*, "Comparison of Various Converter Topologies for Bipolar Switched Reluctance Motor Drives," 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, June 2005, England, pp. 1858–1864, DOI: 10.1109/PESC.2005.1581884
 - [54] M. Anand, *et. al.*: "Analysis and modeling of different types of converter in switched reluctance motor for reducing the torque ripple," 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, March 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIIECS.2015.7192865
 - [55] M. Barnes, C. Pollock, "Power electronic converters for switched reluctance drives", *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol.13, No. 6, pp. 1100 – 1111, 1998.
 - [56] S. Mir, I. Husain, M.E. Elbuluk, "Energy-efficient *C-dump* converters for switched reluctance motors", *IEEE Trans. Power Elect.*, Vol. 12, No. 5, pp. 912 – 921, 1997.
 - [57] M. Barnes, C. Pollock, "Selecting power electronic converters for single phase switched reluctance motors," Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, England, 1998, pp. 527 – 531. DOI: 10.1049/cp:19980582
 - [58] A. Ayob, *et. al.*, "Overview of low cost converters for single-phase Switched Reluctance Motors", 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Poland, Sept. 2005, pp.1-10. DOI: 10.1109/EPE.2005.219236
 - [59] V.V. Deshpande, L.J Young, "New converter configurations for switched reluctance motors wherein some windings operate on recovered energy," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 6, pp. 1558 – 1565, 2002.
 - [60] C. Pollock, B.W. Williams, "A Unipolar Converter for a switched reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 26, No. 2, pp. 222-228, March/April 1990.
 - [61] A. Deriszadeh, *et. al.*, "Switched reluctance motor drive converter operating in continuous conduction mode with high demagnetisation voltage," *IET Power Electron.*, Vol. 8, No. 7, pp. 1119–1127, 2015.

-
- [62] M. Čalasan, V. Vujičić, "Characteristics of Switched Reluctance Generator operating with Derishzadeh converter," International conference of IcETRAN, Zlatibor, Serbia, June 2016, pp. 1-6.
- [63] G.S. Buja, R. Menis, M.I. Valla, "Variable structure control of SRM drive," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 40, No. 1, pp. 56-63, Feb. 1993.
- [64] H. Hannoun, M. Hilairet, C. Marchand, "Design of an SRM Speed Control Strategy for a Wide Range of Operating Speeds," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 57, issue 9, pp. 2911-2921, Sept. 2010.
- [65] H. Hannoun, M. Hilairet, C. Marchand, "Experimental Validation of a Switched Reluctance Machine Operating in Continuous-Conduction Mode," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, Vol. 60, issue 4, pp. 1453-1460, March 2011.
- [66] M. Rekik, *et. al.*, "Improvement in the field-weakening performance of switched reluctance machine with continuous mode," *IET Electric Power Appl.*, Vol. 1, issue 5, pp. 785-792, Sept. 2007.
- [67] M. Rekik, *et. al.*, "High-speed-range enhancement of switched reluctance motor with continuous mode for automotive applications", *Eur Trans. Elec. Power*, Vol. 18, Issue 7, pp. 674-693, Oct. 2008.
- [68] M. Ehsani, K. R. Ramani, "Direct Control Strategies based on Sensing Inductance in Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 11, No. 1, pp. 74-82, Jan. 1996.
- [69] Lj. Perić, V. Vučković, and S. Vukosavić, "Stabilization of switched reluctance drive operating without position sensor," EDS Conf., Italy 90, pp. 215-220, 1990.
- [70] S. Mir, M. Islam, T. Sebastian, I. Husain, "Fault-Tolerant Switched Reluctance Motor Drive Using Adaptive Fuzzy Logic Controller," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 19, No. 2, pp. 289-295, March 2004.
- [71] E. Echenique, *et. al.*, "Sensorless Control for a Switched Reluctance Wind Generator, Based on Current Slopes and Neural Networks," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 56, No. 3, pp. 817-825, March 2009.
- [72] H.M. Hasanien, S.M. Mueen, "Speed control of grid-connected switched reluctance generator driven by variable speed wind turbine using adaptive neural network controller," *Elsevier Elect. Power Syst. Research*, Vol. 84, pp. 206-213, 2012.
- [73] P. Tandon, A.V. Rajarathnam, M. Ehsani, "Self-Tuning Control of a Switched-Reluctance Motor Drive with Shaft Position Sensor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 33, No. 4, pp. 1002-1010, July/August 1997.
- [74] A.D. Cheok, Y. Fukuda, "A New Torque and Flux Control Method for Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 17, No. 4, pp. 543-557, July 2002.
- [75] I. Husein, M. Eshani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 11, No. 1, pp. 83-88, Jan. 2000.
- [76] N.C. Sahoo, J.X. Xu, S.K. Panda, "Low Torque Ripple Control of Switched Reluctance Motors Using Iterative Learning," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 16, No. 4, pp. 318-326, Dec. 2001.

-
- [77] I. Agirman, *et. al.*, "Adaptive Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 48, No. 3, pp. 664-672, June 2001.
 - [78] K. Russa, I. Husain, M.E. Elbuluk, "Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 34, No. 5, pp. 1105-1112, Sept./Oct. 1998.
 - [79] D.H. Lee, *et. al.*, "A Simple Nonlinear Logical Torque Sharing Function for Low-Torque Ripple SR Drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 8, August 2009.
 - [80] V.P. Vujičić, "Minimization of Torque Ripple and Copper Losses in Switched Reluctance Drive," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. PP, Issue: 99, 2011.
 - [81] F. Sahin, H. B. Ertan, K. Leblebicioglu, "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 15, No. 1, pp. 30-39, March 2000.
 - [82] R.S. Colby, F.M. Mottier, T.J.E. Miller, "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1357-1364, Nov/Dec 1996.
 - [83] D.E. Cameron, J.H. Lang, S.D. Umans, "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 3, pp. 1250-1255, May/June 1999.
 - [84] P. Pillay, W.W. Cai, "An Investigation into Vibration in Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 35, No. 3, pp. 589-596, May/June 1999.
 - [85] I. Kioskeridis, C. Mademlis, "Maximum Efficiency in Single-Pulse Controlled Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 20, No. 4, pp. 809-817, Dec. 2005.
 - [86] P.N. Materu, R. Krishnan, "Estimation of Switched reluctance Motor Losses," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 3, pp. 668-679, May/June 1992.
 - [87] T.L. Mthombeni, P. Pillay, "Lamination Core Losses in Motors With Nonsinusoidal Excitation With Particular Reference to PWM and SRM Excitation Waveforms," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 20, No. 4, pp. 836-843, Dec. 2005.
 - [88] Y. Hayashi, T.J.E. Miller, "A New Approach to Calculating Core Losses in the SRM," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, No. 5, pp. 1039-1046, Sept./Oct. 1995.
 - [89] P. Rafajdus, V. Hrabovcova, P. Hudakt, "Investigation of Losses and Efficiency in Switched Reluctance Motor," Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 296 – 301, Portoroz, Aug. 2006. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778416
 - [90] M.S. Lancarotte, C. Goldemberg, A. de Arruda Penteadó, "Estimation of FeSi Core Losses Under PWM or DC Bias Ripple Voltage Excitations," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 20, No. 2, pp. 367-372, June 2005.
 - [91] I. Husain, A. Radun, J. Nairus, "Fault Analysis and Excitation Requirements for Switched Reluctance Generators," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 17, No. 1, pp. 67-72, March 2002.
 - [92] T.J.E. Miller, "Faults and unbalance Forces in the Switched Reluctance Machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 31, No. 2, pp. 319-328, March/April 1995.

- [93] A.A. Arkadan, B.W. Kielgas, "Switched Reluctance motor drive systems dynamic performance prediction under internal and external fault conditions," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 9, No. 1, pp. 45-52, March 1994.
- [94] H.K. Bae, R. Krishnan, "A Novel Approach to Control of Switched Reluctance Motors Considering Mutual Inductance," 26th Annual Conference of the IEEE Industrial electronics Society – IECON 2000, Vol.1, pp. 369-374, Nagoya, Japan, Oct. 2000. DOI: 10.1109/IECON.2000.973178
- [95] D.A. Torrey, "Switched Reluctance Generators and Their Control," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 49, No. 1, pp. 3-14, Feb. 2002.
- [96] A. Radun, "Generating With the Switched Reluctance Motor," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994. APEC '94, Vol. 1, pp. 41-47, 13-17 Feb. 1994. DOI: 10.1109/APEC.1994.316421
- [97] I. Kioskeridis, C. Mademlis, "Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 21, No. 4, pp. 1062-1072, July 2006.
- [98] C. Mademlis, I. Kioskeridis, "Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 20, No. 3, pp. 556-565, Sept. 2005.
- [99] Y. Sozer, D.A. Torrey, "Closed Loop Control of Excitation Parameters for High Speed Switched-Reluctance Generators," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 19, No. 2, pp. 355-362, March 2004.
- [100] M. Nassereddine, J. Rizk, M. Nagrial, "Conversion of a Switched Reluctance Motor to Operate as a Generator for Wind Power Applications," IEEE Bucharest Power Tech Conference, Bucharest-Romania, June 28th - July 2nd 2009. DOI: 10.1109/PTC.2009.5282005
- [101] R. Cardenas, W.F. Ray, G.M. Asher, "Switched reluctance generators for wind energy applications," Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE, Vol. 1, pp.559-564, 18-22. Jun 1995.
- [102] H. Chen, C. Zhang, X. Zhao, "Research on the switched reluctance wind generator system," IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 3, 2001.
- [103] M.A. Mueller, "Design and Performance of a 20kW, 100rpm, Switched Reluctance Generator for a Direct Drive Wind Energy Converter," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, pp. 56 – 63, May 2005. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195701
- [104] R. Karthikeyan, *et. al.*, "Design and Analysis of a Switched Reluctance Generator for Rural Electrification in Stand Alone Wind Energy Conversion System," International Conference on Power Systems, 2009. ICPS '09, pp.1-6, 27-29. Dec. 2009. DOI: 10.1109/ICPWS.2009.5442717
- [105] R. Cardenas, *et. al.*, "Control of a Switched Reluctance Generator for Variable-Speed Wind Energy Applications," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, pp. 781-791, Dec. 2005.
- [106] A. Arifin, I. Al-Bahadly, "Switched Reluctance Generator for Variable Speed Wind Energy Applications," *Smart Grid and Renewable Energy 2011*, Vol.2, pp. 27-36, 2011.
- [107] M. Božović, M. Čalasan, V. Vujičić, "Analiza rada i mogućnost primjene prekidačkog reluktantnog generatora u vjetroelektranama," VII Međunarodni naučni skup – Obnovljivi

izvori energije i energetska efikasnost, u organizaciji Crnogorske Akademije Nauka i Umjetnosti i Evropske Akademije Nauka i Umjetnosti, Budva, Hotel Mogren, 10. i 11. oktobar 2011.

- [108] Q. Ming, *et.al.*, “A rapid design method for high speed aeronautic switched reluctance generator,” International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE), pp. 1937 – 1941, Wuhan-China, 15-17 April 2011.
- [109] A. V. Radun, “High-power density switched reluctance motor drive for aerospace applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 1, pp. 113-119, Jan./Feb. 1992.
- [110] M. Villani, M. Tursini, and G. Fabri, L. Di Leonardo, “A switched-reluctance motor for aerospace application,” in Proc. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2073 – 2079. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960470
- [111] K. M. Rahman, S. E. Schulz, “High-Performance Fully Digital Switched Reluctance Motor Controller for Vehicle Propulsion,” *IEEE Tran. Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 4, pp. 1062-1071, July/August 2002.
- [112] K. M. Rahman, *et. al.*, “Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues,” *IEEE Tran. Ind. Appl.*, Vol. 36, No. 1, pp. 111-121, Jan./Feb. 2000.
- [113] S. Kachapornkul, *et. al.*, “A Design of 15 kW Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Applications,” *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007*, , pp.1690-1693, Seoul, Korea, 8-11. Oct. 2007.
- [114] S. Narla, Y. Sozer, and I. Husain, “Switched reluctance generator controls for optimal power generation and battery charging,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 48, No. 5, pp. 1452-1459, Sep./Oct. 2012.
- [115] A. Martinez, *et.al.*, “Simulation Model of an AC Autonomous Switched Reluctance Generator,” The International Conference on "Computer as a Tool" - EUROCON 2007, Warsaw, pp. 1674 – 1678, Sept. 9-12. 2007. DOI: 10.1109/EURCON.2007.4400376
- [116] A. Fleury, *et.al.*, “Switched Reluctance Generator for complementary Wind Power Generation in Grid Connection,” *IEEE International Electric Machines & Drives Conference - IEMDC '07.*, Vol. 1, pp. 465 – 470, 2007. DOI: 10.1109/IEMDC.2007.382712
- [117] H. Le-Huy, M. Chakir, “Optimizing the performance of a Switched Reluctance Generator by simulation,” XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, 2010. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608165
- [118] O. Ichinokura, *et. al.*, “Dynamic Simulation Model of Switched Reluctance Generator,” *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 39, No. 5, pp. 3253-3255, Sept. 2003.
- [119] I. Jordison, *et. al.*, “Control of switched reluctance machines,” Eur Patent EP 1 385 263 A2, Jan. 28, 2004.
- [120] N. Schofield, S.A. Long, D. Howe, M. McClelland, “Design of a Switched Reluctance Machine for Extended Speed Operation,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 45, Issue 1, pp. 116-122, Jan/Febr 2009.
- [121] A. Chiba, *et. al.*, “Consideration of Number of Series Turns in Switched-Reluctance Traction Motor Competitive to HEV IPMSM,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 48, Issue 6, pp. 2333-2340, Nov. 2012.

- [122] R. Vandana and B.G. Fernandes, “*Switched reluctance motor for hybrid electric vehicles*,” Fifth International Conference on Power and Energy Systems, Kathmandu, Nepal, pp. 1-6, Oct., 2013.
- [123] M. Korkosz, D. Mazur, “*Operation of the Switched Reluctance Motor at Continuous Conduction of Phase Current*,” IEEE MELECON 2006, Benalmádena-Málaga, Spain, pp.1166-1169, May 2006., DOI: 10.1109/MELCON.2006.1653308
- [124] N.A. Patil, and J.S. Lawler, “*Issues in the Control of the Switched Reluctance Motor During Continuous Conduction*,” 39th North American Power Symposium - NAPS 2007, Las Cruces, NM, pp. 534-540, 2007., DOI: 10.1109/NAPS.2007.4402362
- [125] Y. Takano, *et. al.* “*Operating Area of a Switched Reluctance Motor with Continuous Current Operation*,” IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010, Minneapolis, MN, pp. 1 – 4, July 2010., DOI: 10.1109/PES.2010.5590146
- [126] J.S. Lawler, *et. al.*, “*Impact of Continuous Conduction on the Constant Power Speed Range of the Switched Reluctance Motor*,” IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, TX, pp-1285-1292, may 2005., DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195888
- [127] C. Yoopakdee, N.H. Fuengewarodskul, “*Experimental investigation of Control Parameters of SRM drive in Continuous Conduction Mode*,” 18th international Conference on Electrical Machines and Systems – ICEMS, Pattaya City, Thailand, oct. 2015., DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385162
- [128] M.P. Čalasan, V.P. Vujičić, “*Characteristics of Switched Reluctance Motor Operating in Continuous and Discontinuous Conduction Mode*,” *Serbian Journal of Electrical Engineering - SJEE*, Printed ISSN: 1451-4869, Online ISSN: 2217-7183, Vol. 10, No. 1, February 2013, pp. 47-57
- [129] V. Vujicic, M.P. Calasan, “*Simple Sensorless Control for high-speed Operation of Switched Reluctance Generator*,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 31, Issue 4, pp. 1325 - 1335, dec 2016.
- [130] M.P. Calasan, V.P Vujicic, “*A robust Continuous Conduction Mode control strategy of Switched Reluctance Generator for wind power plant applications*,” *Archiv für Elektrotechnik - Electrical Engineering*, accepted for publication, DOI: 10.1007/s00202-016-0459-1
- [131] R. O'Donnell, *et. al.*, “*Design Concepts for High-Voltage Variable-Capacitance DC Generators*,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 45, No. 5, pp.1778-1784, Sept./Oct. 2009.
- [132] M. Čalasan, V. Vujičić, “*Optimizacija omskog opterećenja elektrostatičkog V-C generatora*,” *Energija-Ekologija-Ekonomija*, UDC: 621.311.21: 621.313.5.004, ISSN 0354-8651, mart 2011, pp. 200-205.
- [133] V. Vujičić, M. Čalasan, „*Simulacija rada elektrostatičkog V-C generatora u praznom hodu i kratkom spoju*,” *ETF Journal of Electrical Engineering*, Vol.19., No.1, ISSN 0353-5207, pp. 34-47, oktobar 2011.
- [134] M. Čalasan, V. Vujičić, “*Veza između snage i talasnog oblika kapacitivnosti V-C generatora*,” Žabljak, Informacione tehnologije, Žabljak, Crna Gora, februar 2011., pp. 158-161.

- [135] V. Vujičić, M. Čalasan, “Optimizacija opterećenja visokonaponskog elektrostatičkog generatora,” II Savjetovanje CG-KO CIGRE, Budva, Crna Gora, 16-19. 05. 2011, Grupa A1, Rad broj: R A1-11, www.cigre.me
- [136] Y. Xia, K.H. Ahmed, B.W. Williams, “Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique,” *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 60, pp. 1122-1132, 2013.
- [137] D. Segaran, D.G. Holmes, B.P. McGrath, “Enhanced load step response for a bidirectional DC–DC converter,” *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 28, pp. 371-379, 2013.
- [138] E.Koutroulis, K. Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking systems for wind-energy-conversion applications”, *IEEE Trans. Ind. Electr.*, Vol. 53, No. 2, pp. 486-494, 2006.
- [139] R. Visinka, “Phase resistance estimation for sensorless control of switched reluctance motors,” 28th IEEE Annual Conference of the Industrial Electronics Society – IECON, pp. 1044-1049. 2002., DOI: 10.1109/IECON.2002.1185416
- [140] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, E. Ceanga, “Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators.” *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 17, pp. 523–529, 2002.
- [141] H. Polinder, F.A. Frank, G.J. Vilder, P.J. Tavneret, “Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 21, No. 3, pp. 725-733, Sept. 2006.
- [142] J.G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling, “Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations,” *IEEE Trans Energy Conv*, Vol. 18, pp. 516-524, 2003.
- [143] Y.C. Chang, C.M. Liaw, “Establishment of a Switched-Reluctance Generator-Based Common DC Microgrid System”, *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 26, No. 9, pp. 2512-2527, 2011
- [144] K.W. Hu, J.C. Wang, T.S. Lin, C.M. Liaw, “Switched-Reluctance Generator with Interleaved Interface DC–DC Converter,” *IEEE Trans. Energy Conv*, Vol. 30, No. 1, pp. 273-284, 2015.
- [145] N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Robbins, “*Power Electronics Converters*,” Applications and Design, 3rd ed. New York: Wiley, 2003.
- [146] S. Inoue, H. Akagi, “A bidirectional DC-DC converter for an energy storage system with galvanic isolation,” *IEEE Trans. Power Electr*, Vol. 22, No. 6, pp. 2299–2306, 2007.

PRILOG A

Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u

Tabela P-A.1 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{mch} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
500	92.6	118.4	2.713	142.0536	59.3414	0.4177	1.9989	4.2335
1000	86	116.7	2.7184	284.6671	201.9608	0.7095	1.9989	4.2335
1500	81	112.8	2.647	415.783	333.0155	0.8009	1.9996	4.2335
2000	76.8	105.6	2.4459	512.2581	429.4651	0.8394	1.9999	4.0400
3000	71.4	106.2	1.9654	617.4548	534.6591	0.8659	1.9924	3.9999
4000	65	105.6	1.6111	674.8683	592.9375	0.8786	1.9895	4.2226
5000	63.8	107.5	1.3834	724.3316	641.6423	0.8858	1.9987	4.2052
6000	62.4	109	1.2026	755.6142	672.8499	0.8905	1.9996	4.1640
6500	64.2	111	1.1161	759.7222	677.073	0.8912	1.9982	4.1551
6750	65.6	112.2	1.0649	752.7333	670.7516	0.8911	1.9901	4.1406
7000	66.6	113.3	1.024	750.614	668.0495	0.89	1.9972	4.1508
7500	69	115.6	0.9266	727.7408	645.2893	0.8867	1.9958	4.1447
8000	71	117.6	0.824	690.3048	609.0069	0.8822	1.9818	4.1215
9000	71.2	117.7	0.6455	608.3277	544.1121	0.8944	1.7613	3.6615
10000	71.6	118	0.5187	543.2187	490.599	0.9031	1.5944	3.3129
11000	71.5	117.7	0.4244	488.8325	446.4846	0.9134	1.4303	2.9701
12000	71.6	117.7	0.3546	445.5636	410.1048	0.9204	1.3088	2.7159
13000	71.7	117.7	0.3006	409.1899	379.0786	0.9264	1.2061	2.5015
14000	71.7	117.7	0.259	379.6738	353.6339	0.9314	1.1216	2.324
15000	71.7	117.6	0.2246	352.7673	330.2862	0.9363	1.0421	2.159
16000	71.8	117.6	0.1965	329.2828	309.5976	0.9402	0.9752	2.02

Tabela P-A.2 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u ($I_{ef}=1.75A$,
 $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{meh} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
500	95.9	116.3	2.2649	112.5233	49.1747	0.437	1.7494	4.25
1000	88.9	113.3	2.1706	227.306	163.945	0.7213	1.7495	4.25
1500	82.3	105.8	2.1356	335.4568	272.2124	0.8115	1.7479	4.25
2000	73.5	102.9	1.9639	411.3256	347.9817	0.846	1.7493	3.2733
3000	68.9	103.8	1.6135	506.9024	443.5696	0.8751	1.7492	3.629
4000	66.1	104.9	1.3503	565.6321	502.2632	0.888	1.7497	3.7162
5000	64.6	106.4	1.1613	608.0369	544.6821	0.8958	1.7495	3.7165
6000	63.9	108.1	1.0167	638.7855	575.4076	0.9008	1.7498	3.6875
7000	63.05	109.6	0.8986	658.6736	595.2856	0.9038	1.7499	3.636
7250	63.9	110.5	0.8686	659.4876	596.2161	0.9041	1.7483	3.6376
7500	65.1	111.6	0.8385	658.5508	595.1997	0.9038	1.7494	3.6401
8000	66.9	113.45	0.7769	650.8455	587.6351	0.9029	1.7475	3.631
9000	70.9	117.4	0.6452	608.1278	544.9648	0.8961	1.7469	3.6302
10000	71.6	118	0.5187	543.2187	490.599	0.9031	1.5944	3.3129
11000	71.5	117.7	0.4244	488.8325	446.4846	0.9134	1.4303	2.9701
12000	71.6	117.7	0.3546	445.5636	410.1048	0.9204	1.3088	2.7159
13000	71.7	117.7	0.3006	409.1899	379.0786	0.9264	1.2061	2.5015
14000	71.7	117.7	0.259	379.6738	353.6339	0.9314	1.1216	2.324
15000	71.7	117.6	0.2246	352.7673	330.2832	0.9363	1.0421	2.159
16000	71.8	117.6	0.1965	329.2828	309.5976	0.9402	0.9752	2.02

Tabela P-A.3 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u DCM-u ($I_{ef}=1.5A$,
 $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{meh} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
500	100.2	115.7	1.6934	83.8861	37.5012	0.447	1.4969	4.25
1000	88	108.5	1.6382	171.5507	124.9922	0.7286	1.4997	4.25
1500	81.9	104.5	1.6453	258.4432	211.8952	0.8199	1.4996	3.666
2000	76.2	103.4	1.5373	321.9671	275.5268	0.8558	1.4978	2.8702
3000	72.5	104.5	1.2961	407.1811	360.6145	0.8856	1.4999	3.108
4000	67.6	104.3	1.0888	456.0549	409.5057	0.8979	1.4996	3.163
5000	65.3	105.2	0.9457	495.17	448.3517	0.9054	1.5003	3.193
6000	63.3	106	0.8292	521	474.51	0.9108	1.4985	3.163
7000	63.1	107.6	0.7383	541.1794	495.0484	0.9148	1.4928	3.134
7500	61	107.4	0.7025	551.7551	505.2181	0.9157	1.4994	3.116
8000	62.9	109.2	0.6667	558.56	512.11	0.9168	1.498	3.1168
8500	63.6	110	0.6333	563.6873	517.2029	0.9175	1.4985	3.1035
9000	66.5	112.7	0.5907	556.71	510.7192	0.9164	1.4995	3.1176
10000	69.8	116	0.5095	533.524	487.1094	0.913	1.4974	3.1098
11000	71.5	117.7	0.4244	488.8325	446.4846	0.9134	1.4303	2.9701
12000	71.6	117.7	0.3546	445.5636	410.1048	0.9204	1.3088	2.7159
13000	71.7	117.7	0.3006	409.1899	379.0786	0.9264	1.2061	2.5015
14000	71.7	117.7	0.259	379.6738	353.6339	0.9314	1.1216	2.324
15000	71.7	117.6	0.2246	352.7673	330.2832	0.9363	1.0421	2.159
16000	71.8	117.6	0.1965	329.2828	309.5976	0.9402	0.9752	2.02

PRILOG B

Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u

Tabela P-B.1 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{meh} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
7000	61.7	108.6	1.0539	772.5472	689.8823	0.892997	1.9979	4.117
8000	63.1	110	0.9395	787.1012	704.2591	0.89475	2	4.0638
9000	64.2	111.1	0.8431	794.6404	711.8227	0.89578	2	4.01
10000	65.1	112	0.7624	798.3365	715.6201	0.896389	1.999	3.961
11000	66.1	113	0.6947	800.2146	717.3229	0.896413	2.0001	3.926
12000	66.4	113.3	0.6363	799.6602	717.3408	0.897057	1.9942	3.873
13000	66.4	113.3	0.5869	798.9704	717.3871	0.897889	1.9827	3.818
14000	66.5	113.4	0.5446	798.4766	717.3764	0.898431	1.9794	3.785
15000	66.5	113.4	0.508	798.0378	717.412	0.89897	1.9736	3.7307
16000	66.5	113.4	0.4761	797.6767	717.4389	0.899411	1.9688	3.692

Tabela P-B.2 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1.75A$, $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{meh} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
7000	59.6	106.3	0.886	649.4874	586.1271	0.9024	1.7495	3.5793
7500	60	106.9	0.8412	658.3486	594.9818	0.9037	1.7496	3.5594
8000	60.8	107.5	0.7964	667.2098	603.8365	0.905	1.7497	3.5395
9000	61.7	108.4	0.7195	678.1065	614.8374	0.9067	1.7483	3.496
10000	62.6	109.3	0.6564	687.3779	623.9994	0.9078	1.7498	3.463
11000	63.3	110	0.6017	693.1351	629.7643	0.9086	1.7497	3.429
12000	63.8	110.5	0.5542	696.4115	633.1643	0.9092	1.748	3.394
13000	64.5	111.2	0.5145	700.3563	636.9583	0.9095	1.7501	3.3735
14000	65	111.7	0.4791	702.3412	638.9464	0.9097	1.75	3.35
15000	65.5	112.2	0.448	703.7542	640.3295	0.9099	1.7504	3.33
16000	65.9	112.6	0.4204	704.3355	640.9497	0.9100	1.7499	3.31

Tabela P-B.3 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1.5A$,
 $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{meh} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
7000	59.3	105.7	0.7340	538.0788	491.5162	0.9134	1.4998	3.1170
8000	61.4	107.8	0.6584	545.7351	500.6080	0.9140	1.4928	3.0440
9000	59.1	105.6	0.5852	551.5528	505.0144	0.9156	1.4994	3.0130
10000	59.7	106.2	0.5353	560.5587	514.0806	0.9171	1.4984	2.9812
11000	60.2	106.7	0.4927	567.5505	521.0968	0.9182	1.4980	2.9520
12000	60.7	107.2	0.4570	574.2940	527.7118	0.9190	1.4991	2.9292
13000	61.1	107.6	0.4254	579.1426	532.5933	0.9196	1.4996	2.9070
14000	61.4	107.9	0.3973	582.5281	535.9851	0.9201	1.4995	2.8850
15000	61.7	108.2	0.3728	585.5725	539.0384	0.9205	1.4993	2.8670
16000	61.9	108.4	0.3508	587.7388	541.1938	0.9208	1.4995	2.849

Tabela P-B.4 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1.5A$,
 $V_{dc_mk}=202.5V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{meh} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
7000	63.4	110.3	0.5919	433.892	387.6027	0.893316	1.4954	3.084
8000	64.9	111.8	0.5239	438.8842	392.5599	0.89445	1.496	3.044
9000	66.3	113.2	0.4674	440.5102	394.0787	0.894596	1.5	3.012
10000	66.4	113.3	0.4203	440.1734	394.5319	0.89631	1.4866	2.946
11000	66.5	113.4	0.3819	439.9375	394.8695	0.897558	1.4767	2.892
12000	66.5	113.4	0.3499	439.7589	395.1817	0.898633	1.4682	2.846
13000	66.5	113.4	0.3229	439.6295	395.4327	0.899468	1.4616	2.812
14000	66.5	113.4	0.2998	439.62	395.6377	0.899954	1.4564	2.771
15000	66.5	113.4	0.2798	439.5151	395.8083	0.900557	1.4521	2.741
16000	66.5	113.4	0.2622	439.404	395.9477	0.901102	1.4489	2.732

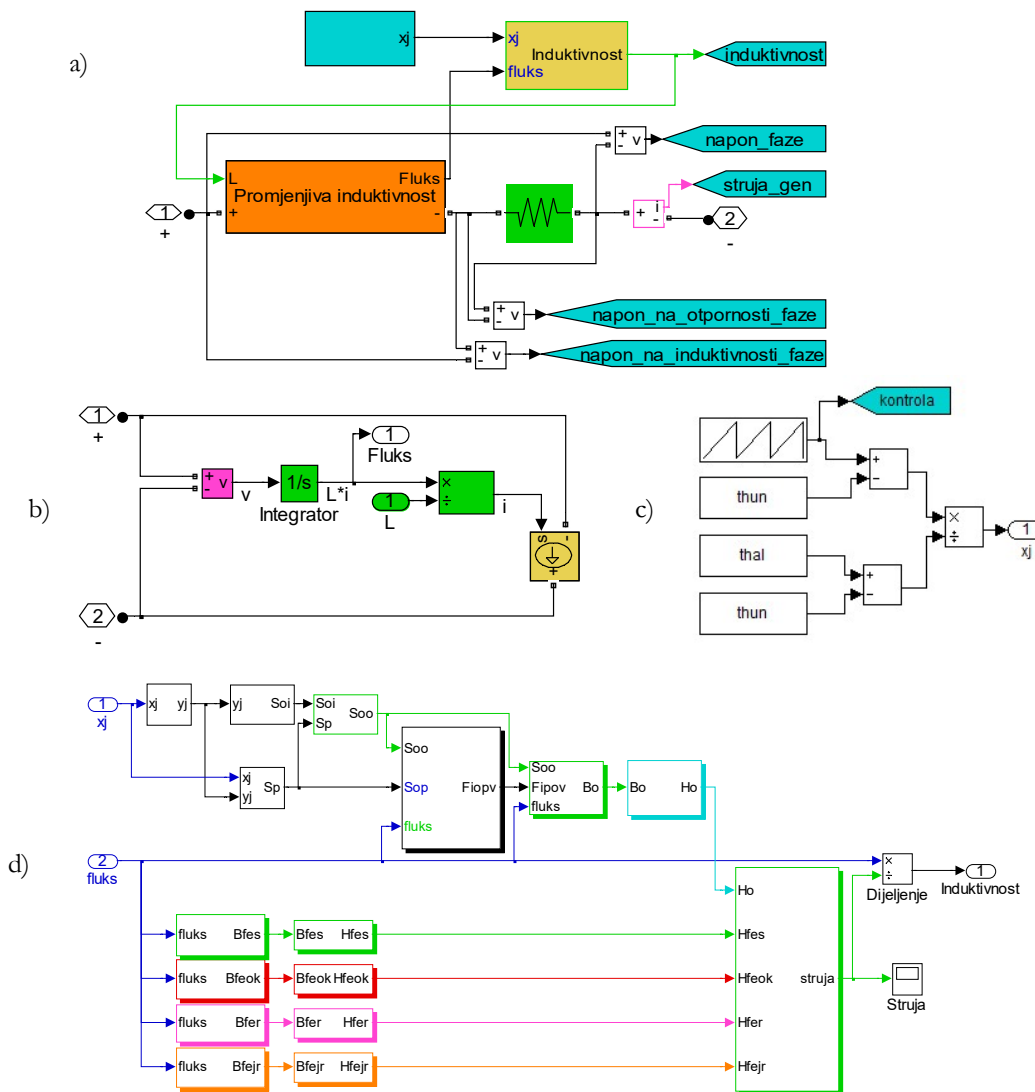
Tabela P-B.5 Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a u CCM-u ($I_{ef}=1A$,
 $V_{dc_mk}=135V$)

n [ob/min]	θ_{on} [°]	θ_{off} [°]	M [Nm]	P_{meh} [W]	P [W]	η [%]	I_{ef} [A]	I_{max} [A]
7000	62	109	0.2637	193.2847	172.657	0.893278	0.9992	2.036
8000	63.3	110.3	0.2348	196.7112	176.0413	0.894923	0.9999	2.0125
9000	64.3	111.3	0.2106	198.5177	177.8581	0.895931	0.9994	1.989
10000	65.2	112.2	0.1906	199.5511	178.8891	0.896458	0.9991	1.969
11000	66.1	113.1	0.1736	199.9159	179.3307	0.897031	0.9999	1.952
12000	66.5	113.5	0.1592	200.0231	179.4232	0.897012	0.9975	1.932
13000	66.5	113.5	0.1469	199.9757	179.5454	0.897836	0.9933	1.908
14000	66.5	113.5	0.1364	199.9389	179.6431	0.89849	0.9902	1.8878
15000	66.5	113.5	0.1273	199.9074	179.7204	0.899018	0.9872	1.87
16000	66.5	113.5	0.1193	199.8833	179.7852	0.899451	0.982	1.855

PRILOG C

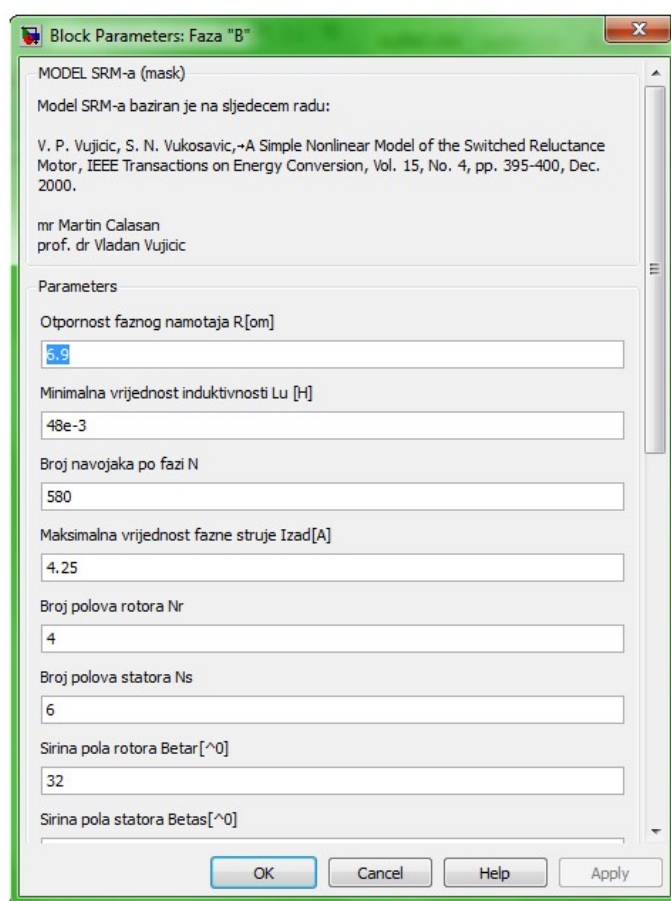
MATLAB/Simulink model SRM-a baziran na Vujičić-evom nelinearnom modelu

U svrhu simulacionog ispitivanja rada SRG-a u programskom paketu MATLAB/Simulink realizovan je model faze SRG-a baziran na jednačinama Vujičić-evog nelinearnog modela SRM-a (slika P-C.1a).

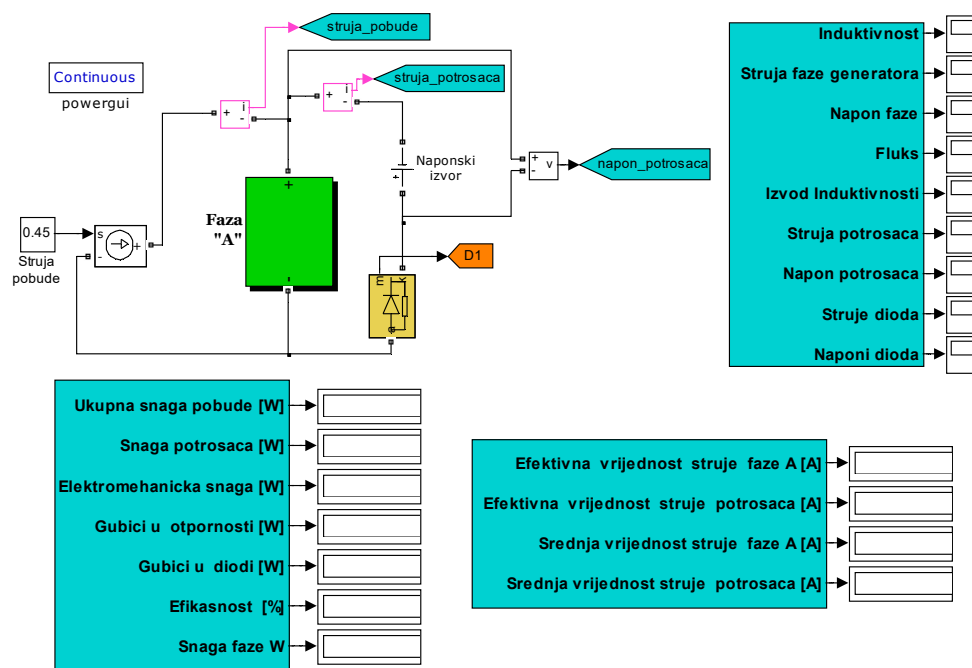


Slika P-C.1 a) Izgled realizovanog MATLAB/Simulink modela. b) Blok za definisanje pozicije rotora. c) Blok za definisanje induktivnosti. d) Blok koji vrši proračun induktivnosti faze.

Izgledi blokova koji vrše definisanje promjenjive induktivnosti, pozicije rotora i proračun induktivnosti faze prikazani su na slikama P-C.1b, P-C.1c i P-C.1d, respektivno. Sa druge strane, u cilju lakše kontrole parametara SRM-a izvršeno je „maskiranje“ bloka jedne faze SRG-a (slika P-C.2). Na ovaj način je omogućen lakši unos parametara mašine, omogućena je njihova promjena „sa jednog mjesta“ i postignuta univerzalnost primjene za bilo koju konfiguraciju i bilo koje parametre SRG-a. Na kraju, MATLAB/Simulink model prostog kola za novo bezsenzorsko upravljanje SRG-om, sa konstantnim strujnim izvorom u kolu pobude, prikazan je na slici P-C.3.



Slika P-C.2 Maskirani izgled MATLAB/Simulink modela faze SRG-a.



Slika P-C.3 MATLAB/Simulink model prostog kola za bezsenzorsko upravljanje SRG-om u CCM-u.

Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri CCM - On/Off - CC metodu upravljanja

Tabela P-C.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	P_{meh} [W]	I_{dc-kom} [A]	I_{ef} [A]	M [Nm]	P [W]	η [%]
7000	618.2062	1.4390	1.9972	0.4223	535.6384	86.6440
8000	668.4169	1.3960	1.9991	0.3991	585.6921	87.6238
9000	706.8339	1.3680	1.9994	0.3751	624.0855	88.2931
10000	733.7576	1.3480	1.9995	0.3504	650.9959	88.7208
11000	752.8352	1.3320	2.0000	0.3268	670.0389	89.0021
12000	763.3275	1.3160	1.9990	0.3039	680.6112	89.1637
13000	772.7462	1.3030	1.9979	0.2841	690.1186	89.3073
14000	780.7165	1.2910	1.9975	0.2666	698.1252	89.4211
15000	787.5748	1.2820	1.9998	0.2507	704.7889	89.4885
16000	792.4041	1.2750	1.9998	0.2365	709.6167	89.5524

Tabela P-C.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju
($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$)

n [ob/min]	P_{meh} [W]	I_{dc-kom} [A]	I_{ef} [A]	M [Nm]	P [W]	η [%]
7000	349.2891	1.0800	1.4983	0.3180	302.8173	86.6953
8000	376.8138	1.0470	1.4976	0.3003	330.3898	87.6798
9000	398.7128	1.0290	1.4996	0.2821	352.1629	88.3250
10000	412.0284	1.0110	1.4961	0.2630	365.6935	88.7544
11000	421.3375	0.9980	1.4978	0.2442	374.9020	88.9790
12000	428.1745	0.9850	1.4964	0.2277	381.8239	89.1748
13000	434.2007	0.9760	1.4982	0.2129	387.7362	89.2988
14000	438.4549	0.9670	1.4987	0.1995	391.9587	89.3954
15000	440.8850	0.9600	1.4988	0.1873	394.3850	89.4530
16000	443.9238	0.9540	1.4966	0.1770	397.5586	89.5556

Tabela P-C.3 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri CCM - On/Off - CC upravljanju
($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$)

n [ob/min]	P_{meh} [W]	I_{dc-kom} [A]	I_{ef} [A]	M [Nm]	P [W]	η [%]
7000	155.7088	0.7200	0.9996	0.2125	135.0267	86.7174
8000	167.6177	0.6980	0.9981	0.2005	146.9958	87.6971
9000	177.5172	0.6850	1.0000	0.1884	156.8180	88.3396
10000	183.2703	0.6740	0.9996	0.1751	162.5855	88.7135
11000	187.5271	0.6640	0.9977	0.1632	166.9211	89.0117
12000	190.5564	0.6570	0.9993	0.1518	169.8871	89.1532
13000	192.7420	0.6490	0.9979	0.1419	172.1305	89.3061
14000	194.9090	0.6440	0.9997	0.1330	174.2225	89.3866
15000	195.9987	0.6390	0.9976	0.1251	175.3984	89.4896
16000	197.6009	0.6360	0.9996	0.1180	176.9159	89.5319

PRILOG D

Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri CCM - Hist - CC metodu upravljanja

Tabela P-D.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri CCM - Hist - CC upravljanju ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$)

n [ob/min]	P_{meh} [W]	I_{dc-kom} [A]	ΔI_{dc-kom} [A]	I_{ef} [A]	M [Nm]	P [W]	η [%]
7000	775.5854	1.042	0.829	1.9998	1.0580	692.7996	89.3260
8000	787.7299	1.085	0.674	1.9994	0.9397	704.9818	89.4954
9000	795.4581	1.110	0.590	1.9996	0.8440	712.6883	89.5947
10000	801.1771	1.128	0.534	1.9997	0.7651	718.4027	89.6684
11000	805.0105	1.140	0.480	1.9993	0.6988	722.2704	89.7219
12000	808.1789	1.150	0.450	1.9991	0.6431	725.4540	89.7640
13000	810.7513	1.155	0.435	1.9991	0.5955	728.0224	89.7960
14000	812.7733	1.160	0.400	1.9995	0.5544	730.0123	89.8174
15000	814.4112	1.166	0.375	1.9998	0.5185	731.6268	89.8351
16000	815.6928	1.169	0.345	2.0000	0.4868	732.8961	89.8495

Tabela P-D.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri CCM - Hist - CC upravljanju ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$)

n [ob/min]	P_{meh} [W]	I_{dc-kom} [A]	ΔI_{dc-kom} [A]	I_{ef} [A]	M [Nm]	P [W]	η [%]
7000	435.2340	0.7840	0.6280	1.4993	0.5937	388.6997	89.3082
8000	441.8661	0.8140	0.5080	1.4982	0.5274	395.4027	89.4847
9000	445.9818	0.8320	0.4430	1.4978	0.4732	399.5425	89.5872
10000	449.2868	0.8460	0.4000	1.4983	0.4290	402.8147	89.6565
11000	451.5369	0.8560	0.3560	1.4986	0.3920	405.0498	89.7047
12000	453.7641	0.8620	0.3310	1.4998	0.3611	407.1991	89.7381
13000	454.9917	0.8680	0.3200	1.4992	0.3342	408.4692	89.7751
14000	455.0950	0.8690	0.3000	1.5000	0.3343	408.5215	89.7662
15000	456.8887	0.8740	0.2810	1.4991	0.2909	410.3722	89.8188
16000	457.8646	0.8780	0.2560	1.5000	0.2733	411.2898	89.8278

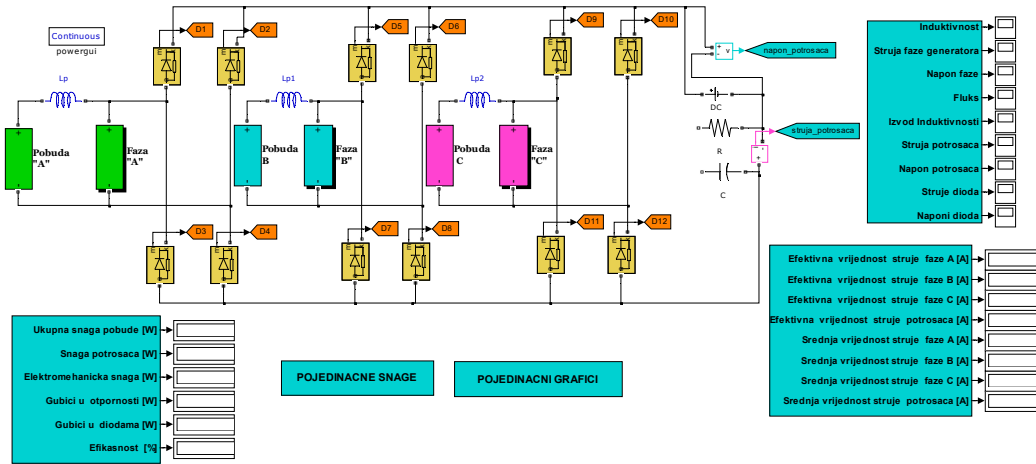
Tabela P-D.3 Rezultati optimizacije rada SRG- pri CCM - Hist - CC upravljanju
 $(I_{ef}=1A, V_{dc_mk}=135V)$

n [ob/min]	P_{mch} [W]	I_{dc-kom} [A]	ΔI_{dc-kom} [A]	I_{ef} [A]	M [Nm]	P [W]	η [%]
7000	193.3679	0.5230	0.4200	0.9999	0.2638	172.6719	89.2971
8000	196.1417	0.5440	0.3310	0.9986	0.2341	175.4991	89.4757
9000	198.0031	0.5550	0.3010	0.9998	0.2101	177.3100	89.5491
10000	199.3756	0.5640	0.2690	0.9999	0.1904	178.6800	89.6198
11000	200.7139	0.5700	0.2460	0.9996	0.1742	180.0312	89.6954
12000	201.1939	0.5730	0.2310	0.9981	0.1601	180.5706	89.7495
13000	202.0893	0.5770	0.2190	0.9996	0.1484	181.4045	89.7645
14000	202.5793	0.5800	0.2020	0.9997	0.1382	181.8907	89.7874
15000	202.4465	0.5810	0.1850	0.9972	0.1289	181.8610	89.8316
16000	203.3044	0.5840	0.1740	0.9999	0.1213	182.6091	89.8206

PRILOG E

MATLAB/Simulink model trofaznog SRG-a sa PCT1

MATLAB/Simulink model trofaznog SRG-a sa PCT1, napajan iz tri nezavisna DC izvora, prikazan je na slici P-E.1.



Slika P-E.1 Izgled realizovanog MATLAB/Simulink modela trofaznog SRG-a sa PCT1.

Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača

Tabela P-E.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p \rightarrow \infty$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{dc} [A]	1.4	1.372	1.351	1.334	1.319	1.305	1.295	1.285	1.277
P_{pot} [W]	633	668.4	693	710.4	722.1	730.8	738.3	743.4	747.9
P_{meh} [W]	671.4	708.6	734.4	752.7	765.3	774.6	783	788.4	793.2
P_{gub} [W]	88.92	88.8	88.71	88.71	88.71	88.71	88.83	88.77	88.8
P [W]	582.3	619.8	645.6	663.9	676.8	686.1	693.9	699.6	704.4
V_{dc} [V]	12	11.83	11.73	11.67	11.62	11.57	11.55	11.52	11.51
η [%]	86.72	87.52	87.95	88.2	88.4	88.6	88.6	88.7	88.8

Tabela P-E.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$, $L_p \rightarrow \infty$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{dc} [A]	1.05	1.03	1.014	1.001	0.989	0.979	0.971	0.9635	0.957
P_{pot} [W]	355.8	375.9	389.4	398.7	405	410.1	414	416.7	419.1
P_{meh} [W]	377.7	398.7	413.1	398.7	429.9	435.3	439.5	442.8	445.2
P_{gub} [W]	49.92	49.89	49.86	49.95	49.92	49.92	49.95	49.95	49.92
P [W]	327.54	348.63	363	373.44	380.7	385.92	390.33	393.51	396.21
V_{dc} [V]	9	8.8725	8.7975	8.7525	8.715	8.6775	8.6625	8.64	8.6325
η [%]	86.72	87.44	87.90	93.66	88.6	88.6	88.8	88.8	88.9

Tabela P-E.3 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$, $L_p \rightarrow \infty$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{dc} [A]	0.7	0.687	0.676	0.666	0.659	0.652	0.646	0.642	0.637
P_{pot} [W]	158.28	167.07	172.83	176.52	179.64	181.68	183.18	184.74	185.52
P_{meh} [W]	168.51	177.84	183.93	187.92	191.28	193.5	195.15	196.86	197.7
P_{gub} [W]	22.194	22.221	22.206	22.158	22.215	22.197	22.173	22.236	22.179
P [W]	146.31	155.64	161.73	165.75	169.05	171.3	172.98	174.63	175.53
V_{dc} [V]	6	5.915	5.865	5.835	5.81	5.785	5.775	5.76	5.755
η [%]	86.82	87.51	87.9	88.2	88.3	88.5	88.6	88.7	88.7

Tabela P-E.4 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{dc} [A]	1.597	1.53	1.488	1.46	1.43	1.403	1.38	1.636	1.35
P_{pot} [W]	533.4	587.1	631.5	666.9	687.3	700.5	711	720.6	729.6
P_{meh} [W]	560.7	617.7	664.8	702	723.9	738.3	749.4	760.2	769.8
P_{gub} [W]	82.62	82.47	82.62	83.16	82.98	82.59	82.35	82.53	82.89
P [W]	477.9	535.2	582.3	618.9	640.8	655.5	666.9	677.7	687
η [%]	85.23	86.64	87.59	88.16	88.52	88.78	88.99	89.15	89.24
V_{dc} [V]	12.32	12.1	11.95	11.87	11.79	11.69	11.63	11.61	11.6
P_{dc} [W]	58.68	55.26	53.13	51.81	50.43	49.08	48.06	47.37	46.89
I_{ef} [A]	1.998	1.996	1.998	2.004	2.002	1.998	1.995	1.997	2.001

Tabela P-E.5 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=300mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{dc} [A]	1.712	1.626	1.569	1.526	1.491	1.463	1.439	1.41	1.394
P_{pot} [W]	467.4	537.6	593.4	632.4	660.9	682.8	699.3	710.7	717.9
P_{meh} [W]	489.3	564.3	623.7	664.8	694.8	718.5	736.2	748.5	756.3
P_{gub} [W]	82.35	82.62	83.22	82.68	82.53	82.83	83.16	83.16	82.83
P [W]	407.1	481.8	540.3	582	612.3	635.4	653.4	665.4	673.5
η [%]	83.20	85.38	86.63	87.55	88.13	88.43	88.75	88.89	89.05
V_{dc} [V]	12.47	12.25	12.1	11.93	11.82	11.77	11.74	11.69	11.65
P_{dc} [W]	63.36	59.22	56.52	54.24	52.53	51.39	50.46	49.44	48.54
I_{ef} [A]	1.995	1.998	2.005	1.999	1.997	2.001	2.005	2.004	2

Tabela P-E.6 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=150mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{dc} [A]	1.957	1.889	1.818	1.753	1.69	1.647	1.61	1.575	1.542
P_{pot} [W]	236.46	350.7	432.9	500.1	550.5	598.2	633.6	657	672.9
P_{meh} [W]	247.8	366	452.4	524.1	576.6	626.7	663.9	688.8	706.2
P_{gub} [W]	83.01	82.98	82.92	83.13	82.56	82.83	83.1	83.07	82.83
P [W]	164.79	283.23	369.6	439.8	494.1	543.9	580.8	605.7	623.4
η [%]	66.501	77.39	81.69	83.92	85.69	86.79	87.48	87.94	88.28
V_{dc} [V]	12.9	12.64	12.42	12.25	12.06	11.96	11.89	11.82	11.75
P_{dc} [W]	73.05	69.51	66.06	63.06	60	58.11	56.58	55.08	53.67
I_{ef} [A]	2.003	2.002	2.002	2.004	1.997	2	2.004	2.003	2.001

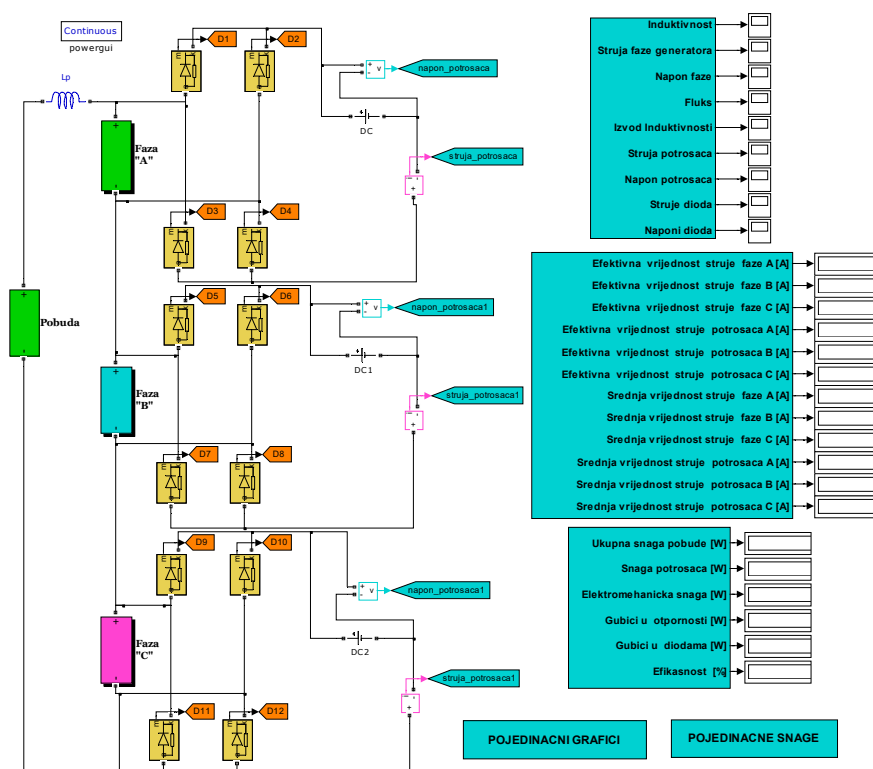
Tabela P-E.7 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT1 pretvarača ($V_{dc}=const$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{dc} [A]	1.528	1.478	1.443	1.43	1.411	1.39	1.377	1.362	1.35
P_{pot} [W]	462.6	538.8	597.9	642.9	672	691.2	708.3	720.3	729.6
P_{meh} [W]	484.2	565.8	628.5	676.2	707.7	728.1	746.4	759.6	769.8
P_{gub} [W]	71.64	74.82	77.25	79.05	80.25	80.88	81.87	82.44	82.89
P [W]	412.5	490.8	551.1	597	627.3	647.4	664.8	677.1	687
η [%]	85.1927	86.743	87.686	88.289	88.635	88.91	89.06	89.13	89.24
V_{dc} [V]	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6
P_{dc} [W]	52.86	51.18	50.22	49.59	48.96	48.27	47.79	47.31	46.89
I_{ef} [A]	1.86	1.901	1.932	1.954	1.969	1.977	1.989	1.996	2.001

PRILOG F

MATLAB/Simulink model trofaznog SRG-a sa PCT2

MATLAB/Simulink model trofaznog SRG-a sa PCT2, a koji napaja tri nezavisna potrošača, prikazan je na slici P-F.1.



Slika P-F.1 Izgled realizovanog MATLAB/Simulink modela trofaznog SRG-a sa PCT2.

Rezultati optimizacije rada korišćenog SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača

Tabela P-F.1 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p \rightarrow \infty$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{ef} [V]	2	2	2	2	2	2	2	2	2
P [W]	585.8	623.6	649.6	667.2	680.2	689.5	697	703.2	707.5
P_{pot} [W]	632.9	668.9	693.5	710.2	722.3	731.2	738.1	743.8	747.6
P_{gub} [W]	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8	82.8
P_{meh} [W]	668.6	706.4	732.4	750	763	772.3	779.8	786	790.3
η [%]	87.61	88.27	88.69	88.96	89.14	89.27	89.38	89.46	89.52
I_{dc} [A]	1.394	1.367	1.346	1.328	1.313	1.3	1.289	1.28	1.271
V_{dc} [V]	35.96	35.5	35.19	34.98	34.84	34.73	34.565	34.461	34.452

Tabela P-F.2 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($I_{ef}=1.5A$, $V_{dc_mk}=202.5V$, $L_p \rightarrow \infty$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{ef} [V]	1.498	1.499	1.499	1.499	1.499	1.5	1.501	1.501	1.501
P [W]	330	350.9	365.3	374.6	382.1	387.2	391.4	394.8	397.2
P_{pot} [W]	356	375.8	389.3	398.3	405	410	414	417	419.4
P_{gub} [W]	46.45	46.51	46.51	46.51	46.51	46.57	46.63	46.63	46.63
P_{meh} [W]	376.45	397.41	411.81	421.11	428.61	433.77	438.03	441.43	443.83
η [%]	87.66	88.29	88.70	88.95	89.14	89.26	89.35	89.43	89.49
I_{dc} [A]	1.0455	1.026	1.01	0.996	0.9847	0.975	0.967	0.96	0.9532
V_{dc} [V]	26.95	26.6	26.38	26.22	26.13	26.05	26	25.96	25.92

Tabela P-F.3 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($I_{ef}=1A$, $V_{dc_mk}=135V$, $L_p \rightarrow \infty$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{ef} [V]	0.9991	0.9998	0.9997	1	1.002	1.001	1.003	1.002	1.003
P [W]	147.1	156.4	162.5	166.8	170.1	172.3	174.2	175.6	176.8
P_{pot} [W]	158.1	166.9	172.7	176.7	179.8	181.9	183.7	185	186.0
P_{gub} [W]	20.66	20.69	20.68	20.7	20.78	20.74	20.82	20.78	20.82
P_{meh} [W]	167.84	177.11	183.21	187.52	190.90	193.06	195.11	196.42	197.63
η [%]	87.68	88.31	88.70	88.96	89.11	89.25	89.32	89.41	89.46
I_{dc} [A]	0.697	0.684	0.673	0.664	0.657	0.65	0.645	0.64	0.636
V_{dc} [V]	17.94	17.74	17.59	17.5	17.45	17.39	17.36	17.33	17.3

Tabela P-F.4 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{ef} [V]	1.996	1.995	1.993	1.996	1.995	1.994	1.992	1.993	1.994
P [W]	555.8	596.3	627.7	651.1	665.3	677	684.8	691.9	697.9
P_{pot} [W]	605.8	643.8	674.4	696.2	710.3	720.4	727.6	734.5	739.9
P_{gub} [W]	82.46	82.38	82.22	82.46	82.38	82.30	82.13	82.22	82.30
P_{meh} [W]	638.2	678.6	709.9	733.5	747.6	759.3	766.9	774.1	780.2
η [%]	87.07	87.86	88.41	88.75	88.98	89.16	89.29	89.37	89.45
I_{dc} [A]	1.456	1.415	1.387	1.366	1.346	1.328	1.313	1.301	1.291
V_{dc} [V]	36.2	35.7	35.3	35.1	34.9	34.75	34.61	34.55	34.5

Tabela P-F.5 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=300mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{efA} [V]	1.997	2.001	1.996	1.996	1.991	1.994	1.991	1.991	1.993
P [W]	541.8	585.1	618.5	643	657.7	671.2	678.8	687.4	694.2
P_{potA} [W]	593.3	635	666	689.1	702.6	715.9	723.6	730.3	736.3
P_{gub} [W]	82.55	82.88	82.46	82.46	82.05	82.30	82.05	82.05	82.22
P_{meh} [W]	624.3	667.9	700.9	725.4	739.7	753.5	760.8	769.4	776.4
η [%]	86.77	87.59	88.23	88.63	88.90	89.07	89.21	89.33	89.41
I_{dc} [A]	1.491	1.445	1.412	1.387	1.362	1.345	1.327	1.314	1.303
V_{dc} [V]	36.35	35.9	35.45	35.2	34.9	34.82	34.65	34.57	34.5

Tabela P-F.6 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($I_{ef}=2A$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=150mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{ef} [V]	1.994	1.995	1.991	1.999	1.996	1.997	1.998	1.997	1.997
P [W]	509.1	546.9	581.4	616.8	638.3	654.8	667.6	675.6	684.4
P_{pot} [W]	563.4	599	631.3	666.2	685.4	701.4	712.9	722.2	728.3
P_{gub} [W]	82.30	82.38	82.05	82.71	82.46	82.55	82.63	82.55	82.55
P_{meh} [W]	591.4	629.2	663.4	699.5	720.7	737.3	750.2	758.1	766.9
η [%]	86.08	86.90	87.63	88.17	88.55	88.80	88.98	89.11	89.23
I_{dc} [A]	1.557	1.519	1.481	1.454	1.424	1.4	1.38	1.361	1.345
V_{dc} [V]	36.7	36.2	35.7	35.5	35.2	35.05	34.9	34.8	34.7

Tabela P-F.7 Rezultati optimizacije rada SRG-a pri upotrebi PCT2 pretvarača ($V_{dc}=const$, $V_{dc_mk}=270V$, $L_p=450mH$)

n [ob/min]	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000
I_{ef} [V]	1.892	1.921	1.944	1.96	1.971	1.979	1.985	1.99	1.994
P [W]	508.9	563.4	606.9	636	656.1	671.1	682	690.8	697.9
P_{pot} [W]	554.7	608.1	651.2	679.8	699.3	713.8	723.2	733	739.9
P_{gub} [W]	74.09	76.38	78.228	79.521	80.416	81.073	81.566	81.977	82.305
P_{meh} [W]	582.99	639.78	685.12	715.51	736.51	752.173	763.57	772.77	780.29
η [%]	87.29	88.06	88.582	88.88	89.08	89.22	89.311	89.39	89.451
I_{dc} [A]	1.396	1.37	1.357	1.344	1.331	1.319	1.309	1.299	1.291
V_{dc} [V]	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5

KRATKA BIOGRAFIJA

Ćalasan Petrašina Martin je rođen 05. oktobra 1986. godine u Plužinama. Osnovnu školu završio je u mjestu Brezna, Opština Plužine, a Gimnaziju, prirodno-matematički smjer, u Plužinama. U toku srednje i osnovne škole učestvovao je na regionalnim i republičkim takmičenjima iz matematike i hemije. Bio je đak generacije, kako u osnovnoj školi, tako i u Gimnaziji, a takodje je i dobitnik diplome »LUČA 1«.

Elektrotehnički fakultet u Podgorici, smjer Energetika i Automatika upisao je 2005. godine. U toku studija bio je korisnik stipendije za talentovane studente Ministarstva prosvjete i nauke Republike Crne Gore (tri godine u kontinuitetu), stipendije Elektroprivrede Crne Gore za talentovane studente tehničkih fakulteta (tri godine u kontinuitetu), stipendije Regulatorne agencije za energetiku Crne Gore (u toku jedne godine) i stipendije Opštine Plužine (u toku dvije godine). Nagrađivan je od strane Elektrotehničkog fakulteta za najboljeg studenta svog odsjeka posle druge i treće godine studija.

Osnovne studije je završio u junu 2008. godine, sa prosječnom ocjenom 9.89. Iste godine je upisao i Specijalističke studije, smjer Industrijska elektrotehnika. Ove studije je završio u junu 2009. godine sa sa prosječnom ocjenom 10.

U oktobru 2009. godine upisao je magistarske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Istovremeno sa upisom magistarskih studija zaposlio se kao saradnik u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu. Magistrske studije je završio odbranivši magistarski rad „*Simulacioni model i dinamika statičkog pobudnog sistema sinbroničkih generatora u HE Perućica*“ u junu 2010. godine. Doktorske studije na istom fakultetu upisao je u septembru 2010. godine.

Kao saradnik u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu, ali i Pomorskom fakultetu u Kotoru, izvodio je vježbe i laboratorijske vježbe iz većeg broja disciplina, uglavnom vezanih za električne mašine.

U dosadašnjem naučnoistraživačkom radu objavio je oko 70 radova u renomiranim međunarodnim i domaćim naučnim časopisima, kao i na međunarodnim i domaćim konferencijama.

Ćalasan Martin je član IEEE (*student member*), CIGRE Paris, CG KO CIGRE, a trenutno je i član UO Univerziteta Crne Gore.

IZJAVA O AUTORSTVU

Potpisani: Martin Čalasan

Broj indeksa: 1/2010

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom i topologije energetskog pretvarača za rad u kontinualnom režimu

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

Potpis doktoranda

U Podgorici, decembar 2016.



IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA

Ime i prezime autora: Martin Čalasan

Broj indeksa/upisa: 1/2010

Studijski program: Industrijska elektrotehnika

Naslov rada: **Upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom i topologije energetskog pretvarača za rad u kontinualnom režimu**

Mentor: Prof. dr Vladan Vujičić

Potpisani: Martin Čalasan

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, odnosno zvanja doktora umjetnosti, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naziv disertacije i datum odbrane rada.

U Podgorici, decembar 2016.

Potpis doktoranda



IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom i topologije energetskog pretvarača za rad u kontinualnom režimu

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerađe
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerađe
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Potpis doktoranda

U Podgorici, decembar 2016.



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerade.
5. Autorstvo - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
6. Autorstvo - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.