

SVEUČILIŠTEU SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Šime Grbin

**SUSTAV REGULACIJE PREKIDAČKOG  
RELUKTANTNOG GENERATORA S URAČUNATIM  
MEĐUINDUKTIVITETIMA, REMANENCIJOM I  
GUBICIMA U ŽELJEZU**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2024.



SVEUČILIŠTEU SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Šime Grbin

*Sustav regulacije prekidačkog reluktantnog generatora s  
uračunatim međiinduktivitetima, remanencijom i gubicima u  
željezu*

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2024.

Doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za elektroenergetiku, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Mentor: Prof. dr. sc. Dinko Vukadinović

---

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: prekidački reluktantni generator, jednopulsni način rada, elektromagnetska pretvorba energije, klasični model, međuintuktivitet, remanencija, algoritam pomaka i promatranja, gubici

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Elektrotehnika

Znanstvena grana: Elektroenergetika

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Prof. dr. sc. Dinko Vukadinović

Broj stranica: 163

Broj slika: 78

Broj tablica: 6

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 144

---

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc.
2. Prof. dr. sc.
3. Prof. dr. sc.

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc.
2. Prof. dr. sc.
3. Prof. dr. sc.
4. Prof. dr. sc.
5. Prof. dr. sc.

Disertacija obranjena dana: xx. mjesec 2024.

# **SUSTAV REGULACIJE PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA S URAČUNATIM MEĐUINDUKTIVITETIMA, REMANENCIJOM I GUBICIMA U ŽELJEZU**

## **SAŽETAK**

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljen je napredni regulacijski sustav prekidačkog reluktantnog generatora s asimetričnim mosnim pretvaračem čiji je cilj minimizacija gubitaka generatora. Izrađen je napredni model prekidačkog reluktantnog generatora koji uključuje međuinduktivne veze između susjednih namota generatora, gubitke u željezu te remanentni magnetski tok. Svi potrebni ulazni podaci za izradu ovog modela dobiveni su eksperimentalno na laboratorijskoj maketi regulacijskog sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom. Simulacijski model regulacijskog sustava izrađen s klasičnim/naprednim modelom prekidačkog reluktantnog generatora predstavlja tzv. klasični/napredni model regulacijskog sustava. Napredni model regulacijskog sustava je najprije uspoređen s klasičnim a potom je napredni model regulacijskog sustava uspoređen s eksperimentalnim rezultatima. Ustanovljeno je da se rezultati dobiveni naprednim modelom regulacijskog sustava bolje slažu s eksperimentalnim rezultatima od rezultata dobivenih klasičnim modelom regulacijskog sustava. Naprednim modelom prekidačkog reluktantnog generatora utvrđena je izražena korelacija između srednje vrijednosti svih faznih struja i gubitaka u stroju. Ova korelacija potvrđena je i eksperimentalno. Budući da se srednja vrijednost svih faznih struja može jednostavno odrediti eksperimentalno, razvijen je algoritam pomaka i promatranja koji se temelji upravo na toj varijabli. Osnovna svrha ovog algoritma je pronaći optimalan položaj uklapanja tranzistora u granama asimetričnog mosnog pretvarača kako bi se postigli minimalni gubici u stroju. Algoritam koristi iznose i promjene srednjih vrijednosti svih faznih struja i promjenu položaja uklapanja tranzistora iz prethodne iteracije kako bi odredio iznos i smjer u kojem će se navedeni položaj promijeniti u sljedećoj iteraciji.

## **KLJUČNE RIJEČI**

prekidački reluktantni generator, jednopulsni način rada, elektromagnetska pretvorba energije, klasični model, međuinduktivitet, remanencija, algoritam pomaka i promatranja, gubici

# **CONTROL SYSTEM OF A SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR INCLUDING MUTUAL INDUCTANCES, REMANENCE AND IRON LOSSES**

## **ABSTRACT**

In this doctoral dissertation, an advanced control system of a switched reluctance generator is presented, the goal of which is to minimize generator losses. An advanced switched reluctance generator model was developed, including mutual inductances, iron losses, and remanent magnetism. All required input data for modeling were obtained experimentally on a laboratory setup of a control system with a switched reluctance generator. The simulation model of the control system made with the classic/advanced model of the switched reluctance generator represents the so-called classic/advanced control system model. The advanced control system model was first compared with the classical one, and then the advanced control system model was compared with the experimental results. It was found that the results obtained with the advanced control system model agreed better with the experimental results than those obtained with the classical control system model. The advanced model of the switched reluctance generator established a strong correlation between the mean value of all phase currents and losses in the machine. This correlation was confirmed experimentally. Since the mean value of all phase currents can be easily determined experimentally a perturb and observe algorithm was developed based on this variable. The main purpose of this algorithm is to find the optimal turn-on position of the transistors in the branches of the asymmetric bridge converter to achieve minimum losses in the machine. The algorithm uses the values and the changes in the mean values of the phase currents and the change in the turn-on position of the transistor from the previous iteration to determine the amount and direction in which the mentioned position will change in the next iteration.

## **KEYWORDS**

switched reluctance generator, single-pulse mode, electromagnetic energy conversion, phase current shaping, conventional model, advanced model, perturb and observe algorithm, losses





## ZAHVALA

*Izražavam veliku zahvalnost svom mentoru, prof. dr. sc. Dinku Vukadinoviću, za dugogodišnje strpljenje, neprocjenjive savjete, ideje i stručnu pomoć tijekom izrade ove disertacije.*

*Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Mateu Bašiću i dr. sc. Ivanu Grgiću na njihovim stručnim savjetima i pomoći u laboratorijskim istraživanjima.*

*Posebnu zahvalnost upućujem laborantu Ivici Pengi, dipl. ing. el., za stručnu pomoć prilikom izrade laboratorijske makete.*

*Na kraju, hvala i mnogobrojnim prijateljima, uključujući i kolege iz Elektre Zadar, za pruženu podršku.*

*Disertacija je posvećena mojim roditeljima Nedi i Emilu.*

## SADRŽAJ

SAŽETAK.....	iv
ABSTRACT .....	v
ZAHVALA .....	vi
SADRŽAJ.....	vii
POPIS TABLICA .....	x
POPIS SLIKA.....	xi
POPIS OZNAKA I KRATICA .....	xvi
1. UVOD.....	1
Motivacija.....	1
Pregled dosadašnjih istraživanja.....	3
Znanstveni doprinos doktorske disertacije .....	7
Struktura doktorske disertacije .....	7
2. OPIS RADA PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA.....	9
2.1. Konfiguracije prekidačkog reluktantnog generatora .....	9
2.2. Asimetrični mosni pretvarač za upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom ...	11
2.3. Elektromagnetska pretvorba energije prekidačkog reluktantnog generatora .....	14
3. KLASIČNI MATEMATIČKI MODEL PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA S ASIMETRIČNIM MOSNIM PRETVARAČEM .....	22
3.1. Prikaz magnetskih karakteristika drugom parcijalnom sumom Fourierovog reda.....	26
3.2. Simulacija klasičnog modela u Matlab/Simulink-u.....	34
3.2.1. Oblikovanje fazne struje prekidačkog reluktantnog generatora.....	38
4. NAPREDNI MATEMATIČKI MODEL PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA S ASIMETRIČNIM MOSNIM PRETVARAČEM .....	43

4.1. Određivanje remanentnog magnetskog toka prekidačkog reluktantnog stroja .....	43
4.2. Razdioba fazne struje po parametrima nadomjesne sheme prekidačkog reluktantnog stroja .....	52
4.3. Određivanje međuinuktiviteta između faza prekidačkog reluktantnog stroja .....	58
4.4. Simulacija naprednog modela u <i>Matlab/Simulinku</i> .....	62
4.5. Krivulje magnetiziranja prekidačkog reluktantnog generatora .....	66
5. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA NAPREDNOG SIMULACIJSKOG MODELA	70
5.1. Laboratorijska maketa sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....	70
5.2. Eksperimentalno određivanje područja rada reguliranog SRG-a .....	73
5.3. Usporedba simulacijskih rezultata s eksperimentalnim .....	78
6. ALGORITAM POMAKA I PROMATRANJA ZA TRAŽENJE MAKSIMALNE KORISNOSTI PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA .....	90
6.1. Korelacija varijabli i gubitaka sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....	90
6.2. Algoritam za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....	95
7. ZAKLJUČAK .....	105
LITERATURA .....	110
Prilog A .....	125
Parametri prekidačkog reluktantnog stroja .....	125
Parametri istosmjernog stroja .....	126
Prilog B .....	127
Koeficijenti aproksimacijskih polinoma .....	127
Prilog C .....	128
Algoritam za filtriranje podataka .....	128
Prilog D .....	132

Sklopni gubici tranzistora.....	132
Gubici vođenja tranzistora i dioda.....	132
Gubici pretvarača.....	134
Prilog E.....	137
Radne točke SRG-a s pripadajućim varijablama kandidatima .....	137
Životopis.....	142
Curriculum Vitae .....	143

## POPIS TABLICA

<i>Tablica 5.1. Otpor trošila, položaj uklapanja, brzina vrtnje, napon između sabirnica te izlazna snaga generatora zabilježeni u realiziranim eksperimentima.....</i>	<i>81</i>
<i>Tablica 5.2. Koeficijenti točnosti K za pojedine faze SRG-a i za radne točke prikazane u Tablici 5.1.....</i>	<i>83</i>
<i>Tablica 5.3. Usporedba ulaznih snaga.....</i>	<i>85</i>
<i>Tablica 6.1. Položaji uklapanja tranzistora dobiveni algoritmom pomaka i promatranja – eksperimenti i simulacije.....</i>	<i>101</i>
<i>Tablica D.1. Otpor trošila, položaj uklapanja, brzina vrtnje, napon između sabirnica te gubici zabilježeni u realiziranim eksperimentima.....</i>	<i>134</i>
<i>Tablica E.1. Radne točke SRG-a s pripadajućim varijablama kandidatima.....</i>	<i>137</i>

## POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Trofazni 12/8 i 6/4 prekidački reluktantni strojevi.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 2.2. Četverofazni 8/6 prekidački reluktantni stroj.....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.3. Potpuno poravnat (pp) i potpuno naporavnat položaj (pn) statorskog i rotorskog pola .....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.4. Sustav SRG-a s simetričnim mosnim pretvaračem, kondenzatorom, teretom i izvorom za početnu uzbudu .....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 2.5. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze SRG-a asimetričnim mosnim pretvaračem.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 2.6. Elektromagnetski moment u generatorskom načinu rada .....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 2.7. Redoslijed magnetiziranja faza za generatorski način rada četverofaznog 8/6 SRM-a.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 2.8. Ovisnost induktiviteta faznog namota o položaju statorskog i rotorskog pola za linearni magnetski krug .....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.9. Magnetiziranje faze stroja uz zakočen rotor u položaju <math>\theta_T</math>.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.10. Magnetiziranje faze stroja uz pomicanje rotora od položaja <math>\theta_{pp}</math> do <math>\theta_T</math>.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2.11. Razmagnetiziranje faze stroja uz pomicanje rotora od položaja <math>\theta_T</math> do <math>\theta_{pn}</math>.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2.12. Cjeloviti ciklus magnetiziranja i razmagnetiziranja .....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2.13. Pretvorba magnetske energije u mehaničku.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 2.14. Cjeloviti ciklus magnetiziranja i razmagnetiziranja uz magnetsko zasićenje i pretvorbu magnetske energije u mehaničku.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 3.1. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a spojene na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača .....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 3.2. Nadomjesna shema klasičnog modela SRG-a, koji je opterećen radnim trošilom <math>R_i</math> pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem .....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 3.3. Shema električnog kruga za provođenje eksperimenta istosmjerne uzbude..</i>	<i>28</i>
<i>Slika 3.4. Struja i napon kod eksperimenta istosmjerne uzbude pri položaju <math>\theta=0^\circ</math>.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 3.5. Aproksimirani magnetski tok i eksperimentalno određeni u ovisnosti o faznoj struji za tri položaja .....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 3.6. Magnetski tok jedne faze u funkciji položaja rotora i fazne struje.....</i>	<i>31</i>

<i>Slika 3.7. Elektromagnetski moment jedne faze SRG-a u ovisnosti o kutu zakreta rotora i faznoj struji</i> .....	34
<i>Slika 3.8. Blokovska shema jedne faze za klasični model SRG-a</i> .....	35
<i>Slika 3.9. Simulacijski model jedne faze za klasični model SRG-a u Matlab/Simulink-u</i> .....	36
<i>Slika 3.10. Blokovska shema simulacije SRG-a koji je opterećen radnim trošilom <math>R_l</math> pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem</i> .....	37
<i>Slika 3.11. Simulacijski model SRG-a koji je opterećen radnim trošilom <math>R_l</math> pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem u Matlab/Simulink-u</i> .....	38
<i>Slika 3.12. Oblikovanje fazne struje kod jednopulsnog načina rada SRG-a</i> .....	40
<i>Slika 4.1. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze stroja uz prethodnu eliminaciju remanencije za položaj rotora <math>\theta=0^\circ</math></i> .....	44
<i>Slika 4.2. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze stroja bez prethodne eliminacije remanencije za položaj rotora <math>\theta=0^\circ</math></i> .....	45
<i>Slika 4.3. Razmagnetiziranje faze stroja s prethodnom eliminacijom remanencije i bez nje</i> .....	46
<i>Slika 4.4. Eksperimentalno određeni remanentni magnetski tok ulančen promatranom fazom i njegova linearna aproksimacija</i> .....	47
<i>Slika 4.5. Smjer silnica glavnog magnetskog toka u statorskim polovima</i> .....	48
<i>Slika 4.6. Promjena remanentnog magnetskog toka pod utjecajem glavnog magnetskog toka svih faza</i> .....	49
<i>Slika 4.7. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a koja uključuje remanentni magnetski tok spojenu na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača</i> .....	51
<i>Slika 4.8. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a spojene na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača s uključenim otporom gubitaka u željezu</i> .....	52
<i>Slika 4.9. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze stroja uz zanemarive gubitke u željezu</i> .....	53
<i>Slika 4.10. Magnetiziranje faze stroja zakočenog SRG-a uz prisutne gubitke u željezu (a) i tokovi struja u nadomjesnoj shemi (b)</i> .....	54
<i>Slika 4.11. Razmagnetiziranje faze stroja zakočenog SRG-a uz prisutne gubitke u željezu (a) i tokovi struja u nadomjesnoj shemi (b)</i> .....	55

<i>Slika 4.12. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze zakočenog SRG-a uz prisutne gubitke u željezu .....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 4.13. Ovisnost struje kroz nadomjesni induktivitet o položaju i magnetskom toku .....</i>	<i>56</i>
<i>Slika 4.14. Ovisnost struje kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu o položaju i glavnom magnetskom toku .....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 4.15. Elektromagnetski moment jedne faze u ovisnosti o kutu zakreta rotora i faznoj struji dobiven iz pregledne tablice <math>i_L(\theta, \psi)</math> .....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 4.16. Položaj rotora kod kojeg je magnetski otpor minimalan između prve i druge faze .....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 4.17. Fazna struja i inducirani napon kod eksperimenta istosmjerne uzbuđene za procjenu međuinuktiviteta pri položaju <math>\theta = -7,5^\circ</math> .....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 4.18. Aproksimirani međuinuktivitet između promatrane i prethodno magnetizirane faze u ovisnosti o položaju rotora .....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 4.19. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a koja uključuje međuinuktivitet, remanentni magnetski tok i gubitke u željezu spojena na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača .....</i>	<i>62</i>
<i>Slika 4.20. Blokowska shema jedne faze za napredni model SRG-a .....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 4.21. Simulacijski model jedne faze za napredni model SRG-a u Matlab/Simulink-u .....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 4.22. Krivulje magnetiziranja za sve četiri faze pri opterećenju od a) 364 W i b) 889 W .....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 4.23. Krivulje magnetiziranja za različite naponske razine .....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 4.24. Krivulje magnetiziranja za različite položaje uklapanja tranzistora asimetričnog mosnog pretvarača .....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 4.25. Krivulje magnetiziranja za različite brzine vrtnje stroja .....</i>	<i>69</i>
<i>Slika 5.1. Blokowska shema regulacijskog sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....</i>	<i>71</i>
<i>Slika 5.2. Laboratorijska maketa regulacijskog sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....</i>	<i>72</i>
<i>Slika 5.3. Niskofrekvencijsko valovanje napona u .....</i>	<i>73</i>



<i>Slika 5.4. Moment praznog hoda <math>M_0</math> .....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 5.5. Područje motorskog i generatorskog načina rada za prvu fazu stroja kada se rotor vrti u smjeru kazaljke na satu .....</i>	<i>77</i>
<i>Slika 5.6. Model SRG-a koji je opterećen radnim trošilom <math>R_t</math> pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem, prilagođen za usporedbu s eksperimentima .....</i>	<i>79</i>
<i>Slika 5.7. Usporedba eksperimentalno dobivene fazne struje sa simulacijski dobivenim faznim strujama .....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 5.8. Relativna greška između ulazne snage dobivene eksperimentalno i simulacijskim modelima .....</i>	<i>88</i>
<i>Slika 6.1. Ilustracija faktora uzbude na valnom obliku fazne struje SRM-a .....</i>	<i>91</i>
<i>Slika 6.2. Gubici SRG-a i varijable kandidati u ovisnosti u položaju uklapanja za radne točke a) <math>\omega=2000</math> o/min, <math>u=200</math> V i <math>R_t=110</math> <math>\Omega</math> i b) <math>\omega=3000</math> o/min, <math>u=250</math> V i <math>R_t=45</math> <math>\Omega</math> .....</i>	<i>93</i>
<i>Slika 6.3. Princip rada algoritma za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....</i>	<i>96</i>
<i>Slika 6.4. Dijagram toka algoritma za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....</i>	<i>97</i>
<i>Slika 6.5. Simulacijski model algoritma za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom .....</i>	<i>99</i>
<i>Slika 6.6. <math>\theta_u</math> određen algoritmom pomaka i promatranja za različite <math>k_p</math> - simulacija naprednim modelom .....</i>	<i>100</i>
<i>Slika 6.7. Promjena <math>\theta_u</math> u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 6 na radnu točku 12 .....</i>	<i>102</i>
<i>Slika 6.8. Promjena <math>\theta_u</math> u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 15 na radnu točku 16 .....</i>	<i>103</i>
<i>Slika 6.9. Promjena <math>\theta_u</math> u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 11 na radnu točku 9 .....</i>	<i>103</i>
<i>Slika 6.10. Promjena <math>\theta_u</math> u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 14 na radnu točku 11 .....</i>	<i>104</i>
<i>Slika A.1. Fotografija statora SRM-a (a) i skica poprečnog presjeka statora (b) .....</i>	<i>125</i>
<i>Slika A.2. Fotografija rotora SRM-a i skica poprečnog presjeka rotora (b) .....</i>	<i>126</i>

<i>Slika C.1. Prikaz funkcije <math>y=f(x)</math> koja je definirana 1. i 2. linijom programskog koda</i>	128
<i>Slika C.2. Prikaz točaka funkcije <math>y=f(x)</math> prije (crvene točke) i nakon (plava točka) što se 5. linija koda izvrši nad drugim podatkom funkcije <math>y=f(x)</math></i>	129
<i>Slika C.3 Prikaz točaka funkcije <math>y=f(x)</math> prije (crvene točke) i nakon (plave točke) što se unutarnja for petlja izvrši nad svim točkama funkcije <math>y=f(x)</math></i>	129
<i>Slika C.4. Prikaz točaka funkcije <math>y=f(x)</math> prije (crvene točke) i nakon (plave točke) što se vanjska for petlja izvrši 5 puta nad svim točkama funkcije <math>y=f(x)</math></i>	130
<i>Slika C.5. Prikaz točaka funkcije <math>y=f(x)</math> bez primjene (plave točke) i uz primjenu (žute točke) while petlje</i>	131
<i>Slika D.1. Izlazna karakteristika tranzistora tipa IRG4PH50UD</i>	133
<i>Slika D.2. Izlazna karakteristika poredne diode tranzistora tipa IRG4PH50UD</i>	133

## POPIS OZNAKA I KRATICA

APC	jednopsulno oblikovanje fazne struje (od engl. Angle Position Control)
$a_{ml}$	koeficijenti aproksimacijskog polinoma za $\psi_m$
$a_{mtl}$	koeficijenti aproksimacijskog polinoma za $L_{mt}$
$a_{pn}$	koeficijent aproksimacijske linearne funkcije za $\psi_{pn}$
$a_{ppt}$	koeficijenti aproksimacijskog polinoma za $\psi_{pp}$
$C$	kapacitet kondenzatora između sabirnica
$C_n$	koeficijenti Fourierovog reda
CCC	histerezno oblikovanje fazne struje (od engl. Current Chopping Control)
$D_s$	dioda koja osigurava minimalan napon između sabirnica
$d$	impuls za sklapanje tranzistora
$d_r$	promjer rotora
$d_{su}$	unutarnji promjer statora SRM-a
$d_{sv}$	vanjski promjer statora SRM-a
$e$	inducirana elektromotorna sila
$e_{mt}$	napon koji prethodno magnetizirana faza inducira u promatranoj
$F_n$	$n$ -ta faza stroja
FEA	analiza konačnim elementima (od engl. Finite Element Analysis)
$g_p$	relativna greška između ulazne snage dobivene eksperimentalno i simulacijskim modelima
$I_{ef,D}$	efektivna vrijednost struje diode
$I_{ef,T}$	efektivna vrijednost struje tranzistora
$I_{sr}$	srednja vrijednost svih faznih struja SRG-a
$I_{sr,D}$	srednja vrijednost struje diode
$I_{sr,T}$	srednja vrijednost struje tranzistora
$I_{max}$	maksimalna fazna struja
$I_{ref}$	referentna vrijednost fazne struje
$i_0$	struja sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača
$I_{ef}$	efektivna vrijednost svih faznih struja
$i_C$	struja kondenzatora između sabirnica

$i_f$	fazna struja
$i_{f,exp}$	eksperimentalno dobivena fazna struja
$i_{f,T}$	fazna struja u točki $T$
$i_{f,simk}$	fazna struja dobivena simulacijom pomoću klasičnog modela
$i_{fM}$	fazna struja za vrijeme magnetiziranja
$i_{f,simm}$	fazna struja dobivena simulacijom pomoću naprednog modela
$i_{fR}$	fazna struja za vrijeme razmagnetiziranja
$i_L$	struja kroz nadomjesni induktivitet faznog namota
$i_m$	struja kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu
$i_s$	fazna struja koja teče kroz susjedni namot od promatranog
$i_{iskl}$	struja pri kojoj se tranzistori isklapaju
$i_t$	struja trošila
$J$	broj koraka u eksperimentu
$j$	stanje univerzalnog brojača
$K$	koeficijent točnosti modela
$k$	stanje uklopljenosti tranzistora u grani pretvarača
$k_p$	koeficijent proporcionalnosti između promjene srednja vrijednosti svih faznih struja i promjene položaja uklapanja
$L$	nadomjesni induktivitet faznog namota stroja
$L_{mt}$	međuinduktivitet između promatrane i prethodno magnetizirane faze
$l$	stupanj funkcije
$L_{pp}$	nadomjesni induktivitet faznog namota stroja pri položaju $\theta_{pp}$
$L_{pn}$	nadomjesni induktivitet faznog namota stroja pri položaju $\theta_{pn}$
$M$	elektromagnetski moment generatora
$M_f$	elektromagnetski moment jedne faze SRG-a
$M_m$	mehanički moment generatora
$M_0$	moment praznog hoda
$n$	brzina vrtnje SRG-a
$pn$	potpuno nepreklapanje statorskog i rotorskog pola
$pp$	potpuno preklapanje statorskog i rotorskog pola

$P$	izlazna snaga SRG-a
$P_n$	nazivna snaga SRG-a
$P_p$	gubici pretvarača
$P_{skl}$	sklopni gubici tranzistora
$P_u$	ulazna snaga SRG-a
PWM	pulsno-širinska modulacija (od engl. Pulse Width Modulation)
$q$	stanje univerzalnog brojača
$R$	nadomjesni otpor faznog namota stroja
$r$	koeficijent korelacije
$r_D$	dinamički otpor diode
$R_m$	nadomjesni otpor gubitaka u željezu
$R_t$	otpor tereta
$r_T$	dinamički otpor tranzistora
SRM	prekidački reluktantni stroj (od engl. Switched Reluctance Machine)
SRG	prekidački reluktantni generator (od engl. Switched Reluctance Generator)
$T$	vremenski interval kada teče fazna struja kod svakog prolaska rotorskog pola
$t_m$	vrijeme magnetiziranja faze stroja
$t_p$	trenutak početka prijelazne pojave
$t_{r1}$	vrijeme od trenutka isklapanja tranzistora do trenutka kad rotorski pol dođe u položaj $30^\circ$
$T_s$	period uzorkovanja
$T_t$	vrijeme trajanja eksperimenta istosmjerne uzbude
$u$	napon između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača
$u_{CE0}$	napon praga tranzistora
$u_{D0}$	napon praga diode
$U_{dc}$	napon na akumulatorskim baterijama
$u_L$	pad napona na nadomjesnom induktivitetu faznog namota stroja
$U_{max}$	gornja granica napona između sabirnica
$U_{min}$	minimalan napon između sabirnica
$U_{ref}$	referentni napon između sabirnica

$u_i$	inducirani napon na stezaljkama namota
$U_0$	početni napon na kondenzatoru između sabirnica
$V$	varijabla kandidat
$W$	magnetska energija jedne faze
$W_{g,m}$	energija pretvorena iz mehaničke u magnetsku za vrijeme magnetiziranja
$W_{g,r}$	energija pretvorena iz mehaničke u magnetsku za vrijeme razmagnetiziranja
$W_u$	energija pretvorena iz magnetske u električnu za vrijeme razmagnetiziranja
$\alpha_r$	luk rotorskog pola
$\alpha_s$	luk statorskog pola
$\varepsilon$	faktor uzbude
$\varepsilon_u$	srednje vrijednosti faktora uzbude svih faza
$\Psi$	glavni magnetski tok jedne faze SRG-a
$\Psi_0$	početni magnetski tok jedne faze SRG-a
$\Psi_m$	magnetski tok jedne faze SRG-a pri položaju $\theta_m$
$\Psi_{mt}$	magnetski tok pojedine faze nastao međuindukcijom od susjedne faze
$\Psi_u$	ukupni magnetski tok jedne faze SRG-a
$\Psi_{pn}$	magnetski tok jedne faze SRG-a pri položaju $\theta_{pn}$
$\Psi_{pp}$	magnetski tok jedne faze SRG-a pri položaju $\theta_{pp}$
$\Psi_T$	magnetski tok jedne faze SRG-a pri položaju $\theta_T$
$\Psi_r$	remanentni magnetski tok
$\omega$	kutna brzina vrtnje SRG-a
$\theta$	položaj rotora
$\theta_0$	položaj rotora pri kojem fazna struja pada na nulu
$\theta_i$	položaj rotora pri kojem se tranzistori pojedine grane isklapaju
$\theta_m$	položaj između $pp$ i $pn$
$\theta_{mag}$	kut magnetiziranja
$\theta_{pn}$	položaj potpunog nepreklapanja statorskog i rotorskog pola
$\theta_{pp}$	položaj potpunog preklapanja statorskog i rotorskog pola
$\theta_u$	položaj rotora pri kojem se tranzistori promatrane grane uklapaju
$\theta_{u,g}$	granični položaj uklapanja tranzistora

# 1. UVOD

## Motivacija

Za odvajanje željeza od magneta potrebno je uložiti mehaničku energiju. U slučaju elektromagneta, dio te mehaničke energije može se pretvoriti u električnu energiju. Ovaj koncept leži u osnovi rada prekidačkog reluktantnog generatora (engl. *Switched Reluctance Generator – SRG*). Osnovni cilj ove doktorske disertacije je razviti računalni model pretvorbe mehaničke energije u električnu pomoću SRG-a s uračunatim međuinduktivitetima, remanentnim magnetskim tokom i gubicima u željezu. Također, istraživanje će se usredotočiti na pronalaženje najučinkovitijeg načina izvođenja te pretvorbe.

Geometrijska jednostavnost, nepostojanje namota ili permanentnih magneta na pomičnom dijelu, manji trošak izrade, veća pouzdanost i robusnost u odnosu na druge električne strojeve glavne su značajke prekidačkog reluktantnog stroja (engl. *Switched Reluctance Machine*) [1, 2]. Kako se namoti ne nalaze na pomičnom dijelu nego samo na statoru stroja olakšano je hlađenje jer se pomični dio ne zagrijava zbog gubitaka u bakru. SRM nema permanentnih magneta ili namota na pomičnom dijelu što pojednostavljuje konstrukciju, ali za razliku od ostalih električnih strojeva, zahtijeva pretvarač. Posljedica geometrije SRM-a i zasićenja željeza je magnetska nelinearnost koja uzrokuje značajne propade momenta. Moguće ih je ublažiti primjenom različitih algoritama upravljanja strojem pomoću pretvarača. Sustav s prekidačkim reluktantnim strojem zahtijeva točno poznavanje pozicije rotora kako bi se pravovremeno magnetiziralo odgovarajuću fazu. Zbog jednostavne konstrukcije, proizvodnja SRM-a je jeftinija od ostalih električnih strojeva, ali njegovu ekonomsku isplativost dovodi u pitanje činjenica da redovito zahtijeva poluvodički pretvarač i često digitalni enkoder za rad.

SRM se u pravilu projektira za kružno gibanje, iako može biti projektiran i za linearno [3-10]. SRM projektiran za kružno gibanje ima stator i rotor na kojima se nalaze istaknuti polovi. Na svakom od statorskih polova nalazi se namot, a rotorski su polovi bez namota. Rotor ima istaknute polove tako da se postigne maksimalna promjena induktiviteta, odnosno reluktancije duž oboda rotora koliko to geometrija i namjena stroja dozvoljavaju.

SRM nalazi primjene i kao motor i kao generator. Tako, npr. u automobilskoj industriji, SRM se primjenjuje kao klasični motor [11-16] ili kao motor u integriranom kotaču [17-20]. Primjerice, tvrtka Nidec je uspješno primijenila SRM u klasičnom pogonu Land Rovera [21]. Jedna od ključnih prednosti SRM-a, naglašena u tom primjeru, jest njegov relativno velik potezni moment, što omogućuje korištenje SRM-a bez potrebe za mjenjačem. Osim automobilske industrije, tvrtka Nidec je također primijenila SRM kao pogonski motor u kućanskim aparatima i laboratorijskim centrifugama. Zahvaljujući svojoj robusnoj konstrukciji, SRM se koristi u zahtjevnim okruženjima kao što su rudnici [22] i prijenos rasutog tereta [23]. Važno je napomenuti da većina gubitaka u SRM-u nastaje u statoru, što olakšava sustav hlađenja u usporedbi s drugim električnim strojevima. Tako, npr., električni strojevi koji se koriste za zavarivanje često se pregriju u kratkom vremenu, a SRM ostaje hladan na dodir čak i nakon dugotrajne upotrebe [23]. SRM nalazi svoju primjenu i u pumpama, klima uređajima, kompresorima i sl. [22]. Danas još uvijek nema masovne primjene SRM-ova, a njihovih proizvođača je tek nekoliko [21, 24-28].

SRM se razmatra za upotrebu u generatorskom načinu rada u različitim područjima. Primjenjuje se za rad u vjetroagregatima [29-43], kao elektropokretač i generator u aeroindustriji [44-49] te kao generator u elektranama zasnovanim na energiji morskih valova [8-10]. Jedna od ključnih prednosti SRG-a je što može raditi u širokom rasponu brzina i ne zahtijeva mjenjač. Komercijalna primjena SRG-a ostvarena je u vjetrogeneratoru *Eco Whisper Turbine* snage 20 kW [50]. U aeroindustriji se kao prednost ističe pouzdanost prilikom kvara. Ako otkáže npr. jedna faza, ostale faze mogu nastaviti generirati energiju, što znači da električni sustavi zrakoplova dalje dobivaju opskrbu električnom energijom unatoč kvaru. Problem nastaje prilikom kratkog spoja jer tada dolazi do razmagnetiziranja stroja. Nakon uklanjanja uzroka kratkog spoja, potrebno je ponovno uspostaviti uzбудu SRG-a pomoću vanjskog izvora napajanja. Za to vrijeme električni sustavi u zrakoplovu su bez opskrbe energijom iz SRG-a [22].

Kod klasičnog modela SRG-a u pravilu se zanemaruju međuinduktivitet, remanentni magnetski tok i gubici u željezu. Kako je SRG geometrijski simetričan, pretpostavlja se da su valni oblici faznih struja također simetrični. U radovima [51, 52] je pokazano da zbog utjecaja međuinduktiviteta može doći do nesimetrija između valnih oblika faznih struja. Zbog toga faze stroja mogu biti različito opterećene te moment stroja nije ravnomjeran. U radu [53] pokazano je da može doći do pogrešne procjene korisnosti stroja ako se međuinduktivitet zanemari. Osim



međuinduktiviteta u pravilu se zanemaruju i gubici u željezu što dodatno doprinosi pogrešnoj procjeni korisnosti stroja.

Sustav sa SRG-om, u pravilu, zahtijeva izvor za početnu uzbudu. Prema radovima [54-57] SRG je moguće magnetizirati remanentnim magnetskim tokom, ali nije predstavljen model koji ga uzima u obzir. U radu [54] je naglašeno da je remanentni magnetski tok teško predvidjeti i modelirati.

Motivacija za izradu ove doktorske disertacije je uočena potreba za razvojem naprednog modela SRG-a s računatim međuinduktivnim vezama između susjednih faza, remanentnim magnetskim tokom i gubicima u željezu. Takav model omogućio je analizu gubitka stroja te razvoj sustava regulacije napona između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača pri maksimalnoj korisnosti SRG-a za bilo koju radnu točku.

## **Pregled dosadašnjih istraživanja**

Klasični model SRM-a temelji se na naponskoj jednadžbi za jednu fazu stroja uz zanemarenje međuinduktiviteta, remanentnog magnetskog toka i gubitaka u željezu. Modeli svih faza stroja daju ukupni model SRM-a. Da bi se takav model napravio potrebno je poznavati radni otpor faznih namota i magnetske karakteristike stroja. Radni otpor se može relativno lako izmjeriti. Magnetske karakteristike podrazumijevaju poznavanje magnetskog toka ili induktiviteta faze za različite vrijednosti faznih struja i položaj rotora. Mogu se odrediti metodom konačnih elemenata (engl. *Finite Element Analysis – FEA*) [4, 7, 12, 13, 17, 37, 40, 41, 46-48, 55-78] ili eksperimentalno [6, 52, 53, 57, 58, 70, 79-94]. Prema radu [80] postoji pet metoda pomoću kojih je moguće eksperimentalno odrediti magnetske karakteristike SRM-a: istosmjerna metoda, izmjenična metoda, kombinirana metoda, metoda prekidanja struje i momentna metoda.

Ovisnost magnetskog toka ili induktiviteta o faznoj struji i položaju rotora najčešće se zapisuje kao druga parcijalna suma Fourierovog reda [18, 20, 59, 63, 65, 68, 69, 74, 91, 95-97]. Osim toga moguće ju je zapisati drugim jednadžbama [29, 56, 66, 82, 83, 98-101], spremite u preglednu tablicu [47, 57, 60, 98] ili povezati neuronskom mrežom [63, 90]. Također, moguće je u svakoj iteraciji

izvođenja programa za izračun trenutnih vrijednosti varijabli stroja, napraviti proračun magnetskog toka metodom konačnih elemenata [51, 57, 58].

U većini modela gubici u željezu se zanemaruju iako mogu iznositi do 50 % gubitaka stroja [72]. Ako su poznate karakteristike materijala od kojeg je stroj napravljen, moguće je provesti proračun magnetskog polja metodom konačnih elemenata te odrediti gubitke u željezu [58, 61, 67, 72, 78, 102, 103]. U radovima [5, 6, 87, 104, 105] predloženo je da se model faze SRM-a nadogradi uvođenjem nadomjesnog otpora u paralelu s nadomjesnim induktivitetom faze te se tako modeliraju gubici u željezu. Za ovu metodu nije potrebno poznavati karakteristike materijala. U radovima [5, 6, 104] nadomjesni otpor gubitaka u željezu ovisi o faznoj struji, naponu na namotu, položaju rotora i frekvenciji fazne struje. Kako je ovisnost o četiri varijable vrlo kompleksno ustanoviti, u radu [87] je predloženo definiranje kvazi-efektivne vrijednosti fazne struje kojom bi se otpor gubitaka u željezu sveo na ovisnost o tri varijable: kvazi-efektivnoj vrijednosti fazne struje, naponu na namotu te položaju rotora.

Remanentni magnetski tok zanemaren je u svim dosadašnjim radovima. U radu [54] je naglašeno da je remanentni magnetski tok potrebno uključiti u model.

Kod izrade modela SRG-a, u većini radova međuinduktivitet se zanemaruje. U radovima [51, 52] pokazano je da međuinduktivitet može uzrokovati nesimetrije između faznih struja. Ako je faza stroja magnetizirana u istom smjeru kao i susjedna faza, onda se magnetski tok susjedne faze koji se zatvara kroz promatranu fazu, oduzima od toka koji stvara promatranu fazu. Ako je faza stroja magnetizirana u suprotnom smjeru od susjedne faze onda se magnetski tok susjedne faze koji se zatvara kroz promatranu fazu zbraja s magnetskim tokom koji stvara promatranu fazu. Poželjno je postići konfiguraciju kod koje se magnetski tok susjedne faze zbraja s magnetskim tokom promatrane faze jer se tada postiže da su magnetski tokovi svih faza simetrični. To je moguće postići ako se svaka faza stroja magnetizira u suprotnom smjeru od susjednih faza. Ovakvu konfiguraciju moguće je postići kod SRM-a koji ima neparan broj faza. Kako se značajan dio magnetskog toka pojedine faze zatvara preko polova susjednih faza, potrebno je u modelu SRG-a uzeti u obzir međuinduktivnu vezu. Naponu na namotu promatrane faze opire se inducirana elektromotorna sila nastala promjenom svih magnetskih tokova koji se zatvaraju kroz tu fazu. Iz tog razloga, u modelu je potrebno uzeti u obzir promjenu magnetskog toka po vremenu kojeg stvara susjedna faza u promatranoj, a ne njegov iznos. U radovima [52, 53, 56, 74] su napravljeni modeli koji međuinduktivnu vezu uzimaju u obzir. U radovima [53, 74] napravljen je model koji uzima u

obzir promjenu međuinuktiviteta po vremenu pa posljedično i magnetskog toka kojeg stvara susjedna faza. U radovima [52, 56] napravljen je model kojem se integrira napon na faznom namotu umanjen za pad napona na radnom otporu. Tako se dobiva određeni magnetski tok na koji se zbraja magnetski tok koji se zatvara kroz promatranu fazu pod utjecajem struja susjednih faza. Iz tako dobivenog magnetskog toka i iz položaja statora dobiva se fazna struja. Dakle, u tim radovima nije uzeta u obzir promjena magnetskog toka po vremenu nastalog zbog međuinuktivne veze, nego samo iznos magnetskog toka.

Većina radova proučava rad SRG-a pri malim brzinama vrtnje, odnosno brzinama vrtnje kod kojih je inducirana elektromotorna sila manja od napona između sabirnica pretvarača. U ovom slučaju je moguće oblikovati faznu struju tako da se tranzistori jedne grane više puta uklope i isklope u jednom periodu vođenja te tako dobiti tražene vrijednosti referentnih varijabli [12, 29-32, 34-36, 38-40, 42, 43, 48, 65, 82-84, 89, 106-114]. To nije moguće kod brzina kod kojih je inducirana elektromotorna sila veća od napona između sabirnica pretvarača. U ovom slučaju tranzistore jedne grane moguće je samo jednom uklopiti i iskllopiti u jednom periodu vođenja čime se postiže jednopulsni način rada stroja [12, 33, 47, 62, 69, 73, 82, 84, 89, 100, 101, 113, 115, 116].

Od sustava koji sadrže SRG može se tražiti da na određenoj vrijednosti održavaju optimalnu brzinu vrtnje stroja [35, 36, 39, 40, 48, 66], optimalnu izlaznu snagu [30, 31, 33, 34, 39, 42, 66, 89, 113, 114], napon između sabirnica pretvarača [9, 38, 43, 47, 62, 65, 82, 84, 88, 100, 101, 107-111, 115], srednju vrijednost struje sabirnica [83, 112] ili moment [29, 32]. Referentna vrijednost i mjereni signali dovode se do regulatora koji generira upravljačke signale za SRG. Taj regulator može biti ostvaren kao PI [30, 38, 39, 43, 47, 48, 66, 82, 84, 89, 107-110, 112, 114, 116-118], pregledna tablica koja daje optimalne položaje uklapanja i isklapanja [69, 73] ili regulator temeljen na neizrastnoj logici [33, 35, 40, 115, 119]. U regulacijskom sustavu SRG-a koji radi u jednopulsnom načinu rada potrebno je odabrati položaj rotora pri kojima se tranzistori promatrane grane uklapaju i isklapaju. Više kombinacija položaja uklapanja i isklapanja tranzistora mogu dati željenu vrijednost regulirane varijable što otvara mogućnost odabira optimalne kombinacije. U [88] razvijena je metoda koja se temelji na optimalnom upravljanju magnetskim tokom prema potrebnoj izlaznoj snazi. U radu je pretpostavljeno da se magnetski tok mijenja linearno u ovisnosti o faznoj struji i položaju, što dovodi u pitanje primjenu takvog načina upravljanja jer SRM radi u dubokom magnetskom zasićenju. U [12] položaji uklapanja i isklapanja su odabrani tako da daju optimalnu kombinaciju valovitosti momenta, struje sabirnica te maksimalne izlazne snage što daje veću

korisnost i životni vijek baterije električnog automobila. U radovima [8, 62, 88, 120] definiran je faktor uzbude kao odnos srednje vrijednosti fazne struje koja teče od trenutka uklapanja tranzistora do trenutka isklapanja i srednje vrijednosti fazne struje koja teče od trenutka isklapanja tranzistora do trenutka kada fazna struja padne na nulu. U radu [62] predloženo je smanjenje faktora uzbude kao uvjet za povećanje korisnosti, ali u radu to nije primijenjeno. U [120] nastoji se dobiti maksimalna korisnost i smanjiti opterećenje pretvarača minimizacijom kombinacije faktora uzbude, efektivne vrijednosti fazne struje, vršne vrijednosti fazne struje i maksimalnog magnetskog toka. U [89] je odabran kompromis između valovitosti momenta i maksimalne korisnosti sustava. U radu [117] srednja struja sabirnica pretvarača održava se mijenjanjem položaja uklapanja, a položaj isklapanja bira se tako da valovitost struje sabirnice bude minimalna. Pretpostavljeno je da je korisnost maksimalna ako je valovitost minimalna. Kriterij valovitosti struje sabirnice i momenta, kao i maksimalne fazne struje i maksimalnog magnetskog toka može biti problematičan jer šum u mjerenju može uzrokovati krivi rezultat. Faktor uzbude i efektivna vrijednost fazne struje u obzir uzimaju više mjernih točaka unutar zadanog vremenskog perioda, stoga mjerni šum ima daleko manji utjecaj. U radovima [66, 73, 118] je za jednopulsni način rada predloženo da se biraju položaji uklapanja i isklapanja kod kojih je efektivna vrijednost faznih struja najmanja. Pretpostavlja se da je korisnost maksimalna ako je efektivna vrijednost faznih struja minimalna jer su gubici u bakru namota proporcionalni kvadratu efektivne vrijednosti fazne struje i gubici u željezu su manji što je magnetski tok manji. U radu [92] za različite položaje uklapanja i isklapanja, procijenjeni su gubici u namotima i željezu, kao i gubici u pretvaraču. Položaji uklapanja i isklapanja koji rezultiraju najmanjim gubicima uspoređeni su s položajima uklapanja i isklapanja koji daju najmanju efektivnu vrijednost fazne struje. Pokazano je da minimalna efektivna vrijednost fazne struje ne daje maksimalnu korisnost sustava, što je u suprotnosti s radovima [66, 73, 118].

## Znanstveni doprinos doktorske disertacije

U okviru ove doktorske disertacije ostvareni su sljedeći znanstveni doprinosi:

Razvijen je novi model SRG-a utemeljen na naponskoj jednadžbi i integralu faznog napona s uključenim međuinuktivitetom susjednih faza SRG-a, remanentnim magnetskim tokom i nadomjesnim otporom gubitaka u željezu.

Razvijen je novi algoritam pomaka i promatranja (engl. *perturb and observe*) za kontinuirano traženje položaja uklapanja u cilju minimiziranja gubitaka u faznim namotima i željezu. Srednja vrijednost svih faznih struja je u korelaciji sa sumom gubitaka u faznim namotima i željezu. Za minimiziranje spomenutih gubitaka primijenjen je iznos i promjena srednje vrijednosti svih faznih struja te iznos i promjena položaja uklapanja tijekom perioda izvođenja algoritma.

## Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija sastoji se od šest poglavlja i zaključka.

U uvodu disertacije, naglašena je motivacija koja je potaknula istraživanje, dan je pregled prethodnih istraživanja i istaknut je znanstveni doprinos ovog rada.

U drugom poglavlju opisana je geometrija SRG-a uključujući najčešće korištene konfiguracije stroja. Također, predstavljen je asimetrični mosni pretvarač koji se koristi za upravljanje SRG-om. Poglavlje završava s opisom teorijske osnove elektromagnetske pretvorbe energije, što je ključna komponenta za razumijevanje procesa pretvaranja mehaničke energije u električnu korištenjem SRG-a.

U trećem poglavlju predstavljen je klasični model SRG-a. Opisano je prikazivanje magnetskih karakteristika kroz drugu parcijalnu sumu Fourierovog reda i način određivanja magnetskih karakteristika istosmjernom metodom, koja je provedena na SRG-u s karakteristikama navedenim u Prilogu A. Također, prikazan je postupak izrade klasičnog modela u *Matlab/Simulink-u*. Poglavlje završava s opisom oblikovanja fazne struje SRG-a temeljenog na klasičnom modelu.

U četvrtom poglavlju predstavljen je napredni model SRG-a utemeljen na naponskoj jednadžbi i integralu faznog napona s uključenim međuinuktivitetom susjednih faza SRG-a, remanentnim magnetskim tokom i nadomjesnim otporom gubitaka u željezu. Poglavlje opisuje metode mjerenja

potrebnih parametara SRG-a i njihovo integriranje u model. Na kraju poglavlja, opisana je izrada naprednog modela u *Matlab/Simulink-u*.

U petom poglavlju predstavljena je eksperimentalna verifikacija naprednog modela SRG-a. Napravljen je niz eksperimenata u kojima je laboratorijska maketa dovedena u različite radne točke za više položaja pri kojima se tranzistori uklapaju. U svakom eksperimentu položaj uklapanja tranzistora držan je konstantnim, a položaj isklapanja je dobiven kao zbroj položaja uklapanja i kuta magnetiziranja. Kut magnetiziranja određen je kao izlaz iz PI regulatora na čijem ulazu je razlika između referentne i stvarne vrijednosti napona između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača. Iz dobivenih podataka napravljena je usporedba faznih struja i ulaznih snaga između podataka dobivenih na laboratorijskoj maketi i podatka dobivenih klasičnim i naprednim modelom.

U šestom poglavlju utvrđeno je da srednja vrijednost svih faznih struja stroja dobro korelira s gubicima u stroju. Predstavljen je algoritam pomaka i promatranja koji određuje položaj uklapanja osiguravajući maksimalnu korisnost SRM-a za zadanu radnu točku. Algoritam koristi iznose i promjene srednjih vrijednosti svih faznih struja i promjene položaja uklapanja tranzistora iz prethodne iteracije kako bi odredio iznos i smjer u kojem će se navedeni položaj promijeniti u sljedećoj iteraciji.

Sedmo poglavlje donosi zaključak disertacije.

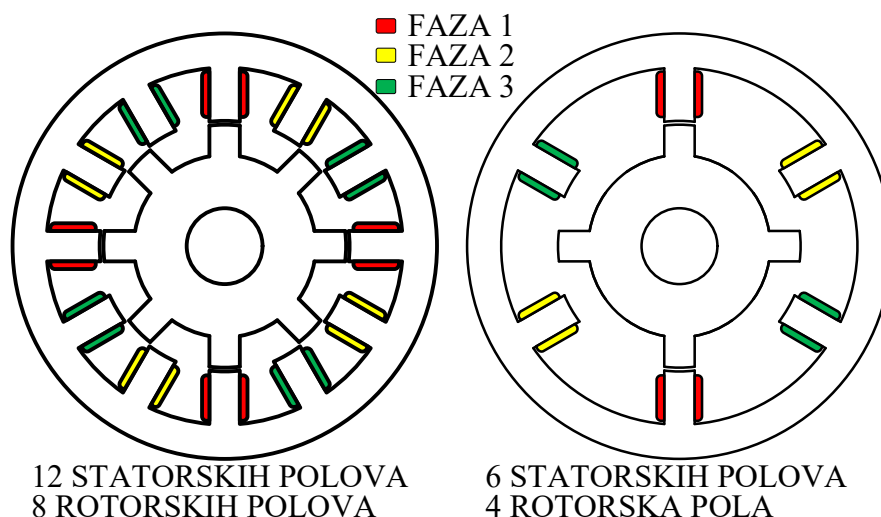
## 2. OPIS RADA PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA

### 2.1. Konfiguracije prekidačkog reluktantnog generatora

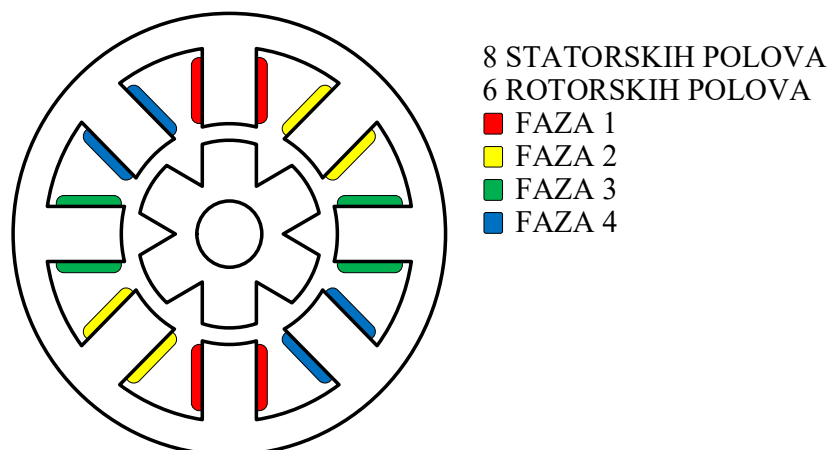
Prekidački reluktantni stroj ima istaknute polove na statoru i na rotoru, a identificira se prema njihovom broju. U ovoj disertaciji se koristi SRM čiji su parametri navedeni u Prilogu A. Ovaj SRM ima 8 statorskih i 6 rotorskih polova što ga klasificira kao 8/6 SRM.

Prekidački reluktantni stroj može biti projektiran za linearno gibanje [3, 4, 7-10, 77] iako se u pravilu projektira za kružno gibanje. Broj statorskih i rotorskih polova može biti proizvoljan. Veći broj polova osigurava mirniji rad s manjim propadima momenta, ali s druge strane zahtijeva veći broj poluvodičkih elemenata što čini sustav sa SRG-om kompleksnijim. Kod generatorskog načina rada stator i rotor mogu imati jednak broj polova te se u tom slučaju magnetiziraju svi statorski polovi istovremeno. Ovaj tip SRG-a naziva se jednofazni prekidački reluktantni generator [1, 121].

Najčešće su korištene trofazne 12/8 [15, 33, 34, 39, 47, 49, 59, 61, 68, 74, 86, 95, 96, 102, 111-114, 118, 119, 122] i 6/4 [14, 42, 46, 51-53, 55, 71, 72, 75, 79, 82, 90, 100, 101, 120, 123-125] konfiguracije prikazane na slici 2.1 te četverofazna 8/6 [2, 11-13, 18, 30-32, 38, 40, 41, 43, 52, 53, 56, 58, 60, 64, 65, 67, 69, 70, 76, 78, 80, 81, 84, 87, 88, 91-94, 97, 98, 103-109, 126-130] konfiguracija prikazana na slici 2.2. 12/8 stroj ima četiri namota po fazi, a 6/4 i 8/6 imaju dva namota po fazi.

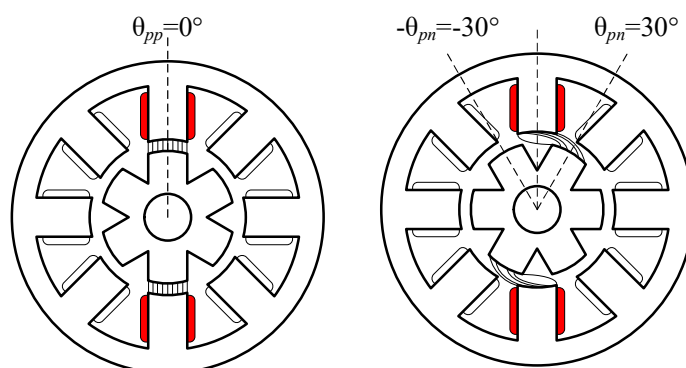


Slika 2.1. Trofazni 12/8 i 6/4 prekidački reluktantni strojevi



Slika 2.2. Četverofazni 8/6 prekidački reluktantni stroj

Dva krajnja položaja u kojim se statorski i rotorski pol mogu naći su položaj potpunog preklapanja  $pp$  i položaj potpunog nepreklapanja  $pn$  kao što je prikazano na slici 2.3 za 8/6 stroj. Položaju  $pp$  dodijeljeno je  $0^\circ$ . Kako stroj ima šest rotorskih polova, svaki pol zauzima  $60^\circ$ , dakle najveći kut između statorskog i rotorskog pola može biti  $30^\circ$ , što odgovara položaju potpunog nepreklapanja  $pn$ .



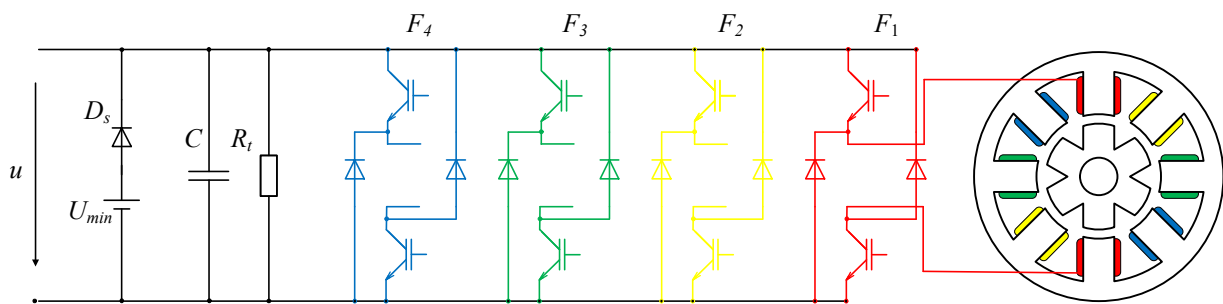
Slika 2.3. Potpuno poravnat ( $pp$ ) i potpuno nedoravnat položaj ( $pn$ ) statorskog i rotorskog pola

Kada je jedan rotorski pol, prikazan na slici 2.3, u položaju potpunog nepreklapanja od  $30^\circ$ , susjedni rotorski pol je također u položaju potpunog nepreklapanja, ali u položaju od  $-30^\circ$ . Kako je položaju potpunog preklapanja dodijeljeno  $0^\circ$ , područje jedne faze podrazumijeva položaje od  $-\theta_{pn}=-30^\circ$  do položaja  $\theta_{pn}=30^\circ$ .



## 2.2. Asimetrični mosni pretvarač za upravljanje prekidačkim reluktantnim generatorom

Na slici 2.4 prikazan je asimetrični mosni pretvarač za upravljanje četverofaznim SRG-om. On ima zadatak osigurati pojedinim fazama SRG-a energiju za magnetiziranje, a generiranu energiju predati trošilu ili izmjenjivaču. Ima broj grana jednak broju faza SRG-a. Slika 2.4 prikazuje sustav asimetričnog mosnog pretvarača i četverofaznog 8/6 SRG-a prikazanog na slici 2.2. Svaka grana pretvarača označena s ( $F_1 - F_4$ ) na slici 2.4 sastoji se od dva tranzistora i dvije diode. Svaka faza stroja spojena je na jednu granu pretvarača. Grane pretvarača su međusobno povezane pozitivnom i negativnom sabirnicom između kojih je napon  $u$ .



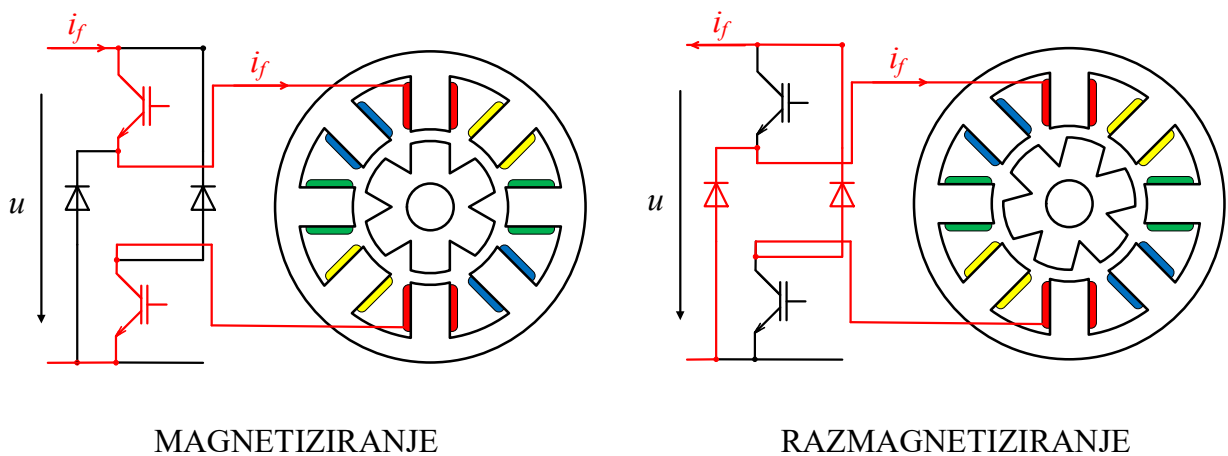
Slika 2.4. Sustav SRG-a s simetričnim mosnim pretvaračem, kondenzatorom, teretom i izvorom za početnu uzbudu

U motorskom načinu rada, napon između sabirnica ostvaren je naponskim izvorom. U generatorskom načinu rada, razina napona između sabirnica održava se kondenzatorom  $C$  prikazanom na slici 2.4, koji djeluje kao energetska međuspremnik. Kondenzator  $C$  istovremeno ima ulogu izvora energije potrebne za magnetiziranje faza stroja i ulogu spremnika za pohranu generirane energije. Ova pohranjena energija može se zatim iskoristiti za napajanje trošila [1, 2, 33, 38, 41-43, 51, 61, 62, 64, 65, 69, 79, 82, 84, 88, 100, 101, 106-110, 116, 118, 119, 121, 124-126, 130, 131] ili prenijeti izmjenjivaču [30, 35, 36, 40, 113, 114, 132]. Kada SRG generira više energije nego što trošilo ili izmjenjivač koriste, tada napon na kondenzatoru raste, kada generira manje, napon na kondenzatoru pada.

Prije nego što se stroj pokrene u generatorskom načinu rada, početnu uzbudu je moguće ostvariti na dva različita načina. Prvi način je iskoristiti remanentni magnetski tok koji ostaje prisutan u željezu stroja [54, 66, 108], ali ovaj način je nepouzdan, pa se obično energija za početnu uzbudu osigurava iz neovisnog izvora napajanja, naznačenog kao  $U_{min}$  na slici 2.4. Dioda  $D_s$  prikazana na

slici 2.4, služi tome da napon između sabirnica ne padne ispod vrijednosti  $U_{min}$ . Kada napon između sabirnica  $u$  padne približno ispod  $U_{min}$ , dioda  $D_s$  provede kako bi osigurala da napon  $u$  ostane jednak  $U_{min}$ .

Slika 2.5 prikazuje jednu granu pretvarača, na koju je spojena jedna faza SRG-a. Tijekom vremena kada su tranzistori uključeni, faza stroja se magnetizira te kroz fazni namot teče struja  $i_f$  kako je prikazano na slici 2.5. Kao izvor energije potrebne za magnetiziranje pojedine faze stroja služi kondenzator  $C$ . Za vrijeme magnetiziranja faze stroja, preuzima se energija iz izvora i pohranjuje kao magnetska.



Slika 2.5. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze SRG-a asimetričnim mosnim pretvaračem

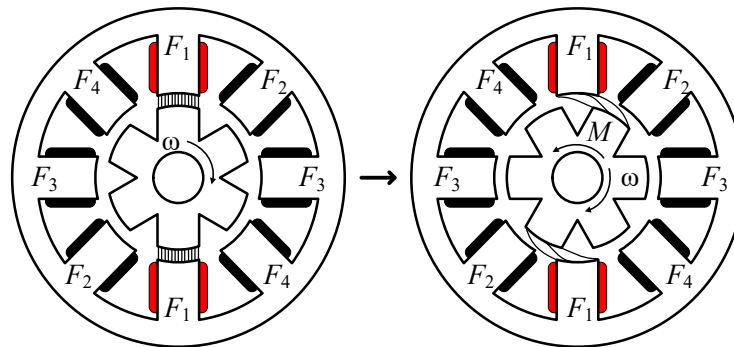
Kada se tranzistori iskllope, vode diode za vrijeme razmagnetiziranja faze. Tada struja kroz fazni namot i dalje teče u istom smjeru kao pri magnetiziranju, a struja koja prolazi kroz sabirnice mijenja smjer. Tijekom razmagnetiziranja, preko dioda i sabirnica pretvarača, kondenzator  $C$  i trošilo  $R_t$  preuzimaju generiranu energiju kao i energiju koja je prethodno preuzeta iz izvora i pohranjena kao magnetska. Kada niti jedna faza trenutno ne generira energiju, trošilo  $R_t$  se napaja isključivo iz kondenzatora. To se može dogoditi kod nižih opterećenja ili ako jedna faza stroja prestane generirati zbog kvara.

Za tranzistore u mosnom pretvaraču najčešće se koriste MOSFET i IGBT tranzistori. Pogodni su jer imaju mogućnost prisilne komutacije. Moraju moći podnijeti zahtijevano naponsko i strujno opterećenje. Isto vrijedi i za diode.

Ako se faza magnetizira kada se rotorski pol nalazi u nepravnom položaju u odnosu na statorski pol te faze, tada postoji elektromagnetski moment koji želi privući rotorski pol statorskom,

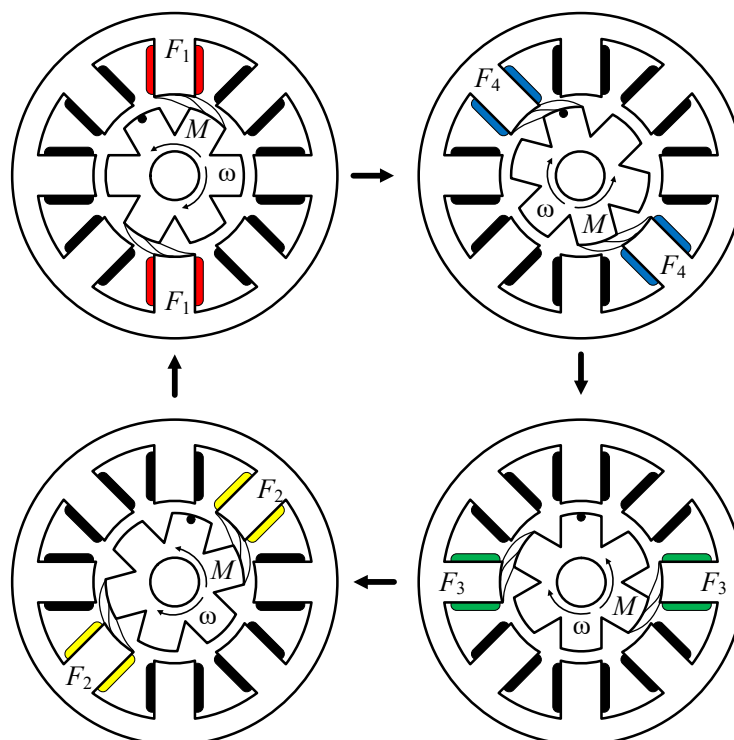
odnosno dolazi do pretvorbe električne energije u mehaničku što definira motorski način rada. U slučaju da na rotor uz elektromagnetski moment djeluje i mehanički moment koji je suprotan i veći od elektromagnetskog, dolazi do pretvorbe mehaničke energije u električnu što definira generatorski način rada [73, 122].

Slika 2.6 prikazuje elektromagnetski moment  $M$  i smjer vrtnje rotora u generatorskom načinu rada. Brzina vrtnje označena je s  $\omega$ , a smjer vrtnje je označen strelicom.



Slika 2.6. Elektromagnetski moment u generatorskom načinu rada

Na slici 2.6 se vidi da je faza  $F_1$  magnetizirana i da se rotor kreće u smjeru kazaljke na satu na satu, što je suprotno smjeru elektromagnetskog momenta kojeg ta faza stvara. Slika 2.7 prikazuje redoslijed magnetiziranja faza SRG-a. Nakon faze  $F_1$ , magnetizira se faza  $F_4$  jer je slijed magnetiziranja faza stroja suprotan smjeru vrtnje rotora [58].

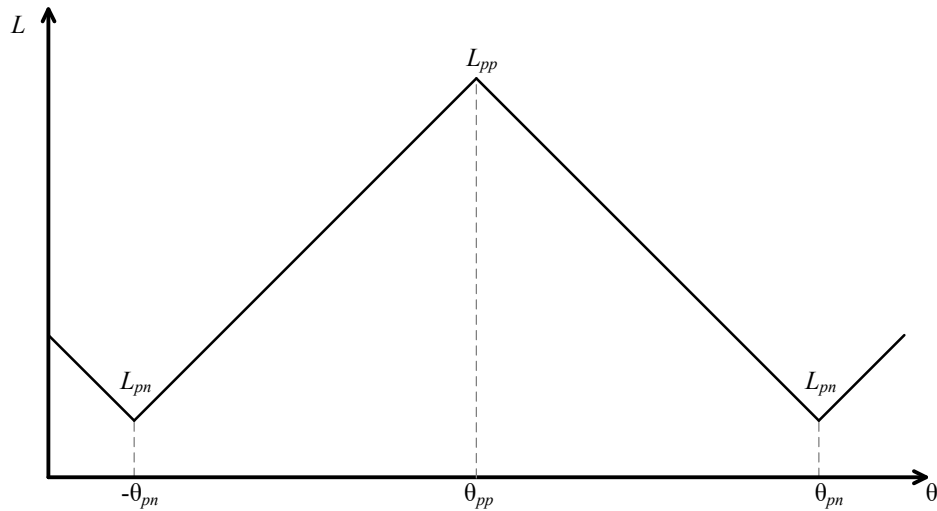


Slika 2.7. Redoslijed magnetiziranja faza za generatorski način rada četverofaznog 8/6 SRM-a

Nakon faze  $F_4$ , slijedi magnetiziranje faze  $F_3$ , zatim faze  $F_2$  nakon čega se ovaj ciklus iznova ponavlja. Iz ovog primjera jasno je da je proces magnetiziranja faza stroja nužno precizno sinkronizirati s položajem rotora, što se postiže korištenjem inkrementalnog enkodera.

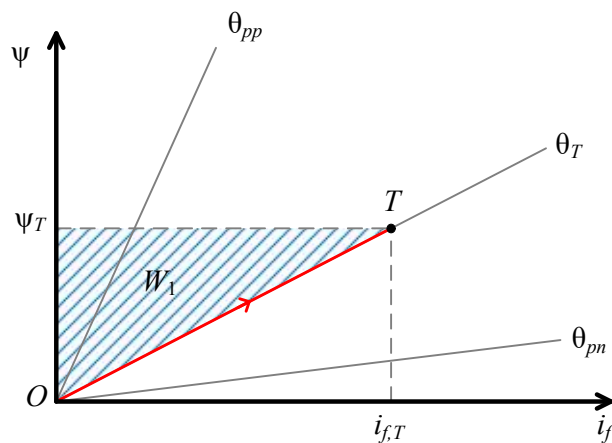
### 2.3. Elektromagnetska pretvorba energije prekidačkog reluktantnog generatora

Kao što je prikazano na slici 2.3 u poglavlju 2.1., statorski i rotorski pol mogu zauzeti različite položaje unutar raspona između potpunog preklapanja  $\theta_{pp}$  i potpunog nepreklapanja  $\theta_{pn}$ . U položaju  $\theta_{pp}$  induktivitet je maksimalan, a u položaju  $\theta_{pn}$  je minimalan. Ovisnost induktiviteta faznog namota o položaju rotora, za linearni magnetski krug, prikazana je na slici 2.8 [29, 36, 37, 45, 46, 67, 120, 126].



Slika 2.8. Ovisnost induktiviteta faznog namota o položaju statorskog i rotorskog pola za linearni magnetski krug

Slika 2.9. prikazuje pravce magnetiziranja za položaje  $\theta_{pp}$  i  $\theta_{pn}$  pod pretpostavkom da nema značajnog utjecaja zasićenja željeza. Osim toga, prikazan je pravac magnetiziranja za proizvoljni položaj  $\theta_T$ . Pretpostavlja se da je rotor zakločen u položaju  $\theta_T$  te da je SRG priključen na asimetrični mosni pretvarač prikazan na slici 2.4. Kada se tranzistori uklope, kroz fazni namot poteći će struja  $i_f$  koja će rasti od vrijednosti 0 A do  $i_{f,T}$  kako je prikazano na slici 2.5. Za to vrijeme faza stroja će se magnetizirati po crvenoj liniji prikazanoj na slici 2.9.



Slika 2.9. Magnetiziranje faze stroja uz zakločen rotor u položaju  $\theta_T$

U točki  $T$  prikazanoj na slici 2.9 energija preuzeta iz izvora za vrijeme magnetiziranja kada je rotor zakočen pohranjena je u magnetskom polju kao energija  $W_1$  što je prikazano na slici 2.9 plavom šrafiranom površinom. Ova energije je opisana sljedećom jednačbom:

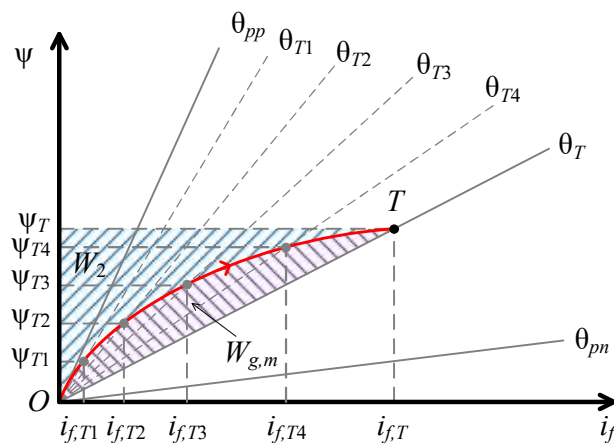
$$W_1 = \int_0^{\psi_T} i_f \cdot d\psi = \frac{1}{2} \cdot \psi_T \cdot i_{f,T} \quad (2.1)$$

gdje je:

$\psi_T$  magnetski tok u točki  $T$

$i_{f,T}$  fazna struja u točki  $T$

Na slici 2.10. prikazano je magnetiziranje faze stroja uz pomicanje rotora od položaja  $\theta_{pp}$  do položaja  $\theta_T$ .



Slika 2.10. Magnetiziranje faze stroja uz pomicanje rotora od položaja  $\theta_{pp}$  do  $\theta_T$

U slučaju prikazanom na slici 2.10 također je postignuta točka  $T$ , ali pod drugim uvjetima. Pretpostavlja se da je rotorski pol u trenutku uklapanja tranzistora u položaju potpunog preklapanja. Na rotor djeluje moment koji nastoji rotorski pol dovesti u položaj  $\theta_T$ . Istovremeno se rotorski pol pomiče od položaja  $\theta_{pp}$  do položaja  $\theta_T$  i fazna struja raste od vrijednosti 0 A do  $i_{f,T}$ . Kako bi se dobila krivulja ovisnosti magnetskog toka o struji, može se smatrati da se položaj rotora  $\theta$  mijenja u diskretnim koracima od  $\theta_{pp}$  preko  $\theta_{T1}$ ,  $\theta_{T2}$ ,  $\theta_{T3}$ ,  $\theta_{T4}$  do konačno  $\theta_T$ . Za svaki od spomenutih položaja, na slici 2.10 su prikazani pravci ovisnosti magnetskog toka o struji faze. Pri poznatom položaju rotora i poznatoj struji faze moguće je definirati radnu točku na slici 2.10. Tako, npr. točka  $T_1$  definira magnetski tok faze  $\psi_{T1}$  kada je rotor u položaju  $\theta_{T1}$  i kada kroz fazni namot teče struja  $i_{f,T1}$ . Slično vrijedi i za točke  $T_2$ - $T_4$  pa konačno i za krajnju točku  $T$ . Dakle, kada bi se rotor stroja pomicao u diskretnim koracima tada bi se i magnetski tok faze mijenjao u diskretnim koracima

definiranim radnim točkama  $O$ ,  $T_1$ - $T_4$  i  $T$ . Rotor stroja se ipak pomiče kontinuirano što je ekvivalentno povećanju broja diskretnih točaka. U tom slučaju se može reći da se faza stroja magnetizira po crvenoj liniji prikazanoj na slici 2.10. Energija koja je preuzeta iz izvora i pohranjena u magnetskom polju kada se rotor pomiče od položaja  $\theta_{pp}$  do položaja  $\theta_T$  opisana je sljedećom jednačinom:

$$\begin{aligned}
 W_2 &= \int_0^{\Psi_T} i_f d\Psi = i_{f,T} \cdot \Psi_T - \int_0^{i_{f,T}} \Psi \cdot di_f \\
 &= i_{f,T} \cdot \Psi_T - \left( W_{g,m} + \frac{1}{2} \cdot \Psi_T \cdot i_{f,T} \right) = \frac{1}{2} \cdot \Psi_T \cdot i_{f,T} - W_{g,m} = W_1 - W_{g,m}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

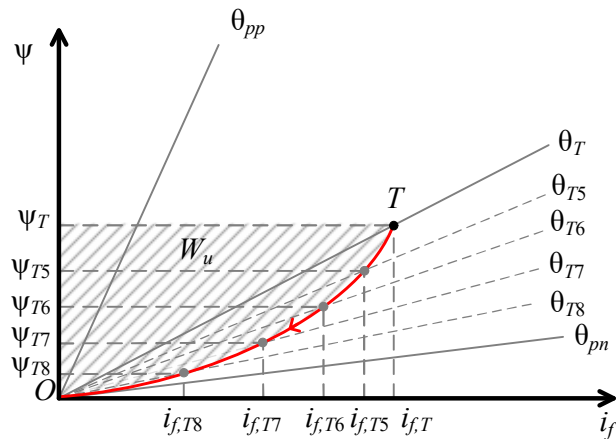
Energija  $W_2$  prikazana je na slici 2.10 plavom šrafiranom površinom. Kako je za postizanje istih uvjeta u oba slučaja potrebna jednaka energija, a vrijedi da je  $W_1 > W_2$ , energija označena sa  $W_{g,m}$  na slici 2.10 mora biti energija pretvorena iz mehaničke i pohranjena u magnetskom polju za vrijeme magnetiziranja faze stroja kada se rotor pomiče od položaja  $\theta_{pp}$  do položaja  $\theta_T$  te vrijedi  $W_{g,m} = W_1 - W_2$ .

Kada se tranzistori isklupe u točki  $T$  počinje razmagnetiziranje faze stroja. Kroz fazni namot nastaviti će teći struja  $i_f$  u istom smjeru kao i kod magnetiziranja kada su tranzistori uklopljeni, ali u ovom slučaju će padati od vrijednosti  $i_{f,T}$  do 0 A kao što je prikazano na slici 2.5. Kako tranzistori više ne vode, fazna struja će se preko dioda usmjeriti prema sabirnicama pretvarača. Za vrijeme razmagnetiziranja faze stroja, struja u sabirnicama pretvarača teče od namota prema kondenzatoru. Ta struja teče u suprotnom smjeru nego što je tekla kada se faza magnetizira. Dakle, tok energije više nije od izvora prema fazi stroja, nego u suprotnom smjeru.

Slično kao što se odvija proces magnetiziranja, proces razmagnetiziranja se može analizirati na isti način. Slično kao i kod procesa magnetiziranja faze, krivulja ovisnosti magnetskog toka o struji biti će različita kada je rotor zakočen i kada se vrti. Ako je rotor zakočen razmagnetiziranje će se događati na isti način kao što je opisano magnetiziranje na slici 2.9 samo će biti u suprotnom smjeru, od magnetskog toka  $\Psi_T$  do točke  $O$ . Uz zanemarene gubitke u namotu i željezu, energija  $W_1$  opisana slikom 2.9 vratit će se izvoru.

Slika 2.11 prikazuje razmagnetiziranje faze stroja kada se tranzistori isklupe u točki  $T$ , a rotor se nastavi kretati prema položaju potpunog nepreklapanja  $\theta_{pn}$ . Rotor se i dalje pomiče pod utjecajem momenta kao i kod magnetiziranja opisanog na slici 2.10. Kao i prethodno, kako bi se dobila krivulja ovisnosti magnetskog toka o struji, može se smatrati da se položaj rotora  $\theta$  mijenja u diskretnim koracima, ali ovaj put od  $\theta_T$  preko  $\theta_{T5}$ ,  $\theta_{T6}$ ,  $\theta_{T7}$ ,  $\theta_{T8}$  do konačno  $\theta_{pn}$ . Kada bi se rotor

stroja pomicao u diskretnim koracima tada bi se i magnetski tok faze mijenjao u diskretnim koracima definiranim radnim točkama  $T$ ,  $T_5-T_8$  i  $O$ . Rotor stroja se ipak pomiče kontinuirano pa se može reći da se faza stroja razmagnetizira po crvenoj liniji prikazanoj na slici 2.11. Uz zanemarene gubitke u namotu i željezu, izvoru je predana energija označena na slici 2.11 kao ukupna energija  $W_u$ .

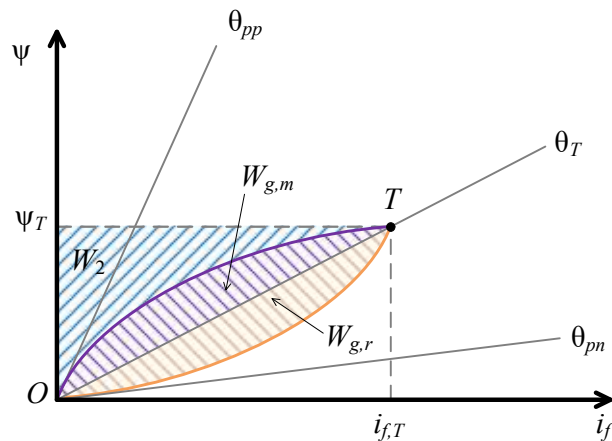


Slika 2.11. Razmagnetiziranje faze stroja uz pomicanje rotora od položaja  $\theta_T$  do  $\theta_{pn}$

Dio energije  $W_u$  koji se nalazi iznad pravca magnetiziranja kroz točku  $T$  je energija pohranjena u magnetskom polju za vrijeme magnetiziranja, odnosno jednaka je zbroju energija  $W_2$  i  $W_{g,m}$  koje su odgovarajućim površinama prikazane na slici 2.10. Za vrijeme razmagnetiziranja tok energije je od faze stroja prema izvoru tako da energija ispod pravca magnetiziranja kroz točku  $T$  koji je prikazan na slici 2.11 mora biti energija pretvorena iz mehaničke i pohranjena u magnetskom polju.

Na slici 2.12. prikazan je cjeloviti ciklus magnetiziranja i razmagnetiziranja. Na njoj su prikazane energija preuzeta iz izvora i pohranjena u magnetskom polju označena kao  $W_2$  i energija pretvorena iz mehaničke i pohranjena u magnetskom polju označena kao  $W_{g,m}$ . Ta pretvorba energije odvija se za vrijeme magnetiziranja. Energija pretvorena iz mehaničke i pohranjena u magnetskom polju za vrijeme razmagnetiziranja označena je kao  $W_{g,r}$  na slici 2.12 narančastom šrafiranom površinom.





Slika 2.12. Cjeloviti ciklus magnetiziranja i razmagnetiziranja

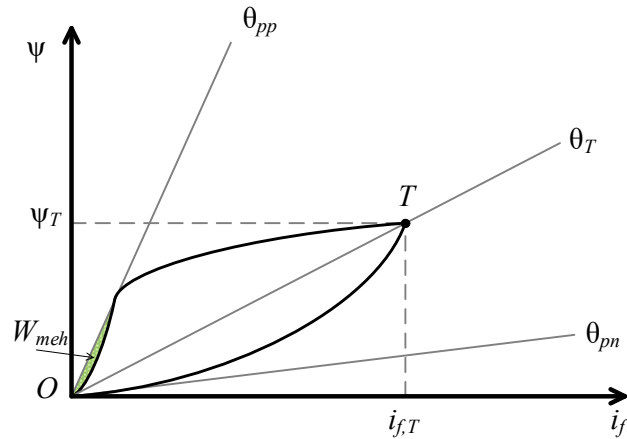
U nastavku će se opisati cjeloviti ciklus promjene magnetskog toka jedna faze kada je rotor otkočen. Prije nego se tranzistori jedne grane pretvarača uklope, fazna struja  $i_f$  i magnetski tok  $\psi$  su nula što je definirano točkom magnetiziranja  $O$  na slici 2.12. Kada se tranzistori uklope faza se počinje postupno magnetizirati, a krivulja magnetiziranja stroja prati ljubičastu liniju od točke  $O$  do točke  $T$ . Tijekom ovog vremena, fazna struja raste na vrijednost  $i_{f,T}$ , a magnetski tok dostiže vrijednost  $\psi_T$ . U magnetskom polju pohranjuje se energija preuzeta iz izvora preko sabirnica pretvarača kao energija  $W_2$  i energija pretvorena iz mehaničke kao  $W_{g,m}$ .

Ako se tranzistori isklope u točki  $T$  započinje period razmagnetiziranja. Fazna struja i magnetski tok postupno padaju na nulu. Krivulja razmagnetiziranja prati narančastu liniju prikazanu na slici 2.12 od točke  $T$  do točke  $O$ . Za to vrijeme izvoru se predaju energije  $W_2$  i  $W_{g,m}$ , koje su prethodno pohranjene u magnetskom polju za vrijeme magnetiziranja. Za vrijeme razmagnetiziranja mehanička energija se i dalje nastavlja pretvarati u magnetsku kao energija  $W_{g,r}$ . Kao i energije  $W_2$  i  $W_{g,m}$ , energija  $W_{g,r}$  se predaje izvoru. Tu je potrebno napomenuti da zbroj energija  $W_2$ ,  $W_{g,m}$  i  $W_{g,r}$  prikazanih na slici 2.12 daju energiju  $W_u$  prikazanu na slici 2.11.

Dakle, u jednom ciklusu, uz zanemarene gubitke u željezu i namotu stroja, iz izvora je preuzeta energija  $W_2$ , a izvoru su predane energije  $W_2$ ,  $W_{g,m}$  i  $W_{g,r}$ . Kada se energije  $W_{g,m}$  i  $W_{g,r}$  pohranjene u magnetskom polju predaju izvoru kao električna energija, njihov zbroj daje generiranu energiju  $W_g = W_{g,m} + W_{g,r}$ .

U generatorskom načinu rada, proces magnetiziranja faze stroja obično počinje prije nego što rotorski pol dosegne položaj potpunog preklapanja kako bi se osiguralo da magnetski tok bude dovoljno velik. Kao rezultat toga, dio energije koji se preuzima iz izvora i pohranjuje u

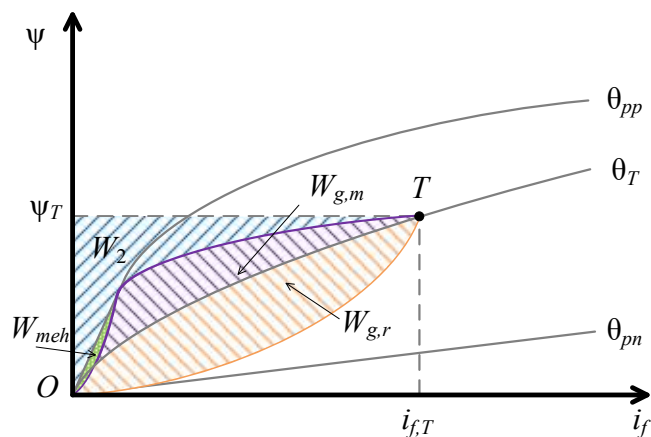
magnetskom polju, pretvara se u mehaničku energiju [133]. Na slici 2.13, ova energija je označena kao  $W_{meh}$ .



Slika 2.13. Pretvorba magnetske energije u mehaničku

Energija  $W_{meh}$  stvara moment u smjeru vrtnje rotora. U pravilu, kada se jedna faza magnetizira, susjedna faza je u području generiranja tako da energija  $W_{meh}$  nije izgubljena jer se energija preko osovine stroja prenosi na fazu koja trenutno generira [133].

Slika 2.14 prikazuje cjeloviti ciklus magnetiziranja i razmagnetiziranja uzimajući u obzir magnetsko zasićenje. Tu se pretpostavlja da je faza stroja magnetizirana prije nego što je rotorski pol stigao u položaj potpunog preklapanja.



Slika 2.14. Cjeloviti ciklus magnetiziranja i razmagnetiziranja uz magnetsko zasićenje i pretvorbu magnetske energije u mehaničku

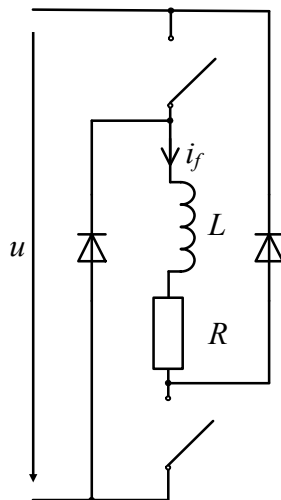
Na temelju provedene analize se može zaključiti da kada se rotor kreće od položaja potpunog preklapanja do položaja potpunog nepreklapanja moguća je pretvorba mehaničke energije u

magnetsku. Magnetiziranjem faze stroja prije nego što rotor postigne položaj potpunog preklapanja moguće je postići veći magnetski tok nego ako se faza stroja počne magnetizirati pri položaju potpunog preklapanja. Veći magnetski tok osigurava veću pohranu mehaničke energije u magnetsku, tj. veće površine označene na slici 2.14 kao  $W_{g,m}$  i  $W_{g,r}$ . Konačno, moguće je ostvariti veću generiranu energiju.

### 3. KLASIČNI MATEMATIČKI MODEL PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA S ASIMETRIČNIM MOSNIM PRETVARAČEM

U ovom poglavlju opisan je postupak izrade klasičnog modela 8/6 SRG-a koji je opterećen radnim trošilom  $R_t$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem. Ovaj model ne uključuje međuinuktivitet, gubitke u željezu ni remanentni magnetski tok. Polazi se od poznate nadomjesne sheme jedne faze i pripadajuće matematičke jednačbe. Nakon toga se postavlja sustav međusobno nezavisnih jednačbi čiji je broj jednak broju faza SRG-a te jednačbi koje povezuju struju tereta, struju kondenzatora i struju sabirnice asimetričnog mosnog pretvarača.

Nadomjesna shema jedne grane asimetričnog mosnog pretvarača i jedne faze stroja prikazana je na slici 3.1. Jedna faza 8/6 SRG-a sastoji se od dva namota spojena u seriju, smještena na suprotnim istaknutim polovima statora. Dva namota jedne faze stroja nadomještaju se induktivitetom  $L$  spojenim u seriju s otporom namota  $R$ . Svaka faza stroja spojena je na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača koja se sastoji od dva tranzistora i dvije diode koji se modeliraju kao idealni što je opravdano jer je pad napona na tranzistorima i diodama zanemariv u usporedbi s naponom između sabirnica.



Slika 3.1. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a spojene na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača

Kroz namot teče struja  $i_f$ , a napon između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača je  $u$ . Prema slici 3.1 vrijedi naponska jednačba:

$$k \cdot u = R \cdot i_f + \frac{d\psi(i_f, \theta)}{dt} \quad (3.1)$$

gdje je:

$k$  stanje uklopljenosti tranzistora

$u$  napon između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača

$i_f$  fazna struja

$\psi$  magnetski tok faze stroja

$\theta$  položaj rotora

Kada su tranzistori grane pretvarača uklopljeni  $k=1$ , a za vrijeme kada vode diode  $k=-1$ . Magnetski tok  $\psi$  ovisi o faznoj struji i položaju statorskog i rotorskog pola.

Postoje radovi [1-3, 9, 11, 12, 18, 29, 30, 35, 38-40, 53, 55, 61, 62, 64, 65, 69, 79, 82, 84, 88, 89, 91, 95-99, 101, 106-109, 126] u kojima je model temeljen na naponskoj jednačbi u kojoj je magnetski tok zapisan kao umnožak induktiviteta  $L$  i fazne struje  $i_f$  prikazane na slici 3.1. Takav model je kompleksniji te zahtijeva definiranje dinamičkog induktiviteta koji nastaje zbog magnetskog zasićenja željeza.

Kako je već navedeno, magnetski tok  $\psi$  mijenja se zbog promjene fazne struje  $i_f$  i zbog promjene položaja rotora te iz jednačbe (3.1) slijedi:

$$k \cdot u = R \cdot i_f + \frac{\partial \psi}{\partial i_f} \cdot \frac{di_f}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.2)$$

Kako je  $\frac{d\theta}{dt}$  kutna brzina vrtnje stroja  $\omega$ , iz jednačbe (3.2) dobiva se:

$$k \cdot u = R \cdot i_f + \frac{\partial \psi}{\partial i_f} \cdot \frac{di_f}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \omega \quad (3.3)$$

Umnožak kutne brzine vrtnje i parcijalne derivacije magnetskog toka po položaju rotora je inducirana elektromotorna sila  $e$ , tako da se jednačba (3.3) može zapisati kao:

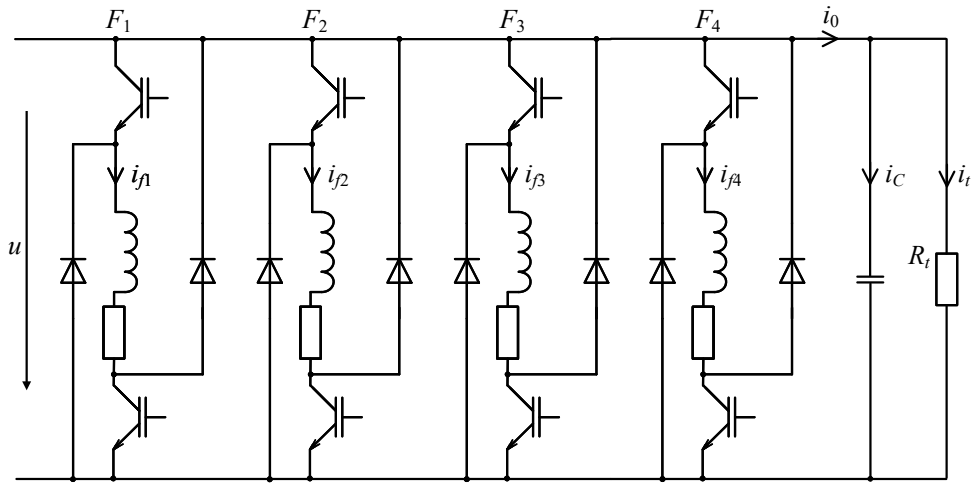
$$k \cdot u = R \cdot i_f + \frac{\partial \psi}{\partial i_f} \cdot \frac{di_f}{dt} + e \quad (3.4)$$

Množenjem jednačbe (3.3) s faznom strujom  $i_f$  te integriranjem cijele jednačbe po vremenskom intervalu  $T$  tijekom kojeg teče fazna struja kod svakog prolaska rotorskog pola, dobiva se sljedeća jednačba koja opisuje energetska bilancu sustava SRG-a:

$$\int_0^T k \cdot u \cdot i_f dt = \int_0^T R \cdot i_f^2 \cdot dt + \int_0^T i_f \frac{\partial \Psi}{\partial i_f} \cdot \frac{di_f}{dt} \cdot dt + \int_0^T i_f \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \omega \cdot dt \quad (3.5)$$

Fazna struja  $i_f$  i napon između sabirnica  $u$  su uvijek pozitivni. Stanje uklopljenosti tranzistora  $k$  omogućava upravljanje tokom energije. Kada su tranzistori uklopljeni  $k=1$  pa je tok energije je pozitivan. Tada struja teče od izvora prema fazi stroja preko sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača. Kada se tranzistori isklope  $k=-1$ , vode diode, pa je tok energije negativan. Tada struja teče od faze stroja prema izvoru preko sabirnica. Kada fazna struja padne na nulu, prestaje razmjena energije između namota i izvora. Dakle, jednačba (3.5) u konačnici treba imati negativnu vrijednost da bi se ostvarila generirana energija. Prvi član s desne strane su Joulovi gubici koji uvijek imaju pozitivnu vrijednost. Drugi član je energija magnetiziranja koja je preuzeta i zatim vraćena izvoru te on iznosi nula. Za generiranu energiju mora biti zadužen treći član s desne strane jednačbe (3.5) koji mora u konačnici biti negativan. Kako su fazna struja i brzina vrtnje uvijek pozitivni, jedino može biti negativan ako je promjena magnetskog toka po položaju negativna. Dakle, magnetski tok se treba smanjivati kako se rotor pomiče, što odgovara pomicanju rotora od položaja potpunog preklapanja do položaja potpunog nepreklapanja. Energija opisana trećim članom s desne strane jednačbe (3.5) je suma energija  $W_{g,m}$  i  $W_{g,r}$  prikazanih na slici 2.12. Bitno je naglasiti, ako je rotor stroja zakočen, da je tada treći član jednačbe (3.5) jednak nuli. Drugi član te jednačbe bi opisivao energiju magnetiziranja i razmagnetiziranja koja je prikazana na slici 2.9 kao  $W_1$ .

Nadomjesna shema jedne faze SRG-a spojenog na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača temelj je nadomjesne sheme klasičnog modela SRG-a, koji je opterećen radnim trošilom  $R_t$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem. Ta shema prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2. Nadomjesna shema klasičnog modela SRG-a, koji je opterećen radnim trošilom  $R_t$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem

Na slici 3.2  $C$  je kondenzator koji služi kao izvor i kao međuspremnik energije. Nadomjesni otpor trošila označen je kao  $R_t$ . S  $i_{f1}$ -  $i_{f4}$  označene su fazne struje sa svaku fazu SRG-a,  $i_0$  je struja koja teče kroz sabirnice,  $i_C$  je struja kondenzatora  $C$ , a  $i_t$  je struja kroz nadomjesni otpor trošila  $R_t$ . Iz jednadžbe (3.3) dobiva se:

$$i_f = \frac{1}{\frac{\partial \Psi}{\partial i_f}} \cdot \int_0^T \left( k \cdot u - R \cdot i_f - \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \omega \right) dt + i_f(0) \quad (3.6)$$

U trenutku uklapanja tranzistora fazna struja ne teče. Stoga je  $i_f(0) = 0$  A. Na temelju jednadžbe (3.6) i nadomjesne sheme asimetričnog mosnog pretvarača prikazane na slici 3.2 postavlja se sustav jednadžbi koji opisuje fazne struje u sve četiri faze stroja:

$$i_{ff} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi}{\partial i_{ff}}} \int_0^T \left( k_j \cdot u - R \cdot i_{ff} - \frac{\partial \Psi_j}{\partial \theta} \cdot \omega \right) dt, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (3.7)$$

Fazne struje opisane jednadžbom (3.7) uvijek su pozitivne. Zbroj faznih struja, uzimajući u obzir vode li tranzistori ili diode pojedine faze, daju struju sabirnica  $i_0$ :

$$i_0 = \sum_{j=1}^4 \left( -k_j \cdot i_{ff} \right), \quad j = 1, \dots, 4 \quad (3.8)$$

Struja sabirnica  $i_0$  se dijeli na struju  $i_C$  koja teče prema kondenzatoru  $C$  i struju  $i_t$  koja teče prema teretu  $R_t$ . Stoga struja  $i_C$  iznosi:

$$i_C = i_0 - i_t = \sum_{j=1}^4 (-k_j \cdot i_{fj}) - i_t, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (3.9)$$

Kada je poznata struja  $i_C$ , napon na kondenzatoru, koji je ujedno i napon između sabirnica  $u$ , određen je jednadžbom:

$$u = \int_0^T i_C \cdot dt + U_0 \quad (3.10)$$

gdje je:

$U_0$  početni napon kondenzatora

Struja tereta, određena je naponom  $u$  i otporom trošila  $R_t$ :

$$i_t = \frac{u}{R_t} \quad (3.11)$$

Kod klasičnog modela, jednadžbom (3.7) određuju se fazne struje SRG-a. Sustavom jednadžbi (3.8) – (3.11) određuju se struje koje teku u asimetričnom mosnom pretvaraču i napon između sabirnica pretvarača.

### 3.1. Prikaz magnetskih karakteristika drugom parcijalnom sumom Fourierovog reda

Nadomjesna shema prikazana na slici 3.2 i sustav jednadžbi (3.6) – (3.11) temelj su za izradu klasičnog modela SRG-a spojenog na asimetrični mosni pretvarač. Jednadžbom (3.6) računa se iznos fazne struje  $i_f$ . Brzina vrtnje  $\omega$ , napon između sabirnica  $u$  i stanje uklopljenosti tranzistora  $k$  ulazne su varijable SRG-a te su poznati u svakom trenutku simulacije. Otpor faznog namota i ovisnost magnetskog toka faze o faznoj struji i položaju rotora predstavljaju ulazne parametre na temelju kojih se pristupa izradi klasičnog modela SRM-a. Kako je toplinski koeficijent bakra relativno nizak i SRM pri radu ostaje hladan na dodir [23] može se smatrati da otpor namota praktički ima konstantnu vrijednost. U radovima [18, 20, 43, 59, 63, 65, 68, 69, 74, 88, 91, 95-97] magnetske karakteristike su predstavljene drugom parcijalnom sumom Fourierovog reda te je taj pristup primijenjen i u ovom radu. Magnetski tok u ovisnosti o faznoj struji  $i_f$  i relativnom položaju rotora  $\theta$  u obliku druge parcijalne sume Fourierovog reda glasi:

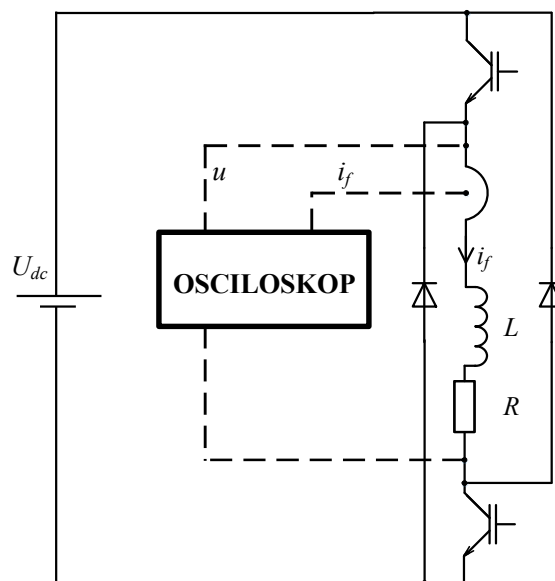


$$\psi(i_f, \theta) = \sum_{l=0}^2 C_l(i_f) \cdot \cos(6 \cdot l \cdot \theta) \quad (3.12)$$

U jednadžbi (3.12) broj 6 se odnosi na broj rotorskih polova. Da bi se područje relativnog položaja statorskog i rotorskog pola od  $-30^\circ$  do  $30^\circ$  preslikalo u  $360^\circ$  potrebno je položaj  $\theta$  pomnožiti sa 6. Kako bi se odredili koeficijenti Fourierovog reda  $C_l$  potrebno je poznavati ovisnost magnetskog toka o faznoj struji za položaj potpunog preklapanja  $\theta_{pp}=0^\circ$ , položaj koji se nalazi na polovici između položaja potpunog preklapanja i potpunog nepreklapanja  $\theta_m=15^\circ$  i položaj potpunog nepreklapanja  $\theta_{pn}=30^\circ$ . Magnetski tokovi za položaje  $\theta_{pp}$ ,  $\theta_m$  i  $\theta_{pn}$  označeni su kao  $\psi_{pp}$  i  $\psi_m$  i  $\psi_{pn}$ , slijedom. Ovisnost ovih magnetskih tokova o faznoj struji  $i_f$  mogu se aproksimirati polinomom. U radovima [69, 95, 97] predložena je aproksimacija polinomima petog stupnja te je i u ovom radu napravljeno isto. Pri položaju potpunog nepreklapanja nema utjecaja zasićenja pa se  $\psi_{pn}$  može se zapisati kao linearna jednadžba. Konačno, jednadžbe koje aproksimiraju ovisnost magnetskih tokova  $\psi_{pp}$ ,  $\psi_m$  i  $\psi_{pn}$  o faznoj struji glase:

$$\begin{aligned} \psi_{pp} &= \sum_{l=1}^5 a_{ppl} \cdot i_f^l \\ \psi_m &= \sum_{l=1}^5 a_{ml} \cdot i_f^l \\ \psi_{pn} &= a_{pn} \cdot i_f \end{aligned} \quad (3.13)$$

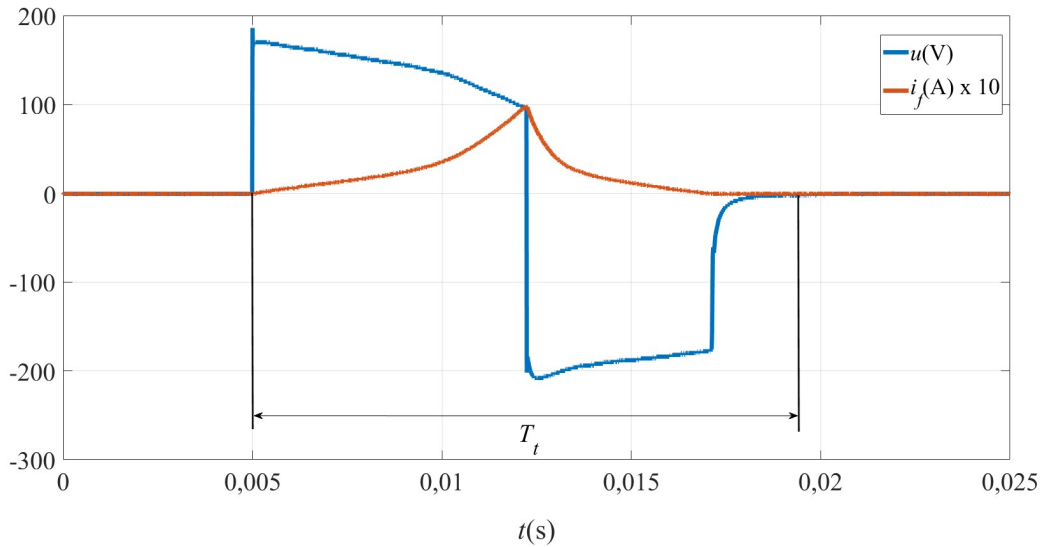
pri čemu su  $a_{ppl}$ ,  $a_{ml}$  i  $a_{pn}$  koeficijenti polinoma koji se određuju iz izmjerenih podataka dobivenih eksperimentom istosmjerne uzbude za tri položaja  $\theta_{pp}=0^\circ$ ,  $\theta_m=15^\circ$  i  $\theta_{pn}=30^\circ$ . Na slici 3.3 prikazana je shema električnog kruga za provođenje eksperimenta istosmjerne uzbude.



Slika 3.3. Shema električnog kruga za provođenje eksperimenta istosmjerne uzbude

Eksperiment zahtijeva da se rotor zakoči na određenom položaju, nakon čega se na namot stroja dovodi napon u iznosa  $U_{dc} = 170$  V koji je ostvaren serijskim spajanjem akumulatorskih baterija. Impuls za uklop i isklop tranzistora zadaje se pomoću računala. Odzivi fazne struje i napona snimaju se osciloskopom čija je frekvencija uzorkovanja 100 kHz, odnosno period uzorkovanja je  $T_s = 10$   $\mu$ s.

Slika 3.4 prikazuje odziv struje i napona kod eksperimenta istosmjerne uzbude za položaj  $\theta = 0^\circ$ . Kada su tranzistori uklopljeni struja kroz namot raste i napon na namotu je pozitivan. Kada se tranzistori iskllope, napon na namotu je negativan pa struja pada. Eksperiment je ponovljen i za položaje  $\theta = 15^\circ$  i  $\theta = 30^\circ$ .



Slika 3.4. Struja i napon kod eksperimenta istosmjerne uzbude pri položaju  $\theta=0^\circ$

Procjena magnetskog toka temelji se na sljedećoj jednadžbi:

$$\psi(t) = \int_0^{T_t} e \cdot dt + \Psi_0 \quad (3.14)$$

gdje je:

$T_t$  vrijeme trajanja eksperimenta istosmjerne uzbude

Pretpostavlja se da je magnetski tok do trenutka uklapanja tranzistora  $\Psi_0=0$  Wb. Ta pretpostavka vrijedi za klasični model jer se remanentni magnetskih tok kod njega zanemaruje. Induciranu elektromotornu silu  $e$  iz jednadžbe (3.14) može se dobiti tako da se od napona na namotu  $u$  oduzme pad napona na otporu namota čime se dobiva:

$$\psi(t) = \int_0^{T_t} (u - R \cdot i_f) \cdot dt \quad (3.15)$$

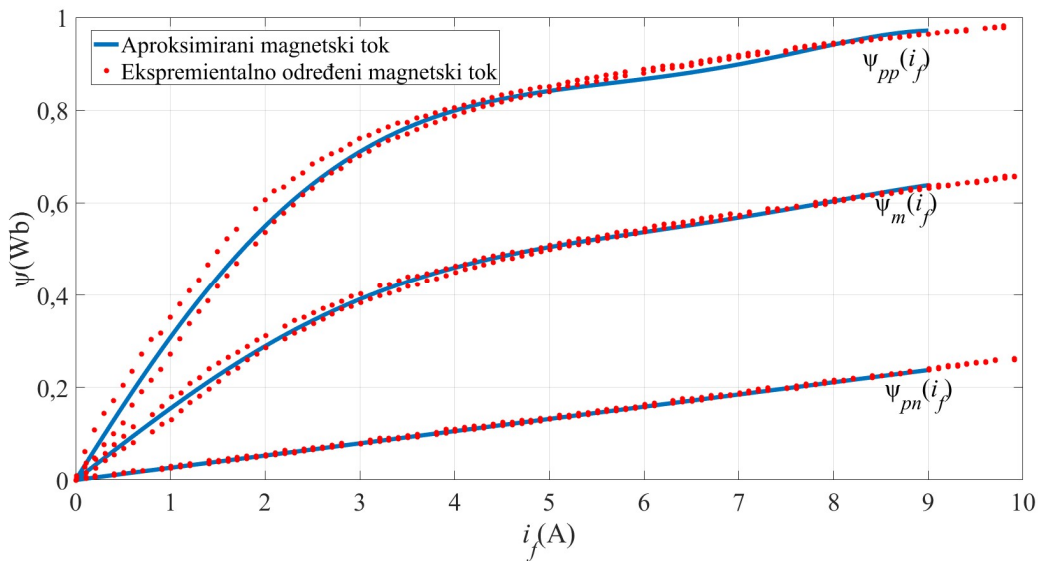
Diskretizacijom jednadžbe (3.15) s vremenom uzorkovanja  $T_s$  dobiva se:

$$\psi(j \cdot T_s) = (u(j \cdot T_s) - R \cdot i_f(j \cdot T_s)) \cdot T_s + \psi((j-1) \cdot T_s), \quad j=2 \dots 2500 \quad (3.16)$$

gdje  $\psi(j \cdot T_s)$  označava magnetski tok u koraku mjerenja  $j$ . Magnetski tok u koraku  $j=1$ , iznosi 0 Wb. Broj koraka u svakom eksperimentu je 2500 jer se struja i napon uzorkuju s vremenom uzorkovanja 10  $\mu$ s tijekom 25 ms.

Koeficijenti polinoma  $a_{pl}$ ,  $a_{ml}$  ( $l=1, \dots, 5$ ) i  $a_{pn}$  u jednadžbama (3.12) dobiveni su *Matlabovim* alatom *Basic Fitting Tool* i navedeni su u prilogu B. Na slici 3.5 prikazan je aproksimirani

magnetski tok i eksperimentalno određeni magnetski tok u ovisnosti o faznoj struji za položaje  $\theta_{pp}$ ,  $\theta_m$  i  $\theta_{pn}$ . Crvenim točkama su označeni magnetski tokovi dobiveni eksperimentalno, a plave krivulje predstavljaju aproksimacijske polinome. Jasno je da kod podataka dobivenih eksperimentalno postoji razlika između krivulje magnetiziranja i razmagnetiziranja. Ta razlika nastaje zbog gubitaka u željezu. Kako se kod klasičnog modela gubici u željezu zanemaruju, aproksimacijski polinomi su dobiveni ravnopravno uzimajući u obzir točke magnetiziranja i razmagnetiziranja.



Slika 3.5. Aproksimirani magnetski tok i eksperimentalno određeni u ovisnosti o faznoj struji za tri položaja

Uvrštavanjem kutova  $\theta_{pp}$ ,  $\theta_m$  i  $\theta_{pn}$  u jednadžbu (3.12) dobiva se:

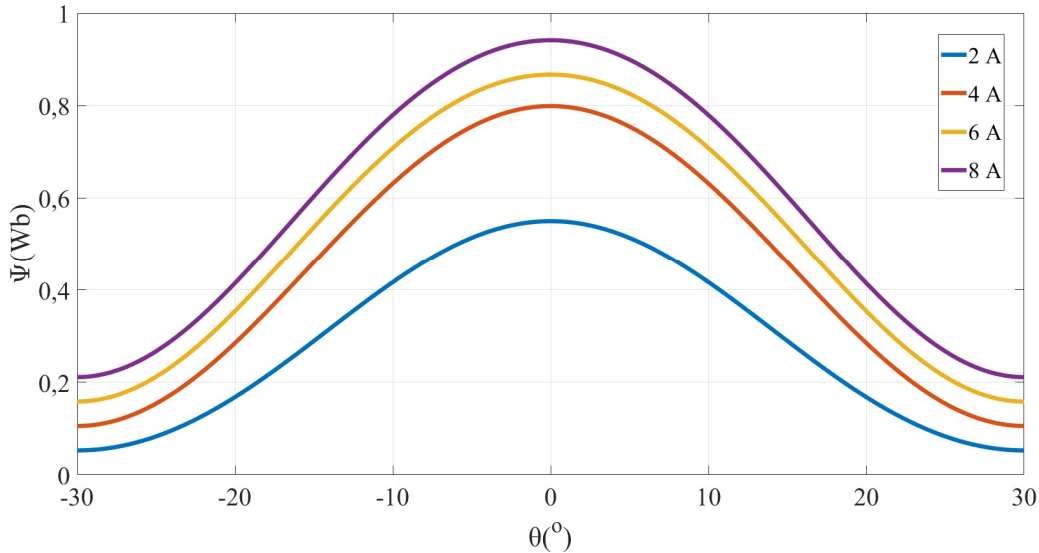
$$\begin{bmatrix} \Psi_{pp} \\ \Psi_m \\ \Psi_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(6 \cdot 0^\circ) & \cos(12 \cdot 0^\circ) \\ 1 & \cos(6 \cdot 15^\circ) & \cos(12 \cdot 15^\circ) \\ 1 & \cos(6 \cdot 30^\circ) & \cos(12 \cdot 30^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Iz čega se dobiva:

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \\ 1/4 & -1/2 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{pp} \\ \Psi_m \\ \Psi_{pn} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Dakle, za poznatu faznu struju  $i_f$  moguće je odrediti magnetske tokove  $\Psi_{pp}$ ,  $\Psi_m$  i  $\Psi_{pn}$  pomoću jednadžbi (3.13). Uvrštavanjem tih magnetskih tokova u jednadžbu (3.18) dobivaju se koeficijenti  $C_0$ ,  $C_1$  i  $C_2$ . Uvrštavanjem tih koeficijenata u jednadžbu (3.12) i poznavajući položaj rotora  $\theta$  dobiva

se izračunati magnetski tok jedne faze u funkciji položaja rotora i fazne struje (slika 3.6).



Slika 3.6. Magnetski tok jedne faze u funkciji položaja rotora i fazne struje

Sve do sada navedeno je vrijedilo uz pretpostavku poznate fazne struje  $i_f$ . Kod klasičnog simulacijskog modela se do ove struje dolazi pomoću jednadžbe (3.7), za svaku od faznih struja. Ova jednadžba zahtijeva određivanje derivacije magnetskog toka po faznoj struji i po položaju. Iz jednadžbe (3.12) dobiva se:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial i_f}(i_f, \theta) = \sum_{l=0}^2 \frac{dC_l}{di_f}(i_f) \cdot \cos(6 \cdot l \cdot \theta) \quad (3.19)$$

Prema jednadžbi (3.18) derivacije koeficijenata  $C_l$  po faznoj struji  $i_f$  glase:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_0}{\partial i_f} \\ \frac{\partial C_1}{\partial i_f} \\ \frac{\partial C_2}{\partial i_f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \\ 1/4 & -1/2 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_{pp}}{\partial i_f} \\ \frac{\partial \Psi_m}{\partial i_f} \\ \frac{\partial \Psi_{pn}}{\partial i_f} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Derivacije magnetskih tokova  $\Psi_{pp}$ ,  $\Psi_{pn}$  i  $\Psi_{pn}$ , koji se pojavljuju u jednadžbi (3.20), dobivaju se iz jednadžbi (3.13):

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{pp}}{di_f} &= \sum_{l=1}^5 l \cdot a_{ppl} \cdot i_f^{l-1} \\
\frac{d\psi_m}{di_f} &= \sum_{l=1}^5 l \cdot a_{ml} \cdot i_f^{l-1} \\
\frac{d\psi_{pn}}{di_f} &= a_{pn}
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Konačno, iz jednađbi (3.19) – (3.21) dobiva se izraz za parcijalnu derivaciju magnetskog toka po faznoj struji:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \psi}{\partial i_f}(i_f, \theta) &= \left[ \frac{1}{4} \cdot \sum_{l=1}^5 l \cdot a_{ppl} \cdot i_f^{l-1} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{l=1}^5 l \cdot a_{ml} \cdot i_f^{l-1} + \frac{1}{4} \cdot a_{pn} \right] \\
&+ \cos(6 \cdot \theta) \left[ \frac{1}{2} \cdot \sum_{l=1}^5 l \cdot a_{ppl} \cdot i_f^{l-1} - \frac{1}{2} \cdot a_{pn} \right] \\
&+ \cos(12 \cdot \theta) \left[ \frac{1}{4} \cdot \sum_{l=1}^5 l \cdot a_{ppl} \cdot i_f^{l-1} - \frac{1}{2} \cdot \sum_{l=1}^5 l \cdot a_{ml} \cdot i_f^{l-1} + \frac{1}{4} \cdot a_{pn} \right]
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Promjenu magnetskog toka po položaju dobiva se deriviranjem jednađbe (3.12) po položaju rotora  $\theta$  čime se dobiva:

$$\frac{\partial \psi(i_f, \theta)}{\partial \theta} = - \sum_{l=1}^2 6 \cdot l \cdot C_l(i_f) \cdot \sin(6 \cdot l \cdot \theta) \tag{3.23}$$

Elektromagnetski moment jedne faze SRG-a opisuje se jednađbom:

$$\boxed{M_f(i_f, \theta)} = \frac{\partial W_c(i_f, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial \int_0^{i_f} \psi(i_f, \theta) \cdot di_f}{\partial \theta} \tag{3.24}$$

U jednađbi (3.24)  $W_c$  označava magnetsku koenergiju. Da bi se dobio izraz za elektromagnetski moment jedne faze SRG-a potrebno je magnetski tok (jednađba (3.12)) integrirati po faznoj struji i derivirati po položaju rotora čime se dobiva:

$$\boxed{M_f(i_f, \theta)} = - \sum_{l=1}^2 6 \cdot l \cdot \int_0^{i_f} C_l(i_f) \cdot \sin(6 \cdot l \cdot \theta) \cdot di_f \tag{3.25}$$

Prema jednađbi (3.18) integrali koeficijenata  $C_1$  i  $C_2$  po faznoj struji  $i_f$  glase:

$$\int_0^{i_f} C_1 \cdot di_f = \frac{1}{2} \cdot \left( \int_0^{i_f} \Psi_{pp} \cdot di_f - \int_0^{i_f} \Psi_{pn} \cdot di_f \right)$$

$$\int_0^{i_f} C_2 \cdot di_f = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \int_0^{i_f} \Psi_{pp} \cdot di_f + \int_0^{i_f} \Psi_{pn} \cdot di_f \right) - \int_0^{i_f} \Psi_m \cdot di_f \right]$$
(3.26)

Integrali magnetskih tokova  $\Psi_{pp}$ ,  $\Psi_{pn}$  i  $\Psi_m$  (prema jednadžbama (3.13)) glase:

$$\int_0^{i_f} \Psi_{pp} di_f = \sum_{l=1}^5 \frac{1}{l+1} a_{pp} i_f^{l+1}$$

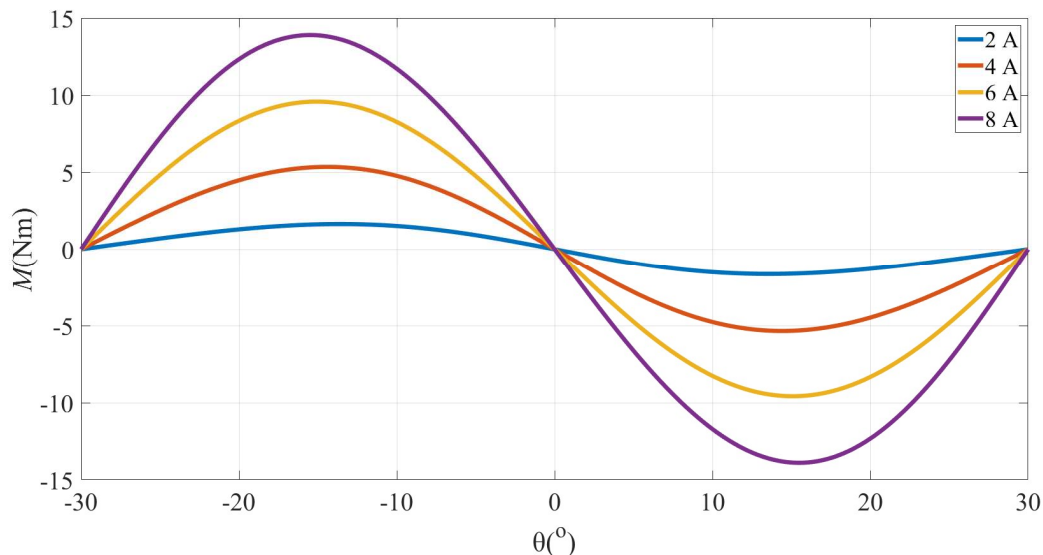
$$\int_0^{i_f} \Psi_m di_f = \sum_{l=1}^5 \frac{1}{l+1} a_{ml} i_f^{l+1}$$

$$\int_0^{i_f} \Psi_{pn} di_f = \frac{1}{2} a_{pn} i_f^2$$
(3.27)

Konačno, iz jednadžbi (3.25) - (3.27) dobiva se izraz za elektromagnetski moment jedne faze SRG-a:

$$\begin{aligned} \square M_f(i_f, \theta) = & -3 \cdot \sin(6 \cdot \theta) \cdot \left[ \sum_{l=1}^5 \frac{1}{l+1} a_{ppl} i_f^{l+1} - \frac{1}{2} a_{pn} \cdot i_f^2 \right] \\ & -6 \cdot \sin(12 \cdot \theta) \left[ \frac{1}{2} \cdot \sum_{l=1}^5 \frac{1}{l+1} \cdot a_{ppl} \cdot i_f^{l+1} + \frac{1}{4} \cdot a_{pn} \cdot i_f^2 - \sum_{l=1}^5 \frac{1}{l+1} \cdot a_{ml} \cdot i_f^{l+1} \right] \end{aligned}$$
(3.28)

Uvrštavanjem koeficijenata  $a_{pl}$ ,  $a_{ml}$  i  $a_{pn}$  iz Priloga B u jednadžbu (3.28) dobiva se elektromagnetski moment jedne faze SRG-a u ovisnosti o kutu zakreta rotora i faznoj struji (slika 3.7).



Slika 3.7. Elektromagnetski moment jedne faze SRG-a u ovisnosti o kutu zakreta rotora i faznoj struji

Elektromagnetski moment jedne faze SRG-a pri položaju  $\theta=0^\circ$  je jednak nuli. Pri položajima  $\theta=-30^\circ$  i  $\theta=30^\circ$ , dva susjedna rotorska pola su jednako udaljena od statorskog pola. Tu je magnetski tok minimalan, ali ipak veći od nule pa se može očekivati da postoji i elektromagnetski moment. Taj elektromagnetski moment na dva navedena rotorska pola djeluje istim iznosom, ali suprotnim smjerom tako da je ukupni elektromagnetski moment jednak nuli. Pozitivan elektromagnetski moment podrazumijeva motorski način rada, a negativan generatorski.

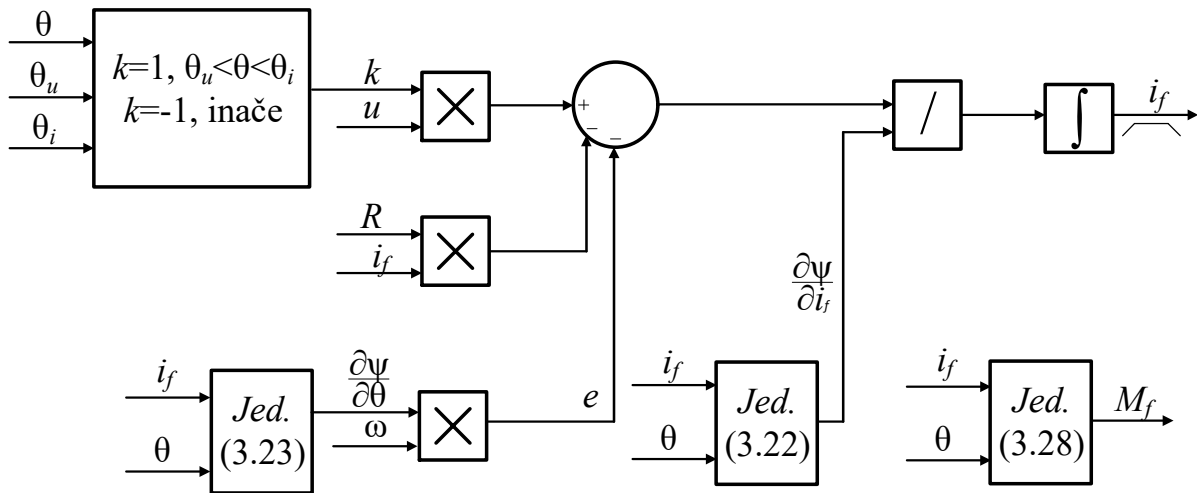
### 3.2. Simulacija klasičnog modela u Matlab/Simulink-u

Klasični model SRG-a spojenog na asimetrični mosni pretvarač napravljen je u *Matlab/Simulink-u*. Temelji se na nadomjesnoj shemi prikazanoj na slici 3.2 i sustavu jednadžbi (3.6) – (3.11). Namot stroja je modeliran kao serijski spoj nadomjesnog induktiviteta i otpora namota, a međuinuktivitet susjednih faza, gubici u željezu i remanentni magnetski tok su



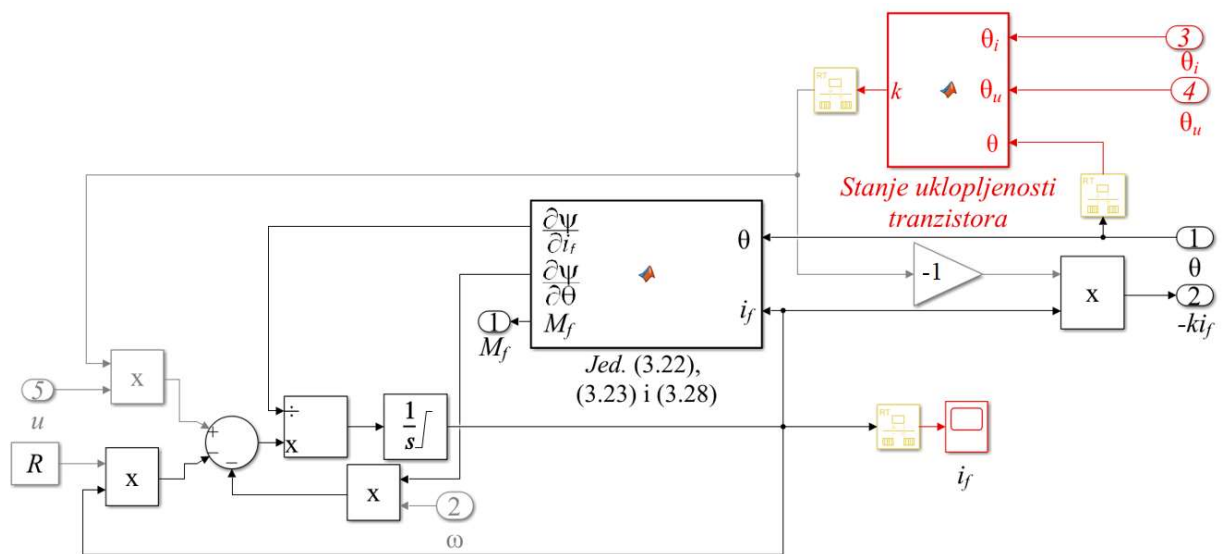
zanemareni. Tranzistori i diode u granama asimetričnog mosnog pretvarača modelirani su kao idealni.

Prvo je napravljen simulacijski model jedne faze stroja koji se temelji na jednadžbi (3.6), a zatim je na temelju jednadžbi (3.7) – (3.11) napravljen cjeloviti model SRG-a. Na slici 3.8 prikazan je blokovski model jedne faze SRG-a u obliku prikladnom za Matlab/Simulink.



Slika 3.8. Blokovska shema jedne faze za klasični model SRG-a

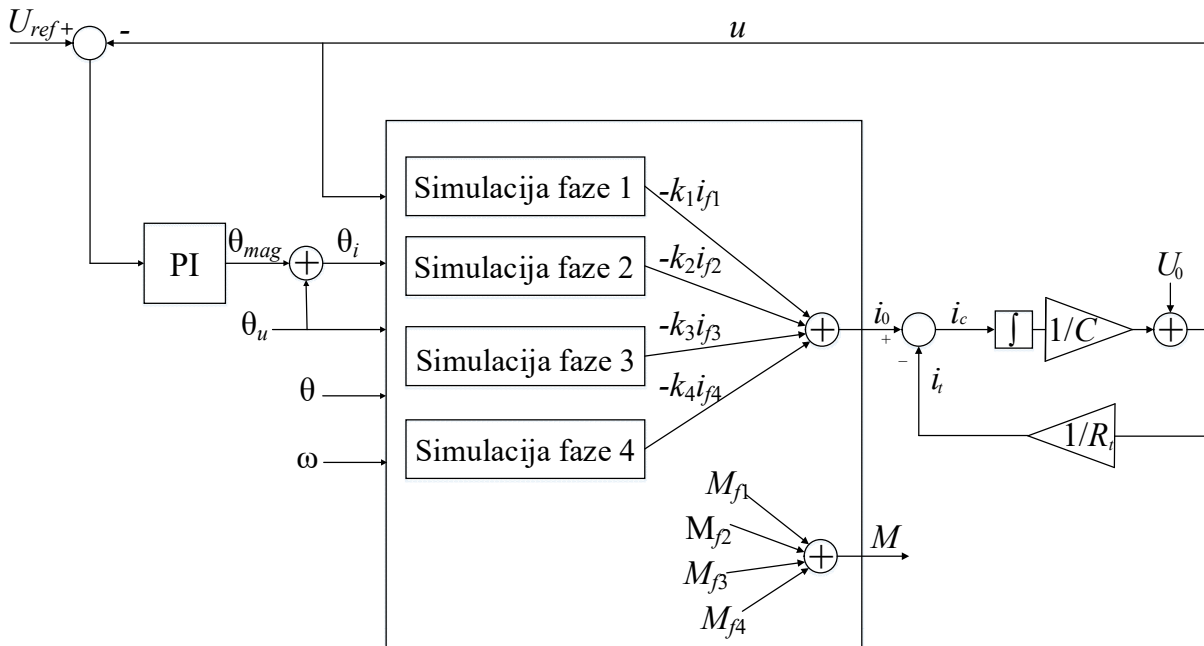
Stanje uklopljenosti tranzistora određuje se na temelju položaja rotora te položaja uklapanja i isklapanja tranzistora. Ako je položaj rotora između položaja uklapanja i položaja isklapanja  $k=1$ , inače je  $k=-1$ . Na temelju fazne struje i položaja rotora pomoću jednadžbi (3.23), (3.22) i (3.28) određuju se parcijalna derivacija magnetskog toka po položaju i po faznoj struji te elektromagnetski moment jedne faze, slijedom. Slika 3.9 prikazuje simulacijski model jedne faze za klasični model SRG-a u *Matlab/Simulink*-u koji se temelji na blokovskoj shemi prikazanoj na slici 3.8.



Slika 3.9. Simulacijski model jedne faze za klasični model SRG-a u Matlab/Simulink-u

Na slici 3.9 žutom bojom označeni su *Rate transition* blokovi. Njihova srha je da razdvoje diskretni i kontinuirani dio simulacije. U diskretnim koracima, frekvencije 20 kHz, simulira se sve što se određuje računalom, a to je izračun stanja uklopljenosti tranzistora i uzorkovanje fazne struje. Taj dio modela označen je crvenom bojom. Za upravljanje laboratorijskom maketom korištena je upravljačka kartica DS1104 proizvođača Dspace koja pouzdano radi do frekvencija izvođenja algoritma do 20 kHz pa je upravo ta frekvencija korištena kako bi simulacija bila usporediva s mjerenjem. Ostatak modela faze je modeliran kao kontinuiran jer se odnosi na sam SRG i asimetrični mosni pretvarač. Na slici 3.9 fazna struja se množi s  $-k$  jer to zahtijeva jednačba (3.8) kojom se određuje struja sabirnice  $i_0$ .

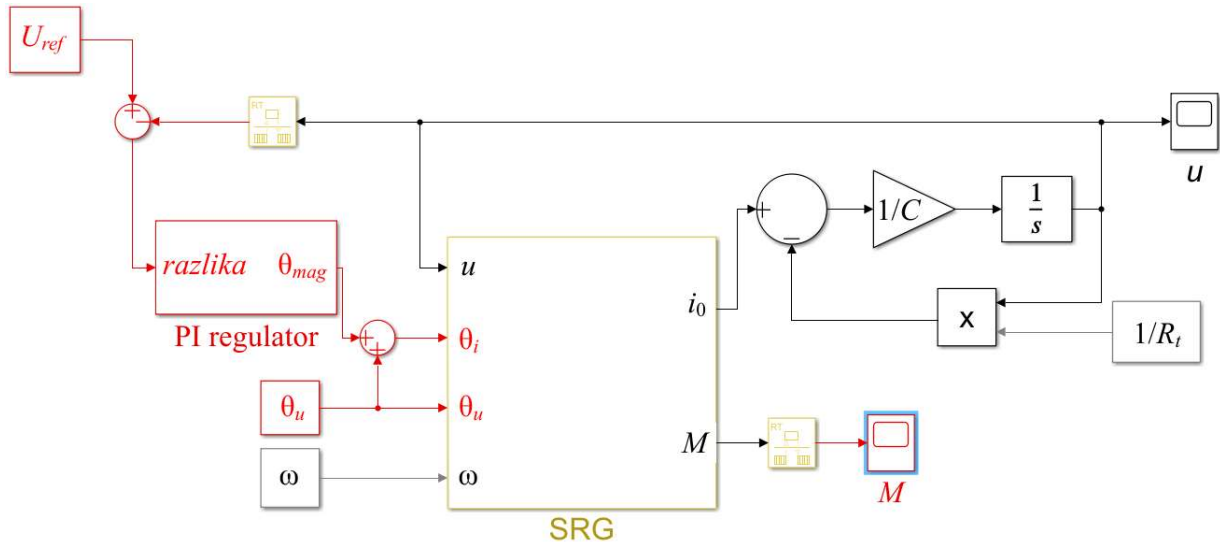
Kada je određena blokovska shema za jednu fazu SRG-a, napravljena je blokovska shema SRG-a, asimetričnog mosnog pretvarača i trošila zajedno s regulacijskim sustavom napona između sabirnica. Ona se temelji na jednačbama (3.8) – (3.11) i prikazana je na slici 3.10.



Slika 3.10. Blokovska shema simulacije SRG-a koji je opterećen radnim trošilom  $R_t$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem

Položaj uklapanja tranzistora  $\theta_u$  može biti zadan kao konstantan ili se može mijenjati. Položaj isklapanja tranzistora  $\theta_i$  određen je kao zbroj  $\theta_u$  i kuta magnetiziranja  $\theta_{mag}$  koji označava kut koji rotor pređe za vrijeme magnetiziranja faze stroja te vrijedi  $\theta_{mag} = \theta_i - \theta_u$ . Kut magnetiziranja određen je kao izlaz iz PI regulatora kojem je na ulazu razlika referentnog napona  $U_{ref}$  i napona između sabirnica  $u$ . Proporcionalno pojačanje regulatora iznosi 1, integracijsko pojačanje iznosi 5 te su određeni metodom pokušaja i pogreške. Veće proporcionalno pojačanje može rezultirati nestabilnošću sustava, a manje pojačanje uzrokuje sporiji odziv. Položaj uklapanja  $\theta$  i brzina vrtnje stroja  $\omega$  poznati su u svakom trenutku simulacije. Blokovi simulacija faze  $j$  ( $j=1, \dots, 4$ ) prikazani na slici 3.10 predstavljaju blokovsku shemu  $j$ -te faze prikazane na slici 3.8. Uzimajući u obzir stanje uklopljenosti tranzistora  $k$  i iznos faznih struja, primjenom jednadžbe (3.8) određuje se struja kroz sabirnice asimetričnog mosnog pretvarača  $i_0$ . Od struje između sabirnica oduzima se struja kroz teret  $i_t$  čime se jednadžbom (3.9) dobiva struja  $i_c$  koja teče prema kondenzatoru  $C$ . Napon na kondenzatoru je ujedno i napon između sabirnica pretvarača te se on određuje na temelju jednadžbe (3.10). Kada je poznat napon između sabirnica, može se odrediti struja kroz teret  $i_t$  jednadžbom (3.11). Elektromagnetski moment SRG-a  $M$  računa se kao suma elektromagnetskih momenata svih faza stroja. Slika 3.11 prikazuje model SRG-a koji je opterećen radnim trošilom  $R_t$  pri čemu je SRG

napajan asimetričnim mosnim pretvaračem. Model je izrađen u *Matlab/Simulink*-u i temelji se na blokovskoj shemi prikazanoj na slici 3.10.



Slika 3.11. Simulacijski model SRG-a koji je opterećen radnim trošilom  $R_t$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem u *Matlab/Simulink*-u

Na slici 3.11 diskretni i kontinuirani dio modela također su razdvojeni pomoću *Rate Transition* blokova koji su označeni žutom bojom. U diskretnim koracima uzorkuju se napon između sabirnica i moment. PI regulator također radi u diskretnom području. Ostatak modela odnosi se na SRG, asimetrični modni pretvarač i teret, stoga su oni modelirani kao kontinuirani.

### 3.2.1. Oblikovanje fazne struje prekidačkog reluktantnog generatora

Pretvorba energije opisana u poglavlju 2.3. postiže se preciznim oblikovanjem fazne struje uklapanjem i isklapanjem tranzistora u odgovarajućim trenucima. Tri su moguća načina oblikovanja fazne struje [34, 89, 107, 113, 125, 130]: histerežno (engl. *Current Chopping Control*, CCC), pulsno-širinsko (engl. *Pulse Width Modulation*, PWM) i jednopulsno (engl. *Angle Position Control*, APC). Kod histereznog upravljanja, nakon što se tranzistori ukllope i fazna struja dostigne referentnu vrijednost, višestrukim uklapanjem i isklapanjem tranzistora, fazna struja se drži između dvije vrijednosti oko referentne [12, 30-32, 34-36, 39, 40, 42, 43, 65, 82, 84, 89, 98, 101, 106-109,

112-114, 120, 124, 125, 130]. Ako se primjeni pulsno-širinsko oblikovanje [29, 34, 38, 48, 83, 89, 98, 107, 111, 113, 125, 130], upravlja se širinom impulsa pozitivnog ili negativnog napona između sabirnica koji djeluje na fazni namot.

Jednopsno oblikovanje fazne struje podrazumijeva da se tranzistori pripadajuće grane pretvarača jednom uklope i jednom isklope u vremenskom intervalu tijekom kojeg teče fazna struja kod svakog prolaska rotorskog pola pored magnetiziranog statorskog pola. Položaj rotora kod kojeg se tranzistori uklapaju je položaj uklapanja  $\theta_u$ , a kod kojeg se isklapaju je položaj isklapanja  $\theta_i$ . Položaj uklapanja može biti konstantan, a položaj isklapanja se može mijenjati [82, 100, 101], položaj isklapanja može biti konstantan, a položaj uklapanja se može mijenjati [33, 47, 62] ili se oba položaja mogu mijenjati [12, 69, 73, 84, 89, 113, 115, 116] kako bi se realizirao funkcionalan rad sustava sa SRG-om. U ovoj disertaciji korišteno je jednopsno oblikovanje fazne struje.

Ako se tranzistori jedne faze stroja isklope istovremeno postiže se jednostupanjsko magnetiziranje faze stroja, a ako se isklope u različito vrijeme postiže se dvostupanjsko. Kod dvostupanjskog magnetiziranja, kada vodi jedan tranzistor, fazna struja se zatvara preko tranzistora koji vodi i jedne diode. Ova metoda se može koristiti u sva tri navedena načina oblikovanja fazne struje. Kod dvostupanjskog magnetiziranja manji je propad napona između sabirnica u odnosu na jednostupanjsko što znači da se može koristiti manji kondenzator [18, 109, 126]. U radu [69] pokazano je da jednostupanjsko magnetiziranje daje oko 10 % veću generiranu energiju od dvostupanjskog za istu vršnu vrijednost fazne struje. U radu [40] je navedeno da dvostupanjsko magnetiziranje ima veće gubitke od jednostupanjskog. Kako je cilj ove disertacije postizanje što veće korisnosti korišteno je jednostupanjsko magnetiziranje.

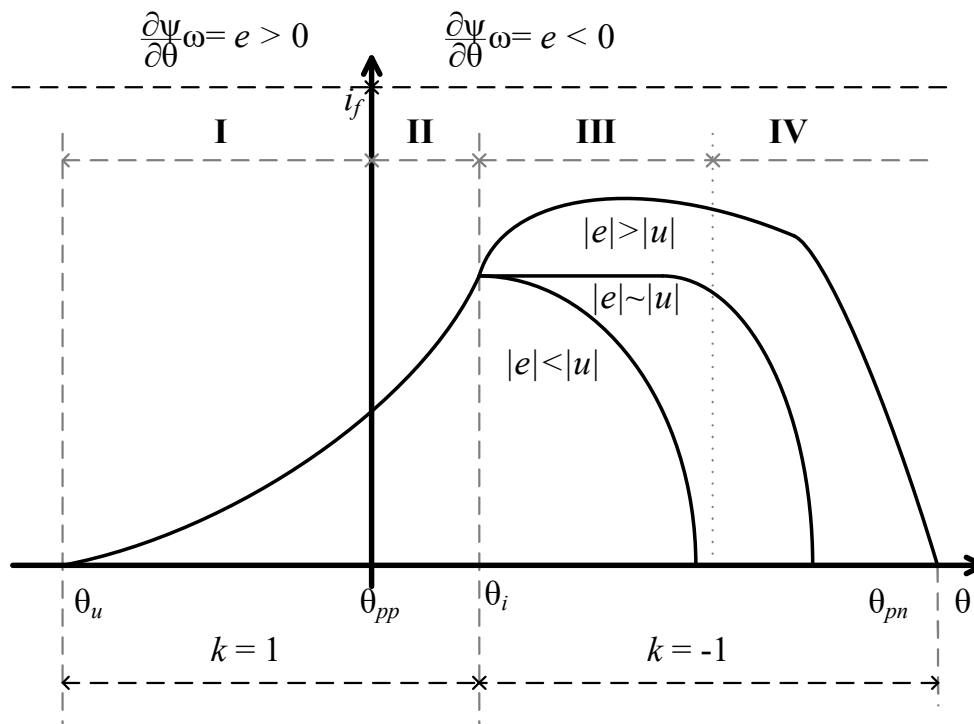
Klasični model opisuje faznu struju jednadžbom (3.6). Za potrebe objašnjenja oblikovanja fazne struje, u njoj se može zanemariti otpor namota, čime se dobiva:

$$i_f = \frac{1}{\frac{\partial \Psi}{\partial i_f}} \cdot \int_0^T \left( k \cdot u - \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \omega \right) \cdot dt \quad (3.29)$$

Kako je inducirana elektromotorna sila  $e = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \omega$ , iz jednadžbe (3.29) dobiva se sljedeća jednadžba koja opisuje promjenu fazne struje po vremenu:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi}{\partial i_f}} \cdot (k \cdot u - e) \quad (3.30)$$

Iznos desne strane jednadžbe (3.30) određuje hoće li fazna struja rasti, padati ili biti konstantna. Promjena magnetskog toka po faznoj struji  $\frac{\partial \psi}{\partial i_f}$  uvijek je pozitivna. Napon između sabirnica  $u$  i brzina vrtnje  $\omega$  se ne mijenjaju značajno za vrijeme jednog prolaska rotorskog pola kraj statorskog. Brzina vrtnje  $\omega$  je uvijek pozitivna, tako da predznak inducirane elektromotorne sile ovisi o promjeni magnetskog toka po položaju. Ta promjena ovisi o tome nalazi li se rotorski pol na negativnom ili pozitivnom položaju. Na slici 3.6 prikazan je magnetski tok  $\psi$  u ovisnosti o položaju rotora za različite fazne struje. Ako se rotor kreće od položaja  $\theta = -30^\circ$  do položaja  $\theta = 0^\circ$  magnetski tok raste pa  $e$  ima pozitivan iznos. S druge strane, ako se kreće od  $\theta = 0^\circ$  do  $\theta = 30^\circ$ , magnetski tok pada pa  $e$  ima negativan iznos. Ako su tranzistori uklopljeni, u jednadžbi (3.30),  $k=1$  pa napon  $u$  na namot djeluje kao pozitivan. Ako su tranzistori isklopljeni i vode diode,  $k=-1$  pa napon  $u$  na namot djeluje kao negativan. Dakle, prema jednadžbi (3.30), hoće li fazna struja rasti, padati ili biti konstantna, ovisi o stanju uklopljenosti tranzistora  $k$  te o odnosu napona  $u$  i inducirane elektromotorne sile  $e$ . Na slici 3.12 prikazano je oblikovanje fazne struje kod jednopulsnog načina rada SRG-a.



Slika 3.12. Oblikovanje fazne struje kod jednopulsnog načina rada SRG-a

Na slici 3.12 oblikovanje fazne struje podijeljeno je u četiri područja. U prvom području (I), vode tranzistori i rotorski pol se nalazi u negativnom području. U drugom području (II) vode tranzistori i rotorski pol se nalazi u pozitivnom području. U trećem području (III), tranzistori su isključeni, vode diode i rotorski pol se nalazi u pozitivnom području. U četvrtom području (IV), vode diode i rotorski pol se nalazi blizu položaja  $\theta_{pn}$  gdje je magnetski tok minimalan.

Faza stroja se u pravilu počinje magnetizirati prije nego rotorski pol dođe u položaj potpunog preklapanja što je prikazano na slici 3.12 (područje (I)). Tu vode tranzistori pa je  $k=1$  u jednadžbi (3.30). Kako fazna struja  $i_f$  tu tek počinje rasti, tako je i magnetski tok  $\psi$  mali pa je i inducirana elektromotorna sila  $e$  mala u odnosu na napon između sabirnica  $u$ . Zato se može smatrati da fazna struja u području (I) raste pod utjecajem pozitivnog napona između sabirnica.

U području (II) napon na namotu je i dalje pozitivan jer vode tranzistori pa je  $k=1$ . Tu magnetski tok ima značajnu vrijednost pa je i inducirana elektromagnetska sila značajna. Kako se područje (II) nalazi u pozitivnom položaju, promjena magnetskog toka po položaju je negativna pa je i inducirana elektromotorna sila  $e$  negativna. Prema jednadžbi (3.30) fazna struja nastavlja rasti pod utjecajem napona između sabirnica  $u$  i inducirane elektromotorne sile  $e$ .

Pri položaju  $\theta_i$  tranzistori se isklapaju te započinje područje (III) prikazano na slici 3.12. U tom dijelu je  $k=-1$  tako da napon između sabirnica djeluje kao negativan na namot stroja. Inducirana elektromotorna sila  $e$  je i dalje negativna, kao i u drugom dijelu. Odnos inducirane elektromotorne sile i napona na faznom namotu određuje kakav oblik će fazna struja imati [1, 106, 113, 119, 120]. Tu se može dogoditi jedna od tri situacije koji su prikazane na slici 3.12. Ako je  $|e|$  manja od  $|u|$ , izraz na desnoj strani jednadžbe (3.30) je negativan, odnosno fazna struja, nakon što se isklupe tranzistori počinje padati. U ovom slučaju, stanjem uklopljenosti tranzistora moguće je izabrati hoće li fazna struja rasti ili padati pa je moguće CCC i PWM oblikovanje fazne struje. Pri nižim brzinama vrtnje,  $|e|$  je u pravilu manja od  $|u|$  jer je inducirana elektromotorna sila  $e$  proporcionalna brzini vrtnje. Ako je  $|e|$  približno jednaka  $|u|$ , izraz na desnoj strani jednadžbe (3.30) je približno nula, odnosno gotovo nema promjene fazne struje. Tada je fazna struja konstantna kao što je prikazano na slici 3.12. U trećem slučaju  $|e|$  je veća od  $|u|$  pa je izraz na desnoj strani jednadžbe (3.30) pozitivan. U tom slučaju čak i nakon isklapanja tranzistora dolazi do porasta fazne struje. Tada CCC i PWM oblikovanje fazne struje nisu mogući nego samo jednopulsno.

U četvrtom području (IV) prikazanom na slici 3.12, rotorski pol se nalazi blizu položaja potpunog nepreklapanja pri kojem je induktivitet minimalan. Iako fazna struja ima značajnu

vrijednost, magnetski tok je mali pa je i inducirana elektromotorna sila mala u odnosu na napon između sabirnica. Zato se može smatrati da fazna struja u području (IV) pada pod utjecajem negativnog napona između sabirnica.

Ako se faza stroja magnetizira više od pola područja jedne faze, fazna struja ne može pasti na nulu prije početka sljedećeg perioda vođenja. Područje jedne faze podrazumijeva položaje od  $\theta_{pn}=-30^\circ$  do položaja  $\theta_{pn}=30^\circ$  za SRG iz priloga A, odnosno  $60^\circ$ . Ako se zadrži takav način magnetiziranja, fazna struja ulazi u stanje kontinuiranog vođenja gdje može početi nekontrolirano rasti i tako oštetiti stroj i opremu [35, 49, 69]. U radovima [129, 134] napravljena je simulacija te je u radu [135] postignut eksperimentalni motorski pogon SRM-a za jednopulsni kontinuirani način rada. Faza stroja se magnetizira nešto više od pola područja jedne faze čime je pokrivena energija potrebna za pogon stroja i gubici. Pokazano je da kod primjene kontinuiranog vođenja ne postoji teorijsko ograničenje brzine SRM-a ako je snaga na osovini kojom je stroj opterećen manja od nazivne vrijednosti.

Kod motorskog načina rada inducirana elektromotorna sila uzrokuje smanjenje fazne struje pa ne može doći do nekontroliranog rasta. U generatorskom načinu rada inducirana elektromotorna sila uzrokuje porast fazne struje kao što je prikazano u području (III) na slici 3.12. U radu [49] napravljena je simulacija rada za generatorski jednopulsni kontinuirani način rada. Primjenom kontinuiranog vođenja moguće je ostvariti generiranje pri brzinama višestruko većim od nazivne brzine vrtnje. U navedenom radu je predloženo upravljanje vršnom faznom strujom kako bi se izbjegao nekontrolirani rast i iskoristilo prednost kontinuiranog vođenja. U ovoj disertaciji kut magnetiziranja ograničen je na  $30^\circ$ , odnosno pola područja jedne faze kako bi se osiguralo da sustav ne uđe u stanje kontinuiranog vođenja.



## **4. NAPREDNI MATEMATIČKI MODEL PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA S ASIMETRIČNIM MOSNIM PRETVARAČEM**

U ovom poglavlju opisan je postupak izrade naprednog modela 8/6 SRG-a koji je opterećen radnim trošilom  $R_l$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem. Ovaj model, za razliku od klasičnog, uključuje međuinstrukciju susjednih faza, gubitke u željezu i remanentni magnetski tok koji se pojedinačno uključuju u nadomjesnu shemu jedne faze SRG-a koja vrijedi za klasični model (slika 3.1.). Na temelju takve napredne nadomjesne sheme jedne faze SRG-a izrađuje se matematički model pojedine faze SRG-a.

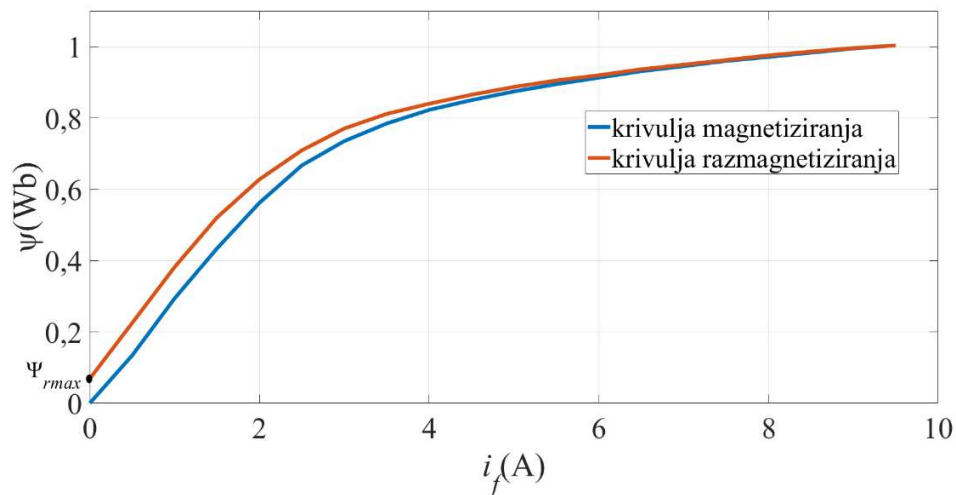
Napredni model u obzir uzima tri magnetska toka: glavni magnetski tok, remanentni magnetski tok i magnetski tok nastao zbog međuinstruktivne veze. Magnetski tok koji nastaje samoindukcijom je glavni magnetski tok. U poglavlju 4.2 opisan je proces određivanja i uključivanja glavnog magnetskog toka u napredni model. Poglavlje 4.1 bavi se određivanjem remanentnog magnetskog toka i njegovim integriranjem u napredni model, a magnetski tok koji nastaje zbog međuinstruktivne veze je opisan u poglavlju 4.3. Utjecaj gubitaka u željezu usko je povezan s glavnim magnetskim tokom stoga je postupak njegovog određivanja i uključivanja u napredni model također opisan u poglavlju 4.2. U poglavlju 4.4 predstavljen je simulacijski napredni model 8/6 SRG-a izrađen u *Matlab/Simulink-u*.

### **4.1. Određivanje remanentnog magnetskog toka prekidačkog reluktantnog stroja**

U ovom poglavlju opisano je određivanje remanentnog magnetskog toka i njegovo uključivanje u nadomjesnu shemu jedne faze SRG-a spojenog na asimetrični mosni pretvarač. Remanentni magnetski tok nastaje zbog poravnavanja magnetskih domena u statorskom i rotorskom polu u smjeru glavnog magnetskog toka. Može se pretpostaviti da statorski i rotorski pol podjednako doprinose remanentnom magnetskom toku. Pri položaju potpunog preklapanja remanentni magnetski tok ulančen promatranom fazom je maksimalan stoga je i određen za taj položaj. Rotor je postavljen u položaj potpunog preklapanja te je dva puta napravljen eksperiment istosmjerne

uzbude opisan u poglavlju 3.1. Kod prvog eksperimenta, remanentni magnetski tok je eliminiran izmjeničnim naponom. U drugom eksperimentu remanentni magnetski tok nije eliminiran te zadržava maksimalnu moguću vrijednost. Iz krivulja razmagnetiziranja prvog i drugog pokusa, određen je maksimalni remanentni magnetski tok  $\Psi_{rmax}$ .

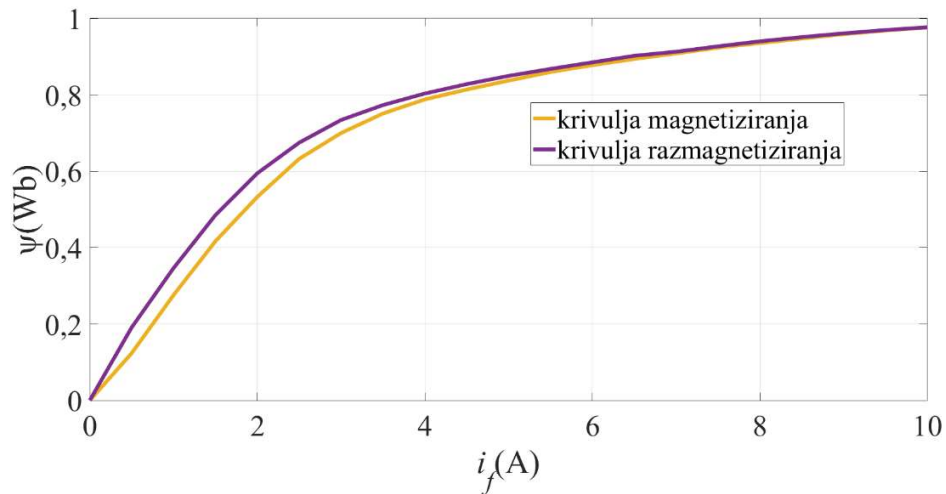
Na slici 4.1 prikazane su krivulje magnetiziranja i razmagnetiziranja dobivene iz eksperimenta istosmjerne uzbude za položaj rotora  $\theta=0^\circ$ , uz prethodnu eliminaciju remanentnog magnetskog toka izmjeničnim naponom. Na početku ovog (prvog) eksperimenta, remanentni magnetski tok je nula. Kako se faza stroja magnetizira, remanentni magnetski tok raste. U trenutku kada započne razmagnetiziranje faze stroja, remanentni magnetski tok ima maksimalni iznos  $\Psi_{rmax}$ . Pretpostavlja se da taj iznos ostaje konstantan za vrijeme razmagnetiziranja faze stroja. Stoga će maksimalni remanentni magnetski tok  $\Psi_{rmax}$  ostati zabilježen u magnetskoj karakteristici kada struja padne na nulu kako je to prikazano na slici 4.1.



*Slika 4.1. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze stroja uz prethodnu eliminaciju remanencije za položaj rotora  $\theta=0^\circ$*

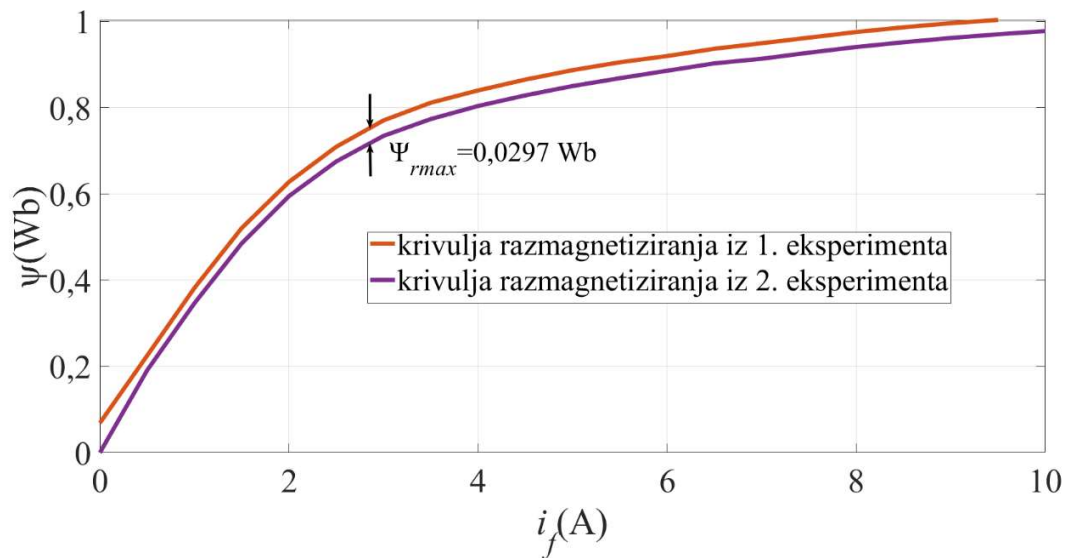
Na slici 4.2 prikazane su krivulje magnetiziranja i razmagnetiziranja dobivene iz eksperimenta istosmjerne uzbude za položaj rotora  $\theta=0^\circ$ , bez prethodne eliminacije remanentnog magnetskog toka izmjeničnim naponom. Ovaj eksperiment je uslijedio odmah nakon prvog eksperimenta, tako da tu remanentni magnetski tok ima maksimalnu vrijednost  $\Psi_{rmax}$  cijelo vrijeme i ne mijenja se s promjenom fazne struje. Stoga, polazeći od ove pretpostavke remanentni magnetski tok nema

utjecaj na induciranu elektromotornu silu te ne može biti zabilježen u drugom eksperimentu. U ovom slučaju, krivulja razmagnetiziranja pri struji od 0 A imat će iznos od 0 Wb.



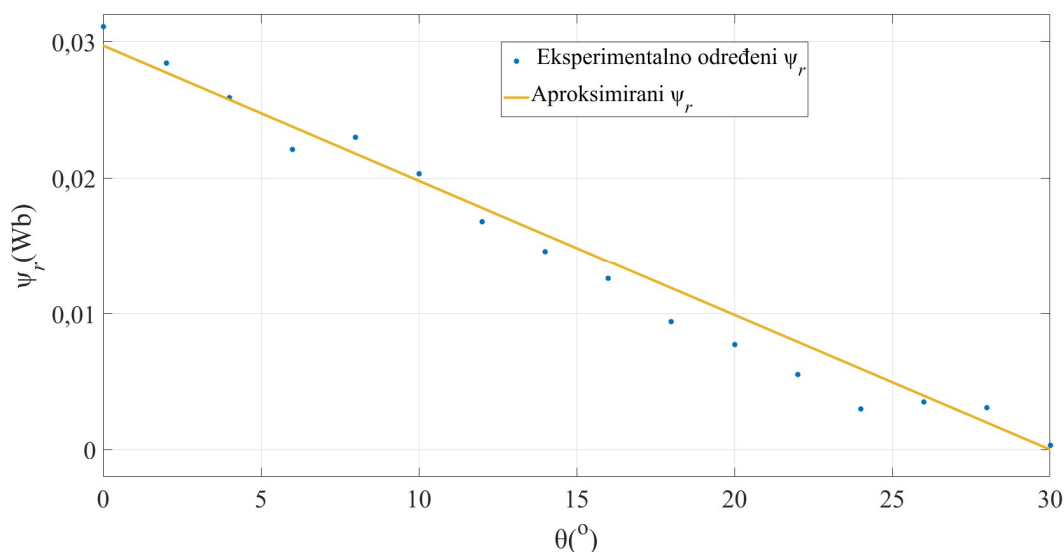
Slika 4.2. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze stroja bez prethodne eliminacije remanencije za položaj rotora  $\theta=0^\circ$

Kod oba eksperimenta, prilikom razmagnetiziranja, remanentni magnetski tok je maksimalan. Krivulja razmagnetiziranja iz prvog eksperimenta uključuje maksimalni remanentni magnetski tok  $\Psi_{rmax}$ , a krivulja razmagnetiziranja iz drugog eksperimenta ga ne sadrži. Slika 4.3 prikazuje krivulje razmagnetiziranja iz prvog (slika 4.1) i drugog eksperimenta (slika 4.2). Razlika između te dvije krivulje daje iznos maksimalnog remanentnog magnetskog toka za položaj rotora  $\theta=0^\circ$  koji iznosi  $\Psi_{rmax} = 0,0297$  Wb.



Slika 4.3. Razmagnetiziranje faze stroja s prethodnom eliminacijom remanencije i bez nje

Kada se kut između statorskog i rotorskog pola povećava, dio  $\Psi_{rmax}$  kojeg namot promatrane faze ulančuje se smanjuje. To je potvrđeno eksperimentalno tako da je proveden eksperiment istosmjerne uzbude za položaje od  $2^\circ$  do  $30^\circ$  za svaka  $2^\circ$ , jednako kao što je proveden za položaj potpunog preklapanja. Na slici 4.4 prikazan je remanentni magnetski tok ulančen promatranom fazom,  $\psi_r$  i njegova linearna aproksimacija. Za položaje od  $-30^\circ$  do  $0^\circ$   $\psi_r$  je zrcalno simetričan s obzirom na os ordinata na slici 4.4.



Slika 4.4. Eksperimentalno određeni remanentni magnetski tok ulančen promatranom fazom i njegova linearna aproksimacija

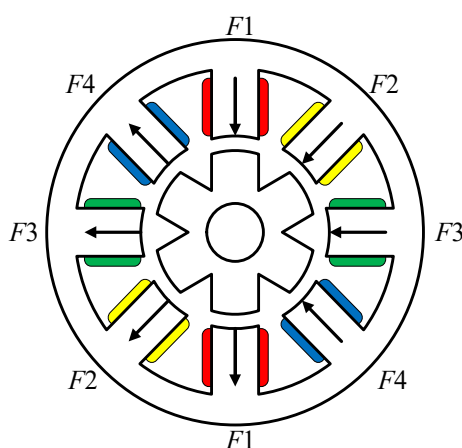
Linearna jednadžba kojom je opisana ovisnost magnetskog toka  $\psi_r$  ulančenog promatranom fazom o položaju je:

$$\psi_r = \Psi_{rmax} \cdot (-\text{sign}(\theta) \cdot 0,033 \cdot \theta + 1) \quad (4.1)$$

Sve do sad navedeno vrijedilo je za zakočen rotor i uz doprinos statorskog i rotorskog pola remanentnom magnetskom toku. U pogonu SRG-a rotor se vrti pa silnice remanentnog magnetskog toka rotorskog pola prolaze kroz fazne namote inducirajući elektromotornu silu, stoga je remanenciju u rotorskom polu potrebno uzeti u obzir. Svaka faza SRG-a uvijek se magnetizira u istom smjeru tako da remanentni magnetski tok u statorskom polu uvijek ima maksimalnu vrijednost. Silnice remanentnog magnetskog toka u statorskom polu se ne mijenjaju pa ne induciraju napon, tako da se utjecaj remanencije u statorskom polu na induciranu elektromotornu silu može zanemariti.

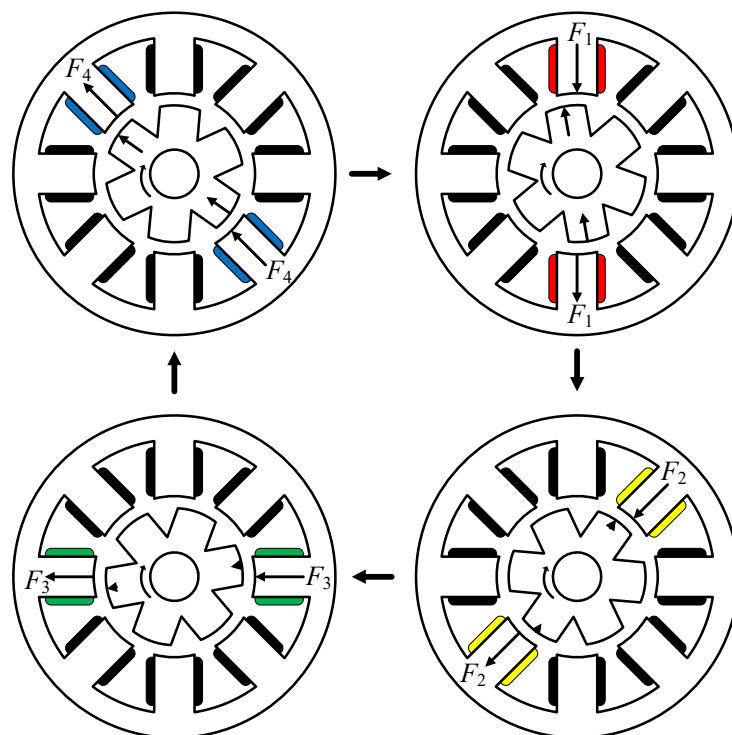
Pretpostavlja se da statorski i rotorski pol podjednako pridonose remanentnom magnetskom toku, stoga maksimalni remanentni magnetski tok rotorskog pola iznosi  $0,5 \cdot \Psi_{rmax}$ . Kako se rotor vrti, remanentni magnetski tok rotorskog pola se mijenja pod utjecajem glavnog magnetskog toka faza kraj kojih prolazi. Eksperiment istosmjerne uzbude za određivanje remanentnog magnetskog toka proveden je pri položaju  $\theta=0^\circ$  i faznoj struji 10 A pa je pretpostavljeno da je postignut dovoljno velik glavni magnetski tok da se postigne maksimalni remanentni magnetski tok. U pogonu,

rotorski pol se u položaju  $\theta=0^\circ$  nalazi kratkotrajno, a struje od 10 A se u pravilu postižu pri nazivnom opterećenju i položaju rotora  $\theta=30^\circ$  gdje je induktivitet najmanji. Iz tog razloga može se pretpostaviti da svaka od faza stroja promijeni remanentni magnetski tok rotorskog pola u smjeru svog glavnog magnetskog toka samo djelomično, a ne u potpunosti kao što je slučaj kod eksperimenta istosmjerne uzbude. Na slici 4.5 strelicama je prikazan smjer glavnog magnetskog toka u svakom od statorskih polova.



Slika 4.5. Smjer silnica glavnog magnetskog toka u statorskim polovima

Kako bi se objasnila promjena remanentnog magnetskog toka u rotorskom polu, pretpostavljeno je da faze počinju voditi pri položaju uklapanja  $\theta_u = -10^\circ$ . Položaj uklapanja drugačiji od ovoga ne mijenja bitno fizikalno objašnjenje koje slijedi. Na slici 4.6 strelicom na rotoru je prikazan remanentni magnetski tok rotorskog pola u trenutku kada pojedina faza počinje voditi. Važno je istaknuti da se remanentni magnetski tok uzima s pozitivnim predznakom kada se njegov smjer poklapa sa smjerom glavnog magnetskog toka pojedine faze, inače je negativan. Ovakvo označavanje predznaka remanentnog magnetskog toka rotorskog pola je napravljeno zato što se u nadomjesnoj shemi SRG-a pozitivna inducirana elektromotorna sila protivi porastu struje faze a negativna elektromotorna sila potpomaže porast struje faze. Nadalje, proces promjene smjera remanentnog magnetskog toka u rotorskom polu je prirodno kontinuiran i mijenja se od  $0,5 \cdot \Psi_{rmax}$  do  $-0,5 \cdot \Psi_{rmax}$  kako to prikazuje slika 4.6. Zbog jednostavnijeg modeliranja ova promjena se modelira kao diskretna te se smatra da ne postoji promjena remanentnog magnetskog toka rotora u zoni utjecaja pojedine faze (položaj rotora od  $-30^\circ$  do  $30^\circ$ ) nego tek kada ovu zonu rotorski pola napusti. Detaljnije objašnjenje ovakvog načina modeliranja slijedi u nastavku.



Slika 4.6. Promjena remanentnog magnetskog toka pod utjecajem glavnog magnetskog toka svih faza

Kada četvrta faza počne voditi, pretpostavlja se da remanentni magnetski tok rotorskog pola iznosi  $0,5 \cdot \Psi_{rmax}$ . Kako je to maksimalni iznos kojeg remanentni magnetski tok rotorskog pola može imati te je glavni magnetski tok četvrte faze u smjeru remanentnog magnetskog toka, on će ostati nepromijenjen cijelo vrijeme dok četvrta faza vodi. To se može zapisati kao  $\Psi_{rp,F4} = 0,5 \cdot \Psi_{rmax}$ . Deriviranjem jednadžbe (4.1) po vremenu i pod pretpostavkom da remanentni magnetski tok u promatranom rotorskom polu iznosi  $0,5 \cdot \Psi_{rmax}$  dobiva se sljedeća jednadžba za elektromotornu silu koju će u namotu četvrte faze izazivati prolazak tog rotorskog pola:

$$e_{r,4} = 0,5 \cdot \Psi_{rmax} \cdot (-\text{sign}(\theta) \cdot 0,033) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \omega \quad (4.2)$$

Prema slici 4.6, nakon što promatrani rotorski pol napusti područje četvrte faze dolazi u područje prve faze. U trenutku kada provede prva faza, remanentni magnetski tok promatranog rotorskog pola i dalje ima isti iznos i smjer koji je imao dok je bio u području četvrte faze, kao što je već navedeno. Sa slike 4.6 je jasno da je remanentni magnetski tok promatranog rotorskog pola u suprotnom smjeru od glavnog magnetskog toka prve faze. Zbog toga se može smatrati da u trenutku kada prva faza počne voditi on ima iznos  $\Psi_{rp,F1} = -0,5 \cdot \Psi_{rmax}$  u odnosu na glavni magnetski tok te

faze. Dok vodi prva faza i promatrani rotorski pol prolazi kroz njeno područje remanentni magnetski tok u tom rotorskom polu ima tendenciju promjene zbog utjecaja glavnog magnetskog toka prve faze. Međutim, zbog pojednostavljenog matematičkog modeliranja, pretpostavlja se da remanentni magnetski tok ima konstantnu vrijednost cijelo vrijeme vođenja prve faze kao u trenutku kada je ta faza počela voditi. Sljedećom jednadžbom opisana je ta elektromotorna sila:

$$e_{r,1} = -0,5 \cdot \Psi_{rmax} \cdot (-\text{sign}(\theta) \cdot 0,033) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \omega \quad (4.3)$$

Jednadžba (4.3) je ista kao i jednadžba (4.2), samo suprotnog predznaka.

Nakon što promatrani rotorski pol napusti područje prve faze dolazi u područje druge faze, a nakon toga i treće. Može se pretpostaviti da će se remanentni magnetski tok pod utjecajem glavnih magnetskih tokova prve, druge i treće faze promijeniti od iznosa  $-0,5 \cdot \Psi_{rmax}$  kada provede prva faza do iznosa  $0,5 \cdot \Psi_{rmax}$  kada ponovno provede četvrta faza, u odnosu na glavni magnetski tok svake od navedenih faza, kao što je prikazano na slici 4.6. Tada ukupna promjena remanentnog magnetskog toka u promatranom rotorskom polu iznosi  $|\Psi_{rmax}|$ . Ako se uzme u obzir da svaka faza ravnopravno doprinosi promjeni remanentnog magnetskog toka rotora onda je doprinos svake pojedine faze  $0,33 \cdot |\Psi_{rmax}|$ . Ove diskretne promjene remanentnog magnetskog toka promatranog rotorskog pola u trenutku kada počne voditi svaka od faza stroja zapisuje se sljedećom jednadžbom:

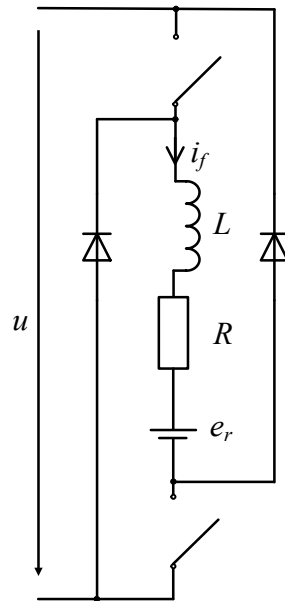
$$\begin{aligned} \Psi_{rp,F1} &= -0,5 \cdot \Psi_{rmax} \\ \Psi_{rp,F2} &= \Psi_{rp,F1} + 0,33 \cdot |\Psi_{rmax}| = -0,5 \cdot 0,33 \cdot \Psi_{rmax} \\ \Psi_{rp,F3} &= \Psi_{rp,F2} + 0,33 \cdot |\Psi_{rmax}| = 0,5 \cdot 0,33 \cdot \Psi_{rmax} \\ \Psi_{rp,F4} &= \Psi_{rp,F3} + 0,33 \cdot |\Psi_{rmax}| = 0,5 \cdot \Psi_{rmax} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Kao što je i kod prve faze pretpostavljeno, može se pretpostaviti da remanentni magnetski tok ima konstantnu vrijednost cijelo vrijeme vođenja druge i treće faze kao u trenutku kada su te faze počele voditi. Deriviranjem jednadžbe (4.1) po vremenu i uvrštavanjem remanentnog magnetskog toka rotorskog pola koji vrijedi u odnosu na svaku fazu stroja iz jednadžbe (4.4) dobiva se sljedeća jednadžba koja opisuje elektromotornu silu koju inducira remanentni magnetski tok rotorskog pola u svakoj od faza stroja:



$$\begin{aligned}
e_{r,1} &= -0,5 \cdot \Psi_{rmax} \cdot (-\text{sign}(\theta) \cdot 0,033) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \omega \\
e_{r,2} &= -0,5 \cdot 0,33 \cdot \Psi_{rmax} \cdot (-\text{sign}(\theta) \cdot 0,033) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \omega \\
e_{r,3} &= 0,5 \cdot 0,33 \cdot \Psi_{rmax} \cdot (-\text{sign}(\theta) \cdot 0,033) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \omega \\
e_{r,4} &= 0,5 \cdot \Psi_{rmax} \cdot (-\text{sign}(\theta) \cdot 0,033) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \omega
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

Jednadžba (4.5) jednako vrijedi za promatrani rotorski pol, kao i za sve ostale rotorske polove. Na slici 4.7 prikazana je nadomjesna shema za jednu fazu SRG-a spojena na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača, nadopunjena utjecajem remanentnog magnetskog toka. Taj utjecaj nadomješten je naponskim izvorom iznosa inducirane elektromotorne sile  $e_r$  koji je spojen u seriju s induktivitetom i otporom.

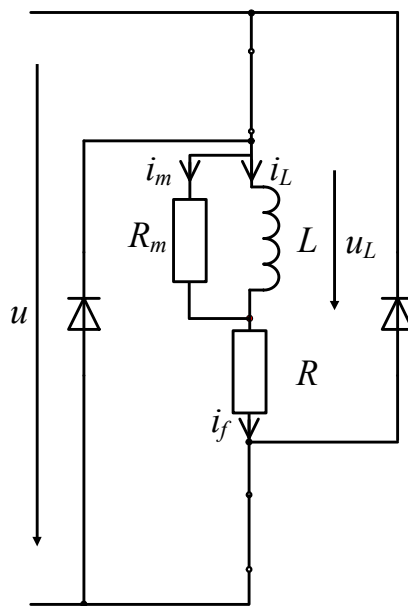


*Slika 4.7. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a koja uključuje remanentni magnetski tok spojena na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača*

Prema jednadžbi (4.5), inducirani napon koji stvara promjena remanentnog magnetskog toka u drugoj i trećoj fazi ima efektivnu vrijednost oko 2 V pri 2000 o/min i 3 V pri 3000 o/min. U prvoj i četvrtoj fazi njegova efektivna vrijednost iznosi oko 6 V i 9 V.

## 4.2. Razdioba fazne struje po parametrima nadomjesne sheme prekidačkog reluktantnog stroja

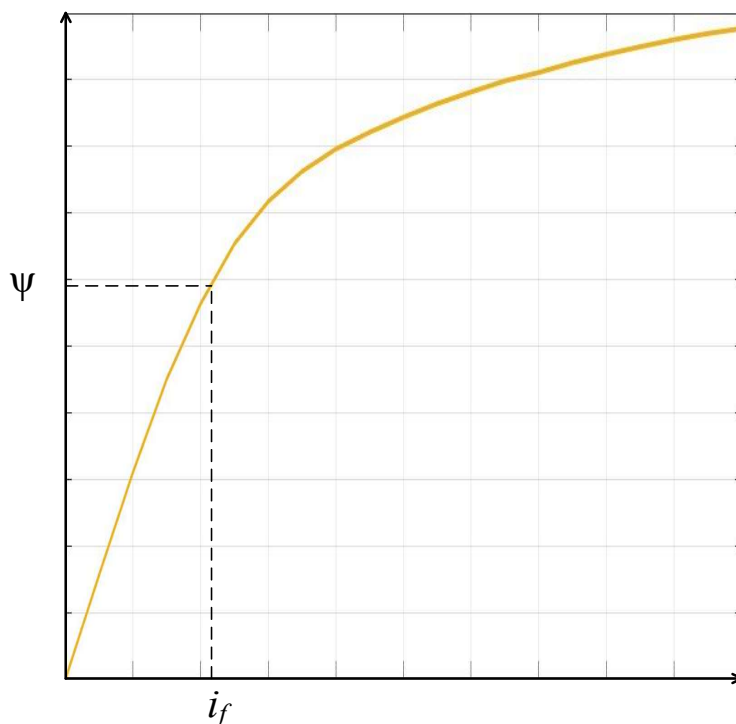
Kada kroz fazni namot teče struja, zbog samoindukcije, stvara se magnetski tok te on uzrokuje gubitke u željezu. Da bi se gubici u željezu uključili u model, u radovima [5, 6, 87, 104, 105] predloženo je da se u paralelu s nadomjesnim induktivitetom doda nadomjesni otpor gubitaka u željezu  $R_m$ . To je prikazano na slici 4.8.



Slika 4.8. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a spojene na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača s uključenim otporom gubitaka u željezu

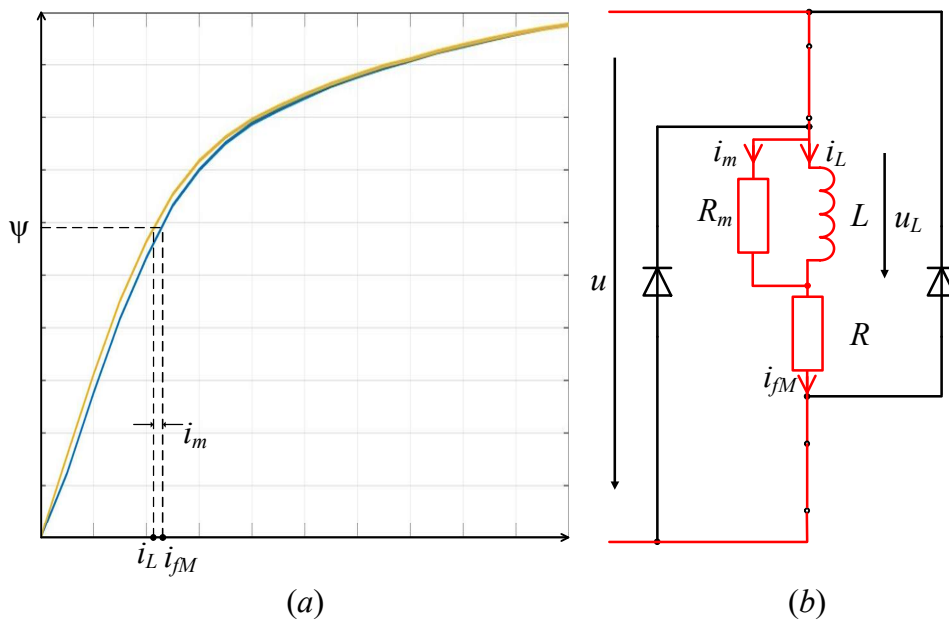
Fazna struja se dijeli na nadomjesnu struju  $i_L$  koja teče kroz nadomjesni induktivitet i nadomjesnu struju  $i_m$  koja teče kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu. Struja  $i_L$  je odgovorna za izgradnju glavnog magnetskog toka, a struja  $i_m$  za gubitke u željezu. U ovom poglavlju opisano je određivanje tih dviju struja za različite iznose glavnog magnetskog toka i položaja rotora. Kao i remanentni magnetski tok,  $i_L$  i  $i_m$  određene su za 16 položaja rotora što je uobičajeno u dostupnim radovima [47, 52, 56, 60, 90]. U prethodnom poglavlju remanentni magnetski tok je određen iz dva eksperimenta istosmjerne uzbuđe. U prvom je postojao utjecaj remanentnog magnetskog toka, a u drugom nije. Dvije navedene struje određene su iz podataka dobivenih iz drugog eksperimenta istosmjerne uzbuđe iz prethodnog poglavlja. Kako u drugom eksperimentu nema utjecaja remanentnog magnetskog toka, za potrebe objašnjenja dobivanja struja  $i_L$  i  $i_m$  u nadomjesnoj shemi sa slike 4.8 izostavljen je nadomjesni napon  $e_r$  prikazan na slici 4.7.

Na slici 4.9 prikazana je krivulja magnetiziranja i razmagnetiziranja faze SRG-a kada bi gubici u željezu bili zanemarivi, pri zakočenom rotoru u položaju  $\theta$ . Tad bi se magnetiziranje i razmagnetiziranje odvijalo po istoj krivulji.



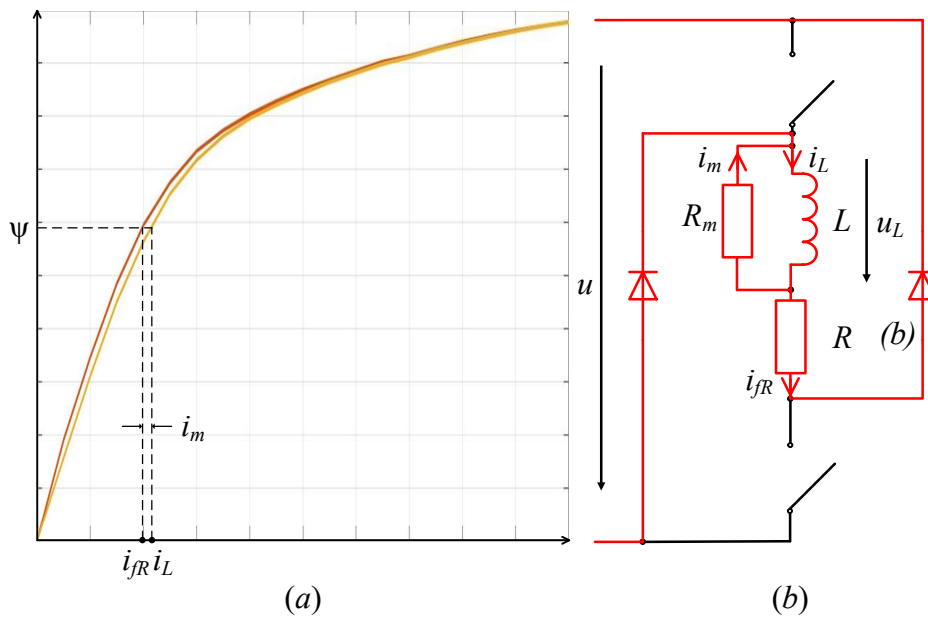
Slika 4.9. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze stroja uz zanemarive gubitke u željezu

Kako gubici u željezu ipak nisu zanemarivi, prilikom magnetiziranja, kroz fazni namot poteći će struja  $i_{fM}$  koja se sastoji od struje  $i_L$  odgovorne za izgradnju glavnog magnetskog toka, uvećana za struju  $i_m$  tako da vrijedi  $i_{fM} = i_L + i_m$ . Struja  $i_m$  se mijenja s promjenom glavnog magnetskog toka  $\psi$ . Krivulja magnetiziranja prikazana na slici 4.9 pomiče se u desno za iznos struje  $i_m$  što je prikazano na sljedećoj slici:



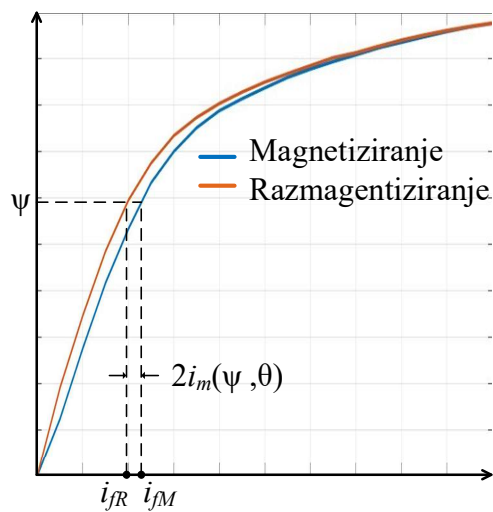
Slika 4.10. Magnetiziranje faze stroja zakočenog SRG-a uz prisutne gubitke u željezu (a) i tokovi struja u nadomjesnoj shemi (b)

Kod razmagnetiziranja kroz fazni namot poteći će struja  $i_{fR}$  koja se sastoji od struje  $i_L$  umanjene za struju  $i_m$  tako da vrijedi  $i_{fR} = i_L - i_m$ . Posljedica toga je da se krivulja magnetiziranja prikazana na slici 4.9 pomiče u lijevo za iznos  $i_m$  što je prikazano na sljedećoj slici:



Slika 4.11. Razmagnetiziranje faze stroja zakočenog SRG-a uz prisutne gubitke u željezu (a) i tokovi struja u nadomjesnoj shemi (b)

Na slici 4.12 prikazane su krivulje magnetiziranja i razmagnetiziranja dobivene iz eksperimenta istosmjerne uzbude, za zadani položaj rotora  $\theta$ , bez utjecaja remanentnog magnetskog toka.



Slika 4.12. Magnetiziranje i razmagnetiziranje faze zakočenog SRG-a uz prisutne gubitke u željezu

Za zadani glavni magnetski tok  $\psi$ , pri zakočenom rotoru na položaju  $\theta$ , sa slike 4.12 mogu se odrediti dvije fazne struje:  $i_{fM}=i_L+i_m$  dobivene prilikom magnetiziranja i  $i_{fR}=i_L-i_m$  dobivene prilikom razmagnetiziranja. Iz zbroja te dvije struje dobiva se struja  $i_L$  sljedećom jednačbom:

$$i_{fM} + i_{fR} = (i_L + i_m) + (i_L - i_m)$$

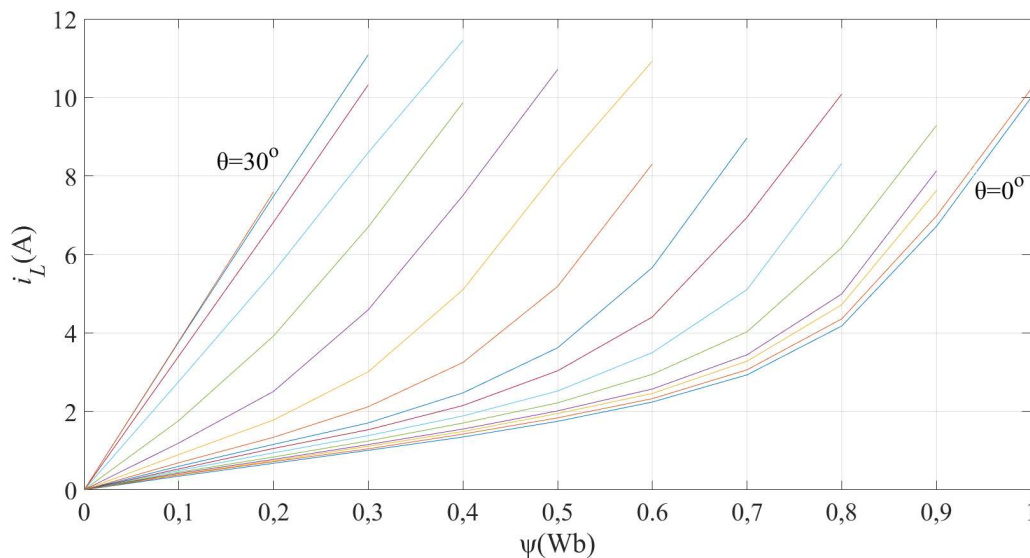
$$i_L = \frac{i_{fM} + i_{fR}}{2} \quad (4.6)$$

Slično, iz razlike tih dviju struja dobiva se struja  $i_m$  sljedećom jednačbom:

$$i_{fM} - i_{fR} = (i_L + i_m) - (i_L - i_m)$$

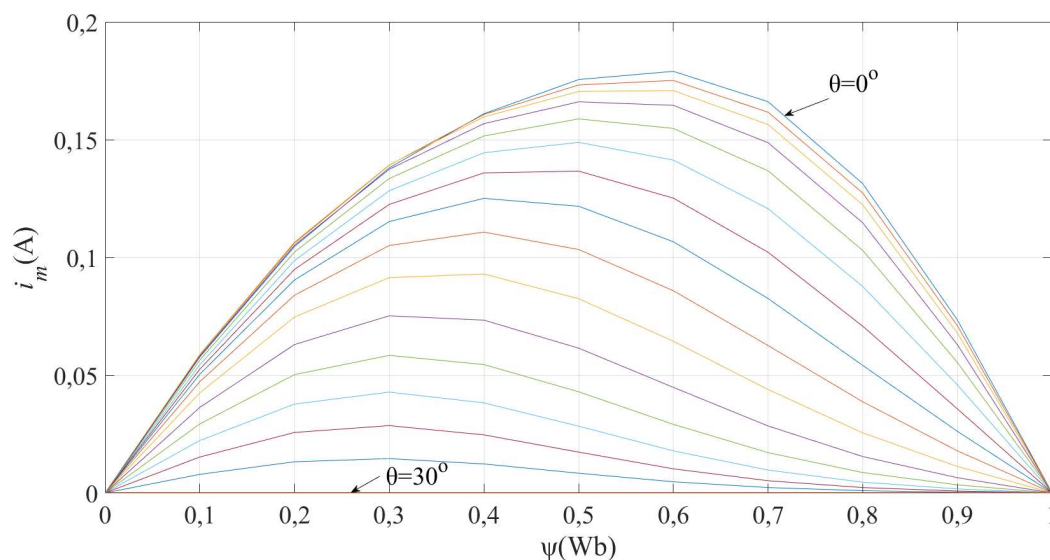
$$i_m = \frac{i_{fM} - i_{fR}}{2} \quad (4.7)$$

Dakle, iz drugog eksperimenta istosmjerne uzbude koji je opisan u poglavlju 3.1, za zadani glavni magnetski tok i položaj, određena je struja kroz nadomjesni induktivitet i struja kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu. Eksperiment istosmjerne uzbude napravljen je na stroju iz Priloga A za 16 položaja rotora i za fazne struje do 12 A što je dvostruki iznos nazivne struje stroja. Iz dobivenih podataka napravljene su pregledne tablice  $i_L(\theta, \psi)$  i  $i_m(\theta, \psi)$ . Ovisnost struje kroz nadomjesni induktivitet o položaju i glavnom magnetskom toku za stroj iz Priloga A prikazana je na slici 4.13.



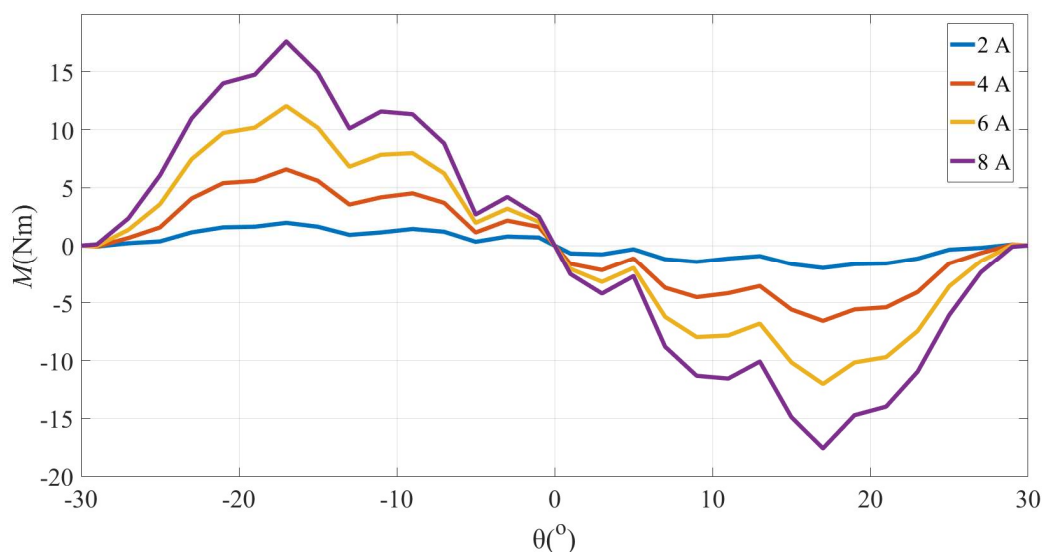
Slika 4.13. Ovisnost struje kroz nadomjesni induktivitet o položaju i magnetskom toku

Ovisnost struje kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu o položaju i glavnom magnetskom toku za stroj iz Priloga A prikazana je na slici 4.14. Kako su krivulje magnetiziranja i razmagnetiziranja međusobno blizu, struja kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu dobivena eksperimentalno pomoću jednadžbe (4.7) ima značajan mjerni šum stoga su podaci prikazani na slici 4.14 prethodno filtrirani algoritmom opisanim u prilogu C. Kao rubni uvjeti postavljeno je da struja  $i_m$  ima iznos 0 A kada je magnetski tok 0 Wb i 1 Wb. Ako je glavni magnetski tok 0 Wb onda ne postoje gubici u željezu pa struja  $i_m$  iznosi 0 A. S druge strane, ako glavni magnetski tok ima iznos 1 Wb, faza se nalazi u dubokom magnetskom zasićenju pa se tu krivulje magnetiziranja i razmagnetiziranja praktički preklapaju te je razlika između njih 0 A. S obzirom na navedeno te na oblik krivulje magnetiziranja može se zaključiti da ovisnost  $i_m(\theta, \psi)$  mora biti glatka krivulja s jednim maksimumom. Stoga je cilj eksperimentalno određene iznose struja kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu prethodno filtrirati kako bi ovi iznosi čim više odgovarali točkama glatkih krivulja. To se postiže primjenom algoritma opisanog u prilogu C, a krajnji rezultat je prikazan na slici 4.14.



*Slika 4.14. Ovisnost struje kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu o položaju i glavnom magnetskom toku*

Na slici 4.15 prikazana je momentna karakteristika stroja koja je dobivena sukladno s jednadžbom (3.24), numeričkim integriranjem magnetskog toka po struji  $i_L$  i deriviranjem po položaju, iz pregledne tablice  $i_L(\theta, \psi)$ .



Slika 4.15. Elektromagnetski moment jedne faze u ovisnosti o kutu zakreta rotora i faznoj struji dobiven iz pregledne tablice  $i_L(\theta, \psi)$

Elektromagnetski moment jedne faze zapisan je u obliku pregledne tablice  $M_f(\theta, i_L)$ .

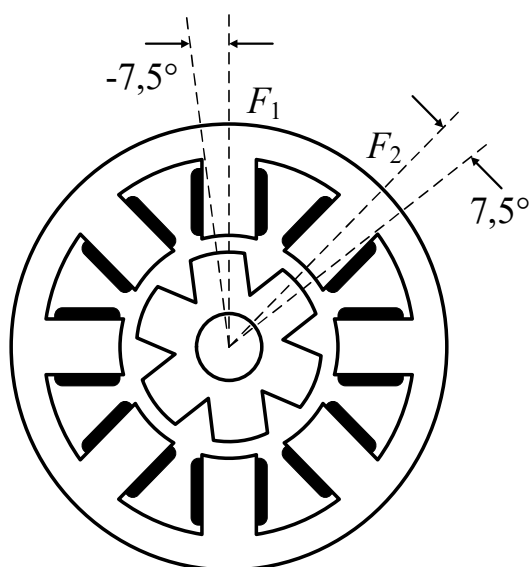
### 4.3. Određivanje međuinuktiviteta između faza prekidačkog reluktantnog stroja

Zbog međuinuktivne veze, kroz promatranu fazu zatvara se dio glavnog magnetskog toka susjedne faze stroja. Promjena tog magnetskog toka inducira određen napon u promatranoj fazi. Faza koja je počela voditi prije promatrane ima značajan magnetski tok u trenutku kada počne voditi promatrana faza. Primjerice, kada počne voditi prva faza, već vodi druga faza. Zato je potrebno uzeti u obzir utjecaj magnetskog toka druge faze koji se zatvara kroz prvu fazu. Kada vodi prva faza, počinje voditi četvrta faza. Kako četvrta faza tek počinje voditi, magnetski tok te faze koji se zatvara kroz prvu je zanemariv.

Međuinuktivitet je procijenjen iz podataka dobivenih eksperimentom istosmjerne uzbude. Metoda je slična kao i kod određivanja glavnog magnetskog toka opisanog u poglavlju 3.1. Razlika je u tome što se kod određivanja međuinuktiviteta napon mjeri na otvorenim stezaljkama promatrane faze, a struja pušta kroz susjednu fazu kada je rotor zakočen u željenom položaju.

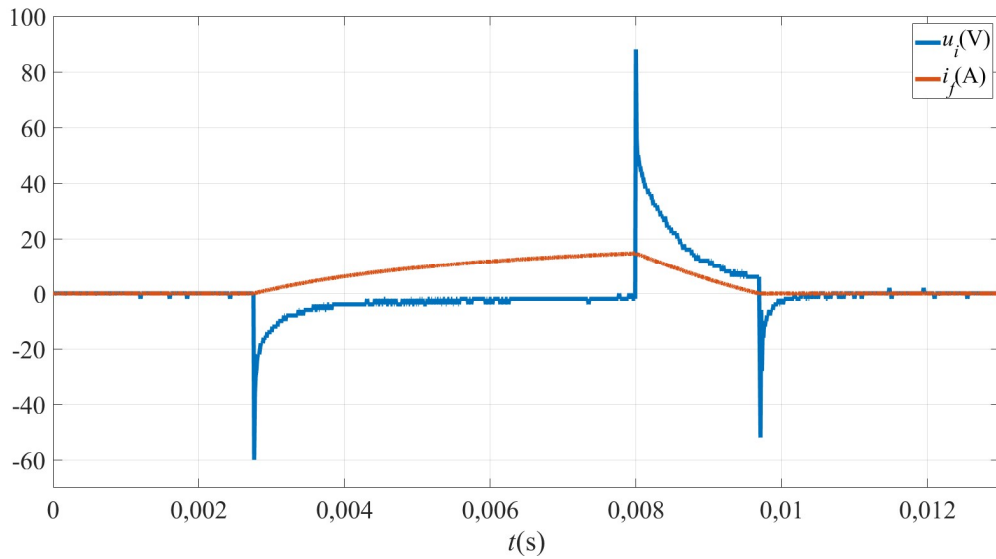


Međuinduktivitet je procijenjen između prve i druge faze stroja, tako da je inducirani napon  $u_i$  mjeren na stezaljkama prve faze, a impuls struje  $i_f$  puštan kroz drugu fazu. Mjerenje je provedeno u rasponu od  $\theta = -30^\circ$  do  $\theta = 17,5^\circ$  s korakom od  $2,5^\circ$ . Pri položajima od  $20^\circ$  do  $30^\circ$  međuinduktivitet između prve i druge faze je zanemariv. Korak od  $2,5^\circ$  odabran je da bi se provelo mjerenje pri položaju  $\theta = -7,5^\circ$  gdje je međuinduktivitet maksimalan. Kada je kut između statorskog pola prve faze i najbližeg rotorskog pola  $\theta = -7,5^\circ$ , tada je kut između statorskog pola druge faze i najbližeg rotorskog pola  $\theta = 7,5^\circ$  što je prikazano na slici 4.16. Pri tom položaju rotora magnetski otpor između te dvije faze je minimalan.



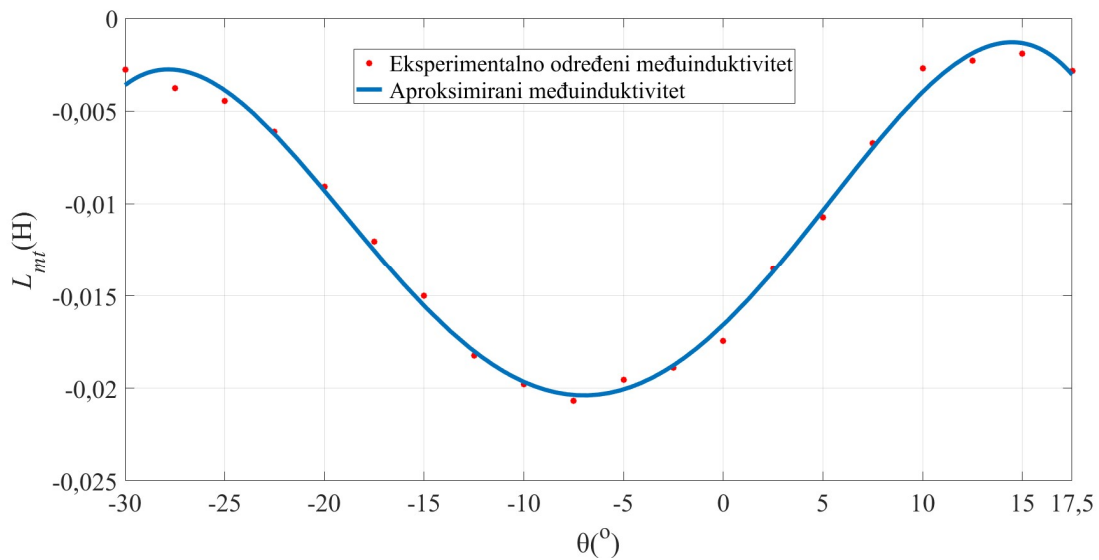
Slika 4.16. Položaj rotora kod kojeg je magnetski otpor minimalan između prve i druge faze

Izmjereni inducirani napon  $u_i$  i fazna struja  $i_f$  iz kojih je procijenjen međuinduktivitet za položaj  $\theta = -7,5^\circ$  prikazani su na slici 4.17.



Slika 4.17. Fazna struja i inducirani napon kod eksperimenta istosmjerne uzbuđe za procjenu međuinđuktiviteta pri položaju  $\theta = -7,5^\circ$

Slika 4.18. prikazuje aproksimirani međuinđuktivitet  $L_{mt}$  između promatrane i prethodno magnetizirane faze u ovisnosti o položaju rotora.



Slika 4.18. Aproksimirani međuinđuktivitet između promatrane i prethodno magnetizirane faze u ovisnosti o položaju rotora

Na slici 4.5 prikazani su smjerovi glavnog magnetskog toka svake faze. Dio glavnog magnetskog toka druge faze koji se zatvara kroz prvu, treće kroz drugu te četvrte kroz treću su u suprotnom smjeru od glavnog magnetskog toka promatrane faze. Tada vrijedi međuinduktivitet prikazan na slici 4.18. Dio glavnog magnetskog toka prve faze koji se zatvara kroz četvrtu fazu je u smjeru glavnog magnetskog toka četvrte faze. U tom slučaju međuinduktivitet je suprotnog predznaka od onog prikazanog na slici 4.18.

Polinom prikazan na slici 4.18 je:

$$L_{mt} = \sum_{l=0}^4 a_{mtl} \cdot \theta^l \quad (4.8)$$

Koeficijenti polinoma  $a_{mtl}$  ( $l=1, \dots, 4$ ) u jednadžbi (4.8) dobiveni su *Matlabovim* alatom *Basic Fitting Tool* i navedeni su u prilogu B. Međutok dvaju faza dobiva se množenjem jednadžbe (4.8) s faznom strujom prethodno magnetizirane faze  $i_s$ :

$$\Psi_{mt} = i_s \cdot L_{mt} \quad (4.9)$$

Deriviranjem jednadžbe (4.9) po vremenu dobiva se sljedeća jednadžba:

$$\frac{d\Psi_{mt}}{dt} = e_{mt} = \frac{di_s}{dt} \cdot L_{mt} + i_s \cdot \frac{dL_{mt}}{d\theta} \cdot \omega \quad (4.10)$$

gdje je:

$e_{mt}$  napon koji prethodno magnetizirana faza inducira u promatranoj

Iz jednadžbi (4.8) i (4.10) slijedi:

$$e_{mt} = \frac{di_s}{dt} \cdot \sum_{l=0}^4 a_{mtl} \cdot \theta^l + i_s \cdot \sum_{l=1}^4 l \cdot a_{mtl} \cdot \theta^{l-1} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \omega \quad (4.11)$$

Uzimajući u obzir smjer magnetiziranja faza stroja sa slike 4.5 vrijedi:

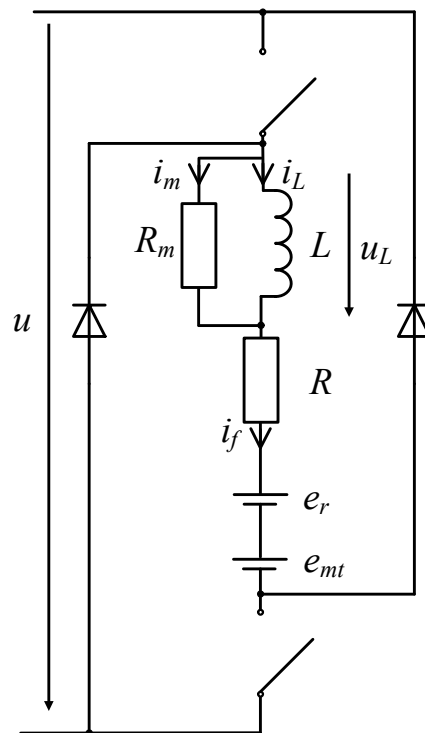
$$e_{mt,j} = \frac{di_s}{dt} \cdot \sum_{l=0}^4 a_{mtl} \cdot \theta^l + i_s \cdot \sum_{l=1}^4 l \cdot a_{mtl} \cdot \theta^{l-1} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \omega, j = 1, 2, 3 \quad (4.12)$$

$$e_{mt,4} = - \left( \frac{di_s}{dt} \cdot \sum_{l=0}^4 a_{mtl} \cdot \theta^l + i_s \cdot \sum_{l=1}^4 l \cdot a_{mtl} \cdot \theta^{l-1} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \omega \right)$$

Dio magnetskog toka prve faze koji se zatvara kroz četvrtu je u suprotnom smjeru nego što je to slučaj za ostale faze, stoga vrijede jednadžbe (4.12).

#### 4.4. Simulacija naprednog modela u Matlab/Simulinku

Kod klasičnog modela jedna faza SRG-a nadomještena je induktivitetom i otporom namota. Nadomjesna shema jedne faze spojene na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača prikladna za klasični model prikazana je slikom 3.1. Na slici 4.19 prikazana je ta nadomjesna shema nadopunjena utjecajem međuinduktiviteta, remanentnog magnetskog toka i gubitaka u željezu. Takva nadomjesna shema prikladna je za izradu naprednog modela SRG-a.



Slika 4.19. Nadomjesna shema jedne faze SRG-a koja uključuje međuinduktivitet, remanentni magnetski tok i gubitke u željezu spojena na jednu granu asimetričnog mosnog pretvarača

Na slici 4.19  $i_m$  predstavlja struju kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu  $R_m$ , a  $i_L$  predstavlja struju kroz nadomjesni induktivitet faznog namota  $L$ . Za faznu struju  $i_f$  vrijedi jednačica:

$$i_f = i_L + k \cdot i_m \quad (4.13)$$

Struje  $i_L$  i  $i_m$  zapisane su kao pregledne tablice  $i_L(\theta, \psi)$  i  $i_m(\theta, \psi)$ . Prilikom magnetiziranja je  $k=1$  pa se fazna struja  $i_f$  sastoji od struje kroz nadomjesni induktivitet  $i_L$ , uvećane za struju  $i_m$  koja teče kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu. Prilikom razmagnetiziranja  $k=-1$  pa se fazna struja sastoji od struje kroz nadomjesni induktivitet umanjene za struju koja teče kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu. Napon  $u_L$  inducira se zbog promjene glavnog magnetskog toka  $\psi$  po vremenu. Ovaj

napon je ujedno i pad napona na nadomjesnom otporu gubitaka u željezu. Utjecaj remanentnog magnetskog toka nadomješten je naponom  $e_r$ , a utjecaj međuinduktiviteta je nadomješten naponom  $e_{mt}$ .

Za nadomjesnu shemu sa slike 4.19 vrijedi naponska jednadžba:

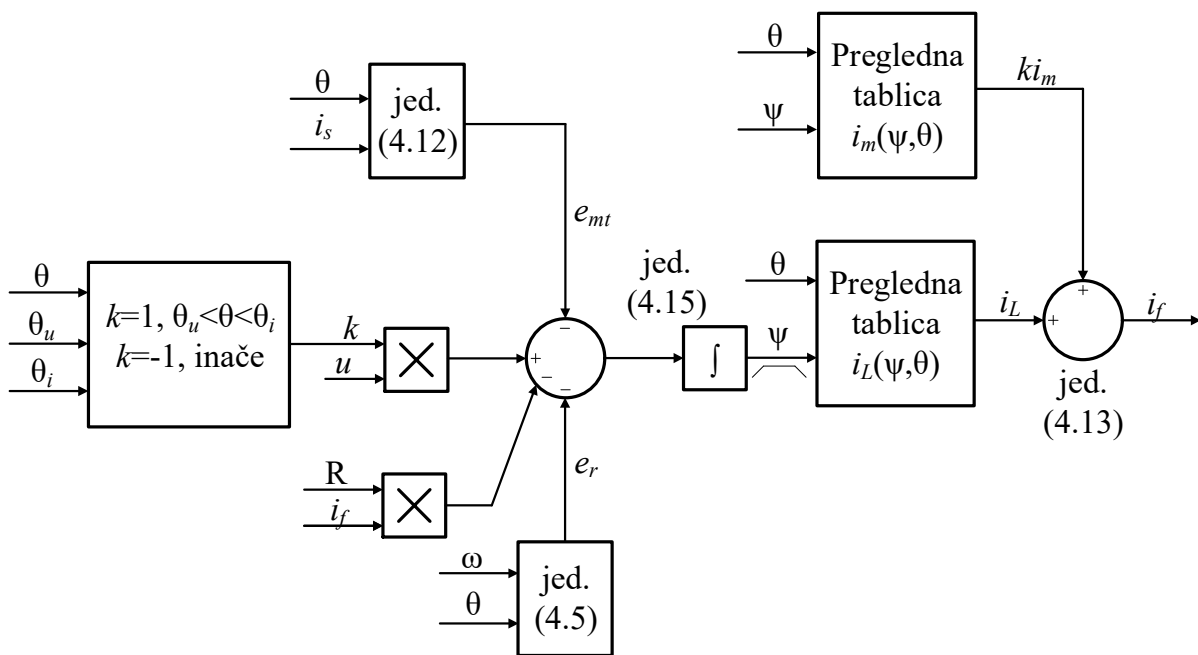
$$k \cdot u = R \cdot i_{f,j} + \frac{d\psi}{dt} + e_{mt,j} + e_{r,j} \quad (4.14)$$

gdje  $j$  predstavlja redni broj faze.

Iz jednadžbe (4.14) dobiva se izraz za glavni magnetski tok:

$$\psi = \int_0^t (k \cdot u - R \cdot i_{f,j} - e_{mt,j} - e_{r,j}) \cdot dt + \psi_0 \quad (4.15)$$

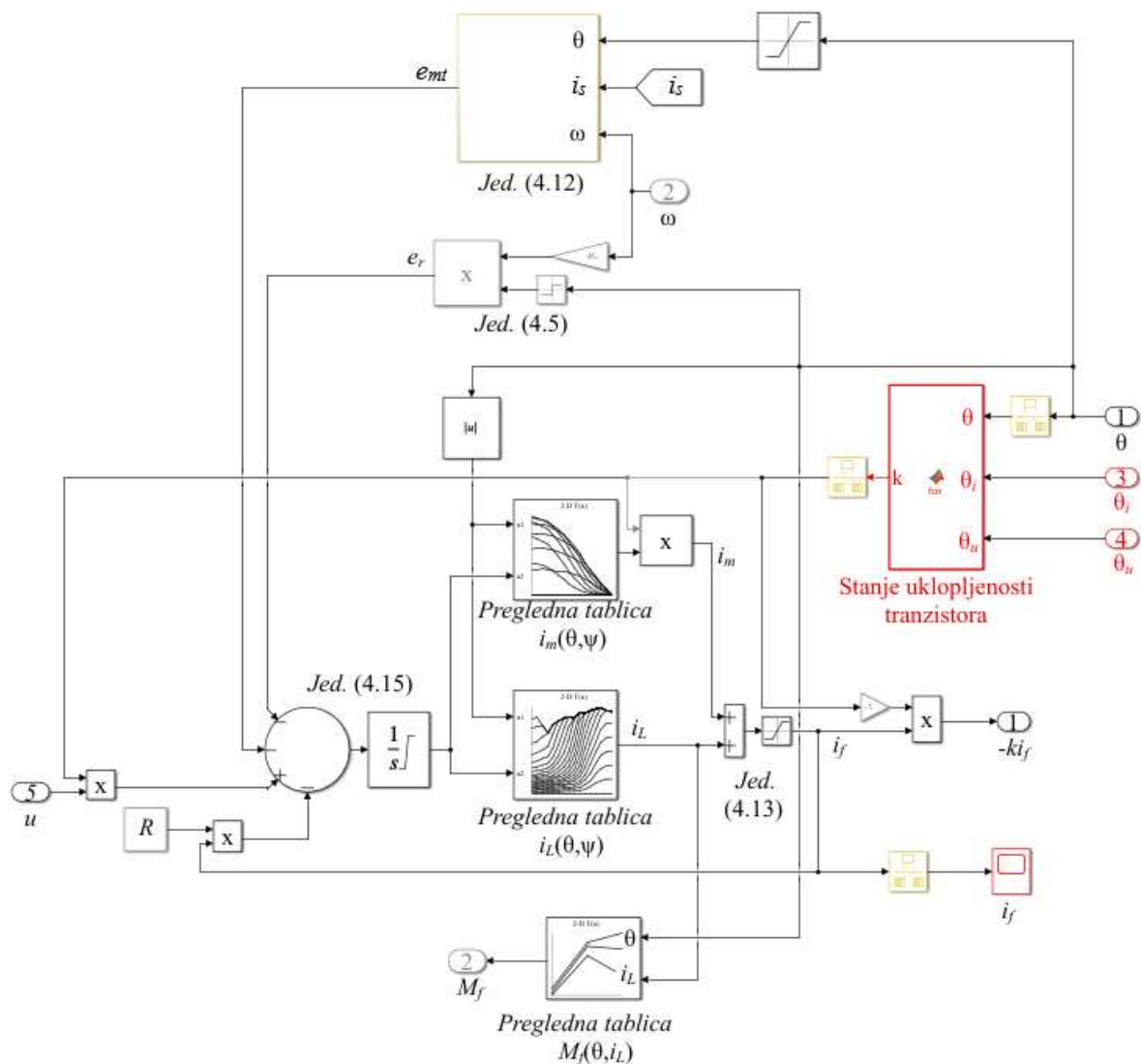
Kako SRG ne radi u području kontinuiranog vođenja, u trenutku uklapanja tranzistora glavni magnetski tok je 0 Wb stoga je  $\psi_0 = 0$  Wb. Blokovska shema jedne faze SRG-a naprednog modela prikladnog za *Matlab/Simulink* prikazana je na slici 4.20.



Slika 4.20. Blokovska shema jedne faze za napredni model SRG-a

Svrha blokovske sheme prikazane na slici 4.20 je odrediti faznu struju  $i_f$ . To se postiže jednadžbom (4.13). Struje  $i_m$  i  $i_L$  određuju se iz preglednih tablica opisanih u poglavlju 4.2 na temelju položaja rotora  $\theta$  i glavnog magnetskog toka  $\psi$ . Smjer struje  $i_m$  ovisi o stanju uklopljenosti tranzistora  $k$  promatrane grane asimetričnog mosnog pretvarača. Prema jednadžbi (4.15) glavni magnetski tok

jedne faze  $\psi$  dobiva se integriranjem napona  $u_L$  na nadomjesnom induktivitetu  $L$  prikazanom na slici 4.19, a to je napon na namotu  $k \cdot u$  umanjen za pad napona na omskom otporu namota  $R \cdot i_f$  te napon  $e_r$  induciran promjenom remanentnog magnetskog toka (jednadžba(4.5)) i napona  $e_{mt}$  kojeg inducira promjena magnetskog toka nastalog zbog međuinduktivne veze (jednadžba(4.12)). U blokovskoj shemi je postavljeno ograničenje da magnetski tok ne može pasti ispod 0 Wb, a gornji iznos nije limitiran. Stanje uklopljenosti tranzistora  $k$  određuje se iz trenutnog položaja rotora  $\theta$ , položaja uklapanja  $\theta_u$  i položaja isklapanja  $\theta_i$ . Ako je položaj rotora između položaja uklapanja i isklapanja onda je  $k=1$ , a inače je  $k=-1$ . Slika 4.21 prikazuje simulacijski model jedne faze naprednog modela SRG-a u *Matlab/Simulink*-u koji se temelji na blokovskoj shemi prikazanoj na slici 4.20.



Slika 4.21. Simulacijski model jedne faze za napredni model SRG-a u Matlab/Simulink-u

Na slici 4.21 žutom bojom označeni su *Rate transition* blokovi. Njihova srha je da razdvoje diskretni i kontinuirani dio simulacije. U diskretnim koracima, frekvencije 20 kHz, simulira se sve što se određuje računalom, a to je stanja uklopljenosti tranzistora i uzorkovanje fazne struje. Taj dio modela označen je crvenom bojom. Ostatak modela faze je modeliran kao kontinuiran jer se odnosi na sam SRG i asimetrični mosni pretvarač. Jednadžba (4.12) kojom je određen napon koji se inducira zbog međuinuktiviteta, vrijedi između položaja  $-30^\circ$  i  $17,5^\circ$  stoga je položaj ograničen između tih vrijednosti prije ulaza u pripadajući blok. Napon induciran zbog promjene remanentnog magnetskog toka određen je jednadžbom (4.5). Jednadžbom (4.15) određen je glavni magnetski

tok. Iz preglednih tablica određene su struje  $i_L$  i  $i_m$ . Kako su magnetske karakteristike faze stroja zrcalno simetrične obzirom na os apscisa, za potrebe određivanja navedenih struja uzeta je apsolutna vrijednost položaja. Jednadžbom (4.13) određuje se fazna struja  $i_f$  koja ne može pasti ispod 0 A, a gornji iznos nije limitiran. Elektromagnetski moment jedne faze određen je iz pregledne tablice na temelju struje  $i_L$  i položaja rotora.

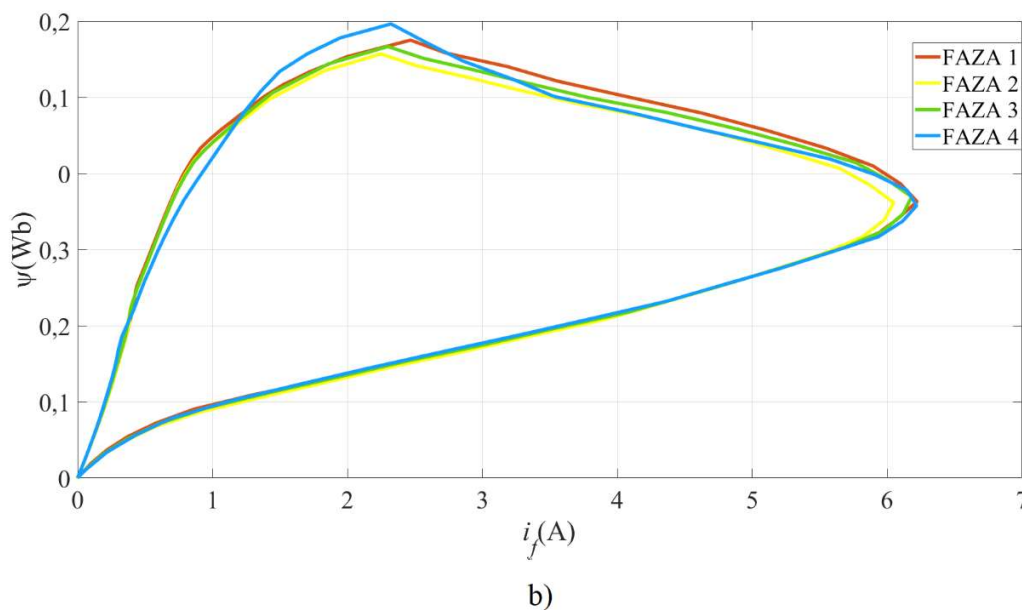
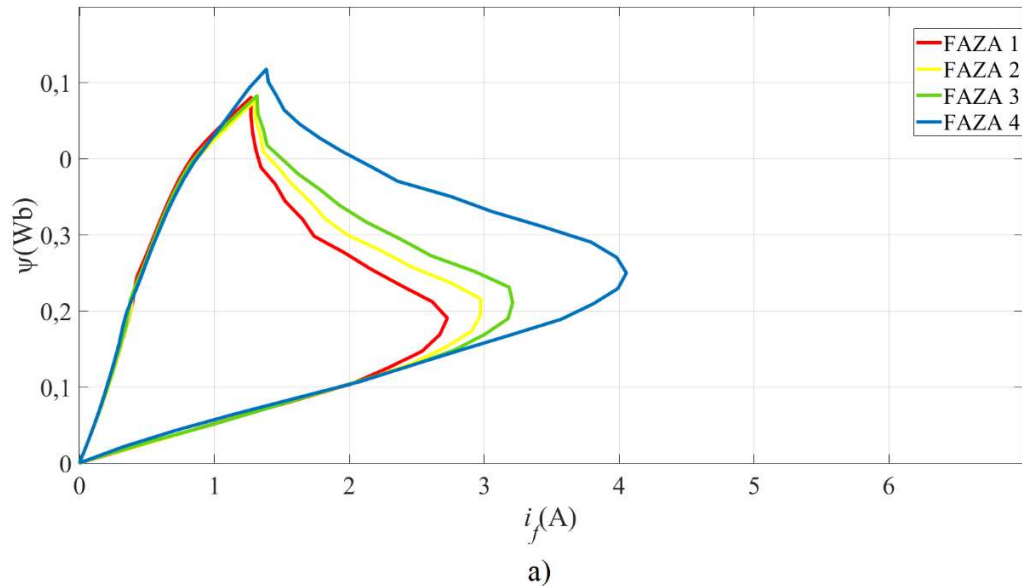
Blokovska shema naprednog modela SRG-a, asimetričnog mosnog pretvarača i trošila zajedno s regulacijskim sustavom napona između sabirnica je identična blokovskoj shemi prikazanoj na slici 3.10 imajući na umu da se sada u bloku Simulacija faze  $j, j=1, 2, 3, 4$  nalazi napredni model pojedine faze.

#### 4.5 Krivulje magnetiziranja prekidačkog reluktantnog generatora

U 2. poglavlju opisana je elektromagnetska pretvorba energije SRG-a krivuljama magnetiziranja. Naprednim modelom procijenjene su krivulje magnetiziranja stroja iz Priloga A za različite radne točke SRG-a. Slika 4.22 prikazuje procijenjene krivulje magnetiziranja u sve četiri faze pri položaju uklapanja  $-10^\circ$  za radne točke definirane naponom od 200 V, brzinom vrtnje 3000 o/min i opterećenjima od 364 W i 889 W, odnosno otporom tereta od 110  $\Omega$  i 45  $\Omega$ . Krivulje se međusobno razlikuju zbog utjecaja međuinduktiviteta i remanentnog magnetskog toka. Promjena magnetskog toka nastalog zbog međuinduktiviteta, u četvrtoj fazi inducira elektromotornu silu koja potpomaže porast fazne struje. U prvoj, drugoj i trećoj fazi inducira elektromotornu silu koja mu se protivi. Za očekivati je da će u te tri faze fazna struja biti podjednaka, ali sa slike 4.22 (a) je očito da to nije slučaj. Za razliku u tim faznim strujama odgovoran je remanentni magnetski tok. Kao što je opisano u poglavlju 4.1, inducirana elektromotorna sila nastala zbog remanentnog magnetskog toka najviše se protivi porastu struje u prvoj fazi. U drugoj fazi protivi se nešto manje, a u trećoj ga počinje podržavati. Kada se rotorski pol nađe u području četvrte faze, u njemu je remanentni magnetski tok maksimalan i u smjeru glavnog magnetskog toka, stoga on podržava porast fazne struje četvrte faze. Dakle u četvrtoj fazi remanentni magnetski tok i međuinduktivitet podržavaju porast fazne struje pa je pri nižim opterećenjima četvrta faza više opterećena nego ostale faze. Kako

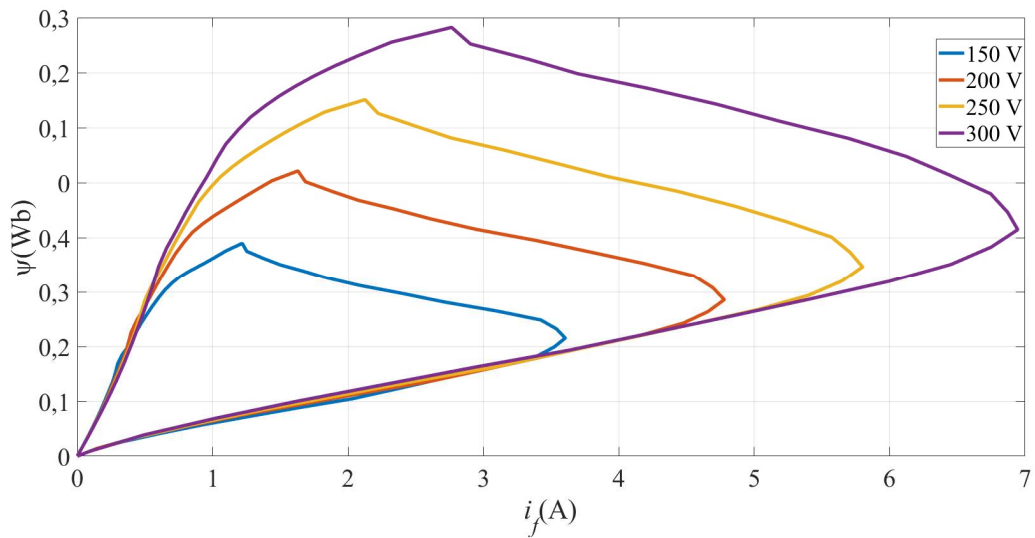


je pri većim opterećenjima glavni magnetski tok veći tako remanentni magnetski tok i međuinuktivitet imaju manji utjecaj na faznu struju kao što je prikazano na slici 4.22 (b).



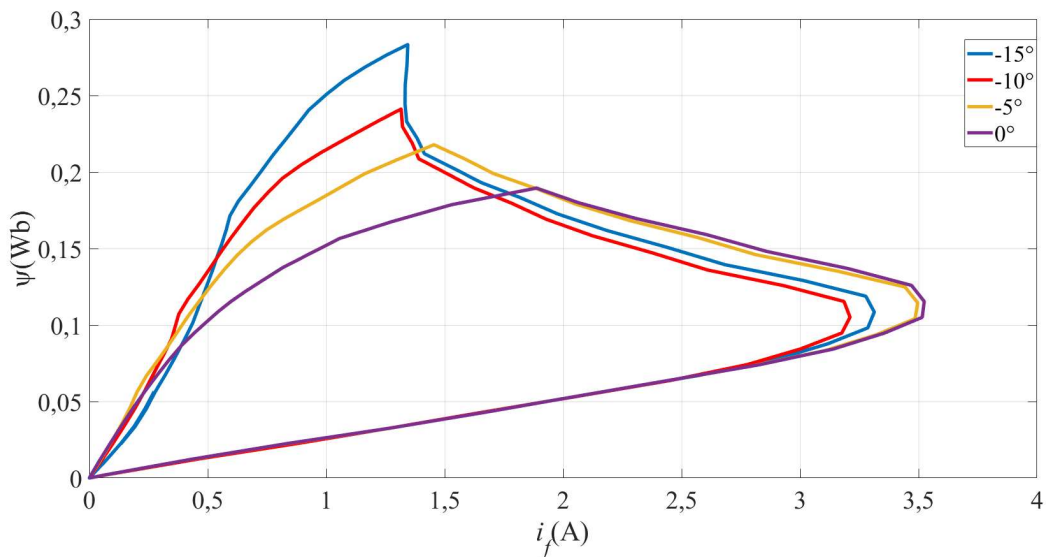
Slika 4.22. Krivulje magnetiziranja za sve četiri faze pri opterećenju od a) 364 W i b) 889 W

Slika 4.23 prikazuje procijenjene krivulje magnetiziranja treće faze stroja pri položaju uklapanja od  $-10^\circ$  i radnim točkama definiranim brzinom vrtnje od 3000 o/min, otporom tereta  $65 \Omega$  i različitim naponskim razinama. Pri većem naponu u istom vremenskom razdoblju postiže se veći magnetski tok, stoga su i površine koje krivulje magnetiziranja zatvaraju veće.



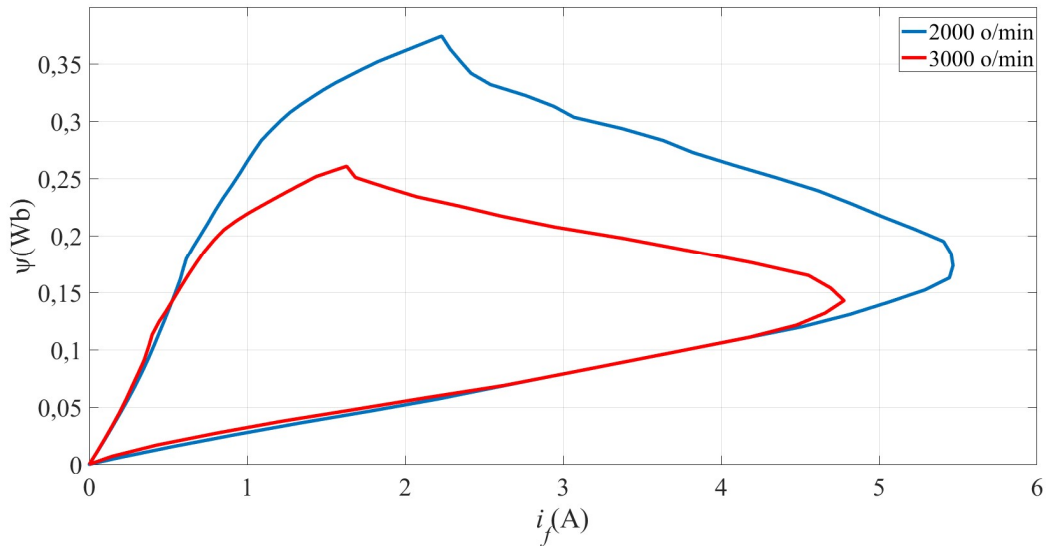
Slika 4.23. Krivulje magnetiziranja za različite naponske razine

Slika 4.24 prikazuje procijenjene krivulje magnetiziranja treće faze stroja pri različitim položajima uklapanja  $\theta_u$ , brzini vrtnje od 3000 o/min, otporu trošila 110  $\Omega$  i naponu od 200 V. Kod položaja uklapanja  $-15^\circ$  veća je energija magnetiziranja nego kod ostalih položaja uklapanja, a kod položaja uklapanja  $0^\circ$  je najmanja od svih prikazanih za približno istu generiranu energiju.



Slika 4.24. Krivulje magnetiziranja za različite položaje uklapanja tranzistora asimetričnog mosnog pretvarača

Slika 4.25 prikazuje procijenjene krivulje magnetiziranja treće faze stroja pri položaju uklapanja od  $-10^\circ$  i radnim točkama definiranom brzinama vrtnje od 2000 o/min i 3000 o/min, otporom tereta  $65 \Omega$  i naponom od 200 V.



Slika 4.25. Krivulje magnetiziranja za različite brzine vrtnje stroja

Površine koje zatvaraju krivulje magnetiziranja prikazane na slici 4.25, obrnuto su proporcionalne brzini vrtnje, odnosno razmijenjena energija u jednom periodu vođenja je manja pri većim brzinama. Tako se postiže ista snaga pri različitim brzinama vrtnje.

## 5. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA NAPREDNOG SIMULACIJSKOG MODELA

U ovom poglavlju opisana je usporedba rezultata dobivenih simulacijskim modelima predstavljenim u 3. i 4. poglavlju s eksperimentalno dobivenim rezultatima. U poglavlju 5.1 opisana je laboratorijska maketa, a u poglavlju 5.2 opisan je eksperimentalni postupak određivanja područja rada reguliranog SRG-a. U poglavlju 5.3 predstavljena je usporedba simulacijskih rezultata s eksperimentalnim.

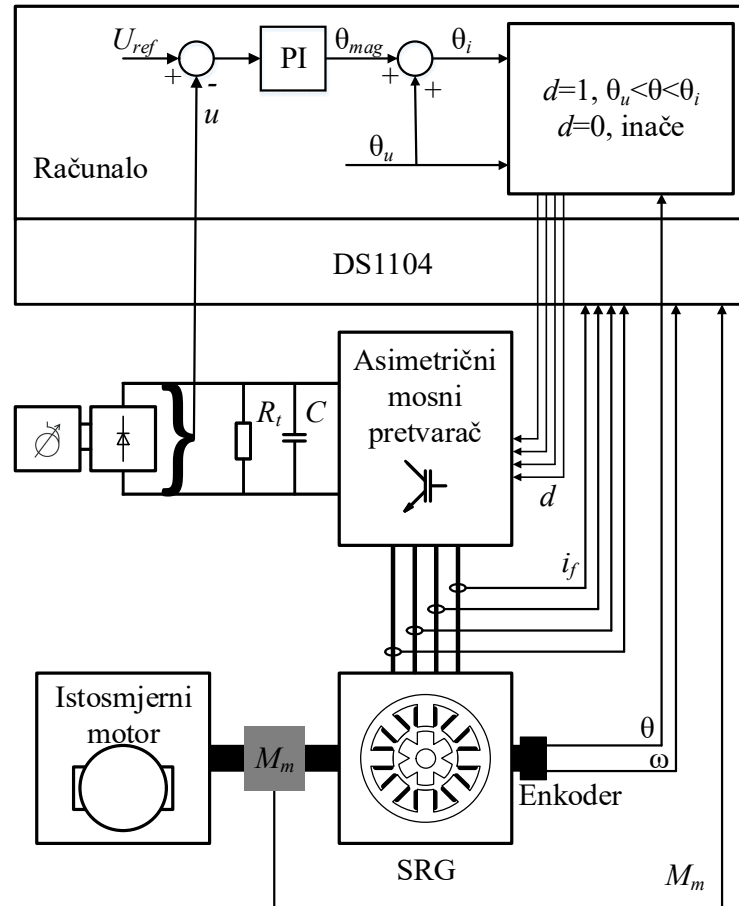
### 5.1. Laboratorijska maketa sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom

Na slici 5.1 prikazana je blokovska shema prema kojoj je izrađena laboratorijska maketa sustava 8/6 SRG-a koji je opterećen radnim trošilom  $R_l$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem. Maketa je prikazana na slici 5.2. SRG se pogoni istosmjernim motorom koji je upravljan usmjerivačem tipa SINAMICS DCM, oznake 6RA813-6DV62-0AA0 (proizvođač Siemens). Parametri istosmjernog motora navedeni su u Prilogu A.

Faznim strujama SRG-a upravlja se asimetričnim mosnim pretvaračem koji je, u osnovi, građen od osam IGBT tranzistora (tip IRG4PH50UD, proizvođač International Rectifiers) i osam dioda (poredne diode tranzistora tipa IRG4PH50UD) [136]. Algoritam koji generira sklapanje ovih tranzistora opisan je u poglavlju 3.2, a implementiran je u upravljačku karticu DS1104, proizvođača dSpace. Algoritam se izvodi s frekvencijom od 20 kHz što je ujedno i približno maksimalna frekvencija izvođenja ovog algoritma. Pobudni sklopovi za tranzistore su tipa SKHI22B proizvođača Semikron na čije se ulaze dovode impulsi s upravljačke kartice DS1104 za sklapanje tranzistora. Istom tom karticom se prikupljaju mjerni signali položaja rotora, brzine vrtnje, napona između sabirnica, momenta i faznih struja. Položaj rotora i brzina vrtnje mjere se inkrementalnim enkoderom tipa XCC 1510PS50X proizvođača Telemecanique koji ima rezoluciju od 5000 impulsa po okretaju.

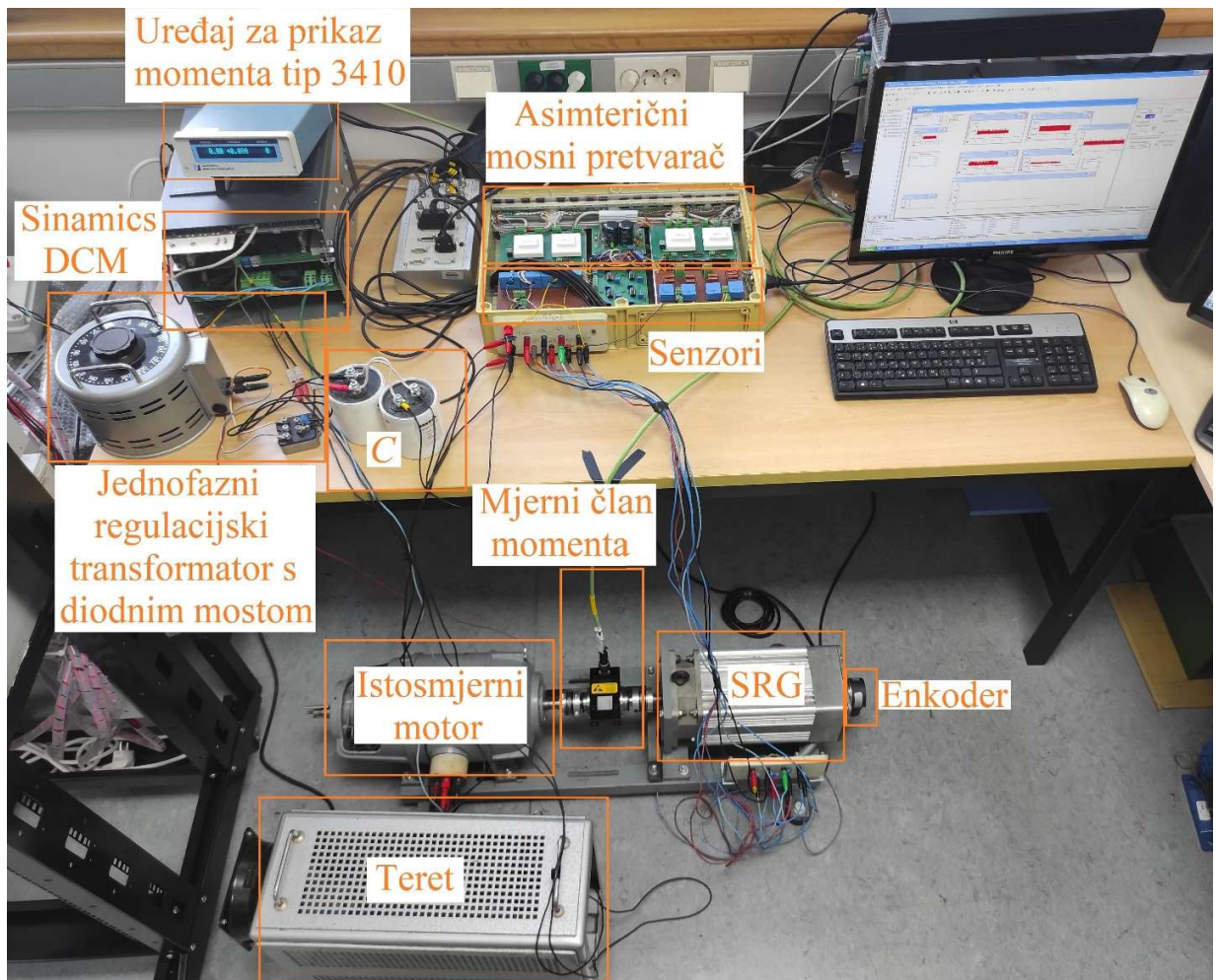
Mehanički moment  $M_m$  mjeri se uređajem TMB 308 (proizvođač Magtrol) koji je kruto spojen na zajedničku osovinu istosmjernog stroja i SRG-a. Kada su se određivali parametri SRG-a,

umjesto uređaja za mjerenje momenta bila je montirana kočnica kojom je rotor fiksiran u željeni položaj kako bi se odredili parametri stroja kao što je opisano u 3. i 4. poglavlju.



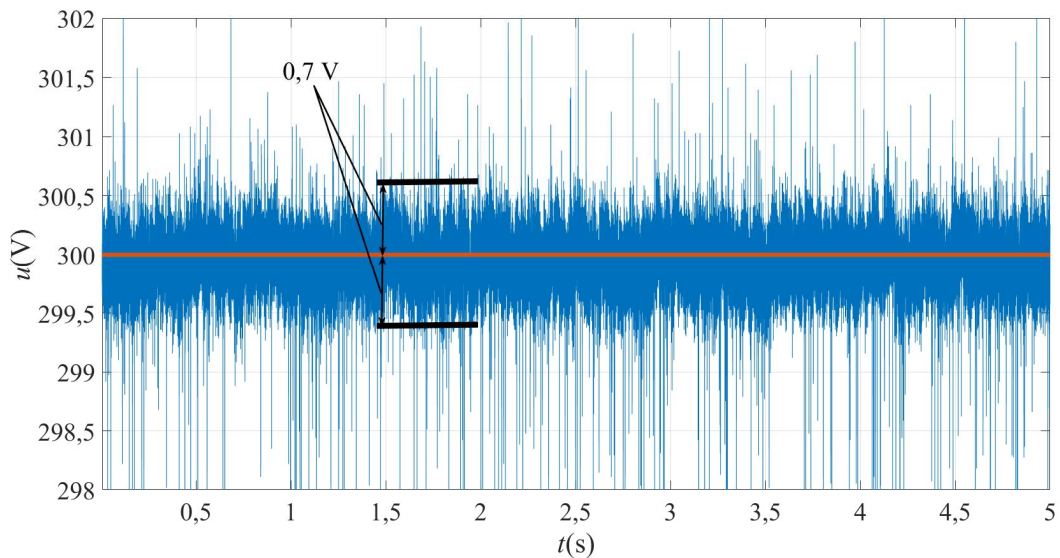
Slika 5.1. Blokvska shema regulacijskog sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom

Napon između sabirnica mjeri se senzorom napona tipa LV 25-P, proizvođača LEM, a svaka fazna struja se mjeri strujnim mjernim senzorom tipa LA 55-P, istog proizvođača. Za uzorkovanje mjerenih podataka koristi se upravljačka kartica DS1104, dok je snimanje podataka realizirano računalnim programom *DSpace Control Desk*. Napon za početnu uzbudu ostvaren je jednofaznim regulacijskim transformatorom i diodnim ispravljačem.



Slika 5.2. Laboratorijska maketa regulacijskog sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom

Između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača spojen je kondenzator  $8000 \mu\text{F}$  koji služi kao međuspremnik energije. Za vrijeme magnetiziranja, struja teče od kondenzatora prema fazi stroja, a za vrijeme razmagnetiziranja u suprotnom smjeru, zbog čega se između sabirnica pojavljuje niskofrekvencijsko valovanje napona  $u$ . To valovanje prikazano je na slici 5.3 za radnu točku definiranu brzinom vrtnje od  $3000 \text{ o/min}$ , naponom između sabirnica  $300 \text{ V}$  i otporom tereta  $65 \Omega$  te položajem uklapanja tranzistora  $-5^\circ$ . U ostalim radnim točkama niskofrekvencijsko valovanje proporcionalno je naponu između sabirnica.



*Slika 5.3. Niskofrekvencijsko valovanje napona u*

Amplituda niskofrekvencijskog valovanja napona iznosi 0,7 V što je prihvatljivo.

## **5.2. Eksperimentalno određivanje područja rada reguliranog SRG-a**

U ovom poglavlju je prikazan postupak određivanja skupa ostvarivih radnih točaka reguliranog SRG-a. Napravljen je niz eksperimenata na opisanoj laboratorijskoj maketi u kojima su postignute radne točke s različitim položajima uklapanja, brzinom vrtnje, naponom između sabirnica i otporom tereta. U svakom eksperimentu snimljene su sve četiri fazne struje, mehanički moment, položaj rotora i kut magnetiziranja.

Kod određivanja područja rada reguliranog SRG-a polazi se od činjenica da je nazivna brzina vrtnje SRM-a 2000 o/min, a maksimalna brzina vrtnje istosmjernog stroja pri kojoj nije potrebno slabljenje polja je 3000 o/min. Stoga su ove brzine uzete kao donja i gornja granica područja promjena brzina vrtnje vodeći računa da se jednopulsni način rada, primijenjen u ovoj disertaciji, u pravilu, koristi pri brzinama vrtnje koje su veće od nazivne brzine vrtnje SRG-a. Provođeni su eksperimenti u ovom području, a u ovom poglavlju su prikazani eksperimentalni rezultati samo pri brzinama vrtnje od 2000 o/min i 3000 o/min jer stacionarne radne točke SRG-a dobivene između ovih graničnih brzina vrtnje nisu posebno značajne. Brzine veće od 3000 o/min su izbjegnute jer



zahtijevaju upravljanje istosmjernim strojem slabljenjem polja uzbude. U svakom eksperimentu brzina vrtnje je regulirana usmjerivačem tipa SINAMICS DCM koji napaja istosmjerni motor. Informaciju o brzini vrtnje usmjerivač dobiva preko enkodera koji je montiran na osovini SRG-a. Osovine istosmjernog motora i SRG-a su kruto spojene pa oba stroja imaju istu brzinu vrtnje. Napon između sabirnica održava se na referentnoj razini PI regulatorom čiji je izlaz kut magnetiziranja. Fazne struje vršnih vrijednosti manjih od 1 A ne generiraju značajniju snagu. Pri struji od 1 A, u rasponu položaja rotora od 0° do 20° magnetski tok je oko 0,2 Wb. U tom se rasponu položaja rotora, u pravilu, odvija magnetiziranje faze. Da bi se u tom području, pri brzini vrtnje od 2000 o/min, postigao magnetski tok od 0,2 Wb, potreban je napon od oko 150 V. Dakle, da bi se generirala značajna energija, minimalan potreban napon iznosi 150 V. Gornju granicu napona između sabirnica  $U_{max}$  potrebno je odrediti kako bi se ograničila vršna vrijednost fazne struje jer se s povećanjem napona između sabirnica povećava i vršna vrijednost fazne struje. Maksimalna vršna vrijednost struje je odabrana iznosa 10 A. Pri tom iznosu fazne struje gubici u bakru dostižu 28 % nazivne snage stroja. Vršna vrijednost fazne struje u pravilu se postiže pri položaju 30° kada induktivitet iznosi 0,025 H. Ako kroz fazni namot teče 10 A, pri položaju 30° magnetski tok iznosi 0,25 Wb. Taj magnetski tok nastao je zbog napona na namotu stroja. Može se smatrati da je napon između sabirnica konstantan u jednom periodu vođenja. Ako se u jednadžbi (3.1) zanemari pad napona na nadomjesnom otporu faznog namota dobiva se:

$$k \cdot u = \frac{d\psi(i_f, \theta)}{dt} \quad (5.1)$$

Iz jednadžbe (5.1) slijedi:

$$\psi(i_f, \theta) = \int_0^T k \cdot u \cdot dt + \Psi_0 \quad (5.2)$$

U trenutku uklapanja tranzistora  $\Psi_0 = 0$  Wb. Iz jednadžbe (5.2) za faznu struju 10 A i položaj 30° dobiva se:

$$U_{max} \cdot (t_m - t_{r1}) = 0,25 \text{ Wb} \quad (5.3)$$

gdje je:

$U_{max}$  gornja granica napona između sabirnica

$t_m$  vrijeme magnetiziranja faze stroja

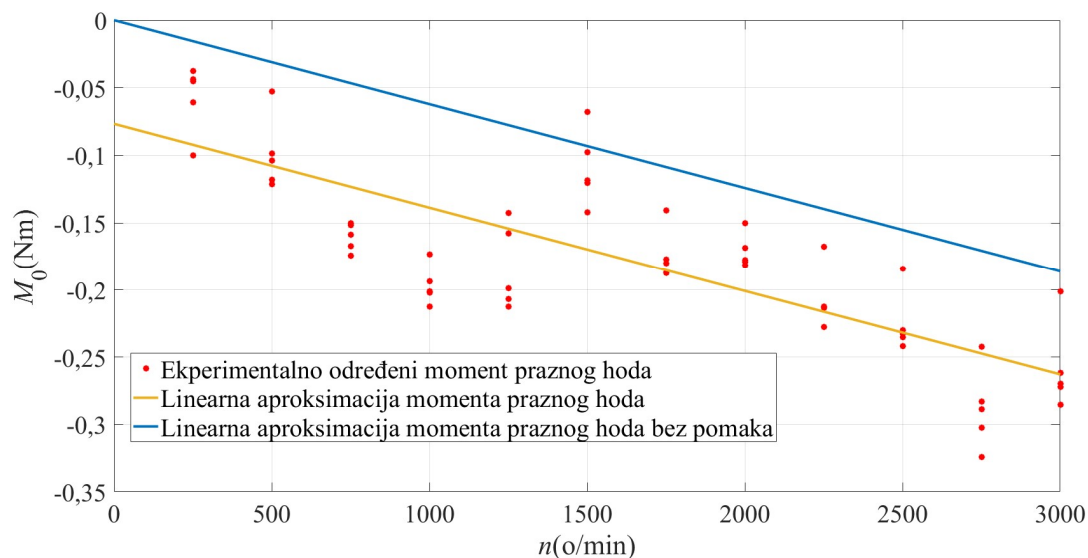
$t_{r1}$  vrijeme od trenutka isklapanja tranzistora do trenutka kad rotorski pol dođe u položaj 30°



Za potrebu procjene gornje granice napona može se smatrati da su inducirani naponi pojedine faze zbog međuinuktiviteta i remanentnog magnetskog toka zanemarivi. Stoga je za ovu procjenu dovoljno poznavati napon između sabirnica. Kut magnetiziranja pri vršnoj vrijednosti fazne struje od 10 A iznosi oko  $25^\circ$ . Prema jednadžbi (5.3) napon  $U_{max}$  će biti tim veći što je razlika vremena  $t_m$  i  $t_{r1}$  manja. Ova razlika se smanjuje kako se brzina vrtnje povećava. Stoga se za određivanje gornje granice napona između sabirnica  $U_{max}$  uzima maksimalna brzina vrtnje koja je jednaka 3000 o/min. Pri brzini vrtnje 3000 o/min magnetiziranje traje oko  $t_m = 1,38$  ms. Za vrijeme magnetiziranja na faznom namotu je pozitivan napon između sabirnica te magnetski tok faze raste. Kada se tranzistori isklupe na faznom namotu je negativan napon između sabirnica. Položaj isklapanja tranzistora je u pravilu oko  $20^\circ$ . Pri brzini vrtnje 3000 o/min kut od  $20^\circ$  do  $30^\circ$  rotor prođe u vremenu  $t_{r1} = 0,55$  ms te tada magnetski tok faze pada. Uvrštavanjem vremena  $t_m$  i  $t_{r1}$  u jednadžbu (5.3) dobiva se iznos gornje granice napona između sabirnica od 301,2 V. Iz toga slijedi, da bi, pri brzini vrtnje od 3000 o/min i maksimalnoj vršnoj faznoj struji od 10 A, maksimalni napon između sabirnica iznosio 300 V. Time je određen maksimalni napon između sabirnica. Konačno, znajući minimalni i maksimalni napon između sabirnica, za provođenje eksperimenata odabrane su naponske razine od 150 V, 200 V, 250 V i 300 V.

Za terećenje sustava korišteni su otpornici od  $45 \Omega$  i  $65 \Omega$  te njihov serijski spoj čime je dobiven otpor od  $110 \Omega$ . U navedenom rasponu napona od 150 V do 300 V, tim otpornicima je ostvaren teret u rasponu od 205 W do 1389 W, odnosno 18,6 % do 126,26 % nazivne snage generatora, što predstavlja širok opseg promjena opterećenja dostatan za kvalitetnu analizu rada SRG-a.

Da bi se odredio elektromagnetski moment koji stvara SRM, prethodno je izmjeren moment praznog hoda  $M_0$ , za različite brzine vrtnje. Rezultat mjerenja je prikazan je slici 5.4 crvenim točkama s tim da se za svaku brzinu vrtnje moment mjerio 5 puta kako bi se pogreška mjerenja minimizirala.



Slika 5.4. Moment praznog hoda  $M_0$

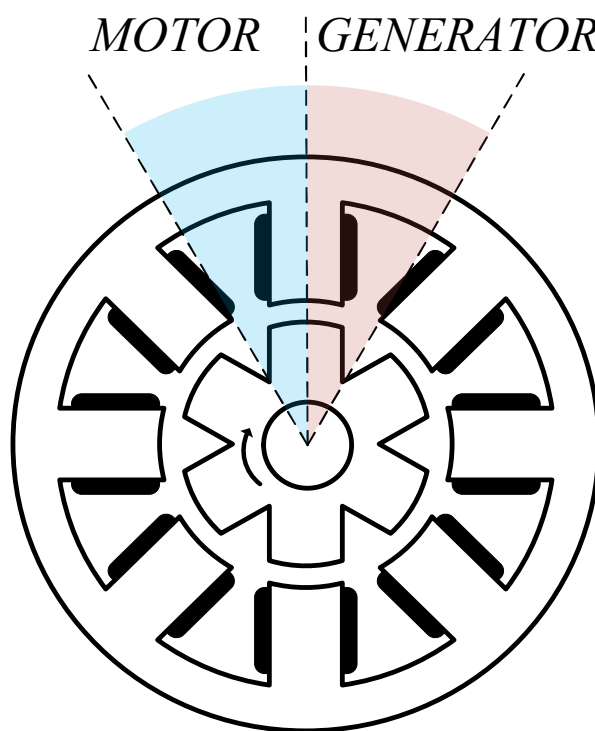
Mjereni moment praznog hoda prikazan na slici 5.4 aproksimiran je pravcem prikazanim žutom bojom jer se moment praznog hoda uobičajeno, u teoriji električnih strojeva, smatra da ovisi linearno o brzini vrtnje [137]. Međutim, zbog Stribeckovog efekta, u području manjih brzina vrtnje, ova ovisnost odstupa od pravca [138]. Uzimajući to u obzir kao i činjenicu da se mjeri vrlo mali moment mjernim uređajem čiji je nominalni moment 20 Nm odstupanja mjernih točaka momenta od idealnih teorijskih su primjetna. Kako bi se dobila ovisnost momenta praznog hoda o brzini vrtnje koja je uobičajena u analizi električnih strojeva, linearna ovisnost prikazana žutim pravcem na slici 5.4 je translahirana za iznos od 0,07665 Nm kako bi se postiglo da je moment praznog hoda jednak nuli kada rotor miruje. Konačno, u daljnjoj analizi se primjenjuje linearna aproksimacija momenta praznog hoda prikazana plavom bojom na slici 5.4 čija jednadžba glasi:

$$M_0 = -6,208 \cdot 10^{-5} \cdot n \quad (5.4)$$

Za svaku radnu točku, od izmjenjenog mehaničkog momenta oduzet je moment praznog hoda  $M_0$  te tako dobiven elektromagnetski moment kojeg stvara SRG. Uvrštavanjem brzina vrtnje 2000 o/min i 3000 o/min u jednadžbu (5.4) dobiva se moment praznog hoda koji iznosi  $M_0 = -0,1242$  Nm i  $M_0 = -0,1862$  Nm, slijedom.

Do pretvorbe mehaničke energije u električnu dolazi ako je uspostavljen magnetski tok faze stroja i rotorski pol prolazi kroz područje od položaja potpunog preklapanja do potpunog nepreklapanja kao što je opisano u poglavlju 2.3. Zato je potrebno magnetski tok stvoriti prije nego

što se rotorski pol nađe u položaju potpunog preklapanja, odnosno u području motorskog načina rada. Prilikom magnetiziranja faze stroja potrebno je zadovoljiti dva suprotna uvjeta. Potrebno je izgraditi dovoljno velik magnetski tok u fazi stroja prije nego što rotorski pol uđe u područje generiranja, a s druge strane, poželjno je da stroj što manje radi u motorskom području rada jer je cilj generiranje energije. Područje motorskog i generatorskog načina rada za prvu fazu stroja kada se rotor vrti u smjeru kazaljke na satu prikazano je na slici 5.5. Pri većim opterećenjima potreban je i veći magnetski tok, stoga je potrebno odabrati položaj uklapanja dalje od položaja potpunog preklapanja, a pri manjim opterećenjima potreban je manji magnetski tok, tako da položaj uklapanja tranzistora može biti bliže položaju potpunog preklapanja.



*Slika 5.5. Područje motorskog i generatorskog načina rada za prvu fazu stroja kada se rotor vrti u smjeru kazaljke na satu*

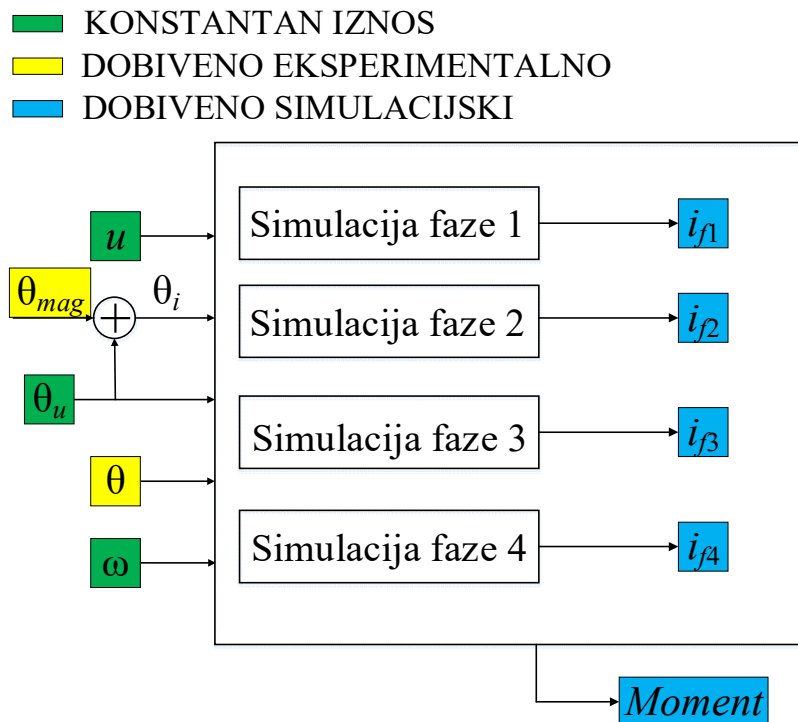
Svaka radna točka može se ostvariti pri različitim iznosima položaja uklapanja. Eksperimenti su provedeni pri položajima uklapanja  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$  i  $-5^\circ$ .

Kombinacija brzina vrtnje 2000 o/min i 3000 o/min; naponskih razina 150 V, 200 V, 250 V i 300 V; tereta od 110  $\Omega$ , 65  $\Omega$  i 45  $\Omega$  te položaja uklapanja  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$  i  $-5^\circ$  daju 72 potencijalna eksperimenta od kojih je na laboratorijskoj maketi ostvareno 58. U nastavku su opisana ograničenja

laboratorijske makete te su navedeni eksperimenti koje nije bilo moguće realizirati, kao i obrazloženja za nemogućnost njihovih realizacija. Zbog ograničenja laboratorijske makete 14 eksperimenata nije ostvareno. Nazivna snaga istosmjernog stroja iznosi 1100 W pri brzini vrtnje od 3000 o/min. Pri otporu tereta  $45 \Omega$  i naponu između sabirnica 300 V, snaga tereta je 2000 W što je 181,81 % nazivne snage istosmjernog stroja. Takvih eksperimenata je 6. S obzirom na maksimalnu brzinu vrtnje od 3000 o/min, istosmjerni stroj se može opteretiti konstantnom snagom od  $\frac{2}{3}$  nazivne snage, odnosno 733,33 W pri brzini od 2000 o/min bez slabljenja polja. Za otpor tereta od  $65 \Omega$ , napon između sabirnica od 300 V i brzinu vrtnje od 2000 o/min, snaga tereta iznosi 1384,61 W, što je 188,81 % prethodno spomenute snage od 733,33 W. Takva su 3 eksperimenta. Za otpor tereta od  $45 \Omega$ , napon između sabirnica od 250 V i brzinu vrtnje od 2000 o/min, snaga tereta iznosi 1388,88 W, što je 189,39 % prethodno spomenute snage od 733,33 W. Ovakvih eksperimenata ima također 3. Kod brzine vrtnje od 3000 o/min, otpora tereta od  $45 \Omega$  i napona između sabirnica od 200 V i 250 V (2 eksperimenta), nije bilo moguće postići stabilnu radnu točku kod položaja uklapanja od  $-5^\circ$  jer se ne stigne razviti dovoljno velik glavni magnetski tok. Za istu brzinu vrtnje od 3000 o/min, otpor tereta od  $45 \Omega$  i napon između sabirnica od 150 V, postignuta je stabilna radna točka kod položaja uklapanja od  $-7^\circ$ , budući da se pri planiranom položaju uklapanja od  $-5^\circ$  nije mogao razviti dovoljno velik glavni magnetski tok.

### **5.3. Usporedba simulacijskih rezultata s eksperimentalnim**

Nakon što su provedeni eksperimenti, napravljene su simulacije pojedinih radnih točaka iz prethodnog poglavlja klasičnim i naprednim modelom koji su opisani u 3. i 4. poglavlju. Dobivene su simulirane fazne struje i ulazne snage koje služe za usporedbu s izmjerenim pripadajućim veličinama. Usporedba je moguća jedino ako su simulacije naprednim i klasičnim modelom provedene pod istim uvjetima kao i eksperimenti. To znači da napon između sabirnica, brzina vrtnje, položaji uklapanja i isklapanja te položaj rotora u svakom trenutku simulacije i mjerenja moraju biti identični. Blokowska shema prikazana slikom 3.10 prilagođena je tim zahtjevima kao što je prikazano slikom 5.6.



Slika 5.6. Model SRG-a koji je opterećen radnim trošilom  $R_t$  pri čemu je SRG napajan asimetričnim mosnim pretvaračem, prilagođen za usporedbu s eksperimentima

Kako je proračunom u simulaciji nemoguće dobiti identičan položaj rotora u modelima kao na laboratorijskoj maketi, u simulacijama je preuzet eksperimentalno snimljen položaj rotora. Položaj uklapanja ima konstantnu vrijednost za vrijeme svakog eksperimenta i simulacije. U simulacijama je, također, preuzet eksperimentalno dobiven kut magnetiziranja. Preuzimanjem ovih dvaju eksperimentalno dobivenih veličina osigurano je jednako vrijeme magnetiziranja u simulacijskim modelima i u eksperimentima. Za vrijeme provedbe eksperimenata napon između sabirnica održavan je konstantnim primjenom PI regulatora čiji je izlaz kut magnetiziranja. Zato je napon između sabirnica u simulacijama postavljen kao konstantan. Brzina vrtnje je također postavljena kao konstantna jer se u eksperimentima ona održava na konstantnoj vrijednosti upravljanjem istosmjernim strojem.

Za svaku radnu točku i svaki položaj uklapanja tranzistora ostvaren eksperimentom provedena je simulacija klasičnim i naprednim modelom. U svakom eksperimentu opisanom u prethodnom poglavlju snimljene su sve četiri fazne struje, mehanički moment, položaj rotora i kut magnetiziranja.

Slikom 5.7 opisana je usporedba faznih struja dobivenih eksperimentalno s faznim strujama dobivenim naprednim i klasičnim modelom. Ova slika prikazuje fazne struje u jednopulsnom načinu rada, dobivene simulacijski i eksperimentalno pod istim uvjetima.

Najprije se definira koeficijent točnosti  $K$  kao pokazatelj točnosti naprednog simulacijskog modela. Ovaj koeficijent je definiran sljedećom jednačbom:

$$K(R_t, \theta_u, \omega, u) = \frac{\sum_{j=1}^{j=95000} |i_{f,eksp}(j) - i_{f,simk}(j)|}{\sum_{j=1}^{j=95000} |i_{f,eksp}(j) - i_{f,simn}(j)|} \quad (5.5)$$

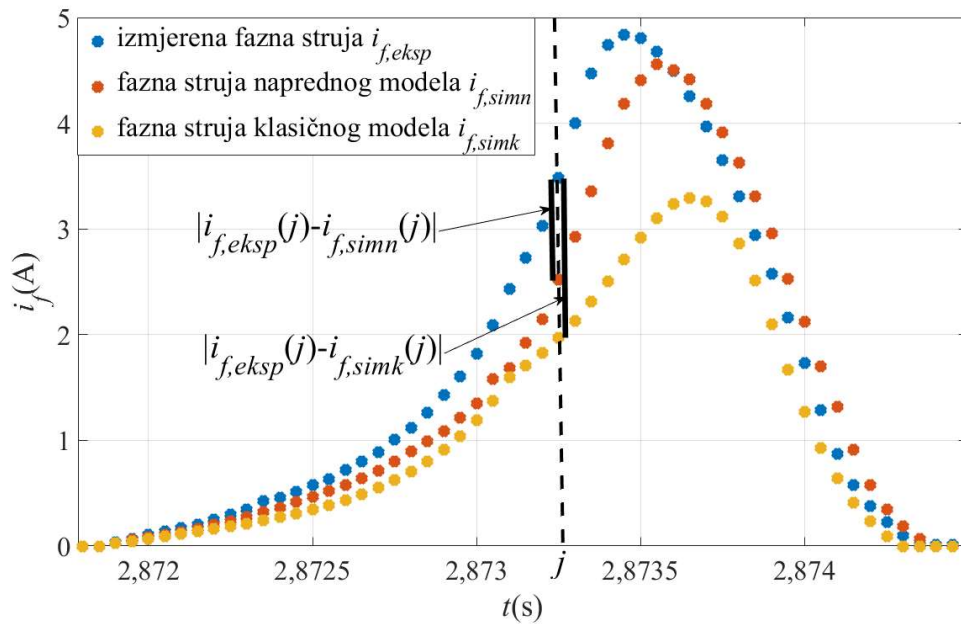
gdje je:

$i_{f,eksp}(j)$  iznos mjerene fazne struje u  $j$ -tom koraku uzorkovanja

$i_{f,simk}(j)$  iznos fazne struje dobivene klasičnim simulacijskim modelom u  $j$ -tom koraku uzorkovanja

$i_{f,simn}(j)$  iznos fazne struje dobivene naprednim simulacijskim modelom u  $j$ -tom koraku uzorkovanja

Koeficijent  $K$  ovisi o parametru  $R_t$  te o varijablama  $\theta_u$ ,  $\omega$  i  $u$ . To je zato što upravo ova četiri podatka određuju bilo koju radnu točku SRG-a. U jednačbi (5.5) uspoređuju se struje dobivene simulacijama i eksperimentalno za 95000 mjernih točaka koje odgovaraju vremenskom intervalu od 4,5 s postignutih u stacionarnom stanju. Na slici 5.7 su ilustrirani uzorci eksperimentalno dobivene fazne struje, fazne struje dobivene naprednim modelom te fazne struje dobivene klasičnim modelom, u stacionarnom stanju SRG-a. Na istoj slici su prikazani i članovi sume brojnika i nazivnika jednačbe (5.5). Prema ovoj jednačbi slijedi da ako je  $K > 1$  onda je napredni model točniji od klasičnog, a ako je  $K < 1$  onda je obrnuto.



Slika 5.7. Usporedba eksperimentalno dobivene fazne struje sa simulacijski dobivenim faznim strujama

U tablici 5.1 prikazane su radne točke i položaji uklapanja koje su eksperimentalno realizirane. Naveden je apsolutni i relativni iznos snage za svaku radnu točku. Relativni iznos snage je dobiven kao omjer apsolutnog iznosa snage i nazivne snage SRG-a.

Tablica 5.1. Otpor trošila, položaj uklapanja, brzina vrtnje, napon između sabirnica te izlazna snaga generatora zabilježeni u realiziranim eksperimentima

Redni br. mj. točke	$R_t$ ( $\Omega$ )	$\theta_u$ ( $^\circ$ )	$\omega$ (o/min)	$u$ (V)	$P$ (W)	$\frac{P}{P_n} \cdot 100$ (%)
1	110	-15	2000	150	204,55	18,60
2	110	-15	2000	200	363,64	33,06
3	110	-15	2000	250	568,18	51,65
4	110	-15	2000	300	818,18	74,38
5	110	-15	3000	150	204,55	18,60
6	110	-15	3000	200	363,64	33,06
7	110	-15	3000	250	568,18	51,65
8	110	-15	3000	300	818,18	74,38
9	110	-10	2000	150	204,55	18,60
10	110	-10	2000	200	363,64	33,06
11	110	-10	2000	250	568,18	51,65
12	110	-10	2000	300	818,18	74,38
13	110	-10	3000	150	204,55	18,60

14	110	-10	3000	200	363,64	33,06
15	110	-10	3000	250	568,18	51,65
16	110	-10	3000	300	818,18	74,38
17	110	-5	2000	150	204,55	18,60
18	110	-5	2000	200	363,64	33,06
19	110	-5	2000	250	568,18	51,65
20	110	-5	2000	300	818,18	74,38
21	110	-5	3000	150	204,55	18,60
22	110	-5	3000	200	363,64	33,06
23	110	-5	3000	250	568,18	51,65
24	110	-5	3000	300	818,18	74,38
25	65	-15	2000	150	346,15	31,47
26	65	-15	2000	200	615,38	55,94
27	65	-15	2000	250	961,54	87,41
28	65	-15	3000	150	346,15	31,47
29	65	-15	3000	200	615,38	55,94
30	65	-15	3000	250	961,54	87,41
31	65	-15	3000	300	1384,62	125,87
32	65	-10	2000	150	346,15	31,47
33	65	-10	2000	200	615,38	55,94
34	65	-10	2000	250	961,54	87,41
35	65	-10	3000	150	346,15	31,47
36	65	-10	3000	200	615,38	55,94
37	65	-10	3000	250	961,54	87,41
38	65	-10	3000	300	1384,62	125,87
39	65	-5	2000	150	346,15	31,47
40	65	-5	2000	200	615,38	55,94
41	65	-5	2000	250	961,54	87,41
42	65	-5	3000	150	346,15	31,47
43	65	-5	3000	200	615,38	55,94
44	65	-5	3000	250	961,54	87,41
45	65	-5	3000	300	1384,62	125,87
46	45	-15	2000	150	500,00	45,45
47	45	-15	2000	200	888,89	80,81
48	45	-15	3000	150	500,00	45,45
49	45	-15	3000	200	888,89	80,81
50	45	-15	3000	250	1388,89	126,26
51	45	-10	2000	150	500,00	45,45
52	45	-10	2000	200	888,89	80,81
53	45	-10	3000	150	500,00	45,45
54	45	-10	3000	200	888,89	80,81



55	45	-10	3000	250	1388,89	126,26
56	45	-5	2000	150	500,00	45,45
57	45	-5	2000	200	888,89	80,81
58	45	-7	3000	150	500,00	45,45

U tablici 5.2 prikazani su koeficijenti točnosti  $K$  definirani jednačbom (5.5) za svaku postignutu točku iz tablice 5.1 i za svaku pojedinu fazu SRG-a.

*Tablica 5.2. Koeficijenti točnosti  $K$  za pojedine faze SRG-a i za radne točke prikazane u Tablici 5.1*

Redni br. mj. točke	$F_1$	$F_2$	$F_2$	$F_4$
1	1,77	1,55	1,15	1,47
2	1,96	1,53	1,18	1,51
3	1,92	1,49	1,31	1,58
4	1,71	1,38	1,47	1,62
5	1,73	1,33	1,26	1,71
6	1,74	1,38	1,27	1,68
7	1,68	1,41	1,28	1,65
8	1,67	1,47	1,35	1,67
9	1,73	1,27	1,06	1,72
10	1,72	1,19	1,00	1,80
11	1,63	1,15	1,00	1,97
12	1,44	1,08	1,03	2,14
13	1,58	1,22	1,27	1,97
14	1,67	1,27	1,24	1,94
15	1,58	1,28	1,20	1,94
16	1,50	1,27	1,21	1,98
17	1,15	1,09	0,93	2,00
18	1,27	1,00	0,84	2,10
19	1,19	0,97	0,75	2,35
20	1,05	0,86	0,68	2,61
21	1,13	1,11	1,30	2,25
22	1,26	1,18	1,24	2,21
23	1,26	1,16	1,14	2,29
24	1,24	1,13	1,08	2,27
25	1,94	1,81	1,20	1,42
26	1,83	1,75	1,27	1,51
27	1,63	1,61	1,45	1,59
28	1,70	1,74	1,32	1,62

29	1,67	1,85	1,26	1,58
30	1,66	1,83	1,26	1,60
31	1,59	1,78	1,32	1,62
32	1,91	1,45	1,47	1,69
33	1,74	1,40	1,44	1,82
34	1,60	1,33	1,42	2,00
35	1,83	1,45	1,75	1,96
36	1,77	1,57	1,65	1,97
37	1,68	1,59	1,60	1,98
38	1,58	1,56	1,59	2,02
39	1,36	1,30	1,49	1,91
40	1,44	1,24	1,34	2,04
41	1,35	1,22	1,24	2,06
42	1,79	1,60	1,86	2,17
43	1,79	1,73	1,70	2,12
44	1,71	1,71	1,62	2,19
45	1,63	1,67	1,54	2,23
46	1,73	1,78	1,02	1,39
47	1,56	1,66	1,05	1,44
48	1,56	1,58	1,07	1,57
49	1,55	1,48	1,02	1,47
50	1,50	1,41	0,97	1,42
51	1,80	1,80	1,49	1,80
52	1,58	1,65	1,46	1,90
53	1,71	1,80	1,35	1,94
54	1,60	1,59	1,21	1,80
55	1,50	1,47	1,10	1,75
56	1,80	1,90	1,53	1,98
57	1,65	1,68	1,46	1,99
58	1,25	1,15	1,04	1,45

Iz Tablice 5.2 se vidi da je napredni model točniji od klasičnog u gotovo svim radnim točkama SRG-a jer je  $K$  veći od 1. Ipak, koeficijenti točnosti  $K$  za pojedine faze SRG-a i za radne točke prikazane u Tablici 5.1 iznosi manje od 1 te su ovi koeficijenti označeni crvenom bojom. U tim fazama i u tim radnim točkama stroja klasični model bolje opisuje magnetske karakteristike SRG-a od naprednog.

Sklopni gubici procijenjeni su iz parametara navedenim u tehničkim podacima IGBT tranzistora (tip IRG4PH50UD) i prema uputama u radu [139]. Gubici vođenja IGBT tranzistora i dioda,

procijenjeni su iz tehničkih podataka IGBT tranzistora i prema uputama u rada [140]. Za diode su iskorištene poredne diode navedenih tranzistora pa se i njihovi parametri nalaze u istim tehničkim podacima. U dodatku D opisano je određivanje gubitaka asimetričnog mosnog pretvarača. U tablici D.1 navedeni su ukupni gubici asimetričnog mosnog pretvarača i SRG-a te samog pretvarača. U zadnjem stupcu te tablice istaknut je udio gubitaka pretvarača u ukupnim gubicima. Gubici pretvarača su u rasponu od 7,91 % do 21,62 % ukupnih gubitaka, a srednja vrijednost iznosi 12,4 %. Stoga su gubici samog SRG-a dominantni te je, u ovom radu, cilj optimizacija rada samo SRG-a.

U svakom eksperimentu, ulazna snaga je određena kao umnožak elektromagnetskog momenta  $M$  i kutne brzine vrtnje  $\omega$ . Navedeni moment dobiven je kao izmjereni mehanički moment  $M_m$  od kojeg je oduzet moment praznog hoda  $M_0$  prikazan na slici 5.4. Kod simulacijskih modela, ulazna snaga se može dobiti na dva načina. Prvi je kao umnožak procijenjenog momenta i brzine vrtnje, a drugi kao zbroj izlazne snage i gubitaka. Kod klasičnog modela, moment je procijenjen iz prikaza magnetskih karakteristika drugom parcijalnom sumom Fourierovog reda. Taj prikaz dobiven je iz samo tri eksperimenta istosmjernje uzbude opisana u poglavlju 3.1. Kod naprednog modela moment je procijenjen prema jednadžbi (3.24) numeričkim integriranjem po magnetskom toku i numeričkim deriviranjem po položaju pregledne tablice  $i_L(\theta, \psi)$  što je uzrokovalo značajnu numeričku grešku. Zato je ulazna snaga procijenjena zbrojem izlazne snage i gubitaka. Izlazna snaga određena je iz napona između sabirnica i otpora tereta. U tablici 5.3 prikazana je ulazna snaga dobivena eksperimentalno te naprednim i klasičnim simulacijskim modelom za svaki ostvareni eksperiment. Kod klasičnog modela uzimaju se u obzir samo gubici u namotima, dok se u naprednom modelu uzimaju i gubici u namotima i gubici u željezu stroja.

Tablica 5.3. Usporedba ulaznih snaga

Redni br. mj. točke	EKSPERIMENT	NAPREDNI MODEL	KLASIČNI MODEL
	Snaga izmjerena (W)	Simulirana izlazna snaga + gubici (W)	Simulirana izlazna snaga + gubici (W)
1	308,39	248,45	215,96
2	509,34	436,71	384,46

3	746,38	674,55	601,25
4	1045,81	943,58	870,60
5	272,39	236,11	211,46
6	458,76	417,25	376,09
7	698,16	648,72	588,36
8	964,35	928,31	847,41
9	300,13	240,56	215,05
10	493,68	424,22	382,78
11	730,00	657,25	598,40
12	1007,20	939,40	863,92
13	276,34	231,10	211,50
14	449,14	409,76	376,59
15	688,60	636,69	588,19
16	958,70	913,15	847,71
17	294,83	234,66	214,97
18	473,80	414,75	382,69
19	704,94	644,28	598,48
20	978,97	923,03	865,43
21	271,83	226,90	211,74
22	438,12	403,10	377,28
23	673,99	627,56	589,61
24	945,22	901,33	849,81
25	461,48	407,44	370,32
26	767,01	717,31	659,12
27	1167,87	1112,58	1042,73
28	412,41	392,19	362,52
29	721,68	694,02	645,34
30	1141,71	1079,77	1010,15
31	1572,81	1545,53	1455,87
32	436,26	397,96	368,42
33	736,71	704,17	657,15
34	1100,28	1093,31	1032,78
35	404,37	386,46	362,37
36	705,61	685,35	645,48
37	1150,44	1067,01	1010,89
38	1564,25	1530,55	1455,05
39	440,28	393,65	370,05
40	717,23	697,27	660,06
41	1086,67	1086,70	1043,98
42	406,42	385,62	365,36
43	689,06	684,39	651,04

44	1140,25	1068,81	1018,81
45	1573,02	1537,69	1476,80
46	658,35	589,88	546,77
47	1106,53	1040,20	983,17
48	624,16	572,52	534,77
49	1049,81	1013,37	953,09
50	1574,53	1575,71	1494,07
51	630,49	579,58	544,53
52	1061,03	1025,20	976,22
53	605,29	569,97	537,24
54	1038,68	1010,48	958,51
55	1587,95	1576,19	1507,40
56	627,99	580,74	550,97
57	1051,95	1034,84	995,86
58	607,29	585,60	553,06

Relativna greška  $g_P$  između ulazne snage dobivene eksperimentalno i simulacijskim modelima definirana je jednadžbom:

$$g_P = \frac{|P_{u,eksp} - P_{u,sim}|}{P_{u,eksp}} \cdot 100 \% \quad (5.6)$$

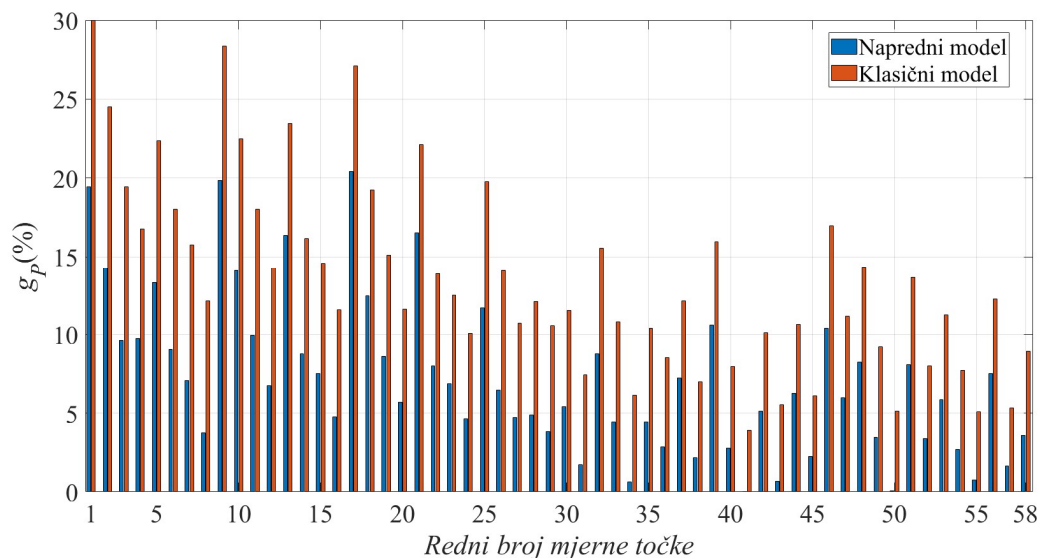
gdje je:

$g_P$  relativna greška između ulazne snage dobivene eksperimentalno i simulacijskim modelima

$P_{u,eksp}$  eksperimentalno dobivena ulazna snaga

$P_{u,sim}$  ulazna snaga dobivena simulacijskim modelom

Na slici 5.8 prikazana je relativna greška  $g_P$  između ulazne snage dobivene eksperimentalno i simulacijskim modelima za svaku radnu točku iz tablice 5.3. Crvenim stupcima prikazana je relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i klasičnim modelom, a plavim stupcima relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i naprednim modelom.



*Slika 5.8. Relativna greška između ulazne snage dobivene eksperimentalno i simulacijskim modelima*

Srednja relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i naprednim modelom iz tablice 5.3 iznosi 7,18 %, a srednja relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i klasičnim modelom iznosi 13,54 %. Na slici 5.8 ističu se mjerne točke 1, 2, 5, 9, 10, 13, 17 i 21 za koje vrijedi da je relativna greška naprednog modela veća od 13 %. U tim mjernim točkama izlazna snaga SRG-a iznosi najviše 35 % nazivne snage stroja. S povećanjem izlazne snage SRG-a povećava se i točnost naprednog modela tako da on ima najveću točnost oko nazivnog i preko nazivnog opterećenja stroja. Eksperimentalno dobivena ulazna snaga mora biti veća od ulazne snage dobivene i klasičnim i naprednim modelom. U području izlaznih snaga od 74,38 % do 126,26 % nazivne snage SRG-a dvije su mjerne točke u kojima je ulazna snaga dobivena naprednim modelom neznatno veća od ulazne snage dobivene eksperimentalno. Te mjerne točke su u tablici 5.3 označene žutom bojom. Iz navedenog se može zaključiti da:

- 1) Napredni model uvijek bolje opisuje SRG od klasičnog.
- 2) U području izlaznih snaga SRG-a manjih od 33,06 % nazivne snage SRG-a, relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i naprednim modelom iznosi od 4,43 % do 20,41 %.
- 3) U području izlaznih snaga između 45,45 % i 55,94 % nazivne snage SRG-a, relativna greška između ulaznih snaga iznosi od 0,68 % do 10,4 %.

4) U području izlaznih snaga između 74,38 % i 126,26 % nazivne snage SRG-a, relativna greška između ulaznih snaga iznosi od 0 % do 9,77 %.

Spomenute pogreške nastaju zato što u simulacijskom modelu sustava sa SRG-om nisu uračunati poluvodički gubici te zbog činjenice da napredni model SRG-a ne uračunava dodatne gubitke (engl. *stray losses*) SRG-a. Ipak, poluvodički gubici su procijenjeni na temelju faznih struja i napona SRG-a te na temelju kataloških podataka proizvođača poluvodiča. Pokazano je da ovi gubici, u eksperimentima, iznose najviše 21,62 % ukupnih gubitaka SRG-a. Stoga ovi gubici nisu uzeti u obzir kod izrade simulacijskog modela sustava sa SRG-om. S obzirom da, prema literaturi [141], dodatni gubici iznose oko 6 % ukupnih gubitaka SRG-a niti ovi gubici nisu uračunati. Dakle, može se zaključiti da gubici u namotima i željezu stroja dominiraju te je, u nastavku istraživanja, cilj minimizirati sumu ovih gubitaka koji su u sljedećem poglavlju nazvani gubicima sustava.

Kako bi se u regulacijskom sustavu minimizirali gubici SRG-a potrebno je uspostaviti odnos između varijabli SRG-a (srednje vrijednosti faktora uzbude svih faza, srednje i efektivne vrijednosti svih faznih struja) i njegovih gubitaka. Upravo razvijeni napredni model će se primijeniti za uspostavljanje ovog odnosa u sljedećem poglavlju.

## **6. ALGORITAM POMAKA I PROMATRANJA ZA TRAŽENJE MAKSIMALNE KORISNOSTI PREKIDAČKOG RELUKTANTNOG GENERATORA**

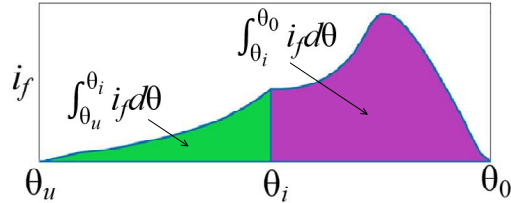
### **6.1. Korelacija varijabli i gubitaka sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom**

U jednopulsnom načinu rada SRG-a potrebno je odabrati položaje uklapanja i isklapanja tranzistora asimetričnog mosnog pretvarača. Više različitih kombinacija položaja uklapanja i isklapanja mogu dati željenu vrijednost regulirane varijable što otvara mogućnost odabira optimalne kombinacije. U [88] je razvijena metoda koja se temelji na optimalnom upravljanju magnetskim tokom prema potrebnoj izlaznoj snazi. U tom radu je pretpostavljeno da se magnetski tok mijenja linearno u ovisnosti o faznoj struji i položaju, što dovodi u pitanje primjenu takvog načina upravljanja jer SRM radi u dubokom magnetskom zasićenju. U radu [12] nastoji se optimizirati kočenje u električnom automobilu pogonjenog SRM-om. Cilj optimizacije je pronaći položaje uklapanja i isklapanja tranzistora pri kojima se postiže zadovoljavajuća pretvorba energije kočenja u električnu, mirnoća kočenja i valovitost struje sabirnica. Manja valovitost struje sabirnica produljuje vijek trajanja automobilske baterije. Kompromis između valovitosti momenta i maksimalne korisnosti sustava postignut je u radu [89]. U radu [117] se srednja struja sabirnica pretvarača održava mijenjanjem položaja uklapanja, a položaj isklapanja se bira tako da valovitost struje sabirnica bude minimalna. Pretpostavljeno je da je korisnost maksimalna ako je valovitost minimalna. U radovima [66, 72, 119] za jednopulsni način rada je predloženo da se biraju položaji uklapanja i isklapanja kod kojih je efektivna vrijednost faznih struja najmanja. U ovim radovima se pretpostavlja da je korisnost maksimalna ako je efektivna vrijednost faznih struja minimalna jer su gubici namota proporcionalni kvadratu efektivne vrijednosti fazne struje, a gubici u željezu su manji što je magnetski tok manji. U radu [92] procijenjeni su gubici u namotima i željezu te gubici u pretvaraču za različite položaje uklapanja i isklapanja. Položaji uklapanja i isklapanja koji daju najmanje gubitke uspoređeni su s položajima uklapanja i isklapanja koji daju najmanju efektivnu vrijednost fazne struje. Pokazano je da minimalna efektivna vrijednost fazne struje ne daje maksimalnu korisnost sustava.

U radovima [8, 62, 88, 120] definiran je faktor uzbude (engl. *excitation penalty*) kao odnos srednje vrijednosti fazne struje koja teče od trenutka uklapanja tranzistora do trenutka isklapanja i



srednje vrijednosti fazne struje koja teče od trenutka isklapanja tranzistora do trenutka kada fazna struja padne na nulu (slika 6.1).



Slika 6.1. Ilustracija faktora uzbude na valnom obliku fazne struje SRM-a

Sukladno navedenoj definiciji, faktor uzbude jednak je:

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{\theta_0 - \theta_u} \cdot \int_{\theta_u}^{\theta_i} i_f \cdot d\theta}{\frac{1}{\theta_0 - \theta_u} \cdot \int_{\theta_i}^{\theta_0} i_f \cdot d\theta} \quad (6.1)$$

gdje je:

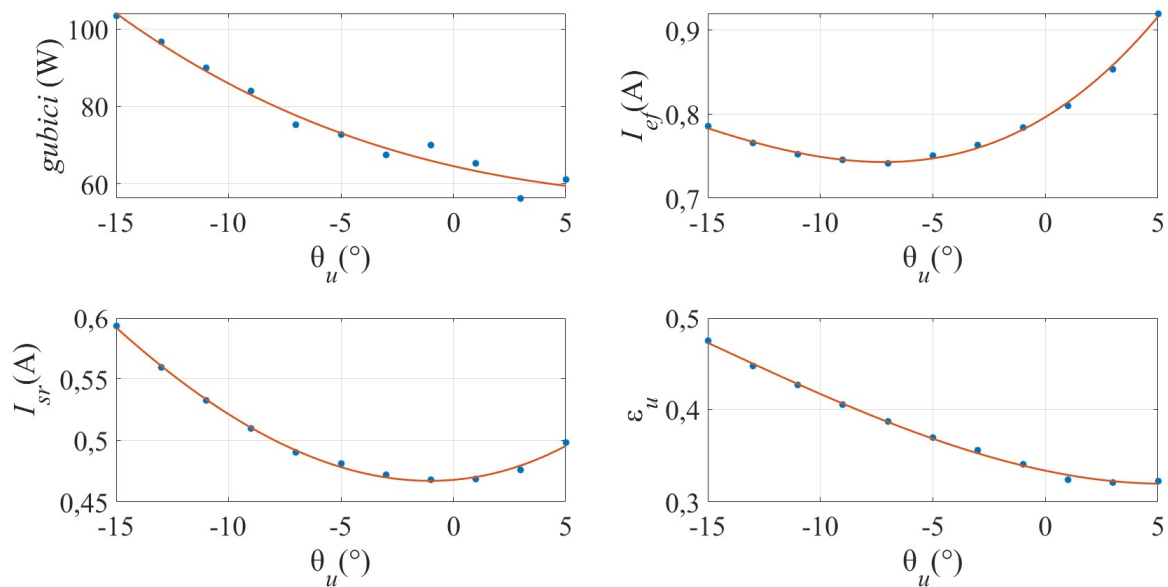
$\theta_0$  položaj rotora pri kojem fazna struja pada na nulu

Na slici 6.1 zelena površina proporcionalna je energiji potrebnoj za magnetiziranje faze stroja. Ljubičasta površina proporcionalna je zbroju energija magnetiziranja i generirane energije. U radu [120] nastoji se dobiti maksimalna korisnost i smanjiti vršna fazna struja minimizacijom kombinacije faktora uzbude, efektivne vrijednosti fazne struje, vršne vrijednosti fazne struje i maksimalnog magnetskog toka. U radu [62] predloženo je smanjenje faktora uzbude kao uvjet za povećanje korisnosti, ali to nije primijenjeno.

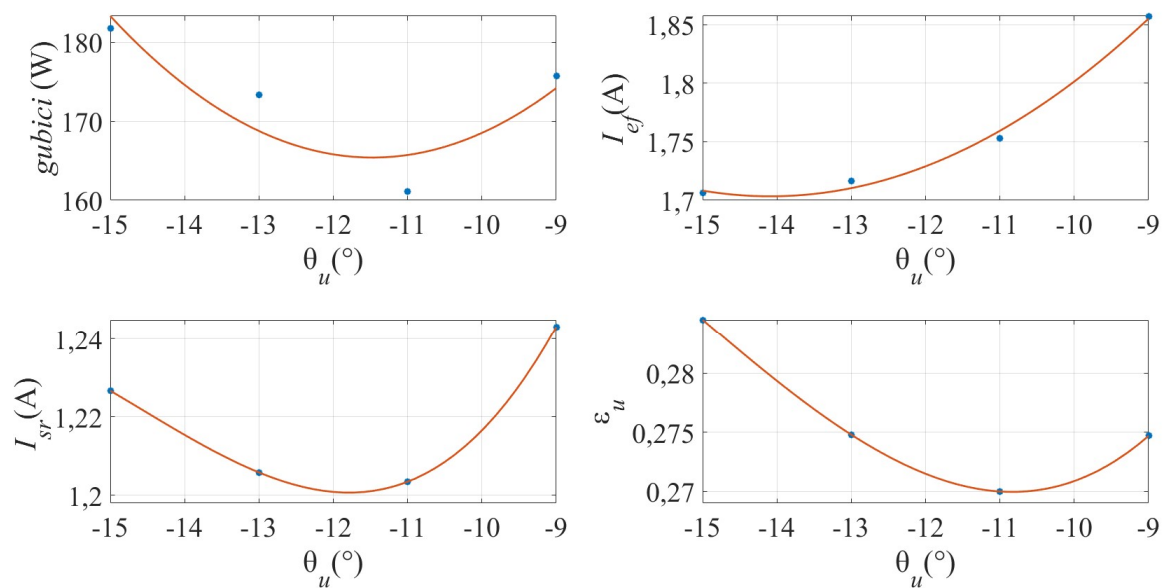
Kod minimizacije valovitosti momenta ili struje kao i minimizacije maksimalnog magnetskog toka uzimaju se trenutne vrijednosti mjerenih varijabli. Kao što je opće poznato, mjerene varijable sadrže mjerni šum. Takav mjerni šum se nepovoljno odražava na određivanja položaja uklapanja i isklapanja. Faktor uzbude, efektivna i srednja vrijednost fazne struje su, zbog procesa integracije, malo osjetljivi na mjerni šum te njihova primjena na izračun položaja uklapanja i isklapanja je prikladna s obzirom na mjerni šum u faznim strujama. Maksimalna izlazna snaga i maksimalna korisnost nisu univerzalno primjenjivi jer takvi algoritmi vrijede samo za sustav za koji su razvijeni.

U ovoj disertaciji se najprije uspostavlja uzročno-posljedična veza tj. korelacija između unaprijed definiranih varijabli SRG-a (tzv. varijabli kandidata) i minimuma njegovih gubitaka. Kao varijable kandidati razmatrane su srednje vrijednosti faktora uzbude svih faza  $\varepsilon_u$  te srednja  $I_{sr}$  i

efektivna vrijednost  $I_{ef}$  svih faznih struja. Kako bi se odredila korelacija između odabranih varijabli kandidata i gubitaka u stroju proveden je niz eksperimenata na laboratorijskoj maketi. Za iste radne točke kao u 5. poglavlju mijenjan je položaj uklapanja od  $-15^\circ$  do najviše  $5^\circ$  s korakom od  $2^\circ$ . Ove radne točke prikazane su u tablici E.1 u Prilogu E. Za 20 radnih točaka postignuto je ukupno 166 mjernih točaka. Kao što je prikazano u toj tablici, svaka radna točka ima granični položaj uklapanja tranzistora  $\theta_{u,g}$  pri kojem je postignuto stacionarno stanje. Dodavanjem  $2^\circ$  na taj položaj uklapanja tranzistora došlo je do razmagnetiziranja SRG-a jer nije bilo moguće stvoriti dovoljno velik magnetski tok. Primjerice, u 1. radnoj točki postignuto je stacionarno stanje u 11 mjernih točaka što odgovara rasponu  $-15^\circ$  do najviše  $5^\circ$  s korakom od  $2^\circ$  pa je granični položaj uklapanja  $5^\circ$ . U 10. radnoj točki postignuto je stacionarno stanje u 9 mjernih točaka, a granični položaj uklapanja je  $1^\circ$ . Kod 20. radne točke postignuta samo 4 stacionarna stanja tako da je granični položaj uklapanja za tu radnu točku  $-9^\circ$ . U svakom eksperimentu snimljene su trenutne vrijednosti faznih struja i momenta. Na temelju njih određeni su iznosi varijabli kandidata i ulazna snaga SRG-a i asimetričnog mosnog pretvarača. Izlazna snaga je određena iz napona između sabirnica pretvarača i otpora tereta. Razlika između izlazne i ulazne snage su gubici. Na slici 6.2 (a) i (b) prikazan je primjer varijabli kandidata i gubitaka stroja u ovisnosti o položaju uklapanja za radne točke 2 i 20 iz tablice E.1. Slične slike se mogu dobiti sa svim ostalim radnim točkama. Izlazna snaga kod radne točke 2 je 364 W, a radne točke 20 je 1389 W te one predstavljaju granice širokog područja promjena snaga.



a)



b)

Slika 6.2. Gubici SRG-a i varijable kandidati u ovisnosti u položaju uklapanja za radne točke a)  $\omega = 2000$  o/min,  $u = 200$  V i  $R_l = 110 \Omega$  i b)  $\omega = 3000$  o/min,  $u = 250$  V i  $R_l = 45 \Omega$

Prema slici 6.2. a) se vidi da su minimalni gubici postignuti kod položaja uklapanja od  $5^\circ$  te da je upravo kod tog položaja uklapanja i faktor uzbude minimalan. Na slici 6.2 b) se vidi da su

minimalni gubici postignuti kod položaja uklapanja od približno  $-11,8^\circ$ . Minimum srednje vrijednosti faznih struja iznosi 1,2 A, a minimum faktora uzbude 0,28 te su oba ova minimuma bliska položaju uklapanja od  $-11,8^\circ$  koji daje minimalne gubitke SRG-a. Nadalje, u radnoj točki 18 iz tablice E.1 položaji uklapanja kod kojih su ostvareni minimalna efektivna vrijednost svih faznih struja i gubitaka stroja su bliže od ostale dvije varijable kandidata. Dakle, ovisno o radnoj točki, minimum gubitaka SRG-a se postiže približno kod minimuma različitih varijabli kandidata. Kako bi se utvrdilo koja od analiziranih varijabli najbolje korelira s minimumom gubitaka SRG-a korišten je koeficijent korelacije koji glasi [142]:

$$r(\text{gubici}, V) = \frac{\sum_{j=1}^{166} ((V(j)-\bar{V}) \cdot (\text{gubici}(j)-\overline{\text{gubici}}))}{\sqrt{\sum_{j=1}^{166} (V(j)-\bar{V})^2 \cdot \sum_{j=1}^{166} (\text{gubici}(j)-\overline{\text{gubici}})^2}} \quad (6.2)$$

gdje je:

$r$  koeficijent korelacije

$V$  varijabla kandidat

U tablici E.1 nalaze se podaci dobiveni iz 166 mjernih točaka kao što je prethodno opisano. Ti podaci uvršteni su u jednadžbu (6.2) te je tako određen koeficijent korelacije  $r$  između svake od varijabli kandidata i ukupnih gubitaka stroja. Za faktor uzbude  $r=-0,07$ , za srednju vrijednost svih faznih struja  $r=0,9$ , a za efektivnu vrijednost svih faznih struja  $r=0,84$ . Za iste radne točke i položaje uklapanja provedena je simulacija naprednim modelom te su određeni koeficijenti korelacije. Za faktor uzbude je  $r=-0,29$ , za srednju vrijednost svih faznih struja  $r=0,97$ , a za efektivnu vrijednost svih faznih struja  $r=0,95$ . Dakle, na temelju eksperimenata kao i na temelju naprednog simulacijskog modela, može se zaključiti da upravo minimalna srednja vrijednost svih faznih struja daje minimalne gubitke stroja, kako u simulacijama tako i u eksperimentima. Minimalni gubici SRG-a će osigurati maksimalnu korisnost sustava sa SRG-om s obzirom da su, kako je objašnjeno u 5. poglavlju, poluvodički gubici zanemareni.

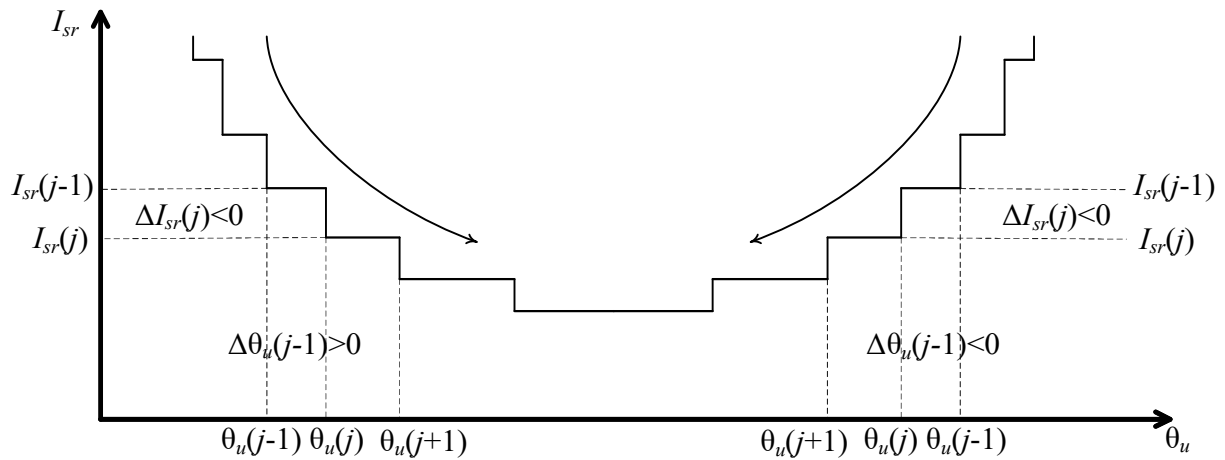
Na temelju provedene analize srednja vrijednost svih faznih struja odabrana je kao varijabla koja se minimizira u algoritmu pomaka i promatranja koji je opisan u sljedećem poglavlju.

## 6.2. Algoritam za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom

Algoritam za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom sličan je metodi pomaka i promatranja koja se koristi za traženje radne točke u kojoj fotonaponski sustav daje maksimalnu snagu [143, 144]. Cilj algoritma je pronaći položaj uklapanja tranzistora pri kojem je srednja vrijednost svih faznih struja  $I_{sr}$  minimalna za zadanu radnu točku. Sljedećom jednadžbom određuje se srednja vrijednost svih faznih struja u trenutku  $jT_s$ .

$$\bar{I}_{sr}(j) = \frac{1}{1000} \cdot \sum_{q=10000 \cdot (j-1) + 9001}^{q=10000 \cdot j} \frac{1}{4} \cdot (i_{f1}(q) + i_{f2}(q) + i_{f3}(q) + i_{f4}(q)) \quad (6.3)$$

U jednadžbi (6.3)  $j$  predstavlja redni broj iteracije usrednjavanja faznih struja a  $q$  označava redni broj uzorkovane fazne struje. PI regulator kojim se određuje položaj isklapanja tranzistora kao i uzorkovanje mjerenih varijabli radi s periodom od 50  $\mu$ s, a algoritam za traženje maksimalne korisnosti radi s periodom od  $T_s=0,5$  s i njime se određuje položaj uklapanja tranzistora. Dakle, za svakih 10000 promjena varijable  $q$ , varijabla  $j$  se poveća za 1, što odgovara vremenu 0,5 s. Nakon svake promjene položaja uklapanja dolazi do prijelazne pojave. Srednja vrijednost svih faznih struja izračunava se u intervalu između 0,45 s i 0,5 s svakog perioda kada je sustav ušao u stacionarno stanje. U tom intervalu, prema jednadžbi (6.3), varijabla  $q$  će se promijeniti za 1000. Na temelju promjene srednje vrijednosti svih faznih struja  $\Delta I_{sr}(j) = I_{sr}(j) - I_{sr}(j-1)$  i prethodnog smjera u kojem se mijenjao položaj uklapanja  $sign(\Delta \theta_u(j-1))$ , gdje je  $\Delta \theta_u(j-1) = \theta_u(j) - \theta_u(j-1)$ , određuje se iznos i smjer promijene položaja uklapanja u idućem koraku,  $\Delta \theta_u(j) = \theta_u(j+1) - \theta_u(j)$ . Na slici 6.3 prikazan je princip rada algoritma.



Slika 6.3. Princip rada algoritma za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom

Prema slici 6.3, ako se promjenom položaja uklapanja od  $\theta_u(j-1)$  do  $\theta_u(j)$  srednja vrijednost svih faznih struja smanjila, položaj uklapanja se mijenja u dobrom smjeru te ga takvog treba zadržati i u idućem koraku, gdje iznosi  $\theta_u(j+1)$ . S druge strane, ako se promjenom položaja uklapanja srednja vrijednost svih faznih struja povećala u odnosu na prethodni korak, položaj uklapanja u idućem koraku se treba promijeniti u suprotnom smjeru. Na slici 6.4 prikazan je dijagram toka koji to opisuje.



lijevom procesu sa slike 6.4, za svakih 10000 promjena brojača  $q$ , univerzalni brojač  $j$  se povećava za 1, što znači da jedna diskretna promjena brojača  $j$  odgovara protoku vremena od 0,5 s. Kada se  $j$  povećava za 1, izračunava se srednja vrijednost svih faznih struja u zadnjih 0,05 s vremenskog intervala od 0,5 s, prema jednadžbi (6.3). Nakon toga izračunava se  $\Delta I_{sr}(j)$ . Sljedećom jednadžbom izračunava se promjena položaja uklapanja:

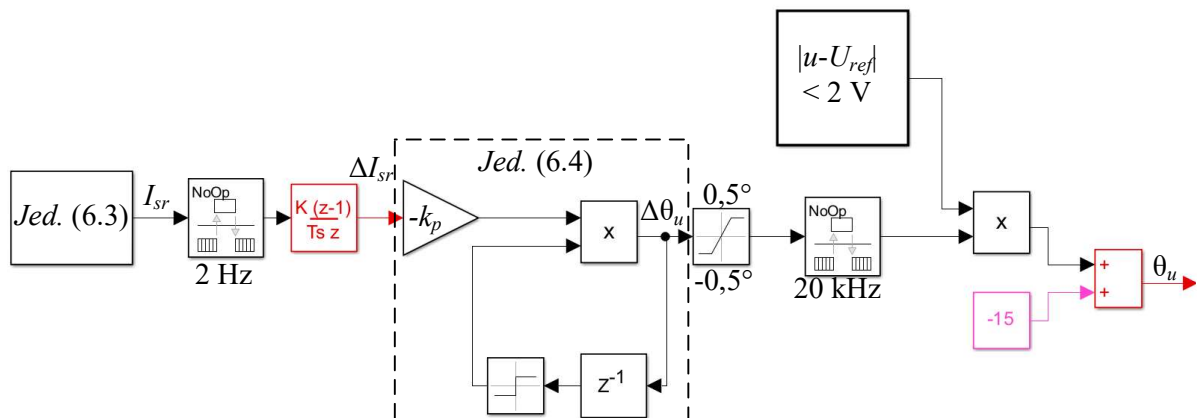
$$\Delta\theta_u(j) = -k_p \cdot \Delta I_{sr}(j) \cdot \text{sign}(\Delta\theta_u(j-1)) \quad (6.4)$$

Jednadžbom (6.4) osigurano je da je promjena položaja uklapanja proporcionalna promjeni srednje vrijednosti svih faznih struja te da se položaj uklapanja mijenja kao što je to opisano slikom 6.3. U jednadžbi (6.4) koeficijent proporcionalnosti između promjene srednje vrijednosti svih faznih struja i promjene položaja uklapanja je odabran iznosa  $k_p=100$  kako bi te promjene bile međusobno usporedive. U algoritmu je također osigurano da  $\Delta\theta_u(j)$  bude unutar granica između  $-0,5^\circ$  i  $0,5^\circ$  kako bi se izbjegla nestabilnost sustava.

U desnom procesu sa slike 6.4 određuje se razlika referentnog napona i napona između sabirnica. Ako je ta razlika manja od 2 V,  $\Delta\theta_u(q)$  ima iznos  $\Delta\theta_u(j)$  koji je određen u lijevom procesu sa slike 6.4. Kada je razlika referentnog napona i napona između sabirnica veća od 2 V, znači da SRG nije postigao stacionarno stanje te se položaj uklapanja zadržava na  $-15^\circ$ . Kada je položaj uklapanja tranzistora  $-15^\circ$  moguće je postići sve radne točke iz prethodnog poglavlja.

Slika 6.5. prikazuje simulacijski model algoritma za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom u *Matlab/Simulink*-u koji se temelji na dijagramu toka sa slike 6.4 te na jednadžbama (6.3) i (6.4).

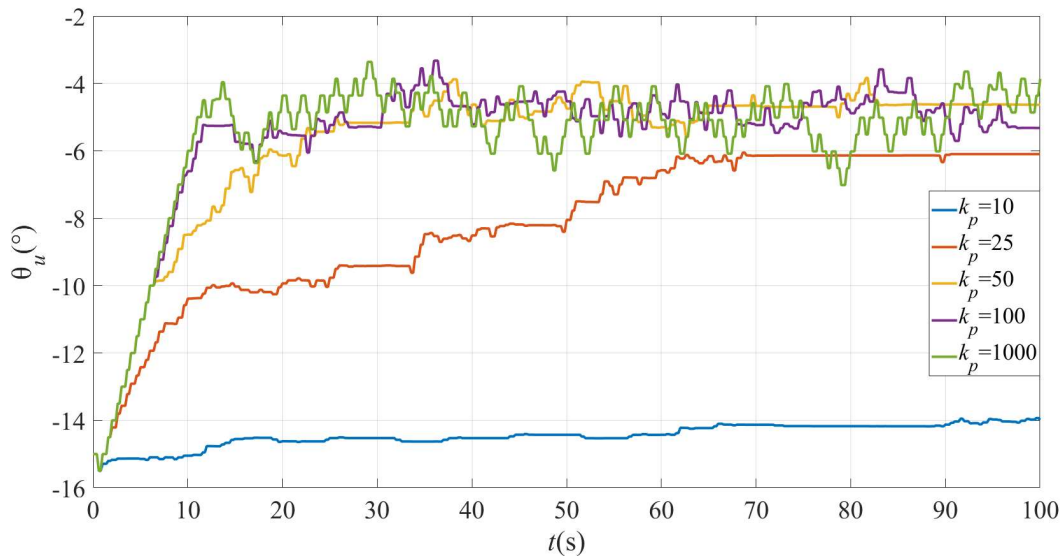




Slika 6.5. Simulacijski model algoritma za traženje maksimalne korisnosti sustava s prekidačkim reluktantnim generatorom

Jednadžbom (6.3) određuje se srednja vrijednost svih faznih struja. Algoritam radi s periodom uzorkovanja  $T_s=0,5$  s, odnosno na frekvenciji 2 Hz. To se postiže *Rate transition* blokom. Nakon što se odredi  $\Delta I_{sr}$ , jednadžba (6.3) daje promjenu položaja uklapanja  $\Delta\theta_u$  koja je zatim ograničena između vrijednosti od  $-0,5^\circ$  do  $0,5^\circ$ . Izlaz iz algoritma potrebno je prebaciti u područje od 20 kHz na kojem radi ostatak programa, što se postiže još jednim *Rate transition* blokom. Ako nije zadovoljen uvjet  $|u-U_{ref}|<2$  V, odnosno ako sustav nije u stacionarnom stanju onda se kut uklapanja zadržava na  $-15^\circ$ .

Period uzorkovanja rada algoritma od  $T_s=0,5$  s, interval između 0,45 s i 0,5 s u kojem se računa srednja vrijednost svih faznih struja navedenog perioda, koeficijent proporcionalnosti između promjene srednja vrijednosti svih faznih struja i promjene položaja uklapanja iznosa  $k_p=100$  te ograničenje promjene položaja uklapanja  $\Delta\theta_u$  između vrijednosti od  $-0,5^\circ$  do  $0,5^\circ$  dobiveni su metodom pokušaja i pogreške naprednim simulacijskim modelom. Period uzorkovanja rada algoritma duži od 0,5 s uzrokuje sporiji rad algoritma. Kraći period uzorkovanja znači da će sljedeća iteracija algoritma započeti prije nego što je završila prijelazna promjena nastala zbog promjene položaja uklapanja tranzistora u prethodnoj iteraciji što može rezultirati krivim odabirom  $\theta_u$ . Kao što je već spomenuto, interval između 0,45 s i 0,5 s svakog perioda odabran je jer se tada sustav nalazi u stacionarnom stanju. Na slici 6.6 prikazana je promjena položaja uklapanja tranzistora za različite koeficijente proporcionalnosti  $k_p$  pri radnoj točki  $\omega=3000$  o/min,  $u=200$  V i  $R_f=65$   $\Omega$ . Ta točka je odabrana kao primjer jer je tu izlazna snaga na trošilu 56 % nazivne snage stroja.



Slika 6.6.  $\theta_u$  određen algoritmom pomaka i promatranja za različite  $k_p$  - simulacija naprednim modelom

Na slici 6.6 vidi se da značajno manji  $k_p$  od 100 (npr. 10), uzrokuje spor odziv te postoji opasnost da će se algoritam naći u lokalnom minimumu pa zato neće pronaći optimalni  $\theta_u$ . Koeficijent proporcionalnosti veći od  $k_p=100$  znači da će limiti  $\Delta\theta_u$  od  $-0,5^\circ$  do  $0,5^\circ$  biti češće aktivirani. Ipak, i u tom slučaju će algoritam raditi sa zadovoljavajućom točnošću. Promjenom  $\theta_u$  za više od  $0,5^\circ$  postoji opasnost da će biti odabran položaj uklapanja pri kojem će se stroj razmagnetizirati. Također, pri većoj promjeni položaja uklapanja prijelazna pojava dulje traje čime se narušavaju dinamički pokazatelji kvalitete sustava.

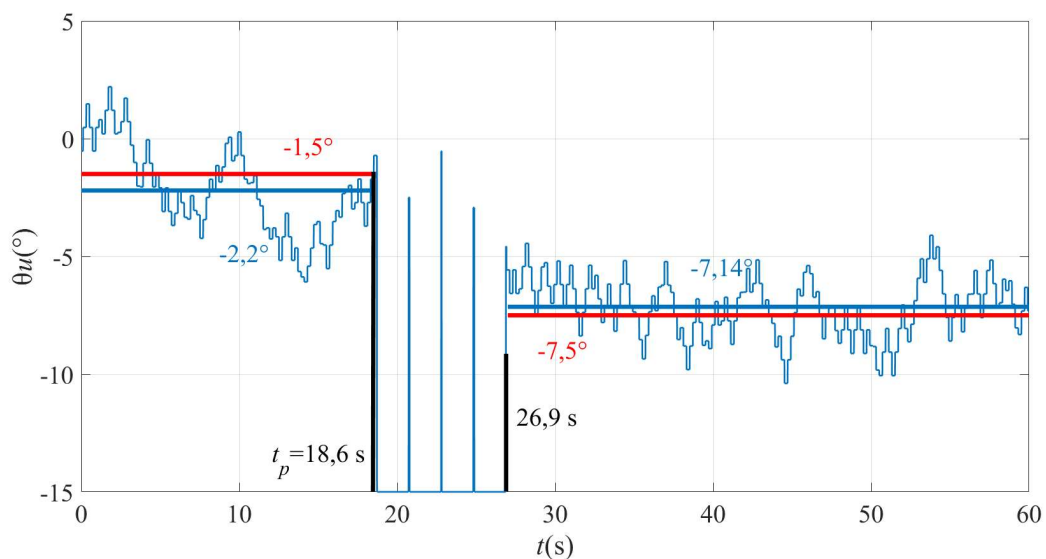
Nakon što su određeni parametri algoritma, proveden je niz simulacija naprednim i klasičnim modelom za radne točke iz prethodnog poglavlja u kojima je određen položaj uklapanja tranzistora pri kojem su ostvarene minimalne srednje vrijednosti svih faznih struja. Nakon toga proveden je niz eksperimenata u kojima je primijenjen algoritam kao i u simulacijama. Kako je svaki eksperiment trajao 60 s mjerenja nisu provedena za radne točke kod kojih je snaga veća od 1100 W pri 3000 o/min i 734 W pri 2000 o/min jer je postojala mogućnost da sustav uđe u područje gdje može doći do preopterećenja istosmjernog stroja. U tablici 6.1 prikazani su položaji uklapanja tranzistora ( $\theta_{u,eksp}$ ,  $\theta_{u,sim1}$  i  $\theta_{u,sim2}$ ) pri kojima su ostvarene minimalne srednje vrijednosti svih faznih struja za navedene radne točke za eksperimente te za simulacije naprednim i klasičnim modelima uz primjenu algoritma pomaka i promatranja. U svakom eksperimentu polazi se od stacionarnog

stanja pri položaju uklapanja tranzistora  $-15^\circ$ , nakon čega se aktivira algoritam pomaka i promatranja. Kada tako određen položaj uklapanja stacionira pristupa se spremanju uzoraka položaja uklapanja s frekvencijom uzorkovanja od 20 kHz u trajanju od 60 s. U tablici 6.1 prikazana je srednja vrijednost položaja uklapanja u tom periodu. Također je prikazana razlika između položaja uklapanja dobivenih eksperimentalno i simulacijskim modelima. Srednja vrijednost apsolutne razlike položaja uklapanja dobivenih eksperimentalno i naprednim modelom iznosi  $2,07^\circ$ , a eksperimenta i klasičnog modela iznosi  $6,34^\circ$  što potvrđuje točnost i opravdanost naprednog modela SRG-a. U zadnjem stupcu nalazi se granični položaj uklapanja tranzistora  $\theta_{u,g}$  koji je dobiven eksperimentalno kao što je opisano u prethodnom podpoglavlju. Položaji uklapanja koje je pronašao algoritam pomaka i promatranja u eksperimentima  $\theta_{u,eksp}$  dovoljno su udaljeni od graničnih položaja uklapanja tranzistora  $\theta_{u,g}$  pa ne postoji opasnost da će algoritam odabrati položaj uklapanja tranzistora kod kojeg će se stroj razmagnetizirati.

Tablica 6.1. Položaji uklapanja tranzistora dobiveni algoritmom pomaka i promatranja – eksperimenti i simulacije

Radna točka	$\omega$ (o/min)	$U$ (V)	$R_t$ ( $\Omega$ )	$P$ (W)	$\theta_{u,eksp}$ ( $^\circ$ )	$\theta_{u,simm}$ ( $^\circ$ )	$\theta_{u,simk}$ ( $^\circ$ )	$\theta_{u,eksp}$ ( $^\circ$ )- $\theta_{u,simm}$ ( $^\circ$ )	$\theta_{u,eksp}$ ( $^\circ$ )- $\theta_{u,simk}$ ( $^\circ$ )	$\theta_{u,g}$ ( $^\circ$ )
1	2000	150	110	205	2,65	3,59	-13,73	-0,94	16,38	5
2	2000	200	110	364	1,73	3,11	-12,16	-1,38	13,89	5
3	2000	250	110	568	0,61	2,24	-13,86	-1,63	14,47	5
4	2000	300	110	818	-0,03	0,97	-11,64	-1	11,16	5
5	3000	150	110	205	-0,62	1,46	-4,84	-2,08	4,22	3
6	3000	200	110	364	-1,5	1,14	-8,6	-2,64	7,1	3
7	3000	250	110	568	-2,07	0,25	-4,41	-2,32	2,34	3
8	3000	300	110	818	-2,72	-0,71	-4,63	-2,01	1,91	3
9	2000	150	65	346	-3,16	-1,42	-15,27	-1,74	12,11	1
10	2000	200	65	615	-3,68	-2,46	-15,55	-1,22	1,87	1
11	3000	150	65	346	-6,52	-3,9	-10,37	-2,62	3,85	-3
12	3000	200	65	615	-7,5	-4,61	-13,03	-2,89	5,53	-3
13	3000	250	65	962	-7,2	-4,92	-6,62	-2,28	-0,58	-3
14	3000	300	65	1385	-7,74	-5,62	-9,58	-2,12	1,84	-3
15	2000	150	45	500	-7,27	-4,79	-16,82	-2,48	9,55	-3
16	3000	150	45	500	-11,52	-8,6	-12,41	-2,92	0,89	-7
17	3000	200	45	889	-12,18	-9,21	-12,31	-2,97	0,13	-9

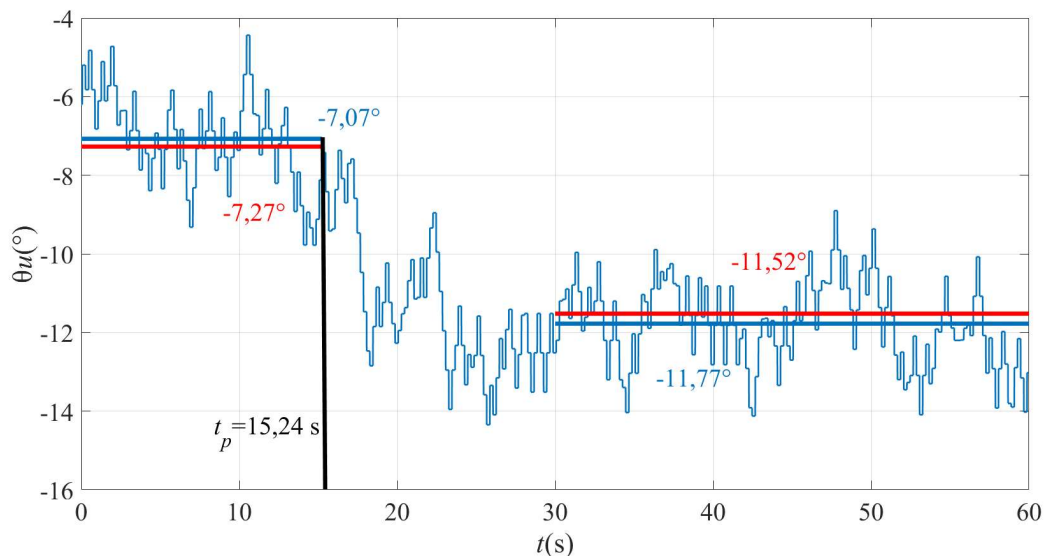
Slike 6.7 – 6.10 prikazuju položaj uklapanja koji daje algoritam pomaka i promatranja u dinamici sustava SRG-a tijekom prelaska iz jedne radne točke prikazane u Tablici 6.1 u drugu radnu točku iste ove tablice. Na slikama 6.7 – 6.10 s  $t_p$  označen je trenutak početka prijelazne pojave. Taj trenutak zadan je ručno u svakom eksperimentu pa je svaki put različit. Plavom linijom označena je eksperimentalno dobivena srednja vrijednost položaja uklapanja u prikazanom intervalu. Crvenom linijom označen je eksperimentalno određen položaj uklapanja iz tablice 6.1 koji je dobiven, kako je već navedeno, polazeći od stacionarnog stanje stanja pri položaju uklapanja tranzistora  $-15^\circ$ . Na slici 6.7 u trenutku  $t_p=18,6$  s dolazi do promjene tereta sa  $110 \Omega$  na  $65 \Omega$ . Ta promjena uzrokuje razliku napona između sabirnica i referentnog napona veću od  $2$  V pa algoritam definiira položaj uklapanja tranzistora u tom trenutku iznosa  $-15^\circ$  kao što je to opisano dijagramom toka na slici 6.4. Između  $18,6$  s i  $26,9$  s algoritam pokušava tri puta izračunati iznos kuta uklapanja različit od  $-15^\circ$  ali ne uspijeva jer je uvijek  $|u-U_{ref}|>2$  V. Tek nakon  $26,9$  s je  $|u-U_{ref}|<2$  V te algoritam izračunava novi kut uklapanja čija je srednja vrijednost u novouspostavljenom stacionarnom stanju jednaka  $-7,14^\circ$ .



Slika 6.7. Promjena  $\theta_u$  u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 6 na radnu točku 12

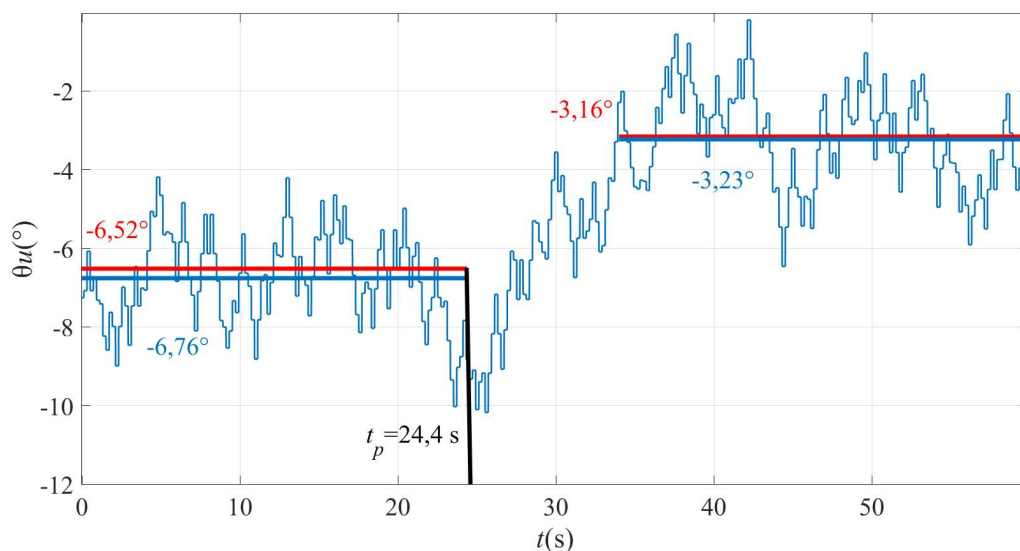
Na slici 6.8 dolazi do promjene brzine vrtnje s  $2000$  o/min na  $3000$  o/min pri naponu  $150$  V i otporu tereta  $45 \Omega$  u trenutku  $t_p=15,24$  s. Ta promjena brzine vrtnje traje  $2,5$  s, što je definirano u postavkama usmjerivača SINAMICS DCM, pa ne uzrokuje razliku napona između sabirnica i

referentnog napona veću od 2 V stoga se za vrijeme ove prijelazne pojave položaj uklapanja ne postavlja na iznos  $-15^\circ$ .



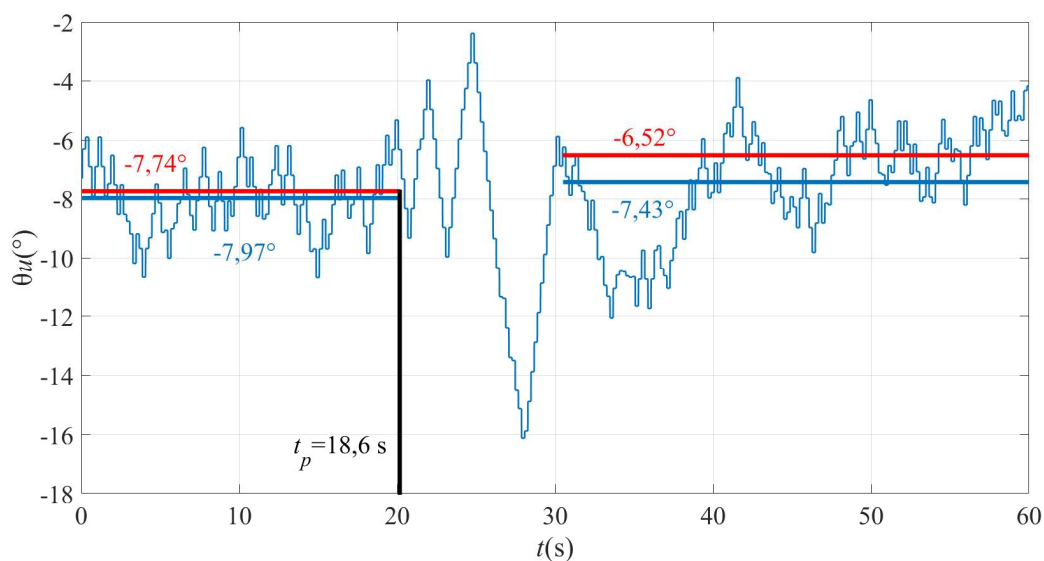
Slika 6.8. Promjena  $\theta_u$  u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 15 na radnu točku 16

Na slici 6.9 dolazi do promjene brzine vrtnje s 3000 o/min na 2000 o/min pri naponu 150 V i otporu tereta  $65 \Omega$  u trenutku  $t_p=24,4$  s. I u ovom slučaju promjena brzine vrtnje traje 2.5 s pa ne dolazi do razlike napona između sabirnica i referentnog napona većeg od 2 V.



Slika 6.9. Promjena  $\theta_u$  u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 11 na radnu točku 9

Na slici 6.10 dolazi do promjene referentnog napona s 300 V na 150 V pri brzini vrtnje 3000 o/min i otporu tereta  $65 \Omega$  u trenutku  $t_p=18,6$  s. Kondenzatoru između sabirnica treba vremena da se napuni ili isprazni pa je brzina promjene referentnog napona ograničena na 15 V/s jer u suprotnom integracijska greška PI regulatora postaje velika i uzrokuje značajan propad ili nadvišenje napona između sabirnica pretvarača. Zato i u ovom slučaju ne dolazi do razlike napona između sabirnica i referentnog napona većeg od 2 V.



Slika 6.10. Promjena  $\theta_u$  u dinamici tijekom prelaska iz radne točke 14 na radnu točku 11

Iz podataka u tablici 6.1 i sa slika 6.7 – 6.10 može se zaključiti da algoritam pomaka i promatranja radi konzistentno, odnosno ne zapinje u lokalnim minimumima i pronalazi približno jednak stacionarni iznos položaja uklapanja tranzistora u određenoj radnoj točki bez obzira na način dolaska u tu radnu točku. Razlika u stacionarnom iznosu položaja uklapanja tranzistora za pojedinu radnu točku, čiji je kut uklapanja prikazan na slikama 6.7 – 6.10, se može promatrati kao razlika između crvene i plave linije na tim slikama. Ova razlika je manja od  $1^\circ$  i nastaje zbog mjernog šuma za vrijeme mjerenja faznih struja i napona istosmjerne sabirnice.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovoj doktorskoj disertaciji analiziran je rad prekidačkog reluktantnog stroja s naglaskom na jednopulsni generatorski način rada. Rad stroja ostvaren je asimetričnim mosnim pretvaračem. U disertaciji je opisan razvoj naprednog modela SRG-a s uračunatim međuinaktivnim vezama između susjednih faza, remanentnim magnetskim tokom i gubicima u željezu. Takav model omogućio je analizu gubitka stroja te razvoj sustava regulacije napona između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača pri maksimalnoj korisnosti SRG-a.

U prvoj fazi istraživanja pristupilo se izradi klasičnog modela SRG-a. U tom modelu fazni namot stroja predstavljen je serijskim spojem omskog otpora namota i induktiviteta. Otpor namota određen je U-I metodom. Kod klasičnog modela, magnetski tok se aproksimira Fourierovim redom što zahtijeva određivanje magnetskog toka pojedine faze SRG-a za tri položaja rotora. Magnetski tok u ovisnosti o faznoj struji određen je za položaje rotora od  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  i  $30^\circ$  istosmjernom metodom. Pomoću naponske jednadžbe za jednu fazu stroja, napravljen je model jedne faze SRG-a. Iz nadomjesne sheme asimetričnog mosnog pretvarača, izveden je sustav jednadžbi koje definiraju klasični model SRG-a, asimetričnog mosnog pretvarača i trošila zajedno s regulacijskim sustavom napona između sabirnica. Ovaj model u obzir uzima gubitke u namotima stroja, a gubitke u željezu zanemaruje, iako gubici u željezu mogu iznositi do 50 % ukupnih gubitaka. Zbog toga klasični model nije primjeren za analizu gubitaka stroja.

U drugoj fazi istraživanja izrađen je napredni model SRG-a koji uračunava glavni magnetski tok, međuinaktivitet, gubitke u željezu i remanentni magnetski tok. U svrhu izrade naprednog modela, magnetski tok je određen eksperimentom istosmjerne uzbude za 16 položaja rotora, za razliku od klasičnog modela kod kojeg je određen samo za 3. Iz tih eksperimenata određeni su gubici u željezu i remanentni magnetski tok. U naprednom modelu gubici u željezu nadomještaju se otporom gubitaka u željezu koji je spojen paralelno nadomjesnom induktivitetu pojedinog faznog namota. Podaci o ovisnosti fazne struje i struje kroz nadomjesni otpor gubitaka u željezu o magnetskom toku i položaju rotora spremljeni su u pregledne tablice. Pokazano je da remanentni magnetski tok ovisi o položaju rotora. Silnice remanentnog magnetskog toka rotorskog pola prolaze kroz fazne namote inducirajući elektromotornu silu te je remanencija u rotorskom polu uzeta u obzir. Silnice remanentnog magnetskog toka u statorskom polu se ne mijenjaju pa ne induciraju napon, tako da utjecaj remanencije u statorskom polu na induciranu elektromotornu silu

ne postoji. Remanentni magnetski tok rotorskog pola se mijenja pod utjecajem glavnog magnetskog toka faza kraj kojih prolazi. Svaka od faza stroja promijeni remanentni magnetski tok rotorskog pola u smjeru svog glavnog magnetskog toka samo djelomično, a ne u potpunosti. Zbog jednostavnijeg modeliranja ova promjena je modelirana kao diskretna te se smatra da ne postoji promjena remanentnog magnetskog toka rotora u zoni utjecaja pojedine faze nego tek kada ovu zonu rotorski pola napusti. Remanentni magnetski tok aproksimiran je linearnim jednadžbama koje se međusobno razlikuju za svaku fazu stroja. Zbog međuinaktivne veze, kroz promatranu fazu zatvara se dio glavnog magnetskog toka susjedne faze stroja. Faza koja je počela voditi prije promatrane ima značajan magnetski tok u trenutku kada počne voditi promatrana faza. Za vrijeme dok vodi promatrana faza, magnetski tok faze koje će tek početi voditi je zanemariv. Stoga je u obzir uzet samo međuinaktivitet između promatrane i prethodno magnetizirane faze. Međuinaktivitet je također određen eksperimentom istosmjerne uzbude, ovisi o položaju rotora, te je aproksimiran polinomom četvrtog stupnja. Nakon toga, nadomjesna shema jedne faze SRG-a koja je kod klasičnog modela predstavljena nadomjesnim otporom namota i induktivitetom, nadopunjena je nadomjesnim otporom gubitaka u željezu i induciranim elektromotornim silama koje su posljedica remanentnoga magnetskog toka i međuinaktiviteta. Pomoću te nadomjesne sheme postavljena je naponska jednadžba iz koje je određen model jedne faze SRG-a. Isti sustav jednadžbi koje vrijedi za nadomjesnu shemu asimetričnog mosnog pretvarača kod klasičnog modela vrijedi i za napredni model. Iz tog sustava jednadžbi i navedenog modela jedne faze stroja, dobiven je napredni model SRG-a, asimetričnog mosnog pretvarača i trošila zajedno s regulacijskim sustavom napona između sabirnica.

U sljedećoj fazi istraživanja pristupilo se izradi laboratorijske makete asimetričnog mosnog pretvarača, koji je, u osnovi, građen od osam IGBT tranzistora i osam dioda. Upravljanje tranzistorima i prikupljanje mjernih signala položaja rotora, brzine vrtnje, napona između sabirnica, momenta na osovini i faznih struja obavljaju se upravljačkim modulom DS1104. Između sabirnica asimetričnog mosnog pretvarača spojen je kondenzator 8000  $\mu\text{F}$  koji služi kao međuspremnik energije. SRG je pogonjen istosmjernim motorom. Brzina vrtnje oba stroja regulira se pogonskim istosmjernim motorom upravljanim tiristorskim usmjerivačem. Na laboratorijskoj maketi napravljen je niz eksperimenata u kojima su postignute radne točke s različitim položajima uklapanja, brzinom vrtnje, naponom između sabirnica i otporom tereta. Za terećenje sustava korišteni su otpornici od 45  $\Omega$  i 65  $\Omega$  te njihov serijski spoj čime je dobiven otpor od 110  $\Omega$ . U



navedenom rasponu napona od 150 V do 300 V, tim otpornicima je ostvaren teret u rasponu od 205 W do 1389 W, odnosno 18,6 % do 126,26 % nazivne snage generatora, što predstavlja širok opseg promjena opterećenja dostatan za kvalitetnu analizu rada SRG-a. Na laboratorijskoj maketi je ostvareno stacionarno stanje u 58 različitih eksperimenata. U svakom eksperimentu snimljene su sve četiri fazne struje, mehanički moment, položaj rotora i kut magnetiziranja. Napravljene su i pripadajuće simulacije klasičnim i naprednim modelom. Definiran je koeficijent točnosti  $K$  kao pokazatelj točnosti pojedinih simuliranih faznih struja u usporedbi s onima dobivenim eksperimentalno. Ako je  $K > 1$  onda je napredni model točniji od klasičnog, a ako je  $K < 1$  onda je obrnuto. Koeficijent  $K$  određen je za svih 58 ostvarenih eksperimenata i za svaku od 4 faze SRG-a čime je dobiveno 232 navedena koeficijenta. U 225 slučajeva napredni model je točniji, a u 7 to vrijedni za klasični model. U svakom eksperimentu, ulazna snaga je određena kao umnožak elektromagnetskog momenta i kutne brzine vrtnje. U simulacijskim modelima ulazna snaga procijenjena je zbrojem izlazne snage i gubitaka. Izlazna snaga određena je iz napona između sabirnica i otpora tereta. Kod klasičnog modela uzimaju se u obzir samo gubici u namotima, dok se u naprednom modelu uzimaju i gubici u namotima i gubici u željezu stroja. Srednja relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i naprednim modelom iznosi 7,18 %, a srednja relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i klasičnim modelom 13,54 %. Eksperimentalno dobivena ulazna snaga mora biti veća od ulazne snage dobivene i klasičnim i naprednim modelom. U području izlaznih snaga između 74,38 % do 126,26 % nazivne snage SRG-a postoje samo dvije mjerne točke u kojima je ulazna snaga dobivena naprednim modelom neznatno veća od ulazne snage dobivene eksperimentalno (manje od 1,2 W). Napredni model uvijek bolje opisuje SRG od klasičnog. U području izlaznih snaga SRG-a manjih od 33,06 % nazivne snage SRG-a, relativna greška između ulaznih snaga dobivenih eksperimentalno i naprednim modelom iznosi od 4,43 % do 20,41 %. U području izlaznih snaga između 45,45 % i 55,94 % nazivne snage SRG-a, relativna greška između ulaznih snaga iznosi od 0,68 % do 10,4 %. U području izlaznih snaga između 74,38 % do 126,26 % nazivne snage SRG-a, relativna greška između ulaznih snaga iznosi od 0 % do 9,77 %. Spomenute pogreške nastaju zato što u simulacijskom modelu sustava sa SRG-om nisu uračunati poluvodički gubici te zbog činjenice da napredni model SRG-a ne računa dodatne gubitke SRG-a. Ipak, poluvodički gubici su procijenjeni na temelju faznih struja i napona SRG-a te na temelju kataloških podataka proizvođača poluvodiča. Pokazano je da ovi gubici, u eksperimentima, iznose najviše 21,62 % ukupnih gubitaka

SRG-a. Stoga ovi gubici nisu uzeti u obzir kod izrade simulacijskog modela sustava sa SRG-om. S obzirom da, prema literaturi, dodatni gubici iznose oko 6 % ukupnih gubitaka SRG-a niti ovi gubici nisu uračunati. Dakle, može se zaključiti da gubici u namotima i željezu stroja dominiraju te je, u nastavku istraživanja, cilj minimizirati sumu ovih gubitaka koji su u sljedećoj fazi istraživanja nazvani gubicima sustava.

U pretposljednjoj fazi istraživanja uspostavljena je uzročno-posljedična veza tj. korelacija između unaprijed definiranih varijabli SRG-a (tzv. varijabli kandidata) i minimuma njegovih gubitaka. Kao varijable kandidati razmatrane su srednje vrijednosti faktora uzbude svih faza te srednja i efektivna vrijednost svih faznih struja. Kako bi se odredila korelacija između odabranih varijabli kandidata i gubitaka u stroju proveden je niz eksperimenata na laboratorijskoj maketi. Na temelju eksperimentalno dobivenih podataka određen je koeficijent korelacije  $r$  između svake od varijabli kandidata i ukupnih gubitaka stroja. Za eksperimentalno dobivenu srednju vrijednost svih faznih struja koeficijent korelacije iznosi  $r=0,9$ , a dobiven naprednim modelom iznosi  $r=0,97$ . Za ostale varijable kandidate  $r$  je u rasponu od  $-0,29$  do  $0,95$ . Na temelju eksperimenata kao i na temelju naprednog simulacijskog modela, zaključeno je da upravo minimalna srednja vrijednost svih faznih struja osigurava minimalne gubitke stroja. Minimalni gubici SRG-a osiguravaju maksimalnu korisnost sustava sa SRG-om s obzirom da su, poluvodički gubici i dodatni gubici zanemareni. Na temelju provedene analize srednja vrijednost svih faznih struja odabrana je kao varijabla koja se minimizira u algoritmu pomaka i promatranja.

U posljednjoj fazi istraživanja razvijen je algoritam pomaka i promatranja koji za zadanu radnu točku promjenom položaja rotora pri kojem se faze stroja počinju magnetizirati traži minimalnu srednju vrijednost svih faznih struja. Parametri ovog algoritma određeni su metodom pokušaja i pogreške naprednim simulacijskim modelom. Nakon toga proveden je niz simulacija naprednim i klasičnim modelom za različite radne točke u kojima je određen položaji uklapanja tranzistora pri kojem su ostvarene minimalne srednje vrijednosti svih faznih struja. Zatim je proveden niz eksperimenata u kojima je primijenjen algoritam identičan kao i u simulacijama. Srednja vrijednost apsolutne razlike položaja uklapanja dobivenih eksperimentalno i naprednim modelom iznosi  $2,07^\circ$ , a eksperimenta i klasičnog modela iznosi  $6,34^\circ$  što potvrđuje točnost i opravdanost naprednog modela SRG-a. Na kraju su napravljene eksperimenti u kojima su snimljeni položaji uklapanja koji daje algoritam pomaka i promatranja u dinamici sustava SRG-a tijekom prelaska iz jedne radne točke u drugu. Pokazano je algoritam pomaka i promatranja radi konzistentno, odnosno

ne zapinje u lokalnim minimumima i pronalazi sličnu vrijednost položaja uklapanja tranzistora za istu radnu točku bez obzira na koji način se dolazi u promatranu radnu točku.

Na temelju rezultata prikazanih u doktorskom radu može se zaključiti da su ostvareni sljedeći znanstveni doprinosi:

- Novi model SRG-a utemeljen na naponskoj jednadžbi i integralu faznog napona s uključenim međuinduktivitetom susjednih faza SRG-a, remanentnim magnetskim tokom i nadomjesnim otporom gubitaka u željezu.

- Novi algoritam pomaka i promatranja za kontinuirano traženje položaja uklapanja u cilju minimiziranja gubitaka u faznim namotima i željezu. Za minimiziranje spomenutih gubitaka primijenjen je iznos srednje vrijednosti svih faznih struja koji je u dobroj korelaciji sa sumom gubitaka u faznim namotima i željezu te promjena položaja uklapanja tijekom perioda izvođenja algoritma.

Analizu koja je provedena u disertaciji, a koja se temeljila na novom naprednom modelu SRG-a koji sadrži međuinduktivitet, gubitke u željezu i remanentni magnetski tok, moguće je proširiti i na motorske načine rada SRM-a. Razvijeni model otvara i mogućnost boljeg razumijevanja rada SRG-a kada bi se fazna struja oblikovala histerezno ili pulsno-širinski. U nastavku istraživanja bi se mogli minimizirati ne samo gubici SRG-a u analiziranom sustavu nego suma ukupnih gubitaka SRG-a i asimetričnog mosnog pretvarača uračunavanjem i tih gubitaka.

## LITERATURA

- [1] T. J. E. Miller, *Electronic Control of Switched Reluctance Machine*, Newnes Power Engineering Series. Oxford, GB, 2001.
- [2] P. Asadi, M. Ehsani, and B. Fahimi, "Design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power," in *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.*, 19-23 March 2006 2006, pp. 1639-1644, doi: 10.1109/APEC.2006.1620761.
- [3] A. E. Santo, M. R. Calado, and C. Cabrita, "Static Simulation of a Linear Switched Reluctance Actuator with the Flux Tube Method," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 35-42, 2010.
- [4] J. G. Amoros and G. P. Andrada, "Magnetic circuit analysis of a linear switched reluctance motor," in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 8-10 Sept. 2009 2009, pp. 1-9.
- [5] J. Corda and S. M. Jamil, "Inclusion of eddy-currents impact in the model of a switched reluctance machine based on the equivalent electric circuit," 2013., vol. 1: Electrical Engineering Electronic Journal.
- [6] J. Corda and S. M. Jamil, "Experimental Determination of Equivalent-Circuit Parameters of a Tubular Switched Reluctance Machine With Solid-Steel Magnetic Core," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 304-310, 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2026762.
- [7] A. Mosallanejad and A. Shoulaie, "Investigation and Calculation of Magnetic Field in Tubular Linear Reluctance Motor Using FEM," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 43-48, 2010, doi: 10.4316/AECE.2010.04007.
- [8] G. Brady, C. O'Loughlin, J. Massey, D. Griffiths, and C. Villegas, "Design and test of a linear switched reluctance generator for use in wave-energy applications," *4th International Conference on Ocean Energy, ICOE*, 2012.
- [9] J. F. Pan, Q. Li, X. Wu, N. Cheung, and L. Qiu, "Complementary power generation of double linear switched reluctance generators for wave power exploitation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 106, pp. 33-44, 2019/03/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.09.023>.
- [10] R. P. G. Mendes, M. R. A. Calado, and S. J. P. S. Mariano, "Particle swarm and Box's complex optimization methods to design linear tubular switched reluctance generators for wave energy conversion," *Swarm and Evolutionary*

- Computation*, vol. 28, pp. 29-41, 2016/06/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.12.003>.
- [11] Y. Zhu, H. Wu, and C. Zhen, "Regenerative braking control under sliding braking condition of electric vehicles with switched reluctance motor drive system," *Energy*, vol. 230, p. 120901, 2021/09/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120901>.
- [12] Y. Zhu, H. Wu, and J. Zhang, "Regenerative Braking Control Strategy for Electric Vehicles Based on Optimization of Switched Reluctance Generator Drive System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 76671-76682, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990349.
- [13] M. Hamouda, A. A. Menaem, H. Rezk, M. N. Ibrahim, and L. Számel, "An improved indirect instantaneous torque control strategy of switched reluctance motor drives for light electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 709-715, 2020/12/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.142>.
- [14] S. Kocan and P. Rafajdus, "Dynamic model of High Speed Switched Reluctance Motor for automotive applications," *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 302-309, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.045>.
- [15] M. Ma, R. Wang, F. Li, J. Wang, and S. Yang, "A fault-tolerant control strategy for switched reluctance motor drive for electric vehicles under short-fault condition," *Microelectronics Reliability*, vol. 88-90, pp. 1221-1225, 2018/09/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.07.033>.
- [16] J. D. Widmer, R. Martin, and M. Kimiabeigi, "Electric vehicle traction motors without rare earth magnets," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 3, pp. 7-13, 2015/04/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.02.001>.
- [17] E. Öksüztepe, "In-Wheel Switched Reluctance Motor Design for Electric Vehicles by Using a Pareto-Based Multiobjective Differential Evolution Algorithm," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 6, pp. 4706-4715, 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2618119.
- [18] A. Rezig, W. Boudendouna, A. Djerdir, and A. N'Diaye, "Investigation of optimal control for vibration and noise reduction in-wheel switched reluctance motor used in electric vehicle," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 167, pp. 267-280, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.05.016>.
- [19] Y. Wang, P. Li, and G. Ren, "Electric vehicles with in-wheel switched reluctance motors: Coupling effects between road excitation and the unbalanced radial force," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 372, pp. 69-81, 2016/06/23/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.02.040>.

- [20] Y. Qin, C. He, X. Shao, H. Du, C. Xiang, and M. Dong, "Vibration mitigation for in-wheel switched reluctance motor driven electric vehicle with dynamic vibration absorbing structures," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 419, pp. 249-267, 2018/04/14/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.01.010>.
- [21] "NIDEC SR Drives, <http://www.srdrives.com/>, 12.3.2019." (accessed.
- [22] T. J. E. Miller, "Optimal design of switched reluctance motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 15-27, 2002, doi: 10.1109/41.982244.
- [23] "Are switched-reluctance motors for you?, <https://www.machinedesign.com/motorsdrives/are-switched-reluctance-motors-you>, 12.3.2019." (accessed.
- [24] "Rocky Mountains, [http://www.rockymountaintechnologies.com/SR\\_Motors.html](http://www.rockymountaintechnologies.com/SR_Motors.html), 12.3.2019." (accessed.
- [25] "Software motor company, <https://softwaremotor.com/technology/>, 12.3.2019." (accessed.
- [26] "Maccon, <https://www.maccon.de/en/stepper-reluctance-motors/reluctance-motors.html>, 12.3.2019." (accessed.
- [27] "Kaskod, <http://kaskod.ee>, 12.3.2019." (accessed.
- [28] "Orangel, <https://www.orangel.eu/en/prodotti/synchronous-reluctance-motor-sr-series/>, 12.3.2019." (accessed.
- [29] E. Darie, C. Cepisca, and E. Darie, *The use of Switched Reluctance Generator in Wind Energy Applications*. 2009.
- [30] R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, J. Clare, G. Asher, and P. Wheeler, "Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 781-791, 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.853733.
- [31] R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, G. Asher, J. Clare, and P. Wheeler, "Control system for grid generation of a switched reluctance generator driven by a variable speed wind turbine," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, 2-6 Nov. 2004 2004, vol. 2, pp. 1879-1884 Vol. 2, doi: 10.1109/IECON.2004.1431870.
- [32] P. Lobato, A. Cruz, J. Silva, and A. J. Pires, "The Switched Reluctance Generator for Wind Power Conversion," in *Proceedings da Conferência 9CHLIE - 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering*, Marbella, Spain, 2005.
- [33] H. Chen and Z. Shao, "Turn-on angle control for switched reluctance wind power generator system," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial*

- Electronics Society, 2004. IECON 2004, 2-6 Nov. 2004 2004, vol. 3, pp. 2367-2370 Vol. 3, doi: 10.1109/IECON.2004.1432170.*
- [34] H. Chen, T. Su, F. Xiao, and Y. Zhu, "A switched reluctance wind power generator with the excitation of low voltage," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 6-9 Oct. 2002 2002, vol. 6, p. 5 pp. vol.6, doi: 10.1109/ICSMC.2002.1175619.
- [35] K. Park and Z. Chen, "Self-tuning fuzzy logic control of a switched reluctance generator for wind energy applications," in *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 25-28 June 2012 2012, pp. 357-363, doi: 10.1109/PEDG.2012.6254026.
- [36] D. McSwiggan, L. Xu, and T. Littler, "Modelling and control of a variable-speed switched reluctance generator based wind turbine," in *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, 4-6 Sept. 2007 2007, pp. 459-463, doi: 10.1109/UPEC.2007.4468990.
- [37] M. A. Mueller, "Design and performance of a 20 kW, 100 rpm, switched reluctance generator for a direct drive wind energy converter," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, 15-15 May 2005 2005, pp. 56-63, doi: 10.1109/IEMDC.2005.195701.
- [38] E. Echenique, J. Dixon, R. Cardenas, and R. Pena, "Sensorless Control for a Switched Reluctance Wind Generator, Based on Current Slopes and Neural Networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 817-825, 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2005940.
- [39] D. Xin *et al.*, "Design of switched reluctance generator system for wind power maximization," in *2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, 2-4 Feb. 2015 2015, pp. 306-310, doi: 10.1109/EIconRusNW.2015.7102286.
- [40] K. Park, *Power Electronic Systems for Switched Reluctance Generator based Wind Farms and DC Networks*. doktorska disertacija, Department of Energy Technology, Aalborg University, 2014.
- [41] R. Jayapragash and C. Chellamuthu, "Analysis of switched reluctance machine using FEA for renewable energy system," in *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, 6-8 Feb. 2013 2013, pp. 777-781, doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527760.
- [42] L. Xiong, B. Xu, H. Gao, and L. Xu, "A novel algorithm of switched reluctance generator for maximum power point tracking in wind turbine application," presented at the 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, Kina, 2009.

- [43] Z. Omaç and C. Cevahir, "Control of switched reluctance generator in wind power system application for variable speeds," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2665-2672, 2021/09/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.009>.
- [44] C. Cossar, L. Kelly, T. J. E. Miller, C. Whitley, C. Maxwell, and D. Moorhouse, "The design of a switched reluctance drive for aircraft flight control surface actuation," in *IEE Colloquium on Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft (Ref. No. 1999/180)*, 9-9 Nov. 1999 1999, pp. 2/1-2/8, doi: 10.1049/ic:19990831.
- [45] M. E. Elbuluk and M. D. Kankam, "Potential starter/generator technologies for future aerospace applications," in *Proceedings of the IEEE 1996 National Aerospace and Electronics Conference NAECON 1996*, 20-22 May 1996 1996, vol. 1, pp. 75-82 vol.1, doi: 10.1109/NAECON.1996.517619.
- [46] M. Qin, L. Dong, X. Huang, and X. Liao, "A rapid design method for high speed aeronautic switched reluctance generator," in *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, Wuhan, China, 15-17 April 2011 2011, pp. 1937-1941, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5777095.
- [47] J. Sun, Z. Wei, S. Wang, Q. Zhan, and Z. Ma, "Modeling and Design of Switched Reluctance Starter/Generator System," in *System Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009 Moscow)*, Moscow, RUSSIA, 2009., pp. 1977-1983.
- [48] M. Tursini, M. Villani, G. Fabri, and L. Di Leonardo, "A switched-reluctance motor for aerospace application: Design, analysis and results," *Electric Power Systems Research*, vol. 142, pp. 74-83, 2017/01/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.044>.
- [49] W. U. N. Fernando, "Control of switched reluctance generators in continuous conduction mode," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 14-18 Sept. 2014 2014, pp. 1360-1365, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953576.
- [50] "Eco Whisper turbine, <http://www.acts.asn.au/wp-content/uploads/2012/04/EWT-Technical-Brochure.pdf>, 12.3.2019." (accessed).
- [51] P. P. d. Paula, W. M. d. Silva, J. R. Cardoso, and S. I. Nabeta, "Assessment of the influences of the mutual inductances on switched reluctance machines performance," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.*, 1-4 June 2003 2003, vol. 3, pp. 1732-1738 vol.3, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210686.
- [52] D. Panda and V. Ramanarayanan, "Mutual Coupling and Its Effect on Steady-State Performance and Position Estimation of Even and Odd Number Phase



- Switched Reluctance Motor Drive," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 8, pp. 3445-3456, 2007, doi: 10.1109/TMAG.2007.898101.
- [53] A. Fleury, J. Dias, R. H. Araújo, W. F. V. Silveira, A. Andrade, and C. Ribeiro, "Effects of the Mutual inductances on the Switched Reluctance Machines," presented at the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Santiago de Compostela, Španjolska, 2012.
- [54] N. Schofield and S. Long, "Generator Operation of a Switched Reluctance Starter/Generator at Extended Speeds," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 48-56, 2009, doi: 10.1109/TVT.2008.924981.
- [55] E. Gizlier, S. Gungor, F. Erfan, and A. F. Mergen, "Investigation of magnetic characteristics and simulation of switched reluctance motor using FEM analysis," in *ELECO 2001 2th Internatinoal Conference on Electrical and Electronics engineering*, Bursa, Turkey, 2001.
- [56] D. Ikeda, N. Yamamura, and M. Ishida, "Proposal of simplified equivalent model for Switched Reluctance Generator," in *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 26-29 Oct. 2013 2013, pp. 720-724, doi: 10.1109/ICEMS.2013.6754509.
- [57] A. Matveev, V. Kuzmichev, R. Nilssen, and T. Undeland, "Two Approaches For Modeling Of Switched Reluctance Drives," in *Electrical Power Electronics 2003.*, Toulouse, France, 2003, pp. 2-4.
- [58] F. D'hulster, K. Stockman, and R. J. M. Belmans, "Modelling of Switched Reluctance Machines: State of the Art," *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 24, no. 4, pp. 216-223, 1.1.2004 2004, doi: 10.1080/02286203.2004.11442306.
- [59] H. Chi, R. Lin, and J. Chen, "Simplified flux-linkage model for switched-reluctance motors," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 152, no. 3, pp. 577-583, 2005, doi: 10.1049/ip-epa:20045207.
- [60] Š. Mašić, J. Čorda, and S. Smaka, "Computation of Static, Steady-state and Dynamic Characteristics of the Switched Reluctance Motor," *Automatika*, vol. 43, no. 3-4, pp. 109-117, 2002.
- [61] V. Hrabovcova, P. Rafajdus, and M. Liptak, "Output Power of Switched Reluctance Generator with regard to the Phase Number and Number of Stator and Rotor Poles," *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 109, no. 3, pp. 1392-1215, 2011, doi: 10.5755/j01.eee.109.3.164.
- [62] V. Hrabovcová, M. Lipták, and P. Rafajdus, "Magnetic Circuit Optimization for a Switched Reluctance Generator," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 1571-1579, 2010.

- [63] S. Song and W. Liu, "A Comparative Study on Modeling Methods for Switched Reluctance Machines," *Computer and Information Science*, vol. 3, no. 2, pp. 205-210, 2010. 2010, doi: 10.5539/cis.v3n2p205.
- [64] R. Jayapragash and C. Chellamuthu, "Modeling and performance analysis of switched reluctance generator," in *2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)*, 27-29 Nov. 2014 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICSEMR.2014.7043594.
- [65] F. Messai, M. Makhlof, A. Messai, K. Nebti, and H. Benalla, "Nonlinear Modeling and Simulation of a Four-phase Switched Reluctance Generator for Wind Energy Applications," *Journal of Clean Energy Technologies*, pp. 127-131, 01/01 2013, doi: 10.7763/JOCET.2013.V1.30.
- [66] D. A. Torrey, "Switched reluctance generators and their control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 3-14, 2002, doi: 10.1109/41.982243.
- [67] B. Ganji, M. Heidarian, and J. Faiz, "Modeling and analysis of switched reluctance generator using finite element method," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 85-93, 2015/03/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.08.007>.
- [68] H. P. Chi, R. L. Lin, and J. F. Chen, "A fast-built flux-linkage model for switched-reluctance motors," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 29, no. 6, pp. 1071-1080, 2006/09/01 2006, doi: 10.1080/02533839.2006.9671206.
- [69] P. Asadi, *Development and application of an advanced switched reluctance generator drive*. doktorska disertacija, Texas A&M University, 2006.
- [70] B. Han-Kyung, *Control of Switched Reluctance Motors Considering Mutual Inductance*. Virginia, SAD: doktorska diertacija, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [71] M. Farshad, J. Faiz, and C. Lucas, "Development of analytical models of switched reluctance motor in two-phase excitation mode: extended Miller model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 6, pp. 2145-2155, 2005, doi: 10.1109/TMAG.2005.848323.
- [72] M. Torrent, P. Andrada, B. BlanquÃ, E. Martinez, J. I. Perat, and J. A. Sanchez, "Method for estimating core losses in switched reluctance motors," presented at the European Transactions on Electrical Power, 2011.
- [73] E. Mese, Y. Sozer, J. M. Kokernak, and D. A. Torrey, "Optimal excitation of a high speed switched reluctance generator," in *APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.00CH37058)*, 6-10 Feb. 2000 2000, vol. 1, pp. 362-368 vol.1, doi: 10.1109/APEC.2000.826128.

- [74] K. Songyan, S. Zhao, H. Fengping, and C. Xin, "Position sensorless technology of switched reluctance motor drives including mutual inductance," *Iet Electric Power Applications*, vol. 11, pp. 1085-1094, 2017.
- [75] O. Ichinokura, T. Kikuchi, K. Nakamura, T. Watanabe, and G. Hai-Jiao, "Dynamic simulation model of switched reluctance generator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 5, pp. 3253-3255, 2003, doi: 10.1109/TMAG.2003.816739.
- [76] S. Muthulakshmi, S. Aiswariya, M. Senthilkumar, G. S. Naganathan, and S. Sivakarthika, "Investigation of electromagnetic characteristics of Switched Reluctance motor for photovoltaic applications," *Materials Today: Proceedings*, 2021/04/11/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.390>.
- [77] B. Ganji and M. H. Askari, "Analysis and modeling of different topologies for linear switched reluctance motor using finite element method," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 2531-2538, 2016/09/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.017>.
- [78] A. Parsapour, B. M. Dehkordi, and M. Moallem, "Predicting core losses and efficiency of SRM in continuous current mode of operation using improved analytical technique," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 378, pp. 118-127, 2015/03/15/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.10.148>.
- [79] M. Liptak, V. Hrabovcova, and P. Rafajdus, "Equivalent circuit of switched reluctance generator based on DC series generator," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 23-28, 2008.
- [80] R. Gobbi, N. C. Sahoo, and R. Vejian, "Experimental Investigations on Computer-Based Methods for Determination of Static Electromagnetic Characteristics of Switched Reluctance Motors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 10, pp. 2196-2211, 2008, doi: 10.1109/TIM.2008.922095.
- [81] S. K. Sahoo, *High-performance torque control of switched reluctance motor*. doktorska disertacija, Department of electrical and computer engineering, National University of Singapore, 2006.
- [82] A. W. F. V. Silveira, D. A. Andrade, A. V. S. Fleury, L. C. Gomes, C. A. Bissochi, and R. J. Dias, "Generated voltage control of the SRM operating as motor/generator," in *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, 27 Sept.-1 Oct. 2009 2009, pp. 830-835, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347764.
- [83] C. G. Turker and F. E. Kuyumcu, "The modelling and the simulation of the switched reluctance generator," in *2008 34th Annual Conference of IEEE*

- Industrial Electronics*, 10-13 Nov. 2008 2008, pp. 1421-1426, doi: 10.1109/IECON.2008.4758162.
- [84] Y. Chang and C. Liaw, "On the Design of Power Circuit and Control Scheme for Switched Reluctance Generator," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 445-454, 2008, doi: 10.1109/TPEL.2007.911872.
- [85] W. G. Hurley and W. H. Wolfle, *Transformers and inductors for power electronics: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- [86] H. J. Chen and W. P. Jing, "Flux linkage determination of the switched reluctance motor from measurable quantities at steady-state operations," *IET Electric Power Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 210-216, 2011, doi: 10.1049/iet-epa.2010.0037.
- [87] D. Vukadinovic, S. Grbin, and M. Basic, "Experimental Method of Determining the Equivalent Circuit Parameters of a Switched Reluctance Machine," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 93-98, 2015.
- [88] I. Kioskeridis and C. Mademlis, "Optimal efficiency control of switched reluctance generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1062-1071, 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.876827.
- [89] P. J. d. S. Neto, T. A. d. S. Barros, M. V. d. Paula, R. R. d. Souza, and E. R. Filho, "Design of Computational Experiment for Performance Optimization of a Switched Reluctance Generator in Wind Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 1, pp. 406-419, 2018, doi: 10.1109/TEC.2017.2755590.
- [90] W. Ding and D. Liang, "Modeling of a 6/4 Switched Reluctance Motor Using Adaptive Neural Fuzzy Inference System," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 7, pp. 1796-1804, 2008, doi: 10.1109/TMAG.2008.919711.
- [91] K. I. Hwu, "Dynamic Modelling of SRM drive assisted by Powersys and Simulink," *International Review of Electrical Engineering-IREE*, vol. 2, no. 2, pp. 282-292, 2007.
- [92] J. Faiz and R. Fazai, "Optimal Excitation Angles of a High Speed Switched Reluctance Generator by Efficiency Maximization," in *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 30 Aug.-1 Sept. 2006 2006, pp. 287-291, doi: 10.1109/EPEPMC.2006.4778414.
- [93] X. Ling, L. Gong, B. Li, and C. Liu, "Precise in-situ characterization and cross-validation of the electromagnetic properties of a switched reluctance motor," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 4, pp. 74-80, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.05.002>.

- [94] S.-C. Wang, "An fully-automated measurement system for identifying magnetization characteristics of switched reluctance motors," *Measurement*, vol. 45, no. 5, pp. 1226-1238, 2012/06/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.014>.
- [95] M. Kiani, "Model predictive control of stator currents in Switched Reluctance Generators," in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1-4 June 2014 2014, pp. 842-846, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864721.
- [96] B. Fahimi, "On the suitability of switched reluctance drives for starter/generator application," in *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)*, 6-9 May 2002 2002, vol. 4, pp. 2070-2075 vol.4, doi: 10.1109/VTC.2002.1002988.
- [97] W. Lu, "Modeling and Control of Switched Reluctance Machines for Electro-Mechanical Brake Systems," *doktorska disertacija, Electrical Engineering Department, The Ohio State University*, 2005.
- [98] B. Shao and A. Emadi, "A digital control for switched reluctance generators," in *2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, 13-15 April 2011 2011, pp. 182-187, doi: 10.1109/ICMECH.2011.5971278.
- [99] V. N. Walivadekar, V. V. Athani, and G. N. Acharya, "Equivalent circuit for switched reluctance motor," in *Proceedings of TENCON '93. IEEE Region 10 International Conference on Computers, Communications and Automation*, 19-21 Oct. 1993 1993, vol. 5, pp. 568-571 vol.5, doi: 10.1109/TENCON.1993.320706.
- [100] G. P. Viajante, D. A. Andrade, L. C. Gomes, M. A. A. Freitas, V. R. Bernardeli, and A. W. F. V. Silveira, "A voltage control strategy for Switched Reluctance Generator," in *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, 12-15 May 2013 2013, pp. 421-426, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556131.
- [101] G. P. Viajante *et al.*, "A grid connection scheme of a Switched Reluctance Generator for active power injection," in *2013 International Electric Machines & Drives Conference*, 12-15 May 2013 2013, pp. 415-420, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556130.
- [102] L. Ge, B. Burkhart, and R. W. D. Doncker, "Fast Iron Loss and Thermal Prediction Method for Power Density and Efficiency Improvement in Switched Reluctance Machines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 6, pp. 4463-4473, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2922937.

- [103] J. Bouchnaif, K. Grari, A. Benslimane, and F. Jeffali, "Analytical approach and thermal signature of Switched reluctance motor iron losses," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp. 3161-3166, 2020/01/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.031>.
- [104] D. Vukadinović, Š. Grbin, and M. Bašić, "Novel Equivalent Circuit of Switched Reluctance Machine with Iron Losses," presented at the 4th European Conference for the Applied Mathematics and Informatics (AMATHI '13), Dubrovnik, Hrvatska, 2013.
- [105] A. A. Memon, S. S. H. Bukhari, and J. S. Ro, "Experimental Determination of Equivalent Iron Loss Resistance for Prediction of Iron Losses in a Switched Reluctance Machine," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 58, no. 2, pp. 1-4, 2022, doi: 10.1109/TMAG.2021.3083491.
- [106] L. Zhenguoguo, G. Dongdong, L. Dong-Hee, and A. Jin-Woo, "Power closed-loop control for high efficiency switched reluctance generator," in *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 9-12 Oct. 2012 2012, pp. 590-593, doi: 10.1109/VPPC.2012.6422793.
- [107] H. Peng, L. Yi, W. Deng, and J. Zhu, "Increasing Output Power of Switched Reluctance Generator with Three-Level Power Converter," presented at the Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Wuhan, Kina, 2011.
- [108] P. Chancharoensook and M. F. Rahman, "Control of a four-phase switched reluctance generator: experimental investigations," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.*, 1-4 June 2003 2003, vol. 2, pp. 842-848 vol.2, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210333.
- [109] C. Mademlis and I. Kioskeridis, "Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 556-565, 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.852960.
- [110] B. Bilgin, A. Emadi, and M. Krishnamurthy, "Switched reluctance generator with higher number of rotor poles than stator poles," in *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 18-20 June 2012 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC.2012.6243494.
- [111] H. Chen, X. Zan, and X. Wang, "Excitation for establishing voltage of Switched Reluctance generator at low rotor speed," in *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, 16-18 June 2010 2010, pp. 378-381, doi: 10.1109/PEDG.2010.5545826.
- [112] C. Sikder, I. Husain, and Y. Sozer, "Switched Reluctance Generator Control for Optimal Power Generation With Current Regulation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 1, pp. 307-316, 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2270971.



- [113] T. A. d. S. Barros, P. J. d. S. Neto, P. S. N. Filho, A. B. Moreira, and E. R. Filho, "An Approach for Switched Reluctance Generator in a Wind Generation System With a Wide Range of Operation Speed," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8277-8292, 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2697822.
- [114] T. A. S. Barros, P. J. S. Neto, P. S. N. Filho, A. B. Moreira, and E. Ruppert, "Approach for performance optimization of switched reluctance generator in variable-speed wind generation system," *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 114-128, 2016/11/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.064>.
- [115] L. Ke and M. Stiebler, "Voltage Control Of A Switched Reluctance Generator By Means Of Fuzzy Logic Approach," in *Proceedings of the 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments*, 14-15 May 1998 1998, vol. 2, pp. 443-446, doi: 10.1109/OPTIM.1998.707972.
- [116] Y. Sozer and D. A. Torrey, "Closed loop control of excitation parameters for high speed switched-reluctance generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 355-362, 2004, doi: 10.1109/TPEL.2003.823178.
- [117] S. Narla, Y. Sozer, and I. Husain, "Switched Reluctance Generator Controls for Optimal Power Generation and Battery Charging," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 5, pp. 1452-1459, 2012, doi: 10.1109/TIA.2012.2209850.
- [118] D. Yuyu, W. Qing, C. Hao, and Y. Dongsheng, "High efficiency control of switched reluctance generator above base speed," in *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 14-17 Dec. 2016 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914551.
- [119] H. Chen, "Implementation of a Three-Phase Switched Reluctance Generator System for Wind Power Applications," in *2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, 10-13 June 2008 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/ELT.2008.104.
- [120] W. U. N. Fernando, M. Barnes, and O. Marjanovic, "Excitation control and voltage regulation of switched reluctance generators above base speed operation," in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 6-9 Sept. 2011 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2011.6043081.
- [121] T. Sawata, P. Kjaer, C. Cossar, T. J. E. Miller, and Y. Hayashi, "Fault-tolerant operation of single-phase switched reluctance generators," in *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, 27-27 Feb. 1997 1997, vol. 1, pp. 553-558 vol.1, doi: 10.1109/APEC.1997.581514.

- [122] A. Arifin, I. H. Al-Bahadly, and S. C. Mukhopadhyay, "A Comprehensive Simulation Platform for Switched Reluctance Generator System," *WSEAS Transactions on Power Systems*, vol. Vol. 7, No. 4, 2012.
- [123] A. El-Shahat, A. Hunter, M. Rahman, and Y. Wu, "Ultra-High Speed Switched Reluctance Motor-Generator for Turbocharger Applications," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 359-368, 2019/04/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.037>.
- [124] M. Liptak, V. Hrabovcová, P. Rafajdus, and B. Zigmund, "SWITCHED RELUCTANCE MACHINE WITH ASYMMETRIC POWER CONVERTER IN GENERATING MODE," 2007.
- [125] C. Liu, J. Yan, X. Zhu, and D. Liu, "Investigation and practice for basic theory of switched reluctance generators," in *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 27-29 Sept. 2005 2005, vol. 1, pp. 575-579 Vol. 1, doi: 10.1109/ICEMS.2005.202595.
- [126] S. Dixon and B. Fahimi, "Enhancement of output electric power in switched reluctance generators," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03.*, 1-4 June 2003 2003, vol. 2, pp. 849-856 vol.2, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210334.
- [127] B. Ganji, Z. Mansourkiaee, and J. Faiz, "A fast general core loss model for switched reluctance machine," *Energy*, vol. 89, pp. 100-105, 2015/09/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.058>.
- [128] A. Kushwaha and R. Kanagaraj, "Peak-current estimation using simplified current-rise model of switched reluctance generator operating in single-pulse mode," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 120, p. 105971, 2020/09/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105971>.
- [129] N. A. Patil and J. S. Lawler, "Issues in the Control of the Switched Reluctance Motor During Continuous Conduction," in *2007 39th North American Power Symposium*, 30 Sept.-2 Oct. 2007 2007, pp. 534-540, doi: 10.1109/NAPS.2007.4402362.
- [130] S. Song and W. Liu, "A Novel Method for Nonlinear Modeling and Dynamic Simulation of a Four-phase Switched Reluctance Generator System Based on MATLAB/SIMULINK," in *2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 23-25 May 2007 2007, pp. 1509-1514, doi: 10.1109/ICIEA.2007.4318659.
- [131] A. Radun, "Generating with the switched reluctance motor," in *Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94*, 13-17 Feb. 1994 1994, pp. 41-47 vol.1, doi: 10.1109/APEC.1994.316421.



- [132] M. I. Mosaad, N. I. Elkalashy, and M. G. Ashmawy, "Integrating adaptive control of renewable distributed Switched Reluctance Generation and feeder protection coordination," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 452-462, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.017>.
- [133] T. P. Heese, J., "Design of a Switched Reluctance Generator," U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information: Lappeenranta, Finland, 1996.
- [134] J. S. Lawler, J. M. Bailey, J. W. McKeever, and P. J. Otaduy, "Impact of continuous conduction on the constant power speed range of the switched reluctance motor," in *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.*, 15-15 May 2005 2005, pp. 1285-1292, doi: 10.1109/IEMDC.2005.195888.
- [135] H. Hannoun, M. Hilairat, and C. Marchand, "Experimental Validation of a Switched Reluctance Machine Operating in Continuous-Conduction Mode," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 4, pp. 1453-1460, 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2124478.
- [136] V. Troskot, *Regulacija prekidačkog reluktantnog generatora*. Diplomski rad, FESB Split, 2011.
- [137] S. N. Vukosavić, *Electrical Machines*. New York 10013, USA: Springer Science & Business Media, 2013.
- [138] J. Na, Chen, Q., & Ren, X., *Friction Dynamics and Modeling. Adaptive Identification and Control of Uncertain Systems with Non-Smooth Dynamics*, 11-18. . 2018.
- [139] D. U. Nicolai, "Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules," 2014.
- [140] D. a. P. Graovac, M. , "IGBT Power Losses Calculation Using the Data Sheet Parameters," 2009.
- [141] W. Yan, H. Chen, K. Wang, and L. Chen, "Dynamic circuit model considering core losses and phase interaction for switched reluctance machines," *Iet Electric Power Applications*, vol. 12, pp. 826-836, 2018.
- [142] A. Garcia Asuero, A. Sayago, and G. González, "The Correlation Coefficient: An Overview," *Critical Reviews in Analytical Chemistry - CRIT REV ANAL CHEM*, vol. 36, pp. 41-59, 01/01 2006, doi: 10.1080/10408340500526766.
- [143] D. Beriber and A. Talha, "MPPT techniques for PV systems," in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 13-17 May 2013 2013, pp. 1437-1442, doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635826.
- [144] N. Verma, A. Jain, Nishi, H. Ahuja, and G. Singh, "Maximum Power Point Tracking MPPT Methods for Photovoltaic Modules," in *2021 International*

*Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, 4-5 March 2021 2021, pp. 223-227, doi: 10.1109/ICACITE51222.2021.9404571.

## PRILOG A

### Parametri prekidačkog reluktantnog stroja

Broj faznih namota: 4

Broj statorskih polova: 8

Broj rotorskih polova: 6

Nazivna snaga: 1,1 kW

Nazivna struja: 6 A

Nazivna brzina vrtnje: 2000 o/min

Vanjski promjer statora:  $d_{sv} = 135$  mm

Unutarnji promjer statora:  $d_{su} = 80$  mm

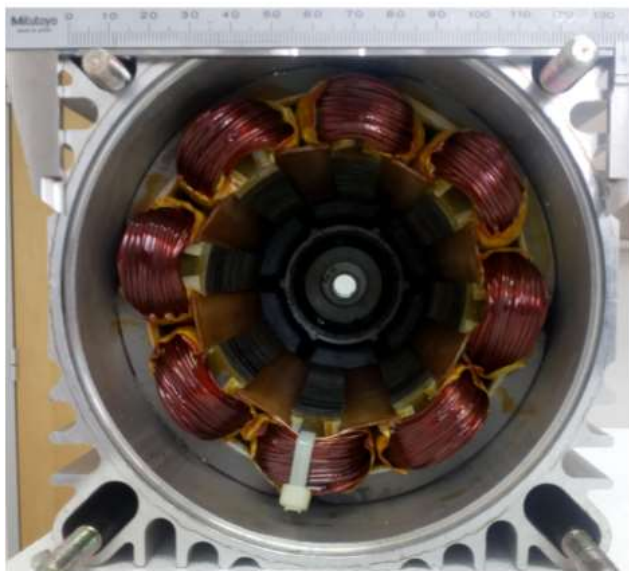
Promjer rotora:  $d_r = 79,5$  mm

Duljina stroja: 300 mm

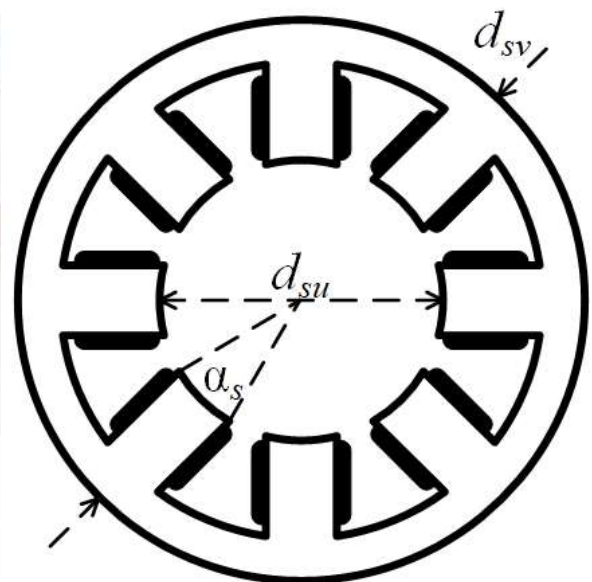
Luk storskog pola:  $\alpha_s = 22^\circ$

Luk rotorskog pola:  $\alpha_r = 24^\circ$

Broj namota po fazi: 300

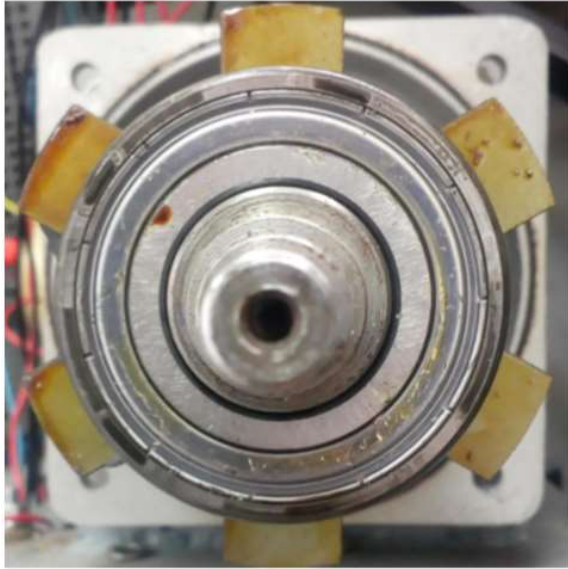


a)

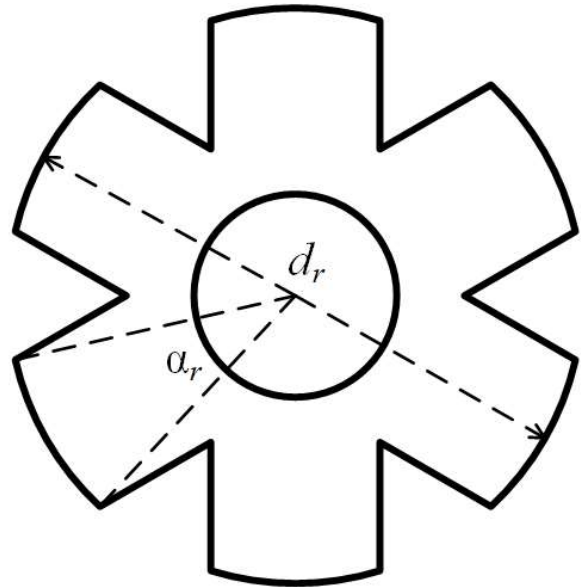


b)

Slika A.1. Fotografija statora SRM-a (a) i skica poprečnog presjeka statora (b)



a)



b)

*Slika A.2. Fotografija rotora SRM-a i skica poprečnog presjeka rotora (b)*

### **Parametri istosmjernog stroja**

Nazivna snaga: 1,1 kW

Nazivna struja armature: 9 A

Maksimalna brzina vrtnje: 3000 o/min

Nazivni napon: 115 V

Napon uzbuđe: 110 V

Struja uzbuđe: 0,52 A

## PRILOG B

### Koeficijenti aproksimacijskih polinoma

$$a_{pp1} = 3,275 \cdot 10^{-1}$$

$$a_{pp2} = -8,9117 \cdot 10^{-3}$$

$$a_{pp3} = -1,2256 \cdot 10^{-2}$$

$$a_{pp4} = 1,9876 \cdot 10^{-3}$$

$$a_{pp5} = -9,0779 \cdot 10^{-5}$$

$$a_{pm1} = 1,5588 \cdot 10^{-1}$$

$$a_{pm2} = -4,5792 \cdot 10^{-3}$$

$$a_{pm3} = -6,8236 \cdot 10^{-3}$$

$$a_{pm4} = 9,3844 \cdot 10^{-4}$$

$$a_{pm5} = -3,9258 \cdot 10^{-5}$$

$$a_{pn} = 2,6393 \cdot 10^{-2}$$

$$a_{mt0} = -1,65 \cdot 10^{-2}$$

$$a_{mt1} = 1,03 \cdot 10^{-3}$$

$$a_{mt2} = 5,67 \cdot 10^{-5}$$

$$a_{mt3} = -2,48 \cdot 10^{-6}$$

$$a_{mt4} = -9,16 \cdot 10^{-8}$$

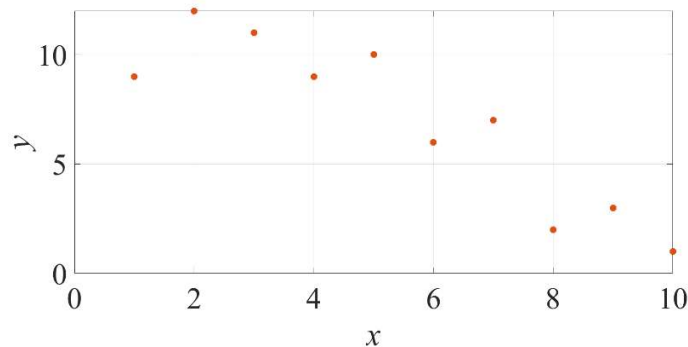
## PRILOG C

### Algoritam za filtriranje podataka

Razvijeni algoritam za filtriranje podataka ima za cilj minimizirati mjernu pogrešku senzora fazne struje te ovisnost jedne varijable o drugoj učiniti glatkom krivuljom koja ima samo jedan maksimum. Algoritam za filtriranje podataka, napisan u programu Matlab, bit će objašnjen na primjeru funkcijske ovisnosti  $y=f(x)$  zadane tablično. Ovaj kod glasi:

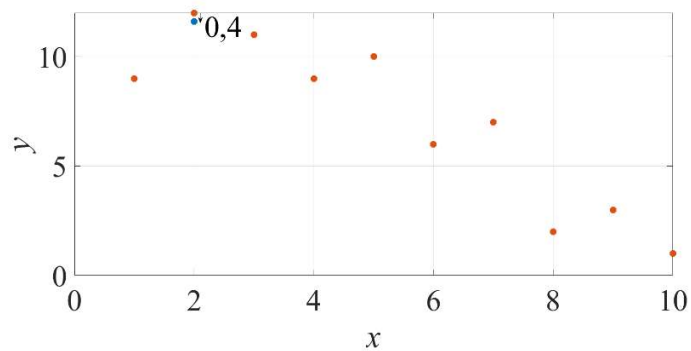
```
1: x=[1:1:10];
2: y=[9 12 11 9 10 6 7 2 3 1];
3: for j=1:5
4:   for i=2:9
5:     y(i)=y(i)-0.1*((y(i)-y(i+1))-(y(i-1)-y(i)));
6:   end
7: end
```

Na slici C.1 prikazana je funkcija  $y=f(x)$  koja je definirana 1. i 2. linijom gornjeg programskog koda.



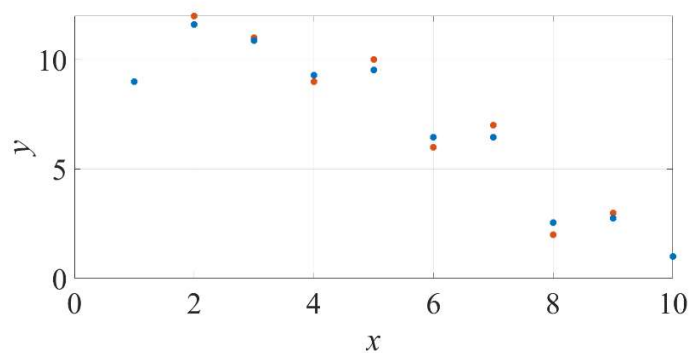
Slika C.1. Prikaz funkcije  $y=f(x)$  koja je definirana 1. i 2. linijom programskog koda

5. linija koda izvršava se unutar dvije *for* petlje. Unutarnja *for* petlja izvršava se na svim podacima definiranim nizom  $y$  osim prvog i zadnjeg. Ta dva podatka algoritam ne mijenja. Moguće ih je zadati prije izvršenja algoritma kao rubne uvjete. Broj izvršavanja vanjske *for* petlje određuje se metodom pokušaja i pogreške. Koeficijent 0,1 u 5. liniji koda također se određuje metodom pokušaja i pogreške. On određuje kojim intenzitetom će se pomicati navedeni podaci. Izvršavanjem 5. linije koda samo nad drugim podatkom funkcije  $y$  taj podatak s pomiče prema dolje za 0,4 što je prikazano slikom C.2.



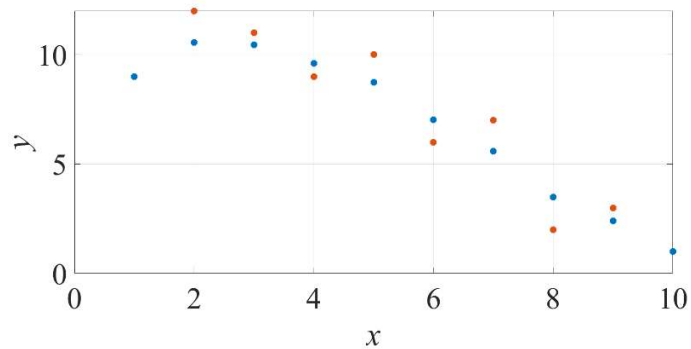
Slika C.2. Prikaz točaka funkcije  $y=f(x)$  prije (crvene točke) i nakon (plava točka) što se 5. linija koda izvrši nad drugim podatkom funkcije  $y=f(x)$

Izvršavanjem unutarnje *for* petlje nad svim podacima iz niza  $y$  dobiva se rezultat prikazan na slici C.3 pri čemu plave točke pokazuju položaje novih i pomaknutih pojedinih točaka funkcije  $y$ .



Slika C.3 Prikaz točaka funkcije  $y=f(x)$  prije (crvene točke) i nakon (plave točke) što se unutarnja *for* petlja izvrši nad svim točkama funkcije  $y=f(x)$

Ako se vanjska *for* petlja izvrši 5 puta kao što je definirano 3. linijom koda dobiva se rezultat prikazan na slici C.4.

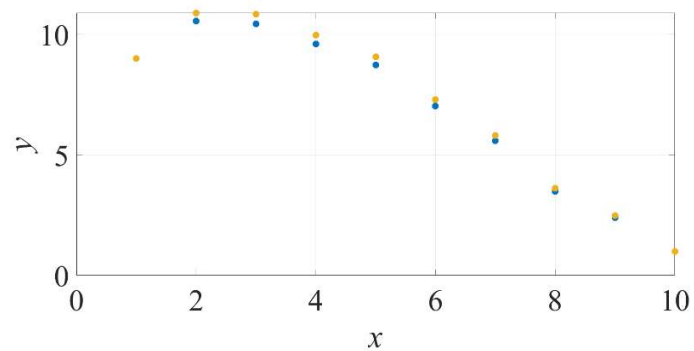


Slika C.4. Prikaz točaka funkcije  $y=f(x)$  prije (crvene točke) i nakon (plave točke) što se vanjska for petlja izvrši 5 puta nad svim točkama funkcije  $y=f(x)$

U nastavku se nalazi modificirani algoritam za filtriranje podataka. U tom kodu je u vanjsku *for* petlju dodana *while* petlja koja osigurava da suma razlika između originalnih i pomaknutih podataka bude manja po apsolutnoj vrijednosti od 0,001 kako se fizikalnost ovisnosti  $y=f(x)$  ne bi narušila. Na slici C.5 žutim točkama prikazan je rezultat dobiven primjenom koda navedenog u nastavku.

```
x=[1:1:10];
y=[9 12 11 9 10 6 7 2 3 1];
y1=y;
for j=1:5
    for i=2:9
        y(i)=y(i)-0.1*((y(i)-y(i+1))-(y(i-1)-y(i)));
    end
    e=999;
    while abs(e)>0.001
        e=0;
        for n=2:9
            e=e+(y1(n)-y(n));
        end
        y(2:9)=y(2:9)*(1+0.0001*e);
    end
end
```





*Slika C.5. Prikaz točaka funkcije  $y=f(x)$  bez primjene (plave točke) i uz primjenu (žute točke) while petlje*

Također, suma razlika između polaznih točaka funkcije  $y=f(x)$  označenih crvenim točkama na slici C.1 i žutih točaka na slici C.5. iznosi po apsolutnoj vrijednosti manje od 0,001.

## PRILOG D

### Sklopni gubici tranzistora

Sklopni gubici tranzistora određeni su sljedećom jednadžbom:

$$P_{skl} = \frac{n}{60} \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{i_{iskl}}{24}\right) \cdot \left(\frac{u}{800}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{22}{5}\right)^{0,15} \quad (D.1)$$

gdje je

$n$  brzina vrtnje [o/min]

$P_{skl}$  sklopni gubici tranzistora [mW]

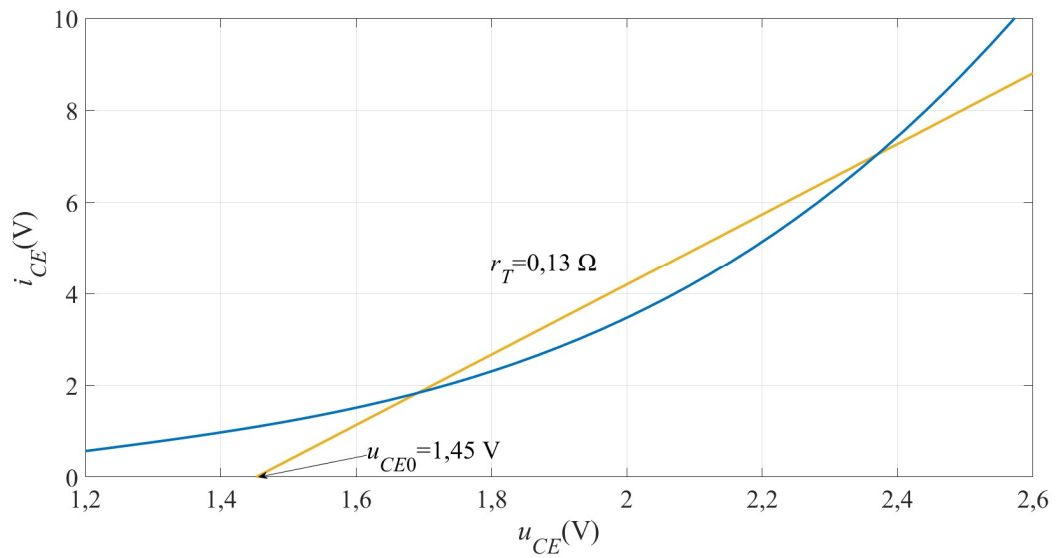
$i_{iskl}$  trenutna struja isklapanja tranzistora [A]

$u$  trenutni iznos napona tranzistora na početku uklapanja ili na kraju isklapanja [V]

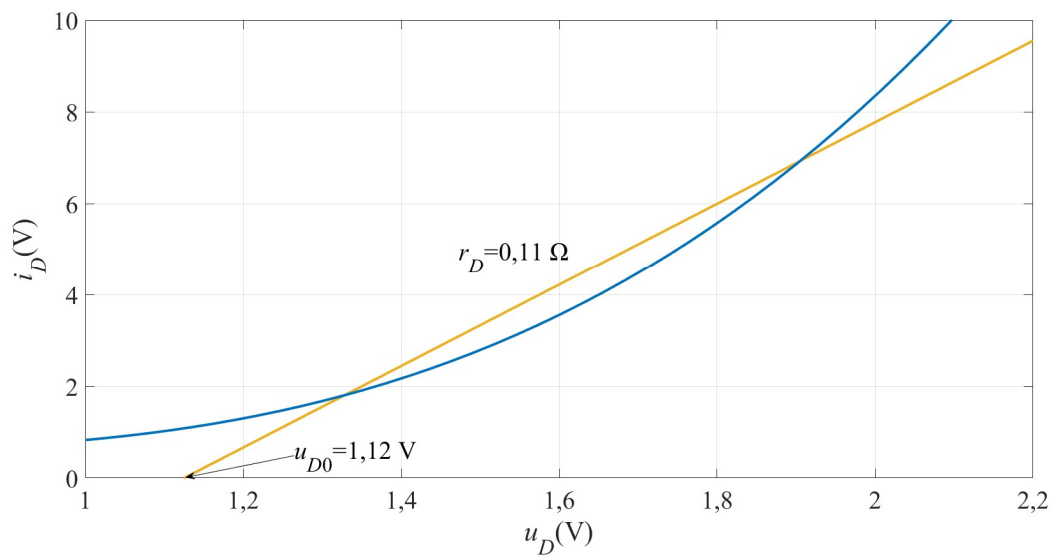
U jednom okretaju rotora tranzistori se uklpe i isklope 6 puta jer kraj svakog statorskog pola prođe svih 6 rotorskih polova. Dijeljenjem brzine vrtnje se 60 dobiva se broj okretaja SRG-a u jednoj sekundi. Množenjem tog broja sa 6 dobiva se sklopna frekvencija tranzistora. Ona pri brzini vrtnje 3000 o/min iznosi 300 Hz, a pri 2000 o/min iznosi 200 Hz. IGBT tranzistor (tip IRG4PH50UD) je testiran na naponu 800 V, nazivna struja 24 A i za te vrijednosti energija isklapanja tranzistora iznosi 1,5 mJ. U kataloškim podacima navedena je ovisnost ukupnih sklopnih gubitaka od otporu geita pri čemu se pretpostavlja da i ovisnost gubitaka isklapanja ovisi na isti način. Navedeni su podaci za otpor geita 5  $\Omega$ , a u pretvaraču je korišten otpor od 22  $\Omega$ .

### Gubici vođenja tranzistora i dioda

Na slikama D.1 i D.2 prikazane izlazne karakteristike tranzistora (tip IRG4PH50UD) i porednih dioda tog tranzistora diode. Karakteristike su prikazane za temperaturu 25 °C. Karakteristike su linearizirane da bi se odredio njihov napon praga i dinamički otpor.



Slika D.1. Izlazna karakteristika tranzistora tipa IRG4PH50UD



Slika D.2. Izlazna karakteristika poredne diode tranzistora tipa IRG4PH50UD

Sljedećim jednadžbama određuju se gubici vođenja tranzistora i dioda:

$$\begin{aligned}
 P_T &= u_{CE0} \cdot I_{sr,T} + r_C \cdot I_{ef,T}^2 \\
 P_D &= u_{D0} \cdot I_{sr,D} + r_D \cdot I_{ef,D}^2
 \end{aligned}
 \tag{D.2}$$

gdje je

$u_{CE0}$  napon praga tranzistora

$u_{D0}$  napon praga diode

$r_T$  dinamički otpor tranzistora

$r_D$  dinamički otpor diode

$I_{sr,T}$  srednja vrijednost struje tranzistora

$I_{ef,T}$  efektivna vrijednost struje tranzistora

$I_{sr,D}$  srednja vrijednost struje diode

$I_{ef,D}$  efektivna vrijednost struje diode

## Gubici pretvarača

U asimetričnom mosnom pretvaraču ima 8 tranzistora. Ukupni poluvodički gubici pretvarača dobivaju se uvrštavanjem vrijednosti dobivenih jednadžbama (D.1) i (D.2) u sljedeću jednadžbu:

$$P_p = 8 \cdot (P_{skl} + P_T + P_D) \quad (D.3)$$

Ukupni gubici asimetričnog mosnog pretvarača i SRG-a dobiveni su kao razlika eksperimentalno određene ulazne snage i izlazne snage što je opisano sljedećom jednadžbom:

$$P_g = M \cdot \omega - \frac{u^2}{R_t} \quad (D.4)$$

U tablici D.1 za eksperimentalno realizirane radne točke i položaje uklapanja navedeni su ukupni gubici asimetričnog mosnog pretvarača i SRG-a dobiveni jednadžbom (D.4) te samog pretvarača dobiveni jednadžbom (D.3). U zadnjem stupcu istaknut je udio gubitaka pretvarača u ukupnim gubicima.

Tablica D.1. Otpor trošila, položaj uklapanja, brzina vrtnje, napon između sabirnica te gubici zabilježeni u realiziranim eksperimentima

Br. mj. točke	$R_t$ ( $\Omega$ )	$\theta_u$ ( $^\circ$ )	$\omega$ (o/min)	$u$ (V)	$P_p$ (W)	$P_g$ (W)	$\frac{P_p}{P_g} \cdot 100$ (%)
1	110	-15	2000	150	8,83	103,84	8,50
2	110	-15	2000	200	12,17	145,70	8,35
3	110	-15	2000	250	15,87	178,20	8,91
4	110	-15	2000	300	20,05	227,63	8,81

5	110	-15	3000	150	7,27	67,85	10,71
6	110	-15	3000	200	9,97	95,12	10,48
7	110	-15	3000	250	12,85	129,97	9,89
8	110	-15	3000	300	15,92	146,17	10,89
9	110	-10	2000	150	7,72	95,58	8,07
10	110	-10	2000	200	10,55	130,05	8,12
11	110	-10	2000	250	13,48	161,82	8,33
12	110	-10	2000	300	16,85	189,02	8,91
13	110	-10	3000	150	6,84	71,80	9,52
14	110	-10	3000	200	9,39	85,50	10,99
15	110	-10	3000	250	12,10	120,42	10,05
16	110	-10	3000	300	14,88	140,52	10,59
17	110	-5	2000	150	7,14	90,28	7,91
18	110	-5	2000	200	9,84	110,16	8,93
19	110	-5	2000	250	12,36	136,76	9,03
20	110	-5	2000	300	14,83	160,78	9,22
21	110	-5	3000	150	6,41	67,28	9,52
22	110	-5	3000	200	8,90	74,48	11,95
23	110	-5	3000	250	11,39	105,81	10,76
24	110	-5	3000	300	13,95	127,04	10,98
25	65	-15	2000	150	12,62	115,33	10,94
26	65	-15	2000	200	17,55	151,63	11,58
27	65	-15	2000	250	23,28	206,33	11,28
28	65	-15	3000	150	10,93	66,25	16,50
29	65	-15	3000	200	15,15	106,29	14,25
30	65	-15	3000	250	19,47	180,17	10,81
31	65	-15	3000	300	23,90	188,20	12,70
32	65	-10	2000	150	11,90	90,11	13,20
33	65	-10	2000	200	16,55	121,33	13,64
34	65	-10	2000	250	21,70	138,74	15,64
35	65	-10	3000	150	11,23	58,21	19,29
36	65	-10	3000	200	15,64	90,23	17,34
37	65	-10	3000	250	19,64	188,90	10,40
38	65	-10	3000	300	24,22	179,63	13,49
39	65	-5	2000	150	11,59	94,12	12,31
40	65	-5	2000	200	16,31	101,84	16,01
41	65	-5	2000	250	21,13	125,14	16,89
42	65	-5	3000	150	11,35	60,26	18,83
43	65	-5	3000	200	15,93	73,67	21,62
44	65	-5	3000	250	20,58	178,71	11,52
45	65	-5	3000	300	25,61	188,40	13,59

46	45	-15	2000	150	17,34	158,35	10,95
47	45	-15	2000	200	24,57	217,64	11,29
48	45	-15	3000	150	15,82	124,16	12,74
49	45	-15	3000	200	22,10	160,93	13,73
50	45	-15	3000	250	28,35	185,64	15,27
51	45	-10	2000	150	17,48	130,49	13,39
52	45	-10	2000	200	24,92	172,14	14,48
53	45	-10	3000	150	16,88	105,29	16,03
54	45	-10	3000	200	23,98	149,79	16,01
55	45	-10	3000	250	30,64	199,06	15,39
56	45	-5	2000	150	18,02	127,99	14,08
57	45	-5	2000	200	26,38	163,07	16,18
58	45	-7	3000	150	19,63	107,29	18,30

## PRILOG E

### Radne točke SRG-a s pripadajućim varijablama kandidatima

Tablica E.1. Radne točke SRG-a s pripadajućim varijablama kandidatima

Br. mj. točke	Radna točka	$\omega$ (o/min)	$u$ (V)	$R_t$ ( $\Omega$ )	$P$ (W)	$\theta_u$ ( $^\circ$ )	$I_{sr}$ (A)	$I_{ef}$ (A)	$\varepsilon$	$P_g$ (W)
1	1 - 1	2000	150	110	204,55	-15	0,44	0,59	0,48	53,38
	1 - 2	2000	150	110	204,55	-13	0,42	0,58	0,46	55,37
	1 - 3	2000	150	110	204,55	-11	0,40	0,57	0,44	56,22
4	1 - 4	2000	150	110	204,55	-9	0,39	0,56	0,42	60,52
5	1 - 5	2000	150	110	204,55	-7	0,38	0,56	0,40	60,47
6	1 - 6	2000	150	110	204,55	-5	0,37	0,57	0,38	57,89
7	1 - 7	2000	150	110	204,55	-3	0,36	0,58	0,37	60,16
8	1 - 8	2000	150	110	204,55	-1	0,36	0,60	0,35	52,10
9	1 - 9	2000	150	110	204,55	1	0,36	0,62	0,34	52,45
10	1 - 10	2000	150	110	204,55	3	0,36	0,65	0,33	50,04
11	1 - 11	2000	150	110	204,55	5	0,38	0,69	0,33	52,78
12	2 - 1	2000	200	110	363,64	-15	0,59	0,79	0,47	114,50
13	2 - 2	2000	200	110	363,64	-13	0,56	0,77	0,45	107,68
14	2 - 3	2000	200	110	363,64	-11	0,53	0,75	0,43	101,00
15	2 - 4	2000	200	110	363,64	-9	0,51	0,75	0,41	95,06
16	2 - 5	2000	200	110	363,64	-7	0,49	0,74	0,39	86,29
17	2 - 6	2000	200	110	363,64	-5	0,48	0,75	0,37	83,80
18	2 - 7	2000	200	110	363,64	-3	0,47	0,76	0,36	78,51
19	2 - 8	2000	200	110	363,64	-1	0,47	0,78	0,34	81,00
20	2 - 9	2000	200	110	363,64	1	0,47	0,81	0,32	76,37
21	2 - 10	2000	200	110	363,64	3	0,48	0,85	0,32	67,39
22	2 - 11	2000	200	110	363,64	5	0,50	0,92	0,32	72,28
23	3 - 1	2000	250	110	568,18	-15	0,74	0,98	0,47	135,57
24	3 - 2	2000	250	110	568,18	-13	0,70	0,96	0,44	129,99
25	3 - 3	2000	250	110	568,18	-11	0,66	0,93	0,42	127,60
26	3 - 4	2000	250	110	568,18	-9	0,63	0,92	0,40	121,50
27	3 - 5	2000	250	110	568,18	-7	0,61	0,92	0,38	116,24

28	3 - 6	2000	250	110	568,18	-5	0,59	0,93	0,36	109,19
29	3 - 7	2000	250	110	568,18	-3	0,58	0,95	0,34	102,30
30	3 - 8	2000	250	110	568,18	-1	0,58	0,97	0,33	93,22
31	3 - 9	2000	250	110	568,18	1	0,58	1,01	0,32	88,71
32	3 - 10	2000	250	110	568,18	3	0,59	1,07	0,31	94,70
33	3 - 11	2000	250	110	568,18	5	0,63	1,17	0,32	96,25
34	4 - 1	2000	300	110	818,18	-15	0,90	1,20	0,48	169,94
35	4 - 2	2000	300	110	818,18	-13	0,84	1,16	0,44	162,51
36	4 - 3	2000	300	110	818,18	-11	0,79	1,12	0,42	149,57
37	4 - 4	2000	300	110	818,18	-9	0,75	1,11	0,39	140,27
38	4 - 5	2000	300	110	818,18	-7	0,72	1,11	0,37	136,31
39	4 - 6	2000	300	110	818,18	-5	0,71	1,12	0,35	132,09
40	4 - 7	2000	300	110	818,18	-3	0,69	1,14	0,33	121,20
41	4 - 8	2000	300	110	818,18	-1	0,69	1,17	0,32	116,54
42	4 - 9	2000	300	110	818,18	1	0,70	1,22	0,31	107,74
43	4 - 10	2000	300	110	818,18	3	0,72	1,31	0,31	113,68
44	4 - 11	2000	300	110	818,18	5	0,78	1,46	0,33	129,67
45	5 - 1	3000	150	110	204,55	-15	0,38	0,50	0,41	48,75
46	5 - 2	3000	150	110	204,55	-13	0,36	0,50	0,40	44,03
47	5 - 3	3000	150	110	204,55	-11	0,35	0,50	0,38	42,66
48	5 - 4	3000	150	110	204,55	-9	0,34	0,50	0,36	52,42
49	5 - 5	3000	150	110	204,55	-7	0,34	0,51	0,34	41,82
50	5 - 6	3000	150	110	204,55	-5	0,34	0,52	0,33	41,44
51	5 - 7	3000	150	110	204,55	-3	0,33	0,53	0,32	35,09
52	5 - 8	3000	150	110	204,55	-1	0,33	0,55	0,31	45,84
53	5 - 9	3000	150	110	204,55	1	0,34	0,58	0,30	44,28
54	5 - 10	3000	150	110	204,55	3	0,37	0,63	0,31	37,76
55	6 - 1	3000	200	110	363,64	-15	0,50	0,67	0,39	81,58
56	6 - 2	3000	200	110	363,64	-13	0,47	0,66	0,38	76,46
57	6 - 3	3000	200	110	363,64	-11	0,46	0,66	0,36	75,66
58	6 - 4	3000	200	110	363,64	-9	0,45	0,66	0,35	73,85
59	6 - 5	3000	200	110	363,64	-7	0,44	0,67	0,33	66,75
60	6 - 6	3000	200	110	363,64	-5	0,44	0,68	0,32	64,00
61	6 - 7	3000	200	110	363,64	-3	0,43	0,69	0,31	65,17
62	6 - 8	3000	200	110	363,64	-1	0,43	0,72	0,30	60,28
63	6 - 9	3000	200	110	363,64	1	0,45	0,76	0,29	59,22



64	6 - 10	3000	200	110	363,64	3	0,48	0,84	0,30	52,69
65	7 - 1	3000	250	110	568,18	-15	0,62	0,84	0,39	118,13
66	7 - 2	3000	250	110	568,18	-13	0,59	0,82	0,37	112,63
67	7 - 3	3000	250	110	568,18	-11	0,57	0,81	0,35	110,37
68	7 - 4	3000	250	110	568,18	-9	0,55	0,82	0,33	102,73
69	7 - 5	3000	250	110	568,18	-7	0,54	0,83	0,32	94,87
70	7 - 6	3000	250	110	568,18	-5	0,54	0,84	0,31	89,90
71	7 - 7	3000	250	110	568,18	-3	0,53	0,86	0,30	72,77
72	7 - 8	3000	250	110	568,18	-1	0,53	0,89	0,29	68,25
73	7 - 9	3000	250	110	568,18	1	0,55	0,95	0,28	66,27
74	7 - 10	3000	250	110	568,18	3	0,61	1,07	0,30	94,54
75	8 - 1	3000	300	110	818,18	-15	0,74	1,01	0,38	145,29
76	8 - 2	3000	300	110	818,18	-13	0,70	0,98	0,37	143,84
77	8 - 3	3000	300	110	818,18	-11	0,67	0,97	0,35	121,43
78	8 - 4	3000	300	110	818,18	-9	0,65	0,97	0,33	124,08
79	8 - 5	3000	300	110	818,18	-7	0,64	0,98	0,31	115,18
80	8 - 6	3000	300	110	818,18	-5	0,64	1,01	0,30	105,93
81	8 - 7	3000	300	110	818,18	-3	0,63	1,03	0,29	105,94
82	8 - 8	3000	300	110	818,18	-1	0,64	1,07	0,28	93,45
83	8 - 9	3000	300	110	818,18	1	0,67	1,15	0,28	98,65
84	8 - 10	3000	300	110	818,18	3	0,75	1,32	0,30	110,02
85	9 - 1	2000	150	65	346,15	-15	0,61	0,83	0,37	100,51
86	9 - 2	2000	150	65	346,15	-13	0,59	0,82	0,35	93,37
87	9 - 3	2000	150	65	346,15	-11	0,57	0,82	0,34	86,22
88	9 - 4	2000	150	65	346,15	-9	0,55	0,82	0,32	87,69
89	9 - 5	2000	150	65	346,15	-7	0,54	0,83	0,31	87,39
90	9 - 6	2000	150	65	346,15	-5	0,54	0,84	0,30	88,45
91	9 - 7	2000	150	65	346,15	-3	0,54	0,87	0,29	84,58
92	9 - 8	2000	150	65	346,15	-1	0,55	0,91	0,29	81,50
93	9 - 9	2000	150	65	346,15	1	0,57	0,97	0,30	80,67
94	10 - 1	2000	200	65	615,38	-15	0,82	1,11	0,38	136,50
95	10 - 2	2000	200	65	615,38	-13	0,79	1,09	0,37	132,31
96	10 - 3	2000	200	65	615,38	-11	0,75	1,08	0,35	132,71
97	10 - 4	2000	200	65	615,38	-9	0,73	1,09	0,33	124,47
98	10 - 5	2000	200	65	615,38	-7	0,72	1,09	0,32	115,04
99	10 - 6	2000	200	65	615,38	-5	0,71	1,12	0,31	103,75

100	10 - 7	2000	200	65	615,38	-3	0,71	1,15	0,30	106,55
101	10 - 8	2000	200	65	615,38	-1	0,72	1,20	0,30	108,36
102	10 - 9	2000	200	65	615,38	1	0,77	1,31	0,31	124,18
103	11 - 1	2000	250	65	961,54	-15	1,03	1,39	0,39	183,93
104	11 - 2	2000	250	65	961,54	-13	0,97	1,36	0,37	174,85
105	11 - 3	2000	250	65	961,54	-11	0,93	1,35	0,35	143,38
106	11 - 4	2000	250	65	961,54	-9	0,90	1,35	0,33	133,02
107	11 - 5	2000	250	65	961,54	-7	0,88	1,35	0,32	123,03
108	11 - 6	2000	250	65	961,54	-5	0,87	1,38	0,31	126,72
109	11 - 7	2000	250	65	961,54	-3	0,88	1,43	0,30	121,97
110	11 - 8	2000	250	65	961,54	-1	0,90	1,51	0,30	117,77
111	11 - 9	2000	250	65	961,54	1	0,98	1,68	0,32	147,49
112	12 - 1	3000	150	65	346,15	-15	0,54	0,74	0,33	61,44
113	12 - 2	3000	150	65	346,15	-13	0,53	0,74	0,32	72,99
114	12 - 3	3000	150	65	346,15	-11	0,52	0,75	0,31	64,25
115	12 - 4	3000	150	65	346,15	-9	0,51	0,75	0,30	61,72
116	12 - 5	3000	150	65	346,15	-7	0,51	0,77	0,29	61,51
117	12 - 6	3000	150	65	346,15	-5	0,52	0,81	0,28	61,85
118	12 - 7	3000	150	65	346,15	-3	0,54	0,85	0,29	64,28
119	13 - 1	3000	200	65	615,38	-15	0,72	0,99	0,32	108,82
120	13 - 2	3000	200	65	615,38	-13	0,70	0,99	0,30	103,91
121	13 - 3	3000	200	65	615,38	-11	0,68	0,99	0,30	101,44
122	13 - 4	3000	200	65	615,38	-9	0,67	0,99	0,29	89,71
123	13 - 5	3000	200	65	615,38	-7	0,67	1,02	0,28	90,24
124	13 - 6	3000	200	65	615,38	-5	0,68	1,06	0,28	87,86
125	13 - 7	3000	200	65	615,38	-3	0,71	1,13	0,28	87,27
126	14 - 1	3000	250	65	961,54	-15	0,88	1,21	0,32	130,41
127	14 - 2	3000	250	65	961,54	-13	0,86	1,21	0,30	118,24
128	14 - 3	3000	250	65	961,54	-11	0,83	1,20	0,29	110,65
129	14 - 4	3000	250	65	961,54	-9	0,82	1,22	0,28	108,92
130	14 - 5	3000	250	65	961,54	-7	0,82	1,24	0,27	100,67
131	14 - 6	3000	250	65	961,54	-5	0,83	1,29	0,27	100,36
132	14 - 7	3000	250	65	961,54	-3	0,87	1,40	0,28	105,60
133	15 - 8	3000	300	65	1384,62	-15	1,04	1,43	0,32	122,49
134	15 - 1	3000	300	65	1384,62	-13	1,01	1,42	0,30	117,49
135	15 - 2	3000	300	65	1384,62	-11	0,98	1,42	0,29	115,48

136	15 - 3	3000	300	65	1384,62	-9	0,97	1,44	0,28	105,90
137	15 - 4	3000	300	65	1384,62	-7	0,97	1,48	0,27	98,61
138	15 - 5	3000	300	65	1384,62	-5	0,99	1,55	0,27	110,13
139	15 - 6	3000	300	65	1384,62	-3	1,07	1,72	0,28	125,44
140	16 - 1	2000	150	45	500,00	-15	0,81	1,12	0,33	132,95
141	16 - 2	2000	150	45	500,00	-13	0,79	1,11	0,32	130,63
142	16 - 3	2000	150	45	500,00	-11	0,77	1,11	0,31	123,87
143	16 - 4	2000	150	45	500,00	-9	0,76	1,12	0,30	121,29
144	16 - 5	2000	150	45	500,00	-7	0,76	1,15	0,30	120,82
145	16 - 6	2000	150	45	500,00	-5	0,76	1,19	0,29	126,92
146	16 - 7	2000	150	45	500,00	-3	0,80	1,29	0,30	130,73
147	17 - 1	2000	200	45	888,89	-15	1,08	1,48	0,33	186,13
148	17 - 2	2000	200	45	888,89	-13	1,05	1,47	0,32	180,74
149	17 - 3	2000	200	45	888,89	-11	1,02	1,48	0,31	176,44
150	17 - 4	2000	200	45	888,89	-9	1,00	1,49	0,30	172,09
151	17 - 5	2000	200	45	888,89	-7	1,00	1,53	0,29	169,56
152	17 - 6	2000	200	45	888,89	-5	1,02	1,61	0,29	172,36
153	17 - 7	2000	200	45	888,89	-3	1,13	1,81	0,31	205,71
154	18 - 1	3000	150	45	500,00	-15	0,73	1,02	0,29	95,39
155	18 - 2	3000	150	45	500,00	-13	0,73	1,04	0,28	101,82
156	18 - 3	3000	150	45	500,00	-11	0,73	1,06	0,27	96,88
157	18 - 4	3000	150	45	500,00	-9	0,74	1,10	0,27	100,77
158	18 - 5	3000	150	45	500,00	-7	0,80	1,22	0,29	114,95
159	19 - 1	3000	200	45	888,89	-15	0,99	1,38	0,29	157,35
160	19 - 2	3000	200	45	888,89	-13	0,97	1,38	0,28	162,25
161	19 - 3	3000	200	45	888,89	-11	0,97	1,41	0,27	159,18
162	19 - 4	3000	200	45	888,89	-9	0,99	1,48	0,28	158,86
163	20 - 1	3000	250	45	1388,89	-15	1,23	1,71	0,28	205,53
164	20 - 2	3000	250	45	1388,89	-13	1,21	1,72	0,27	197,14
165	20 - 3	3000	250	45	1388,89	-11	1,20	1,75	0,27	184,89
166	20 - 4	3000	250	45	1388,89	-9	1,24	1,86	0,27	199,50

## ŽIVOTOPIS

Šime Grbin rođen je u 9. 1. 1985. u Zadru, Hrvatska. Pohađao je Osnovnu školu Petra Lorinija na Salima i Osnovnu školu Šime Budinića u Zadru. Gimnaziju Franje Petrića pohađao je također u Zadru. 2003. godine upisao je studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB) u Splitu, Sveučilišta u Splitu. Diplomirao je na usmjerenju Električni pogoni i postrojenja 2008. godine. Iste godine zapošljava se u Elektri Zadar kao samostalni inženjer elektrotehnike. Radio je u Odjelu za mjerne uređaje i Odjelu za mjerenje i zaštitu od 2008. do 2014. godine. Trenutno radi u Odjelu za realizaciju investicijskih projekata. Poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije upisuje na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu 2009. godine. Kao koautor do sad je objavio jedan znanstveni rad A kategorije i jedan znanstveni rad C kategorije u zborniku radova međunarodnog znanstvenog skupa.

## **CURRICULUM VITAE**

Šime Grbin was born on January 9, 1985 in Zadar, Croatia. He attended Petar Lorini Primary School in Sali and Šime Budinić Primary School in Zadar. He also attended Franjo Petrić High School in Zadar. In 2003 he enrolled in graduate study in Electrical Engineering (Electrical Power Engineering) at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture of the University of Split. He graduated in 2008 with a specialization in Electrical Power Drives and Plants. In the same year, he was employed at Elektra Zadar as an independent electrical engineer. He worked in the Department for Measuring Devices, and in the Department for Measurement and Protection from 2008 to 2014. He currently works in the Department for Realization of Investment Projects. He enrolled in the postgraduate doctoral study of Electrical engineering and information technology at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split in 2009. So far he has co-authored and published one scientific paper indexed in Scopus and SCI-Expanded, and one professional paper at a domestic symposium.