



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Gintautas Danyla

VALDYMO ĮTAKOS ASINCHRONINIO GENERATORIAUS
EFEKTYVUMUI TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Artūras Kalvaitis

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

VALDYMO ĮTAKOS ASINCHRONINIO GENERATORIAUS
EFEKTYVUMUI TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Artūras Kalvaitis
(data)

Recenzentas

(parašas) Asist. dr. Artūras Baronas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Gintautas Danyla
(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Gintautas Danyla

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Valdymo įtakos asinchroninio generatoriaus efektyvumui tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. Gegužės 20 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Gintauro Danylos**, baigiamasis projektas tema „Valdymo įtakos asinchroninio generatoriaus efektyvumui tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesažiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Danyla, Gintautas. Valdymo įtakos asinchroninio generatoriaus efektyvumui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Artūras Kalvaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros Energetikos Sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: Asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi, apvijos, puslaidininkis, magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymas.

Kaunas, 2018. 69 p.

SANTRAUKA

Tiriamasis darbas skirtas trifazio asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi energetinių efektyvumo parametrų kitimo dėsningumą nustatymui. Kai šio generatoriaus fazinio rotoriaus apvijomis tekančios srovės yra valdomos puslaidininkinio elektros energijos keitiklio, kuris valdomas magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija. Siekiama apibrėžti generatoriaus efektyvumo priklausomybę nuo apkrovos ir sukimosi greičio, kaip tai apibrėžia IEC61800-9-2 standartas.

Šiame tiriamajame darbe sudarytas asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi ir puslaidininkinio elektros energijos keitiklio valdymo matematinis modelis. Modeliavimui parinkti 1,5MW ir 2 MW nominaliosios galios asinchroniniai generatoriai su faziniu rotoriumi. Atlikta gautų rezultatų analizė.

Danyla, Gintautas. Research of Control Influence on Efficiency of Induction Generator: Master's qualification degree / supervisor PhD. Artūras Kalvaitis. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: Doubly-fed induction generator, windings, semiconductor, field orientation control

Kaunas, 2018. 69 p.

SUMMARY

The purpose of this work is to study the change in energy efficiency parameters of doubly-fed induction generator when the speed of the rotor is being varied and the rotor winding currents are controlled by a semiconductor converter with field orientation control. Aim of this work is to define the effect on efficiency of an induction generator when there is a change in speed or load like it is defined by the IEC61800-9-2 standard.

A mathematical model of doubly-fed induction generator and field orientation controlled converter is created. Doubly-fed induction generators of 1,5MW and 2MW power ratings were chosen for modelling. Analysis of the obtained results is provided.

TURINYS

ĮVADAS	11
1. ELEKTROS MAŠINŲ EFEKTYVUMO REGULIAVIMAS.....	12
2. VĖJO ENERGETIKA.....	16
2.1. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi pritaikymas vėjo energetikoje.....	17
3. DINAMINIS MODELIS.....	19
3.1. d-q dinaminis modelis.....	19
3.2. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi matematinis modelis	23
4. VEKTORINIO VALDYMO STRATEGIJOS.....	25
4.1. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymas, paremtas statoriaus magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymu.....	25
4.2. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymas, paremtas tiesioginiu sukimo momento valdymu.....	30
4.3. Tiesioginės sukimo momento valdymo ir magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategijų lyginamoji apžvalga	33
5. MODELIS IR REZULTATAI	34
5.1. Modelio struktūra.....	34
5.2. Valdymo algoritmo realizavimas.....	36
5.3. Tyrimo rezultatai.....	43
IŠVADOS.....	65
LITERATŪRA.....	66
PRIEDAI	70
Priedas 1. Tiriami generatorių darbo taškai ir tyrimo rezultatai	71
Priedas 2. „Isovac 600-65 A“ elektrotechninio plieno galios nuostolių priklausomybė nuo magnetinio srauto tankio.....	73
Priedas 3. 1,5MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi paradiniai duomenys.....	74
Priedas 4. 2MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi paradiniai duomenys.....	75

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. IEC 60034-30 standarto apibrėžiamos variklių efektyvumo klasės	14
1.2 pav. IEC 61800-9-2 standarto apibrėžiami analizuojami elektros pavaros sistemos apkrovos taškai	15
2.1 pav. Vėjo elektrinių rinkos pasiskirstymas pagal vėjo elektrinės tipą	16
2.2 pav. Vėjo elektrinių tipai	17
2.3 pav. Galios priklausomybės nuo vėjo turbino valdymo.....	18
2.4 pav. Principinis, vėjo elektrinės, kurioje įdiegtas asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi, konstrukcijos vaizdas	18
3.1 pav. Atskaitos sistemų ryšys	19
3.2 pav. Dvifazių atskaitos sistemų tarpusavio ryšio grafinis vaizdas	20
3.3 pav. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi atstojamosios schemos d-q atskaitos sistemoje. a - d fazės atstojamoji schema; b – q fazės atstojamoji schema.....	22
4.1 pav. Magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo sistemos principinė schema	25
4.3 pav. Tiesioginės momento valdymo sistemos principinis vaizdas	30
4.4 pav. Histerezės regulatoriai: a- magnetinio srauto, b – elektromagnetinio momento	31
4.5 pav. Rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto valdymas remiantis įtampos vektoriaus erdvine pozicija	32
5.1 pav. Magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategijos matematinio modelio realizavimas.....	34
5.2 pav. Algoritmo, skirto statoriaus trifazių abc sistemos parametrų perskaičiavimui į dvifazės $\alpha\text{-}\beta$ atskaitos sistemos parametrus, realizavimas: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra	36
5.3 pav. Algoritmo, skirto rotoriaus trifazių abc sistemos parametrų perskaičiavimui į dvifazės D-Q atskaitos sistemos parametrus, realizavimas: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra	36
5.4 pav. Algoritmo, skirto rotoriaus dvifazių D-Q atskaitos sistemos parametrų perskaičiavimui į dvifazės d-q atskaitos sistemos parametrus, realizavimas: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra	37
5.5 pav. Erdvinio kampo tarp d-q atskaitos sistemos d ašies ir $\alpha\text{-}\beta$ atskaitos sistemos α ašies apskaičiavimo algoritmas	37
5.6 pav. Rotoriaus srovės atstojamojo vektoriaus projekcijos q ašyje užduoties apskaičiavimo algoritmas	37
5.7 pav. Rotoriaus greičio PI regulatorius: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra.....	38
5.8 pav. Rotoriaus apvijomis tekančios srovės atstojamojo vektoriaus projekcijos d ašyje užduoties apskaičiavimo, remiantis reaktyviosios galios užduotimi, algoritmas.....	38

5.9 pav. Statoriaus reaktyviosios galios PI reguliatoriaus realizavimas. a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra.....	38
5.10 pav. Rotoriaus srovės vektoriaus projekcijos q ašyje dedamosios PI reguliatoriaus: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra	39
5.11 pav. Rotoriaus srovės vektoriaus projekcijos d ašyje dedamosios PI reguliatoriaus a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra	39
5.12 pav. Rotoriaus įtampos vektoriaus projekcijų d ir q ašyse dedamųjų skaičiavimo algoritmas	39
5.13 pav. Rotoriaus įtampos vektoriaus užduoties perskaičiavimo į puslaidininkinio keitiklio valdymo impulsus algoritmas	40
5.14 pav. Generatoriaus apkrovos momento apskaičiavimo algoritmas	40
5.15 pav. Galios grandinės realizavimas	40
5.16 pav. Galios srautų ir naudingumo koeficiento momentinės vertės apskaičiavimo algoritmo realizavimas	41
5.17 pav. 1,5MW generatoriaus apkrovos momentas M_{apk} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$	43
5.18 pav. 1,5MW generatoriaus elektromagnetinis sukimo momentas M_{em} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$	44
5.19 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$	44
5.20 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$	45
5.21 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	45
5.22 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	46
5.23 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	47
5.24 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	47
5.25 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	48
5.26 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	48

5.27 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$	49
5.28 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$	49
5.29 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	50
5.30 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$	50
5.31 pav. 1,5MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	51
5.32 pav. 1,5MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	51
5.33 pav. 1,5MW generatoriaus statoriaus srovė i_s , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	52
5.34 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovė i_r , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	52
5.35 pav. 2MW generatoriaus apkrovos momentas M_{apk} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$	53
5.36 pav. 2MW generatoriaus elektromagnetinis sukimo momentas M_{em} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$	53
5.37 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$	54
5.38 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=1,04\omega_s$	54
5.39 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	55
5.40 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	55
5.41 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	56
5.42 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	56
5.43 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	57
5.44 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	57

5.45 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$	58
5.46 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	58
5.47 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	59
5.48 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$	59
5.49 pav. 2MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	60
5.50 pav. 2MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$	60
5.51 pav. 2MW generatoriaus statoriaus srovė i_s , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	61
5.52 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovė i_r , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$	61
5.53 pav. 1,5 MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi vidutinio efektyvumo η kitimo grafikai	62
5.54 pav. 2 MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi vidutinio efektyvumo η kitimo grafikai.....	63

LENTELIŲ SĄRAŠAS

4.1 lentelė. Puslaidininkinio elektros energijos keitiklio perjungimų lentelė.....	32
5.1 lentelė. Asinchroninių generatorių su faziniu rotoriumi parametrai.....	35
5.2 lentelė. PI reguliatorių koeficientai	42

IVADAS

Didėjantis elektros energijos poreikis ir noras pritaikyti gamtoje atsinaujinančius energijos šaltinius pastūmėjo technologijų, kurios atsinaujinančių energijos šaltinių pagalba generuoja elektros energiją, kūrimą ir tobulinimą. Vėjo energijos panaudojimas tapo viena, didžiausią susidomėjimą visame pasaulyje sukūrusia ir besiplečiančia atsinaujinančia energijos rūšimi. Šios priežastys sukėlė susidomėjimą vėjo elektrinių elektros energijos generavimo sistemų tyrinėjimais.

Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi pritaikymas kintančio greičio vėjo elektrinių technologijoje tapo viena iš tyrinėjimo sričių. Asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi gali stabiliai funkcionuoti plačiame vėjo turbinos sukimosi greičio kitimo diapazone, kuris sudaro ± 30 procentų nominalaus generatoriaus veleno sukimosi greičio. O šio tipo vėjo elektrinės minimos, kaip vienos efektyviausių [6]. Nors efektyvumo sąvoką apibrėžti sudėtinga, kai generatoriaus darbo taškas nėra pastovus. Standartai IEC 60034-30-1 ir IEC 60034-30-2 pasauliniu mastu apibrėžia tik elektros variklių efektyvumą nominaliame darbo taške, kai variklių nominali galia yra diapazone nuo 0,12 iki 1000 kW [1][2][4]. Tačiau efektyvumo apribojimai gali būti pritaikyti ir elektros generatoriams.

Šiame tiriamajame darbe analizuojamas asinchroninio elektros energijos generatoriaus su faziniu rotoriumi efektyvumas keičiantis variklio darbo taškui, kai dvipusis puslaidininkinis elektros energijos keitiklis, kuris jungia rotoriaus elektros grandinę ir elektros tinklą, yra valdomas magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo algoritmu. Taip pat, siekiama apibrėžti generatoriaus efektyvumo priklausomybę nuo apkrovos ir sukimosi greičio, kaip tai apibrėžia IEC61800-9-2 standartas. Valdymo strategija simuliuojama naudojant MATLAB-SIMULINK programinės įrangos paketą.

Tyrimo tikslas: Ištirti asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi, valdomo magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija, energetinių parametru kitimą skirtinguose, nusistovėjusiuose, darbo taškuose.

Tyrimo uždaviniai:

1. išanalizuoti elektros mašinų efektyvumo standartus;
2. išanalizuoti asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi matematinį modelį;
3. atlikti vektorinio valdymo strategijų lyginamąją apžvalgą;
4. sudaryti matematinį modelį naudojantis MATLAB-SIMULINK programinės įrangos paketą ir atlikti rezultatų analizę.

1. ELEKTROS MAŠINŲ EFEKTYVUMO REGULIAVIMAS

Industrijos sektoriuje elektros mašinos suvartoja daugiau nei 70 procentų visos šiame sektoriuje suvartojamos elektros energijos [3]. Sumažintas elektros energijos vartojimas, padidinus elektros mašinų efektyvumą, gerokai sumažintų išmetamo į atmosferą anglies dvideginio kiekį. Siekiant šio tikslo reikia aiškiai apibrėžti efektyvumo sąvoką. [1][2] Efektyvumo sąvokos vartojimas sudėtingas, dėl plataus elektros variklių pritaikymo ir galios diapazono.

Mažesni, nei 0,75 kW galios, elektros varikliai yra plačiai pritaikyti buities ir komerciniame sektoriuje. Šie varikliai suvartoja tik apie 9 procentus visos elektros variklių suvartojamos energijos [3]. Mažos galios varikliai integruoti į masinės produkcijos prietaisus, kaip aušinimo ventiliatorius, kompiuterio kietojo disko pavaros ir daugeli kitų. Daugumos šių įrenginių gamyba ir išpildymas yra ribojami reglamentų, kurie dažniausiai pritaikomi bendros sistemos lygmeniu, o ne atskiriems įrenginio komponentams. Tačiau daugumos mažos galios elektros variklių gamybos ir efektyvumo reikalavimai nėra apriboti jokiais teisės aktais. 2010 metais, tik apie 38 procentai buities ir komercinio sektoriaus elektros variklių suvartotos galios buvo naudojama remiantis minimalios energijos vartojimo standartu [3].

Didžiausias elektros energijos, suvartojamos elektros variklių, kiekis yra suvartojamas vidutinės galios elektros variklių, kurių galios diapazonas yra nuo 0,75kW iki 375 kW. Įvairių technologijų elektros varikliai priklauso šiai kategorijai, tačiau plačiausiai naudojami asinchroniniai varikliai su narveliniu rotoriumi, kurie suvartoja daugiausia elektros energijos.

Šio galios diapazono elektros varikliai plačiausiai pritaikyti industrijos sektoriuje, tačiau taip pat plačiai naudojami ir komerciniame arba buities sektoriuje. Šio galios diapazono elektros variklių gamyba ir eksploatavimas yra labiausiai ribojamas teisės aktų dėl didelio elektros energijos suvartojimo.

Didelės galios elektros varikliai, kurių nominali galia viršija 375 kW, dažniausiai yra aukštos įtampos kintamos srovės varikliai, kurie yra gaminami ir projektuojami darbui specifinėse sistemose. Jie užima vos 0,03 procentus elektros variklių rinkos, tačiau suvartoja apie 23 procentus bendros elektros variklių suvartojamos elektros energijos [3]. Šio galios diapazono elektros variklių gamyba ir eksploatavimas nėra reglamentuojamas jokiais teisės aktais pasauliniu mastu [3]. Bet iki 1MW nominaliosios galios elektros varikliai yra apibrėžiami efektyvumo klase, remiantis 60034-30 standarto 1 ir 2 dalimis.

Tarptautinis standartas IEC 60034-30-1:2014 buvo paruoštas Tarptautinio Elektrotechnikos Komiteto (IEC) tam, kad pasauliniu mastu suvienodinti elektros variklių

energijos efektyvumo klases. Šis standartas išskiria keturias efektyvumo klases, tiesiogiai prie elektros tinklo prijungtiems elektros varikliams:

- IE1 (Standard Efficiency);
- IE2 (High Efficiency);
- IE3 (Premium Efficiency);
- IE4 (Super Premium Efficiency).

Efektyvumo klasės yra nustatomos kintamos srovės elektros varikliams, dirbantiems nominaliame darbo taške. IEC 60034-30-1 standartas apibrėžia elektros variklius, kurių pagrindinės techninės specifikacijos yra:

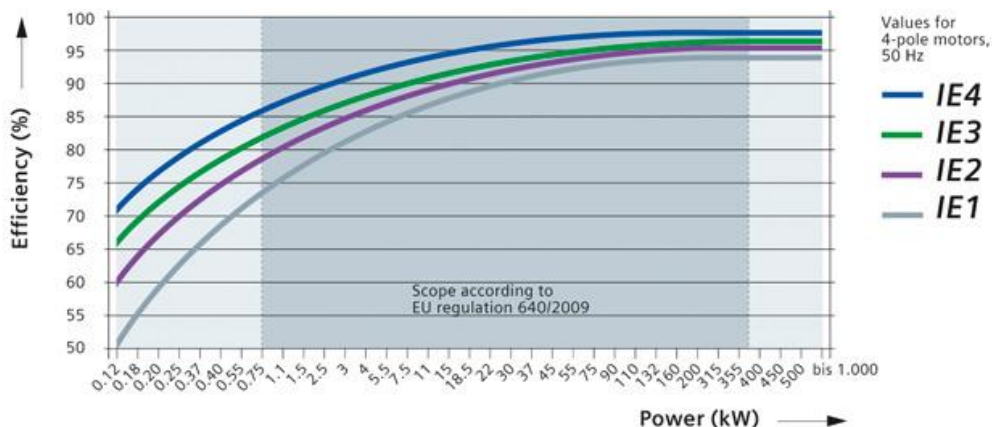
- polių skaičius : 2, 4, 6 arba 8;
- nominalios galios diapazonas: 0,12 - 1000 kW;
- įtampa: nuo 50V iki 1000 V;
- apsaugos laipsnis: visi;
- darbo režimas: S1, bei elektros varikliams galintiems dirbti S1 darbo režimu nominaliame darbo taške, kai variklio temperatūra neviršija izoliacijos klasės temperatūros;
- aplinkos temperatūros diapazonas: -20 C iki +60 C;
- variklis skirtas naudoti: ne didesniame, nei 4000 m aukštyje virš jūros lygio.

Šis standartas apibrėžia elektros variklių efektyvumo priklausomybę nuo tinklo įtampos dažnio, polių porų skaičiaus ir nominalios galios. Tačiau neapibrėžia variklio technologijos, maitinimo įtampos efektinės vertės ar variklių su sustiprintos izoliacijos klase. Atsižvelgiant į tai, skirtingos elektros variklių technologijos gali būti lyginamos atsižvelgiant į jų efektyvumą. Esminis IEC 60034-30-1 standarto trūkumas yra tas, jog jis neapibrėžia elektros variklių efektyvumo, kai jie yra valdomi naudojant dažnio keitiklius.

Šiam IEC 60034-30-1 standarto trūkumui panaikinti, 2016 metais buvo sudarytas standartas IEC 60034-30-2, kuris skirtas pasauliniu mastu apibrėžti keičiamo greičio elektros variklių efektyvumo klases. IEC 60034-30-2 standartas apima visų tipų kintamosios įtampos elektros variklius, kurie yra skirti kintančio greičio operacijoms, o maitinimo įtampa yra tiekama įdiegiant elektroninį dažnio keitiklį [2].

Abu standartai, IEC 60034-30-1 ir IEC 60034-30-2 tik apibrėžia elektros variklių efektyvumo klases, tačiau neapriboja elektros variklių gamybos ir eksploatacijos. Ribojimo teisė paliekama regionams. Šiam tikslui, 2009 metais Europos sąjungoje buvo priimtas 640/2009 komisijos reglamentas, kuriuo įgyvendinama Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2005/32/EB, kuria nustatomi elektros variklių ekologinio projektavimo reikalavimai. Šia direktyva, nuo 2017 metų sausio 1 dienos, apribojama 0,75 – 375 kW diapazono vardinės išėjimo galios elektros variklių rinka. Remiantis šia direktyva, nauji elektros varikliai turi atitikti IE3

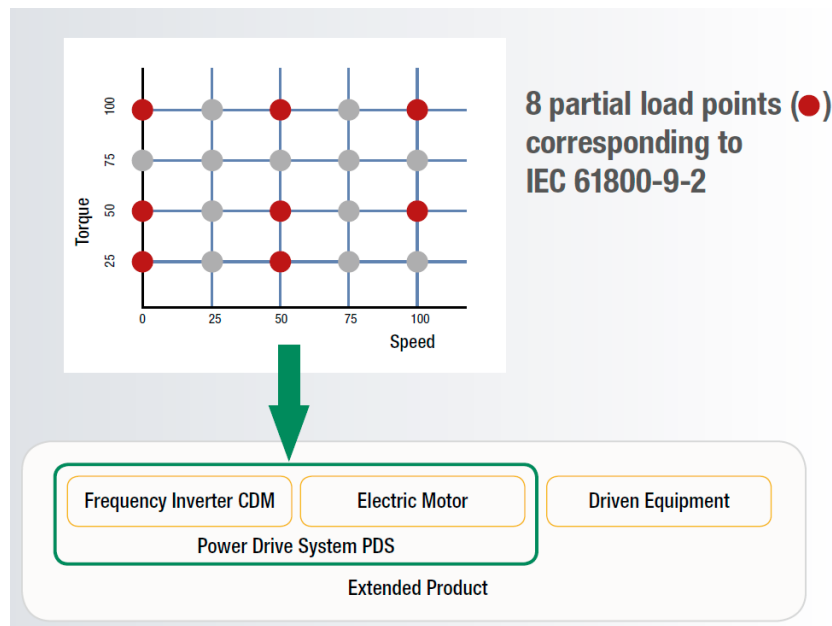
efektyvumo klasę, kai jie dirba tiesiogiai prijungti prie elektros tinklo bei IE2 efektyvumo klasę, kai elektros variklis yra valdomas naudojant dažnio keitiklį [4].



1.1 pav. IEC 60034-30 standarto apibrėžiamos variklių efektyvumo klasės [1]

640/2009 reglamento priėmimą paskatino tai, jog bendrijos rinkai tiekama daug elektros variklių, kurių suvartojama energija naudojimo aspektu, per visą gyvenimo ciklą yra ganėtinai reikšminga ir 2005 metai energijos suvartojimas siekė 1067 TWh, o 2020 metais gali siekti 1252 TWh [4].

Tačiau, 640/2009 reglamentas elektros variklį apibūdina kaip asinchroninį elektros variklį su narveliniu rotoriumi, kurio statoriaus apvijų trifazės. Tuo tarpu, kitokios konstrukcijos elektros varikliai bei generatoriai nėra apribojami šio standarto. Pabrėžiant, jog variklis su narveliniu rotoriumi tai variklis, kuris neturi komutatoriaus, kontaktinių žiedų ar elektros jungčių su variklio rotoriumi. Kitų konstrukcijų elektros mašinų gamyba ir eksploatavimas vis dar lieka neapribojami Europos Sąjungoje, nors jas apima IEC 60034-30-1 ir IEC 60034-30-2 standartai. Kyla klausimas, ar apribojimas ir atitinkamo efektyvumo lygmens nustatymas, 640/2009 reglamento neapimtiems varikliams gali suteikti naudos ir kaip efektyvumo sąvoka gali būti apibrėžiama elektros generatoriams, kurių darbo taškas nėra pastovus?



1.2 pav. IEC 61800-9-2 standarto apibrėžiami analizuojami elektros pavaros sistemos apkrovos taškai [5]

Standartai, IEC 60034-30-1 ir IEC 60034-30-2, apibrėžia variklių efektyvumą, kai jie dirba nominaliame darbo taške. Tačiau realiomis darbo sąlygomis, varikliai ne visada dirba nominaliame darbo taške. O reguliuojant variklio greitį, naudojant dažnio keitiklį, tiek variklio, tiek variklio ir dažnio keitiklio sistemos, efektyvumą apibrėžti yra sudėtinga. Šiam tikslui Europos standartas EN 50598-2 bei 2017 metais sudarytas tarptautinis standartas IEC61800-9-2, apibrėžia visos elektros pavaros sistemos (elektros variklio ir dažnio keitiklio) nuostolius 8 sistemos darbo taškuose. Taip apibrėžiamas sistemos efektyvumas keičiantis darbo taškui, o tarpinės efektyvumo reikšmės yra apskaičiuojamos remiantis šių darbo taškų duomenimis. Tačiau šis standartas apima tik elektros variklius ir jų valdymo sistemas, todėl iškyla klausimas, kodėl šie standartai negali būti taikomi ir elektros generatoriams?

2. VĖJO ENERGETIKA

Pastarąjį dešimtmetį, atsinaujinančių energijos šaltinių svarba elektros energetikoje buvo labai pabrėžiama. Kartu pabrėžiant tai, jog atsinaujinančių energijos šaltinių generuojama elektros energiją turi sudaryti vis didesnę dalį bendros generuojamos elektros energijos [6].

Vėjo energetika išskiriama tuo, jog ji laikoma viena populiariausių, kalbant apie atsinaujinančią energetiką [7]. Vėjo elektrinės suskirstomos į dvi pagrindines rūšis: fiksuoto greičio ir kintančio greičio vėjo elektrines [8][9]. Fiksuoto greičio vėjo elektrinių technologija buvo pirmoji vystoma vėjo elektrinių technologija, kuri buvo pradėta plėtoti jau 1970 metais Danijoje [10]. Šių vėjo elektrinių pagrindinis trūkumas yra tas, jog generatoriaus sinchronizavimo su elektros tinklu sąlygos išlaikomos tik esant fiksuotam elektros generatoriaus veleno sukimosi greičiui.

Sparčiai besivystančios galios elektronikos ir puslaidininkių technologijos, kartu pastūmėjo kintančio greičio ir pastovaus elektros energijos parametrų dažnio vėjo elektrinių technologijos kūrimą. Ši technologija pasižymi tuo, jog keičiantis generatoriaus veleno sukimosi greičiui, sinchronizavimo su elektros tinklu sąlygos yra išlaikomos plačiame variklio veleno sukimosi greičio kitimo diapazone. Prie šios rūšies vėjo elektrinių priskiriamos vėjo elektrinės, kurių konstrukcijos išpildyme yra įdiegti asinchroniniai generatoriai su faziniu rotoriumi, kurių rotorų elektros grandinė prie elektros tinklo prijungiama dvikrypčiu puslaidininkiniu elektros energijos keitikliu, ir sinchroniniai generatoriai, kurių statoriaus elektros grandinė prie elektros tinklo prijungta puslaidininkiniu elektros energijos keitikliu [11][12]. Vėjo elektrinių rinkos tendencijos pateikiamos 2.1 paveiksle.

Year Concept	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Type A (%)	69.5	62.7	53.5	39.6	40.8	39.0	30.6	27.8	19.2	24.7
Type B (%)	16.2	23.4	27.0	17.8	17.1	17.2	15.2	5.2	3.1	2.2
Type C (%)	0.0	0.1	3.1	26.5	28.1	28.2	37.3	46.7	59.8	54.8
Type D (%)	14.3	13.7	16.3	16.1	14.0	15.6	16.9	20.3	17.9	18.3
Installed power (MW) (22 suppliers)	1161	1092	1483	2345	3788	4381	7175	7242	8084	8247
Total world market share of top 22 suppliers [%]	85.7	95.7	96.2	92.7	94.0	96.3	100.0	97.4	100.0	97.7

2.1 pav. Vėjo elektrinių rinkos pasiskirstymas pagal vėjo elektrinės tipą [15]

2.1. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi pritaikymas vėjo energetikoje.

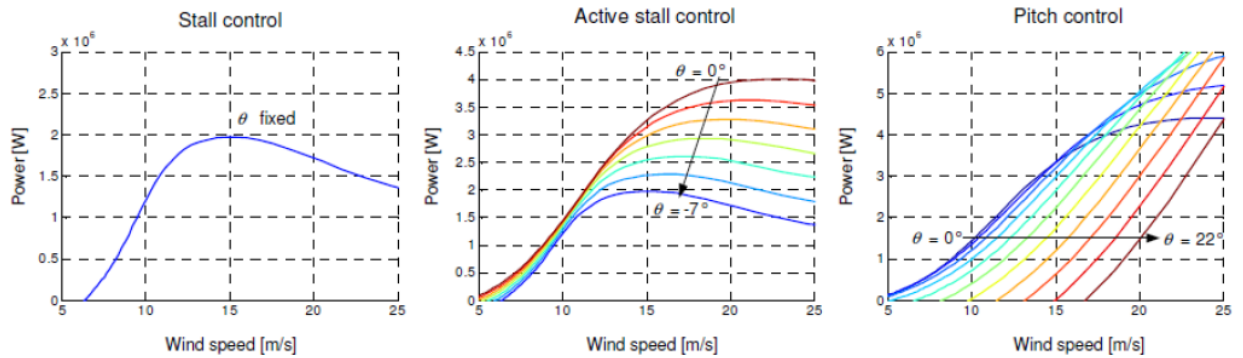
Vėjo elektrinė, kurios konstrukcijoje įdiegtas asinchroninis elektros generatorius su faziniu rotoriumi, neabejotinai tapo viena iš pirmaujančių technologijų, kurią pritaikė vėjo elektrinių gamintojai. Asinchroniniai generatoriai su faziniu rotoriumi yra vieni iš populiariausių elektros generatorių, kurie yra naudojami vėjo elektrinėse. Jie naudojami apie 45 procentų Europoje 2015 metais įdiegtų vėjo elektrinių struktūroje [16]. Be to, vėjo elektrinių gamintojai šią technologiją pristato kaip taupią, efektyvią ir patikimą [13].

Šio tipo vėjo elektrinės turi daug privalumų lyginant su vėjo elektrinėmis, kuriose įdiegti sinchroniniai elektros generatoriai su nuolatiniais magnetais arba asinchroniniai elektros generatoriai su narveliniu rotoriumi. Pagrindiniai šios vėjo elektrinės privalumai yra: aukštas efektyvumas, galimybė valdyti elektromagnetinį sukimo momentą, galimybė valdyti aktyviają ir reaktyviają galią puslaidininkiniu keitikliu, kuris jungia rotoriaus elektros grandinę su elektros tinklu ir taip realizuoti galios faktoriaus korekcijas [13]. Puslaidininkinio elektros energijos keitiklio, kuris jungia rotoriaus elektros grandinę ir elektros tinklą nominali galia sudaro apie 25-30 procentų nominalios generatoriaus galios [7-9]. Ši galia priklauso nuo generatoriaus greičio diapazono nuokrypio nuo sinchroninio greičio, kuris daugelio gamintojų parenkamas ± 30 procentų.

Blade angle control	stall/active stall control		pitch control		
Speed control	fixed speed		variable speed		
Grid connection	direct grid connection		direct grid connection	partial scale converter	full scale converter
Drive train	gear	gear	gear	gear	gearless
Generator	SCIG	SCIG with pole changeable stator winding	WRIG with variable rotor resistance	DFIG	DCSG/PMSG SCIG Multipole DCSG/PMSG
Speed range	n_{rated} (~2% slip)	$n_1 ; n_2$ (~2% slip)	$1 - 1.1 \cdot n_{syn}$ (~10% slip)	$0.7 - 1.3 \cdot n_{syn}$ (~ ±30% slip)	$0 \dots 1 \cdot n_{rated}$ $0 \dots 1 \cdot n_{rated}$
	TYPE A		TYPE B	TYPE C	TYPE D

2.2 pav. Vėjo elektrinių tipai [15]

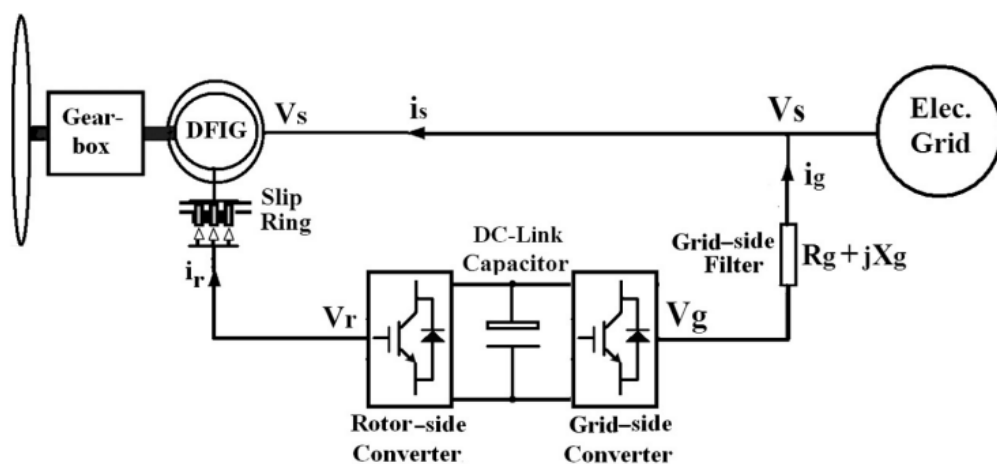
Keičiantis generatoriaus veleno sukimosi greičiui, kubine priklausomybe keičiasi ir vėjo perduodamos galios dydis. Ši priklausomybė pavaizduota 2.3 paveiksle. Šiam galios kitimui kontroliuoti asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi galios grandinėje yra įdiegiamas dvikryptis puslaidininkinis elektros energijos keitiklis.



2.3 pav. Galios priklausomybės nuo vėjo turbinos valdymo [15]

Puslaidininkinis dvipusis elektros energijos keitiklis, kuris jungia rotoriaus elektros grandinę ir elektros tinklą, išskaidomas į dvi struktūrinės dedamosias: rotoriaus pusės keitiklį ir tinklo pusės keitiklį. Rotoriaus pusės keitiklis, kartu su pasirinkta generatoriaus valdymo strategija, kontroliuoja fazinio rotoriaus apvijų įtampos parametrus tam, kad pasiektų pasirinktą generatoriaus darbo tašką. Taip, tuo pačiu, kontroliuojant galios srautus tarp statoriaus apvijų ir elektros tinklo. Tinklo pusės keitiklio paskirtis išlaikyti nuolatinės įtampos grandinės, kuri jungia tinklo pusės puslaidininkinį elektros energijos keitiklį ir rotoriaus pusės puslaidininkinį elektros energijos keitiklį, įtampą nekintančią, nepriklausomai kokios krypties galios srautai puslaidininkinio keitiklio grandine [8].

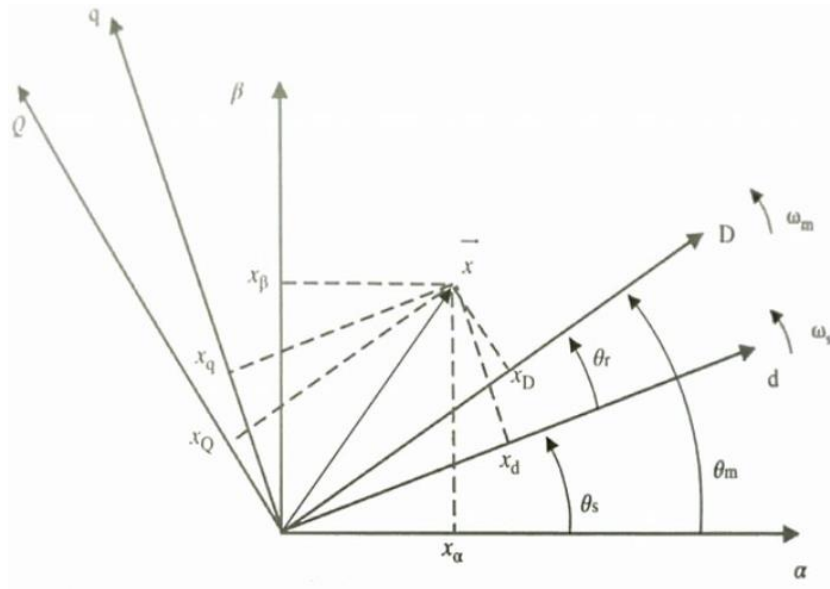
Vėjo elektrinės, kurios konstrukcijoje įdiegtas asinchroninis elektros generatorius su faziniu rotoriumi, pagrindinės konstrukcinės dalys yra pavaizduotos 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Principinis, vėjo elektrinės, kurioje įdiegtas asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi, konstrukcijos vaizdas [6]

3. DINAMINIS MODELIS.

Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi vektorinis valdymas apima šio generatoriaus dinaminio modelio analizę. Dinaminio modelio analizė yra atliekama skirtingose, tiek stacionariose, tiek besisukančiose atskaitos sistemose. Be trifazės abc atskaitos sistemos išskiriamos trys dvifazės atskaitos sistemos: statoriaus stacionari atskaitos sistema (α - β), rotoriaus atskaitos sistema (D-Q), kuri sukasi ω_m greičiu apie savo ašį, bei sinchroniniu greičiu besisukanti atskaitos sistema (d-q), kuri sukasi sinchroniniu greičiu ω_s apie savo ašį (statoriaus atžvilgiu). Naudojant atitinkamas („Park“ arba „Clark“) tiesiogines ir atvirkštines transformacijas erdvinis elektros energijos parametro vektorius gali būti perskaičiuojamas į atitinkamą atskaitos sistemą [16-20] [30-34].



3.1 pav. Atskaitos sistemų ryšys [9]

3.1. d-q dinaminis modelis

Trifazio variklio matematinio modelio supaprastinimui, trifazės abc atskaitos sistemos parametrai yra perskaičiuojami į atitinkamą dvifazę atskaitos sistemą. Viena iš dvifazių atskaitos sistemų yra sinchroniniu greičiu besisukanti d-q atskaitos sistema.

d-q atskaitos sistema yra besisukanti atskaitos sistema, kuri apibūdinama besikeičiančia pozicija stacionarios α - β statoriaus atskaitos sistemos atžvilgiu. Norint realizuoti šią atskaitos sistemą reikia išanalizuoti jos kitimą laike. Priimant, jog θ_s yra erdvinis kampas tarp sinchroniniu greičiu besisukančios d-q atskaitos sistemos d ašies ir statoriaus stacionarios α - β atskaitos

sistemos α ašies. Kadangi d-q atskaitos sistema yra besisukanti, tai erdvinis kampas išreiškiamas laiko funkcija [22].

$$\theta_s(t) = \int_0^t \omega_s dt + \theta_s(0); \quad (1)$$

čia, $\theta_s(0)$ - pradinis erdvinis kampas tarp d-q atskaitos sistemos ir statoriaus stacionarios α - β atskaitos sistemos, °;

$\theta_s(t)$ - erdvinis kampas tarp d-q atskaitos sistemos ir statoriaus stacionarios α - β atskaitos sistemos, °;

ω_s – sinchroninis kampinis greitis, rad/s.

d-q atskaitos sistema sukasi sinchroniniu ω_s greičiu statoriaus stacionarios α - β atskaitos sistemos atžvilgiu. Tai reiškia, jog erdvinis kampas tarp d-q atskaitos sistemos ir rotoriaus grandinės taip pat kinta erdvėje ir laike.

$$\theta_r(t) = \theta_s - \theta_r = \int_0^t (\omega_s - \omega_r) dt + (\theta_s(0) - \theta_r(0)); \quad (2)$$

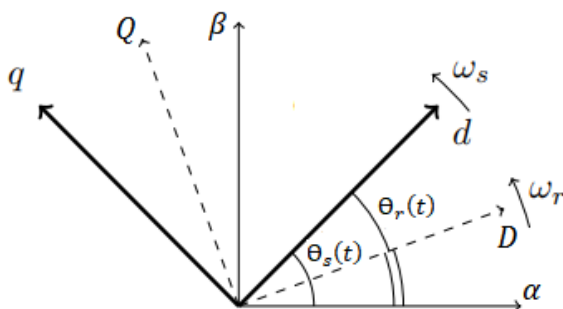
čia, $\theta_r(0)$ – pradinis erdvinis kampas tarp rotoriaus D-Q atskaitos sistemos ir statoriaus stacionarios α - β atskaitos sistemos, °;

θ_r – erdvinis kampas tarp rotoriaus D-Q atskaitos sistemos ir statoriaus stacionarios α - β atskaitos sistemos, °;

$\theta_r(t)$ – erdvinis kampas tarp rotoriaus D-Q atskaitos sistemos ir statoriaus sinchroniniu greičiu besisukančios d-q atskaitos sistemos, °;

ω_r – rotoriaus elektrinis kampinis greitis, rad/s.

D-Q atskaitos sistema sukasi elektriniu kampiniu rotoriaus greičiu ω_r statoriaus stacionarios α - β atskaitos sistemos atžvilgiu.



3.2 pav. Dvifazių atskaitos sistemų tarpusavio ryšio grafinis vaizdas [9]

$T_{dq0}(\Theta)$ yra transformavimo matrica, kuri naudojama transformuoti trifazės abc atskaitos sistemos elektrinius parametrus į dvifazę $dq0$ atskaitos sistemą [31].

$$T_{dq0}(\Theta) = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

čia, $T_{dq0}(\Theta)$ – transformacijos matrica;

Θ – erdvinis kampas, °.

Pagal pasirinktus perskaičiuoti parametrus, atitinkamai parenkamas erdvinis kampas: Θ_s - statoriaus elektriniams parametrams perskaičiuoti ir Θ_r - rotoriaus elektriniams parametrams perskaičiuoti. Perskaičiavimas atliekamas sudauginus atitinkamo abc sistemos elektrinio parametro 3 eilučių matricą su transformavimo matrica. Atvirkštinė transformacija realizuojama $dq0$ sistemos elektrinio parametro matricą padauginus su atvirkštine transformavimo matrica.

$$\vec{f}_{dq0} = T_{dq0}(\Theta) * \vec{f}_{abc}; \quad (4)$$

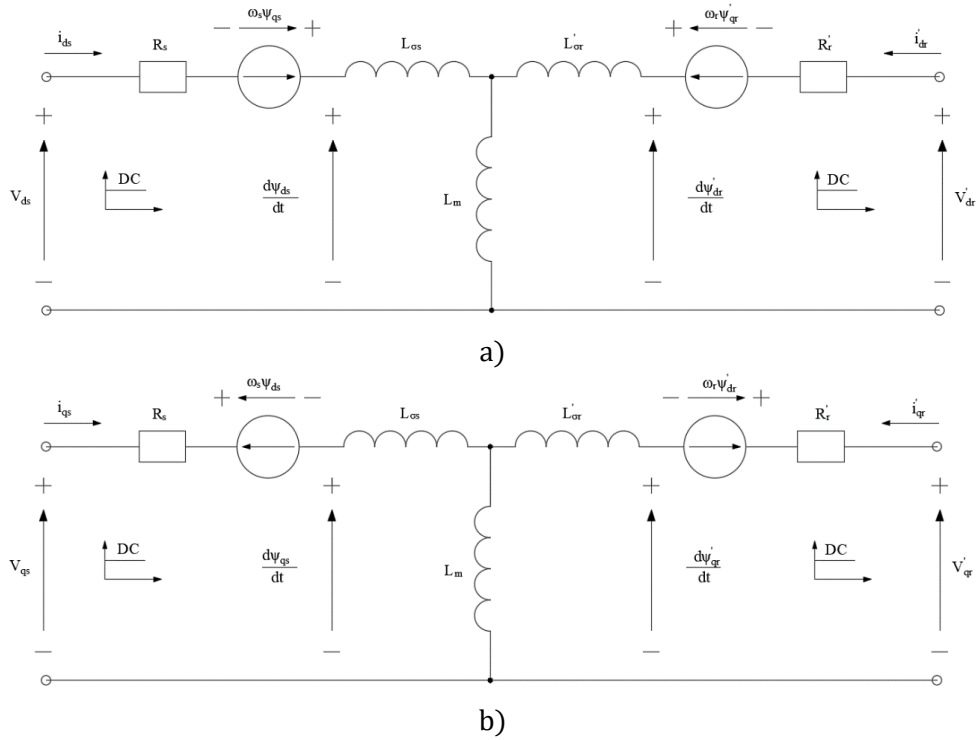
$$\vec{f}_{abc} = T_{dq0}^{-1}(\Theta) * \vec{f}_{dq0}; \quad (5)$$

čia, \vec{f}_{abc} – elektros energijos parametro verčių matrica trifazėje abc atskaitos sistemoje;

\vec{f}_{dq0} – elektros energijos parametro verčių matrica dvifazėje $dq0$ atskaitos sistemoje.

Esant simetrinei sistemai, į nulinės sekos komponentus gali būti neatsižvelgiama. Tuomet $d-q$ atskaitos sistemos matrica \vec{f}_{dq0} pakeičiama į \vec{f}_{d-q} , o transformavimo matricoje $T_{dq0}(\Theta)$ panaikinama trečioji eilutė [30-34].

Remiantis šiais perskaičiavimais sudaromos ekvivalentinės asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi schemas. Šios schemas sudaromos atitinkamai q ir d fazei. Atstojamosios schemas pateikiamos 3.3 paveiksle.



3.3 pav. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi atstojamosios schemas d-q atskaitos sistemoje. a - d fazės atstojamoji schema; b – q fazės atstojamoji schema

Remiantis šiomis atstojamosiomis elektros grandinių schemomis, išreiškiamos statoriaus ir rotoriaus įtampos vektorių lygtys d-q atskaitos sistemoje.

$$\vec{v}_s^S = R_s \vec{i}_s^S + \frac{d\vec{\Psi}_s^S}{dt} + j\omega_s \vec{\Psi}_s^S ; \quad (6)$$

$$\vec{v}_r^S = R'_r \vec{i}_r^S + \frac{d\vec{\Psi}'_r^S}{dt} + j\omega_r \vec{\Psi}'_r^S ; \quad (7)$$

čia, \vec{v}_s^S , \vec{v}_r^S – atitinkamai, statoriaus ir perskaičiuoto rotoriaus įtampos vektoriai d-q atskaitos sistemoje, V;

\vec{i}_s^S , \vec{i}_r^S - statoriaus ir perskaičiuoto rotoriaus srovės vektoriai d-q atskaitos sistemoje, A;

$\vec{\Psi}_s^S$, $\vec{\Psi}'_r^S$ - statoriaus ir perskaičiuoto rotoriaus magnetinio srauto vektoriai d-q atskaitos sistemoje, Wb;

R_s , R'_r - atitinkamai, statoriaus ir perskaičiuoto rotoriaus apvijų aktyviosios varžos, Ω .

Išreiškiamos statoriaus ir rotoriaus magnetinio srauto vektorių lygtys d-q atskaitos sistemoje:

$$\vec{\Psi}_s^S = L_s \vec{i}_s^S + L_m \vec{i}_r^S ; \quad (8)$$

$$\vec{\Psi}'_r^S = L_m \vec{i}_s^S + L'_r \vec{i}_r^S ; \quad (9)$$

čia, L_s , L'_r , L_m – atitinkamai, statoriaus, rotoriaus ir magnetinės grandinės induktyvumai, H.

3.2. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi matematinis modelis

Remiantis 3.3 paveiksle pavaizduotomis asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi atstojamosiomis schemomis, sudaromos pagrindinės asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi matematinio modelio lygtys.

Pirmiausia išreiškiamos statoriaus ir rotoriaus apvijų kuriamų surištųjų magnetinių srautų lygtys bei abipusio surištojo magnetinio srauto lygtys. Šios lygtys yra išreiškiamos, atitinkamai, statoriaus ir rotoriaus apvijų elektros grandinėms bei, atitinkamai, projekcijoms į d-q atskaitos sistemos d ir q ašis.

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = \omega_b \left[v_{qs} - \frac{\omega_s}{\omega_b} \lambda_{ds} + \frac{R_s}{X_{\sigma s}} (\lambda_{mq} + \lambda_{qs}) \right]; \quad (10)$$

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = \omega_b \left[v_{ds} + \frac{\omega_s}{\omega_b} \lambda_{qs} + \frac{R_s}{X_{\sigma s}} (\lambda_{md} + \lambda_{ds}) \right]; \quad (11)$$

$$\frac{d\lambda'_{qr}}{dt} = \omega_b \left[v_{qr} - \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_b} \lambda'_{dr} + \frac{R'_r}{X'_{\sigma r}} (\lambda_{mq} + \lambda'_{qr}) \right]; \quad (12)$$

$$\frac{d\lambda'_{dr}}{dt} = \omega_b \left[v'_{dr} + \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_b} \lambda'_{qr} + \frac{R'_r}{X'_{\sigma r}} (\lambda_{md} + \lambda'_{dr}) \right]; \quad (13)$$

$$\lambda_{mq} = X_m \left(\frac{\lambda_{qs}}{X_{\sigma s}} + \frac{\lambda'_{qr}}{X'_{\sigma r}} \right); \quad (14)$$

$$\lambda_{md} = X_m \left(\frac{\lambda_{ds}}{X_{\sigma s}} + \frac{\lambda'_{dr}}{X'_{\sigma r}} \right); \quad (15)$$

$$\lambda_{ij} = \Psi_{ij} \omega_b; \quad (16)$$

čia, $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}, \lambda'_{dr}, \lambda'_{qr}, \lambda_{md}, \lambda_{mq}$ – atitinkamai, statoriaus, perskaičiuoto rotoriaus ir magnetinės grandinės surištųjų magnetinių srautų projekcijos q ir d ašyse, Wb/s;

$v_{ds}, v_{qs}, v'_{dr}, v'_{qr}$ – atitinkamai, statoriaus ir perskaičiuoto rotoriaus įtampos projekcijos q ir d ašyse, V;

R_s, R'_r – statoriaus ir perskaičiuoto rotoriaus apvijų aktyviosios varžos, Ω ;

$X_{\sigma s}, X'_{\sigma r}$ – statoriaus ir perskaičiuoto rotoriaus apvijų reaktyviosios varžos, Ω ;

ω_s, ω_r – statoriaus ir rotoriaus kampinis elektrinis dažnis, rad/s ;

ω_b – bazinis kampinis elektrinis dažnis, rad/s;

Ψ_{ij} – surištasis magnetinis srautas ($i = d$ arba $q, j = s$ arba r), Wb;

λ_{ij} – surištasis magnetinis srautas per sekunde ($i = d$ arba $q, j = s$ arba r), Wb/s .

Taip pat, pateikiamos statoriaus ir rotoriaus apvijomis tekančių srovių vektorių projekcijų d ir q ašyse išraiškos.

$$i_{qs} = \frac{1}{X_{\sigma s}}(\lambda_{qs} - \lambda_{mq}); \quad (17)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{X_{\sigma s}}(\lambda_{ds} - \lambda_{md}); \quad (18)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{X'_{\sigma r}}(\lambda'_{qr} - \lambda_{mq}); \quad (19)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{X'_{\sigma r}}(\lambda'_{dr} - \lambda_{md}); \quad (20)$$

čia, i_{ds}, i_{qs} - statoriaus srovės vektorius projekcijos d ir q ašyse, A;

i'_{dr}, i'_{qr} - perskaičiuotos rotoriaus srovės vektorius projekcijos d ir q ašyse, A.

Elektromagnetinis sukimo momentas išreiškiamas statoriaus surištojo magnetinio srauto Ψ_s ir statoriaus apvijomis tekančios srovės i_s priklausomybe.

$$M_{em} = \frac{3}{2}p \frac{1}{\omega_b}(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}). \quad (21)$$

Momentų pusiausvyros lygtis :

$$M_{em} - M_{apk.} = Jp \frac{d\omega_r}{dt}; \quad (22)$$

čia, p – polių porų skaičius;

J – inercija, kg*m²;

M_{em} - elektromagnetinis sukimo momentas, Nm;

$M_{apk.}$ - apkrovos sukimo momentas, Nm.

Aktyvioji ir reaktyvioji statoriaus apvijų generuojama galia išreiškiamas:

$$P_s = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}); \quad (23)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs}); \quad (24)$$

P_s, Q_s - aktyvioji ir reaktyvioji statoriaus apvijų kuriama galia, W, Var.

Aktyvioji ir reaktyvioji rotoriaus apvijų generuojama galia išreiškiamas:

$$P_r = \frac{3}{2}(v'_{dr}i'_{dr} + v'_{qr}i'_{qr}); \quad (25)$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(v'_{qr}i'_{dr} - v'_{dr}i'_{qr}); \quad (26)$$

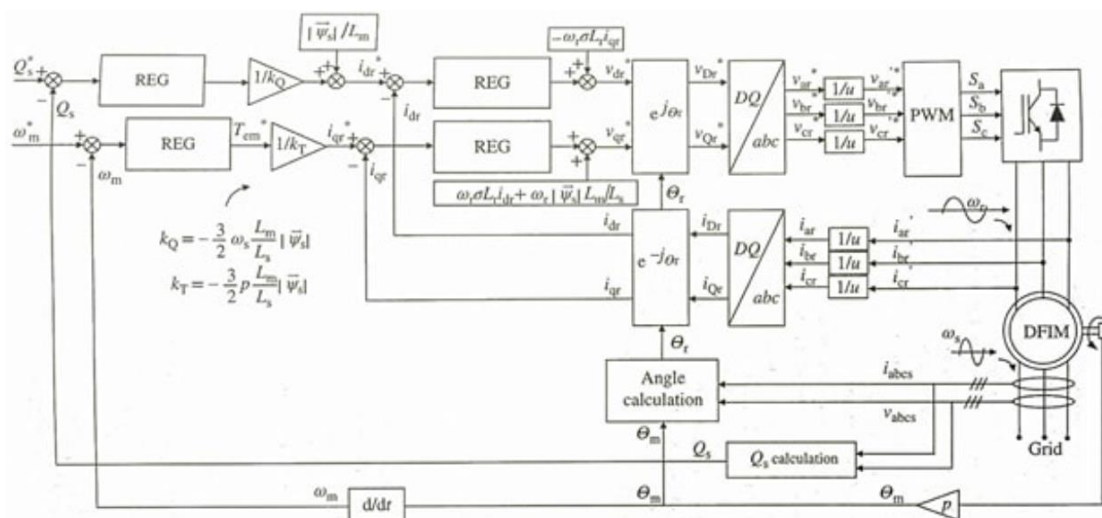
P_r, Q_r - aktyvioji ir reaktyvioji rotoriaus apvijų kuriama galia, W, Var.

4. VEKTORINIO VALDYMO STRATEGIJOS.

Yra pagrindinės 2 asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi rotoriaus pusės puslaidininkinio elektros energijos keitiklio vektorinio valdymo strategijos: tiesioginė sukimo momento valdymo ir magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo. Kiekviena iš šių valdymo strategijų gali būti modifikuojama apjungiant keletą valdymo algoritmų struktūrų arba pritaikant technologinių uždavinių sprendimui. Taisyklingai parinktas ir išpildytas valdymo algoritmas efektyviau išnaudoja technines asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi galimybes [21-23].

4.1. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymas, paremtas statoriaus magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymu.

Viena iš populiariausių valdymo sistemų, kuri įdiegiama asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi rotoriaus pusės puslaidininkinio elektros energijos keitiklio valdymui, yra magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo sistema. Ši valdymo sistema yra viena iš labiausiai išplėtotų ir ištyrinėtų valdymo sistemų. Aprašant šią valdymo sistemą, valdymo algoritmas yra skaidomas į struktūrines dalis. Pagrindinę struktūrinę dalį sudaro rotoriaus įtampos vektoriaus reguliavimo ir statoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto vektoriaus sekimo erdvėje loginis algoritmas. Generatoriaus darbo taško užduoties nustatymui, pagrindinis loginis algoritmas yra apjungiamas reaktyviosios galios ir greičio reguliavimo algoritmais [24-25]. Magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategijos algoritmo vaizdas pateikiamas 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo sistemos principinė schema [8]

Klasikinė vektorinio valdymo sistema, skirta asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymui, išpildoma perskaičiuojant trifazės abc atskaitos sistemos elektros energijos parametrus į sinchroniniu greičiu besisukančią d-q atskaitos sistemą, kurioje statoriaus magnetinio srauto vektorius Ψ_s kryptis yra sutapatinama su d ašimi, $\Psi_{ds} = \Psi_s$ ir $\Psi_{qs} = 0$ [26].

Ši prielaida priimama dėl tos priežasties, jog tuomet rotoriaus srovės vektorius projekcija d-q atskaitos sistemos d ašyje yra tiesiogiai proporcinga statoriaus reaktyviajai galiai, o rotoriaus srovės vektorius projekcija d-q atskaitos sistemos q ašyje yra tiesiogiai proporcinga aktyviajai statoriaus apvijų generuojamai galiai arba elektromagnetiniam momentui.

Stacionarioje α - β atskaitos sistemoje, statoriaus magnetinis srautas yra apskaičiuojamas remiantis šiomis formulėmis:

$$\Psi_{\alpha s} = \int v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}; \quad (27)$$

$$\Psi_{\beta s} = \int v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}; \quad (28)$$

čia, $\Psi_{\alpha s}$, $\Psi_{\beta s}$ – atitinkamai, statoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto projekcijos α ir β ašyse, Wb;

$v_{\alpha s}$, $v_{\beta s}$ – atitinkamai, statoriaus įtampos projekcijos α ir β ašyse, V;

$i_{\alpha s}$, $i_{\beta s}$ - atitinkamai, statoriaus srovės projekcijos α ir β ašyse, A.

O erdvinis kampas Θ_s , kurį sudaro statoriaus magnetinio srauto vektorius ir stacionarios α - β atskaitos sistemos α ašis.

$$\Theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\Psi_{\beta s}}{\Psi_{\alpha s}} \right); \quad (29)$$

čia, Θ_s – erdvinis kampas, kurį sudaro statoriaus magnetinio srauto vektorius ir stacionarios α - β atskaitos sistemos α ašis, °.

Remiantis (29) formule nustatomas pradinis d-q atskaitos sistemos erdvinis kampas kompleksinėje plokštumoje [27]. Toliau erdviniai parametrai yra analizuojami sinchroniniu greičiu besisukančioje d-q atskaitos sistemoje.

Statoriaus ir perskaičiuoto rotorius diferencialines surištojo magnetinio srauto lygtis (10) – (14) padauginus iš bazinio kampinio dažnio ω_b ir pertvarkius, gaunamos statoriaus ir rotorius įtampos lygtys d-q atskaitos sistemoje.

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt}; \quad (30)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt}; \quad (31)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Psi'_{dr} + \frac{d\Psi'_{qr}}{dt}; \quad (32)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Psi'_{qr} + \frac{d\Psi'_{dr}}{dt}; \quad (33)$$

O statoriaus ir rotorius apvijų kuriamų surištųjų magnetinių srautų projekcijų d-q atskaitos sistemos d ir q ašyse lygtys:

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} - L_m i'_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} - L_m i'_{qr} \\ \Psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} - L_m i_{ds} \\ \Psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} - L_m i_{qs} \end{cases}; \quad (34)$$

čia, Ψ_{ds} , Ψ_{qs} – statoriaus apvijų kuriamas magnetinis srautas, Wb ;

Ψ'_{dr} , Ψ'_{qr} – rotorius apvijų kuriamas perskaičiuotas magnetinis srautas, Wb .

Atitinkamai, išreiškiamos statoriaus ir rotorius apvijų induktyvumų lygtys.

$$L_s = L_m + L_{\sigma s}; \quad (35)$$

$$L'_r = L_m + L'_{\sigma r}; \quad (36)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L'_r}; \quad (37)$$

čia, L_m – magnetinės grandinės induktyvumas, H.

Kadangi buvo priimta prielaida, jog asinchroninio elektros generatorius su faziniu rotoriumi statoriaus apvijos yra tiesiogiai prijungtos prie elektros tinklo, tai statoriaus magnetinio srauto amplitudė yra pastovi ir palaikoma elektros tinklo, o statoriaus apvijų magnetinio srauto kitimas laike lygus nuliui ($\frac{d[\overline{\Psi}_s^s]}{dt} = 0$) [28].

$$[\overline{\Psi}_s^s] \cong [\overline{v}_s^s]/\omega_s; \quad (38)$$

$$\overline{\Psi}_s^s = \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}; \quad (39)$$

$$\Psi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}. \quad (40)$$

Statoriaus kuriamo magnetinio srauto $[\vec{\Psi}_s]$ vektorius tiesiogiai priklauso nuo statoriaus ir rotoriaus apvijomis tekančių srovių projekcijų d-q atskaitos sistemos d ašyje, i_{ds} ir i'_{dr} . Pažymint tai, jog rotoriaus apvijomis tekančios srovės projekcija d-q atskaitos sistemos q ašyje i'_{qr} yra reguliuojama remiantis norima elektromagnetinio momento reikšme. Tačiau, priklausomai nuo nustatytos reaktyviosios galio užduotos vertės Q_s^* yra keičiamos statoriaus ir rotoriaus srovių amplitudės. Pavyzdžiui, vėjo elektrinės generatoriui skirtingos reaktyviosios galios užduotoji Q_s^* reikšmė gali būti nustatytos tiesiogiai elektros tinklo operatoriaus.

Remiantis rotoriaus apvijų įtampos lygtimis (30)-(33) matyti, kad įmanoma atlikti d-q atskaitos sistemos rotoriaus srovių kontrolę naudojant reguliatorius atskirai rotoriaus srovės projekcijai q ir d ašyse. Pabrėžiama tai, jog šiam tikslui statoriaus magnetinis srautas ir rotoriaus elektrinis kampinis greitis turi būti įvertinami [25]. Rotoriaus elektrinis erdvinis kampas turi būti įvertinamas atskaitos sistemų transformacijai iš D-Q į d-q atlikt. Atitinkamai įvertinamas ir sinchroniniu greičiu besisukančios d-q atskaitos sistemos erdvinis kampas, kuris nustatomas statoriaus įtampos vektoriaus erdvinį kampą perstumiant 90° kampu.

Kadangi priimta, jog statoriaus magnetinio srauto vektoriaus Ψ_s kryptis yra sulyginama su d-q atskaitos sistemos d ašimi, tai įtampų lygtys turi būti pertvarkomos. Statoriaus apvijų įtampos lygtys d-q atskaitos sistemoje išreiškiamos:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} \end{cases} \quad (41)$$

Atsižvelgiant į priimtas prielaidas, išreiškiamos statoriaus apvijomis tekančių srovių lygtys.

$$i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} i'_{qr} ; \quad (42)$$

$$i_{ds} = \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i'_{dr}) ; \quad (43)$$

$$i_{ms} = \frac{v_{qs} - R_s i_{qs}}{\omega_s L_m} . \quad (44)$$

Remiantis (23) formule ir priimtomis prielaidomis, išreiškiamos statoriaus apvijų generuojamos aktyviosios ir reaktyviosios galios formulės.

$$P_s = \frac{-3 L_m^2}{2 L_s} \omega_s i_{ms} i'_{qr} ; \quad (45)$$

$$Q_s = \frac{3 L_m^2}{2 L_s} \omega_s i_{ms} (i_{ms} - i'_{dr}) . \quad (46)$$

Remiantis priimtomis prielaidomis ir (32)-(33) formulėmis, išreiškiamos rotoriaus įtampos lygtys d-q atskaitos sistemoje.

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \sigma L'_r \frac{d}{dt} i'_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \sigma L'_r i'_{qr}; \quad (47)$$

$$v'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \sigma L'_r \frac{d}{dt} i'_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \left(\frac{\sigma L'_r i'_{dr} + L_m^2 i_{ms}}{L_s} \right); \quad (48)$$

čia, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L'_r}$ - konstanta.

Srovės reguliavimo kilpos algoritmo veikimas pagrįstas remiantis rotoriaus srovės projekcijų q ir d ašyse užduotomis vertėmis. Šios vertės yra apskaičiuojamos nustačius generatoriaus rotorių veikiančio sukimo momento vertę ir elektros tinklui reikalingos reaktyviosios galios vertę [29].

Remiantis priimtomis prielaidomis ir (38)-(40) formulėmis, elektromagnetinis generatoriaus kuriamas momentas gali būti išreiškiamas taip:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\Psi_{qs} i'_{dr} + \Psi_{ds} i'_{qr}); \quad (49)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} [\overline{\Psi}_s] i'_{qr}. \quad (50)$$

Jeigu statoriaus aktyvioji varža R_s yra neįvertinama, tai yra priimtina sąlyga, kuri nesudaro didelės skaičiavimo paklaidos, kai atliekami didelės galios variklių skaičiavimai [33], tai statoriaus aktyviosios ir reaktyviosios galios lygtis galime išreikšti:

$$P_s = \frac{-3}{2} \frac{L_m}{L_s} i'_{qr}; \quad (51)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{L_m^2}{L_s} \left(\frac{v_{qs}}{\omega_s L_m} - i'_{dr} \right). \quad (52)$$

Analizuojant statoriaus reaktyviosios galios išraiškas d-q atskaitos sistemoje pabrėžiama, jog statoriaus reaktyvioji galia tiesiogiai priklauso nuo rotoriaus srovės projekcijos d ašyje dedamosios.

Remiantis priimtomis prielaidomis, rotoriaus elektros grandinės puslaidininkinio elektros energijos keitiklio įtampos užduoties valdymas gali būti išpildomas logine srovės valdymo kilpa, kurioje užduotosios vertės palaikymas yra įgyvendinamas PI reguliatoriaus pagalba. Šios loginės srovės valdymo kilpos įtampos užduoties funkcijos:

$$v'_{dr} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i'_{dr}^* - i'_{dr}) + s \omega_s \sigma L'_r i'_{qr}; \quad (53)$$

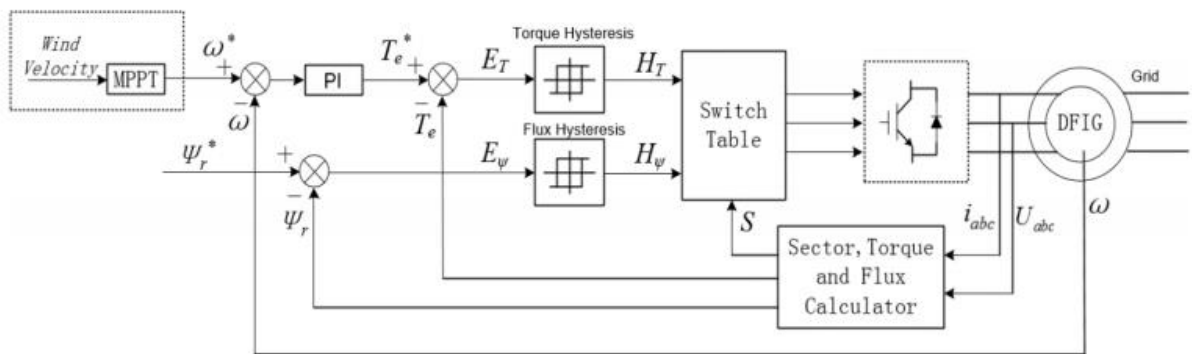
$$v'_{qr} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i'_{qr}^* - i'_{qr}) + s \omega_r \left(\sigma L'_r i'_{dr} + \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} \right); \quad (54)$$

čia, K_p , K_i - atitinkamai, proporcinis ir integralinis PI reguliatoriaus koeficientai;

i'_{dr}^* , i'_{qr}^* - rotoriaus srovės vektoriaus projekcijų d ir q ašyse užduotosios vertės, A.

4.2. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymas, paremtas tiesioginiu sukimo momento valdymu

Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi tiesioginio sukimo momento valdymo strategija paremta tiesioginiu rotoriaus apvijoms perduodamos įtampos vektorius v'_r valdymu, kurio erdvinė padėtis nustatoma remiantis rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto Ψ'_r ir elektromagnetinio momento M_{em} dydžiu, bei rotoriaus magnetinio srauto erdvine padėtimi [21].



4.3 pav. Tiesioginės momento valdymo sistemos principinis vaizdas [19]

Remiantis 4.3 paveiksle pavaizduota logine valdymo grandine, elektromagnetinio momento M_{em}^* užduotoji vertė ir rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto Ψ'_r užduotoji vertė yra lyginamos su apskaičiuotomis reikšmėmis. Elektromagnetinio momento užduotoji vertė M_{em}^* nustatoma iš rotoriaus sukimosi greičio regulatoriaus ir PI kontrolerio, o rotoriaus greičio užduoties vertė ω_r^* nustatoma iš maksimalios galios taško sekimo algoritmo.

Tiesioginė momento valdymo strategija, skirta asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymui, turi paprastesnę struktūrą ir mažesnę priklausomybę nuo elektros mašinos parametrų lyginant su magnetinio srauto erdvinio vektorius valdymo strategija. Tiesioginė momento valdymo strategija yra paremta tinkamos įtampos vektorius erdvinės projekcijos parinkimu, kuri parenkama iš puslaidininkinių elektros energijos keitiklio ventilių perjungimų lentelės. Įtampos vektorius padėties nustatymas yra paremtas apskaičiuojamo rotoriaus apvijų magnetinio srauto ir elektromagnetinio momento valdymu naudojant histerezės regulatorius.

Rotoriaus apvijų kuriamas magnetinis srautas apskaičiuojamas :

$$\Psi'_r = \int_0^t (v'_r - R'_r i'_r) dt ; \quad (55)$$

čia, Ψ'_r – rotoriaus apvijų kuriamo magnetinis srautas, Wb.

Rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto projekcijos stacionarios α - β atskaitos sistemos α ir β ašyse:

$$\Psi'_{\alpha r} = \int_0^t (v'_{\alpha r} - R'_r i'_{\alpha r}) dt ; \quad (56)$$

$$\Psi'_{\beta r} = \int_0^t (v'_{\beta r} - R'_r i'_{\beta r}) dt ; \quad (57)$$

čia, $\Psi'_{\alpha r}$, $\Psi'_{\beta r}$ – rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto projekcijos α ir β ašyse, Wb.

Tuomet, rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto modulis ir erdvinis kampas stacionarioje α - β atskaitos sistemoje apskaičiuojami:

$$\Psi'_r = \sqrt{\Psi'^2_{\alpha r} + \Psi'^2_{\beta r}} ; \quad (58)$$

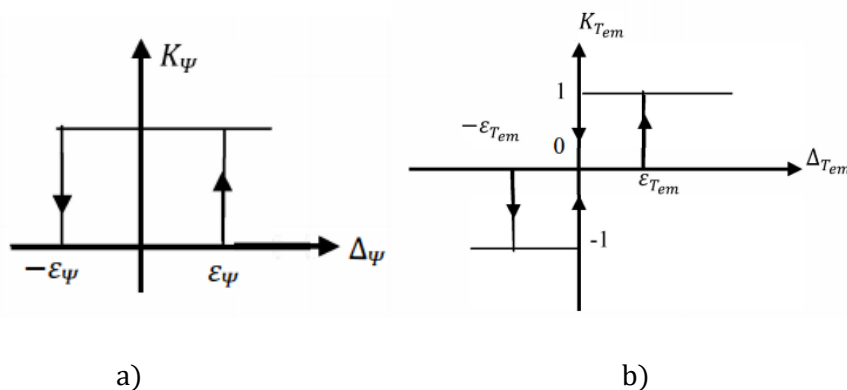
$$\Theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{\Psi'_{\beta r}}{\Psi'_{\alpha r}} \right). \quad (59)$$

Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi kuriamas elektromagnetinis momentas apskaičiuojamas:

$$M_{em} = p(i'_{\beta r} \Psi'_{\alpha r} - i'_{\alpha r} \Psi'_{\beta r}). \quad (60)$$

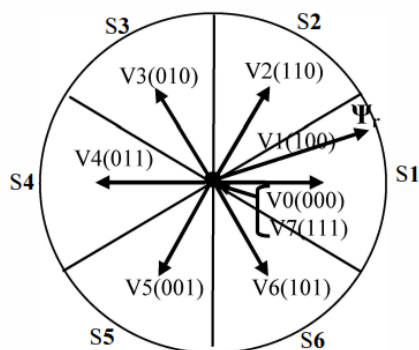
Rotoriaus apvijų kuriamas magnetinis srautas Ψ'_r yra valdomas dviejų lygių histerezės reguliatoriumi. Kai magnetinio srauto amplitudės vertė yra didesnė už užduotą magnetinio srauto amplitudės vertę, tai rotoriaus magnetinio srauto histerezės reguliatoriaus koeficientas K_Ψ yra prilyginamas 1, o kai nukrinta žemiau nurodytosios vertės: $K_\Psi = 0$.

Elektromagnetinio momento reguliatorius sudaromas iš 3 lygių histerezės reguliatoriaus. Šis reguliatorius elektromagnetinio momento reguliavimo koeficientui K_M gali suteikti vieną iš trijų reikšmių: 1,0 ir -1.



4.4 pav. Histerezės reguliatoriai: a- magnetinio srauto, b – elektromagnetinio momento [14]

Yra aštuonios puslaidininkinio keitiklio valdymo kombinacijos iš kurių šešios yra aktyvaus vektoriaus, V1-V6, ir dvi, V0 ir V7, nulinio vektoriaus. Galimos erdvinio rotoriaus įtampos vektoriaus išsidėstymo erdvėje padėtys ir erdvės sekcijų erdvinis vaizdas pateikiamas 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto valdymas remiantis įtampos vektoriaus erdvine pozicija [19]

Remiantis rotoriaus apvijų kuriamo magnetinio srauto vektoriaus pozicija erdvėje, kuri gali būti vienoje iš 6 erdvinių pozicijų, bei magnetinio srauto vektoriaus ir elektromagnetinio momento histerezės reguliatorių koeficientų reikšmėmis, yra nustatoma puslaidininkinio elektros energijos keitiklio ventilių būsenų kombinacijos.

4.1 lentelė. Puslaidininkinio elektros energijos keitiklio perjungimų lentelė [19]

Pozicija erdvėje		1	2	3	4	5	6
K_Ψ	K_M						
$K_\Psi = 1$	$K_M = 1$	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	$K_M = 0$	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	$K_M = -1$	V6	V1	V2	V3	V4	V5
$K_\Psi = 0$	$K_M = 1$	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	$K_M = 0$	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	$K_M = -1$	V5	V6	V1	V2	V3	V4

4.3. Tiesioginės sukimo momento valdymo ir magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategijų lyginamoji apžvalga

Tiek tiesioginė sukimo momento valdymo strategija, tiek magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija paremta rotorius apvijų kuriamo magnetinio srauto vektoriaus orientacijos valdymu, kai šios valdymo strategijos pritaikomos asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymui. Abi šios strategijos yra vektorinio valdymo strategijos, tačiau jos turi didelius realizavimo skirtumus.

Tiesioginė sukimo momento valdymo strategija yra kur kas paprastesnė, lyginant su magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija. Tiesioginė sukimo momento valdymo strategija turi greitesnę reakciją į dinaminio momento svyravimus [23]. Ši elektros mašinų valdymo strategija dažniausiai pritaikoma didelių elektros pavarų valdymui, kurios veikiamos dinaminio sukimo momentų. Tačiau šios strategijos trūkumas yra tas, jog ji sudaro didelius elektros srovės ir elektromagnetinio sukimo momento svyravimus, kuriuos įtakoja loginėje struktūroje realizuojami elektromagnetinio sukimo momento ir magnetinio srauto histerezės reguliatoriai [21]. Skirtingai, nei magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija, tiesioginėje sukimo momento valdymo strategijoje nereikalingi srovės dedamųjų PI reguliatoriai, atskaitos sistemų transformacijos ir impulso pločio moduliacijos signalų generatoriai [10]. Neatsižvelgiant į šios valdymo strategijos trūkumus, tiesioginė sukimo momento valdymo strategija suteikia geras momento valdymo galimybes nusistovėjusiame darbo režime, kai ji pritaikoma mažos ir vidutinės galios elektros pavarų valdymui [23].

Magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija, pritaikyta asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi valdymui, tiesiogiai kontroliuoja rotorius srovės vektoriaus projekcijas d-q atskaitos sistemos d ir q ašyse. Ši valdymo strategija suteikia geresnes elektros parametrų reguliavimo galimybes nusistovėjusiame darbo režime, nei tiesioginė momento valdymo strategija. Be to, magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija tiesiogiai reguliuodama rotorius srovės projekcijas d-q atskaitos sistemos d ir q ašyse sudaro mažesnę generuojamų aukštesnių įtampos harmonikų lygį statoriaus apvijuose, lyginant su tiesiogine momento valdymo strategija [22]. Dėl mažesnių aukštesnių harmonikų lygio, asinchroninio elektros generatoriaus su faziniu rotoriumi oro tarpe sukuriamas tolygesnis sukamasis magnetinis laukas, todėl elektros generatorius dirba efektyviau. Tačiau modulinėje šios valdymo strategijos struktūroje įdiegiamas proceso laikmatis, tai riboja elektromagnetinio sukimo momento valdymo reakciją. Be to, magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo strategija priklauso nuo elektrinių ir mechaninių elektros pavaros parametrų.

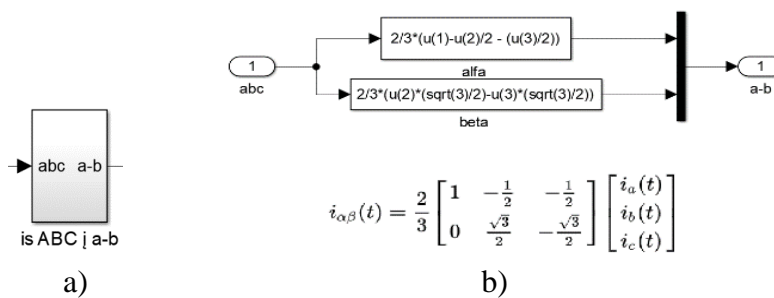
Sudarytame matematiniam modelyje naudojamas programos „powerlib“ bibliotekoje esantis asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi matematinis modelis, kuris atitinka 3.2 skyriuje aprašytą matematinį modelį. Generatorių parametrai, kurie naudojami matematiniam modelyje, pateikiami 5.1 lentelėje. Modelyje įvertinta turbinos inercija.

5.1 lentelė. Asinchroninių generatorių su faziniu rotoriumi parametrai

Parametras	Vertė	Vertė
Generatorius		
Nominali generatoriaus aktyvioji galia	$P_n = 1,5 \text{ MW}$	$P_n = 2 \text{ MW}$
Nominali linijinė statoriaus apvijų įtampa	$U_s = 575 \text{ V}$	$U_s = 690 \text{ V}$
Nominali rotoriaus apvijų įtampa	$U_r = 575 \text{ V}$	$U_r = 2\,070 \text{ V}$
Elektros tinklo dažnis	$f_t = 50 \text{ Hz}$	$f_t = 50 \text{ Hz}$
Polių porų skaičius	$p = 2$	$p = 2$
Perskaičiavimo koeficientas	$u = 1$	$u = 1/3$
Nominalus slydimas	$s_n = 4\%$	$s_n = 4\%$
Statoriaus apvijų aktyvioji varža	$R_s = 1,4 \text{ m}\Omega$	$R_s = 2,6 \text{ m}\Omega$
Statoriaus apvijų sklaidos induktyvumas	$L_{\sigma s} = 0,08998 \text{ mH}$	$L_{\sigma s} = 0,0871 \text{ mH}$
Rotoriaus perskaičiuota apvijų aktyvioji varža	$R'_r = 9,92 \text{ m}\Omega$	$R'_r = 2,9 \text{ m}\Omega$
Rotoriaus apvijų perskaičiuotas sklaidos induktyvumas	$L'_{\sigma r} = 0,08209 \text{ mH}$	$L'_{\sigma r} = 0,087 \text{ mH}$
Magnetinės grandinės induktyvumas	$L_m = 1,53 \text{ mH}$	$L_m = 2,52 \text{ mH}$
Inercija	$J_g = 81,2 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$	$J_g = 121,5 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
Variklio masė	$m_g = 7\,070 \text{ kg}$	$m_g = 7\,830 \text{ kg}$
Turbina		
Turbinos inercijos momentas	$J_T = 1\,003,22 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$	$J_T = 1\,048,88 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
Rotoriaus spindulys	$R_t = 35 \text{ m}$	$R_t = 37,5 \text{ m}$
Reduktoriaus perdavimo koeficientas	$GR = 70$	$GR = 75$

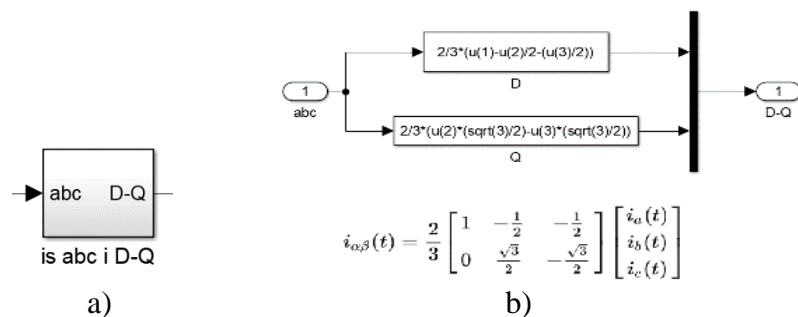
5.2. Valdymo algoritmo realizavimas

Rotoriaus pusės puslaidininkinio elektros energijos keitiklio valdymo algoritmas realizuojamas remiantis matematiniu modeliu, kuris pateikiamas 4.1 skyriuje. Valdymo algoritmo matematiniame modelyje realizuotos atskaitos sistemų transformacijų operacijos. Parametrų perskaičiavimas iš trifazės abc atskaitos sistemos į dvifazę d-q atskaitos sistemą realizuojamas tam, kad supaprastinti parametrų analizę ir valdymo algoritmo realizavimą. Pradžioje atliekamas statoriaus apvijų trifazės abc atskaitos sistemos parametrų perskaičiavimas į dvifazės α - β atskaitos sistemos parametrus. Perskaičiavimų realizavimas pateikiamas 5.2 paveiksle.



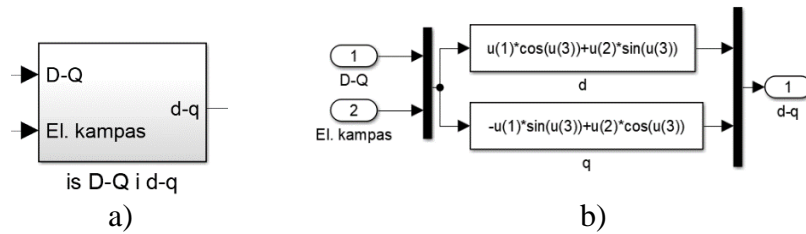
5.2 pav. Algoritmo, skirto statoriaus trifazių abc sistemos parametrų perskaičiavimui į dvifazės α - β atskaitos sistemos parametrus, realizavimas: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra

Kadangi rotorius sukasi, tai rotoriaus apvijų elektros energijos parametrai kinta laike, o apvijos keičia erdvine pozicija kartu su rotoriumi. Todėl rotoriaus apvijų elektros energijos parametrai iš trifazės abc sistemos perskaičiuojami į D-Q dvifazę sistemą, kuri sukasi rotoriaus mechaniniu kampiniu greičiu apie savo ašį. Perskaičiavimo algoritmas pavaizduotas 5.3 paveiksle.



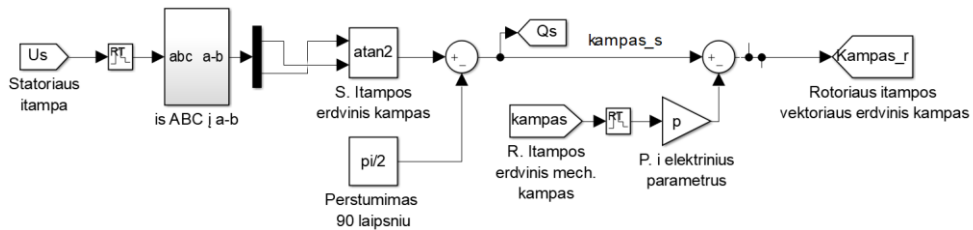
5.3 pav. Algoritmo, skirto rotoriaus trifazių abc sistemos parametrų perskaičiavimui į dvifazės D-Q atskaitos sistemos parametrus, realizavimas: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra

Statoriaus ir rotoriaus elektros energijos parametrai perskaičiuojami į bendrą d-q atskaitos sistemą. Perskaičiavimo iš rotoriaus dvifazės atskaitos sistemos D-Q į sinchroniniu greičiu statoriaus atžvilgiu besisukančią d-q atskaitos sistemą realizavimas modelyje pateikiamas 5.4 paveiksle.



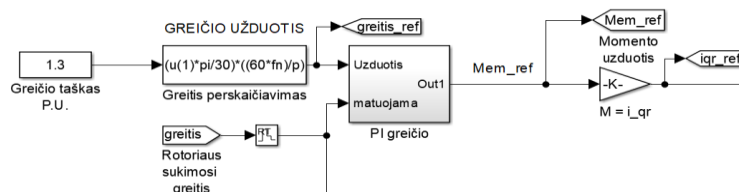
5.4 pav. Algoritmo, skirto rotoriaus dvifazių D-Q atskaitos sistemos parametrų perskaičiavimui į dvifazės d-q atskaitos sistemos parametrus, realizavimas: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra

Erdvinis kampas tarp d-q atskaitos sistemos d ašies ir α - β atskaitos sistemos α ašies apskaičiuojamas remiantis statoriaus apvijoms tiekiamos įtampos vektoriaus erdvine pozicija α - β atskaitos sistemoje. Šis erdvinio kampo nustatymo algoritmas leidžia išlaikyti statoriaus apvijų įtampos dažnį, kai reguliuojama rotoriaus įtampa. Bei remiantis gauta reikšme nustatomos rotoriaus apvijų srovės vektoriaus projekcijos d-q atskaitos sistemos d ir q ašyse. Šio erdvinio kampo apskaičiavimo algoritmas pateikiamas 5.5 paveiksle.



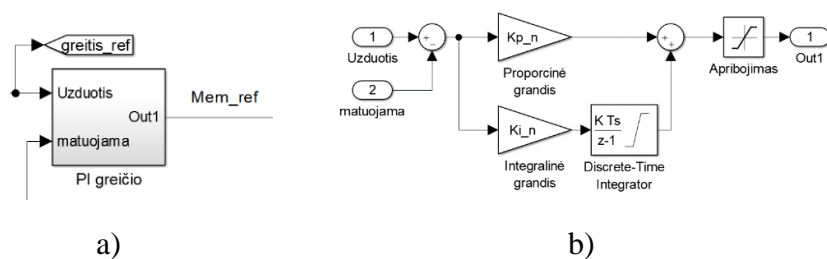
5.5 pav. Erdvinio kampo tarp d-q atskaitos sistemos d ašies ir α - β atskaitos sistemos α ašies apskaičiavimo algoritmas

Siekiant nustatyti sistemos darbo režimus esant tikslioms greičio užduoties vertėms realizuota santykinio greičio perskaičiavimo į kampinį greitį grandis. Realizavus greičio PI reguliatorių nustatoma elektromagnetinio momento užduoties vertė generatoriaus rotoriaus srovės valdymo kilpai. Remiantis elektromagnetinio momento užduoties vertė M_{em} ir (50) formule, apskaičiuojama rotoriaus srovės vektoriaus projekcijos į d-q atskaitos sistemos q ašį i_{qr} užduoties vertė. Šio algoritmo realizavimas pateikiamas 5.6 paveiksle.



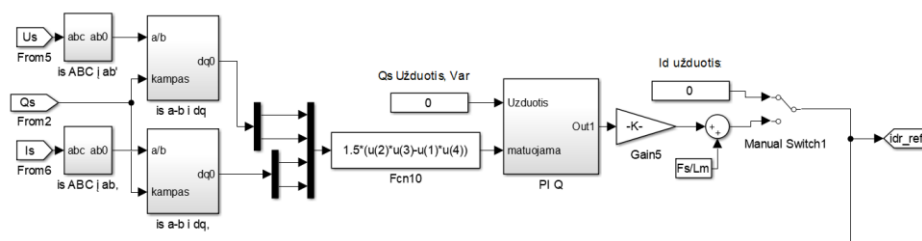
5.6 pav. Rotoriaus srovės atstojamojo vektoriaus projekcijos q ašyje užduoties apskaičiavimo algoritmas

Generatoriaus rotoriaus greičio PI regulatoriaus, kuris reguliuoja valdymo algoritmo elektromagnetinio sukimo momento užduoties vertę M_{em} , realizavimas pateikiamas 5.7 paveiksle. Šio regulatoriaus apskaičiuotoji reikšmė apribojama nuo $-M_n$ iki M_n .



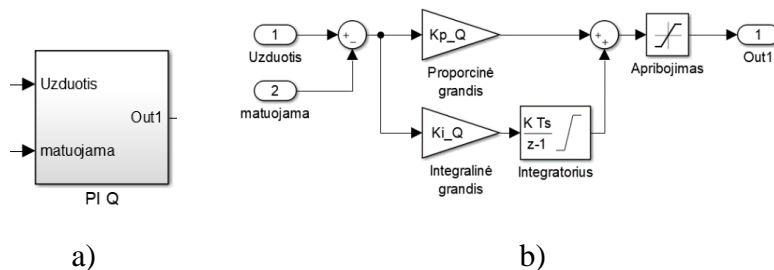
5.7 pav. Rotoriaus greičio PI regulatorius: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra

Rotoriaus apvijomis tekančios srovės vektoriaus projekcija d-q atskaitos sistemos d ašyje i_{dr} reguliuojama remiantis statoriaus apvijų reaktyviosios galios srautu ir reaktyviosios galios užduotąja verte. Remiantis (24) formule ir naudojant atitinkamas atskaitos sistemų transformacijas, nustatoma statoriaus reaktyviosios galios momentinė vertė. Ši vertė ir užduodama reaktyviosios galios vertė sulyginamos naudojant PI reguliatorių. Remiantis (46) formule nustatoma rotoriaus apvijų srovės vektoriaus projekcija d-q atskaitos sistemos d ašyje i_{dr} . Šių veiksmų realizavimas modelyje pateikiamas 5.8 paveiksle.



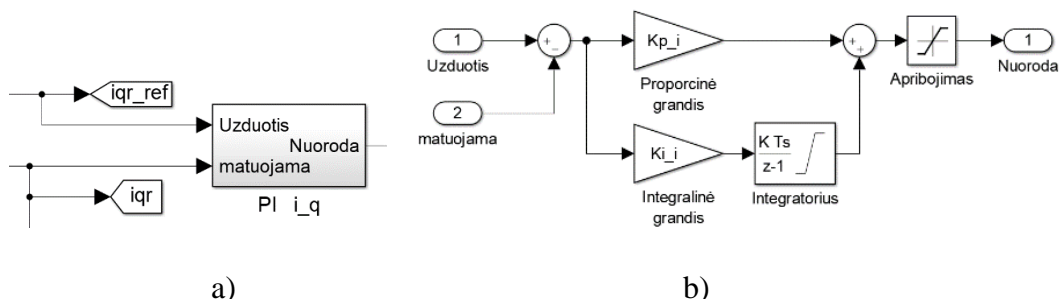
5.8 pav. Rotoriaus apvijomis tekančios srovės atstojamojo vektoriaus projekcijos d ašyje užduoties apskaičiavimo, remiantis reaktyviosios galios užduotimi, algoritmas

Statoriaus reaktyviosios galios valdymo grandies PI regulatoriaus realizavimas pateikiamas 5.9 paveiksle. Šio regulatoriaus apskaičiuotoji reikšmė apribojama nuo $-P_n$ iki P_n .

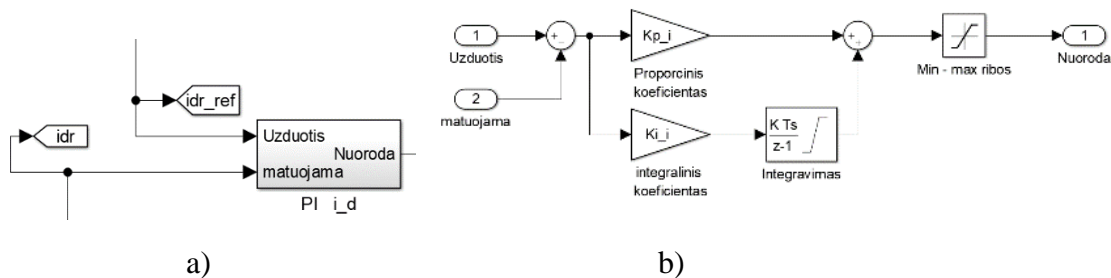


5.9 pav. Statoriaus reaktyviosios galios PI regulatoriaus realizavimas. a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra

Statoriaus reaktyviosios galios reguliavimo grandies ir generatoriaus veleno sukimosi greičio reguliavimo grandies perduodamos rotoriaus srovės vektoriaus projekcijų d-q atskaitos sistemoje užduotys yra analizuojamos srovės vektoriaus projekcijų q ir d ašyse PI reguliatoriuose. Srovės dedamųjų PI reguliatoriai pateikiami 5.10 ir 5.11 paveiksluose. Šių reguliatoriaus apskaičiuotoji reikšmė apribojama nuo $-V_{dc}$ iki V_{dc} .

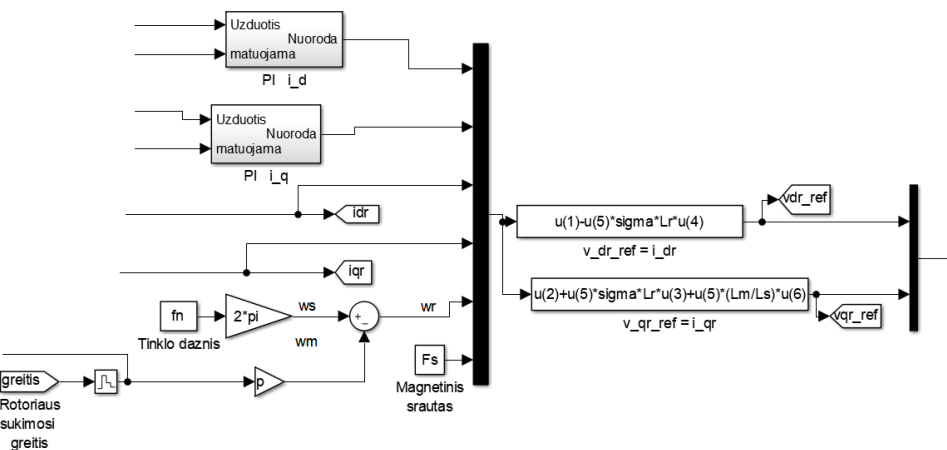


5.10 pav. Rotoriaus srovės vektoriaus projekcijos q ašyje dedamosios PI reguliatoriaus: a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra



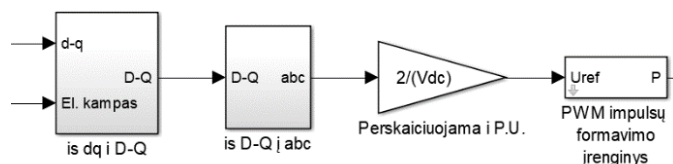
5.11 pav. Rotoriaus srovės vektoriaus projekcijos d ašyje dedamosios PI reguliatoriaus a – vaizdas modelyje; b – vidinė struktūra

Remiantis (47)(48) formulėmis apskaičiuojamos rotoriaus apvijų įtampos vektoriaus projekcijų d-q atskaitos sistemos d ir q ašyse vertės. Ši matematinio modelio dalis pateikiama 5.12 paveiksle.



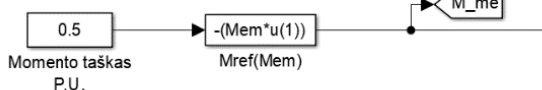
5.12 pav. Rotoriaus įtampos vektoriaus projekcijų d ir q ašyse dedamųjų skaičiavimo algoritmas

Gautos rotoriaus apvijų įtampos vektoriaus projekcijų d ir q ašyse užduočių vertės perskaičiuojamos iš dvifazės d - q atskaitos sistemos į trifazę abc sistemą. O momentinės santykinės rotoriaus apvijų įtampos vertės perduodamos į impulsų pločio formavimo funkcinį bloką, kuris formuoja valdymo signalus rotoriaus pusės elektros energijos keitiklio ventilių valdymui.



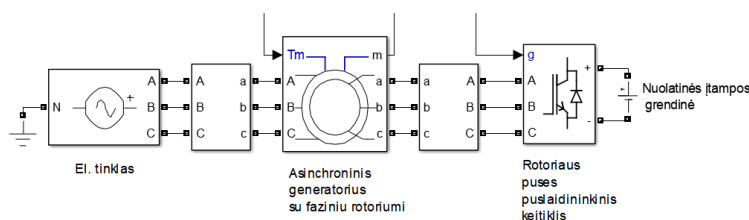
5.13 pav. Rotoriaus įtampos vektoriaus užduoties perskaičiavimo į puslaidininkinio keitiklio valdymo impulsus algoritmas

Atitinkamai, nustatomas generatoriui perduodamas mechaninis sukimo momentas. Šio momento perskaičiavimo iš santykinio dydžio algoritmas pateikiamas 5.14 paveiksle.



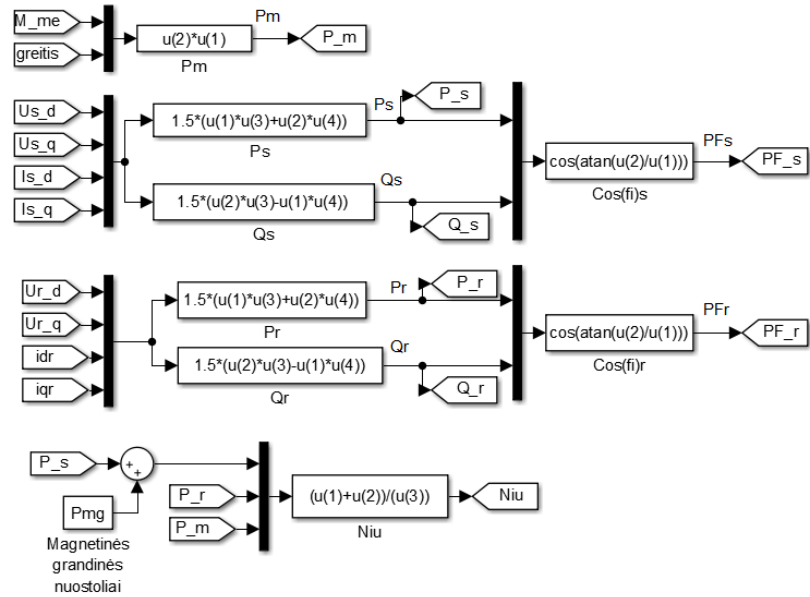
5.14 pav. Generatoriaus apkrovos momento apskaičiavimo algoritmas

Valdomo generatoriaus ir galios grandinės realizavimas modelyje pateikiamas 5.15 paveiksle. Valdomas tik rotoriaus pusės elektros energijos keitiklis. Priimama prielaida, jog nuolatinės grandinės įtampa yra stabili ir palaikoma neatsižvelgiant į galios srautus.



5.15 pav. Galios grandinės realizavimas

Remiantis (23)(24) formulėmis apskaičiuojama momentinė statoriaus apvijų aktyvioji ir reaktyvioji galia. Atitinkamai, remiantis (25)(26) formulėmis apskaičiuojama aktyvioji ir reaktyvioji galia, kurią perduoda elektros energijos keitiklis. Remiantis šiais galios srautais ir mechanine apkrovos galia nustatomas generatoriaus efektyvumas. Skaičiavimų realizavimas matematiname modelyje pateikiamas 5.16 paveiksle.



5.16 pav. Galios srautų ir naudingumo koeficiento momentinės vertės apskaičiavimo algoritmo realizavimas

Magnetinės grandinės aktyviosios galios nuostoliai įvertinami remiantis generatorių magnetolaidžio mase ir „isovac 600-65 A“ klasės elektrotechninio plieno galios nuostolių priklausomybe nuo magnetinio srauto tankio.

$$P_{z1} = k_{z1} * B_{z1}^2 * G_{z1} ; \quad (61)$$

$$P_{j1} = k_{j1} * B_{j1}^2 * G_{j1} ; \quad (62)$$

$$P_m = P_{j1} + P_{z1} ; \quad (63)$$

čia, P_{z1} , P_{j1} ir P_m – statoriaus magnetolaidžio dantų, magnetolaidžio jungo ir suminiai magnetolaidžio aktyviosios galios nuostoliai, W;

k_{z1} , k_{j1} - magnetolaidžio dantų ir jungo galios nuostolių koeficientai, W/kg;

B_{z1} , B_{j1} - magnetolaidžio dantų ir jungo magnetinio srauto tankis, T;

G_{z1} , G_{j1} - magnetolaidžio dantų ir jungo masė, Kg.

Apskaičiuojami 1,5MW generatoriaus magnetinės grandinės aktyviosios galios nuostoliai:

$$P_{z1_{1.5}} = 4,45 * 1,45^2 * 636,45 = 5,9657 \text{ kW} ;$$

$$P_{j1_{1.5}} = 2,98 * 1,2^2 * 3606,55 = 15,476 \text{ kW} ;$$

$$P_{m_{1.5}} = 5\,965,7 + 15\,476 = 21,431 \text{ kW} .$$

Apskaičiuojami 2MW generatoriaus magnetinės grandinės aktyviosios galios nuostoliai:

$$P_{z1,2} = 4,45 * 1,45^2 * 778,5 = 7,2837 \text{ kW} ;$$

$$P_{j1,2} = 2,98 * 1,2^2 * 4414,5 = 18,944 \text{ kW} ;$$

$$P_{m,2} = 7\,283,7 + 18\,944 = 26,277 \text{ kW} .$$

PI reguliatorių proporcinės ir integralinės grandies koeficientai pateikiami 5.2 lentelėje.

5.2 lentelė. PI reguliatorių koeficientai

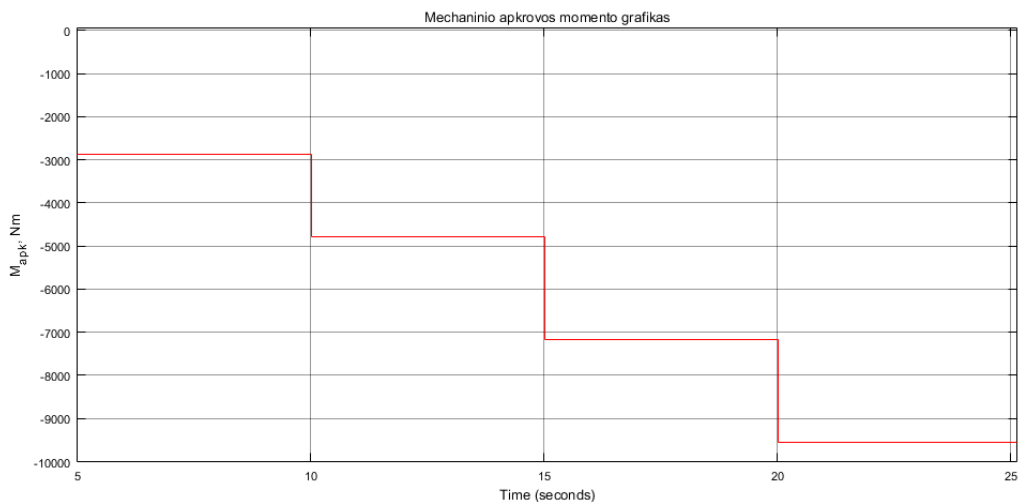
	1,5 MW generatorius		2 MW generatorius	
	Proporcinis koeficientas K_p	Integralinis koeficientas K_i	Proporcinis koeficientas K_p	Integralinis koeficientas K_i
Rotoriaus srovės vektoriaus projekcijų į d ir q ašis reguliatorių	$K_{p,i} = 0,05$	$K_{i,i} = 5$	$K_{p,i} = 0,58$	$K_{i,i} = 50$
Rotoriaus greičio reguliatoriaus	$K_{p,n} = 21\,688,4$	$K_{i,n} = 216\,884$	$K_{p,n} = 14\,230$	$K_{i,n} = 142\,300$
Reaktyviosios galios reguliatoriaus	$K_{p,Q} = -1,482 * 10^{-5}$	$K_{i,Q} = 5,49 * 10^{-5}$	$K_{p,Q} = -5,97 * 10^{-5}$	$K_{i,Q} = 2,46 * 10^{-6}$

5.3. Tyrimo rezultatai

Sudaryto matematinio modelio modeliavimas atliekamas nustatytuose darbo taškuose. Darbo taškų sąrašas sudaromas remiantis IEC 61800-9-2 standartu ir apribojant mechaninės apkrovos galią iki nominalios generatoriaus galios, kai generatoriaus velenas sukasi sinchroniniu greičiu. Tiriamų darbo taškų apkrovos momento ir rotoriaus sukimosi greičio vertės pateikiamos 1 priede.

Modeliavimo metu apskaičiuotos srovių ir įtampų vertės grafikuose pateikiamos perskaičiuotos į d-q atskaitos sistemą. Tai palengvina duomenų analize ir aiškiau pateikia modeliavimo duomenis. Generatorių modeliavimo rezultatai analizuojami $\omega_m = 0,8\omega_s$, $\omega_m = 0,96\omega_s$ ir $\omega_m = 1,04\omega_s$ rotoriaus greičio užduoties taškuose, kuriuose keičiamas generatoriaus apkrovos momentas.

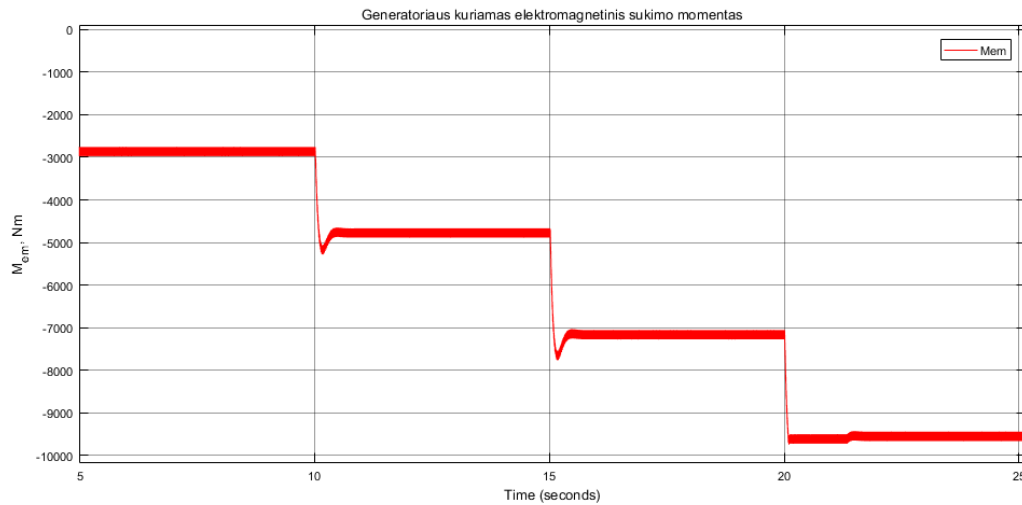
Pirmiausia išanalizuojami 1,5MW generatoriaus modeliavimo rezultatai. Valdymo sistemai nustatoma $\omega_m=0,8\omega_s$ generatoriaus rotoriaus sukimosi greičio užduotis. Nusistovėjusiame generatoriaus darbo režime apkrovos momentas keičiamas. Apkrovos momento kitimo grafikas pateikiamas 5.17 paveiksle. Apkrovos momento vertės keičiamos kas 5 s, esant 10s, 15s ir 20s. Ši tendencija išlaikoma pasikeitus generatoriaus greičio užduoties vertei. Apkrovos momento vertės kinta atitinkamai: -2 864,79Nm; -4 774,65Nm; -7 161,97Nm ir -9 549,29Nm. Didžiausia apkrovos momento vertė pakeičiama į -9 071,82Nm, kai $\omega_m = 1,04\omega_s$ tam, kad nebūtų viršijama suminė generatoriaus galia.



5.17 pav. 1,5MW generatoriaus apkrovos momentas M_{apk} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$

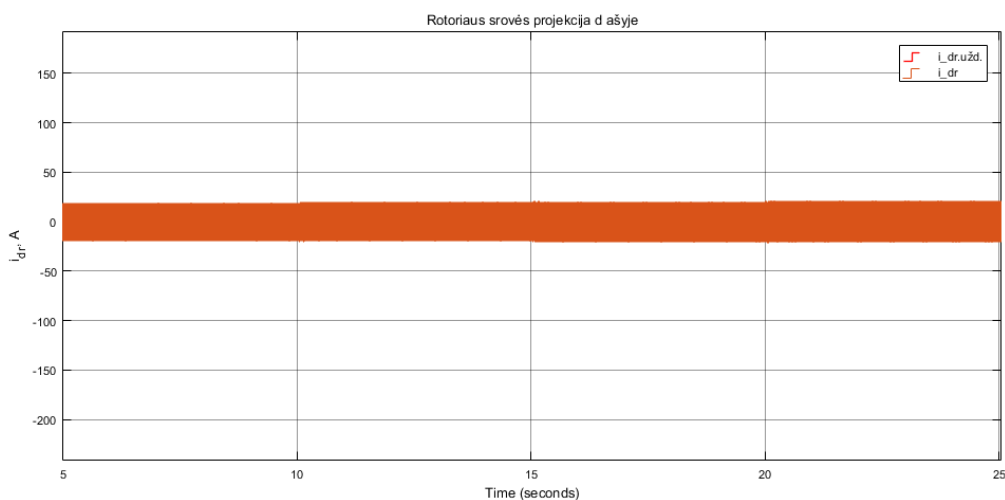
Realizuota magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo sistema reguliuoja darbo tašką ir generatoriaus kuriamą elektromagnetinį sukimo momentą M_{em} , kuris pateikiamas 5.18 paveiksle.

Greičio PI reguliatorius išlaiko generatoriaus greitį lygų generatoriaus greičio užduotajai vertei, tai pasiekama reguliuojant rotoriaus srovės vektoriaus projekcijos į q ašį i_{qr} vertę, kuri tiesiogiai proporcinga kuriamo elektromagnetinio sukimo momento M_{em} vertei.



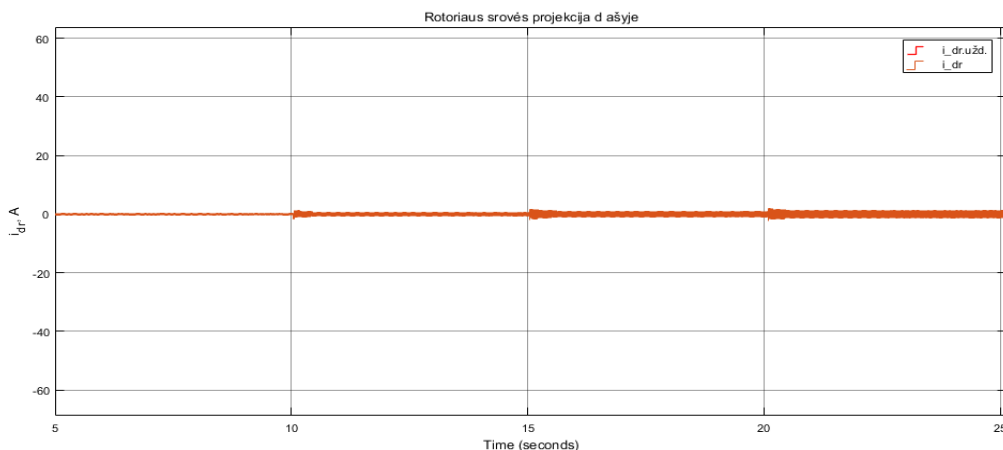
5.18 pav. 1,5MW generatoriaus elektromagnetinis sukimo momentas M_{em} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$

Išlaikydama didžiausią efektyvumą valdymo sistema rotoriaus srovės vektoriaus projekciją d ašyje i_{dr} išlaiko kintančią apie 0 vertę. Tai sumažina rotoriaus srovės amplitudę ir aktyviuosius galios nuostolius rotoriaus elektros grandinėje, kadangi rotoriaus srovės amplitudė išlaikoma mažiausia. Tačiau, kaip pastebima 5.19 paveiksle, rotoriaus srovės projekcija d ašyje svyruoja. Svyravimai siekia nuo -19,2A iki 19,2A, kai apkrovos momentas yra -4 774,65Nm ir rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$. Apkrovos momentą padidinus iki -9 549,29Nm rotoriaus srovės projekcijos d ašyje svyravimai išauga ir siekia nuo -20,3A iki 20,3A.



5.19 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$

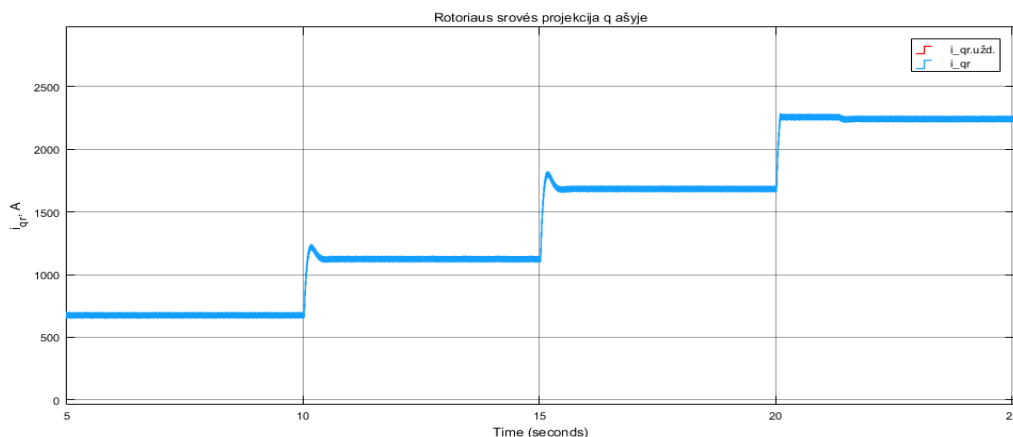
Geresnės generatoriaus darbo sąlygos pasiekiamos, kai valdymo sistemai užduota generatoriaus rotoriaus sukimosi greičio užduoties vertė yra 104 procentai sinchroninio generatoriaus greičio $\omega_m = 1.04\omega_s$. Tuomet valdymo sistemos reguliuojamos rotoriaus srovės projekcijos d ašyje svyravimai siekia nuo -0,44A iki 0,44A, kai santykinis apkrovos momentas yra -4 774,65Nm. Apkrovos momentą padidinus iki -9 071,82Nm rotoriaus srovės projekcijos d ašyje svyravimai išauga ir siekia nuo -1,35A iki 1,35A.



5.20 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$

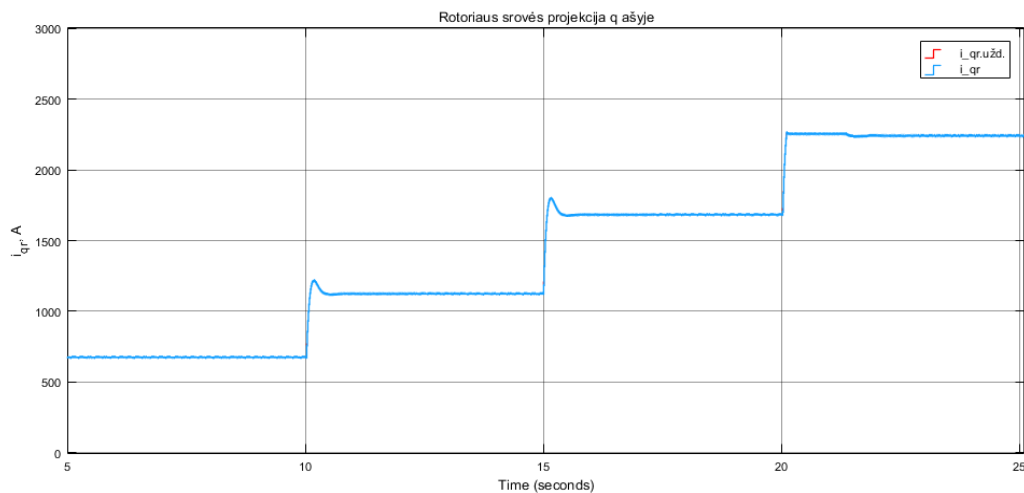
Šiuos svyravimus įtakoja elektros energijos keitiklio generuojamos aukštesnio dažnio harmonikos ir valdymo sistemos apskaičiuotos rotoriaus įtampos vektorių projekcijų d-q atskaitos sistemos ašyse verčių svyravimai, kurie įtakojami PI reguliatorių integralinės grandinės uždelimo į sistemos darbo taško kitimą ir matuojamos rotoriaus srovės svyravimus. Šiame modelyje duomenų nuskaitymo ciklo dažnis 20kHz.

Priklausimai nuo mechaninio apkrovos momento vertės valdymo sistema reguliuoja rotoriaus srovės projekcijos į q ašį i_{qr} vertę.



5.21 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

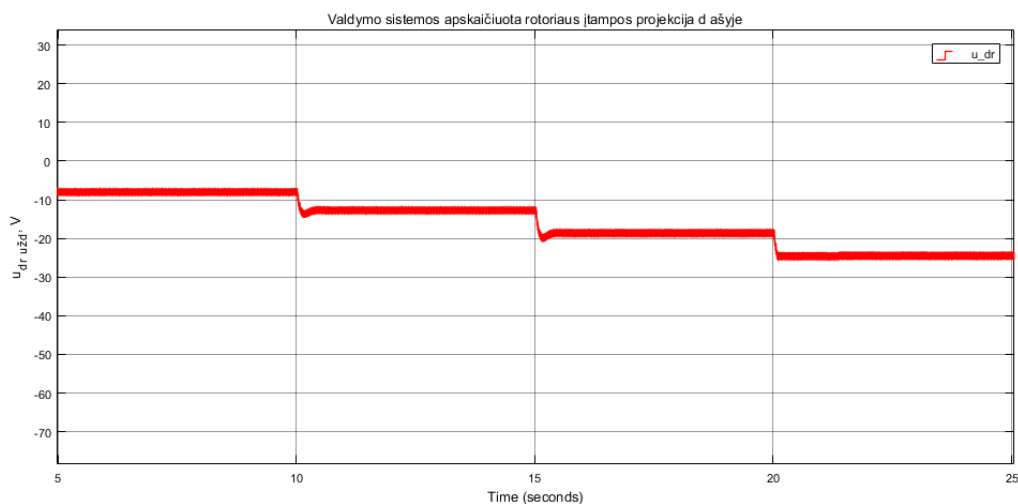
Kai generatoriaus rotoriaus sukimosi greičio užduotis yra $\omega_m=0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra $-4\,774,65\text{Nm}$, rotoriaus srovės projekcijos vertė q ašyje i_{qr} svyruoja nuo $1101,8\text{A}$ iki $1147,01\text{A}$. Apkrovos momentą padidinus iki $-9\,549,29\text{Nm}$ rotoriaus srovės projekcijos q ašyje i_{qr} svyravimai siekia nuo $2\,217,5\text{A}$ iki $2\,264,6\text{A}$. Rotoriaus sukimosi greitį padidinus iki $\omega_m = 0,96\omega_s$ rotoriaus srovės projekcijos vertė q ašyje i_{qr} svyruoja nuo $1118,1\text{A}$ iki $1130,03\text{A}$, kai apkrovos momentas yra $-4\,774,65\text{Nm}$. Apkrovos momentą padidinus iki $-9\,549,29\text{Nm}$ rotoriaus srovės projekcijos q ašyje i_{qr} svyravimai siekia nuo $2\,234,42\text{A}$ iki $2\,247,75\text{A}$.



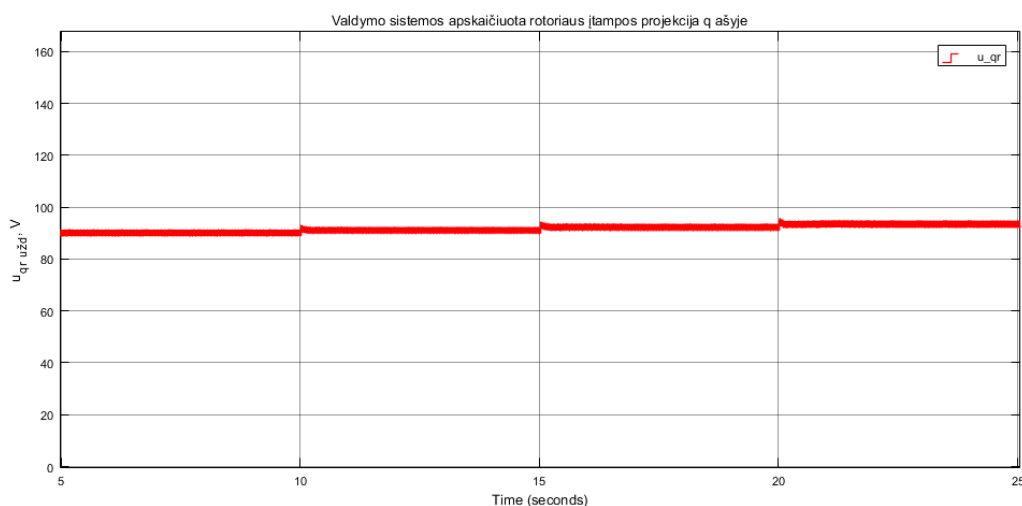
5.22 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$

Pakeitus valdymo sistemai užduotosios rotoriaus sukimosi greičio užduoties vertę, tačiau išlaikant mechaninio apkrovos momento kitimo tendenciją, valdymo sistemos reguliuojamos rotoriaus srovės projekcijos q ašyje i_{qr} vidutinė reikšmė išlaikoma nekintanti.

Remiantis rotoriaus atstojamojo srovės vektoriaus projekcijų į d ir q ašis užduotosiomis vertėmis ir matuojamomis rotoriaus srovės vektoriaus projekcijų į d ir q ašis vertėmis, valdymo algoritmas apskaičiuoja rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijų į d ir q ašis vertes. Valdymo algoritmo apskaičiuota rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijos į d ašį $u_{dr.uzd}$ vertė svyruoja nuo $-18,03\text{V}$ iki $-19,24\text{V}$, o projekcijos į q ašį vertė $u_{qr.uzd}$ svyruoja nuo $91,14\text{V}$ iki $93,48\text{V}$, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra $-7\,161,97\text{Nm}$. Didinant rotoriaus sukimosi greičio nuokrypį nuo sinchroninio greičio kartu didėja ir keitiklio perduodamos įtampos amplitudė. Tai pastebima sulyginus 5.23 ir 5.24 grafikus su 5.25 ir 5.26 grafikus.

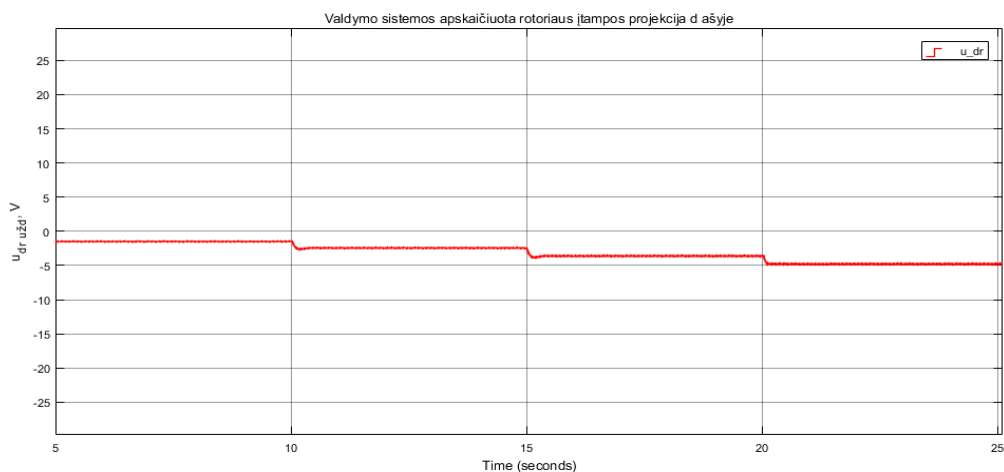


5.23 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje u_{dr_uzd} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

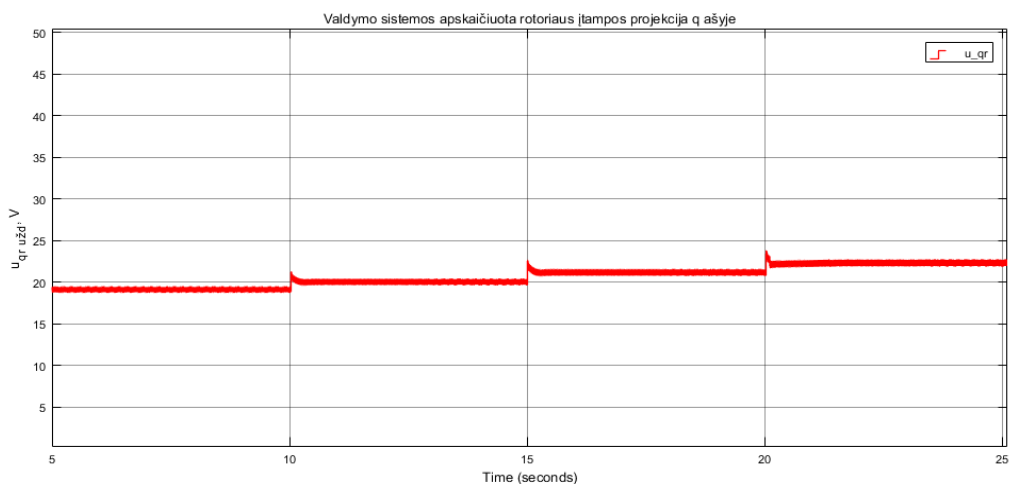


5.24 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje u_{qr_uzd} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

Rotoriaus sukimosi greičiui padidėjus nuo $\omega_m = 0,8\omega_s$ iki $\omega_m = 0,96\omega_s$ sumažėjusi indukuotoji įtampa rotoriaus apvijose bei įtampos dažnis ir reaktyvioji rotoriaus apvijų varža įtakoja valdymo sistemos apskaičiuotąsias rotoriaus įtampos projekcijų d ir q ašyse vertes, tai pastebima 5.25 ir 5.26 paveiksluose. Valdymo algoritmo apskaičiuota rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijos į d ašį u_{dr_uzd} vertė svyruoja nuo -3,57V iki -3,65V, o projekcijos į q ašį vertė u_{qr_uzd} svyruoja nuo 20,85V iki 21,49V, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,96\omega_s$, o apkrovos momentas yra -7 161,97Nm.

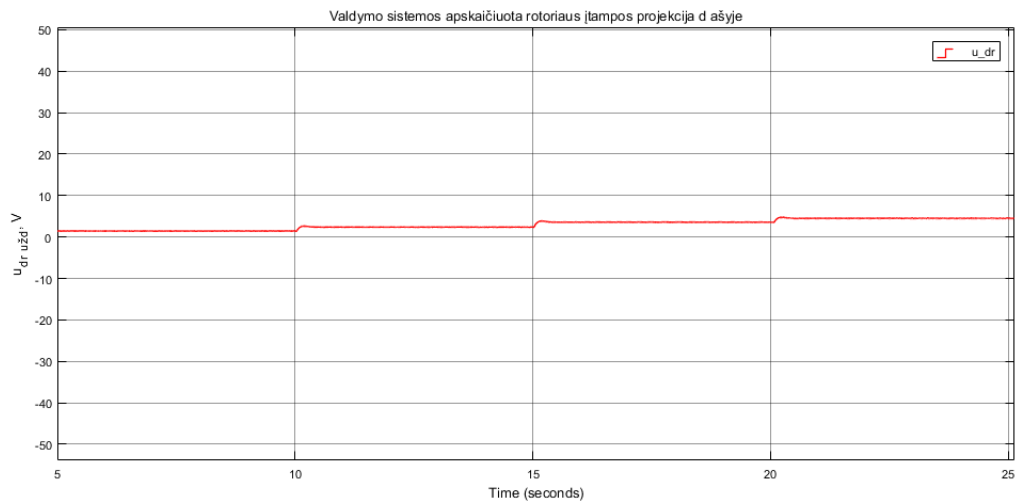


5.25 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$

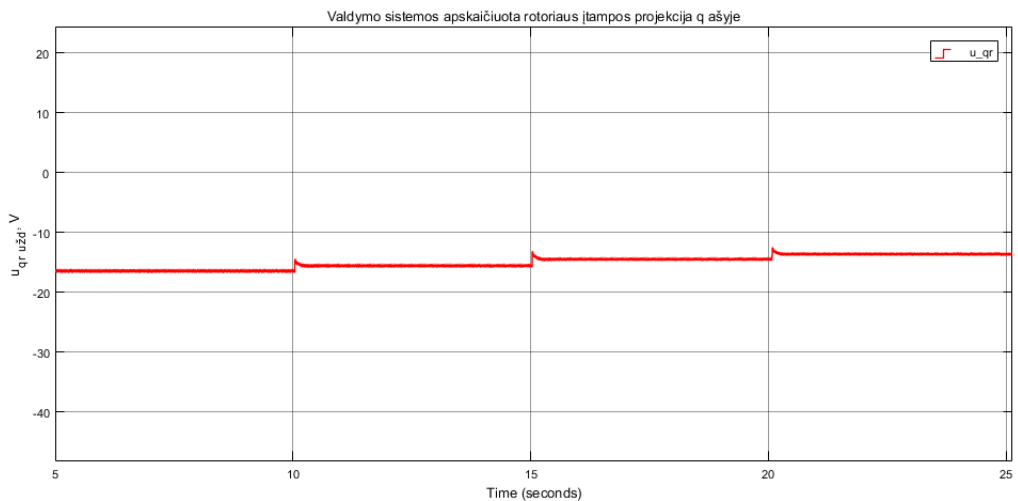


5.26 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$

Generatoriaus rotoriaus sukimosi greičiui viršijus sinchroninį rotoriaus sukimosi greitį indukuotosios rotoriaus apvijų įtampos vektorius kaičia padėtų kompleksinėje plokštumoje. Tam, kad išlaikyti rotoriaus apvijų srovės vektoriaus padėtį d-q atskaitos sistemoje valdymo sistema atitinkamai keičia puslaidininkinio keitiklio formuojamos įtampos vektoriaus padėtį d-q atskaitos sistemoje. Valdymo algoritmo apskaičiuota rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijos į d ašį $u_{dr.užd}$ vertė svyruoja nuo 3,49V iki 3,62V, o projekcijos į q ašį vertė $u_{qr.užd}$ svyruoja nuo -14,69V iki -14,26V, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 1,04\omega_s$, o apkrovos momentas yra -7 161,97Nm.

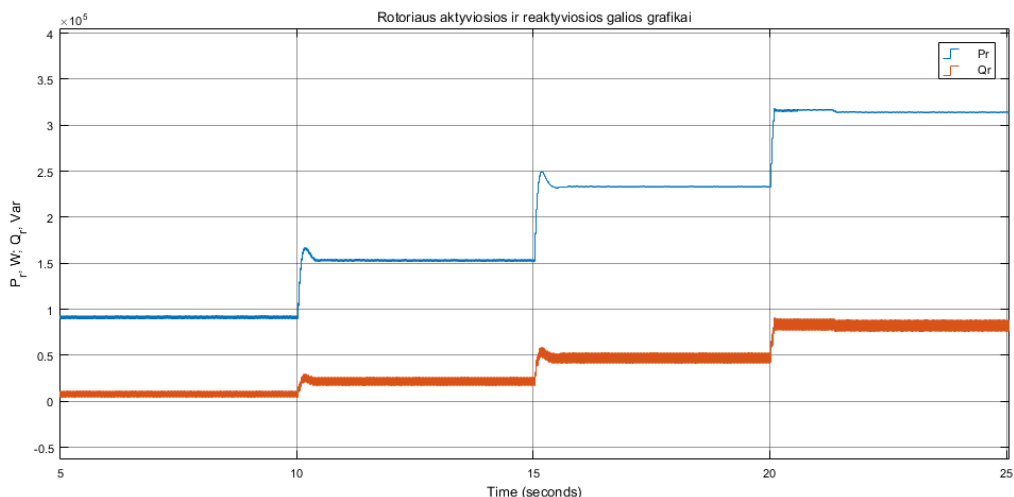


5.27 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$



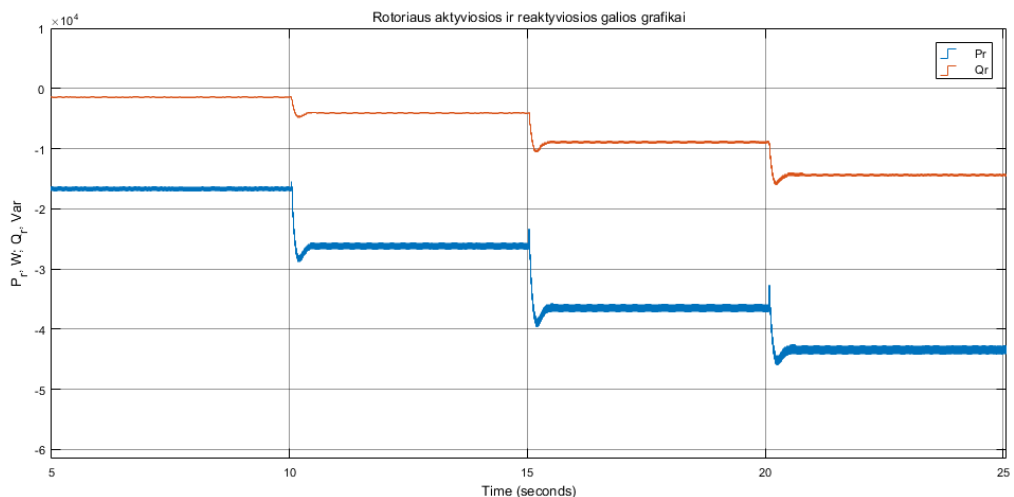
5.28 pav. 1,5MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$

Generatoriaus rotoriaus sukimosi greičiui viršijus sinchroninį generatoriaus sukimosi greitį, tačiau valdymo sistemai reguliuojant rotoriaus atstojamojo srovės vektoriaus projekcijų į d- q atskaitos sistemos ašis vertes, rotoriaus apvijų generuoja elektros energiją į elektros tinklą. Rotoriaus apvijų elektros energijos srautų grafikai pateikiami 5.29 ir 5.30 paveiksluose.



5.29 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

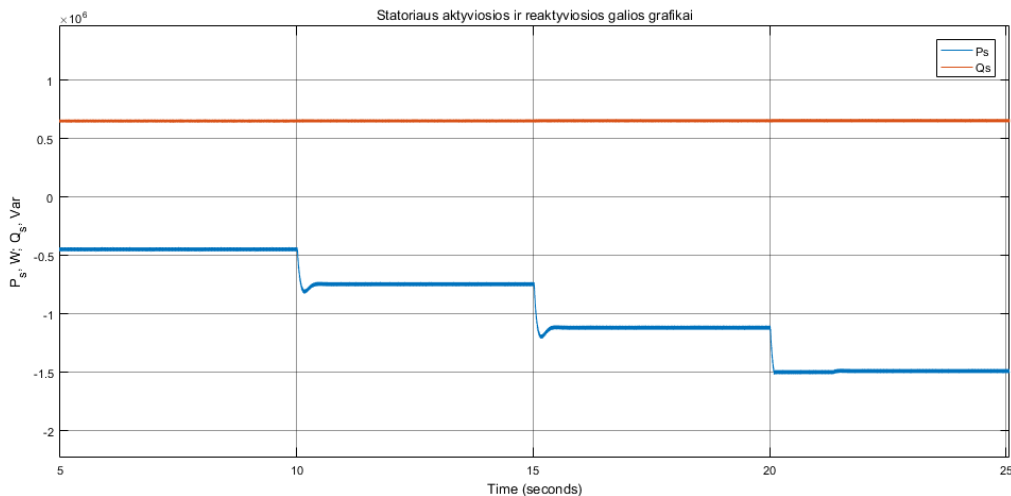
Pastebima tai, jog vidutinė aktyvioji galia P_r , kurią elektros energijos keitiklis perduoda į rotoriaus apvijų elektros grandinę yra 233,1 kW, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra -7 161,97Nm. Kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 1,04\omega_s$, o apkrovos momentas yra -7 161,97Nm, generatorius rotoriaus apvijų generuoja 26,22kW vidutinę aktyviąją galią P_r elektros energijos keitikliui.



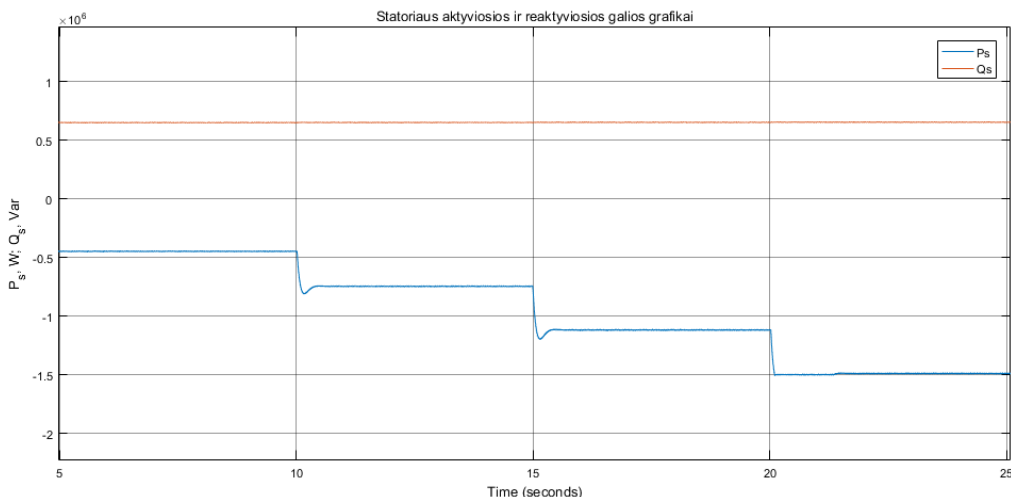
5.30 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$

Valdymo sistemai reguliuojant generatoriaus kuriamą elektromagnetinį sukimo momentą proporcingai reguliuojama generuojama aktyvioji statoriaus apvijų galia P_s . Keičiantis rotoriaus sukimosi greičiui, tačiau išlaikant generatoriaus kuriamą elektromagnetinį sukimosi momentą, vidutinė statoriaus apvijų generuojama aktyvioji galia išlieka nekintanti. Tai pastebima 5.31 ir 5.32

paveiksluose. Vidutinė aktyvioji galia P_s , kurią statoriaus apvijų generuoja į elektros tinklą yra 1,118MW, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$, o apkrovos momentas yra -7 161,97Nm.

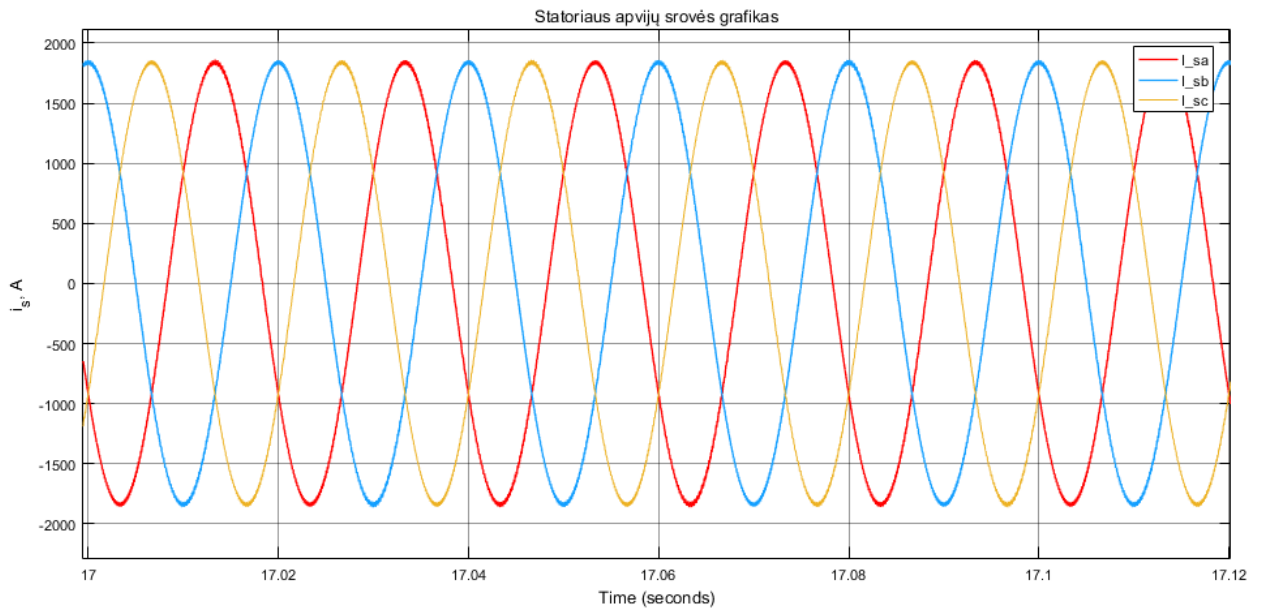


5.31 pav. 1,5MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$



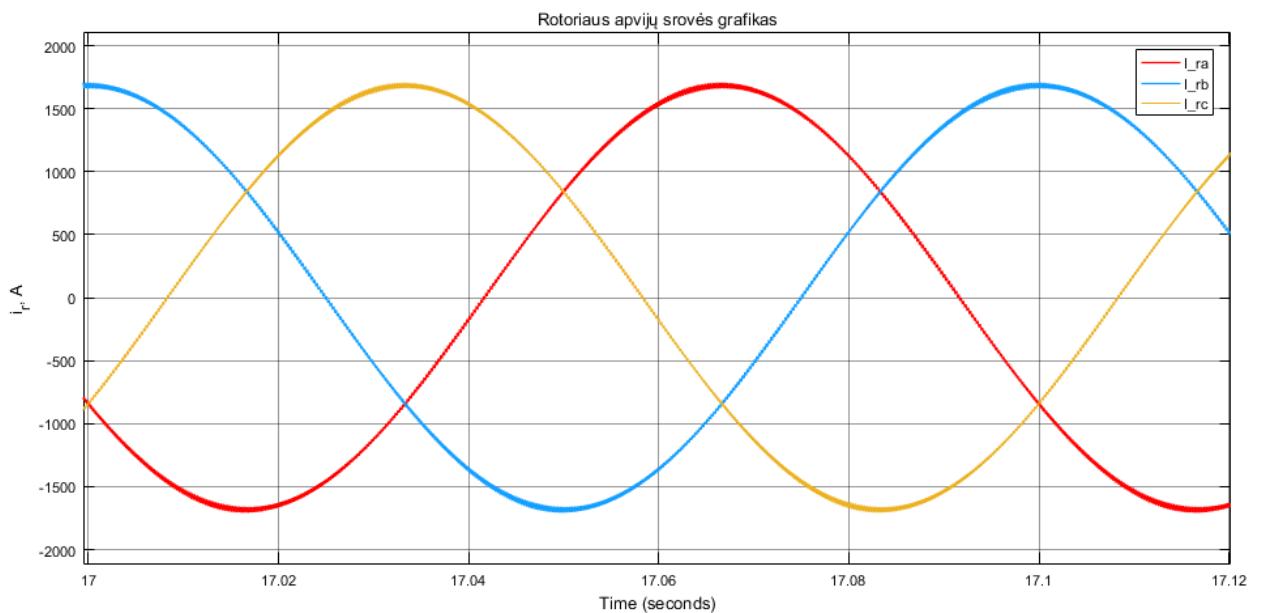
5.32 pav. 1,5MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$

Valdymo sistemos reguliuojamos rotoriaus srovės atstojamojo vektoriaus projekcijos d-q atskaitos sistemos d ir q ašyse. Šios projekcijos svyruoja apie užduotąją vertę. Šių svyravimų įtakojami iškreipimai pastebimi statoriaus ir rotoriaus sroves perskaičius į trifazę abc atskaitos sistemą. Statoriaus srovių grafikai, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra -7 161,97Nm, pateikiami 5.33 paveiksle.



5.33 pav. 1,5MW generatoriaus statoriaus srovė i_s , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

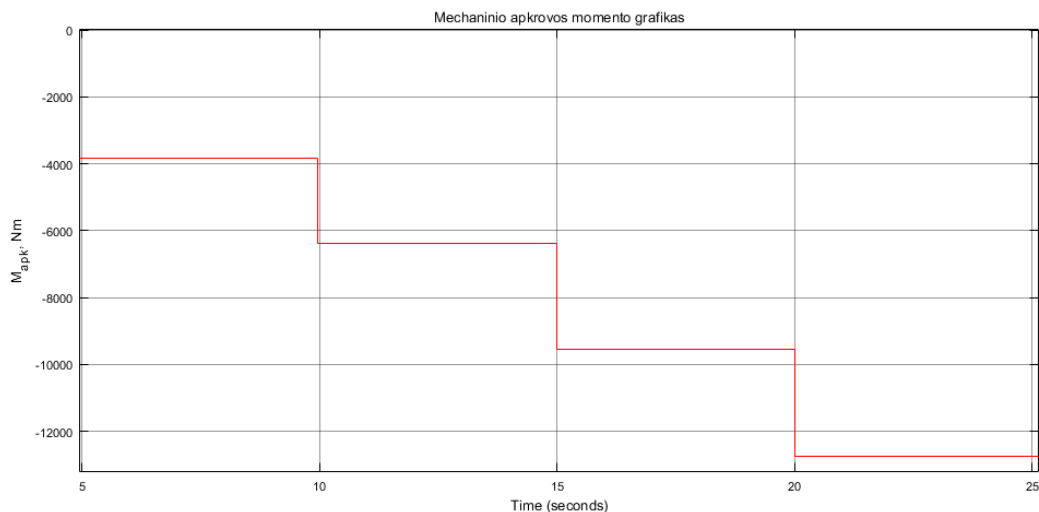
Statoriaus apvijomis tekančių srovių iškreipymus įtakoja elektros energijos keitiklio formuojami rotoriaus srovės iškreipimai. Rotoriaus srovių grafikai, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra $-7\,161,97\text{Nm}$, pateikiami 5.34 paveiksle.



5.34 pav. 1,5MW generatoriaus rotoriaus srovė i_r , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

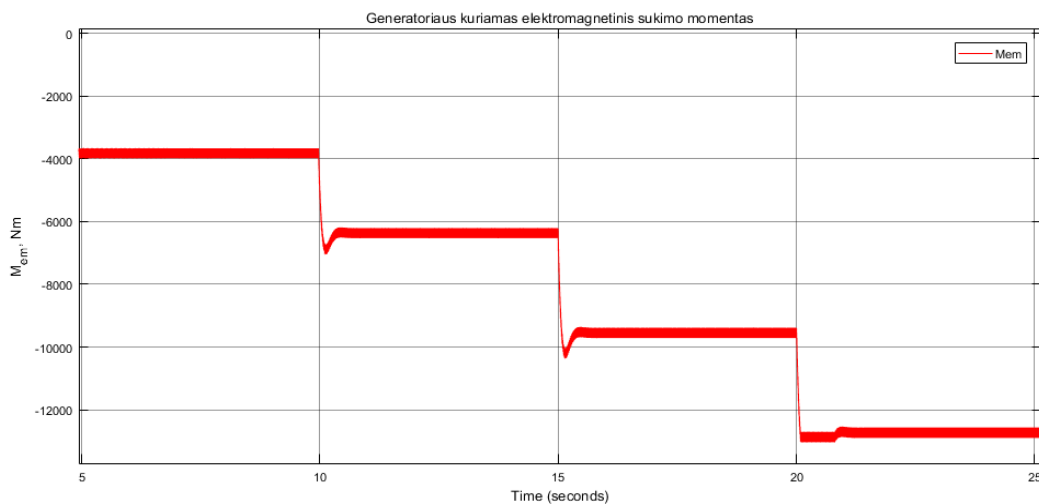
Išlaikant analogiją su 1,5MW generatoriaus modeliavimo duomenų analize analizuojami 2MW generatoriaus modeliavimo duomenys. Šio generatoriaus konstrukcija skiriasi nuo 1,5MW generatoriaus, kadangi statoriaus ir rotoriaus apvijų vijų skaičių santykis yra kitoks. 1,5MW generatoriaus šis santykis yra lygus vienetui. 2MW generatoriaus šis santykis yra lygus 1/3. Dėl skirtingo konstrukcinio išpildymo 2MW rotoriaus apvijų įtampa yra didesnė. Šis konstrukcijos projektavimo sprendimas lemia tai, jog reguliuojama rotoriaus apvijų srovė yra sumažinama.

Valdymo sistemai nustatoma $\omega_r = 0,8\omega_s$ generatoriaus rotoriaus sukimosi greičio užduotis. Nusistovėjusiame generatoriaus rotoriaus sukimosi greičio taške apkrovos momentas keičiamas. Apkrovos momento kitimo grafikas pateikiamas 5.35 paveiksle. Apkrovos momento vertės keičiamos kas 5 s, esant 10s, 15s ir 20s. Ši tendencija išlaikoma pasikeitus generatoriaus greičio užduoties vertei. Apkrovos momento vertės kinta atitinkamai: -3 819,72Nm; -6 366,2Nm; -9 549,3Nm ir -12 732,4Nm. Didžiausia apkrovos momento vertė pakeičiama į -12 095,78Nm, kai $\omega_m = 1,04\omega_s$ tam, kad neviršyti suminės generatoriaus galios.



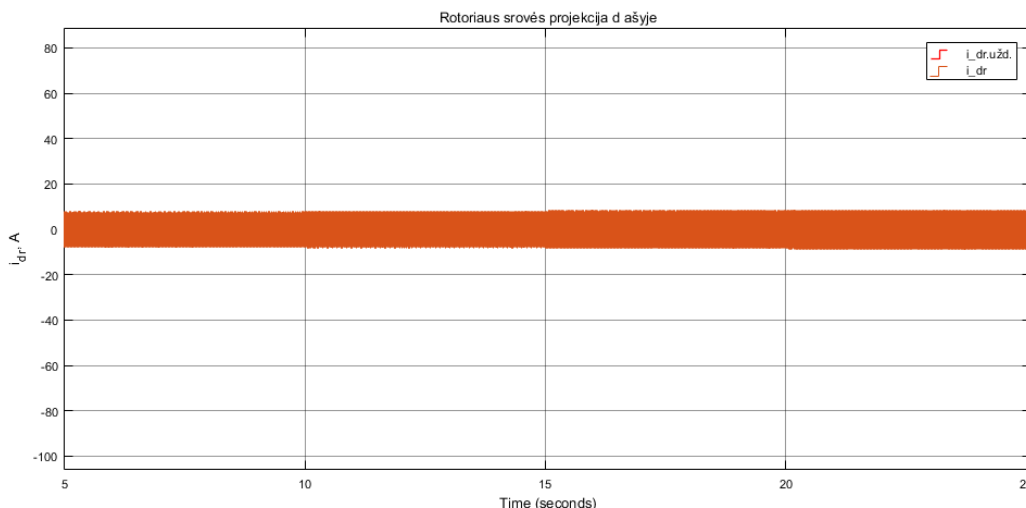
5.35 pav. 2MW generatoriaus apkrovos momentas M_{apkr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$

Magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo sistema reguliuoja generatoriaus darbo tašką atsižvelgiant į rotoriaus greičio užduotosios vertės reikšmę ir apkrovos momentą. Generatoriaus kuriamo elektromagnetinio sukimo momento kitimo grafikas pateikiamas 5.36 paveiksle.



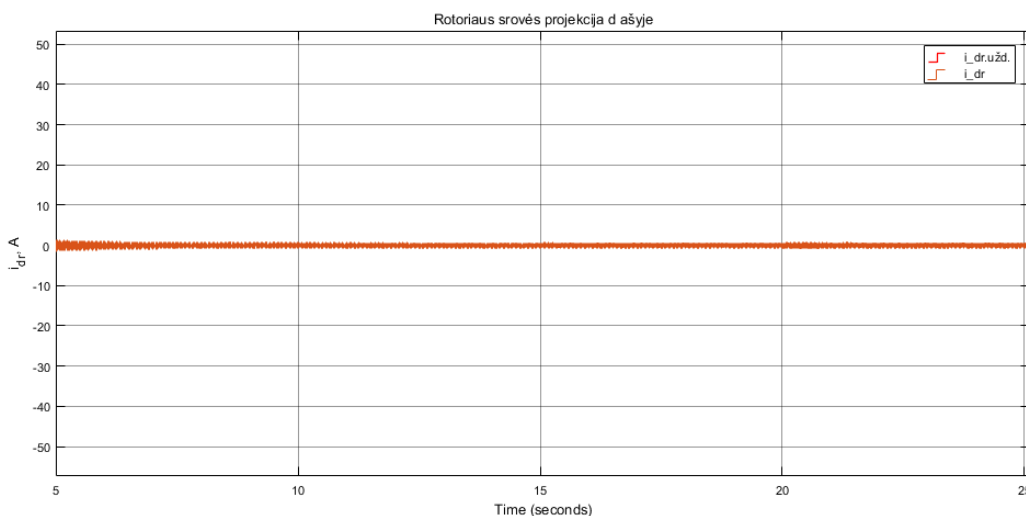
5.36 pav. 2MW generatoriaus elektromagnetinis sukimo momentas M_{em} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$

Magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo sistema reguliuodama rotoriaus srovę išlaiko rotoriaus apvijų atstojamojo srovės vektoriaus projekciją d-q atskaitos sistemos d ašyje i_{dr} lygia 0. Keičiantis generatoriaus darbo taškui valdymo sistema išlaiko šią tendenciją. Tačiau, kaip pastebima 5.37 paveiksle, rotoriaus srovės projekcija d ašyje svyruoja. Svyravimai siekia nuo -5,2A iki 5,2A, kai apkrovos momentas yra -6 366,2Nm. Apkrovos momentą padidinus iki -12 732,4Nm rotoriaus srovės projekcijos d ašyje svyravimai išauga ir siekia nuo -6,3A iki 6,3A.



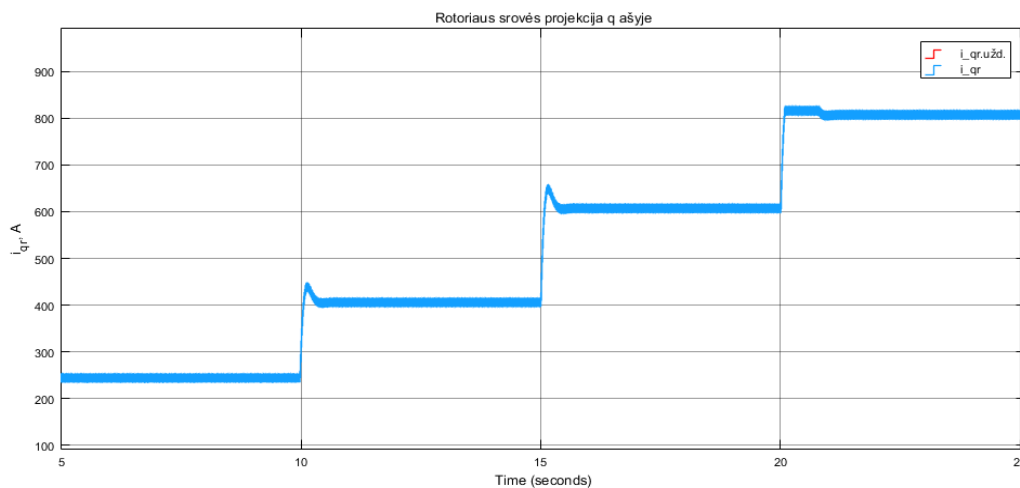
5.37 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=0,8\omega_s$

Kai generatorius rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=1,04\omega_s$ valdymo sistemos reguliuojamos rotoriaus srovės projekcijos d ašyje svyravimai siekia nuo -0,38A iki 0,38A, kai santykinis apkrovos momentas yra -6 366,2Nm. Apkrovos momentą padidinus iki -12 095,78Nm rotoriaus srovės projekcijos d ašyje svyravimai išauga ir siekia nuo -0,54A iki 0,54A.



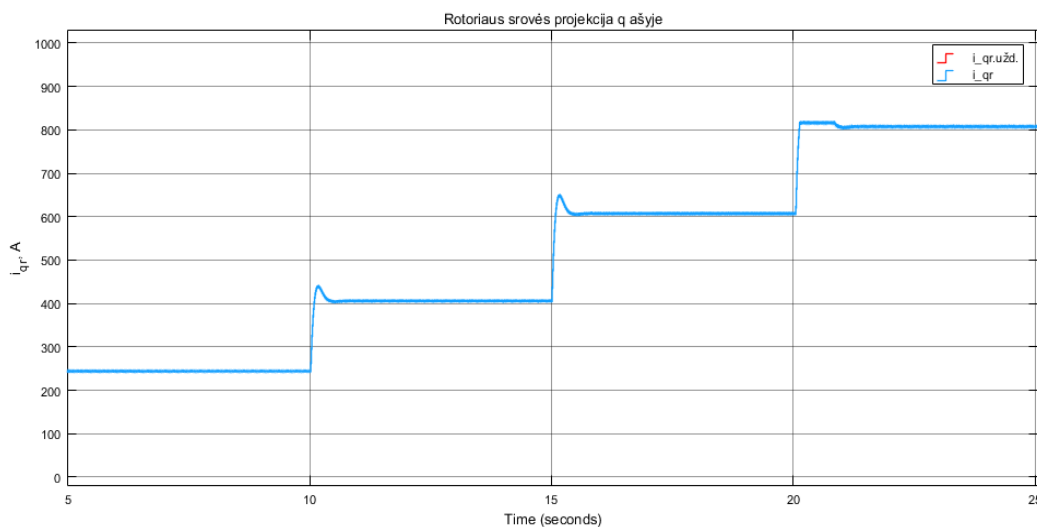
5.38 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija d ašyje i_{dr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m=1,04\omega_s$

Analogiškai 1,5MW generatoriaus modeliavimo duomenų analizei, 2MW generatoriaus rotoriaus atstojamojo srovės vektoriaus projekciją q ašyje i_{qr} yra reguliuojama valdymo sistemos ir keičiantis generatoriaus apkrovos momentui valdymo sistema šią rotoriaus atstojamojo srovės vektoriaus projekciją reguliuoja.



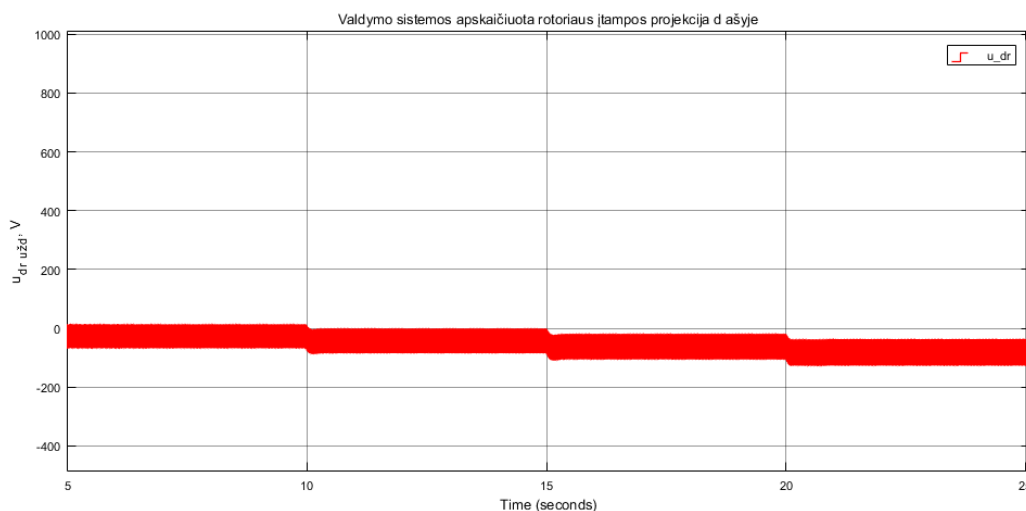
5.39 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

Kai generatoriaus rotoriaus sukimosi greičio užduotis yra $\omega_m=0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra $-6\,366,2\text{Nm}$, rotoriaus srovės projekcijos vertė q ašyje i_{qr} svyruoja nuo $396,83\text{A}$ iki $414,9\text{A}$. Apkrovos momentą padidinus iki $-12\,095,78\text{Nm}$ rotoriaus srovės projekcijos q ašyje i_{qr} svyravimai siekia nuo $798,16\text{A}$ iki $816,7\text{A}$. Rotoriaus sukimosi greitį padidinus iki $\omega_m = 0,96\omega_s$ rotoriaus srovės projekcijos vertė q ašyje i_{qr} svyruoja nuo $402,3\text{A}$ iki $409,19\text{A}$, kai apkrovos momentas yra $-6\,366,2\text{Nm}$. Apkrovos momentą padidinus iki $-12\,095,78\text{Nm}$ rotoriaus srovės projekcijos q ašyje i_{qr} svyravimai siekia nuo $804,28\text{A}$ iki $810,55\text{A}$.

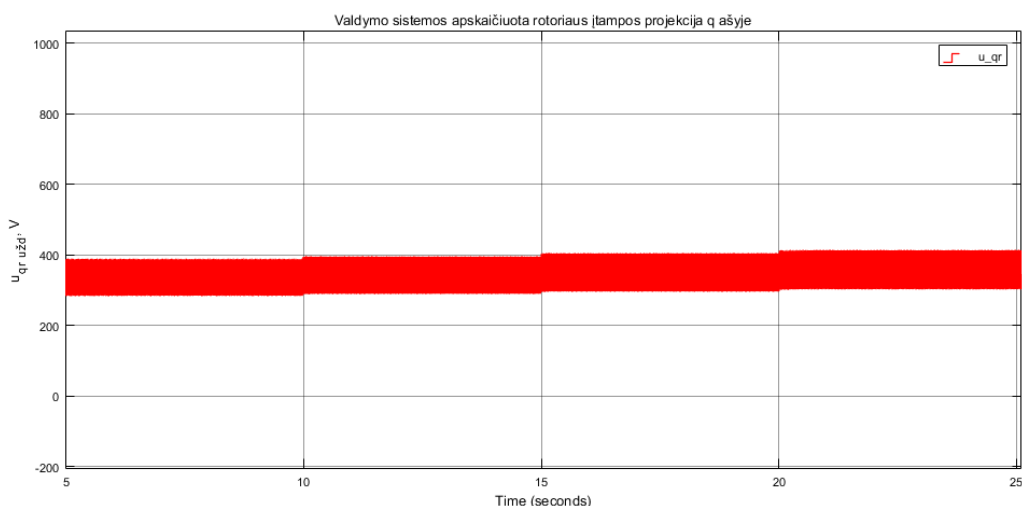


5.40 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovės projekcija q ašyje i_{qr} , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$

Remiantis rotoriaus atstojamojo srovės vektoriaus projekcijų į d ir q ašis užduotosiomis vertėmis ir matuojamomis rotoriaus srovės vektoriaus projekcijų į d ir q ašis vertėmis, valdymo algoritmas apskaičiuoja rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijų į d ir q ašis vertes. Valdymo algoritmas apskaičiuota rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijos į d ašį $u_{dr.užd}$ vertė svyruoja nuo -92V iki -32,6V, o projekcijos į q ašį vertė $u_{qr.užd}$ svyruoja nuo 302,7V iki 397,82V, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra -9 549,3Nm. Didinant rotoriaus sukimosi greičio nuokrypį nuo sinchroninio greičio kartu didėja ir keitiklio perduodamos įtampos amplitudė. Tai pastebima sulyginus 5.41 ir 5.42 grafikus su 5.43 ir 5.44 grafikais.

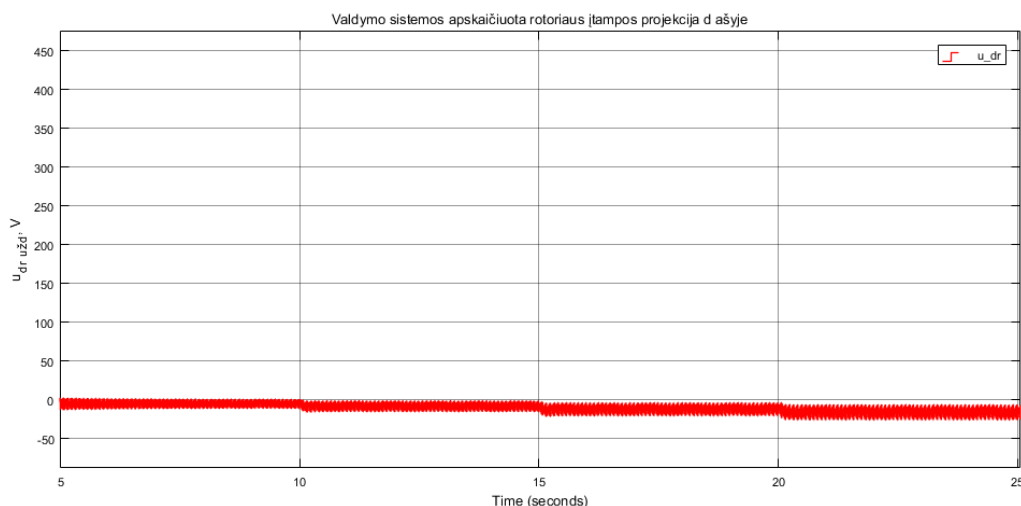


5.41 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

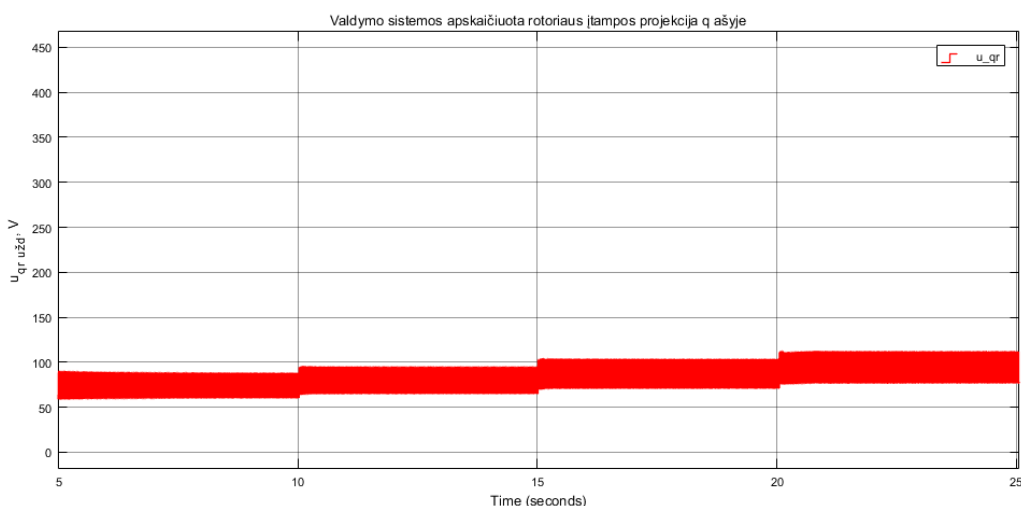


5.42 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

Rotoriaus sukimosi greičiui padidėjus nuo $\omega_m = 0,8\omega_s$ iki $\omega_m = 0,96\omega_s$ sumažėjusi indukuotoji įtampa rotoriaus apvijose bei įtampos dažnis ir reaktyvioji rotoriaus apvijų varža įtakoja valdymo sistemos apskaičiuotąsias rotoriaus įtampos projekcijų d ir q ašyse vertes, tai pastebima 5.43 ir 5.44 paveiksluose. Valdymo algoritmo apskaičiuota rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijos į d ašį $u_{dr_užd}$ vertė svyruoja nuo -15,8V iki -8,95V, o projekcijos į q ašį vertė $u_{qr_užd}$ svyruoja nuo 71,2V iki 103,7V, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,96\omega_s$, o apkrovos momentas yra -9 549,3Nm.



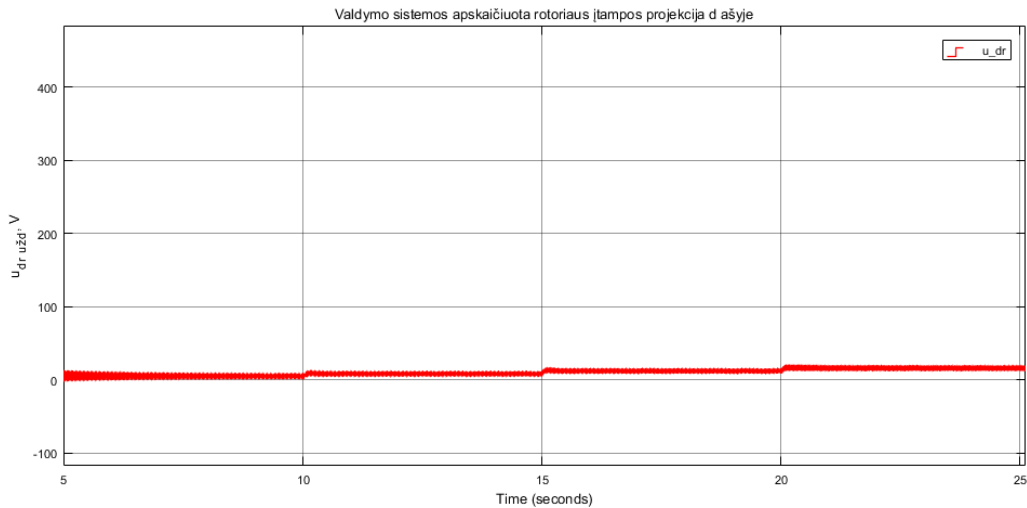
5.43 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$



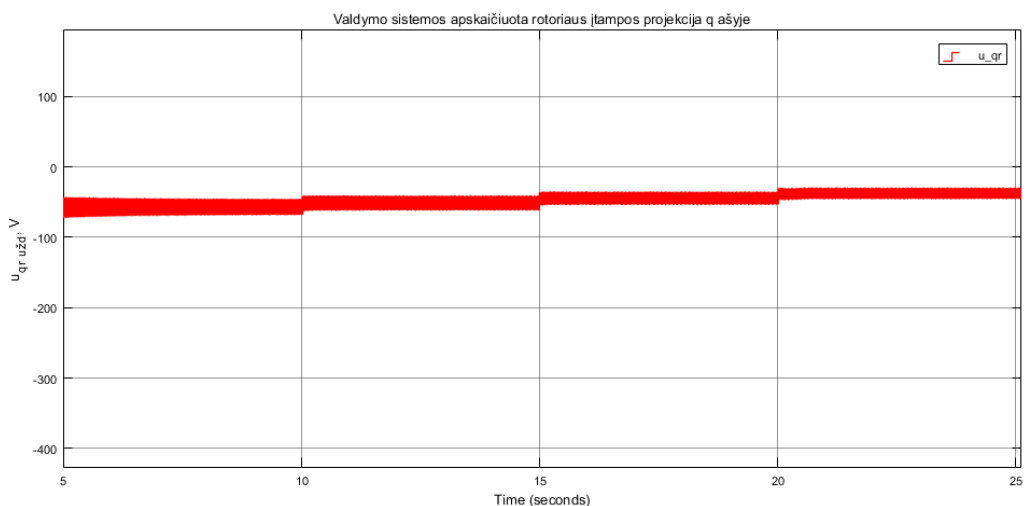
5.44 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$

Generatoriaus rotoriaus sukimosi greičiui viršijus sinchroninį rotoriaus sukimosi greitį indukuotosios rotoriaus apvijų įtampos vektorius kaičia padėtį kompleksinėje plokštumoje. Tam,

kad išlaikyti rotoriaus apvijų srovės vektoriaus padėtį d-q atskaitos sistemoje valdymo sistema atitinkamai keičia puslaidininkinio keitiklio formuojamos įtampos vektoriaus padėtį d-q atskaitos sistemoje. Valdymo algoritmo apskaičiuota rotoriaus įtampos atstojamojo vektoriaus projekcijos į d ašį $u_{dr_užd}$ vertė svyruoja nuo 9,57V iki 14,35V, o projekcijos į q ašį vertė $u_{qr_užd}$ svyruoja nuo -52,5V iki -36,75V, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 1,04\omega_s$, o apkrovos momentas yra -9 549,3Nm.



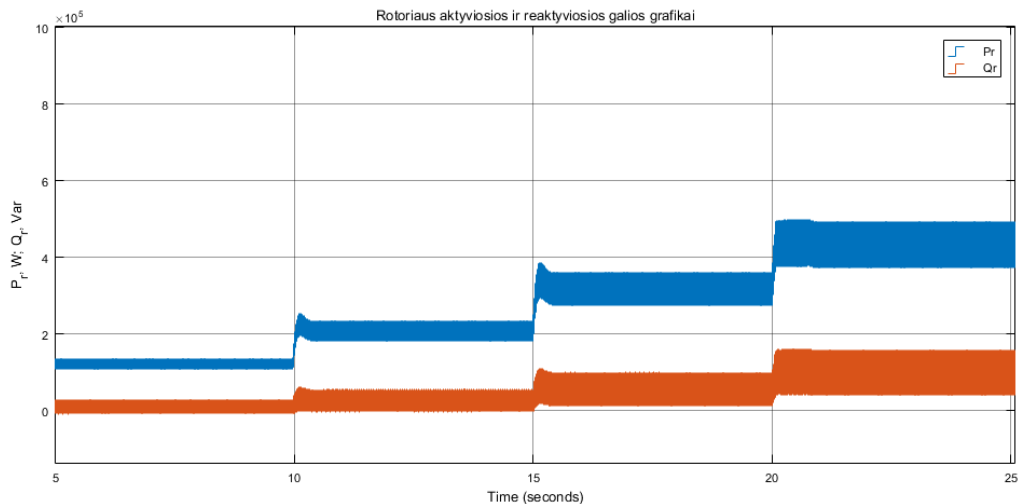
5.45 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija d ašyje $u_{dr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$



5.46 pav. 2MW generatoriaus valdymo sistemos apskaičiuota rotoriaus įtampos projekcija q ašyje $u_{qr_užd}$, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

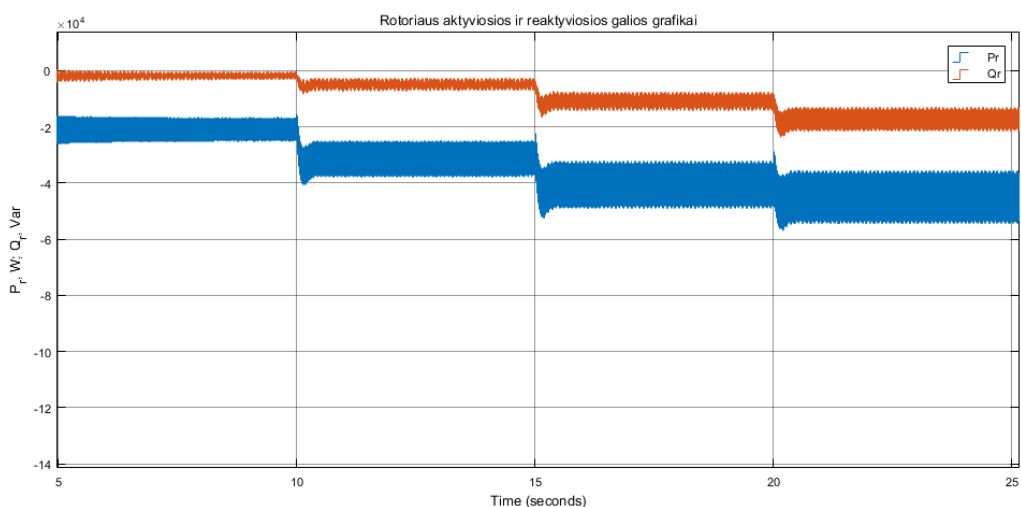
Analogijai su 1,5MW generatoriaus modeliavimo rezultatais, 2MW generatoriaus darbo taškui priartėjus prie sinchroninio rotoriaus sukimosi greičio valdymo sistemos reguliuojama rotoriaus įtampos vertė sumažėja. Tačiau dėl didesnės rotoriaus apvijų įtampos svyravimų amplitudė išlieka gana didelė, tai pastebima ir rotoriaus galios srautų grafikuose. Generatoriaus

rotoriaus sukimosi greičiui viršijus sinchroninį generatoriaus sukimosi greitį, tačiau valdymo sistemai reguliuojant rotoriaus atstojamojo srovės vektoriaus projekcijų į d-q atskaitos sistemos ašis vertes, rotoriaus apvijos generuoja elektros energiją į elektros tinklą. Rotoriaus apvijų elektros energijos srautų grafikai pateikiami 5.47 ir 5.48 paveiksluose.



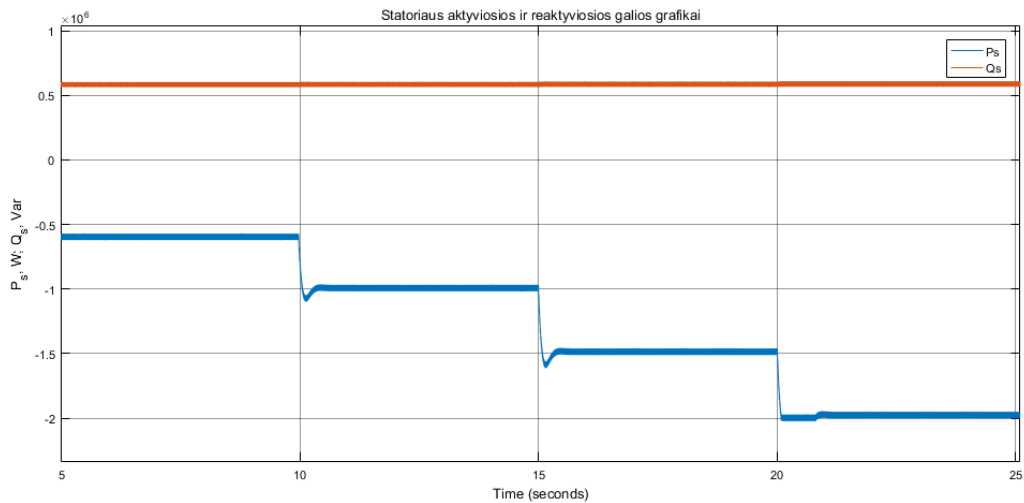
5.47 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

Pastebima tai, jog vidutinė aktyvioji galia P_r , kurią elektros energijos keitiklis perduoda į rotoriaus apvijų elektros grandinę yra 318,38 kW, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra -9 549,3Nm. Kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 1,04\omega_s$, o apkrovos momentas yra -9 549,3Nm, generatoriaus rotoriaus elektros grandine perduodama 40,68kW aktyvioji galia P_r elektros energijos keitikliui.

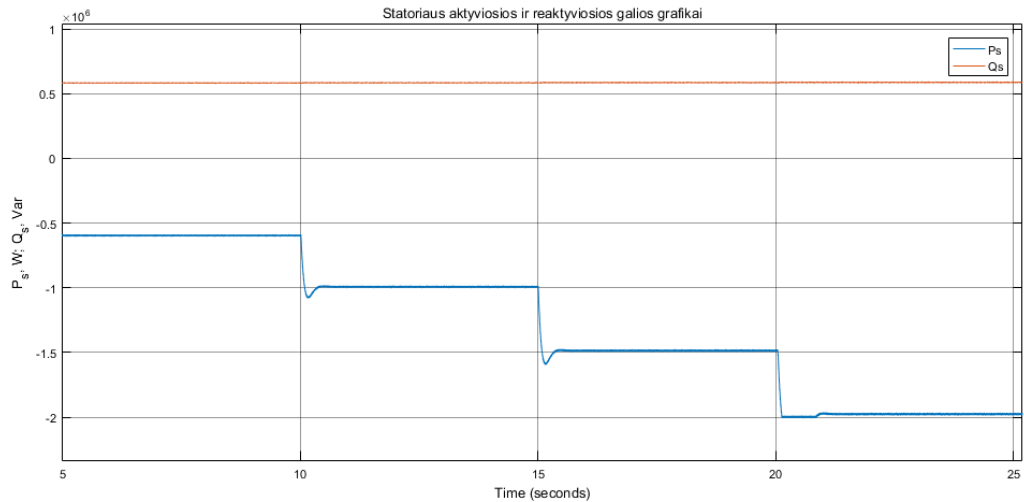


5.48 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_r ir reaktyvioji Q_r galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 1,04\omega_s$

Valdymo sistemai reguliuojant generatoriaus kuriamą elektromagnetinį sukimo momentą, proporcingai reguliuojama generuojama aktyvioji statoriaus apvijų galia P_s . Keičiantis rotoriaus sukimosi greičiui, tačiau išlaikant generatoriaus kuriamą elektromagnetinį sukimosi momentą vidutinė statoriaus apvijų generuojama aktyvioji galia išlieka nekintanti. Tai pastebima 5.49 ir 5.50 paveiksluose. Vidutinė aktyvioji galia P_s , kurią statoriaus apvijos generuoja į elektros tinklą yra 1,486MW, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$, o apkrovos momentas yra -9 549,3Nm.



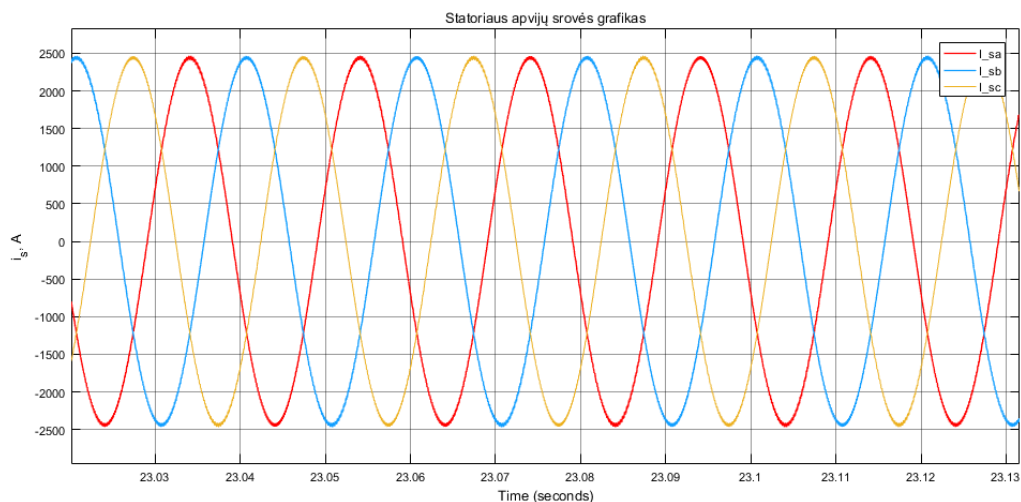
5.49 pav. 2MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$



5.50 pav. 2MW generatoriaus statoriaus apvijų generuojama aktyvioji P_s ir reaktyvioji Q_s galia, kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,96\omega_s$

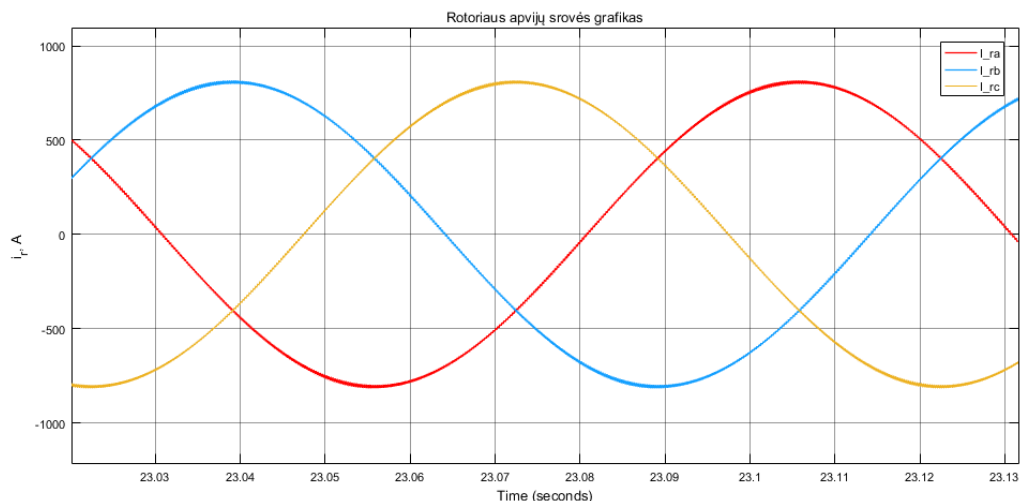
Valdymo sistemos reguliuojamos rotoriaus srovės atstojamojo vektoriaus projekcijos d-q atskaitos sistemos d ir q ašyse. Šios projekcijos svyruoja apie užduotąją vertę. Šių svyravimų įtakojami iškreipymai pastebimi statoriaus ir rotoriaus srovės perskaičius į trifazę abc atskaitos

sistema. Statoriaus srovių grafikai, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra $-9\,549,3\text{Nm}$, pateikiami 5.51 paveiksle.



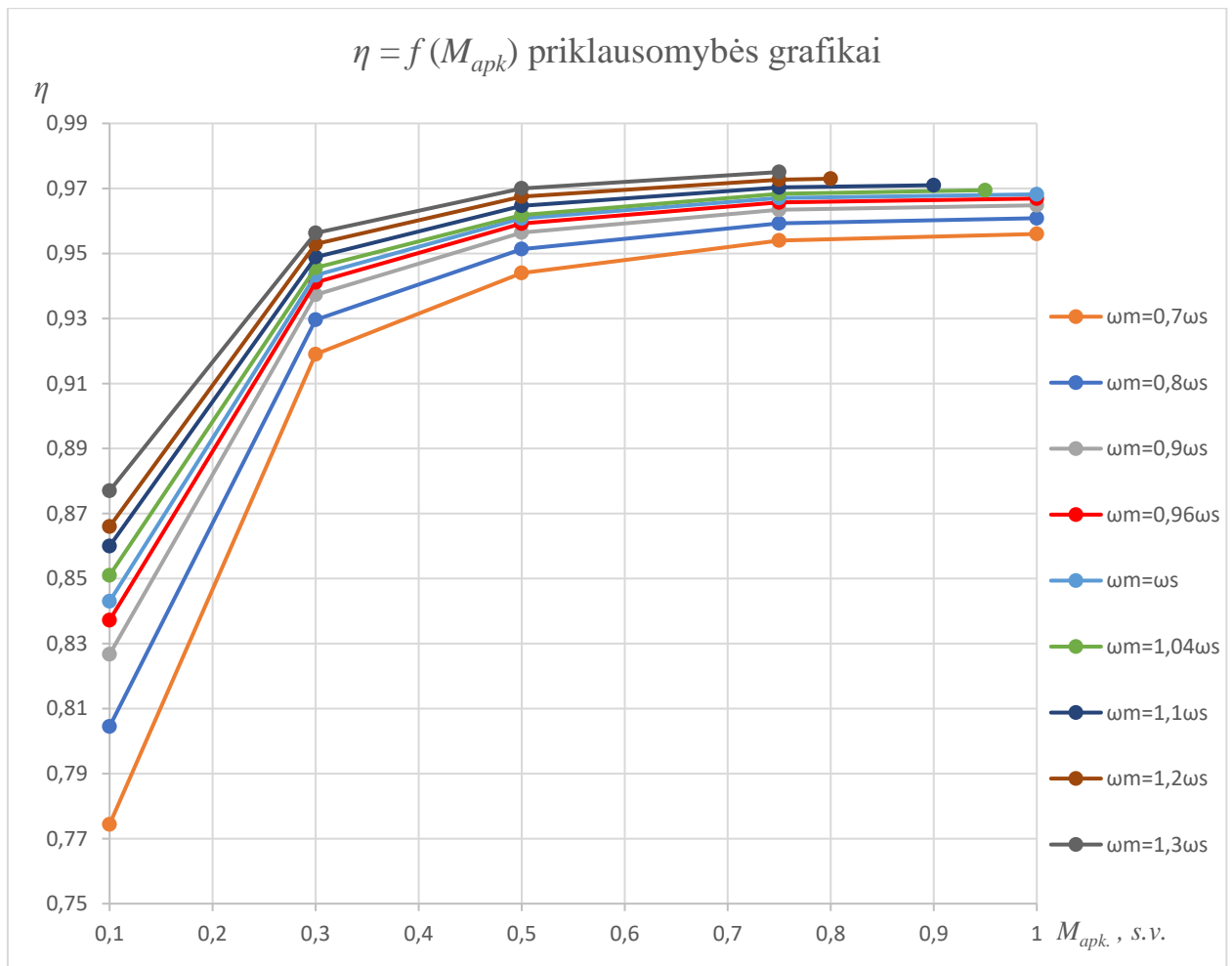
5.51 pav. 2MW generatoriaus statoriaus srovė i_s , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

Statoriaus apvijomis tekančių srovių iškraipymus įtakoja elektros energijos keitiklio formuojami rotoriaus srovės iškraipymai. Rotoriaus srovių grafikai, kai rotoriaus sukimosi greitis yra $\omega_m = 0,8\omega_s$, o apkrovos momentas yra $-9\,549,3\text{Nm}$, pateikiami 5.52 paveiksle.



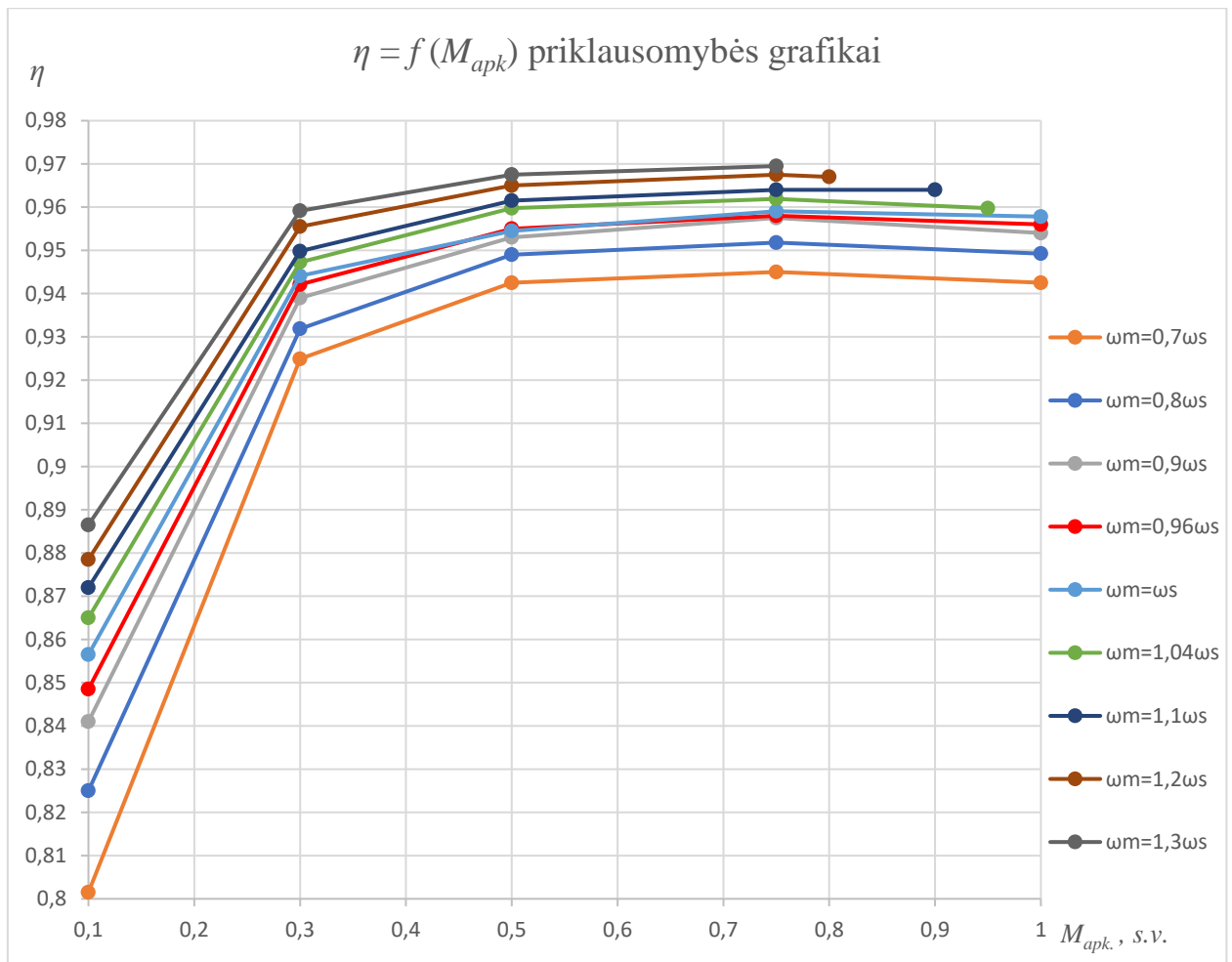
5.52 pav. 2MW generatoriaus rotoriaus srovė i_r , kai rotoriaus sukimosi greitis $\omega_m = 0,8\omega_s$

Išanalizavus 1,5MW ir 2MW generatorių darbo taškus, kurie nurodyti 1 priede, nubraižomi generatorių vidutinių efektyvumo verčių priklausomybių nuo santykinio apkrovos momento ir santykinio rotoriaus sukimosi greičio grafikai. Generatoriaus apkrovos galios ir vidutinės efektyvumo vertės pateikiamos 1 priede.



5.53 pav. 1,5 MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi vidutinio efektyvumo η kitimo grafikai

Analizuojant 1,5MW asinchroninio generatoriaus vidutinio efektyvumo kitimo grafikus pastebima tai, jog santykiniui apkrovos momentui M_{apk} kintant nuo 0,1 iki 0,3 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,774 iki 0,919, kai $\omega_m = 0,7\omega_s$. Šiame apkrovos momento kitimo diapazone vidutinio naudingumo koeficiento kitimas yra 0,145. O apkrovos momentui M_{apk} kintant nuo 0,3 iki 0,5 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,919 iki 0,944, tai sudaro 0,025 kitimą, kuris yra ženkliai mažesnis. Apkrovos momentui M_{apk} didėjant nuo 0,5 iki 0,75 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,944 iki 0,954 ir tai sudaro 0,01 kitimą. Rotoriaus sukimosi greičiui esant $\omega_m = 0,96\omega_s$ naudingumo koeficiento kitimo tendencija keičiantis apkrovos momentui išlieka. Esant šiam rotoriaus sukimosi greičiui vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,837 iki 0,941, kai apkrovos momentas M_{apk} kinta nuo 0,1 iki 0,3, o tai sudaro 0,104 pokitį. Apkrovos momentui M_{apk} didėjant nuo 0,5 iki 0,75 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,959 iki 0,966 ir tai sudaro 0,007 kitimą.



5.54 pav. 2 MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi vidutinio efektyvumo η kitimo grafikai

Analizuojant 2MW asinchroninio generatoriaus vidutinio efektyvumo kitimo grafikus pastebima tai, jog santykiniai apkrovos momentui M_{apk} kintant nuo 0,1 iki 0,3 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,801 iki 0,925, kai $\omega_m = 0,7\omega_s$. Šiame apkrovos momento kitimo diapazone vidutinio naudingumo koeficiento kitimas yra 0,124. O apkrovos momentui M_{apk} kintant nuo 0,3 iki 0,5 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,925 iki 0,943, tai sudaro 0,018 kitimą, kuris yra ženkliai mažesnis. Apkrovos momentui M_{apk} didėjant nuo 0,5 iki 0,75 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,943 iki 0,945 ir tai sudaro 0,002 kitimą. Rotoriaus sukimosi greičiui esant $\omega_m = 0,96\omega_s$ naudingumo koeficiento kitimo tendencija keičiantis apkrovos momentui išlieka. Esant šiam rotoriaus sukimosi greičiui vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,849 iki 0,942, kai apkrovos momentas M_{apk} kinta nuo 0,1 iki 0,3, o tai sudaro 0,093 pokitį. Apkrovos momentui M_{apk} didėjant nuo 0,5 iki 0,75 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,955 iki 0,958 ir tai sudaro 0,003 kitimą.

Remiantis modeliavimo duomenimis, viena iš augančio generatorių efektyvumo didėjant rotoriaus sukimosi greičiui priežasčių yra mažėjantis galios srautas į rotoriaus elektros grandinę, kai generatoriaus rotoriaus sukimosi greitis neviršija sinchroninio greičio ir didėjantis galios srautas iš rotoriaus elektros grandinės, kai generatoriaus rotoriaus sukimosi greitis viršija sinchroninį sukimosi greitį. Be to, 1,5MW generatoriaus efektyvumas turi didesnę priklausomybę nuo apkrovos momento, nei 2 MW generatorius. Kadangi 2MW rotoriaus apvijų skaičius yra didesnis ir srovės mažesnės, tai rotoriaus apvijų srovės mažiau svyruoja keičiantis generatoriaus apkrovos momentui. Ši priežastis įtakoja mažesnius galios nuostolių svyravimus keičiantis generatoriaus generuojamai galiai. Tai pastebima išanalizavus tyrimo duomenis ir skaitinių verčių kitimo tendencijas.

Išanalizavus 5.53 ir 5.54 paveikslus pastebima tai, jog remiantis generatoriaus vidutinio efektyvumo kitimo grafikais galima aiškiai apibrėžti generatoriaus efektyvumo kitimo tendencijas, kai kinta generatoriaus apkrovos momentas arba rotoriaus sukimosi greitis. Ši informacija padeda inžinieriui suvokti generatoriaus efektyvumo kitimo tendencijas valdant generatorių arba parenkant generatorių naujai projektuojamai sistemai. Kadangi daugumos sudėtingų elektros energijos generavimo sistemų valdymo sistemos valdo tiek generatoriaus darbą, tiek mechaninį apkrovos momentą kuriančios sistemos darbo tašką, tai pritaikius valdymo algoritmus ir šiame tiriamajame darbe analizuojamas efektyvumo kitimo tendencijas galima pasiekti kuo efektyvesnį elektrinės darbą.

Analizuojant modeliavimo duomenis pastebima, jog valdymo sistema sudaro triukšmus reguliuodama generatoriaus rotoriaus sroves. Keletas asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo sistemos darbo tobulinamo perspektyvų yra procesoriaus greita veikos didinimas ir analizuojamus parametrus matuojančių daviklių matavimo paklaidos mažinimas bei perduodamų signalų diskretizavimo žingsnio mažinimas. O galimos asinchroninių generatorių su faziniu rotoriumi tobulinimo perspektyvos yra naujų elektrotechninių medžiagų kūrimas ir pritaikymas.

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros apžvalgą buvo atkreipiamas dėmesys į tai, kad auga elektros variklių ekologinio projektavimo reikalavimai ir sudaromi standartai, kurie apibrėžia bendros elektros pavaros sistemos efektyvumą skirtinguose darbo taškuose. Tačiau didelės galios elektros energijos generatoriai šiuose standartuose nėra apibrėžiami.
2. Naudojantis „MATLAB-Simulink“ programinės įrangos paketu ir „powerlib“ bibliotekoje esančiais elementų principiniais matematiniais modeliais sudarytas asinchroninio elektros generatoriaus su faziniu rotoriumi ir magnetinio srauto erdvinio vektoriaus valdymo matematinis modelis. Sudarytas matematinis modelis buvo išnagrinėtas keičiantis valdymo sistemai užduotosios rotoriaus sukimosi greičio vertės reikšmei ir generatorių apkrovos momento reikšmei.
3. Atlikus generatorių nusistovėjusių režimų analizę nustatyta, kad didėjant valdymo sistemos greičio užduotosios vertės reikšmei bei generatoriaus apkrovos momento vertei generatorių efektyvumas išauga. Šią efektyvumo kitimo tendenciją lemia kintantis statoriaus ir rotoriaus galios srautų pasiskirstymas. Analizuojant 1,5MW generatoriaus galios srautų kitimą, esant $\omega_m = 0,8\omega_s$ valdymo sistemai užduoto rotoriaus sukimosi greičio užduotajai vertei bei $-7\ 161,97\text{Nm}$ apkrovos momento vertei generatoriaus statoriaus apvijoms į elektros tinklą generuoja 1,118MW vidutinę aktyviają galią P_s , tačiau rotoriau apvijoms yra perduodama 233,1kW vidutinė aktyvioji galia P_r , todėl suminė generatoriaus generuojama galia siekia 884,9kW. Viršijus sinchroninį greitį ir esant $\omega_m = 1,04\omega_s$ valdymo sistemai užduoto rotoriaus sukimosi greičio užduotajai vertei bei $-7\ 161,97\text{Nm}$ apkrovos momento vertei generatoriaus statoriaus apvijoms į elektros tinklą generuoja 1,118MW vidutinę aktyviają galią P_s , o rotoriau apvijoms į elektros tinklą generuoja 26,22 kW vidutinę aktyviają galią P_r , todėl suminė generatoriaus generuojama galia siekia 1 144,22kW.
4. Atlikus generatorių nusistovėjusių režimų modeliavimą apskaičiuotos 1,5MW ir 2 MW generatorių vidutinės efektyvumo η reikšmės. Analizuojant 2MW asinchroninio generatoriaus vidutinio efektyvumo reikšmes pastebima tai, jog santykiniai apkrovos momentui M_{apk} kintant nuo 0,1 iki 0,3 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,801 iki 0,925, kai $\omega_m = 0,7\omega_s$. Šiame apkrovos momento kitimo diapazone vidutinio naudingumo koeficiento kitimas yra 0,124. O apkrovos momentui M_{apk} kintant nuo 0,3 iki 0,5 vidutinis naudingumo koeficientas η kinta nuo 0,925 iki 0,943, tai sudaro 0,018 kitimą, kuris yra ženkliai mažesnis. Ši efektyvumo kitimo tendencija išlieka didėjant rotoriaus sukimosi greičiui. Analogiški rezultatai gauti analizuojant 1,5MW generatoriaus rezultatus.

LITERATŪRA

1. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60034 Part:30-1: *Efficiency classes of line operated AC motors*. [interaktyvus]. IEC, 2014. ISBN 978-2-8322-1415-2. [žiūrėta 2018-04-09]. Prieiga per: webstore.iec.ch.
2. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60034 Part:30-2: *Efficiency classes of variable speed AC motors*. [interaktyvus]. IEC, 2016. ISBN 978-2-8322-3670-3. [žiūrėta 2018-04-09]. Prieiga per: webstore.iec.ch.
3. WAIDE. P., C.U. BRUNNER. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. [interaktyvus]. *International Energy Agency*, 2011. [žiūrėta 2018-04-09]. Prieiga per: iea.org.
4. THE EUROPEAN COMMISSION. COMMISSION REGULATION (EU) No 4/2014 of 6 January 2014 amending Regulation (EC) No 640/2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors. [interaktyvus]. *Official Journal of the European Union*, 2014. [žiūrėta 2018-04-09]. Prieiga per: <http://eur-lex.europa.eu>.
5. Altra Industrial Motion. International standard IEC TS 60034-30-2 for variable speed motors. [interaktyvus]. *Bauer Gear Motor*, 2018. [žiūrėta 2018-04-09]. Prieiga per: www.altraliterature.com.
6. ENERDATA. Share of wind and solar in electricity production. [interaktyvus]. *Enerdata 2009 – 2018*. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: yearbook.enerdata.net.
7. CHEN Q., M. DEFOURNY ir kt. Control and simulation of doubly fed induction generator for variable speed wind turbine systems based on an integrated finite element approach. [interaktyvus]. *Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition 2011 (EWEA 2011)*. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <http://orbi.ulg.ac.be>.
8. ULU C. Electrical design and testing of a 500 kW doubly fed induction generator for wind power applications. [interaktyvus]. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016, p. 1278-1290. doi:10.3906/elk-1512-28. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: journals.tubitak.gov.tr.
9. ABAD G. ir kt. Doubly Fed Induction Machine: *Modeling and Control for Wind Energy Generation*. US: IEEE, 2011. ISBN: 9780470768655.
10. RAHIMI M. Coordinated control of rotor and grid sides converters in DFIG based wind turbines for providing optimal reactive power support and voltage regulation. [interaktyvus]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Vol. 20, 2017, p. 47-57. ISSN 2213-1388. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com>

11. BOUMASSATA A. Speed control of a doubly fed induction machine via an AC–AC converter. [interaktyvus]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management* Vol. 8, 2017, p. 407–412. ISSN: 09756809. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://link-springer-com>
12. GUNAWAN R., M.L. SIREGAR, F. YUSIVAR. The Influence of Moment of Inertia to Induction Motor Rotation in Sensorless Direct Torque Control and Duty Ratio. [interaktyvus]. *Trans Tech Publications*, 2013, p. 55-60. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.313-314.55. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: www.scientific.net
13. LHACHIMI H., Y.E. KOUARI. Control Strategy of DFIG for Wind Energy System in the Grid Connected Mode. [interaktyvus]. *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2016 International. DOI: 10.1109/IRSEC.2016.7983925. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>.
14. MURARI A. L. L. F. Ir kt. A Proposal of Project of PI Controller Gains Used on the Control of Doubly-Fed Induction Generators. [interaktyvus]. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 15, 2017, p. 173 – 180. DOI: 10.1109/TLA.2017.7854609. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <http://journals.sagepub.com/>
15. SUBRAMANIAN CHADRASEKARAN. *Grid Connected Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine under LVRT*. Department of electric, electronic and information engineering „Guglielmo Marconi“, 2014, Bologna, Italy.
16. Han Y., P. SHEN. Modeling, control and electromagnetic transient simulation of the doubly fed induction generator-based wind energy generation system. [interaktyvus]. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International* 2014, Vol. 90(3) 275–289. DOI: 10.1177/0037549713516516. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <http://journals.sagepub.com>.
17. CHEN B., T. LU, Y. HSU, W. CHEN, Z. LEE. An Analytical Approach to Maximum Power Tracking and Loss Minimization of a Doubly Fed Induction Generator Considering Core Loss. [interaktyvus]. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 27, NO. 2, 2012. DOI: 10.1109/TEC.2012.2190513. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
18. SENANI F., A. RAHAB, F. LOUAR ir kt. Active and Reactive Power Control of DFIG using PI and DPC controllers. [interaktyvus]. *Electrical Engineering (ICEE)*, 2015. DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416841. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>

19. ZAMZOOM O., Y.E. MOURABIT ir kt. Study and implementation of the MPPT strategy applied to a variable speed wind system based on DFIG with PWM-vector control. [interaktyvus]. *Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2016. DOI: 10.1109/CISTEM.2016.8066803. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
20. GENNADY T., B. MAXIM ir kt. Energy - Efficient Control of Double Inverter-fed Induction Motor. [interaktyvus]. *Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2017. DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955431. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
21. WU Y., W. YANG. Different control strategies on the rotor side converter in DFIG based wind turbines. [interaktyvus]. *Energy Procedia* Vol. 100, 2016, p. 551-555. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.217>. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://www.elsevier.com/>.
22. MWANIKI J., H. LIN, Z. DAI. A Condensed Introduction to the Doubly Fed Induction Generator Wind Energy Conversion Systems. [interaktyvus]. *Journal of Engineering Volume* 2017, p.18. <https://doi.org/10.1155/2017/2918281>. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://www.hindawi.com/>.
23. DJERIRI Y. ir kt. A COMPARATIVE STUDY BETWEEN FIELD ORIENTED CONTROL STRATEGY AND DIRECT POWER CONTROL STRATEGY FOR DFIG. [interaktyvus]. *Journal of Electrical Engineering*, 2014. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: researchgate.net.
24. SENANI F., A. Rahab, F. Louar, F. BOUROUROU, H. BENALLA. Active and reactive power control of DFIG using PI and DPC controllers. [interaktyvus]. *Electrical Engineering (ICEE), 2015 4th International Conference*, 2015. DOI: 10.1109/INTEE.2015.7416841. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
25. MURAR A.L.L.F., R.V. Jacomini ir kt. A Proposal of Project of PI Controller Gains Used on the Control of Doubly-Fed Induction Generators. [interaktyvus]. *IEEE Latin America Transactions* (Volume: 15, Issue: 2, Feb. 2017), 2017. DOI: 10.1109/TLA.2017.7854609. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
26. MASAUD T. M., P.K. SEN. MODELING AND CONTROL OF DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR FOR WIND POWER. [interaktyvus]. *North American Power Symposium (NAPS)*, 2011. DOI: 10.1109/NAPS.2011.6025122. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
27. QIAO W. Dynamic Modeling and Control of Doubly Fed Induction Generators Driven by Wind Turbines. [interaktyvus]. *Power Systems Conference and Exposition*, 2009. PSCE '09. IEEE/PES. DOI: 10.1109/PSCE.2009.4840245. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>

28. DONG L., S. LIU ir kt. Modeling and Fault Analysis of Doubly Fed Wind Power Generation Systems. [interaktyvus]. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016 IEEE PES Asia-Pacific. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779953. [žiūrėta 2017-01-02]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
29. CHAU K. T. *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*. Singapore: John Wiley & Sons, 2015, p. 39-68. ISBN 1118752524.
30. WEIDAUER J., R. MESSER. *Electrical Drives*. Vokietija: Publicis, 2014. ISBN 9783895784347.
31. BOSE B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002, p. 30-97. ISBN 0130167436.
32. NYDEC CORPORATION. *2-3-2 Rotation Principle Of Induction Motor*. Nidec Corporation [interaktyvus] © Nidec Corporation 1995-2014 [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per: <http://www.nidec.com/>
33. KRIGS A. *Iron Losses in Electrical Machines – Influence of Material Properties, Manufacturing Processes, and Inverter Operation*. Stockholm: Universitetservice, 2014. ISBN 9789175950990.
34. Ic 600-65 A: *Data sheet*. [interaktyvus] voestalpine, 2015. [žiūrėta 2016-05-10]. Prieiga per: <http://www.voestalpine.com/isovac>

PRIEDAI

Priedas 1. Tiriama generatorių darbo taškai ir tyrimo rezultatai

Apkrovos momentas, M_{apk}	Rotoriaus sukimosi greitis, ω_m	Apkrovos galia, P_m	1.5 MW generatoriaus naudingumo koeficientas, η	2 MW generatoriaus naudingumo koeficientas, η
S. V.	S. V.	S. V.	%	%
0,1	0,7	0,07	0,774	0,802
0,3	0,7	0,21	0,919	0,925
0,5	0,7	0,35	0,944	0,943
0,75	0,7	0,525	0,954	0,945
1	0,7	0,7	0,956	0,943
0,1	0,8	0,08	0,805	0,825
0,3	0,8	0,24	0,930	0,932
0,5	0,8	0,4	0,951	0,949
0,75	0,8	0,6	0,959	0,952
1	0,8	0,8	0,961	0,949
0,1	0,9	0,09	0,827	0,841
0,3	0,9	0,32	0,937	0,939
0,5	0,9	0,45	0,956	0,953
0,75	0,9	0,675	0,963	0,958
1	0,9	0,9	0,965	0,954
0,1	0,96	0,096	0,837	0,849
0,3	0,96	0,288	0,941	0,942
0,5	0,96	0,48	0,959	0,955
0,75	0,96	0,72	0,966	0,958
1	0,96	0,96	0,967	0,956
0,1	1	0,1	0,843	0,857
0,3	1	0,3	0,943	0,944
0,5	1	0,5	0,961	0,955
0,75	1	0,75	0,967	0,959
1	1	1	0,968	0,958
0,1	1,04	0,104	0,851	0,865
0,3	1,04	0,312	0,946	0,947
0,5	1,04	0,52	0,962	0,960
0,75	1,04	0,78	0,968	0,962
0,95	1,04	0,988	0,969	0,960

0,1	1,1	0,11	0,860	0,872
0,3	1,1	0,33	0,949	0,950
0,5	1,1	0,55	0,965	0,962
0,75	1,1	0,825	0,970	0,964
0,9	1,1	0,99	0,971	0,964
0,1	1,2	0,12	0,866	0,879
0,3	1,2	0,36	0,953	0,956
0,5	1,2	0,6	0,968	0,965
0,75	1,2	0,9	0,973	0,968
0,8	1,2	0,96	0,973	0,967
0,1	1,3	0,13	0,877	0,887
0,3	1,3	0,39	0,956	0,959
0,5	1,3	0,65	0,970	0,968
0,75	1,3	0,975	0,975	0,970

*Priimta sąlyga, jog $P_{apk} = P_n$.

50 Hz			
J [mT]	H [A/m]	P _s [W/kg]	μ _r [-]
100	49	0.03	1630
150	55	0.10	2018
200	61	0.17	2403
250	66	0.24	2781
300	72	0.32	3149
350	77	0.40	3503
400	82	0.48	3840
450	87	0.58	4156
500	92	0.68	4449
550	96	0.79	4714
600	100	0.91	4955
650	104	1.04	5173
700	108	1.17	5371
750	112	1.31	5550
800	116	1.46	5714
850	120	1.62	5862
900	125	1.78	5985
1000	137	2.13	6110
1050	145	2.32	6095
1100	154	2.53	6046
1150	164	2.74	5976
1200	177	2.98	5875
1250	192	3.23	5713
1300	216	3.50	5411
1350	254	3.79	4889
1400	316	4.11	4117
1450	426	4.45	3121
1500	659	4.81	2110
1550	1110	5.19	1292
1600	1912	5.57	725
1650	3151	5.93	409
1700	4712	6.27	271

Priedas 2. „Isovac 600-65 A“ elektrotechninio plieno galios nuostolių priklausomybė nuo magnetinio srauto tankio [34]

Priedas 3. 1,5MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi paradiniai duomenys

```

clear all
%-----%
%Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi parametrai
%-----%
fn = 50;           % Tinklo įtampos dažnis, Hz
Pn = 1.5e6;       % Nominali aktyvioji galia, W
Us = 575;        % Nominali statoriaus apvijų įtampa, V
Ur = 575;        % Nominali rotoriaus apvijų įtampa, kai s=1 (neperskaičiuota), V
n = 1500;        % Sinchroninis greitis, aps/min
sn = 0.04;       % Nominalus slydimas
p=2;            % Poliu poros
Rs = 1.4e-3;     % Statoriaus apvijų aktyvioji varža, omai
Lss = 89.98e-6;  % Sklaidos induktyvumas, H
Lsr = 82.09e-6;  % Sklaidos induktyvumas, H
Lm = 1.53e-3;    % Abipusis įmagnetinimo induktyvumas, H
Rr = 0.992e-3;   % Rotoriaus varža (perskaičiuota), Omai
Ls = Lm+Lss;     % Statoriaus induktyvumas, H
Lr = Lm +Lsr;    % Rotoriaus induktyvumas, H
%-----%
smax = 0.45;     % Maksimalus slydimo taško perstūmimas
u=1;            % Perskaičiavimo koeficientas
Fs = (Us*sqrt(2/3))/(2*pi*fn); % Statoriaus apvijų kuriamas magnetinis srautas, Wb
sigma = 1-Lm^2/(Ls*Lr); % Koeficientas sigma
Mem = Pn/((n*pi)/30); % Nominalus sukimo momentas, Nm
J=81.2 + 1003.22; % Inercijos momentas, Kg*m^2
D=1e-3;         % Dampingo koeficientas
%-----%
Vdc =Ur*smax*u*sqrt(2); % DC linko įtampos nuoroda (perskaičiuota), V
f_s=4e3;        % PWM moduliacijos dažnis
ts=1/(f_s*5);   % Samplinimo laiko pastovioji (20KHz dažnis)
%-----%
%PI reguliatoriu parametrai:
%-----%
% Sroves PI reguliatoriaus proporcinis koeficientas
Kp_i = 0.05;
% Sroves PI reguliatoriaus integralinis koeficientas
Ki_i =5;
% Greicio PI reguliatoriaus proporcinis koeficientas
Kp_n = 2.16884e+04;
% Greicio PI reguliatoriaus integralinis koeficientas
Ki_n = 216884;
% Reaktyviosios galios PI reguliatoriaus proporcinis koeficientas
Kp_Q = -1.482e-05;
% Reaktyviosios galios PI reguliatoriaus integralinis koeficientas
Ki_Q = 5.496e-07;
%-----%
%Magnetinės grandinės aktyviosios galios nuostolių įvertinimas
%-----%
M_s_j=3606.55;  % Statoriaus magnetolaidžio jungo masė, Kg
M_s_d=636.45;  % Statoriaus magnetolaidžio dantų masė, Kg
M_r_j=688;     % Rotoriaus magnetolaidžio jungo masė, Kg
M_r_d=172.4;   % Rotoriaus magnetolaidžio dantų masė, Kg
%-----%
Bj1=1.2;       % Statoriaus jungo magnetinio srauto tankis, T
Bz1=1.45;      % Statoriaus dantų magnetinio srauto tankis, T
kz1=4.45;     % Plieno magnetinių nuostolių koeficientas dantims,
kj1=2.98;     % Plieno magnetinių nuostolių koeficientas jungui
%-----%
Pz1=kz1*Bz1*Bz1*M_s_d; % Magnetolaidžio dantų magnetinių nuostoliai, W
Pj1=kj1*Bj1*Bj1*M_s_j; % Magnetolaidžio jungo magnetinių nuostoliai, W
Pmg=Pz1+Pj1;    % Pagrindiniai magnetinių nuostoliai, W
%-----%

```

Priedas 4. 2MW asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi paradiniai duomenys

```

clear all
%-----%
%Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi parametrai
%-----%
fn = 50;           % Tinklo įtampos dažnis, Hz
Pn = 2e6;         % Nominali aktyvioji galia, W
Us = 690;         % Nominali statoriaus apvijų įtampa, V
Ur = 2070;        % Nominali rotoriaus apvijų įtampa, kai s=1 (neperskaičiuota), V
n = 1500;         % Sinchroninis greitis, aps/min
sn = 0.04;        % Nominalus slydimas
p=2;             % Poliu poros
Rs = 2.6e-3;      % Statoriaus apvijų aktyvioji varža, omai
Lss = 0.0871e-3; % Sklaidos induktyvumas, H
Lsr = 0.087e-3;  % Sklaidos induktyvumas, H
Lm = 2.52e-3;    % Abipusis įmagnetinimo induktyvumas, H
Rr = 2.9e-3;     % Rotoriaus varža (perskaičiuota), Omai
Ls = Lm+Lss;     % Statoriaus induktyvumas, H
Lr = Lm +Lsr;    % Rotoriaus induktyvumas, H
%-----%
smax = 0.45;     % Maksimalus slydimo taško perstūmimas
u=1/3;          % Perskaičiavimo koeficientas
Fs = (Us*sqrt(2/3))/(2*pi*fn); % Statoriaus apvijų kuriamas magnetinis srautas, Wb
sigma = 1-Lm^2/(Ls*Lr); % Koeficientas sigma
Mem = Pn/((n*pi)/30); % Nominalus sukimo momentas, Nm
J=121.5+1048.88; % Inercijos momentas, Kg*m^2
D=1e-3;         % Dampingo koeficientas
%-----%
Vdc =Ur*smax*u*sqrt(2); % DC linko įtampos nuoroda (perskaičiuota), V
f_s=4e3;        % PWM moduliacijos dažnis
ts=1/(f_s*5);  % Samplinimo laiko pastovioji (20KHz dažnis)
%-----%
%PI reguliatorių parametrai:
%-----%
% Sroves PI reguliatoriaus proporcinis koeficientas
Kp_i = 0.58;
% Sroves PI reguliatoriaus integralinis koeficientas
Ki_i = 50;
% Greicio PI reguliatoriaus proporcinis koeficientas
Kp_n = 14230;
% Greicio PI reguliatoriaus integralinis koeficientas
Ki_n = 142300;
% Reaktyviosios galios PI reguliatoriaus proporcinis koeficientas
Kp_Q = -5.97e-05;
% Reaktyviosios galios PI reguliatoriaus integralinis koeficientas
Ki_Q = 2.46e-06;
%-----%
%Magnetinės grandinės aktyviosios galios nuostolių įvertinimas
%-----%
M_s_j=4414.5;   % Statoriaus magnetolaidžio jungo masė, Kg
M_s_d=778.5;   % Statoriaus magnetolaidžio dantų masė, Kg
M_r_j=1013.6;  % Rotoriaus magnetolaidžio jungo masė, Kg
M_r_d=253.4;   % Rotoriaus magnetolaidžio dantų masė, Kg
%-----%
Bj1=1.2;       % Statoriaus jungo magnetinio srauto tankis, T
Bz1=1.45;      % Statoriaus dantų magnetinio srauto tankis, T
kz1=4.45;      % Plieno magnetinių nuostolių koeficientas dantims,
kj1=2.98;      % Plieno magnetinių nuostolių koeficientas jungui
%-----%
Pz1=kz1*Bz1*Bz1*M_s_d; % Magnetolaidžio dantų magnetinių nuostoliai, W
Pj1=kj1*Bj1*Bj1*M_s_j; % Magnetolaidžio jungo magnetinių nuostoliai, W
Pmg=Pz1+Pj1;     % Pagrindiniai magnetinių nuostoliai, W
%-----%

```