



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Asinchroninio generatoriaus taikymo galios švytavimo slopinimui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Lorenas Vitkus

Projekto autorius

Asist. Almantas Bandza

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Asinchroninio generatoriaus taikymo galios švytavimo slopinimui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Lorenas Vitkus

Projekto autorius

Asist. Almantas Bandza

Vadovas

Doc. Povilas Marčiulionis

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Lorenas Vitkus

Asinchroninio generatoriaus taikymo galios švytavimo slopinimui tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Lorenas Vitkus

Patvirtinta elektroniniu būdu

Vitkus, Lorenas. Asinchroninio generatoriaus taikymo galios švytavimo slopinimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas asist. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, studijų krypčių grupė – inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: sinchroninis generatorius, asinchroninis generatorius, galios švytavimas, sintetinė inercija.

Kaunas, 2025. 52 p.

Santrauka

Baigiamasis magistro tyrimas skirtas ištirti asinchroninio generatoriaus galimybes slopinti elektros sistemoje atsirandančius aktyviosios galios švytavimus.

Pirmojoje tyrimo dalyje atliekama literatūros šaltinių analizė, kurioje apžvelgiama elektros sistemos stabilumo svarba bei elektros sistemos stabilumo klasifikavimas pagal pagrindinius sistemos parametrus. Šioje dalyje taip pat analizuojamos aktyviosios galios švytavimo atsiradimo priežastys bei šio proceso daromas poveikis sistemai. Baigiamajame tyrimo darbe asinchroninis generatorius modeliuojamas naudojant vėjo elektrinės valdymo algoritmą, todėl atliekama vėjo elektrinių apžvalga. Šioje apžvalgoje nustatomi skirtingi vėjų elektrinių tipai bei galios švytavimo slopinimo galimybės.

Antrojoje dalyje sukuriama modelis, kuriuo atliekamas aktyviosios galios švytavimo tyrimas. Šioje dalyje detalios aprašomi naudojami sistemos įrenginiai, šių įrenginių parametrai, valdymo algoritmai, papildomi valdikliai bei tyrimo režimai. Modelis kuriamas *MATLAB* programinėje įrangoje, *Simulink* aplinkoje. Trečiojoje dalyje pateikiami sistemos ir asinchroninio generatoriaus rezultatai, kurie gaunami tiriant aktyviosios galios švytavimo procesą. Gauti rezultatai parodo, kad modifikuotas asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi gali būti efektyvus slopinant sistemos stabilius ir nestabilius aktyviosios galios švytavimus.

Vitkus, Lorenas. Investigation of Asynchronous Generator Application to Power Oscillation Damping. Master's Final Degree Project / supervisor assist. dr. Almantas Bandza; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, study field group – engineering science.

Keywords: synchronous generator, asynchronous generator, power oscillation, virtual inertia.

Kaunas, 2025. 52 pages.

Summary

The final master's thesis is dedicated to investigating the capabilities of an asynchronous generator to damp active power oscillations arising in the electrical power system.

In the first part of the study, a literature review is conducted, in which the importance of power system stability is discussed, along with the classification of power system stability based on the main system parameters. This section also analyzes the causes of active power oscillations and the impact of this process on the system. Since the asynchronous generator is modeled using a wind power plant control algorithm in the final research, a review of wind power plants is also conducted. This review identifies different types of wind power plants and the possibilities for damping power oscillations.

In the second part, a model is created to study active power oscillations. This section provides a detailed description of the system components used, their parameters, control algorithms, additional controllers, and testing modes. The model is developed using *MATLAB* software in the *Simulink* environment. In the third part, the results of the system and the asynchronous generator are presented, which are obtained by examining the active power oscillation process. The results show that the modified asynchronous generator with a wound rotor can be effective in damping both stable and unstable active power oscillations in the system.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros šaltinių analizė.....	12
1.1. Elektros sistemos stabilumas	12
1.1.1. Stabilumo svarba	12
1.1.2. Sistemos inercija.....	12
1.1.3. Sintetinė inercija.....	14
1.1.4. Stabilumo tipai.....	16
1.2. Elektros sistemos galios švytavimas	17
1.2.1. Aktyviosios galios švytavimas	17
1.2.2. Galios švytavimo atsiradimo priežastis	18
1.2.3. Stabilus ir nestabilus švytavimas	20
1.2.4. Švytavimų tipai.....	22
1.3. Vėjo elektrinių apžvalga.....	23
1.3.1. Vėjo elektrinių tipai	23
1.3.2. Vėjo elektrinių valdymo galimybės slopinant galios švytavimą.....	24
1.3.3. POD valdiklis	25
2. Metodologinė dalis.....	26
2.1. Programinė įranga	26
2.2. Tyrimo schema	26
2.3. Tiriamos schemos režimai	27
2.4. Tiriamos schemos parametrai	27
2.5. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi POD valdiklis	29
2.6. Sinchroninio generatoriaus greičio reguliatorius.....	30
2.7. Sinchroninio generatoriaus įtampos reguliatorius	31
3. Tiriamoji dalis.....	32
3.1. Apkrovos atsijungimas be POD valdiklio	32
3.2. Apkrovos atsijungimas su POD valdikliu	35
3.3. Trumpasis jungimas be POD valdiklio.....	40
3.4. Trumpasis jungimas su POD valdikliu.....	43
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50
Priedai.....	53
1 priedas. Sistemos modelis <i>Simulink</i> aplinkoje.....	53
2 priedas. Asinchroninio generatoriaus aktyviosios galios valdymo schema <i>Simulink</i> aplinkoje .	54

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Galios švytavimo atsiradimo priežastis ir daromas poveikis sistemos generatoriams [16]	17
2 lentelė. Tiriamos schemos režimai	27
3 lentelė. Sinchroninių generatorių parametrai	28
4 lentelė. Vėjo elektrinės parametrai	28
5 lentelė. Transformatorių parametrai	28
6 lentelė. Elektros linijų parametrai	29
7 lentelė. Apkrovų parametrai	29
8 lentelė. Atskaitiniai parametrai apkrovos atjungimo schemeje	34
9 lentelė. Apkrovos atjungimo schemos matavimo rezultatai	38
10 lentelė. Atskaitiniai parametrai trumpojo jungimo schemeje	43
11 lentelė. Trumpojo jungimo schemos matavimo rezultatai	47

Paveikslų sąrašas

1 pav. Dažnio pokyčio nuo apkrovos ir generacijos kiekio pavyzdys [3]	12
2 pav. Dažnio kitimo priklausomybė nuo sistemos inercijos dydžio [8]	14
3 pav. Sintetinio sinchroninio generatoriaus struktūra [10]	14
4 pav. Paskirstytųjų generatorių su integruotu sintetiniu inercijos valdikliu blokinė schema [12] ..	15
5 pav. Elektros sistemos stabilumo klasifikavimas [13]	16
6 pav. Aktyviosios galios švytavimo pavyzdys įvykus trikdžiui tinkle [16]	17
7 pav. Rotoriaus kampas δ sinchroniniame generatoriuje [17]	18
8 pav. Sinchroninio generatoriaus galios kampinė charakteristika [17]	19
9 pav. Sinchroninio generatoriaus galios kampinė charakteristika avarijos metu	19
10 pav. Lygių plotų taisyklės taikymo pavyzdys [19]	20
11 pav. Stabilaus ir nestabilaus sinchroninio generatoriaus švytavimo pavyzdys [19]	22
12 pav. Vietinio švytavimo pavyzdys [22]	23
13 pav. Vėjo elektrinių tipai [1]	24
14 pav. POD valdiklio blokinė schema [33]	25
15 pav. Principinė tyrimo schema	26
16 pav. AGFR galios valdiklio blokinė schema su integruotu POD valdikliu [34]	29
17 pav. Hidraulinės turbinos greičio regulatoriaus blokinė valdymo schema	30
18 pav. Sinchroninio generatoriaus įtampos regulatoriaus blokinė valdymo schema	31
19 pav. Generatorių aktyviosios galios kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo	32
20 pav. Sinchroninių generatorių rotorų kampo δ kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo....	33
21 pav. Generatorių rotoriaus kampinio greičio kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo.....	33
22 pav. Sinchroninių generatorių žadinimo įtampos kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo.	34
23 pav. SG1 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje	35
24 pav. SG2 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje	36
25 pav. VE aktyviosios galios kreivės su skirtingais POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje	36
26 pav. SG1 žadinimo įtampos kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje	37
27 pav. SG2 žadinimo įtampos kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje	38
28 pav. Generatorių aktyviosios galios kreivės trumpojo jungimo schemoje	40
29 pav. Sinchroninių generatorių rotorų kampo δ kreivės trumpojo jungimo schemoje	41
30 pav. Generatorių rotoriaus kampinio greičio kreivės trumpojo jungimo schemoje	41
31 pav. Sinchroninių generatorių žadinimo įtampos kreivės trumpojo jungimo schemoje	42
32 pav. SG1 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje	43
33 pav. SG2 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje	44
34 pav. VE aktyviosios galios kreivės su skirtingais POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje	44
35 pav. SG1 rotoriaus kampinio greičio kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje	45

36 pav. SG2 rotoriaus kampinio greičio kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje	46
37 pav. VE rotoriaus kampinio greičio kreivės su skirtingais POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje.....	46

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ADN – automatinis dažnio nukrovimas;

AGFR – asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi;

ANG – asinchroninis narvelinis generatorius;

FACTS – lanksti kintamos srovės perdavimo sistema (angl. *Flexible Alternating Current Transmission System*);

IPM – impulso pločio moduliacija;

MPPT – maksimalios galios taško valdiklis (angl. *Maximum Power Point Tracking*);

PG – paskirstytieji generatoriai;

PI – proporcinio integralo valdiklis;

PID – proporcinio integralo išvestinis valdiklis;

PKANG – pilnai konvertuojamas asinchroninis narvelinis generatorius;

PKSG – pilnai konvertuojamas sinchroninis generatorius;

POD – galios švytavimo slopinimas (angl. *Power Oscillation Damping*);

PSS – elektros sistemos stabilizatorius (angl. *Power System Stabilizer*);

RPK – rotoriaus pusės keitiklis;

SG – sinchroninis generatorius;

STATCOM – statinis sinchroninis kompensatorius;

VE – vėjo elektrinė.

Įvadas

Elektros energijos vartojimas pasaulyje nuosekliai didėja, todėl tampa būtina užtikrinti pakankamą bei patikimą jos generaciją. Atsižvelgiant į griežtėjančius aplinkosauginius reikalavimus ir siekį sumažinti oro taršą, vis daugiau dėmesio skiriama atsinaujinantiems energijos šaltiniams, kurie laikomi tvaresne alternatyva tradiciniams, išskastiniu kuru pagrįstiems generatoriams. Žaliojo kurso siekiai ir technologinė pažanga skatina šių šaltinių integravimą į elektros energetikos sistemas.

Nors atsinaujinančios energijos šaltiniai padeda didinti bendrą sistemos galią, jų veikimas turi tam tikrų trūkumų. Vienas svarbiausių – tai, kad jie nėra prijungiami tiesiogiai per sistemos dėl savo vidinės struktūros. Dėl šios priežasties šie šaltiniai negali prisidėti prie sistemos inercijos, kuri yra būtina dažnio stabilumui palaikyti. Sistemoje sumažėjus inercijai, išauga dažnio švytavimų rizika, atsiranda aktyviosios galios srautų pasikeitimas tarp skirtingų generatorių sričių, o bendra sistemos patikimumo būklė blogėja.

Norint išspręsti šią problemą, būtina taikyti papildomus sprendimus, kurie atkurtų dinamines sistemos savybes. Vienas iš jų – asinchroninių generatorių ar atsinaujinančių šaltinių integravimas su sintetiniu inercijos valdikliu. Tokios priemonės leidžia imituoti sinchroninių generatorių būdingus energijos mainus, kurie padeda slopinti galios švytavimus procesus bei gerinti bendrą sistemos stabilumą.

Darbo tikslas – ištirti galios švytavimo slopinimo galimybes naudojant asinchroninį generatorių su faziniu rotoriumi.

Darbo uždaviniai:

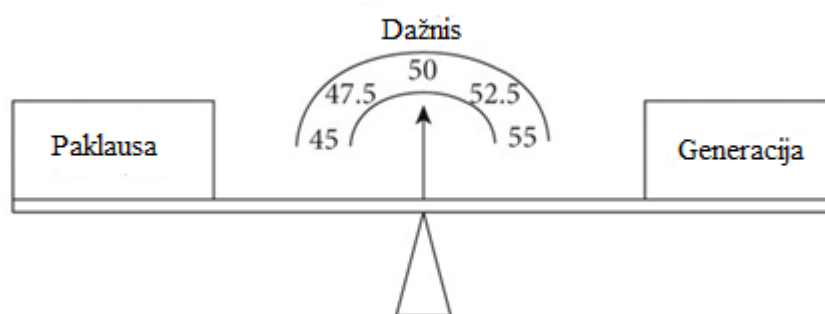
1. nustatyti galios švytavimo atsiradimo priežastis;
2. išanalizuoti galios švytavimo slopinimo galimybes pritaikius asinchroninį generatorių;
3. parengti elektros sistemos ir asinchroninio generatoriaus modelį galios švytavimo procesui tirti;
4. atlikti asinchroninio generatoriaus galios švytavimo slopinimo vertinimą.

1. Literatūros šaltinių analizė

1.1. Elektros sistemos stabilumas

1.1.1. Stabilumo svarba

Elektros sistemos stabilumas – tai gebėjimas palaikyti sistemos parametrų pusiausvyrą įprastu darbo režimu bei gebėti sugrįžti į pusiausvyrą po elektros tinkle įvykusių avarijų [1]. Nuo komercinės elektros gamybos pradžios, kuomet elektros energija buvo pradėta gaminti pardavimui, sinchroniniai generatoriai tapo visos sistemos pagrindu. Gamybos pradžioje generatoriai nebuvo pritaikyti veikti kartu su energijos kaupimo įrenginiais, kuriais būtų galima balansuoti paklausą ir palengvinti generatorių darbą. Stiprus ryšys tarp sinchroninio generatoriaus generuojamos galios ir sistemos dažnio suteikė galimybę lengvai identifikuoti ir naudoti kaip balanso rodiklį, kuris perteikdavo generacijos ir suvartojimo kiekio skirtumus [2].



1 pav. Dažnio pokyčio nuo apkrovos ir generacijos kiekio pavyzdys [3]

Veikiantis sinchroninis generatorius sukdamasis kaupia kinetinę energiją, kuri labai svarbi sistemos stabilumui. Tinkle įvykus trikdžiui, apkrovos ir generacijos kiekis pasikeičia, dėl ko pradeda kisti ir sistemos dažnis. Kuomet sistema sudaryta iš daug sinchroninių generatorių su didelio svorio rotoriais, dažnio pasikeitimas avarijos ar apkrovos pokyčio metu trunka ilgesnį laiko tarpą. Dėl ilgesnės sukimosi greičio pokyčio trukmės, generatoriaus valdymo sistemos gali atitinkamai reaguoti ir prisitaikyti prie pakitusių tinklo parametrų užtikrindami stabilų sistemos darbą [2].

Šiuo metu sparčiai didėjant atsinaujinančių generacijos šaltinių kiekiui, prie sistemos prijungiami įrenginiai, kurie neturi tiesioginio ryšio su sistema ir valdomi per galios elektroniką. Tokie prietaisai nesugeba kaupti kinetinės energijos, todėl dažnio pokytis dėl mažėjančių sinchroninių generatorių kiekio pradeda vykti intensyviau. Siekiant išspręsti mechaninės inercijos kiekio trūkumą, galios elektronikos valdymo pagalba sukuriama sintetinės inercijos koncepcija, kuri leidžia imituoti sinchroninio generatoriaus veikimo dinamiką ir suteiki trūkstamą inerciją [4].

1.1.2. Sistemos inercija

Sistemos inercija – tai parametras, kuriuo apibūdinamas elektros sistemos gebėjimas slopinti sukeltus įtampos ir dažnio švytavimus panaudojant besisukančią rotoriaus masę. Pagrindiniai sistemoje energiją kaupiantys ir turintys įrenginiai yra sinchroniniai generatoriai [5]. Vieno sinchroninio generatoriaus sukuriama inercijos momentas apskaičiuojama pagal (1) formulę:

$$J = \int r^2 dm; \quad (1)$$

čia J – generatoriaus inercijos momentas [kg m²];
 r – rotoriaus spindulys [m];
 m – rotoriaus masė [kg].

Sistemoje atsiradus galios pokyčiui, greitis rotoriuje pradeda kisti. Sinchroninio generatoriaus greičio kitimo spartumas priklauso nuo energijos kiekio, kuris yra sukaupiamas rotoriuje [6]. Sinchroniniame generatoriuje sukaupta kinetinė energija išreiškiama pagal (2) formulę:

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2; \quad (2)$$

čia E_k – kinetinė energija [J];
 J – generatoriaus inercijos momentas [kg m²];
 ω – rotoriaus kampinis dažnis [rad/s].

Formulėje (2) matoma, kad sinchroninio generatoriaus rotorius sukaupia daugiau kinetinės energijos būdamas sunkus ir didelis arba turėdamas didesnę sukimosi greitį. Tokia sukaupta kinetinė energija gali būti panaudojama vėliau, kuomet sistemoje reikalinga stabilizuoti dažnio kitimą.

Elektros sistemos analizėse ir bandymuose, dažnai sutinkamas parametras yra generatoriaus inercijos konstanta. Šis dydis apibūdinamas kaip laikas, per kurį generatorius praradęs mechaninį sukimo momentą, gali tiekti vardinę galią panaudojant rotoriuje sukaupią kinetinę energiją [7]. Inercijos konstanta vienam generatoriui apskaičiuojama pagal (3) formulę:

$$H = \frac{E_k}{S_n}; \quad (3)$$

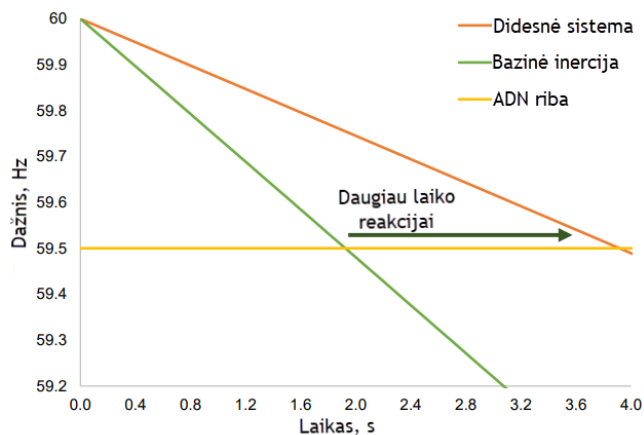
čia H – inercijos konstanta [s];
 E_k – kinetinė energija [J];
 S_n – generatoriaus vardinė galia [VA].

Kuomet tinklas yra sudaromas iš daug skirtingų veikiančių sinchroninių generatorių, bendra sistemos inercija kinta ir apskaičiuojama pagal (4) formulę:

$$H_{sistemos} = \frac{\sum_{i=1} H_{SG,i} \cdot S_{n,i}}{\sum_{i=1} S_{n,i}} = \frac{\sum_{i=1} E_{SG,i}}{\sum_{i=1} S_{n,i}}; \quad (4)$$

čia $H_{sistemos}$ – sistemos inercijos konstanta [s];
 $H_{SG,i}$ – i -ojo sinchroninio generatoriaus inercijos konstanta [s];
 $S_{n,i}$ – i -ojo generatoriaus vardinė galia [VA];
 $E_{SG,i}$ – i -ojo sinchroninio generatoriaus kinetinė energija [J].

Iš formulės (4) matoma, kuomet prie tinklo prijungiami nauji sinchroniniai generatoriai galintys kaupti didelį kinetinės energijos kiekį, sistemos inercija pradeda didėti. Tai padeda stabilizuoti ir sulėtinti dažnio kitimą galios disbalanso metu. Dažnio kitimo pavyzdžiai laike su skirtingomis sistemos inercijomis pateikiami paveiksle (žr. 2 pav.).

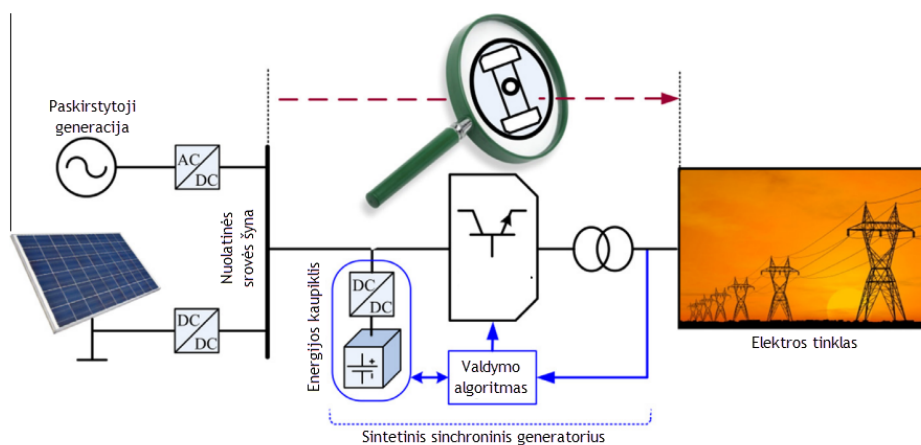


2 pav. Dažnio kitimo priklausomybė nuo sistemos inercijos dydžio [8]

Grafike (žr. 2 pav.) matomos dvi kreivės rodančios dažnio kitimą skirtingo dydžio sistemose. ADN riba žymimas minimalus leistinas tinklo dažnis, nuo kurios dažniui mažėjant toliau pradedami atjunginėti vartotojai dėl generacijos stokos. Pateiktame paveiksle didžioji sistema sudaryta iš dvigubai daugiau generacijos ir dvigubai daugiau apkrovos. Trikdžio dydis abiejų sistemų atžvilgiu yra vienodas, tačiau dažnio kitimas laike yra skirtingas. Tai rodo sukaupiamos kinetinės energijos poveikį, kuriuo dažnio mažėjimas trikdžio metu yra kompensuojamas sukaupta rotoriaus energija [8].

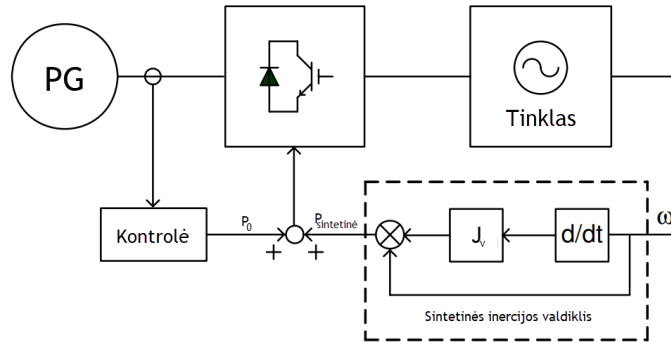
1.1.3. Sintetinė inercija

Sintetinė inercija – tai atsinaujinančių šaltinių, energijos kaupiklių ir generatorių kontroliuojamų per galios elektroniką valdymas, kuriais imituojamas įprastinis sinchroninio generatoriaus veikimas [9]. Sintetinė inercija tinkle sukuriama galios keitiklių pagalba, kurie į tinklą atiduodą aktyviają galią priešinga kryptimi nei sinchroninio generatoriaus sukimosi greičio pokytis. Kuomet sinchroninio generatoriaus rotorius pradeda lėtėti, keitiklių pagalba į tinklą paduodama papildoma reikalinga galia, kuri slopina rotoriaus greičio kitimą. Tokiu pačiu algoritmu generacijos šaltiniai veikia ir į priešingą pusę, susimąžindami galią, kuomet sinchroninių generatorių rotoriai pradeda greitėti. Tokie sistemoje veikiantys šaltiniai vadinami sintetiniais sinchroniniais generatoriais [10].



3 pav. Sintetinio sinchroninio generatoriaus struktūra [10]

Paveiksle (žr. 3 pav.) galima matyti, kad generuojantys šaltiniai arba energijos kaupikliai prie tinklo nėra prijungiami tiesiogiai. Tam naudojami keitikliai, kurių pagalba nuolatinė srovė pakeičiama į kintamą srovę. Šie keitikliai dažnu atveju nėra programuojami taip, kad valdytų savo atiduodamą galią pagal tinkle kintantį dažnį. Atliekant papildomus matavimus, keitiklį galima modifikuoti ir generacijos šaltinį paversti sintetiniu sinchroniniu generatoriumi. [11]. Modifikuoto generacijos šaltinio schema pateikiama paveiksle (žr. 4 pav.)



4 pav. Paskirstytųjų generatorių su integruotu sintetiniu inercijos valdikliu blokinė schema [12]

Paveiksle (žr. 4 pav.) matomas sintetinės inercijos valdiklis, kurio pagalba sukuriamas sintetinio sinchroninio generatoriaus modelis. Šis valdiklis imituoja sinchroninio generatoriaus kinetinius energijos mainus, o šie mainai apibūdinami kaip sintetiniu inercijos atsaku. Atsako stiprumas aprašomas sintetiniu inercijos momentu J_v [11].

Per galios keitiklius prie tinklo prijungtų generatorių sukuriama kinetinė energija apskaičiuojama pagal (5) formulę:

$$E_{PG} = \frac{1}{2} J_v \omega_g^2; \quad (5)$$

čia E_{PG} – kinetinė energija PG [J];
 J_v – sintetinės inercijos momentas [kg m²];
 ω_g – tinklo kampinis dažnis [rad/s].

Anksčiau pateikta (4) formulė skirta skaičiuoti tik iš sinchroninių generatorių sudarytos sistemos inerciją. Jei prie tinklo prijungiami generatoriai per galios keitiklius, bendra sistemos inercija apskaičiuojama pagal (6) formulę:

$$H_{sistemos} = \frac{\sum_{i=1} E_{SG,i} + \sum_{n=1} E_{PG,n}}{S_{sistemos}}; \quad (6)$$

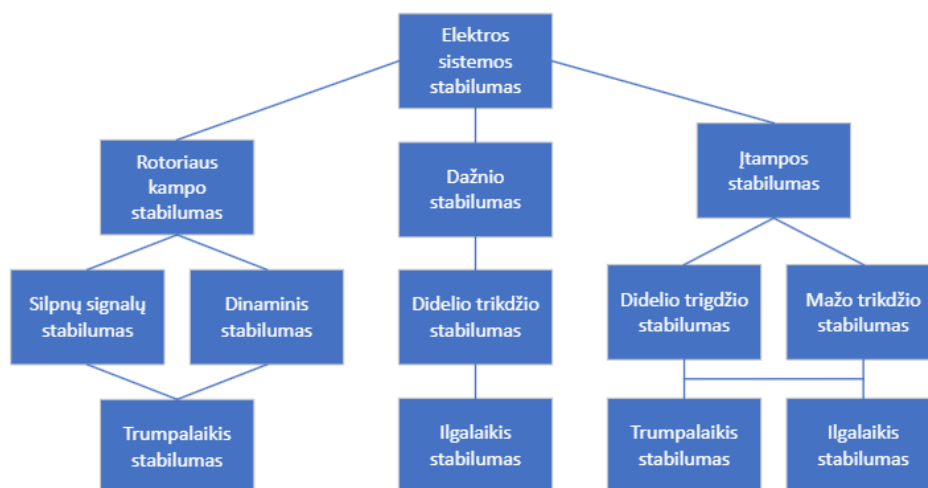
čia $H_{sistemos}$ – sistemos inercijos konstanta [s];
 $E_{SG,i}$ – i -ojo sinchroninio generatoriaus kinetinė energija [J];
 $E_{PG,n}$ – n -ojo PG kinetinė energija [J];
 $S_{sistemos}$ – visos sistemos generatorių įrengtoji galia [VA].

Iš (6) formulės matoma, kad sistemos inercija sudaryta iš sinchroninių ir per galios keitiklius prijungtų generatorių kinetinės energijos suma, kuri padalinama iš visos sistemos galios. Kuomet prie elektros tinklo prijungiami nauji generatoriai, bendra sistemos galia pradeda didėti. Jei generuojantis šaltinis neturi tiesioginio ryšio su tinklu, jis nekaupia kinetinės energijos ir nedidina sistemos inercijos. Tai

lemia visos sistemos stabilumo sumažėjimą, kuris svarbus pereinamosiose procesuose. Tam, kad tokie generacijos šaltiniai nesumažintų tinklo patikimumo, naudojamas papildomas sintetinės inercijos valdiklis, kuris leidžia netiesiogiai prijungtam generatoriui atkartoti sinchroninio generatoriaus veikimą.

1.1.4. Stabilumo tipai

Elektros sistemos stabilumas yra apibūdinamas kaip viena problema, kuri gali būti nulemiama daug skirtingų faktorių ir veiksnių. Siekiant palengvinti pagrindinių nestabilumo atsiradimo priežasčių nustatymą, elektros sistemos stabilumas yra išskiriamas į skirtingas rūšis ir kategorijas [13]. Elektros sistemos skirstymas pagal rūšis ir kategorijas pateikiamas paveiksle (žr. 5 pav.).



5 pav. Elektros sistemos stabilumo klasifikavimas [13]

Pagrindinės elektros sistemos stabilumo rūšys yra:

1. rotoriaus kampo stabilumas;
2. dažnio stabilumas;
3. įtampos stabilumas.

Rotoriaus kampo stabilumas apibūdinamas kaip gebėjimas būti sinchronizuotame tinkle normaliomis darbo sąlygomis arba išlaikyti sinchronizaciją po elektros tinkle įvykusių avarių. Sinchronizuotu režimu apibūdinamas procesas, kuriuo metu generatoriaus mechaninė sukimo momento jėga yra lygi elektriniai sukimo momento jėgai. Šioms dedamosioms nesutampant, reguliatorių pagalba yra valdomi generatoriai, kurie pereinamojo proceso metu gali sukelti aperiodinį arba periodinį nestabilumą [14]. Taip pat elektros sistemoje įvykus trikdžiui ar pakitus elektriniai sukimo momento jėgai, visų tinkle esančių sinchroninių generatorių galios kampinės charakteristikos kinta. Priklausomai nuo trikdžio dydžio, kintant charakteristikoms, generatoriai gali tapti nestabilūs ir greitėti nestabdant iki tol, kol mechaniškai subyrės.

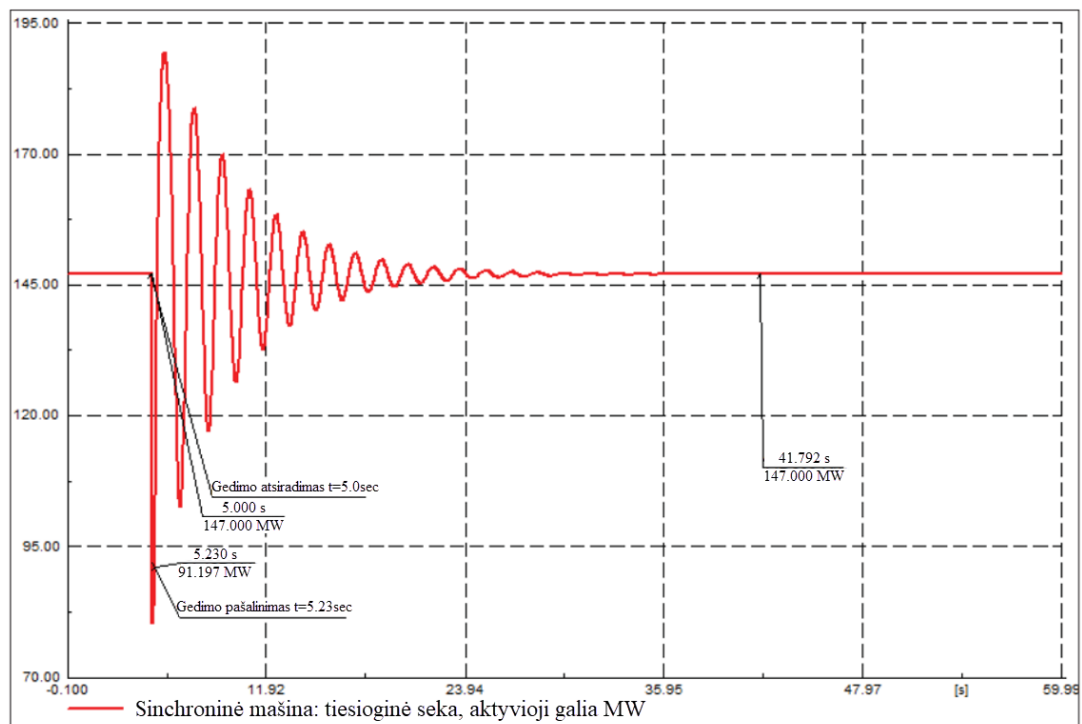
Įtampos stabilumo sąlyga yra palaikyti nominalią įtampa visose elektros sistemos taškuose. Toks įtampos lygio palaikymas turi būti užtikrinamas skirtingiems tinklo darbo režimams bei avarijos atvejams. Nevaldomas įtampos lygis gali privesti prie tinklo prijungtų apkrovų praradimų, sinchroninių generatorių rotorinių kampų δ kitimų [13].

Dažnio stabilumas yra gebėjimas elektros sistemos dažnio vertę išlaikyti vienodą normaliu darbo režimu arba po tinkle įvykusių didelių trikdžių. Elektros sistemos dažniu sutrikimu laikomas gamybos ir apkrovos skirtumas, kuris gali įtakoti galios srautų bei įtampų švytavimų atsiradimą. Sistemos stabilumo išlaikymui ši santyki tarp elektros gamybos ir suvartojimo būtina išlaikyti vienodą [13, 14].

1.2. Elektros sistemos galios švytavimas

1.2.1. Aktyviosios galios švytavimas

Galios švytavimo reiškiniu laikomas galios srautų pokytis tarp dviejų elektros sistemos sričių. Šių sutrikimų atsiradimas dažniausiai pastebimas sistemoje prarandant apkrovas, komutuojuant perdavimo linijas, išjungiant generatorius ar vykstant trumpiesiems jungimams [15]. Šio reiškinio pereinamojo proceso metu vyksta rotoriaus kampo poslinkis, kuris yra labai svarbus stabilios sistemos užtikrinimui. Rotoriaus kampo padėtimi sistemoje palaikoma aktyvioji ir reaktyvioji galia, įtampos lygiai, fazės kampai. Bet kokio trikdžio ar pereinamojo proceso metu, rotoriaus kampo nekontroliavimas gali sukelti pilną sistemos griūtį, dar vadinamą „blackout“ [15, 16]. Aktyviosios galios švytavimo pavyzdys sinchroniniame generatoriuje pateikiamas paveiksle (žr. 6 pav.).



6 pav. Aktyviosios galios švytavimo pavyzdys įvykus trikdžiui tinkle [16]

Kaip minėta anksčiau, švytavimo atsiradimo priežastis gali būti skirtinga. Sinchroniniams generatoriams trikdžio pobūdis lemia skirtingų parametrų kitimą sinchronizacijos pradžioje metu [16]. Sinchroninių generatorių parametrai trikdžio metu pateikiami lentelėje (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. Galios švytavimo atsiradimo priežastis ir daromas poveikis sistemos generatoriams [16]

Priežastis	Poveikis sinchroniniams generatoriams
Apkrovos praradimas	Sinchronizacijos praradimas tarp įtampų
Generatoriaus atsijungimas	Sinchronizacijos praradimas tarp fazių kampų

Priežastis	Poveikis sinchroniniams generatoriams
Apkrovos padidėjimas	Sinchronizacijos praradimas tarp fazių sekos
Linijų perjungimas	Sinchronizacijos praradimas tarp dažnio

1.2.2. Galios švytavimo atsiradimo priežastis

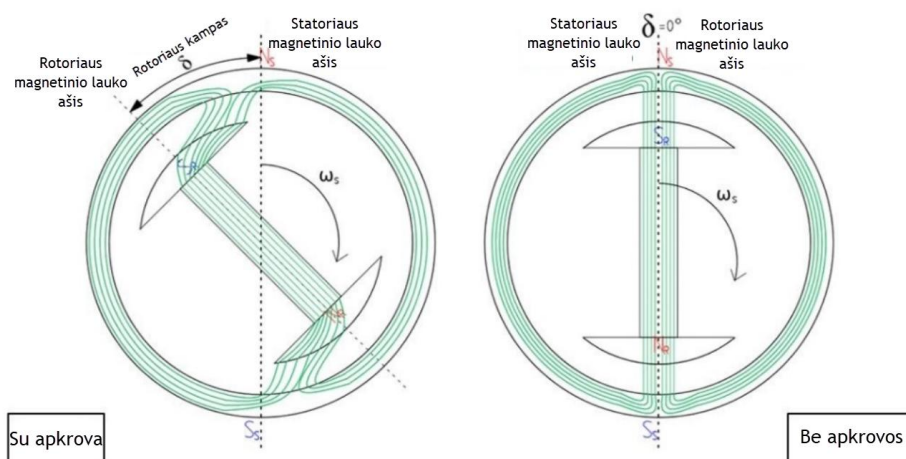
Sinchroninio generatoriaus aktyviosios galios švytavimas atsiranda dėl rotoriaus kampo poslinkio pereinamojo proceso metu, kuomet sistemoje vyksta perjungimai ar gedimai. Sinchroninio generatoriaus judesio lygtis aprašoma pagal (7) formulę:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e; \quad (7)$$

- čia H – sistemos inercijos konstanta [s];
 δ – rotoriaus kampas [°];
 ω_s – sinchroninis kampinis dažnis [rad/s];
 P_m – mechaninė generatoriaus galia [W];
 P_e – elektrinė generatoriaus galia [W].

Pateiktoje (7) formulėje matoma, kad sinchroninio generatoriaus rotoriaus kampo δ kitimas priklauso nuo mechaninės ir elektrinės galios skirtumo. Sinchroninio generatoriaus inercijos konstanta apskaičiuojama pagal (3) formulę, o sinchroninis kampinis dažnis apibrėžiamas kaip pastovus dydis. Kuomet sistema yra nusistovėjusi ir pereinamieji procesai nevyksta, mechaninė generuojama galia yra lygi elektrinei generuojamai galiai. Toks lygus galių pasiskirstymas leidžia rotoriaus kampui δ nekisti ir būti pastovioje reikšmėje.

Sinchroninio generatoriaus rotoriaus kampas δ yra apibūdinamas, kaip kampas tarp rotoriaus magnetinio lauko ir statoriaus magnetinio lauko. Abu magnetiniai laukai nusistovėjusioje sistemoje sukasi vienodu greičiu, tačiau sinchroninės mašinos kampo pozicija priklauso nuo mašinos darbo režimo. Kuomet sinchroninė mašina veikia generatoriaus režimu, rotoriaus magnetinis laukas lenkia statoriaus magnetinį lauką, o mašinai veikiant variklio režimu, rotoriaus magnetinis laukas atsilieka nuo statoriaus magnetinio lauko [17]. Rotoriaus kampas δ sinchroniniame generatoriuje vaizduojamas paveiksle (žr. 7 pav.).



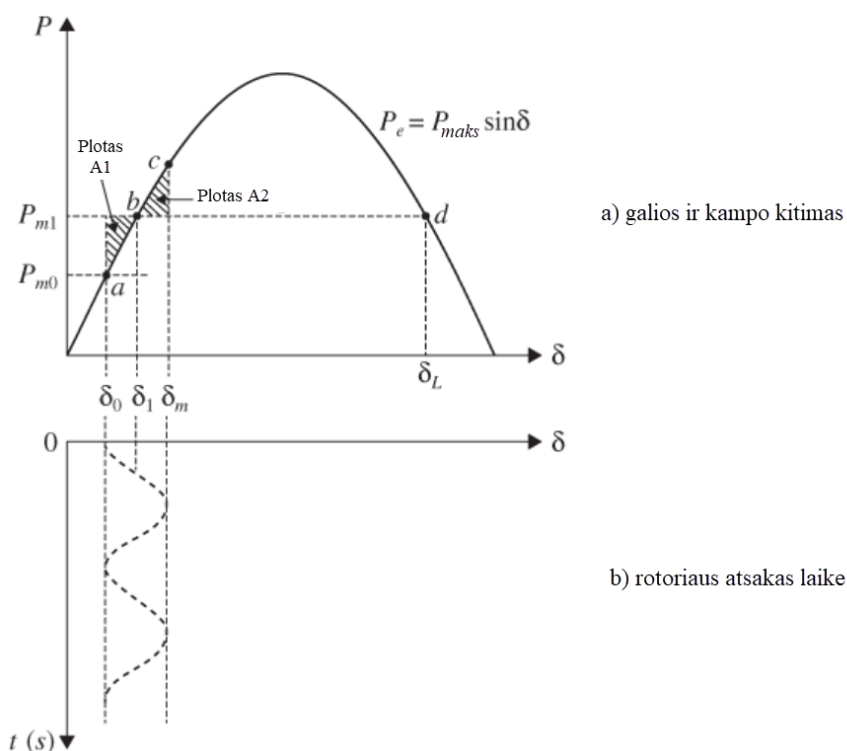
7 pav. Rotoriaus kampas δ sinchroniniame generatoriuje [17]

Priklausomai nuo tinkle vykstančio pokyčio ar gedimo dydžio, generatoriaus galios kampinė charakteristika kinta skirtingai. Tai lemia pakitusių verčių reikšmės, kurios pateikiamos (8) formulėje.

Galios švytavimo atsiradimo priežastiai nustatyti naudojamos galios kampinės charakteristikos (žr. 9 pav.), kurios išreiškia sinchroninio generatoriaus rotorius kitimo dinamiką. Elektros sistemoje įvykus trikdžiui, kurio metu sinchroninio generatoriaus galios kampinė charakteristika pasikeičia, tinkle atsiranda galios skirtumas tarp mechaninės ir elektrinės galios. Pradiniu laiko momentu, mechaninė galia yra didesnė už elektrinę, kas lemia generatoriaus rotorius greitėjimą dėl mažesnio statorius magnetinio lauko pasipriešinimo [17]. Kaip apžvelgta anksčiau, rotorius greitėjimas sukelia kinetinės energijos didėjimą (žr. 2 formulę). Kuomet pereinamojo proceso metu mechaninė galia susilygina su elektrine galia, rotorius būdamas sukaupęs perteklinės energijos sąlygoja tolimesnį rotorius greičio didėjimą. Rotorius lėtėjimas prasideda momentu, kuomet elektrinė galia tampa stipresnė už mechaninę. Toks švytavimas vyksta iki tol, kol rotorius apsisukimai susilygina su vardinu sistemos kampiniu dažniu. Vykstantis greičio kitimas turi tiesioginį poveikį rotorius kampui δ , kas lemia ir nepastovią generatoriaus generuojamą galią (žr. 8 formulę).

1.2.3. Stabilus ir nestabilus švytavimas

Aktyviosios galios švytavimo atsiradimo priežastis sistemoje, kaip apžvelgta 1.2.1 skyriuje, gali būti sukeliama skirtingų veiksnių. Skirtingų trikdžių metu rotorius sukaupiamas nevienodas kinetinės energijos kiekis, kuris pereinamojo proceso metu gali sinchroninių generatorių išvesti iš stabilumo. Tam tikslui, generatorių patikimumas įvertinamas pritaikant lygių plotų taisyklę [16]. Šios taisyklės taikymo pavyzdys pateikiamas paveiksle (žr. 10 pav.).



10 pav. Lygių plotų taisyklės taikymo pavyzdys [19]

Lygių plotų taisyklė apibūdinama kaip grafinis ir analitinis sinchroninių generatorių vertinimo metodas, kuriuo tiriami pirmieji rotorius kampo pokyčiai pereinamojo proceso metu. Šiame metode

apibrėžiami trys režimai, kuriais suformuojami greitėjimo ir lėtėjimo plotai. Pateiktame paveiksle (žr. 10 pav.) sinchroninio generatoriaus rotoriaus greitėjimo plotas žymimas A_1 , o lėtėjimo plotas – A_2 [18].

Šie plotai yra prilyginami generatoriaus sukaupiamos ir prarandamos kinetinės energijos kiekiui. Energijos kaupimas vyksta rotoriaus greitėjimo metu, o praradimas – lėtėjimo [19]. Šios sukaupiamos ir prarandamos kinetinės energijos apskaičiuojamos pagal (9) ir (10) formules:

$$E_{A1} = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta \quad (9)$$

čia E_{A1} – sukaupta kinetinė energija greitėjimo metu [J];
 P_m – mechaninė galia [W];
 P_e – elektrinė galia [W];
 δ – rotoriaus kampas [°].

$$E_{A2} = \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_e - P_m) d\delta \quad (10)$$

čia E_{A2} – prarasta kinetinė energija lėtėjimo metu [J];
 P_e – elektrinė galia [W];
 P_m – mechaninė galia [W];
 δ – rotoriaus kampas [°].

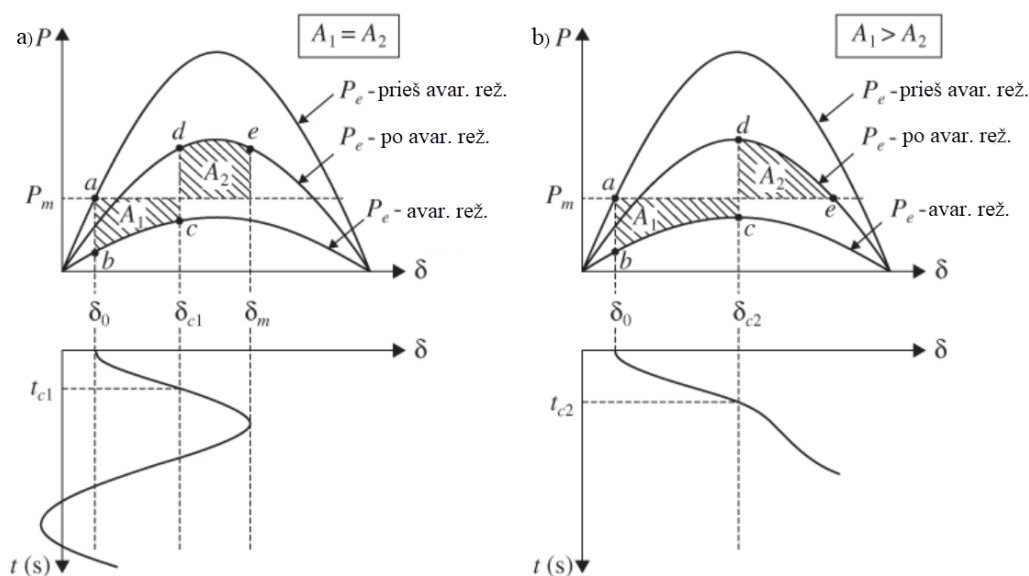
Sinchroninių generatorių kinetinės energijos skirtumas greitėjimo ir lėtėjimo metu yra svarbus parametras, kuriuo apibrėžiamas stabilus ir nestabilus rotoriaus švytavimas. Stabiliu švytavimu laikomas elektros mašinos gebėjimas sugrįžti į sinchroninį sukimosi greitį po tinkle įvykusių trikdžių. Tai pasiekama, kuomet generatoriuje prarandama kinetinė energija yra lygi sukaupiamai. Nestabilus rotoriaus švytavimas apibūdinamas, kaip rotoriaus išėjimas iš sinchroninio darbo taško po kurio rotorius nebepajėgia grįžti į nusistovėjusį darbo režimą. Tai nulemiama per daug sukaupiamą energiją greitėjimo metu. Tuo tikslu, lygiu plotų taisyklė apibrėžia generatoriaus darbo ribas, kuriose mašina išlieka stabili pereinamojo proceso metu [20, 21]. Lygių plotų taisyklė matematiškai aprašoma pagal (11) formulę:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta = E_{A1} - E_{A2} = 0; \quad (11)$$

čia δ_0 – pradinis rotoriaus kampas [°];
 δ_m – maksimalus rotoriaus kampas [°];
 P_m – elektrinė galia [W];
 P_e – elektrinė galia [W];
 E_{A1} – sukaupta kinetinė energija greitėjimo metu [J];
 E_{A2} – prarasta kinetinė energija lėtėjimo metu [J];
 δ – rotoriaus kampas [°].

Sinchroninio generatoriaus pagrindinis stabilumo parametras apibrėžiamas, kaip maksimalus rotoriaus kampas δ_m . Šiuo dydžiu išreiškiamas kampas, kurį generatorius gali pasiekti pereinamojo

proceso metu [16]. Rotoriaus kampo kitimas laike stabiliaame ir nestabiliaame režime pateikiamas paveiksle (žr. 11 pav.)



11 pav. Stabilus ir nestabilus sinchroninio generatoriaus švytavimo pavyzdys [19]

Sinchroninio generatoriaus stabilus ir nestabilus režimas apibūdinamas kaip rotoriaus gebėjimas arba negebėjimas grįžti į stabilų sukimosi greitį. Pateiktame paveiksle (žr. 11 pav.) vaizduojami rotoriaus kampo kitimai stabiliu (žr. 11 pav. a) ir nestabiliu (žr. 11 pav. b) darbo režimu. Šiuose grafikuose matomas rotoriaus kampo išsiskyrimas, kuomet greitėjimo plotas yra didesnis nei lėtėjimo. Stabiliaame generatoriuje vykstant kinetinės energijos mainams, rotoriaus kampo kitimas vyksta švytuojant, tačiau rotoriuje ir statoriuje sukurti magnetiniai laukai vienas kitą kompensuoja. Nestabiliaame generatoriuje sukaupiama kinetinė energija greitėjimo metu negali būti nuslopinama statoriuje sukurtu magnetiniu lauku. Tai lemia generatoriaus rotoriaus sinchronizacijos praradimą, kurio metu generatorius pradeda greitėti be jokio pasipriešinimo.

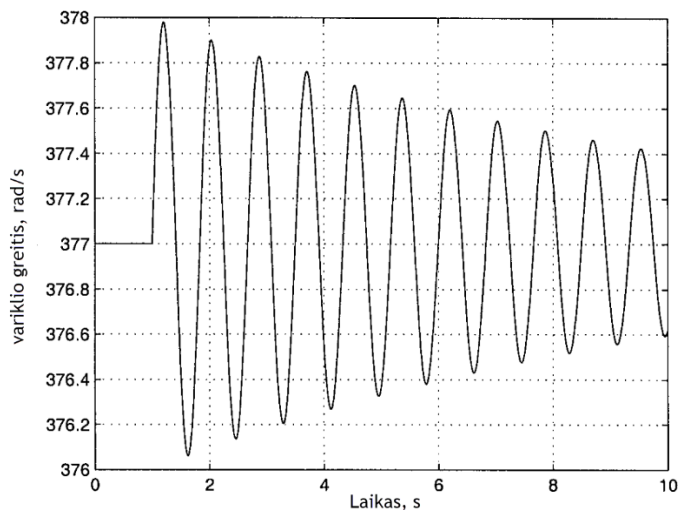
1.2.4. Švytavimų tipai

Elektros tinkle atsirandantis galios švytavimas nulemiamas skirtingų priežasčių ir daromas švytavimo poveikis sistemai yra kitoks. Siekiant palengvinti galios srautų analizę, švytavimai apibrėžiami penkiais tipais. Šie tipai leidžia identifikuoti švytavimo atsiradimo priežastį, švytavime procese dalyvaujančių įrenginių kiekį bei galimus švytavimo slopinimo metodus [22, 23, 24]. Pagrindiniai švytavimo tipai yra:

1. vidiniai elektrinių švytavimai;
2. vietiniai švytavimai;
3. tarpsteminiai švytavimai;
4. elektrinių valdymo sukelti švytavimai;
5. besisukančių įrenginių švytavimai.

Vidiniai elektrinių švytavimai – tai vienoje vietoje esančių generatorių švytavimas tarpusavyje, kuriuo metu švytavimo dažnis kinta nuo 1,5 iki 3 Hz. Šių švytavimų stiprumas priklauso nuo generatorius jungiančių reaktyviųjų varžų bei generatorių generuojamų galių. Šio tipo švytavimai slopinami PSS valdikliais.

Vietiniai švytavimai – tai vienos ar daugiau elektrinių švytavimas prieš kitus sistemoje esančius generatorius. Švytavimas kinta 0,7 iki 3 Hz dažnumu, o švytavimo dydis priklauso nuo generatorius jungiančių linijų stiprumų bei esančių apkrovų. Švytavimo slopinimui gali būti pritaikomi vienos arba dviejų įvesčių PSS valdikliai. Šio švytavimo atsiradimą dažniausiai lemia sinchroninių generatorių automatinų įtampos reguliatorių valdymas.



12 pav. Vietinio švytavimo pavyzdys [22]

Tarpsisteminiai švytavimai – apibūdinami, kaip didelių generatorių grupių švytavimas skirtingose tinklo regionuose. Šių švytavimų dažnumas apibrėžiamas iki 1 Hz. Šio tipo švytavimo slopinimas yra sudėtingas, nes slopinimo galimybės priklauso nuo galios pokyčio tarp dviejų tinklo regionų, linijų stiprumų, apkrovų dydžių, sinchroninių generatorių valdymo sistemų greičių.

Elektrinių valdymo sukelti švytavimai – tai švytavimai atsirandantys netinkamais sukonfigūruotais generatoriaus įtampos ir greičio reguliatoriais, statiniais reaktyviosios galios kompensatoriais, aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliais.

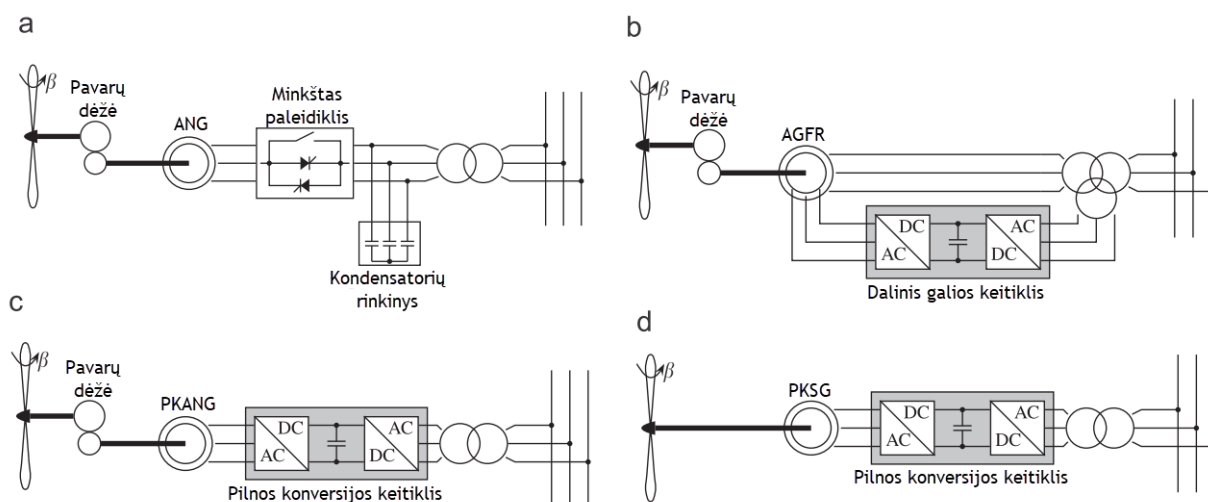
Besisukančių įrenginių švytavimai – tai švytavimai atsirandantys turbinų sukimosi metu, kuomet generatoriai valdomi įtampos ir greičio reguliatorių. Dažnio kitimas apibrėžiamas nuo 10 iki 46 Hz, o švytavimo slopinimas galimas tik naudojant daugiapakopį PSS valdiklį.

1.3. Vėjo elektrinių apžvalga

1.3.1. Vėjo elektrinių tipai

Vystantis atsijauninančiajai energetikai prie sistemos prijungiami didesni vėjo elektrinių kiekiai. Tokių generatorių tiesioginis prijungimas prie elektros tinklo yra komplikotas, kadangi pučiamo vėjo nepastovumas neužtikrina stabilaus rotoriaus sukimosi greičio. Ši priežastis vėjo elektrinėms neleidžia veikti sinchroninių generatorių režimu, o tai neprisideda prie bendros sistemos inercijos didėjimo. Tuo tikslu, vėjo elektrinės prie tinklo yra prijungiamos skirtingomis schemomis, kuriomis rotoriumi sukantis kintamu greičiu suteikiama galimybę atiduoti generuojamą galią į sistemą. Dėl rotoriaus greičio sukimosi skirtumų elektrinės išskiriamos į fiksuoto ir kintamo greičio generatorius, kurios labiausiai paplitusios sistemoje yra kintamo greičio. Tokio tipo elektrinėmis pasiekiamas didesnis mechaninės jėgos efektyvumas, turbinas veikia mažesni mechaniniai įtempiai bei sukuriama mažesnis akustinis triukšmas [25]. Vėjo elektrinės skirstomos į keturis tipus[1]:

1. fiksuoto greičio asinchroninis narvelinis generatorius (žr. 13 pav. a);
2. kintamo greičio asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi (žr. 13 pav. b);
3. kintamo greičio pilnai konvertuojamas asinchroninis narvelinis generatorius (žr. 13 pav. c);
4. kintamo greičio pilnai konvertuojamas sinchroninis generatorius (žr. 13 pav. d).



13 pav. Vėjo elektrinių tipai [1]

1.3.2. Vėjo elektrinių valdymo galimybės slopinant galios švytavimą

Vėjo elektrinės prijungtos prie tinklo skirtingomis schemomis turi nevienodas valdymo galimybes slopinti atsirandančius galios švytavimo procesus. Tai riboja elektrinių greitaveika, kuri tiesiogiai priklauso nuo generatorių struktūros ir valdymo algoritmų.

Fiksuoto greičio asinchroninis narvelinis generatorius turi mažiausiai valdymo galimybių nei kiti vėjo elektrinių tipai. Šio tipo generatorius yra tiesiogiai prijungtas prie tinklo neturint jokie fizinio atskyrimo nuo sistemos. Vėjo elektrinė turi galimybę slopinti atsirandančius galios švytavimus reguliuojant menčių pasukimo kampą (angl. *pitch angle*). Kintantis menčių kampas vėjo elektrinėje didina arba mažina liečiamą oro srauto kiekį į generatoriaus sparnus. Tai lemia mechaninio sukimo momento padidėjimą arba sumažėjimą, kuriuo valdoma generatoriaus generuojama galia. Tačiau tokios vėjo elektrinės valdymas galios švytavimo metu yra per daug lėtas ir tokio tipo generatoriaus slopinimas nėra efektyvus. Tuo tikslu, papildomai sistemoje integruojami statiniai sinchroniniai kompensatoriai (angl. „*STATCOM*“), kurie greičiau padeda grąžinti sinchroninius generatorius į stabilų darbo režimą [1, 26].

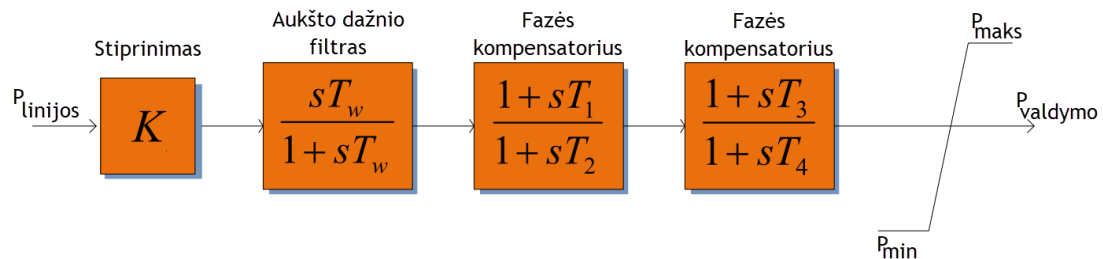
Kintamo greičio asinchroniniui generatoriui su faziniu rotoriumi prijungimui prie sistemos naudojamas dalinis galios keitiklis. Šis keitiklis išskiriamas į du atskirus valdiklius, kurių vienas tiesiogiai prijungiamas prie elektros tinklo, o kitas prie rotoriaus slydimo žiedų. Dėl šios priežasties šie valdikliai vadinami tinklo ir rotoriaus pusės keitikliais. Šio tipo generatoriumi galios švytavimas gali būti slopinimas integruojant POD valdiklį į skirtingų keitiklių valdymo schemas. Pagrindinė POD valdiklio funkcija skirta suteikti nepriklausomą aktyviosios ir reaktyviosios galios moduliavimą asinchroniniam generatoriui, kuris padėtų sumažinti skirtingų sinchroninių generatorių aktyviosios galios pokytį. Tokio valdiklio integravimas sistemose leidžia pastebėti geresnį švytavimo slopinimo efektą nei sinchroninių generatorių PSS valdikliai [27, 28]

Kintamo greičio pilnai konvertuojami generatoriai vis labiau populiarėja sistemoje. Dėl griežtėjančių elektros tinklo operatorių reikalavimų didinti sistemos stabilumą, tokio tipo vėjo elektrinės būdamos pilnai atskirtos nuo sistemos gali greitai ir efektyviai būti valdomos. Sistemoje esant aktyviosios galios švytavimui, tokio tipo elektrinėmis slopinimas galimas keičiant galios faktoriaus koeficientus pilnos konversijos keitikliuose [29, 30].

1.3.3. POD valdiklis

Elektros sistemos stabilumo didinimui skirtingose įrenginiuose naudojami papildomi valdikliai, kurie pagerina įrenginių atsaką į tinkle vykstančius trikdžius. Dažniausiai papildomai integruojami valdikliai sinchroniniuose generatoriuose yra PSS valdikliai, o FACTS, vėjo ar saulės elektrinėse – POD valdikliai. Šių valdiklių blokinė schema yra vienoda (žr. 14 pav.), tačiau matuojamos vertės valdiklio įėjime ir atiduodami signalai išėjime yra skirtingi [31].

Sinchroniniuose generatoriuose PSS valdikliai diegiami automatinųjų įtampos reguliatorių schemose, o vėjo, saulės ar FACTS įrenginiuose – aktyviosios arba reaktyviosios galios valdymo algoritmuose [32].



14 pav. POD valdiklio blokinė schema [33]

POD valdiklio schemoje (žr. 14 pav.) galima matyti, kad šis įrenginys sudarytas iš keturių funkcinių blokų. Valdiklio įėjime matuojama linijos galia, kuri jungia atskirus sinchroninius generatorius, sinchroninių generatorių grupes ar skirtingų regionų tarp sistemines jungtis. Šių blokų fizinė prasmė valdymo sistemoje yra [31]:

1. stiprinimo blokas – tai blokas, skirtas nustatyti generatoriaus slopinimo kiekį;
2. aukšto dažnio filtro blokas – tai blokas, skirtas apriboti lėtus ir nusistovėjusius galios pokyčius laike;
3. fazės kompensatoriaus blokas – tai blokas, skirtas paankstinti valdymo signalą reguliatoriams, kuriais būtų kompensuota valdymo sistemos delsa.

Šių blokų jungimas nuosekliai leidžia nustatyti generatoriaus reakcijos stiprį į tinkle vykstančius galios švytavimus, eliminuoti nusistovėjusias galios vertes bei kompensuoti generatorių reguliatorių delną. Valdiklis yra aktyvus tik pereinamojo proceso metu, kuomet sistemoje vyksta galios pokytis tarp dviejų generatorių ar sistemų sričių. Kuomet sistema veikia nusistovėjusiame darbo režime, valdiklis yra neveiksnus ir poveikio generatoriaus valdymui neturi.

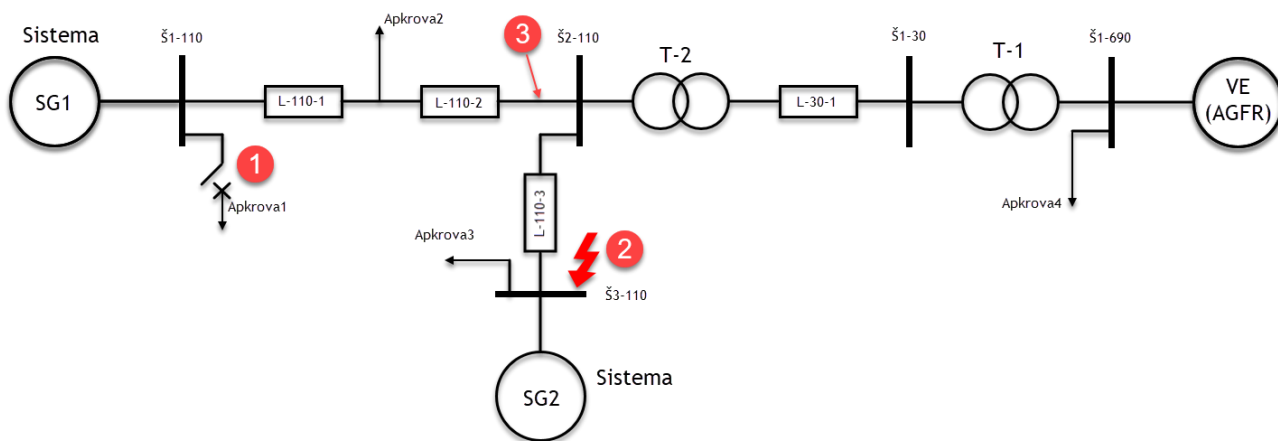
2. Metodologinė dalis

2.1. Programinė įranga

Atlikus literatūros šaltinių analizę bus vykdomas modeliavimo bandymas, kuriuo metu sukuriamas matematinis modelis galios švytavimo procesui tirti. Tyrimo atlikimui naudojama *MATLAB* programine įranga su integruotu *Simulink* paketu. *Simulink* pasižymi vartotojui draugišku naudojimu ir paprastumu, kadangi programa matematinius modelius perteikia grafine blokine schema, kuri supaprastina sudėtingos sistemos kūrimą bei supratimą. Šiame pakete galima rasti skirtingas bibliotekas pritaikytas automatikai, robotikai, aviacijai, transportui, hidraulikai ar energetikai. Energetikos skiltyje yra pateikiami elektros sistemos komponentai, tokie kaip sinchroniniai ir asinchroniniai generatoriai, greičio ir įtampos reguliatoriai, aukštos įtampos nuolatinės srovės keitikliai, vėjo elektrinių modeliai, transformatoriai, perdavimo linijos, apkrovos, linijų jungtuvai bei matavimo prietaisai. Būtent toks pagrindinių elektros sistemos elementų pasirinkimas ir grafinis modeliavimas suteikia galimybę atlikti sudėtingą sistemos tyrimą ir analizę.

2.2. Tyrimo schema

Tyrimo atlikimui sukuriamas modelis, kuriuo išbandomas elektros sistemos galios švytavimas ir galios švytavimo slopinimo galimybės naudojant POD valdiklį asinchroniniame generatoriuje (žr. 15 pav.). Tinklo konfigūracija sudaroma atsižvelgiant į galimybę iširti skirtingus elektros sistemos režimus bei leisti detaliai išanalizuoti tinkle esančius įrenginius. Sukurtas modelis *Simulink* aplinkoje pateikiamas priede (žr. 1 priedą).



15 pav. Principinė tyrimo schema

Tyrimo schema sudaryta iš dviejų sinchroninių generatorių prijungtų prie aukštos įtampos perdavimo tinklo ir vienos vėjo elektrinės, kurios tipas asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi. Tinklo modelyje randasi trys 110 kV skirtingo ilgio perdavimo oro linijos bei viena trumpa 30 kV oro linija tarp dviejų aukštinančiųjų transformatorių. Šios oro linijos schemoje vaizduojamos kaip varžos. Schemoje numatytos keturios apkrovos, kurios pažymėtos juodomis rodyklėmis. Taip pat sistemoje numatomas jungtuvas, kuris prijungtas prie 1 apkrovos (žr. 15 pav. – žyma 1). Šio jungtuvo pagalba bus tiriama vienas iš tinklo režimų, kurio metu vyks apkrovos atjungimas ir prijungimas prie sistemos.

2.3. Tiriamos schemos režimai

Valdant ir kontroliuojant elektros sistemą susiduriama su daug skirtingų darbo režimų. Ruošiantis planiniams remonto ar eksploataciniams darbams galima numatyti pereinamuosius procesus sistemai, tačiau tinkle susiduriama ir su neplanuotais gedimais ar atsijungimais. Siekiant nustatyti ar asinchroniniame generatoriuje integruotas POD valdiklis sugeba prisitaikyti ir tiktai skirtingiems tinklo režimams, tyrimo metu bus naudojamos dvi schemos. Bandymo režimai pateikiami lentelėje (žr. 2 lentelę).

2 lentelė. Tiriamos schemos režimai

Tyrimo schema	Schemos pavadinimas	Galios švytavimo atsiradimo priežastis
1	Apkrovos atsijungimas be POD valdiklio	1 apkrovos atsijungimas 700 ms
	Apkrovos atsijungimas su POD valdikliu	1 apkrovos atsijungimas 700 ms
2	Trumpasis jungimas be POD valdiklio	Trifazis trumpasis jungimas ant SG2 šynų 500 ms
	Trumpasis jungimas su POD valdikliu	Trifazis trumpasis jungimas ant SG2 šynų 500 ms

Pirmąją schemą bus tiriama galios švytavimo atsiradimas ir galimas vėjo elektrinės slopinimas, kuomet trumpą laiką tarpą sistema praranda apkrovą. Modeliavimo metu, 150 sekunde nuo simuliacijos pradžios, tinkle atjungiamas pirmoji apkrova (žr. 15 pav. – žyma 1) ir praėjus 700 ms tarpui vėl prijungiamas. Pirmuoju bandymu tikrinamas ir nustatomas galios švytavimo atsiradimas bei priežastis, o antruoju, stebimas sinchroninių generatorių galios švytavimo slopinimas kintant asinchroninio generatoriaus POD valdiklio stiprinimo koeficientui.

Antrojoje schemoje keičiasi režimo pobūdis ir vieta (žr. 15 pav. – žyma 2). Nuo simuliacijos pradžios, ties 150 sekunde, atliekamas trifazis trumpasis jungimas su žeme ant antrojo sinchroninio generatoriaus šynų. Trumpasis jungimas trunka 500 ms, o po šio laiko gedimas pašalinamas. Atstačius schemą, nustatomas galios švytavimo atsiradimo priežastis ir dydis. Paskutinio bandymo metu, naudojant tuos pačius POD valdiklio stiprinimo koeficientus kaip ir pirmojoje schemoje, analizuojamas sinchroninių generatorių galios švytavimo slopinimas.

2.4. Tiriamos schemos parametrai

Atliekant galios švytavimo stebėseną ir tyrimą, modeliavimo metu būtina atkartoti tikrą elektros sistemos kitimo dinamiką ir elgseną. Galios srautų pasikeitimas tarpusavyje galimas tik tarp dviejų kinetinę energiją kaupiančių įrenginių, todėl šioje schemoje bus naudojami du sinchroniniai generatoriai, kurie tyrimo eigoje bus išvedami iš nusistovėjusio darbo režimo.

Pagrindinis šių generatorių skirtumas yra antrojo sinchroninio generatoriaus veikimo režimas. Abu sinchroniniai generatoriai atkuria elektros sistemos dinamiką ir prisitaiko prie tinkle vykstančių pokyčių sumažindami arba padidindami generuojamą galią. Tyrimo schemoje užduodant norimus perduodamos galios srautus, antrame sinchroniniame generatoriuje fiksuojamas pastovus generacijos dydis, kurį generatorius stengiasi palaikyti normaliu darbo režimu. Tai leidžia tiriamojoje schemoje išlaikyti norimą galios srauto perdavimą į apkrovų sritis. Pagrindiniai generatorių parametrai pateikiami lentelėje (žr. 3 lentelę).

3 lentelė. Sinchroninių generatorių parametrai

Generatorius	Parametras	Parametro vertė
SG1	Vardinė galia	120 MVA
	Įtampa	110 kV
	Inercijos konstanta	3,1 s
SG2	Vardinė galia	50 MVA
	Nustatyta generuojama galia	30 MVA
	Įtampa	110 kV
	Inercijos konstanta	6 s

Modelyje prie tinklo prijungta vėjo elektrinė, kuri schemoje žymima VE. Šiame tyrime tai bus pagrindinis įrenginys, kuriuo bus valdomas ir slopinamas sinchroninių generatorių sukeltas galios švytavimas. Vėjo elektrinės vardiniai ir kiti pagrindiniai aktualūs parametrai pateikiami lentelėje (žr. 4 lentelę).

4 lentelė. Vėjo elektrinės parametrai

Parametras	Parametro vertė
Elektrinės tipas	Asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi
Vardinė galia	15 MVA
Įtampa	690 V
Dažnis	50 Hz
Inercijos konstanta	5,3 s
Didžiausios elektrinės galios pasiekimo greitis	12 m/s
Pučiamas vėjo greitis	13 m/s

Vėjo elektrinės prijungimas prie perdavimo tinklo sumodeliuotas per du aukštinančiuosius galios transformatorius. Pirmasis transformatorius aukština įtampa iš 690 V į 30 kV, antrasis – iš 30 kV į 110 kV tinklo įtampą. Pagrindiniai transformatorių parametrai pateikiami lentelėje (žr. 5 lentelę).

5 lentelė. Transformatorių parametrai

Transformatorius	Parametras	Parametro vertė
T-1	Nominali galia	25 MVA
	Žemosios pusės įtampa	690 V
	Aukštosios pusės įtampa	30 kV
T-2	Nominali galia	100 MVA
	Žemosios pusės įtampa	30 kV
	Aukštosios pusės įtampa	110 kV

Tinklo schemoje taip pat numatytos ir keturios linijos. Siekiant palengvinti sistemos modelį, visų linijų techniniai parametrai išlieka vienodi, tačiau užduodami skirtingi linijų ilgiai. Elektros linijų duomenys pateikiami lentelėje (žr. 6 lentelę).

6 lentelė. Elektros linijų parametrai

Parametras	Parametro vertė
Aktyvioji varža	0,189 Ω /km
Talpa	12,74 nF/km
Induktyvumas	0,93 mH/km
L-100-1 ilgis	140 km
L-100-2 ilgis	150 km
L-100-3 ilgis	31 km
L-30-1 ilgis	0,5 km

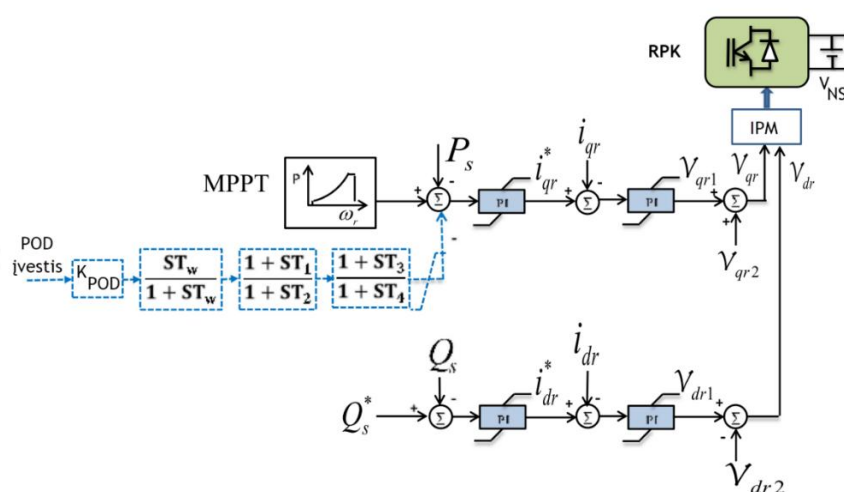
Prie modeliujamo tinklo prijungiamos keturios apkrovos. Trys iš jų numatytos 110 kV įtampos perdavimo tinkle ir viena apkrova vėjo elektrinės 690 V įtampos pusėje. Šių apkrovų dydžiai pateikiami lentelėje (žr. 7 lentelę).

7 lentelė. Apkrovų parametrai

Apkrova	Parametro vertė
Apkrova1	20 MW
Apkrova2	60 MW
Apkrova3	20 MW
Apkrova4	400 kW

2.5. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi POD valdiklis

Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi POD valdiklis, kaip išnagrinėta 1.3.3 skyriuje, yra įdiegiamas į aktyviosios arba reaktyviosios galios valdymo algoritmą. Tai nulemiama parametru, kurį norima stabilizuoti tinkle. AGFR galios regulatoriaus principinė schema pateikiama paveiksle (žr. 16 pav.), o detali blokinė schema *Simulink* aplinkoje, pridedama priede (žr. 2 priedą).



16 pav. AGFR galios valdiklio blokinė schema su integruotu POD valdikliu [34]

Iš aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymo schemas (žr. 16 pav.) galima matyti, kad generatorius yra valdomas d - q atskaitinėje sistemoje. D - q transformacija asinchroniniui generatoriui reikalinga dėl

reguliacijos specifika, kuri generatorių valdo vektoriniu būdu. Vėjo elektrinėje d - q ašimis palaikoma aktyvioji ir reaktyvioji generatoriaus galia, kurioje skersinė q ašis atsakinga už aktyviąją galią, o tiesioginė d ašis – už generuojamą arba vartojamą reaktyviąją galią [19, 35].

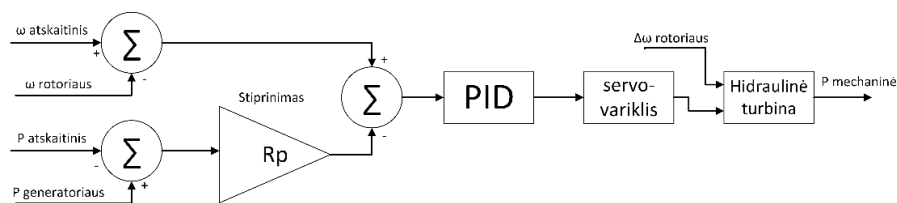
Schemoje žymimas MPPT blokas perteikia vėjo elektrinės valdymo algoritmą, kuriuo reguliuojama generatoriaus galia pagal rotoriaus sukimosi greitį. Tai yra standartinis generatoriaus valdymas, kuriuo metu vėjo elektrinė, nereaguodama į tinkle vykstančius pokyčius, keičia savo atiduodamą galią tik pagal rotoriaus sukimosi greitį. Ši galia yra prilyginama atskaitinei galiai, kurią generatorius turi pasiekti statoriuje. Schemoje žymėjimas P_s perteikia generatoriaus statoriuje generuojamą galią, kuri matuojama kiekvienu laiko momentu. Kuomet atskaitinė galia yra lygi statoriuje sugeneruotai galiai, sumavimo bloke valdymo signalas tampa nulinis. Tai lemia vėjo elektrinės stabilų generavimą nereaguojant į tinkle kintančius parametrus. Tam tikslui, kad vėjo elektrinė pradėtų reaguoti į tinkle kintančius pokyčius, į sumavimo bloką prijungiamas POD valdiklis. Toks valdymo algoritmo praplėtimas leidžia asinchroniniam generatoriui dalyvauti galios mainuose vykstant sinchroninių generatorių galios švytavimui.

POD valdiklio įėjime į stiprinimo koeficientą yra įvedamas galios matavimas. Šis galios matavimas atliekamas tarp dviejų sinchroninių generatorių sričių (žr. 15 pav. – žyma 3). Kuomet sistema yra nusistovėjusi ir jokie galios srautų pokyčiai tarp dviejų generatorių nevyksta, valdiklio įvestyje matuojama reikšmė nepatenka į aktyviosios galios reguliatoriaus schemą. Tai nutinka dėl aukšto dažnio filtro, kuris nepraleidžia nusistovėjusių signalų į generatoriaus valdymo algoritmą. Šis valdiklis aktyvuojamas tik tuo metu, kuomet sistemoje pradeda kisti galia ir atsiranda galios pokytis tarp dviejų sinchroninių generatorių sričių. Tokiu išoriniu signalu aktyvuojamas vėjo elektrinės galios valdymas, kurio rotoriaus pusės keitiklio pagalba pradeda valdyti asinchroninio generatoriaus galia.

2.6. Sinchroninio generatoriaus greičio reguliatorius

Sinchroninio generatoriaus greičio reguliatorius yra tiesiogiai susietas su aktyviosios galios švytavimu. Reguliatoriaus būdamas lėtas, avarijos ar pereinamojo proceso metu, gali didelės inercijos turintį generatorių išvesti iš stabilaus darbo režimo ir sukelti aktyviosios galios srautų pasikeitimą tarp skirtingų sistemos sričių. Šis įrenginys taip pat negali būti ir per daug greitas, nes jautrus reagavimas į tinkle vykstančius pokyčius gali turėti įtakos nestabiliai ir nepastoviai generacijai.

Tiriamosiose schemose sinchroniniams generatoriams naudojamas hidraulinės turbinos greičio reguliatorius modelis. Tokio tipo reguliatorius vandens tėkmę paverčia mechanine energija, kuri sukurtą mechaninę jėgą perduoda sinchroninio generatoriaus rotoriumi. Hidraulinės turbinos greičio reguliatoriaus valdymo struktūrinė schema pateikiama žemiau (žr. 17 pav.)

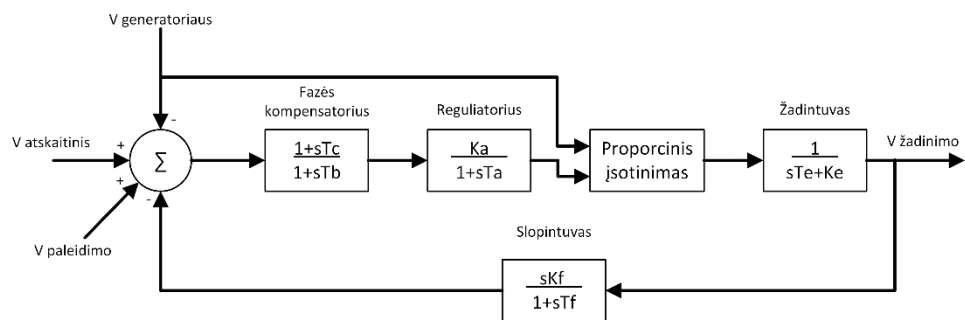


17 pav. Hidraulinės turbinos greičio reguliatoriaus blokinė valdymo schema

Hidraulinės turbinos greičio reguliatorius sudarytas iš stiprinimo koeficiento R_p , PID valdiklio, servo variklio bei hidraulinės turbinos modelio. Įvestyje reguliatorius stebi generatoriaus rotoriaus kampinį greitį, kampinio greičio skirtumą bei atiduodamą elektrinę galią. Išvestyje sugeneruota mechaninė galia perduodama į sinchroninio generatoriaus rotorių.

2.7. Sinchroninio generatoriaus įtampos reguliatorius

Sinchroninio generatoriaus įtampos reguliatorius taip pat svarbus įrenginys užtikrinantis sklandų ir tinkamą generatoriaus darbą. Šis reguliatorius palaiko reikalingą generatoriaus gnybtų įtampą, kuri tiesiogiai susijusi su generatoriaus atiduodama elektros galia. Netinkami valdiklio parametrai, pereinamojo proceso metu, gali įtakoti generatoriaus nekorektišką veikimą bei sukelti kitų sistemoje veikiančių sinchroninių generatorių galios švytavimo atsiradimą. Sinchroninio generatoriaus įtampos reguliatoriaus struktūrinė schema pateikiama žemiau (žr. 18 pav.).



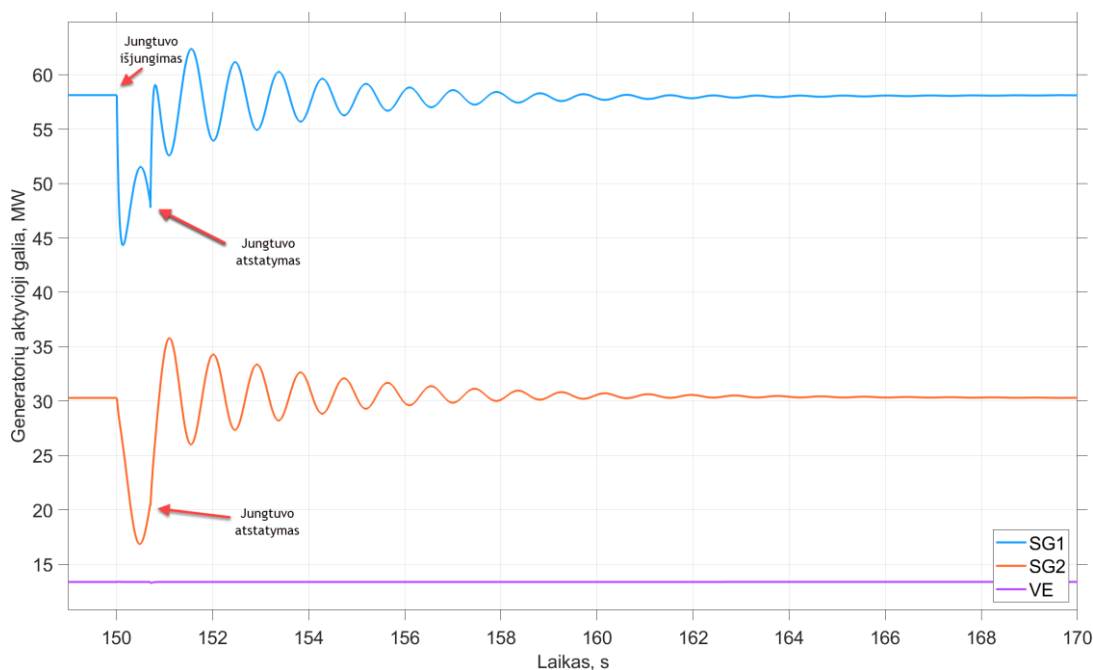
18 pav. Sinchroninio generatoriaus įtampos reguliatoriaus blokinė valdymo schema

Įtampos reguliatorius valdiklis sudarytas iš įtampos matavimo ir įtampos reguliatoriaus vidinių nustatymų įvesčių, fazės kompensatoriaus, reguliatoriaus, proporcinio įsotinimo valdiklio, žadintuvo ir slopintuvo. Regulatoriaus išvestyje atiduoda žadinimo įtampą sinchroniniam generatoriui.

3. Tiriamoji dalis

3.1. Apkrovos atsijungimas be POD valdiklio

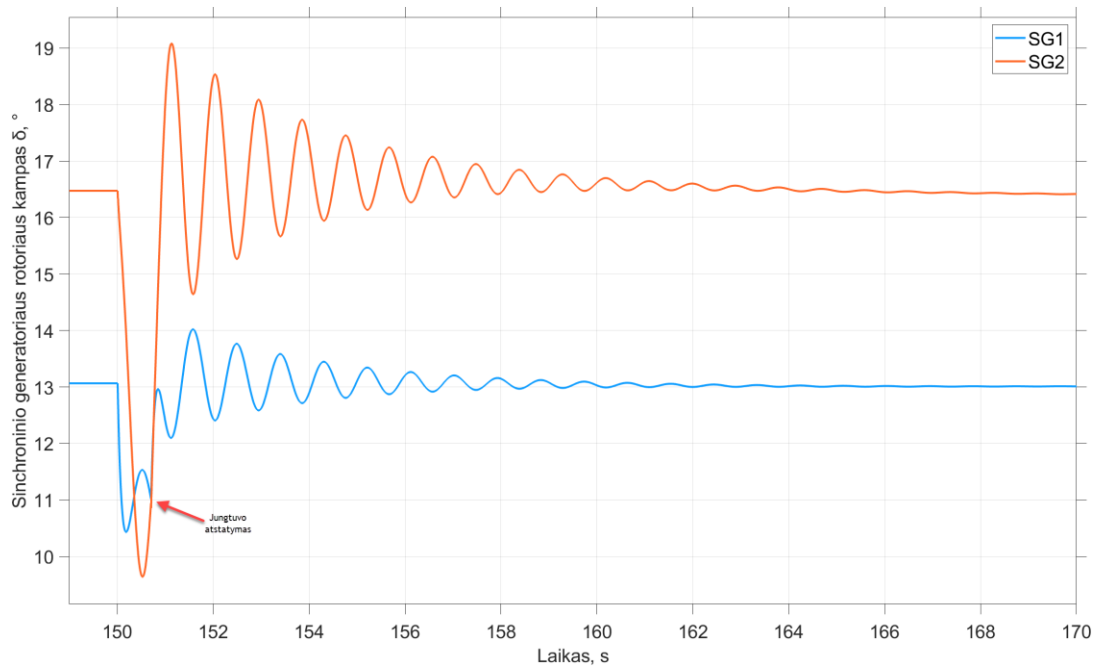
Pirmoji tyrimo schema atliekama siekiant įvertinti kaip elektros tinkle esantys generatoriai reaguoja į trumpalaikį apkrovos atsijungimą. Sistemoje veikia visi trys generatoriai, bendra tinklo apkrova iki 150 sekundžių yra 100,4 MW. Pasiekus šią laiko žymę, jungtuvo pagalba atjungiami pirmoji 20 MW apkrova (žr. 15 pav.). Po 700 ms jungtuvas įjungiamas ir atstatomas pirminis galios poreikis. Generatorių aktyviųjų galių grafikai laike pateikiami paveiksle (žr. 19 pav.).



19 pav. Generatorių aktyviosios galios kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo

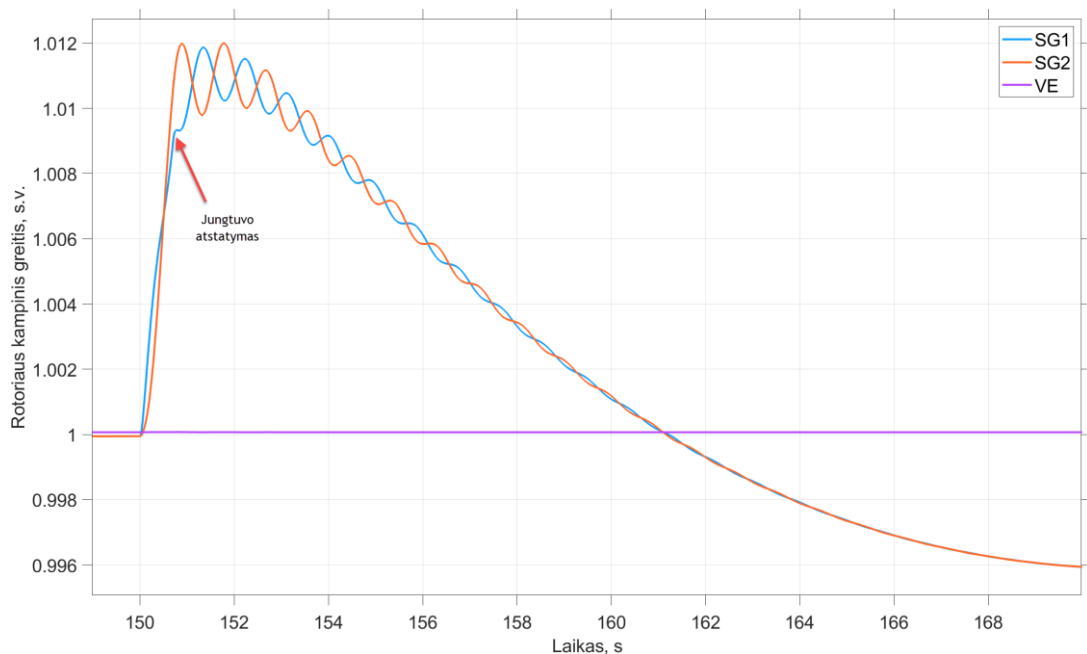
Iš pateiktų kreivių (žr. 19 pav.) galima matyti, kad atsijungus pirmajai apkrovai abu sinchroniniai generatoriai susimažina generuojamą galią su tikslu išlaikyti būtiną galios balansą tarp generacijos ir suvartojimo. Pirmasis generatorius galią pakeičia nuo 58,08 MW iki 44,28 MW per 130 ms ir vėliau pradeda ją nestipriai reguliuoti, o antrasis mažinasi nuo 30,3 MW iki 16,85 MW per 500 ms ir tik tuomet pradeda ją didinti. Kaip aprašyta metodologinėje dalyje, antrasis generatorius palaiko pastovų generacijos lygį nepriklausant nuo esamos tinklo konfigūracijos. Tai matoma ir kreivėje, kurioje 150,5 sekunde generatorius pradeda didintis galią ir siekia savo nustatytos reikšmės. Po jungtuvo atjungimo praėjus 700 ms ir generatoriams nespėjus nusistovėti į naują balanso tašką, apkrova vėl įjungiamą sugrąžindama pirminį galios poreikį. Matomas abiejų generatorių galios kreivių padidėjimas ir galios švytavimo atsiradimas. Vėjo elektrinė viso bandymo metu lieka pastovioje generacijoje ir švytavimo procese nedalyvauja.

Siekiant įsitikinti, kad modelis sukurtas korektiškai ir švytavimas atsiranda dėl sinchroninių generatorių valdymo delsos ir rotoriaus kampo δ kitimo, pagrindiniai generatorių parametrai pateikiame paveiksluose (žr. 20 pav., 21 pav., 22 pav.).



20 pav. Sinchroninių generatorių rotorų kampo δ kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo

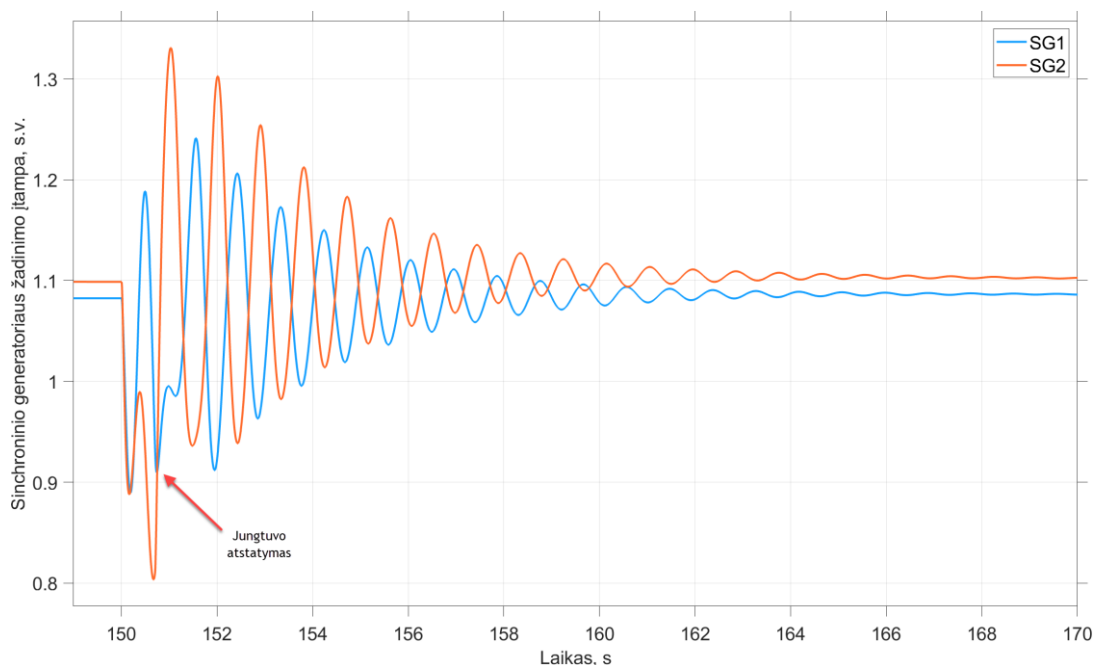
Sinchroninių generatorių rotorų kampo δ kreivėse (žr. 20 pav.) matomas sinchroniškas švytavimas aktyviosios galios kreivės (žr. 19 pav.) atžvilgiu. Remiantis literatūroje išnagrinėta generatoriaus elektrinės galios formule (žr. 8 formulę) bei švytavimo metu kintančiais parametrai, šios vertės kitimas turi tiesioginį poveikį generuojamos galios dydžiui ir yra priklausomi nuo greičio bei įtampos reguliatorių valdymo.



21 pav. Generatorių rotoriaus kampinio greičio kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo

Tinkle veikiančių sinchroninių generatorių rotoriaus greitis atsijungus apkrovai pradeda didėti (žr. 21 pav.) o vėjo elektrinės išlieka pastovi. Sistemoje sumažėjus apkrovai, greičio reguliatorius turi sumažinti atiduodamą mechaninę galią generatoriui, taip išlygindamas mechaninės ir elektrinės jėgos

santykį. Šio bandymo metu rotoriai nepradeda lėtėti iki apkrovos atstatymo ir reaguoja tik ties 150,75 sekunde, kuomet apkrova jau yra prijungta. Paveiksle galima matyti, kad rotorijų greičių švytavimas tarpusavyje yra sinchroniškas aktyvios galios kreivių (žr.20 pav.) atžvilgiu, tačiau nuslopsta greičiau. Didžiausias rotorijų greičių išsiskyrimas viso švytavimo metu yra 0,002 s.v., todėl toks mažas greičių skirtumas negali sukelti galios švytavimo proceso tarp dviejų sinchroninių generatorių sričių.



22 pav. Sinchroninių generatorių žadinimo įtampos kreivės po trumpalaikio apkrovos atjungimo

Sinchroninių generatorių žadinimo kreivėse (žr. 22 pav.) galima matyti, kad nuo tinklo atsijungus apkrovai, įtampos reguliatorius žadinimo įtampą pradeda reguliuoti žaibiškai. Pirmojo ir antrojo generatoriaus įtampos korekcijos matomos jau po 170 ms. Jungtuvui atstačius apkrovą grafikuose išryškėja reguliatorių sukeltas švytavimas, kuris lygiagrečiai matomas ir aktyviosios galios kreivėse (žr. 19 pav.). Šių atsiradusių švytavimų trukmė trunka vienodą laiko tarpą, todėl galima teigti, kad aktyviosios galios švytavimas tarp generatorių yra sukeltas dviejų įtampos reguliatorių.

Siekiant įvertinti vėjo elektrinės galimybes slopinti sinchroninių generatorių galios švytavimą yra apsibrėžiami pagrindiniai atskaitiniai parametrai, kuriais bus lyginamos naujos reikšmės integravus POD valdiklį. Tolimesniam tyrimui bus matuojamas švytavimo laikas, aktyviosios galios amplitudinės vertės bei žadinimo įtampa. Visos šios vertės matuojamos nuo 150,7 sekundės, kuomet atstatoma pirminė schema. Atskaitiniai parametrai pateikiami lentelėje (žr. 8 lentelę).

8 lentelė. Atskaitiniai parametrai apkrovos atjungimo schemeje

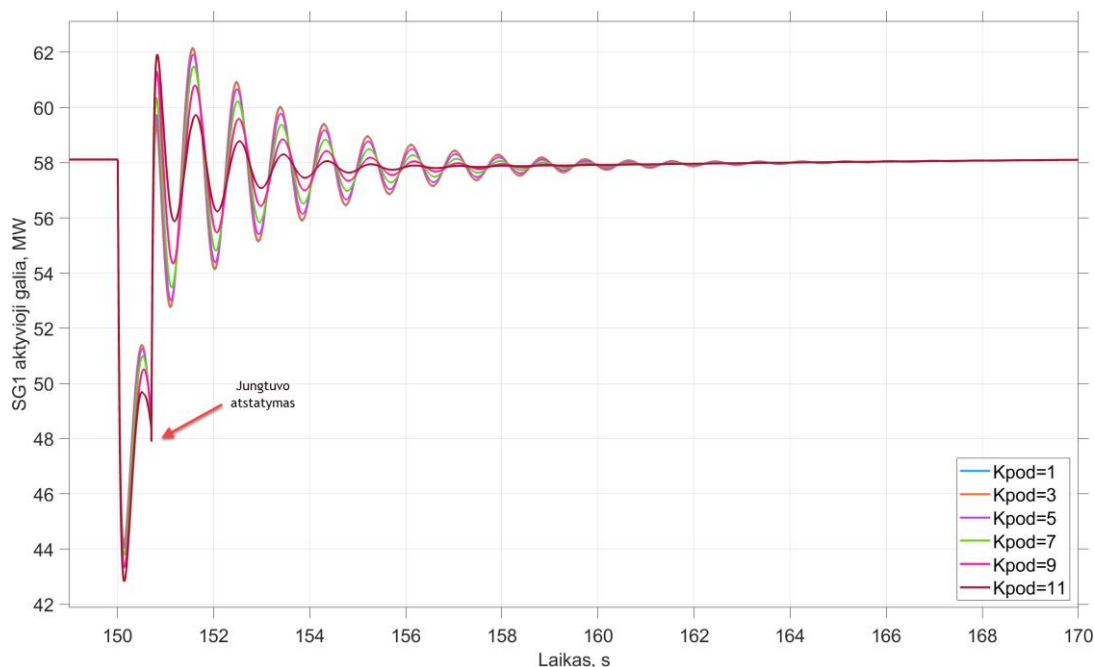
Parametras	Generatorius		
	SG1	SG2	VE
Generuojama galia iki apkrovos atjungimo, MW	58,11	30,26	13,36
Aukščiausia galios vertė švytavimo metu, MW	62,40	35,78	13,36
Žemiausia galios vertė švytavimo metu, MW	52,56	26,01	13,36
Aukščiausia SG žadinimo įtampa švytavimo metu, s.v.	1,241	1,330	-
Žemiausia SG žadinimo įtampa švytavimo metu, s.v.	0,912	0,936	-

Parametras	Generatorius		
	SG1	SG2	VE
Galios švytavimo trukmė, s	16,75	16,41	0

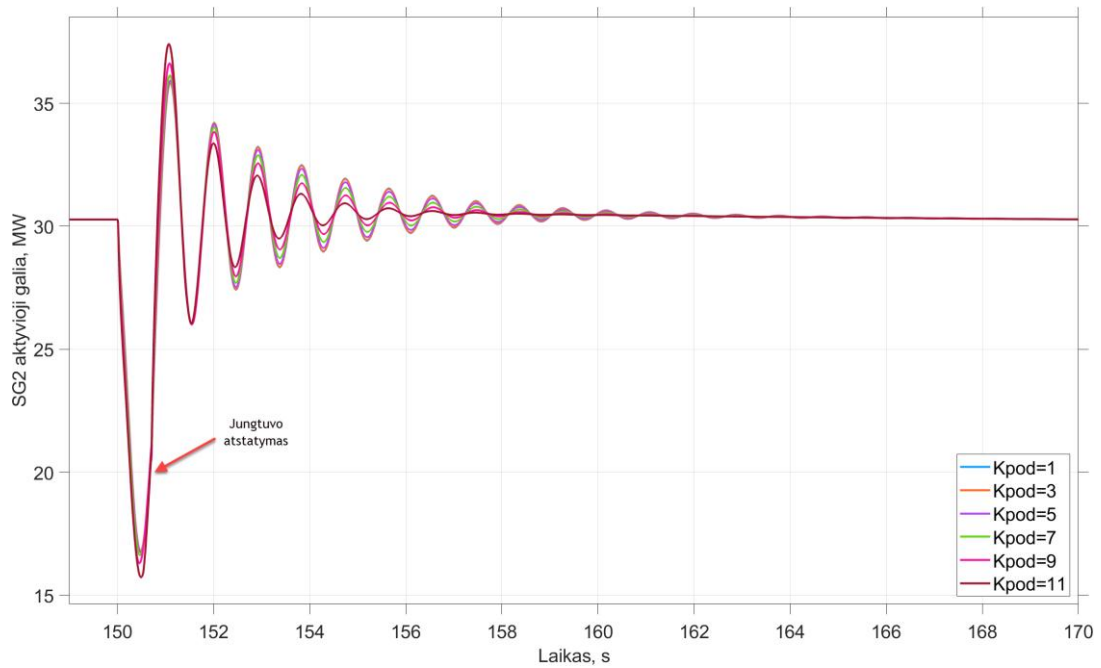
3.2. Apkrovos atsijungimas su POD valdikliu

Antruoju bandymu į asinchroninių generatorių integruojamas POD valdiklis, kuris aprašomas metodologinėje dalyje (žr. 2.5 skyrių). Modeliavimo metu, siekiant nustatyti POD valdiklio galimybes, tam tikru žingsniu didinamas stiprinimo K_{POD} koeficientas ir stebimas sistemos atsakas. Atlikus simuliacijas su skirtingomis POD valdiklio reikšmėmis, analizuojamas vėjo elektrinės poveikis pagrindiniams sinchroninių generatorių parametrams.

Maksimalus leistinas stiprinimo koeficientas modeliavimo metu pasiekiamas $K_{POD} = 11$. Viršijus šį parametą, modelis tampa nestabilus ir negali nusistovėti į pastovų darbo režimą. Dėl šios priežasties maksimali tikrinama stiprinimo koeficiento vertė yra 11.

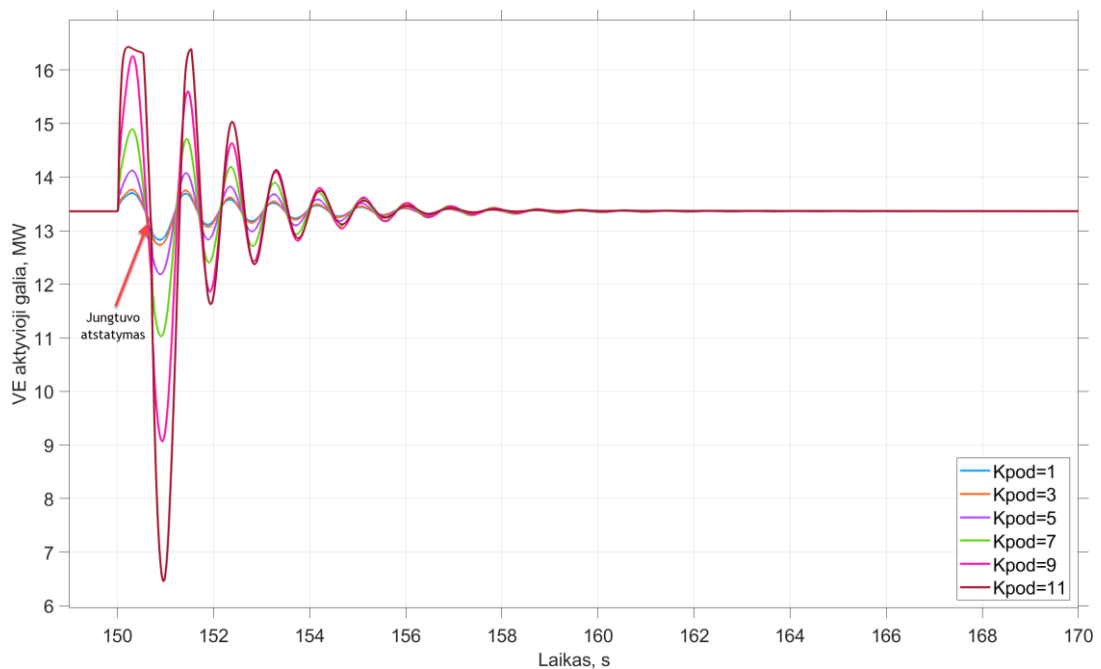


23 pav. SG1 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje



24 pav. SG2 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje

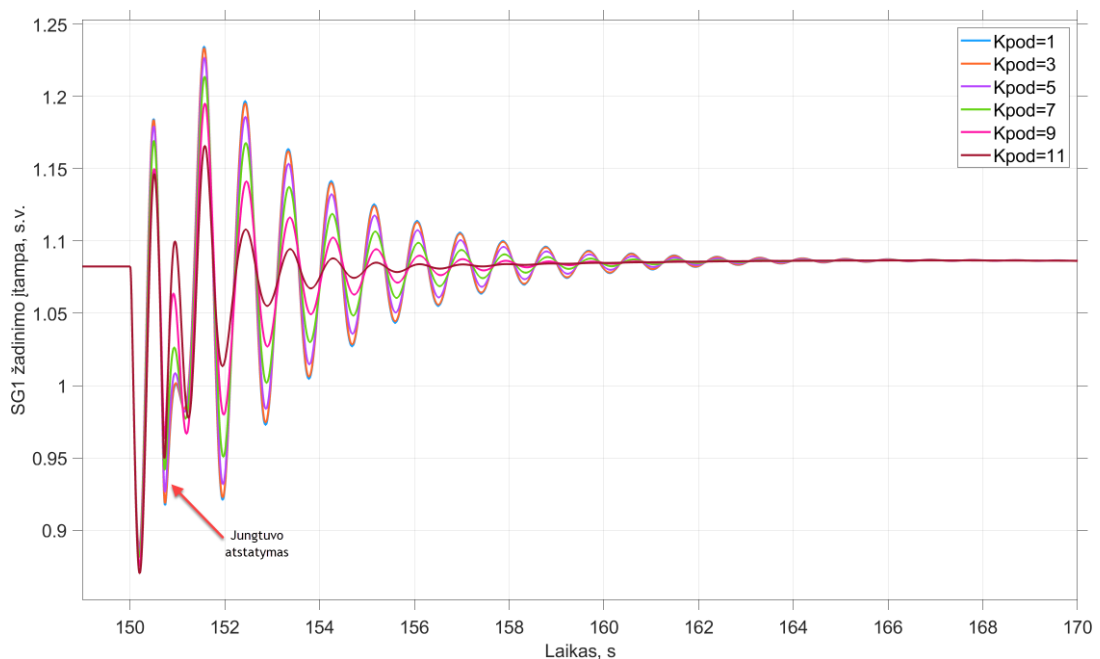
Iš pirmojo ir antrojo generatorių aktyviųjų galių kreivių (žr. 23 pav. ir 24 pav.) galima matyti, kad didėjant AGFR POD valdiklio stiprinimo koeficientui, sinchroninių generatorių galių išsiskyrimas tarp aukščiausios ir žemiausios išmatuotos vertės mažėja. Tai nepasireiškia tik pirmiesiems periodams, kuomet jungtuvas yra išjungiamas arba įjungiamas. Įjungimo ir išjungimo metu pirmieji švytavimai yra didesni. Kreivėse išryškėja ir švytavimo laikas, kuris pradeda trumpėti prie didesnio stiprinimo koeficiento. Pagrindiniai išmatuoti parametrai reikalingi analizės atlikimui pateikiami lentelėje (žr. 9 lentelę).



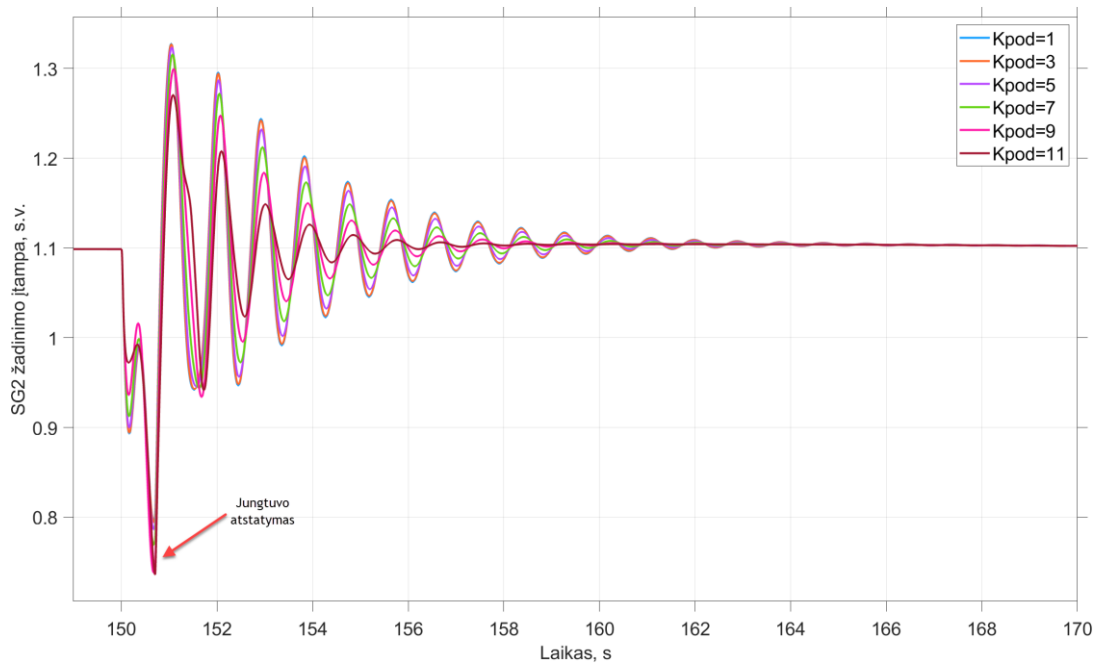
25 pav. VE aktyviosios galios kreivės su skirtingais POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje

Asinchroninio generatoriaus galios kreivėse (žr. 25 pav.) matomas švytavimo proceso atsiradimas. Pirmojo bandymo metu, kuomet POD valdiklis buvo išjungtas, galios srautų pasikeitimas tarp dviejų sinchroninių generatorių sričių vėjo elektrinei įtakos neturėjo ir į asinchroninis generatorius generavo pastovią galią (žr. 19 pav.). Tačiau grafike matomas vėjo elektrinės generuojamos galios reguliavimas, kuris atsiranda dėl tiesiogiai prijungto išorinio galios pokyčio matavimo prie asinchroninio generatoriaus galios regulatoriaus schemos (žr. 16 pav.). AGFR galios regulatoriaus ir POD valdiklio valdymas aprašytas metodologinėje dalyje (žr. 2.5 skyrių).

Vėjo elektrinė veikia priešingai antrojo generatoriaus galios švytavimo atžvilgiu. Kuomet antrasis generatorius didinasi galią ir savo srautą perduoda į pirmojo generatoriaus sritį, vėjo elektrinė mažina savo atiduodamą galią, taip stengdamasi sumažinti galios pokytį tarp dviejų sinchroninių generatorių sričių (žr. 15 pav. – žyma 3). Tokiu pat veikimo algoritmu valdiklis veikia ir į priešingą pusę, kuomet antrojo generatoriaus generuojama galia mažėja, vėjo elektrinė galią didinasi. Pateiktame paveiksle matoma (žr. 25 pav.), kad didėjant POD stiprinimo koeficientui, galios reguliavimas tampa stipresnis bei švytavimo laikas trumpesnis. Vėjo elektrinės galios amplitudės ir laiko matavimai pateikiami lentelėje (žr. 9 lentelę).



26 pav. SG1 žadinimo įtampos kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje



27 pav. SG2 žadinimo įtampos kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais apkrovos atjungimo schemoje

Sistemoje veikiančių sinchroninių generatorių žadinimo įtampos vertės pateikiamos paveiksluose (žr. 26 pav., 27 pav.). Šiuose grafikuose išryškėja vėjo elektrinės įtaka sinchroninių generatorių įtampos reguliatoriams, kurie tampa stabilesni prie didesnio POD valdiklio koeficientų. Didėjant POD stiprinimui, matomas žadinimo įtampos amplitudės išsiskyrimo mažėjimas tarp aukščiausios ir žemiausios vertės bei švytavimo laiko sutrumpėjimas. Tokia pati kitimo tendencija buvo matoma ir aktyviosios galios kreivėse su AGFR integruotu POD valdikliu (žr. 23 pav., 24 pav.). Išmatuotos kreivių vertės pateikiamos lentelėje (žr. 9 lentelę).

9 lentelė. Apkrovos atjungimo schemas matavimo rezultatai

Parametras	Stiprinimo koeficientas K_{POD}	Generatorius		
		SG1	SG2	VE
Aukščiausia generatoriaus galios vertė švytavimo metu, MW	0 (atskaitinis)	62,40	35,78	13,36
	1	62,16	35,84	13,69
	3	62,12	35,85	13,75
	5	61,90	35,93	14,08
	7	61,49	36,14	14,71
	9	61,30	36,63	15,60
	11	61,92	37,42	16,40
Žemiausia generatoriaus galios vertė švytavimo metu, MW	0 (atskaitinis)	52,56	26,01	13,36
	1	52,76	26,01	12,83
	3	52,8	26,01	12,73
	5	53,01	26,01	12,19
	7	53,48	26,01	11,03
	9	53,34	26,00	9,07

Parametras	Stiprinimo koeficientas K_{POD}	Generatorius		
		SG1	SG2	VE
	11	55,88	26,03	6,46
Aukščiausia SG žadinimo įtampa švytavimo metu, s.v.	0 (atskaitinis)	1,241	1,330	-
	1	1,235	1,328	-
	3	1,233	1,327	-
	5	1,227	1,324	-
	7	1,214	1,316	-
	9	1,195	1,300	-
	11	1,166	1,271	-
Žemiausia SG žadinimo įtampa švytavimo metu, s.v.	0 (atskaitinis)	0,912	0,936	-
	1	0,921	0,942	-
	3	0,923	0,943	-
	5	0,932	0,946	-
	7	0,951	0,943	-
	9	0,980	0,934	-
	11	0,978	0,941	-
Galios švytavimo trukmė, s	0 (atskaitinis)	16,75	16,41	0
	1	16,07	16,02	16,35
	3	15,91	15,97	15,85
	5	15,40	15,12	15,37
	7	13,67	13,86	13,72
	9	11,64	11,22	11,32
	11	7,14	6,98	6,73

Atlikus modeliavimą, kuriuo metu sistemoje trumpą laiko tarpą buvo atjungta apkrova, matomas vėjo elektrinės daromas poveikis sistemai ir joje esantiems sinchroniniams generatoriams. Iki apkrovos atjungimo, SG1 generuojama galia buvo 58,11 MW, SG2 30,26 MW, VE 13,36 MW. Tinkle veikiant asinchroniniui generatoriui be papildomai integruoto POD valdiklio, vėjo elektrinė pereinamajame procese nedalyvavo. Didžiausios užfiksuotos aktyviosios galios amplitudės švytavimo metu buvo SG1 62,40 MW, SG2 35,78 MW. Mažiausios išmatuotos vertės SG1 52,56 MW, SG2 26,01 MW. Šių generatorių galios skirtumas tarp aukščiausios ir žemiausios išmatuotos vertės yra SG1 9,84 MW, SG2 9,77 MW. Bendras švytavimo laikas nuo apkrovos įjungimo truko 17 sekundžių, o pagrindinė švytavimo atsiradimo priežastis – sinchroninių generatorių įtampos reguliatoriai.

Vėjo elektrinėje atsiradus POD valdikliui, sparčiausias sinchroninių generatorių švytavimo slopimas vyko prie $K_{POD} = 11$. Šį valdiklį prijungus prie AGFR galios reguliatoriaus schemas, didžiausia SG1 išmatuota reikšmė 61,92 MW, SG2 37,42 MW. Žemiausios fiksuotos vertės SG1 55,88 MW, SG2 26,03 MW. Skirtumas tarp maksimalių ir minimalių amplitudinių verčių SG1 6,04 MW, SG2 11,39 MW, o švytavimo laikas 6,73 sekundės.

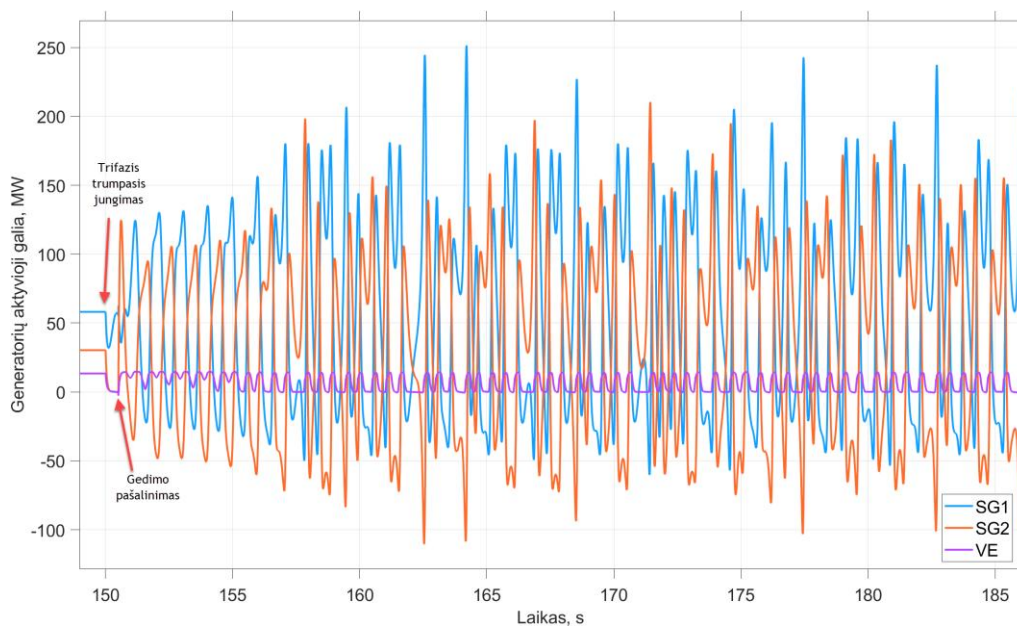
Gautuose rezultatuose matomas SG1 galios išsiskyrimo sumažėjimas nuo 9,84 MW iki 6,04 MW, o SG2 padidėjimas nuo 9,77 MW iki 11,39 MW. Kaip apžvelgta vėjo elektrinės aktyviosios galios

kreivėse su POD valdikliu (žr. 25 pav.), asinchroninis generatorius pereinamojo proceso metu taip pat pradeda švytuoti. VE švytavimas yra priešingas SG2 švytavimui, todėl galia, kuri perduodama tarp sinchroninių generatorių sričių (žr. 15 pav. – žyma 3) yra mažesnė. Aukščiausia VE pasiekiamą galia 13,36 MW, o žemiausia 6,46 MW. Suminė SG2 ir VE galia aukščiausiam taške 43,88 MW, mažiausia 39,39 MW. Toks galių pasiskirstymas tarp dviejų generatorių sumažina bendros perduodamos galios amplitudės išsiskyrimą į SG1 sritį iki 4,49 MW.

Atlikus pirmosios schemos tyrimą matoma, kad sinchroninio generatoriaus galios švytavimus galima slopinti į asinchroninį generatorių integravus POD valdiklį. POD valdiklis lemia trūkstamos arba reikiamos galios pateikimą į tinklą pereinamojo proceso metu, taip palengvindamas sinchroninių generatorių įtampos reguliatorių darbą.

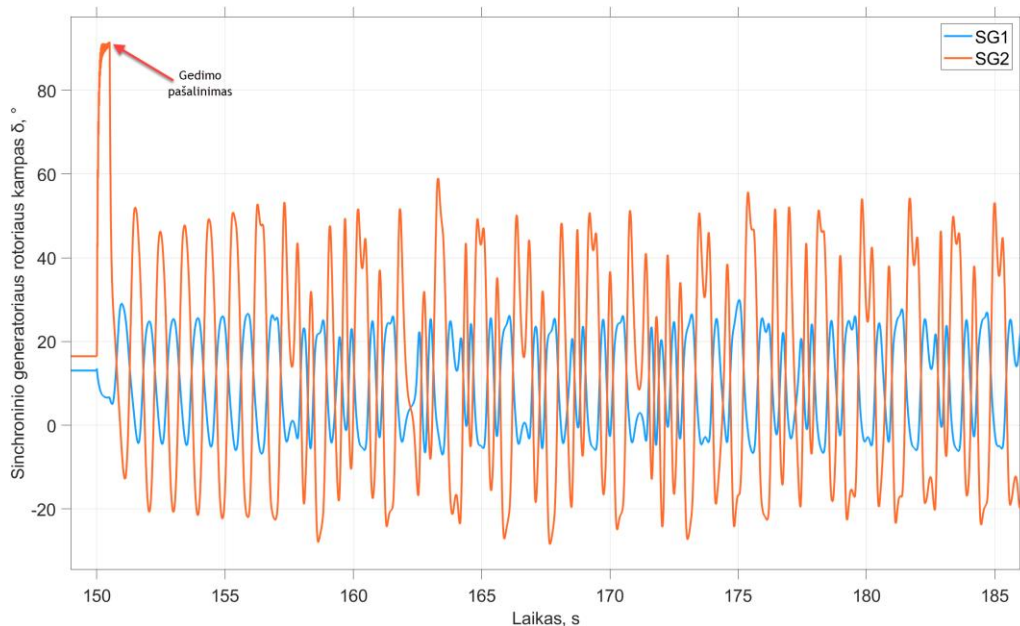
3.3. Trumpasis jungimas be POD valdiklio

Antrojoje schemoje pirmuoju bandymu nustatomas galios švytavimo dydis, kuomet sistemoje įvyksta trifazis trumpasis jungimas su žeme ant antrojo sinchroninio generatoriaus šynų (žr. 15 pav. – žyma 2). Tokia gedimo vieta antrajam generatoriui neleidžia perduoti generuojamos galios į sistemą, kol avarija nebus likviduota. Modeliavimo metu trumpasis jungimas pradedamas 150 sekunde ir pašalinamas po 500 ms laiko tarpo. Generatorių aktyviosios galios kreivės pateikiamos paveiksle (žr. 28 pav.).



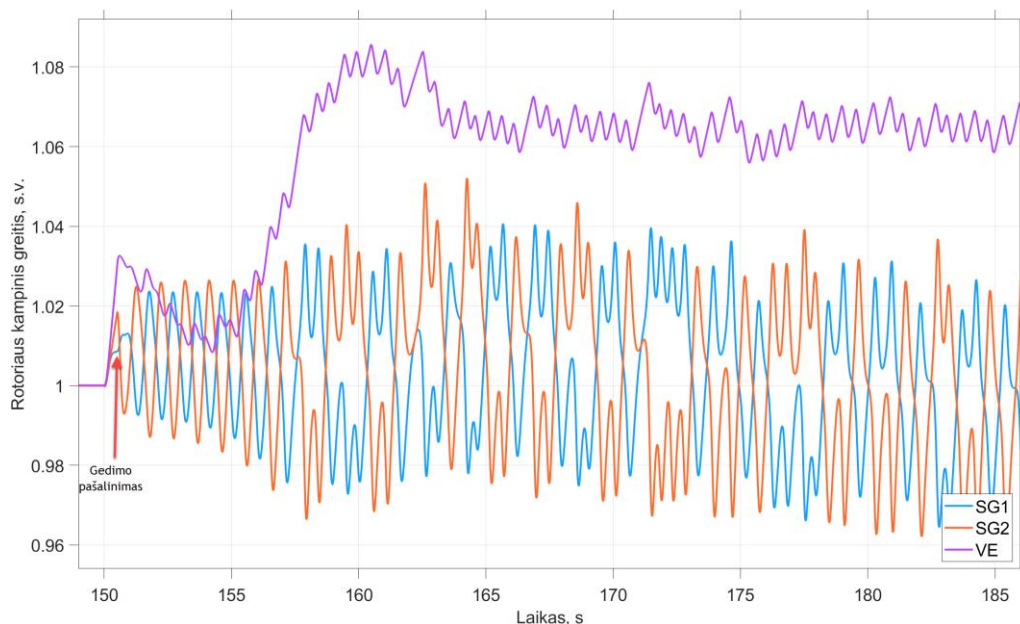
28 pav. Generatorių aktyviosios galios kreivės trumpojo jungimo schemoje

Iš pateikto grafiko (žr. 28 pav.) matoma, kad įvykus trumpajam jungimui, antrojo generatoriaus ir vėjo elektrinės galia krenta iki nulines vertės. Tai rodo, kad šie du generatoriai gedimo metu nebesugeba tiekti galios į tinklą. Pirmojo generatoriaus galia pradžioje krenta, tačiau greitai pradeda valdyti įtampos ir greičio reguliatoriaus pagalba. Pašalinus gedimą, tinkle atsistato visų generatorių veikimas, tačiau atsiranda galios srautų pasikeitimas tarp dviejų sinchroninių generatorių sričių. Vėjo elektrinės generacija tampa taip pat nepastovi, kuri tam tikru laiko momentu susimąžina atiduodama galia iki nulinės vertės. Sistemoje atsiradęs galios švytavimas po trifazio trumpojo jungimo yra nestabilus.



29 pav. Sinchroninių generatorių rotorų kampo δ kreivės trumpojo jungimo schemoje

Paveiksle matomas (žr. 29 pav.) sinchroninių generatorių rotorų kampo δ kreivės, kurios išryškina generatorių švytavimo procesą. Trumpojo jungimo metu, antrasis sinchroninis generatorius didinasi rotoriaus kampą iki 90 laipsnių. Tai yra maksimalus kampas, prie kurio generatorius atiduoda didžiausią elektrinę galią (žr. 8 formulę). Tačiau kaip apžvelgta anksčiau, generatorius į tinklą neatiduoda jokios generacijos, nes trumpojo jungimo metu įtamos potencialas šynose yra nulinis. Pašalinus gedimą, matomas rotorų kampo δ švytavimas tarp dviejų generatorių sričių. Šis švytavimas yra sinchroniškas aktyviosios galios kreivės atžvilgiu (žr. 28 pav.).

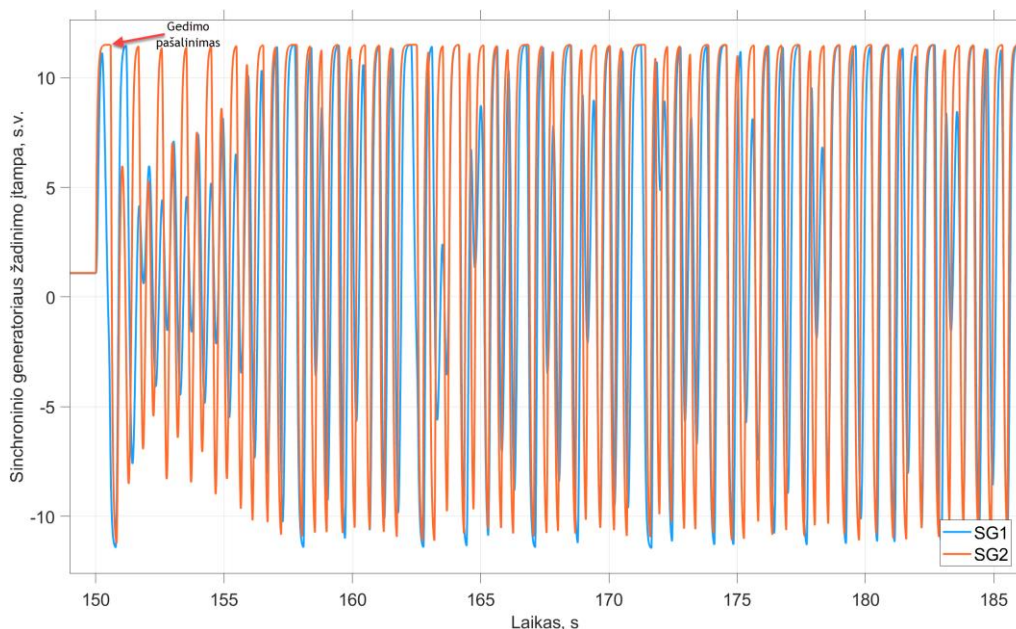


30 pav. Generatorių rotoriaus kampinio greičio kreivės trumpojo jungimo schemoje

Pateiktame paveiksle matoma, kad gedimo metu visų generatorių rotorų greičiai didėja (žr. 30 pav.). Įvykus trumpajam jungimui su žeme ant antrojo sinchroninio generatoriaus šynų, visoje sistemoje

sumažėja įtampa. Synchroniniams generatoriams įtampos sumažėjimas lemia elektrinės galios praradimą, kuriuo metu atsiranda skirtumas tarp elektrinio ir mechaninio sukimo momento jėgų. Elektrinės galios praradimo metu mechaninė sukimo momento jėga tampa stipresnė už elektrinę, kas sąlygoja synchroninių generatorių rotorius greičio didėjimą. Vėjo elektrinės generuojama galia avarijos metu, kaip ir antrojo generatorius, pradiniu laiko momentu pasiekia nulinę vertę. Nebesukuriamas magnetinis laukas rotorius apvijose ir sumažėjusi tinklo įtampa, neleidžia sukurti elektrinės jėgos, kuri prilaikytų generatoriaus rotorius tinklo atžvilgiu. Tuo atveju vėjo kuriama mechaninė jėga pradeda didinti asinchroninio generatoriaus rotorius sukimąsi.

Grafike matomas priešingas synchroninių generatorių rotorius greičio kitimas, kurio gedimo pradžioje išsiskyrimas tarp rotorius greičių siekia 0,033 s.v. Didžiausias generatorius greičių skirtumas užfiksuotas 0,068 s.v. Vėjo elektrinės greitis po avariniu metu taip pat kinta, tačiau sparčiausiai pradeda didėti nuo 156 sekundės. Dėl padidėjusio asinchroninio generatoriaus rotorius sukimosi greičio, aktyviosios galios kreivėse (žr. 28 pav.) matomas tam tikrais laiko momentais vėjo elektrinės galios praradimas, kuriais vėjo elektrinė nebegeneruoja aktyviosios galios.



31 pav. Synchroninių generatorių žadinimo įtampos kreivės trumpojo jungimo schemeje

Synchroninių generatorių žadinimo kreivėse (žr. 31 pav.) matomas stiprus įtampos reguliatorių valdymas, kadangi žadinimo įtampos švytavimo metu pasiekia reguliatorių minimalias ir maksimalias ribų vertes. Gedimo pradžioje, kuomet tinkle dėl trumpojo jungimo sumažėja įtampa, synchroninių generatorių įtampos reguliatoriai bandydami kompensuoti sumažėjusią generatoriaus gnybtų įtampa, didina savo žadinimo vertes. Antrojo generatoriaus, kuris laikomas užtrumpintas, žadinimas laikomas maksimalus iki gedimo pabaigos. Pirmasis generatorius per 500 ms laiko tarpą pradeda ieškoti tinkamos vertės, tačiau gedimo trukmė yra per trumpa ir gedimas pašalinamas greičiau nei randamas tinkamas reguliatoriaus darbo taškas.

Synchroninių generatorių žadinimo valdymas po avariniu metu yra daug dažnesnis nei aktyviosios galios pokytis laike. Abiejų įtampos reguliatorių žadinimas yra toje pačioje fazėje ir nekinta vienas kito atžvilgiu. Toks reguliatoriaus poveikis generatoriaus gnybtų įtampai gali įtakoti švytavimo atsiradimą, tačiau anksčiau apžvelgtos aktyviosios galios (žr. 28 pav.) ir rotorius greičio (žr. 30 pav.)

kreivės leidžia nustatyti, kad švytavimas yra sukeliamas sinchroninių generatorių greičio reguliatorių delsa. Įtampos reguliatorių įtaka matoma fiksuojant tam tikrais laiko momentais aukščiausias ir žemiausias aktyviosios galios vertes laike (žr. 28 pav.).

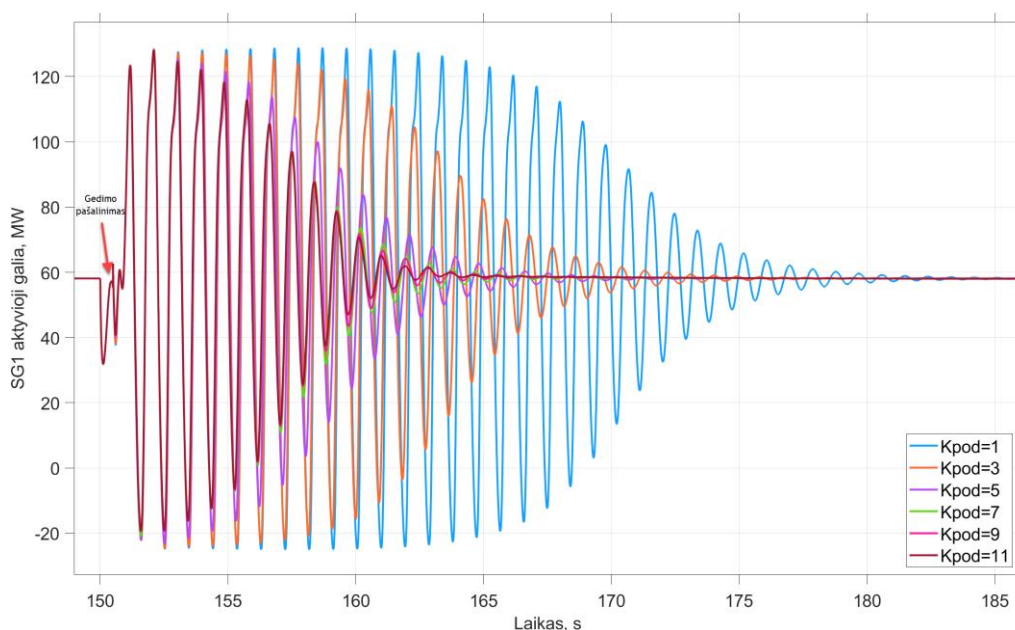
Antrosios schemos pagrindiniai lyginamieji parametrai, kurie bus naudojami tolimesniam tyrimui ir POD valdiklio įtakos vertinimui, pateikiami lentelėje (žr. 10 lentelę).

10 lentelė. Atskaitiniai parametrai trumpojo jungimo schemoje

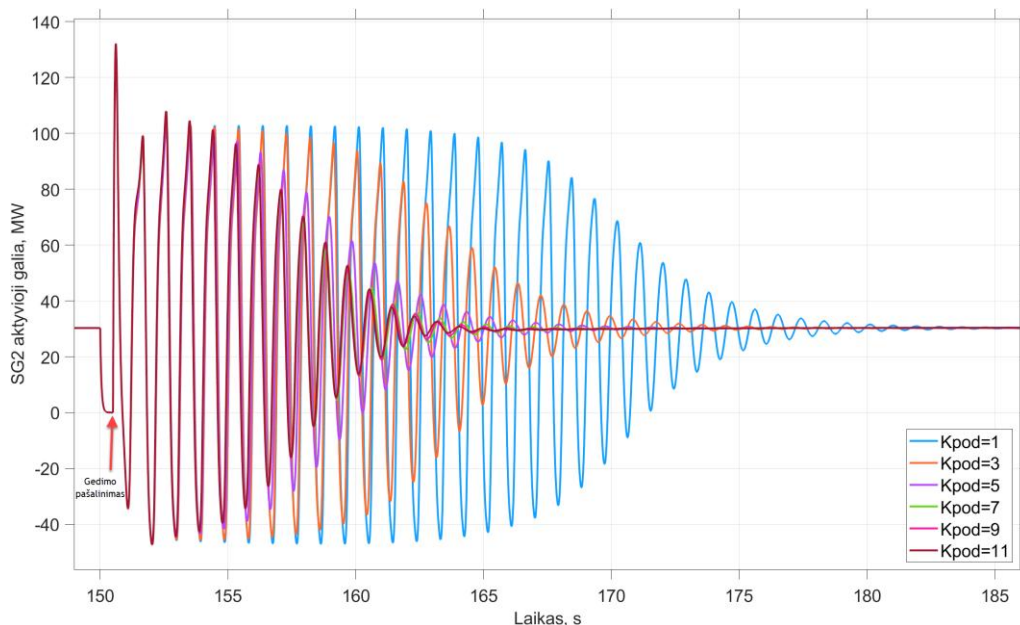
Parametras	Generatorius		
	SG1	SG2	VE
Generuojama galia iki apkrovos atjungimo, MW	58,11	30,26	13,36
Aukščiausia galios vertė švytavimo metu, MW	251,45	210,35	14,51
Žemiausia galios vertė švytavimo metu, MW	-60	-110,50	0
Didžiausias rotoriaus kampinis greitis švytavimo metu, s.v.	1,041	1,052	1,086
Mažiausias rotoriaus kampinis greitis švytavimo metu, s.v.	0,966	0,960	1,008
Galios švytavimo trukmė, s	neslopstantis	neslopstantis	neslopstantis

3.4. Trumpasis jungimas su POD valdikliu

Paskutiniam bandymui į vėjo elektrinę integruojamas POD valdiklis, kuris buvo naudojamas ankstesnėje schemoje. Siekiant įvertinti POD valdiklio pritaikomumą skirtingiems darbo režimams, bandymo metu naudojami tokie patys stiprinimo koeficientai.

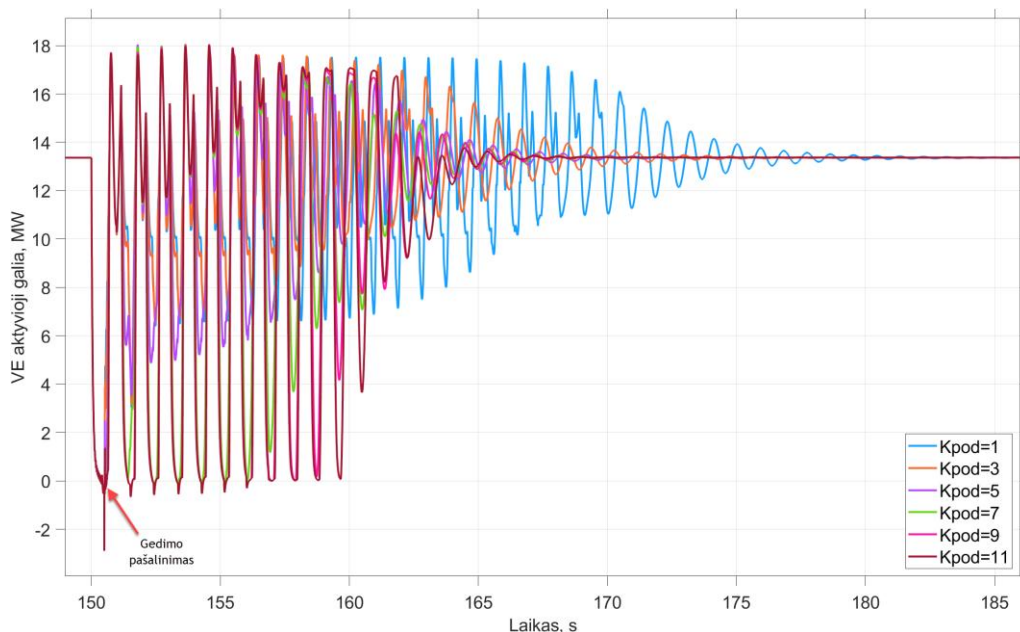


32 pav. SG1 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje



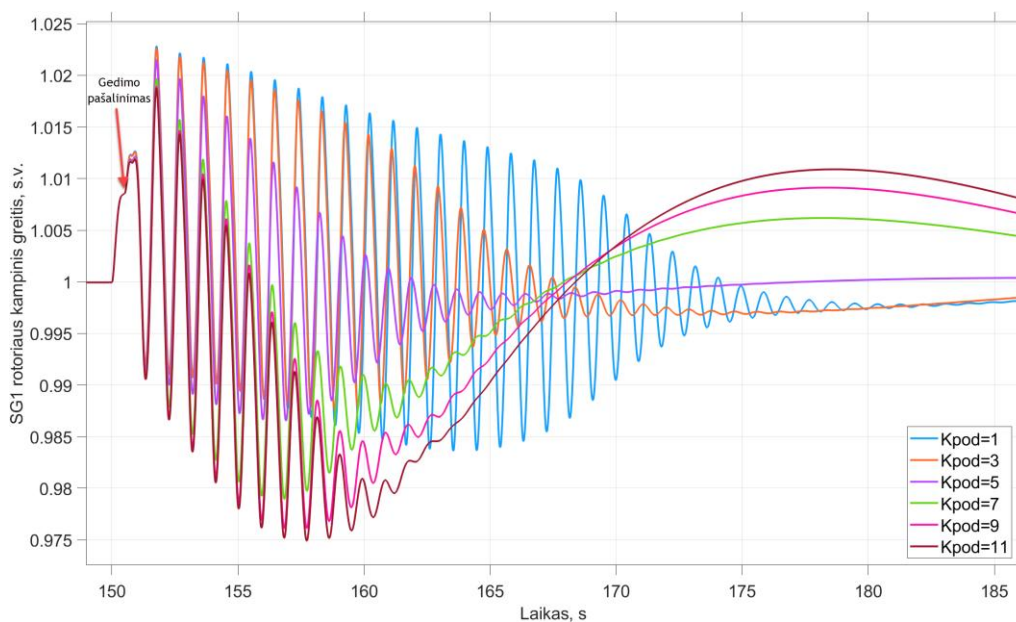
33 pav. SG2 aktyviosios galios kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje

Aktyviųjų galių kreivėse (žr. 32 pav., 33 pav.) matomas vėjo elektrinės poveikis sistemai, kuomet AGFR turi integruotą POD valdiklį. Vėjo elektrinė su silpniausiu POD stiprinimo koeficientu padeda sistemos generatorius sugrįžti į stabilumą per 34,91 sekundes. Didėjant stiprinimo koeficientui švytavimo laikas trumpėja, tačiau matomas POD valdiklio įsisotinimas, kuriuo metu švytavimo laikas beveik nebetrumpėja. Koeficientui būnant didesniai nei $K_{POD} = 7$, švytavimo laikas yra praktiškai vienodas. Švytavimo pradžioje, nepriklausant nuo stiprinimo koeficiento dydžio, pirmieji periodai iki 155 sekundės yra identiški ir sutampa su atiduodama galia kuri buvo iki POD valdiklio įjungimo. (žr. 28 pav.).

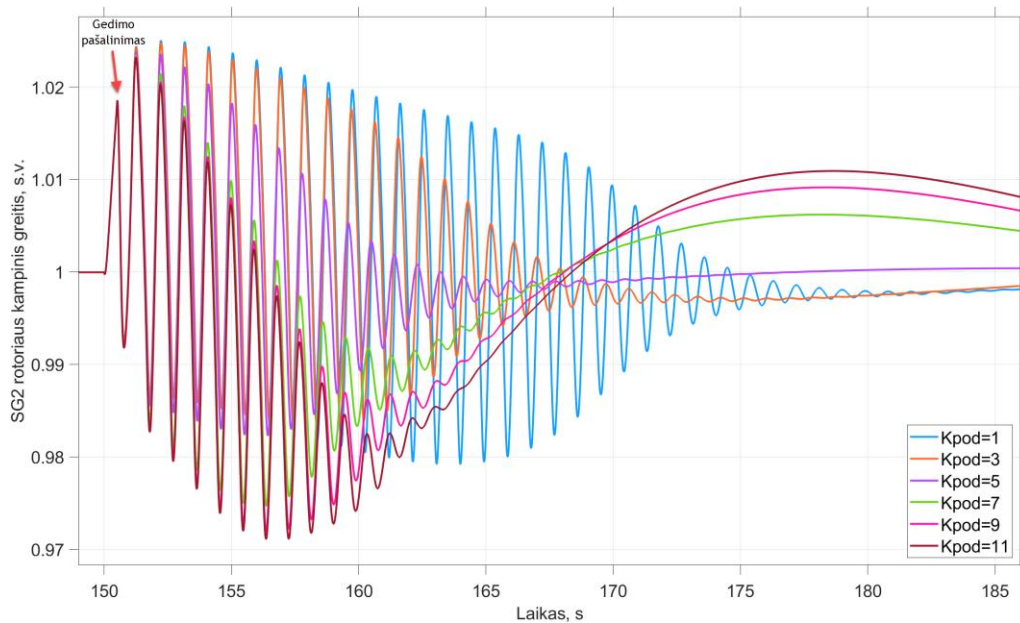


34 pav. VE aktyviosios galios kreivės su skirtingais POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje

Vėjo elektrinės aktyviosios galios grafike (žr. 34 pav.) matomas ryškus kreivių išsiskyrimas tarp skirtingų POD valdiklio stiprinimo koeficientų. Prieš švytavimo pradžią, kaip ir be POD valdiklio, asinchroninis generatorius trumpojo jungimo metu nesugeba perduoti galios į sistemą ir galia yra lygi nuliui. Avarijai dingus, generuojama galia padidėja iki 17,68 MW, kuomet generatoriui neturint POD valdiklio, galia buvo atstatoma tik iki 14,60 MW. Švytavimo metu didžiausia vėjo elektrinės pasiekiamą galia, nepriklausant nuo POD valdiklio stiprinimo koeficiento, yra arti 18 MW, tačiau mažiausios reikšmės fiksuojamos skirtingos. Asinchroniniui generatoriui naudojant silpniausią stiprinimą $K_{POD} = 1$, vėjo elektrinė švytavimo metu generuoja galią neatsijungdama nuo tinklo. Šis generatoriaus švytavimas laike yra mažėjantis ir nuslopstantis per 35,06 sekundes. Tokiu pačiu laiku nuslopinamas ir sinchroninių generatorių aktyviosios galios švytavimas (žr. 32 pav., 33 pav.). Didėjant stiprinimo koeficientui matomas vėjo elektrinės žemutinės vertės mažėjimas, kuris prie didžiausių stiprinimų pasiekia nulinę reikšmę. Tai rodo, kad generatorius yra tam tikrais laiko momentais atjungiamas nuo tinklo. Vėjo elektrinės galios reguliavimas yra toks pat kaip anksčiau atliktame bandyme. Kuomet antrasis sinchroninis generatorius atiduoda galią į pirmojo generatoriaus sritį, vėjo elektrinė mažinasi savo generuojamą galią, o vykstant priešingam srauto tekėjimui, galią didinasi. Greičiausias sinchroninių generatorių švytavimo slopinimas įvyksta prie didžiausio stiprinimo koeficiento per 16,94 sekundžių.

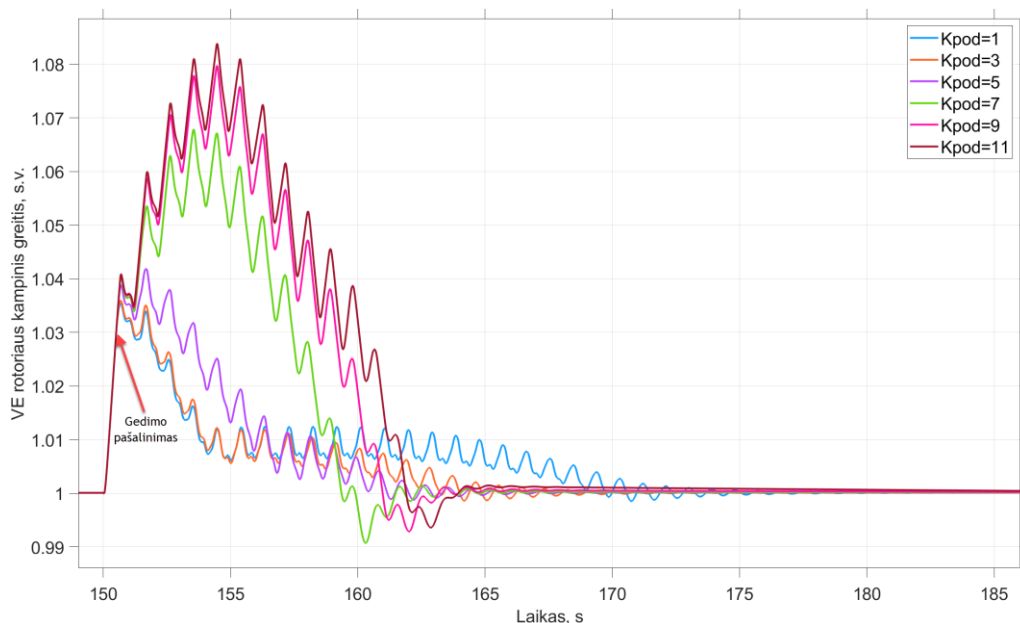


35 pav. SG1 rotoriaus kampinio greičio kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemeje



36 pav. SG2 rotoriaus kampinio greičio kreivės su skirtingais AGFR POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje

Sinchroninių generatorių rotorių greičių kitimas vaizduojamas paveiksluose (žr. 35 pav., 36 pav.). Po avariniu metu, kuomet vėjo elektrinėje yra didinamas POD koeficientas, generatorių rotorių greičiai pradeda mažėti. Toks sinchroninių generatorių lėtėjimas nulemiamas mažėjančiu galios perdavimu tarp skirtingų generatorių sričių (žr. 15 pav. – žyma 3). Galios sumažinimas vykdomas vėjo elektrinės pagalba, kuri prie tam tikro stiprinimo koeficiento, savo atiduodamą galią didinasi arba mažinasi (žr. 34 pav.).



37 pav. VE rotoriaus kampinio greičio kreivės su skirtingais POD stiprinimo koeficientais trumpojo jungimo schemoje

Pateiktame greičio grafike (žr. 37 pav.) matoma vėjo elektrinės rotoriaus greičio priklausomybė nuo POD valdiklio stiprinimo koeficiento. Didėjant K_{POD} stiprinimui, kreivėse išryškėja asinchroninio

generatoriaus greičio didėjimas, kuris pradeda įsisotinti prie $K_{POD} = 7$. Toks rotoriaus greitėjimas nulemiamas dažnu elektrinės atsijungimu nuo tinklo, kurie matomi prie didesnių POD valdiklio koeficientų (žr. 34 pav.).

Tyrimo eigoje išmatuotos parametrų vertės su asinchroniniame generatoriuje integruotu POD valdikliu pateikiamos lentelėje (žr. 11 lentelę).

11 lentelė. Trumpojo jungimo schemos matavimo rezultatai

Parametras	Stiprinimo koeficientas K_{POD}	Generatorius		
		SG1	SG2	VE
Aukščiausia generatoriaus galios vertė švytavimo metu, MW	0 (atskaitinis)	251,45	210,35	14,51
	1	128,80	127,70	17,54
	3	128,36	128,30	17,74
	5	127,70	131,19	18,04
	7	127,75	132,14	18,06
	9	128,08	132,06	18,05
	11	128,13	132,11	18,02
Žemiausia generatoriaus galios vertė švytavimo metu, MW	0 (atskaitinis)	-60	-110,50	0
	1	-25,04	-47,30	3,02
	3	-24,67	-47,19	3,15
	5	-23,30	-46,85	3,52
	7	-20,95	-47,01	0
	9	-19,50	-47,30	0
	11	-19,45	-47,36	0
Didžiausias rotoriaus kampinis greitis švytavimo metu, s.v.	0 (atskaitinis)	1,041	1,052	1,086
	1	1,023	1,025	1,035
	3	1,023	1,025	1,036
	5	1,022	1,024	1,042
	7	1,020	1,023	1,068
	9	1,019	1,023	1,080
	11	1,019	1,023	1,084
Mažiausias rotoriaus kampinis greitis švytavimo metu, s.v.	0 (atskaitinis)	0,966	0,960	1,008
	1	0,984	0,979	0,999
	3	0,988	0,983	0,999
	5	0,987	0,982	0,999
	7	0,979	0,975	0,991
	9	0,976	0,972	0,993
	11	0,975	0,971	0,994
Galios švytavimo trukmė, s	0 (atskaitinis)	neslopstantis	neslopstantis	neslopstantis
	1	34,91	34,82	35,06
	3	24,98	25,67	25,40

Parametras	Stiprinimo koeficientas K_{POD}	Generatorius		
		SG1	SG2	VE
	5	21,12	21,38	21,43
	7	19,26	19,18	19,42
	9	18,36	18,27	18,55
	11	16,85	16,74	16,94

Atlikus antrosios schemos tyrimą, kuriuo metu įvyksta trifazis trumpasis jungimas su žeme ant antrojo sinchroninio generatoriaus šynų, po avariniu metu sistemoje esantys generatoriai išeina į nestabilų švytavimą. Toks švytavimas yra nulemtas sinchroninių generatorių greičio reguliatorių delsa bei stiprių įtampos reguliatorių valdymu. Asinchroniniame generatoriuje įdiegus POD valdiklį su silpniausiu stiprinimo koeficientu, sistema tampa pajėgi grįžti į stabilų darbo režimą.

Vėjo elektrinėje atsiradus POD valdikliui, sistemoje pakinta generatorių aukščiausios ir žemiausios fiksuojamos galios vertės. Šie dydžiai sinchroniniams generatoriams tampa mažesni, kas lemia silpnesnius galios srautų pasikeitimus tarp generatorių sričių. Didėjant POD valdiklio stiprinimo koeficientui, tolimesnis galios pokytis sinchroniniuose generatoriuose nėra ryškiai matomas, kadangi vėjo elektrinė pasiekia savo maksimalias ribas ir dirba generacijoje tarp 0 MW ir 18 MW. Tačiau kylant stiprinimo koeficientui matomas ir tolimesnis švytavimo laiko trumpėjimas, kuris kinta nuo 35,06 sekundžių iki 16,94 sekundžių. Tai nutinka dėl vėjo elektrinės generuojamos galios sumažėjimo, kuris daugiausiai kartų įvyksta prie didžiausio stiprinimo koeficiento (žr. 34 pav.). Tai taip pat nulemia ir suminės perduodamos galios į pirmojo generatoriaus sritį sumažėjimą. Toks galios sumažėjimo poveikis matomas ir abiejų sinchroninių generatorių rotorius greičių kreivėse (žr. 35 pav., 36 pav.), kuriose POD valdikliui turint didesnę koeficientą rotorius stabdomas greičiau.

Remiantis atlikta literatūros šaltinių analize ir modelio tyrimu, galima teigti, kad galios švytavimo slopinimas naudojant asinchroninę generatorių yra įmanomas. Tam reikia į AGFR rotorius pusės keitiklio galios reguliatoriaus schemą integruoti POD valdiklį, kuris stebi linijos galios pokytį pereinamojo proceso metu. Siekiant įvertinti ir nustatyti optimalų POD valdiklio stiprinimo koeficientą, reikia atlikti vėjo elektrinės tyrimą, kuriuo metu būtų apžvelgiamos ir nustatomos fizinės generatoriaus galimybės. Didžiausi stiprinimo koeficientai prie kurių vėjo elektrinė yra dažnai prijungiamas ir atjungiamas nuo tinklo gali turėti įtakos generatoriui ir jo ilgaamžiškumui.

Išvados

1. Galios švytavimo atsiradimo priežastį lemia sinchroninių generatorių rotorių kampo δ kitimai, kuriais sistemoje reguliuojami aktyviosios ir reaktyviosios galios dydžiai. Šių kampų pokyčiai atsiranda dėl mechaninio ir elektrinio sukimo momento skirtumų, kuomet sistemoje įvyksta apkrovos ar generatorių praradimai, linijų atsijungimai, trumpieji jungimai.
2. Galios švytavimo slopinimas asinchroniniu narveliniu generatoriumi gali būti atliekamas tik keičiant generatoriaus mechaninį sukimo momentą. Asinchroniniu generatoriumi su faziniu rotoriumi slopinimas įmanomas išplečiant galios regulatoriaus schemą POD valdikliu, o pilnai konvertuojamo asinchroninio narvelinio generatoriaus – keičiant pilnos konversijos keitiklių galios faktorių koeficientus.
3. *MATLAB* programinėje įrangoje sukurtas elektros sistemos ir asinchroninio generatoriaus modelis, kuriuo tiriamas aktyviosios galios švytavimo procesas. Asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi švytavimo slopinimo galimybės ir efektyvumas patikrinamas prie skirtingų tinklo režimų.
4. Atlikus asinchroninio generatoriaus su faziniu rotoriumi galios švytavimo slopinimo vertinimą nustatyta, kad tokio tipo generatorius yra pajėgus slopinti galios srautų pokyčius sistemoje. Įvykus trumpalaikiam apkrovos praradimui, sistemoje aktyviosios galios švytavimas gali būti nuslopinamas nuo 16,02 iki 6,98 sekundžių. Taip pat nustatyta, jog sinchroniniai generatoriai tapę nestabilūs pereinamojo proceso metu, asinchroninio generatoriaus valdymo pagalba gali būti sugražinami į stabilų darbo režimą per ilgiausią 35,06 sekundžių laiko tarpą.

Literatūros sąrašas

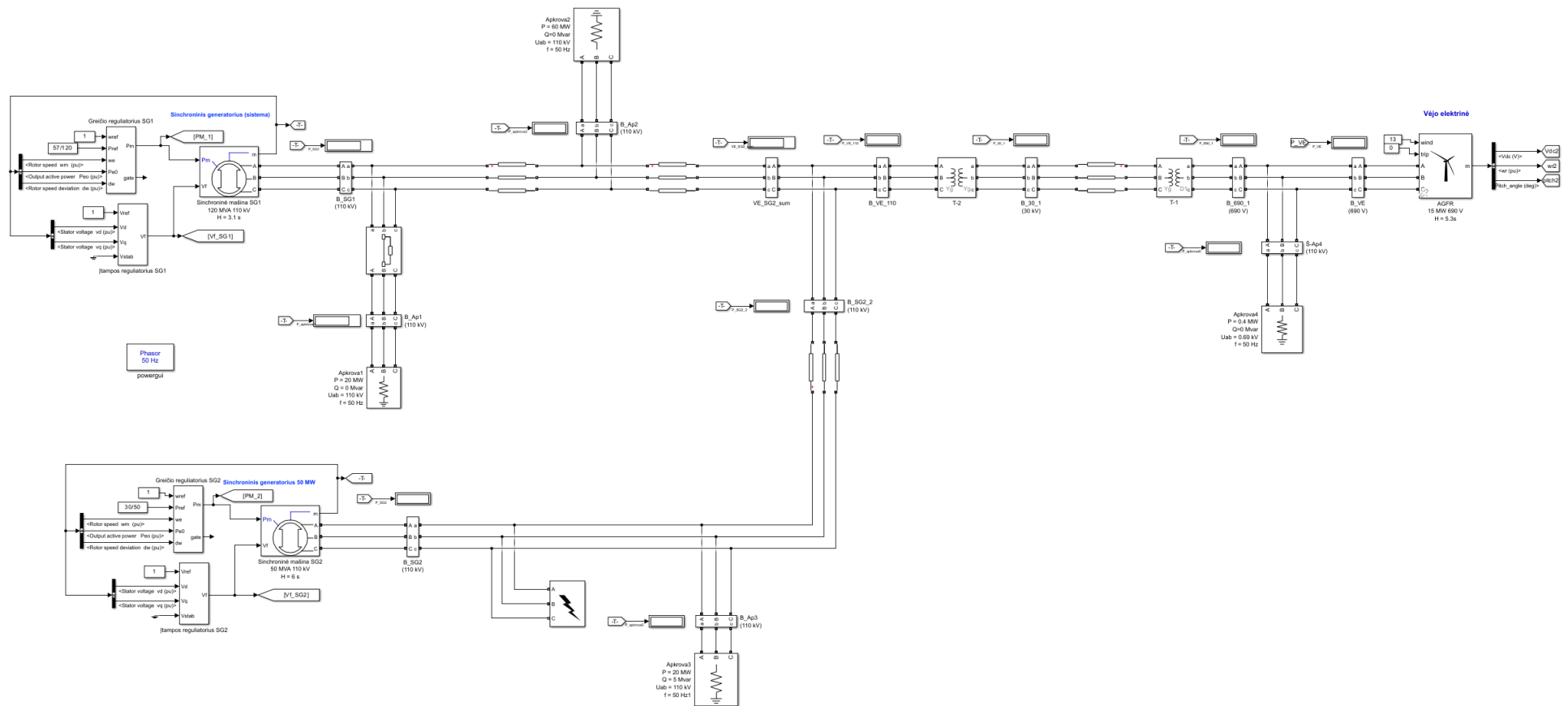
1. DOMI'NGUEZ-GARCIA Jose' Luis, GOMIS-BELLMUNT Oriol, BIANCHI Fernando D., SUMPER Andreas. *Power oscillation damping supported by wind power: A review*. 2012 [žiūrėta: 2024-04-16]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211200247X>
2. FARMER Warren J., RIX Arnold J. *Optimising power system frequency stability using virtual inertia from inverter-based renewable energy generation*. 2020 [žiūrėta: 2024-04-19]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/342333070_Optimising_Power_System_Frequency_Stability_Using_Virtual_Inertia_from_Inverter-based_Renewable_Energy_Generation
3. ISLAM ul Badar, BAHARUDIN Zuhairi, KATTEL Parameshwari. *Inertia Theory Frequency Dynamic Analysis and Control of Power System with High Proportion of Renewable Source*. 2021 [žiūrėta: 2024-05-02] Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/357479161_Inertia_Theory_Frequency_Dynamic_Analysis_and_Control_of_Power_System_with_High_Proportion_of_Renewable_Source
4. KHAYAT Yousef, NADERI Mobin, BEVRANI Hassan, BLAABJERG Frede. *Control of Power Electronic Converters and Systems*. 2021 [žiūrėta: 2024-05-02]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128194324/control-of-power-electronic-converters-and-systems>
5. SHU Hongchun, DONG Haifei, CHEN Jing, WANG Guangxue , WANG Xi, SHI Botao. *Estimation of inertia demand in power systems considering wind power virtual inertia*. 2025 [žiūrėta 2025-01-04]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061525001486>
6. SUNA Feng, SUNA Junjie, ZHANGA Xiaoheng, YANGB Hongyu, QIANB Xiaoyi, YEB Peng. *Measurement method of inertia constant of power system based on large-scale wind power grid connection*. 2022 [žiūrėta: 2025-01-16]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722006114>
7. WALL Peter, GONZÁLEZ-LONGATT Francisco, TERZIJA Vladimir. *Demonstration of an Inertia Constant Estimation Method Through Simulation*. 2010. [žiūrėta: 2025-01-29]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5649023>
8. DENHOLM Paul, MAI Trieu, WALLACE KENYON Rick, KROPOSKI Ben, O'MALLEY Mark. *Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin*. 2020 [žiūrėta: 2025-02-05]. Prieiga per: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/73856.pdf>
9. TAMRAKAR Ujjwol, SHRESTHA Dipesh, MAHARJAN Manisha, P. BHATTARAI Bishnu, M. HANSEN Timothy, TONKOSKI Reinaldo. *Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions*. 2017 [žiūrėta: 2025-02-19]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/7/654>
10. BEVRANI Hassan, ISE Toshifumi, MIURA Yushi. *Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives*. 2014 [žiūrėta: 2025-03-01]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061513003062>
11. TIELENS Pieter, VAN HERTEM Dirk. *The relevance of inertia in power systems*. 2016 [žiūrėta: 2025-03-07]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211501268X>
12. MORREN Johan. *Grid support by power electronic converters of Distributed Generation units*. 2006 [žiūrėta: 2025-03-15]. Prieiga per: <https://scispace.com/pdf/grid-support-by-power-electronic-converters-of-distributed-f3z40bvvoc.pdf>

13. GRIGSBY, Leonard. *Power System Stability and Control Third Edition*. Boca Raton, FL, 2012. ISBN 9781439883211
14. HATZIARGYRIOU Nikos, MILANOVIC Jovica, RAHMANN Claudia, AJJARAPU Venkataramana, CANIZARES Claudio, ERLICH Istvan, HILL David, HISKENS Ian, KAMWA Innocent, PAL Bikash, POURBEIK Pouyan, SANCHEZ-GASCA Juan, STANKOVIC Aleksandar, VAN CUTSEM Thierry, VITTAL Vijay, VOURNAS Costas. *Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended*. 2021 [žiūrēta: 2024-05-10]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9286772>
15. PANG Chengzong, KEZUNOVIC Mladen. *Fast Distance Relay Scheme for Detecting Symmetrical Fault During Power Swing*. 2010. [žiūrēta: 2024-05-11]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5565523>
16. UNASEGARAN, M. K., CHIAKWANG, Tan, BAKAR A.H.A. *Investigation of Power swing phenomenon and verification of critical clearing time through theoretical calculations and simulated studies*. 2014 [žiūrēta 2024-06-03]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/281257499_Investigation_of_Power_swing_phenomenon_and_verification_of_critical_clearing_time_through_theoretical_calculations_and_simulated_studies
17. VIŠIĆ Ivan, STRNAD Ivan, MARUŠIĆ Ante. *Synchronous Generator Out of Step Detection Using Real Time Load Angle Data*. 2020 [žiūrēta: 2025-03-22]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/13/3336>
18. ENTSO-E. *Determining generator fault clearing time for the synchronous zone of Continental Europe*. 2017 [žiūrēta: 2025-03-31]. Prieiga per: https://www.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Regional_Groups_Continental_Europe/2017/SPD_FCT-BestPractices_website.pdf
19. KUNDUR Prabha, MALIK Om P. *Power System Stability and Control*. ISBN:9781260473544
20. FISCHER Normann, BENMOUYAL Gabriel, HOU Daqing, TZIOUVARAS Demetrios, BYRNE-FINLEY John, SMYTH Brian. *Tutorial on Power Swing Blocking and Out-of-Step Tripping*. 2012. [žiūrēta: 2024-06-13]. Prieiga per: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6577_TutorialPower_JBF_20120911_Web.pdf
21. Zhikang Shuai, Chao Shen, Xuan Liu, Zuyi Li, Z. John Shen. *Transient Angle Stability of Virtual Synchronous Generators Using Lyapunov's Direct Method*. 2019 [žiūrēta: 2025-04-06]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8444083>
22. BIKASH, Pal, BALARKO, Chaudhuri. *Robust Control in Power Systems*. 2005. ISBN:9780387259499
23. OBAIDA Zeyad Assi, CIPCIGANA L.M., MUHSSIN Mazin T. *Power system oscillations and control: Classifications and PSSs' design methods: A review*. 2017. [žiūrēta: 2024-06-11]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/317136941_Power_system_oscillations_and_control_Classifications_and_PSSs'_design_methods_A_review
24. KUNDUR Prabha, WANG Lei. *Small Signal Stability Analysis: Experiences, Achievements, and Challenges*. 2002. [žiūrēta: 2025-04-13]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1053494>

25. YANG Dejian, JIN Enshu, YOU Jiahan, HUA Liang. *Dynamic Frequency Support from a DFIG-Based Wind Turbine Generator via Virtual Inertia Control*. [žiūrēta: 2024-06-13]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/app10103376>
26. MUYEEN S. M., MOHD. HASAN Ali., TAKAHASHI Rion, MURATA Toshiaki, TAMURA Junji. *Damping of Blade-shaft Torsional Oscillations of Wind Turbine Generator System*. 2008. [žiūrēta: 2024-06-14]. Prieiga per: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15325000701549293>
27. GURUNG Niroj; KAMALASADAN Sukumar. *Power System Oscillation Damping Capability of Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*. 2018 [žiūrēta: 2025-04-18]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8440223>
28. LI Shenghu, ZHANG Hao, YAN Yunsong, REN Jianfeng. *Parameter Optimization to Power Oscillation Damper (POD) Considering its Impact on the DFIG*. 2021 [žiūrēta: 2025-04-24]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9513549>
29. KNÜPPEL Thyge, AKHMATOV Vladislav, NIELSEN Jørgen Nygård, JENSEN Kim H., DIXON Andrew, ØSTERGAARD Jacob. *On Small-Signal Stability of Wind Power System with Full-Load Converter Interfaced Wind Turbines*. 2010 [žiūrēta: 2024-06-15]. Prieiga per: <https://orbit.dtu.dk/files/4973185/master.pdf>
30. HAGSTRØM Espen, NORHEIM Ian, UHLEN Kjetil. *Large-scale wind power integration in Norway and impact on damping in the Nordic grid*. 2005. [žiūrēta: 2024-06-16]. Prieiga per: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/we.168>
31. BERNAL-SANCHO Marta, PAZ COMECH María, GALAN-HERNANDEZ Noemí. *Damping control in renewable-integrated power systems: A comparative analysis of PSS, POD-P, and POD-Q strategies*. [žiūrēta: 2025-04-29]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061524005313>
32. MIOTTO Ednei L., COVACIC Marcio R. *Study of Stability Dynamic in a Multimachine Power System Using Robust Controllers PSS and POD*. 2011 [žiūrēta: 2025-05-05]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5748844>
33. SURINKAEW Tossaporn, NGAMROO Issarachai. *Robust power oscillation damper design for DFIG-based wind turbine based on specified structure mixed H_2/H_∞ control*. 2014 [žiūrēta: 2025-05-11]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/259519290_Robust_power_oscillation_damper_design_for_DFIG-based_wind_turbine_based_on_specified_structure_mixed_H2H_control
34. EDRAH Mohamed, ZHAO Xiaowei, HUNG William, QI Pengyuan, MARSHALL Benjamin, KARCANIAS Aris, BALOCH Shurooque. *Effects of POD Control on a DFIG Wind Turbine Structural System*. 2020 [žiūrēta: 2025-05-11]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/338564560_Effects_of_POD_Control_on_a_DFIG_Wind_Turbine_Structural_System
35. RANI M. Deepthi, KUMAR M. Satyendra. *Development of Doubly Fed Induction Generator Equivalent Circuit and Stability Analysis Applicable for Wind Energy Conversion System*. 2017 [žiūrēta: 2025-05-11]. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8081901>

Priedai

1 priedas. Sistemos modelis *Simulink* aplinkoje



2 priedas. Asinchroninio generatoriaus aktyviosios galios valdymo schema *Simulink* aplinkoje

