



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vėjo elektrinių įtakos elektros sistemos stabilumui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Daivaras Sabaliauskas

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vėjo elektrinių įtakos elektros sistemos stabilumui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Daivaras Sabaliauskas

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Doc. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Daivaras Sabaliauskas

Vėjo elektrinių įtakos elektros sistemos stabilumui 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.

Daivaras Sabaliauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Sabaliauskas, Daivaras. Vėjo elektrinių įtakos elektros sistemos stabilumui tyrimas / vadovas prof. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: vėjo elektrinė, atsinaujinantys elektros energijos šaltiniai, stabilumas, įtampa, srovė.

Kaunas, 2025. 47 p.

Santrauka

Baigiamojo darbo tikslas yra ištirti vėjo elektrinių įtaką perdavimo tinklo stabilumui. Paruoštas sistemos modelis įvairiems scenarijams simuliuoti. Vadovaujantis įvairiais šaltiniais ir moksliniais straipsniais vertinti gautus rezultatus. Tyrimui atlikti naudojamas DIgSILENT PowerFactory programinės įrangos paketas. Naudojant šią programinę įrangą, kaip bazė naudojamas „Transmission system“ lietuviškai elektros perdavimo sistema, modelis, kuris buvo modifikuotas, kad atitiktų Lietuvos elektros energetikos sistemos reikalavimus. Tyrimo metu buvo vertinamas sistemos atsakas į įvykusį gedimą ir jos sugebėjimas grįžti į normalų darbo režimą. Buvo vertinamas dažnio svyravimas, rotoriaus kampo nuokrypis, tinklo įtampa ir sistemos sugebėjimas grįžti į normalų režimą. Nustatyta, kad integruojant didelį kiekį vėjo jėgainių, ypač turinčių mažą ar jokios inercijos, smarkiai sumažėja sistemos gebėjimas slopinti dažnio svyravimus po trikdžių. Rotoriaus kampo analizė taip pat parodė padidėjusią sinchronizacijos praradimo riziką esant žemai inercijai. Tyrimo išvados aktualios energetikos sistemų projektuotojams ir tinklo operatoriams, siekiantiems sklandaus perėjimo prie klimatui neutralios energetikos sistemos.

Sabaliauskas, Daivaras. Research of Wind Power Plants Impact on Power System Stability / supervisor prof. dr. Audrius Jonaitis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: wind power plant, renewable energy sources, stability, voltage, current.

Kaunas, 2025. 47 p.

Summary

The purpose of the final thesis is to study the impact of wind farms on the stability of the transmission network. A system model has been prepared to simulate various scenarios. The results obtained are evaluated based on various sources and scientific articles. The DIgSILENT PowerFactory software package is used to conduct the study. Using this software, the “Transmission system” model is used as a base, which was modified to meet the requirements of the Lithuanian electricity system. During the study, the system response to a fault and its ability to return to normal operation were assessed. Frequency fluctuation, rotor angle deviation, network voltage and the system's ability to return to normal operation were assessed. It was found that integrating a large number of wind farms, especially those with low or no inertia, significantly reduces the system's ability to suppress frequency fluctuations after disturbances. Rotor angle analysis also showed an increased risk of loss of synchronization at low inertia. The study conclusions are relevant for energy system designers and network operators seeking a smooth transition to a climate-neutral energy system.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	11
1.1. Elektros perdavimo tinklo dinamiškumas	11
1.2. Elektros perdavimo tinklo stabilumas	12
1.3. Atsinaujinančios elektros energijos perspektyvos.....	13
1.4. Elektros sistemos inercija	15
2. Metodinė dalis.....	18
2.1. Vėjo turbinų poveikis elektros sistemos stabilumui.....	18
2.2. Pagrindinės stabilumo rūšys	19
2.3. Pagrindinės stabilumo rūšys	20
2.4. Įtampos stabilumas	23
2.5. Dažnio stabilumas	24
2.6. Dažnio stabilumo klasifikacija	25
3. Modelio aprašymas.....	28
3.1. Programinės įrangos aprašymas	28
3.2. Tiriamojo objekto aprašymas	28
4. Tyrimo rezultatai.....	30
4.1. Elektros perdavimo tinklo stabilumo tyrimas.....	30
4.2. Pradiniai duomenys, prieš prijungiant vėjo elektrines	31
4.3. Prijungus 50 MW galios vėjo jėginių prie tinklo.....	34
4.4. Prijungus 100 MW galios vėjo jėginių prie tinklo.....	36
4.5. Prijungus 150 MW galios vėjo jėginių prie tinklo.....	39
Išvados	42
Literatūros sąrašas	43
Informacijos šaltinių sąrašas	46
Priedai.....	47
1 priedas. Vienlinijinė schema.....	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo neprijungus vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.	31
2 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo neprijungus vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.	32
3 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo neprijungus vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.	33
4 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 50 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.	34
5 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 50 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.....	35
6 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 50 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.....	36
7 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 100 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.	37
8 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 100 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.....	37
9 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 100 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.....	38
10 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 150 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.	39
11 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 150 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.....	40
12 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 150 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.....	41

Paveikslų sąrašas

1 pav. Elektros sistemos stabilumo tipai [2].	11
2 pav. Instaliuotos vėjo ir saulės elektrinių galios Lietuvoje [18].	14
3 pav. Instaliuotos vėjo ir saulės elektrinių galios Lietuvoje. [19]	15
4 pav. Dažnio reakcijos po tinklo sutrikimo esant skirtingoms sistemos inercijos konfigūracijoms.	16
5 pav. Atsinaujinančių energijos šaltinių gaminama elektros energijos dalis Europoje. [17]	17
6 pav. Skirtingų vėjo elektrinių tipų aktyvioji ir reaktyvioji galios P ir Q pagrindiniuose prijungimo taškuose santykiniais vienetais. [21]	19
8 pav. „Elektros perdavimo sistemos“ vienlinijinė schema.	28
9 pav. „Elektros perdavimo sistemos“ modelyje naudojami įtampos lygiai.	29
10 pav. „Elektros perdavimo sistemos“ vienlinijinė schema pertvarkius įrangos parametrus.	30
11 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.	31
12 pav. Linijinė įtampa šynose S_10, kV.	32
13 pav. Sistemos dažnis, Hz.	33
14 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2 prijungus 50 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.	34
15 pav. Linijinė įtampa šynose S_10 prijungus 50 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, kV.	35
16 pav. Sistemos dažnis prijungus 50 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, Hz.	35
17 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2 prijungus 100 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.	36
18 pav. Linijinė įtampa šynose S_10 prijungus 100 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, kV.	37
19 pav. Sistemos dažnis prijungus 100 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, Hz.	38
20 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2 prijungus 150 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.	39
21 pav. Linijinė įtampa šynose S_10 prijungus 150 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, kV.	40
22 pav. Sistemos dažnis prijungus 150 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, Hz.	41

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

t. j. – trumpasis jungimas;

STATCOM - statiniai sinchroniniai kompensatoriai;

ADR - automatizuotas dažnio ir įtampos reguliavimas;

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

AES – atsinaujinantys energijos šaltiniai;

AVR - Automatinės įtampos reguliavimo sistemos;

Terminai:

Trumpas jungimas – šaltinio polių sujungimas laidininku, kurio varža maža, palyginti su kitų grandinės dalių varža.

Įtampos stabilumas - yra vienas pagrindinių elektros energijos sistemų stabilumo aspektų, apibūdinantis sistemos gebėjimą palaikyti leistinas įtampos reikšmes tiek normaliomis, tiek trikdžių sąlygomis.

Rotoriaus kampo - stabilumas yra vienas pagrindinių elektros energijos sistemų stabilumo aspektų, apibūdinantis sinchroninių generatorių gebėjimą išlaikyti sinchronizmą po įvairių trikdžių.

Dažnio stabilumas - yra vienas svarbiausių elektros energijos sistemų stabilumo aspektų, apibūdinantis sistemos gebėjimą palaikyti nominalų dažnį po trikdžių.

Įvadas

Bėgant metams pasaulio požiūris į energetiką pasikeitė, būtina skubiai mažinti klimato kaitą ir užtikrinti energetinį saugumą. Atsinaujinančių energijos šaltiniai tokių kaip saulės elektrinės ir vėjo elektrinių integravimas į esamą tinklą yra labai svarbus šio tikslo siekiant. Šie atsinaujinantys energetikos šaltiniai suteikia daug naudos aplinkai ir ekonomikai. Tačiau pertraukiamas ir kintantis saulės ir vėjo elektrinių pobūdis sukelia didelių iššūkių elektros perdavimo tinklo stabilumui ir patikimumui.

Šio darbo metu bus siekiama išnagrinėti atsinaujinančių energijos šaltinių įtaką elektros perdavimo tinklo stabilumui. Tyrimo metu bus siekiama iširti saulės ir vėjo elektrinių poveikį tinklo stabilumo parametrų tokiems kaip: dažnis, įtampos stabilumas ir bendras sistemos patikimumas.

Daugelis šalių siekia didinti atsinaujinančių energijos šaltinių dalį elektros gamybos sektoriuje, tačiau susiduria su lankstumo ir struktūros trūkumu įprastuose elektros tinkluose, reikalingu šių šaltinių masinei integracijai. Saulės ir vėjo energija, pasižyminti maža inercija ir pertraukiamumu, paprastai paskirstoma tinkle be didelio poveikio. Vis dėlto, didėjant vėjo ir saulės parkų skaičiui, kyla techninių problemų, tokių kaip srovės perkrova, pernelyg didelė ar per maža įtampa ir tinklo stabilumo problemos.

Darbo objektas: „Transmission system“, lietuviškai elektros perdavimo sistema, tipinis elektros tinklas naudojamas simuliacijoms.

Darbo tikslas: Iširti vėjo elektrinių prijungimo įtaką elektros perdavimo tinklo stabilumui.

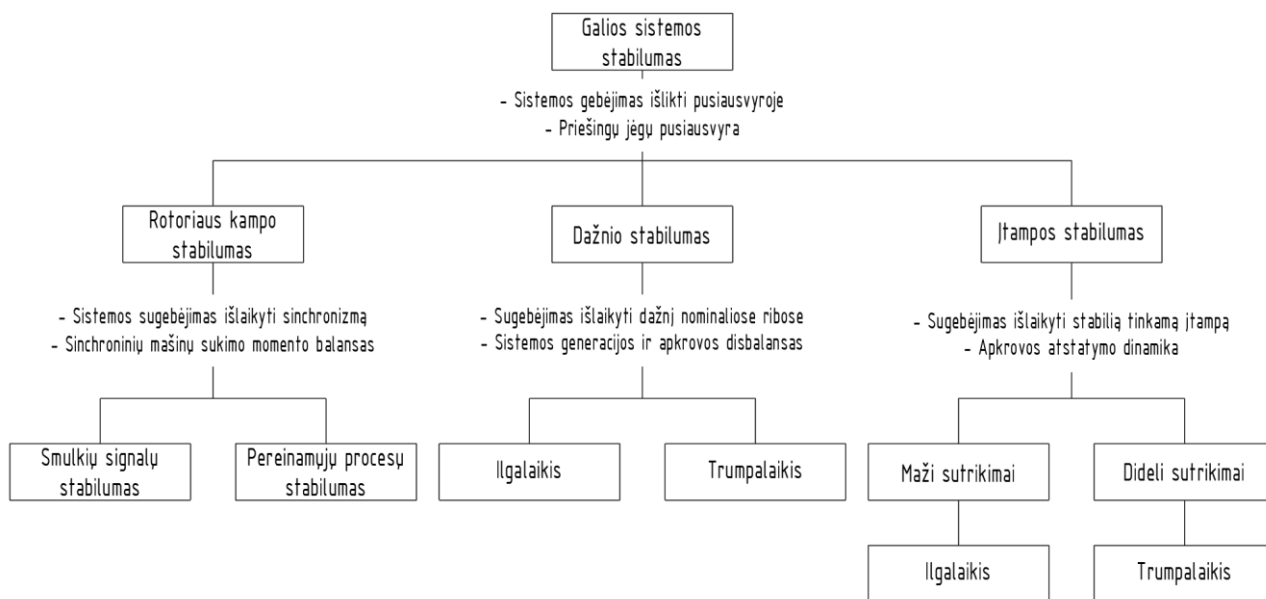
Darbo uždaviniai:

1. Sudaryti metodiką, padedančią įvertinti vėjo elektrinių įtaką perdavimo tinklui;
2. Sudaryti elektros sistemos modelį su vėjo elektrinėmis, skirtą srautų paskirstymo uždaviniams spręsti;
3. Iširti, kaip nepastovus ir kintantis atsinaujinančių energijos šaltinių pobūdis veikia tinklo stabilumą;
4. Įvertinti atsinaujinančių energetikos šaltinių įtaką tinklo dažniui, įtampos stabilumui ir bendram elektros sistemos patikimumui;

1. Literatūros analizė

1.1. Elektros perdavimo tinklo dinamiškumas

Elektros perdavimo tinklo dinamiškumas yra viena svarbiausių jo savybių, apibūdinanti tinklo gebėjimą greitai ir efektyviai prisitaikyti prie nuolat kintančių sąlygų. Dinamiškumas yra ypač svarbus, kai kalbama apie apkrovos svyravimus, elektros energijos gamybos pokyčius ar nenumatytus gedimus. Tinklo dinamiškumas leidžia palaikyti stabilų ir patikimą elektros tiekimą, naudojant efektyvias valdymo strategijas ir techninius sprendimus [1]. Vienas pagrindinių veiksnių, apibrėžiančių dinamiškumą, yra tinklo elementų reakcijos laikas. Modernūs reaktyviosios galios kompensatoriai, transformatoriai ir automatiniai perjungimo įrenginiai turi gebėti greitai reaguoti į kylančius įtampos ar apkrovos svyravimus [2]. Reaktyviosios galios kompensavimo sistemos ypač svarbios, nes jos palaiko įtampos lygį ir padeda optimizuoti energijos srautų valdymą. Tradiciniai sprendimai, tokie kaip sinchroniniai kompensatoriai, teikia didelį inercijos indėlį, o naujesnės technologijos, tokios kaip STATCOM (statiniai sinchroniniai kompensatoriai), leidžia itin greitai reguliuoti reaktyviąją galią ir didinti tinklo stabilumą [2], [5]. Elektros tinklo stabilumui itin didelę įtaką daro sistemos inercija. Inercija, kurią sukuria generatoriai ir rotacinės mašinos, laikinai kompensuoja elektros sistemos dažnio svyravimus, todėl ši savybė yra kritiškai svarbi didelei ir sudėtingai elektros perdavimo infrastruktūrai.



1 pav. Elektros sistemos stabilumo tipai [2].

Didėjant decentralizuotam elektros energijos gamybos modeliui, ypač naudojant atsinaujinančius šaltinius kaip vėjo ar saulės elektrines, inercijos kiekis sistemoje natūraliai sumažėja, nes šios technologijos naudoja elektroninius keitiklius, kurie neturi rotacinės masės. Todėl svarbu diegti dirbtinę inerciją arba kitus stabilumo palaikymo sprendimus, pavyzdžiui, naudojant akumuliatorių energijos kaupiklius su greitąja reakcija [3], [6]. Automatizuotos valdymo sistemos, tokios kaip automatizuotas dažnio ir įtampos reguliavimas (ADR), stiprina tinklo dinamiškumą, leidžiančios operatoriams greitai reaguoti į bet kokius trikdžius. Automatizuotas valdymas užtikrina, kad įtampa ir dažnis išliktų normaliose ribose net esant staigiems elektros vartojimo pokyčiams. Tai itin svarbu diegiant didelio masto atsinaujinančių išteklių energijos šaltinius, kurie pasižymi gamybos

nepastovumu. Pavyzdžiui, vėjo jėgainės gali sugeneruoti itin daug energijos per trumpą laikotarpį, tačiau orų sąlygoms pasikeitus energijos tiekimas sumažėja, sukeldami dažnio svyravimus. Tokiais atvejais ADR padeda subalansuoti sistemą be operatoriaus įsikišimo [2], [5], [6]. Dinamiškumas taip pat yra glaudžiai susijęs su gebėjimu prisijungti naujiems elektros gamybos šaltiniams. Atsinaujinantys energijos šaltiniai, tokie kaip vėjo ir saulės energijos jėgainės, kelia unikalius iššūkius dėl savo nepastovumo ir priklausomybės nuo gamtos sąlygų. Tinklas turi būti pakankamai lankstus, kad galėtų integruoti šiuos šaltinius be didelių trikdžių. Pavyzdžiui, didžiulė vėjo energijos generavimo galia gali staiga sumažėti, jei vėjas nurimsta. Norint valdyti tokius svyravimus, tinklų operatoriai naudoja akumuliatorines energijos saugyklas arba kitus greitojo atsako sprendimus, kurie leidžia stabilizuoti energijos srautus [5]. Be technologinių sprendimų, dinamiškumo palaikymas reikalauja nuolat tobulinamų algoritmų ir realaus laiko duomenų analizės sistemų. Pažangiosios elektros tinklo technologijos, tokios kaip „išmanieji tinklai“ (smart grids), leidžia valdyti energijos srautus efektyviai ir lanksčiai. Naudojant dirbtinio intelekto algoritmus, tinklo operatoriai gali prognozuoti galimus apkrovos pokyčius ir imtis prevencinių veiksmų, siekdami sumažinti gedimų riziką [6], [7].

1.2. Elektros perdavimo tinklo stabilumas

Elektros perdavimo tinklo stabilumas yra esminis veiksnys, lemiantis visos sistemos patikimumą ir efektyvumą. Tačiau tam tikromis sąlygomis sistema gali tapti nestabili, o tai sukelia rimtų padarinių tiek techniniu, tiek ekonominiu požiūriu. Nestabili elektros sistema reiškia būseną, kai sistema praranda gebėjimą palaikyti įprastas darbo sąlygas po trikdžių arba esant staigiems apkrovos ar elektros generacijos pokyčiams ([1]).

Priežastys sukeliančios tinklo nestabilumą

Nestabilumo priežastys gali būti įvairios, tačiau dažniausiai jos susijusios su šiais veiksniais:

1. Nepakankama inercija ir dažnio reguliavimas – Kadangi inercija padeda išlaikyti sistemos dažnio stabilumą, jos trūkumas gali sukelti staigius dažnio svyravimus. Tai ypač aktualu sistemose, kuriose didelę dalį gamybos sudaro atsinaujinantys energijos šaltiniai, kurie neveikia pagal tradicinius sinchroninius mechanizmus ([2]).
2. Reaktyviosios galios trūkumas – Jeigu elektros sistema negali užtikrinti pakankamo reaktyviosios galios kiekio, gali atsirasti įtampos nestabilumas, kuris lemia įtampos kritimus ir netgi visos sistemos žlugimą ([3]).
3. Per didelė tinklo apkrova – Kai perdavimo linijos tampa perkrautos, didėja varžinės galios nuostoliai, mažėja įtampa, o galiausiai gali atsirasti perkrovos sukeltos avarijos, įskaitant linijų atsijungimą ar net grandininį išsijungimą ([4]).
4. Valdymo sistemos neefektyvumas – Net jei tinklas techniškai pajėgus išlaikyti stabilumą, netinkamai sureguliuotos automatinės valdymo sistemos gali per lėtai reaguoti į pokyčius arba net sukelti papildomus svyravimus, didindamos nestabilumą ([5]).

Nestabilumo padariniai

Nestabili elektros sistema gali turėti kelis rimtus padarinius, tarp kurių dažniausiai pasitaiko:

1. Dažnio griūtis – Staigūs dažnio pokyčiai gali priversti elektrines ir prijungtus įrenginius atsijungti nuo tinklo, o tai gali sukelti regioninius ar net visos sistemos elektros tiekimo nutrūkimus ([6]).

2. Įtampos kritimai ir šuoliai – Nepakankamas reaktyviosios galios tiekimas ar linijų perkrova gali lemti staigius įtampos pokyčius, kurie gali sugadinti jautrią elektroniką ir sumažinti elektros energijos tiekimo kokybę ([7]).
3. Grandininiai išsijungimai – Vieno elemento atsijungimas gali sukelti grandininę reakciją, kuomet kitos sistemos dalys nebesugeba kompensuoti apkrovos persiskirstymo, sukeldamos vis didesnę išsijungimų mastą ([4]).
4. Ekonominiai nuostoliai – Dėl sistemos nestabilumo gali kilti dideli ekonominiai nuostoliai tiek elektros tiekimo įmonėms, tiek vartotojams. Nestabilumas taip pat verčia investuoti į papildomas apsaugos priemones, kurios gali būti labai brangios ([5]).

Sprendimo būdai ir prevencija

Norint sumažinti sistemos nestabilumo riziką, svarbu taikyti šiuos sprendimus:

- Padidinti sistemos inerciją naudojant energijos kaupimo įrenginius ir hibridinius sprendimus, leidžiančius greitai reaguoti į dažnio pokyčius ([2]).
- Užtikrinti pakankamą reaktyviosios galios rezervą, naudojant STATCOM ir FACTS įrenginius, kurie padeda stabilizuoti įtampą realiuoju laiku ([3]).
- Optimizuoti tinklo apkrovos valdymą, naudojant išmaniuosius tinklus ir automatizuotus reguliavimo mechanizmus, kurie užkerta kelią linijų perkrovai ([6]).
- Diegti patobulintas automatines valdymo sistemas, kurios naudoja dirbtinio intelekto algoritmus, leidžiančius tiksliau prognozuoti apkrovos pokyčius ir užtikrinti greitesnę reakciją į trikdžius ([7]).

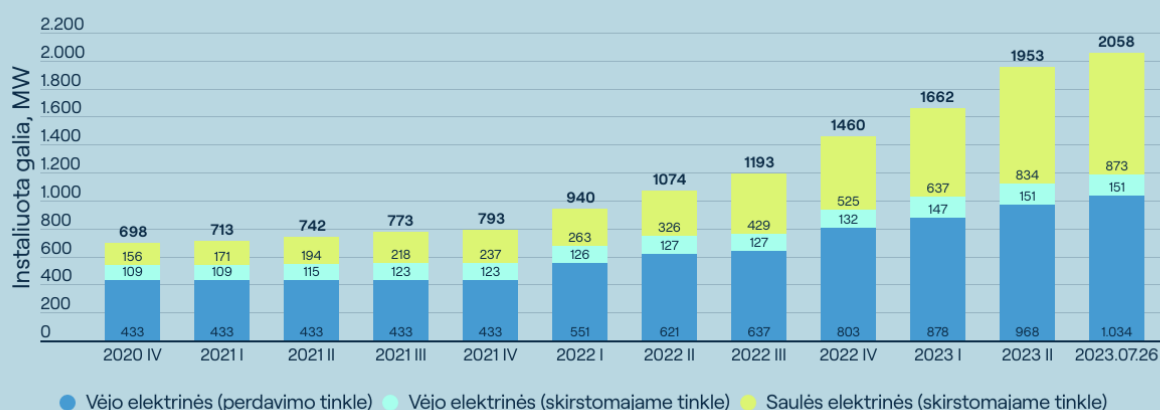
Nestabilios sistemos problema yra sudėtinga, tačiau naudojant pažangias technologijas ir tinkamas valdymo strategijas galima sumažinti riziką ir užtikrinti patikimą elektros energijos tiekimą.

1.3. Atsinaujinančios elektros energijos perspektyvos

Europos Sąjunga iki 2030 metų siekia padidinti atsinaujinančių energijos išteklių dalį iki bent 42,5 %, taip beveik padvigubindama dabartinę jų kiekį. Šis ambicingas tikslas yra dalis platesnio ES įsipareigojimo tapti pirmuoju klimatui neutraliu žemynu iki 2050 metų. Lietuva aktyviai prisideda prie šio perėjimo ir siekia tapti viena iš lyderių atsinaujinančios energetikos srityje. Šalyje sparčiai plėtojamos žaliosios energetikos iniciatyvos – investuojama į saulės ir vėjo elektrines, o taip pat įgyvendinami projektai, skirti didinti vietinės elektros energijos gamybą ir mažinti priklausomybę nuo importo[8].

Šiuo metu Lietuvoje apie 30 % suvartojamos elektros energijos pagaminama iš atsinaujinančių išteklių, tačiau didžioji dalis vis dar importuojama iš užsienio. 2023 metais fiksuoti rekordiniai saulės elektrinių prijungimo prie tinklo tempai – verslas ir gyventojai aktyviai investuoja į nuosavas saulės elektrines ar įsigyja jų dalis nutolusiuose parkuose. Taip pat didelį potencialą demonstruoja vėjo energetika – ypač planuojami jūrinio vėjo elektrinių projektai Baltijos jūroje. Šie projektai ne tik prisidės prie energetinės nepriklausomybės, bet ir atvers galimybes Lietuvai eksportuoti žaliąją energiją į kaimynines šalis[8].

AEI plėtra



Lietuvoje įrengtų vėjo ir saulės elektrinių galia viršijo 2 GW

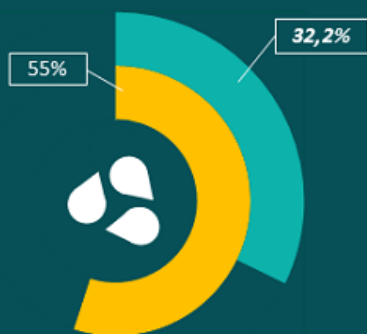
2 pav. Instaliuotos vėjo ir saulės elektrinių galios Lietuvoje [18].

Tačiau norint sklandžiai integruoti atsinaujinančius energijos šaltinius į Europos energetinę sistemą, būtina įveikti keletą iššūkių. Vienas iš svarbiausių – tai elektros perdavimo tinklų modernizavimas, kad jie galėtų efektyviai valdyti besikeičiančius apkrovos ir gamybos srautus, būdingus vėjo ir saulės energetikai. Taip pat vyksta intensyvios diskusijos dėl branduolinės energetikos vaidmens pereinant prie žaliosios energijos – kai kurios šalys ją laiko būtina pereinamojo laikotarpio dalimi, tuo tarpu kitos siekia jos visiškai atsisakyti[8].

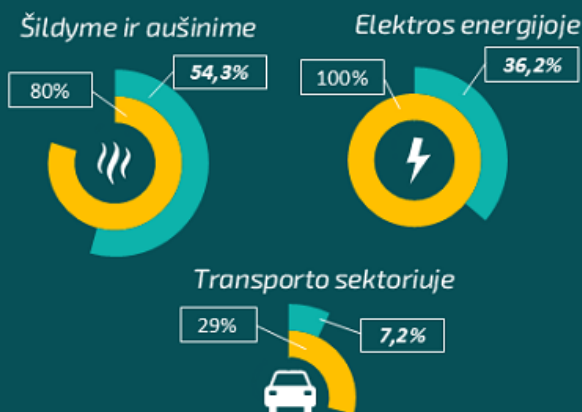
2023 m. AEI dalis bendrame galutiniame energijos suvartojime sudarė 32,2 proc. Šiuos rezultatus daugiausia lėmė AEI dalis šilumos sektoriuje, kuri sudarė 54,3 proc., AEI dalis elektros gamyboje sudarė 36,2 proc., o transporto sektoriuje – 7,2 proc.

ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI

Atsinaujinančių energijos išteklių dalis bendrame galutiniame energijos suvartojime



Atsinaujinančių energijos išteklių dalis:



■ 2030 m. TIKSLAS

■ 2023 m. FAKTAS

3 pav. Instaliuotos vėjo ir saulės elektrinių galios Lietuvoje. [19]

Lietuva ketina iki 2030 m. pasiekti 55 proc., AEI tikslą galutiniame energijos suvartojime. Tai bus pasiekta plačiai diegiant privatiems energijos vartotojams ir bendruomenėms priklausančius mažos galios atsinaujinančios energijos įrenginius. Siekiant sėkmingai integruoti didesnius atsinaujinančios energijos kiekius ir didelį elektrą gaminančių vartotojų skaičių, numatoma investuoti į pažangiąsias energijos sistemas, įskaitant perdavimo, skirstymo ir kaupimo infrastruktūrą, ir į reikiamų balansavimo pajėgumų kiekio didinimą.

Nepaisant šių iššūkių, atsinaujinančios energetikos plėtra išlieka pagrindiniu prioritetu tiek ES, tiek Lietuvai. Sėkmingas šios politikos įgyvendinimas ne tik padės kovoti su klimato kaita, bet ir užtikrins tvaresnę, saugesnę ir ekonomiškai stabilesnę energetikos sistemą visam regionui[8].

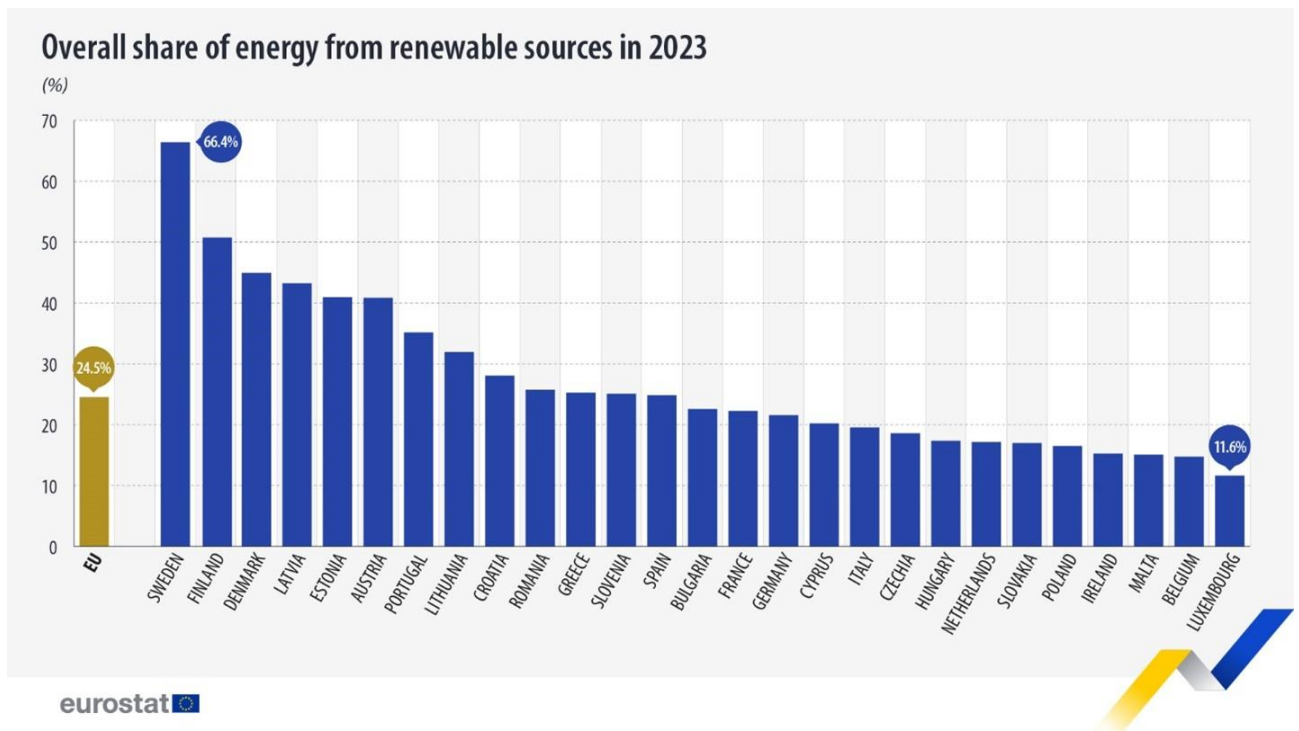
1.4. Elektros sistemos inercija

Tradiciskai elektros energetikos sistemų dažnio stabilumui palaikyti itin svarbią reikšmę turi sinchroniniai generatoriai, kurie ne tik gamina elektros energiją, bet ir suteikia sistemai inerciją – gebėjimą priešintis greitiems dažnio pokyčiams. Sinchroninio generatoriaus rotorijoje sukaupia kinetinė energija, esant staigiems apkrovos arba gamybos pokyčiams, iš karto reaguoja į disbalansą tarp generacijos ir vartojimo, laikinai kompensuodama trūkumą ar perteklių. Tai leidžia sistemai lėčiau reaguoti į sutrikimus, suteikiant laiko kitoms dažnio reguliavimo priemonėms įsijungti [9]. Šiuo metu, didėjant atsinaujinančiųjų energijos šaltinių (AES) – tokių kaip vėjo ar saulės elektrinės – integracijai, ši inercinė savybė tampa vis mažiau prieinama. Dauguma AES yra prijungiami prie tinklo naudojant galios elektronikos įrenginius, kurie neatlieka sinchroninių generatorių funkcijos ir nesiūlo jokios arba labai mažą inerciją. Tokia situacija lemia vadinamąją „mažos inercijos“ sistemą, kur dažnio svyravimai tampa intensyvesni ir pavojingesni [10][11].



4 pav. Dažnio reakcijos po tinklo sutrikimo esant skirtingoms sistemos inercijos konfigūracijoms.

Remiantis Eurostat duomenimis, 2023 metais atsinaujinančių energijos šaltinių (AES) dalis galutiniame energijos suvartojime Europos Sąjungoje pasiekė 24,5 %, o tai yra žingsnis į priekį, palyginti su 23,0 % dalimi 2022 m. Šis augimas yra nuoseklaus ilgalaikio pereinamojo laikotarpio rezultatas, kurio tikslas – didinti energetinę nepriklausomybę, mažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas bei stiprinti žaliosios energetikos sektorių. Kai kurios valstybės narės, tokios kaip Švedija, Suomija ir Latvija, jau dabar pasiekė arba net viršijo ES keliamus tikslus – pavyzdžiui, Švedija iš atsinaujinančių šaltinių pasigamina net 66 % savo suvartojamos energijos. [17] Tuo tarpu kai kurios pietinės valstybės narės, pvz., Malta ar Liuksemburgas, atsilieka, tačiau ir ten matomas augimas dėl investicijų į saulės energijos projektus. Europos Komisija yra numaciusi tikslą iki 2030 m. pasiekti, kad mažiausiai 42,5 % visos ES suvartojamos energijos būtų iš atsinaujinančių šaltinių, o idealus siekis – 45 %. Šis tikslas yra dalis „Europos žaliojo kurso“, kurio pagrindinis siekis – iki 2050 metų tapti klimatui neutraliu žemynu. Atsižvelgiant į dabartines tendencijas, pasiekti šiuos tikslus bus įmanoma tik užtikrinus spartų AES diegimą visuose sektoriuose – tiek elektros gamyboje, tiek šildymo, vėsinimo, transporto srityse. Tolesnis augimas bus susijęs su iššūkiiais, tokiais kaip energijos kaupimo sprendimų integracija, infrastruktūros modernizavimas bei efektyvesnis tinklų valdymas, kad būtų galima užtikrinti tiekimo patikimumą net ir esant aukštam atsinaujinančių šaltinių kintamumui. [17]



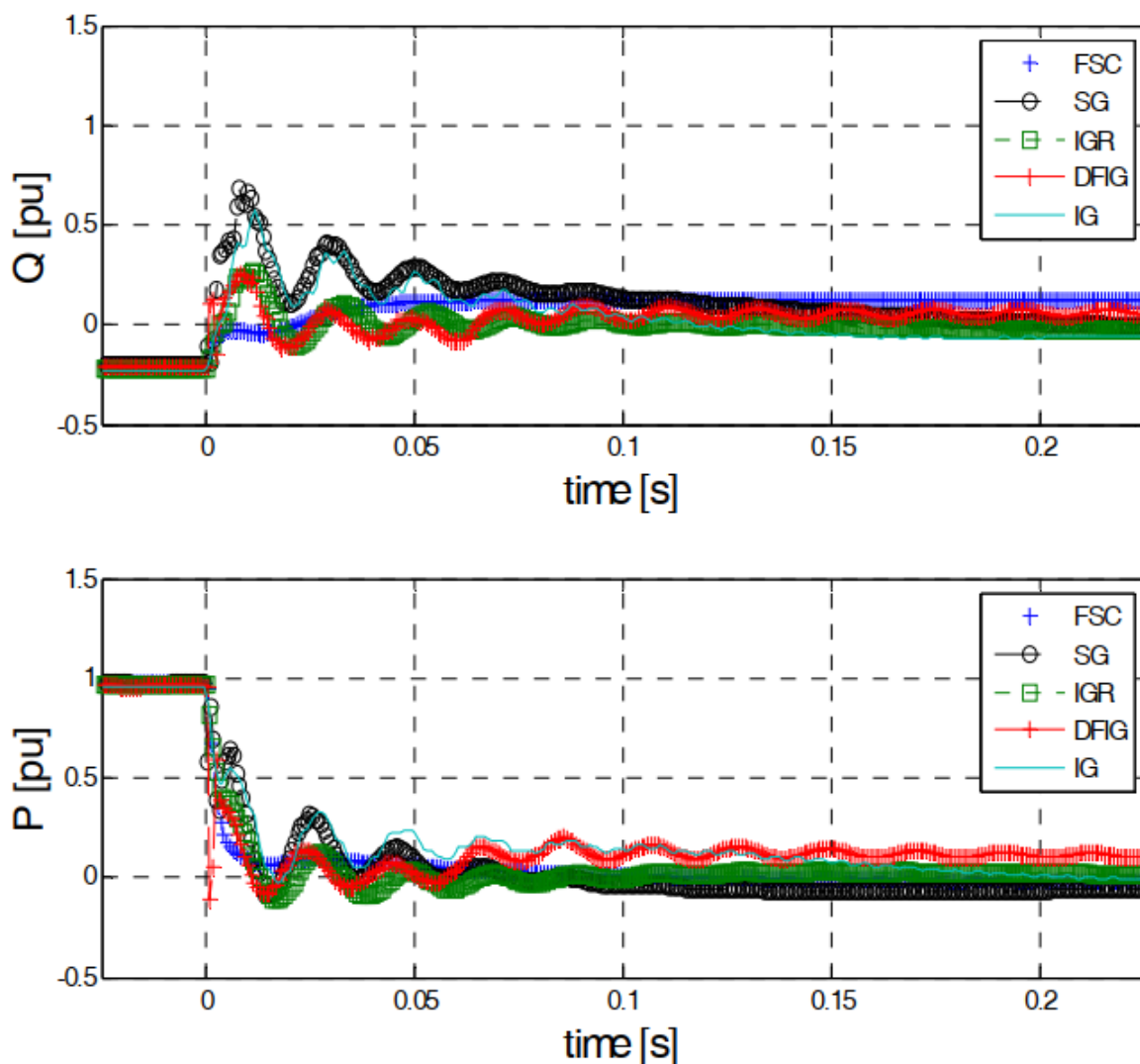
5 pav. Atsinaujinančių energijos šaltinių gaminama elektros energijos dalis Europoje. [17]

Šios problemos ypač aktualios regionams, turintiems didelę atsinaujinančiosios energijos gamybos dalį – pavyzdžiui, kai kuriose Europos valstybėse, kur atsinaujinančiosios energijos dalis viršija 60–70 %. Mažos inercijos sąlygomis sistemos dažnis gali labai greitai nukrypti nuo nominalios vertės, todėl reikia naujų sprendimų – tokių kaip momentinis rezervas, pažangūs valdikliai bei „virtualios inercijos“ technologijos, kurios gali imituoti sinchroninių mašinų elgseną [12][13]. Taip pat būtina tobulinti dažnio reguliavimo modelius bei realiuoju laiku veikiančias valdymo sistemas, ypač išmaniuosiuose elektros tinkluose. Šiuo tikslu siūlomos įvairios dažnio valdymo schemas, paremtos dirbtiniu intelektu ar adaptyviais algoritmais, kurie gali efektyviai valdyti apkrovų pokyčius esant mažai inercijai [14]. Be to, ENTSO-E 2020 m. ataskaitoje pabrėžiama, jog didelę reikšmę ateities sistemoms turės tinklą formuojantys keitikliai („grid-forming converters“), galintys užtikrinti sisteminių atsparumą dažnio pokyčiams net be tradicinės inercijos [15]. Europos Komisija taip pat numato plataus masto energijos sistemos integravimo strategijas, kurios apima pažangias balansavimo ir sinchronizavimo priemones visos Europos mastu [16].

2. Metodinė dalis

2.1. Vėjo turbinų poveikis elektros sistemos stabilumui

Skirtingų tipų vėjo turbinos turi nevienodą poveikį elektros sistemos stabilumui, ypač didelio atsinaujinančios energijos įsiskverbimo sąlygomis. Tradicinės pastovaus greičio vėjo jėgainės, dažnai naudojančios narvelinius asinchroninius generatorius, yra paprastos konstrukcijos ir tiesiogiai sujungtos su elektros tinklu be galios keitiklių. Nors jos yra patikimos ir ekonomiškos, jos nesugeba valdyti reaktyviosios galios ir reaguoti į tinklo dažnio pokyčius, todėl nesugeba prisidėti prie sistemos stabilizavimo ekstremaliose situacijose, pavyzdžiui, gedimo metu ar staigiai pasikeitus apkrovai [20]. Kintamo greičio vėjo turbinos su dvigubos maitinimo asinchroniniais generatoriais (DFIG) suteikia daug didesnes galimybes prisidėti prie elektros tinklo stabilumo. Jos yra prijungtos prie tinklo per dalinius keitiklius, kurie leidžia valdyti reaktyviąją galią ir ribotai prisidėti prie dažnio stabilumo. Tačiau tokios sistemos yra jautresnės gedimams tinkle ir dažnai reikalauja papildomos apsaugos ar valdymo strategijų, kad būtų užtikrintas stabilus veikimas esant trikdžiams. Dėl dalinės keitiklio topologijos DFIG sistemos negali visiškai kontroliuoti į tinklą patenkančių elektros parametrų, todėl, nors ir patobulintos, jos vis dar kelia iššūkių tinklo operatoriams [20]. Moderniausios vėjo jėgainės naudoja pilno keitiklio sprendimus, dažnai su nuolatinės srovės sinchroniniais generatoriais (PMSG), kurie leidžia visiškai valdyti aktyviąją ir reaktyviąją galią bei atjungti generatorių nuo tinklo elektriniu požiūriu. Tokie sprendimai leidžia simuliuoti sistemos inerciją – vadinamąją „virtualią inerciją“ – per pažangius valdiklius. Tokiu būdu šios turbinos gali teikti sisteminės paslaugas, kurios anksčiau buvo būdingos tik sinchroniniams generatoriams. Be to, pilni keitikliai leidžia vėjo turbinoms dalyvauti dažnio stabilizavimo procese per vadinamąsias „fast frequency response“ (FFR) strategijas, kurios tampa ypač svarbios mažos inercijos sistemose [21]. Taip pat svarbu pažymėti, kad kiekvienas turbino tipas turi skirtingą elgseną trumpojo jungimo metu. Pavyzdžiui, asinchroniniai generatoriai sukelia staigų srovės šuolį, tuo tarpu keitikliais valdomi generatoriai turi ribotą trumpojo jungimo srovę, kuri priklauso nuo keitiklio galios ir valdymo strategijų. Ši savybė daro įtaką apsaugos sistemų veikimui, kadangi klasikinės apsaugos schemas, paremtos trumpojo jungimo srovės dydžiu, gali netinkamai veikti tokiose sąlygose [21].



6 pav. Skirtingų vėjo elektrinių tipų aktyvioji ir reaktyvioji galios P ir Q pagrindiniuose prijungimo taškuose santykiniais vienetais. [21]

Apibendrinant, vėjo turbinų technologijų raida nuo paprastų asinchroninių sistemų iki pažangių pilno keitiklio sprendimų leidžia šiems įrenginiams vis aktyviau prisidėti prie elektros sistemos stabilumo užtikrinimo. Vis dėlto, siekiant užtikrinti tinkamą sistemos elgseną esant aukštai vėjo energijos išsiskverbimo daliai, būtina tinkamai pasirinkti ir integruoti šiuos įrenginius į sistemą, atsižvelgiant į jų technologines savybes, valdymo galimybes ir poveikį tiek pereinamajam, tiek dažnio stabilumui.

2.2. Pagrindinės stabilumo rūšys

Inercinis palaikymas ir tinklo stabilumas: tradicinės energijos sistemos remiasi inercija, kurią suteikia besisukančių sinchroninių generatorių masės, kad išlaikytų dažnio stabilumą. Tačiau atsinaujinantiems energijos šaltiniams, tokiems kaip vėjas ir saulė, šios inercijos trūksta. Tyrime pabrėžiamas sintetinės, dirbtinės inercijos ir kitų paramos mechanizmų poreikis užtikrinti tinklo stabilumą. AEI kintamumas ir pertraukiamumas: dėl atsinaujinantiems energijos šaltiniams būdingo kintamumo ir pertrūkių gali atsirasti dažnio nukrypimų, todėl gali būti sudėtinga suderinti pasiūlą ir paklausą realiu laiku [22]. Tyrimas tiria, kaip šie svyravimai veikia tinklo stabilumą, ir tiria būdus, kaip sušvelninti jų poveikį. Siekiant išspręsti AEI integravimo iššūkius, tyrime nagrinėjamos įvairios

pažangios valdymo strategijos. Tai apima greito veikimo galios elektronikos naudojimą, reaguojimą į paklausą ir patobulintus tinklo valdymo metodus dažniui stabilizuoti. [24] Atsinaujinančių energijos šaltinių (AEI) integravimo į išmaniuosius tinklus poveikis. Siekiant padidinti tinklo stabilumą, efektyvumą ir tvarumą, pagrindiniai pokyčiai apima išplėstinę matavimo infrastruktūrą, kuri leidžia stebėti ir valdyti energijos suvartojimą realiu laiku, bei paklausos ir atsako programas, kurios subalansuoja energijos pasiūlą ir paklausą. Energijos kaupimo sistemos, tokios kaip baterijos ir hidroakumuliacinės talpyklos, mažina AEI pertrūkius, kaupdamos perteklinę energiją piko metu. Pažangios tinklo valdymo ir automatizavimo technologijos padeda valdyti sudėtingą tinklų dinamiką, o paskirstytų energijos išteklių integravimas, įskaitant mažo masto saulės baterijas ir vėjo turbinas, užtikrina vietinę gamybą ir sumažina perdavimo nuostolius. Straipsnyje nagrinėjami AEI integravimo iššūkiai, tokie kaip nepastovumas ir kintamumas. [23] AEI integravimas žymiai sumažina sistemos inerciją, todėl po trikdžių dažnis nukrypsta greičiau. Tyrimas kiekybiškai įvertina reikalingą papildomą inercinę paramą, naudojant sintetinę inerciją iš galios elektroninių prietaisų ir greitą dažnio atsaką iš energijos kaupimo sistemų. Modeliuojant tiriamas elektros tinklo dažnio atsakas pagal įvairius AEI instaliacijos scenarijus, įvertinant skirtingų inercijos lygių ir inercinių palaikymo mechanizmų poveikį. Keli bandymai atskleidžia tinklo dažnio jautrumą inercijos pokyčiams ir nustato kritines ribas, kuriose būtina papildoma pagalba tinklo stabilizavimui. Analizė nustato specifinius AE instaliavimo lygius, kuriems esant tradiciniai dažnio valdymo mechanizmai yra netinkami, todėl reikia sustiprinti inercinę paramą. [25]

2.3. Pagrindinės stabilumo rūšys

Stabilumo rūšys skirstomos į tris pagrindines kategorijas: Rotoriaus kampo stabilumas, įtampos stabilumas, dažnio stabilumas.

2.3.1. Rotoriaus kampo stabilumo sąvoka

Rotoriaus kampo stabilumas yra vienas pagrindinių elektros energijos sistemų stabilumo aspektų, apibūdinantis sinchroninių generatorių gebėjimą išlaikyti sinchronizmą po įvairių trikdžių [1]. Tai itin svarbu siekiant išlaikyti sistemos patikimumą ir užtikrinti nepertraukiamą elektros energijos tiekimą. Sistemos nestabilumas gali sukelti elektros energijos tiekimo sutrikimus ir net didelio masto elektros energijos tiekimo avarijas [7].

2.3.2. Rotoriaus kampo stabilumo klasifikacija

Remiantis elektros energijos sistemų stabilumo klasifikacija, rotoriaus kampo stabilumas skirstomas į dvi pagrindines kategorijas:

Pereinamasis stabilumas (*transient stability*)

Smulkių signalų stabilumas (*small-signal stability*).

Abi šios stabilumo rūšys yra svarbios vertinant generatorių veikimą ir bendrą elektros energijos sistemos patikimumą.

2.3.3. Pareinamojo stabilumo samprata

Pareinamasis stabilumas apibrėžia elektros energijos sistemos gebėjimą išlaikyti sinchronizmą po staigių ir stiprių trikdžių, tokių kaip:

Trumpieji jungimai elektros tinkle;
Linijų ir transformatorių atjungimai;
Dideli apkrovos pokyčiai;
Stiprios dažnio svyravimo bangos.

Pereinamojo stabilumo analizė paprastai atliekama per trumpus laiko intervalus (iki 10 sekundžių), siekiant įvertinti sistemos reakciją į staigius trikdžius [1].

2.3.4. Matematinis pereinamojo stabilumo modeliavimas

Pereinamasis stabilumas dažniausiai analizuojamas naudojant lyginamąją kampo metodiką. Ji grindžiama generatoriaus kinetinės ir potencialiosios energijos pokyčiais esant trikdžiui.

Sistema laikoma stabili, jei sukimo momento (T_m) ir elektromechaninio momento (T_e) skirtumas po trikdžio sugrąžina rotoriaus kampą į pusiausvyros būseną [7]:

$$\Delta\theta = \int_{\theta_0}^{\theta} (T_m - T_e) d\theta; \quad (1)$$

kur:

$\Delta\theta$ – rotoriaus kampo poslinkis,

T_m – mechaninis sukimo momentas,

T_e – elektromagnetinis sukimo momentas.

Jei per integravimo periodą plotas po energijos kreivės neigiamas, sistema grįžta į sinchronizmą, jei teigiamas – sistema tampa nestabili ir generatorius gali atsijungti nuo tinklo [1].

2.3.5. Pereinamojo stabilumo didinimo metodai

Siekiant pagerinti pereinamąjį stabilumą, taikomi šie metodai:

Automatinės įtampos reguliavimo sistemos (AVR) – padidina generatorių reakcijos greitį į įtampos pokyčius [5];

Perjungimo greičio optimizavimas – leidžia greičiau pašalinti trumpuosius jungimus [6];

Galios sistemos stabilizatoriai (PSS) – sumažina mechaninius generatoriaus svyravimus [7].

2.3.6. Smulkių signalų stabilumas, apibrėžimas ir priežastys

Smulkių signalų stabilumas apibrėžia sistemos gebėjimą išlikti sinchronizuotai po mažų trikdžių, tokių kaip:

Nedideli apkrovos pokyčiai;

Įtampos ar dažnio svyravimai;

Reaktyviosios galios srautų pokyčiai [3].

Maži trikdžiai gali sukelti negesinamus svyravimus, kurie ilgainiui lemia sistemos nestabilumą.

2.3.7. Matematinis modeliavimas

Smulkių signalų stabilumo analizė atliekama naudojant linijinius modelius, paremtus generatoriaus svyravimų diferencialinėmis lygtimis:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} + K\delta = 0; \quad (2)$$

kur:

M – generatoriaus inercijos konstanta,

D – slopinimo konstanta,

K – sinchronizavimo koeficientas,

δ – rotoriaus kampas.

Jei D per mažas, svyravimai gali tapti **nestabilūs**, o sistema – prarasti sinchronizmą [7].

2.3.8. Stabilumo gerinimo metodai

Galios sistemos stabilizatoriai (PSS) – padidina svyravimų slopinimą [7];

Įtampos reguliavimo sistemos – stabilizuoja įtampos ir galios srautus [5];

Valdomos serijos kompensacijos (TCSC, SSSC) – reguliuoja reaktyviosios galios srautus [6].

2.3.9. Praktiniai pavyzdžiai ir sistemų analizė

2003 m. Šiaurės Amerikos elektros tinklo avarija - 2003 m. rugpjūčio 14 d. įvykusi viena didžiausių elektros tinklo avarių istorijoje parodė, kaip svarbu užtikrinti tinkamą rotoriaus kampo stabilumą. Trikdžiai Ohajo valstijoje sukėlė generatorių sinchronizmo praradimą, kas galiausiai lėmė didelio masto elektros tiekimo sutrikimus visoje JAV ir Kanadoje [2].

Europos elektros sistemos stabilumo analizė - Europos elektros energijos sistemoje pereinamasis stabilumas nuolat vertinamas naudojant realaus laiko stebėsenos sistemas (*Wide-Area Monitoring Systems* – WAMS), leidžiančias išvengti sinchronizmo praradimo po didelių tinklo trikdžių [1].

Rotoriaus kampo stabilumas yra kritinis elektros energijos sistemų patikimumo aspektas. Jo išlaikymas reikalauja tiek tinkamos sistemos projektavimo, tiek aktyvios stebėsenos bei modernių stabilumo užtikrinimo priemonių. Geresnis pereinamojo ir smulkių signalų stabilumo supratimas leidžia efektyviai valdyti elektros tinklą ir išvengti didelio masto sutrikimų.

2.4. Įtampos stabilumas

Įtampos stabilumas yra vienas pagrindinių elektros energijos sistemų stabilumo aspektų, apibūdinantis sistemos gebėjimą palaikyti leistinas įtampos reikšmes tiek normaliomis, tiek trikdžių sąlygomis [1]. Įtampos stabilumas yra tiesiogiai susijęs su reaktyviosios galios balansu, tinklo konfigūracija bei apkrovos elgsena. Sistemos nestabilumas gali sukelti įtampos nuosmukius, plačiai paplitusius elektros energijos tiekimo sutrikimus ir net didelio masto elektros energijos tinklo avarijas [2].

2.4.1. Įtampos stabilumo klasifikacija

Įtampos stabilumas skirstomas į šias kategorijas:

- Smulkių trikdžių įtampos stabilumas (*small-disturbance voltage stability*);
- Didelių trikdžių įtampos stabilumas (*large-disturbance voltage stability*) [1].

Kiekviena iš šių stabilumo rūšių yra svarbi vertinant sistemos patikimumą ir atsparumą trikdžiams.

2.4.2. Smulkių trikdžių įtampos stabilumo apibrėžimas ir pagrindinės priežastys

Smulkių trikdžių įtampos stabilumas apibrėžia sistemos gebėjimą palaikyti stabilias įtampos reikšmes esant nedideliems apkrovos pokyčiams arba sisteminiams trikdžiams. Jo nestabilumas gali kilti dėl šių priežasčių:

- Nepakankamo reaktyviosios galios palaikymo;
- Didelio impedanso elektros perdavimo linijų;
- Netinkamai sureguliuotų transformatorių ir kompensacinių įrenginių [3].

2.4.3. Matematinė analizė

Smulkių trikdžių įtampos stabilumas dažnai vertinamas naudojant P/Q-V charakteristikas ir Jacobi matricos analizę:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{\Delta Q}{\Delta V}; \quad (3)$$

kur:

- ΔQ – reaktyviosios galios pokytis,
- ΔV – įtampos pokytis.

Jei $\frac{\partial Q}{\partial V} > 0$, sistema yra įtampos stabilumo būsenoje; jei $\frac{\partial Q}{\partial V} < 0$, įtampos stabilumas yra pažeistas [2].

2.4.4. Stabilumo didinimo metodai

- Automatinės įtampos reguliavimo sistemos (AVR) – užtikrina greitą įtampos korekciją [5];
- Reaktyviosios galios kompensavimas (STATCOM, SVC, kondensatorių baterijos) – padidina sistemos stabilumą [6];
- Transformatorių apkrovos reguliavimo įtaisai (ULTC) – reguliuoja įtampą keičiant transformatoriaus apvijų santykį [7].

2.4.5. Didelių trikdžių įtampos stabilumo apibrėžimas ir pagrindinės priežastys

Didelių trikdžių įtampos stabilumas apibrėžia sistemos gebėjimą atlaikyti didelius įtampos sutrikimus, tokius kaip:

- Trumpieji jungimai;
- Elektros linijų ir transformatorių atjungimai;
- Dideli apkrovos svyravimai [1].

2.4.6. Nestabilumo mechanizmai

Įtampos nestabilumas gali pasireikšti kaip:

- Laipsniškas įtampos kritimas – dėl nepakankamo reaktyviosios galios palaikymo [2];
- Dinaminis įtampos kritimas – kai įtampa krinta per greitai ir sistema nebegali atsistatyti [3].

2.4.7. Stabilumo didinimo metodai

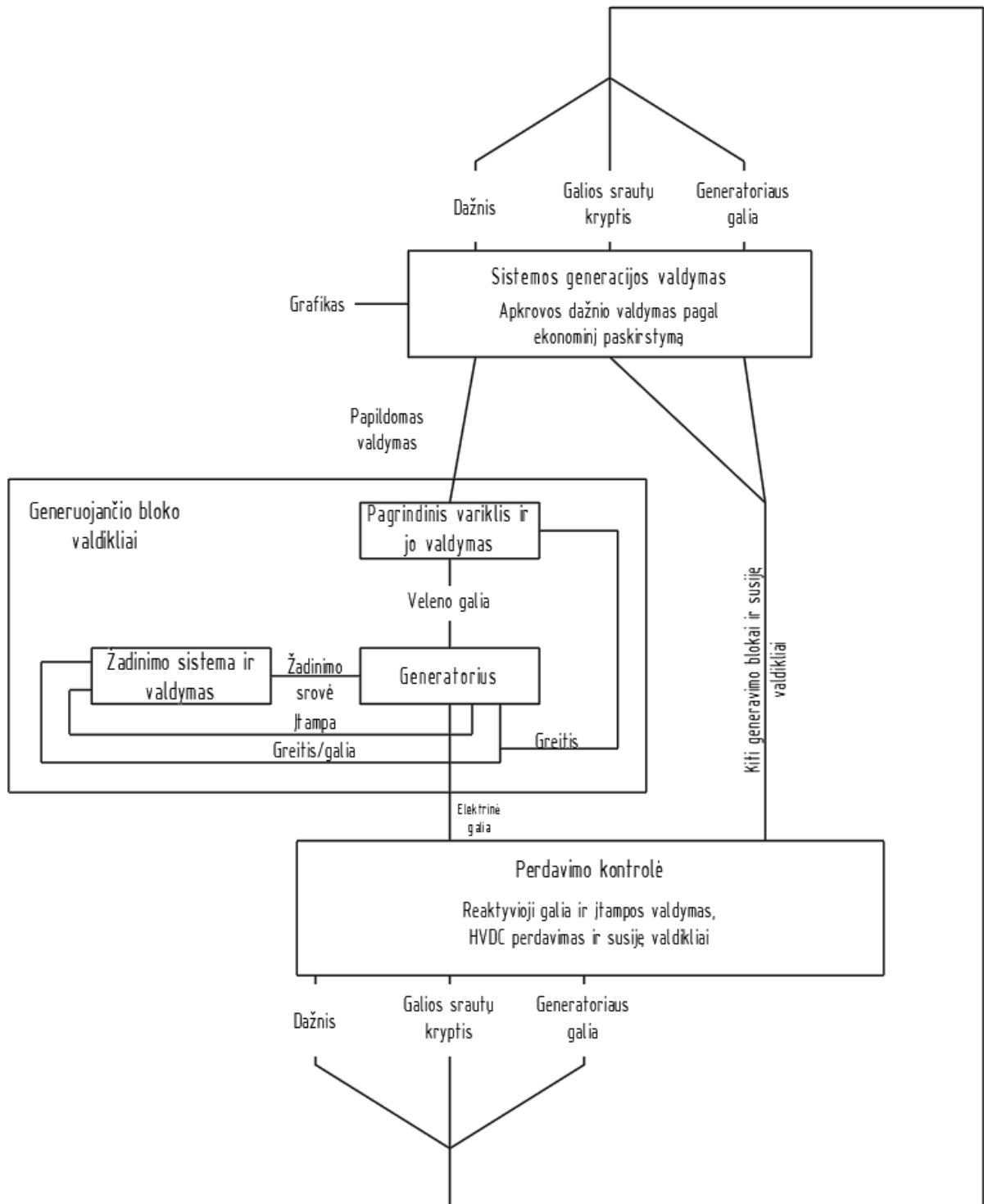
- Sistemos reaktyviosios galios rezervo didinimas – užtikrina tinkamą Q balansą [5];
- Perjungimo ir apsaugos sistemų optimizavimas – leidžia greičiau pašalinti trikdžius [6];
- Išmaniųjų elektros tinklų sprendimai (FACTS, HVDC technologijos) – padeda stabilizuoti įtampą [7].

Įtampos stabilumas yra esminis elektros sistemų patikimumo aspektas. Tiek smulkių, tiek didelių trikdžių stabilumo užtikrinimas reikalauja kompleksinių sprendimų – nuo reaktyviosios galios valdymo iki išmaniųjų elektros tinklų technologijų taikymo. Efektyvus stabilumo palaikymas leidžia išvengti didelių elektros energijos tiekimo sutrikimų ir užtikrinti saugų elektros tinklų veikimą.

2.5. Dažnio stabilumas

Dažnio stabilumas yra vienas svarbiausių elektros energijos sistemų stabilumo aspektų, apibūdinantis sistemos gebėjimą palaikyti nominalų dažnį po trikdžių. Elektros sistemos dažnis tiesiogiai priklauso nuo aktyviosios galios balanso tarp gamybos ir vartojimo. Jei generuojama galia viršija vartojimą, dažnis kyla, o jei gamyba mažesnė už paklausą – dažnis krenta [1].

Dažnio nestabilumas gali sukelti rimtus elektros sistemos veikimo sutrikimus, įskaitant sinchroninių generatorių išsiderinimą, linijų ir įrenginių išjungimus bei grandininis atsijungimus, kurie gali baigtis regioniniais ar net sisteminiiais elektros tiekimo sutrikimais [2].



7 pav. Dažnio ir galios valdymo hierarchija elektros energetikos sistemoje. [1]

2.6. Dažnio stabilumo klasifikacija

Dažnio stabilumas dažniausiai skirstomas į šias kategorijas:

- Trumpalaikis dažnio stabilumas (*short-term frequency stability*);
- Ilgalaikis dažnio stabilumas (*long-term frequency stability*) [3].

2.6.1. Trumpalaikis dažnio stabilumo apibrėžimas ir pagrindinės priežastys

Trumpalaikis dažnio stabilumas apibrėžia sistemos gebėjimą atsigauti po staigių generavimo ar apkrovos pokyčių per pirmąsias kelias sekundes po trikdžio. Pagrindinės nestabilumo priežastys:

- Dideli generavimo pajėgumo nuostoliai;
- Staigus apkrovos padidėjimas;
- Elektros linijų atjungimai, sutrikdantys galios srautą [4].

2.6.2. Sistemos atsakas į dažnio pokyčius

Trumpalaikis dažnio stabilumas priklauso nuo sistemos inercijos bei pirminio dažnio reguliavimo mechanizmų:

- Inercinė reakcija – pirmasis atsakas į dažnio pokytį, priklausantis nuo sinchroninių generatorių kinetinės energijos [5];
- Pirminė dažnio reguliavimo sistema – automatizuoti valdymo mechanizmai, veikiantys per kelias sekundes ir stabilizuojantys dažnį [6].

Matematinis dažnio dinamikos modelis gali būti išreiškiamas taip:

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{1}{2H} (P_{gen} - P_{load} - P_{loss}); \quad (4)$$

kur:

- H – sistemos inercijos konstanta,
- P_{gen} – generuojama aktyvioji galia,
- P_{load} – vartojama aktyvioji galia,
- P_{loss} – perdavimo nuostoliai [2].

2.6.3. Stabilumo gerinimo metodai

- Didinant sistemos inerciją – naudojant didelės inercijos generatorius arba dirbtinius inercijos sprendimus (pvz., „virtualią inerciją“) [5];
- Gerinant pirminę dažnio kontrolę – optimizuojant garo ir dujų turbinų reakciją į dažnio pokyčius [6];
- Greitai aktyvuojamos atsarginės galios naudojimas – pvz., akumuliatorių energijos kaupimo sistemos (*Battery Energy Storage Systems – BESS*) gali greitai suteikti trūkstamą galią [7].

2.6.4. Ilgalaikio dažnio stabilumo apibrėžimas ir pagrindinės priežastys

Ilgalaikis dažnio stabilumas apibrėžia sistemos gebėjimą išlaikyti dažnį priimtinosiose ribose po didelių galios disbalansų, kurie trunka minutes ar net valandas. Pagrindinės priežastys:

- Reikšmingi generavimo nuostoliai (pvz., didelės jėgainės atsijungimas);
- Ilgalaikis apkrovos augimas be atitinkamo generavimo didinimo;
- Nepakankamos rezervinės galios išteklių strategijos [1].

2.6.5. Sistemos atsakas į ilgalaikius dažnio pokyčius

Ilgalaikio dažnio stabilumo užtikrinimui svarbūs šie mechanizmai:

- Antrinė dažnio kontrolė – automatiniai reguliatoriai, veikiantys per kelias minutes ir gražinantys dažnį į nominalią reikšmę [3];
- Tretinė dažnio kontrolė – operatorių vykdomos intervencijos, keičiant generavimo režimus [4];
- Sistemos atsarginiai pajėgumai – rezerve laikomi gamybos pajėgumai, naudojami esant kritinėms situacijoms [6].

Matematinis ilgalaikio dažnio stabilumo vertinimas dažnai atliekamas naudojant diferencialines lygtis, įvertinančias sistemos valdymo mechanizmų reakciją į ilgalaikį galios deficitą [5].

2.6.6. Stabilumo gerinimo metodai

- Rezervinės galios planavimas – užtikrinant pakankamą rezervą tiek reguliuojamuose šaltiniuose (pvz., hidroelektrinėse), tiek kaupimo sistemose (pvz., baterijose) [6];
- Tinklo perkrovų valdymas – optimizuojant galios srautus ir mažinant perdavimo linijų perkrovas [7];
- Atnaujintų technologijų diegimas – naudojant išmaniąsias valdymo sistemas ir atsinaujinančius energijos šaltinius su dažnio valdymo galimybėmis [3].

Dažnio stabilumas yra kritinis elektros energijos sistemų patikimumo elementas. Tiek trumpalaikiai, tiek ilgalaikiai dažnio svyravimai turi būti efektyviai kontroliuojami naudojant tinkamas technologijas, rezervinius pajėgumus ir išmaniąsias valdymo strategijas. Tinkamai valdoma dažnio stabilumo sistema leidžia išvengti didelių elektros energijos tiekimo sutrikimų ir užtikrina sistemos saugumą bei efektyvumą.

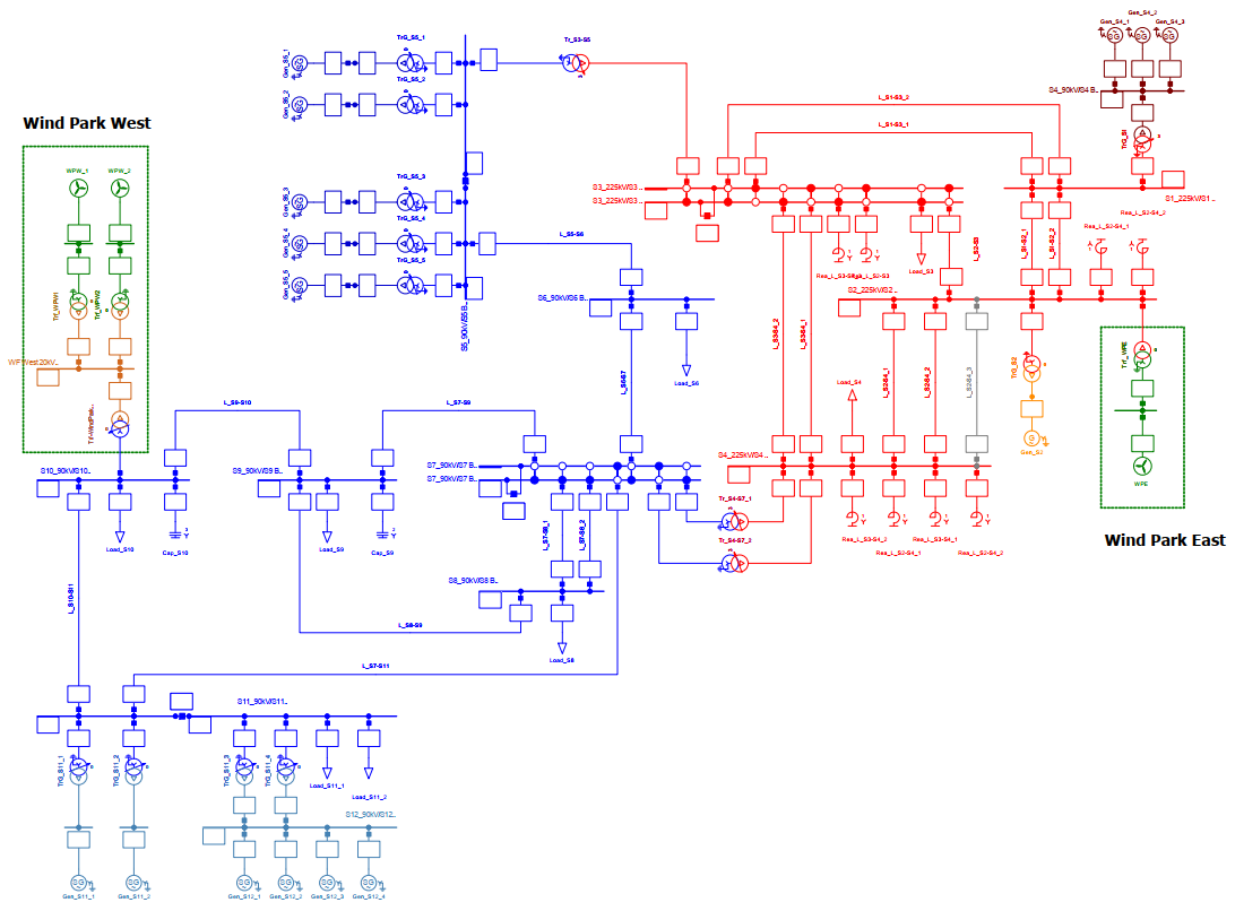
3. Modelio aprašymas

3.1. Programinės įrangos aprašymas

DIgSILENT PowerFactory yra pirmaujanti elektros energijos sistemų analizės programinė įranga, plačiai naudojama moksliniuose tyrimuose ir pramonėje elektros energijos sistemų modeliavimui ir analizei. Ji siūlo platų įrankių rinkinį įvairiems tyrimams, įskaitant apkrovos srautų, trumpųjų jungimų, stabilumo ir elektromagnetinių pereinamųjų procesų analizę. Pagrindinės šio tyrimo ypatybės apima išsamų atsinaujinančių energijos šaltinių, pvz., vėjo turbinų ir saulės modulių modeliavimą, skirtą dažnio stabilumui tirti, apkrovos srauto analizę, skirtą pastovaus veikimo našumui įvertinti, taip pat vertinti išmaniuosius tinklus. Patogus programinės įrangos valdymas, didelės bibliotekos ir įvairių scenarijų sudarymo galimybės daro ją tinkama kuriant ir modifikuojant sudėtingus maitinimo sistemų modelius. Šiame tyrime „PowerFactory“ bus naudojama kuriant detalius elektros perdavimo tinklo modelius, atliekant modeliavimą pagal skirtingus atsinaujinančios energijos scenarijus.

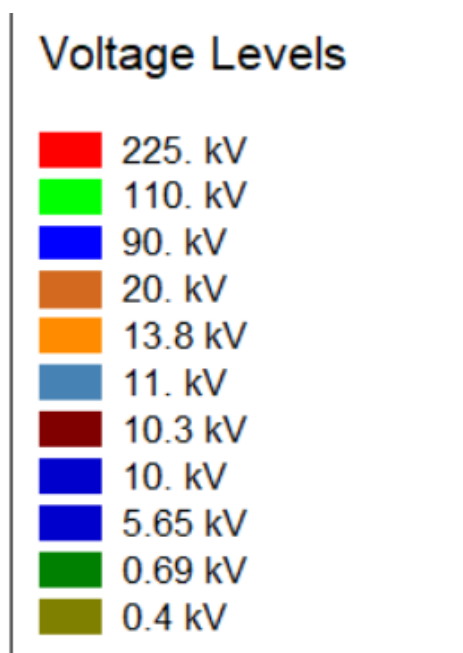
3.2. Tiriamojo objekto aprašymas

Tyrimui atlikti buvo pasirinktas standartinis „Transmission system“, lietuviškai elektros perdavimo sistema, modelis, pateiktas DIgSILENT PowerFactory programinėje įrangoje.



8 pav. „Elektros perdavimo sistemos“ vienlinijinė schema.

Šį modelį sudaro 21 šynų sekcija, 16 generatorių sistemų, 18 transformatorių sistemų, 8 šunto reaktorių sistemos, 2 kondensatorių sistemos, kabelių ir oro linijos jungiančios įrangą ir atskiras šynas, 2 vėjo elektrinių parkai, kurie sudaryti iš 3 vėjo elektrinių grupių. Tinklo dažnis nustatytas 60 Hz. Modelyje naudojami 225 kV, 110 kV, 90 kV, 20 kV ir t.t įtampos lygiai.

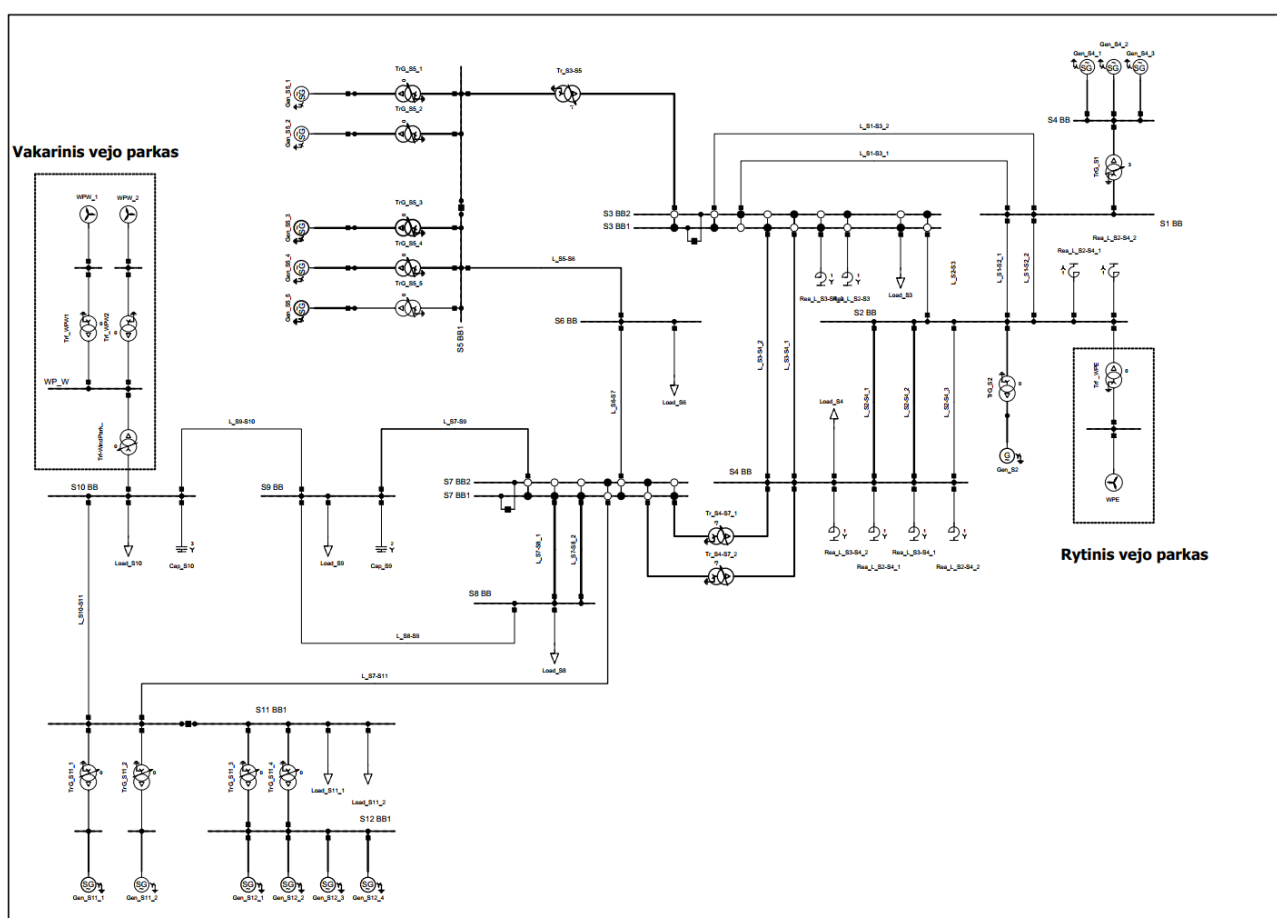


9 pav. „Elektros perdavimo sistemos“ modelyje naudojami įtampos lygiai.

Šios įtampos ir naudojamos kai kuriose Europos šalyse, taip pat kai kuriose Pietų Amerikos šalyse. Tačiau ne visos šios reikšmės yra naudojamos kaip standartinės Lietuvoje.

4. Tyrimo rezultatai

Tyrimui atlikti pradinis tinklo modelis buvo modifikuojamas, siekiant jį pritaikyti prie standartinės Lietuvos elektros energetikos sistemos struktūros. Modeliavimas buvo vykdomas naudojant DIgSILENT PowerFactory aplinką. „Transmission system“ lietuviškai elektros perdavimo sistema, sistemos modelis, naudojamas kaip bazinis modelis. Modelyje pakeistos įtampos į standartines, 330 kV, 110 kV, 35 kV, 30 kV, 10 kV, 0,4 kV Lietuvoje naudojamas reikšmes. Pakeistas sistemos dažnis iš 60 Hz į 50 Hz, kad atitiktų. Modifikuoti esami generatoriai, kad jie labiau atitiktų Lietuvoje naudojamų elektrinių charakteristikas. Ypatingas dėmesys buvo skiriamas perdavimo tinklo elementų – transformatorių, linijų bei apkrovų – parametrų adaptavimui, kad jie atitiktų regioninius standartus ir eksploatacines sąlygas. Sistemoje buvo atliekami matavimai su skirtingomis atsinaujinančių energijos šaltinių integravimo kiekiais, jų poveikis buvo tiriamas įvairiomis apkrovos sąlygomis, siekiant įvertinti jų įtaką sistemos stabilumui, dažnio palaikymui, įtampų lygiui skirtingose tinklo vietose, bei rotoriaus kampo stabilumą.



10 pav. „Elektros perdavimo sistemos“ vienlinijinė schema pertvarkius įrangos parametrus.

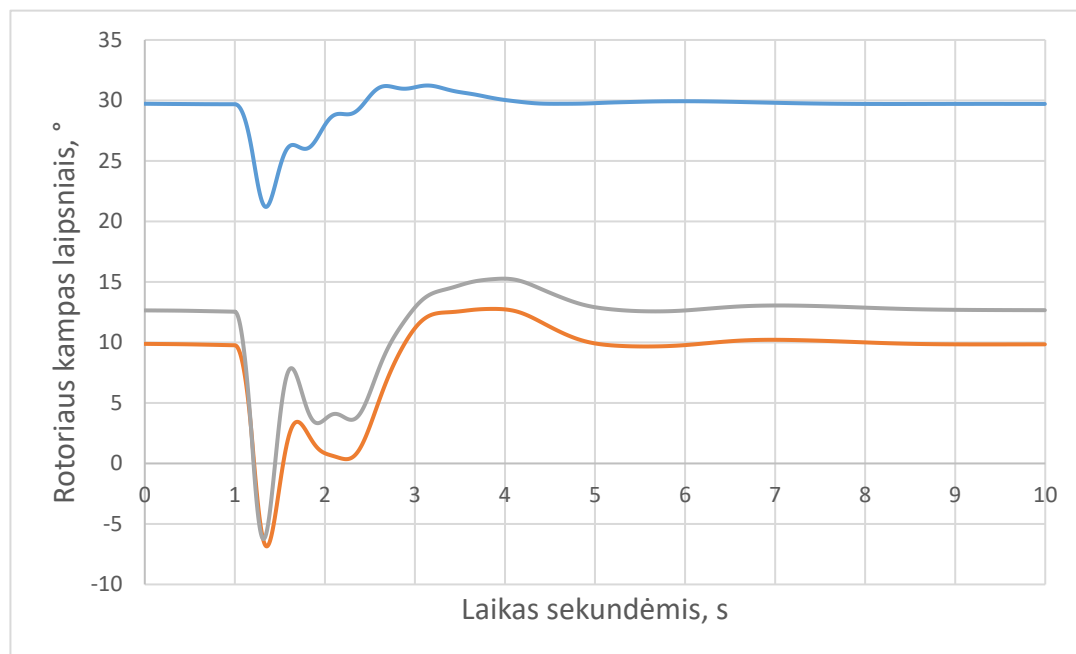
4.1. Elektros perdavimo tinklo stabilumo tyrimas

Pagal Litgrid pateiktus duomenis Lietuvos energetikos sistemoje, bendra elektrinių įrengtoji galia sudaro 7083 MW [26]. Tyrimui atlikti naudojama sistema turi 750 MW instaliuotos galios neatsinaujinančių šaltinių generatorių. Tyrimas bus atliekamas 3-4 skirtingais instaliuotos atsinaujinančios elektros energijos galios scenarijais. Tyrimo metu bus analizuojamas tinklo stabilumas, vertinamas rotoriaus kampo stabilumas, dažnio stabilumas, įtampų lygis ir tinklo

sugebėjimas grįžti į normalų darbo režimą po sutrikimo. Simuliacijos metu įvyks trifazis trumpasis jungimas S10_BB šynose po 1 sekundės, trikdys bus pašalintas po 0,2 sekundžių.

4.2. Pradiniai duomenys, prieš prijungiant vėjo elektrines

Surenkami baziniai tinklo duomenys, prieš prijungiant vėjo parkus.

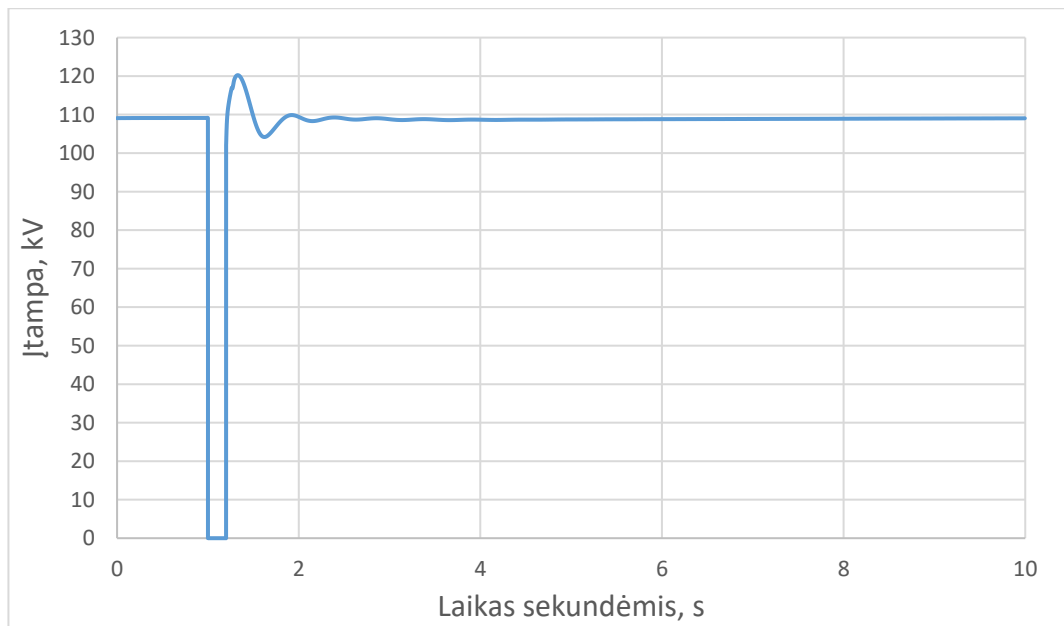


11 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.

1 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo neprijungus vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Generatorių pavadinimai			Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	Gen_S5, °.	Gen_S11, °.	Gen_S12, °.	
Rotoriaus kampas prieš sutrikimą	29,709	12,623	9,871	≈3
Maksimali rotoriaus kampo reikšmė	31,018	15,073	12,760	
Minimali rotoriaus kampo reikšmė	21,203	-4,941	-6,748	

Matome, kad generatoriai gali pakankamai stabiliai susidoroti su trikdžiais tinkle ir greitai grįžti prie pastovaus santykinio kampo.



12 pav. Linijinė įtampa šynose S_10, kV.

2 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo neprijungus vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Šynų įtampa	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	S_10, kV	
Nominali įtampos reikšmė	110	≈3
Maksimali įtampos reikšmė po trikdžio	119,256	
Minimali įtampos reikšmė po trikdžio	104,253	

Įvykus trumpajam jungimui ir gedimui pasišalinus įtampa staigiai pakyla ir greitai stabilizuojasi į nominalią vertę.



13 pav. Sistemos dažnis, Hz.

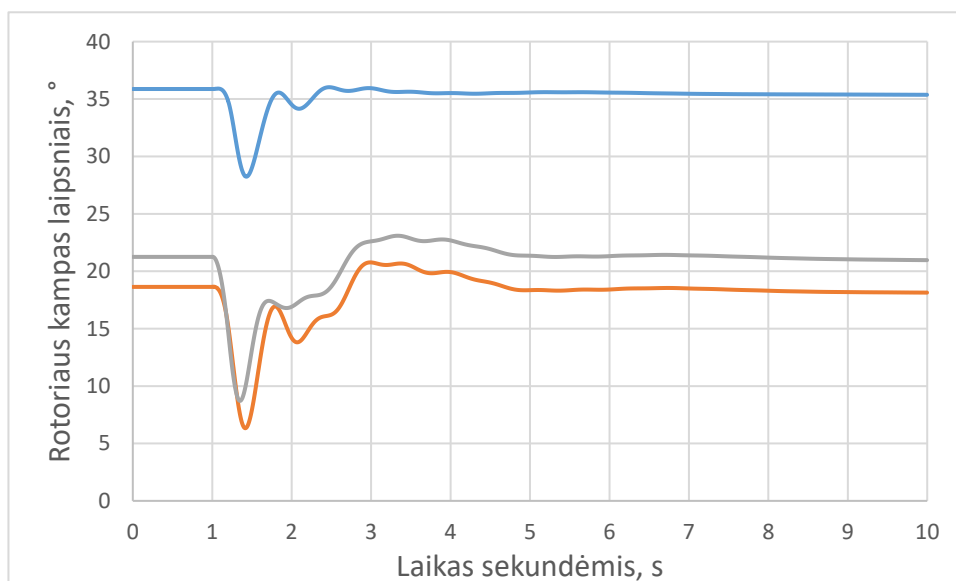
3 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo neprijungus vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Tinklo dažnis, Hz	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
Nominalus tinklo dažnis	50	≈3
Maksimalus tinklo dažnis po trikdžio	50,375	
Minimalus tinklo dažnis po trikdžio	49,954	

Sistemos dažnis po trikdžio mažai svyruoja ir greitai grįžta į nusistovėjusią vertę.

4.3. Prijungus 50 MW galios vėjo jėgainių prie tinklo

Vykdomos simuliacijos prijungus atsinaujinančių elektros energijos šaltinių.

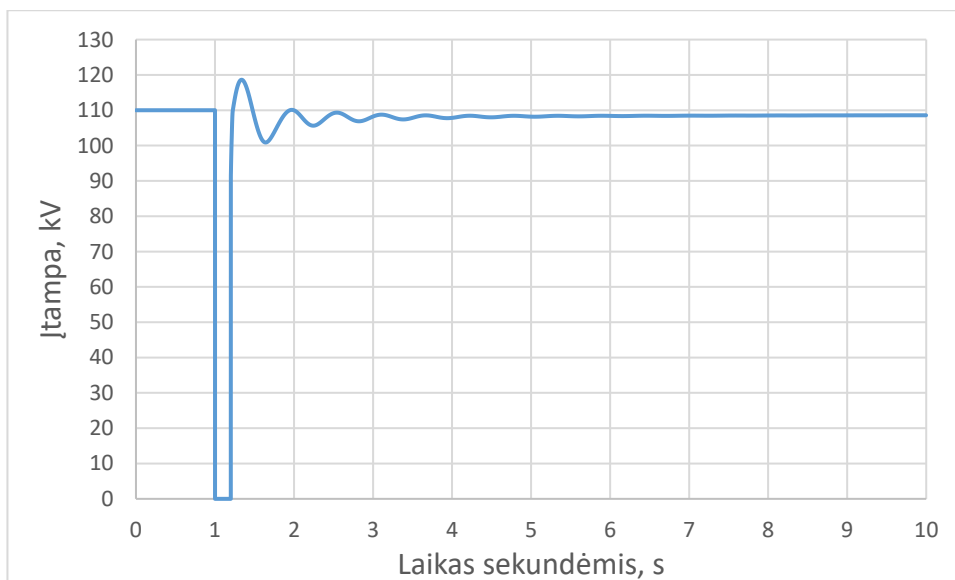


14 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2 prijungus 50 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.

4 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 50 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Generatorių pavadinimai			Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	Gen_S5, °.	Gen_S11, °.	Gen_S12, °.	
Rotoriaus kampas prieš sutrikimą	35,873	21,249	18,637	≈4,5
Maksimali rotoriaus kampo reikšmė	35,900	23,0769	21,334	
Minimali rotoriaus kampo reikšmė	28,265	8,977	6,330	

Prijungus prie tinklo atsinaujinančių energijos šaltinių, matome, kad rotorių kampas taip pat pasikeitė ir pasiūalinus trikdžiui jų kampo charakteristikos svyruoja labiau.

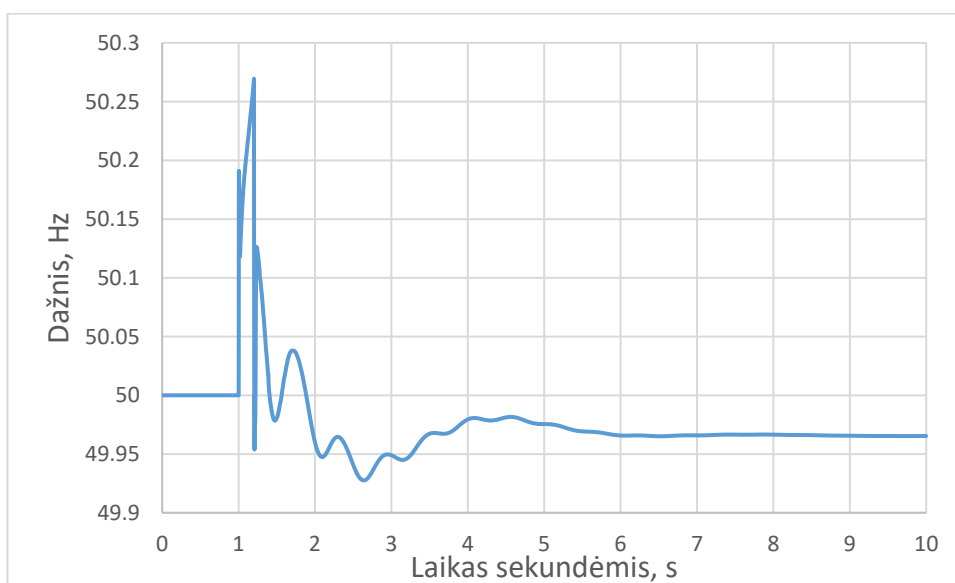


15 pav. Linijinė įtampa šynose S₁₀ prijungus 50 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, kV.

5 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 50 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Šynų įtampa	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	S ₁₀ , kV	
Nominali įtampos reikšmė	110	≈4,5
Maksimali įtampos reikšmė po trikdžio	118,584	
Minimali įtampos reikšmė po trikdžio	101,095	

Įtampai reikia daugiau laiko grįžti prie nominalios vertės.



16 pav. Sistemos dažnis prijungus 50 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, Hz.

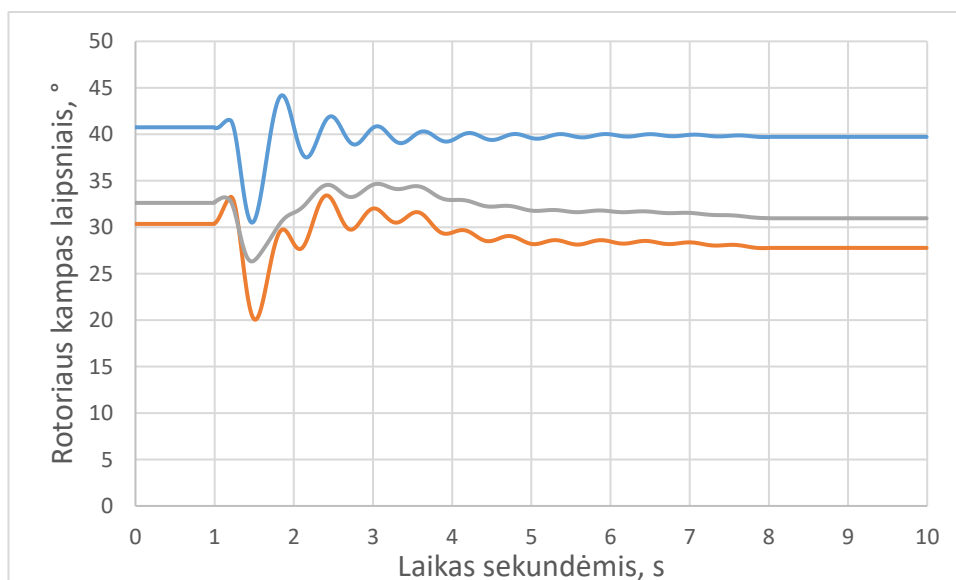
6 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 50 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Tinklo dažnis, Hz	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
Nominalus tinklo dažnis	50	≈4,5
Maksimalus tinklo dažnis po trikdžio	50,253	
Minimalus tinklo dažnis po trikdžio	49,953	

Dažnio svyravimai po trumpo jungimo trunka ilgiau.

4.4. Prijungus 100 MW galios vėjo jėgainių prie tinklo

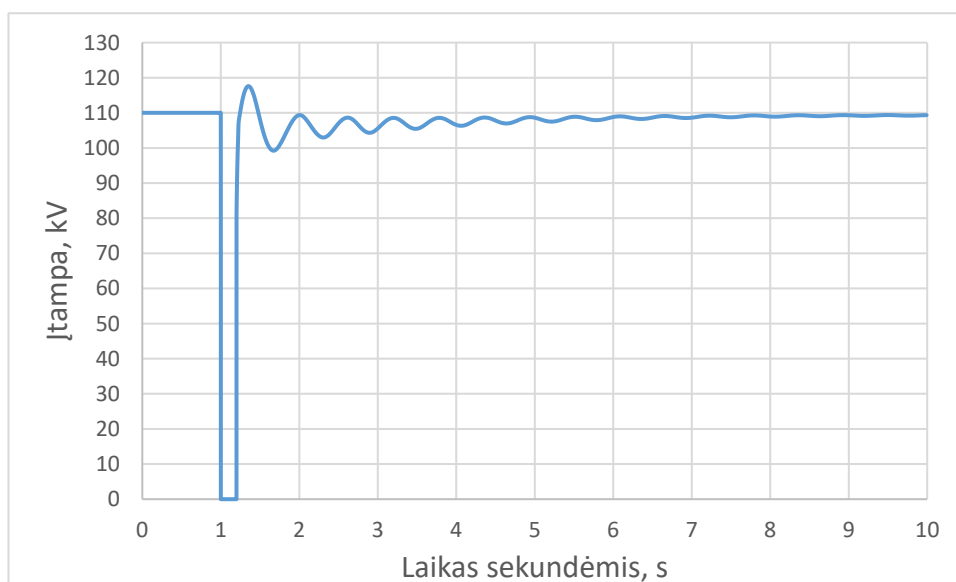
Vykdomos simuliacijos prijungus atsinaujinančių elektros energijos šaltinių.



17 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2 prijungus 100 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.

7 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 100 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

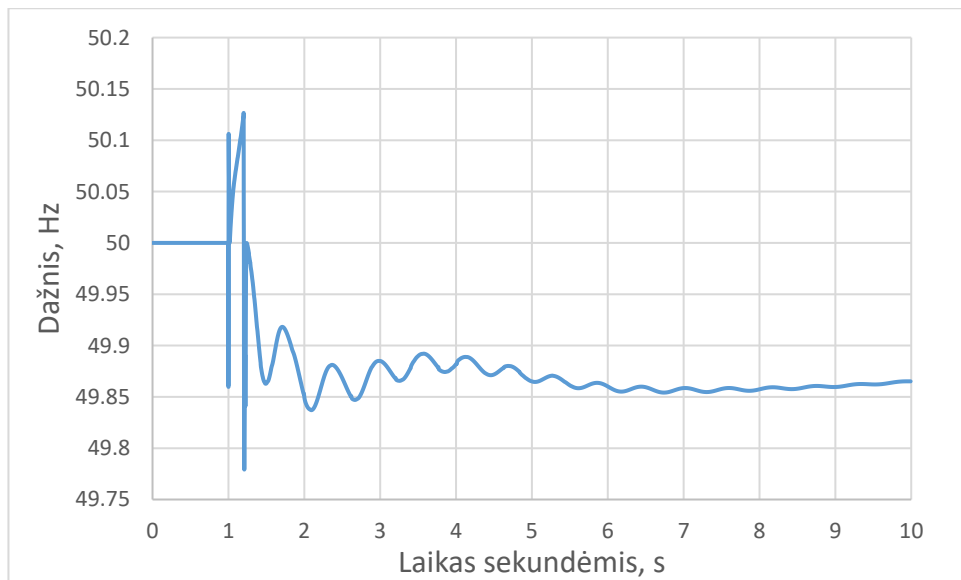
Matuojami parametrai	Generatorių pavadinimai			Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	Gen_S5, °.	Gen_S11, °.	Gen_S12, °.	
Rotoriaus kampas prieš sutrikimą	40,752	32,617	30,354	≈7
Maksimali rotoriaus kampo reikšmė	43,535	34,539	33,326	
Minimali rotoriaus kampo reikšmė	28,474	23,723	20,050	



18 pav. Linijinė įtampa šynose S_10 prijungus 100 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, kV.

8 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 100 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Šynų įtampa	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	S_10, kV	
Nominali įtampos reikšmė	110	≈7
Maksimali įtampos reikšmė po trikdžio	116,134	
Minimali įtampos reikšmė po trikdžio	99,226	



19 pav. Sistemos dažnis prijungus 100 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, Hz.

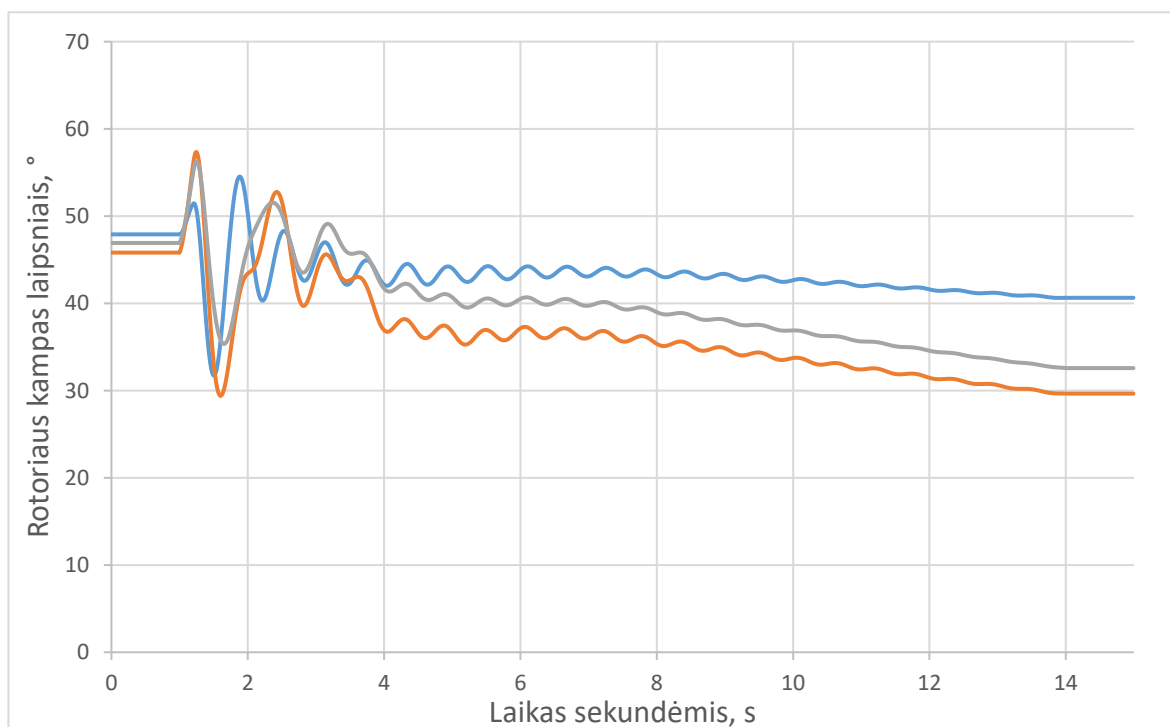
9 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 100 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Tinklo dažnis, Hz	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
Nominalus tinklo dažnis	50	≈7
Maksimalus tinklo dažnis po trikdžio	50,123	
Minimalus tinklo dažnis po trikdžio	49,779	

Tendencija vis stiprėja, tinklui darosi vis sudėtingiau grįžti į normalų darbo režimą, tai užtrunka vis daugiau laiko, su padidėjusiu atsinaujinančių elektros energijos šaltinių kiekiu.

4.5. Prijungus 150 MW galios vėjo jėgainių prie tinklo

Vykdomos simuliacijos prijungus atsinaujinančių elektros energijos šaltinių.

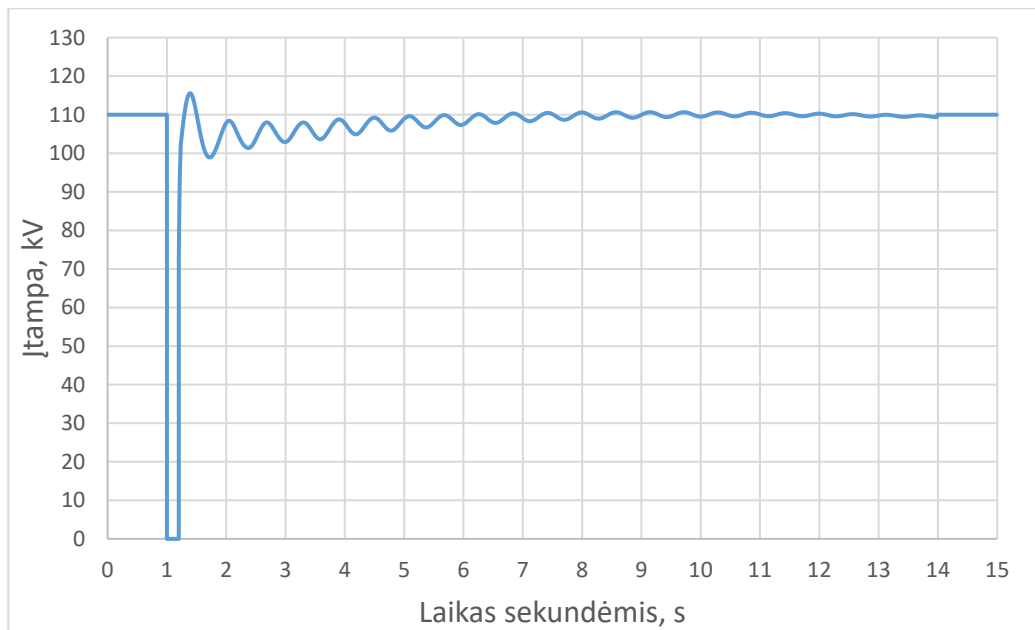


20 pav. Rotoriaus kampo priklausomybė laipsniais nuo atskaitinio generatoriaus Gen_S2 prijungus 150 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių. Mėlyna linija Gen_S5, oranžinė linija Gen_S12, pilka linija Gen_S11.

10 lentelė. Rotoriaus kampo svyravimų reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 150 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Generatorių pavadinimai			Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	Gen_S5, °.	Gen_S11, °.	Gen_S12, °.	
Rotoriaus kampas prieš sutrikimą	47,903	45,811	46,918	≈12
Maksimali rotoriaus kampo reikšmė	54,524	57,338	56,253	
Minimali rotoriaus kampo reikšmė	31,717	29,397	32,574	

Tinklui prarandant vis daugiau inercijos, darosi vis sudėtingiau grįžti į stabilų darbo režimą, tinklas nepasiekia stabilumo per 5 sekundžių simuliaciją.

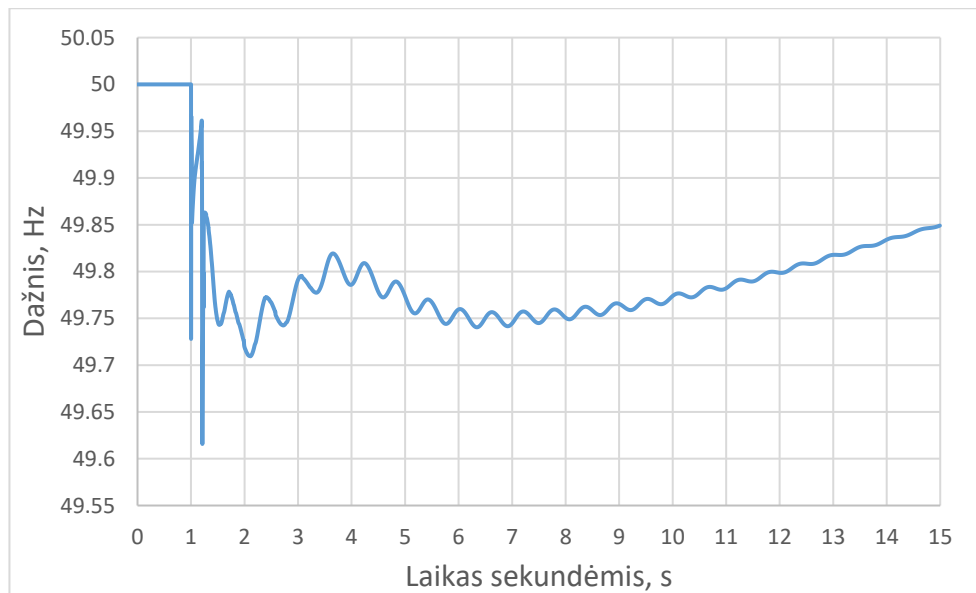


21 pav. Linijinė įtampa šynose S_10 prijungus 150 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, kV.

11 lentelė. Įtampos reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 150 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Šynos	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
	S_10, kV	
Nominali įtampos reikšmė	110	≈12
Maksimali įtampos reikšmė po trikdžio	115,554	
Minimali įtampos reikšmė po trikdžio	99,262	

Tinklo įtampai grįžti į normalų darbo režimą darosi dar sudėtingiau, dėl nepastovios atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip vėjo jėgainės nepastovumo.



22 pav. Sistemos dažnis prijungus 150 MW atsinaujinančių elektros energijos šaltinių, Hz.

12 lentelė. Dažnio reikšmės prieš trikdį ir po jo, prie tinklo prijungus 150 MW galios vėjo elektrinių, jų minimumai ir maksimumai, laiko per kurį sistema grįžta į stabilų režimą, lentelė.

Matuojami parametrai	Tinklo dažnis, Hz	Laikas per kurį nusistovi sistemos svyravimai, s.
Nominalus tinklo dažnis	50	≈12
Maksimalus tinklo dažnis po trikdžio	49,954	
Minimalus tinklo dažnis po trikdžio	49,615	

Tinklo dažniui grįžti į stabilų darbo režimą užtrunka dar ilgiau. Svyravimų amplitudė išaugo.

Išvados

1. Modelis buvo sėkmingai sudarytas pagal Lietuvos elektros sistemos struktūrą, modifikuojant „Transmission system“ lietuviškai elektros perdavimo sistema, standartinį tinklo modelį, kad atitiktų regioninius standartus.
2. Atsinaujinančių energijos šaltinių integracija, ypač vėjo jėgainių, reikšmingai paveikia sistemos dinaminį atsaką, ypač dažnio stabilumą po trikdžių.
3. Didelės vėjo generacijos dalis mažina sistemos inerciją, todėl dažnio kitimo greitis po trikdžių padidėja, o tai apsunkina normalaus dažnio palaikymą.
4. Pereinamųjų procesų stabilumo analizė parodė, kad didėjant vėjo jėgainių daliai sistemoje, kai kurie generatoriai sunkiau išlaiko sinchronizaciją po trumpalaikių trikdžių, ypač jei nėra papildomo stabilumo užtikrinimo (pvz., valdiklių ar rezervinių šaltinių).
5. Rotoriaus kampo analizė patvirtino, kad sistema yra jautri galios disbalansams – be pakankamo inercinio atsako kampiniai svyravimai tampa labiau išsikraipę ir lėčiau slopsta.
6. Dažnio reakcijos kreivės rodo, kad sistema vis dar gali stabilizuotis po vidutinio intensyvumo trikdžių, tačiau su ženkliai mažesniu rezervu, nei esant aukštai inercijai. Lyginant tinklo dažnį prieš prijungiant vėjo parkus, dažniui stabilizuotis po trikdžio užtruko apie 3 sekundes, o prijungus 150 MW vėjo jėgainių dažniui stabilizuotis užtruko net 12 sekundžių.

Literatūros sąrašas

1. KUNDUR, Prabhakar. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1994.
2. PAVELLA, M.; ERNST, D.; RUIZ-VEGA, D. Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control. Berlin: Springer, 2000.
3. HATZIARGYRIOU, Nikos. Microgrids: architectures and control. Chichester: Wiley, 2014.
4. ACKERMANN, Thomas. Wind power in power systems. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2012.
5. KEYHANI, Ali. Smart power grids 2011. Berlin: Springer, 2011.
6. KIRSCHEN, Daniel; STRBAC, Goran. Fundamentals of power system economics. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2018.
7. MACHOWSKI, Jan; BIALEK, Janusz; BUMBY, James. Power system dynamics: stability and control. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2020.
8. IGNITIS. Kokią elektros energiją vartosime iki 2030 m. [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-04-15]. Prieiga per: <https://ignitis.lt/lt/verslui/naujienos/kokia-elektros-energija-vartosime-iki-2030-m>
9. KUNDUR, Prabhakar et al. Definition and classification of power system stability. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2), p. 1387–1401. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1318675>
10. ULBIG, Andreas; BORSCHE, Theo S.; ANDERSSON, Göran. Impact of low rotational inertia on power system stability and operation. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3), p. 7290–7297. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016427618?via%3Dihub>
11. NREL. Inertia and the power grid: a guide without the spin. 2020 [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-04-15]. Prieiga per: <https://www.nrel.gov/news/program/2020/inertia-and-the-power-grid-a-guide-without-the-spin.html>
12. Renewable Energy. Review of frequency response strategies in renewable-dominated power systems. 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227624002990>
13. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Future low-inertia power systems: requirements, issues, and solutions. 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120300691>
14. Computers & Electrical Engineering. Frequency response models and control in smart power systems with high renewable energy penetration. 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790621004328>
15. ENTSO-E. High penetration of power electronic interfaced power sources and the potential contribution of grid forming converters. 2020 [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-15]. Prieiga per: https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidance-d-3/user_uploads/igd-high-penetration-of-power-electronic-interfaced-power-sources.pdf
16. EUROPEAN COMMISSION. Energy system integration strategy. 2021 [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-05-15]. Prieiga per: https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/energy-system-integration_en
17. EUROSTAT. Renewable energy statistics [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-04-17]. Prieiga per: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics
18. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA. Per trejus metus trigubas žaliuosios energetikos augimas Lietuvoje [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-04-12]. Prieiga per: <https://enmin.lrv.lt/lt/naujienos/per-trejus-metus-trigubas-zaliosios-energetikos-augimas-lietuvoje/>
19. ENA. Aktuali AEI statistika [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-04-12]. Prieiga per: <https://www.ena.lt/aktuali-aei-statistika/>
20. EKANAYAKE, J. B.; JENKINS, N. Impact on transient and frequency stability for a power system at very high wind penetration. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1), p. 151–157. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5589908>

21. UHLEN, K.; FOSSUM, A.; UNDELAND, T. Short circuit signatures from different wind turbine generator types. *IEEE Trondheim PowerTech*, 2011, p. 1–6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5772497>
22. ULLAH, Farhan et al. A comprehensive review of wind power integration and energy storage technologies for modern grid frequency regulation. *Heliyon*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024064971>
23. OHANU, Chibuike Peter et al. A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024017365>
24. SALEEM, M. I.; SAHA, S.; ROY, T. K. A frequency stability assessment framework for renewable energy rich power grids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467724001097>
25. SALEEM, M. I.; SAHA, S. Assessment of frequency stability and required inertial support for power grids with high penetration of renewable energy sources. *Electric Power Systems Research*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779624000737>
26. LITGRID. Įrengtoji galia [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-05-02]. Prieiga per: <https://www.litgrid.eu/index.php/sistema/elektros-energetikos-sistemas-informacija/irengtoji-galia/502>
27. MAHMOUDI RASHID, Sara. Employing advanced control, energy storage, and renewable technologies to enhance power system stability. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724001550>
28. SHRESTHA, Ashish; GONZALEZ-LONGATT, Francisco. Frequency stability issues and research opportunities in converter dominated power system. *Energies*, 2021, 14(14), 4184. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4184>
29. SAHA, S.; SALEEM, M. I.; RAY, T. K. Impact of high penetration of renewable energy sources on grid frequency behaviour. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522006974>
30. SULE, Aliyu Hamza. Impact of integration of renewable energy sources on power system stability, fault protection and location: a review. *Direct Research Journal of Engineering and Information Technology*, 2022. <https://directresearchpublisher.org/drjeit/files/2022/05/PUBLICATIONDRJEIT10476091.pdf>
31. QIN, Boyu et al. Impact of renewable energy penetration rate on power system frequency stability. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722011076>
32. KATARAY, Tarun et al. Integration of smart grid with renewable energy sources: opportunities and challenges – a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138823003569>
33. ALSHARIF, Hassan; JALILI, Mahdi; HASAN, Kazi N. Power system frequency stability using optimal sizing and placement of battery energy storage system under uncertainty. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22006260>
34. HOSSAIN, M. J.; MAHMUD, Md. Apel. Renewable energy integration challenges and solutions. [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-05-01]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/259226027_Renewable_Energy_Integration_Challenges_and_Solutions
35. KHALID, Muhammad. Smart grids and renewable energy systems: perspectives and grid integration challenges. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X24000063>
36. HOSSEINZADEH, Nasser et al. Voltage stability of power systems with renewable-energy inverter-based generators: a review. *Electronics*, 2021, 10(2), 115. <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/2/115>

37. FREEMAN, Sergio; AGAR, Ertan. The impact of energy storage on the reliability of wind and solar power in New England. *Heliyon*, 2024.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024036831>
38. SANNI, Shereefdeen Oladapo et al. Investigating the impact of solar PV and wind energy systems on the strength of a longitudinal power grid. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671124001736>
39. MASIKANA, S. B.; SHARMA, Gulshan; SHARMA, Sachin. Renewable energy sources integrated load frequency control of power system: a review. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671124001852>
40. SALEHIZADEH, Saeed; LAK, Soheila Zandi; RAHIMPOUR, Mohammad Reza. Energy storage technologies for renewable energy sources. In: ZOBAA, A. F. (ed.). *Renewable energy systems: modeling, optimization and control*. Elsevier, 2023.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032393940900253X>
41. WANG, Sen et al. Analysis of energy storage demand for peak shaving and frequency regulation of power systems with high penetration of renewable energy. *Energy*, 2023.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222034739>
42. RAPIZZA, Marco Raffaele; CANEVESE, Silvia Maria. Fast frequency regulation and synthetic inertia in a power system with high penetration of renewable energy sources: optimal design of the required quantities. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467720303386>

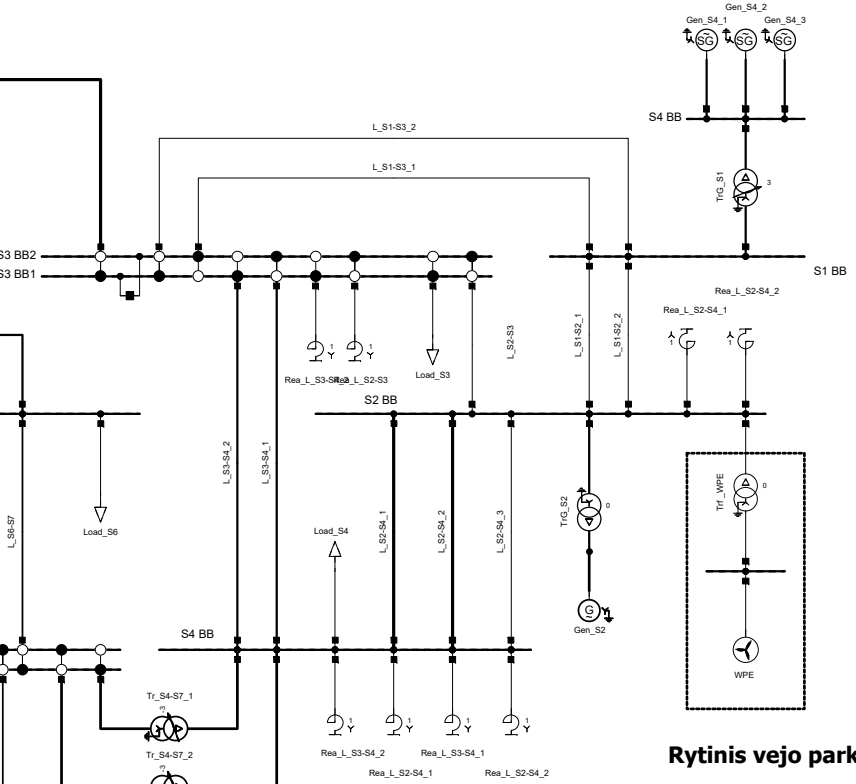
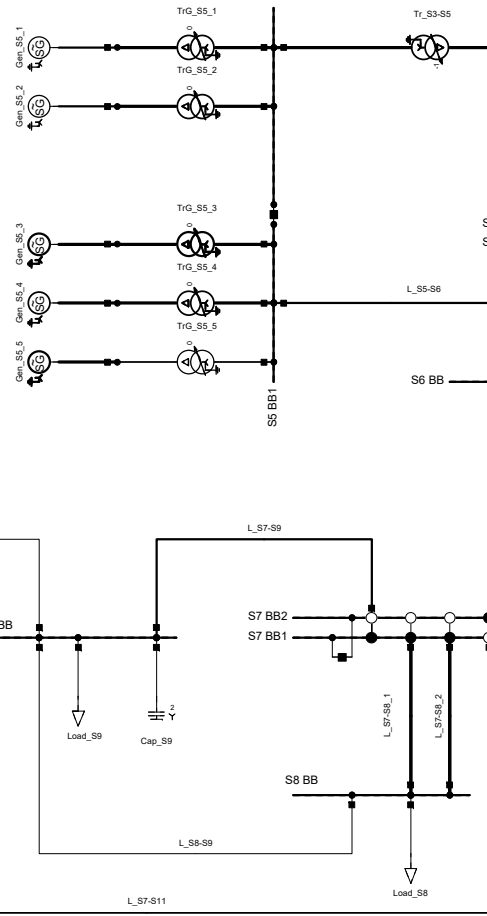
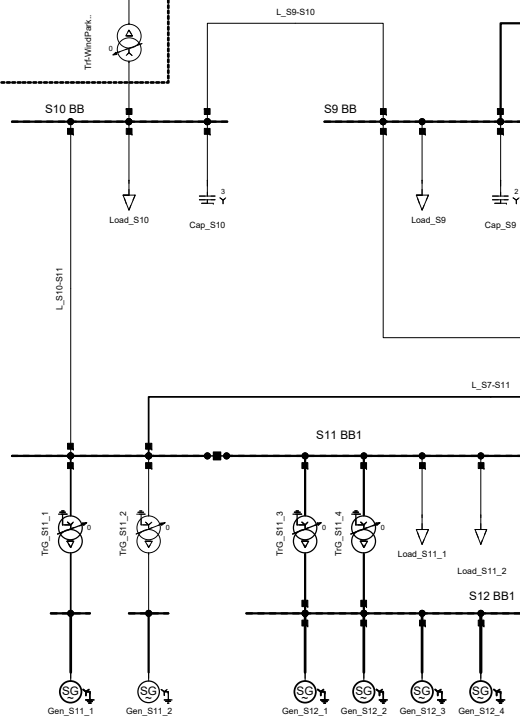
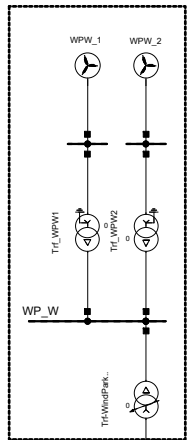
Informacijos šaltinių sąrašas

1. DIgSILENT programinės įrangos dokumentacijos ir aprašymų puslapis.
<https://www.digsilent.de/en/downloads.html>

Priedai

1 priedas. Vienlīnijnē schema.

Vakarinis vejo parkas



Rytinis vejo parkas