



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Atsinaujinančių šaltinių įtakos perdavimo tinklo dažniui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Džiugas Rudmickas

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Atsinaujinančių šaltinių įtakos perdavimo tinklo dažniui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Džiugas Rudmickas

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Asist. Almantas Bandza

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Džiugas Rudmickas

Atsinaujinančių šaltinių įtakos perdavimo tinklo dažniui 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.

Džiugas Rudmickas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Rudnickas, Džiugas. Atsinaujinančių šaltinių įtakos perdavimo tinklo dažniui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: energijos kaupikliai, dažnis, sistemos stabilumas, inercija.

Kaunas, 2025. 40 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame darbe atliekama atsinaujinančių energijos šaltinių, baterijų energijos kaupimo sistemų ir sinchroninių kompensatorių įtakos sistemos dažniui tyrimas. Šis baigiamasis projektas sudarytas iš trijų dalių. Pirmoje dalyje pateikiama literatūros apžvalga, kurioje aptariamas atsinaujinančių šaltinių poveikis sistemos dažniui. Joje remiantis moksline literatūra išskiriamos pagrindinės dažnio nestabilumo priežastys bei šių problemų sprendimo būdai naudojant baterijų energijos kaupimo sistemas. Antroje dalyje aprašomas tiriamas sistemos modelis. Pateikiami scenarijai, skirti ištirti sistemos parametrus. Trečioje dalyje pateikiami ir analizuojami gauti darbo rezultatai. Rezultatai lyginami tarpusavyje ir analizuojama AEI, BEKS ir SC įtaka tinklo charakteristikoms. Galutinėje dalyje, remiantis praitų dalių rezultatais ir duomenimis, suformuojamos tyrimo išvados.

Rudmickas, Džiugas. Research of Renewable Sources Impact on Transmission Network Frequency. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: energy storage, frequency, system stability, inertia.

Kaunas, 2025. 40 p.

Summary

The Master's thesis investigates the influence of renewable energy sources, battery energy storage systems and synchronous compensators on system frequency. This thesis is structured in three parts. The first part presents a literature review which discusses the impact of renewable sources on system frequency. It draws on the literature to identify the main causes of frequency instability and the solutions to these problems using battery energy storage systems. The second part describes the system model under investigation. Scenarios to investigate the system parameters are presented. The third part presents and analyses the results obtained. The results are compared with each other and the impact of RES, BESS and SC on the grid characteristics is analysed. In the final part, conclusions of the study are drawn based on the results and data of the previous parts.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Elektros tinklas	11
1.1.1. Inercija elektros tinkle	11
1.1.2. Elektros sistemos patikimumas	13
1.2. AEI įtaka tinklui	14
1.2.1. Vėjo elektrinių įtaka tinklo stabilumui	14
1.2.2. Saulės elektrinių įtaka tinklo stabilumui	15
1.3. Elektros kaupimo technologijos	16
1.3.1. Akumuliatorių baterijos.....	17
1.3.2. Akumuliatorių baterijų sistemos.....	18
2. Metodinė dalis.....	19
2.1. Elektros energijos šaltinių valdymo sistemos.....	22
2.1.1. Tradicinių šaltinių valdymo sistema.....	22
2.1.2. Vėjo elektrinių valdymo sistema	23
2.1.3. Saulės elektrinių valdymo sistema	24
2.1.4. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymo sistema.....	25
2.1.5. Sinchroninio kompensatoriaus valdymo sistema	26
3. Tiriamoji dalis.....	27
3.1. Bazinių duomenų nustatymas.....	27
3.2. 80% generacija iš SG, 20% generacija iš AEI	28
3.3. 60% generacija iš SG, 40% generacija iš AEI	29
3.4. 40% generacija iš SG, 60% generacija iš AEI	31
3.5. 20% generacija iš SG, 80% generacija iš AEI	33
3.6. Tyrimo rezultatų apibendrinimas.....	35
Išvados	38
Literatūros sąrašas	39
Priedai.....	41
1 priedas. Modeliuojamos IEEE 39 šynų sistemos schema DIGSILENT PowerFactory programiniame pakete	41

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Modelio generatorių parametrai	20
2 lentelė. Modelio transformatorių parametrai.....	20
3 lentelė. Modelio perdavimo linijų parametrai	21
4 lentelė. Modelio apkrovų parametrai	22
5 lentelė. Dažnio kitimo parametrai,kai 100% generacijos iš SG.....	27
6 lentelė. Dažnio kitimo parametrai,kai 20% generacijos iš AEI	29
7 lentelė. Dažnio kitimo parametrai,kai 40% generacijos iš AEI	31
8 lentelė. Dažnio kitimo parametrai,kai 60% generacijos iš AEI	33
9 lentelė. Dažnio kitimo parametrai,kai 80% generacijos iš AEI	35

Paveikslų sąrašas

1 pav.	Elektros generacijos pasiskirstymas Europoje [5].....	11
2 pav.	Tinklo dažnis padidėjus apkrovai, esant skirtingai inercijai[8].....	12
3 pav.	Rotoriaus kampas įvykus avarijai arti VE[12]	15
4 pav.	Rotoriaus kampas įvykus avarijai arti sinchroninio generatoriaus[12]	15
5 pav.	Dažnio svyravimai po avarijos priklausomai nuo SE generacijos dalies[20]	16
6 pav.	Modeliuojamos sistemos schema	19
7 pav.	Sinchroninių generatorių valdiklio schema[14]	23
8 pav.	Vėjo elektrinių schema[16]	24
9 pav.	Saulės elektrinių schema[17]	25
10 pav.	BEKS sistemų schema[18].....	26
11 pav.	Sinchroninio kompensatoriaus schema[19].....	26
12 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 100% energijos generuojama SG	27
13 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 20% energijos generuojama iš AEI.....	28
14 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 20% energijos generuojama iš AEI su BEKS	28
15 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 20% energijos generuojama iš AEI su SC	29
16 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 40% energijos generuojama iš AEI.....	30
17 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 40% energijos generuojama iš AEI su BEKS	30
18 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 40% energijos generuojama iš AEI su SC	31
19 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 60% energijos generuojama iš AEI.....	32
20 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 60% energijos generuojama iš AEI su BEKS	32
21 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 60% energijos generuojama iš AEI su SC	33
22 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 80% energijos generuojama iš AEI.....	34
23 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 80% energijos generuojama iš AEI su BEKS	34
24 pav.	Dažnio priklausomybė, kai 80% energijos generuojama iš AEI su SC	35
25 pav.	Suvestinė dažnio priklausomybių lentelė be BEKS ir SC.....	36
26 pav.	Suvestinė dažnio priklausomybių lentelė su BEKS	36
27 pav.	Suvestinė dažnio priklausomybių lentelė su SC.....	37

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ES – Europos sąjunga;

KAE – keitiklinė atsinaujinanti energija;

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

PSO – perdavimo sistemos operatorius;

VE – vėjo elektrinės;

SC – sinchroninis kompensatorius;

BEKS – baterijų energijos kaupimo sistema;

SG – sinchroninis generatorius;

AVR – *angl. automatic voltage regulator;*

PSS - *angl. power system stabilizer;*

GOV - *angl. governor;*

BMS – *angl. battery management system;*

PCS - *angl. Power conversion system;*

AC – kintama srovė;

DC – nuolatinė srovė

Įvadas

Pastarąjį dešimtmetį visoje Europos Sąjungoje (ES) sparčiai padidėjo elektros išgaunamos iš atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas. Tokios tendencijos yra numatomos ir toliau, nes valstybės yra įsipareigojusios iki 2050 m. tapti neutralios šiltnamio dujų atžvilgiu[1]. Tokios tendencijos priverčia elektros sistemos operatorius iš naujo vertinti, kaip reguliuoti elektros perdavimą. Dideles inerciją turinčius sinchroninius generatorius iš rinkos išstumia keitiklių pagrindu paremti atsinaujinančios energijos (KAE) šaltiniai. Tokie energijos šaltiniai, kaip vėjas ir saulė, turi labai mažą, arba išvis neturi inercijos. Būtent dėl šios priežasties, galimas labai didelis elektros sistemos dažnio nuokrypis, ypač esant dideliam paklausos ir pasiūlos disbalansui. Be papildomų sistemų, tokių kaip inerciją imituojančios baterijų sistemos, sistemos operatorius gali būti priverstas atjungti vartotojus, tam kad galėtų išlyginti elektros energijos balansą [2]. Būtent toks sistemos valdymas, neturint šaltinių, kurie turi inerciją, yra vienas iš didžiausių iššūkių sistemos operatoriams[3]

Šio darbo tikslas - ištirti atsinaujinančių šaltinių, baterijų energijos kaupimo sistemų ir sinchroninių kompensatorių poveikį elektros sistemos tinklo dažniui.

Darbo uždaviniai:

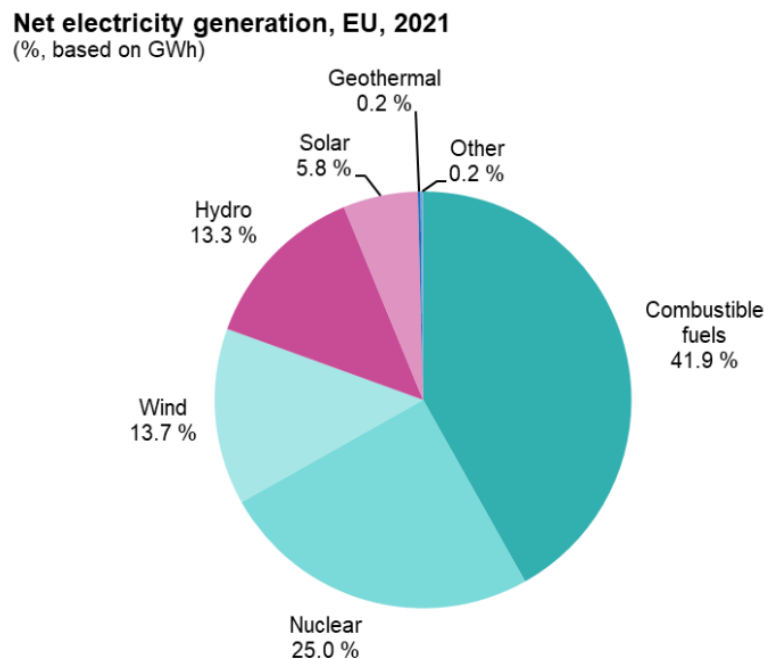
1. Atlikti atsinaujinančių šaltinių įtakos sistemos dažniui analizę, remiantis atliktais tyrimais.
2. Naudojant DIGSILENT PowerFactory programinį paketą, paruošti dinaminį modelį sistemos parametrams matuoti.
3. Atlikti sistemos dinaminio stabilumo analizę, skirtą išmatuoti atsinaujinančių šaltinių poveikį tinklo dažniui
4. Atlikti gautų rezultatų analizę, lyginant bazinius rezultatus su rezultatais gautais prijungus BEKS ir SC sistemas.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Elektros tinklas

Elektros tinklas yra sudarytas iš daug sudėtingų elektros energetikos sistemų, pradedant tradiciniais generaciniais šaltiniais ir baigiant sudėtingais aparatais skirtais palaikyti būtent to tinklo stabilumą. Elektra yra perduodama iš generacinių taškų aukštos įtampos tinklais, kurie prisijungia prie vidutinės arba žemos įtampos pastočių, kurios savo ruožtu paskirsto energiją vartotojams.

Augant energijos poreikiui ir mažėjant tradicinių elektros generavimo šaltinių, tinklas susiduria su stabilumo problemomis. Didėjantis keitiklinių energijos šaltinių kiekis stipriai įtakoja inercijos sumažėjimą sistemoje[4]. Europos ir pasaulio valstybės yra išsikėlusios ambicingus tikslus sumažinti į aplinką išskiriamą anglies dioksidą(CO₂). Šie tikslai stipriai paveikia elektros energijos gamybą, nes didžioji dalis išgaunamos elektros energijos yra iš iškastinio kuro[5]. Būtent šie tikslai stumia energetikos sistemą fokusuotis į iš atsinaujinančių energijos išteklių(AEI) išgaunamą energiją.



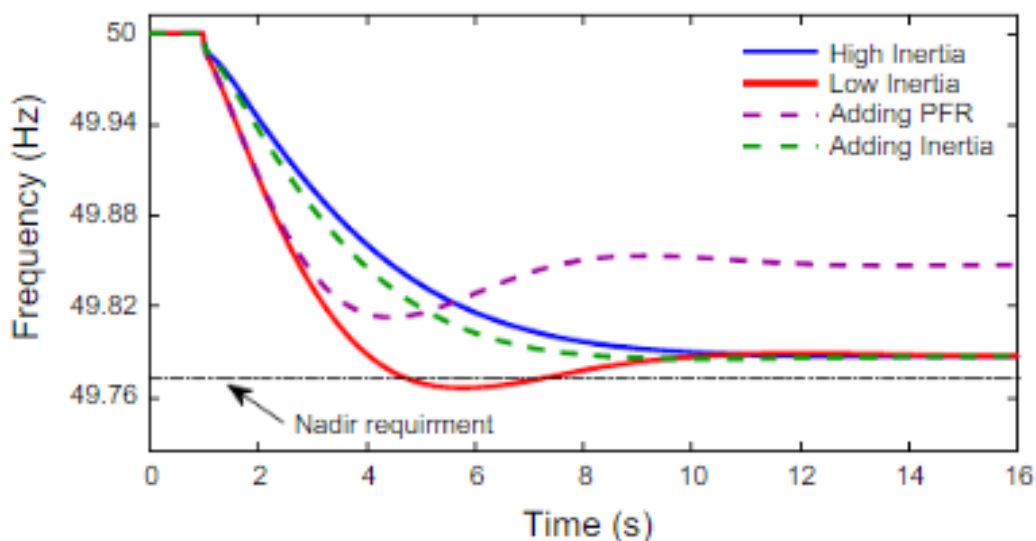
1 pav. Elektros generacijos pasiskirstymas Europoje [5]

1.1.1. Inercija elektros tinkle

Tradicinėje elektros sistemoje didžiąją dalį elektros gamina sinchroniniai generatoriai. Jie mechaninę energiją paverčia elektros energija. Elektros sistemos inerciją vertinama kaip tinklo galimybė pasipriešinti trikdžiams ir palaikyti stabilią sistemą. Ją sistemoje sudaro prie sistemos prijungtų sinchroniškai besisukančių įrenginių visuma. Kadangi inercijos dydis yra proporcingas įrenginio masei, sistemos dažnio kitimo greitis yra tiesiogiai proporcingas šiam dydžiui. Atsiradus sistemos disbalansui dėl padidėjusios paklausos, dažnis sistemos kinta lėtai, nes šie įrenginiai sugeba savo sukauptą kinetinę energiją panaudoti kaip bateriją, kad išlaikyti stabilumą. Dažnį galima reguliuoti į

tinklą paduodant papildomą energijos kiekį, taip sumažinant disbalansą, todėl būtent inertiniai įrenginiai šį laiko tarpą padidina[6].

Mažėjant sinchroninių generatorių generuojamos energijos kiekiui tinkle, mažėja ir inercijos kiekis. Esant mažesnei tinklo inercijai dažnis krenta žymiai staigiau ir užtrunka ilgiau, kol yra atstatomas į normalias ribas. Priešingai sistemose su didele inercija, dažnio kritimas yra mažesnis ir nusistovi, nes sinchroniniai generatoriai gali panaudoti savo galios rezervą[7].



2 pav. Tinklo dažnis padidėjus apkrovai, esant skirtingai inercijai[8]

Mažėjantis inercijos kiekis sukelia dvi pagrindines problemas:

- Padidėjęs dažnio kitimo greitis prisijungus papildomoms apkrovoms, gali sukelti generacijos šaltinių atsijungimą, kurie ir toliau mažindami pasiūlą mažina ir dažnį
- Relinės apsaugos, skirtos sureaguoti į dažnio pokyčius ir atjungti vartotojus dažnio nestabilumo atveju, gali sukelti visišką sistemos atsijungimą, jei dažnis nespėja atsistatyti į reikiamas ribas.

Norint palaikyti tinklą stabilų ir saugų reikia vertinti inercijos kiekį tinkle. Vis daugiau integruojamos energijos gaunama iš AEI, šią inerciją tik mažina ir sukelia stabilumo problemų.

Perdavimo sistemos operatorius stengiasi užtikrinti, kad dažnis sistemoje išliktų 50 Hz. Dažnio nukrypimai pirmiausia yra stabdomi, kad išvengtų sistemos problemų ir tik tada yra koreguojami iki normalaus režimo.

PSO skiria didelius išteklius dažnio stabilumo palaikymui, nes generuojamos galios kiekis turi atitikti apkrovą, nes kitaip galios disbalansas gali pažeisti sistemos įrenginius. Normaliu sistemos režimu yra leistini nedideli nukrypimai, nes vartotojų poreikiai yra greitai kintantis parametras. Generacija iš AEI taip pat yra nepastovus ir kintantis šaltinis, todėl dažnio stabilumas yra viena iš pagrindinių užduočių PSO. Generatoriai dažniausiai negali greitai reaguoti į vartojimo pokyčius,

operatoriai nuolat vykdo generacijos koregavimą ir perdavimo valdymą. Šis valdymas šiais laikais dažniausiai vyksta automatiškai su minimaliu žmogaus įsikišimu.

Įvykus staigiems generacijos sutrikimams, balansas sistemoje sutrinka ir PSO turi užtikrinti balansą tarp pagamintos ir suvartojamos energijos. Norit atstatyti normalaus režimo dažnį reikia šį balansą reguliuoti ne sekundžių iki minučių tikslumu. Būtent šis gebėjimas greitai reaguoti į pokyčius yra vienas iš svarbiausių faktorių projektuojant ir valdant elektros sistemas.

Kai inercija mažėja, PSO susiduria su iššūkiais eksploatuojant elektros sistemas. Didelis AEI elektros generacijų šaltinių augimas priverčia operatorius ieškoti inovatyvių sprendimų. Sprendimai gali būti nuo gana paprastų baterijų, kurios gali greitai kompensuoti išaugusį energijos poreikį, iki sudėtingų keitiklių, kurie sugeba simuliuoti inercinius įrenginius esančius perdavimo sistemoje.

1.1.2. Elektros sistemos patikimumas

Vienas iš pagrindinių sistemos rodiklių yra jos patikimumas. Elektros energija turi būti nepertraukiamai tiekiamą vartotojams, o susidūrus su trikdžiais, kuo greičiau atstatytas elektros tiekimas ir jų parametrai. Patikimumui yra labai svarbus elektros balansas, tai yra skirtumas tarp pasiūlos ir paklausos turi būti kuo artimesnis nuliui.

Siekiant padidinti patikimumą, atliekamos sudėtingos analizės, kad būtų parinktos optimalios generacijos ir vartojimo vietos. Kadangi apkrova yra labai greitai kintantis parametras, tampa sunku prognozuoti ateities vartojimo tendencijas.

Elektrinių darbą gali trikdyti ir nenuspėjami įvykiai (audros, įrangos gedimai), todėl patyrus gedimus ir kitų nenumatytų reiškinių trikdžius, gali stipriai sumažėti generavimas ar apkrova. Dėl plataus įrenginių skaičiaus labai sudėtinga atlikti patikimą prognozavimo analizę. Tokių prognozių sudėtingumas sumažina tinklo patikimumą, kas lemia ir pačios sistemos stabilumo nebuvimą. Dažniausiai įvykus gedimams nukenčia galutiniai vartotojai, nes jie yra mažiausios svarbos ir jų elektros tiekimą leidžiama atjungti iki 12 valandų ilgio laikotarpio[9]. Tokie atjungimai mažina patikimumą, nes sumažėja apkrova.

Apkrova yra viena iš svarbiausių sistemos dalių. Tinklo pagrindinis tikslas yra patenkinti vartotojų energijos poreikį. Esant per didelei apkrovai, sistema negali patenkinti poreikio, dėl to krenta dažnis ir sistema gali nustoti veikti, kadangi gali suveikti apsaugos veikiančios nuo per mažo dažnio. Toks visiškas sistemos sustojimas yra labai retai pasikartojanti problema ir elektros tinklų bei elektros generacijos šaltinių savininkai saugosi ir visas būdais bando tokios problemos išvengti.

Taip pat labai svarbus yra sistemos elektros energijos srautų paskirstymas. Sugedus svarbioms sistemos dalims, energijos srautai turi turėti kitus kelius, kad paskirstytu energiją. Tačiau ne visada šis pasiskirstymas gali patenkinti vartotojų poreikį. Kai sistema nestabili, galima matyti, kaip perdavimo arba paskirstymo linijos veikia virš savo įvertintos galios lubų. Tokiais atvejais perdavimo sistemos operatorius(PSO) gali pasirinkti laikinai atjungti liniją, kad būtų apsaugoti kiti elektros sistemos elementai, taip apsaugant visą sistemą nuo pilnutinio atsijungimo. Apkrovai ir generacijai stabilizavus linijos yra įjungiamos vėl, taip atstatant tiekimą atjungtiems vartotojams. Įprastai elektros sistema projektuojama ir valdoma taip, kad atjungus vieną ar dvi pagrindines linijas sistema liktų veikianti, o vartotojai neprarastų elektros. Toks būdas yra vadinamas N-1 būdu, tai yra, kad atjungus

vieną ar dvi linijas, PSO imasi veiksmų, kurie net ir atjungtus trečią liniją, sistema išliktu stabili ir nenustotų veikti[10].

Sistemoje yra svarbu turėti galios rezervą. Šią rezervinę galią turi turėti ne tik generacijos šaltiniai, bet ir perdavimo linijos. Norint užtikrinti patikimą tiekimą, rezervas turi būti apie 20% didesnis už maksimalią apkrovą. Jei sistemą sudaro daug mažų generatorių, rezervas gali būti sumažinamas, nes sugedus vienam generatoriui, sistema praranda tik mažą dalį galimos generuoti galios. Priešingai jei sugestų didelės galios generatorius, kiti įrenginiai turėtų kompensuoti visą tos galios trūkumą, todėl mažėtų sistemos patikimumas. Remiantis šia taisykle, rezervas turėtų būti parenkamas pagal didžiausią sistemos generatorių, kadangi net ir įvykus blogiausiam scenarijui ir sugedus didžiausiam generacijos šaltiniui, sistema išliktų stabili. [11]

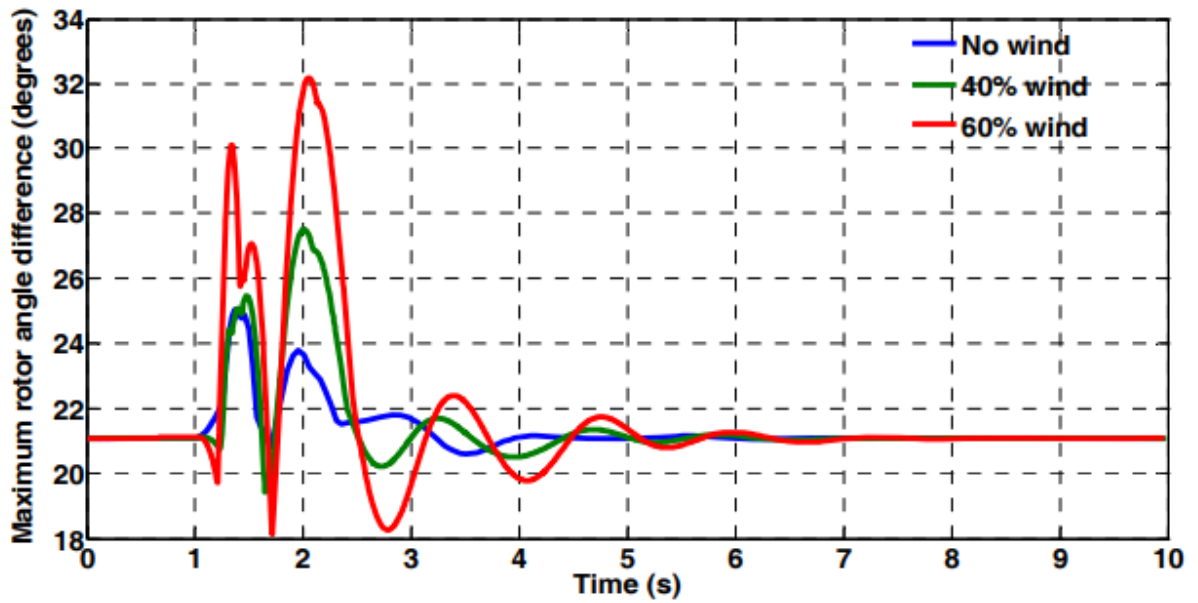
Sistemos rezervus kiekviena šalis gali nusistatyti pagal savo generacijos sudėtį. Šalys, kurios linkusios į elektros eksportą gali sau leisti mažesnius rezervus palyginus su tomis, kurios energiją importuoja, kadangi nereikia vertinti, kad yra galimybė gauti nepakankamai energijos iš eksportuojančios šalies.

Taip pat yra labai svarbu prognozuoti energijos poreikio augimą ateityje. Atlikus šių prognozių vertinimą reikia tikrinti ar sistema turi pakankamą galios rezervą ir gali veikti stabiliai įvykus gedimams. Taip pat reikia vertinti, kad per didelis rezervas yra brangi investicija, kurios potencialo neišnaudojimas gali nutolinti atsipirkimą. Sistemai yra svarbu kainos ir kokybės santykis, todėl reikia vertinti ar geriau yra pigi tačiau nevisiškai patikima sistema, ar geriau yra brangi, patikima, tačiau ilgai atsiperkanti sistema. Taip pat vertinant paklausą reikia ir vertinti sistemos perdavimo galimybes ir paruošti jas prognozuojamam augimui.

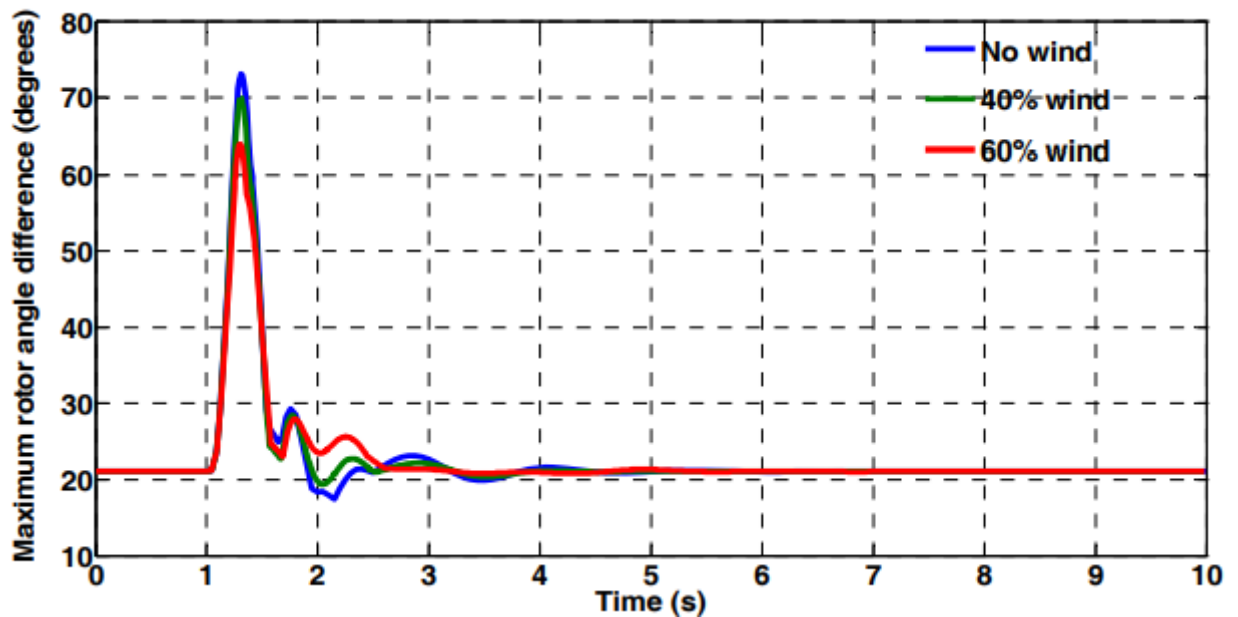
1.2. AEI įtaka tinklui

1.2.1. Vėjo elektrinių įtaka tinklo stabilumui

Vėjo elektrinės daro didelę įtaką tinklo stabilumui, priklausomai nuo jos prijungimo vietos. Dažniausiai instaliuojant VE į skirstomąjį tinklą, matomas žymus kritinio atjungimo laiko trumpėjimas. Neigiamą įtaką yra sumažinama instaliuojant VE į perdavimo tinklą. Šiuo metu populiariausia vėjo energijos technologija leidžia reguliuoti tiek reaktyviąją tiek aktyviąją galią. Šios elektrinės turi tiek neigiamą tiek teigiamą įtaką tinklo stabilumui. Priklausomai nuo avarijos vietos artumo prie sinchroninių generatorių, keičiasi rotoriaus kampo svyravimai. Įvykus avarijai arti sinchroninių generatorių, sumažėja kampo svyravimai po avarijos. Atvirkščiai jei avarija įvyksta arti vėjo elektrinių, rotoriaus kampo svyravimai išauga ir pailgėja atsistatymo laikas. Taip pat problema yra tokia, kad VE nepakeičia sistemos atsako į avariją tendencijos o tiesiog pablogina situaciją ir atsistatymo laiką.[12]



3 pav. Rotoriaus kampas įvykus avarijai arti VE[12]

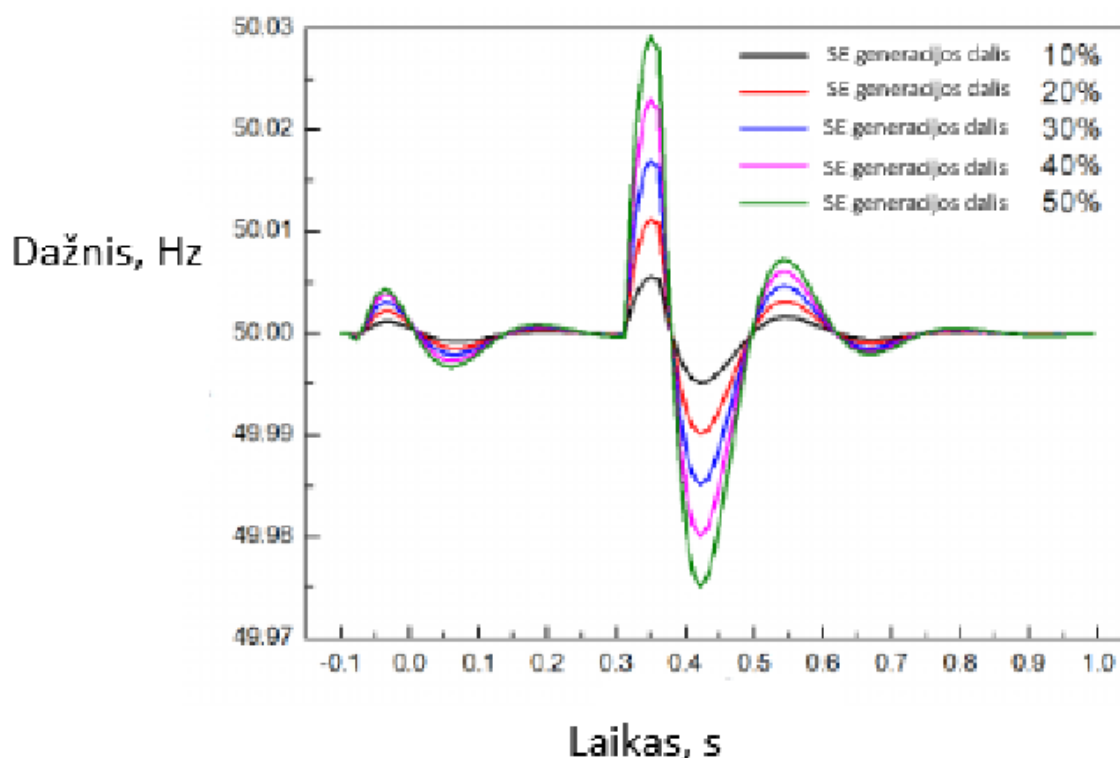


4 pav. Rotoriaus kampas įvykus avarijai arti sinchroninio generatoriaus[12]

1.2.2. Saulės elektrinių įtaka tinklo stabilumui

Saulės elektrinių sistemos, ypač didelės skvarbos regionuose, gali daryti didelę įtaką perdavimo tinklo dažnio stabilumui. Dėl jų nepastovaus pobūdžio - saulės spinduliuotės nepastovumo - gali atsirasti staigių galios svyravimų, kurie savo ruožtu daro įtaką tinklo dažniui. Didėjant fotovoltinės energijos skvarbai, mažėja bendra tinklo inercija, nes fotovoltinės sistemos neturi tokios sukimosi inercijos

kaip įprastiniai sinchroniniai generatoriai. Dėl sumažėjusios inercijos tinklas tampa jautresnis dažnio nuokrypiams, atsirandantiems dėl staigių gamybos nuostolių ar apkrovos pokyčių.[21]



5 pav. Dažnio svyravimai po avarijos priklausomai nuo SE generacijos dalies[20]

1.3. Elektros kaupimo technologijos

Energijos kaupimo technologijos įprastai yra naudojamos padengti apkrovai, kai pasiūlą yra deficite. Ši elektros energija paverčiama į kaupiamąją, o vėliau pakilus poreikiui verčiama atgal į elektros energiją. Šiais laikais energijos kaupimo sistemų yra labai daug, ir kiekvieną jų turi savo išskirtinių parametrų.

Pagrindinės naudojamos kaupiklių technologijos yra smagratinės, elektrocheminės, hidroakumuliacinės, kuro elementų ir t.t.

Kaupikliai pagal technologijas ir jų paskirtį gali būti suskirstomi į keturias pagrindines grupes:

- Mažos galios maitinimui
- Vidutinės galios maitinimui
- Elektros dinaminių parametrų svyravimų reguliavimui
- Elektros energijos kokybės užtikrinimui

Pirmos dvi kategorijos yra skirtos mažos galios ir mažos apkrovos elektros sistemoms. Jose dažniausiai naudojamos elektrocheminės, kuro elementų ir kinetinės elektros energijos baterijos. Likusios dvi rūšys naudojamos didelės galios sistemose ir jas dažniausiai sudaro hidraulinės sistemos, elektrocheminės baterijos arba šiluminės baterijos.

1.3.1. Akumuliatorių baterijos

Baterijų sandara yra sudarytų iš celių, kurios yra kaip atskiros mažesnės baterijos versijos. Įkrovimo metu elektros energija yra paverčiama chemine energija ir iškrovos metu ta pati cheminė energija tampa elektrine. Baterijų įtampos ir srovės reikšmės galima reguliuoti pagal lygiagretų arba nuoseklių celių sujungimą. Pagrindiniai parametrai dažniausiai yra baterijos talpa ir išduodama energija, o antriniai tai tarnavimo laikas, iškrovimo – įkrovimo ciklų skaičius ir t.t. Elektrocheminės baterijos negali išlaikyti savyje energijos neribotą laiką, todėl bėgant laikui ji savaime išsikrauna. Dažnu atveju baterijos negali būti pilnai iškrautos, nes tai pažeidžia jų efektyvumą. Toks reiškinys vadinamas iškrovos gyliu.

Akumuliatorių baterijų technologijos vis greičiau įdiegia naujoves. Kuriami nauji baterijų tipai, jie testuojami ir integruojami į sistemas. Dažniausias pasikeitimas akumuliatoriuose yra skirtingos medžiagos, kurios sudaro elektrodus ir elektrolitus.

Elektros energijos sistemose dažniausiai naudojamos giluminio iškrovos ciklo baterijos. Yra keletas rūšių, kurios geriausiai atitinka reikiamas charakteristikas ir yra tinkamos naudoti elektros sistemose. Tokie baterijų tipai yra:[13]

- Natrio sulfido pagrindu paremtos baterijos. Jas sudaro natrio elektrodas ir sieros elektrodas. Juos atskiria aliuminio oksido keramikos elektrolitas. Cheminių reakcijų metu teigiami natrio jonai praleidžiami pro aliuminio elektrolitą ir susijungia su sieros elektrodu, taip sudarant natrio polisulfidus. Iškrovos metu elektronai teka pro šoninę elektros grandinę taip sukurdamą įtampą. Viena problema, su kuria susiduria sistemos naudojančios šias baterijas yra tokia, kad procesui vykti reikalinga didelė temperatūra.
- Ličio jonų baterijos. Šios baterijos teigiamas polius padengtas ličio oksidu, o neigiamas polius pagamintas iš grafito. Kaip elektrolitas yra naudojama ličio druska. Įkrovimo metu ličio atomai pereina per elektrolitą ir jungiasi su grafito anodu. Iškrovos metu šis procesas yra priešingas.
- Švino – rūgštinės baterijos. Šia bateriją sudaro talpa, kuri dažniausiai yra pagaminta iš plastiko, kuris yra suskirstytas į kelias švino – rūgšties dalis. Švino dioksido elektrodas per sieros rūgšties elektrolitą praleidžia jonus į neigiamai įkrautą švino elektrodą ir taip sukuria elektros energiją.
- Aktyviųjų metalų baterijos. Šias baterijas sudaro aliuminio arba cinko anodai, nes jie turi didelį energetinį tankį. Šie metalai oksiduodamiesi išskiria elektronus, kurie juda link iš anglies arba metalo tinklo struktūros anodo. Elektrolito sudėtis dažniausiai naudojama kaip hidroksido terpė, nes jie yra geri jonų laidininkai. Patogu yra tai kad elektrolitas gali būti tiek skystos tiek kietos fazės, nes hidroksidu galima prisotinti polimerus.

Iš šių elektros baterijų rūšių, švino – rūgšties akumuliatoriai yra puikus impulsinės galios šaltinis. Šių baterijų minusai yra tokie, kad jų naudojimui reikalingi nuodingi sunkieji metalai, jei dažniausiai yra

labai dideli ir turi didelį savaiminį išsikrovimą. Natrio sulfido baterijos yra žymiai mažesnės ir lengvesnės, tačiau reikalinga aukšta temperatūra, kad būtų palaikomas veikimas sukelia didelius šilumos nuostolius, kadangi ją visados reikia šildyti. Aktyviųjų metalų baterijos yra pigios, nes naudojami lengvai prieinami katodai. Šie katodai pasižymi dideliu energiniu tankiu, tačiau juos labai sunku įkrauti. Ličio jonų, natrio sulfido baterijos yra naudojamos didelės galios akumuliatorių sistemose. Iš šių rūšių didžiausią potencialą turi ličio jonų akumuliatoriai. Jie yra nedideli, mažo svorio ir turi labai didelį energijos tankį. Tačiau didžiausia ličio jonų akumuliatorių problema yra jos kaina. Technologija brangi dėl jos sudėtingumo ir didelės žalos tarnavimo laikui gilaus iškrovimo metu.

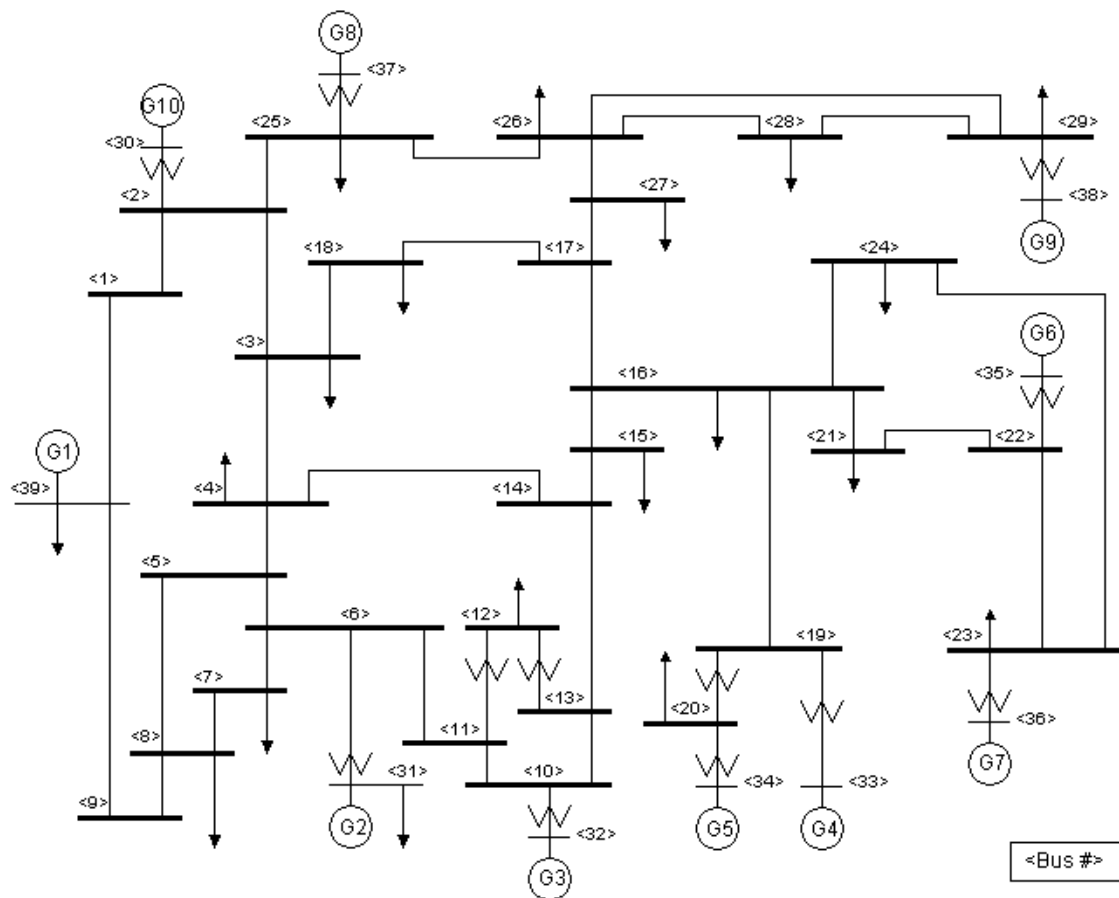
1.3.2. Akumuliatorių baterijų sistemos

Energijos kaupimo baterijų sistemos yra priskiriamos prie vidutinės iškrovos trukmės kaupimo elementų. Jos savo energija gali tiekti vidutiniškai nuo 1 iki 10 valandų. Įrengtosios galios režiai yra nuo 10 kW iki 10 MW. Šios sistemos naudojamos galiai rezervuoti ir palaikyti balansą sistemos tinkle. Jos taip pat yra naudojamos dažniui reguliuoti, patenkinti aukščiausiu energijos poreikius, kai neužtenka generacijos ir didinti tiekimo tinklo patikimumą. Baterijų energijos kaupimo technologijos priklauso nuo elektrocheminės sudėties. Didžiąją dalį sistemos kaupimo sistemų sudaro baterijų kaupimo sistemos. Pagal poreikį kaupimas gali būti komplektuojamas su skirtingu reagavimo laiko baterijomis. Įprastam tinklui naudojami trijų rūšių reagavimo režimai: greito, vidutinio ir lėto. Dažnai akumuliatoriai persidengia pagal reagavimo režimą, todėl svarbu parinkti reikiamos galios ir reakcijos laiko baterijas.

2. Metodinė dalis

Atsinaujinančių šaltinių poveikio elektros sistemos dažnio charakteristikoms tyrimas atliekamas naudojant DIgSILENT PowerFactory programinį paketą. Modeliuojama izoliuota elektros sistema, pagal tarptautinio elektros ir elektronikos instituto (IEEE) mokslininkų sukurtą, 39-ių mazgų elektros sistemos schemą, tačiau patobulinta pagal šio darbo temą ir tikslą.

Patobulinta 39 mazgų modeliuojama elektros sistema yra sudaryta viso iš 10 sinchroninių generatorių ir 19 apkrovų. Elementai tarpusavyje jungiami elektros oro linijomis. Palaipsniui yra mažinamas sinchroninių generatorių kiekis ir jie keičiami atsinaujinančiais šaltiniais iki kol didžioji sistemos dalis yra maitinama iš atsinaujinančiųjų šaltinių.



6 pav. Modeliuojamos sistemos schema

Naudojantis programine įranga yra modeliuojami šie scenarijai:

1. Pagrindinis elektros energijos sistemos scenarijus skirtas apskaičiuoti bazines vertes.
2. Tradicinių generacijos šaltinių keitimas į atsinaujinančius energijos šaltinius
3. Baterijų energijos kaupimo sistemos prijungimas, esant didelei atsinaujinančių šaltinių generacijai.
4. Sinchroninių kompensatorių prijungimas esant didelei atsinaujinančių šaltinių generacijai.

Kiekvienam iš šių scenarijų atliekamas dažnio stabilumo tyrimas.

Prielaidos, pagal kurias modeliuojami sistemos rodikliai:

- Skaičiavimai atliekami naudojant vidutinės kvadratinės šaknies (*angl. RMS- root mean square*) būdą.

- Vėjo ir saulės elektrinių galios parinktos identiškos sinchroniniams generatoriams, kad išvengti neatitikimų nuo bazinių verčių
- Sistemos galių disbalansui, modeliuojamas apkrovos Nr.4 išjungimas per jungtuvą ir pakartotinis įjungimas. Apkrova išjungžiama praėjus 5 sekundėms nuo stabilaus sistemos veikimo, taip sukuriama galios disbalansas. Po dar 5 sekundžių apkrova įjungžiama ir taip sukuriama galios deficitas, kurio metu matomi didžiausi dažnio pokyčiai.
- Sistemos dažnis parenkamas – 50Hz.
- Akumuliatorių baterijų galios yra 10% nuo generatorių galios.
- Akumuliatoriai jungiami į tas pačias šynas, į kurias prijungti AEI.
- Sinchroninių generatorių inercijos konstantos pateikiamos lentelėje Nr. 1

Visos sistemos parametrai pateikiami žemiau esančiose lentelėse.

1 lentelė. Modelio generatorių parametrai

Generatorius	Sr, MVA	U, kV	H, s
G1	1000	16,5	5
G2	700	16,5	4,329
G3	800	16,5	4,475
G4	800	16,5	3,575
G5	300	16,5	4,333
G6	800	16,5	4,35
G7	700	16,5	3,771
G8	700	16,5	3,471
G9	1000	16,5	3,45
G10	1000	16,5	4,2

2 lentelė. Modelio transformatorių parametrai

Transformatorius	Sr, MVA	U, kV
Trf 12 - 11	300	345/138
Trf 12 - 13	300	345/138
Trf 06 - 31	700	345/16,5
Trf 10 - 32	800	345/16,5
Trf 19 - 33	800	345/16,5
Trf 20 - 34	600	345/16,5
Trf 22 - 35	800	345/16,5
Trf 23 - 36	700	345/16,5
Trf 25 - 37	700	345/16,5
Trf 29 - 30	1000	345/16,5
Trf 29 - 38	1000	345/16,5
Trf 19 - 20	1000	345/230

3 lentelė. Modelio perdavimo linių parametrai

Linija	Ilgis, km	R, Ω /km	X, Ω /km	C, μ F/km
Linija 01-02	163,06	0,0255	0,3	0,0095
Linija 01-39	99,19	0,012	0,3	0,0168
Linija 02-03	59,9	0,0258	0,3	0,0095
Linija 02-25	34,12	0,244	0,3	0,0058
Linija 03-04	84,5	0,0183	0,3	0,009
Linija 03-18	52,77	0,0248	0,3	0,0058
Linija 04-05	50,78	0,0187	0,3	0,006
Linija 04-14	51,18	0,0186	0,3	0,0093
Linija 05-06	10,31	0,023	0,3	0,0074
Linija 05-08	44,43	0,0214	0,3	0,0068
Linija 06-07	36,5	0,0195	0,3	0,0095
Linija 06-11	32,53	0,0256	0,3	0,0095
Linija 07-08	18,25	0,026	0,3	0,0058
Linija 08-09	144,02	0,019	0,3	0,0269
Linija 09-39	99,19	0,012	0,3	0,0095
Linija 10-11	17,06	0,0279	0,3	0,0095
Linija 10-13	1,06	0,0279	0,3	0,0095
Linija 13-14	40,07	0,0267	0,3	0,0094
Linija 14-15	86,09	0,0248	0,3	0,0102
Linija 15-16	37,29	0,0287	0,3	0,0084
Linija 16-17	35,31	0,0235	0,3	0,0087
Linija 16-19	77,36	0,0246	0,3	0,0106
Linija 16-21	53,56	0,0177	0,3	0,0064
Linija 16-24	23,4	0,0152	0,3	0,009
Linija 17-18	32,53	0,0256	0,3	0,0104
Linija 17-27	68,63	0,0225	0,3	0,0102
Linija 21-22	55,54	0,0171	0,3	0,0108
Linija 22-23	38,08	0,0187	0,3	0,0057
Linija 23-24	138,86	0,0188	0,3	0,0089
Linija 25-26	128,15	0,0297	0,3	0,0091
Linija 26-27	58,32	0,0285	0,3	0,0092
Linija 26-28	188,05	0,0272	0,3	0,0092
Linija 26-29	247,96	0,0273	0,3	0,0092
Linija 28-29	59,9	0,0278	0,3	0,0092

4 lentelė. Modelio apkrovų parametrai

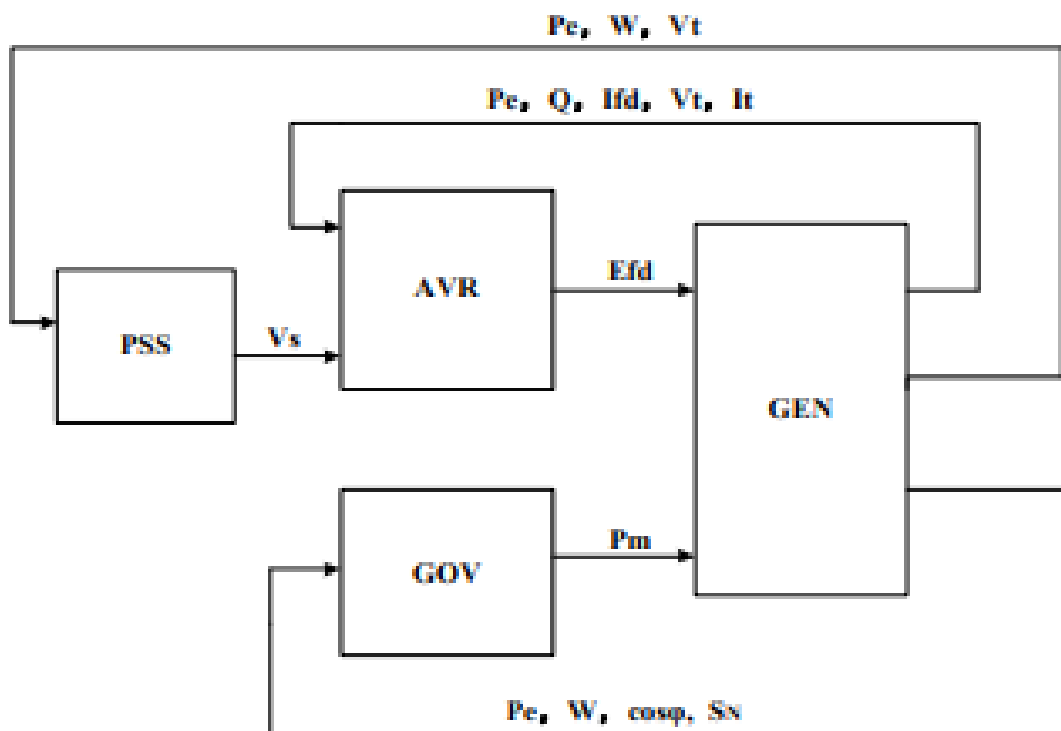
Apkrovos Nr.	Prijungtos šynos Nr.	P, MW	Q, Mvar
1	Bus 3	322	2,4
2	Bus 4	500	184
3	Bus 7	233,8	84
4	Bus 8	522	176
5	Bus 12	7,5	88
6	Bus 15	320	153
7	Bus 16	329	32,3
8	Bus 18	158	30
9	Bus 20	628	103
10	Bus 21	274	115
11	Bus 23	247,5	84,6
12	Bus 24	308,6	92,2
13	Bus 25	224	47,2
14	Bus 26	139	17
15	Bus 27	281	75,5
16	Bus 28	206	27,6
17	Bus 29	283,5	26,9
18	Bus 31	9,2	4,6
19	Bus 39	1104	250

2.1. Elektros energijos šaltinių valdymo sistemos

Kiekvienas elektros energijos generacijos šaltinis turi turėti savo valdymo sistemą. Tyrime modeliuojamos tradiciniai ir atsinaujinantys elektros generacijos šaltiniai. Kiekvienas šios sistemos elementas reaguoja į aplinkos, apkrovos ir kitus pokyčius. Kadangi kiekvienas generacijos šaltinis yra unikalus, negalima naudoti vienos valdiklių sistemos visiems elementams. Toliau pateikiamos skirtingų sistemos elektros generatorių šaltinių valdymo sistemos.

2.1.1. Tradicinių šaltinių valdymo sistema

Elektros energetikos sistemos modeliavimo patikimumas labai priklauso nuo generatorių ir jų valdymo sistemos modelių struktūrų tikslumo. Įvairūs išmatuoti modeliai ir atitinkami sinchroninio generatoriaus valdymo sistemos (pavyzdžiui, automatinio įtampos reguliatoriaus (angl. AVR – automatic voltage regulator), elektros energijos sistemos stabilizatoriaus (angl. PSS – Power system stabilizer) ir greičio reguliatoriaus (angl. GOV - governor)) parametrai gauti atliekant lauko bandymus [15]. Šie modeliai ir parametrai integruojami į plačiai naudojamą elektros sistemos analizės programą DlgSILENT PowerFactory yra visame pasaulyje populiarus galios sistemos analizės programinės įrangos paketas. Skirtingų elektros energetikos sistemos modeliavimo programinės įrangos palyginimas susijusių problemų tyrimams yra svarbus norint sužinoti programinės įrangos modeliavimo galimybes ir apribojimus. Tradicinio sinchroninio generatoriaus valdymo sistema pateikta 6 paveiksle.

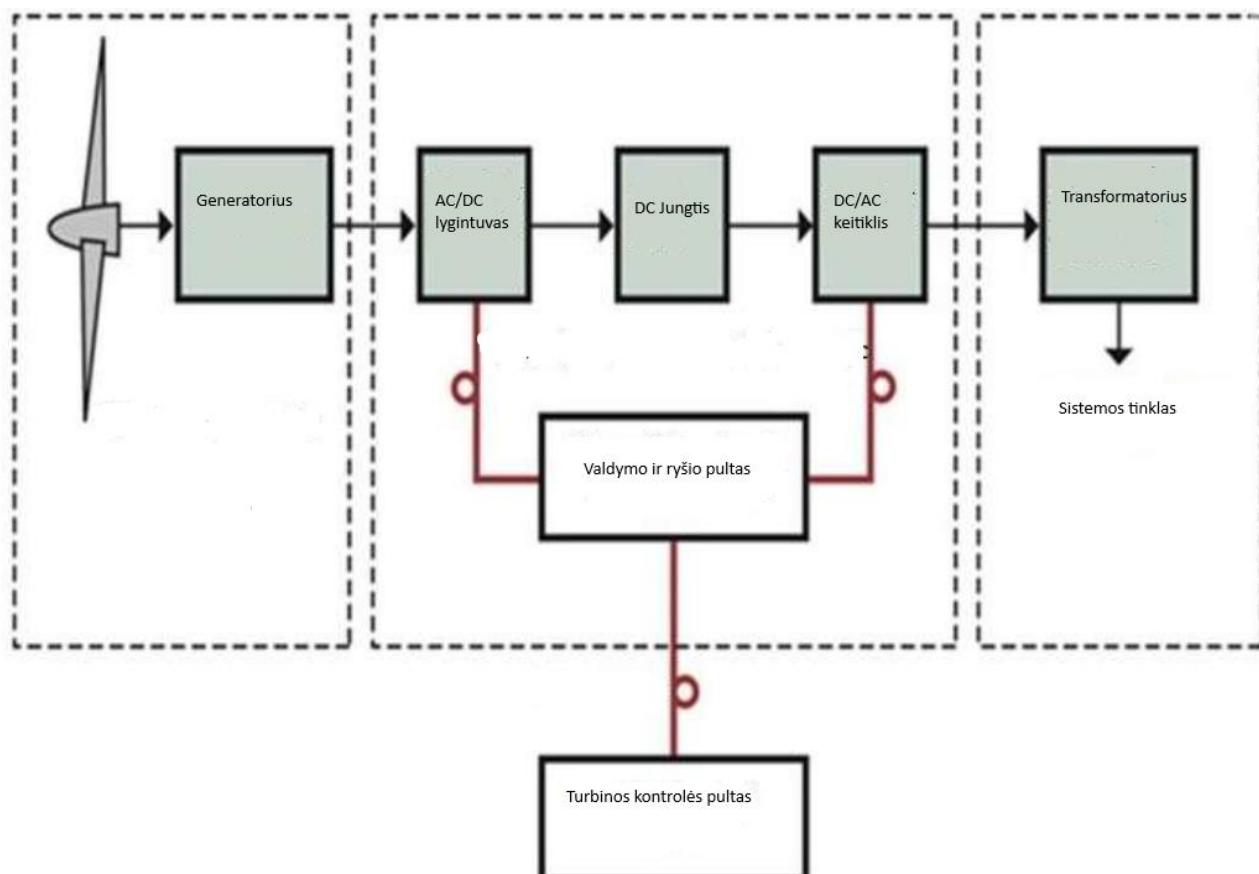


7 pav. Sinchroninių generatorių valdiklio schema[14]

Sinchroninio generatoriaus su valdymo sistema blokinės schemos kintamieji: V_s – Sistemos stabilizatoriaus išeiga; E_{fd} – sužadinimo įtampa; P_m – mechaninė galia; P_e – aktyvioji galia; W – rotoriaus greitis; V_t – terminalo įtampa; I_{fd} – sužadinimo srovė; I_t – terminalo srovė; $\cos\phi$ – galios faktorius; S_N – nominali pilnutinė galia.

2.1.2. Vėjo elektrinių valdymo sistema

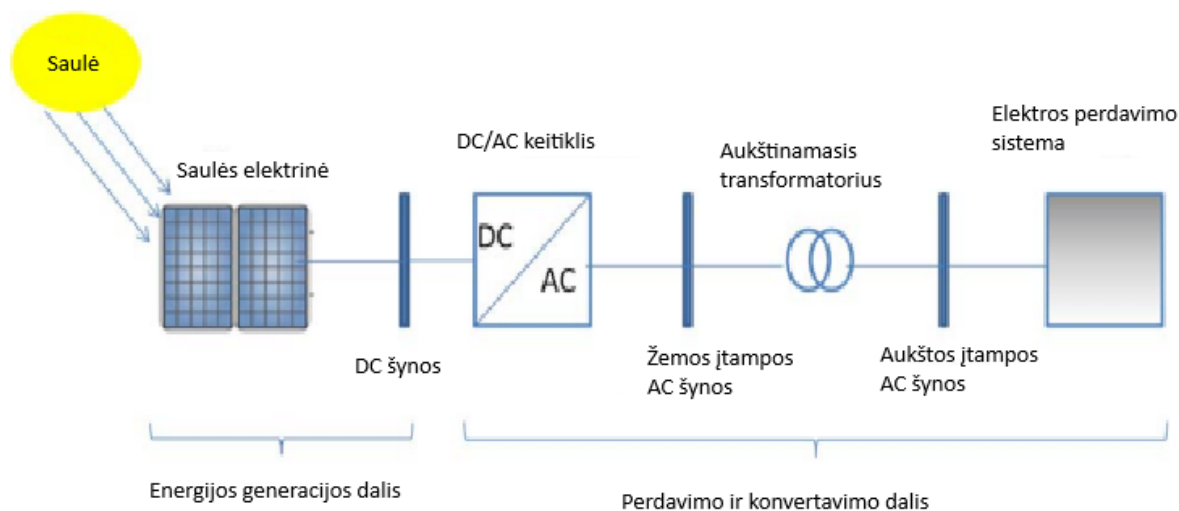
Vėjo elektrinė – atsinaujinančios energijos keitimo įrenginys. Jis vėjo sukurtą kinetinę energiją paverčia į mechaninę energiją, kuri sukdama generatorių gamina elektros energiją. Vėjui pučiant per turbinos mentes, susidaro oro slėgio skirtumas, todėl mentės sukasi. Šis sukimasis suka veleną, sujungtą su generatoriumi, kuris gamina elektros energiją. Priklausomai nuo turbinos konstrukcijos, sukimosi greičiui padidinti gali būti naudojama pavaru dėžė. Siekiant užtikrinti optimalų veikimą ir apsaugoti turbiną nuo pažeidimų, naudojamos kelios valdymo sistemos. Turbinos posvyrio valdymo sistema reguliuoja menčių pasvirimo kampą, kad būtų galima reguliuoti vėjo energijos kiekį ir išlaikyti efektyvų veikimą esant skirtingam vėjo greičiui. Posvyrio valdymo sistema nukreipia turbiną į vėjo kryptį, kad būtų maksimaliai išnaudojama vėjo kinetinė energija. Be to, turbinos valdiklis stebi vėjo sąlygas ir eksploatacinius parametrus ir išjungia turbiną, jei vėjo greitis viršija saugias ribas, kad būtų išvengta mechaninių pažeidimų.



8 pav. Vėjo elektrinių schema[16]

2.1.3. Saulės elektrinių valdymo sistema

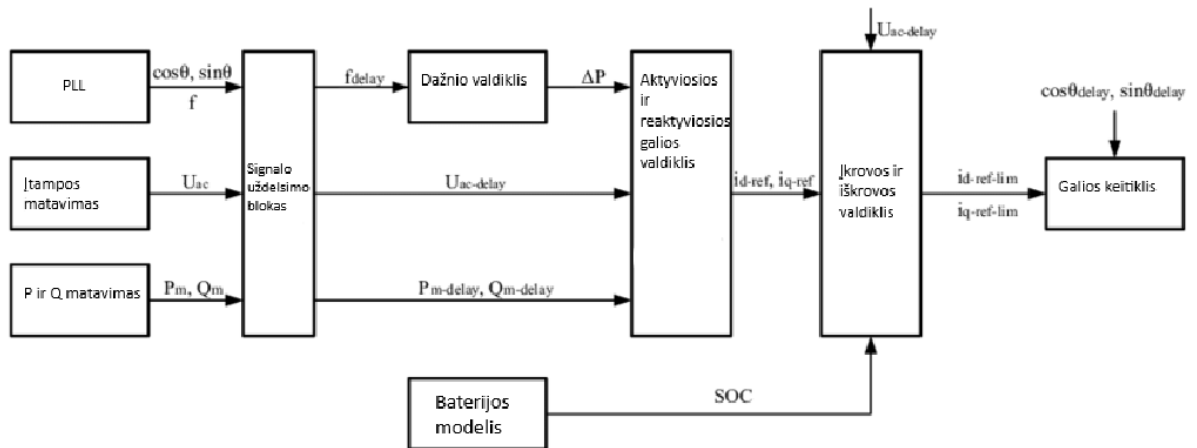
Saulės elektrinėje elektros energija gaminama saulės šviesą paverčiant elektros energija naudojant fotovoltinius (PV) modulius. Moduliai yra sudaryti iš puslaidininkinių medžiagų, paprastai silicio, kurios sugeria saulės šviesos fotonus, todėl išsiskiria elektronai ir susidaro nuolatinė srovė. Vėliau ši nuolatinės srovės elektra inverteriais paverčiama kintamąja, kad ją galima būtų prijungti prie sistemos tinklo. Šio modelio atveju, saulės parkai yra prijungiami per aukštinamuosius transformatorius, kad saulės elektrinė būtų prijungiama prie perdavimo, o ne skirstomosios sistemos tinklo. Siekiant užtikrinti optimalų veikimą ir integraciją su elektros tinklu, saulės elektrinėse naudojamos pažangios valdymo sistemos. Šios sistemos nuolat stebi tokius kintamuosius, kaip saulės spinduliuotė, modulių efektyvumas, temperatūra ir elektros energijos gamyba. Jos reguliuoja inverterių veikimą, kad būtų maksimaliai padidinta energijos gamyba, dažnai naudojant didžiausios galios taško sekimo (MPPT) algoritmus, kad būtų rastas optimalus veikimo taškas kintančiomis saulės šviesos sąlygomis. Be to, meteorologiniai bokštai analizuoja aplinkos sąlygas, kad galėtų numatyti saulės spinduliuotės intensyvumą ir informuoti apie eksploatacinius pakeitimus. Prie tinklo prijungtose sistemose inverteriai sinchronizuoja pagamintos elektros energijos fazę, įtampą ir dažnį su tinklo faze, taip užtikrindami saugų ir veiksmingą energijos tiekimą.



9 pav. Saulės elektrinių schema[17]

2.1.4. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymo sistema

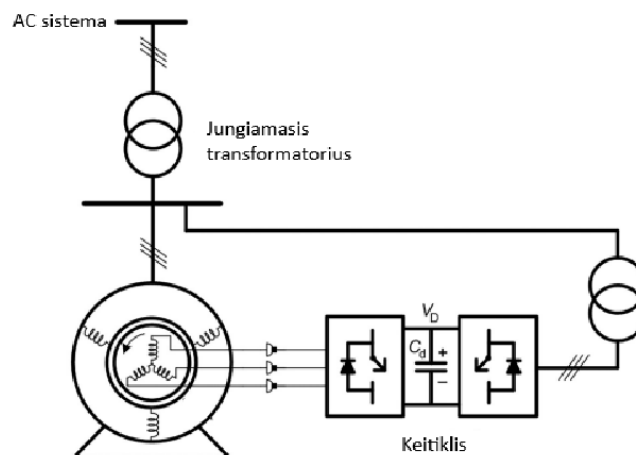
Akumuliatorių energijos kaupimo sistemoje (BEKS) kaupiama elektros energija, kuri vėliau naudojama, taip didinant tinklo stabilumą ir palengvinant atsinaujinančiųjų energijos šaltinių, pavyzdžiui, saulės ir vėjo, integravimą. Sistemą sudaro keli pagrindiniai komponentai, kurių kiekvienas atlieka svarbų vaidmenį jos veikimui. Akumuliatoriai yra pagrindiniai energijos kaupikliai, o dėl didelio energijos tankio ir ilgo ciklo trukmės dažniausiai naudojama ličio jonų technologija. Akumuliatorių valdymo sistema (*angl. Battery management system - BMS*) stebi ir valdo akumuliatorių būklę, stebėdama tokius parametrus kaip įtampa, temperatūra ir įkrovos būseną, taip užtikrindama saugų ir veiksmingą veikimą. Maitinimo konversijos sistema (*angl. Power conversion system - PCS*), dažniausiai tai inverteris, kuris akumuliatoriuose sukauptą nuolatinę srovę (DC) konvertuoja į kintamąją srovę (AC), skirtą naudoti tinkle, ir atvirkščiai - įkrovimo metu kintamąją srovę konvertuoja į nuolatinę. Energijos valdymo sistema (*angl. Energy management system - EMS*) prižiūri bendrą BEKS veikimą, optimizuoja įkrovimo ir iškrovimo ciklus, atsižvelgdama į tinklo paklausą. Prižiūros valdymo ir duomenų rinkimo sistema užtikrina stebėseną ir valdymą realiuoju laiku, todėl operatoriai gali valdyti sistemą nuotoliniu būdu ir užtikrinti tinkamą jos veikimą. Kartu šie komponentai leidžia BEKS tiekti patikimą energiją pagal poreikį, palaikyti tinklo balansavimą ir palengvinti atsinaujinančiųjų energijos šaltinių integravimą.



10 pav. BEKS sistemų schema[18]

2.1.5. Sinchroninio kompensatoriaus valdymo sistema

Sinchroninis kompensatorius, atlieka labai svarbų vaidmenį stabilizuojant tinklo dažnį, nes suteikia sinchroninę inerciją. Šis prietaisas iš esmės yra nuolatine srove žadinamas sinchroninis variklis, veikiantis be mechaninės apkrovos, t. y. jo velenas nėra prijungtas prie jokios varomosios įrangos. Pagrindinė jo funkcija yra ne paversti elektros energiją mechanine ar atvirkščiai, bet reguliuoti elektros perdavimo tinklo sąlygas. Sinchroninis kompensatorius prisideda prie tinklo dažnio reguliavimo, veikdamas kaip besisukanti masė, kuri priešinasi staigiems dažnio pokyčiams. Kai sparčiai padidėja apkrova arba prarandama elektros energijos gamyba, sinchroninio kompensatoriaus inercija padeda sulėtinti dažnio kritimo greitį, todėl kitiems valdymo mechanizmams lieka papildomo laiko reaguoti į apkrovos pokyčius. Ir atvirkščiai, mažos paklausos arba didelės gamybos laikotarpiais kompensatorius gali absorbuoti energijos perteklių, taip padėdamas išvengti dažnio padidėjimo.



11 pav. Sinchroninio kompensatoriaus schema[19]

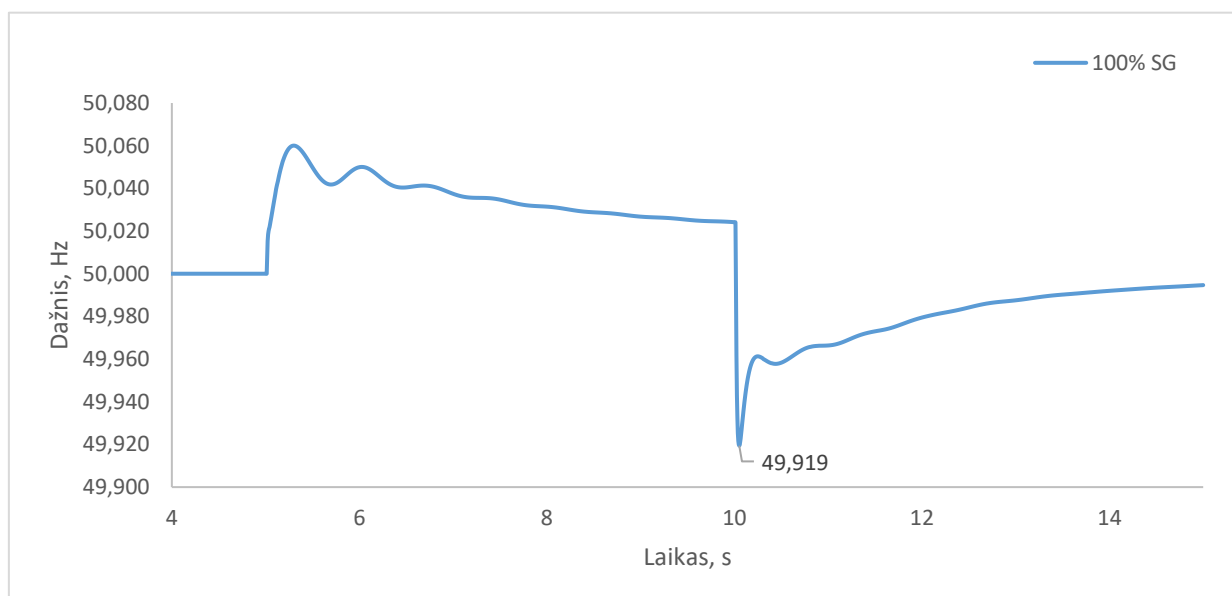
3. Tiriamoji dalis

Tyrimui atlikti naudojamas IEEE 39 mazgų modelis, kuriame atliekami šie žingsniai:

1. Apskaičiuojami baziniai duomenys, prieš paleidžiant simuliaciją;
2. Nusistovėjus dažniui ties 50 Hz, po 5 sekundžių išjungiama apkrova Nr.4;
3. Praėjus dar 5 sekundėms, apkrova įjungžiama atgal ir stebimi dažnio pasikeitimai šynose Nr.8;

3.1. Bazinių duomenų nustatymas

Baziniai duomenys nustatomi pagal pirmą scenarijų, t.y. visą sistema maitinama iš sinchroninių generatorių be baterijų kaupimo sistemų ir sinchroninių kompensatorių.



12 pav. Dažnio priklausomybė, kai 100% energijos generuojama SG

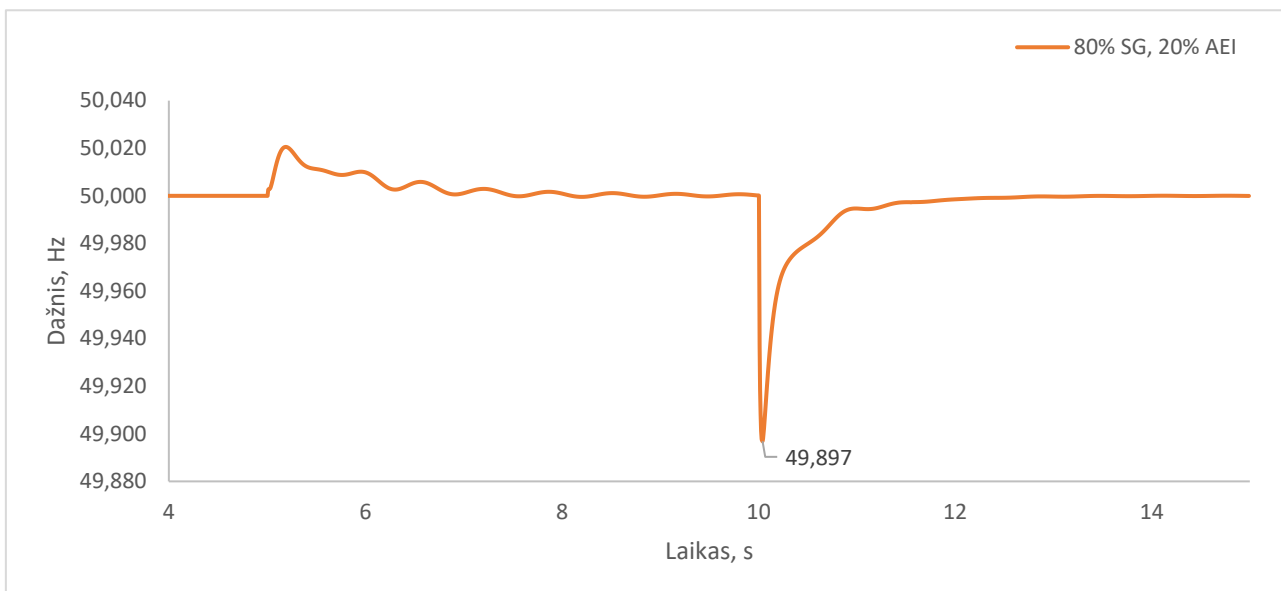
5 lentelė. Dažnio kitimo parametrai, kai 100% generacijos iš SG

Bandymo konfigūracija	Minimali dažnio vertė, Hz	Dažnio nuokrypis, Hz	Dažnio kitimo greitis, Hz/s	
			Kritimo greitis	Atsistatymo greitis
100% SG	49,919	0,081	-2,62	0,02

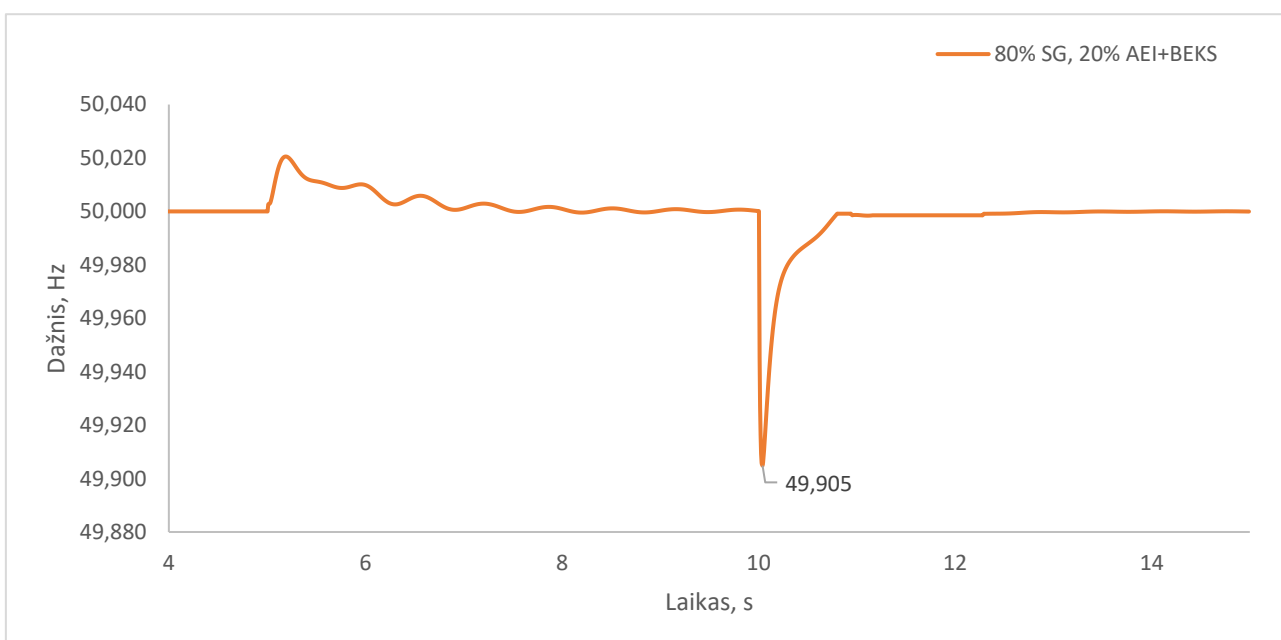
Grafike matoma, kad atjungus apkrovą ir sumažėjus energijos poreikiui, dažnis pakyla iki 50,06 Hz. Tai parodo, kad aktyviosios galios generacija yra didesnė, nei apkrova. Apkrovai išjungus, dažnis staigiai krenta ir pasiekia 49,919 Hz ribą. Maksimalus dažnio nuokrypis yra 0,081 Hz, ir jis pasiekiamas 10,051s nuo tiriamo modelio pradžios. Minimali vertė pasiekama po 0,051s nuo apkrovos įjungimo. Sinchroninių generatorių inercija sugeria staigų apkrovos padidėjimą ir dažnio kritimo greitis yra -2,62 Hz/s. Pasiekus žemiausią dažnį, sistema po truputį atsistatinėja, kol pasiekia 50 Hz ribą.

3.2. 80% generacija iš SG, 20% generacija iš AEI

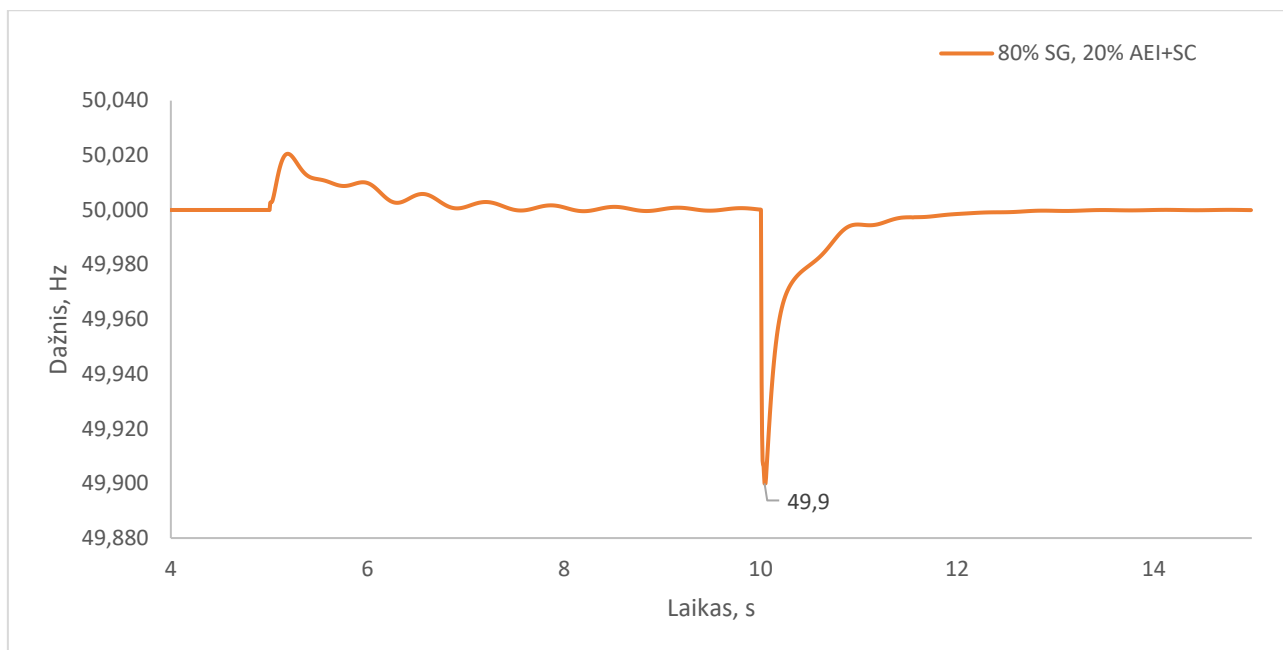
Antrojo scenarijaus metu, 2 iš 10 sinchroninių generatorių pakeičiami į atsinaujinančiuosius šaltinius. Vienas generatorius keičiamas į tokios pat galios vėjo elektrinę, o kitas į saulės. Bandymo metu yra testuojami ir sinchroninio kompensatoriaus bei BEKS sistemos prijunginiai. Dažnio kitimo rezultatai matomi paveiksluose Nr. 12-14.



13 pav. Dažnio priklausomybė, kai 20% energijos generuojama iš AEI



14 pav. Dažnio priklausomybė, kai 20% energijos generuojama iš AEI su BEKS



15 pav. Dažnio priklausomybė, kai 20% energijos generuojama iš AEI su SC

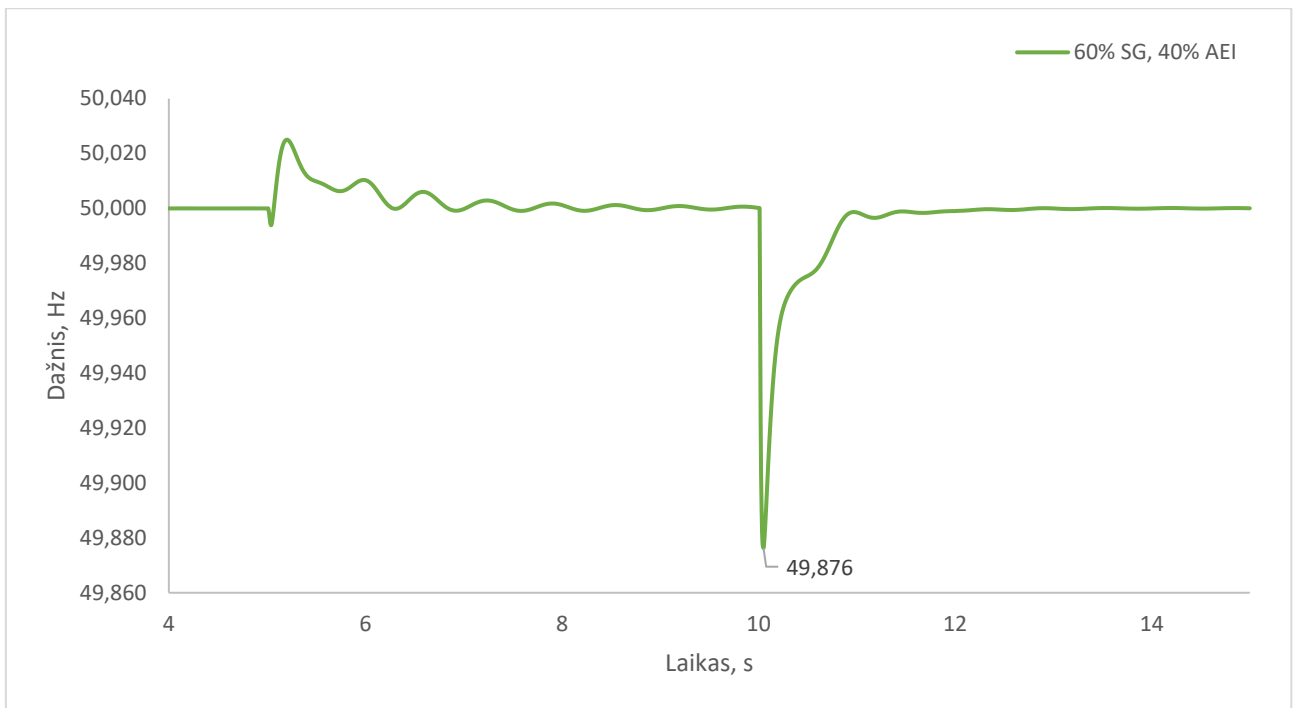
6 lentelė. Dažnio kitimo parametrai, kai 20% generacijos iš AEI

Bandymo konfigūracija	Minimali dažnio vertė, Hz	Dažnio nuokrypis, Hz	Dažnio kitimo greitis, Hz/s	
			Kritimo greitis	Atsistatymo greitis
80% SG, 20% AEI	49,897	0,103	-2,58	0,07
80% SG, 20% AEI + BEKS	49,905	0,095	-2,38	0,08
80% SG, 20% AEI + SC	49,9	0,1	-2,50	0,06

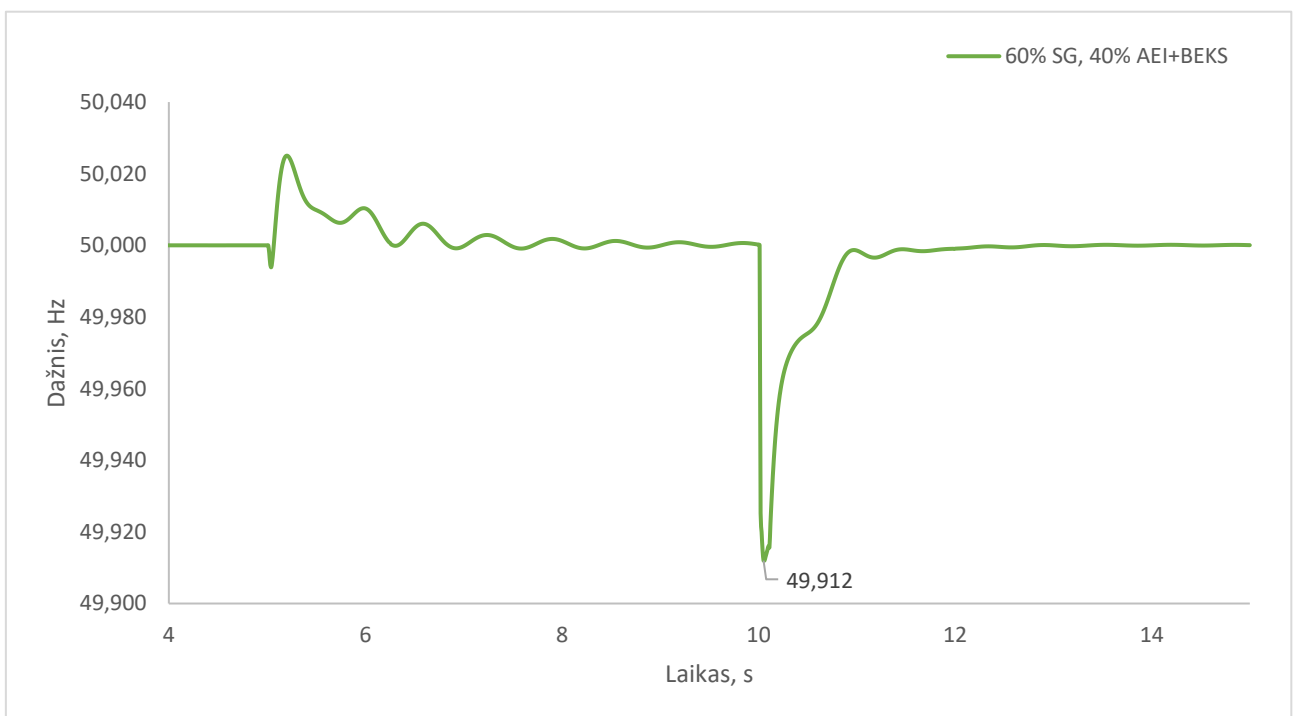
Grafikuose matoma, kad atjungus apkrovą, dažnis nepakyla taip aukštai palyginus su generacija, kai visa energija gaunama iš sinchroninių generatorių. Dažnis pakyla iki 50,021 Hz. Apkrovai prisijungus matome kritimą iki žemesnės dažnio ribos – 49,897 Hz. Maksimalus nuokrypis yra 0,103 Hz. Minimali vertė pasiekama per 0,043s. Prijungus baterijų energijos kaupimo sistemą, dažnis krenta iki 49,905 Hz ribos. Baterijų sistema kompensuoja trūkstama aktyvios energijos kiekį ir pagerina dažnio kritimo greitį per 0,2 Hz/s. Prijungus sinchroninį kompensatorių gaunamas geresnis rezultatas nei naudojant tik AEI šaltinius, bet blogesnis nei prijungus BEKS. BEKS sistema pagerina tiek kritimo greitį, tiek atsistatymo greitį iki 50 Hz ribos.

3.3. 60% generacija iš SG, 40% generacija iš AEI

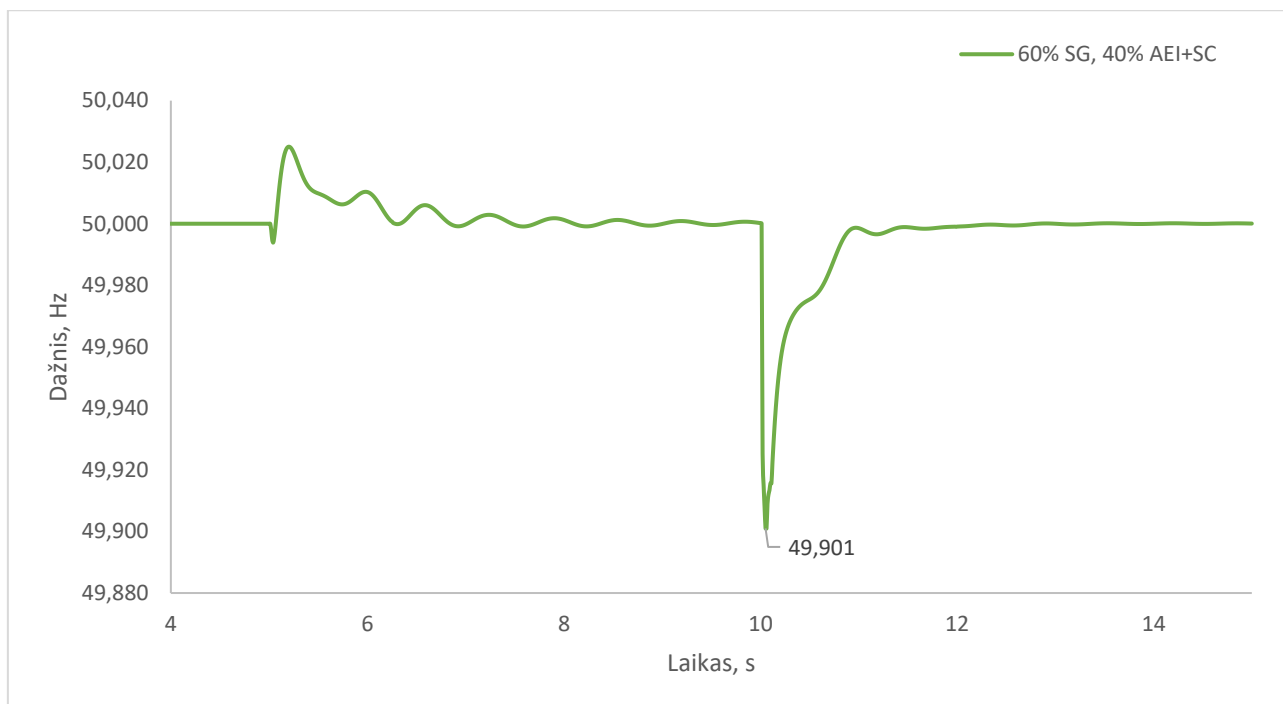
Trečiasis scenarijaus apima, 4 iš 10 sinchroninių generatorių pakeitimą į atsinaujinančiuosius šaltinius. Du generatoriai keičiami į vėjo elektrines, kiti du keičiami į saulės elektrines. Bandymo metu yra Prijungiami papildomi BEKS įrenginiai prie AEI šynų. Dažnio kitimo rezultatai matomi paveiksluose Nr. 16-18.



16 pav. Dažnio priklausomybė, kai 40% energijos generuojama iš AEI



17 pav. Dažnio priklausomybė, kai 40% energijos generuojama iš AEI su BEKS



18 pav. Dažnio priklausomybė, kai 40% energijos generuojama iš AEI su SC

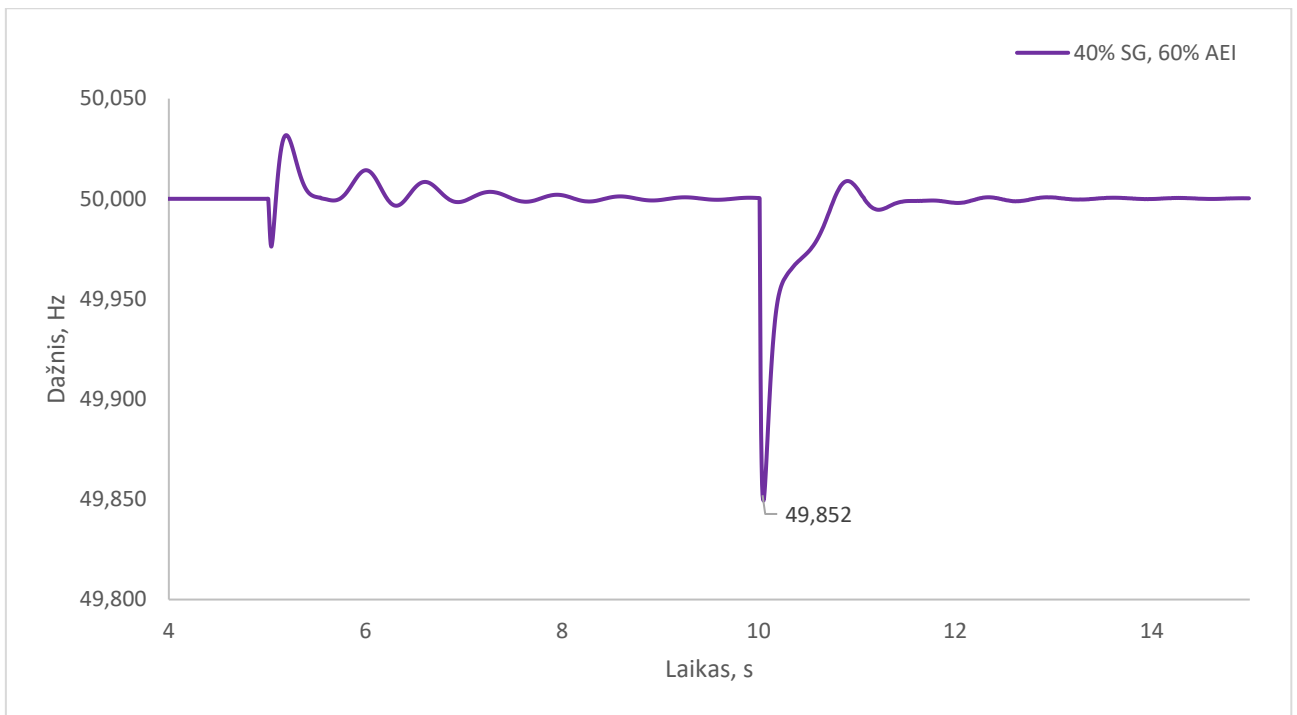
7 lentelė. Dažnio kitimo parametrai, kai 40% generacijos iš AEI

Bandymo konfigūracija	Minimali dažnio vertė, Hz	Dažnio nuokrypis, Hz	Dažnio kitimo greitis, Hz/s	
			Kritimo greitis	Atsistatymo greitis
60% SG, 40% AEI	49,876	0,124	-3,10	0,09
60% SG, 40% AEI + BEKS	49,912	0,088	-1,76	0,07
60% SG, 40% AEI + SC	49,901	0,099	-1,98	0,07

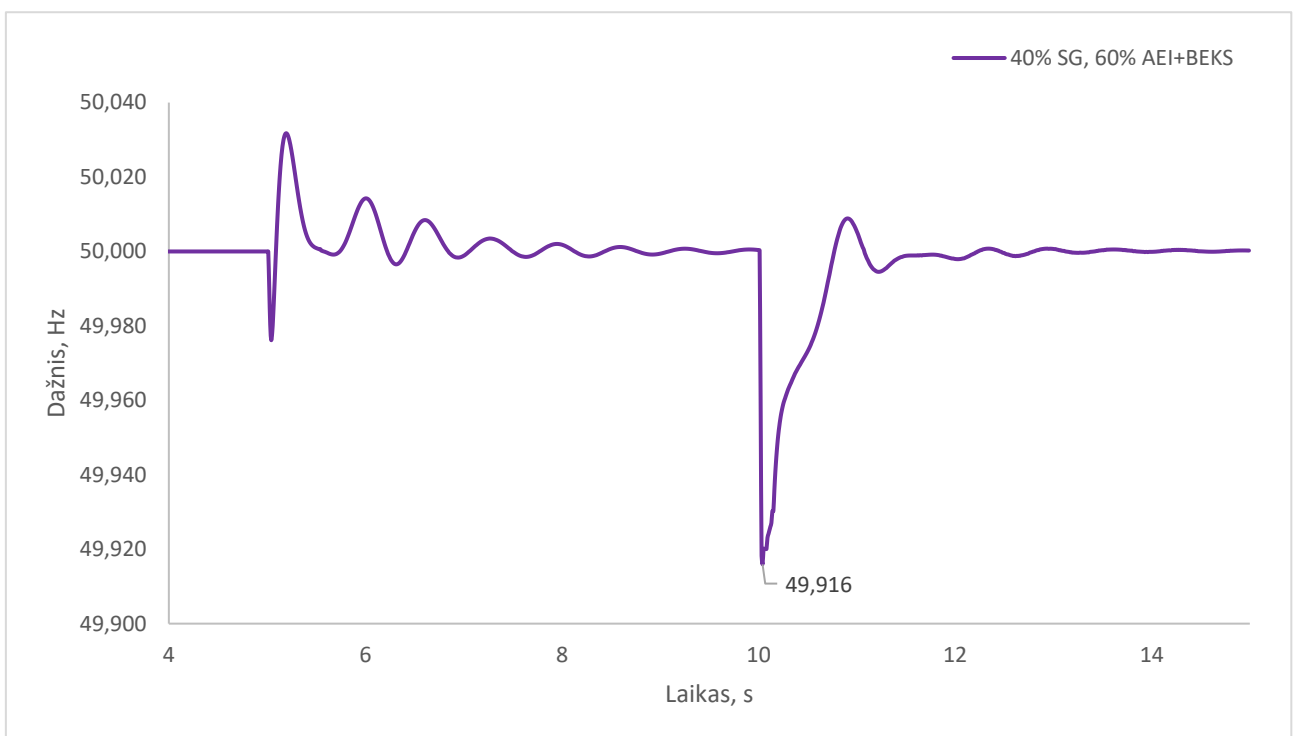
Grafikuose matoma, kad atjungus apkrovą, dažnis nepakyla taip aukštai palyginus su generacija, kai visa energija gaunama iš sinchroninių generatorių. Dažnis pakyla iki 50,021 Hz. Apkrovai prisijungus matome kritimą iki žemesnės dažnio ribos – 49,897 Hz. Maksimalus nuokrypis yra 0,103 Hz. Minimali vertė pasiekama per 0,043s. Atsistatymo greitis išlieka panašus kaip ir praeituose scenarijuose.

3.4. 40% generacija iš SG, 60% generacija iš AEI

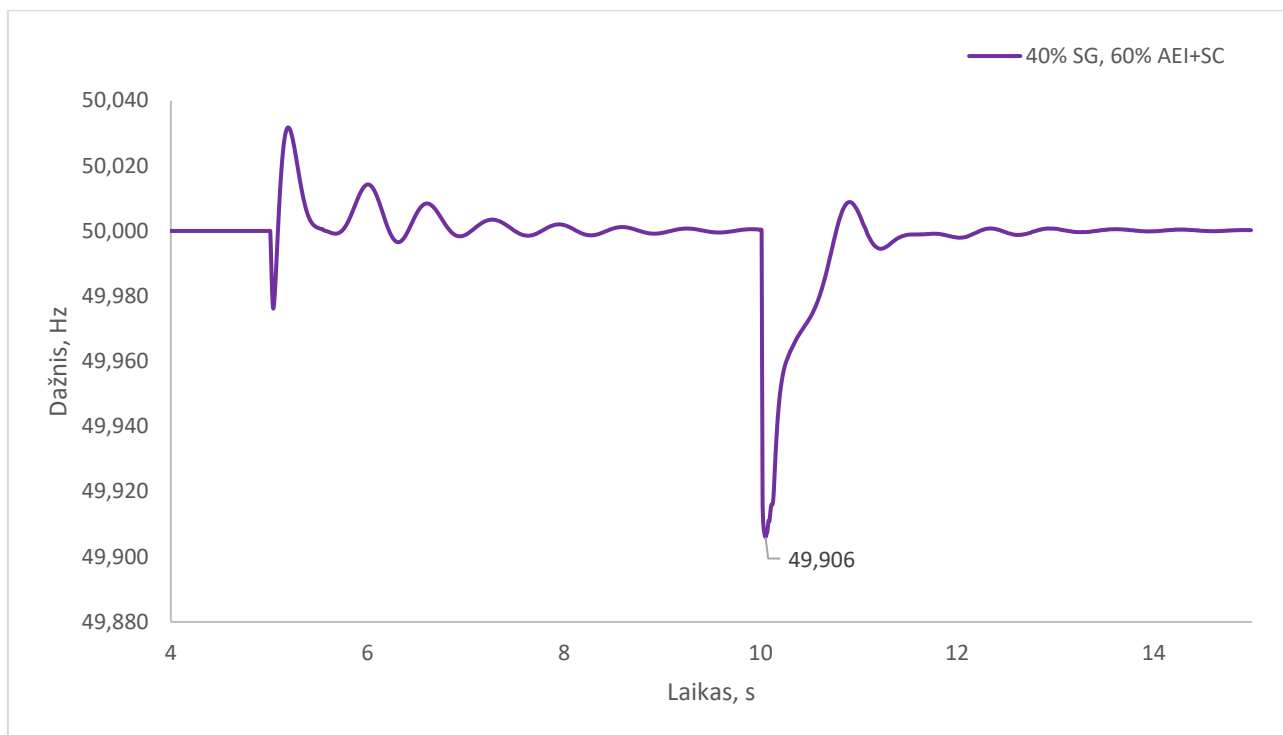
Ketvirtasis scenarijaus apima, 6 iš 10 sinchroninių generatorių pakeitimą į atsinaujinančiuosius šaltinius. Trys generatoriai keičiami į vėjo elektrines, kiti trys keičiami į saulės elektrines. Bandymo metu yra prijungiami dar du papildomi BEKS įrenginiai prie AEI šynų. Taip pat prijungiamas dar vienas papildomas sinchroninis kompensatorius. Dažnio kitimo rezultatai matomi paveiksluose Nr. 19-21.



19 pav. Dažnio priklausomybė, kai 60% energijos generuojama iš AEI



20 pav. Dažnio priklausomybė, kai 60% energijos generuojama iš AEI su BEKS



21 pav. Dažnio priklausomybė, kai 60% energijos generuojama iš AEI su SC

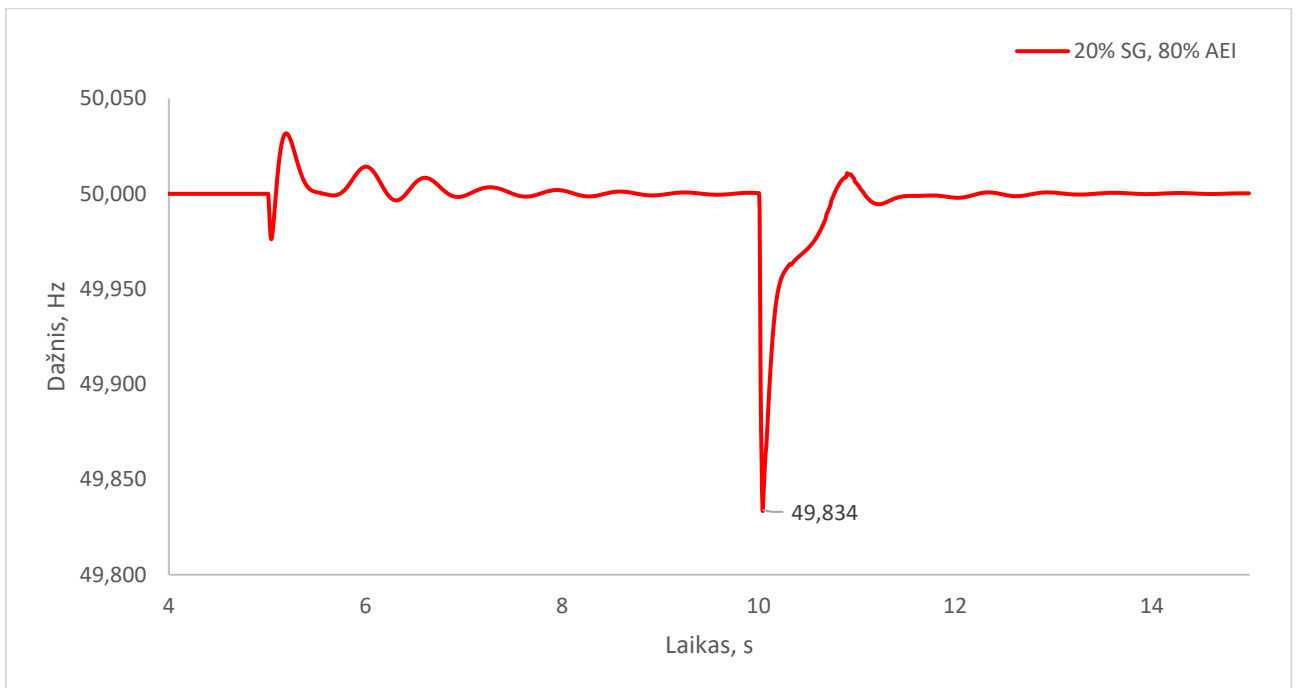
8 lentelė. Dažnio kitimo parametrai, kai 60% generacijos iš AEI

Bandymo konfigūracija	Minimali dažnio vertė, Hz	Dažnio nuokrypis, Hz	Dažnio kitimo greitis, Hz/s	
			Kritimo greitis	Atsistatymo greitis
40% SG, 60% AEI	49,852	0,148	-3,56	0,09
40% SG, 60% AEI + BEKS	49,916	0,084	-2,03	0,12
40% SG, 60% AEI + SC	49,906	0,094	-1,83	0,13

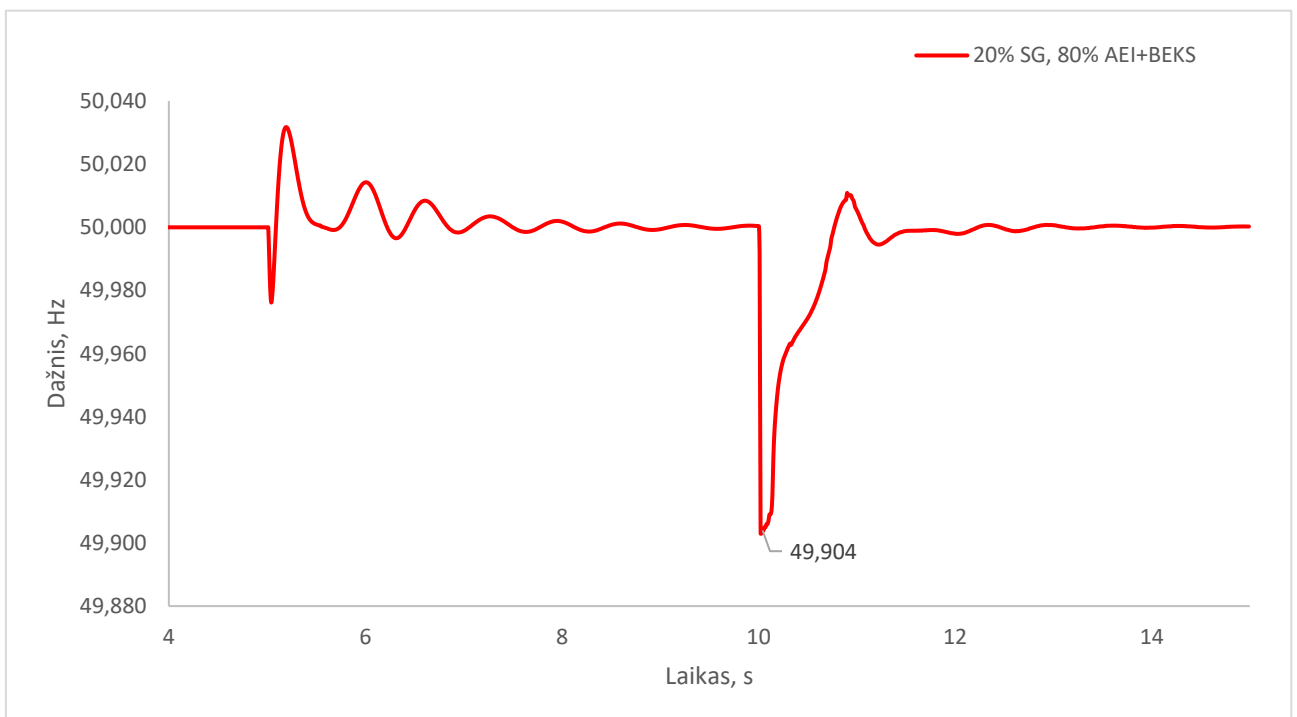
Prijungus po papildomą vėjo ir saulės elektrinę ir atjungus apkrovą, dažnis pakyla iki 50,03 Hz ir svyruodamas nusistovi ties 50 Hz. Apkrovai prisijungus dažnis krenta žemiau nei anksčiau minėtais scenarijais iki 49,852 Hz žemiausios ribos. Kritimo greitis taip pat padidėja iki -3,56 Hz/s. Prijungus baterijas dažnio nuokrypis 0,064 Hz mažesnis nei be BEKS sistemos. Papildomas sinchroninis kompensatorius minimaliai pagerino minimalią dažnio reikšmę, lyginant su anksčiau aprašytais scenarijais. Tiek BEKS sistema tiek papildomas sinchroninis kompensatorius pagerino atsistatymo greitį.

3.5. 20% generacija iš SG, 80% generacija iš AEI

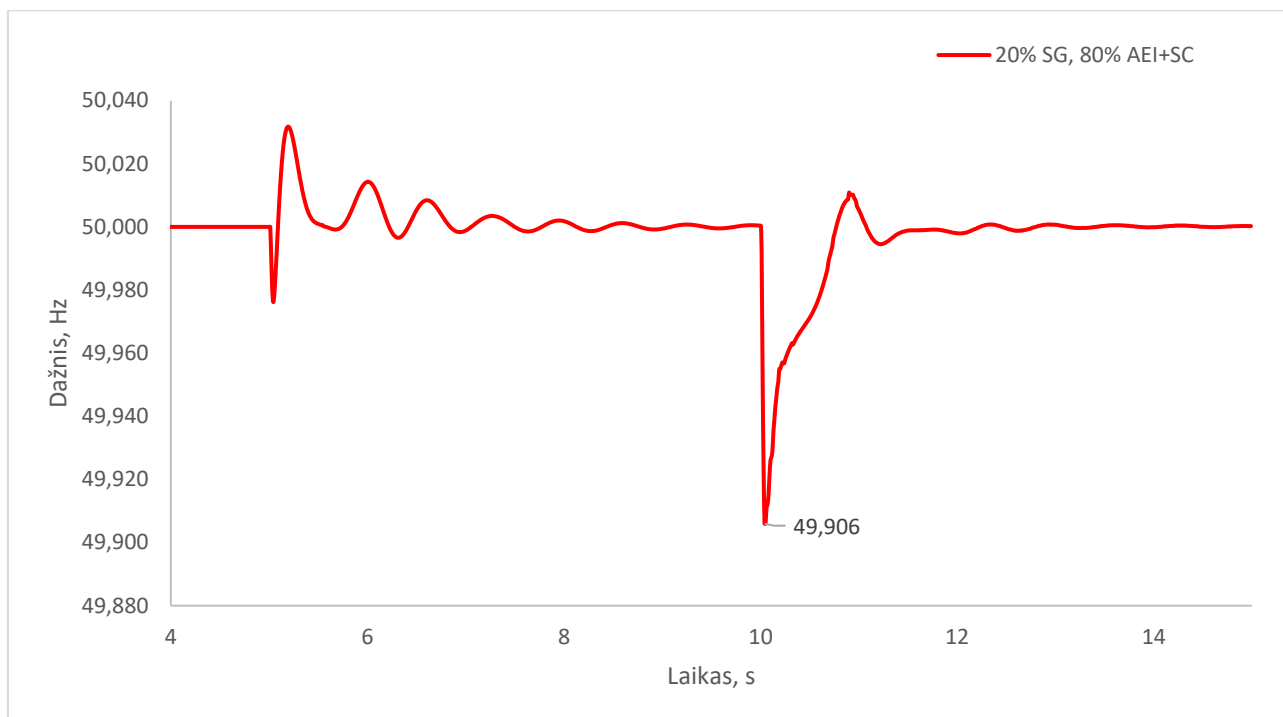
Penktasis scenarijaus apima, 8 iš 10 sinchroninių generatorių pakeitimą į atsinaujinančiuosius šaltinius. Išviso 8 generatoriai keičiami į vėjo ir saulės elektrines (4 vėjo ir 4 saulės elektrines). Bandymo metu yra prijungiami dar du papildomi BEKS įrenginiai prie AEI šynų. Sinchroninių kompensatorių kiekis išlieka nepakitęs. Dažnio kitimo rezultatai matomi paveiksluose Nr. 22-24.



22 pav. Dažnio priklausomybė, kai 80% energijos generuojama iš AEI



23 pav. Dažnio priklausomybė, kai 80% energijos generuojama iš AEI su BEKS



24 pav. Dažnio priklausomybė, kai 80% energijos generuojama iš AEI su SC

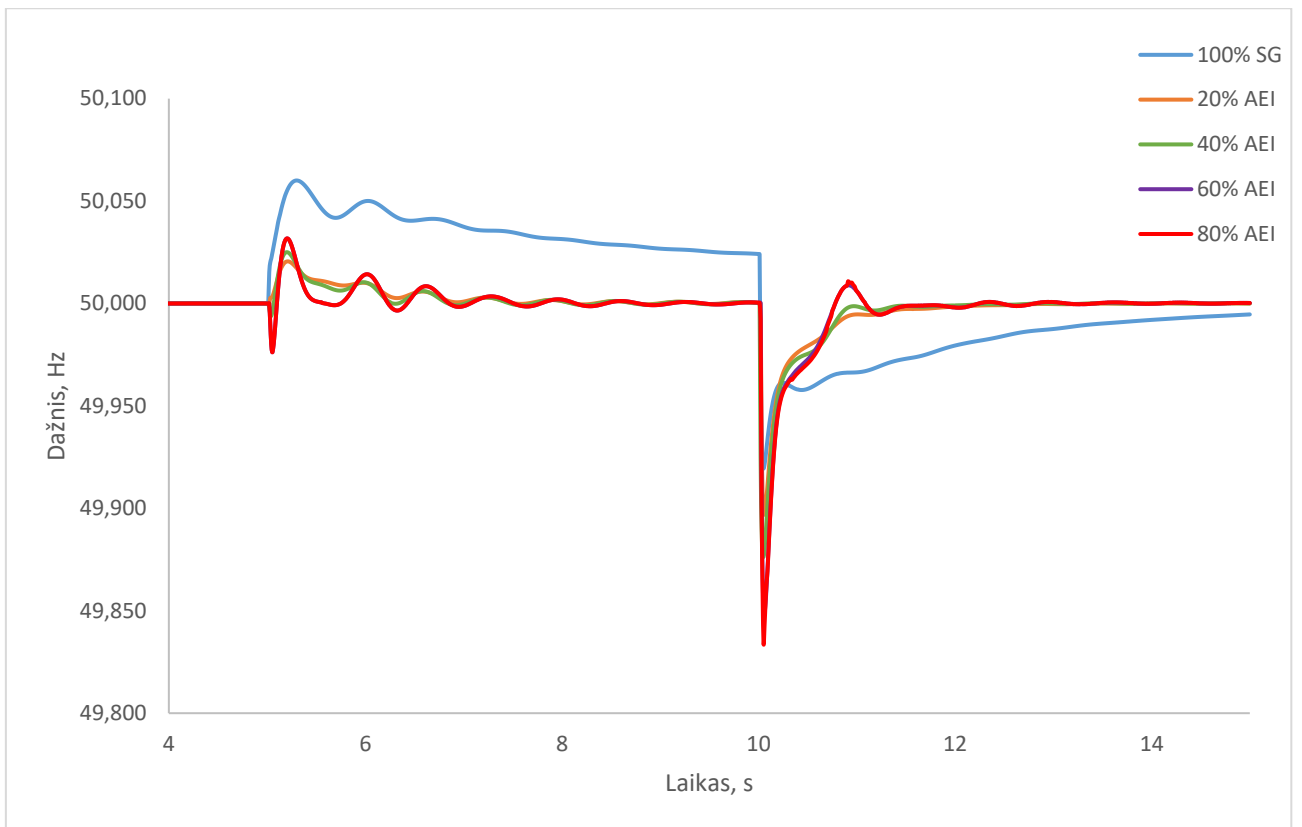
9 lentelė. Dažnio kitimo parametrai, kai 80% generacijos iš AEI

Bandyto konfigūracija	Minimali dažnio vertė, Hz	Dažnio nuokrypis, Hz	Dažnio kitimo greitis, Hz/s	
			Kritimo greitis	Atsistatymo greitis
20% SG, 80% AEI	49,834	0,166	-3,99	0,23
20% SG, 80% AEI + BEKS	49,904	0,097	-1,87	0,13
20% SG, 80% AEI + SC	49,906	0,094	-1,83	0,13

Kai 80% energijos generuojama iš AEI, matomas didžiausias dažnio kritimas iki 49,834 Hz. Kritimo greitis siekia -3,99 Hz/s. Prijungus BEKS sistemą dažnis išsilaiko stabilesnis, tačiau krenta žemiau nei 4 scenarijaus metu – iki 49,904 HZ. Šiuo atveju sinchroniniai kompensatoriai situaciją pagerino labiau nei baterijų sistema. Dažnio atsistatymo greitis nenaudojant BEKS ir sinchroninių kompensatorių yra greičiausias – 0,23 Hz/s.

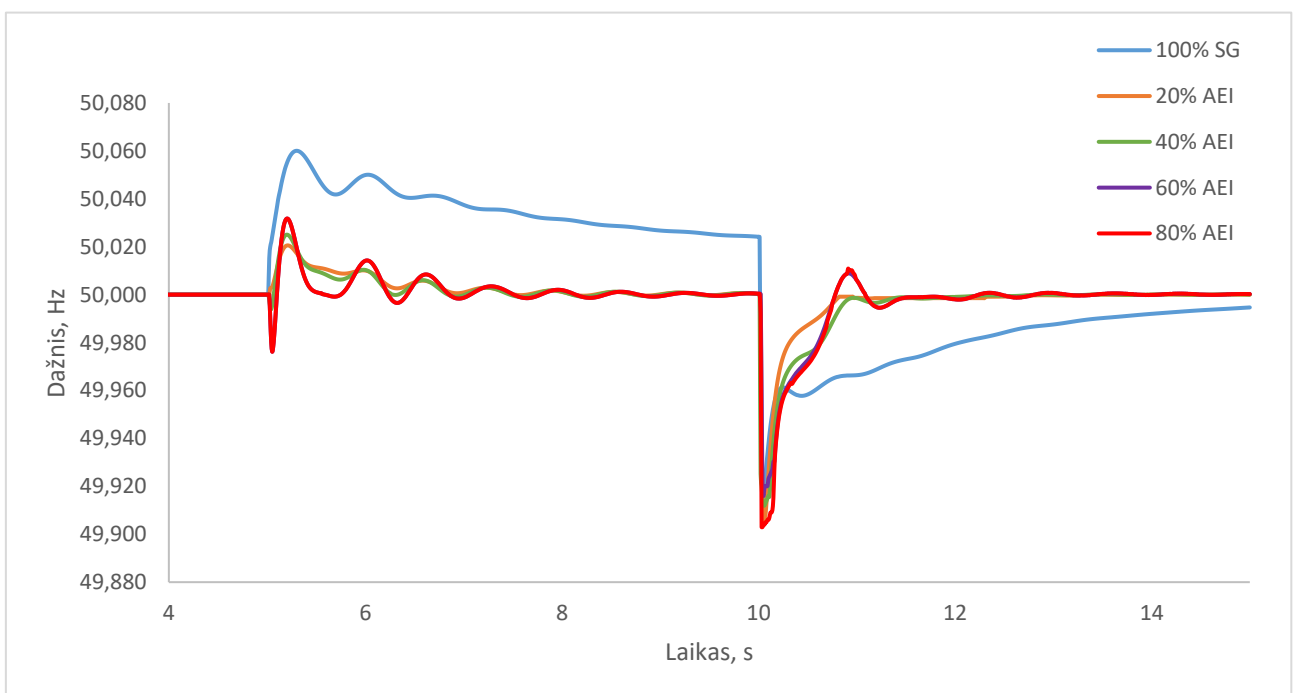
3.6. Tyrimo rezultatų apibendrinimas

Siekiant aiškiau atvaizduoti tyrimo metu gautus rezultatus sudaromi bendri gautų rezultatų grafikai. Gautus rezultatus galima palyginti paveiksluose Nr. 25-27.



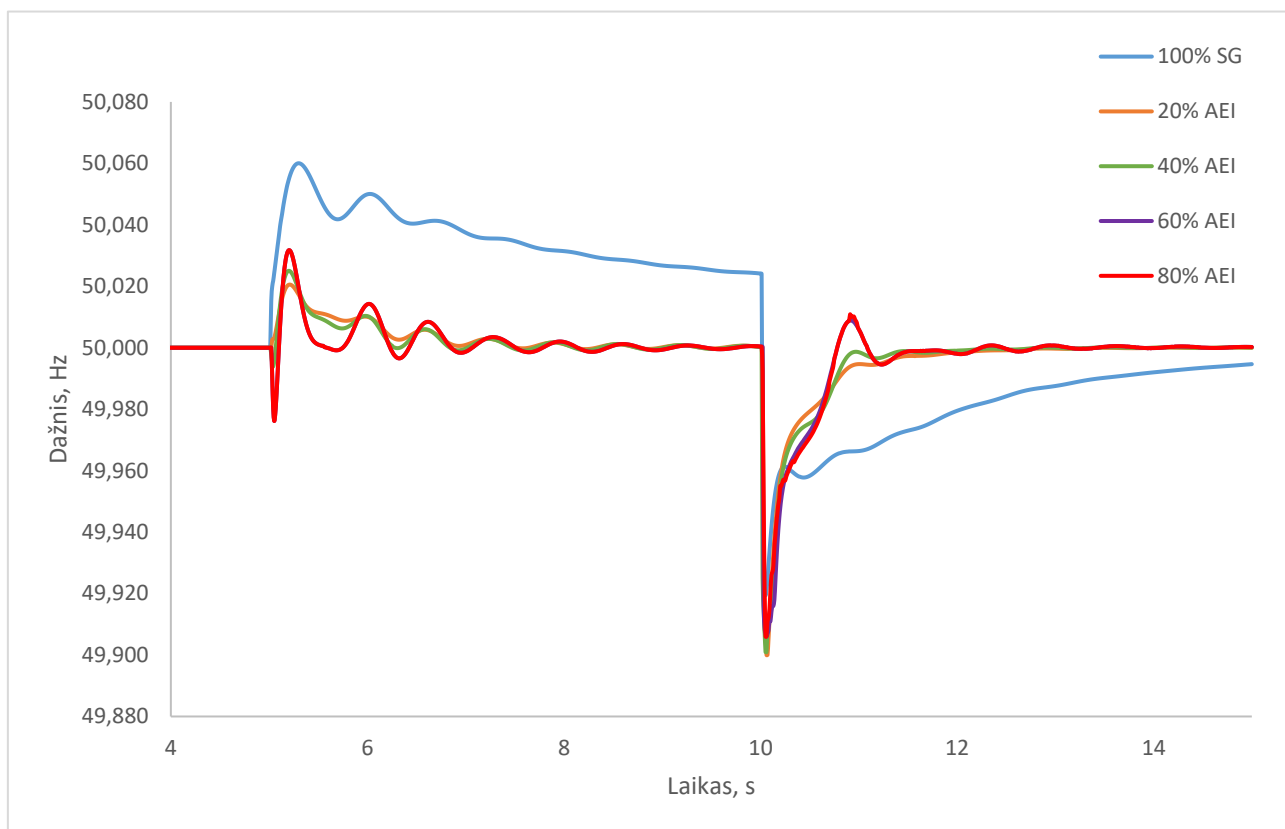
25 pav. Suvestinė dažnio priklausomybių lentelė be BEKS ir SC

25 paveiksle matoma, kad naudojant daugiau atsinaujinančių šaltinių dažnio atsistatymas į stabilų režimą yra žymiai greitesnis nei naudojant tik sinchroninius generatorius. Tokį rezultatą galima matyti todėl, nes keitikliais paremtose sistemose galima žymiai greičiau pakeisti generuojamą aktyviąją galią. AEI minusas yra toks, kad išjungus apkrovai dažnis krenta iki žemesnio lygio, kas tam tikrose situacijose gali iššaukti vartotojų atjungimą, kad kompensuoti staigų kritimą.



26 pav. Suvestinė dažnio priklausomybių lentelė su BEKS

26 paveiksle matoma, kad prijungus BEKS šalia AEI šaltinių galima sumažinti šį dažnio kritimą iki stabilesnių verčių. Taip pat galima matyti nežymų dažnio atsistatymo į stabilų režimą pagreitėjimą.



27 pav. Suvestinė dažnio priklausomybių lentelė su SC

27 paveiksle matoma, kad vietoj BEKS prijungus sinchroninius kompensatorius, dažnio kritimas šiek tiek pristabdomas, tačiau ne tiek stipriai kiek naudojant BEKS. Taip pat sinchroniniai kompensatoriai visais atvejais apatinę dažnio ribą išlaiko beveik vienodą. Galima matyti ir nežymų dažnio atsistatymo greičio padidėjimą.

Išvados

1. Remiantis literatūros šaltiniais, nustatyta, kad atsinaujinantys energijos šaltiniai, ypač keitikliniai vėjo ir saulės elektrinių įrenginiai, turi žymiai mažesnę arba visai neturi sukimosi inercijos. Dėl to jų integracija į perdavimo tinklą mažina bendrą sistemos inerciją ir didina jos jautrumą dažnio svyravimams. Tyrimas parodė, kad AEI dalies didėjimas tinklo generacijoje tiesiogiai koreliuoja su spartesniu dažnio kritimo greičiu bei didesniu dažnio nuokrypiu po apkrovos pokyčių.
2. Tyrimui parengtas 39 mazgų modelis paremtas IEEE mokslininkų sukurtu standartiniu tinklu. Modelyje buvo integruoti skirtingi elektros energijos generacijos šaltiniai: sinchroniniai generatoriai, vėjo ir saulės elektrinės, taip pat baterijų energijos kaupimo sistemos ir sinchroniniai kompensatoriai.
3. Dinaminio stabilumo analizė atskleidė, kad AEI integracija, keičiant sinchroninius generatorius, ženkliai mažina dažnio atsparumą pokyčiams. Nustatyta, jog esant 80 % AEI generacijos, dažnis po apkrovos įjungimo krenta iki 49,834 Hz (nuokrypis 0,166 Hz), o kritimo greitis siekia $-3,99$ Hz/s. Palyginus su tradicine sistema (100 % SG), kur dažnio kritimo greitis buvo $-2,62$ Hz/s, AEI poveikis stabilumui yra akivaizdžiai neigiamas. Didėjant generacijos iš AEI daliai, matoma ta pati dažnio mažiausios vertės kitimo tendencija. Šie rezultatai patvirtina teorines išvadas dėl AEI sukulto inercijos mažėjimo poveikio tinklo dažnio dinamikai.
4. Prijungus BEKS IR SC į modelio sistemą, analizė parodė, kad tiek BEKS, tiek SC įrenginių integravimas prie AEI šaltinių veiksmingai gerina sistemos dažnio stabilumą. Prijungus BEKS, dažnio kritimo greitis ir minimali dažnio vertė sumažėja, o atsistatymo greitis padidėja, kas rodo efektyvų sistemos balansavimą po sutrikimų. Sinchroniniai kompensatoriai padeda palaikyti aukštesnę minimalią dažnio ribą ir išlyginti dažnio pokyčius. Nors abu sprendimai pagerina sistemos stabilumą, BEKS dažniau užtikrina greitesnę pradinių svyravimų slopinimą.

Literatūros sąrašas

1. A European strategic long-term vision for prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, Interaktyvus, 2018, prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>, [žiūrėta 2024-06-02]
2. L. Mehigan, Dlzar Al Kez, Sean Collins, Aoife Foley, Brian O'Gallachoir, Paul Deane, Renewable in the European power system and the impact on system rotational inertia, Interaktyvus, 2020, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220308835?via%3Dihub>, [žiūrėta 2024-06-02]
3. Pieter Tielens, Dink Van Hertem, The relevance of inertia in power systems, Interaktyvus, 2016, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211501268X?via%3Dihub>, [žiūrėta 2024-06-02]
4. Tayo Uthman, Nnamdi I. Nwulu, Saheed Lekan Gbadamosi, Low-inertia control of large-scale renewable energy penetration in power grids: A systematic review with taxonomy and bibliometric analysis Interaktyvus, 2016, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X24000440>, [žiūrėta 2024-06-02]
5. Electricity production , consumption and market overview Interaktyvus, 2021, prieiga per: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Electricity_generation, [žiūrėta 2024-06-04]
6. S.Saha, M.I.Saleemi, T.K.Roy, Impact of high penetration of renewable energy sources on grid frequency behaviour Interaktyvus, 2023, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522006974>, [žiūrėta 2024-06-04]
7. Andreas Ulbig, Theodor S. Borsche, Goran Andersson, Impact of low rotational inertia on power system stability and operation Interaktyvus, 2014, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016427618?via%3Dihub>, [žiūrėta 2024-06-05]
8. Michel Rezkalla, Michael Pertl, Mattia Marinelli, Electric power system inertia: requirements, challenges and solutions Interaktyvus, 2014, prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/327105525_Electric_power_system_inertia_requirements_challenges_and_solutions, [žiūrėta 2024-06-11]
9. Elektros energijos persiuntimo atstatymo laikai Interaktyvus, 2023, prieiga per: https://www.eso.lt/lt/verslui/elektra_99/ka-daryti-dingus-elektrai-ar-pastebejus-itampos-svyravima/elektros-energijos-persiuntimo-atstatymo-laikai.html, [žiūrėta 2024-06-11]
10. Mohammad Majidi-Qadikolai, Ross Baldick, Stochastic transmission capacity expansion planning with special scenario selection for integrating N-1 contingency analysis Interaktyvus, 2016, prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7406771>, [žiūrėta 2024-06-14]
11. Leonard L Grigsby, Power system stability and control, third edition, 2012 [žiūrėta 2024-06-14]
12. Lasantha Meegahapola, Damian Flynn, Impact on transien and frequency stability for a power system at very high wind penetration, Interaktyvus 2016, prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/224179120_Impact_on_transient_and_frequency_stability_for_a_power_system_at_very_high_wind_penetration, [žiūrėta 2024-06-14]

13. K.C.Divya, Jacib Ostergaard, Battery energy storage technology for power systems – an overview, Interaktyvus 2009, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779608002642?via%3Dihub>, [žiūrėta 2024-06-15]
14. Dawei Zhao, Lingzhi Zhu, Dajun Jiang, Minhui Qian, Liang Zhao, and Lei Zhang, Modeling Comparison on Control System of Synchronous Generator between DIGSILENT Power Factory and PSASP, interaktyvus 2013, prieiga per: <https://scispace.com/pdf/modeling-comparison-on-control-system-of-synchronous-3fcgpbml1.pdf>, [žiūrėta 2024-11-21]
15. Xue Min, Zhang Wei, Li Huiyong, Yang Qi, Zheng Yongyi, Study on evaluation method of dynamic performance of generator, Interaktyvus 2015, prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/299944071> Study on evaluation method of dynamic performance of generator [žiūrėta 2024-11-24]
16. Ahmed Harb Najd, Goksu Gorel and Hsam Faisal Hammood, Pitch angle control using neural network in wind turbines, Interaktyvus 2020, prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/347059635> Pitch angle control using neural network in wind turbines [žiūrėta 2024-11-24]
17. Farhan Mahmood, Improving the Photovoltaic Model in PowerFactory, Interaktyvus 2012, prieiga per: https://scholar.google.se/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=VOA8S-8AAAAJ&citation_for_view=VOA8S-8AAAAJ:9yKSN-GCB0IC [žiūrėta 2024-04-02]
18. Mirza Nuhic, Guangya Yang, Battery Energy Storage System Modelling in DIGSILENT PowerFactory, Interaktyvus 2021, prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/346605278> Battery Energy Storage System Modelling in DIGSILENT PowerFactory [žiūrėta 2024-05-04]
19. Edson H. Watanabe , Francisco Kleber de A. Lima , Robson F. da Silva Dias , Maurício Aredes, Pedro G. Barbosa , and Silvangela L.S. Lima Barcelos, Flexible AC Transmission Systems, Interaktyvus 2023, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032399216900038X?via%3Dihub> [žiūrėta 2024-05-14]
20. Hui Guo, Shuai Zheng, Donghai Zhang, Pengfei Gao, Wenzhe Miao and Zongliang Zuo, Effects on Frequency Stability of Power System for Photovoltaic High-Penetration Ratio Grid-Connected Power Generation, Interaktyvus 2023, prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/367472492> Effects on Frequency Stability of Power System for Photovoltaic High-Penetration Ratio Grid-Connected Power Generation [žiūrėta 2024-05-14]
21. Chaouki Messasma, Abdallah Barakat, Seif eddine Chouaba, Bilal Sari, PV system frequency regulation employing a new power reserve control approach and a hybrid inertial response, Interaktyvus 2023, prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623004455> [žiūrėta 2024-05-14]

Priedai

1 priedas. Modeliuojamos IEEE 39 žynų sistemos schema DigSILENT PowerFactory programiniame pakete

