



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Baterijų energijos kaupimo sistemų įtakos elektros tinklo stabilumui analizė

Baigiamasis magistro projektas

Valdas Endrulis

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Baterijų energijos kaupimo sistemų įtakos elektros tinklo stabilumui analizė

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Valdas Endrulis

Projekto autorius

Prof. Audrius Jonaitis

Vadovas

Doc. Povilas Marčiulionis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Valdas Endrulis

Baterijų energijos kaupimo sistemų įtakos elektros tinklo stabilumui analizė

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.

Valdas Endrulis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Endrulis, Valdas. Baterijų energijos kaupimo sistemų įtakos elektros tinko stabilumui analizė. Magistro baigiamasis projektas / 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: Baterijų energijos kaupimo sistemos, elektros energetikos sistema, įtampos stabilumas, dažnio stabilumas.

Kaunas, 2026. 60 p.

Santrauka

Darbe nagrinėjama baterijų energijos kaupimo sistemų įtaka elektros tinklo įtampos ir dažnio stabilumui. Analizuojama, kaip baterijų energijos kaupimo sistema, valdydama aktyviają ir reaktyviają galią, gali pagerinti elektros energetikos sistemos stabilumo rodiklius po tinklo elementų ar generacijos šaltinių atjungimo.

Tyrimui atlikti sudarytas IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos modelis „DIGSILENT PowerFactory“ programinėje aplinkoje. Atlikta bazinio režimo galios srautų analizė, N–1 nenumatytų atvejų analizė, Q–U analizė ir dinaminė dažnio stabilumo analizė. Šių tyrimų metu nustatytas silpniausias tinklo mazgas, įvertintas reaktyviosios galios poreikis įtampos stabilumui pagerinti ir ištirta baterijų energijos kaupimo sistemų aktyviosios galios bei statizmo parametro įtaka dažnio stabilumui.

Gauti rezultatai parodė, kad baterijų energijos kaupimo sistemų integravimas silpniausiame tinklo mazge pagerina įtampos stabilumą, o aktyviosios galios tiekimas po generacijos praradimo sumažina dažnio nuokrypį ir dažnio kitimo spartą. Nustatyta, kad statizmo parametras turi reikšmingą įtaką baterijų energijos kaupimo sistemų veikimui. Mažesnė statizmo reikšmė leidžia efektyviau panaudoti aktyviosios galios rezervą, tačiau per mažas statizmas gali padidinti valdymo jautrumą ir sukelti dažnio svyravimus.

Endrulis, Valdas. Analysis of Impact of Battery Energy Storage Systems on Power Grid Stability. Master's Final Degree Project / 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 sciences.

Keywords: battery energy storage system, electric power system, voltage stability, frequency stability.

Kaunas, 2026. 60 p.

Summary

The thesis examines the impact of battery energy storage systems on voltage and frequency stability in electric power grid. It analyses how a battery energy storage system, by controlling active and reactive power, can improve the stability characteristics of an electric power system after the disconnection of network elements or generation sources.

An IEEE 9-bus electric power system model was developed in the “DIgSILENT PowerFactory” software environment for the research. Base-case load flow analysis, N–1 contingency analysis, Q–U analysis, and dynamic frequency stability analysis were performed. During these studies, the weakest network bus was identified, the reactive power demand for improving voltage stability was evaluated, and the influence of the active power and droop parameter of the battery energy storage system on frequency stability was investigated.

The obtained results showed that integrating a battery energy storage system at the weakest network bus improves voltage stability, while active power support after generation loss reduces frequency deviation and the rate of change of frequency. It was found that the droop parameter has a significant impact on the operation of the battery energy storage system. A lower droop value allows the active power reserve to be used more effectively. However, an excessively low droop value may increase control sensitivity and cause frequency oscillations.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros analizė.....	13
1.1. Elektros sistemų stabilumas	13
1.1.1. Rotoriaus kampo stabilumas.....	13
1.1.2. Įtampos stabilumas	15
1.1.3. Dažnio stabilumas	16
1.1.4. Atsinaujinančių energijos išteklių įtaka elektros tinklų stabilumui.....	17
1.2. Baterijų energijos kaupimo sistemos.....	19
1.2.1. Baterijų technologijos ir charakteristikos.....	19
1.2.2. Rūgštinės švino baterijos.....	20
1.2.3. Ličio jonų baterijos.....	21
1.2.4. Nikelio kadmio baterijos	22
1.2.5. Nikelio ir metalo hidrido baterijos	23
1.2.6. Natrio sieros baterijos.....	24
1.2.7. Vanadžio tekančiojo elektrolito redokso baterijos	24
1.2.8. Baterijų technologijų palyginimas.....	25
1.3. Baterijų energijos kaupimo sistemos struktūra.....	26
1.4. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymas ir reikalavimai įdiegiant Lietuvoje.....	27
1.5. Baterijų energijos kaupimo sistemų panaudojimas elektros tinklo piko apkrovos mažinimui	30
1.6. Baterijų energijos kaupimo sistemų panaudojimas AE integracijoje.....	31
1.7. Baterijų energijos kaupimo sistemų panaudojimas dažnio reguliavimui	31
2. Metodologinė dalis.....	33
2.1. Naudojama modeliavimo priemonė	33
2.2. Tiriamoji elektros energetikos schema	33
2.3. Galios srautų skaičiavimo Niutono-Rafsono iteraciniu metodu metodika.....	34
2.4. Nenumatytų atvejų analizės metodika.....	37
2.5. Sinchroninio generatoriaus valdymo modelis	39
2.6. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymo modelis	40
2.6.1. BEKS dažnio valdiklis	40
2.6.2. BEKS P-Q valdiklis.....	41
2.6.3. BEKS įkrovimo/iškrovimo valdiklis.....	42
2.7. Modeliuojamos elektros sistemos tyrimo scenarijus	42
3. Tiriamoji dalis.....	44
3.1. Įtampos stabilumo analizė	44
3.1.1. Bazinio režimo analizė	44
3.1.2. Nenumatytų atvejų N-1 analizė	45
3.1.3. Q-U analizė.....	46
3.1.4. BEKS įtaka įtampos stabilumui.....	48
3.2. Dažnio stabilumo analizė	49
3.2.1. Kritinio trikdžio nustatymas	49
3.2.2. BEKS aktyviosios galios įtaka dažnio stabilumui.....	50

3.2.3. Statizmo parametro įtaka dažnio stabilumui	52
3.3. BEKS įtakos įtampos ir dažnio stabilumui įvertinimas.....	55
Išvados	57
Literatūros sąrašas	58
Priedai.....	61
1 priedas. Sukurtas elektros energetikos sistemos modelis „DIgSILENT PowerFactory“ programine įranga.....	61
2 priedas. Modeliuojama sinchroninio generatoriaus valdymo schema „DIgSILENT PowerFactory“ platformoje	62
3 priedas. Modeliuojama BEKS valdymo schema „DIgSILENT PowerFactory“ platformoje ..	63

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtingų baterijų technologijų palyginimas [11].....	25
2 lentelė. Generatorių duomenys.....	34
3 lentelė. Linijų duomenys.....	34
4 lentelė. Transformatorių duomenys	34
5 lentelė. Apkrovų duomenys	34
6 lentelė. Mazgų įtampos reikšmės N-1 analizės metu.....	45
7 lentelė. Dažnio minimalios vertės ir kitimo spartos priklausomybė nuo BEKS galios ir statizmo parametro	53

Paveikslų sąrašas

1 pav. Elektros sistemų stabilumo klasifikacija [1]	13
2 pav. Galios ir rotoriaus kampo charakteristika [3].....	14
3 pav. Rotoriaus kampo atsakas į didelius sistemos trikdžius	15
4 pav. P-U charakteristika [5]	15
5 pav. Q-U charakteristika [5].....	16
6 pav. Dažnio atsako palyginimas tarp SG ir SG + AEI be inercijos palaikymo	18
7 pav. Pirminė dažninė reakcija esant skirtingiems AEI įsiskverbimo lygiams sistemoje po generatoriaus atsijungimo [8].....	18
8 pav. Rūgštinės švino baterija [11].....	21
9 pav. Ličio jonų baterija [11].....	22
10 pav. Nikelio kadmio baterija [11]	22
11 pav. Nikelio ir metalo hidrido baterija [11]	23
12 pav. Natrio sieros baterija [11].....	24
13 pav. Vanadžio tekančiojo elektrolito redokso baterija [11]	25
14 pav. Baterijų energijos kaupimo sistemos struktūra [21].....	26
15 pav. Baterijų kaupiklio sudėtis [21]	27
16 pav. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymo schema [23].....	27
17 pav. BEKS aktyviosios galios valdymo priklausomybė nuo dažnio pagal AB „Litgrid“ reikalavimus [24].....	28
18 pav. EEKĮ aktyviosios galios valdymas dažniui viršijus 50,2 Hz [24].....	29
19 pav. EEKĮ aktyviosios galios valdymas dažniui sumažėjus iki 49,8 Hz [24].....	29
20 pav. EEKĮ U-Q/P _{max} profilis [24].....	30
21 pav. Elektros tinklo piko apkrovos mažinimas panaudojant BEKS [25].....	30
22 pav. AEI generacijos ir elektros apkrovos kreivės subalansavimas naudojant BEKS [26].....	31
23 pav. Dažnio kitimas esant skirtingiems vėjo elektrinių ir BEKS scenarijams po trikdžio [23]...	32
24 pav. BEKS aktyviosios ir reaktyviosios galios atsakas į generacijos sumažėjimą [23]	32
25 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos modelis	33
26 pav. Trijų mazgų nuolatinės srovės elektros sistemos modelis [30].....	35
27 pav. Nenumatytų atvejų analizės algoritmas.....	38
28 pav. Sinchroninio generatoriaus valdymo struktūra [34].....	39
29 pav. BEKS valdymo schema [35]	40
30 pav. BEKS dažnio valdiklio struktūra [36].....	41
31 pav. a) aktyviosios galios dalies P-Q valdiklis, b) reaktyviosios galios dalies P-Q valdiklis [36]	41
32 pav. BEKS įkrovimo/iškrovimo valdiklio struktūra [36].....	42
33 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos galios srautų analizė baziniu režimu	44
34 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos įtampos pasiskirstymas baziniu režimu.....	45
35 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos vidutinės mazgų įtampos N–1 režimais	46
36 pav. Q-U kreivė 4 mazge normaliu režimu	47
37 pav. Q-U kreivė 4 mazge atjungus liniją L1	47
38 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistema su BEKS.....	48
39 pav. Įtampos palyginimas mazguose atjungus liniją L1 su BEKS ir be BEKS	49
40 pav. Sistemos dažnio kitimas skirtingų N–1 trikdžių metu be BEKS.....	50
41 pav. Sistemos dažnio kitimas atjungus G3 generatorių esant skirtingai BEKS aktyviajai galiai	51

42 pav. 60 MW BEKS aktyviosios galios atsakas į dažnio pokytį atjungus G3 generatorių	52
43 pav. Dažnio kitimo greičio priklausomybė nuo BEKS aktyviosios galios naudojant skirtingą statizmo parametą.....	53
44 pav. Dažnio minimalios vertės priklausomybė nuo BEKS aktyviosios galios naudojant skirtingą statizmo parametą.....	54
45 pav. Sistemos dažnio kitimas atjungus G3 generatorių, kai BEKS galia 150 MW ir keičiama statizmo reikšmė	55
46 pav. BEKS aktyviosios galios parinkimas pagal 49,0 Hz dažnio minimumo kriterijų.....	56

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;

EES – elektros energetikos sistema;

BEKS – baterijų energijos kaupimo sistema;

SOC – (angl. *State of Charge*) baterijos įkrovos lygis;

EEKI – elektros energijos kaupimo įrenginys;

IEEE – (angl. *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*) elektros ir elektronikos inžinierių institutas;

Įvadas

Šiuolaikinės elektros energetikos sistemos išgyvena reikšmingus pokyčius, kuriuos lemia sparčiai auganti atsinaujinančių energijos išteklių plėtra, didėjantis energijos vartojimas ir griežtėjantys aplinkosaugos reikalavimai. Remiantis tarptautinės atsinaujinančių energijos išteklių agentūros (angl. *International Renewable Energy Agency, IRENA*) duomenimis, pasaulinė atsinaujinančių energijos šaltinių instaliuota galia 2024 metais pasiekė 4448 GW. Lietuvoje taip pat stebimas spartus atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) plėtros augimas – pavyzdžiui, vien 2024 m. pabaigoje instaliuota saulės elektrinių galia viršijo 2,4 GW, o vėjo elektrinių – virš 1,8 GW. Tokie pokyčiai kuria naujus iššūkius elektros sistemų stabilumui. Tradicinės elektros energijos sistemos buvo suprojektuotos veikti naudojant sinchroninius generatorius, kurių mechaninė inercija natūraliai slopina dažnio svyravimus, tačiau dauguma AEI į tinklą yra integruojami per galios keitiklius, neturinčius inercijos. Dėl to mažėja bendras sistemos inercijos lygis.

Siekiant užtikrinti stabilų elektros sistemos darbą didėjant AEI daliai, vis didesnę reikšmę įgauna baterijų energijos kaupimo sistemos (BEKS). Šios sistemos leidžia kaupti perteklinę energiją esant gamybos pertekliui ir ją panaudoti vėliau, kai apkrova viršija generaciją. BEKS išsiskiria greitu reagavimu į sistemos svyravimus, lankstumu bei gebėjimu prisidėti prie dažnio ir įtampos reguliavimo.

Darbo tikslas:

Ištirti baterijų energijos kaupimo sistemų įtaką elektros tinklo stabilumo kriterijams.

Darbo uždaviniai:

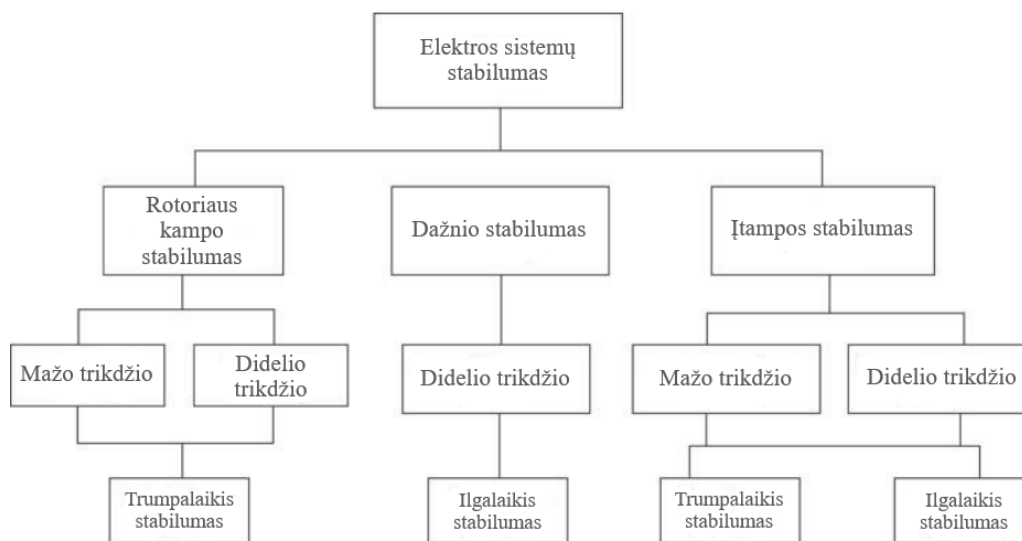
1. sukurti elektros energetikos sistemos modelį, tinkamą įtampos ir dažnio stabilumo analizei;
2. atlikti elektros sistemos N–1 nenumatytų atvejų analizę ir nustatyti kritinius sistemos darbo režimus bei silpniausią tinklo mazgą;
3. atlikti Q-U analizę silpniausiame tinklo mazge ir nustatyti reikalingą reaktyviosios galios dydį;
4. įvertinti įtampos stabilumą su integruota BEKS ir be jos;
5. įvertinti BEKS aktyviosios galios įtaką dažnio stabilumui;
6. įvertinti BEKS statizmo parametro įtaką dažnio stabilumui.

1. Literatūros analizė

1.1. Elektros sistemų stabilumas

Elektros energetikos sistema (EES) yra netiesinė dinaminių procesų sistema ir veikia nuolat kintančioje aplinkoje, kurioje keičiasi apkrovos, generatorių galios, tinklo topologija ir kiti pagrindiniai veikimo parametrai. Sistemos stabilumas, esant pereinamiesiems procesams, priklauso tiek nuo trikdžių pobūdžio, tiek nuo pradinės veikimo būsenos. Trikdžiai gali būti dideli ir nedideli. Maži trikdžiai, tokie kaip apkrovų pokyčiai, vyksta nuolat, todėl sistema turi gebėti prisitaikyti prie besikeičiančių sąlygų. Ji privalo patikimai ir sėkmingai tenkinti apkrovos poreikį. Taip pat būtina, kad sistema išlaikytų stabilumą esant didesniems sutrikimams, pavyzdžiui įvykus trumpajam jungimui perdavimo linijoje ar atsijungiant dideliam generatoriui [1].

Elektros energijos sistemos stabilumas gali būti apibūdinamas kaip sistemos savybė, leidžianti jai išlaikyti darbinę pusiausvyrą esant normalioms eksploatacinėms sąlygoms ir atkurti priimtina pusiausvyros būseną po sutrikimo [2]. Nors elektros energetikos sistemos stabilumas iš esmės yra vientisas reiškinys, praktiškai jį nagrinėti kaip vieną visumą yra sudėtinga. Siekiant tiksliau analizuoti sistemos stabilumą, jis yra skaidomas į atskiras, rotoriaus kampo, dažnio bei įtampos stabilumo kategorijas. 1 paveiksle pavaizduotas elektros sistemų stabilumo klasifikavimas į atskiras kategorijas ir subkategorijas [1].



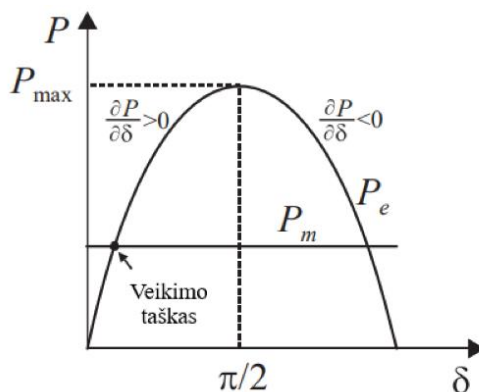
1 pav. Elektros sistemų stabilumo klasifikacija [1]

1.1.1. Rotoriaus kampo stabilumas

Rotoriaus kampo stabilumas – tai sinchroninių mašinų savybė išlaikyti sinchroninį režimą po sistemos sutrikdymo. Rotoriaus apvijų sužadinimas nuolatine srove sukuria magnetinį lauką, kuris, sukantis rotoriumi, indukuoja kintamąją įtampą statoriaus apvijose. Prijungus generatorių prie elektros tinklo, statoriuje teka trijų fazių srovė, kuri sukuria besisukantį magnetinį lauką. Šis laukas sąveikauja su rotoriaus lauku, sukeldamas elektromagnetinį sukimo momentą, kuris priešinasi mechaniniam. Sinchroniniame režime šie momentai yra lygūs, todėl rotoriaus greitis išlieka pastovus ir generatorius veikia sinchroniškai su elektros tinklu. Vardinėmis sąlygomis rotorius sukasi sinchroniniu greičiu, o

reikiamas mechaninis momentas priklauso nuo statoriaus srovės – jai kintant, turi kisti ir mechaninis momentas [3].

Bet koks disbalansas tarp generuojamos ir suvartojamos galios sukelia sinchroninių mašinų rotorių svyravimus, kadangi dėl šio neatitikimo rotorius veikia pagreitėjimo arba stabdymo momentai. Šie momentai gali padidėti iki tiek, jog gali sukelti ženklius rotorių kampo pokyčius, o tai lemtų sinchroninio darbo sutrikimus. Siekiant išlaikyti sistemos stabilumą, būtina, kad po bet kokio sutrikimo būtų greitai pasiekta nauja stabilumo būseną, kol dar nė viena mašina neišeina iš sinchronizmo [4]. Ryšys tarp perduodamos galios P_e ir rotoriaus kampo δ pavaizduotas 2 paveiksle.

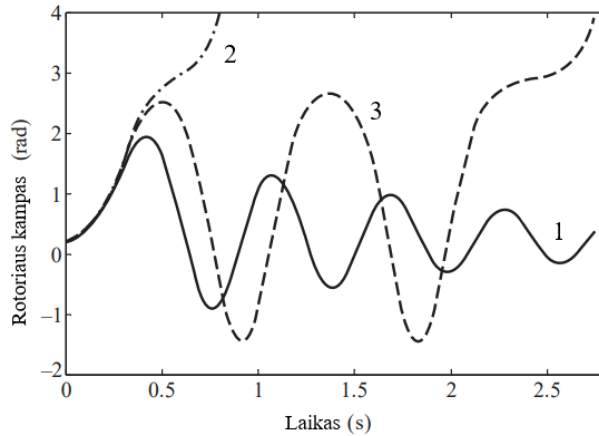


2 pav. Galios ir rotoriaus kampo charakteristika [3]

Sinchroninis generatorius gali savarankiškai išlaikyti sinchroninę sukimąsi, kai rotoriaus kampas yra intervale nuo 0° iki 90°. Šiame diapazone veikia vadinamoji sinchroninio stabilumo zona, kurioje generatorius geba atsispirti nedideliems trikdžiams ir savaime sugrįžti į pusiausvyros būseną. Tačiau pasiekus ar viršijus 90° kampą, generatorius praranda gebėjimą dirbti stabiliai, nes susidarantis elektromagnetinis momentas nebeužtikrina rotoriaus stabilizavimo[4]. Generatorius praradęs sinchronizmą nustoja sukintis vienodu dažniu su sistema, atsiranda sukimosi greičio ir kampo svyravimai.

Rotoriaus kampo stabilumas yra skirstomas į mažo bei didelio trikdžio stabilumą.

- Nedidelio trikdžio rotoriaus stabilumas apibūdina elektros energijos sistemos gebėjimą išlaikyti sinchronizmą esant nedideliems trikdžiams, pavyzdžiui, nedideliems apkrovos ar generacijos pokyčiams. Šie trikdžiai yra tokie sistemos būklės pokyčiai, kurių metu rotoriaus kampo kitimas yra beveik tiesinio pobūdžio.
- Didelio trikdžio rotoriaus kampo stabilumas yra apibūdinamas kaip sinchroninio generatoriaus gebėjimas išlaikyti stabilų veikimą kai sistema patiria stiprų pažeidimą. Tokiais atvejais pasireiškia dideli rotoriaus kampo nuokrypiai. Tai įvyksta dėl trumpųjų jungimų perdavimo linijose, didelių elektrinių atjungimo ar stambių apkrovų praradimo.



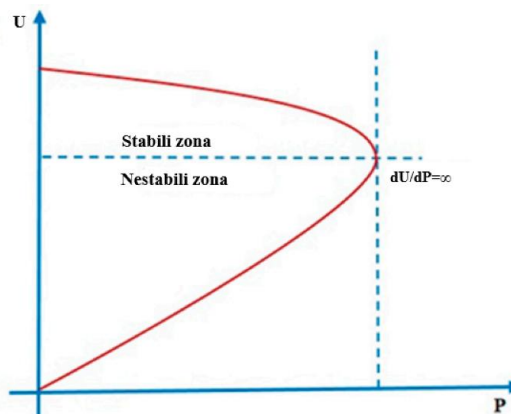
3 pav. Rotoriaus kampo atsakas į didelius sistemos trikdžius

Paveiksle pavaizduoti sinchroninio generatoriaus rotoriaus kampo svyravimai (3 pav.). Esant nedideliam trikdžiui, stabilus darbas pasireiškia svyravimų slopinimu ir kampo stabilizavimusi (1 atvejis). Nestabilumo atvejais (2 ir 3) rotoriaus kampo svyravimų amplitudė didėja ir generatorius praranda sinchronizmą. Jei sinchronizmas prarandamas jau per pirmąjį svyravimą, tai vadinama pirmojo svyravimo nestabilumu, dažniausiai kylančiu dėl nepakankamo sinchronizuojančio momento. Jei sinchronizmas prarandamas po kelių svyravimų, tai rodo nepakankamą slopinimą ir/arba valdymo sistemų nesuderinamumą [3].

1.1.2. Įtampos stabilumas

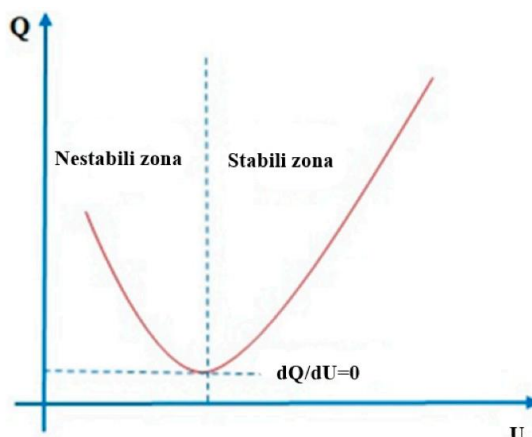
Įtampos stabilumas – tai elektros energetikos sistemos gebėjimas palaikyti pastovias ir priimtinas įtampas visuose sistemos mazguose esant normalioms darbo sąlygoms ir po trikdžių. Įtampa gali tapti nestabili, kai atsiranda disbalansas tarp apkrovos poreikio ir jos tiekimo, ypač kai sutrinka reaktyviosios galios pusiausvyra [3].

Egzistuoja ribinė galia, kurią elektros linija gali perduoti vartotojui. Pasiekus šią ribinę galią neįmanoma palaikyti įtampos vartotojo mazge. Tuomet įtampos pokytis U atsižvelgiant į aktyviosios galios P pokytį yra begalinis $dU/dP=\infty$. Kai ši išvestinė tampa begalinė, tai reiškia, kad mažiausias aktyviosios galios padidėjimas sukelia labai didelį įtampos sumažėjimą. Paprastai standartų ir operatorių taikomi reikalavimai įtampos kokybei yra griežtesni, nei teorinė įtampos stabilumo riba. 4 paveiksle pateikiama įtampos priklausomybė nuo aktyviosios galios [5].



4 pav. P-U charakteristika [5]

Vienas iš svarbiausių įtampos stabilumo vertinimo metodų yra reaktyviosios galios ir įtampos priklausomybės Q-U analizė. Tai leidžia įvertinti sistemos gebėjimą palaikyti pastovią įtampą, kai kinta reaktyviosios galios poreikis. 5 paveiksle pavaizduota Q-U kreivė, iliustruojanti reaktyviosios galios Q priklausomybę nuo įtampos U .



5 pav. Q-U charakteristika [5]

Kreivė turi charakteringą U formą, kurios žemiausias taškas žymi kritinį sistemos veikimo tašką. Šiame taške tenkinama sąlyga $dQ/dU=0$ t. y. reaktyviosios galios kitimo greitis įtampos atžvilgiu tampa lygus nuliui. Tai yra įtampos stabilumo riba, kuri skiria stabilią ir nestabilią sistemos veikimo sritis. Q-U analizė padeda identifikuoti kritinius sistemos veikimo taškus ir leidžia iš anksto įvertinti, kiek sistema gali atlaikyti apkrovos augimą ar trikdžius neperžengiant įtampos stabilumo ribos.

Atsižvelgiant į trikdžio stiprumą įtampos stabilumas gali būti klasifikuojamas į mažo bei didelio trikdžio įtampos stabilumą.

- Didelio trikdžio įtampos stabilumas (angl. *large-disturbance voltage stability*) apima sistemos gebėjimą atkurti pusiausvyrą po reikšmingų ir staigių trikdžių, tokių kaip perdavimo linijų, transformatorių ar didelių generatorių atsijungimai.
- Mažo trikdžio įtampos stabilumas (angl. *small-disturbance voltage stability*) susijęs su sistemos atsaku į nedidelius, laipsniškus pokyčius, tokius kaip apkrovos didėjimas ar mažėjimas.

1.1.3. Dažnio stabilumas

Dažnio stabilumas apibūdina elektros energetikos sistemos gebėjimą išlaikyti pastovų dažnį po stipraus sistemos sutrikdymo, kuris sukelia didelį disbalansą tarp apkrovos ir generacijos [3].

Bet koks neatitikimas tarp generacijos ir apkrovos sukelia sistemos dažnio nukrypimą nuo nominalios vertės, o tai lemia kampinio greičio pokyčius elektros sistemoje, kadangi jų ryšys apibrėžiamas lygtimi:

$$\omega = 2\pi f; \quad (1)$$

čia f – elektros sistemos dažnis (Hz).

Dažnio nuokrypis yra susijęs su mechaninės ir elektrinės galios disbalansu. Esant nedideliems nuokrypiams, tai gali būti išreikšta formule:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{2H_{sis}}; \quad (2)$$

čia ΔP – aktyviosios galios pokytis (MW); H_{sis} – elektros sistemos inercija (s).

Sistemos inercija nusako, kokį laiko tarpą generatoriai gali generuoti į tinklą nominalią galią, pasinaudodami savyje sukauptą kinetinę energiją. Inercija, atspindinti sukauptą kinetinę energiją besisukančiose masėse apskaičiuojama panaudojant formulę [6]:

$$H = \frac{E_{kinetinė}}{S_{vard}} = \frac{1}{2} \frac{J\omega^2}{S_{vard}}; \quad (3)$$

čia $E_{kinetinė}$ – kinetinė energija, sukaupta besisukančiame sinchroninės mašinos rotoriuje (MJ); S_{vard} – generatoriaus vardinė galia (MW); J – inercijos momentas ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$).

Didelėse elektros sistemose, kuriose veikia daug sinchroninių generatorių (pvz., kontinentinės Europos tinklai) sistemos inercija yra labai didelė. Izoliuotos elektros sistemos yra jautresnės didelės galios generatorių atjungimui.

Europoje dažnio reguliavimas vykdomas trimis lygmenimis. Pirminis ir antrinis dažnio reguliavimas yra automatinės sistemos, galinčios labai greitai reaguoti į dažnio nuokrypius. Trečiasis reguliavimo lygmuo apima rankinį galios rezervų aktyvavimą pagal dispečerinio centro nurodymą. Pirminio reguliavimo paskirtis – stabilizuoti dažnį per pirmąsias sekundes po sutrikimo atsiradimo. Tuo tarpu antrinis reguliavimas automatiškai subalansuoja generaciją ir apkrovą, siekdamas sugrąžinti sistemos dažnį į iš anksto nustatytas ribas. Trečiojo reguliavimo lygmens tikslas – pakeisti antrinį rezervą taip, kad sistemoje visada būtų palaikomas pakankamas automatinis aktyviosios galios rezervas, skirtas kompensuoti atsitiktinius galios disbalansus ir dažnio svyravimus [3].

1.1.4. Atsinaujinančių energijos išteklių įtaka elektros tinklų stabilumui

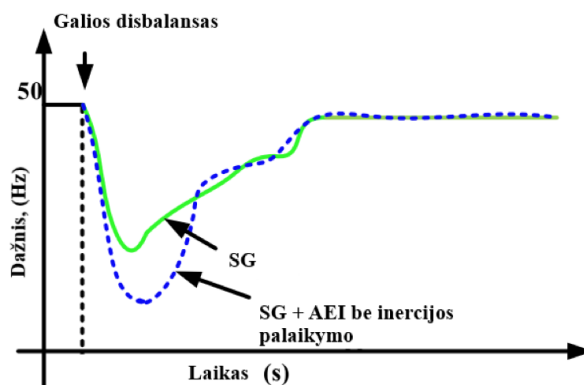
Pasaulinės energetikos sistemos pereina prie švaresnių ir tvaresnių energijos šaltinių, tokių kaip vėjas bei saulės energija. Šios technologijos leidžia mažinti anglies dvideginio emisijas, tačiau kartu kelia naujų techninių iššūkių elektros tinklų stabilumui. Vienas esminių iššūkių yra EES inercijos mažėjimas ir su tuo susijęs dažnio stabilumo blogėjimas.

Tradiciskai, EES dažnio stabilumą palaikydavo sinchroniniai generatoriai, kurių besisukančios masės užtikrindavo natūralią inerciją. Inercija apibūdina sistemos gebėjimą priešintis greitiems dažnio pokyčiams esant galios disbalansui. AEI prijungti per galios keitiklius tokio mechaninio inercijos efekto neturi [7]. Mažėjanti inercija lemia didesnę sistemos jautrumą dažnio pokyčiams, o tai ypač pasireiškia per ROCOF (angl. *Rate of Change of Frequency*) rodiklį – dažnio kitimo spartą. Šis rodiklis nusako dažnio pokyčio greitį per laiką ir apskaičiuojamas formule [8]:

$$ROCOF = \frac{df}{dt} = \frac{f_n \cdot \Delta P}{2H_{sis} \cdot S_{sis}}; \quad (4)$$

čia f_n – nominalus elektros sistemos dažnis (Hz); ΔP – aktyviosios galios pokytis (MW); H_{sis} – elektros sistemos inercijos konstanta (s); S_{sis} – elektros sistemos vardinė bazinė galia (MW).

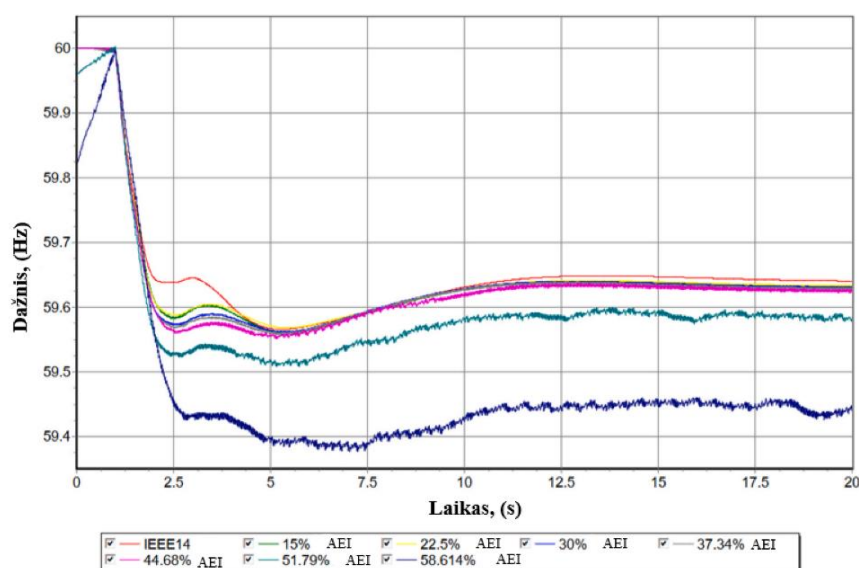
Dažnio stabilumo skirtumai tarp tradicinių sinchroninių generatorių ir sistemų, kuriose dominuoja AEI be inercijos palaikymo, pavaizduoti 6 paveiksle. Šis grafikas iliustruoja sistemos dažnio atsaką po netikėto galios disbalanso, pavyzdžiui generacijos praradimo.



6 pav. Dažnio atsako palyginimas tarp SG ir SG + AEI be inercijos palaikymo

Skirtumas tarp žalios išsitiesinės bei mėlynos punktyrinės linijos atsiranda dėl to, kad sinchroniniai generatoriai natūraliai tiekia inerciją per savo mechanines sukamąsias dalis, o dauguma AEI yra prijungiami prie tinklo per galios keitiklius ir neturi tiesioginės inercijos, dėl to sistema tampa labiau pažeidžiama, įvykus trikdžiui dažnio kitimo sparta didėja, o dažnio minimumas sumažėja [7].

Svarbus indėlis į šią sritį pateikiamas Kenijos tyrėjų tyrime [8], kuriame buvo modeliuojamas dažnio kitimas po didelio generatoriaus atsijungimo esant skirtingai instaliuotai AEI daliai IEEE-14 14-os mazgų sistemoje. Rezultatai pateikiami 7 paveiksle, kurie rodo, kad viršijus kritinę 44% AEI dalį sistemoje, dažnio stabilumo rodikliai pablogėja drastiškai – dažnio kitimo sparta bei kritimo vertė padidėja [8].



7 pav. Pirminė dažninė reakcija esant skirtingiems AEI išskverbimo lygiams sistemoje po generatoriaus atsijungimo [8]

Be to, dauguma AEI keitiklių naudoja tinklo sekimo (angl. *grid-following*) technologiją, kurios pagrindas yra fazės sinchronizavimas su tinklu, t.y. keitiklis seka tinklo įtampos fazę, dažnį bei amplitudę ir tai leidžia keitikliui prisiderinti prie tinklo sinusoidės ir veikti sinchroniškai. Toks valdymas, ištikus stipriems įtampos iškraipymams, gali prarasti sinchronizaciją ir lemti masinį AEI atsijungimą nuo elektros tinklo [7]. AEI taip pat pasižymi nepastovumu – jų gamyba priklauso nuo gamtos sąlygų, todėl sunku tiksliai prognozuoti ir subalansuoti pasiūlą su paklausa realiuoju laiku [8].

Vis dėlto, taikant tinkamas technologijas, šiuos iššūkius galima įveikti. Pavyzdžiui, į tinklą integruojamos baterijų energijos kaupimo sistemos gali suteikti greitą dažnio palaikymą, o naujos kartos keitikliai jau geba imituoti sintetinę inerciją (angl. *virtual inertia*) [7].

1.2. Baterijų energijos kaupimo sistemos

Elektros energijos kaupimas yra svarbus norint subalansuoti elektros gamybos ir vartojimo pusiausvyrą, pagerinti elektros kokybę ir sudaryti sąlygas atsinaujinančios energetikos plėtrai [9]. Baterijų energijos kaupimo sistemos (BEKS) tampa vis svarbesnės šiuolaikinėse elektros energetikos sistemose dėl didėjančios nepastovių energijos išteklių, tokių kaip saulės ar vėjo elektrinių plėtros. BEKS gali būti panaudojamos įvairiems tikslams – dažnio reguliavimui, įtampos palaikymui, tinklo apkrovos mažinimui bei atsinaujinančios energetikos integracijai [10]. BEKS yra puikus sprendinys dėl savo trumpo reakcijos laiko, modulinės struktūros bei greito įrengimo [11].

1.2.1. Baterijų technologijos ir charakteristikos

Baterijos yra sudarytos iš atskirų sujungtų celių, kuriose iškraunant bateriją cheminė energija yra paverčiama į elektros energiją ir atvirkščiai bateriją įkraunant. Reikalinga baterijos įtampa bei srovė yra pasiekiami celes sujungiant nuosekliai ir lygiagrečiai. Paprastai, baterijos yra vertinamos pagal jų išduodamą galią ir gebamą sukaupti energijos talpą. Šie dydžiai nėra vienas nuo kito priklausomi, jų dydį lemia skirtingos baterijų technologijos [12]. Taip pat kiti baterijas apibūdinantys parametrai yra šie:

Elemento ir akumulatoriaus įtampa: Elemento gnybtų įtampa, kai elementas atiduoda galią, apskritai lygi jo vardinei įtampai. Jeigu reikalinga didesnė įtampa, elementai jungiami nuosekliai. Praktiškai elemento (baterijos) įtampa nėra pastovi ir priklauso nuo daugelio veiksnių. Iškraunant bateriją įtampa mažėja, įkraunant didėja [13].

Įkrova (įkrovos talpa): Tai didžiausias akumulatoriaus arba baterijos krūvis, matuojamas ampervalandėmis (Ah), $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$. Baterijos ampervalandės nurodomos konkrečiam iškrovimo greičiui C/h. Tarkime, baterijos žymėjimas 100 Ah ir C/5 (arba C5) reiškia, kad baterijos įkrova yra 100 Ah iškraunant per 5 h, o iškrovimo srovė $I = 100/5 = 20 \text{ A}$ (C – įkrovos vardinis krūvis, Ah; h – iškrovimo laikas, valandomis) [13].

Įkrovos lygis SOC (angl. *State Of Charge*): Tai santykis tarp esamo krūvio ir visos įkrovos krūvio. Iki galo įkrautos baterijos SOC yra 100 %, o visiškai iškrautos – 0 %. SOC pokytis per laiko intervalą dt , kai įkrovimo arba iškrovimo srovė I, yra

$$\Delta SOC = \frac{I_t}{Q(I)} \cdot 100\%; \quad (5)$$

čia $Q(I)$ – baterijos talpa, Ah, esant srovei I. Iškrovimo metu srovė I yra teigiama, įkrovimo metu – neigiama.

Sukaupta energija: Baterijos sukaupta energija priklauso nuo įtampos ir sukaupto krūvio - $1 \text{ Wh} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ Ah}$.

Teorinė sukaupta energija lygi:

$$E_c = U \cdot C; \quad (6)$$

čia U – baterijos gnybtų įtampa, V ; C – įkrova, Ah . Jeigu baterijos srovė didelė, sumažėja ir įtampa, ir talpa, todėl atiduodama energija taip pat smarkiai sumažėja [13].

Specifinė energija: Tai elektros energijos kiekis, sukauptas kiekviename baterijos masės kilograme, matuojamas Wh/kg . Kai žinoma reikalinga baterijos sukaupti energija, galima apskaičiuoti reikalingą baterijos masę [13].

Energijos tankis: Tai elektros energijos kiekis, sukauptas kiekviename baterijos kubiniame metre, matuojamas Wh/m^3 . Šis parametras parodo, kokio dydžio baterija yra reikalinga, norint gauti arba sukaupti tam tikrą energijos kiekį [13].

Specifinė galia: Tai trumpalaikė maksimali galia, gaunama iš baterijos masės vieneto, matuojama W/kg . Specifinė galia yra svarbi siekiant sumažinti baterijos masę, kai apkrova yra dinaminė, pvz., elektromobiliuose. Ji praktiškai priklauso nuo baterijos vidinės varžos.

Didžiausioji galia, kurią baterija atiduoda apkrovai, yra lygi:

$$P_{max} = \frac{E_0^2}{4(R_{laido} + R_i)}; \quad (7)$$

čia R_{laido} – laidų varža, Ω ; R_i – vidinė baterijos varža, priklausanti nuo cheminių reakcijų. Kadangi E ir R priklauso nuo SOC, P_{max} taip pat priklauso nuo jo [13].

Efektyvumas (naudingumo faktorius): Baterijos energijos efektyvumas – tai baterijos atiduodamos elektros energijos kiekio santykis su elektros energijos kiekiu, reikalingu baterijai įkrauti iki to paties lygio. Energijos arba galios nuostoliai, iškraunant ir įkraunant bateriją, atsiranda dėl įtampos nuostolių vidinėje varžoje. Efektyvumas iškrovimo metu $\eta_{iškr} = \frac{U_{iškr}}{E}$, o įkrovimo metu $\eta_{įkr} = \frac{E}{U_{įkr}}$ [13].

Savaiminio išsikrovimo greitis: parodo, kiek įkrovos parandama procentais, kai baterija nenaudojama. Šis rodiklis nėra svarbus, jei baterija yra nuolat eksploatuojama – įkraunama ir iškraunama [11].

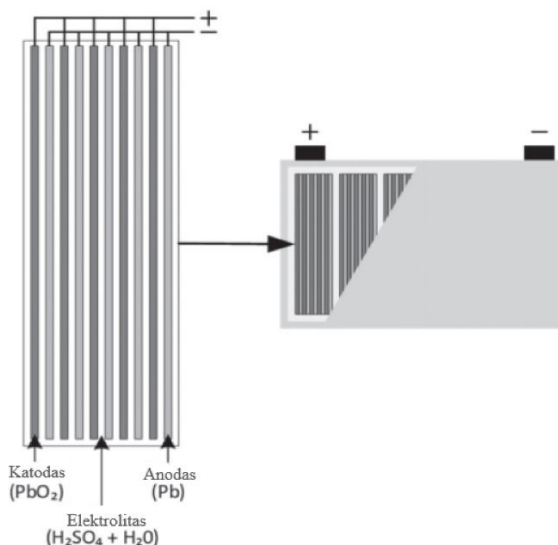
Ciklų skaičius: šis parametras nusako, kiek įkrovimo ir išsikrovimo procesų baterija gali atlaikyti, po kurių baterijos našumas sumažėja [11].

Kiti parametrai: baterijos geometrija, veikimo temperatūra, šildymo arba aušinimo reikalingumas [13].

1.2.2. Rūgštinės švino baterijos

Rūgštinės švino baterijos naudojamos jau ilgą laiką, jas lengva ir pigu įrengti ir prižiūrėti, todėl tai yra pagrindinė priežastis, dėl kurios ši technologija yra plačiai taikoma. Rūgštinės švino baterijos gali

būti giliai iškraunamos, tačiau pagrindinė jų problema – stipri veikimo priklausomybė nuo temperatūros [14] Neigiamąjį elektrodą sudaro keli sujungti rėmeliai su aktyviuoju švinu, teigiamąjį – keli sujungti švino-stibio lydinio rėmeliai su aktyviuoju švino oksidu.



8 pav. Rūgštinės švino baterija [11]

Elektrodai atskirti separatoriais, kurie neleidžia elektrodų aktyviajai medžiagai išbyrėti iš rėmelių. Naujas akumuliatorius yra pripildomas 15-25 °C temperatūros sieros rūgšties tirpalo ir laikomas keletą valandų, kad elektrolitas įsigertų į elektrodų ir separatorių plokšteles. Įkraunant akumuliatorių teigiamasis elektrodas sujungiamas su nuolatinės elektros srovės šaltinio teigiamuoju poliumi, o neigiamasis – su neigiamuoju poliumi [15].

Elektrodams esant sieros rūgšties tirpale, švino ir švino oksido elektrodų aktyviosios medžiagos pasidengia mažai tirpiu $PbSO_4$ (švino sulfato) sluoksniu. Iškvovimo metu, kai baterija tiekia energiją išoriniam įrenginiui, neigiamajame Pb (švino) elektrodo paviršiuje vyksta oksidacijos reakcija – švinas netenka elektronų ir virsta švino sulfatu $PbSO_4$. Atskilę elektronai per išorinę grandinę juda nuo neigiamo elektrodo link teigiamo švino dioksido PbO_2 elektrodo. Ši elektronų srovė yra naudojama išoriniame elektros įrenginyje. Teigiamajame elektrode tuo metu vyksta redukcija – atėję elektronai reaguoja su švino dioksidu, vandenilio jonais ir sulfato jonais, susidarant švino sulfatui ir vandeniui.

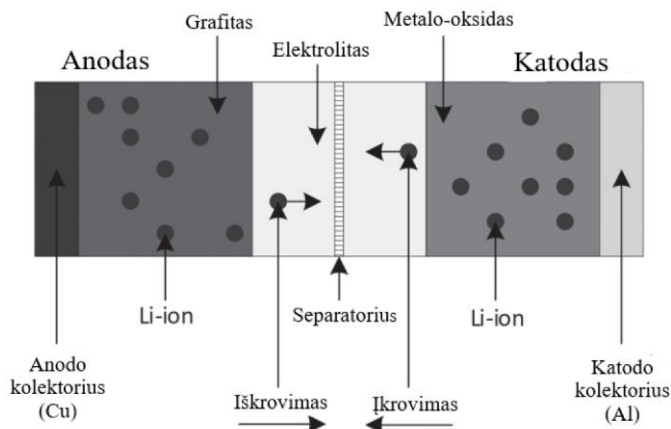
Įkvovimo metu procesas vyksta priešinga kryptimi – baterija prijungiama prie išorinio įkroviklio, kuris tiekia elektros energiją. Elektronai šiuo atveju verčiami tekėti iš teigiamo elektrodo į neigiamą. Neigiamajame elektrode švino sulfatas vėl virsta švinu Pb, o teigiamajame – švino sulfatas oksiduojamas atgal į švino dioksidą PbO_2 .

Rūgštinio švino baterijų privalumai – žema kaina, aukšta celės įtampa, tinka nepastoviams įkvovimo taikymams, geros perdirbimo galimybės. Tarp trūkumų išskiriamas ribotas energijos tankis ir mažesnis tarnavimo ciklą skaičius, palyginti su kitomis technologijomis [11].

1.2.3. Ličio jonų baterijos

Ličio jonų technologija šiandien yra viena pažangiausių ir plačiausiai naudojamų baterijų technologijų. Mobilieji telefonai, planšetiniai kompiuteriai, nešiojami kompiuteriai, visa elektronika yra maitinami ličio jonų baterijomis [16].

Ličio jonų baterijos veikimo principas pavaizduotas 9 paveiksle. Ličio jonų elementai susideda iš dviejų elektrodų – anodo ir katodo. Anodui naudojamas grafitas, o katodui – ličio metalo oksidas. Elektrolitas – tai ličio druska ištirpinta organiniame tirpiklyje. Anodo kolektorius gaminamas iš vario, o katodo iš aliuminio. Šios technologijos veikimo principas pagrįstas ličio jonų judėjimu: įkrovimo metu jonai juda iš katodo į anodą, o iškrovimo metu iš anodo į katodą.

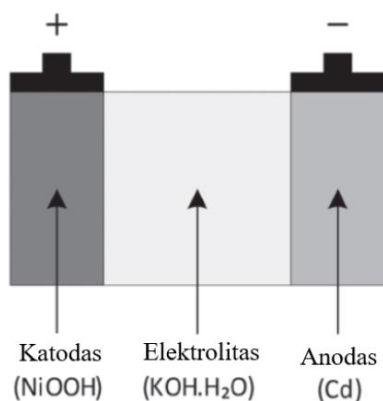


9 pav. Ličio jonų baterija [11]

Ličio jonų baterijų privalumai yra ilgas tarnavimo laikas, didelis ciklų skaičius, aukštas energijos tankis, mažos priežiūros sąnaudos. Tarp trūkumų galima išskirti aukštesnę kainą, palyginti su kitomis technologijomis, mažesnę efektyvumą esant aukštai temperatūrai ir sprogstamumas, dėl kurio yra būtinos apsaugos grandinės [17].

1.2.4. Nikelio kadmio baterijos

Nikelio kadmio (Ni-Cd) technologija naudojama jau ilgą laiką, ypač tose srityse, kuriose reikalingas ilgas baterijos tarnavimo laikas ir veikimas sudėtingose aplinkos sąlygomis. Ni-Cd baterijos susideda iš katodo, pagaminto iš nikelio oksido hidroksido (NiOOH), metalinio kadmio Cd anodo ir kalio hidroksido elektrolito [18].



10 pav. Nikelio kadmio baterija [11]

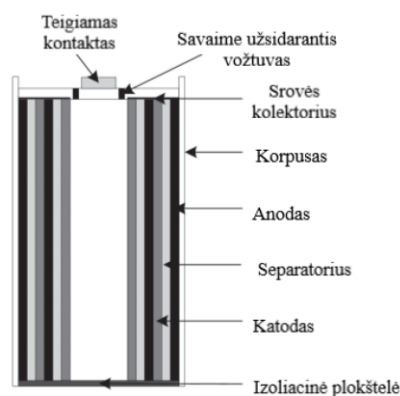
Iškrovimo metu katode vyksta redukcija – nikelio oksido hidroksidas priima elektronus ir virsta nikelio hidroksidu (Ni(OH)_2), o anode kadmio oksiduoja į kadmio hidroksidą (Cd(OH)_2), atiduodamas elektronus. Šie elektronai per išorinę elektros grandinę teka nuo anodo į katodą, taip sukurdami naudotiną elektros srovę. Įkrovimo metu veiksmas vyksta atvirkštine kryptimi – taikant

išorinę elektros įtampą, elektronai teka nuo katodo į anodą, o cheminės reakcijos elektroduose vyksta priešinga kryptimi: kadmio hidroksidas redukuojasi į metalinį kadmį, o nikelio hidroksidas oksiduoja atgal į nikelio oksido hidroksidą.

Ni-Cd baterijas galima įkrauti dideliu srovės stipriu, įkrovimo metu srovė gali būti daug didesnė už nominalią, tačiau tokiu atveju įkrovimas turi būti sustabdytas vos tik baterija pasiekia pilną įkrovą, kadangi priešingu atveju ji gali labai greitai įkaisti ir užsiliepsnoti. Nikelio kadmio baterijų privalumai – nedidelės priežiūros sąnaudos, didelis ciklų skaičius, tinka ilgalaikiam energijos kaupimui. Vis dėlto, šios baterijos išsiskiria aukštesne kaina, ribotu energijos tankiu bei atminties efektu. Atminties efektas – reiškinys kai baterija „įsimena“ trumpesnę iškrovimo ciklą, jeigu ji nuolat neiškraunama iki galo. Dėl šios priežasties baterija praranda dalį savo nominalios talpos [11].

1.2.5. Nikelio ir metalo hidrido baterijos

Nikelio ir metalo hibrido baterijos (Ni-MH) technologija yra taikoma įvairiose srityse, išmaniose energijos sistemose, tvirtose akumuliatorių sistemose, kurios veikia aukštos temperatūrose, elektromobiliuose bei viešajame transporte [18]. Ni-MH celės pjūvis pavaizduotas 11 paveiksle.



11 pav. Nikelio ir metalo hidrido baterija [11]

Ni-MH baterijos veikimas grindžiamas elektrocheminėmis reakcijomis tarp neigiamo elektrodo, pagaminto iš vandenilį sugeriančių lydinių, ir teigiamo elektrodo, sudaryto iš nikelio oksido hidroksido (NiOOH). Neigiamasis elektrodas geba sugerti ir išskirti vandenilį, o teigiamasis elektrodas dalyvauja redokso reakcijose. Elektrodus skiria separatorius, apsaugantis nuo trumpojo jungimo. Elektrolitu naudojamas kalio hidroksidas (KOH), kuris užtikrina jonų judėjimą tarp elektrodų. Be to, baterijose integruotas srovės kolektorius, mažinantis vidinę varžą, o dujų išsiskyrimo atvejais veikia savaimė užsidarantis apsauginis vožtuvas [19].

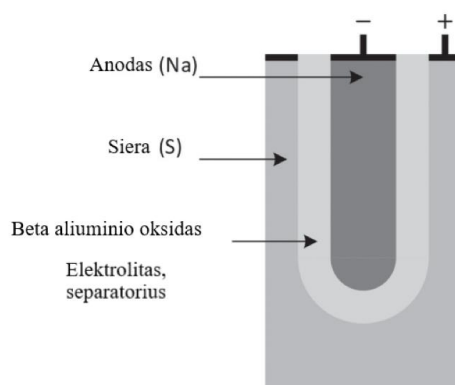
Iškrovimo metu vandenilį sugeriantis lydinys anode oksiduoja – vandenilio atomai atskyla ir išskiria elektronus bei protonus. Tuo pačiu metu katode vyksta redukcija: nikelio oksido hidroksidas priima elektronus ir virsta nikelio hidroksidu (Ni(OH)₂). Elektronai teka per išorinę elektros grandinę nuo anodo link katodo, sukurdami elektros srovę, o protonai pernešami elektrolitu. Šis procesas leidžia baterijai tiekti energiją išoriniams vartotojams.

Įkrovimo metu, prijungus bateriją prie išorinio šaltinio, procesas vyksta priešinga kryptimi. Elektronai teka nuo katodo į anodą, o cheminės reakcijos grįžta į pradinę būseną: nikelio hidroksidas katode oksiduoja atgal į nikelio oksido hidroksidą, o neigiamajame elektrode vandenilio protonai redukuojasi ir vėl įsijungia į lydinį, sudarydami vandenilį sugeriančią medžiagą.

Pagrindiniai Ni-MH technologijos privalumai yra ilgas tarnavimo laikas, didelis ciklų skaičius, geras veikimas aukštoje temperatūroje, aukštas energijos tankis bei gera perdirbimo galimybė. Šios baterijos taip pat pasižymi dideliu atsparumu per dideliam įkrovimui ir giliam iškrovimui. Tačiau, palyginti su švino rūgšties baterijomis, Ni-MH technologija yra brangesnė, o esant žemai aplinkos temperatūrai jų veikimo efektyvumas prastėja [17].

1.2.6. Natrio sieros baterijos

Natrio sieros (NaS) baterijų technologija yra viena tinkamiausių energijos kaupimo sistemoms, ypač dėl didelio energijos tankio. Šios baterijos sudarytos iš natrio anodo ir sieros katodo, o kaip elektrolitas naudojama keramika – beta-aliumino oksidas. Ši keramika atlieka ne tik elektrolito, bet ir separatoriaus funkciją, atskiriančią elektrodus ir leidžiančią jonams judėti tarp jų.



12 pav. Natrio sieros baterija [11]

NaS technologija pasižymi maža vidine varža, nes keraminis elektrolitas pasižymi geru joniniu laidumu. Tai naudinga dėl kelių priežasčių: mažesnė varža leidžia padidinti galios ir masės santykį, taip pat sumažėja šilumos kiekis, susidarantis įkrovimo metu. Dėl šių savybių sistema tampa efektyvesnė ir labiau pritaikoma stambaus masto energijos kaupimo reikmėms [11].

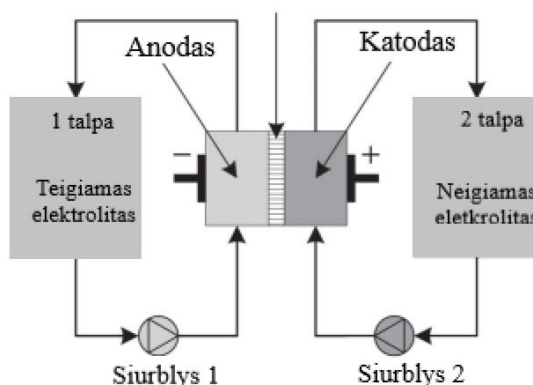
Tipinė NaS baterijų darbinė temperatūra siekia nuo 300 °C iki 350 °C. Tokia aukšta temperatūra reikalinga tam, kad abu elektrodai išliktų skystos būsenos, nes tiek natrius, tiek siera esant žemesnei temperatūrai būtų kieti. Nors aukšta temperatūra mažina ciklo energinį naudingumą, ji tuo pačiu padidina veikimo patikimumą ir leidžia pasiekti didesnę įkrovimo–iškrovimo ciklų skaičių [11].

Natrio–sieros technologijos privalumai yra didelis energijos tankis, ilgas tarnavimo laikas, galimybė tiekti didelę impulsinę galią bei geras atsparumas savaiminiam išsikrovimui. Tačiau tarp trūkumų galima išskirti aukštą sistemos kainą ir būtinybę palaikyti aukštą darbinę temperatūrą, reikalingą baterijos veikimui [17].

1.2.7. Vanadžio tekančiojo elektrolito redokso baterijos

Vanadžio tekančiojo elektrolito redokso baterijos – tai nauja technologija, kuri yra perspektyvi dėl gerų veikimo parametrų. Ji pasižymi ilgu tarnavimo laiku, labai greita reakcija ir ilga saugojimo trukme, todėl idealiai tinka ilgalaikiam energijos saugojimui. Šių baterijų galia ir energijos talpa yra nepriklausomos, galia priklauso nuo elementų skaičiaus ir dydžio, o energijos talpa – nuo turimo elektrolito rezervuarų dydžio. Technologija pagrįsta dviejų rezervuarų sistema, kuriose laikomi vanadžio jonų turintys elektrolitai – vienas jų yra teigiamas, kitas neigiamas. Elektronų srautas

atsiranda dėl oksidacijos ir redukcijos reakcijų, vykstančių per jonus laidžią membraną, per kurią pumpuojami elektrolitai. Šios technologijos atsako laikas yra labai greitas, nes elektrolitų srautas išlieka pastovus tiek įkrovimo, tiek iškrovimo metu [20].



13 pav. Vanadžio tekančiojo elektrolito redokso baterija [11]

Šių baterijų privalumai - aukštas eksploatacinis saugumas, ilgas tarnavimo laikas, mažos veikimo ir priežiūros sąnaudos bei galimybė giliai iškrauti be žalos baterijai. Tarp trūkumų išskiriamas mažas energijos tankis ir didelio ploto poreikis technologijai įrengti [17].

1.2.8. Baterijų technologijų palyginimas

Siekiant įvertinti skirtingas energijos kaupimo technologijas, 1 lentelėje pateikiami pagrindiniai techniniai ir ekonominiai parametrai: specifinė energija, specifinė galia, energijos tankis, galios tankis, energijos kaina, tarnavimo trukmė, ciklų skaičius, elemento įtampa bei naudingumo koeficientas.

1 lentelė. Skirtingų baterijų technologijų palyginimas [11]

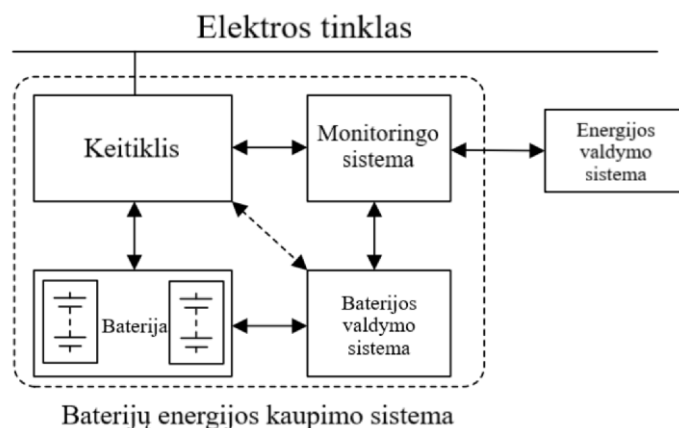
Charakteristikos	Švino rūgštis	Ličio jonų	Nikelio kadmio	Nikelio metalo hidrido	Natrio sieros	Vanadžio redokso
Specifinė energija, Wh/kg	25–50	80–250	30–80	40–110	150–240	10–130
Specifinė galia, W/kg	150–400	200–2000	80–300	200–300	90–230	50–150
Energijos tankis, kWh/m ³	25–90	95–500	15–150	40–300	150–350	10–33
Galios tankis, kW/m ³	10–400	50–800	40–140	10–600	1.2–50	2.5–33
Energijos kaina, €/kWh	40–170	100–300	680–1300	170–640	250–420	130–850
Tarnavimo trukmė, metai	2–15	5–15	10–20	2–15	10–15	5–15
Ciklų skaičius	250–2000	1000–10000	1000–5000	300–1800	2500–40000	10000–16000
Elemento įtampa, V	2–2.1	2.5–5	1.2–1.3	1.2–1.35	1.8–2.71	1.2–1.4
Naudingumo koeficientas, %	63–90	75–97	60–90	50–80	75–90	75–90

Iš pateiktų duomenų lentelės matyti, kad ličio jonų baterijos pasižymi vienu aukščiausių specifinės energijos tankių (80–250 Wh/kg), dideliu efektyvumu (75–97 %) ir plačiu galios diapazonu (200–2000 W/kg). Taip pat jos turi itin didelį ciklų skaičių (iki 10 000), o tai užtikrina ilgalaikį patikimumą. Ličio jonų baterijų energijos kaina sumažėjo iki ~100–300 €/kWh, kas leidžia šią technologiją laikyti itin konkurencinga tiek gyvenamuosiuose, tiek komerciniuose projektuose. Šis kainų kritimas susijęs su masine gamyba, ypač Kinijoje, bei pažangiais cheminiais sprendimais, tokiais kaip LFP (LiFePO₄) tipo elementai.

Palyginimui, švino rūgšties baterijos, nors ir yra pigesnės (40–170 €/kWh), pasižymi nedideliu ciklų skaičiumi (iki 2000), mažesniu efektyvumu ir energijos tankiu. Tuo tarpu NiCd ir NiMH technologijos, nors ir tinkamos sudėtingoms sąlygoms, praranda aktualumą dėl toksiškumo, riboto energijos tankio ir didesnės kainos. NaS baterijos išsiskiria ilgu tarnavimo laiku (iki 40 000 ciklų) ir dideliu energijos tankiu, tačiau jų eksploatavimui būtina aukšta temperatūra, kas riboja jų taikymą. Vanadžio redokso baterijos pasižymi itin ilgaamžiškumu (iki 16 000 ciklų), tačiau turi mažą energijos tankį ir reikalauja daugiau vietos instaliacijai.

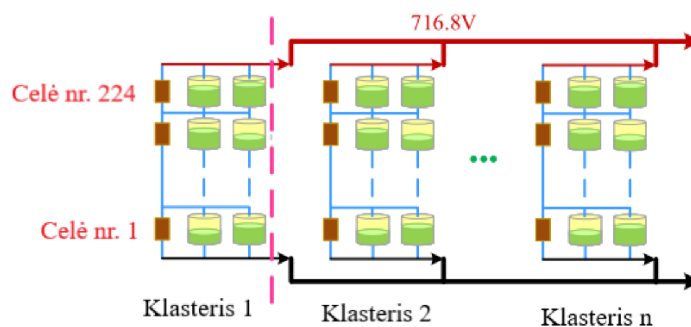
1.3. Baterijų energijos kaupimo sistemos struktūra

Baterijų energijos kaupimo sistema (BEKS) yra sudaryta iš keturių pagrindinių dalių – baterijų sistemos, kuri apima kelis baterijų modulių blokus, keitiklio (PCS, angl. – *Power Conversion System*), baterijų valdymo sistemos (BMS, angl. – *Battery Management System*) ir energijos valdymo sistemos (EMS, angl. – *Energy Management System*). BEKS struktūra pavaizduota 14 paveiksle [21].



14 pav. Baterijų energijos kaupimo sistemos struktūra [21].

Baterijos celė yra pagrindinis BEKS komponentas. Didelės talpos BEKS įrenginio modulis sudarytas iš daugybės nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtų baterijų elementų. Daugumoje šiuolaikinių BEKS, vienas baterijų klasteris sudaromas sujungiant 224 vienetus 280 Ah talpos baterijų celių nuosekliai. Jei vienos celės vardinė įtampa yra 3,2 V, tuomet viso klasterio vardinė įtampa sudaro 716,8 V [21].



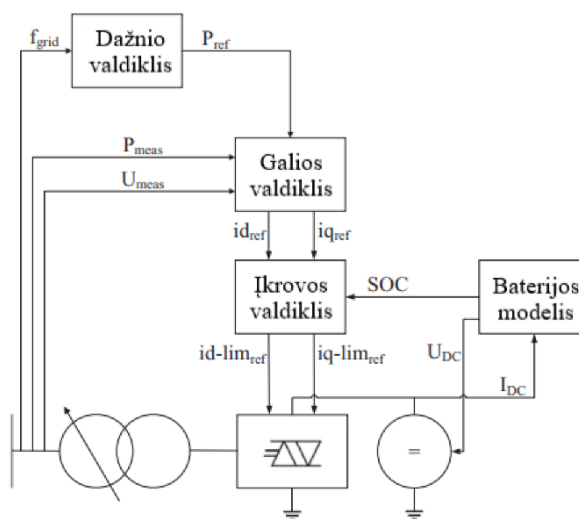
15 pav. Baterijų kaupiklio sudėtis [21]

Keitiklis yra pagrindinis energijos konversijos įrenginys. Jis keičia nuolatinę srovę į kintamą ir atvirkščiai bateriją įkraunant. Pagrindinės baterijų valdymo sistemos funkcijos – stebėti baterijų būseną, fiksuoti celių įtampą, srovę, temperatūrą ir kitus baterijų saugaus veikimo parametrus. Taip pat užtikrinamas saugus įkrovimo ir iškrovimo procesų valdymas (pvz., perkrovimo ir per gilaus iškrovimo prevencija), signalizacija ir avarinė apsauga nuo galimų gedimų bei valdymo optimizavimas, siekiant saugaus, patikimo ir stabilaus baterijų sistemos veikimo. Energijos valdymo sistema atlieka energijos srautų valdymo funkciją, nusprendžia kada BEKS turi įsikrauti ir kada išsikrauti [21].

1.4. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymas ir reikalavimai įdiegiant Lietuvoje

Baterijų energijos kaupimo sistemos atlieka svarbų vaidmenį elektros tinklų balansavime, užtikrindamos momentinį energijos pasiūlos ir paklausos suderinimą. Jos leidžia greitai reaguoti į netikėtus tinklo svyravimus ir palaikyti stabilų dažnį bei įtampą. Baterijos gali kaupti elektros energijos perteklių esant mažai paklausai ir ją išleisti piko metu, taip mažindamos apkrovas ir padėdamos išvengti per didelio elektros tinklo apkrovimo. Be to, per inverterius jos gali reguliuoti reaktyviąją galią, o tai ypač svarbu įtampos stabilizavimui. Dėl šių savybių baterijos tampa esminiu įrankiu modernių, lanksčių ir atsparių elektros tinklų valdyme [22].

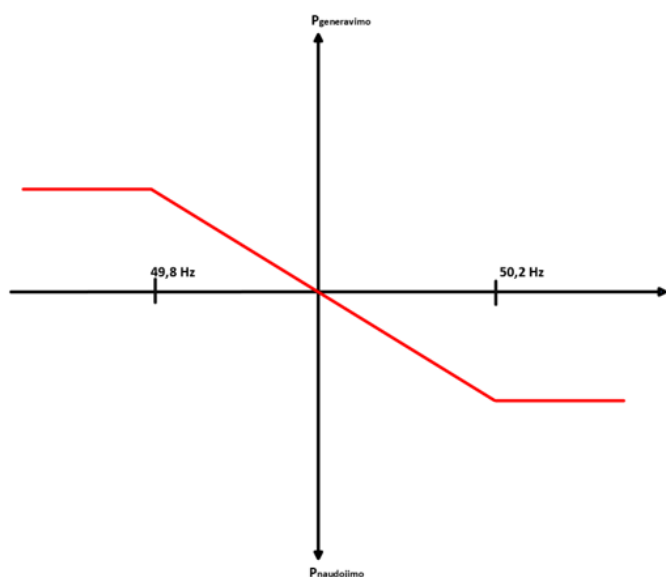
Baterijų valdymo sistema (16 pav.) susideda iš trijų pagrindinių komponentų: dažnio valdiklio (angl. *Frequency Controller*), galios valdiklio (angl. *PQ Controller*) ir įkrovos valdiklio (angl. *Charge Controller*), kurie dirba kartu su baterija.



16 pav. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymo schema [23]

Šie komponentai realiu laiku matuoja tinklo parametrus – dažnį, įtampą, galią. Dažnio reikšmė perduodama į dažnio valdiklį, kur pagal esamą dažnio nuokrypį apskaičiuojama pageidaujama aktyviosios galios vertė P_{ref} . Tuomet ši reikšmė kartu su matuojama galia bei įtampa perduodama į aktyviosios ir reaktyviosios galios valdiklį, kuris apskaičiuoja srovės komponentes i_{dref} arba i_{qref} d-q koordinatių sistemoje. Gautos srovės reikšmės yra papildomai koreguojamos įkrovimo valdiklyje, atsižvelgiant į baterijos įkrovos lygį SOC. Taip suformuojamos ribinės srovės reikšmės, kurios yra vėliau perduodamos inverteriui [23].

Lietuvoje norint integruoti baterijų energijos kaupimo sistemas į perdavimo tinklą, būtina užtikrinti perdavimo sistemos operatoriaus AB „Litgrid“ nustatytus techninius valdymo reikalavimus. Viena iš pagrindinių funkcijų, kurią BEKS privalo atlikti prisijungus prie perdavimo tinklo, yra aktyviosios galios reguliavimas priklausomai nuo dažnio pokyčių.

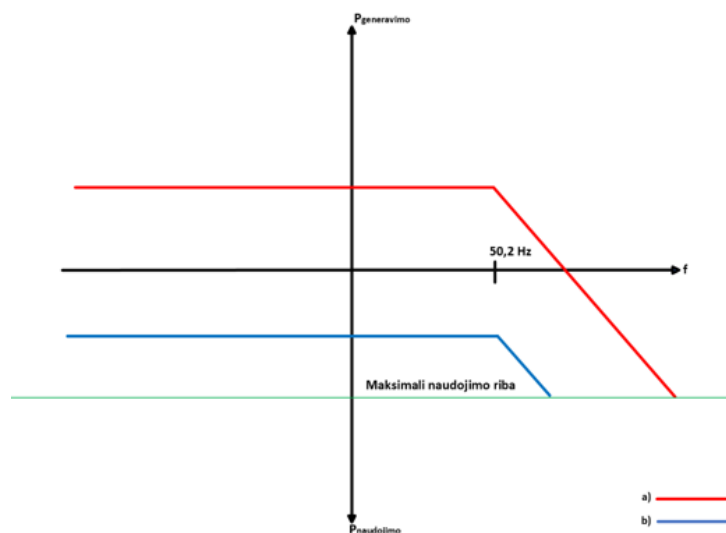


17 pav. BEKS aktyviosios galios valdymo priklausomybė nuo dažnio pagal AB „Litgrid“ reikalavimus [24]

Elektros energijos kaupimo įrenginys (EEKĮ) privalo gebėti sklandžiai persijungti iš naudojimo į generavimo režimą ir atvirkščiai bei tolygiai vykdyti aktyviosios galios reguliavimą pagal nustatytus parametrus [24].

Dažniui viršijus 50,2 Hz:

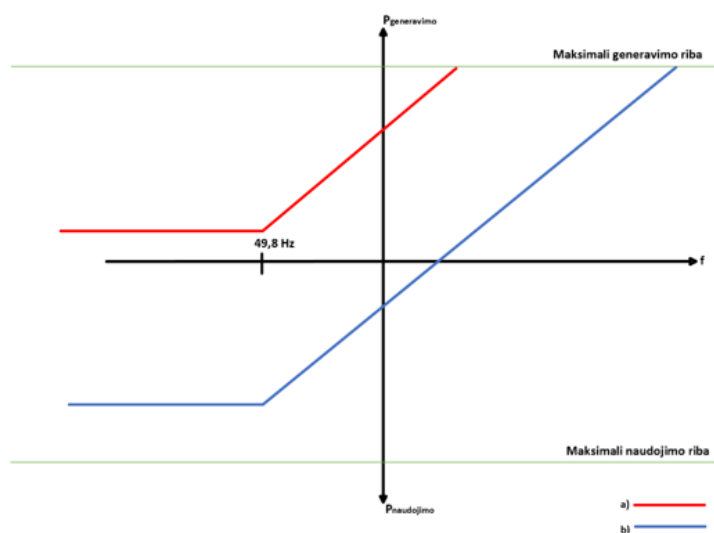
- a) Elektros energijos kaupimo įrenginys esantis generavimo režime privalo tiesiškai sumažinti aktyviosios galios atidavimą į tinklą ir perėjus į naudojimo režimą tiesiškai didinti suvartojimą iki maksimalios naudojimo galios kaip pavaizduota 18 paveiksle [24].
- b) Elektros energijos kaupimo įrenginys esantis naudojimo režime privalo tiesiškai padidinti aktyviosios galios suvartojimą iki maksimalios naudojimo galios kaip pavaizduota 18 paveiksle [24].



18 pav. EEKĮ aktyviosios galios valdymas dažniui viršijus 50,2 Hz [24]

Dažniui sumažėjus iki 49,8 Hz:

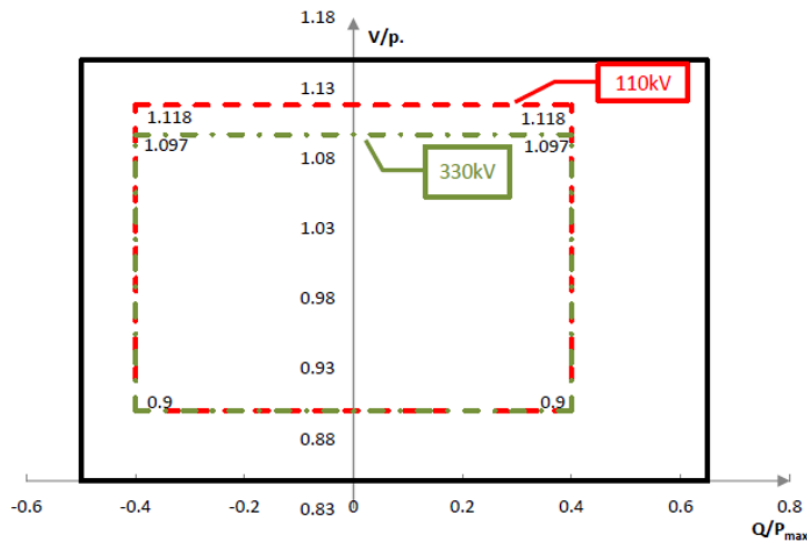
- Elektros energijos kaupimo įrenginys esantis generavimo režime privalo tiesiškai padidinti aktyviosios galios atidavimą į tinklą iki maksimalios generavimo galios kaip pavaizduota 19 paveiksle [24].
- Elektros energijos kaupimo įrenginys esantis naudojimo režime privalo tiesiškai sumažinti aktyviosios galios suvartojimą iš tinklo ir perėjus į generavimo režimą tiesiškai padidinti aktyviosios galios atidavimą į tinklą iki maksimalios generavimo galios kaip pavaizduota 19 paveiksle [24].



19 pav. EEKĮ aktyviosios galios valdymas dažniui sumažėjus iki 49,8 Hz [24]

EEKĮ turi sugebėti valdyti įtampą, keičiant reaktyviąją galią pagal vieną iš šių valdymo algoritmų:

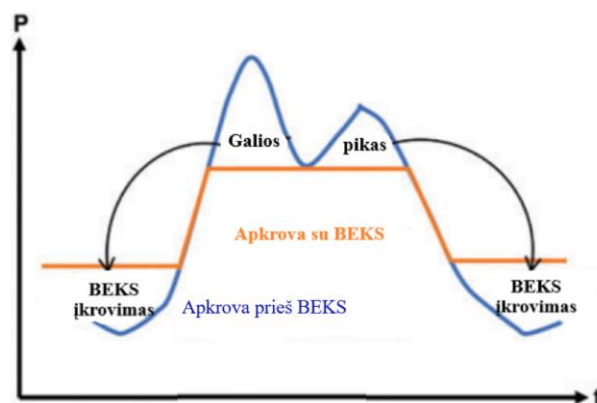
- Q_{fix} - išlaikyti pastovią reaktyviąją galią Q/P_{max} galimybių ribose;
- $Q(U)$ - palaikyti pastovią kintamosios srovės įtampą Q/P_{max} galimybių ribose



20 pav. EEKĪ U-Q/P_{max} profilis [24]

1.5. Baterijų energijos kaupimo sistemų panaudojimas elektros tinklo piko apkrovos mažinimui

Elektros tinklo piko apkrovos mažinimas (angl. *peak shaving*) yra viena iš svarbiausių baterijų energijos kaupimo sistemų taikymo sričių elektros energetikos sistemoje. Šios strategijos esmė – sumažinti momentinius elektros paklausos šuolius, kurie dažnai atsiranda vartotojams veikiant dideliu intensyvumu tam tikrais paros laikotarpiais. Naudojant BEKS, per žemos paklausos laikotarpius (pvz., naktį ar savaitgaliais) energija sukaupiama, o per piko laikotarpius, rytais arba vakarais – išleidžiama į tinklą ar tiesiai vartotojui. Tai leidžia sumažinti tinklo apkrovą, optimizuoti esamą infrastruktūrą ir sumažinti elektros kainą vartotojams. Be to, ši strategija padeda sumažinti būtinybę plėsti perdavimo linijas ar papildomai įjungti brangius, greitai veikiančius rezervinius generatorius [25].

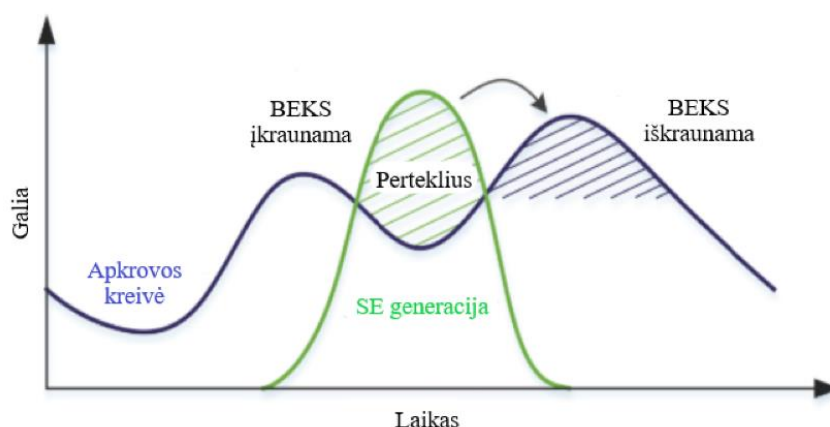


21 pav. Elektros tinklo piko apkrovos mažinimas panaudojant BEKS [25]

Pateiktame 21 pav. pavaizduota apkrovos piko mažinimo strategija. Naudojant energijos kaupimo sistemas, piko metu sumažinamas galios poreikis (angl. *load after shaving*), o perteklinė energija kaupiama mažos apkrovos laikotarpiais (angl. *recharge period*).

1.6. Baterijų energijos kaupimo sistemų panaudojimas AE integracijoje

Atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į elektros energetikos sistemas yra vienas svarbiausių tvartos energetikos plėtros komponentų, tačiau kartu kelia sudėtingų techninių, ekonominių ir sisteminių iššūkių. Vėjo ir saulės energijos gamyba pasižymi nepastovumu bei sunkiai prognozuojamais srautais, o tai apsunkina elektros gamybos ir vartojimo balansavimą realiu laiku. Šių šaltinių nepastovumas gali lemti dažnio svyravimus ir įtampos nestabilumą, ypač esant dideliame atsinaujinančių šaltinių daliai bendrame generacijos mišinyje. Siekiant išvengti energijos pertekliaus apribojimo bei sumažinti priklausomybę nuo iškastinio kuro rezervinių pajėgumų, būtina įdiegti energijos kaupimo sprendimus, tokius kaip baterijų energijos kaupimo sistemos. Tai leidžia sukaupti generacijos perteklių piko metu ir vėliau išleisti jį esant padidėjusiai tinklo apkrovai [26].



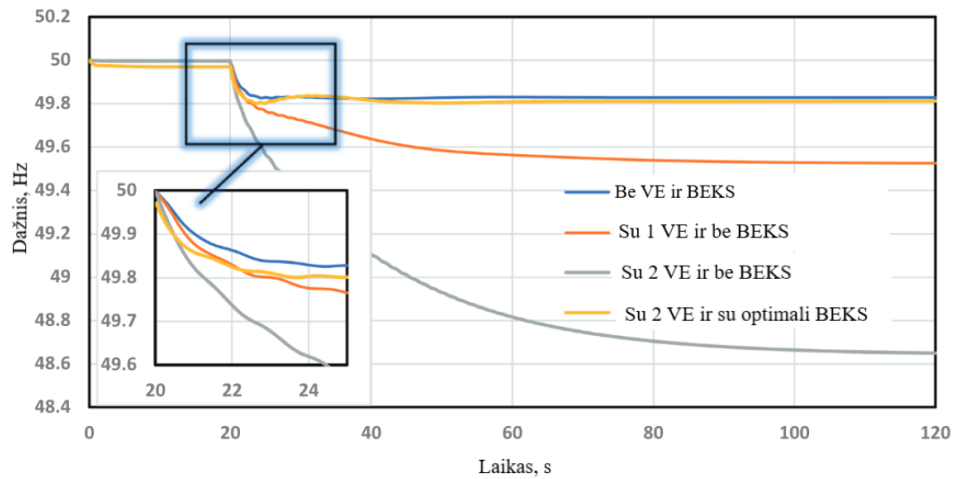
22 pav. AEI generacijos ir elektros apkrovos kreivės subalansavimas naudojant BEKS [26]

22 paveiksle pavaizduota, kaip BEKS padeda integruoti saulės elektrinių generaciją į elektros tinklą. Dienos metu saulės elektrinių generacija viršija apkrovos kreivę, susidaro perteklinė energija, kuri kaupiama BEKS įkrovimo režimu. Vėliau, kai apkrovos poreikis viršija generaciją, BEKS iškraunama ir tiekiami sukaupti energija.

1.7. Baterijų energijos kaupimo sistemų panaudojimas dažnio reguliavimui

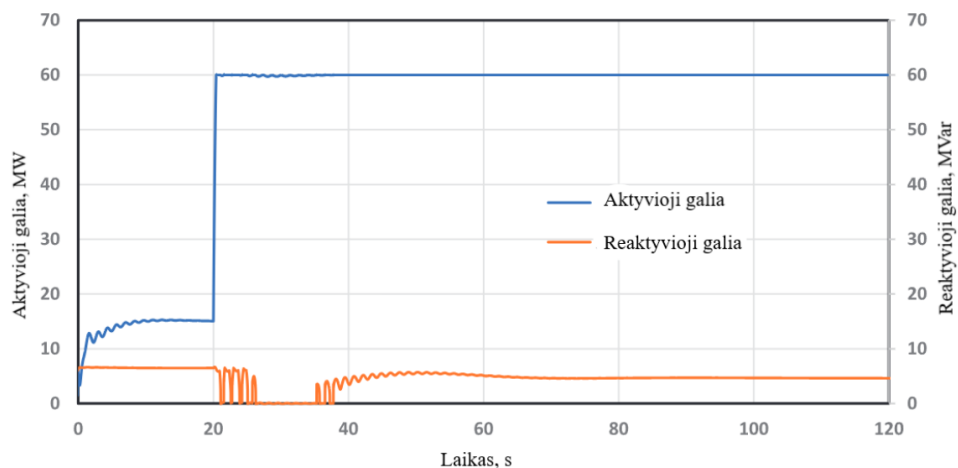
Galios elektronikos keitikliai, skirtingai nei sinchroniniai generatoriai, natūraliai neabsorbuoja ir neišskiria galios tam, kad priešintųsi dažnio pokyčiams. EES inercijos sumažėjimas daro didžiausią įtaką dažnio stabilumui — netikėti generacijos ar apkrovos pokyčiai sukelia dažnio nuokrypius. Tokie dažnio svyravimai gali turėti neigiamą poveikį vartotojams, padidinti įrangos nusidėvėjimą bei sukelti grandininis atsijungimus (angl. *blackout*) [27].

Baterijų energijos kaupimo sistema (BEKS) yra efektyvi priemonė, padedanti pagerinti sistemos dažnio stabilumą [28]. Pavyzdžiui, [23] šaltinyje atliktame tyrime modeliuota žemos inercijos sistema, kurioje dalis sinchroninių generatorių buvo pakeisti vėjo jėgainėmis. Įdiegus optimizuotą 60 MW BESS, sistema galėjo atkurti dažnį po generacijos praradimo ir palaikyti jį virš 49,6 Hz ribos, o be BESS dažnis krito žemiau šios ribos ir išliko nestabilus ilgiau nei 5 minutes (23 pav.) [23].



23 pav. Dažnio kitimas esant skirtingiems vėjo elektrinių ir BEKS scenarijams po trikdžio [23]

24 paveiksle pateikiama BEKS aktyviosios ir reaktyviosios galios atsakas į sinchroninio generatoriaus praradimą sistemoje. BEKS aktyvioji galia akimirksniu padidėja iki maksimalios taip kompensuodama generacijos trūkumą [23].



24 pav. BEKS aktyviosios ir reaktyviosios galios atsakas į generacijos sumažėjimą [23]

Dėl greito atsako laiko ir lankstumo BEKS gali dalyvauti pirminiame dažnio reguliavime (angl. *Frequency Containment Reserve, FCR*), automatiniam antriniame dažnio reguliavime (angl. *automatic Frequency Restoration Reserve, aFRR*) bei rankiniame trečiojo lygio reguliavime (angl. *manual Frequency Restoration Reserve, mFRR*) [26].

2. Metodologinė dalis

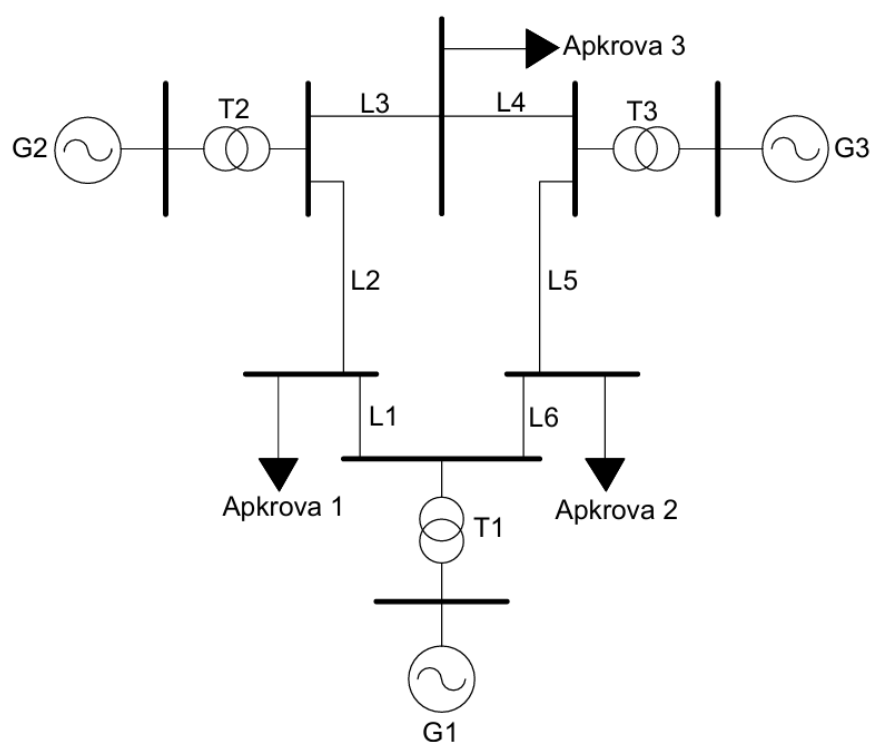
2.1. Naudojama modeliavimo priemonė

Šiame darbe baterijų energijos kaupimo sistemų įtakos elektros tinklo stabilumui analizė yra atliekama panaudojant „DIGSILENT PowerFactory“ programinę įrangą. „DIGSILENT PowerFactory“ yra pirmaujanti elektros energetikos sistemų analizės platforma, skirta generacijos, perdavimo, skirstymo ir pramoninių elektros sistemų analizei [29].

Programinė įranga pasižymi plačiu funkcionalumu - nuo tradicinių galios srautų ir trumpojo jungimo skaičiavimų iki pažangių dinaminių ir elektromagnetinių simuliacijų, dažnio ir įtampos stabilumo vertinimo, optimalios generacijos, ilgalaikio patikimumo bei apsaugos įrenginių selektyvumo analizės. Tai leidžia modeliuoti tiek įprastus tinklo darbo režimus, tiek ekstremalias avarines situacijas.

2.2. Tiriamoji elektros energetikos schema

Tiriamajai analizei šiame darbe naudojamas standartinis IEEE-9 elektros energetikos sistemos modelis. Ši sistema susideda iš 3 sinchroninių generatorių, devynių mazgų, šešių perdavimo linijų, trijų transformatorių ir trijų apkrovų. Šių elementų tarpusavio sujungimas pavaizduotas 25 paveiksle.



25 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos modelis

Norint sumodeliuoti elektros energetikos sistemą „DIGSILENT PowerFactory“ aplinkoje, būtina nurodyti pagrindinius visų sistemos elementų parametrus. Šie duomenys apima elektros sistemos dažnį, generatorių vardines galias ir įtampas, apkrovų aktyviają ir reaktyviają galią, perdavimo linijų ilgius bei varžas, taip pat transformatorių nominalias galias ir pirminių bei antrinių apvijų įtampas. Šiame darbe naudojami pradiniai sistemos parametrai pateikti 2, 3, 4 lentelėse. Elektros sistemos dažnis – 50 Hz.

2 lentelė. Generatorių duomenys

Generatoriai	P0 (MW)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Srate (MVA)	Qmax (Mvar)	Qmin (Mvar)
G1	100	-	-	290	290	-290
G2	75	200	0	200	200	-200
G3	140	320	40	320	320	-320

3 lentelė. Linijų duomenys

Linijos	R (Ω)	X (Ω)
L1	5,29	44,965
L2	16,928	85,169
L3	4,497	38,088
L4	6,2951	53,323
L5	20,631	89,93
L6	8,993	48,668

4 lentelė. Transformatorių duomenys

Transformatoriai	Srate (MVA)	uk%	U1, kV	U2, kV
T1	250	14,4	230	16,5
T2	200	12,5	230	18
T3	200	8,79	230	13,8

5 lentelė. Apkrovų duomenys

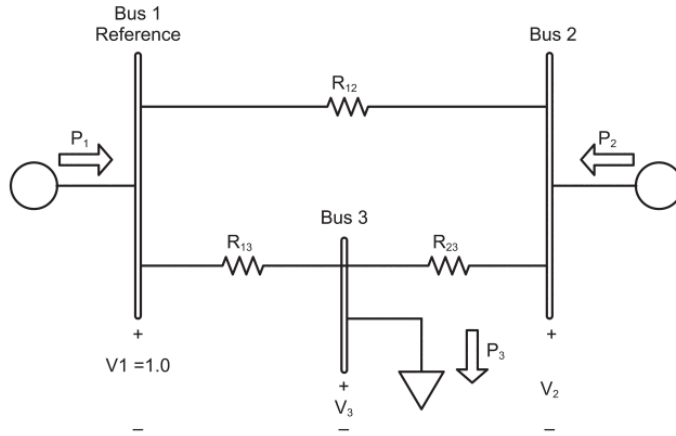
Apkrovos	P (MW)	Q (Mvar)
AP1	125	50
AP2	90	30
AP3	100	35

Sistemos modelis sukurtas „DigSILENT PowerFactory“ programine įranga atvaizduotas 1 priede.

2.3. Galios srautų skaičiavimo Niutono-Rafsono iteraciniu metodu metodika

Galios srautų (angl. *Load Flow*) analizė yra vienas pagrindinių elektros energetikos sistemos skaičiavimų, leidžiančių nustatyti mazgų įtampų lygius, galios srautų kryptis, transformatorių apkrovas ir sistemos stabilumo ribas. Dėl sistemos netiesiškumo šis uždavinys sprendžiamas taikant iteracinius skaitinius metodus. Šiame darbe galios srautams apskaičiuoti naudojamas Niutono-Rafsono metodas.

Skaičiavimo metodikai paaiškinti naudojamas 28 paveiksle pateiktas trijų mazgų elektros sistemos modelis.



26 pav. Trijų mazgų nuolatinės srovės elektros sistemos modelis [30]

Norint pritaikyti Niutono-Rafsono metodą šiam pavyzdžiui, mazgų aktyviosios galios išreiškiamos kaip netiesinės mazgų įtampų funkcijos:

$$\begin{aligned} P_1 &= V_1(Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3) \\ P_2 &= V_2(Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3); \\ P_3 &= V_3(Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3) \end{aligned} \quad (8)$$

Maži mazgų įtampų pokyčiai (ΔV) sukelia atitinkamus mazgų aktyviosios galios pokyčius (ΔP). Galios pokyčio išraiška kaip įtampos pokyčio funkcija gali būti gauta taip:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_1} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

Ši priklausomybė gali būti užrašyta:

$$[\Delta P] = [J][\Delta V]; \quad (10)$$

kur $[J]$ žymi Jakobiano matricą, sudarytą iš dalinių galios išvestinių pagal mazgų įtampas. Jakobiano matrica apskaičiuojama konkrečiam įtampos vektoriui (V_1, V_2, V_3), t. y. naudojamos (8) lygčių dalinės išvestinės. Svarbu tai, kad jei bent vieno mazgo įtampa kinta reikšmingai, Jakobiano matrica turi būti perskaičiuojama, nes jos elementai tiesiogiai priklauso nuo esamos įtampos būsenos [30].

Galios srautų skaičiavime, V_1 yra prilyginamas 0, kadangi 1 mazgas yra laikomas baziniu. Atsižvelgiant į tai 9 lygtis gali būti supaprastinta ir išreiškiama taip:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

Mazgų V_2 ir V_3 įtampų pokyčiai, atsirandantys dėl galių P_2 ir P_3 pokyčių, gaunami invertavus Jakobiano matricą:

$$[\Delta V] = [J]^{-1}[\Delta P]; \quad (12)$$

Niutono-Rafsono galios srautų skaičiavimo metodas susideda iš 5 žingsnių:

- 1) Pasirenkami pradiniai įtampos V_2 ir V_3 įverčiai (pavyzdžiui, $V_2 = V_3 = 1,0$).
- 2) Apskaičiuojamos galios P_2 ir P_3 pagal 8 formulę.
- 3) Apskaičiuojami nukrypimai (ΔP) tarp apskaičiuotų ir pageidaujamų galių:

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= P_2 - P'_2 \\ \Delta P_3 &= P_3 - P'_3; \end{aligned} \quad (13)$$

Čia indeksas ' reiškia pageidaujamą vertę.

- 4) Kadangi sąlyga $\Delta P \neq 0$ atsiranda dėl įtampos paklaidų, vadinasi, tikrosios mazgų įtampos taip pat yra neteisingos. Todėl nauji mazgų įtampos dydžiai apskaičiuojami:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}_{nauji} = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}_{seni} - [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

- 5) Iš naujai apskaičiuotų įtampų vėl sudaroma ir „invertuojama“ Jakobiano matrica, o tuomet apskaičiuojamas atnaujintas įtampos įvertis, naudojant lygtis (13) ir (14). Skaičiavimai kartojami tol, kol ΔP_2 ir ΔP_3 tampa pakankamai mažos (t. y. pasiekiamas konvergavimo kriterijus). Pradinėse iteracijose konvergencija yra labai greita ir lėtėja tik artėjant prie galutinio sprendinio [30].

Kintamosios srovės galios srautų uždavinyje Jakobiano matricą galima sudaryti šia forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}; \quad (15)$$

Galutiniai skaičiai gaunami kai, nedidelis mazgo įtampos modulio $\Delta |V|$ pokytis beveik nepakeičia aktyviosios galios P . Analogiškai, kai nedidelis mazgo fazės kampo $\Delta \theta$ pokytis tik nereikšmingai veikia reaktyviają galią Q [30].

Tuomet iš 15 formulės gauname:

$$[J_2] = \left[\frac{\partial P}{\partial |V|} \right] \cong 0; \quad (16)$$

$$[J_3] = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cong 0; \quad (17)$$

Tai leidžia 15 lygtį išskaidyti į dvi nepriklausomas lygtis:

$$[\Delta P] = [J_1][\Delta \theta]; \quad (18)$$

$$[\Delta Q] = [J_4][\Delta |V|]; \quad (19)$$

Niutono–Rafsono iteracinis metodas yra vienas plačiausiai taikomų galios srautų skaičiavimo algoritmų šiuolaikinėse elektros energetikos analizės programose. Jo pagrindimas remiasi mazgų įtampų ir galios balansų netiesinių lygčių pakeitimas tiesinėmis, sudarant Jakobiano matricą ir

iteratyviai koreguojant įtampos dydžius tol, kol pasiekiamas konvergavimo kriterijus. Dėl greitos konvergencijos, stabilumo ir galimybės efektyviai spręsti didelio masto sistemas, Niutono–Rafsono metodas tapo pramoniniu standartu ir yra taikomas daugumoje galios sistemų modeliavimo paketų. Šiame darbe naudojama programinė įranga DIgSILENT PowerFactory taip pat naudoja Niutono–Rafsono metodą galios srautų skaičiavimams atlikti.

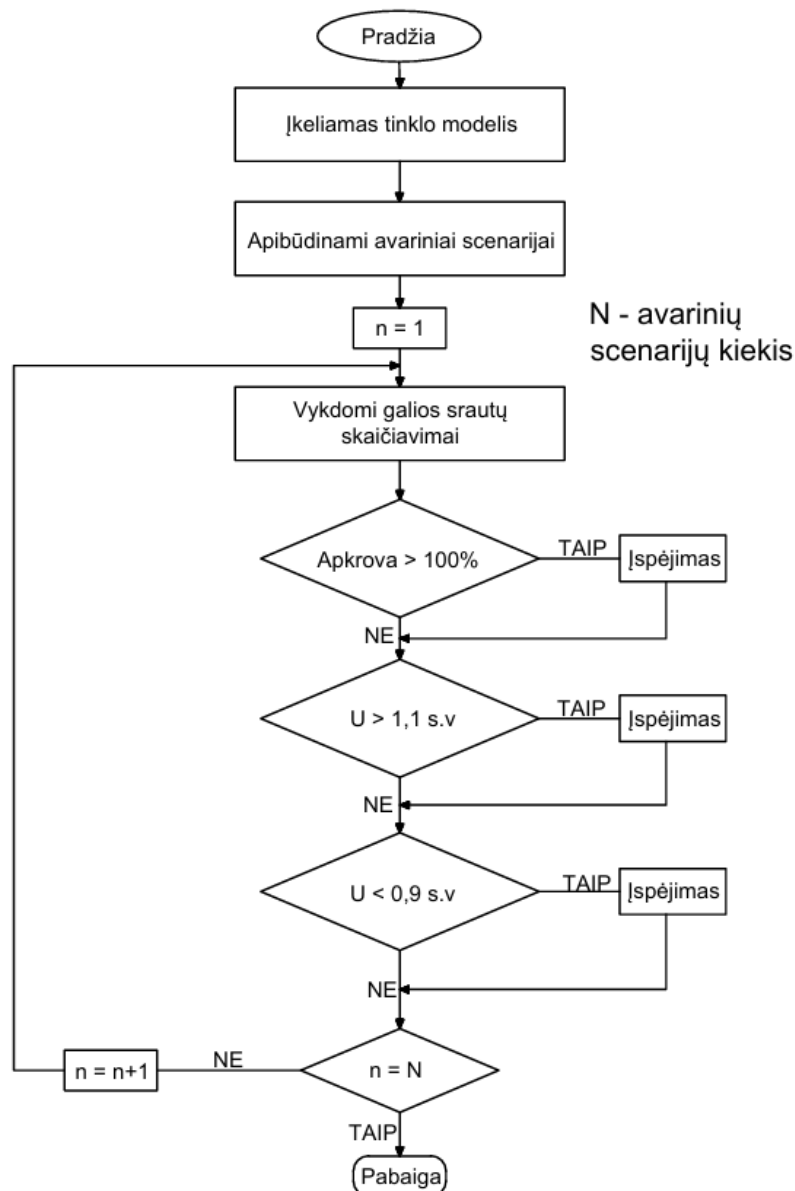
2.4. Nenumatytų atvejų analizės metodika

Nenumatytų atvejų analizė (angl. *Contingency analysis*) – tai elektros energetikos sistemos elementų, tokių kaip perdavimo linijų, transformatorių ar generatorių, atjungimo poveikio tyrimas, vertinant jų įtaką galios srautams ir mazgų įtampoms likusioje sistemos dalyje. Ši analizė leidžia įvertinti elementų gedimų poveikį sistemos patikimumui tiek eksploatacijos, tiek planavimo etapuose. Avariniais scenarijais laikomi tokie trikdžiai kaip perdavimo linijos ar generatoriaus atsijungimas, kurie gali sukelti staigius ir reikšmingus pokyčius sistemos būklei [31].

Avarinių situacijų analizei yra taikomas N-1 kriterijus, kuriuo metu yra analizuojamas vieno sistemos elemento atjungimo poveikis elektros sistemos darbo režimams. Atliekant tokią analizę vertinama, kaip keičiasi sistemos būklė pašalinus vieną komponentą. Paprastai vykdant N–1 analizę apskaičiuoti linijų srautai lyginami su perdavimo linijų leistinomis srovės apkrovomis, o transformatorių apkrovimai – su jų maksimaliomis leistinomis ribomis. Taip pat tikrinama, ar mazgų įtampos nuokrypiai neviršija leidžiamų ribų, nustatytų atsižvelgiant į vardines įtampos reikšmes [32].

Šiame darbe nenumatytų atvejų analizė yra atliekama naudojantis „DIgSILENT PowerFactory“ programine įranga. Programa suteikia didelį lankstumą atliekant avarinių scenarijų konfigūravimą, skaičiavimų metodų parinkimą ir rezultatų pateikimą. Avarinių scenarijų atvejai gali būti generuojami automatiškai arba kuriami ir redaguojami vartotojo [33].

Programoje taikomas nenumatytų atvejų analizės algoritmas pateikiamas 29 paveiksle.



27 pav. Nenumatytų atvejų analizės algoritmas

Analizė pradedama įkeliant tiriamos elektros energetikos sistemos modelį ir nustatant pradinį darbo režimo parametrus. Toliau sudaromas galimų avarinių scenarijų sąrašas – elementai (linijos, transformatoriai, generatoriai), kurių atjungimai bus modeliuojami skaičiavimuose.

Skaičiavimai vykdomi cikliškai, pradedant nuo pirmojo scenarijaus ($n = 1$). Kiekvieno ciklo metu išjungiamas atitinkamas tinklo elementas ir atliekami galios srautų skaičiavimai Newtono–Rafsono metodu, siekiant nustatyti naują sistemos būseną po sutrikimo.

Po skaičiavimų atliekamas eksploatacinių ribų tikrinimas. Tikrinamos trys pagrindinės sąlygos:

- 1) Jeigu perdavimo linijų, transformatorių ar generatorių apkrovimas viršija 100 % jų vardinės galios, užfiksuojamas įspėjimas apie elemento perkrovimą.

- 2) Jeigu nors vieno mazgo įtampa viršija 1,1 s.v., užregistruojamas įspėjimas apie per didelę įtampą.
- 3) Jeigu mazgo įtampa nukrenta žemiau 0,9 s.v., registruojamas įspėjimas apie neleistinai žemą įtampos lygį.

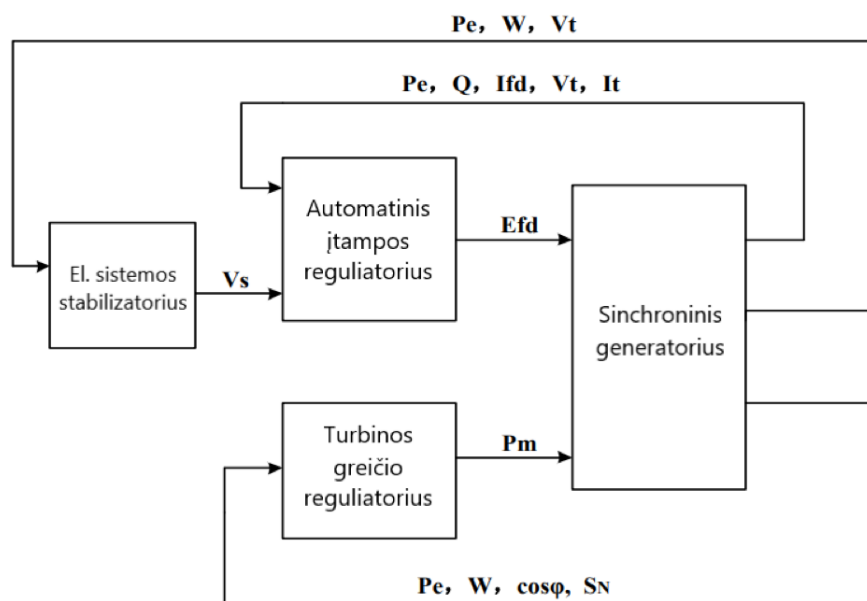
Jeigu kuri nors iš šių sąlygų tenkinama, į rezultatus įtraukiamas atitinkamas įspėjimas, kuris vėliau analizuojamas nustatant sistemos „silpnąsias vietas“.

Toliau tikrinama, ar pasiektas paskutinis scenarijus ($n = N$). Jeigu ne, scenarijų skaitiklis padidinamas ($n = n + 1$) ir algoritmas grįžta į kitą skaičiavimų ciklą su kito elemento atjungimu. Jei visi N scenarijai įvertinti, algoritmas baigiamas.

Šis algoritmas leidžia sistemingai identifikuoti kritinius elementų atjungimo atvejus, sukeliančius perkrovas ar neleistinus įtampos nuokrypius, ir sudaro prielaidas tolimesnei sistemos patikimumo analizei.

2.5. Sinchroninio generatoriaus valdymo modelis

Šiame darbe naudojama sinchroninio generatoriaus valdymo struktūra apima generatorių, turbinos greičio reguliatorių, automatinį įtampos reguliatorių bei elektros sistemos stabilizatorių. Sinchroninio generatoriaus valdymo struktūra pavaizduota 30 paveiksle. Šioje schemoje el. sistemos stabilizatorius generuoja stabilizuojantį signalą V_s , kuris yra perduodamas į automatinį įtampos reguliatorių. Automatinis įtampos reguliatorius remdamasis įtampos V_t , reaktyviosios galios Q , srovės I_t bei kitais matuojamais dydžiais, formuoja sužadintimo įtampą E_{fd} , kuri tiesiogiai veikia generatoriaus elektromagnetinį momentą ir reaktyviosios galios balansą. Tuo tarpu turbinos greičio reguliatorius, naudodamas aktyviosios galios P_e ir rotoriaus greičio ω matavimais, apskaičiuoja mechaninę galią P_m , reikalingą dažnio palaikymui [34].

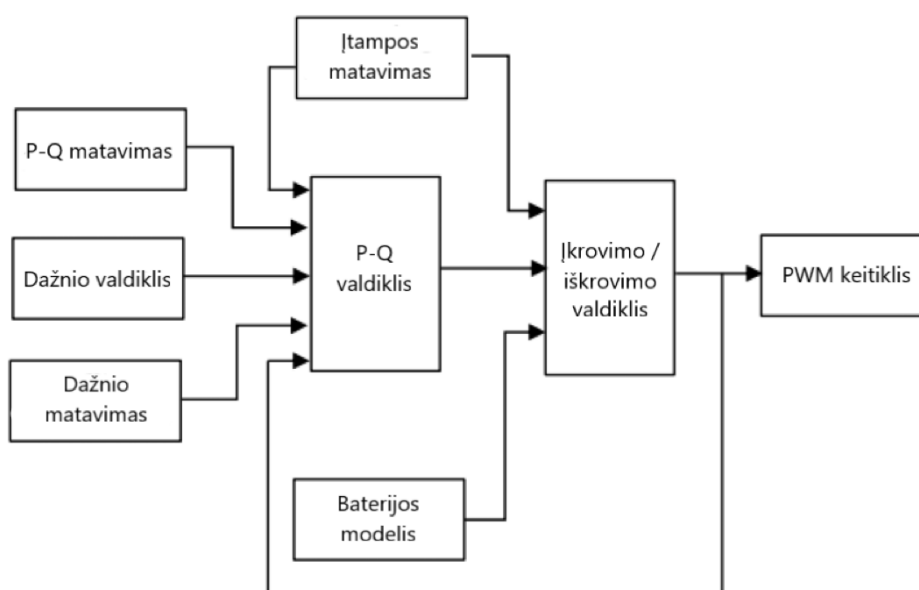


28 pav. Sinchroninio generatoriaus valdymo struktūra [34]

Modeliuojama sinchroninio generatoriaus valdymo schema „DIGSILENT PowerFactory” programine įranga atvaizduojama 2 priede.

2.6. Baterijų energijos kaupimo sistemos valdymo modelis

Darbe naudojama BEKS valdymo sistema pavaizduota 31 pav. yra suformuota kaip kelių nuosekliai ir lygiagrečiai veikiančių blokų struktūra, kuri leidžia realiu laiku reaguoti į elektros tinklo dažnio ir įtampos pokyčius bei reguliuoti į tinklą tiekiamą aktyviąją ir reaktyviąją galią. BEKS valdymo principas remiasi dažnio ir įtampos matavimais bei aktyviosios galios priklausomybe nuo dažnio. Dažnio matavimo blokas nustato esamą dažnio reikšmę, kuri perduodama į dažnio valdiklį. Šiame bloke apskaičiuojama reikalinga aktyvioji galia. Tokiu būdu BEKS gali automatiškai didinti arba mažinti į tinklą tiekiamą aktyviąją galią, priklausomai nuo to, ar dažnis mažėja, ar didėja. Dažnio valdiklio išėjimo signalas yra sujungiamas su įtampos matavimo bloko informacija ir su aktyviosios bei reaktyviosios galios matavimais, gautais iš P–Q matavimo bloko. Šie signalai kartu sudaro įėjimą į P–Q valdiklį. P–Q valdiklio paskirtis – formuoti reikiamas aktyviosios ir reaktyviosios galios funkcijas, kurios apibrėžia, kokią galią baterijų energijos kaupimo sistema turi pateikti į elektros tinklą ar suvartoti pagal iš anksto nustatytas reikšmes. Toliau P–Q valdiklio išėjimas perduodamas į įkrovimo / iškrovimo valdiklį. Šis blokas atsižvelgia į baterijos būseną ir nustato, ar BEKS gali dirbti įkrovimo, ar iškrovimo režimu. Galiausiai, įkrovimo / iškrovimo valdiklio suformuoti valdymo signalai perduodami į keitiklį, o šis fiziškai realizuoja aktyviosios ir reaktyviosios galios mainus tarp baterijos ir elektros tinklo [35].

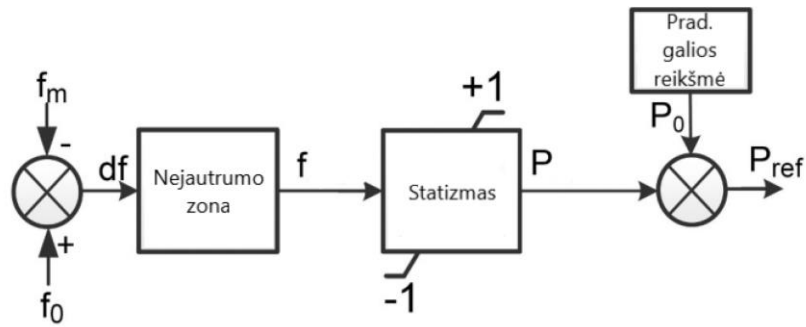


29 pav. BEKS valdymo schema [35]

Modeliuojama BEKS valdymo schema „DIGSILENT PowerFactory” programine įranga atvaizduojama 3 priede.

2.6.1. BEKS dažnio valdiklis

Dažnio valdiklis priima sprendimus dėl BEKS darbo režimo, nustato, ar baterijų energijos kaupimo sistema turi tiekti aktyviąją galią į tinklą, ar ją sugerti, priklausomai nuo dažnio nuokrypių atsiradimo. Dažnio valdiklis yra paremtas statizmo (angl. *droop*) principu, pagal kurį statizmo koeficientas apibrėžia, kokio dydžio aktyvioji galia turi būti tiekiamą arba sugeriamą esant dažnio nuokrypiui. Valdiklio struktūra pavaizduota 32 paveiksle [36].



30 pav. BEKS dažnio valdiklio struktūra [36]

Statizmu pagrįstą dažnio valdymą galima išreikšti matematiškai:

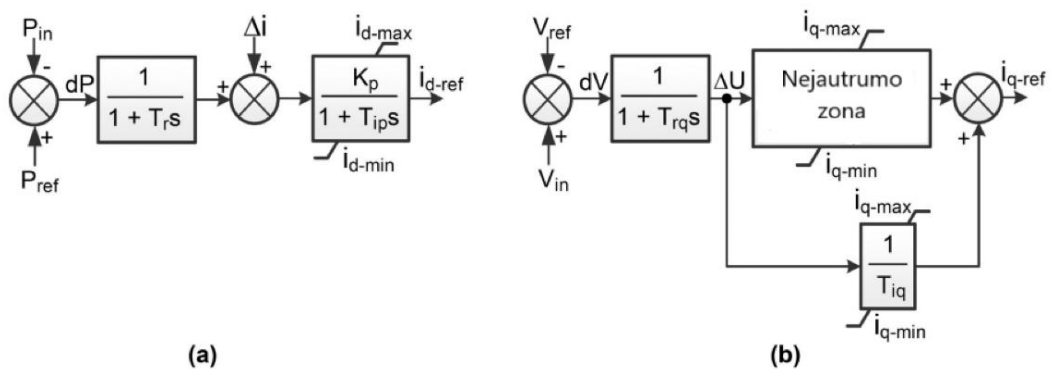
$$\Delta P = -K_{droop} \cdot \Delta f. \quad (20)$$

čia ΔP - aktyviosios galios pokytis (MW), K_{droop} – statizmo koeficientas, nusakantis BEKS jautrumą dažnio pokyčiams (MW/Hz), Δf - tinklo dažnio nuokrypis nuo nominalios reikšmės (Hz) [25].

Valdiklyje įdiegta „nejautrumo zona“ (angl. *deadband*) padeda išvengti BEKS veikimo esant labai mažiems dažnio nuokrypiams, kai sistemos reguliavimas nėra būtinas. Statizmo (angl. *droop*) blokas paverčia dažnio nuokrypį į aktyviosios galios užduotį, kuri vėliau, atsižvelgiant į nustatytą pradinę galio reikšmę P_0 , suformuoja galutinę aktyviosios galios reikšmę P_{ref} [36].

2.6.2. BEKS P-Q valdiklis

P-Q valdiklis sudarytas iš dviejų integralinių PI1 ir PI2 valdiklių, skirtų aktyviajai ir reaktyviajai galiai reguliuoti [36].



31 pav. a) aktyviosios galios dalies P-Q valdiklis, b) reaktyviosios galios dalies P-Q valdiklis [36]

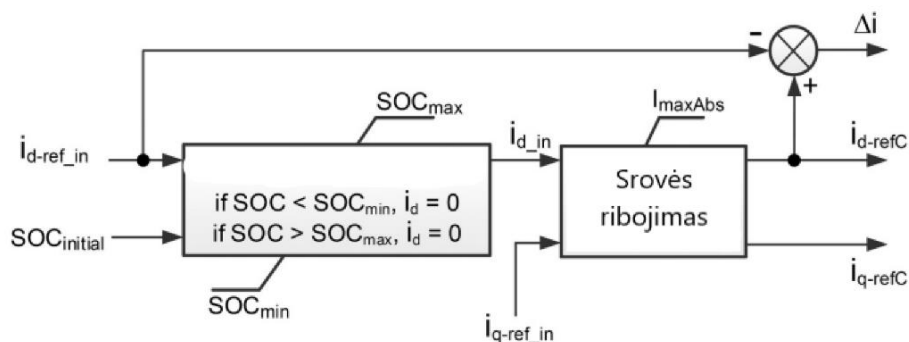
Aktyviosios galios dalyje (33 pav. a) dažnio valdiklio išėjimo signalas P_{ref} yra naudojamas kaip aktyviosios galios nuoroda P-Q valdikliui. Jis lyginamas su faktine į tinklą tiekiamą galia P_{in} , o gautas skirtumas ΔP perduodamas į pirmos eilės filtrą. Prie šio signalo papildomai pridedamas srovės korekcijos signalas Δi , gaunamas iš įkrovimo / iškrovimo valdiklio. Toliau signalas paduodamas į PI valdiklį, kuris suformuoja d ašies srovės nuorodą i_{d-ref} [36].

Reaktyviosios galios dalyje (33 pav. b) reguliavimas vykdomas pagal įtampos nuokrypį. Pirmiausia apskaičiuojamas skirtumas tarp įtampos nuorodos V_{ref} ir faktinės įtampos BEKS prijungimo taške.

Šis signalas filtruojamas ir perduodamas į PI valdiklį, kuris suformuoja q ašies srovės komponentės užduotį. Papildomai naudojamas „nejautrumo zona“ blokas, kuris realizuoja reaktyviosios galios nejautrumo zonos ir ribojimo funkciją. Taip išvengiama nereikalingo BEKS reagavimo į mažus įtampos svyravimus bei užtikrinama, kad srovė neviršytų nustatytų ribų (i_{q-max} , i_{q-min}). Galutinis PI2 valdiklio rezultatas yra q ašies srovės nuroda i_{q-ref} , tiesiogiai susijusi su reaktyviosios galios reguliavimu [36].

2.6.3. BEKS įkrovimo/iškrovimo valdiklis

Įkrovimo/iškrovimo valdiklį sudaro du valdymo blokai, kaip pavaizduota 34 pav. Pirmasis SOC valdymo blokas – kontroliuoja baterijos įkrovos būseną, palaikydamas ją nustatytose ribose. Antrasis blokas riboja absoliučią srovės reikšmę pagal maksimalią leistiną vertę I_{maxAbs} [36].



32 pav. BEKS įkrovimo/iškrovimo valdiklio struktūra [36]

BEKS veikia tik tuo atveju, jei baterijos SOC yra didesnis už minimalų ir mažesnis už maksimalų. Kitaip tariant, d ašies srovė yra nustatoma lygi nuliui, kai SOC peržengia nustatytas minimalias arba maksimalias ribas (SOC_{min} ir SOC_{max}), apibrėžtas BEKS SOC valdymo logikoje. Srovės ribojimo blokas reguliuoja išėjimo nuorodų signalus i_{d-refC} ir i_{q-refC} BEKS keitikliui taip, kad jie neviršytų jo bendros galios [36].

2.7. Modeliuojamos elektros sistemos tyrimo scenarijus

Elektros sistemos stabilumo tyrimas atliekamas pagal šiuos etapus:

- 1) Sudaromas IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos modelis „DIGSILENT PowerFactory“ programinėje aplinkoje, aprašant pagrindinius sistemos elementus ir jų parametrus.
- 2) Atliekami bazinio režimo galios srautų skaičiavimai, kuriais nustatomi pradiniai sistemos darbo taškai, mazgų įtampos ir galios srautai linijose.
- 3) Atliekama N–1 nenumatytų atvejų analizė, nuosekliai atjungiant perdavimo linijas ir generatorius. Pagal gautus rezultatus nustatomi kritiniai scenarijai ir identifikuojamas silpniausias sistemos mazgas įtampos stabilumo požiūriu.
- 4) Silpniausiame sistemos mazge atliekama Q–U analizė, siekiant nustatyti reikalingą reaktyviosios galios dydį įtampos stabilumui užtikrinti normaliu ir kritiniu darbo režimu.

- 5) Parinktoje tinklo vietoje integruojama baterijų energijos kaupimo sistema ir vertinama jos įtaka įtampos stabilumui, lyginant mazgų įtampas be BEKS ir su BEKS jai tiekiant reaktyviąją galią.
- 6) Atliekama dažnio stabilumo analizė, modeliuojant kritinį dinaminį trikdį. Vertinamas sistemos dažnio atsakas be BEKS ir su BEKS.
- 7) Tiriama BEKS aktyviosios galios ir statizmo parametro įtaka dažnio stabilumo rodikliams - dažnio minimaliai vertei ir dažnio kitimo greičiui.
- 8) Remiantis įtampos ir dažnio stabilumo analizės rezultatais, atliekamas preliminarus BEKS galios ir talpos parinkimas.

3. Tiriamoji dalis

Šiame skyriuje pateikiami atlikto tyrimo rezultatai ir jų analizė, siekiant įvertinti BEKS įtaką elektros energetikos sistemos stabilumui. Tyrimas atliktas naudojant IEEE 9 mazgų elektros tinklo modelį, sukurtą „DIgSILENT PowerFactory“ programinėje aplinkoje.

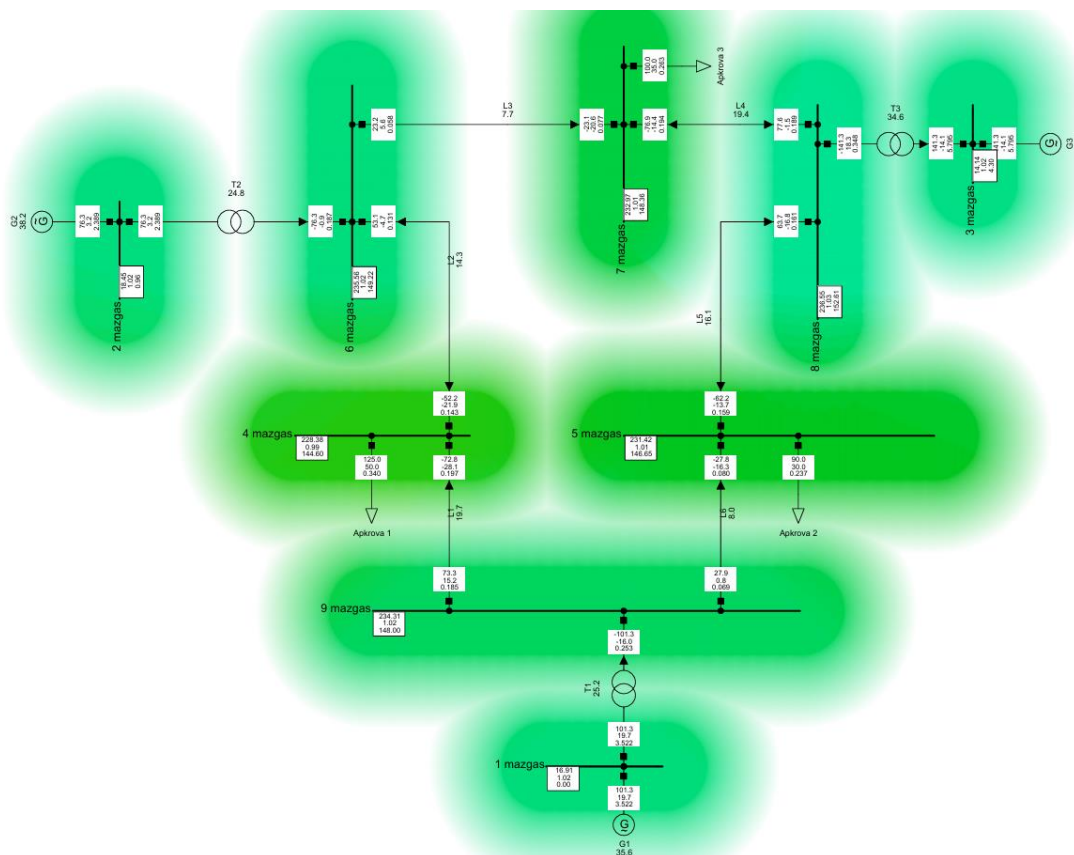
Pirmiausia analizuojamas elektros sistemos darbas be BEKS, atliekant galios srautų skaičiavimus ir nenumatytų atvejų (N-1) analizę. Šių skaičiavimų pagrindu nustatomi kritiniai sistemos režimai ir identifikuojamas silniausias mazgas, kuriame įtampos nuokrypiai yra didžiausi. Remiantis gautais rezultatais parenkama tinkamiausia BEKS prijungimo vieta.

Toliau tiriama BEKS įtaka įtampos stabilumui, vertinant, kaip skirtingos reaktyviosios galios vertės veikia sistemos įtampos profilį tiek normaliomis, tiek avarinėmis sąlygomis. Po to atliekama dinaminė analizė, kurios metu nagrinėjamas sistemos dažnio atsakas į staigius trikdžius, įvertinant BEKS aktyviosios galios bei statizmo parametrų įtaką dažnio stabilumui.

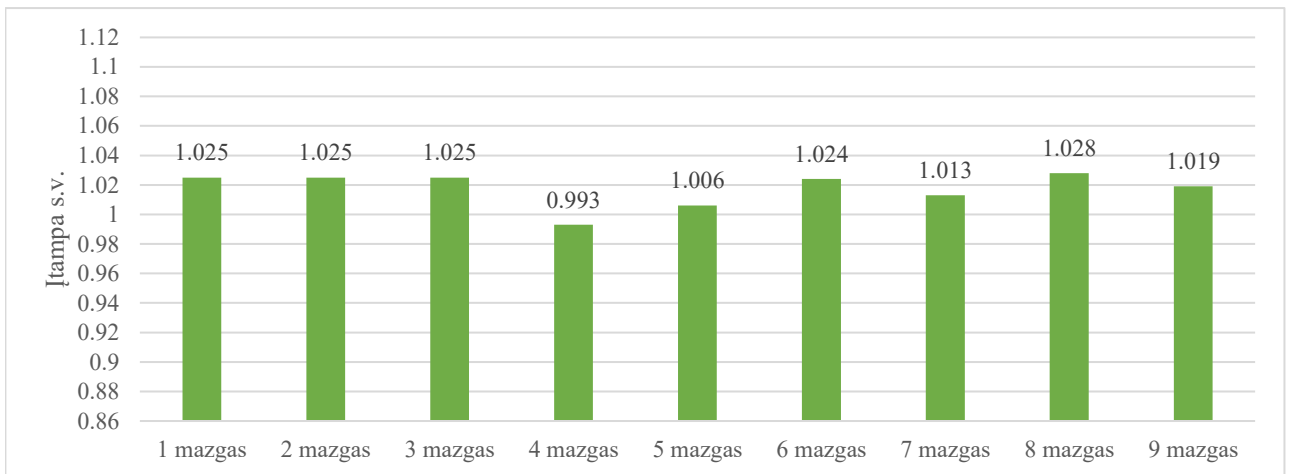
3.1. Įtampos stabilumo analizė

3.1.1. Bazinio režimo analizė

Atlikus galios srautų skaičiavimus IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemoje nustatyta, kad normaliu eksploatacijos režimu sistema veikia stabiliai ir visų mazgų įtampos išlieka leistinose ribose.



33 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos galios srautų analizė baziniu režimu



34 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos įtampos pasiskirstymas baziniu režimu

Baziniu režimu sistema veikia stabiliai ir tai patvirtina, kad sudarytas modelis yra tinkamas tolesnei stabilumo analizei. Tačiau siekiant įvertinti sistemos atsparumą trikdžiams, būtina atlikti nenumatytų atvejų (N-1) analizę.

3.1.2. Nenumatytų atvejų N-1 analizė

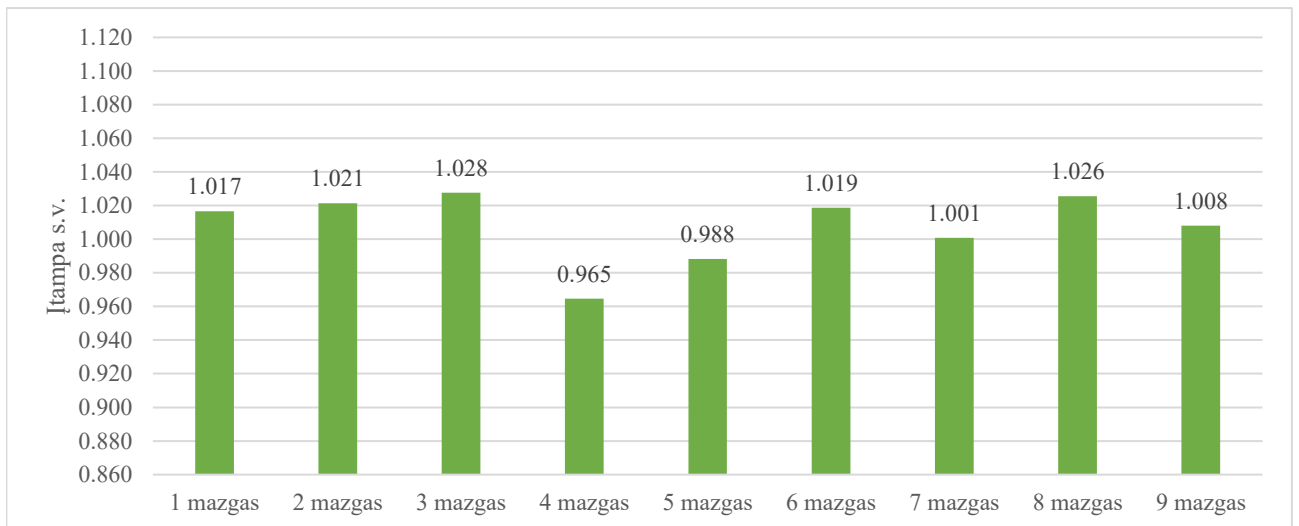
N-1 nenumatytų atvejų analizės metu yra nuosekliai atjungiamas kiekvienas sistemos elementas (perdavimo linijos ir generatoriai) ir vertinami įtampos pokyčiai visuose mazguose. Gauti rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Mazgų įtampos reikšmės N-1 analizės metu

	Įtampa s.v.								
	Be L1	Be L2	Be L3	Be L4	Be L5	Be L6	Be G1	Be G2	Be G3
1 mazgas	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1	1,025	1,025
2 mazgas	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	0,993	1,025
3 mazgas	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,049
4 mazgas	0,868	0,961	0,992	0,982	0,986	0,994	0,914	0,988	0,996
5 mazgas	1,011	0,997	1,005	0,988	0,981	0,949	0,948	1,005	1,011
6 mazgas	1,009	1,024	1,027	1,01	1,02	1,023	1,02	1,009	1,026
7 mazgas	0,998	1,013	0,98	0,978	1,005	1,01	1,007	1,001	1,015
8 mazgas	1,024	1,028	1,023	1,027	1,024	1,023	1,022	1,026	1,033
9 mazgas	1,026	1,016	1,019	1,01	1,021	1,02	0,921	1,017	1,022

Analizė parodė, kad tam tikrais avariniais scenarijais sistemoje atsiranda dideli įtampos nuokrypiai. Didžiausias įtampos kritimas nustatytas atjungus liniją L1, kai 4 mazgo įtampa sumažėjo iki 0,868 s.v. Taip pat reikšmingi įtampos kritimai stebimi atjungus generatorių G1, kai mazgo 4 mazgo įtampa sumažėja iki 0,914 s.v., o 9 mazge iki 0,921 s.v.

Siekiant įvertinti kiekvieno mazgo jautrumą trikdžiams, apskaičiuotos vidutinės įtampos reikšmės visų N-1 scenarijų metu. Šie rezultatai pateikti 35 paveiksle.



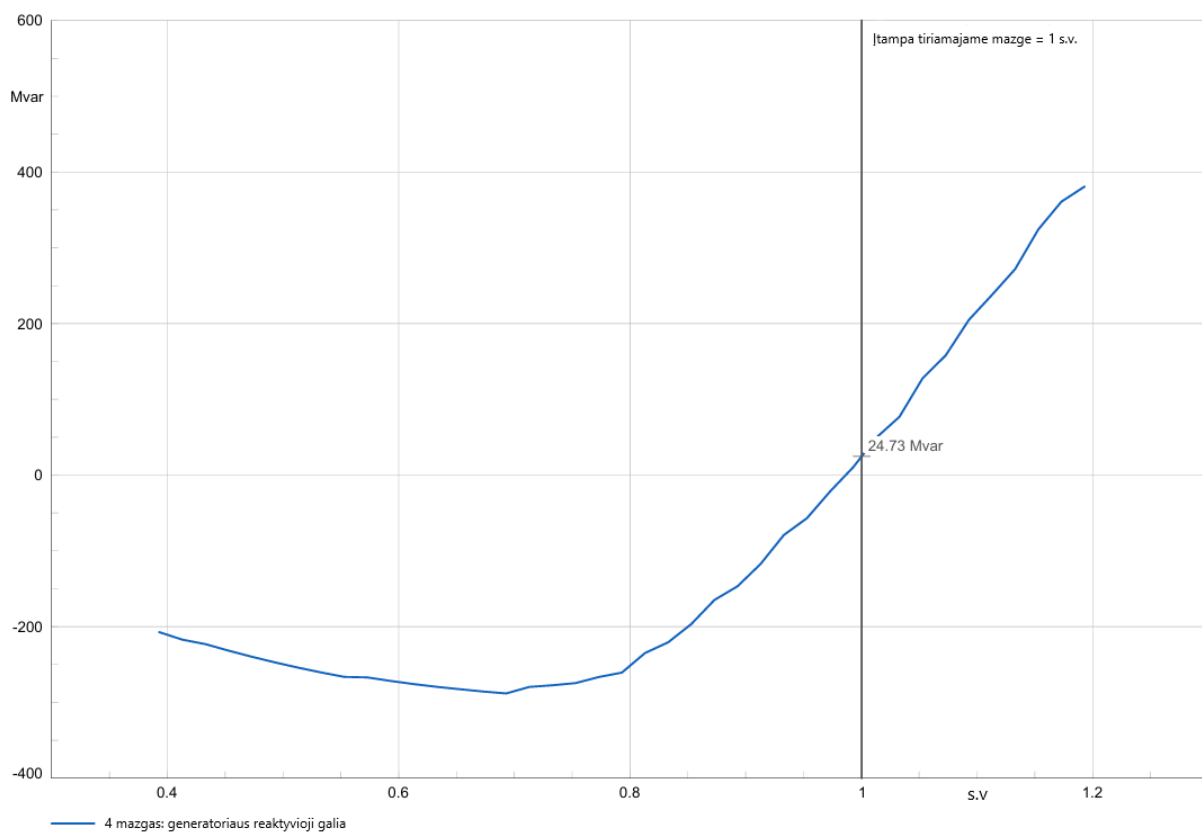
35 pav. IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos vidutinės mazgų įtampos N–1 režimais

Iš grafiko matyti, kad mažiausia vidutinė įtampa nustatyta 4 mazge (0,965 s.v.), o tai patvirtina, kad šis mazgas yra jautriausias sistemos trikdžiams. Remiantis šiais rezultatais, 4 mazgas pasirenkamas kaip tinkamiausia vieta baterijų energijos kaupimo sistemos integravimui, siekiant pagerinti elektros tinklo įtampos stabilumą.

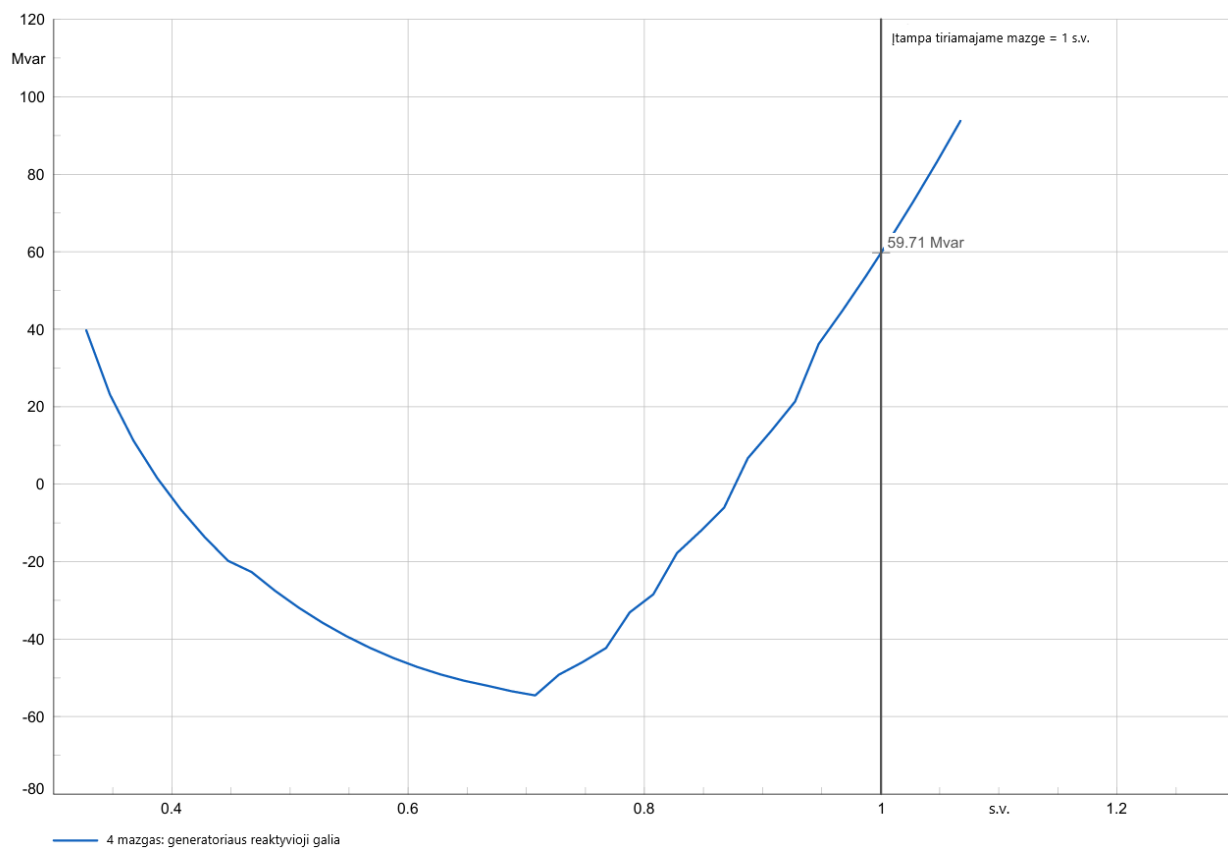
3.1.3. Q-U analizė

Siekiant nustatyti reikalingą BEKS tiekiamą reaktyviosios galios dydį, buvo atlikta Q-U analizė, kurios metu vertinama įtampos priklausomybė nuo reaktyviosios galios tiriamajame mazge. Analizė atlikta silpniausiame sistemos taške – 4 mazge, kuris buvo identifikuotas atlikus N-1 analizę. Analizuojamos Q-U kreivės dviem atvejais:

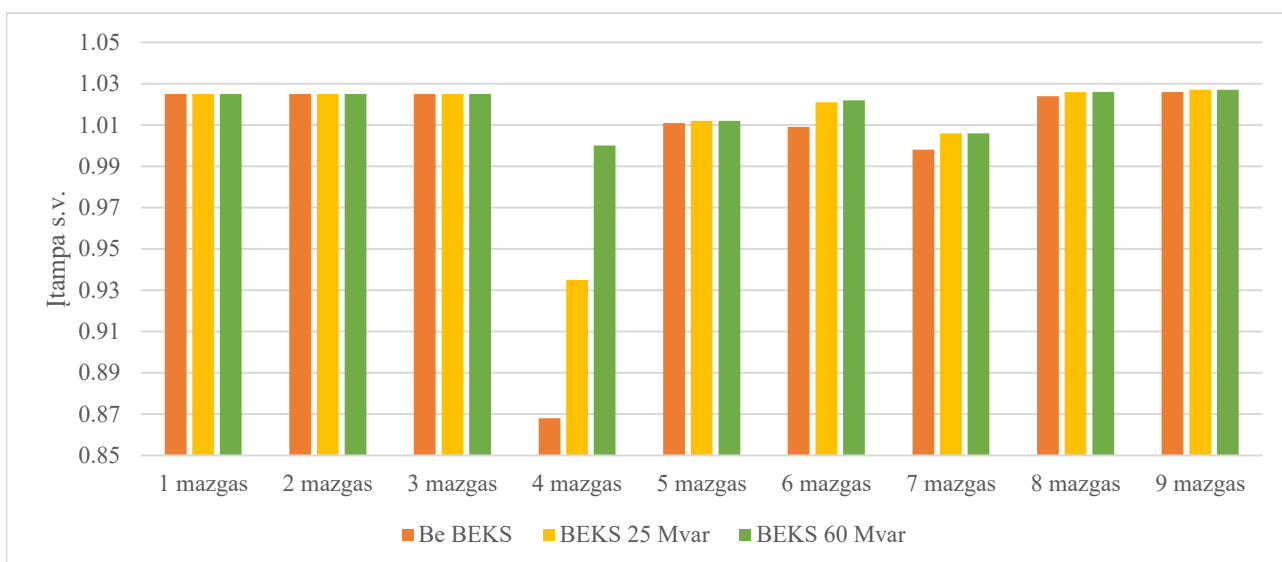
- 1) Normaliu sistemos režimu;
- 2) Kritiniu N-1 scenarijumi – atjungus liniją L1.



36 pav. Q-U kreivė 4 mazge normaliu režimu



37 pav. Q-U kreivė 4 mazge atjungus liniją L1



39 pav. Įtampos palyginimas mazguose atjungus liniją L1 su BEKS ir be BEKS

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad BEKS įdiegimas turi reikšmingą teigiamą poveikį įtampos stabilumui. Didžiausias efektas stebimas 4 mazge, kuriame be BEKS įtampa sumažėja iki 0,868 s.v., o įdiegus 25 Mvar BEKS įtampa padidėja iki 0,935 s.v., o su 60 Mvar lieka nominalioje reikšmėje 1 s.v.

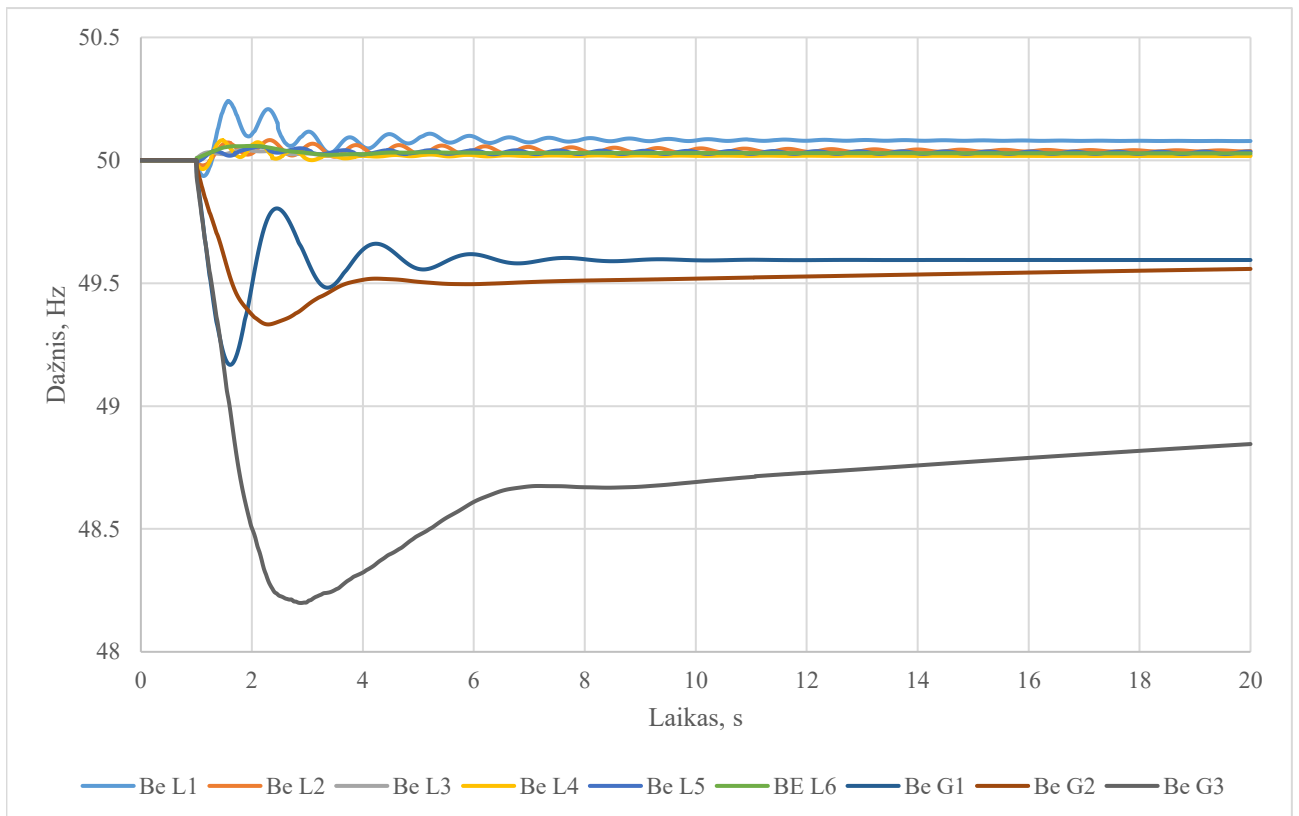
BEKS efektyviai kompensuoja reaktyviosios galios trūkumą ir leidžia sumažinti įtampos kritimus avarinėse situacijose. Taip pat BEKS galios parinkimas turi būti atliekamas įvertinus kritinius sistemos darbo režimus, nes normaliam režimui pakankama galia ne visada užtikrina stabilumą esant trikdžiams.

3.2. Dažnio stabilumo analizė

Dažnio stabilumo tyrimas atliekamas dinaminio modeliavimo būdu, vertinant sistemos dažnio atsaką po skirtingų tinklo elementų atjungimo. Pagrindiniai vertinimo rodikliai yra minimali dažnio vertė ir dažnio kitimo sparta. BEKS poveikis vertinamas keičiant aktyviosios galios dydį bei statizmo valdymo parametras.

3.2.1. Kritinio trikdžio nustatymas

Siekiant nustatyti kritinį dinaminį trikdį, buvo atlikta N–1 analizė be BEKS. Analizės metu nuosekliai atjungiami perdavimo tinklo elementai ir generatoriai, o vertinamas sistemos dažnio atsakas laiko atžvilgiu.



40 pav. Sistemos dažnio kitimas skirtingų N–1 trikdžių metu be BEKS

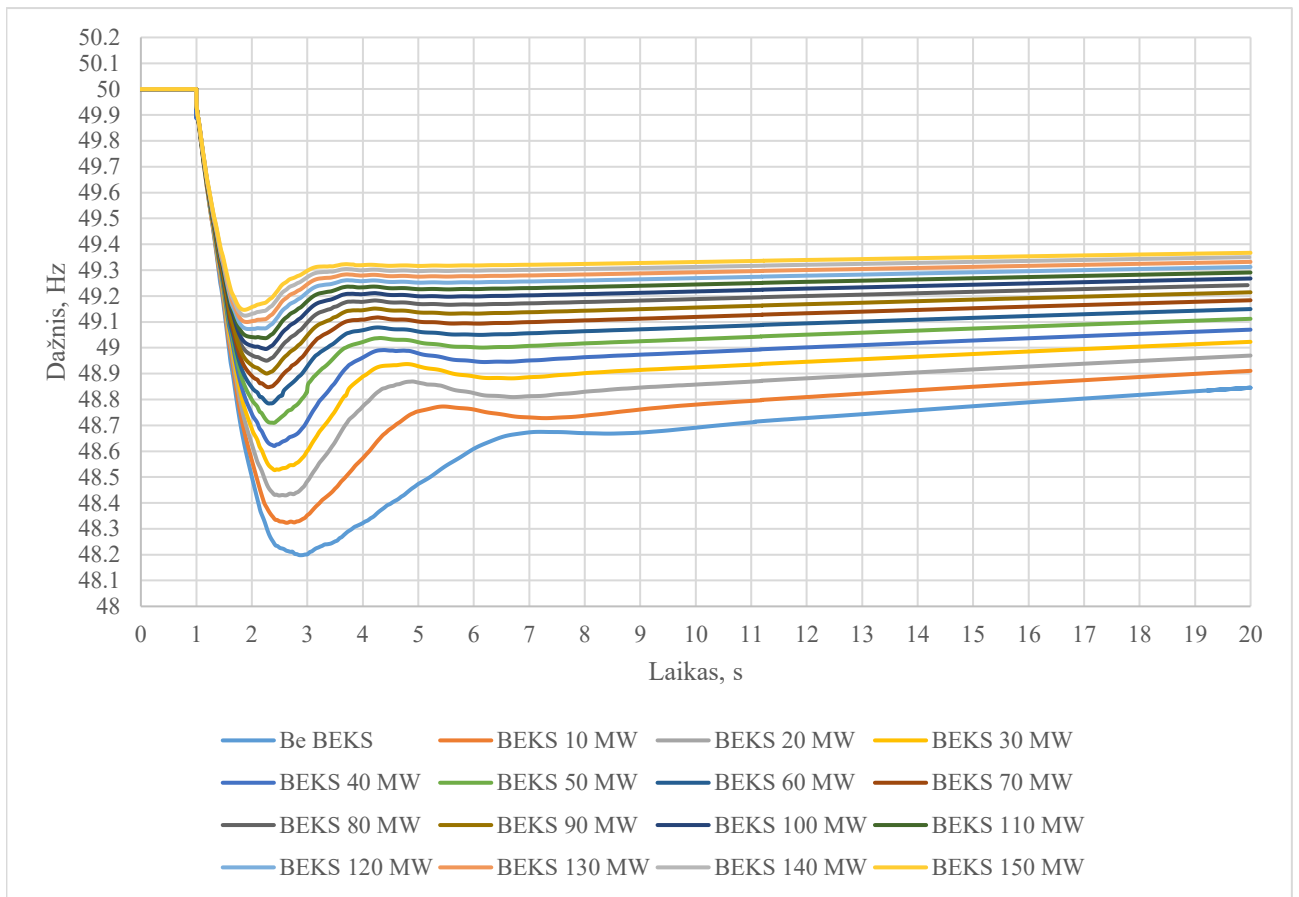
Iš 40 paveikslo matyti, kad perdavimo linijų atjungimo atvejais sistemos dažnio nuokrypis yra nedidelis, o dažnis išlieka artimas nominaliai 50 Hz vertei. Tai rodo, kad linijų atjungimas nesukelia reikšmingo aktyviosios galios disbalanso sistemoje.

Tuo tarpu generatorių atjungimas sukelia žymiai didesnę dažnio sumažėjimą. Didžiausias dažnio kritimas nustatytas atjungus G3 generatorių, kai dažnis sumažėja iki 48,199 Hz. Atjungus G1 generatorių dažnis sumažėja iki 49,168 Hz, o atjungus G2 generatorių – iki 49,332 Hz.

Remiantis gautais rezultatais nustatyta, kad kritinis dinaminis trikdys yra G3 generatoriaus atjungimas, nes šiuo atveju stebimas didžiausias dažnio nuokrypis nuo nominalios vertės. Dėl šios priežasties tolimesnė BEKS įtakos dažnio stabilumui analizė atliekama būtent šiam scenarijui.

3.2.2. BEKS aktyviosios galios įtaka dažnio stabilumui

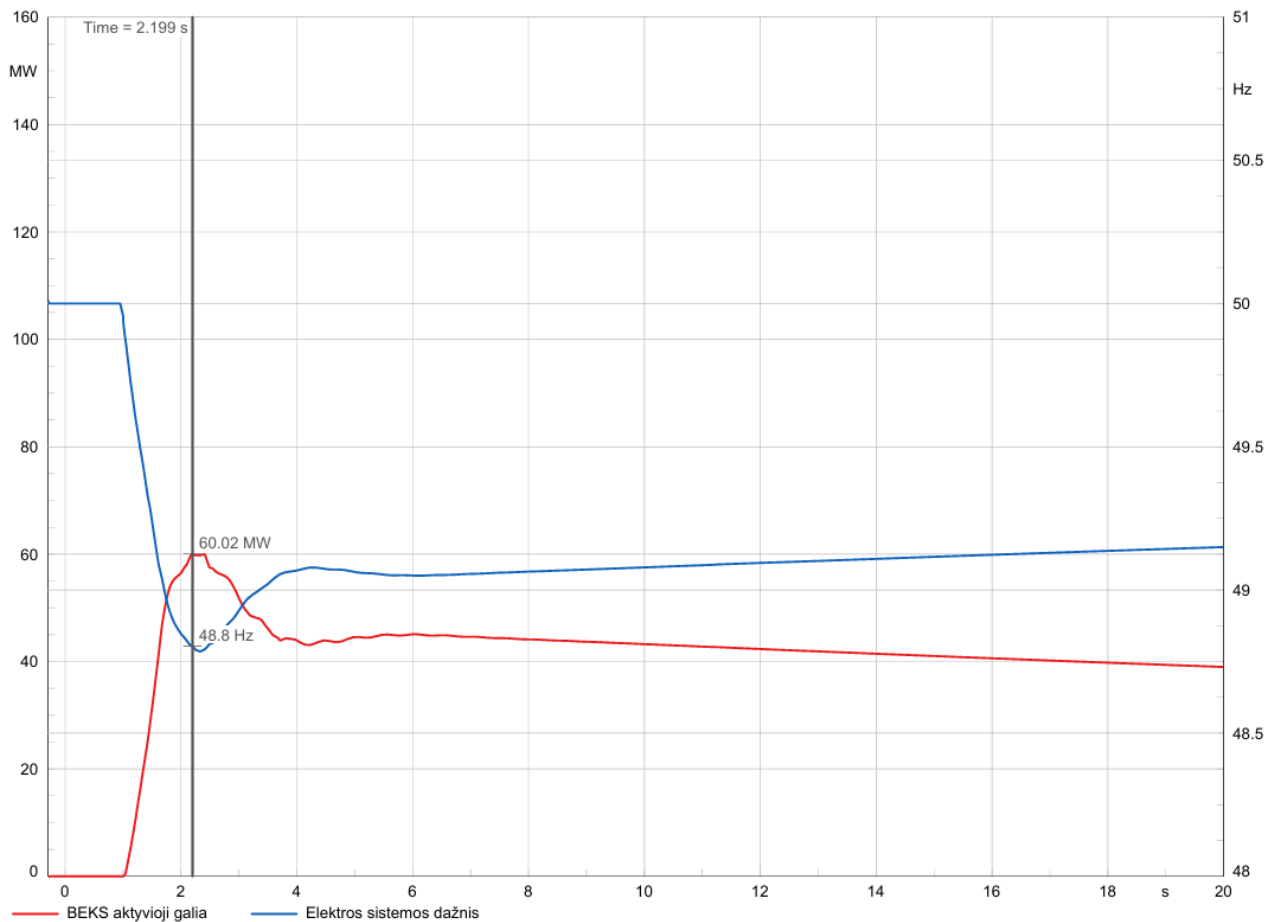
Nustatius, kad kritinis dinaminis trikdys yra G3 generatoriaus atjungimas, toliau analizuojama baterijų energijos kaupimo sistemos aktyviosios galios įtaka dažnio stabilumui. Tyrimo metu modeliuojamas G3 generatoriaus atjungimas 1 s laiko momentu, o BEKS aktyvioji galia keičiama nuo 10 MW iki 150 MW. Visais atvejais taikoma ta pati statizmo (angl. *droop*) reikšmė – 2 % ir nejautrumo zona (angl. *deadband*) – 0,2 Hz. Gauti rezultatai pateikti 41 paveiksle.



41 pav. Sistemos dažnio kitimas atjungus G3 generatorių esant skirtingai BEKS aktyviajai galiai

Iš 41 paveikslo matyti, kad didinant BEKS aktyviają galią sistemos dažnio kritimas po G3 generatoriaus atjungimo palaipsniui mažėja. Be BEKS dažnis sumažėjo iki 48,199 Hz. Integravus BEKS, dažnio minimali vertė didėja, nes baterijų sistema greitai tiekia aktyviają galią į tinklą ir iš dalies kompensuoja prarastą generacijos šaltinį. Esant mažesnei BEKS galiai, pavyzdžiui 10–40 MW, dažnio kritimas vis dar išlieka didelis, tačiau jau pastebimas dažnio atsako pagerėjimas. Didinant BEKS galią iki 60 MW, dažnio minimali vertė padidėja iki 48,78 Hz. Toliau didinant BEKS galią iki 100 MW, dažnio minimali vertė pasiekia 49,00 Hz.

Dar didesnė BEKS galia lemia papildomą dažnio stabilumo pagerėjimą, tačiau poveikis tampa mažiau ryškus. Esant 150 MW BEKS galiai, dažnio minimali vertė padidėja iki 49,15 Hz. Tai rodo, kad BEKS aktyviosios galios rezervas turi tiesioginę įtaką dažnio minimumui, tačiau didinant galią poveikis palaipsniui mažėja. Taip yra dėl to, kadangi yra naudojamas 2% statizmo valdymo parametras. Taikant 2 % statizmo valdymo parametą, BEKS maksimali aktyvioji galia pasiekiamą tada, kai dažnis sumažėja iki 48,8 Hz. Jeigu dažnis nenukrenta iki šios reikšmės, BEKS netiekia visos vardinės galios, o jos aktyviosios galios atsakas yra proporcingas faktiniam dažnio nuokrypiui.



42 pav. 60 MW BEKS aktyviosios galios atsakas į dažnio pokytį atjungus G3 generatorių

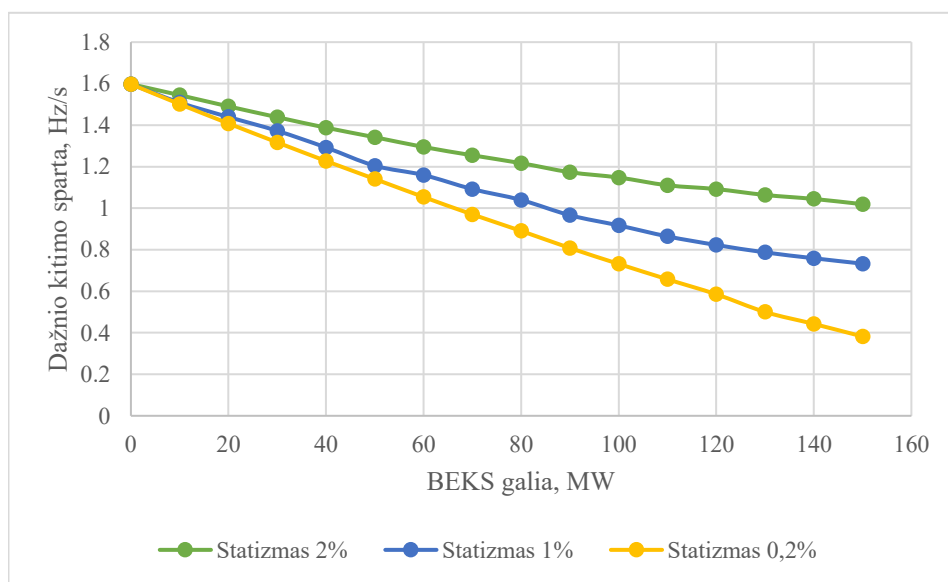
Pateiktame grafike matyti, kad dažniui sumažėjus žemiau 48,8 Hz BEKS tiekia visa maksimalią 60 MW galia, tačiau vėliau dažniui atsistatant BEKS tiekama aktyvioji galia mažėja pagal statizmo charakteristiką.

3.2.3. Statizmo parametro įtaka dažnio stabilumui

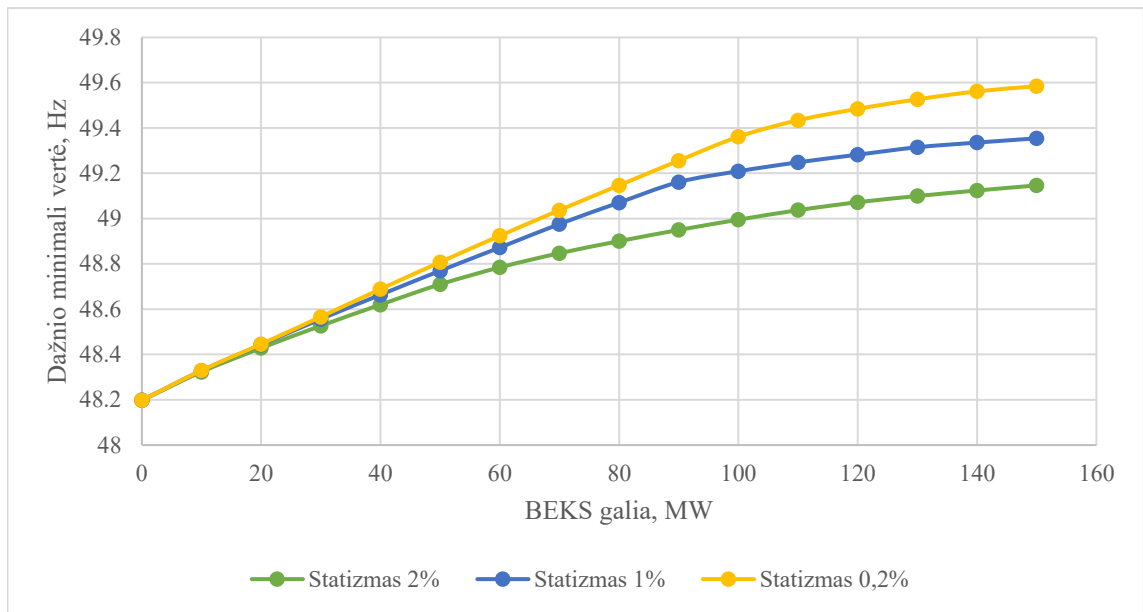
Siekiant įvertinti BEKS valdymo parametru įtaką dažnio stabilumui, toliau analizuojamas statizmo parametro poveikis. Statizmas nusako BEKS aktyviosios galios reguliavimo jautrumą dažnio nuokrypiui. Mažesnė statizmo reikšmė reiškia, kad tam pačiam dažnio pokyčiui BEKS generuoja didesnę aktyviosios galios pokytį, todėl sistemos atsakas tampa greitesnis ir agresyvesnis. Didesnė statizmo reikšmė lemia švelnesnį, tačiau lėtesnį aktyviosios galios atsaką. Atliekant analizę vertintos trys statizmo reikšmės – 2 %, 1 % ir 0,2 %. Poveikis vertinamas pagal du pagrindinius rodiklius: dažnio kitimo greitį ir dažnio minimalią vertę, keičiant BEKS aktyviają galią. Rezultatai pateikiami 7 lentelėje bei 43 ir 44 paveiksluose.

7 lentelė. Dažnio minimalios vertės ir kitimo spartos priklausomybė nuo BEKS galios ir statizmo parametro

BEKS galia, MW	Statizmas 2%		Statizmas 1%		Statizmas 0,2%	
	Dažnio minimali vertė, Hz	Dažnio kitimo sparta, Hz/s	Dažnio minimali vertė, Hz	Dažnio kitimo sparta, Hz/s	Dažnio minimali vertė, Hz	Dažnio kitimo sparta, Hz/s
10	48.32	1.54	48.33	1.51	48.33	1.50
20	48.43	1.49	48.44	1.44	48.45	1.41
30	48.53	1.44	48.56	1.37	48.57	1.32
40	48.62	1.39	48.66	1.29	48.69	1.23
50	48.71	1.34	48.77	1.20	48.81	1.14
60	48.78	1.30	48.87	1.16	48.92	1.05
70	48.85	1.25	48.98	1.09	49.04	0.97
80	48.90	1.22	49.07	1.04	49.15	0.89
90	48.95	1.17	49.16	0.97	49.26	0.81
100	49.00	1.15	49.21	0.92	49.36	0.73
110	49.04	1.11	49.25	0.86	49.43	0.66
120	49.07	1.09	49.28	0.82	49.48	0.59
130	49.10	1.06	49.32	0.79	49.53	0.50
140	49.12	1.04	49.34	0.76	49.56	0.44
150	49.15	1.02	49.35	0.73	49.58	0.38



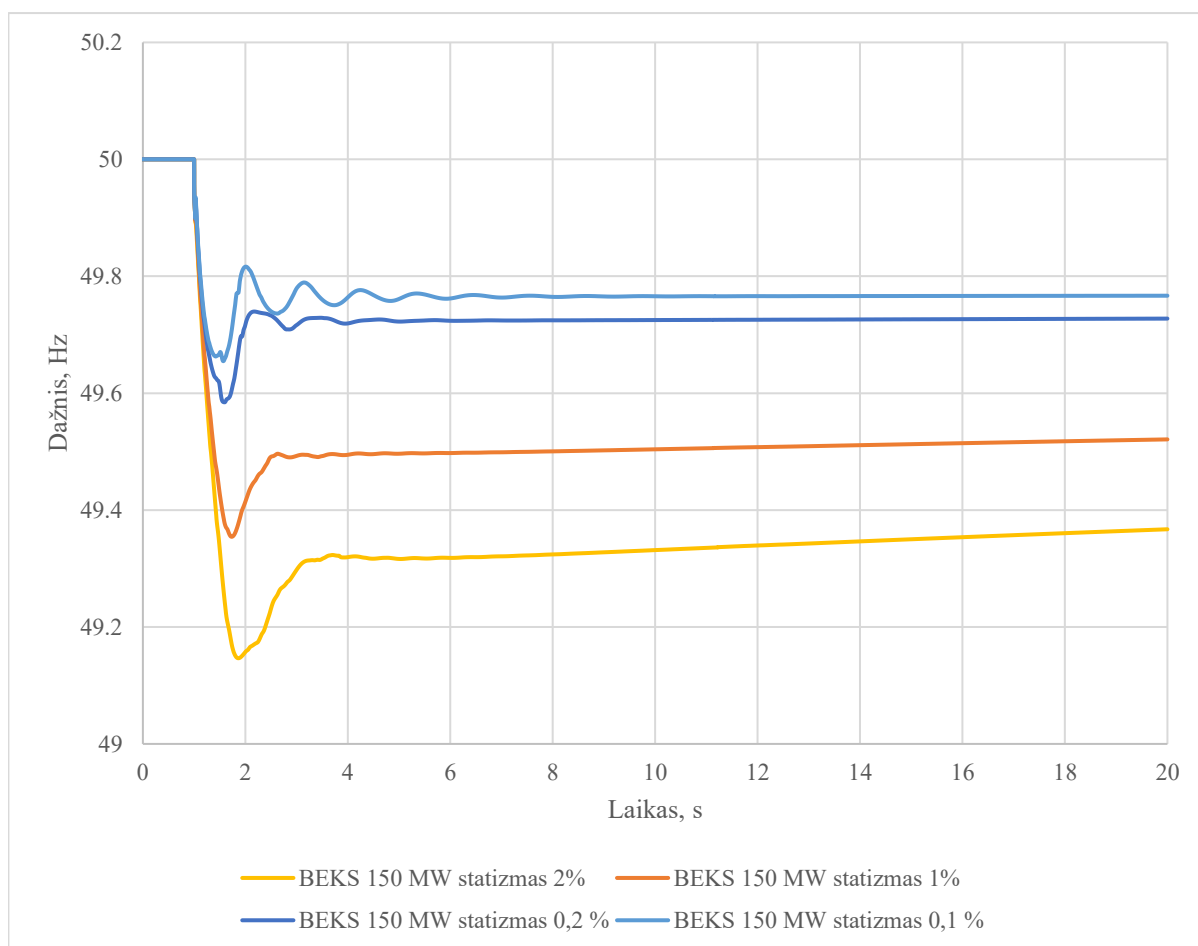
43 pav. Dažnio kitimo greičio priklausomybė nuo BEKS aktyviosios galios naudojant skirtingą statizmo parametą



44 pav. Dažnio minimalios vertės priklausomybė nuo BEKS aktyviosios galios naudojant skirtingą statizmo parametą

Mažesnė statizmo reikšmė lemia geresnį dažnio palaikymą. Pavyzdžiui, kai BEKS galia yra 150 MW, esant 2 % statizmui dažnio minimali vertė siekia 49,15 Hz, esant 1 % statizmui – 49,35 Hz, o esant 0,2 % statizmui – 49,58 Hz. Tuo pačiu metu dažnio kitimo greitis sumažėja atitinkamai nuo 1,02 Hz/s iki 0,73 Hz/s ir 0,38 Hz/s. Mažesnės statizmo reikšmės lemia jautresnį BEKS atsaką į dažnio nuokrypį, todėl aktyvioji galia į tinklą tiekama greičiau ir didesne galia. Dėl šios priežasties dažnio minimumas tampa aukštesnis, o pradinė dažnio kitimo sparta mažesnė. Vis dėlto statizmo mažinimas negali būti vertinamas vien tik teigiamai, nes pernelyg agresyvus valdymas gali sukelti dažnio perreguliuojimą arba svyravimus.

Dėl šios priežasties papildomai analizuojamas dažnio kitimas laiko atžvilgiu, kai BEKS aktyvioji galia yra 150 MW, o statizmo reikšmė keičiama.



45 pav. Sistemos dažnio kitimas atjungus G3 generatorių, kai BEKS galia 150 MW ir keičiama statizmo reikšmė

Pagal gautus rezultatus galima teigti, kad mažinant statizmo reikšmę dažnio minimali vertė didėja ir dažnio stabilumas gerėja tačiau iki tam tikros ribos. Esant 2 % statizmui dažnio kritimas yra didžiausias. Sumažinus statizmą iki 1 % ir 0,2 %, dažnio minimali vertė palapsniui gerėja. Tuo tarpu esant 0,1 % statizmui jau pastebimi slopstantys dažnio svyravimai, rodantys, kad pernelyg mažas statizmo parametras didina BEKS valdymo jautrumą ir gali pabloginti dinaminį sistemos atsaką. Svyravimai atsiranda dėl padidėjusio BEKS aktyviosios galios valdymo jautrumo ir jo sąveikos su sinchroninių generatorių dinamika. Mažas statizmas lemia, kad net nedidelis dažnio nuokrypis sukelia didelį BEKS aktyviosios galios pokytį, todėl bendras sistemos galios balansas tampa svyruojantis.

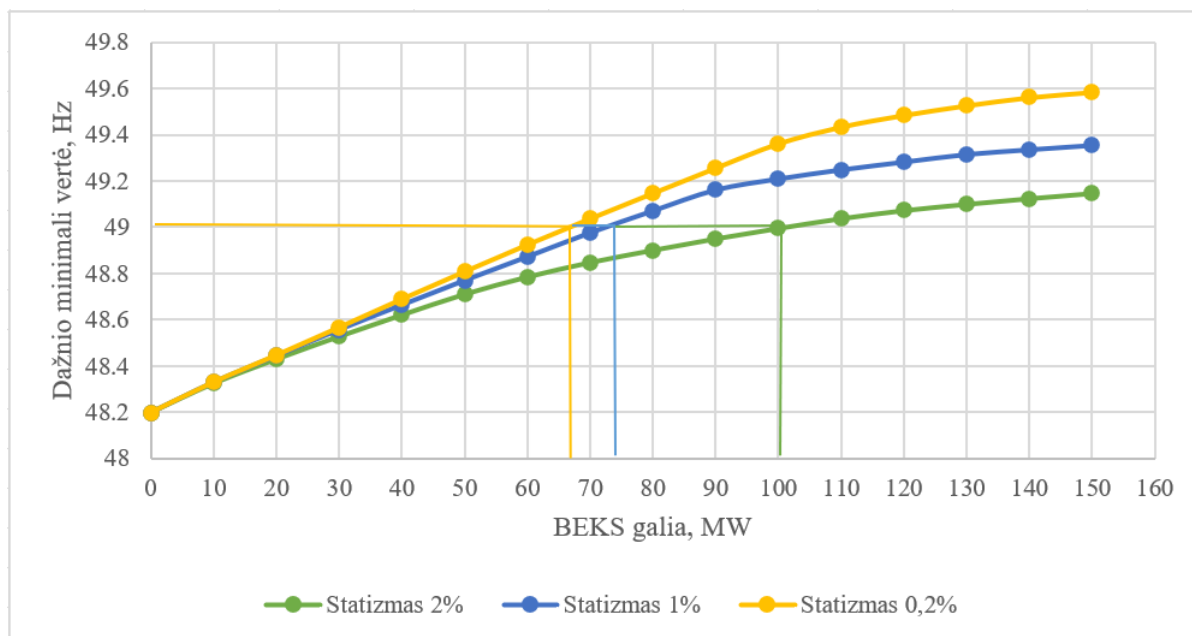
3.3. BEKS įtakos įtampos ir dažnio stabilumui įvertinimas

Atlikus įtampos ir dažnio stabilumo analizę galima įvertinti bendrą BEKS poveikį nagrinėjamai IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemai. Gauti rezultatai parodė, kad BEKS gali pagerinti tiek įtampos, tiek dažnio stabilumo rodiklius, tačiau šiems tikslams reikalingi skirtingi galios valdymo režimai. Įtampos stabilumui svarbiausia yra reaktyviosios galios valdymas, o dažnio stabilumui – aktyviosios galios tiekimas į tinklą.

Įtampos stabilumo analizėje nustatyta, kad silpniausias sistemos mazgas yra 4 mazgas, o kritinis įtampos stabilumo scenarijus – L1 linijos atjungimas. Šiuo atveju 4 mazgo įtampa sumažėjo iki 0,868 s.v. Q–U analizės rezultatai parodė, kad norint atkurti 4 mazgo įtampą iki artimos nominaliai

reikšmės, reikalinga apie 60 Mvar reaktyvioji galia. Įdiegus BEKS 4 mazge ir užtikrinus 60 Mvar reaktyviosios galios tiekimą, 4 mazgo įtampa kritiniu L1 atjungimo režimu padidėjo iki 1,0 s.v. Tai patvirtina, kad BEKS gali efektyviai kompensuoti reaktyviosios galios trūkumą ir pagerinti įtampos profilį silpniausiam sistemos taške.

Dažnio stabilumo analizėje nustatyta, kad kritinis dinaminis trikdys yra G3 generatoriaus atjungimas. Be BEKS šiuo atveju sistemos dažnis sumažėjo iki 48,199 Hz, todėl šis scenarijus buvo pasirinktas BEKS aktyviosios galios poveikiui vertinti. Tyrimo rezultatai parodė, kad didinant BEKS aktyviają galią dažnio minimali vertė didėja, o dažnio kitimo sparta mažėja.



46 pav. BEKS aktyviosios galios parinkimas pagal 49,0 Hz dažnio minimumo kriterijų

Iš 46 paveikslo matyti, kad reikalinga BEKS aktyvioji galia priklauso nuo pasirinktos statizmo reikšmės. Esant 2 % statizmui, 49,0 Hz dažnio minimumo kriterijui pasiekti reikalinga apie 100 MW BEKS aktyvioji galia. Esant 1 % statizmui, tam pačiam kriterijui pasiekti pakanka apie 73 MW, o esant 0,2 % statizmui – apie 67 MW. Tai rodo, kad mažesnė statizmo reikšmė leidžia efektyviau panaudoti BEKS aktyviosios galios rezervą ir sumažinti reikalingą aktyviosios galios dydį. Vis dėlto statizmo parametras turi būti vertinamas ne tik pagal dažnio minamąją vertę, bet ir pagal sistemos dinaminio atsako pobūdį. Ankstesnėje analizėje nustatyta, kad sumažinus statizmą iki 0,1 % sistemos atsake atsiranda ryškesni slopstantys dažnio svyravimai.

Apibendrinant galima teigti, kad BEKS integravimas 4 mazge pagerina abu nagrinėtus stabilumo aspektus. Įtampos stabilumui kritiniu L1 linijos atjungimo režimu reikalinga apie 60 Mvar reaktyvioji galia, o dažnio stabilumui po G3 generatoriaus atjungimo, taikant 0,2 % statizmo parametą, reikalinga apie 67 MW aktyvioji galia, norint, kad dažnis nekristų žemiau 49,0 Hz.

Išvados

1. Sudarius IEEE 9 mazgų elektros energetikos sistemos modelį „DIGSILENT PowerFactory“ aplinkoje nustatyta, kad modelis yra tinkamas įtampos ir dažnio stabilumo analizei. Baziniu darbo režimu sistema veikė stabiliai, o visų mazgų įtampos išliko leistinose ribose.
2. Atlikus N–1 nenumatytų atvejų analizę nustatyta, kad kritinis įtampos stabilumo scenarijus yra L1 linijos atjungimas. Šiuo atveju silpniausiu tinklo mazgu nustatytas 4 mazgas, kurio įtampa sumažėjo iki 0,868 s.v.
3. Atlikus Q–U analizę silpniausiam 4 mazge nustatyta, kad normaliu režimu įtampai palaikyti artimai nominaliai reikšmei reikalinga 24,73 Mvar reaktyvioji galia, o kritiniu L1 linijos atjungimo režimu 59,71 Mvar.
4. Įvertinus įtampos stabilumą su integruota BEKS ir be jos nustatyta, kad BEKS reikšmingai pagerina įtampos profilį silpniausiam mazge. Atjungus L1 liniją, 4 mazgo įtampa be BEKS buvo 0,868 s.v., su 25 Mvar BEKS padidėjo iki 0,935 s.v., o su 60 Mvar BEKS pasiekė 1,0 s.v.
5. Dažnio stabilumo analizė parodė, kad kritinis dinaminis trikdys yra G3 generatoriaus atjungimas, kai be BEKS sistemos dažnis sumažėjo iki 48,199 Hz. Didinant BEKS aktyviają galią iki 150 MW, dažnio minimali vertė padidėjo iki 49,15 Hz, o dažnio kitimo sparta sumažėjo nuo 1,54 Hz/s iki 1,02 Hz/s. Tai rodo, kad BEKS aktyviosios galios rezervas tiesiogiai prisideda prie dažnio stabilumo gerinimo po generacijos praradimo.
6. Statizmo parametro analizė parodė, kad šis parametras turi reikšmingą įtaką BEKS aktyviosios galios panaudojimui dažnio stabilizavimo procese. Pagal 49,0 Hz dažnio minimumo kriterijų nustatyta, kad esant 2 % statizmui reikalinga 100 MW BEKS aktyvioji galia, esant 1 % statizmui – 73 MW, o esant 0,2 % statizmui – 67 MW. Vis dėlto statizmo negalima mažinti neribotai, nes per mažas statizmas didina BEKS valdymo jautrumą ir gali sukelti dažnio svyravimus elektros sistemoje.

Literatūros sąrašas

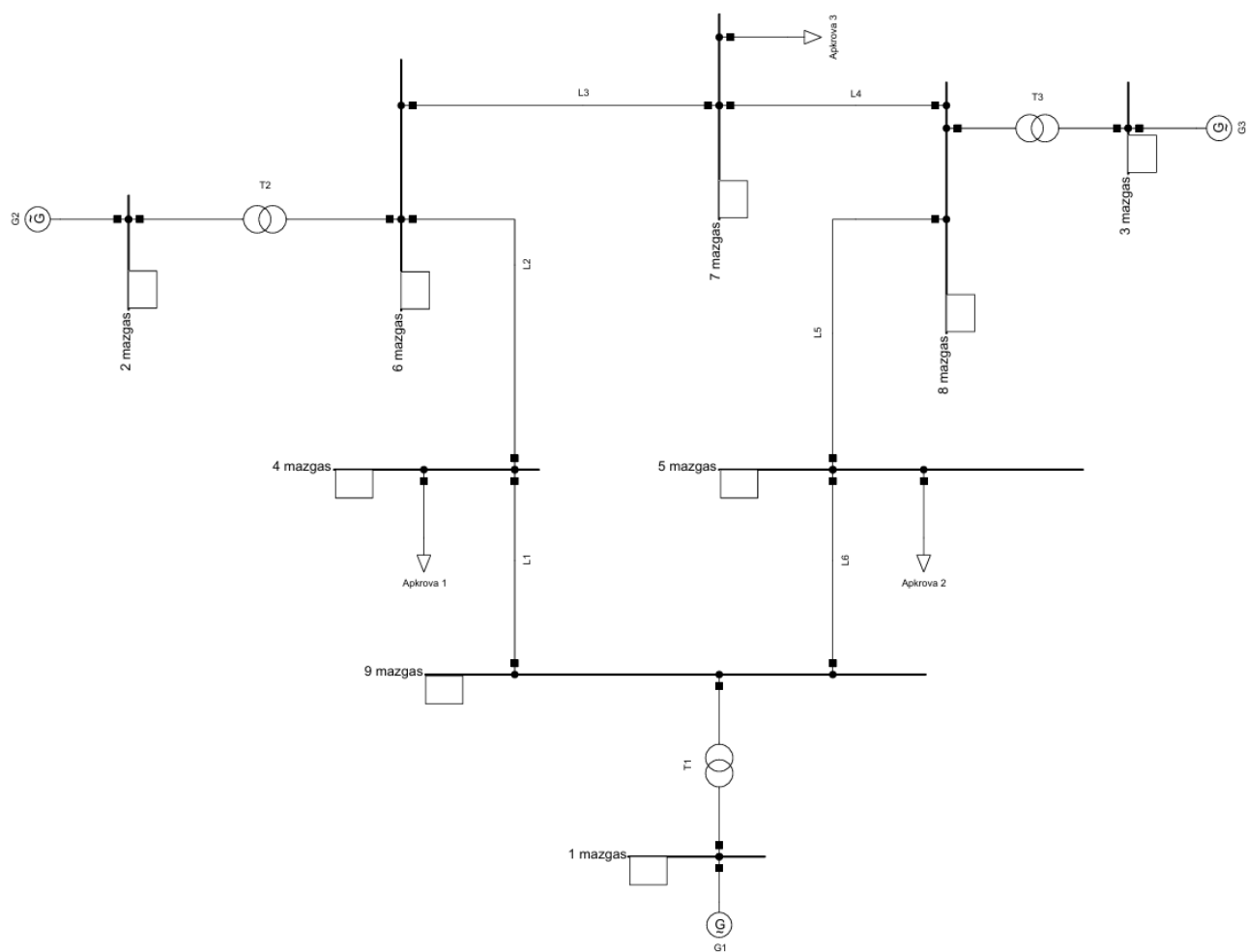
1. GRIGSBY, L. L. ir GRIGSBY, L. L. *Power System Stability and Control*. United States: CRC Press, 2012..
2. KUNDUR, P. S. ir MALIK, O. P. *Power System Stability and Control, Second Edition / Prabha S. Kundur, Om P. Malik*. New York, N.Y: McGraw Hill LLC, 2022..
3. *Handbook of Electrical Power System Dynamics; Modeling, Stability, and Control*. Portland: Ringgold, Inc, 2013.
4. DOLGOV, A. P.; LAKTIONOV, A. I. ir MIKHAILISHIN, L. A. Investigation of Autonomous Power System Stability Improvement Methods. , pp. 1–5.2022-03. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9731489>.
5. HOSSEINZADEH, N.; AZIZ, A.; MAHMUD, A.; GARGOOM, A. ir RABBANI, M. Voltage Stability of Power Systems with Renewable-Energy Inverter-Based Generators: A Review. *Electronics*, t. 10 (2021), nr. 2, p. 115. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/2/115>.
6. NJOKA, G. M.; MOGAKA, L. ir WANGAI, A. Enhancing grid stability and resilience through BESS optimal placement and sizing in VRES-dominated systems. *Energy Reports*, t. 13 (2025), p. 1764–1779. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725000307>.
7. RATNAM, K. S.; PALANISAMY, K. ir YANG, G. Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions - A review. *Renewable & sustainable energy reviews*, t. 124 (2020), p. 109773.
8. NJOKA, G. M.; MOGAKA, L. ir WANGAI, A. Impact of variable renewable energy sources on the power system frequency stability and system inertia. *Energy reports*, t. 12 (2024), p. 4983–4997.
9. ZHOU, X.; LIN, Y. ir MA, Y. The Overview of Energy Storage Technology. , pp. 43–48. IEEE, 2015..
10. ZHAO, C.; ANDERSEN, P. B.; TRÆHOLT, C. ir HASHEMI, S. Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 182 (2023), p. 113400. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123002575>.
11. ŠIMIĆ, Z.; TOPIĆ, D.; KNEŽEVIĆ, G. ir PELIN, D. Battery energy storage technologies overview. *International journal of electrical and computer engineering systems*, t. 12 (2021), nr. 1, p. 53–65. Prieiga per internetą: <https://hrcak.srce.hr/257521>.
12. DIVYA, K. C. ir ØSTERGAARD, J. Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, t. 79 (2009), nr. 4, p. 511–520.
13. ANDRIUŠIS, A.; ANDRIUŠIENĖ, L.; JONAITIS, A.; MILIŪNĖ, R.; Kauno technologijos universitetas autorius. ir kt. *Pastatų elektros sistemos: teorija praktika : mokomoji praktinė knyga / Algimantas Andriušis, Liudmila Andriušienė, Audrius Jonaitis, Renata Miliūnė*. Vilnius: UAB „SN Media group“, 2025..
14. KESHAN, H.; THORNBURG, J. ir USTUN, T. S. Comparison of Lead-Acid and Lithium Ion Batteries for Stationary Storage in Off-Grid Energy Systems. Stevenage: The Institution of Engineering & Technology, 2016..

15. GREVYS, S.; Kauno technologijos universitetas. ir VALEIKA, V. *Cheminiai elektros srovės šaltiniai : mokomoji knyga / Stanislovas Grevyas, Virginijus Valeika ; Kauno technologijos universitetas*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008..
16. DENG, D. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy science & engineering*, t. 3 (2015), nr. 5, p. 385–418.
17. FAN, X.; LIU, B.; LIU, J.; DING, J.; HAN, X. ir kt. Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. *Transactions of Tianjin University*, t. 26 (2020), nr. 2, p. 92–103.
18. KASIM, R.; ABDULLAH, A.; SELAMAT, N.; BASIR, M. ir RAMLI, M. Z. Nickel-Cadmium Battery Analysis using Spectrogram. March 1, 2016. Prieiga per internetą: <https://www.semanticscholar.org/paper/Nickel-Cadmium-Battery-Analysis-Using-Spectrogram-Kasim-Abdullah/67509d2df76d52a1c8e85d597855219a87dc11e8>.
19. TARABAY, J. ir KARAMI, N. Nickel Metal Hydride Battery: Structure, Chemical Reaction, and Circuit Model. , pp. 22–26. IEEE, 2015..
20. CHALLAPURAM, Y. R.; QUINTERO, G. M.; BAYNE, S. B.; SUBBURAJ, A. S. ir HARRAL, M. A. Electrical Equivalent Model of Vanadium Redox Flow Battery. , pp. 1–4. IEEE, 2019..
21. LIU, M.; CAO, X.; CAO, C.; WANG, P.; WANG, C. ir kt. A Review of Power Conversion Systems and Design Schemes of High-Capacity Battery Energy Storage Systems. *IEEE access*, t. 10 (2022), p. 52030–52042.
22. NJOKA, G. M.; MOGAKA, L. ir WANGAI, A. Enhancing grid stability and resilience through BESS optimal placement and sizing in VRES-dominated systems. *Energy reports*, t. 13 (2025), p. 1764–1779.
23. JANNESAR, M. R.; SADR, S. ir SAVAGHEBI, M. Optimal sitting, sizing and control of battery energy storage to enhance dynamic stability of low-inertia grids. *IET renewable power generation*, t. 18 (2024), nr. 15, p. 2925–2941.
24. *Patvirtinti Elektros Energijos Kaupimo Įrenginių Valdymo Reikalavimai*. Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/elektros-rinka/viesosios-konsultacijos-/buvusios-konsultacijos/viesoji-konsultacija-del-elektros-energijos-kaupimo-irenginiu-prijungimo-prieperdavimo-tinklo-valdymo-reikalavimu/32304>.
25. RAKIB, M. W.; MUNNA, A. H.; FAROOQ, T.; BOKER, A. ir HE, M. Enhancing Grid Stability and Sustainability: Energy-Storage-Based Hybrid Systems for Seamless Renewable Integration. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, t. 8 (2024), nr. 3, p. 1–8. Prieiga per internetą: <https://www.ejece.org/index.php/ejece/article/view/618>.
26. AHMADIAHANGAR, R.; PLAUM, F.; HARING, T.; DROVTAR, I.; KOROTKO, T. ir kt. Impacts of grid-scale battery systems on power system operation, case of Baltic region. *IET Smart Grid*, t. 7 (2024), nr. 2, p. 101–119. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1049/stg2.12142>.
27. BROGAN, P. V.; BEST, R. J.; MORROW, D. J.; MCKINLEY, K. ir KUBIK, M. L. Effect of BESS Response on Frequency and RoCoF During Underfrequency Transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 34 (2019), nr. 1, p. 575–583.
28. HUANG, J. ir YANG, D. Improved System Frequency Regulation Capability of a Battery Energy Storage System. *Frontiers in Energy Research*, t. 10 (2022). Prieiga per internetą: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2022.904430/full>.
29. . PowerFactory - DIgSILENT. Prieiga per internetą: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>.

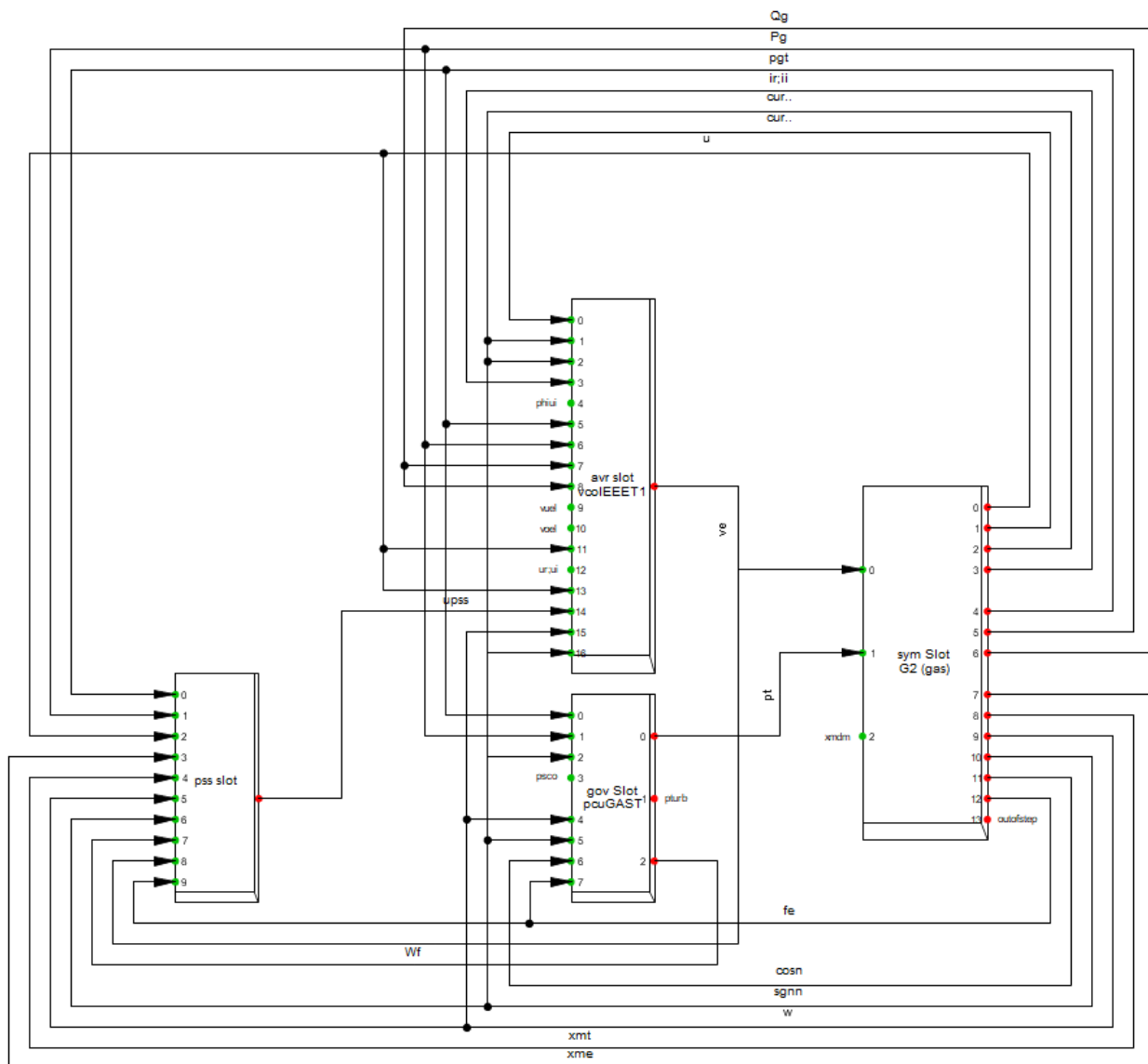
30. *IEEE Recommended Practice for Conducting Load-Flow Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems*. IEEE, 2018. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8529292>.
31. NNONYELU, C. ir MADUEME, T. Power System Contingency Analysis: A Study of Nigeria's 330KV Transmission Grid. July 22, 2013. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/255729015_Power_System_Contingency_Analysis_A_Study_of_Nigeria's_330KV_Transmission_Grid.
32. BULAT, H.; FRANKOVIĆ, D. ir VLAHINIĆ, S. Enhanced Contingency Analysis—A Power System Operator Tool. *Energies (Basel)*, t. 14 (2021), nr. 4, p. 923.
33. . Contingency Analysis - DIgSILENT. Prieiga per internetą: <https://www.digsilent.de/en/contingency-analysis.html>.
34. ZHAO, D.; ZHU, L.; JIANG, D.; QIAN, M.; ZHAO, L. ir kt. Modeling Comparison on Control System of Synchronous Generator between DIgSILENT Power Factory and PSASP. *International Journal of Computer and Electrical Engineering* (2013), p. 229–232. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/273710707_Modeling_Comparison_on_Control_System_of_Synchronous_Generator_between_DiG_SILENT_Power_Factory_and_PSASP.
35. NGUYEN, H. C.; TRAN, Q. T. ir BESANGER, Y. Effectiveness of BESS in Improving Frequency Stability of an Island Grid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, t. 60 (2024), nr. 6, p. 8203–8212. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10636315>.
36. DAS, C. K.; MAHMOUD, T. S.; BASS, O.; MUYEEN, S. M.; KOTHAPALLI, G. ir kt. Optimal sizing of a utility-scale energy storage system in transmission networks to improve frequency response. *Journal of energy storage*, t. 29 (2020), p. 101315. Prieiga per internetą: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S2352152X19315646>

Priedai

1 priedas. Sukurtas elektros energetikos sistemos modelis „DIGSILENT PowerFactory“ programine įranga



2 priedas. Modeliuojama sinchroninio generatoriaus valdymo schema „DIGSILENT PowerFactory“ platformoje



3 priedas. Modeliuojama BEKS valdymo schema „DigSILENT PowerFactory“ platformoje

