



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Gražvydas Kruopys

BALTIJOS ŠALIŲ IZOLIUOTOS ELEKTROS ENERGETIKOS
SISTEMOS STABILUMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro darbas

Vadovas
doc. dr. Audrius Jonaitis

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

Baltijos šalių izoliuotos elektros energetikos sistemos stabilumo tyrimas

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemos 621H63005

Vadovas

(parašas) doc. dr. Audrius Jonaitis

(data)

Recenzentas

(parašas) doc. dr. Mindaugas Ažubalis

(data)

Projektą atliko

(parašas) Gražvydas Kruopys

(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Gražvydas Kruopys

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Baltijos šalių izoliuotos elektros energetikos sistemos stabilumo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 23 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Gražvydo Kruopio, baigiamasis projektas tema „Baltijos šalių izoliuotos elektros energetikos sistemos stabilumo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Kruopys G., Baltijos šalių izoliuotos elektros energetikos sistemos stabilumo tyrimas. Energetikos kryptis, *Elektros energetikos sistemos* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.
Kaunas, 2016 - 66 psl.

SANTRAUKA

Šiame darbe tiriama Baltijos šalių elektros energetikos sistemos galimybė dirbti izoliuotai bei užtikrinti patikimą ir stabilų elektros energetikos sistemos veikimą. Įvertinus numatomus elektros perdavimo sistemos tinklo pakeitimus, sudaryti 2017 metų minimalių bei 2018 metų maksimalių apkrovų skaičiuojamieji režimai. Šiems režimams sumodeliuoti didžiausi trikdžiai, galintys pažeisti sistemos stabilumą. Atlikus galios srautų pasiskirstymo skaičiavimus, buvo tiriamas sistemos statinis stabilumas, įvertinant galimus sistemos elementų N-1 atsijungimus. Atlikta pereinamųjų procesų analizė ir ištirtas sistemos dinaminis dažnio stabilumas. Tiriant dinaminį dažnio stabilumą buvo nustatyta ribinė didžiausio sistemos generatoriaus generuojama galia, maksimali elektros importo bei eksporto galimybė, skirtingomis sistemos veikimo sąlygomis. Ištirtas pagrindinių Baltijos šalių generatorių stabilumas dinaminio stabilumo atžvilgiu bei nustatytos ribinės trumpojo jungimo atjungimo trukmės.

Reikšminiai žodžiai: izoliuota elektros sistema, galios srautų pasiskirstymas, dinaminis stabilumas.

Kruopys G., Stability Analysis of the Baltic States Isolated Power System. Final project of Electric power system / supervisor PhD. Audrius Jonaitis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power.
Kaunas, 2016 - 66 psl.

Summary

This paper investigates Baltic power system ability to operate in island mode plus ensure reliable and stable system performance. The regimes for year 2017 low load mode and for year 2018 high load mode were modeled by taking into account transmission system plans. The largest disturbances endangered of system instability were modeled for these regimes. Following by power flow calculations, power system static stability were investigated based on N-1 disturbances. Transient processes analysis and frequency dynamic stability studies were made. Based on different system conditions, boundary limit of generation and import/export were estimated under frequency dynamic stability analysis. The transient stability of major Baltic States generators and critical fault clearing time is investigated.

Key words: isolated power system, power flow, dynamic stability.

TURINYS

Santrumpų ir ženklų aiškinimo žodynas.....	7
Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Elektros energetikos sistemos stabilumas	12
1.1. Pagrindinės sąvokos.....	12
1.2. Elektros energetikos sistemos stabilumo klasifikacija.....	13
1.2.1. Rotoriaus kampo stabilumas.....	14
1.2.2. Įtampos stabilumas.....	15
1.2.3. Dažnio stabilumas	17
1.2.4. Dažnio stabilumo užtikrinimo priemonės.....	17
1.3. Statinio stabilumo tyrimo metodai.....	18
1.4. Dinaminio stabilumo tyrimo metodai	19
1.5. Baltijos šalių EES stabilumo tyrimų apžvalga	20
1.6. Elektros perdavimo sistemos modelis.....	21
2. Baltijos šalių EES izoliuoto darbo stabilumo tyrimas	24
2.1. Baltijos šalių elektros perdavimo tinklo skaičiuojamosios schemos sudarymas ..	24
2.2. Baltijos šalių elektros sistemos balansų sudarymas.....	27
2.3. Nustovėjusių režimų statinio stabilumo tyrimas.....	30
2.4. Pereinamųjų procesų dinaminio stabilumo tyrimas.....	34
2.4.1. Dažnio stabilumo tyrimas	35
2.4.1.1. Lietuvos elektrinės generuojamos galios netekimo tyrimas.....	36
2.4.1.2. NordBalt ir LitPol Link perduodamos galios netekimo tyrimas.....	41
2.4.2. Baltijos šalių EES generatorių stabilumo tyrimas.....	50
2.4.2.1. Lietuvos elektrinės stabilumo tyrimas	50
2.4.2.2. Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės stabilumo tyrimas	58
2.4.2.3. Kitų Baltijos šalių EES generatorių stabilumo tyrimas.....	63
Išvados	64
Literatūros sąrašas	65
PRIEDAI.....	67
Priedas 1. Lietuvos ir Kaliningrado generatorių PSS/E dinaminiai duomenys.....	67
Priedas 2. Latvijos generatorių PSS/E dinaminiai duomenys	68
Priedas 3. Estijos generatorių PSS/E dinaminiai duomenys	69

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

EES – elektros energetikos sistema;

BEES – Baltijos šalių elektros energetikos sistema;

KET – kontinentinės Europos tinklai;

IPS/UPS – „integruota elektros sistema / jungtinė elektros sistema“, nepriklausomos sandraugos valstybių, kurios dalis buvo Sovietų sąjunga, sinchroninė elektros perdavimo sistema.

PSO – perdavimo sistemos operatorius;

PSS/E – Siemens PTI „Power System Simulator for Engineering“, kompiuterinė programa skirta modeliuoti, analizuoti bei optimizuoti elektros energetikos sistemos veikimą;

HE – hidroelektrinė;

HVDC – aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklis;

VSC – įtampos šaltinio keitiklis;

CSC – srovės šaltinio keitiklis;

HAE – hidroakumuliacinė elektrinė;

LE – Lietuvos elektrinė;

V_{min} – vasaros minimalių apkrovų režimas;

V_{max} – vasaros maksimalių apkrovų režimas;

Ž_{max} – žiemos maksimalių apkrovų režimas.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav.	Elektros energetikos sistemos stabilumo klasifikacija	14
2.1 pav.	Baltijos šalių izoliuotos elektros sistemos perdavimo tinklo schema 2018 m. perspektyvoje	25
2.2 pav.	Lietuvos elektros energijos poreikio didžiausios galios prognozė.....	27
2.3 pav.	2015 metų liepos mėnesio antros savaitės valandinis Baltijos šalių faktinio poreikio grafikas ...	28
2.4 pav.	2016 metų sausio mėnesio antros savaitės valandinis Baltijos šalių faktinio poreikio grafikas...	29
2.5 pav.	Sumodeliuotas ribinių režimų pradinis galios srautų pasiskirstymas izoliuotoje BEES	30
2.6 pav.	Įtampos pažemėjimas Vilniaus regiono mazguose atsijungus 330 kV linijai LN332.....	31
2.7 pav.	Neries AT perkrova atsijungus 330 kV linijai LN332	32
2.8 pav.	Vilniaus AT perkrova atsijungus vienam iš autotransformatorių	33
2.9 pav.	Klaipėda – Pagėgiai tranzito perkrova atsijungus LN530	33
2.10 pav.	Įtampų lygiai Utenos regione atsijungus Utenos AT maksimaliame žiemos režime	34
2.11 pav.	Dažnio pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 240 MW, Vmin režime	36
2.12 pav.	Dažnio pokytis LE 330kV pastotėje atsijungus LE G9 blokui - 240 MW bei 250 MW, Vmin .	37
2.13 pav.	Įtampos pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 240 MW, Vmin režime	38
2.14 pav.	BEES generatorių mechaninės galios atsijungus LE G9 blokui - 240 MW, Vmin režime	38
2.15 pav.	Dažnio pokytis LE 330kV pastotėje atsijungus LE G9 blokui – 330 - 350 MW, Vmax	39
2.16 pav.	Dažnio pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 450 MW, Žmax režime	40
2.17 pav.	Įtampos pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 450 MW, Žmax režime	40
2.18 pav.	BEES generatorių mechaninės galios atsijungus LE G9 blokui - 450 MW, Žmax režime.....	41
2.19 pav.	Dažnio pokytis Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt: 260 – 280 MW, Vmin.....	42
2.20 pav.	Įtampos pokytis BEES mazguose atsijungus NordBalt 270 MW, Vmin režime.....	43
2.21 pav.	BEES generatorių mechaninės galios pokytis atsijungus NordBalt 270 MW, Vmin režime.....	43
2.22 pav.	Dažnio pokytis Alytaus 330kV pastotėje atsijungus LitPol Link 140, 150 ir 270 MW, Vmin ..	44
2.23 pav.	Įtampos kitimas Alytaus 330kV pastotėje atsijungus LitPol Link 140, 150 ir 270 MW, Vmin .	45
2.24 pav.	BEES generatorių mechaninės galios pokytis atsijungus LitPol Link 140 MW, Vmin.....	45
2.25 pav.	Dažnio pokytis Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt: 320 -340 MW, Vmax	46
2.26 pav.	Dažnio pokytis BEES mazguose, atsijungus LitPol Link 330 MW, Vmax režime	47
2.27 pav.	Dažnio pokytis Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt: 440 -450 MW, Žmax	48
2.28 pav.	Įtampos pokytis BEES 330kV mazguose atsijungus NordBalt 450 MW, Žmax režime	48
2.29 pav.	BEES generatorių mechaninės galios pokytis atsijungus NordBalt 450 MW, Žmax režime.....	49
2.30 pav.	Dažnio pokytis BEES mazguose, atsijungus LitPol Link 450 MW, Žmax režime	49
2.31 pav.	Lietuvos elektrinės 330 kV pastotės schema su modeliuojamu trumpuoju jungimu	51
2.32 pav.	BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 205 ms, Vmin	52
2.33 pav.	BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 205 ms, Vmin.....	52

2.34 pav.	BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 205 ms, V_{min}	53
2.35 pav.	BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 210 ms, V_{min}	54
2.36 pav.	BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 210 ms, V_{min}	54
2.37 pav.	BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 210 ms, V_{min}	55
2.38 pav.	BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 215 ms, \check{Z}_{max}	56
2.39 pav.	BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 220 ms, \check{Z}_{max}	56
2.40 pav.	BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 220 ms, \check{Z}_{max}	57
2.41 pav.	BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 220 ms, \check{Z}_{max}	57
2.42 pav.	Kruonio HAE 330 kV pastotės schema su modeliuojamu trumpuoju jungimu	59
2.43 pav.	BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 195 ms, V_{min}	59
2.44 pav.	BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 195 ms, V_{min}	60
2.45 pav.	BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 195 ms, V_{min}	60
2.46 pav.	BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 200 ms, V_{min}	61
2.47 pav.	BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 200 ms, V_{min}	61
2.48 pav.	BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 200 ms, V_{min}	62

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Baltijos EES elektrinių įrengtoji galia 2018 m., MW	26
2.2 lentelė. Poreikis Baltijos šalyse vasaros minimaliame ir maksimaliame režimuose 2015 - 2017 m....	28
2.3 lentelė. Poreikis Baltijos šalyse žiemos maksimaliame režime 2016 - 2018 m.	29
2.4 lentelė. Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių dinaminiai modeliai	35
2.5 lentelė. Dažnio stabilumo tyrimo rezultatai, LE G9 atsijungimo atveju.....	41
2.6 lentelė. Dažnio stabilumo tyrimo rezultatai įvertinus elektros importo bei eksporto galimybes	50
2.7 lentelė. Prie Lietuvos elektrinės prijungtos labiausiai apkrautos linijos pradinuose režimuose	51
2.8 lentelė. Lietuvos elektrinės trumpojo jungimo atjungimo ribinių laikų apibendrinti rezultatai.....	58
2.9 lentelė. Prie Kruonio HAE prijungtos labiausiai apkrautos linijos pradinuose režimuose	58
2.10 lentelė. Kruonio HAE trumpojo jungimo atjungimo ribinių laikų apibendrinti rezultatai	62
2.11 lentelė. Estijos ir Latvijos elektrinių trumpojo jungimo atjungimo ribinių laikų rezultatai	63

IVADAS

Elektros energetikos sistema – tai visuma tarpusavyje suderintu režimu veikiančių elektros įrenginių, skirtų elektros energijai gaminti, perduoti ir skirstyti. Elektros energetikos sritis yra viena svarbiausių ūkio šakų, todėl elektros energijos tiekimas turi būti patikimas ir nepertraukiamas. Būtina elektros energetikos sistemos patikimumo ir gyvybingumo sąlyga yra stabilus sistemos veikimas. Kad elektros sistema veiktų stabiliai, turi būti nuolatos palaikomas balansas tarp vartojamos ir generuojamos galios. Sisteminių avarių pasekmė gali būti statinio bei dinaminio stabilumo sąlygų pažeidimo priežastis. Įvykus trikdžiui bet kuriame sistemos mazge, visa elektros sistema turi išlikti stabili. Tai reiškia, kad negali būti atjungiamos apkrovos ar generatoriai, įvykus trikdžiui, normaliaame sistemos darbo režime.

Baltijos elektros energetikos sistema veikia sinchroniškai su IPS/UPS sistema, tačiau 2025 metais siekia sinchroniškai prisijungti prie Kontinentinės Europos tinkų. Nuo 2016 metų pradėtos eksploatuoti aukštos įtampos nuolatinės srovės jungtys su Švedija ir Lenkija. Tai vienas iš etapų prieš prisijungiant prie KET. Pradėjus veikti šioms jungtis, sistemoje persiskirsto galios srautai bei atsiranda didelės galios netekimo galimybė, kurios atveju turi būti užtikrinti pakankami reguliavimo galios rezervai. Didelėse jungtinėse elektros energetikos sistemose, bendras sistemos dažnis valdomas centralizuotai, o atskiri valdymo regionai palaiko esamus sistemos parametrus pagal iš anksto nustatytą generuojamą galią. Tačiau atskiros EES neturi apsunkinti pagrindinės EES dažnio reguliavimo, pabloginti statinio ir dinaminio stabilumo sąlygų, todėl viena iš Baltijos šalių EES prisijungimo prie KET sąlygų yra izoliuotos EES stabilus veikimas. Baltijos šalys 2017 metais ruošiasi atlikti BEES atsijungimo nuo IPS/UPS sistemos ir savarankiško sistemos darbo bandymą, todėl tikslinga iširti Baltijos šalių izoliuotos elektros energetikos sistemos statinį bei dinaminį stabilumą įvertinus numatomą tinklo schemas, apkrovų bei generuojamos galios pasikeitimą.

Darbo tikslas: Iširti Baltijos EES galimybę dirbti izoliuotai bei užtikrinti patikimą ir stabilų elektros energetikos sistemos veikimą.

Darbo uždaviniai:

1. Nustatyti pagrindines EES stabilumo pažeidimo priežastis;
2. Sudaryti izoliuotos Baltijos šalių EES statinį bei dinaminį modelį 2017 metų vasaros minimaliam ir maksimaliam bei 2018 metų žiemos maksimaliam režimams;
3. Iširti izoliuotos Baltijos šalių EES nusistovėjusių režimų statinį stabilumą;
4. Atlikti izoliuotos Baltijos šalių EES pereinamųjų procesų dažnio dinaminio stabilumo tyrimą;
5. Patikrinti Baltijos šalių EES generatorių dinaminį stabilumą sistemai veikiant izoliuotai.

1. ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS STABILUMAS

1.1. Pagrindinės sąvokos

Elektros energetikos sistema yra netiesinė sistema, kuri veikia nuolatos besikeičiant įvairioms sąlygoms. Sistemoje nuolat keičiasi apkrovos, generacija, tinklo topologija ir kiti tinklo parametrai. Sistemos stabilumu vadinamas sistemos gebėjimas atstatyti sinchroninį veikimą po įvykusio trikdžio sistemoje. [1] Elektros sistemoje visi sinchroniškai besisukantys generatoriai palaiko pastovų 50 Hz dažnį. Sistemos veikimą gali sutrikdyti nestabilumo sąlyga, kai vienu generatorių dažnis pradeda didėti arba mažėti kitų generatorių atžvilgiu ir jų sukimosi greitį stabilizuojantis procesas nenusistovi. [2]

Trikdžiai sistemoje skirstomi pagal jų sunkumą į nedidelius ir didelius trikdžius. Nedideliais trikdžiais laikomi šie: apkrovos kitimas, elektros energetikos sistemos elementų perkrova ar jų atsijungimas. Atsiradus nedideliam trikdžiui sistemos stabilumas priklauso nuo trikdžio pobūdžio ir pradinių sistemos veikimo sąlygų. Dideliu trikdžiu sistemoje laikomas trumpas jungimas perdavimo sistemoje, didelės generuojamos galios netekimas, nesinchroniškas generatoriaus įjungimas arba sinchroninio režimo sąlygos netekimas. [1] Pagal trikdžio dydį sistemos stabilumas yra skirstomas į dvi rūšis: statinį bei dinaminį stabilumą. Statinis stabilumas – tai elektros energetikos sistemos gebėjimas grįžti į ankstesnį režimą po nedidelio trikdžio. Dinaminis stabilumas – tai sistemos savybė atstatyti normalų režimą po didelio trikdžio. [2] Trikdžiai, kurie gali pažeisti elektros energetikos sistemos dinaminį stabilumą:

- linijų, pastočių ar generatorių šynų trumpieji jungimai;
- didelės galios apkrovų ir generuojančių šaltinių atsijungimai;
- didelės avarijos ar tinklo elementų perkrova;
- asinchroninė eiga gretimoje elektros energetikos sistemoje.

Trumpasis jungimas, tai įtampą turinčių elektros grandinių fazių susijungimas tarpusavyje arba fazės susijungimas su žeme. Trumpieji jungimai skirstomi į trifazius, dvifazius, vienfazius arba įžemėjimus bei dvifazius su žeme trumpuosius jungimus. Didžiausias triktis elektros sistemoje laikomas trifaziu trumpuoju jungimu. Trumpojo jungimo srovės skaičiuojamos tiriant elektros sistemos režimus įvykus avarijai, parenkant elektros aparatus ar laidininkus, projektuojant apsaugas, įžeminimą, reikiamus iškroviklius bei parenkant schemas.

Trumpųjų jungimų pasekmės priklauso nuo trumpojo jungimo atjungimo laiko ir tinklo vietos, kurioje įvyko avarija. Tinklo įtampai nukritus daugiau nei 30 - 40 % asinchroniniai elektros varikliai pradeda stoti. Stojant varikliams išauga srovė, kuri pamažina įtampą tinkle ir tokie neatjungiami nuo tinklo varikliai gali sukelti kaskadinę avariją. Pereinamieji režimai yra nusakomi įvairių trikdžių sudaromais elektromagnetiniais bei elektromechaniniais pereinamaisiais procesais, vykstant greitam režimo parametrų kitimui ir veikiant automatinėms reguliavimo sistemoms. [2]

Elektros sistemoje atsiradęs trikdys, toks kaip trumpasis jungimas, gali sukelti galios srautų persiskirstymą, įtampos pasikeitimą, generatoriaus rotoriaus kampų pokytį, bei dažnio nuokrypius. Bet kokio trikdžio sąlyga elektros sistemoje reikalauja, kad sistema turi išlikti stabili, veikti po trikdžio nepertraukiamai, nesudarant sąlygos sisteminės griūties atsiradimui. Įtampos reguliavimo įrengimai, generatorių reguliatorių įrenginiai bei generatorių galia yra nustatomi atsižvelgiant į tai, kad atsiradus N-1 atsijungimui sistemos galių balansas, dažnis ir įtampa kistų tik leistinose ribose.

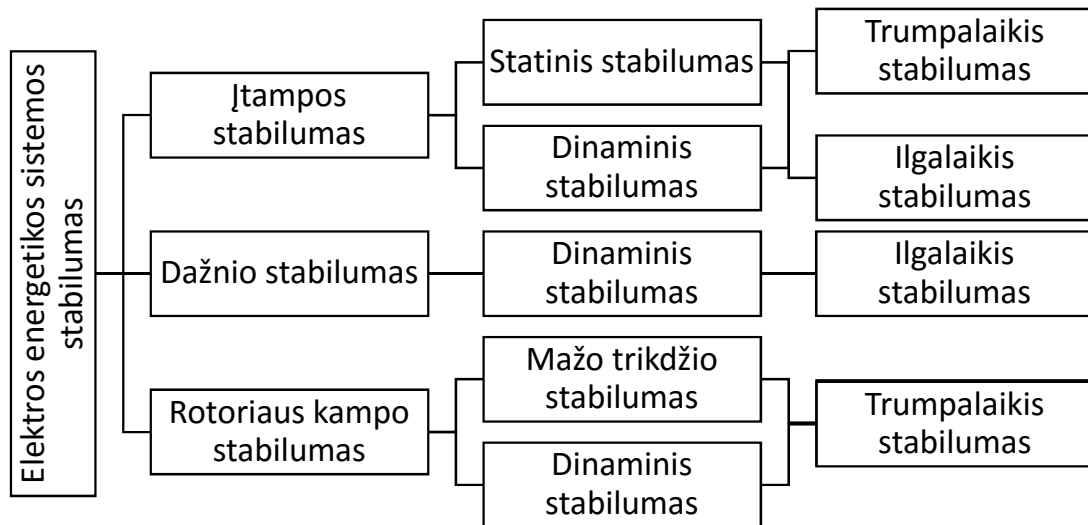
Norint užtikrinti sistemos gyvybingumą yra ribojami tarpsteminiai pralaidumai. Jų nustatymas reikalauja sudėtingos analizės. Elektros sistemos peravimo tinklo topologija ir srautų pasikeitimas įvykus trikdžiui reikalauja skaičiavimų, kuriais būtų galima įvertinti jo įtaką sistemai. Taip pat reikalinga įvertinti ne vien galių srautų persiskirstymą, bet ir jo įtaką įtampų lygiams. Po avarinis režimas nusistovi tik po tam tikro laiko, o iki jo nusistovėjimo stebimas pereinamasis procesas, kuriam vykstant keičiasi generuojama generatorių galia bei įtampa sistemos mazguose. Norint įvertinti po avarinio režimo būklę ir nustatyti ar po įvykusio trikdžio sistema išliks stabili, reikalinga sistemos stabilumo analizė. Atliekant sistemos stabilumo analizę yra atliekami statinio bei dinaminio stabilumo skaičiavimai. [4]

1.2. Elektros energetikos sistemos stabilumo klasifikacija

Elektros energetikos sistemos nestabilumas gali būti įvairių formų, o jį veikia daug skirtingų veiksnių. Stabilumo klasifikavimas yra paremtas stabilumo problemų analize, metodais kurie pagerintų stabilų sistemos darbą bei veiksniais, kurie prisideda prie sistemos nestabilumo atsiradimo. [1] Klasifikavimas yra paremtas šiomis prielaidomis:

- Sistemos nestabilumas gali atsirasti pasikeitus fizinėms tinklo savybėms, kurios susijusios su perdavimo tinklo parametrais. Pagal šią prielaidą stabilumas skirstomas į įtampos stabilumą, dažnio stabilumą bei rotoriaus kampo stabilumą.
- Pagal trikdžio dydį nustatomas tinkamiausias stabilumo skaičiavimo metodas. Tiriant perdavimo sistemos stabilumą įvykus dideliui trikdžiui atliekamas dinaminio stabilumo tyrimas, o nustatant nedidelio trikdžio įtaką atliekamas statinis stabilumas.
- Įvertinant perdavimo sistemos stabilumą turi būti atsižvelgta į pereinamuosius procesus vykstančius po trikdžio atsiradimo bei jų laiko trukmę.

Elektros energetikos sistemos stabilumo klasifikacija į skirtingas kategorijas pateikta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Elektros energetikos sistemos stabilumo klasifikacija

1.2.1. Rotoriaus kampo stabilumas

Rotoriaus kampo stabilumas apibūdina vientisoje elektros sistemoje prijungtų synchroninių generatorių gebėjimą išlikti sinchroniniame režime tiek esant normaliomis veikimo sąlygomis, tiek įvykus trikdžiui sistemoje. Tai priklauso nuo kiekvienos sistemoje esančios sinchroninės mašinos galimybės palaikyti ir atstatyti pusiausvyrą tarp elektromagnetinio ir mechaninio sukimo momento. Sistema gali prarasti stabilumą dėl pagrindinių elektros sistemos generatorių kampo svyravimų padidėjimo. Pagrindinių generatorių sinchroninio veikimo praradimas su kitais generatoriais taip pat gali sąlygoti sistemos nestabilumą. Pagrindinė rotoriaus kampo stabilumo sąlyga yra palaikyti vienodą generatorių sukimosi greitį bei išlaikyti kiekvieno generatoriaus lygybę tarp įeinančio mechaninio sukimo momento ir išeinančio elektrinio sukimo momento. Jei vienas iš generatorių yra greitinamas, jo sukimo momentas padidėja kitų generatorių sukimo momento atžvilgiu. Atsiradus tokiai sąlygai sistemos stabilumas priklauso nuo to ar generatoriai pakankamai greit reaguoja į kampo pokytį ir atstato reikiamą sukimo momentą. [1]

Sinchroninių generatorių elektromagnetinio sukimo momento pokytis po trikdžio gali būti tiriamas dviem aspektais:

- Synchronizuojant sukimo momento komponentę fazėje su rotoriaus kampo pokyčiu.
- Reguluojant sukimo momento komponentę fazėje su greičio nuokrypiu.

Abu šie aspektai sąlygoja rotoriaus kampo stabilumą sistemoje. Nepakankamas sukimo momento sinchronizavimas sąlygoja aperiodinį dinaminį nestabilumą, o nepakankamas sukimo momento reguliavimas gali sąlygoti periodinį dinaminį nestabilumą. Kaip pateikta 1.1 paveiksle problemos susijusios su rotoriaus kampo stabilumu gali būti skirstomos į mažo trikdžio stabilumą ir dinaminį

(pereinamojo proceso) stabilumą. Tiek viena tiek kita kategorija yra priskiriama trumpalaikiam trikdžiui, kurio tyrimo laikotarpis iki 20 sekundžių.

Statinis rotoriaus kampo stabilumas yra susijęs su elektros energetikos sistemos galimybe išlikti sinchroniniame režime įvykus nedideliam trikdžiui. Trikdžiai yra laikomi maži, jei stabilumo analizę yra įmanoma atlikti sprendžiant tiesinę lygčių sistemą. Nedideliu trikdžiu yra laikomas nedidelis apkrovos arba generacijos pokytis, linijų atsijungimas. Statinis stabilumas priklauso nuo sistemos pradinių veikimo sąlygų. Nestabilumas gali pasireikšti dviem būdais: rotoriaus kampo padidėjimas dėl sukimo momento trūkumo arba rotoriaus kampo amplitudės įsisvyravimo dėl nepakankamai slopinamo sukimo momento, kai šis yra per didelis. Laikotarpis kurio metu nustatomas statinis stabilumas trunka nuo 10 iki 20 sekundžių, priklausomai nuo trikdžio dydžio. [1]

Dinaminis rotoriaus kampo stabilumas yra galimybė išlaikyti elektros energetikos sistemą sinchroniniame režime atsiradus dideliam trikdžiui tinkle. Sistemos reakcija į tokį trikdį apima didžiulius generatoriaus rotoriaus kampo nuokrypius, kuriuos lemia netiesinė galios nuo kampo priklausomybė. Dinaminis stabilumas priklauso tiek nuo pradinio režimo sąlygų, tiek nuo trikdžio sunkumo. Įprastai trikdžis taip pakeičia sistemą, kad pradinis nusistovėjęs režimas skiriasi nuo nusistovėjusio režimo po įvykusio trikdžio tinkle. Aperiodinio pereinamojo proceso nestabilumas, vadinamas pirmojo svyravimo nestabilumu, atsiranda dėl nepakankamo sukimo momento. [2] Didelėse elektros energetikos sistemose pereinamojo proceso nestabilumas nebūtinai atsiranda per pirmąjį svyravimą. Laikotarpis kurio metu nustatomas dinaminis stabilumas trunka nuo 3 iki 5 sekundžių, priklausomai nuo trikdžio dydžio. Tačiau, tiriant labai didelę elektros energetikos sistemą pereinamajam procesui nusistovėti gali prireikti iki 10 sekundžių.

Elektros energetikos sistema gali susidurti su daugybe įvairių trikdžių. Tačiau suprojektuoti tokią sistemą, kuri išliktu stabili visais nenumatytais atvejais būtų nepraktiška ir neekonomiška. Todėl nenumatyti atvejai yra pasirenkami pagal jų pasitaikymo tikimybę. [1]

1.2.2. Įtampos stabilumas

Įtampos stabilumas – elektros energetikos sistemos gebėjimas visuose mazguose palaikyti leistinų ribų pastovią įtampą veikiant normaliu režimu arba įvykus trikdžiui tinkle. Įtampos nestabilumą gali sąlygoti laipsniškas įtampos mažėjimas arba didėjimas atskiruose sistemos mazguose. Dėl prarasto įtampos stabilumo gali būti prarastas elektros sistemos vientisumas bei galimi apkrovų atsijungimai ten kur įtampa pasiekia neleistinai žemą lygį. [1]

Staigus įtampos pokytis gali sukelti generatorių rotoriaus kampo nestabilumą. Jei laipsniškai prarandamas generatorių sinchronizmas, kai dviejų generatorių rotorių kampų skirtumas siekia arba viršija 180° , elektriniame centre įtampos pradeda švytuoti tarp aukštų ir žemų verčių. [3] Priešingai nei

ilgalaikis įtampos kritimas, kuris nėra susijęs su rotoriaus kampo stabilumo problema.

Pagrindinė įtampos nestabilumo priežastis yra įtampos kritimas, kuris atsiranda kai aktyviosios ir reaktyviosios galios srautai perdavimo tinkle yra susieti talpumine varža. Toks įtampos kritimas gali apriboti ir linijų pralaidumą perdavimo tinkle. Taip pat, galios persiuntimo galimybių ribojimas gali atsirasti, kai generatorius pasiekia reaktyviosios galios ribas. Įtampos nestabilumą gali sukelti apkrovos, reaguodamos į trikdį. Vartotojams įtampa atstatoma panaudojant skirstomojo tinklo įtampos reguliatorius bei autotransformatorių atšakų perjungiklius. Tokiu būdu atstatyta įtampa skirstomajame tinkle sukelia dar didesnę įtampos kritimą perdavimo tinkle. Kita priežastis dėl kurios gali atsirasti įtampos nestabilumas yra generatoriaus žadinimo problemos, kai generatorius yra peržadinamas arba nesužadinamas. Įtampos nestabilumas gali būti kaskadinės avarijos priežastis. [1]

Kaip ir rotoriaus kampo stabilumas, įtampos stabilumas skirstomas į dvi rūšis pagal trikdžio dydį. Statinis įtampos stabilumas yra sistemos gebėjimas suvaldyti įtampas po mažo trikdžio tinke, tokio kaip apkrovų pasikeitimas. Ši stabilumo forma yra apibrėžiama apkrovų ir valdymo charakteristikomis tam tikru laiko momentu. Ši sąvoka yra naudinga apibrėžiant kaip sistemos įtampa reaguos į nedidelius sistemos pakitimus tam tikru laiko momentu. [2] Pagrindiniai procesai dėl kurių atsiranda statinis įtampos nestabilumas iš esmės yra nusistovėjusio pobūdžio. Dėl to, statinio stabilumo tyrimai gali būti efektyviai panaudoti nustatant stabilumo ribą, aptinkant veiksnius, darančius įtaką stabilumui, ir išbandant daugybę sistemos sąlygų ir netikėtų įvykių scenarijus. Statinio įtampos stabilumo kriterijus yra tenkinamas, jei visose sistemos šynose, šynų įtampa išauga, kai reaktyviosios galios srautas į tas šynas padidėja. Sistemos įtampa tampa nestabili, jei bent vienoje sistemos šynose įtampos dydis krenta, o reaktyviosios galios srautas į tas šynas padidėja. Kitaip tariant, sistemos įtampa stabili, jei V-Q jautrumas yra teigiamas visose sistemos šynose, o nestabili jei V-Q jautrumas yra neigiamas bent vienoje iš sistemos šynų.

Dinaminis įtampos stabilumas – tai sistemos gebėjimas suvaldyti įtampas įvykus dideliame trikdžiui tinkle (trumpam jungimui, generacijos netekimui ar linijų netekimui). Šis sistemos gebėjimas yra apibrėžiamas kaip sistemos apkrovų charakteristika ir valdymo bei apsaugų sąveika. Norint nustatyti dinaminį įtampos stabilumą reikia atlikti netiesinį dinaminį sistemos tyrimą, kurį atliekant būtų galima nustatyti tokių prietaisų kaip transformatoriaus atšakų perjungimo ir generatorių viršsrovių ribotuvų sąveiką. Tokio tyrimo trukmė gali nusitęsti nuo kelių sekundžių iki dešimčių minučių. Dėl to, analizei yra reikalingas ilgalaikis dinaminis modeliavimas. [3]

Įtampos nestabilumas ne visada atsiranda savo grynu pavidalu. Dažniausiai rotoriaus kampo nestabilumas ir įtampos nestabilumas seka vienas paskui kitą. Vienas jų gali sąlygoti kitą, o riba tarp jų gali būti neaiški. Vis dėlto, atskirti rotoriaus kampo stabilumą ir įtampos stabilumą yra svarbu, kad suprastume pagrindines problemų priežastis, siekiant sukurti tinkamus sistemos projektavimo bei valdymo būdus. [1]

1.2.3. Dažnio stabilumas

Dažnio stabilumas – elektros energetikos sistemos savybė išlikti stabiliam režimui ir jį atstatyti atsiradus dideliam trikdžiui tinkle. Nestabilumas gali pasireikšti kaip nenusistovintis ilgalaikis dažnio svyravimas, kuris atsiranda dėl apkrovų ir generuojančių agregatų atsijungimo. Didelėse jungtinėse elektros energetikos sistemose dažnio stabilumo praradimas dažniausiai susijęs su sistemos atsidalinimu į salas. Tokiu atveju dažnio stabilumo pagrindinis uždavinys yra kiekvienai salai pasiekti stabilų veikimą minimaliai netenkant apkrovų (atjungiamų vartotojų). Pagrindinės priežastys galinčios sukelti dažnio stabilumo problemas yra blogas elektrinių reguliavimas, prastas valdymo koordinavimas bei prasti apsaugų įrenginiai, netinkamas apsaugų veikimas, elektrinių agregatų atsijungimai ir įtampos nestabilumas. Netinkamas apsaugų veikimas gali sukelti dvi problemas: atsidalijimą į salą arba sistemos galios nebalansą. [1]

1.2.4. Dažnio stabilumo užtikrinimo priemonės

Dažnio reguliavimo galios rezervai yra skirstomi į pirminį, antrinį bei tretinį rezervus. Visi šie galios rezervai turi būti palaikomi norint užtikrinti dažnio stabilumą. Paprastai sistemos pirminio reguliavimo galios rezervo dydis negali būti mažesnis už didžiausią generavo galią, kuri staigiai gali būti prarasta. Antrinis reguliavimo galios rezervas yra reikalingas atkurti dažnį, atstatyti pirminį reguliavimo rezervą bei sukompensuoti nenumatytą generuojamų galių ir apkrovų kitimą greičiau nei per 15 minučių. Tretinis reguliavimo rezervas yra skirtas antrinio reguliavimo rezervo bei pirminio reguliavimo rezervo atstatymui.

Pirminį reguliavimo rezervą palaiko veikiantys kondensaciniai elektrinių agregatai, kombinuoto ciklo elektrinių agregatai, dujų turbinų agregatai bei hidroelektrinių agregatai. Antrinį reguliavimo rezervą palaiko veikiantieji hidroelektrinių bei hidroakumuliacinių elektrinių agregatai, veikiantys kondensaciniai elektrinių agregatai, kombinuoto ciklo elektrinių agregatai bei dujų turbinų agregatai. Tretinį reguliavimo rezervą palaiko veikiantys kondensaciniai elektrinių agregatai bei greitai paleidžiami dujų turbinų elektrinių agregatai.

Pagrindinės dažnio stabilumo gerinimo priemonės yra šios: automatinis dažninis nukrovimas (ADN), automatinis žadinimo reguliavimas (AŽR), automatinis kartotinis įjungimas (AKĮ), trumpojo jungimo išjungimo laiko trumpinimas, aktyviosios ir reaktyviosios galių rezervų panaudojimas. ADN reikalingas ekstremaliomis sąlygomis, kai reikia sustabdyti dažnio žemėjimo procesą. Ši priemonė paremta daliniu trečios kategorijos vartotojų atjungimu. AŽR – slopina įtampų svyravimus bei padeda palaikyti reikiamus įtampų lygius. AKĮ – paremtas pakartotiniu oro linijos įjungimu ir sėkmingo AKĮ atveju padeda greitai atstatyti prieš tai buvusią tinklo topologiją, taip užtikrinant didesnę sistemos patikimumą.

Galios rezervo pagrindiniai kriterijai yra šie:

1. Bendras pirminio reguliavimo galios rezervo dydis privalo būti toks pat kaip ir avarijos skaičiuojamoji galia.
2. Pirminis dažnio reguliavimo rezervas aktyvuojamas atsiradus ± 200 mHz dažnio nuokrypiui;
3. Pirminio aktyviosios galios rezervas veikiant normaliaame režime negali būti mažesnis nei $\pm 5\%$ vardinės galios.
4. Antrinis dažnio reguliavimo rezervas turi būti pakankamas nuolatos ir privalo dengti tikėtinus generavimo ir apkrovos svyravimus bei agregato generuojamos galios netekimą.
5. Antrinis aktyviosios galios rezervas negali būti mažesnis nei $\pm 5\%$ vardinės galios ir jei agregatas dalyvauja ir pirminiame reguliavime, tai antinio galios reguliavimo rezervas turėtų būti pridodamas prie pirminio galios reguliavimo rezervo. [5]

1.3. Statinio stabilumo tyrimo metodai

Statiniai (srautų pasiskirstymo) režimai yra nusakomi pastoviais režimo parametrais. Lėtai keičiantis režimo parametrams, kai kinta elektros apkrovos ir generacija dienos eigoje, dirbant aktyviosios galios bei dažnio reguliavimo įtaisams ir keičiantis aktyviosios galios srautams, šie gali būti nagrinėjami kaip nusistovėję režimai. Priimta, kad nusistovėjusių režimų stabilumas yra būtina sąlyga normaliam režimui, nes tokio tipo nedideli trikdžiai būna visą elektros sistemos veikimo laiką.

Apie elektros sistemos statinį stabilumą galima tiksliai spręsti pagal sistemos charakteringąsias lygties šaknis. Elektros sistemos charakteringoji lygtis yra sudaroma per ištiesintąją diferencialinių lygčių sistemą, kurios apibendrinta išraiška pateikta (1) lygtyje. Lygtyje a_n – tai charakteringosios lygties koeficientai. Išsprendus šią lygtį yra gaunama n šaknų - p_n . Gaunama dalis realių šaknų ir dalis kompleksinių šaknų. [2] Iš šio matematinio modelio seka tai, kad įvykus mažam trikdžiui režimo parametrų y pokytis Δy gali būti nusakomas (2) lygtimi. Kurioje t yra laikas, m bei n – tai realiųjų charakteringosios elektros sistemos lygties bendras kompleksinių šaknų skaičius, C_i – pradinio režimo parametrų dedamosios pokyčio koeficientas, α_i – laisvojo svyravimo slopinimas, φ_i – pradinis kampas ir ω_i – kampinis dažnis.

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0; \quad (1)$$

$$\Delta y(t) = \sum_{i=1}^m C_i \times e^{\alpha_i t} + \sum_{i=m+1}^n C_i \times e^{\alpha_i t} \times \sin(\omega_i t + \varphi_i); \quad (2)$$

Jei visos kompleksinių kintamųjų realiosios dalys ir visos realiosios šaknys bus neigiamos, tai Δy parametro pokytis laikui bėgant mažės, o sistema bus statiškai stabili. Jei viena iš kompleksinių šaknų bus teigiama, tai sistemoje kintamųjų dydžiai didės, o įsisvyravus sistema neteks sinchroninio darbo. Tokiu atveju bus pažeidžiamas statinis periodinis stabilumas. Statinis aperiodinis stabilumas bus pažeidžiamas, jei nebus kompleksinių šaknų su teigiama realiąja dalimi. [2]

1.4. Dinaminio stabilumo tyrimo metodai

Dinaminis stabilumas yra tiriamas ribinių apkrovų režimo atvejais: kai sistema veikia minimalių bei maksimalių apkrovų režime. Nusistovėjusiuose režimuose, priklausomai nuo apkrovų dydžio yra parenkama generatorių generuojama galia bei skirtingi galios srautai su kitomis elektros sistemomis. Lyginant dinaminį stabilumą yra nustatoma dinaminio stabilumo riba kiekvienam darbo režimui pagal ribinę generuojamą arba perduodamą galią bei ribinę trikdžio trukmę. [7] Tiriant generatoriaus dinaminio stabilumo atsargą, trikdžio vieta parenkama taip, kad avarija būtų sunkiausia. Sunkiausiu trikdžiu laikomas trifazis trumpasis jungimas arti generatoriaus šynų. Tokiam trikdžiui yra parenkami sunkiausi generatoriaus remontiniai režimai esant įvairioms tinklo sujungimo schemoms. Modeliuojamas trikdys yra taip, kad po jo seka labiausiai apkrautos linijos atsijungimas. Jei ištyrus didžiausio trikdžio sukeltus pereinamuosius procesus nustatoma, kad šie yra dinamiškai stabilūs, lengvesnės avarijos atveju režimai netikrinami. [3] Lengvesnė avarija paprastai nustatoma kai elektrinės yra sujungtos su kitais mazgais stipriais ryšiais, modeliuojamo trumpojo jungimo galia yra mažesnė.

Režimo stabilumo atsarga randama lyginant skirtingų režimų variantais tiriant dinaminį stabilumą ir surandant ribinį režimą, kuris tampa dinamiškai nestabilus. Vienas iš dinaminio stabilumo įvertinimo kriterijų yra ribinė modeliuojamo trikdžio trukmė arba modeliuojamo trikdžio dinaminio stabilumo trukmės atsargos koeficientas. Skaičiuojamo režimo trikdžio trukmės atsargos koeficientas yra nustatomas pagal (3) formulę, kurioje t – tiriamo režimo skaičiuojama trikdžio trukmė ir t_{rib} – ribinė trikdžio reikšmė, kai režimas vis dar lieka dinamiškai stabilus. Ribinė trikdžio trukmė randama, kai trikdžio trukmė modeliuojant yra didinama iki tol, kol režimas yra vis dar stabilus. Stabilumas pažeidžiamas, kai bent vienas sistemos generatorius prarandą sinchronizmą su kitais veikiančiais generatoriais, t. y. generatoriaus rotoriaus kampas pradeda kisti ne tolygiai kitų generatorių atžvilgiu. [2]

$$K_T = \frac{t_{rib} - t}{t_{rib}}; \quad (3)$$

Ribinė generuojančios elektrinės dinaminio stabilumo riba yra randama didinant generatoriaus galią ir tiriant dinaminį dažnio stabilumą. Didinant galią randamas režimas, kuriame dažnio stabilumas praranda stabilumą dinaminio atžvilgiu. [2] Pagal ENTSO-E reikalavimus, atliekant dinaminio stabilumo tyrimą, dažnio pokytis sistemoje negali būti didesnis nei 0,8 Hz Ribinė generuojančio agregato

galia P_G yra santykinė maksimali generatoriaus bloko stabilaus veikimo galia. [6] Ribinės generatoriaus galios išraiška pateikta (4) formulėje, kurioje P_N – generatoriaus vardinė galia, P_{rib} – ribinė (didžiausia galima) galia, kai generatorius dar lieka dinamiškai stabilus. [2]

$$P_G = \frac{P_{rib}}{P_N} ; \quad (4)$$

Įvykus trumpam jungimui arba įžemėjimui perdavimo sistemos tinkle yra būtina sąlyga, kad visi veikiantys generatorių blokai išliktu dirbti sinchroniškai su visais sistemoje veikiančiais generatoriais. Kitu atveju atsiranda rizika, kad sistema gali užgesti. Pereinamųjų procesų būtina stabilumo sąlyga yra apibūdinta taip: „bet koks pirminių apsaugų sėkmingai atjungtas trifazis trumpasis jungimas turėtų nesukelti generatoriaus rotorius kampo sinchronizmo praradimo ir generatoriaus atsijungimo“. Reikalavimuose taip pat nurodoma, kad ribinis trumpo jungimo atjungimo laikas turi būti ne mažesnis nei 0,14 sekundės. O nustatyta ribinė pailginto trumpojo jungimo atjungimo laiko riba yra 0,25 sekundės. Ilgesnis trumpojo jungimo laiko tyrimas nėra būtinas. [6]

1.5. Baltijos šalių EES stabilumo tyrimų apžvalga

Baltijos šalių elektros energetikos sistemos veikia sinchroniškai su IPS/UPS sistema, kurią jungia „Baltarusijos, Rusijos, Estijos, Latvijos, Lietuvos bei kitų šalių“ [10] sistemos. „Baltijos šalių elektros energetikos sistemos dažnis yra centralizuotai valdomas ir koordinuojamas Maskvos dispečerinės, todėl Europos kontekste „Lietuva, Latvija ir Estija iki šiol yra izoliuota energetinė sala.“ [10] Baltijos šalių elektros energetikos sistemai pradėjus sinchroniškai veikti su kontinentinės Europos elektros tinklu, energetinė Baltijos šalių izoliacija Europos Sąjungoje būtų visiškai panaikinta. Tačiau Baltijos šalių prisijungimo prie kontinentinės Europos elektros tinklo sąlygose yra keliami aukšti dažnio valdymo bei įtampos stabilumo reikalavimai. Be šių sąlygų, vienas pagrindinių kriterijų, kurį turi tenkinti Baltijos šalių elektros sistema, yra savarankiško sistemos darbo užtikrinimas. Todėl yra reikalinga atlikti tiek Baltijos šalių izoliuoto darbo galimybių tyrimus, tiek Baltijos šalių ir kontinentinės Europos elektros sistemų susijungimo tyrimus. [10]

Turkijos elektros energetikos sistema 2013 metais prisijungė prie KET. Remiantis Turkijos sinchronizacijos su KET patirtimi, pagrindinis reikalavimas yra prijungiamos sistemos savarankiškas veikimas izoliuotame režime. Baltijos šalių elektros energetikos sistemos veikimas izoliuotai yra išnagrinėtas 2010 metais Kauno technologijos universiteto parengtoje studijoje „Baltijos šalių ilgalaikio izoliuoto darbo tyrimas“. [9] Pagrindinis tyrimo tikslas buvo įvertinti balansų sudarymo sąlygas ir patikrinti sistemos stabilumą veikiant izoliuotai. Šioje studijoje buvo tiriami perspektyviai 2016 ir 2020 metų ribiniai režimai. Tyrime identifikuotos būtinos techninės priemonės norint įgyvendinti stabilų Baltijos šalių izoliuotą darbą. Nustatyta, kad reikia rekonstruoti kurių Baltijos šalių elektrinių skirstyklų schemas, patikrinti ar visi Baltijos šalių elektrinių blokai deklaruojantys dalyvavimą pirminiame

reguliavime gali kokybiškai dalyvauti pirminiame reguliavime bei antriniame reguliavime dalyvaujančios Baltijos šalių elektrinės turėtų modernizuoti elektrinių blokų valdymą. [5] Atliktame tyrime nebuvo vertinami šiuo metu veikiantys nuolatinės srovės intarpai, tačiau 2020 metų režimuose buvo įvertinta Visagino atominė elektrinė, kurios statybos planai naujausioje Lietuvos perdavimo sistemos operatoriaus strategijoje atidėti 2025 metams. [9] Atsiradus pakeitimams elektros energetikos sistemų tinkluose bei pasikeitus tolimesnės jų plėtros strategijai tikslinga tai įvertinti ir atnaujinus Baltijos šalių elektros sistemos modelį bei balansą iširti ribinių režimų stabilumą.

Baltijos šalių perdavimo sistemų integracijos į kontinentinės Europos elektros sistemą sujungimo buvo atliktas 2013 metais. Šis Baltijos šalių užsakytas tyrimas buvo parengtas Švedijos konsultacinės bendrovės „Gothia Power“. Tyrimo rezultatai parodė, kad realistinis perėjimas iš vienos sistemos į kitą gali įvykti ne anksčiau nei 2025 metais. [10] Bet studijoje daroma išvada, jog sinchroninis BEES darbas su KET yra įmanomas techniniu požiūriu. Tačiau reikia sustiprinti Baltijos šalių, Kaliningrado ir Lenkijos elektros perdavimo sistemų tinklus, prieš prisijungiant sinchroniniam darbui su KET. Taip pat reikėtų modernizuoti valdymo prietaisus ir rezervo reguliavimą. Be to, reikėtų įrengti keltą nuolatinės srovės intarpų su Rusija ir Baltarusija. Labiausiai reikėtų atsižvelgti į planuojamos Visagino atominės elektrinės dydį ir konstrukcijos parametrus, nes ši elektrinė bus svarbi nustatant leistinas sistemos parametrų ribas daugelio režimų atveju, ypač sistemai veikiant izoliuotu režimu. Įrengus Visagino atominę elektrinę, BEES generatorių galios rezervų poreikis labai išaugtų. Didesnių teisinių kliūčių sinchronizacijai su KET nustatyta nebuvo, tačiau dar turi būti išspręsta nemažai klausimų susijusių su prisijungimo sąlygomis prie KET sistemos sinchroniniam darbui. Perėjimas iš IPS/UPS sistemos prie KET sistemos sinchroniniam darbui negali būti grindžiamas vien technine bei ekonomine analize. Kaip nurodoma tyrime šis perėjimas gali būti grindžiamas politiniais bei kitais aspektais. Šią studiją apima penkios skirtingos tyrimo sritys: ankstesnių tyrimų apžvalga, elektros sistemos tyrimo duomenys bei skaičiuojamosios schemos scenarijų nustatymas, galios srautų pasiskirstymo skaičiavimai, dinaminio stabilumo analizė bei problemų susijusių su socialine ir ekonomine nauda analizė. [11] Studijoje iširti trys pagrindiniai scenarijai ir modeliai:

- BEES sinchroninio darbo su IPS/UPS sistema;
- BEES ir Kaliningrado sistemos sinchroninio susijungimo su KET sistema;
- BEES sinchroninio darbo su KET sistema, asinchroniškai prijungus Kaliningrado EES.

1.6. Elektros perdavimo sistemos modelis

Baltijos šalių EES perdavimo sistemos modelis yra parengtas naudojantis SIEMENS PSS/E programine įranga. Su šia programa buvo atlikti visi statinio bei dinaminio stabilumo skaičiavimai ir modeliavimas. Siekiant įvertinti sistemos stabilumą, reikia sudaryti sistemos elementų matematinius modelius ir apjungti juos į vieną visumą. Tiek dinaminio, tiek statinio stabilumo tyrimo rezultatų

tikslumą lemia panaudotų atskirų elektros sistemos elementų modelių tikslumas. Netinkamai įvertinus stabilios elektros sistemos darbo sąlygas, trikdys sistemoje gali sukelti nenumatytą avariją: neleistini generatorių parametrų svyravimai, asinchroninis režimas, įtampos arba dažnio leistinų ribų pažeidimas. [14] Tačiau nustačius per daug griežtus reikalavimus elektros sistemai, ši gali veikti neekonomiškai, o EES įrengimų techninės galimybės būtų neišnaudojamos. Baltijos šalių EES pereinamųjų procesų modeliavimui naudojama PSS/E kompiuterinė programa. Šioje programoje visi EES elementai yra sudaryti naudojantis programinės įrangos matematiniais modeliais. Statinis sistemos modelis yra sudaromas nurodant pagrindinius mazgų, generatorių, apkrovų, linijų, transformatorių, reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių bei nuolatinės srovės intarpų parametrus. [15, 16] Pagrindiniai tipiniai dinaminiai PSS/E programos modeliai yra šie:

- generatorių modeliai;
- turbinų modeliai;
- žadinimo sistemų modeliai;
- kompensatorių modeliai;
- stabilizatorių modeliai;
- reguliavimo sistemų modeliai. [12]

Dinaminių pereinamųjų procesų modeliavimui dažniausiai naudojami GENSAL, GENROU, GENSAE ir GENCLS generatorių modeliai. Tikslūs turbogeneratorių GENROU ir GENSAL modeliai yra naudojami dažnių rezonanso tyrimams. Hidrogeneratoriai yra modeliuojami naudojantis ryškiapolio generatoriaus GENSAL modeliu su eksponentės įsotinimu d-ašyje. GENSAE modelis taip pat atstoja ryškiapolių generatorių, tačiau jo eksponentinės įsotinimas yra abiejuose d ir q ašyse. Paprasčiausias generatorių modelis yra GENCLS. Jis atstoja induktyviosios pereinamosios varžos x'_d elektrovarą. GENCLS generatorių modelis naudojamas nutolusių nuo tiriamo mazgo generatorių modeliavimui. Baltijos šalių elektros energetikos sistemos modeliavimui naudotų generatorių modelių sąrašas pateiktas pirmame, antrame bei trečiame prieduose. [12]

Žadinimo sistemų modelių tikslumas pasirenkamas pagal turimų duomenų kiekį. Tuo atveju, kai trūksta informacijos apie konkrečią žadinimo sistemą, gali būti panaudojami paprastesni modeliai. Modeliams parinkti yra taikomas pagrindini kriterijus - žadinimo sistemos perdavimo funkcijų tiesinės dalies ir jų apribojimų atkūrimas. Dažniausiai žadinimo sistemoms modeliuoti yra naudojami ESST1A, SCRX, EXAC1, ESAC8B bei EXBAS modeliai. Kur kas rečiau naudojami ESAC5A, IEET1A, REXSYS, SEXS, ESST2A ir ESST4B žadinimo sistemų modeliai. BEES žadinimo sistemoms naudoti modeliai pateikti pirmame, antrame bei trečiame prieduose. Žadinimo sistemų statinis ESST1A modelis skirtas žadinimo sistemų, valdomais lygintuvais, kurie maitinami nuo generatoriaus arba savųjų reikmių modeliavimui. Šios žadinimo sistemos laiko pastovioji yra ganėtinai maža, todėl žadinimo

stabilizavimas nebūtinai. Kintamosios srovės žadinimo sistemos modeliavimui naudojamas EXAC1 modelis. Jis atitinka nepriklausomą kintamosios srovės žadinimo sistemą su nevaldomu lygintuvu. Modelis perteikia lygintuvo charakteristikas bei išmagnetintą žadinimo srovės įtaką žadintuvui. Modelis ESAC8B naudojamas nepriklausomų žadinimo sistemų su pilnai valdomu tiristoriniu tilteliu modeliavimui. ESAC5A modelis atitinka supaprastintą bešepetėlinę žadinimo sistemą su atskirai maitinamu reguliatoriumi. Šis modelis naudojamas nedidelės galios generatorių žadinimo sistemos modeliavimui. SCRX ir SEXS modeliai naudojami tada, kai nėra svarbus žadinimo sistemos tikslumas. Šie modeliai atspindi pagrindines idealiai suderintos žadinimo sistemos charakteristikas. [12]

2. BALTIJOS ŠALIŲ EES IZOLIUOTO DARBO STABILUMO TYRIMAS

Pagal Lietuvos perdavimo sistemos operatoriaus naujausius duomenis Baltijos šalių EES izoliuoto darbo bandymo parengiamieji darbai ir analizė bus atlikta iki 2017 metų pirmo ketvirčio, o 2017 metų antrame ketvirtyje bus priimtas sprendimas dėl izoliuoto darbo bandymo eigos. Pagal šiuos planus izoliuoto darbo bandymas turėtų būti atliekamas 2017 metų trečiajame ketvirtyje. [13] Tokio tipo bandymai yra atliekami ribiniais sistemos darbo režimais. Remiantis šiomis prielaidomis Baltijos šalių EES izoliuoto darbo statinis bei dinaminis stabilumas bus tiriamas:

- 2017 metų vasaros maksimalių apkrovų režime;
- 2017 metų vasaros minimalių apkrovų režime;
- 2018 metų žiemos maksimalių apkrovų režime.

2.1. Baltijos šalių elektros perdavimo tinklo skaičiuojamosios schemos sudarymas

Priimta prielaida, kad Baltijos šalių EES izoliuoto darbo bandymo sąlygose bus numatyta, kad jo metu Baltijos šalių EES dirba izoliuotai nuo IPS/UPS sistemos, tačiau sinchroniškai su Kaliningrado sritimi ir asinchroniškai su KET per aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklius. Remiantis šia prielaida skaičiuojamoji schema sudaryta pagal esamą Baltijos šalių 330 kV perdavimo tinklo schemą, įtraukiant į ją pakeitimus, numatomus atlikti iki 2018 metų (2.1 pav.).

Naudojamas BRELL elektros sistemos perdavimo tinklo skaitmeninis modelis paruoštas Siemens PSS/E programiniu paketu. Atjungiamos visos esamos linijos jungiančios Baltijos šalis su IPS/UPS sistema. Atsidalinus nuo IPS/UPS sistemos Baltijos šalių EES balansiniu mazgu priimtas Balti elektrinės mazgas esantis Estijoje. Schema išplėsta, įtraukiant pakeitimus Lietuvos, Latvijos bei Estijos elektros perdavimo tinklo modelyje, pagal Baltijos EES tinklų plėtros planus. [8] Į 2018 m. Lietuvos perdavimo tinklo schemą įtraukiama:

- Lietuva – Švedija aukštos įtampos nuolatinės srovės elektros jungtis „NordBalt“, kuri prijungta per įtampos šaltinio HVDC keitiklį prie Klaipėdos TP (keitiklio galia: 700 MW);
- Lietuva – Lenkija 400 kV elektros jungtis „LitPol Link“, kuri prijungta per HVDC srovės šaltinio keitiklį prie Alytaus TP (keitiklio galia: 500 MW);
- Klaipėda – Telšiai 330 kV linija;
- Kruonio HAE – Alytus dvigrandė 330 kV linija;
- Šyšos VEP 330 kV transformatorinė pastotė;
- 110 kV linija Kretinga-Benaičiai.

Į 2018 m. Latvijos perdavimo tinklo schemą įtraukiama:

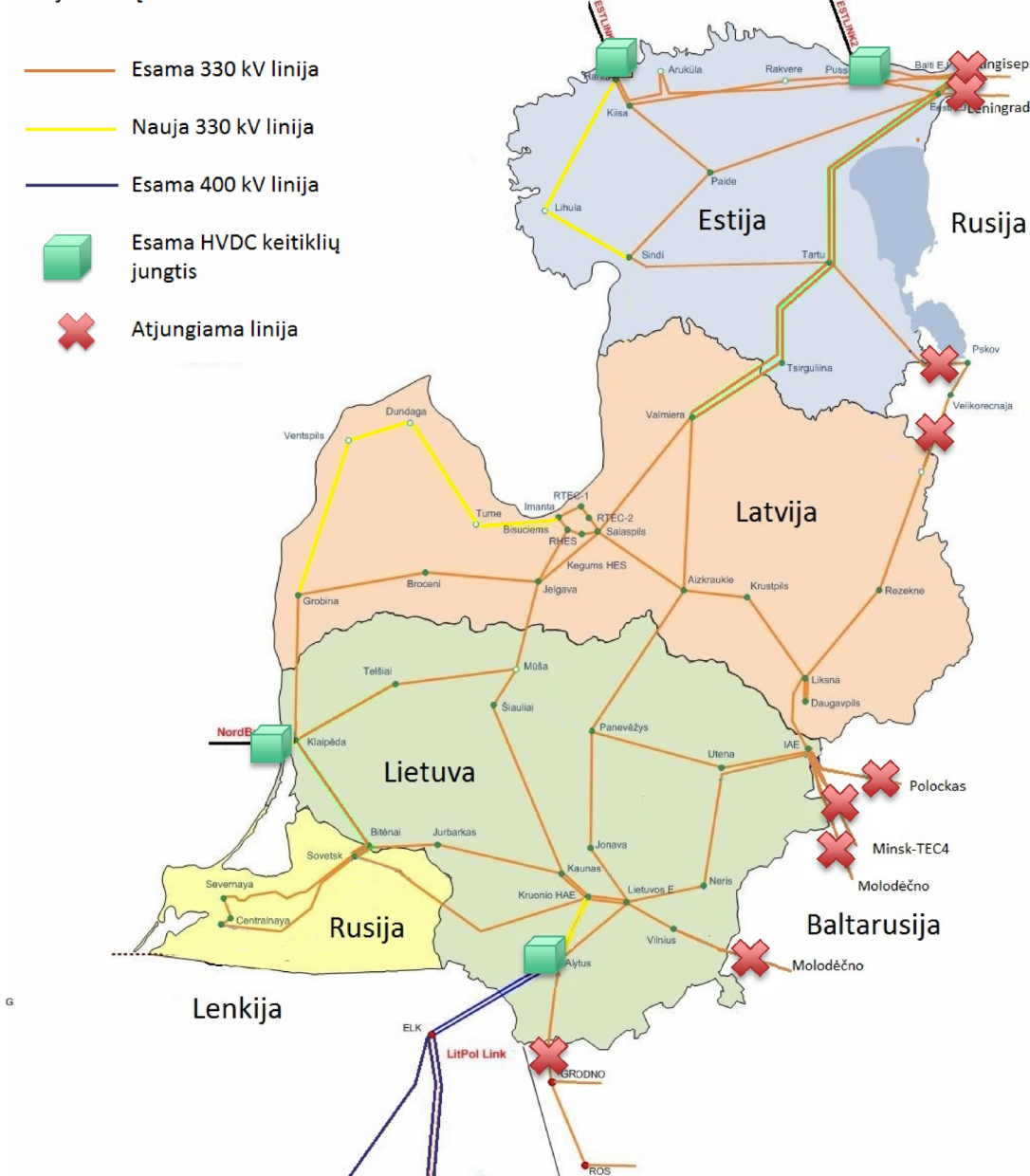
- Imanta - Tume 330 kV linija;
- Dundaga – Imanta 330 kV linija;

- Ventspilis - Dundaga 330 kV linija;
- Grobina – Ventspilis 330 kV/ linija.

Į 2018 m. Estijos perdavimo tinklo schemą įtraukiami:

- Estija – Suomija aukštos įtampos nuolatinės srovės elektros jungtis „ESTLINK1“, kuri prijungta per įtampos šaltinio HVDC keitiklį (keitiklio galia: 350 MW);
- Estija – Suomija aukštos įtampos nuolatinės srovės elektros jungtis „ESTLINK2“, kuri prijungta per HVDC srovės šaltinio keitiklį (keitiklio galia: 650 MW);
- Harku – Lihula 330 kV linija;
- Lihula - Sindi 330 kV linija.

Baltijos šalių EES izoliuoto darbo schema 2018 metais



2.1 pav. Baltijos šalių izoliuotos elektros sistemos perdavimo tinklo schema 2018 m. perspektyvoje

Lietuvos su Lenkija jungtis „LitPol Link“ sumodeliuota dvejomis 400 kV linijomis iš Elk TP į Alytaus TP. Šiai jungčiai sumodeliuotas HVDC srovės keitiklis, kuris jungia Alytus TP ir dvigrandę liniją į Elk. Estijos jungtis su Suomija „ESTLINK 2“, kaip ir „LitPol Link“ keitiklių stotis, sumodeliuota panaudojant HVDC standartinį PSS/E programos modelį „2-Terminal DC Line“, kuris veikia kaip srovės šaltinio keitiklis. Kita Estijos jungtis su Suomija „ESTLINK 1“ bei Lietuvos nuolatinės srovės intarpas su Švedija „NordBalt“ sumodeliuotos naudojant standartinį PSS/E modelį „VSC DC Line“, kuris veikia kaip įtampos šaltinio keitiklis. Lenkijos, Švedijos bei Suomijos sistemos sumodeliuotos, kaip ekvivalentinės elektros sistemos turinčios balansinį mazgą, generatorių ir apkrovą, kurie atstoja sistemą parinktame mazge.

Į BEES skaičiuojamąją schemą taip pat įtraukti ir iki 2018 metų numatyti nauji generavimo blokai:

- Kauno elektrinės numatoma galia - 350 MW;
- Antras blokas Panevėžio elektrinėje, kurio numatoma galia – 35 MW. [8]

2.1 lentelė. Baltijos EES elektrinių įrengtoji galia 2018 m., MW

Elektrinė	Įrengtoji galia, MW
Elektrinės Lietuvos EES	
Lietuvos elektrinė	1045
Vilniaus elektrinė 3	-
Kauno elektrinė	350
Petrašiūnų elektrinė	8
Panevėžio elektrinė	35
Įmonių elektrinės	292
Kauno hidroelektrinė	101
Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė	900
Mažosios hidroelektrinės	27
Vėjo elektrinės	500
Kiti atsinaujinantys energijos išteklių	181
Iš viso:	3439
Elektrinės Latvijos EES	
Rygos TEC-1	114
Rygos TEC-2	832
Pliavinės hidroelektrinė	883
Rygos hidroelektrinė	402
Kegums hidroelektrinė	264
Vėjo elektrinės	100
Kiti atsinaujinantys energijos išteklių	37
Iš viso:	2632
Elektrinės Estijos EES	
Eesti elektrinė	114
Balti elektrinė	832
Vėjo elektrinės	300
Kitos elektrinės	410
Iš viso:	1656

Lietuvos elektros energetikos sistemos generatorių įrengtoji galia 2018 metais sieks 3439 MW. Tais pačiais metais Latvijos elektrinių įrengtoji galia sieks 2566 MW, o Estijos elektrinių suminė galia

1656 MW. Didžiausia įrengtoji galia yra Lietuvos elektrinėje, kurią sudaro 7, 8 bei 9 generatorių blokai. Tačiau 7 ir 8 generatorių blokai šiuo metu yra šaltame rezerve, todėl skaičiavimuose įvertintas tik 9 blokas, kurio galia siekia 455 MW. Tai yra didžiausias generuojantis blokas Baltijos šalių EES. Baltijos šalių EES elektrinių įrengtoji galia 2018 metais pateikta 2.1 lentelėje.

2.2. Baltijos šalių elektros sistemos balansų sudarymas

Pagal pasirinktą Baltijos šalių elektros sistemos izoliuoto darbo scenarijų sumodeliuoti pradiniai galios srautų pasiskirstymo režimai statiniams skaičiavimams. Naudojantis sumodeliuotais režimais bus nustatomi sistemos mazgų įtampos lygiai bei sistemos elementų apkrautumas įvertinant „N-1“ kriterijų. Dinaminio stabilumo tyrimui sumodeliuoti režimai bus konvertuojami dinaminiais skaičiavimams.

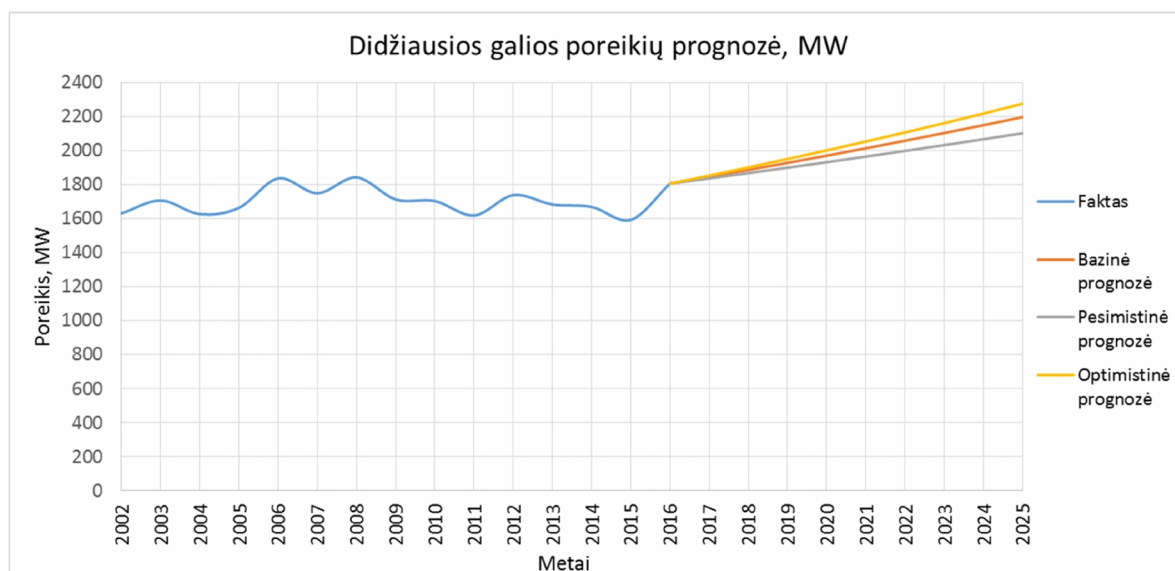
Baltijos šalių elektros energetikos sistemos darbo izoliuotu režimu stabilumo tyrimui sudarytos skaičiuojamosios schemos ir galios srautų pasiskirstymo režimai šiems charakteringiems režimams:

- sausio mėnesio antros savaitės, maksimalių apkrovų režimas (17:00-18:00 valandos);
- liepos mėnesio antros savaitės, minimalių apkrovų režimas (03:00-04:00 valandos);
- liepos mėnesio antros savaitės, maksimalių apkrovų režimas (11:00-12:00 valandos).

Perdavimo sistemos operatoriaus pateiktuose 2015 metų plėtros planuose nurodytas prognozuojamas elektros energijos poreikio augimas. Sudaryti trys skirtingi scenarijai, priklausomai nuo šalies ekonomikos augimo:

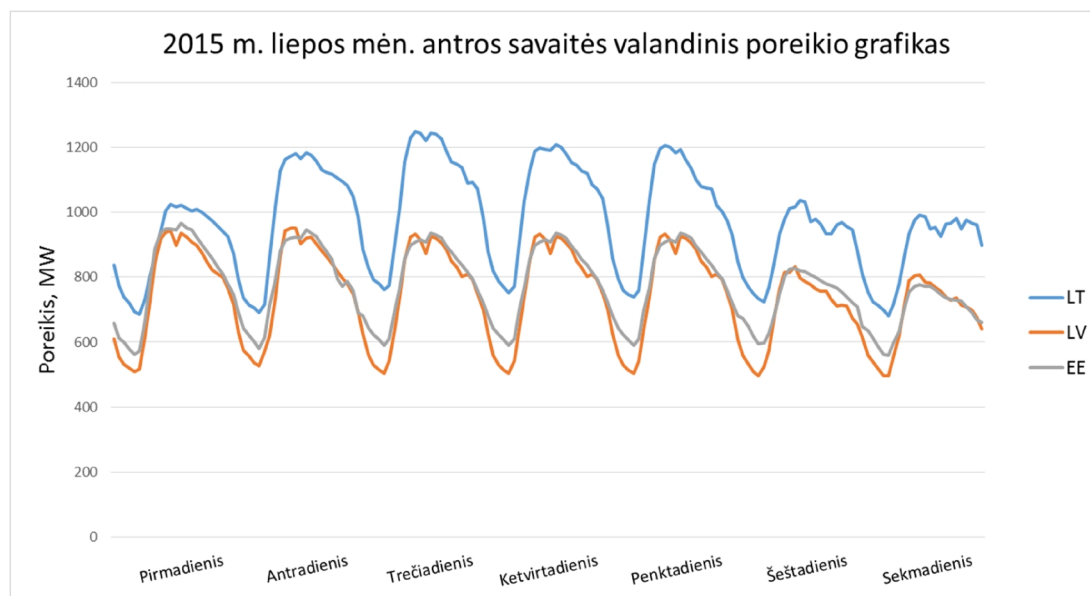
- pesimistinė prognozė – 1,7 % metinis elektros energijos poreikio prieaugis;
- bazinė prognozė – 2,2 % metinis elektros energijos poreikio prieaugis;
- optimistinė prognozė – 2,6 % metinis elektros energijos poreikio prieaugis. [13]

Remiantis šiomis prognozėmis ir faktiniais didžiausio poreikio duomenimis sudaryta Lietuvos elektros energijos poreikio didžiausios galios prognozė pateikta 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Lietuvos elektros energijos poreikio didžiausios galios prognozė

Remiantis faktiniais 2015 metų liepos mėnesio antros savaitės valandiniais poreikio duomenimis nustatyta, kad mažiausias elektros energijos poreikis Baltijos šalyse buvo sekmadienį. Tą naktį Lietuvos poreikis siekė 680 MW, Latvijos – 496 MW, Estijos - 560,2 MW. Tos pačios savaitės duomenimis didžiausias poreikis Baltijos šalyse buvo trečiadienį. Vidurdienį Lietuvos poreikis buvo 1250 MW, Latvijos – 934 MW, Estijos – 908,9 MW. 2015 metų liepos mėnesio antros savaitė valandinis faktinio poreikio grafikas pateiktas 2.3 paveiksle.



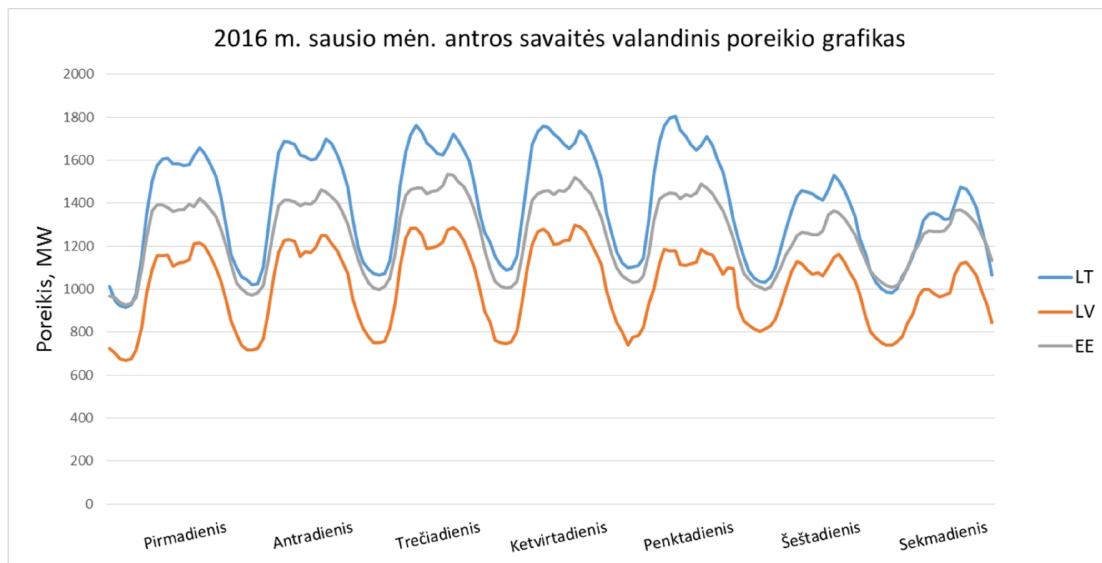
2.3 pav. 2015 metų liepos mėnesio antros savaitės valandinis Baltijos šalių faktinio poreikio grafikas

Pagal 2015 metų PSO plėtros planus prognozuojamas bazinis elektros energijos poreikio augimas, įvertinus šalies ekonomikos augimą, turėtų siekti 2,2 %. Įvertinus šį elektros energijos poreikio prieaugį apskaičiuotas poreikis Baltijos šalyse vasaros režimams pateiktas 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Poreikis Baltijos šalyse vasaros minimaliame ir maksimaliame režimuose 2015 - 2017 m.

Vasaros minimaliame režime	2015	2016	2017
Latvija	496.0	506.9	518.1
Estija	560.2	572.5	585.1
Lietuva	680.0	695.0	710.2
Vasaros maksimaliame režime	2015	2016	2017
Latvija	934.0	954.5	975.5
Estija	908.9	928.9	949.3
Lietuva	1250.0	1277.5	1305.6

Remiantis faktiniais 2016 metų sausio mėnesio antros savaitės valandiniais poreikio duomenimis nustatyta, kad didžiausias elektros energijos poreikis Baltijos šalyse buvo penktadienį. Tos dienos 17-18 valandos Lietuvos poreikis siekė 1806,3 MW, Latvijos – 1179 MW, Estijos - 1445,3 MW. 2016 metų sausio mėnesio antros savaitė valandinis faktinio poreikio grafikas pateiktas 2.4 paveiksle.



2.4 pav. 2016 metų sausio mėnesio antros savaitės valandinis Baltijos šalių faktinio poreikio grafikas

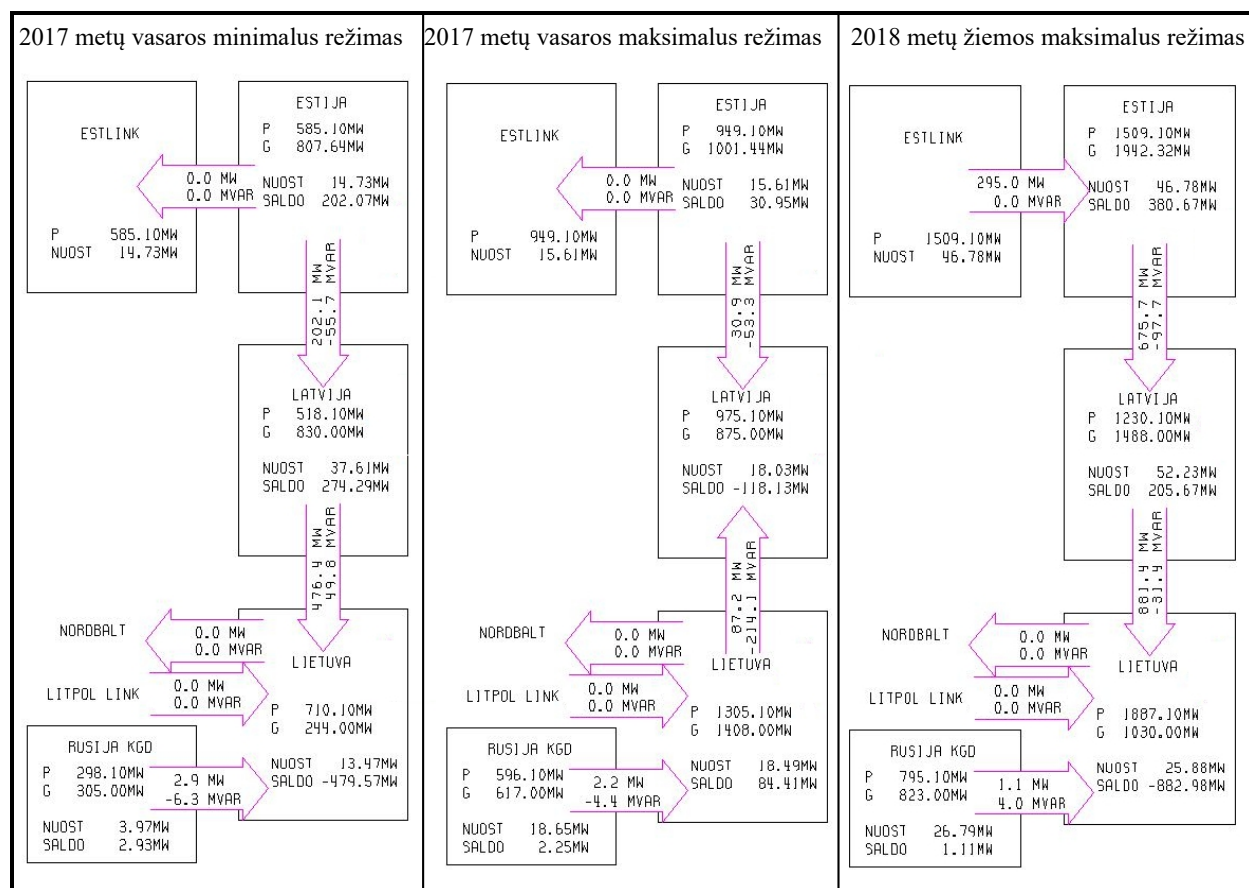
Įvertinus bazinį prognozuojamą elektros energijos poreikio augimą Baltijos šalyse, 2018 metais didžiausias elektros energijos poreikis Lietuvoje turėtų siekti apie 1886 MW, Latvijoje - 1231 MW, o Estijoje – 1509 MW. Įvertinus šį elektros energijos poreikio prieaugį apskaičiuotas poreikis Baltijos šalyse vasaros režimams pateiktas 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Poreikis Baltijos šalyse žiemos maksimaliame režime 2016 - 2018 m.

Žiemos maksimaliame režime	2016	2017	2018
Latvija	1179.0 MW	1204.9 MW	1231.4 MW
Estija	1445.3 MW	1477.1 MW	1509.6 MW
Lietuva	1806.3 MW	1846.0 MW	1886.7 MW

Pradiniams vasaros statiniams režimams sudarytas Baltijos šalių EES balansas be importo ir eksporto su kitomis šalimis. Režime įvertintos visos vasaros metu veikiančios elektrinės. Pradiniame žiemos maksimaliame režime Lietuvoje veikia: Lietuvos elektrinės 9 blokas, Kauno HE, Kruonio HAE (generatoriaus režimu – maksimalių apkrovų skaičiavimuose, siurblio režimu – minimalių apkrovų skaičiavimuose), Mažeikių E ir kitos nedidelės galios elektrinės, biokuro elektrinės bei dalis vėjo elektrinių. Latvijoje vasaros režime veikia: Rygos TEC-1, Pliavenes HE, Rygos HE ir kitos elektrinės. Estijoje šiame režime veikia: EESTI elektrinė, BALTI elektrinė bei kitos elektrinės. Žiemos maksimumo 2018 metų galios srautų pasiskirstymo režimams sudarytas Baltijos šalių EES balansas su 300MW importu iš Suomijos per ESTLINK1 ir be eksporto į kitomis šalimi. Režime įvertintos visos veikiančios šiluminės elektrinės. Pradiniame žiemos maksimaliame režime Lietuvoje veikia: Lietuvos elektrinės 9 blokas, Vilniaus E2, Kauno TE, Kauno HE, Kruonio HAE (generatoriaus režimu), Mažeikių E ir kitos šiluminės bei biokuro elektrinės. Šiame režime Latvijoje veikia: Rygos TEC-1, Rygos TEC-2, Pliavenes HE, Rygos HE ir kitos mažesnės galios elektrinės. Estijoje žiemos režime veikia: EESTI elektrinė, BALTI elektrinė, Parnu elektrinė bei kitos elektrinės. Tiek vasaros, tiek žiemos režimuose Kaliningrade

veikia du šiluminės elektrinės blokai, tačiau Kaliningrado poreikis priimtas toks, kad šalies saldo būtų artimas nuliui. Sumodeliuotas pradinis galios srautų pasiskirstymas BEES 2017 metų vasaros minimaliame ir vasaros maksimaliame režime bei 2018 metų žiemos maksimaliame režime pateiktas 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Sumodeliuotas ribinių režimų pradinis galios srautų pasiskirstymas izoliuotoje BEES

2.3. Nusistovėjusių režimų statinio stabilumo tyrimas

Nusistovėjusių režimų statinis stabilumas yra tiriama įvertinant N-1 kriterijų ir pagal jį nustatant ar bet kurio sistemos elemento atsijungimas nesukelia pavojaus sistemos stabiliam veikimui. Šiame tyrime įvertintas įvairių įvykių sukeltas linijų atsijungimas, transformatorių atsijungimas, generuojamo mazgo netekimas bei kitų sistemos elementų atsijungimas. Tokie atsijungimai turi nesukelti linijų bei autotransformatorių perkrovų, įtampos paaukštėjimo ar pažemėjimo neleistinuose ribose. N-1 kriterijus nėra taikomas radialiai prijungtiems mazgams.

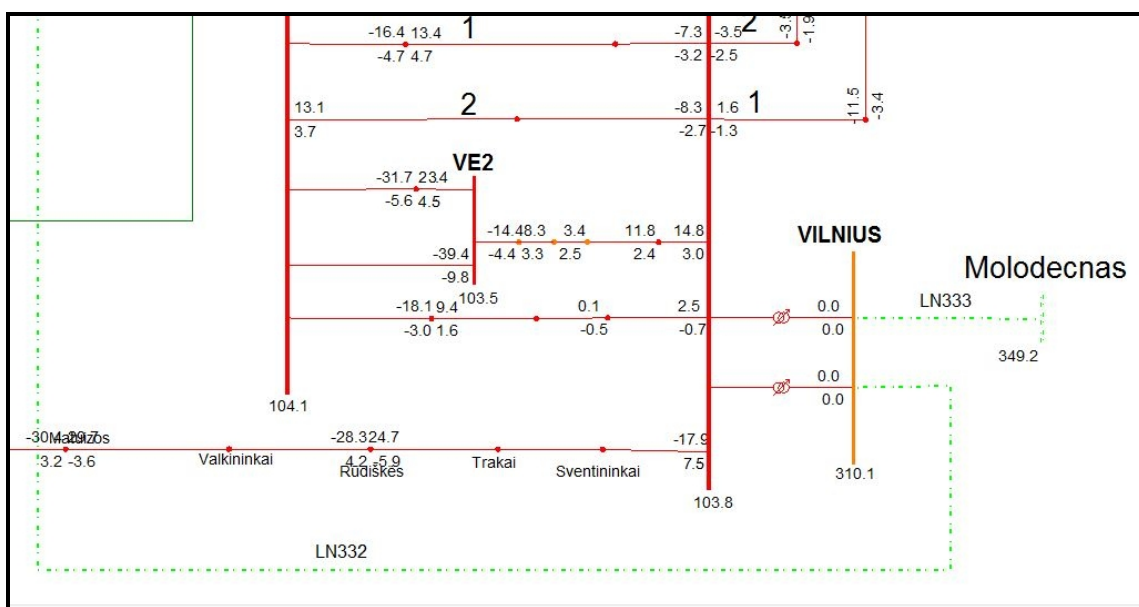
Atlikus N-1 analizę parinkti elementai keliantys didžiausią pavojų N-k atsijungimams, kurie galimi vasaros režimuose dėl vykdomų planinių remontų ir avariškai atsijungusio dar vieno elemento. N-k analizė atliekama sudarinėjant remontų grafikų planus, kurios metu nustatomi galimi sistemos stabilumo pažeidimo atvejai atsijungus dvejais ar daugiau elementų.

Tiriant žiemos maksimalių, vasaros minimalių bei vasaros maksimalių apkrovų režimus buvo nustatyti didžiausią pavojų keliantys N-1 atsijungimai. Šie režimai buvo keičiami sudarant skirtingus scenarijus: kai Baltijos šalių EES yra balanse, kai Baltijos šalys importuoja maksimalią galią bei tranzito atveju, kai galia perduodama iš Švedijos į Lenkiją. Atliekant N-1 analizę buvo priimta, kad linijų apkrautumas negali viršyti 100 %, o autotransformatorių apkrautumas - 105 %. Įtampos ribų pažeidimai fiksuojami, jei sistemos mazguose viršijamos leistinos įtampų ribos:

- 330 kV elektrinių pastočių šynose: 330 - 362 kV;
- 330 kV transformatorių pastočių šynose: 300 – 362 kV;
- 110 kV elektrinių pastočių šynose: 110 - 121 kV;
- 110 kV transformatorių pastočių šynose: 104 – 121 kV.

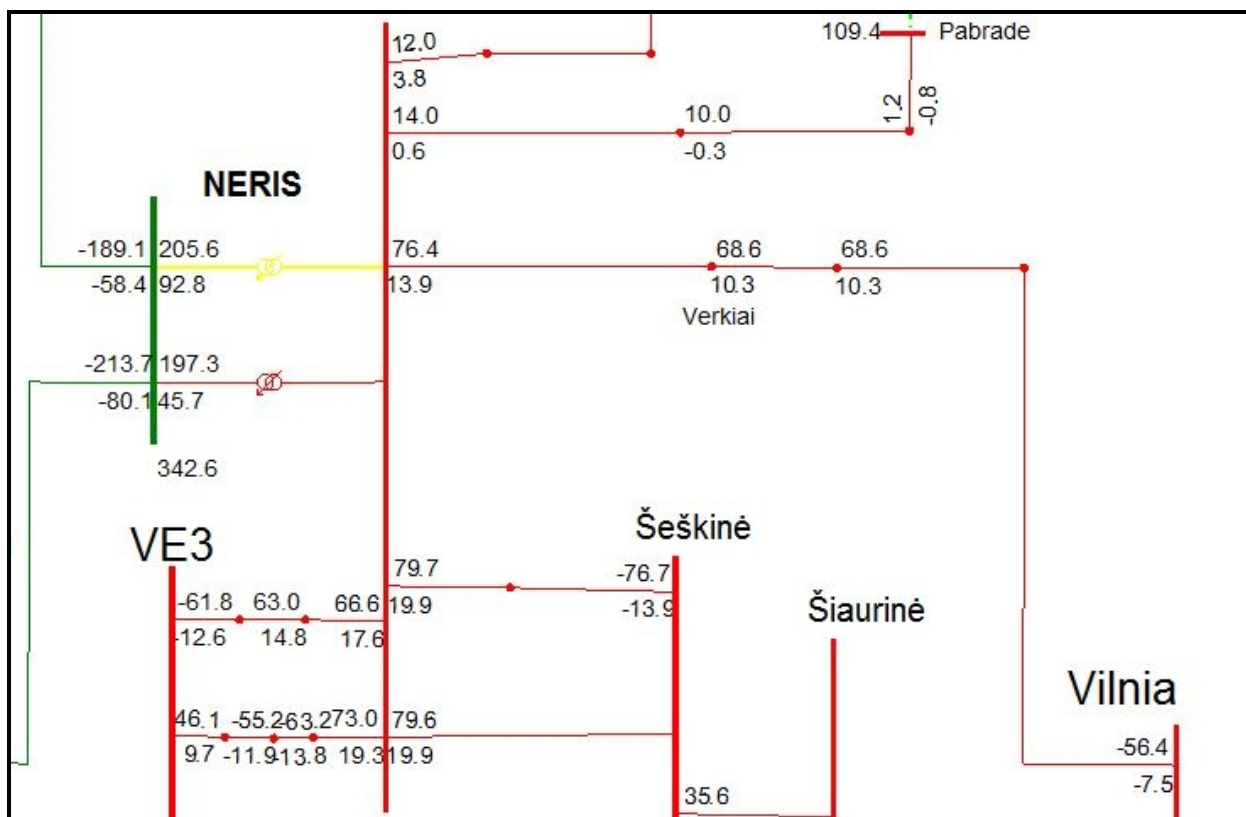
Atlikus Baltijos šalių izoliuotos elektros sistemos N-1 analizę Latvijos ir Estijos elektros energetikos sistemos didelių statinio stabilumo pažeidimų nebuvo užfiksuota. Vienintelis 330 kV linijos Liksna – Rėzekne atsijungimas sukėlė įtampos problemas žiemos maksimalių apkrovų režime. Šio atsijungimo atveju žiemos maksimalių apkrovų režime 110 kV Rėzekne pastotėje įtampa nukrenta iki 102,7 kV. Ši problema susijusi su 330 kV linijos Rėzekne – Velikoreckaja atjungimu atsidalijant nuo IPS/UPS sistemos. Nustatyta, kad šią liniją prijungus prie 330 kV Tartu – Pskovas linijos, šios problemos būtų išvengta. Todėl izoliuoto darbo bandymą žiemos metu reikėtų atlikti tik įvykdžius tinklo pertvarkymą Rėzekne zonoje.

Tiriant statinį stabilumą vasaros minimalių bei maksimalių apkrovų režimams statinio stabilumo pažeidimas nebuvo užfiksuotas. Daugiau sistemos stabilumo pažeidimų užfiksuota Lietuvos perdavimo sistemos tinkle tiriant N-1 atsijungimus žiemos maksimaliame režime. Šiame režime Vilniaus mazgas maitinamas 110 kV linijomis bei viena 330 kV linija Lietuvos E – Vilnius (LN332).

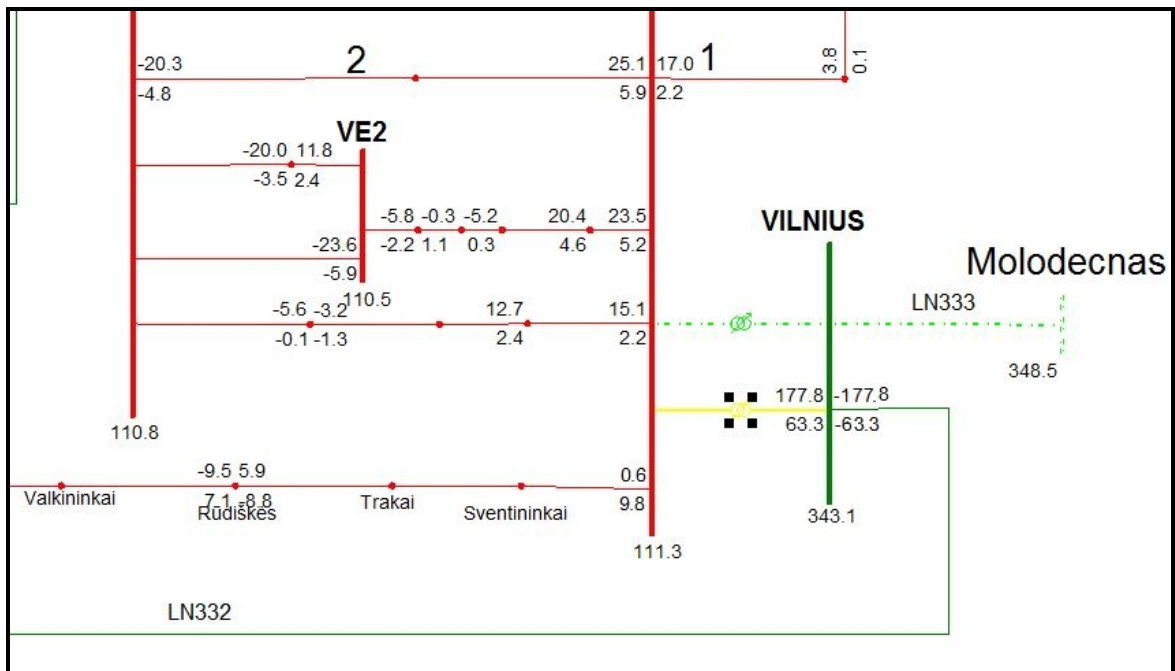


2.6 pav. Įtampos pažemėjimas Vilniaus regiono mazguose atsijungus 330 kV linijai LN332

Atsijungus tik vienai mazgą maitinančiai 330 kV linijai yra pažeidžiamas įtampos stabilumas Vilniaus mazge, kadangi šis lieka maitinamas tik per 110 kV linijas. Vilniaus mazgo įtampos stabilumo pažeidimas pateikiamas 2.6 pav. Taip pat atsijungus šiai linijai persikrauna Neries autotransformatorius, tokia avarija pateikta 2.7 paveiksle. Atsijungus vienam iš Vilniaus AT, kitas autotransformatorius persikrauna, toks atsijungimas pateiktas 2.8 paveiksle. Šiais atvejais pažeidžiamas statinis stabilumas, todėl toks režimas yra negalimas. Jei žiemos maksimaliu režimu veiktų Vilniaus elektrinė 3 arba Vilniaus mazgas būtų sujungtas su Neries mazgu 330 kV linija, įtampos stabilumas pažeidžiamas nebūtų ir Neries autotransformatorius nepersikrautų. Todėl būtina stiprinti Vilniaus regiono tinklą arba didinti Vilniaus regiono generaciją prieš atliekant izoliuoto darbo bandymą žiemos režime.

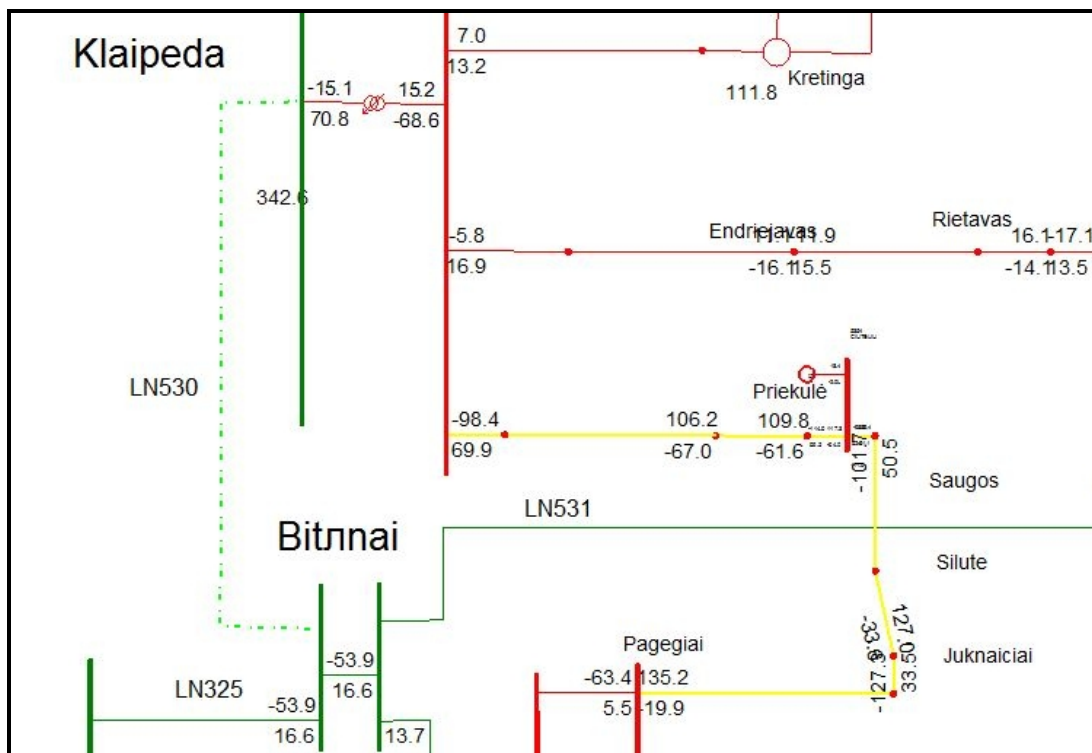


2.7 pav. Neries AT perkrova atsijungus 330 kV linijai LN332



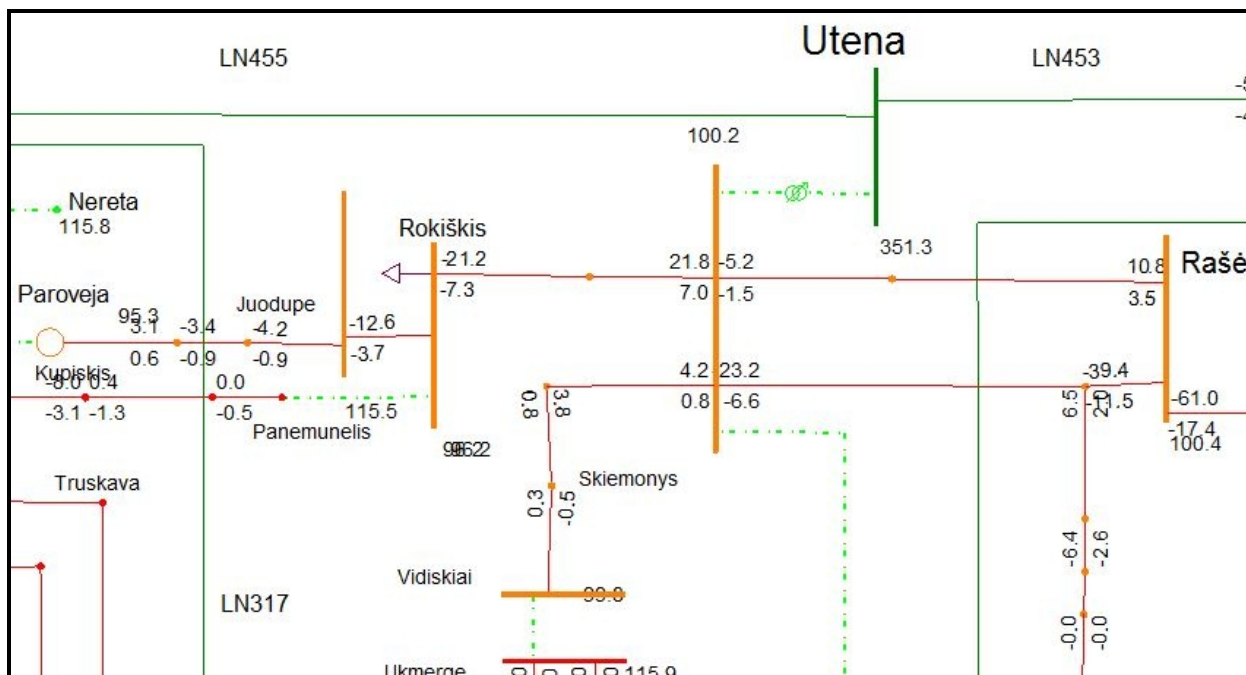
2.8 pav. Vilniaus AT perkrova atsijungus vienam iš autotransformatorių

Tiriant statinį stabilumą žiemos maksimaliame režime tranzito atveju, kai 500 MW galia perduodama iš Švedijos į Lenkiją per HVDC keitiklius ir atsijungia 330 kV linija Klaipėda – Bitėnai (LN530) užfiksuota perkrova 110 kV tranzite Klaipėda – Pagėgiai. Toks režimas pateiktas 2.9 paveiksle. Kad išvengti perkrovų šis tranzitas turėtų būti nutraukiamas Žiemos maksimalių režimų metu.



2.9 pav. Klaipėda – Pagėgiai tranzito perkrova atsijungus LN530

Žiemos maksimalių apkrovų režime esant normaliai sujungimų schemai atsijungus Utenos AT įtampa Utenos regiono 110 kV tinkle nukrenta beveik 4 kV žemiau leistinų ribų. Šiuo atveju įtampa Utenos regione siekia 100,2 – 100,4 kV, todėl pažeidžiamas įtampos stabilumas. Šiame režime reikėtų įjungti normalioje schemoje atjungtas 110 kV linijas (Rokiškis – Panemunėlis, Vidiškiai – Ukmergė bei Utena – Jonava), kad būtų išlaikyta įtampa leistinose ribose.



2.10 pav. Įtampų lygiai Utenos regione atsijungus Utenos AT maksimaliame žiemos režime

2.4. Pereinamųjų procesų dinaminio stabilumo tyrimas

Atliekant dinaminio stabilumo tyrimą yra nagrinėjami didžiausių trikdžių sistemoje sukelti pereinamieji procesai. Jeigu didžiausių trikdžių atveju režime dinaminis stabilumas nėra pažeidžiamas, mažesnių trikdžių sukelti pereinamieji procesai dinaminio stabilumo nepažeidžia. Siekiant nustatyti dinaminio stabilumo atsargą, tiriami patys didžiausi trikdžiai tinkle – trifaziai trumpieji jungimai įvykę arti labiausiai apkrautų generatorių šynų bei didžiausios galios generatoriaus ar HVDC keitiklio atsijungimas. Pereinamųjų procesų stabilumas bus tiriamas Baltijos šalims veikiant izoliuotai nuo IPS/UPS sistemos, tačiau paliekant sinchroniškai veikti su Kaliningrado sritimi ir asinchroniškai per HVDC keitiklius su KET bei Skandinavijos šalimis.

Baltijos šalių generatoriams naudojami dinaminiai Siemens PSS/E programinio paketo modeliai pateikti 1 – 3 prieduose. Pirmame priede pateikti Lietuvos bei Kaliningrado srities generatorių dinaminiai modeliai, antrame priede pateikti Latvijos generatorių dinaminiai modeliai, trečiame priede pateikti Estijos generatorių dinaminiai modeliai. Švedijos, Lenkijos bei Suomijos sistemos

sumodeliuotos kaip apkrovos ir generatoriai, prijungti prie vieno mazgo sistemai. Šiems generatoriams naudoti GENROU generatorių modeliai, TGOV1 turbinų modeliai ir IEEEEST stabilizatorių modeliai.

Lietuvoje, Latvijoje bei Estijoje prijungtos vėjo elektrinės bei HVDC keitikliai sumodeliuoti naudojantis standartiniais PSS/E dinaminiais modeliais. Vėjo elektrinių generatoriams naudotas WT4G1 modelis, o jų valdymo elektronika sumodeliuota naudojant WT4E1 modelį. Šis modelis atitinka vėjo elektrines su pilnai valdomais keitikliais. HVDC keitikliai sumodeliuoti atsižvelgiant į esamuose keitikliuose naudojamą technologiją. Naudoti modeliai keitiklių modeliavimui pateikti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Aukštos įtampos nuolatinės srovės keitiklių dinaminiai modeliai

PSS/E duomenys		PSS/E dinaminiai duomenys
Pavadinimas	Modelis	Modelis
EstLink1	VSC DC Line	VSCDCT
EstLink2	2-Terminal DC Line	CDC4T
NordBalt	VSC DC Line	VSCDCT
LitPol1	2-Terminal DC Line	CDC4T

2.4.1. Dažnio stabilumo tyrimas

Atsijungus didžiausiam generatoriaus blokui arba HVDC keitikliui, kuris naudojamas importuoti ar eksportuoti elektrą, kiti generuojantys šaltiniai turi sugebėti patiekti į tinklą tokį elektros energijos kiekį, kad būtų padengtas elektros energijos deficitas ir nebūtų pažeistas dažnio stabilumas. Baltijos šalių izoliuotos sistemos dažnio stabilumo tyrime įvertintas didžiausio sistemos generatoriaus (Lietuvos elektrinės 9 bloko, kurio galia 450 MW) atsijungimas, NordBalt atsijungimas, kai importuojama elektros energija ir LitPol Link atsijungimas, kai eksportuojama elektros energija į Lenkiją. Visais atvejais reikia surasti maksimalią galią, kurios atsijungimo metu bus pažeistas dažnio stabilumas. Pagal ENTSO-E metodiką didžiausias avarinis leistinas dažnio pokytis neturi viršyti 0,8 Hz, o nusistovėjus pereinamajam procesui maksimalus išlikęs dažnio pokytis negali viršyti 0,5 Hz. Pagal dabartinius Lietuvos perdavimo sistemos ADN apsaugų nuo dažnio mažėjimo veikimo principus, dažniui pamažėjus žemiau 49,2 Hz yra atjunginėjami vartotojai, siekiant atstatyti dažnį ir išvengti visiško sistemos užgesimo.

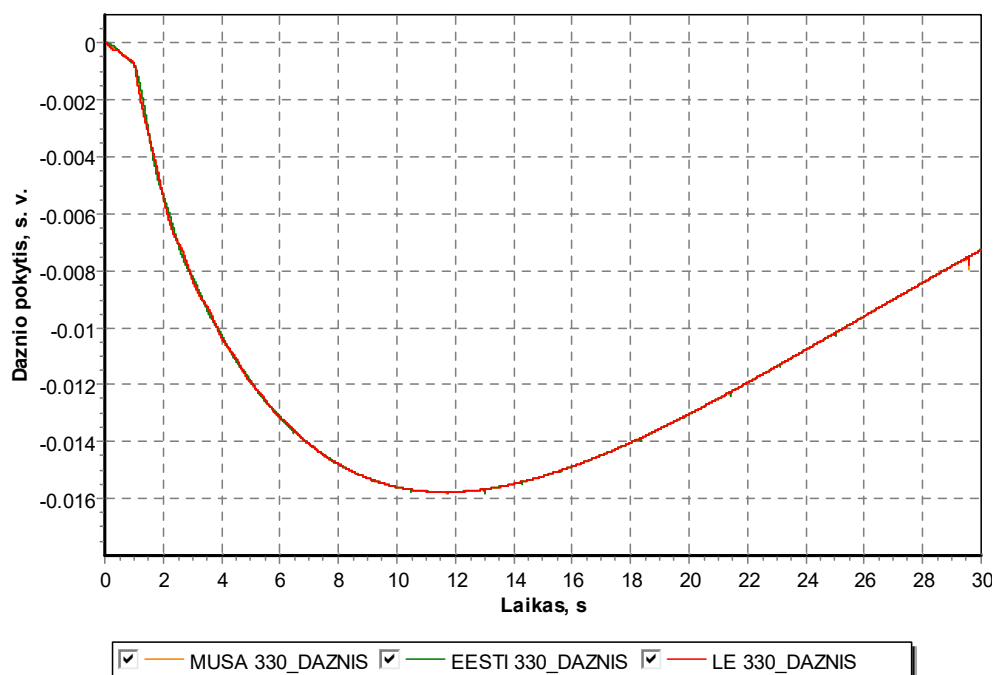
Tiriamuose pereinamuosiuose procesuose įvertintas tik pirminis dažnio reguliavimas. Baltijos šalims susijungus su Kontinentine Europos perdavimo sistema (CE), Baltijos šalys turėtų užtikrinti apie 25 MW pirminio rezervo. Tačiau Baltijos šalims veikiant izoliuotame režime pirminio galios rezervo reguliavimo galia turėtų būti tokio pat dydžio kaip didžiausio generatoriaus bloko arba HVDC jungties galia. Turimas pirminio reguliavimo galios rezervas įvertinamas ištyrus dažnio stabilumą. Reikiamas pirminio galios reguliavimo kiekis nustatomas atsižvelgiant į šiuos principus:

- Visas sistemos pirminio galios reguliavimo rezervas turėtų padengti didžiausio sistemos generatoriaus bloko galią;
- Pirminio galios rezervo aktyvavimo greitis turi būti pakankamas, kad pereinamojo proceso metu dažnio pokytis neviršytų leistinų ribų;
- Pirminis rezervas gali būti patiektas generatorių turbinos reguliatorių, kurie yra valdomi pagal dažnį arba per HVDC jungtis, susitarus su kaimyninėmis šalimis, kad jos tieks pirminį galios rezervą (agreed supportive power);
- Nenumatytas vartotojų atjungimas yra nepriimtinas po N-1 elemento atsijungimo (didžiausio generatoriaus netekimo).

Atliekant dažnio stabilumo tyrimą buvo priimta prielaida, kad Baltijos šalių EES izoliuoto darbo bandymo sąlygose, kurias pateiks Europos komisija, bus numatyta, jog pirminis galios rezervas negali būti tiekiamas per nuolatinės srovės intarpus su Lenkija bei Skandinavijos šalimis.

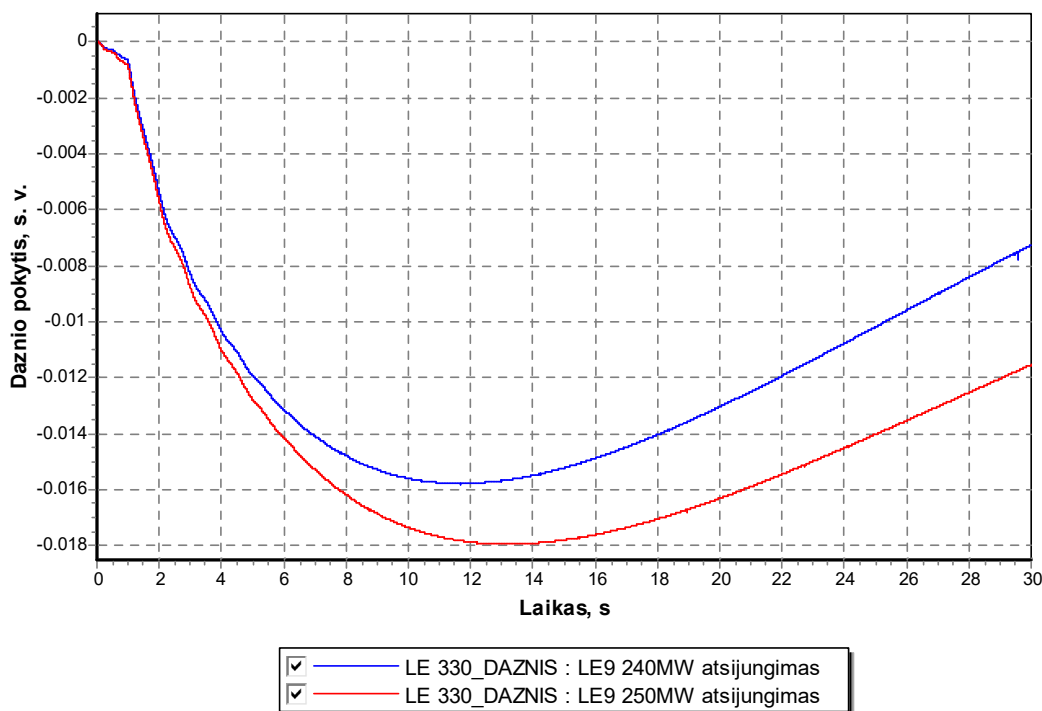
2.4.1.1. Lietuvos elektrinės generuojamos galios netekimo tyrimas

Lietuvos elektrinės 9 blokas yra didžiausias generatoriaus blokas Baltijos šalių EES, todėl tiriamas dažnio stabilumas generatoriaus atsijungimo atveju. Atlikus dažnio stabilumo tyrimą buvo nustatyta, kad vasaros minimaliame režime Lietuvos elektrinės 9 bloko maksimali generuojama galia negali viršyti 240 MW galios. Jei šis blokas atsijungia, kai generuojama galia yra 250 MW, maksimalus dažnio kritimas siekia 0,9 Hz, todėl tokia didžiausio generatoriaus generuojama galia yra neleistina. Generatoriui veikiant 240 MW galia ir jam atsijungus didžiausias dažnio pokytis nustatytas po 10 sekundžių nuo bloko atsijungimo ir jo dydis siekia 0,78 Hz. Dažnis per 25 sekundes pakyla iki 49,5 Hz,

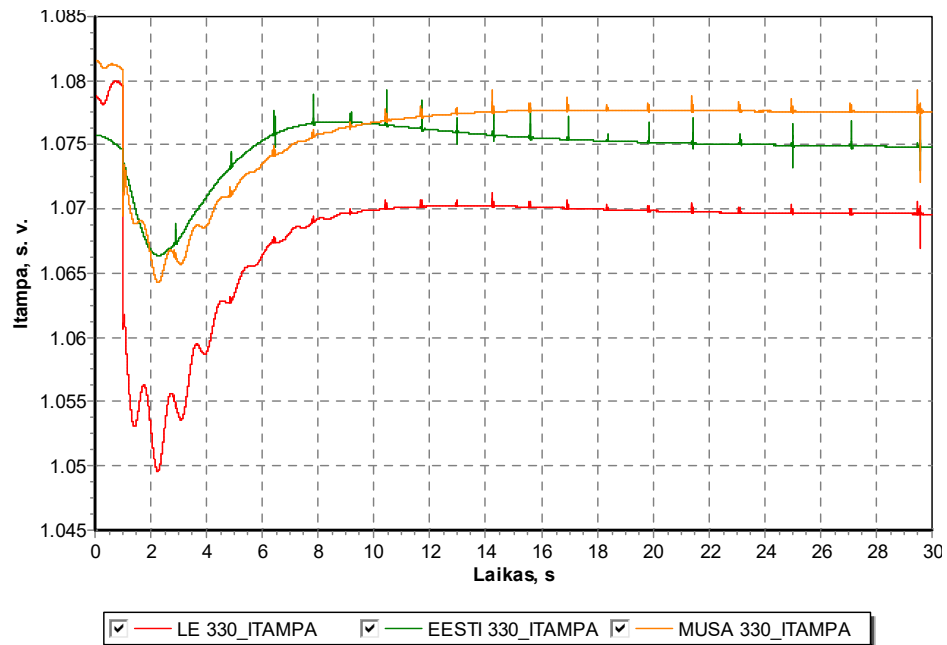


2.11 pav. Dažnio pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 240 MW, Vmin režime

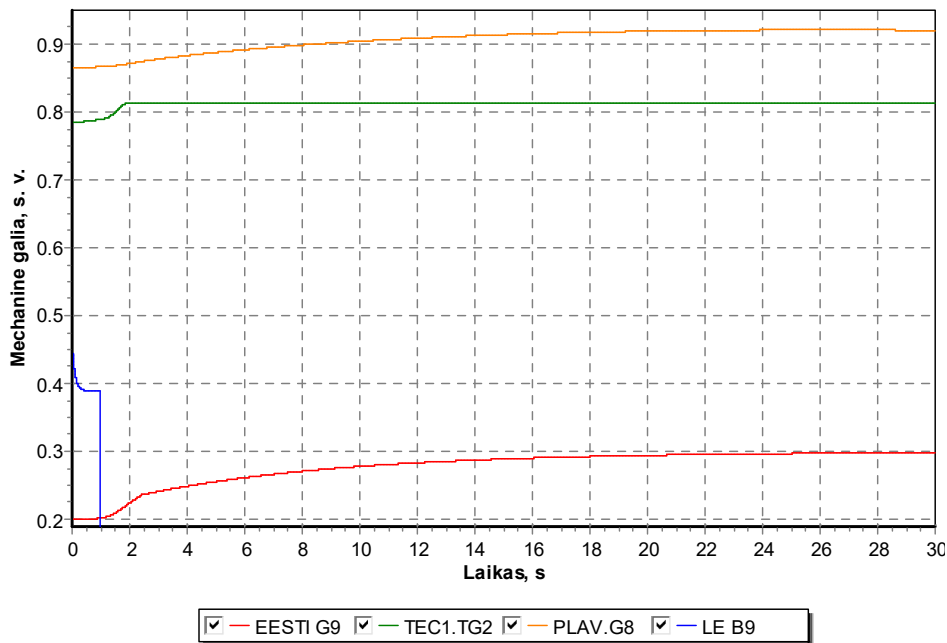
todėl toks generatoriaus atsijungimas tenkina dažnio stabilumo sąlygą. Dažnio pokytis santykiniais vienetais Lietuvos E, EESTI bei Mūša 330kV pastotėse atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui generuojant 240 MW galią pateiktas 2.11 paveiksle. Dažnio pokytis Lietuvos elektrinės 330 kV šynose LE G9 blokui dirbant 240 MW bei 250 MW galiomis pateiktas 2.12 paveiksle. Stebint dažnio kitimą nutolusiuose nuo avarijos sistemos mazguose, kaip EESTI 330 kV pastotėje, nustatyta, kad dažnis tame mazge pradeda mažėti vėliau nei Lietuvos elektrinės šynos. Taip yra dėl to, kad nutolusios elektrinės kelti galią pradeda tik po tam tikro laiko, kai sureaguoja dažnio reguliavimo įtaisai. Tai pačiai avarijai įvykus įtampos kitimas santykiniais vienetais Baltijos šalių EES pagrindiniuose mazguose pateiktas 2.13 paveiksle. Nustatytas didžiausias įtampos kritimas LE šynose, kuris per vieną sekundę nukrenta iki 346 kV. Toks įtampos kritimas yra leistinose ribose. Pagrindinių BEES generatorių mechaninės galios pokytis santykiniais vienetais pateiktas 2.14 paveiksle. Šiame paveiksle stebimas sistemoje veikiančių generatorių pirminio galios rezervo aktyvavimas. Besisukantys generatoriai kelią galią ir taip atstatomas dažnis iki leistinų dažnio ribų.



2.12 pav. Dažnio pokytis LE 330kV pastotėje atsijungus LE G9 blokui - 240 MW bei 250 MW, Vmin

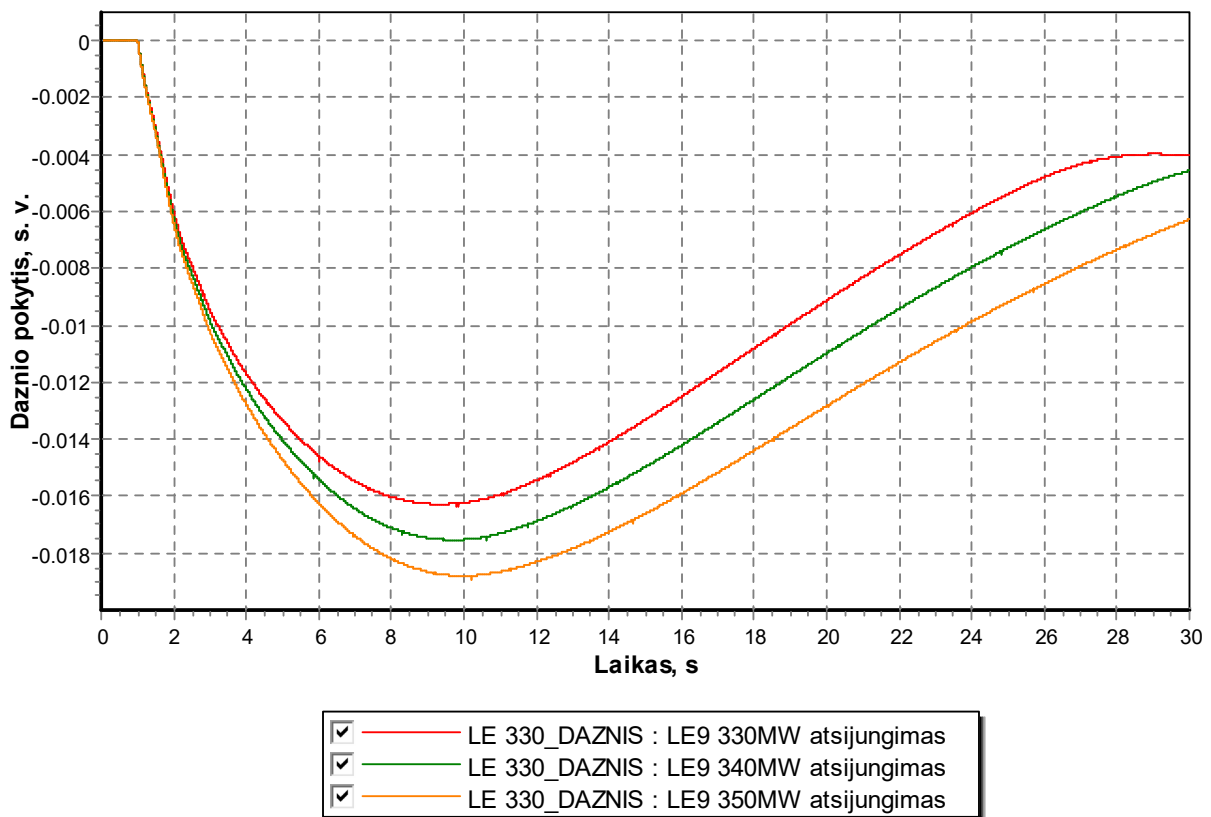


2.13 pav. Įtampos pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 240 MW, Vmin režime



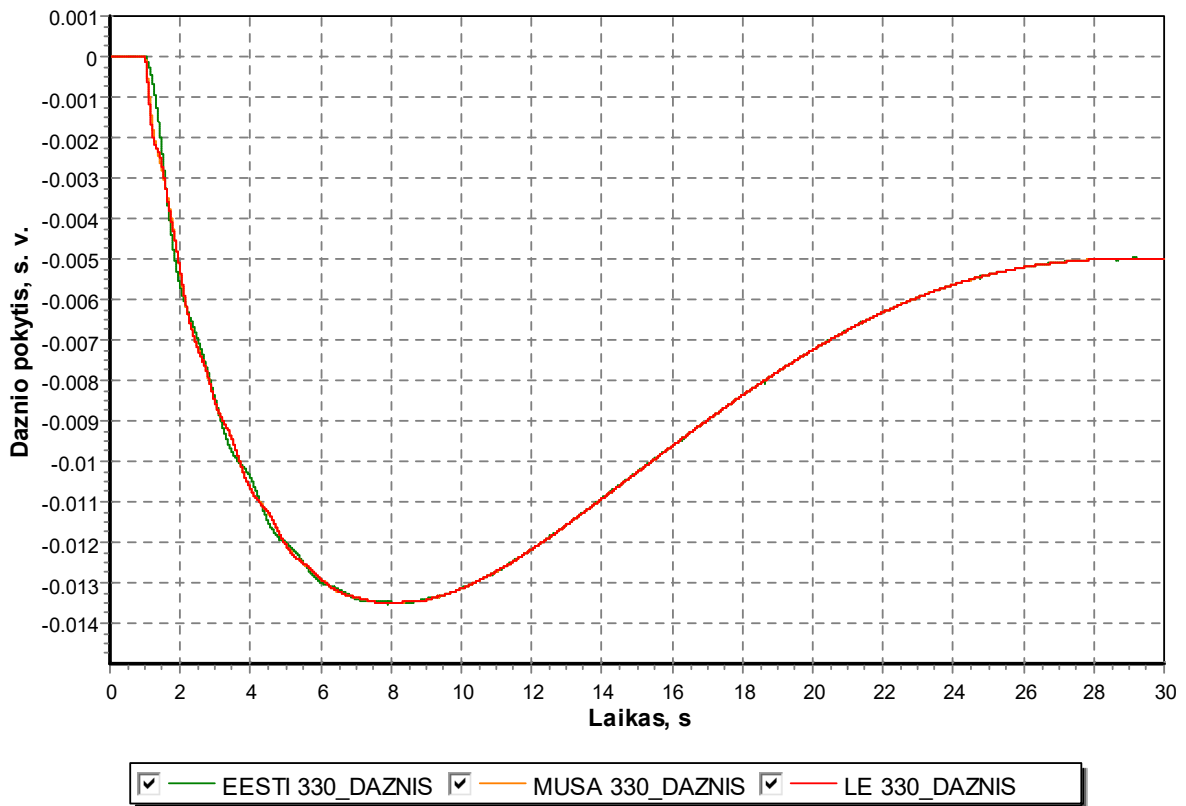
2.14 pav. BEES generatorių mechaninės galios atsijungus LE G9 blokui - 240 MW, Vmin režime

Dažnio stabilumo tyrimo metu buvo nustatyta, kad vasaros maksimalių apkrovų režime Lietuvos elektrinės 9 bloko didžiausia generuojama galia negali viršyti 320 MW galios. Jei šis blokas atsijungia, kai generuojama galia – 330 MW, didžiausias dažnio kritimas siekia 0,825 Hz, todėl tokia didžiausio generatoriaus generuojama galia yra neleistina. Tokiame režime veikiančio LE G9 bloko netekimo generuojant 330 – 350 MW galią, sukeltas dažnio pokytis santykiniais vienetais Lietuvos E 330kV pastotėje pateiktas 2.15 paveiksle.

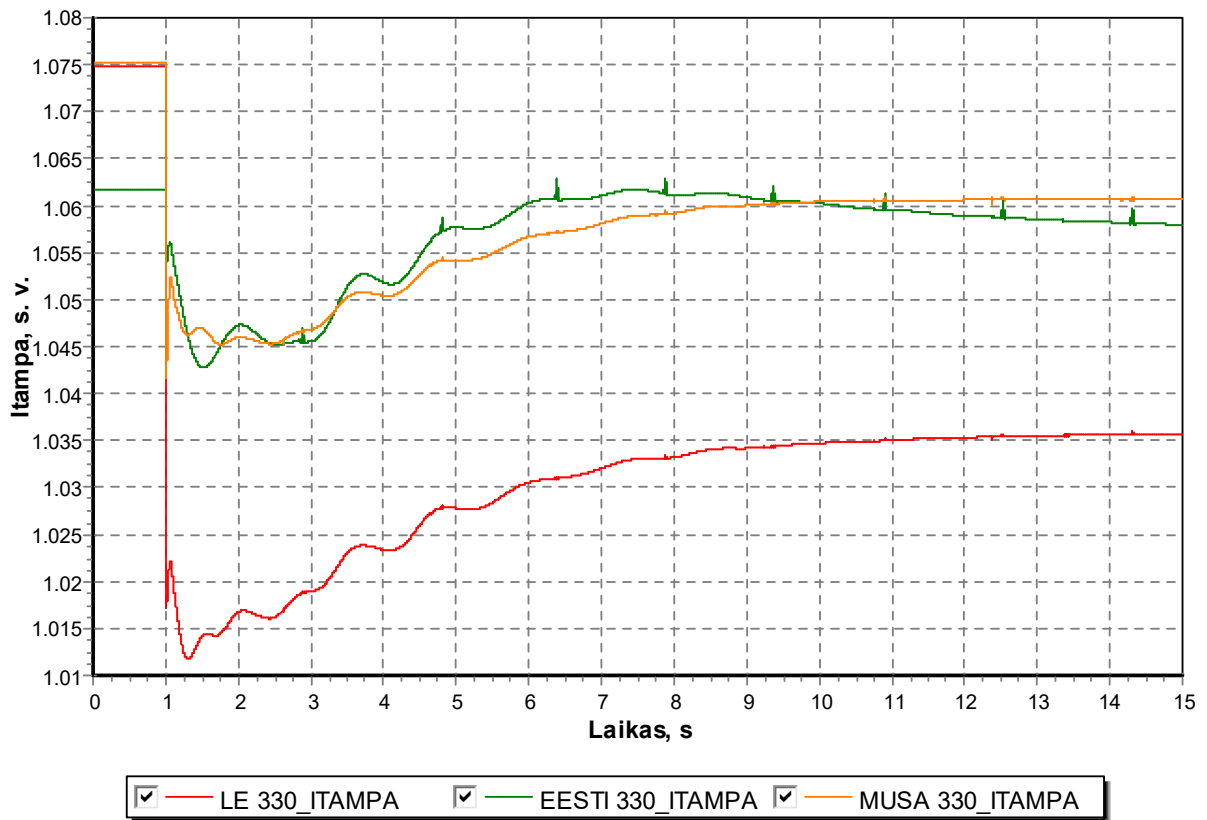


2.15 pav. Dažnio pokytis LE 330kV pastotėje atsijungus LE G9 blokui – 330 - 350 MW, V_{max}

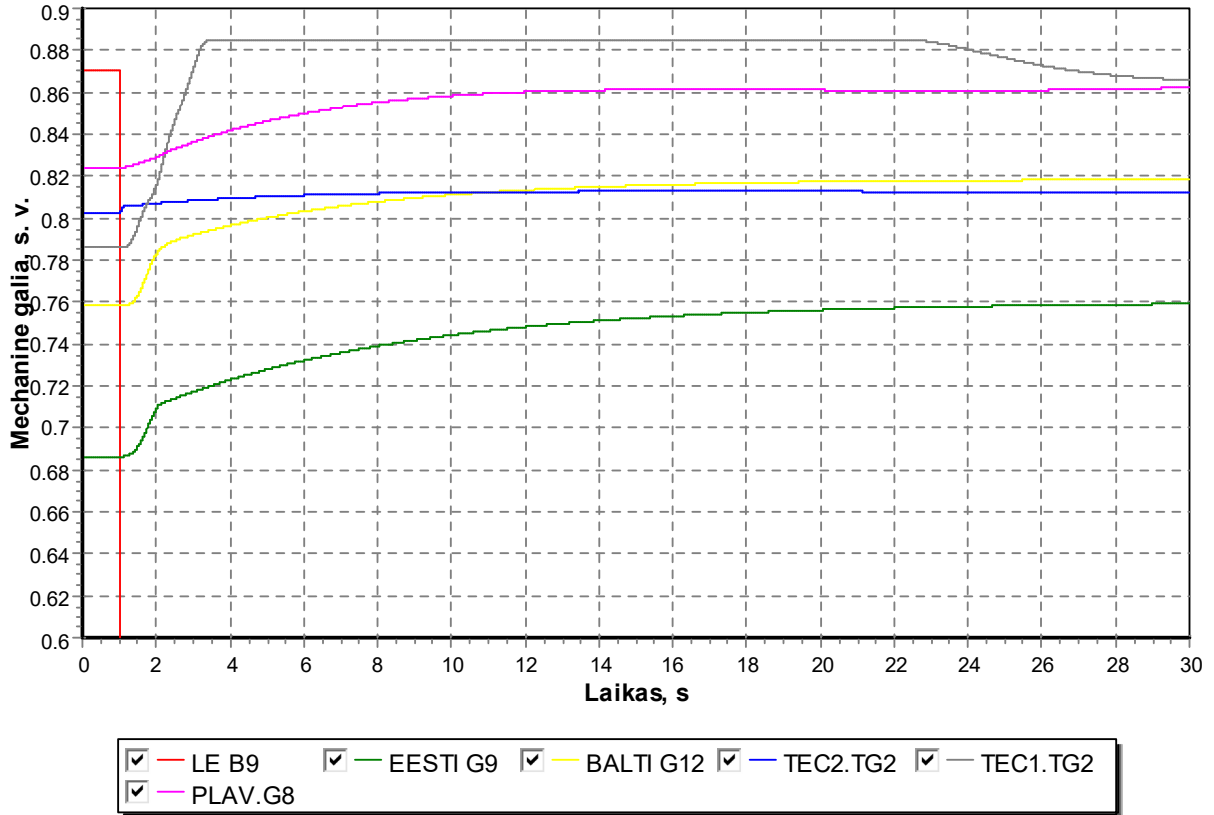
Ištyrus dažnio stabilumą žiemos maksimalių apkrovų režime nustatyta, kad Lietuvos elektrinės 9 blokas gali veikti pilna 450 MW galia. Kai blokas atsijungia dirbdamas pilna galia didžiausias dažnio kritimas siekia 0,675 Hz, o per 15,5 sekundės dažnis atstatomas iki 49,5 Hz, todėl dažnio stabilumas nėra pažeidžiamas. Dažnio pokytis santykiniais vienetais Lietuvos E, EESTI bei Mūša 330kV pastotėse atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui generuojant 450 MW galią pateiktas 2.16 paveiksle. Dažnio kitimas nutolusiame nuo avarijos sistemos mazge, EESTI 330 kV pastotėje, matomas pavėluotas dažnio kritimas. Tai pačiai avarijai įvykus įtampos kitimas santykiniais vienetais Baltijos šalių EES pagrindiniuose mazguose pateiktas 2.17 paveiksle. Nustatytas didžiausias įtampos kritimas LE šynose, kuris per vieną sekundę nukrenta iki 334 kV. Toks įtampos kritimas yra leistinose ribose. Kituose sistemos mazguose nustatytas įtampos kritimas yra dar mažesnis ir įtampa nukrenta iki 345 kV. Pagrindinių BEES generatorių mechaninės galios pokytis santykiniais vienetais pateiktas 2.18 paveiksle. Šiame paveiksle stebimas sistemoje veikiančių generatorių pirminio galios rezervo aktyvavimas, kai besisukantys generatoriai kelia aktyviają galią ir taip atstato dažnį iki leistinų ribų. Greičiausiai pirminį galios rezervą aktyvuoja Rygos TEC-1 antrasis turbogeneratorius, kuris savo galią per 2 sekundes pakelia 10 %.



2.16 pav. Dažnio pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 450 MW, Žmax režime



2.17 pav. Įtampos pokytis BEES atsijungus Lietuvos elektrinės 9 blokui - 450 MW, Žmax režime



2.18 pav. BEES generatorių mechaninės galios atsijungus LE G9 blokui - 450 MW, Ž_{max} režime

Išanalizavus Lietuvos elektrinės 9 generatoriaus bloko atsijungimą įvairiomis sąlygomis, nustatyta ribinė šio generatoriaus generacijos galia, prie kurios atsijungus generatoriui nebūtų pažeidžiamas dažnio stabilumas. Vasaros minimalaus, vasaros maksimalaus bei žiemos maksimalaus režimų apibendrinti dažnio stabilumo tyrimo rezultatai pateikti 2.5 lentelėje.

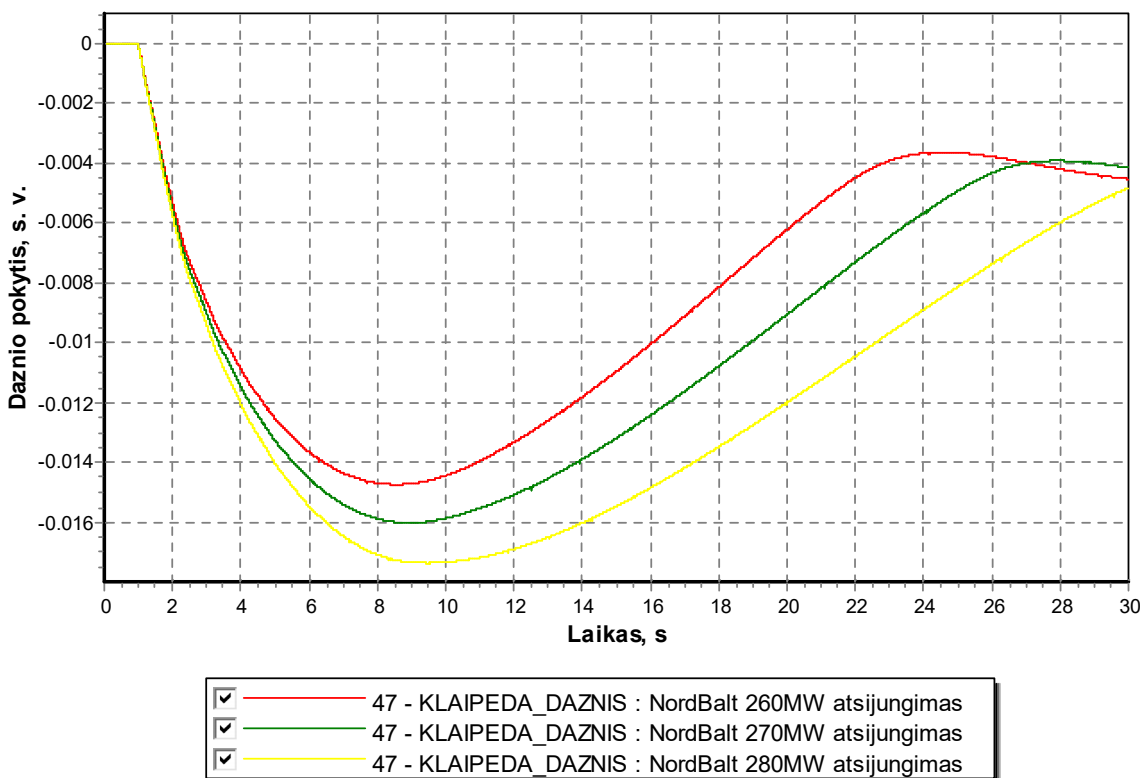
2.5 lentelė. Dažnio stabilumo tyrimo rezultatai, LE G9 atsijungimo atveju

Režimas	Vasaros minimalus	Vasaros maksimalus	Žiemos maksimalus
Ribinė generatoriaus galia, MW	240	320	450

2.4.1.2. NordBalt ir LitPol Link perduodamos galios netekimo tyrimas

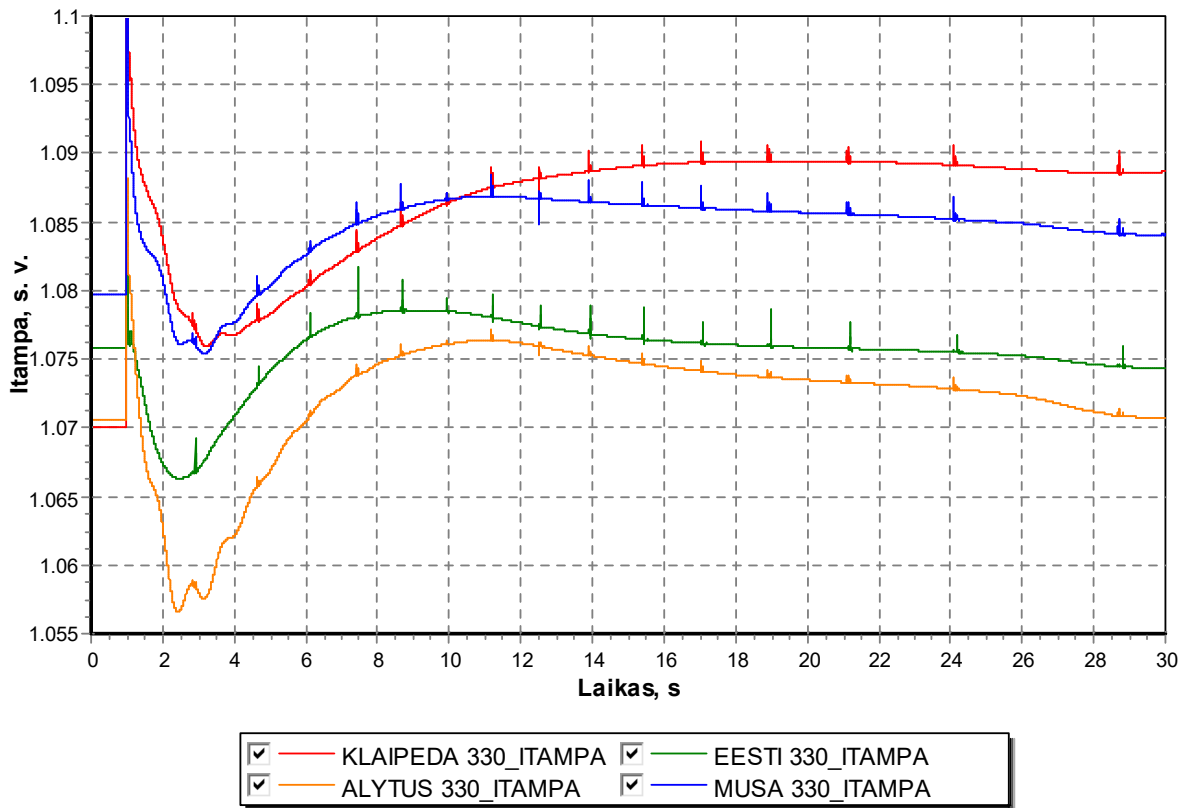
NordBalt aukštos įtampos nuolatinės srovės intarpas, kurio galia siekia 700 MW, yra didžiausia Baltijos šalių EES jungtis su kitomis EES, todėl tiriamas dažnio stabilumas jungties atsijungimo atveju. Atlikus dažnio stabilumo tyrimą buvo nustatyta, kad vasaros minimaliame režime NordBalt didžiausia perduodama galia į Lenkiją negali viršyti 270 MW galios. Jei ši jungtis atsijungia, kai yra perduodama 280 MW galia, didžiausias dažnio kritimas siekia 0,875 Hz, todėl tokio galios perdavimo sukeltas dažnio

pokytis pažeidžia dažnio stabilumo sąlygą. NordBalt perduodant 270 MW galią iš Švedijos į Lenkiją ir jam atsijungus didžiausias dažnio pokytis nustatytas po 8 sekundžių nuo bloko atsijungimo ir jo dydis siekia beveik 0,8 Hz. Dažnis per 19 sekundžių pakyla iki 49,5 Hz, todėl toks jungties atsijungimas tenkina dažnio stabilumo sąlygą. Dažnio pokytis santykiniais vienetais Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt perduodamai 260 - 280 MW galiai iš Švedijos į Lenkiją pateiktas 2.19 paveiksle.

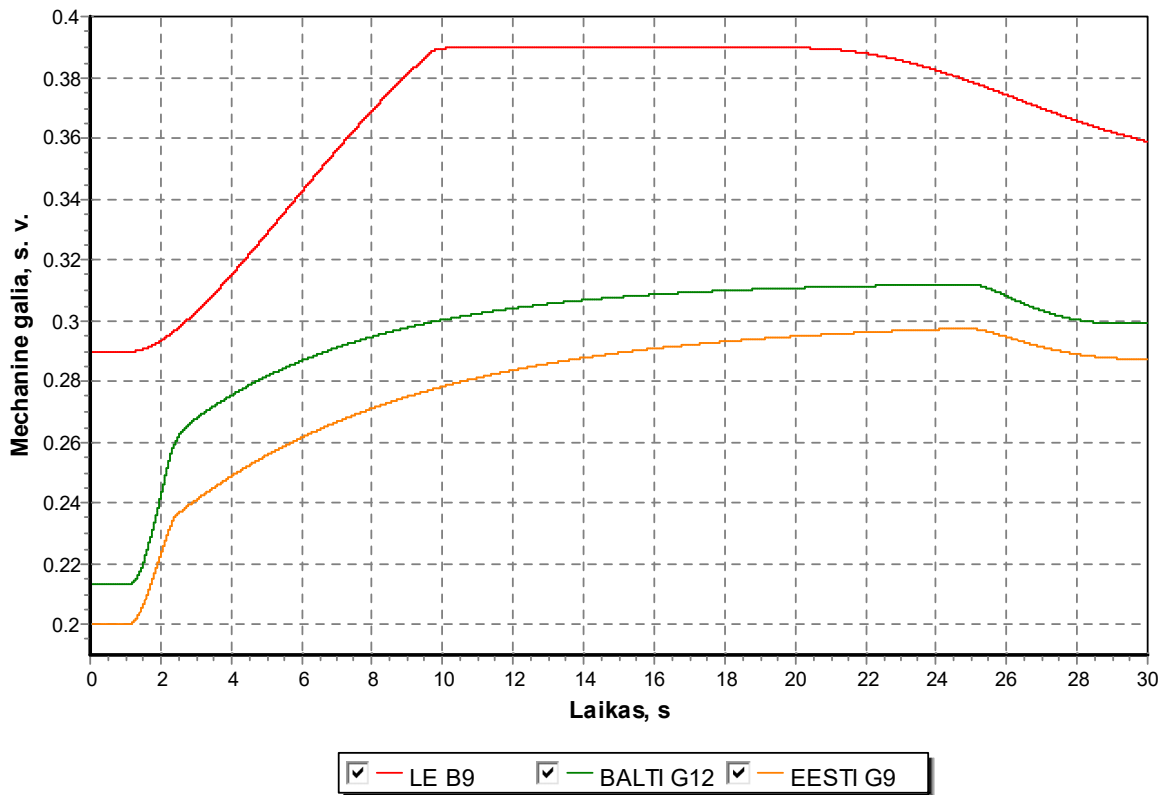


2.19 pav. Dažnio pokytis Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt: 260 – 280 MW, V_{min}

Įtampos kitimas santykiniais vienetais Baltijos šalių EES pagrindiniuose mazguose, atsijungus NordBalt keitikliui perduodant 270 MW galią į Lenkiją pateiktas 2.20 paveiksle. Nustatytas didžiausias įtampos kritimas Alytaus 330kV pastotės šynose, kuris per vieną sekundę nukrenta iki 349 kV. Toks įtampos kritimas yra leistinas. NordBalt jungties atsijungimo metu užfiksuotas 363 kV viršįtampis, tačiau jis trunka iki 100 ms, todėl šiuo atveju įtampos stabilumas nėra pažeidžiamas. Viršįtampis atsiranda dėl NordBalt vartojamos reaktyviosios galios pradiniame režime. Atsijungus jungčiai Klaipėdos mazge atsiranda reaktyviosios galios perteklius. Sistemoje nuolatos turi būti reguliuojamas ne tik aktyviosios, bet ir reaktyviosios galios balansas, o režime tai atlikti būtų sudėtinga. Todėl daroma prielaida, kad šiuo atveju viršįtampių atsiradimas gali būti atmetas. Pagrindinių BEES generatorių mechaninės galios pokytis santykiniais vienetais pateiktas 2.21 paveiksle. Šiame paveiksle matoma, kad generatorių keliama galia yra pakankama dažniui atstatyti.

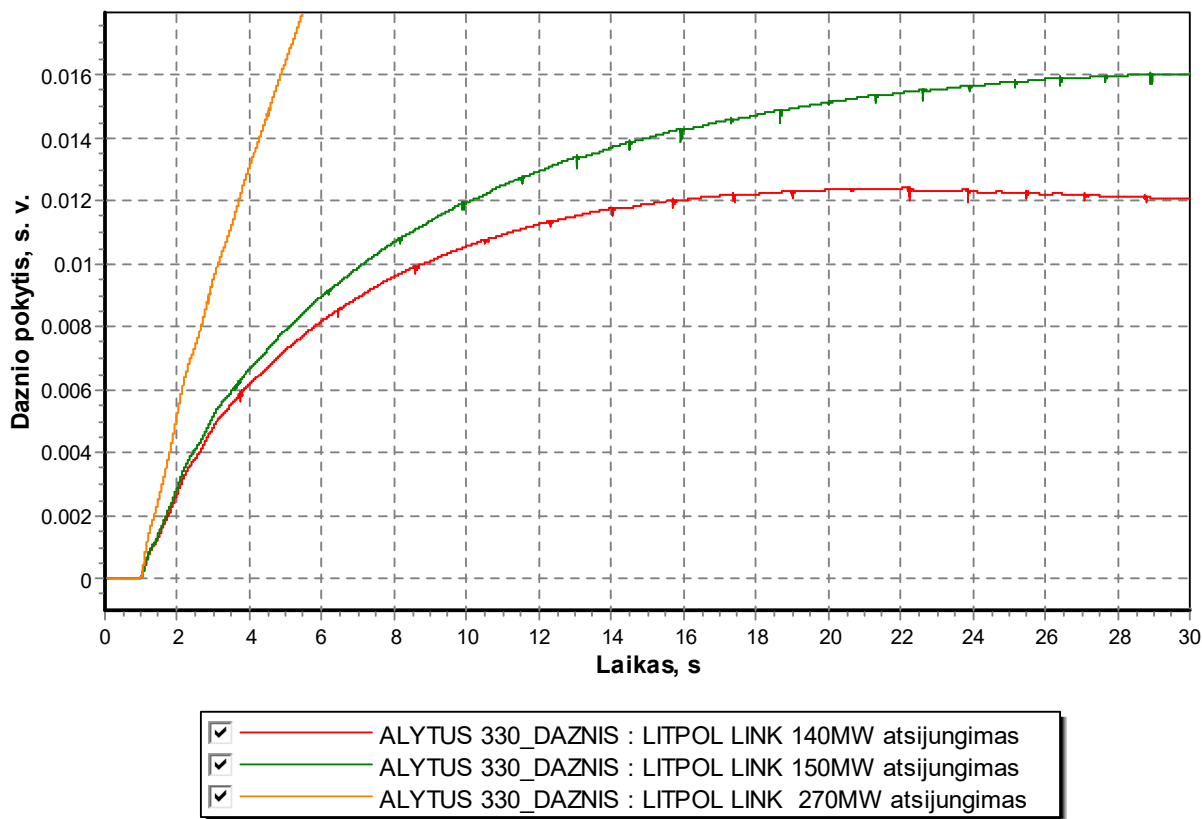


2.20 pav. Įtampos pokytis BEES mazguose atsijungus NordBalt 270 MW, Vmin režime



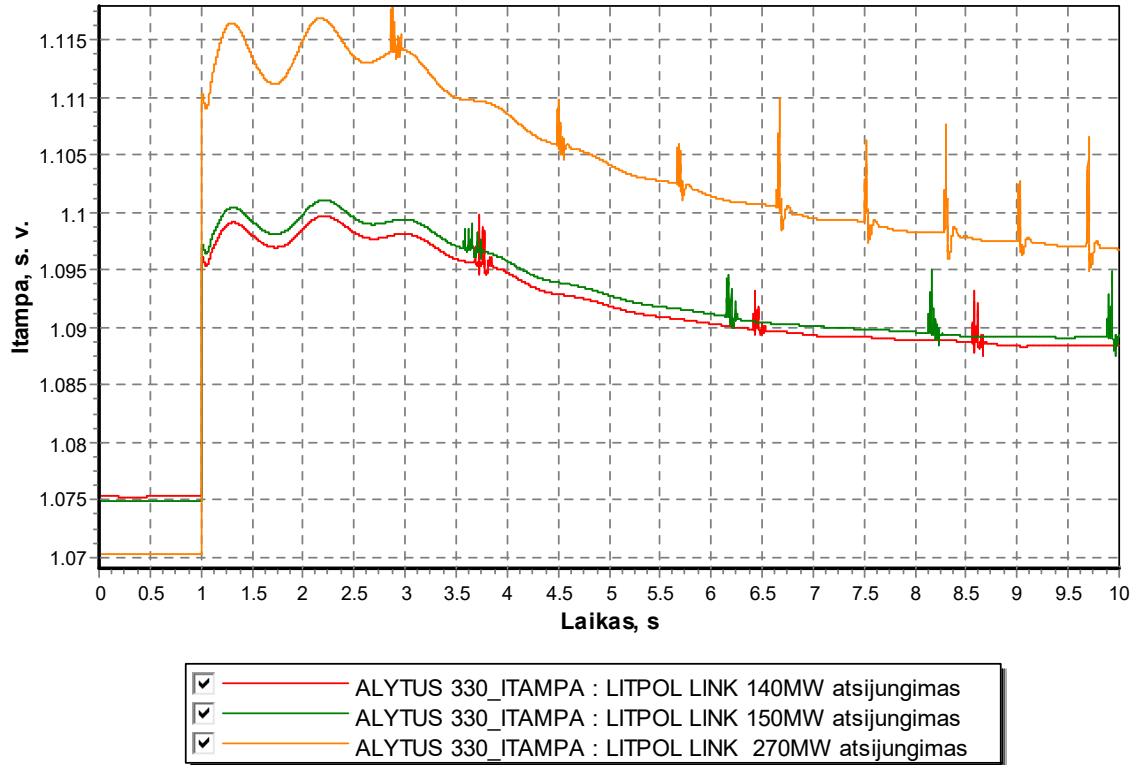
2.21 pav. BEES generatorių mechaninės galios pokytis atsijungus NordBalt 270 MW, Vmin režime

Vasaros minimaliame režime ištirtas LitPol Link keitiklio atsijungimas, kai galia perduodama į Lenkiją. Nustatyta, kad esant 270 MW galios tranzitui iš Švedijos į Lenkiją, LitPol Link keitiklio atsijungimo atveju režimas yra nestabilus tiek dažnio, tiek įtampos stabilumo atžvilgiu. Atlikus tyrimą buvo prieita išvada, kad maksimali į Lenkiją perduodama galia gali būti ne didesnė nei 140 MW. Dažnio pokytis santykiniais vienetais prie skirtingų į Lenkiją perduodamų galių pateiktas 2.22 paveiksle. Atsiradus aktyviosios galios pertekliui generatorių sukimosi greitis didėja, kai yra nepakankamas pirminio aktyviosios galios reguliavimo žemyn rezervas. Atsijungus LitPol Link keitikliui perduodant 150 MW galią į Lenkiją buvo užfiksuotas didesnis nei 0,8 Hz dažnio paaukštėjimas, todėl toks režimas yra neleistinas.

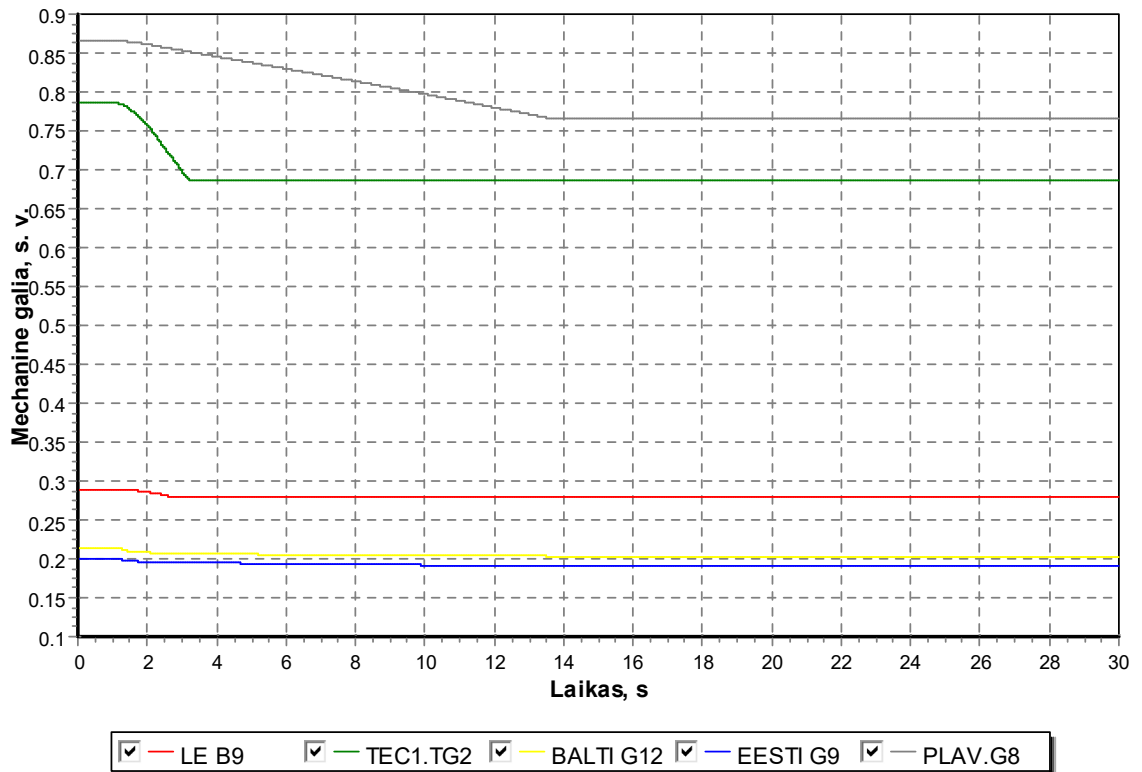


2.22 pav. Dažnio pokytis Alytaus 330kV pastotėje atsijungus LitPol Link 140, 150 ir 270 MW, Vmin

Įtampos kitimas santykiniais vienetais Alytaus 330 kV pastotėje, LitPol Link jungčiai atsijungus prie skirtingų perduodamų galių pateiktas 2.23 paveiksle. Iš šio įtampų kitimo grafiko nustatyta, kad įtampos stabilumas yra pažeidžiamas tik perduodant 270 MW galią. Šiuo atveju, LitPol Link keitiklio atsijungimo metu įtampa padidėja iki 380 kV. BEES veikiančių generatorių mechaninės galios kitimas santykiniais vienetais pateiktas 2.24 paveiksle. Kai keitiklio perduodama galia – 140 MW, dažnio stabilumas nėra pažeidžiamas, nes yra pakankamas sistemoje besisukančių generatorių reguliavimo žemyn rezervas.

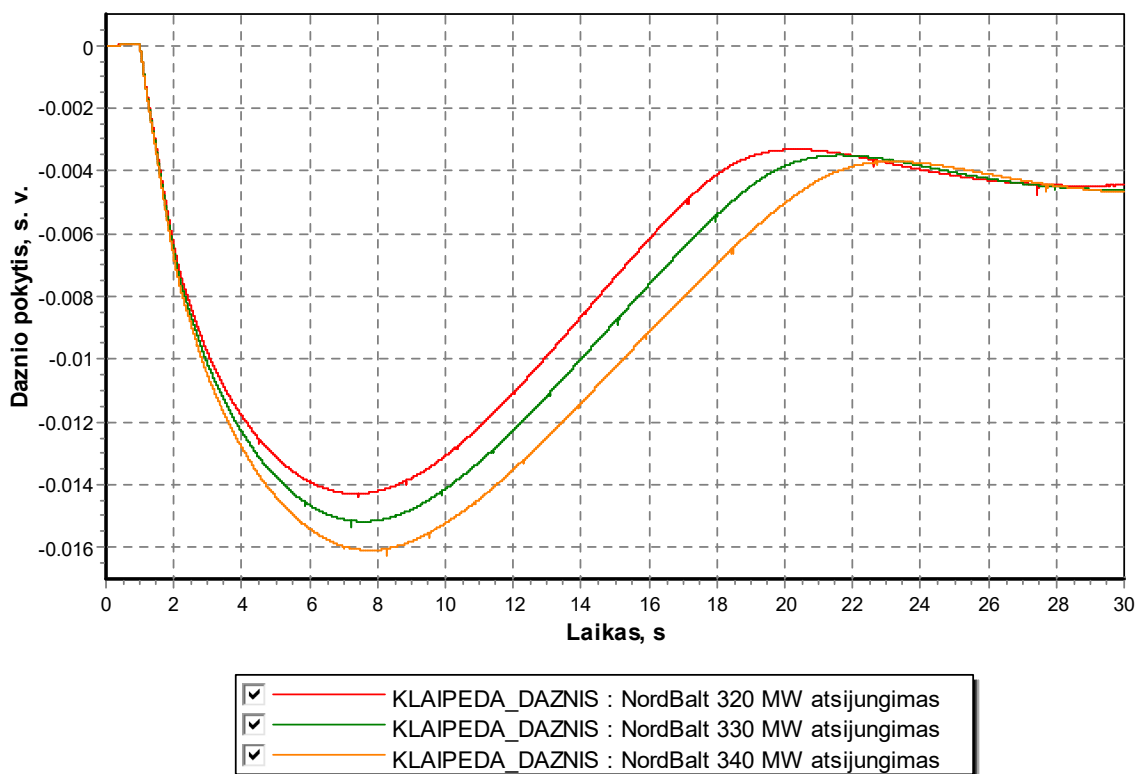


2.23 pav. Įtampos kitimas Alytaus 330kV pastotėje atsijungus LitPol Link 140, 150 ir 270 MW, Vmin



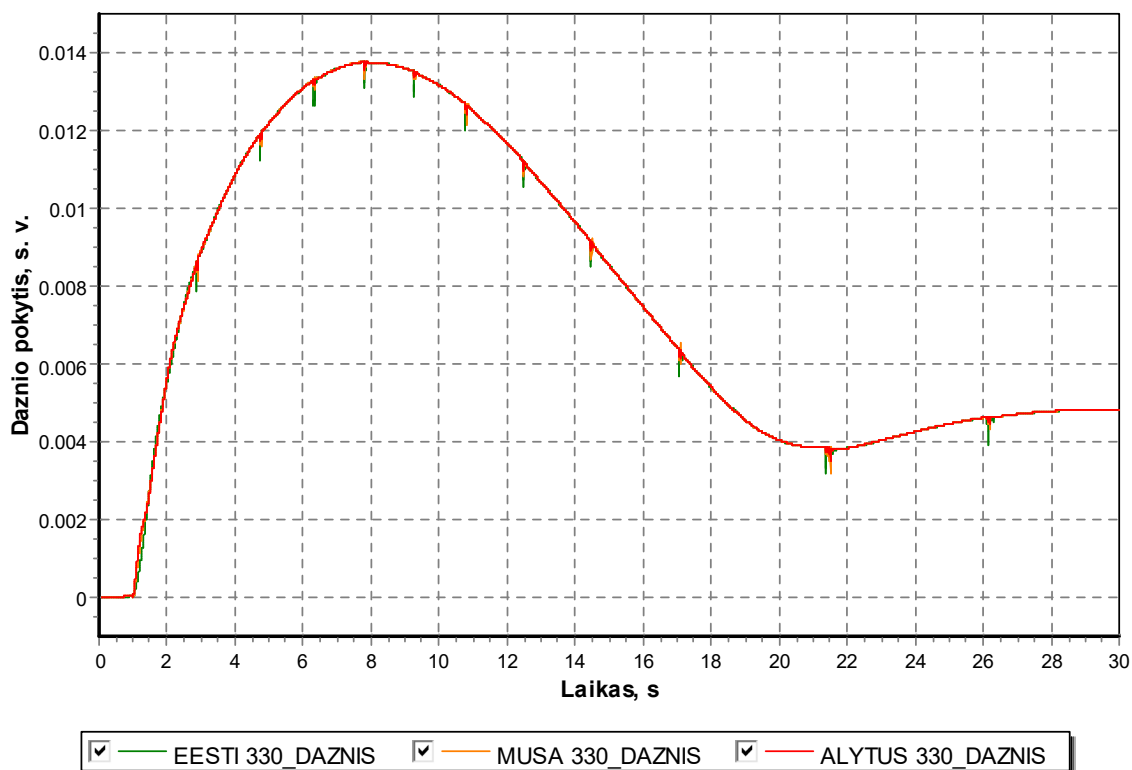
2.24 pav. BEES generatorių mechaninės galios pokytis atsijungus LitPol Link 140 MW, Vmin

Atlikus dažnio stabilumo analizę buvo nustatyta, kad vasaros maksimalių apkrovų režime NordBalt didžiausia perduodama galia į Lenkiją negali viršyti 330 MW galios. Jei ši jungtis atsijungia, kai yra perduodama 340 MW galia, dažnis krenta iki 49,18Hz, todėl tokio galios perdavimo sukeltas dažnio pokytis pažeidžia dažnio stabilumo sąlygą. NordBalt perduodant 330 MW galią iš Švedijos į Lenkiją ir jam atsijungus, didžiausias dažnio pokytis nustatytas po 6,5 sekundės nuo jungties atsijungimo. Didžiausias dažnio pokytis 0,75 Hz. Dažnis per 13 sekundžių pakyla iki 49,5 Hz, todėl toks jungties atsijungimas tenkina dažnio stabilumo sąlygą. Dažnio pokyčio santykiniais vienetais kreivės Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt perduodamai 320 - 340 MW galiai iš Švedijos į Lenkiją pateiktos 2.25 paveiksle.



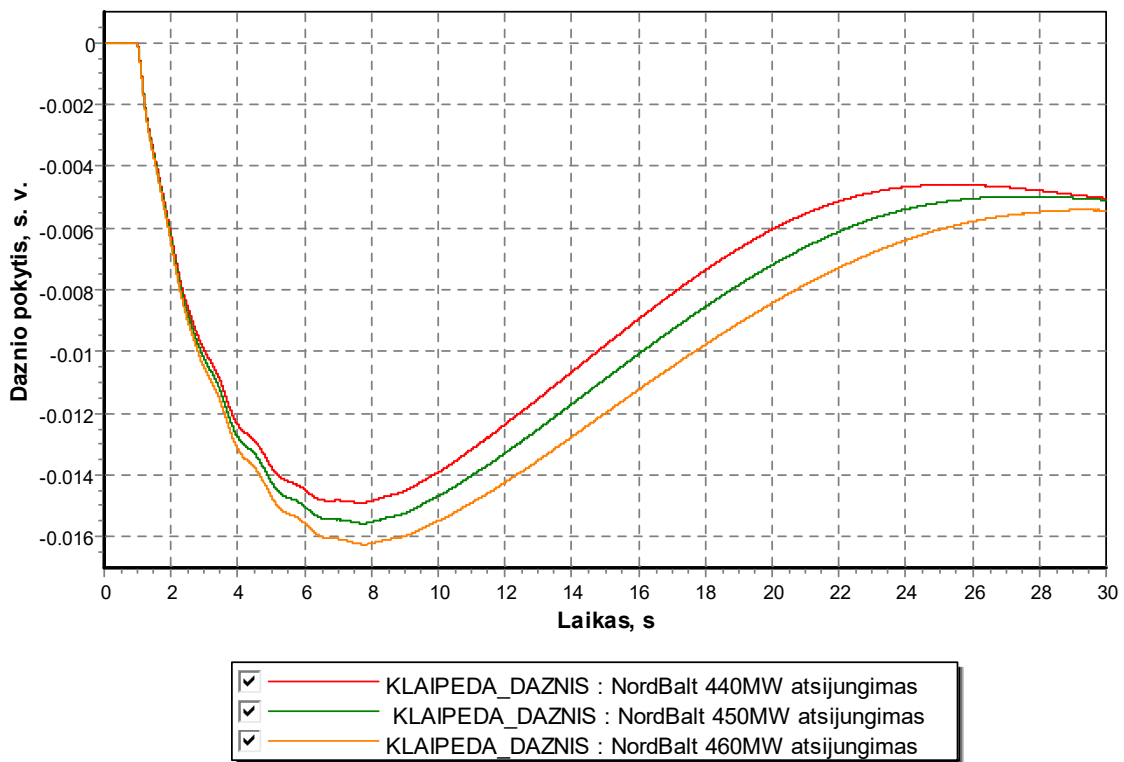
2.25 pav. Dažnio pokytis Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt: 320 -340 MW, Vmax

Vasaros maksimalių apkrovų režime sumodeliuotas LitPol Link keitiklio atsijungimas, kai galia perduodama į Lenkiją. Nustatyta, kad perduodant visą maksimaliai leistinos galios srautą (330 MW) iš Švedijos į Lenkiją, LitPol Link keitiklio atsijungimo atveju režimas yra galimas dažnio stabilumo požiūriu. Dažnio pokyčio santykiniais vienetais BEES mazguose kreivės, atsijungus LitPol Link keitikliui perduodant 330 MW galią į Lenkiją pateiktos 2.26 paveiksle. LitPol Link keitikliui perduodant 330 MW galią į Lenkiją užfiksuotas 0,675 Hz dažnio padidėjimas.

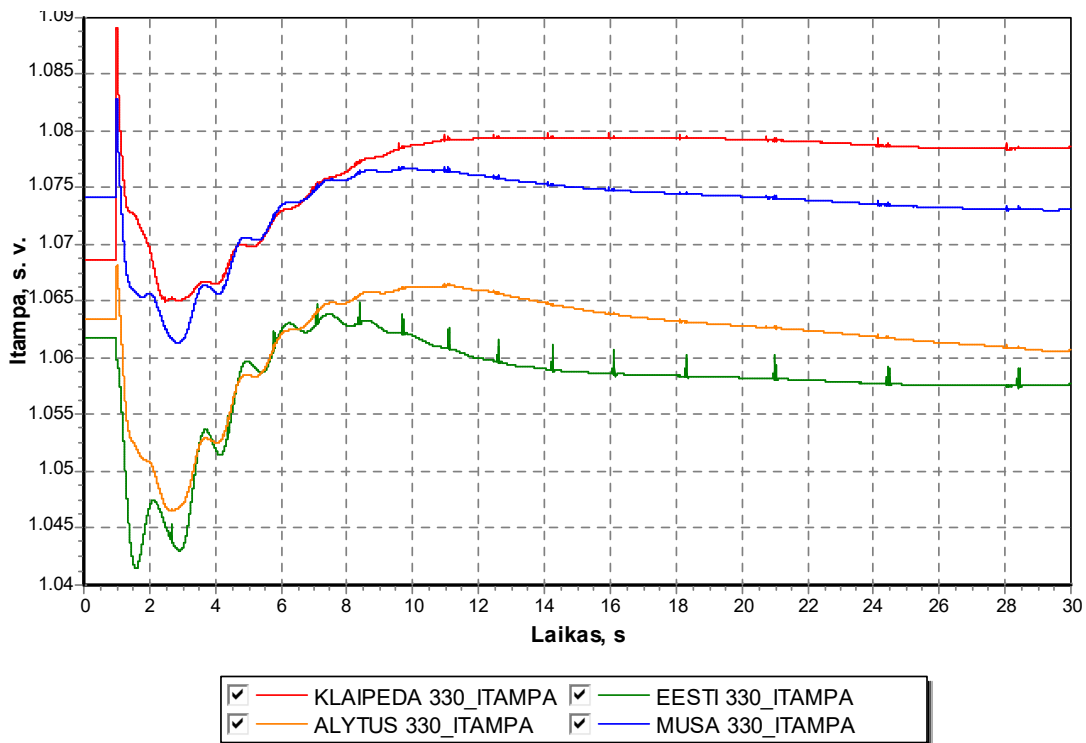


2.26 pav. Dažnio pokytis BEES mazguose, atsijungus LitPol Link 330 MW, Vmax režime

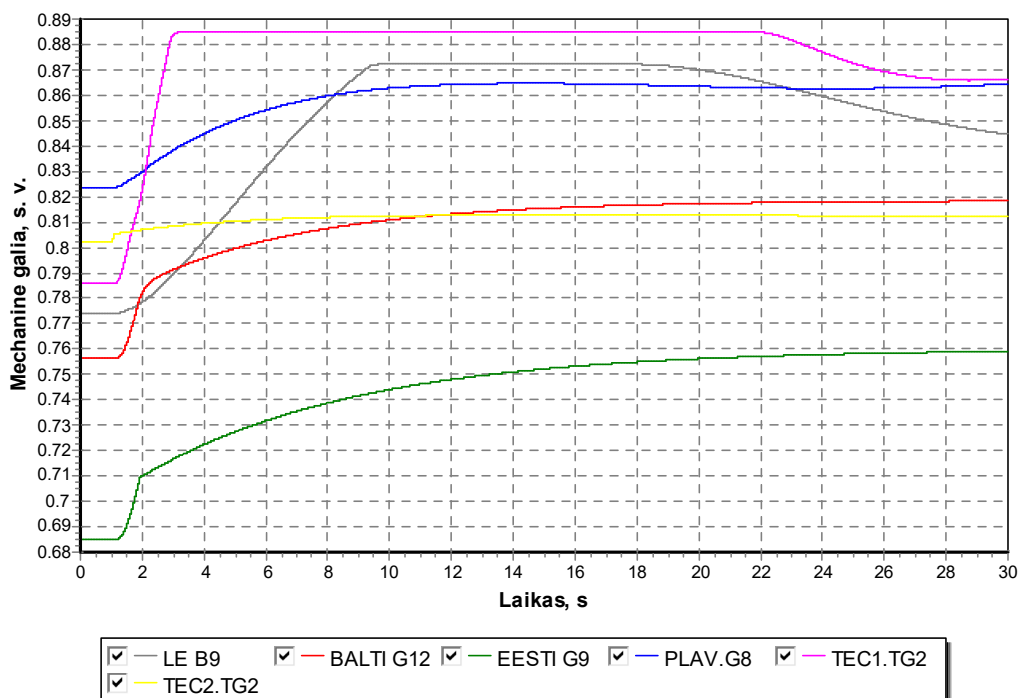
Nustatyta, kad žiemos maksimalių apkrovų režime NordBalt didžiausia perduodama galia į Lenkiją negali viršyti 450 MW galios. Jei jungtis atsijungia, kai yra perduodama 460 MW galia, dažnis pamažėja 0,815 Hz. Toks dažnio pokytis pažeidžia dažnio dinaminio stabilumo sąlygą. NordBalt perduodant 450 MW galią iš Švedijos į Lenkiją ir jam atsijungus didžiausias dažnio pokytis (0,775 Hz) nustatytas po 7 sekundžių nuo bloko atsijungimo. Dažnis per 15 sekundžių padidėja iki 49,5 Hz. Toks jungties atsijungimas nepažeidžia dinaminio stabilumo. Dažnio pokyčio santykiniais vienetais kreivės Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt perduodamai 440 - 460 MW galiai iš Švedijos į Lenkiją pateiktos 2.27 paveiksle. Įtampos kitimo santykiniais vienetais kreivės, kai NordBalt atsijungia prie 450 MW perduodamos galios pateiktos 2.28 paveiksle. Šiose kreivėse matomi įtampų svyravimai, tačiau po 10 sekundžių pereinamojo proceso įtampos svyravimai nusistovi. Įtampos lygiai kinta leistinose ribose. Baltijos šalių EES generatorių galia yra didinama, o jų pirminis aktyviosios galios rezervas yra pakankamas galios deficitui padengti, todėl dažnio mažėjimas yra sustabdomas. Generatorių mechaninės galios kitimo kreivės pateiktos 2.29 paveiksle.



2.27 pav. Dažnio pokytis Klaipėdos 330kV pastotėje atsijungus NordBalt: 440 -450 MW, \checkmark_{max}

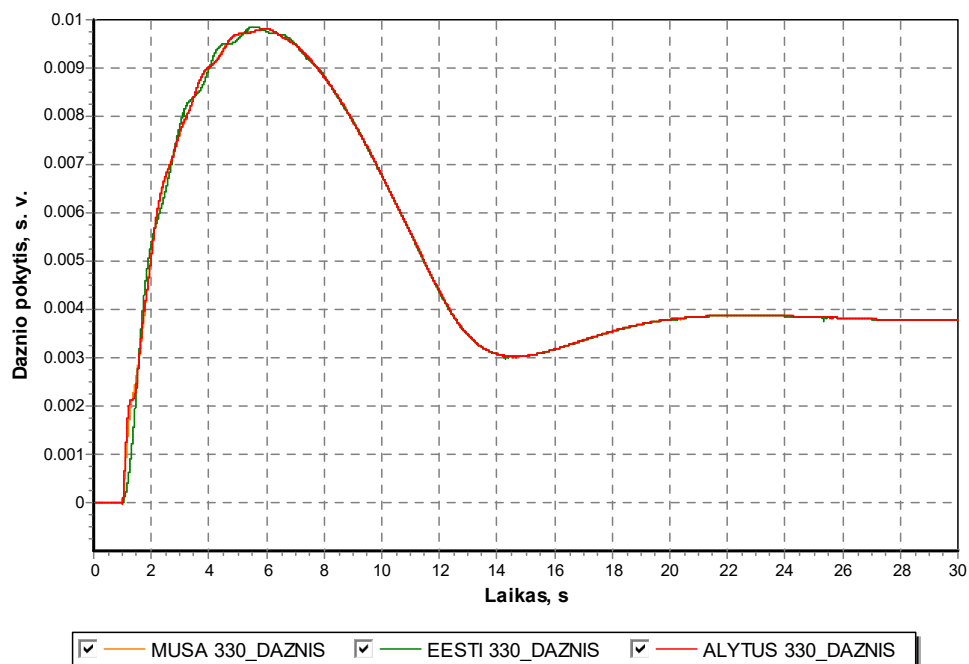


2.28 pav. Įtampos pokytis BEES 330kV mazguose atsijungus NordBalt 450 MW, \checkmark_{max} režime



2.29 pav. BEES generatorių mechaninės galios pokytis atsijungus NordBalt 450 MW, Žmax režime

Žiemos maksimalių apkrovų režime sumodeliuotas LitPol Link keitiklio atsijungimas, kai galia perduodama į Lenkiją. Nustatyta, kad perduodant visą maksimaliai leistinos galios srautą (450 MW) iš Švedijos į Lenkiją, LitPol Link keitiklio atsijungimo atveju režimas yra galimas dažnio stabilumo požiūriu. Dažnio pokyčio santykiniais vienetais BEES mazguose kreivės, atsijungus LitPol Link keitikliui perduodant 450 MW galią į Lenkiją pateiktos 2.30 paveiksle. LitPol Link keitikliui perduodant 450 MW galią į Lenkiją užfiksuotas 0,5 Hz dažnio padidėjimas.



2.30 pav. Dažnio pokytis BEES mazguose, atsijungus LitPol Link 450 MW, Žmax režime

Ištyrus NordBalt bei LitPol Link keitiklių atsijungimą Baltijos šalių izoliuotoje elektros energetikos sistemoje, nustatytos ribinės elektros importo bei eksporto galimybės, kai atsijungia vienas iš keitiklių. Vasaros minimalaus, vasaros maksimalaus bei žiemos maksimalaus režimų apibendrinti dažnio stabilumo tyrimo rezultatai pateikti 2.6 lentelėje. Didesnės galios perdavimas į Lenkiją už importą iš Švedijos tiriamas nebuvo, nes daroma prielaida, kad kainų lygiai elektros biržoje 2017 - 2018 metais bus panašūs kaip ir 2016 metais. O 2016 metų pirmajame ketvirtyje Lenkijoje elektros kainos buvo didesnės nei Lietuvoje. Tokiu atveju elektros perdavimas ribojamas, didžiausiu importuojamos elektros iš Skandinavijos dydžiu.

2.6 lentelė. Dažnio stabilumo tyrimo rezultatai įvertinus elektros importo bei eksporto galimybes

Režimas	Vasaros minimalus	Vasaros maksimalus	Žiemos maksimalus
Ribinė NordBalt importuojama galia, MW	270	330	450
Ribinė LitPol Link eksportuojama galia, MW	140	330*	450*

* - didesnės galios perdavimas į Lenkiją nei galimas importas iš Švedijos tiriamas nebuvo.

2.4.2. Baltijos šalių EES generatorių stabilumo tyrimas

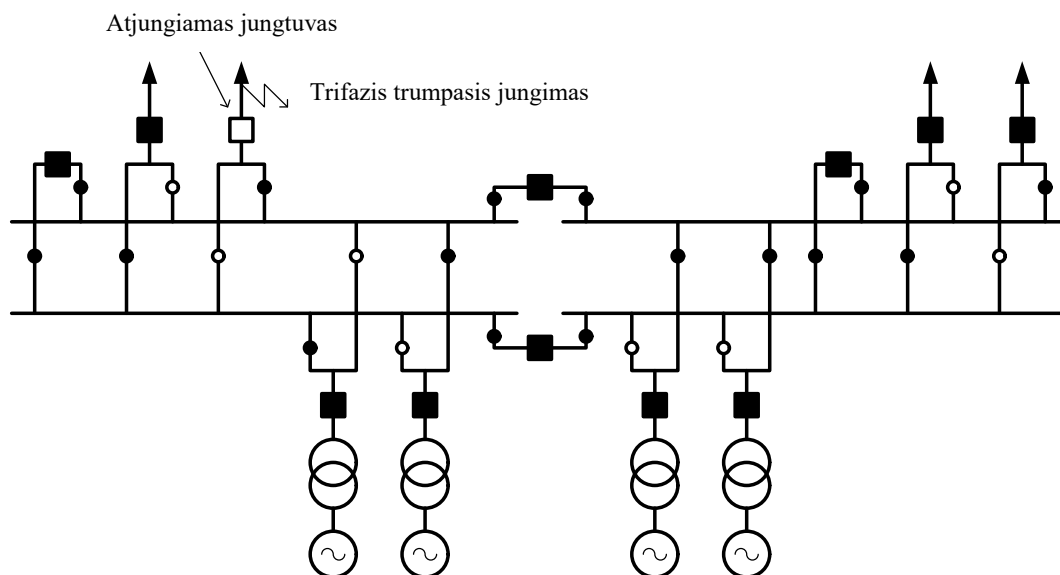
Generatorių stabilumo modeliavimui parinkti svarbiausi Baltijos šalių EES generatoriai, tam kad patikrinti ar išpildomi jų stabilumo reikalavimai. Šiame tyrime Baltijos šalių izoliuota EES turi būti balanse, o papildomiems tyrimams bus patikrinta tranzito per Lietuvą, iš Švedijos į Lenkiją, įtaka. Priimama prielaida kad, visais apkrovų režimais (vasaros minimalių, vasaros maksimalių bei žiemos maksimalių) tinko schema bus normalių sujungimų, o generatoriai veiks pamažinta galia, priklausomai konkretaus režimo atveju. Generatorių veikimo dinaminėse sąlygose įvertinti jų įmagnetinimo lygiai ir trumpo jungimo galios pasikeitimai, priklausomai nuo apkrovų ir generacijos režimo. Tam kad surasti Baltijos šalių EES generatorių stabilumo ribas, trumpojo jungimo atjungimo laikas bus pailgintas iki 250 ms, nors normaliai trumpasis jungimas daugumoje elektrinių atjungiamas per 100 ms. Papildomai, nustatant sunkiausią trikdį, trifazis trumpasis jungimas bus modeliuojamas prie elektrinės šynų, labiausiai apkrautoje linijoje. Taip bus įvertinta didžiausia trumpojo jungimo srovė. Modeliuojant pereinamąjį procesą, po įvykusio trumpojo jungimo, šis bus pašalinamas kartu atjungiant ir labiausiai apkrautą liniją. Tiriant generatorių stabilumą stebimi šie matavimai:

- santykinis generatorių rotorius kampas;
- generatorių elektrinė galia;
- įtampa pagrindiniuose sistemos mazguose.

2.4.2.1. Lietuvos elektrinės stabilumo styrimas

Lietuvos elektrinės 330 kV pastotėje yra keturios šynų sekcijos. Kiekviena šynų sekcija yra

sujungta tarpusavyje per tarpšyningus jungtuvus, kurie normaliai uždaryti. Tai reiškia, kad 330 kV trumpasis jungimas arti elektrinės šynų sukels įtampų kritimą visose šynose. Lietuvos elektrinės schema pateikta 2.31 paveiksle. Prie kiekvienų šynų yra prijungtas vienas arba du generatoriai bei viena ar dvi perdavimo linijos. Tačiau modeliuojamose scenarijuose vertinama, kad tik vienas LE G9 blokas bus veikiantis. Trumpojo jungimo metu generatorius yra greitinamas, o kuo ilgiau generatorius yra greitinamas, tuo didesnė tikimybė, kad generatorius praras sinchronizmą su kitais sistemos generatoriais. Modeliuojant trifazį trumpąjį jungimą, po jo seka labiausiai apkrautos linijos atjungimas. Labiausiai apkrautos linijos, kurios modeliavime buvo atjungtos po trumpojo jungimo pateiktos 2.7 lentelėje.



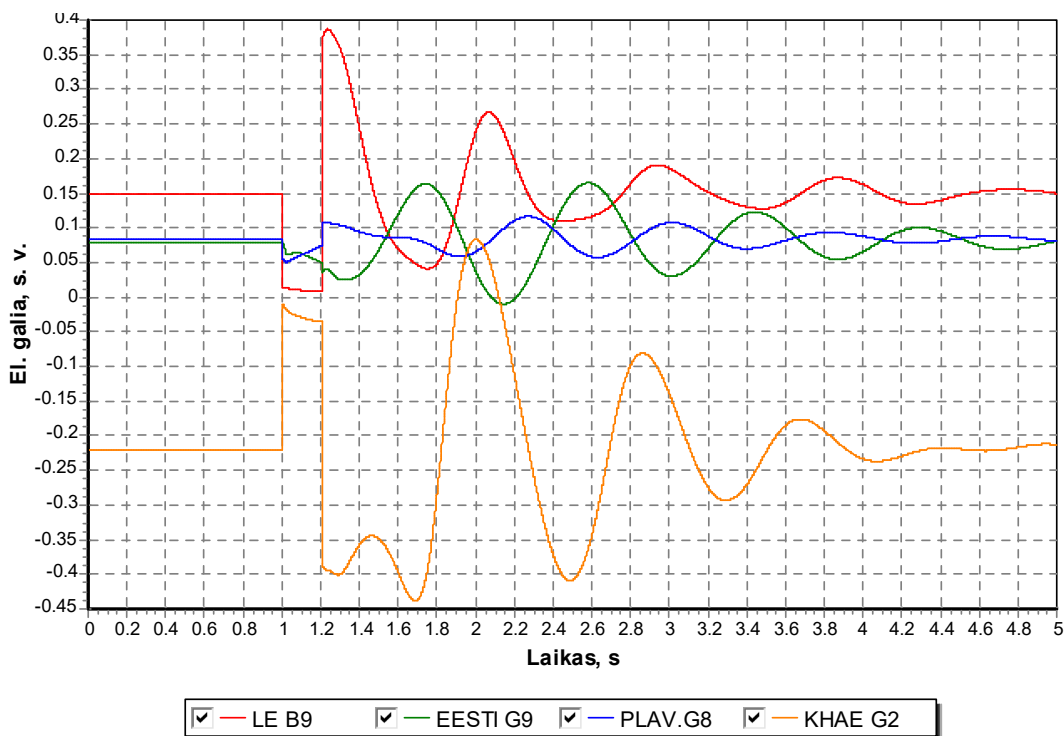
2.31 pav. Lietuvos elektrinės 330 kV pastotės schema su modeliuojamu trumpuoju jungimu

2.7 lentelė. Prie Lietuvos elektrinės prijungtos labiausiai apkrautos linijos pradiniuose režimuose

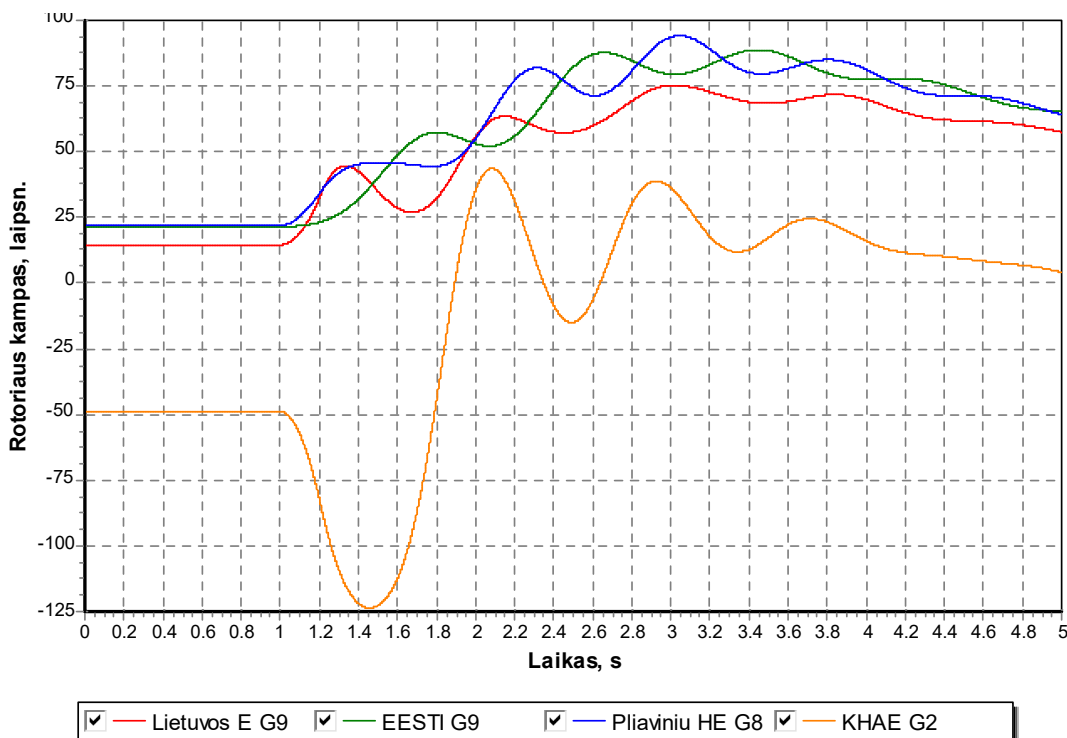
Režimas	Vasaros minimalus	Vasaros maksimalus	Žiemos maksimalus
Labiausiai apkrauta linija	Vilnius – Lietuvos E	Vilnius – Lietuvos E	Jonava – Lietuvos E
Linijos apkrautumas, MW	102	238	296

Sumodeliavus trumpąjį jungimą prie Lietuvos elektrinės šynų, po kurio atjungta labiausiai apkrauta Vilnius – Lietuvos E 330 kV linija, buvo nustatytas ribinis 205 ms trumpojo jungimo atjungimo laikas, vasaros minimalių apkrovų režime. Trumpojo jungimo atjungimo po 205 ms atveju pastebimi galių svyravimai, tačiau per 5 sekundes šie svyravimai nusistovi (2.32 pav.). Didžiausi galių svyravimai yra tų elektrinių, prie kurių įvyksta trumpasis jungimas, šiuo atveju Kruonio HAE ir Lietuvos elektrinės. Nutolusių elektrinių galių svyravimai taip pat pastebimi, tačiau jų amplitudė daug mažesnė. Lietuvos E, EESTI E bei Pliavinių HE generatorių reliatyvus rotorių kampų kitimas pateiktas 2.33 paveiksle. Pastebėta, kad skirtingose sistemos mazguose prijungtų elektrinių rotorių kampai kinta tolygiai vienas

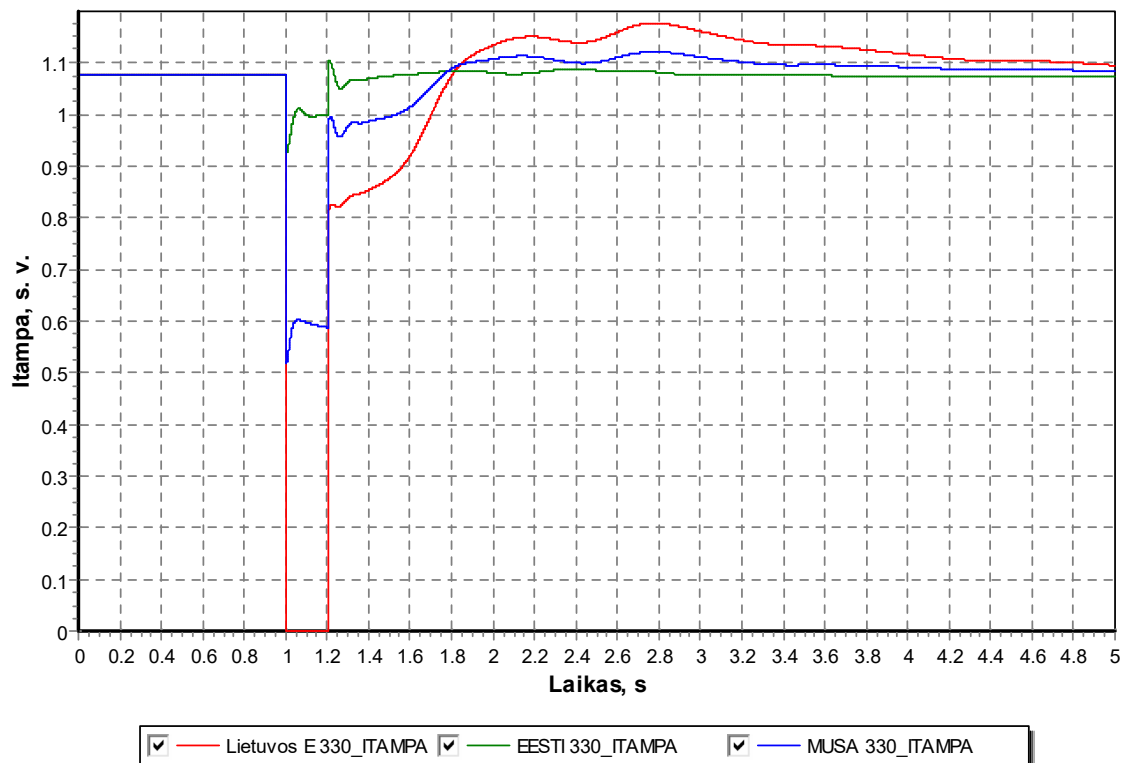
kito atžvilgiu, todėl galima teigti jog sinchroninis generatorių darbas nėra prarandamas. Įtampa Lietuvos elektrinės 330 kV šynose prieš trumpąjį jungimą siekė 355 kV, trumpojo jungimo metu įtampa nukrenta iki 0 kV, o atjungus trumpąjį jungimą pereinamojo proceso metu įtampa viršija didžiausią leistiną įtampą, tačiau per 2,5 sekundės nusistovi leistinose įtampos ribose.



2.32 pav. BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 205 ms, V_{min}

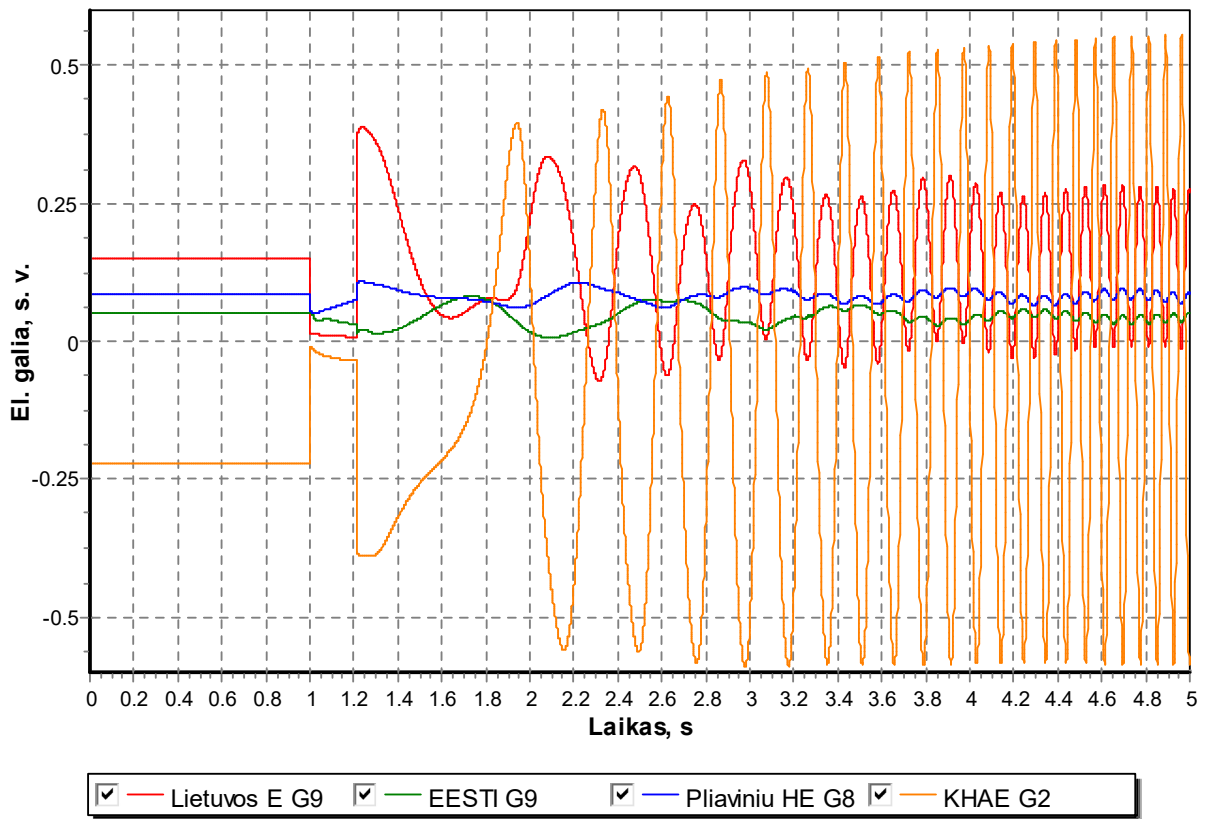


2.33 pav. BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 205 ms, V_{min}

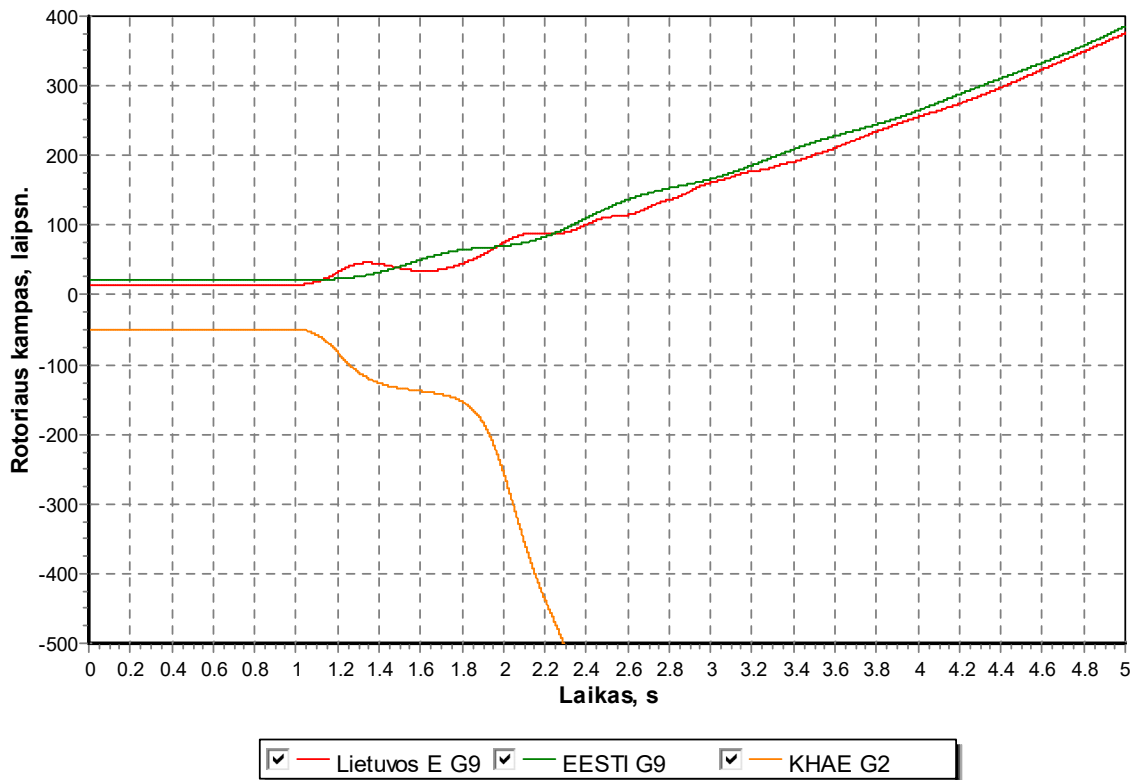


2.34 pav. BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 205 ms, V_{min}

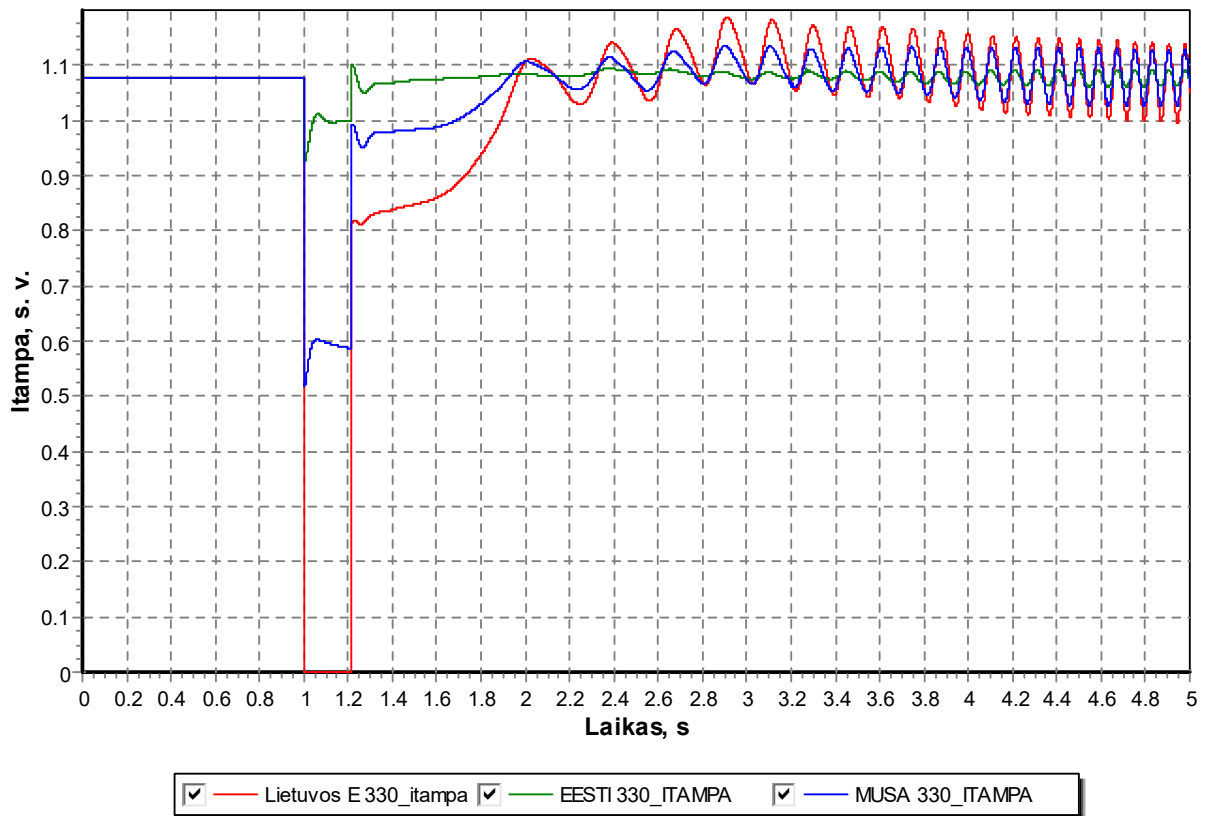
Vasaros minimalių apkrovų režime, Lietuvos elektrinės šynose, trumpojo jungimo atjungimo po 210 ms atveju, užfiksuoti galios svyravimai kurių amplitudė didėja. (2.35 pav.). Nustatyta, kad didžiausia Kruonio HAE veikiančio siurblio režimu bei Lietuvos elektrinės generatoriaus galios svyravimų amplitudė atsiranda dėl Kruonio HAE prarasto sinchronizmo. Lietuvos E, EESTI E, Pliavinių HE bei Kruonio HAE generatorių reliatyvus rotorių kampų kitimas pateiktas 2.36 paveiksle. Pastebėta, kad skirtingose sistemos mazguose prijungtų elektrinių rotorių kampai kinta tolygiai vienas kito atžvilgiu, išskyrus Kruonio HAE, todėl galima teigti jog sinchroninis KHAE agregato darbas yra prarandamas su kitais sistemos generatoriais. Praktikoje toks agregatas būtų atjungiamas nuo sistemos. Įtampos svyravimai sistemoje atsiranda dėl to paties agregato asinchroninės darbo eigos (2.37 pav.). Kuo ilgiau tęsiasi asinchroninis elektrinių darbas, tuo svyravimų dažnis didėja.



2.35 pav. BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 210 ms, V_{min}

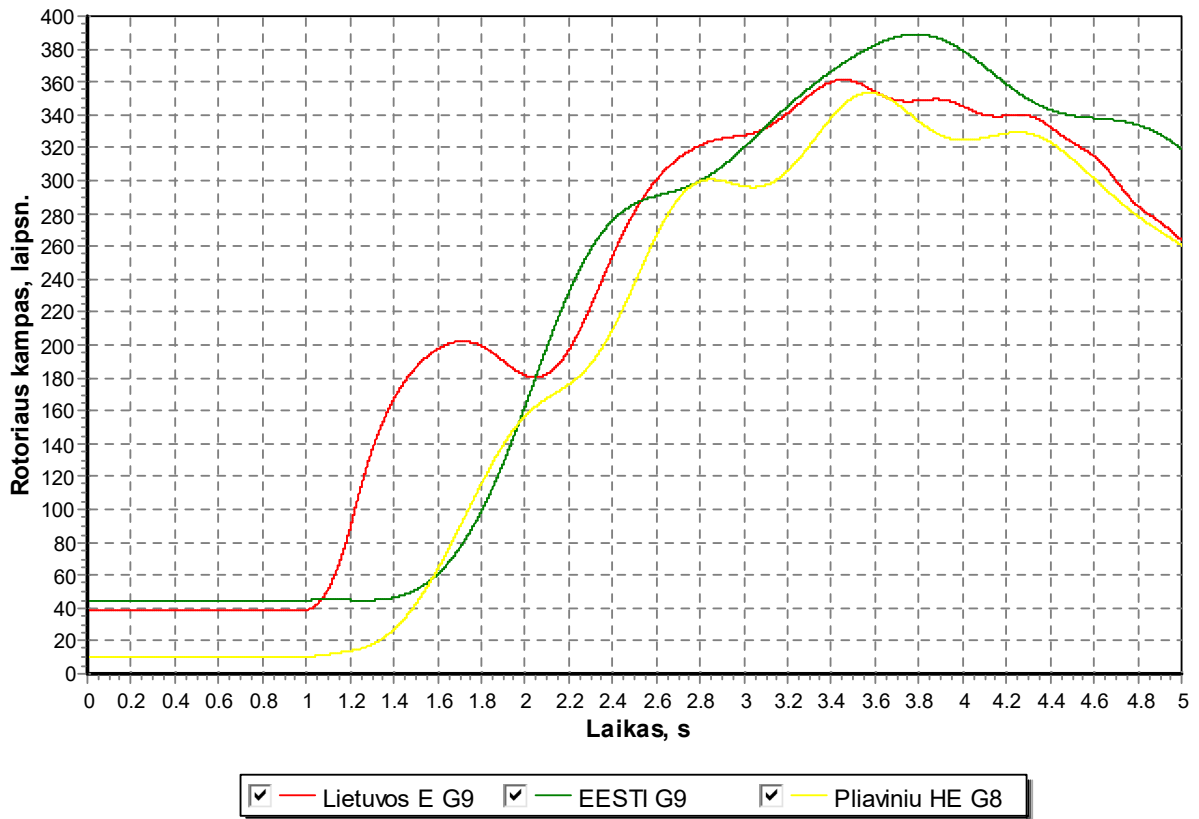


2.36 pav. BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 210 ms, V_{min}

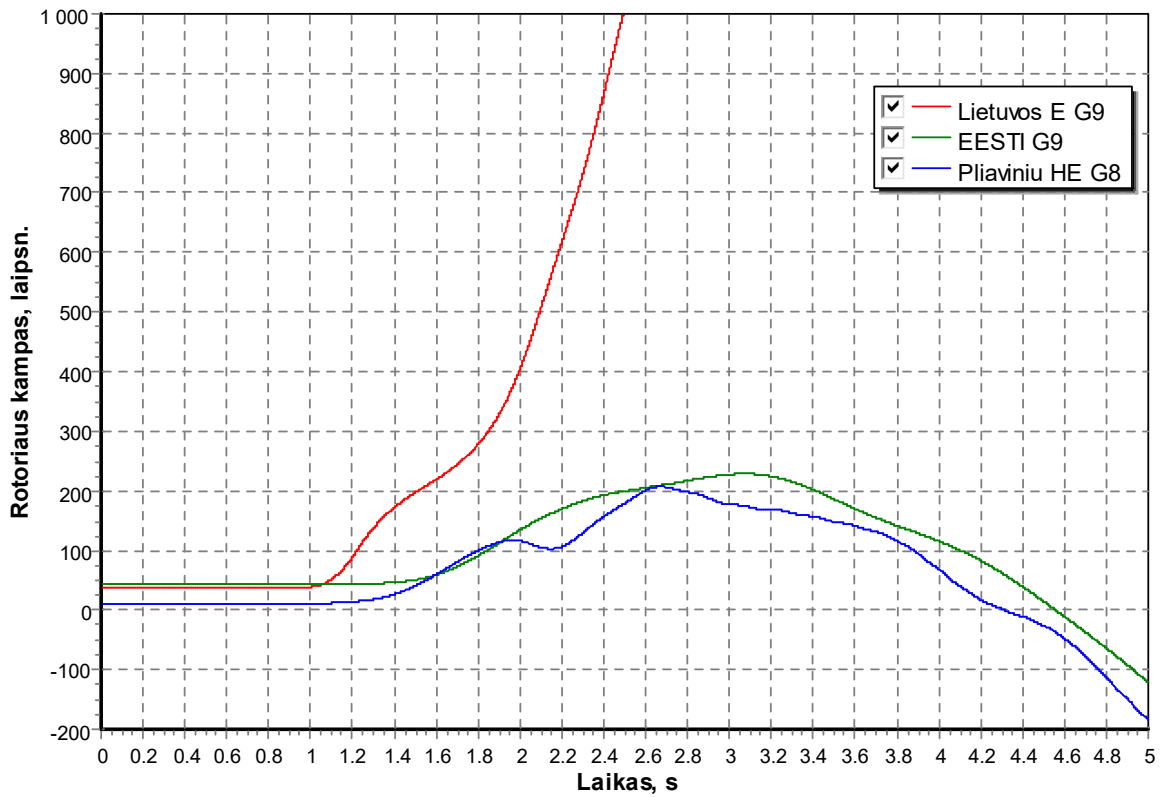


2.37 pav. BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 210 ms, V_{min}

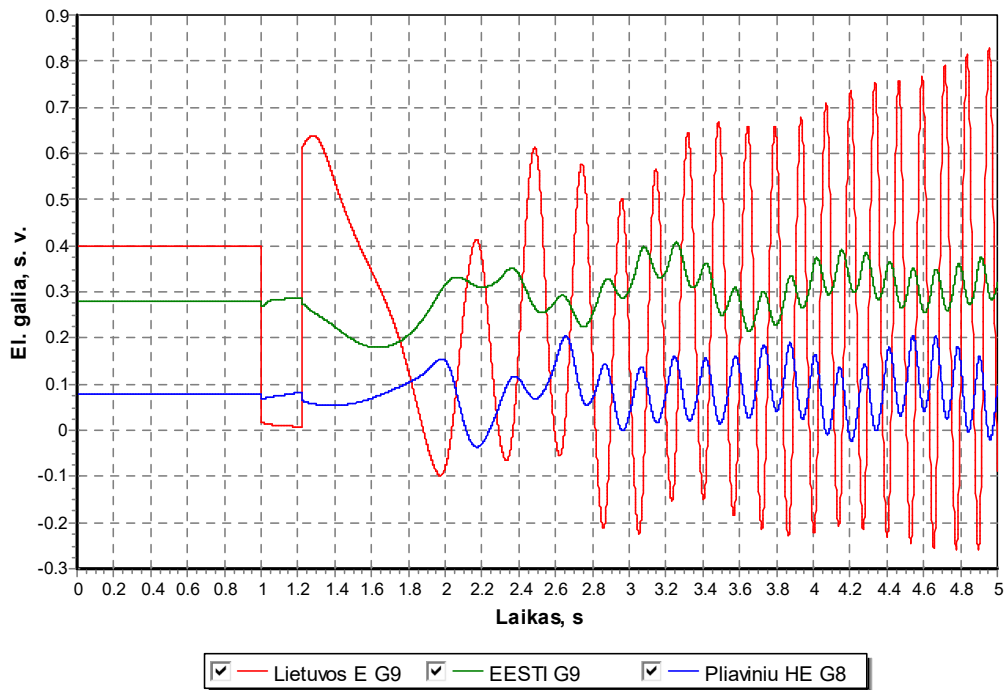
Sumodeliavus trumpąjį jungimą žiemos maksimalių apkrovų režime prie Lietuvos elektrinės šynų, po kurio atjungta labiausiai apkrauta Jonava – Lietuvos E 330 kV linija, buvo nustatytas ribinis 215 ms trumpojo jungimo atjungimo laikas. Trumpojo jungimo atjungimo po 215 ms atveju pastebėta, kad skirtingose sistemos mazguose prijungtų elektrinių rotorų kampai kinta tolygiai vienas kito atžvilgiu, todėl galima teigti jog sinchroninis generatorių darbas nėra prarandamas. (2.38 pav.). Pailginus trumpojo jungimo atjungimo laiką iki 220 ms buvo nustatyta, kad atsiranda generatorių generuojamos galios bei įtampų švytavimai. Tai nutinka dėl Lietuvos elektrinės generatoriaus prarasto sinchroninio darbo su kitais sistemos generatoriais – prarandamas rotoriaus kampo stabilumas. Baltijos šalių generatorių rotoriaus kampų reliatyvaus kitimo kreivės pateiktos 2.39 paveiksle. Šio nestabilaus režimo įtampų bei galios atsirandantys švytavimai pavaizduoti 2. 40 bei 2.41 paveiksluose.



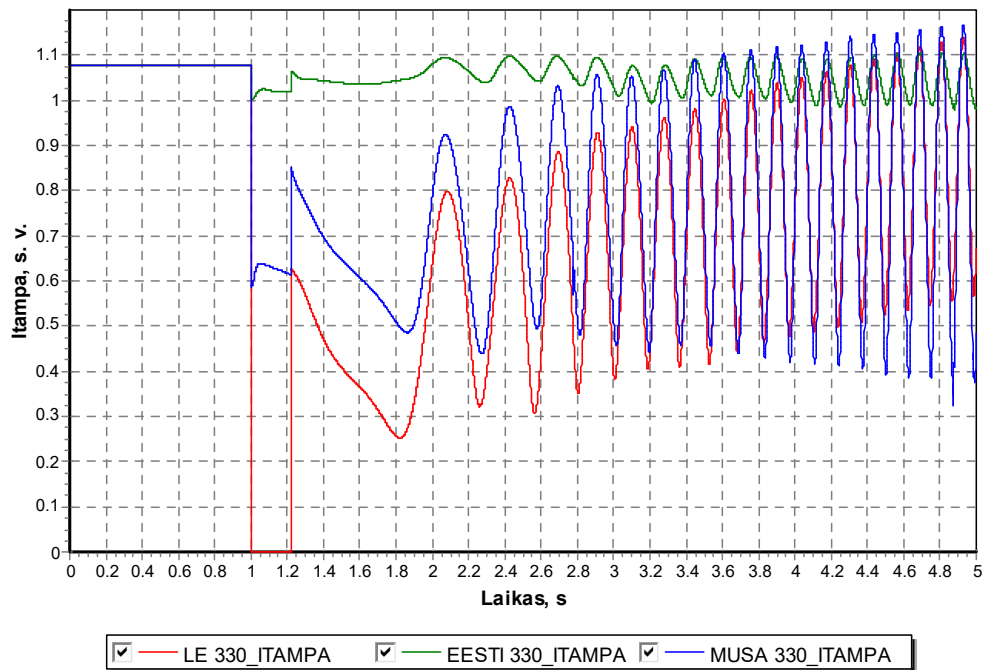
2.38 pav. BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 215 ms, \checkmark_{max}



2.39 pav. BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie LE - 220 ms, \checkmark_{max}



2.40 pav. BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 220 ms, \checkmark_{max}



2.41 pav. BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie LE - 220 ms, \checkmark_{max}

Išanalizavus Lietuvos elektrinės rotoriaus kampo stabilumą visais režimų variantais buvo nustatyta, kad yra tenkinamas trumpojo jungimo atjungimo laikas, nes trumpasis jungimas Lietuvos elektrinės jungtuvų būtų atjungiamas per 100 ms. Trumpojo jungimo atjungimo laikai taip pat tenkina ir ENTSO-E keliamus reikalavimus elektros generatoriams pagal kuriuos trumpojo jungimo atjungimo

laikas turi būti ribose nuo 140 ms iki 250 ms. Ilgiausias trumpojo jungimo atjungimo laikas nustatytas vasaros minimalių apkrovų režime, kai generatoriai veikia minimaliai apkrauti, o Lietuvoje Kruonio HAE veikia du agregatai siurblio režimu. Šiuo atveju prarandamas sinchronizmas ne paties Lietuvos elektrinės generatoriaus, o Kruonio HAE agregato. Vasaros maksimalių apkrovų režime buvo nustatyta, kad net trumpąjį jungimą atjungus po 250 ms, visi sistemos generatoriai lieka dirbti sinchroniškai. Žiemos maksimalių apkrovų režime trumpojo jungimo laikas buvo galimas šiek tiek ilgesnis nei vasaros minimalių apkrovų metu, kuomet sinchronizmo neteko pats Lietuvos elektrinės generatorius. Apibendrinti Lietuvos elektrinės trumpojo jungimo atjungimo laikai skirtingais režimais pateikti 2.8 lentelėje.

2.8 lentelė. Lietuvos elektrinės trumpojo jungimo atjungimo ribinių laikų apibendrinti rezultatai

Režimas	Vasaros minimalus	Vasaros maksimalus	Žiemos maksimalus
Trumpojo jungimo atjungimo laikas, ms	205	250	215

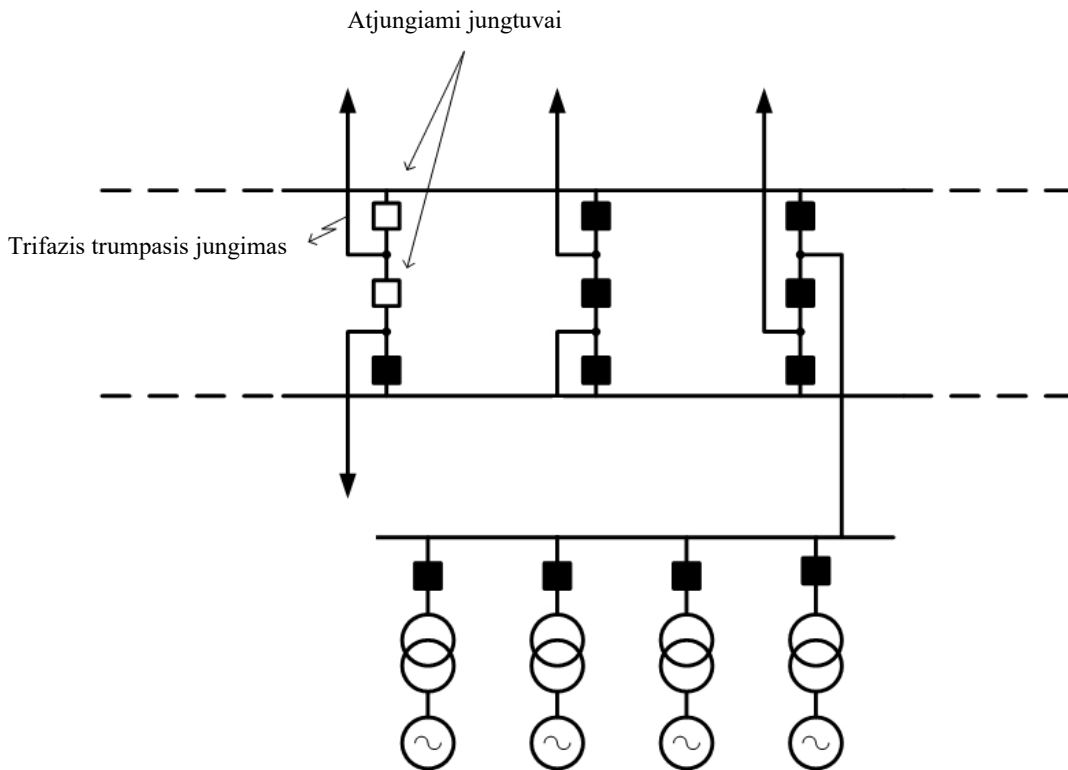
2.4.2.2. Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės stabilumo tyrimas

Kruonio HAE 330 kV pastotėje visi keturi generatoriai yra prijungti prie vienu šynų. 2020 metais įrengus planuojamą penktąjį generatorių schema būtų pertvarkyta į pusantrinę jungtuvų schemą. Tuomet du generatoriai būtų prijungti prie vienu šynų, o kiti trys būtų prijungti prie kitų. Dabartinė ir iki 2018 metų išliekanti Kruonio HAE elektrinių sujungimų schema pateikta 2.42 paveiksle. Modeliuojant trifazį trumpąjį jungimą, po jo seka labiausiai apkrautos linijos atjungimas. Labiausiai apkrautos linijos, kurios modeliavime buvo atjungtos po trumpojo jungimo pateiktos 2.9 lentelėje.

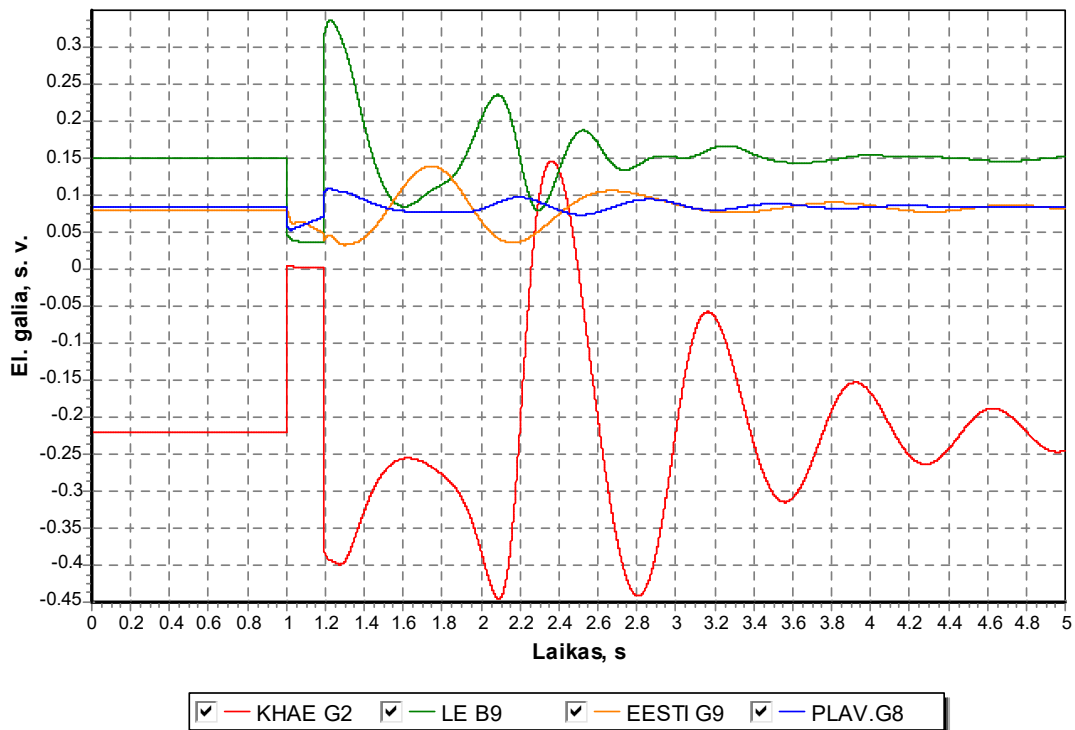
2.9 lentelė. Prie Kruonio HAE prijungtos labiausiai apkrautos linijos pradinuose režimuose

Režimas	Vasaros minimalus	Vasaros maksimalus	Žiemos maksimalus
Labiausiai apkrauta linija	KHAE – Kaunas	KHAE – Kaunas	KHAE – Lietuvos E
Linijos apkrautumas, MW	154	89	255

Sumodeliavus trumpąjį jungimą prie Kruonio HAE šynų, po kurio atjungta labiausiai apkrauta KHAE – Kaunas 330 kV linija, buvo nustatytas ribinis 195 ms trumpojo jungimo atjungimo laikas vasaros minimalių apkrovų režime. Trumpojo jungimo atjungimo po 195 ms atveju pastebimi galiu svyravimai, tačiau per 5 sekundes šie svyravimai nusistovi (2.43 pav.).



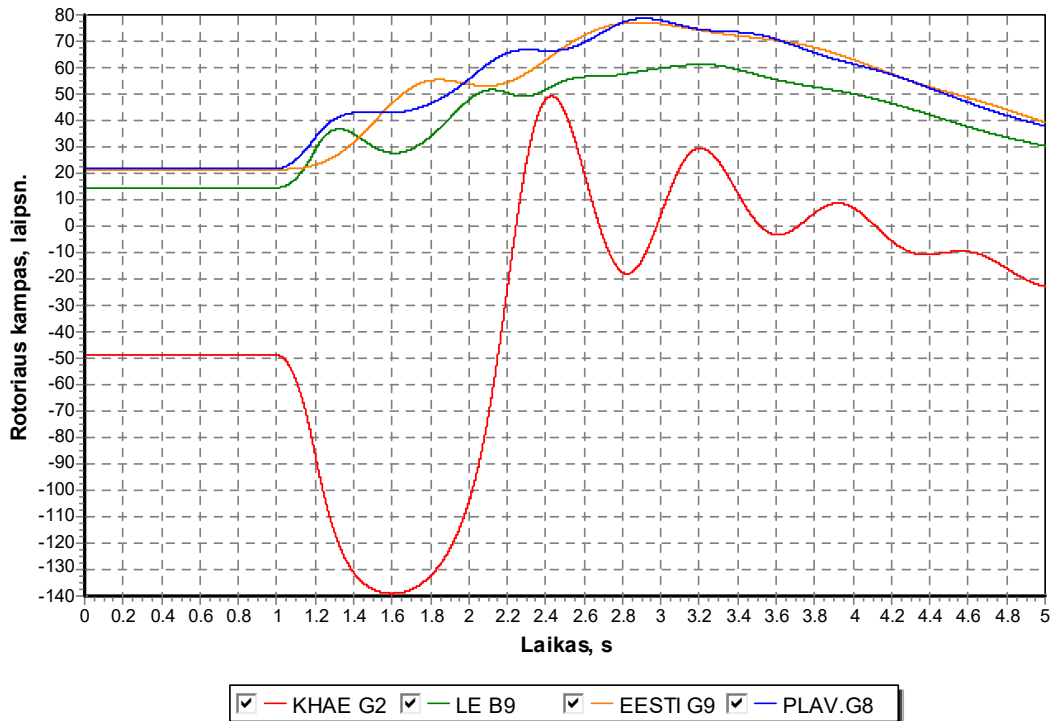
2.42 pav. Kruonio HAE 330 kV pastotės schema su modeliuojamu trumpuoju jungimu



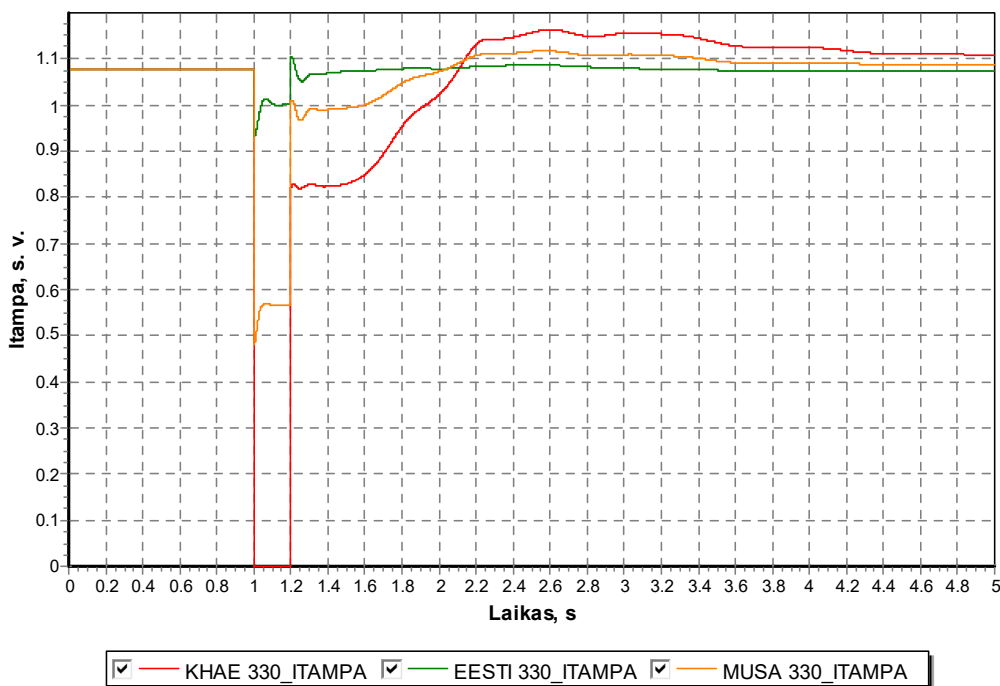
2.43 pav. BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 195 ms, V_{min}

Kruonio HAE, Lietuvos E, EESTI E bei Pliaviinių HE generatorių reliatyvus rotorių kampų kitimas pateiktas 2.44 paveiksle. Nustatyta, kad skirtingose sistemos mazguose prijungtų elektrinių rotorių

kampai kinta tolygiai vienas kito atžvilgiu, todėl daroma išvada jog sinchroninis generatorių darbas nėra prarandamas. Įtampa KHAE 330 kV šynose prieš trumpąjį jungimą siekė 355 kV, trumpojo jungimo metu įtampa nukrenta iki 0 kV, o atjungus trumpąjį jungimą pereinamojo proceso metu įtampa viršija didžiausią leistiną įtampą ir jai nusistovėti prireikia kelto sekundžių, tačiau įtampa nusistovi leistinose ribose (2.45 pav.).

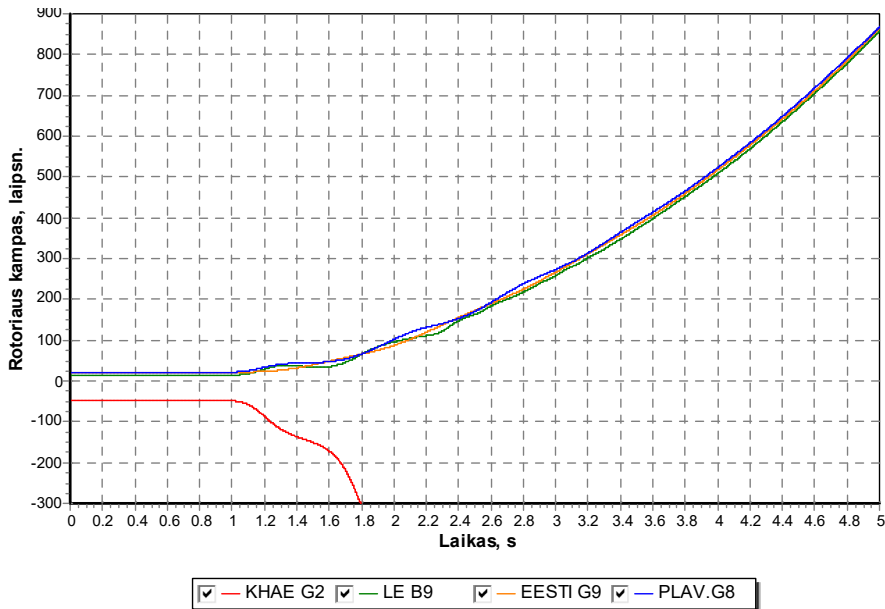


2.44 pav. BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 195 ms, V_{min}



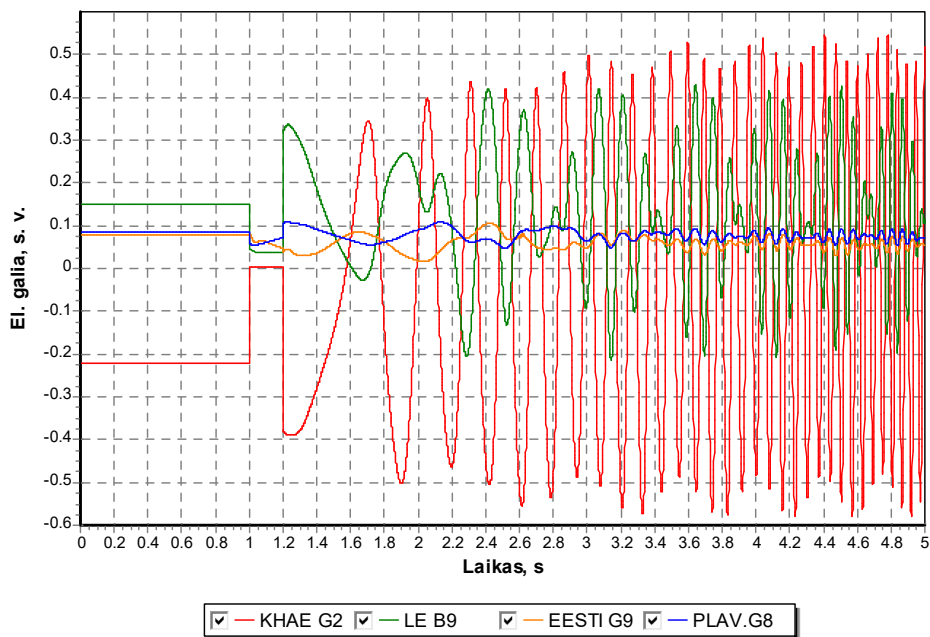
2.45 pav. BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 195 ms, V_{min}

Trumpojo jungimo atjungimo laiką prie Kruonio HAE šynų pailginus iki 200 ms nustatyta, kad Kruonio HAE agregatas veikiantis siurblio režimu praranda sinchronizmą su kitais sistemoje veikiančiais generatoriais. Kitų sistemos generatorių rotorų kampai kinta tolygiai vienas kito atžvilgiu, o Kruonio HAE agregatas praranda rotoriaus kampo stabilumą. Tokios sistemos generatorių reliatyvių rotoriaus kampų kitimo kreivės pateiktos 2.46 paveiksle.

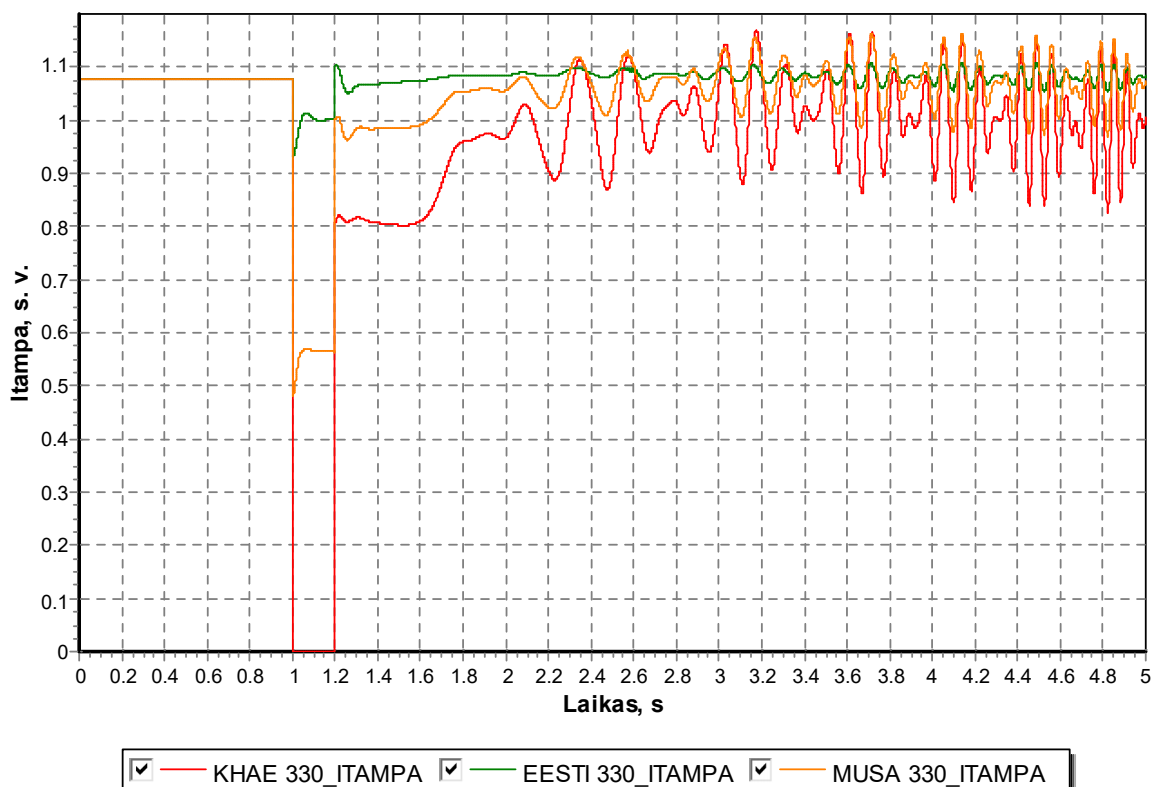


2.46 pav. BEES generatorių rotoriaus kampai įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 200 ms, V_{min}

Atjungus trumpąjį jungimą po 200 ms atsiranda generatorių galių bei sistemos mazgų įtampos švytavimai (2.47 ir 2.48 pav.). Šie švytavimai atsiranda dėl Kruonio HAE agregato asinchroninės darbo eigos.



2.47 pav. BEES generatorių galios kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 200 ms, V_{min}



2.48 pav. BEES mazgų įtampų kitimas įvykus trumpajam jungimui prie KHAE - 200 ms, V_{min}

Išanalizavus Kruonio HAE rotoriaus kampo stabilumą visais režimų variantais buvo nustatyta, kad trumpojo atjungimo laikas yra išpildomas, nes trumpasis jungimas Kruonio HAE jungtuvų būtų atjungiamas per 150 ms. Trumpojo jungimo atjungimo laikai taip pat tenkina ir ENTSO-E keliamus reikalavimus elektros generatoriams pagal kuriuos trumpojo jungimo atjungimo laikas turi būti ribose nuo 140 ms iki 250 ms. Ilgiausias trumpojo jungimo atjungimo laikas nustatytas vasaros minimalių apkrovų režime, Kruonio HAE veikiant dvejiems agregatams siurblio režimu. Tyrimo rezultatai parodė, kad šiuo atveju prarandamas paties Kruonio HAE agregato sinchronizmas. Vasaros maksimalių apkrovų bei žiemos maksimalių apkrovų režimuose buvo nustatyta, kad net trumpąjį jungimą atjungus po 250 ms, visi sistemos generatoriai lieka dirbti sinchroniškai. Apibendrinti Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės trumpojo jungimo atjungimo laikai skirtingais režimais pateikti 2.10 lentelėje.

2.10 lentelė. Kruonio HAE trumpojo jungimo atjungimo ribinių laikų apibendrinti rezultatai

Režimas	Vasaros minimalus	Vasaros maksimalus	Žiemos maksimalus
Trumpojo jungimo atjungimo laikas, ms	195	250	250

2.4.2.3. Kitų Baltijos šalių EES generatorių stabilumo tyrimas

Generatorių stabilumo tyrimui papildomai buvo parinkti svarbiausi Estijos ir Latvijos generatoriai. Rotoriaus kampo stabilumas buvo tiriamas EESTI elektrinei, Balti elektrinei, Pliavenes elektrinei bei Rygos TEC-1 elektrinei. Ištyrus šių elektrinių dinaminį stabilumą buvo nustatyta, kad visais apkrovų režimais, trumpojo jungimo atjungiamo po 250 ms atveju visi Baltijos šalių elektros sistemoje veikiantys generatoriai lieka dirbti sinchroniškai vienas kito atžvilgiu. Todėl daroma išvada, kad visi Baltijos šalių pagrindiniai generatoriai tenkina rotoriaus kampo stabilumo kriterijų. Apibendrinti šio tyrimo rezultatai pateikti 2.11 lentelėje.

2.11 lentelė. Estijos ir Latvijos elektrinių trumpojo jungimo atjungimo ribinių laikų rezultatai

Režimas	Vasaros minimalus	Vasaros maksimalus	Žiemos maksimalus
EESTI elektrinės t. j. atjungimo laikas, ms	250	250	250
Balti elektrinės t. j. atjungimo laikas, ms	250	250	250
Pliavenes HE t. j. atjungimo laikas, ms	250	250	250
Rygos TEC-1 t. j. atjungimo laikas, ms	250	250	250

IŠVADOS

1. Atlikus literatūros apžvalgą buvo nustatyta, kad elektros energetikos sistemoje didžiausias trikdžiais laikomi trifaziai trumpieji jungimai bei didelės galios generatorių blokų atsijungimai, kurie gali pažeisti elektros sistemos stabilumą.
2. Naudojantis elektros sistemų modeliavimo programine įranga PSS/E bei šiai įrangai parengtu perdavimo tinklo modeliu buvo sudaryti pradiniai izoliuotos Baltijos šalių elektros sistemos režimai, pagal esamą perdavimo tinklo schemą ir į ją įtraukiant perspektyviniuose 2018 metų planuose numatytus sistemos elementus. Sudarytai schemai buvo išnagrinėti ir sumodeliuoti didžiausi trikdžiai izoliuotai elektros energetikos sistemai vasaros minimalių bei maksimalių apkrovų ir žiemos maksimalių apkrovų režimams.
3. Atlikus nusistovėjusių režimų analizę buvo nustatyta, kad režimai konverguoja visais nagrinėtais sistemos elementų atsijungimo atvejais, todėl galima teigti, jog statinis sistemos stabilumas pažeidžiamas nėra. Tačiau tikrinant sistemos N-1 kriterijų buvo nustatyti linijų atsijungimai galintys sukelti sistemos elementų perkrovas bei įtampų nukrypimus nuo leistinų ribų. Nustatyta, kad izoliuotas Baltijos šalių EES veikimas galimas tik 2017 metų minimaliame bei maksimaliame režime, o 2018 metų žiemos maksimaliame režime toks veikimas negalimas. Reikalinga rekonstruoti 110 kV bei 330 kV perdavimo tinklą Vilniaus mazge bei didinti Vilniaus regiono elektrinių įrengtąją galią, prieš atliekant Baltijos šalių EES izoliuoto darbo bandymą.
4. Atlikus izoliuotos BEES dažnio stabilumo tyrimą buvo nustatyta, kad Lietuvos elektrinės 9 blokas žiemos maksimaliame režime gali dirbti pina (450 MW) galia, vasaros maksimaliame režime ne didesne nei 320 MW, o vasaros minimaliame režime nedidesne nei 240 MW galia. Ištyrus nuolatinės srovės intarpų su kitomis šalimis atsijungimo atvejus, buvo nustatyta, kad dažnio stabilumo požiūriu, iš Švedijos didžiausia importuojama galia žiemos maksimaliame režime gali būti ne didesnė nei 450 MW, vasaros maksimaliame režime – 330 MW, o vasaros minimaliame režime – 270 MW. Žiemos ir vasaros maksimumo režimuose visa importuojama galia gali būti eksportuojama į Lenkiją, tačiau vasaros minimaliame režime galia negali viršyti 140 MW. Tokie ribojimai nustatyti dėl dažnio dinaminio stabilumo pažeidimų. Norint padidinti elektros importo bei eksporto galimybes reikėtų didinti generuojančių agregatų su pirminio aktyviosios galios reguliavimu pajėgumą Baltijos šalyse.
5. Atlikus izoliuotos Baltijos šalių EES pagrindinių generatorių dinaminio stabilumo tyrimą buvo nustatyta, kad visi ištirti Baltijos šalių generatoriai tenkina rotoriaus kampo stabilumo reikalavimus. Tyrimo rezultatai parodė, kad prie EESTI, BATLI, Pliavinių HE bei Rygos TEC-1 elektrinių šynų įvykę trifaziai trumpieji jungimai gali būti atjungiami per ilgesnį nei 250 ms laiką. Trumpesnis trumpojo jungimo atjungimo ribinis laikas buvo nustatytas Lietuvos elektrinėje – 205 ms ir Kruonio HAE – 195 ms.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. FARMER, R. G. Power System Dynamics and Stability. The Electric Power Engineering Handbook, Ed. L.L. Grigsby, Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. 4 - 14 p. ISBN 0-8493-8578-4
2. KUNDUR, P. Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 1993. 17 – 20, 700 – 706 p. ISBN 978-0070359581.
3. MACHOWSKI J., BIALEK J.W., BUMBY J. R., Power System Dynamics Stability and Control. 2nd Edition. Chichester: Wiley, 2008. 10, 207 p. ISBN 978-0-470-72558-0.
4. Abed, A.M., WSCC voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology, in Proceedings of the 1999 IEEE PES Summer Meeting, Edmonton, Alberta, 191 p, 1999.
5. Baltijos šalių ilgalaikio izoliuoto darbo tyrimas. KTU Elektros ir valdymo inž. fakultetas, Elektros sistemų katedra. Kaunas, 2010 m.
6. Load-Frequency Control and Performance. Operation Handbook. ENTSO-E.
[žiūrėta: 2016 04 11] Prieiga per internetą: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf
7. CUTSEM, T. V. Voltage instability: phenomenon, countermeasures and analysis methods. Proc IEEE 88(2): 208, 2000.
8. ENTSO-E TYNDP 2014 - Map of projects of pan-European relevance. Midterm 2014-2018.
[žiūrėta: 2016 04 17] Prieiga per internetą: https://www.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP%202014/140710_TYNDP_2014_Projects_of_European_relevance_MT_2014-2018.pdf
9. „Litgrid“ Strategijos departamentas, Sistemos planavimo ir tyrimų skyrius. Lietuvos elektros energetikos sistemos 330-110 kV tinklų plėtros planas 2015-2024 m. Studija. Vilnius, 2015.
[žiūrėta: 2016 04 17] Prieiga per internetą: http://www.regula.lt/SiteAssets/posedziai/2015-12-10/4_priedas.pdf
10. Litgrid pranešimas energetikos konferencijoje „Sinchronizacija“ 2012 m. spalio 10 d.
[žiūrėta: 2016 04 20] Prieiga per internetą: http://www.litgrid.eu/uploads/files/dir20/dir1/13_0.php
11. Executive summary of Project “Feasibility study on the interconnection variants for the integration of the Baltic States to the EU internal electricity market”. [žiūrėta: 2016 04 22]
Prieiga per internetą: http://www.ast.lv/files/ast_files/files/documents/Executive%20summary%20of%20FIS-BIS%20project.pdf
12. Model library. PSS/E- 33.4. Siemens Industry, Inc. 2013.
13. „Litgrid“ 2015 m. veiklos ataskaitą visuomenei. [žiūrėta: 2016 05 10] Prieiga prie internetą:

http://globenewswire.com/Attachment/DownloadAttachment?articleid=833512&fileId=389601&filename=2016%2004%2027_Litgrid%20metin%C4%97%20ataskaita%20visuomenei.pdf&filetype=3&islogo=0

14. Program Operation Manual. PSS/E- 33.4. Siemens Industry, Inc. 2013.
15. Program Application Guide, Volume I. PSS/E- 33.4. Siemens Industry, Inc. 2013.
16. Program Application Guide, Volume II. PSS/E- 33.4. Siemens Industry, Inc. 2013.

PRIEDAI

Priedas 1. Lietuvos ir Kaliningrado generatorių PSS/E dinaminiai duomenys

Lietuvos gen. PSS/E duomenys				Lietuvos gen. PSS/E dinaminiai modeliai				
Mazgo Nr.	Pavadinimas	Id	M _{base} MVA	Generatoriaus tipas	Žadinimo sistemos tipas	Turbinos tipas	Stabilizatoriaus tipas	Kompensatoriaus tipas
5802	KLE G2	1	24	GENROU	EXBAS	TGOV5	-	COMP
5807	SIAULIU E	1	14	GENROU	EXBAS	DEGOV1	-	COMP
5816	KE B3	1	375	GENROU	ESST1A	GAST	PSS2A	COMP
5817	KHAE G1	1	268	GENSAL	ESST1A	TGOV5	PSS2A	COMP
5818	KHAE G2	1	268	GENSAL	ESST1A	TGOV5	PSS2A	COMP
5819	KHAE G3	1	268	GENSAL	ESST1A	TGOV5	PSS2A	COMP
5820	KHAE G4	1	268	GENSAL	ESST4B	TGOV5	STAB2A	COMP
5823	LE B9	1	518	GENROU	ESST1A	GAST	PSS2A	COMP
5843	KHE G2	1	30	GENSAL	ESAC8B	HYGOV	-	-
5843	KHE G2	2	30	GENSAL	ESAC8B	HYGOV	-	-
5848	ME G3	1	63	GENROU	ESST1A	TGOV5	PSS2A	COMP
5849	ME G1	1	125	GENROU	ESST1A	TGOV5	PSS2A	COMP
5857	LIFOSA G1	1	31	GENROU	ESAC5A	TGOV5	-	-
5859	PUTINU E	1	13	GENROU	ESAC8B	TGOV5	-	-
5860	PAN.E G1	1	29	GENROU	ESAC8B	GAST	-	-
5861	PAN.E G2	1	12	GENROU	ESAC8B	IEEEG1	-	-
5862	PAN.E G3	1	29	GENROU	ESAC8B	GAST	-	-
5863	PAN.E G4	1	12	GENROU	ESAC8B	IEEEG1	-	-
5875	VE2 B1	1	15	GENROU	ESST2A	TGOV5	-	-
5876	VE2 B2	1	21	GENROU	ESST2A	TGOV5	-	-
5881	SANTAKA	1	24	GENROU	ESAC5A	GAST	-	-
5882	SANTAKA2	1	56	GENROU	EXBAS	GAST	-	COMP

Kaliningrado gen. PSS/E duomenys				Kaliningrado gen. PSS/E dinaminiai modeliai				
Mazgo Nr.	Pavadinimas	Id	M _{base} MVA	Generatoriaus tipas	Žadinimo sistemos tipas	Turbinos tipas	Stabilizatoriaus tipas	Kompensatoriaus tipas
5802	KLE G2	1	24	GENROU	EXBAS	TGOV5	-	COMP
5807	SIAULIU E	1	14	GENROU	EXBAS	DEGOV1	-	COMP
5816	KE B3	1	375	GENROU	ESST1A	GAST	PSS2A	COMP
5817	KHAE G1	1	268	GENSAL	ESST1A	TGOV5	PSS2A	COMP

Priedas 2. Latvijos generatorių PSS/E dinaminiai duomenys

PSS/E duomenys				PSS/E dinaminiai modeliai				
Mazgo Nr.	Pavadinimas	Id	M _{base} MVA	Generatoriaus tipas	Žadinimo sistemos tipas	Turbinos tipas	Stabilizatoriaus tipas	Kompensatoriaus tipas
4821	K.HGN1	1	20	GENSAL	SEXS	HYGOV	IEEEEST	-
4825	K.HGN5	1	75	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4826	K.HGN6	1	75	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4833	JAKAB_HP	1	38	GENSAL	SCRX	HYGOV	PSS2A	IEEEVC
4834	IMANTA_C	1	53	GENROU	ESST1A	TGOV5	PSS2A	COMP
4844	PLAV.G4	1	97	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4847	PLAV.G7	1	97	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4848	PLAV.G8	1	97	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4849	PLAV.G9	1	97	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4861	TEC1.TG1	1	56	GENROU	REXSYS	GAST	-	COMP
4862	TEC1.TG2	1	56	GENROU	REXSYS	GAST	-	COMP
4864	TEC1.TG4	1	68	GENROU	REXSYS	IEEEG1	-	COMP
4871	RHES.G1	1	75	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4872	RHES.G2	1	75	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4873	RHES.G3	1	75	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4874	RHES.G4	1	75	GENSAL	SCRX	IEEEG3	PSS2A	IEEEVC
4882	TEC2.TG2	1	187	GENROU	SCRX	TGOV1	-	-
4883	TEC2.TG3	1	187	GENROU	SCRX	TGOV1	-	-
4884	TEC2.TG4	1	344	GENROU	ESST1A	GAST	PSS2A	COMP
4885	TEC2.TG5	1	344	GENROU	ESST1A	GAST	PSS2A	COMP

Priedas 3. Estijos generatorių PSS/E dinaminiai duomenys

PSS/E duomenys				PSS/E dinaminiai modeliai				
Mazgo Nr.	Pavadinimas	Id	M _{base} MVA	Generatoriaus tipas	Žadinimo sistemos tipas	Turbinos tipas	Stabilizatoriaus tipas	Kompensatoriaus tipas
3782	IMAVERECHP	1	6	GENSAE	-	-	-	-
11803	EESTI G3	1	235	GENROU	EXAC1	IEEEG1	IEE2ST	-
11804	EESTI G4	1	235	GENROU	EXAC1	IEEEG1	IEE2ST	-
11805	EESTI G5	1	235	GENROU	EXAC1	IEEEG1	IEE2ST	-
11806	EESTI G6	1	235	GENROU	EXAC1	IEEEG1	IEE2ST	-
11807	EESTI G7	1	235	GENROU	EXAC1	IEEEG1	IEE2ST	-
11808	EESTI G8	1	235	GENROU	EXST1	TGOV1	PSS2A	-
11809	EESTI G13	1	400	GENROU	EXST1	TGOV1	PSS2A	-
11810	EESTI G9	1	400	GENROU	EXST1	TGOV1	PSS2A	-
11812	IRU TG2	1	125	GENROU	EXAC1	IEEEG1	-	-
11911	BALTI G11	1	235	GENROU	EXST1	TGOV1	PSS2A	-
11912	BALTI G12	1	235	GENROU	EXAC1	IEEEG1	IEE2ST	-
11950	VAO	1	31	GENSAE	IEET1A	TGOV1	PSS2A	-
11952	ANNE	1	31	GENSAE	IEET1A	TGOV1	PSS2A	-
11953	PARNU	1	28	GENSAE	EXAC1	TGOV1	PSS2A	-
11961	TÕRVA CHP G	1	8	GENSAL	-	-	-	-