



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Lietuvos elektros energetikos sistemos, veikiančios su
kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus
darbo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Milda Budreckaitė

Projekto autorė

Lekt. dr. Birutė Linkevičiūtė

Vadovė

Vilnius, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Lietuvos elektros energetikos sistemos, veikiančios su
kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus
darbo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Milda Budreckaitė

Projekto autorė

Lekt. dr. Birutė Linkevičiūtė

Vadovė

Doc. dr. Audrius Jonaitis

Recenzentas

Vilnius, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Milda Budreckaitė

**Lietuvos elektros energetikos sistemos, veikiančios su
kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus
darbo tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Mildos Budreckaitės, baigiamasis projektas tema „Lietuvos elektros energetikos sistemos, veikiančios su kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus darbo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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 mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Milda Budreckaitė. Lietuvos elektros energetikos sistemos, veikiančios su Kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus darbo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. dr. Birutė Linkevičiūtė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Kontinentinės Europos tinklai, sinchronizacija, elektros energetikos sistema.

Vilnius, 2019. 44 p.

Santrauka

Energetinis saugumas – viena svarbiausių problemų, kuri sukuria pažeidimus ekonomikos, politikos ir aplinkosaugos srityse. Nors jau praėjo 12 metų nuo dienos, kuomet trys Lietuvos, Latvijos ir Estijos ministrai pirmininkai pasirašė bendrą komunikatą, kuriuo patvirtintas Baltijos valstybių strateginis tikslas tapti kontinentinės Europos tinklų dalimi sinchroninėje zonoje, nei viena iš valstybių nėra desinchronizavusi nuo Rusijos elektros energetikos sistemos.

Kiekviena Baltijos valstybė, kuri siekia sinchroniškai dirbti su kontinentinės Europos tinklais, pirmiausia turi įrodyti, jog atitinka visus Europos elektros perdavimo sistemų operatorių organizacijos keliamus reikalavimus. Šiame darbe analizuojama užsienio šalių prisijungimo prie kontinentinės Europos tinklų patirtis, jų elektros energetikos sistemų atitikimas Europos elektros perdavimo sistemų operatorių organizacijos keliamiems reikalavimams bei atliekamas Lietuvos elektros energetikos sistemos, veikiančios su kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus darbo tyrimas. Stabilaus darbo tyrimas atliekamas indikuojant reikalingą inercijos dydį stabiliai Lietuvos elektros energetikos sistemai palaikyti, ieškant optimalaus inercijos užtikrinimo sprendinio bei atliekant dažnio išlaikymo rezervu užtikrinimo analizę.

Milda Budreckaitė. Research of Stability of Lithuanian Electricity System Operating in Synchronous Mode with Continental European Networks. Master's Final Degree Project / supervisor lect., dr. Birutė Linkevičiūtė; Faculty of electrical and electronics engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): power engineering, engineering sciences.

Keywords: Continental European Networks, synchronization, electricity system.

Vilnius, 2019. 44 p.

Summary

Energy security is one of the most important problems, which creates violations in economic, political and environmental areas. The three Prime Ministers of Lithuania, Latvia and Estonia signed a joint communication confirming the strategic goal of the Baltic States to become part of the continental European networks in a synchronous zone in 2007. Although from this date has passed over 12 years, none of the states has desynchronized from the Russian electricity system.

However, each of the Baltic states seeking to work synchronously with continental European networks must approve that the electricity system satisfies the European Network of Transmission System Operators – electricity requirements. This paper analyzes the experience of foreign countries, which recently joined continental European networks, their electricity systems' compliance with European Network of Transmission System Operators – electricity requirements, and the study of stable work of the Lithuanian electricity system operating in synchronous mode with continental European networks. Stable work research is carried out by indicating the required inertia amount for maintenance of a stable Lithuanian power system, by finding an optimal inertia assurance solution and performing a frequency containment reserve assurance analysis.

Turinys

| | |
|---|-----------|
| Lentelių sąrašas | 7 |
| Paveikslų sąrašas | 8 |
| Santrumpų sąrašas | 9 |
| Įvadas..... | 10 |
| 1. Literatūros apžvalga | 11 |
| 1.1. Problemos aktualumas..... | 11 |
| 1.2. Kontinentinės Europos regiono grupė | 11 |
| 1.3. Kitų valstybių patirtis | 13 |
| 1.3.1. Turkijos elektros energetikos sistemos sujungimas su KET | 13 |
| 1.3.2. Ukrainos elektros energetikos sistemos prijungimas prie KET | 16 |
| 1.4. Studijų apžvalga | 17 |
| 2. EES stabilaus darbo su KET sinchroniniu režimu vertinimas bei tyrimo metodika..... | 19 |
| 2.1. Sistemos būsenų klasifikacija..... | 19 |
| 2.2. Sistemos rezervai..... | 19 |
| 2.3. Dažnio kitimo sparta..... | 23 |
| 2.4. Sistemos inercija..... | 23 |
| 2.5. Imties duomenys bei sąstato sudarymas..... | 25 |
| 3. Lietuvos EES, veikiančios su Kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus darbo tyrimas..... | 32 |
| 3.1. Lietuvos elektros energetikos sistemos inercijos analizė | 32 |
| 3.2. Lietuvos dažnio išlaikymo rezervų užtikrinimo analizė..... | 37 |
| Išvados | 41 |
| Literatūros sąrašas | 42 |

Lentelių sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 lentelė. Generatorių tipinės inercijos laiko pastoviosios reikšmės [28]..... | 25 |
| 2 lentelė. Lietuvos EES elektrinių įrengtoji galia 2018 m., MW, [29] | 26 |
| 3 lentelė. Lietuvos EES elektrinių, prijungtų prie perdavimo tinklo, pilnutinė galia 2018 m., MVA | 26 |
| 4 lentelė. Lietuvos EES elektrinių, elektros energijos gamyba 2018 m., GWh, [29], [30]..... | 28 |
| 5 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant I sąstatą..... | 34 |
| 6 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant II sąstatą..... | 34 |
| 7 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant III sąstatą | 35 |
| 8 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant IV sąstatą..... | 36 |
| 9 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant V sąstatą | 36 |
| 10 lentelė. FCR vertinimas..... | 38 |
| 11 lentelė. „Tesla Powerwall“ baterijos instaliavimo kaštai, JAV doleriais, [38]..... | 40 |

Paveikslų sąrašas

| | |
|---|----|
| 1 pav. Regioninių grupių zonų pasiskirstymas | 12 |
| 2 pav. Turkijos elektros perdavimo sistema..... | 13 |
| 3 pav. Apkrovos dažnio kontrolė: pagrindinė proceso struktūra | 20 |
| 4 pav. FCR tikimybinis matavimas [23] | 21 |
| 5 pav. Inercijos užtikrinimas | 24 |
| 6 pav. Lietuvos elektrinių elektros energijos gamybos pasiskirstymas 2018 m., GWh..... | 28 |
| 7 pav. Šiluminių elektrinių elektros energijos gamyba 2018 m., GWh | 29 |
| 8 pav. Hidroelektrinių elektros energijos gamyba 2018 m., GWh..... | 30 |
| 9 pav. Vėjo elektrinių elektros energijos gamyba, GWh | 31 |
| 10 pav. Kitų atsinaujinančių energijos išteklių elektros energijos gamyba 2018 m., GWh | 31 |
| 11 pav. Tyrimo eiga | 32 |
| 12 pav. Optimalaus sprendinio radimo eiga..... | 32 |
| 13 pav. Kruonio HAE | 39 |

Santrumpų sąrašas

BEMIP (angl. *Baltic Energy Market Interconnection Plan*) – Baltijos jūros regiono valstybių elektros rinkų integracijos planas

BRELL (angl. *Belarus, Russia, Estonia, Latvia and Lithuania*) – Baltarusija, Rusija, Estija, Latvija ir Lietuva

DC (angl. *Direct current*) – Nuolatinė srovė

EES (angl. *Electricity system*) – Elektros energetikos sistema

ENTSO-E (angl. *European Network of Transmission System Operators – electricity*) – Europos elektros perdavimo sistemų operatorių organizacija

ES (angl. *the European Union*) – Europos Sąjunga

FCR (angl. *Frequency containment reserves*) – Dažnio išlaikymo rezervai

FRR (angl. *Frequency restoration reserves*) – Dažnio atkūrimo rezervai

IPS/UPS (angl. *Integrated Power System/Unified Power System*) – Integruota elektros energetikos sistema/Vieninga elektros energetikos sistema

JRC (angl. *Joint research center*) – Europos Komisijos Jungtinis tyrimų centras

KET (angl. *Continental European Networks*) – Kontinentinės Europos tinklai

Kruonio HAE – Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė

Kauno HE – Kauno Algirdo Brazausko hidroelektrinė

OH (angl. *Operational Handbook*) – ENTSO-E parengtas Kontinentinės Europos perdavimo sistemos operatorių veiklos principų ir taisyklių rinkinys

PCI (angl. *Projects of Common Interest*) – Bendro Intereso Projektų sąrašas

PSO (angl. *Transmission System Operator*) – Perdavimo sistemos operatorius

RG CE (angl. *Regional group „Continental Europe“*) – Regioninė grupė „Kontinentinė Europa“

RoCoF (angl. *Rate of change of frequency*) – Dažnio kitimo sparta

RR (angl. *Replacement reserves*) – Pakaitos rezervai

TEIAS (angl. *Turkish Electricity Transmission Corporation*) – Turkijos elektros energijos perdavimo korporacija

UCTE (angl. *the Union for the Coordination of Transmission of Electricity*) – Elektros energijos perdavimo koordinavimo sąjunga

Ukrenergo (ru. *Укрэнерго*) – Ukrainos elektros energijos perdavimo sistemos operatorius

Komisija – Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija

Įvadas

1990 m. Rusijos federacija pripažino visišką trijų Baltijos valstybių – Lietuvos, Latvijos ir Estijos – nepriklausomybę. Baltijos šalims tapus suvereniomis valstybėmis, nuo pat pradžių buvo pasirinkta aiški kryptis – Europos Sąjungos (ES) link, dėl ko Baltijos šalys įsipareigojo visapusiškai integruotis į Vakarų bloko šalis politiniais, socialiniais ir ekonominiais aspektais. Dėl tokio pasirinkimo Baltijos šalių elektros energetikos sektoriuje iškilo du pagrindiniai klausimai: jungčių su kaimyninėmis ES narėmis nebuvimas bei priklausymas IPS/UPS sistemai, t. y. veikimas BRELL žiede, kuriame sistemos dažnį reguliuoja Rusijos federacija [1]. Buvimas energetine sala, priklausoma nuo trečiųjų šalių infrastruktūros, kelia išskirtinį pavojų sistemos saugumui, didina totalinių avarijų riziką ir daro įtaką regiono politinei bei ekonominei nepriklausomybei.

Prisijungusios prie ES, Baltijos valstybės pradėjo tiesti nuolatinės srovės (angl. *Direct current (DC)*) jungtis su kaimyninėmis ES valstybėmis narėmis. Dėl regioninio bendradarbiavimo ir bendrų pastangų, Baltijos šalys sėkmingai įgyvendino jungčių su Suomija, Švedija ir Lenkija projektus. Trys Baltijos valstybės tapo vienu geriausių tarpusavyje susijusių ES regionų. Be to, Baltijos valstybės prisijungė prie „Nordpool“ energijos rinkos, kuriančios konkurenciją ir, atitinkamai, rinkos dalyviams siūlančios skaidrią prieigą prie Europos elektros energijos rinkos [2].

Nepaisant to, kad Baltijos valstybės sugebėjo integruotis į bendrą ES vidaus energijos rinką ir dirbti pagal ES reglamentus, techniškai jos liko sinchroniškai prijungtos prie IPS/UPS sistemos. Tai trukdo visiškam integravimui į ES elektros energijos rinkas ir Europos perdavimo tinklą.

Baltijos valstybių sinchronizavimosi prie kontinentinės Europos tinklų (angl. *Continental European Networks (KET)*) projektą sudaro daugybė investicinių elementų, kurie apima Baltijos elektros energetikos sistemos vidaus įtvirtinimus, sinchronizavimui reikalingus valdymo sistemos atnaujinimus bei izoliuoto darbo bandymą. Baltijos valstybių izoliuoto darbo bandymo metu bus siekiama įrodyti, jog valstybių narių eksploatuojami techniniai generatoriai parengti stabiliam sistemos darbui.

Įvertinus, jog dalis užsienio valstybių jau yra sinchroniškai prisijungę prie KET, šiame darbe pirmiausia bus apžvelgiama kelių valstybių, neseniai prisijungusių sinchroniškai prie KET, patirtis. Indikavus energetikos sistemos problemas, su kuriomis susiduria kitos valstybės, šiame darbe bus atliekamas Lietuvos elektros energetikos sistemos stabilaus darbo tyrimas.

Darbo tikslas – atlikti Lietuvos elektros energetikos sistemos, veikiančios su kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus darbo tyrimą.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti kitų valstybių sinchroninio prisijungimo prie kontinentinės Europos tinklų patirtį, nustatant pagrindines sąlygas prisijungimui prie KET;
2. atlikti Lietuvos elektros energetikos sistemos inercijos analizę, nustatant optimalų Lietuvos EES inercijos užtikrinimo sprendinį;
3. atlikti Lietuvos dažnio išlaikymo rezervo užtikrinimo analizę techniniu bei ekonominiu aspektais.

Magistro baigiamojo projekto tikslui pasiekti ir uždaviniams išspręsti bus naudojami šie tyrimo metodai: teorinė ir mokslinė analizė, skaičiuojamoji analizė.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Problemos aktualumas

Energetinis saugumas lieka viena svarbiausių problemų, kuri sukuria pažeidimus ekonomikos, politikos ir aplinkosaugos srityse. Valstybių priklausomybė nuo vienintelio tiekėjo kelia grėsmes ekonominiam ir politiniam valstybių suverenitetui. Elektros sistemų sinchronizavimas – tai sujungtų elektros energetikos sistemų darbas vienodu dažniu ir tuo pačiu taktu [3]. Energetinio saugumo tyrimų centro mokslininkų atlikti elektros energetikos sistemos plėtros scenarijai rodo, kad sinchronizacija su KET stiprins Lietuvos energetinį saugumą. Nepaisant to, elektros energetikos sistemos sinchronizacija yra sudėtinga tiek politiniu, tiek techniniu požiūriu. Norint sėkmingai sinchronizuotis su KET būtina ne tik papildoma elektros generavimo ir perdavimo infrastruktūra, bet reikalingas ir Baltijos valstybių tarpusavio sutarimas, ES ir Lenkijos palaikymas. Turint omenyje Rusijos pasipriešinimą ir tarptautinio palaikymo svarbą, sinchronizacijos įgyvendinimas priklauso ne tik nuo energetikos ekspertų, bet ir nuo aukščiausių šalies politikų bei diplomatų veiksmų [4].

Baltijos valstybių sinchronizacijos proceso plėtros pradžia yra laikoma 2007 m. birželio 11 d., kuomet trys Lietuvos, Latvijos ir Estijos ministrai pirmininkai pasirašė bendrą komunikatą, kuriuo patvirtintas Lietuvos, Latvijos ir Estijos strateginis tikslas tapti UCTE (dabartinis KET) dalimi sinchroninėje zonoje.

2009 m. liepos 17 d. pasirašytas dar vienas svarbus dokumentas – 8 Baltijos jūros valstybės narės pasirašė Baltijos energijos rinkų tinklų sujungimo plano memorandumą. Europos Komisijos iniciatyva per devynis mėnesius buvo parengtas Baltijos energetikos rinkų tinklų sujungimo planas, siekiant išsiaiškinti konkrečias priemones, skirtas sujungti Lietuvos, Latvijos ir Estijos energetikos tinklus (BEMIP).

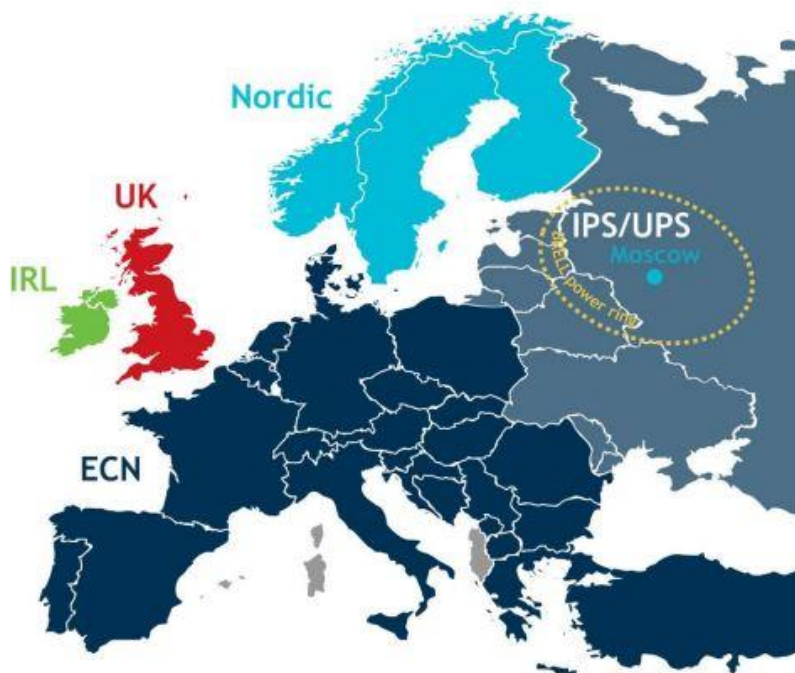
2011 m. vasario 11 d. Baltijos valstybių ministrai pirmininkai paskelbė, kad Lietuva, Latvija ir Estija ketina tapti neatskiriama KET dalimi. Atitinkamai, Europos Komisija savo paskelbtame komunikate, kuriame buvo nagrinėjama energetikos vidaus rinka, pažymėjo, kad Baltijos valstybės, veikiančios Rusijos ir Baltarusijos elektros energetikos sistemoje, stengiasi būti sinchronizuojamos su ES ir kad reikia rimtų investicijų į energetikos tinklus, kad kai kurios ES zonos galėtų atsiriboti nuo izoliacijos. Kitaip tariant, iki šiol atlikta dalis infrastruktūros pokyčių, elektros rinkos pokyčių bei sistemos valdymo pokyčių, tačiau sinchronizacijos projektas vis dar pateikia daug iššūkių. Laikotarpiu nuo 2011 m. iki šių dienų Baltijos PSO parengė keletą studijų, siekiant rasti optimalų sinchronizavimo variantą. Studijų apžvalga pateikiama 1.4 skyriuje.

Nors sinchronizavimo procesas yra laikomas pagrindiniu fizinio Baltijos valstybių integravimo į žemyninės Europos energetikos sistemą elementas, labai prisidėsiantis prie ES vienybės ir energijos tiekimo saugumo, susitarimas dėl Baltijos šalių elektros tinklų sinchronizacijos su KET pasirašytas tik 2018 m. birželio 28 d. [5].

1.2. Kontinentinės Europos regiono grupė

Remiantis sinchroninėmis zonomis, šiuo metu Europoje yra 5 regioninės grupės (kontinentinės Europos, Šiaurės, Baltijos, Didžiosios Britanijos ir Airijos – Šiaurės Airijos) ir 2 savanoriškos regioninės grupės (Šiaurės Europos ir izoliuotos sistemos) (žr. 1 pav.). Šios regioninės grupės užtikrina suderinamumą tarp sistemos operatorių, apima rinkos sprendimus ir sistemos kūrimo

klausimus [6]. Visų sinchroninių zonų vardinis dažnis turi būti 50 Hz. Vieną didžiausių – kontinentinės Europos – regiono grupių sudaro buvusios UCTE sinchroninės zonos valstybės: Albanija, Austrija, Belgija, Bosnija ir Hercegovina, Bulgarija, Čekijos Respublika, Kroatija, Danija (vakarai), Makedonija, Prancūzija, Vokietija, Graikija, Vengrija, Italija, Liuksemburgas, Juodkalnija, Olandija, Lenkija, Portugalija, Rumunija, Serbija, Slovakija, Slovėnija, Ispanija, Šveicarija ir Turkija [7].



1 pav. Regioninių grupių zonų pasiskirstymas

Pagrindinis RG CE tikslas užtikrinti patikimą ir veiksmingą kontinentinės Europos sinchroninės zonos veikimą. RG CE užtikrina pagrindinę ENTSO-E regioninių kontinentinės Europos sinchroninės zonos operatorių tinklo veiklą. Tai apima visų sistemos valdymo klausimus (įskaitant dažnių reguliavimo, planavimą, apskaitą, koordinavimo paslaugas), Kontinentinės Europos perdavimo sistemos operatorių veiklos principų ir taisyklių rinkinio (angl. *Operational Handbook*, (OH)) rengimą ir atnaujinimą, OH įgyvendinimą ir procedūras, kurios turi būti taikomos galimų pažeidimų atvejais, bei atitikties stebėseną.

2005 m. liepos 1 d. buvo pasirašytas daugiašalis susitarimas (angl. *the Multilateral Agreement*, (MLA)), įskaitant vėlesnius pakeitimus, kuriuo buvusios UCTE narės, šiai dienai esančios RG CE narėmis, įsipareigojo visapusiškai laikytis OH reikalavimų.

OH yra išsamus techninių standartų rinkinys, skirtas RG CE integruoto tinklo veikimui. Jis suskirstytas į 8 strategines kryptis, 3 iš jų sukurtos 2005 m., 4 iš jų – 2006 m., o 8 strategija – 2008 m. Taip pat RG CE turi 5 pograpius: koordinuoto sistemos veikimo (angl. *Coordinated System Operation*, (SG CSO)), sistemos dažnio (angl. *System frequency*, (SG SF)), tinklo modeliavimo ir prognozavimo įrankių (angl. *Network Modelling & Forecast Tools* (SG NM&FT)), sistemos apsaugos ir dinamikos (angl. *System Protection & Dynamics* (SG SP&D)), atitikties stebėjimo ir vykdymo (angl. *Compliance Monitoring & Enforcement*, (SG CM&E)) [7].

1.3. Kitų valstybių patirtis

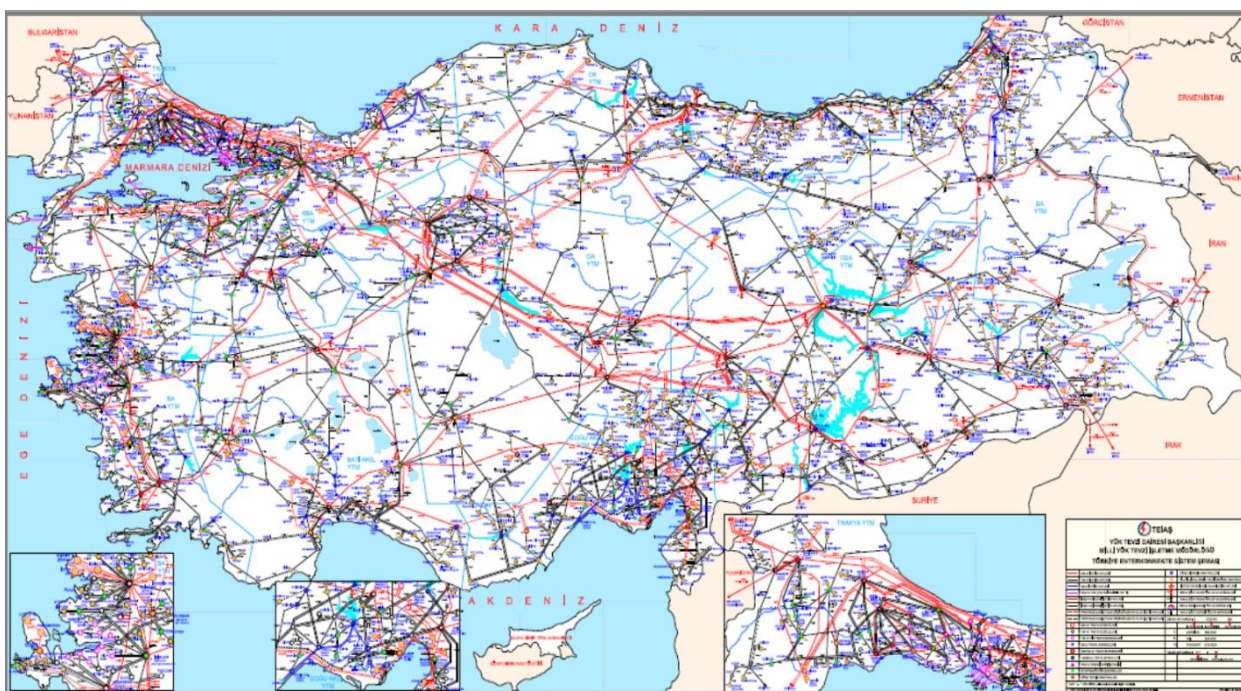
Kol kas Baltijos šalys yra vienintelės ES valstybės narės, kurios yra sinchroniškai sujungtos su IPS/UPS, kitos Centrinės ir Pietryčių Europos valstybės narės jau yra desinchronizuotos nuo Rusijos elektros energetikos sistemos [6].

RG CE buvo sukurtos 2 sistemos plėtros projektų grupės, skirtos spręsti sistemos integravimo ir išplėtimo klausimus:

- a) Turkijos;
- b) Ukrainos / Moldovos.

1.3.1. Turkijos elektros energetikos sistemos sujungimas su KET

Turkijos elektros energetikos sistemoje vyrauja trijų tipų elektrinės: gamtinių dujų kombinuoto ciklo elektrinės, termofikacinės jėgainės ir hidroelektrinės. Jų įrengtas pajėgumų santykis yra beveik lygus (t. y. apie 30 %). Tačiau Turkija jau nuo 1970 m. turėjo viziją prisijungti prie UCTE, kol galiausiai jų elektros energetikos sistema buvo prijungta per tris 400 kV linijas – dvi 400 kV linijos tarp Hamitabat (Turkija) ir Maritsa (Bulgarija) ir viena 400 kV linija tarp Babaeski (Turkija) ir N. Santa (Graikija) [8]. Turkijos elektros energetikos perdavimo sistema pavaizduota 2 pav., kur įrengtoji galia 40,7 GW, apkrovos maksimumas 30 GW.



2 pav. Turkijos elektros perdavimo sistema

Siekiant prisijungti prie UCTE, buvo atlikta ne viena studija, kurių tikslas – Turkijos elektros energetikos sistemos ir UCTE sinchroninis darbas, t. y. poreikis identifikuoti optimalų Turkijos integracijos į vakarų Europą būdą.

2000 m. kovo 21 d. TEIAS pateikė paraišką UCTE dėl integracijos į žemyninę Europą. Sukurta projektų grupė ir planuota, kaip vykdyti tinklų sujungimą. Ši projekto grupė koordinavo visą veiklą, susijusią su Turkijos elektros energetikos sistemos tyrimais. Buvo atlikti du projektai. Pirmasis

projektas skirtas techniniams tyrimams, susijusiems su Turkijos elektros energetikos sistemos sinchronizacija su UCTE, kuris buvo pradėtas 2005 m. gruodžio mėn. ir baigtas 2007 m. balandžio mėn. Šio projekto tikslas buvo nustatyti technines sąlygas, kuriomis Turkijos elektros energetikos sistema gali būti suderinta su UCTE elektros energetikos sistema. Iš tyrimo rezultatų buvo gautos tokios išvados ir rekomendacijos:

Tinkamas sujungimas su UCTE yra įmanomas su sąlyga, kad:

a) esama dažnio valdymo problema bus išspręsta. Tuo metu, kai buvo atliktas pirmasis projektas, Turkijos elektros energetikos sistemai buvo būdinga dažnio valdymo problema, t. y. ženklus dažnio svyravimas trumpame laiko intervale. Tyrimas atskleidė, kad ši problema tikriausiai kilo dėl turbinų, esančių didelėse hidroelektrinėse, parametų;

b) daugumos gamybos pajėgumų slopinimo efektyvumas bus pagerintas su elektros sistemos stabilizatoriumi (PSS, angl. *power system stabilizer*), kurie gali slopinti žemo dažnio svyravimus 0,15 Hz diapazone;

c) bus įdiegta sistemos apsaugos schema, apsauganti tarpusavyje sujungtą sistemą nuo pavojų, kylančių iš plataus asinchronizmo.

Šie rezultatai paskatino antrąjį projektą „Turkijos elektros energetikos sistemos dažnio valdymo veikimo rekonstravimas sinchroniniam veikimui su UCTE“, kurio tikslas – parengti Turkijos elektros energetikos sistemą būsimai veiklai su UCTE dėl galios ir dažnio valdymo, pastoviosios būklės ir trumpalaikio stabilumo.

Norint įvykdyti pirmiau minėtus Turkijos elektros energetikos sistemos iššūkius, buvo sukurtas bendras perdavimo sistemos operatorių, elektrinių operatorių, gamintojų ir universitetų bendradarbiavimas, o projektas buvo suskirstytas į šešias užduotis: Elektrinių bandymų tyrimas; Valdymo ir parametų optimizavimas (projektavimas); Antrinė kontrolė; Įtampos valdiklio (AVR)/PSS projektavimas/optimizavimas; Speciali apsaugos schema ir atkūrimo planas; Mokymas. Iš šių studijų analizių galima daryti išvadą, kad Turkijos elektros energetikos sistemos dažnio efektyvumas yra pakankamas ir stabilus, kai visos elektrinės (kombinuoto ciklo elektrinės, termofikacinės jėgainės, hidroelektrinės) veikia lygiagrečiai [8].

Atitinkamai buvo atlikta kita studija, kuria buvo siekiama identifikuoti, kaip galima pagerinti Turkijos elektros energetikos sistemos pirminio ir antrinio dažnio valdymą. Pirminio dažnio valdymo tikslas yra išlaikyti balansą tarp gamybos ir vartojimo (paklausos) dirbant sinchroniniu režimu. Pirminio dažnio valdymas prasideda per kelias sekundes kaip bendras visų dalyvaujančių šalių veiksmas. Antrinis dažnio valdymas po kurio laiko pakeičia pirminį dažnį, tačiau jį vykdo tik atsakingų šalių PSO. Studijos metu atliktas Turkijos elektros energetikos sistemos statinių duomenų (tinklo duomenų) modeliavimas, naudojant tokius duomenis: bendra generacija (30 000 MW), mazgų skaičius (1556), linijų skaičius (1343), apkrovų skaičius (701), transformatorių skaičius (806), kompensaciniai elementai (28), bendras mašinų skaičius (690). Atliekant Turkijos elektros energetikos sistemos dinaminį modeliavimą, buvo renkami tokie duomenys: išsamūs sinchroniniai modeliai, greičio regulatorius ir turbinos valdymas, automatinės įtampos regulatoriai, energijos sistemos stabilizatorius. Taip pat buvo atlikta tarpusisteminių svyravimų matavimo sistema (WAMS, angl. *wide area measurement system*). Studijos metu buvo identifikuota sisteminė dažnio kontrolės problema Turkijos elektros energetikos sistemoje [9].

Vėliau, Turkijos elektros energetikos sistemai sinchronizuojantis prie KET, projektas buvo suskaidytas į 2 etapus. Pirmojo etapo metu vyko izoliuoto darbo bandymas, t. y. bandymas atliktas Turkijos elektros energetikos sistemos darbo maksimalių (2010 01 11–24) ir minimalių (2010 03 22–2010 04 04) apkrovų metu, siekiant išsiaiškinti:

a) Turkijos elektros energetikos sistemos dažnio valdymo galimybes pagal kontinentinės Europos taisykles, normaliais ir avariniais režimais:

1. pirminio dažnio reguliavimo galimybes;
2. antrinio dažnio reguliavimo galimybes.

b) pastočių (tarpsisteminių) įtampos reguliavimo galimybes;

c) sistemos stabilizavimo įrenginių (angl. *PSS-devices*) darbą.

Antrojo etapo metu vyko Turkijos elektros energetikos sistemos ir UCTE sinchroninio darbo bandymas (2010 09 18 – 2011 09 18). Padaryta išvada, jog pirminis dažnio reguliavimas yra geras ir pakankamas sinchroniniam darbui su UCTE. Normaliu režimu dažnio kitimas neviršija nustatytos 200 mHz ribos. Vidutinis kvadratinis nuokrypis 46 mHz maksimalių ir 40 mHz minimalių apkrovų bandymų metu. Pirminio rezervo kiekis siekia 700 MW ir viršija sinchroniniam darbui būtiną 300 MW ribą.

Pirminiam dažnio reguliavime turi dalyvauti šiluminiai agregatai arba hidroagregatai, kurių vandens laiko pastovioji neviršija 1 sekundės, todėl kai kurių elektrinių (ypač kūrenamų anglimis) pirminio dažnio valdymo kokybė turi būti pagerinta. Antrinis dažnio reguliavimas yra geras ir pakankamas sinchroniniam darbui su UCTE. Dažnio svyravimai po sistemos darbo sutrikdymo nusistovi iki leistinų ribų (+/- 30 mHz) per kelias minutes ir neviršija leistinos 15 minučių ribos. Elektrinės, dalyvaujančios tiek pirminiam, tiek ir antriniam dažnio valdyme, negali būti apkrautos iki nominalių galių ir turi turėti pakankamus dažnio reguliavimo rezervus. Tarpsisteminių pastočių įtampos tiriamuoju laikotarpiu neviršijo leistinų 380–420 kV reikšmių. PSS įrenginių darbas tenkina sistemos stabilaus darbo reikalavimus. Maksimalių apkrovų tyrimo metu nustatytos 10 mHz neįtakios zonos užtikrino pakankamą dažnio valdymo kokybę normalių ir avarinių režimų metu. Minimalių apkrovų tyrimo metu visų tipų agregatų reguliatorių neįtakios zona buvo 0 mHz, ir tai pagerino sistemos dažnio valdymo kokybę. Tiriamuoju laikotarpiu dideli (iki 380 mHz) dažnio svyravimai užfiksuoti dėl netinkamo režimų planavimo, kai apkrova buvo didesnė nei tikėtasi. Dėl to elektrinėse, dalyvaujančiose valdant dažnį, buvo aktyvuotas antrinio reguliavimo rezervas, o kitos elektrinės dėl prastos elektros rinkos organizacijos sustabdė gamybą. Eksperimentai pavyko ir Turkijos elektros energetikos sistema buvo pasiruošusi atlikti sinchroninio darbo su UCTE bandymą (2 etapas).

Viename iš dokumentų, kuriame buvo analizuojama Turkijos elektros energetikos sistema, teigiama, jog prieš bet kokią sistemos plėtrą būtina atlikti tyrimus (t. y. analizę, bandymus ir ataskaitas), siekiant išvengti galimo neigiamo tinklų sujungimo poveikio sistemos saugumui, taip pat visai UCTE sistemai. Sistemos plėtros analizės, galimų rizikų identifikavimas ir tinkamų priemonių taikymas yra esminės prielaidos veiksmingam tinklų sujungimui. Įgyvendinant Turkijos elektros energetikos sistemos sujungimo su UCTE elektros energetikos sistema atliko papildomus techninius tyrimus – Turkijos elektros energetikos sistemoje buvo įrengti du tarpsisteminių svyravimų matavimo sistemos (WAMS) įrenginiai. Dinamikos grupės ekspertai turėjo nuotolinės prieigos galimybes prie WAMS programų. Remiantis dažnio kontrolės veiklos ataskaitomis, kurias nuo 2004 m. kas mėnesį rengė TEIAS bei buvo rinkti WAMS įrašai, UCTE ekspertai taip pat atkreipė dėmesį į Turkijos elektros

energetikos sistemos dažnio svyravimus. Kadangi Turkijos dažnio svyravimų egzistavimas neatitinka UCTE reikalavimų, kurie yra apibrėžti UCTE veiklos vadove, būtina, kad būtų imtasi tolimesnių veiksmų, siekiant, jog Turkijos elektros energetikos sistema veiktų lygiagrečiai kartu su UCTE sistema.

1.3.2. Ukrainos elektros energetikos sistemos prijungimas prie KET

Analogiškai kaip ir Turkijos atveju, Ukrainai siekiant prijungti prie KET, ENTSO-E sukūrė RG CE grupę, kuriai priskyrė koordinuoti ne tik kontinentinės Europos PSO veikimą ir techninę priežiūrą, bet ir atlikti Ukrenergo sistemos monitoringą dėl suderinamumo ir tinkamumo prieš Ukrainos prijungimą prie KET.

Svarbu paminėti, jog 2017 m. birželio 28 d. Ukrenergo pasirašė susitarimą su ENTSO-E dėl sinchronizacijos projekto [10]. Be kita ko, svarbu paminėti, jog Ukraina jau turi elektros jungtis su kaimyninėmis ES šalimis – Lenkija, Slovakija, Vengrija ir Rumunija. Ukrainos *Burshtyn* šiluminė elektrinė (2400 MW), esanti Ivano-Frankivsko regione, yra sinchronizuota su Europos tinklu (todėl ji vadinama „Burštino sala“) ir dėl to gali Europai eksportuoti iki 650 MW elektros energijos (kadangi tarpvalstybinių jungčių pajėgumas yra ribotas). Likusi Ukrainos energijos tinklų sistema yra sinchronizuota su Rusija, Baltarusija ir Moldova. Tai žymiai riboja Ukrainos elektros eksportą ir importo pajėgumus.

Be kita ko, Ukrainos elektros energetikos sistemos sinchronizavimas turės teigiamą poveikį Ukrainos energetiniam saugumui, padidins Ukrainos elektros eksportą į Europos šalis (pagal Ukrenergo lūkesčius – nuo 5 mlrd. kWh iki 18–20 mlrd. kWh), taip pat skatins konkurenciją Ukrainos elektros energijos rinkoje.

Aukščiau minėto 2017 m. pasirašyto susitarimo tekstas nebuvo paskelbtas viešai, tačiau, remiantis Ukrenergo skelbimu, jame pateikiamas reikalavimų sąrašas (prisijungimui prie Europos elektros energetikos sistemos) ir planas, skirtas visiškai sinchronizuoti. Ukrainos veiksmai turėtų būti tokie:

- a) techninių ir norminių reikalavimų įvykdymas (pagal reikalavimų sąrašą);
- b) perėjimas nuo sinchronizuoto darbo su NVS šalių energetikos sistemomis į izoliuotą darbo režimą; ir
- c) visiškai sinchronizuoti Ukrainos elektros tinklą su KET [11], [12], t. y. Ukrainos prisijungimo atveju pagrindiniai uždaviniai: atlikti papildomas reikalingas studijas, išspręsti elektros tinklo kodeksų neatitikimus, nustatyti reikalingus procesus ir priemones, įdiegti reikalingus įrenginius ir kitą įrangą.

Pirmas tikslas buvo detalizuoti reikalingas priemones, siekiant prisijungti prie KET, įskaitant visus techninius ir valdymo reikalavimus. Analogiškai aukščiau minėtu Turkijos atveju, privaloma atlikti statinio stabilumo reikalavimus, apibrėžtus OH ir dinaminio stabilumo reikalavimus, t. y.:

- a) pateikti informaciją apie esamo modelio veikimo rodiklius;
- b) nustatyti tikslų dinaminį modelį;
- c) atlikti papildomas reikalaujamas dinaminio stabilumo studijas:

1. patvirtinančią, kad yra saugu dirbti izoliuotai, atsijungus naujoms jungtims su KET;
2. sinchroninio darbo su KET prie įvairių galių mainų;
3. kritinių gedimų prie jungčių su IPS/UPS sistema;
4. didelių atsijungimų abiejose sistemose, kurie sukeltų nebalansus.

d) atlikti realius sistemos bandymus (izoliuoto darbo bei lygiagretaus darbo).

Atlikus tyrimus, siekiant išsiaiškinti, ar Ukrenergo atitinka OH reikalavimus, dinaminio stabilumo reikalavimus bei ar Ukrainos elektros energetikos sistema galėtų dirbti salos ir bandomuoju režimais, užtikrinant saugų Ukrainos ir jai kaimyninių sistemų veikimą, padaryta išvada, jog dabartinė Ukrainos perdavimo sistema pilnai neatitinka OH reikalavimų. Ukrenergo prisiėmė atsakomybę atitikti OH principus bei tą daryti ir ateityje, pasikeitus OH principams.

1.4. Studijų apžvalga

Kaip minėta prieš tai, dažnio stabilumo užtikrinimas yra vienas pagrindinių reikalavimų, siekiant prisijungti prie KET. Dažnio stabilumas apibrėžiamas kaip EES savybė išlikti stabiliam režime ir jį atstatyti atsiradus dideliame trikdžiui tinkle. Nestabilumas gali pasireikšti kaip nenusistovintis ilgalaikis dažnio svyravimas, kuris atsiranda dėl apkrovų ir generuojančių agregatų atsijungimo. Didelėse jungtinėse EES 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 [13].

Atsižvelgiant į tai, kas išdėstyta aukščiau, šiame skyriuje apžvelgiamos atliktos studijos, siekiant išanalizuoti Baltijos šalių prisijungimo prie KET galimus scenarijus bei įvertinti sistemos stabilumą.

Viena pirmųjų studijų – Baltijos šalių perdavimo sistemų integracijos į kontinentinės Europos elektros sistemą sujungimo galimybių studija, kuri buvo atlikta 2013 metais. 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.

Išanalizavus studiją, nustatyta, jog sinchroninis Baltijos EES 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 pažymėta, jog reikėtų modernizuoti valdymo prietaisus ir rezervo reguliavimą. Be to, reikėtų įrengti keletą nuolatinės srovės intarpų su Rusija ir Baltarusija. 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 [14].

Be kita ko, buvo atliktos ir kitos studijos, susijusios tiek su galimų sinchronizacijos scenarijų analize, tiek su dažnio valdymu [15].

Baltijos šalių sinchronizacijos scenarijų studija (JRC studija). 2016–2017 m. JRC bendradarbiaudamas su Baltijos jūros regiono šalių atstovais BEMIP formate atliko Baltijos šalių sinchronizacijos scenarijų analizės studiją. Studijoje nagrinėtos trys alternatyvos:

1. Baltijos šalių darbas izoliuotu režimu (vertintos dvi alternatyvos, kuomet Baltijos šalys keičiasi bei nesikeičia rezervais su kaimyninėmis šalimis (išskyrus Kaliningrado sritį);

2. Baltijos sinchronizacija su Šiaurės šalimis per 3 naujas kintamosios elektros srovės (angl. *Alternating current (AC)*) kabelines jungtis tarp Estijos ir Suomijos.

3. Baltijos sinchronizacija su KET (vertintos dvi alternatyvos, t. y. per esamą LitPol Link jungtį bei per esamą LitPol Link ir naują dvigrandę LitPol Link 2 jungtį).

Studijos rezultatai dar kartą patvirtino techniniu, ekonominiu ir elektros tiekimo patikimumo aspektais optimalų Baltijos šalių sinchronizacijos su Vakarų Europos tinklais scenarijų – sinchronizaciją su KET per Lenkijos elektros energetikos sistemą. Studijos rezultatams 2017 metų 3 ketvirtį BEMIP šalys pritarė, tačiau, siekiant pasirinkti sinchronizacijos scenarijų, buvo įvardintas ir papildomos analizės poreikis dėl dinaminio bei statinio dažnio stabilumo klausimų. Buvo nutarta atlikti dvi papildomas studijas šiais klausimais [16]. O 2018 metų birželį Briuselyje pasirašytas Lietuvos, Latvijos, Estijos, Lenkijos ir Europos Komisijos politinis susitarimas dėl sinchronizacijos [17].

Baltijos šalių sinchroninio sujungimo su KET dinaminio stabilumo studija. 2018 metų balandį Bulgarijoje, Sofijoje pasirašyta sinchronizavimo projektui svarbios dinaminio stabilumo studijos finansavimo sutartis. Studiją Baltijos valstybių (LITGRID AB, AST ir „Elering“) ir Lenkijos (PSE) perdavimo tinklų operatorių užsakymu atliko Gdansko universiteto mokslininkai [18]. Studijos tikslas – išanalizuoti Baltijos šalių EES prijungimo prie KET įtaką dinaminiam stabilumui [19]. Studija apima tarp sisteminių svyravimų bei pereinamųjų procesų stabilumo analizes šiems sinchronizacijos su KET scenarijams (per esamą LitPol Link jungtį, per esamą LitPol Link bei naują LitPol Link 2 jungtis, per esamą LitPol Link bei naują HVDC jungtį tarp Lietuvos ir Lenkijos).

Baltijos šalių sinchroninio sujungimo su KET dažnio stabilumo studija. [15]. 2018 m. 4 ketvirtį Baltijos šalių PSO, kartu su ENTSO-E inicijavo Baltijos šalių sinchroninio sujungimo su KET dažnio stabilumo studiją. Studijos tikslas – įvertinti tikėtinus papildomus investicinius, operacinius bei socio-ekonominius kaštus susijusius su Baltijos šalių EES dažnio stabilumo užtikrinimu sinchroninio ryšio praradimo bei darbo salos režimu atvejais analizuojamiems sinchronizacijos scenarijams, nurodytiems aukščiau.

2. EES stabilaus darbo su KET sinchroniniu režimu vertinimas bei tyrimo metodika

Atlikus užsienio šalių prisijungimo prie KET patirties apžvalgą, matyti, kad pagrindiniai reikalavimai, norint prisijungti prie KET, yra statinio stabilumo reikalavimų, apibrėžtų ENTSO-E parengtose kontinentinės Europos perdavimo sistemos operatorių veiklos principų ir taisyklių rinkinyje (OH), atitikimas ir EES gebėjimas dirbti salos bei bandomuoju režimais, užtikrinant saugų sistemų veikimą.

Pažymėtina, jog rengiantis elektros tinklų sinchronizavimui su KET, Baltijos šalių EES izoliuoto darbo bandymas turėjo vykti šių metų birželį ir trukti apie 18 valandų, sistemą išbandant kartu su latviais ir estais. Tačiau pažymėtina, jog Estijos PSO „Elering“ ir Latvijos PSO AST per „Nord Pool“ biržą pranešė, jog neribotam laikui atidėjo izoliuoto darbo bandymą dėl Rusijos sprendimo tokį bandymą Kaliningrado srityje atlikti dar gegužės pabaigoje [20]. Įvertinus tai, jog izoliuoto darbo bandymas yra tik vienas iš reikalavimų, norint sėkmingai prisijungti prie KET, šiame darbe izoliuotas darbas nagrinėjamas nebus.

2.1. Sistemos būsenų klasifikacija

Atsižvelgiant į tai, kad turi būti išspręsta nemažai klausimų, susijusių su darbo sąlygomis, siekiant prisijungti prie KET sinchroniniam darbui, įskaitant sistemos inerciją, dažnio nuokrypius bei rezervus, šiame skyriuje siekiama apžvelgti galimas EES būsenas.

Siekiant užtikrinti tinklo eksploatavimo saugumą, užkirsti kelią incidentui plisti ar sunkėti, kad būtų išvengta didelio masto trikdžių ir visiško atsijungimo būsenos ir būtų galima efektyviai ir greitai atkurti avarinės būsenos ar visiško atsijungimo būsenos elektros energijos sistemos veikimą, 2017 m. lapkričio 24 d. Komisijos reglamente (ES) 2017/2196 dėl tinklo kodekso, kuriame nustatomi elektros sistemos avarijų šalinimo ir veikimo atkūrimo reikalavimai, nustatomi PSO vykdomo avarinės, visiško atsijungimo ir veikimo atkūrimo būsenų valdymo reikalavimai [21]. Normalioji būsena, pavojaus būsena, avarijos būsena, atsijungimo būsena bei atkūrimo būsena aprašomos 2017 m. rugpjūčio 2 d. Komisijos reglamente (ES) 2017/1485, kuriuo nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo gairės [22].

Pagal aukščiau minėtą reglamentą, perdavimo sistema klasifikuojama į atitinkamas būsenas, pagal šiuos rodiklius:

- a) įtampos ir energijos srautus;
- b) dažnį;
- c) aktyviosios ir reaktyviosios galios rezervų pakankamumą (tam, kad nebūtų pažeistos tinklo eksploatavimo saugumo ribos įvykus avariniams atvejams, įtrauktiems į avarinių atvejų sąrašą);
- d) susijusio PSO valdymo rajone sistema veikia ir, jei įvyks į avarinių atvejų sąrašą įtrauktas avarinis atvejis ir bus aktyvinti taisomieji veiksmai, toliau veiks nepažeisdama tinklo eksploatavimo saugumo ribų [22].

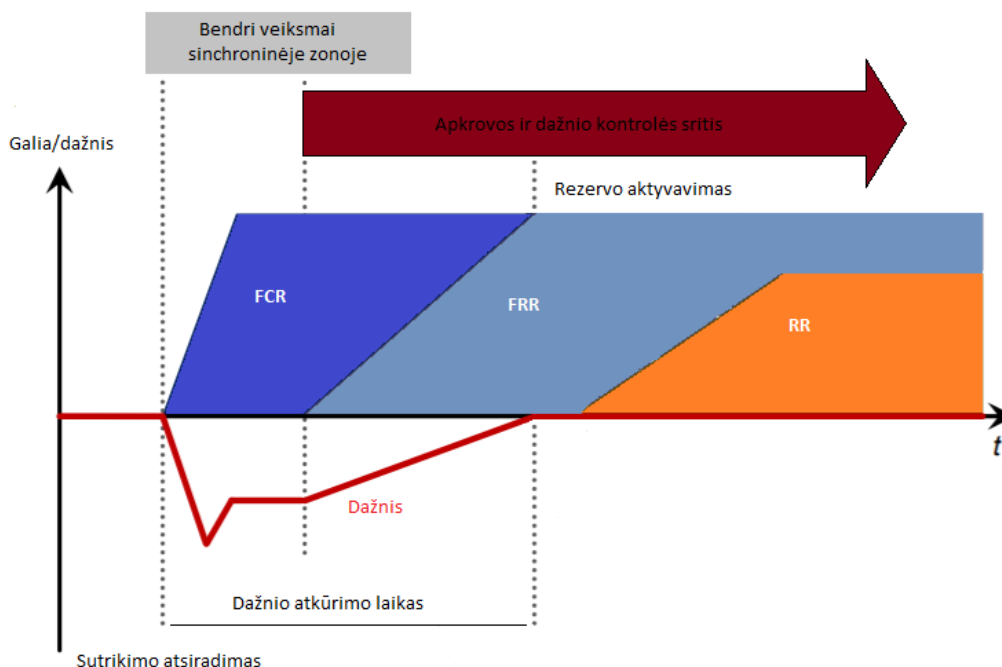
2.2. Sistemos rezervai

Kiekviena sinchroninė zona sukurta taip, kad būtų užtikrinta, jog po trikdžių, atsiradusių dėl pusiausvyros tarp gamybos ir paklausos, pasekmės būtų pagrįstos. Kitaip tariant, tinklo dažnio

pasikeitimai yra tiesioginis generacijos ir apkrovos disbalansas: tinklo dažnis auga, jei generacija viršija apkrovą ir turi tendenciją mažėti, jeigu apkrova viršija generaciją. Dėl apkrovos svyravimų bei siekiant užtikrinti dažnio stabilumą, ENTSO-E yra nustačiusi dažnio išlaikymo rezervą (FCR) (atitinka anksčiau laikytą pirminį (I) galios rezervą), dažnio atkūrimo rezervą (angl. *Frequency restoration reserves* (FRR)) (atitinka anksčiau laikytą antrinį (II) galios rezervą) bei pakaitos rezervą (angl. *Replacement reserves* (RR)) (atitinka anksčiau laikytą tretinį (III) galios rezervą) apibrėžimus bei dydžius, kuriuos turi palaikyti kiekviena iš šalių [22].

FCR – aktyviosios galios rezervas, kurį atsiradus disbalansui galima panaudoti elektros sistemos dažniui išlaikyti [22]. Kitaip tariant tai generuojantis šaltinis, kuris turi būti pajėgus per 30 sekundžių pasiekti reikiamą pirminio rezervo dydį ir išlaikyti jį ne mažiau kaip 15 minučių. Praėjus 15 minučių po pirminio reguliavimo aktyvavimo, generuojantis šaltinis vėl turi būti pasiruošęs atlikti pirminį reguliavimą, jei dažnis pasieks nustatytą nuokrypį. Paprastai sistemos pirminio reguliavimo galios rezervo dydis negali būti mažesnis už didžiausią generavo galią, kuri staigiai gali būti prarasta. Priimta, kad pirminiame reguliavime dalyvauja veikiantys: kondensaciniai elektrinių blokai, dujų turbininiai blokai, kombinuotojo ciklo elektrinių blokai, asinchroninių ryšių keitikliai tarp sistemų.

Apkrovos-dažnio-kontrolės procesų sistema remiasi dabartine geriausia elektros energetikos sistemos veikimo ir valdymo inžinerijos praktika. 3 pav. pateikta FCR, FRR ir RR tarpusavio priklausomybė: dažnio išlaikymo procesas stabilizuoja dažnį po trikdžių esant pastoviai vertei per leistiną maksimalų pastoviosios būsenos dažnio nuokrypį visame sinchroniniame rajone, dažnio atkūrimo procesas reguliuoja dažnį iki nustatytojo taško ir pakeičia aktyvuotą FCR. RR procesas pakeičia aktyvuotą FRR, o kai kuriose sinchroninėse srityse – FCR (šis procesas taip pat gali palaikyti FRR aktyvavimą) [23].

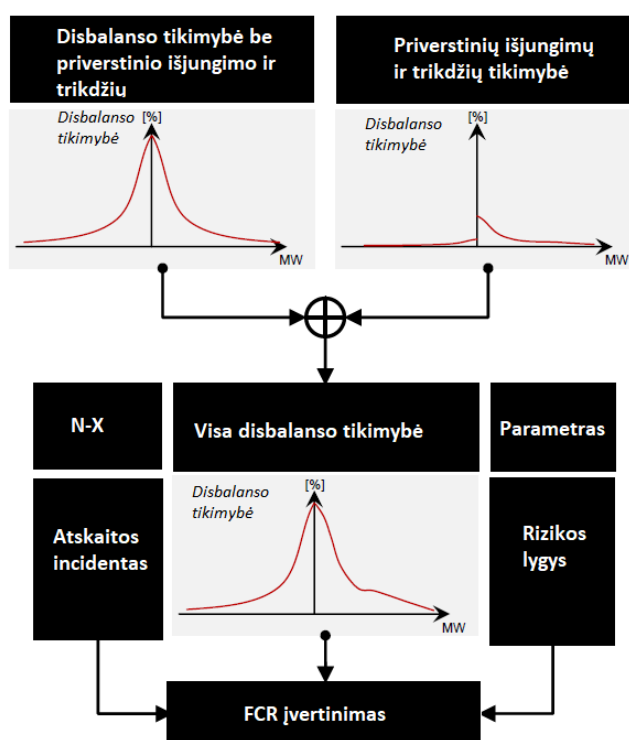


3 pav. Apkrovos dažnio kontrolė: pagrindinė proceso struktūra, [23]

Vadovaujantis ENTSO-E tinklo kodekso dėl apkrovos ir dažnumo valdymo ir rezervų patvirtinamuoju dokumentu (angl. *Supporting Document for the Network Code on Load-Frequency Control and Reserves*) [24], 2017 m. rugpjūčio 2 d. Komisijos reglamentu (ES) 2017/1485, kuriuo

nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo gairės [22] bei OH reikalavimais, bendras pirminio rezervo kiekis visam KET nustatomas atsižvelgiant į valdymo patirtį ir teorinius argumentus. Šiuo metu nustatant atskaitos incidento dydį, t. y. didžiausią teigiamą arba neigiamą momentinį sinchroninėje zonoje generuojamos ir vartojamos galių nesutapimą, į kurį atsižvelgiama nustatant FCR apimtį, yra naudojamas N-2 kriterijus. N-2 kriterijus taikomas remiantis eksploatacinėmis charakteristikomis, susijusiomis su sistemos patikimumu ir gamybos įrenginių dydžiu, t. y. įvertinus du didžiausius blokus (šiuo atveju atominės elektrinės du blokus po 1 500 MW). Be to, atskaitos incidentas yra simetriškas, o tai reiškia, kad teigiamas FCR pajėgumas yra lygus neigiamam FCR pajėgumui.

Papildomai su atskaitos incidentu, FCR išsekimo tikimybė gali būti apskaičiuojama derinant priverstinių momentinių išjungimų ir trikdžių tikimybę naudojant tikėtiną FCR dėl esamos dažnio atkūrimo kontrolės klaidos (žr. 4 pav.) [23].



4 pav. FCR tikimybinis matavimas [23]

Vadovaujantis 2017 m. rugpjūčio 2 d. Komisijos reglamentu (ES) 2017/1485, kuriuo nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo gairės, žemyninės Europos sinchroninėje zonoje atskaitos incidentas turi būti 3 000 MW teigiamąja kryptimi ir 3 000 MW neigiamąja kryptimi [24].

Privalomo FCR dydis remiantis ENTSO-E reikalavimais kiekvienoje Baltijos EES nustatomas pagal 1 ir 2 formules (laikant visų trijų Baltijos šalių elektros energetikos sistemą vienu valdymo bloku):

$$K_i = \frac{(P_{\text{cons}(i)} + P_{\text{gen}(i)})}{(P_{\text{cons}(CE)} + P_{\text{gen}(CE)} + P_{\text{cons}(Baltics)} + P_{\text{gen}(Baltics)}} \quad (1)$$

kur:

K_i – KET privalomas pirminis rezervas megavatais (MW);

$P_{gen(i)}$ – *i*-ojo generatoriaus galia.

$$P_{FCR(i)} = K_i \cdot 3000 \quad (2)$$

kur:

$P_{FCR(i)}$ – privalomas pirminis rezervas *i*-ajai valstybei

arba FCR galima apskaičiuoti pagal 3 formulę:

$$r_i^k = \frac{G_i^{k-1}}{\sum_{i \in I} G_i^{k-1}} \times R \quad (3)$$

kur:

r_i^k – *i*-osios valstybės privalomas pirminis rezervas megavatais (MW);

G_i^{k-1} - bendra elektros energijos gamyba regione;

R – reikalingas FCR dydis sinchroninėje zonoje.

FRR – tai aktyviosios galios rezervas, kurį galima panaudoti elektros sistemos vardiniam dažniui atkurti, o sinchroninėje zonoje, kurią sudaro daugiau kaip vienas galios ir dažnio valdymo rajonas, – planinei galių balanso vertei atkurti. Kitaip tariant, jeigu per 15 min. atsijungęs blokas neįjungiamas, turi būti įjungiamas antrinis rezervas, automatiškai arba ranka, pakeičiantis pirminio rezervo galią. Toks rezervas visą laiką turi būti paruoštas įjungimui ir išlaikomas iki 12 val. 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. Antriniame reguliavime dalyvauja veikiantieji hidraulinių ir hidroakumuliacinių elektrinių blokai, veikiantieji kondensaciniai elektrinių blokai, veikiantieji dujų turbininiai blokai, kombinuoto ciklo elektrinių blokai [22].

RR – rezervas, kurį galima panaudoti siekiant atkurti arba išlaikyti reikiamą FRR lygį, kad būtų pasirengta kompensuoti papildomą sistemos disbalansą, taip pat gamybos rezervas. Pažymėtina, kad antrinis rezervas kiek galima greičiau turi būti pakeičiamas tretiniu, kad, esant reikalui, vėl galėtų pakeisti pirminį, t. y. tretinis reguliavimo rezervas yra skirtas antrinio reguliavimo rezervo bei pirminio reguliavimo rezervo atstatymui. Tretinis rezervas lieka aktyvuotas tol, kol likviduojama avarija. Jo dydis priklauso nuo sistemos apkrovos. Tretiniame reguliavime dalyvauja veikiantieji kondensaciniai elektrinių blokai, dujų turbininiai elektrinių blokai, kondensaciniai elektrinių agregatai [22].

Pagrindinės dažnio stabilumo gerinimo priemonės yra šios: automatinis dažninis nukrovimas (ADN), automatinis žadinimo reguliavimas (AŽR), automatinis kartotinis įjungimas (AKI), 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. AKI – paremtas pakartotiniu oro linijos įjungimu ir sėkmingo AKI atveju padeda greitai atstatyti prieš tai buvusią tinklo topologiją, taip užtikrinant didesnę sistemos patikimumą.

2.3. Dažnio kitimo sparta

ENTSO-E kelia reikalavimus, kurių tikslas – užtikrinti, kad energijos gamybos moduliai (NC RfG – Network Code on Requirements for Grid), paklauskos principu veikiantys blokai (DR – Demand response) ir teikiantis tokias paslaugas DCC (angl. Demand Connection Code, (DCC)), aukštosios įtampos nuolatinės srovės (angl. High Voltage Direct Current, (HVDC)) sistemos bei DC jėgainės neatsijungtų nuo bendros sistemos didesniu nei maksimalia leistina dažnio kitimo sparta (df / dt) [25]. Po tam tikrų incidentų tinkle dažnis gali susvyruoti didele dažnio kitimo sparta (pvz., po didelių generatorių praradimo mažesnėje sistemoje). Infrastruktūra turėtų veikti taip, kad padėtų stabilizuoti ir atkurti tinklą ir pasiekti įprastas eksploataavimo sąlygas.

Aukšta df / dt reikšmė gali kelti pavojų saugiam sistemos veikimui dėl individualių sinchroninių mašinų mechaninių apribojimų (nominalūs pajėgumai), apsaugos įtaisų suveikimas, RoCoF slenkstinės vertės arba sinchroniškumo problemos, susijusios su apkrovos mažinimo schemomis.

Pradinis df / dt yra momentinis RoCoF iš karto po generatoriaus išjungimo arba apkrovos pasikeitimo elektros energijos sistemoje, dar nesuveikus automatiniam reguliatoriams. Teoriškai tai yra aukščiausia sistemos RoCoF [25]. N sinchroninių apkrovų ir generatorių tarpusavio sujungimo vidurkį galima apskaičiuoti pagal 4 formulę:

$$\frac{d\Delta f}{dt} \Big|_{t=0^+} = \frac{f^0 P_k}{2 \sum_{i=1, i \neq k}^N H_i S_i} \quad (4)$$

Čia Δf dažnio nuokrypis nuo nominalios vertės f^0 , 0^+ atsijungimo nuo apkrovos ar generatoriaus momentas, P_k yra prarastas generatorius ar apkrova (k – įrenginio indeksas), H_i ir S_i yra inercijos konstanta ir įrenginio galios įvertis, kur i kinta nuo 1 iki N [26].

Airijoje, į kurios sistemą panaši ir Baltijos šalių struktūra, energetikos reguliavimo komisija CER (angl. – Commission for Energy Regulation), kelia reikalavimus, kad visi gamintojai atitiktų 1 Hz/s RoCoF. 2018 metais visi aukščiausio lygmens generatoriai buvo testuojami ar atitinka šiuos reikalavimus, o dauguma vidutinio ir žemo prioriteto generatorių buvo patikrinti anksčiau [27].

2.4. Sistemos inercija

Reikalavimai, susiję su minimalia inercija, kuri yra svarbi sinchroninės zonos dažnio stabilumui numatyti Europos Komisijos reglamente (ES) 2017/1485, kuriuo nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploataavimo gairės:

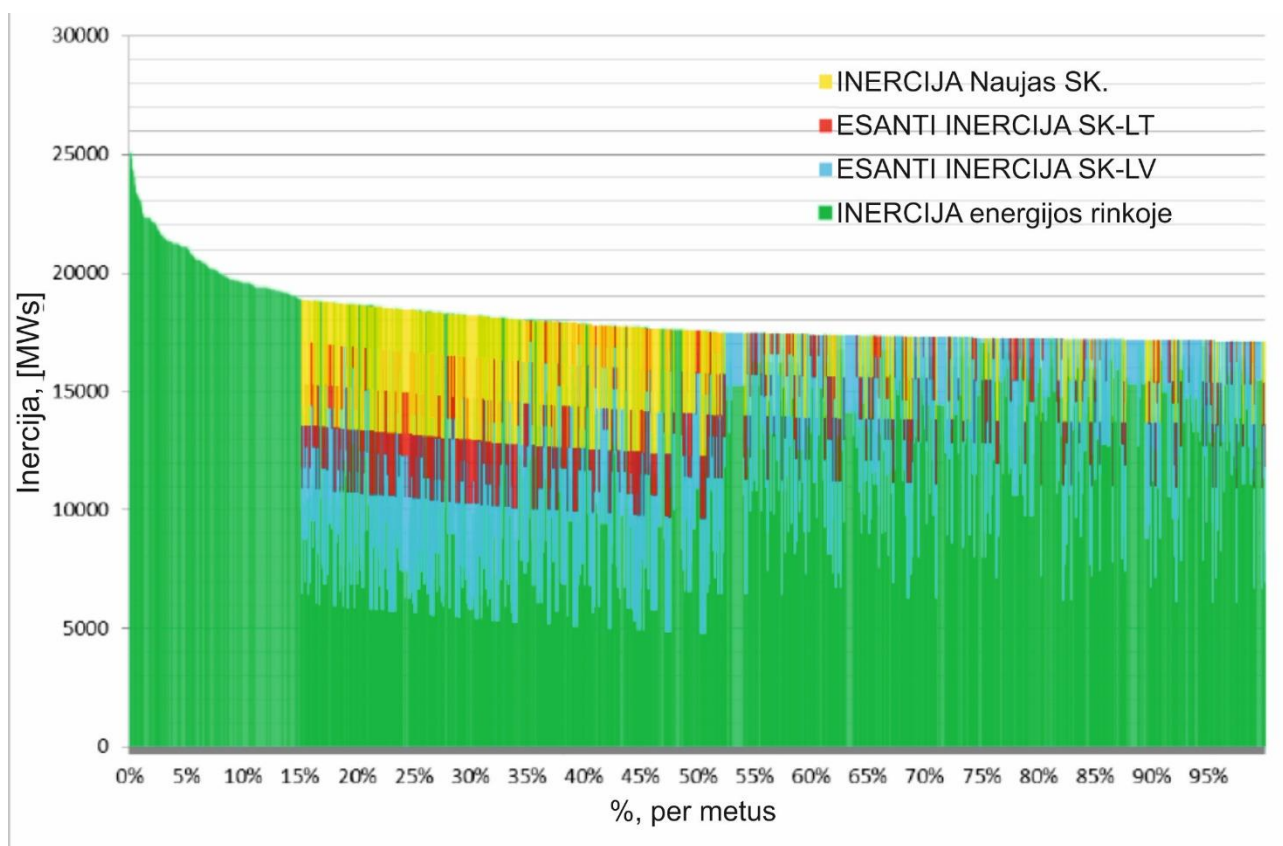
a) visi sinchroninės zonos PSO atlieka bendrą sinchroninės zonos tyrimą, kad išsiaiškintų, ar reikia nustatyti minimalios inercijos reikalavimus, atsižvelgiant į išlaidas ir naudą, taip pat galimas alternatyvas. Visi PSO savo tyrimų rezultatus praneša savo reguliavimo institucijoms. Visi PSO atlieka periodinę peržiūrą ir tuos tyrimus kas dvejus metus atnaujina;

b) jei atlikus a punkte nurodytus tyrimus paaiškėja, kad reikia nustatyti minimalios inercijos reikalavimus, visi tos sinchroninės zonos PSO bendrai parengia minimalios inercijos, būtinos siekiant išlaikyti tinklo eksploataavimo saugumą ir užtikrinti, kad nebūtų pažeistos stabilumo ribos, nustatymo metodiką. Ta metodika turi atitikti efektyvumo ir proporcingumo principus, ji turi būti parengta per šešis mėnesius po a punkte nurodytų tyrimų užbaigimo ir atnaujinama per šešis mėnesius po to, kai tampa prieinami atnaujinti tyrimų rezultatai, ir

c) kiekvienas PSO, remdamasis b punkte nurodyta metodika ir pagal ją gautais rezultatais, savo valdymo rajone įdiegia minimalios inercijos užtikrinimo tikralaike veiksena priemones [22].

Elektros sistemos inercija priklauso nuo veikiančių (besisukančių) generatorinių agregatų masių. Pvz., anglimi kūrenamoje elektrinėje anglis sudeginama ir gaminamas garas, kuris suka turbiną ir atitinkamai generuoja elektros energiją. Gamykla dirba su sunkia, besisukančia mase, kuri turi inerciją. Jei staiga būtų nustojama deginti anglis, turbina sukėtųsi toliau.

Remiantis ENTSO-E atliktu elektros rinkų modeliavimu 2030 metams, pateiktu Baltijos šalių sinchroninio sujungimo su KET dinaminio stabilumo studijoje, nustatyta, kad pakankamą kiekį inercijos galima užtikrinti dėl elektros rinkoje veikiančių sinchroninių generatorių tik apie 15-20 proc. laiko per metus (5 pav.).



5 pav. Inercijos užtikrinimas

Likusį laiką (apie 80 proc.) reikiamam inercijos kiekiui palaikyti yra būtinos kitos priemonės. Tokios priemonės gali būti: šiluminių elektrinių agregatai, demontuojamų šiluminių elektrinių agregatų modernizavimas ir pritaikymas dirbti sinchroninių kompensatorių (SK) režimu, esamų hidro ar hidroakumuliacinių agregatų veikimas sinchroninių kompensatorių režimu. Taip pat gali būti panaudoti ir nauji pažangūs sinchroniniai kompensatoriai.

Todėl apibendrinant, galima teigti, kad bet kokia jėgainė su judančiomis dalimis turi inerciją. Pvz. hidroelektrinė veikia taip pat kaip ir anglimi kūrenama elektrinė, tik vietoj garo turbiną suką krentantis vanduo. Jei vanduo pašalinamas, o turbina atjungžiama nuo generatoriaus, turbina sukasi, kol trintis sustabdys veiksmą.

Vėjo jėgainės taip pat turi sukimosi inerciją. Jei vėjo jėgainės sukasi – priklausomai nuo turbinos dydžio, ašmenų galai gali judėti 180 km/h greičiu – ir jeigu vėjas staiga sustoja, turbinos toliau judės iki trinties ir sukimosi energijos konversijos elektros energiją, lėtina juos. Kalbant apie saulės energiją, pažymėtina, jog pagrindinė inercijos ir saulės modulių problema ta, jog saulės baterijos ar fotovoltiniai elementai neturi judančių dalių, todėl jie neturi mechaninės inercijos.

Siekiant ištirti, ar sistemoje yra pakankamai galios „sugauti“ krintantį dažnį bei kokie generatoriai būtų patikimiausi, yra sudarytas generatorių modelis atsižvelgiant į pagrindinius rotoriaus mechaninius parametrus [28].

Inercijos laiko pastovioji H nusako sukauptą energijos kiekį rotoriuje, išreikštą MWs prie pilnutinės generatoriaus galios. Standartiškai inercijos laiko pastovioji kinta 3÷15 MWs/MVA ribose, priklausomai nuo generatoriaus tipo ir dydžio. Jeigu generatoriaus rotoriaus inercija J žinoma kgm/s, tai H apskaičiuojama pagal 5 formulę:

$$H = \frac{5.48 \times 10^{-9} \times J (\text{RPM})^2}{S_{\text{MVA}}} \text{ MW} \cdot \text{s/MVA} \quad (5)$$

Dauguma generatorių dinaminų modelių turi slopinimo koeficiento D parametą. Jis nusako generatoriaus rotoriaus modelio švytavimų slopinimo poveikį ir jo reikšmė standartiškai svyruoja 0÷4 ribose.

1 lentelė. Generatorių tipinės inercijos laiko pastoviosios reikšmės [28]

| Generatoriaus tipas | Inercijos laiko pastovioji H , MWs/MVA |
|--|--|
| Turbogeneratorius 3600 r/min (2 polių) | 2,5–6,0 |
| Turbogeneratorius 1800 r/min (4 polių) | 4,0–10,0 |
| Hidrogeneratorius | 2,0–4,0 |

2.5. Imties duomenys bei sąstato sudarymas

3.1. poskyryje atliekama FCR užtikrinimo analizė, t. y. apskaičiuojamas reikalingas rezervo dydis pagal 2.4. poskyryje pateiktas formules bei atliekamas ekonominis vertinimas, palyginant šiluminių elektrinių, hidroelektrinių bei baterijų palaikymo kaštus.

Inercijos užtikrinimo tyrimui sudaromas sąstatas pagal technines elektrinių charakteristikas (įrengtąsias bei pilnąsias galias), faktinę elektros energijos gamybą, t. y. dalyvavimą rinkoje bei prieinamą galią, kitaip tariant pagal sistemoje turimą suminę galią, kuri lieka įvertinus generuojančių galių sumažėjimą dėl techninių ribojimų elektrinėse, šiluminių elektrinių galios sumažėjimo dėl šilumos gamybos technologinių procesų, atsinaujinančių išteklių neprieinamumo, vykdomų elektrinių remontų, laikino elektros energijos gamybos veiklos sustabdymo („konservavimo“) ir pan.

2 lentelėje pateikiamos Lietuvos elektrinių įrengtosios galios 2018 m. sausio 1 d.

2 lentelė. Lietuvos EES elektrinių įrengtoji galia 2018 m., MW, [29]

| Elektrinė | | Įrengtoji galia, MW | |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|-----|
| Elektrinės Lietuvos EES | | | |
| Šiluminės elektrinės: | | 1910 | |
| Lietuvos elektrinė | | 1045 | |
| Vilniaus elektrinė 3* | | 360 | |
| Kauno elektrinė | | 170 | |
| Mažeikių elektrinė | | 160 | |
| Panevėžio elektrinė | | 35 | |
| Kitos šiluminės elektrinės | | 140 | |
| Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė | | 900 | |
| AEI naudojančios elektrinės: | | 856 | |
| Kauno hidroelektrinė | | 101 | |
| Mažosios hidroelektrinės | | 27 | |
| Vėjo elektrinės | Prijungtos prie PSO | 433 | 521 |
| | Prijungtos prie STO | 88 | |
| Saulės elektrinės | | 82 | |
| Biokuro | Biomasės | 62 | 102 |
| | Biodujų | 40 | |
| Atliekas deginančios elektrinės | | 22 | |
| Iš viso: | | 3666 | |

* 2015 m. gruodžio 31 d. sustabdyta Vilniaus trečioji termofikacinė elektrinė – didžiausia kogeneracinė elektrinė Lietuvoje, kartu gaminanti elektros energiją ir šilumą. 603 MW instaliuotos šilumos galios ir 360 MW elektros galios jėgainė veikė nuo 1983 metų.

Iš 2 lentelės matyti, jog Lietuvos elektros energetikos sistemos generatorių įrengtoji galia 2018 m. sausio 1 d. siekė 3666 MW [29]. 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 bus vertinamas tik 9 blokas, kurio galia siekia 455 MW. Vilniaus trečioji termofikacinė elektrinė sustabdyta 2015 m. gruodžio 31 d., todėl toliau tyrime vertinama nebus.

3 lentelėje pateikiamos Lietuvos elektrinių pilnutinės galios 2018 m., MVA

3 lentelė. Lietuvos EES elektrinių, prijungtų prie perdavimo tinklo, pilnutinė galia 2018 m., MVA

| Elektrinė | | Pilnutinė galia, MVA | |
|-------------------------------------|----|----------------------|-------------|
| Elektrinės Lietuvos EES, MVA | | | |
| Šiluminės elektrinės: | | | |
| Lietuvos elektrinė | G7 | 353 | 1230 |

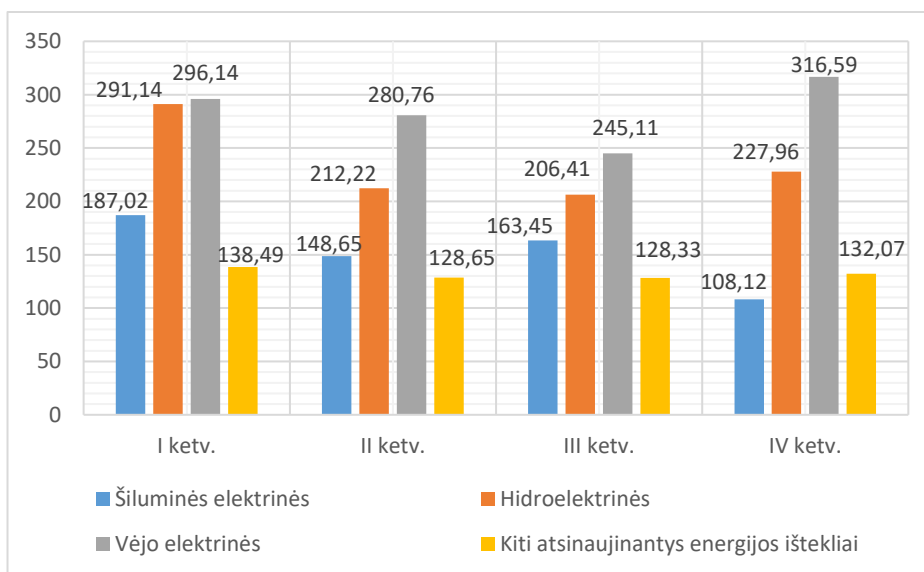
| | | | |
|-------------------------------------|----|-------|-----------------|
| | G8 | 353 | |
| | G9 | 524 | |
| Mažeikių elektrinė | G1 | 125 | 250 |
| | G2 | 125 | |
| Kauno hidroelektrinė | G1 | 29,5 | 118 |
| | G2 | 29,5 | |
| | G3 | 29,5 | |
| | G4 | 29,5 | |
| Panevėžio elektrinė | G1 | 29,25 | 41,11 |
| | G2 | 11,86 | |
| Kauno elektrinė | G1 | 78,75 | 203,75 |
| | G2 | 125 | |
| Vilniaus E-2 | G1 | 15 | 35,83 |
| | G2 | 20,83 | |
| Vilniaus E-3 | G1 | 247 | 494 |
| | G2 | 247 | |
| Lifosos elektrinė | G1 | 7,5 | 38,75 |
| | G2 | 31,25 | |
| Achemos elektrinė | G1 | 24,4 | 80,65 |
| | G2 | 56,25 | |
| Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė | G1 | 248 | 992 |
| | G2 | 248 | |
| | G3 | 248 | |
| | G4 | 248 | |
| Vėjo elektrinės | – | – | 475,93 |
| Iš viso: | – | – | 3 960,02 |

Toliau sąstatui parinkti yra nagrinėjama Lietuvos elektrinių faktinė elektros energijos gamyba 2018 m. Duomenys surinkti iš viešai prieinamų šaltinių, tokių kaip Lietuvos elektros energijos perdavimo sistemos operatoriaus LITGRID AB tinklalapio, kuriame pateikiamos ketvirtinės bei metinės elektros energijos gamybos ir vartojimo balanso duomenys bei Komisijos internetinės svetainės, kuriame pateikiamos ketvirtinės rinkos ataskaitos, bei kitų aktualių šaltinių [29], [30].

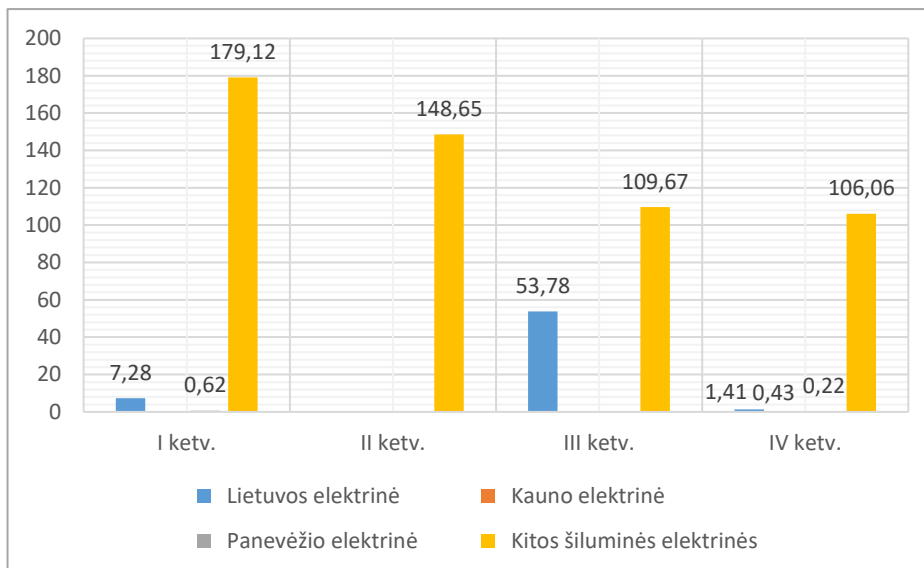
4 lentelė. Lietuvos EES elektrinių, elektros energijos gamyba 2018 m., GWh, [29], [30].

| Eil. Nr. | Rodiklis | GWh | | | | |
|----------|--|---------|----------|-----------|----------|-------------------|
| | | I ketv. | II ketv. | III ketv. | IV ketv. | Nuo metų pradžios |
| | Elektros energijos gamyba (Neto) | 912,78 | 779,27 | 743,31 | 784,74 | 3220,11 |
| 1. | Šiluminės elektrinės | 187,02 | 148,65 | 163,45 | 108,12 | 607,23 |
| 1.1. | Lietuvos elektrinė | 7,28 | 0,00 | 53,78 | 1,41 | 62,47 |
| 1.2. | Vilniaus elektrinė | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1.3. | Kauno elektrinė | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,43 | 0,43 |
| 1.4. | Panevėžio elektrinė | 0,62 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 0,84 |
| 1.5. | Mažeikių elektrinė | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,13 |
| 1.6. | Kitos šiluminės elektrinės | 179,09 | 148,62 | 109,63 | 106,03 | 543,36 |
| 2. | Hidroelektrinės | 291,14 | 221,22 | 206,41 | 227,96 | 946,72 |
| 2.1. | Kauno HE | 139,34 | 99,12 | 53,64 | 67,29 | 359,38 |
| 2.2. | Kruonio HAE | 122,07 | 103,68 | 146,40 | 148,93 | 521,07 |
| 2.3. | Mažos HE | 29,73 | 18,42 | 6,37 | 11,74 | 66,27 |
| 3. | Vėjo elektrinės | 296,14 | 280,76 | 245,11 | 316,59 | 1138,60 |
| 3.1. | Vėjo elektrinės perdavimo tinkle | 260,74 | 244,29 | 213,99 | 273,03 | 992,35 |
| 3.2. | Vėjo elektrinės skirstomajame tinkle | 35,40 | 36,16 | 31,13 | 43,56 | 146,25 |
| 4. | Kiti atsinaujinantys energijos ištekliai | 138,49 | 128,65 | 128,33 | 132,07 | 527,55 |
| 4.1. | Elektrinės kūrenamos biokuru | 107,06 | 80,17 | 82,96 | 106,06 | 376,23 |
| 4.2. | Saulės energijos elektrinės | 9,78 | 34,86 | 27,96 | 7,48 | 80,08 |
| 4.3. | Atliekų deginimo elektrinės | 21,66 | 13,62 | 17,42 | 18,53 | 71,24 |

Iš 4 lentelės matyti, jog 2018 m. Lietuvoje faktiškai buvo pagaminta šiek tiek daugiau nei 3220 GWh elektros energijos. Beveik 19 proc. pagaminta šiluminėse elektrinėse (607,23 GWh), 29,4 proc. pagaminta hidroelektrinėse (946,72 GWh), 35,4 proc. pagaminta vėjo elektrinėse (1138,60 GWh), o likusi dalis kitose atsinaujinančius energijos išteklius naudojančiose elektrinėse (527,55 GWh) (žiūrėti 5 pav.).



6 pav. Lietuvos elektrinių elektros energijos gamybos pasiskirstymas 2018 m., GWh



7 pav. Šiluminių elektrinių elektros energijos gamyba 2018 m., GWh

2018 m. šiluminėse elektrinėse pagaminta beveik 19 proc. elektros energijos (Lietuvos elektrinėje – 62,47 GWh, Kauno elektrinėje – 0,43 GWh, Panevėžio elektrinėje – 0,84 GWh, Mažeikių elektrinėje – 0,13 GWh, kitose šiluminėse elektrinėse – 543,36 GWh).

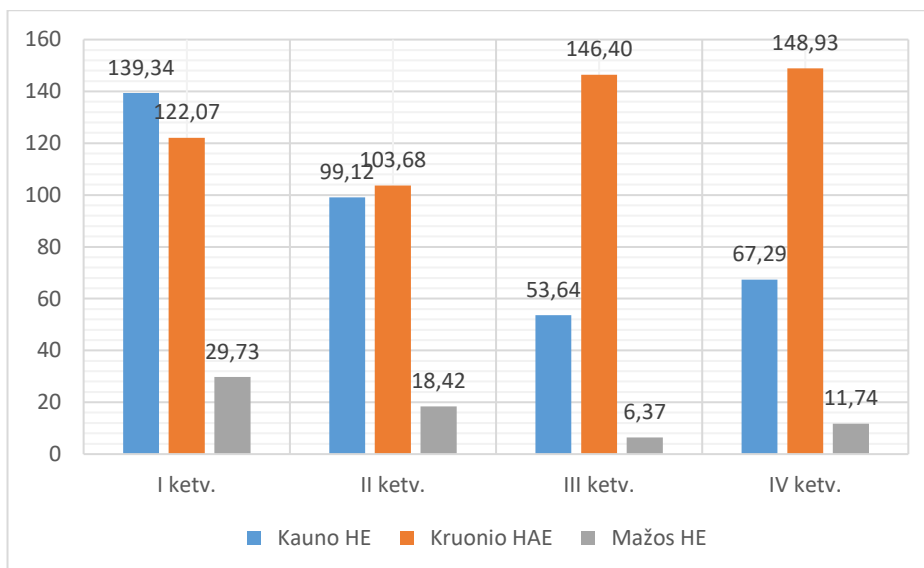
6 pav. pateikti pagamintos elektros energijos duomenys atitinkamai pagal 2018 m. ketvirčius. Matyti, jog nors Lietuvos elektrinės faktinė gamyba 2018 m. sudarė apie 62 GWh, tačiau gamybos pikas buvo III ketv. Generuojamos galios padidėjimas 2018 m. III ketv. siejamas su elektros tinklų ir elektros rinkos situacija, t. y. vasaros mėnesiais nedirba termofikacinės elektrinės, kurios gamina dalį elektros energijos šildymo metu. Vasaros laikotarpiu trūkstamos galios kiekiai pagrįdė buvo gaminami Lietuvos elektrinėje.

Mažeikių elektrinės faktinė elektros energijos gamyba 2018 m. sudarė 0,13 GWh. Ši elektrinė dirbo ištisus metus, kadangi jos darbas reikalingas Mažeikių naftos perdirbimo gamyklos technologiniam procesui palaikyti (gamykloje naudojamas ir elektrinės gaminamas garas).

Kauno termofikacinės elektrinė faktiškai elektros energiją gamino tik 2018 m. IV ketv. Kauno elektrinė, Vilniaus E-3 bei Panevėžio elektrinė dirbo įprastu režimu – žiemos šildymo sezono metu.

Toliau 7 pav. yra pateikiama hidroelektrinių elektros energijos gamyba 2018 m. Galima pastebėti, jog daugiausia elektros energijos buvo gamina Kruonio HAE (521,07 GWh). Kauno HE pagaminta kiek mažiau, t. y. 359,38 GWh, o likusiose mažose hidroelektrinėse vos 66,27 GWh.

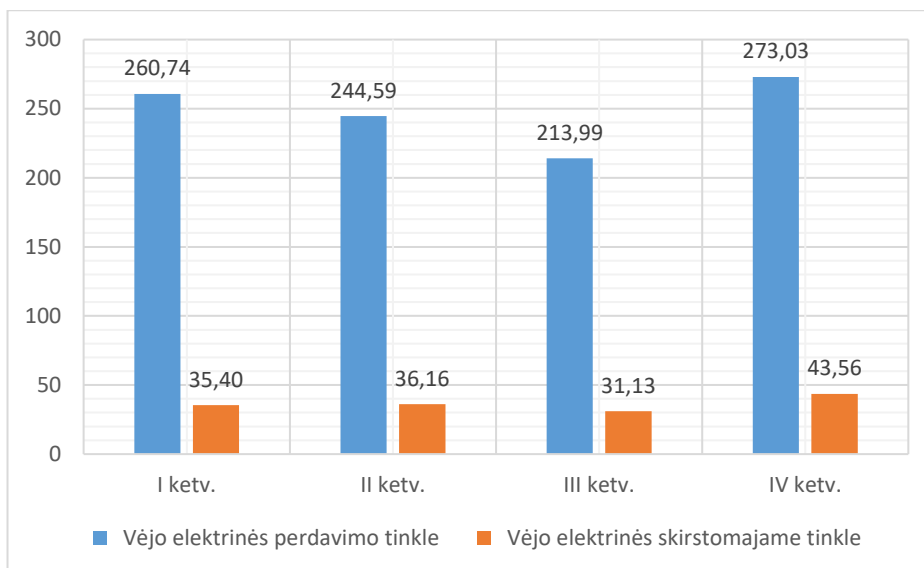
Didžiausios Kauno HE galios dažniausiai yra žiemos pabaigoje / pavasario potvynio metu, esant dideliame vandens debetui Nemuno upėje.



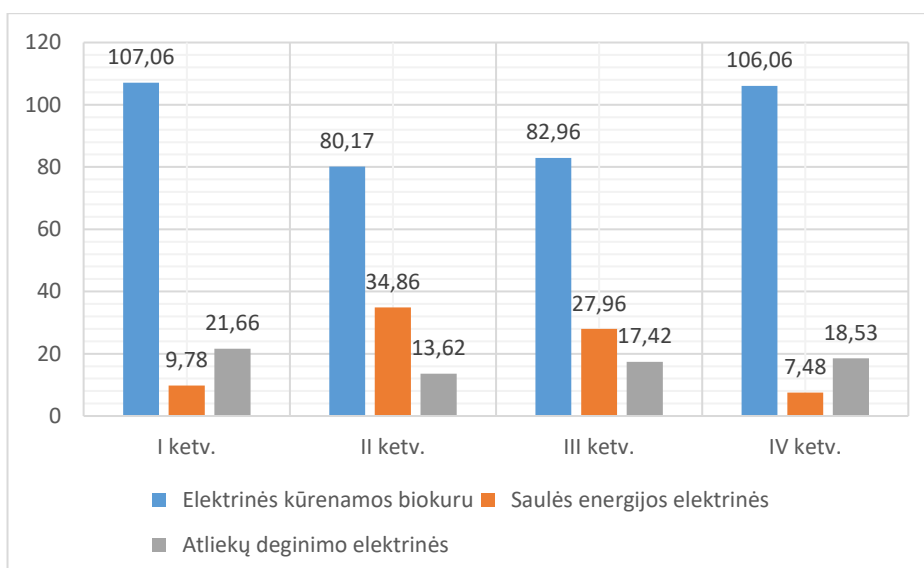
8 pav. Hidroelektrinių elektros energijos gamyba 2018 m., GWh

Paveiksluose Nr. 8 – 9 grafiškai pateikta 2018 m. elektros energijos gamyba vėjo elektrinėse bei kitose atsinaujinančius energijos išteklius naudojančiose elektrinėse.

Iš 2 lentelės matyti, jog Kruonio HAE įrengtoji galia lygi 900 MW, o iš 8 pav. matyti, jog Kruonio HAE 2018 m. pagamino 521,07 TWh elektros energijos. Šiai dienai didelės galios sinchroninės mašinos (šiluminių elektrinių, hidroelektrinių ir hidroakumuliacinių elektrinių generatoriai) dažniausiai veikia generatoriaus režimu, mažesnę jų dalis veikia variklio režimu. Kruonio HAE veikia generatoriaus ir variklio režimu: apkrovos piko metu sinchroninė mašina dirba generatoriaus režimu, o kai elektros energijos paklausa mažiausia - variklio režimu, tuomet sinchroninė mašina suka siurblius, kurie kelia vandenį į viršutinį tvenkinį iš apatinio. Sinchroninė mašina, be dviejų minėtų režimų, gali veikti ir kompensatoriaus režimu: tai darbo režimas, kada sinchroninė mašina teikia į tinklą arba iš jo ima reaktyviąją galią. Be kita ko, atsižvelgiant tiek į Kruonio HAE technines charakteristikas, tiek į 2.4 poskyryje aptartą inerciją, jog ją užtikrina ir sinchroniniai kompensatoriai, toliau darbe bus vertinama ir Kruonio HAE.



9 pav. Vėjo elektrinių elektros energijos gamyba, GWh



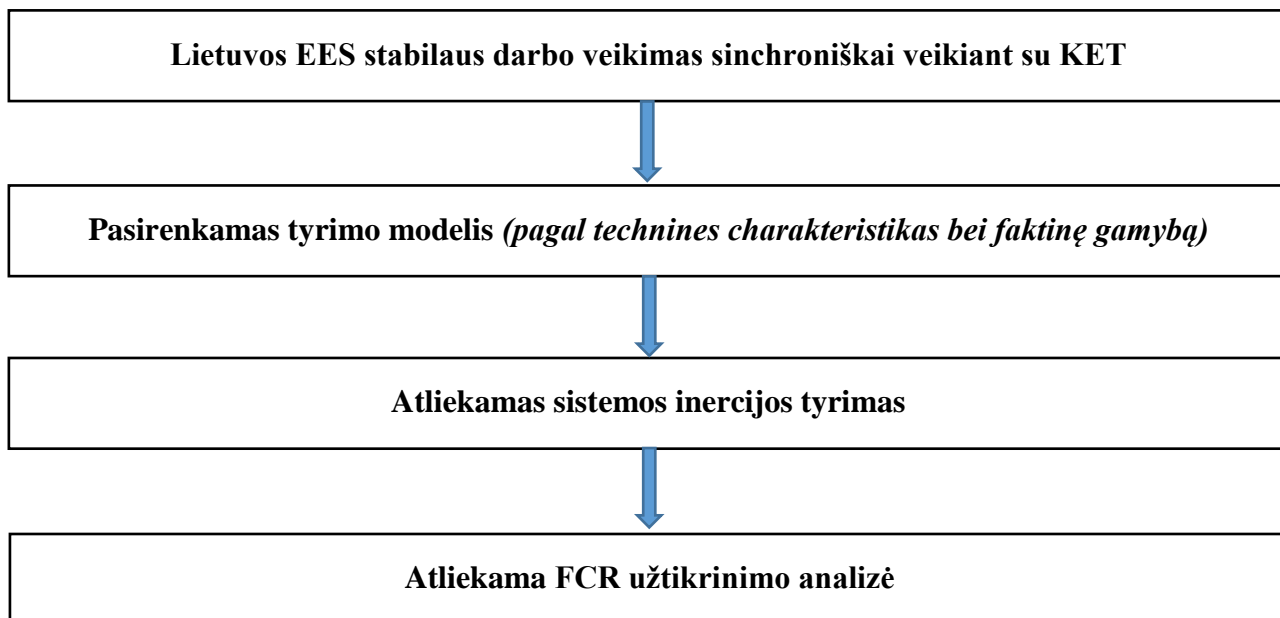
10 pav. Kitų atsinaujinančių energijos išteklių elektros energijos gamyba 2018 m., GWh

Kaip minėta anksčiau, sudarant skaičiuojamąjį modelį yra įvertinama patikimai prieinama galia. Išanalizavus Baltijos šalių ir Suomijos galių adekvatumo vertinimo ataskaitą, nustatyta, jog Baltijos regiono šalyse yra ženklus skaičius valandų, kada vėjo elektrinių generacija buvo 0 MW. Dėl vėjo elektrinių galios nepastovumo, toliau darbe laikoma, kad vėjo elektrinių galia yra nepatikima. Analogiškai daroma prielaida dėl kitų atsinaujinančius energijos išteklius naudojančių elektrinių, t. y. saulės elektrinių, hidroelektrinių ir pan.

Išanalizavus elektrinių technines charakteristikas, elektros energijos gamybą 2018 m. bei nepatikimą galią sistemoje tyrimui sudaromas sąstatas, apimantis esamas šiluminės elektrines bei Kruonio hidroakumuliacinę elektrinę.

3. Lietuvos EES, veikiančios su Kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus darbo tyrimas

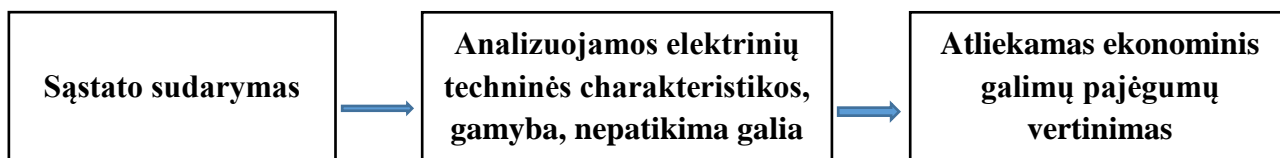
Šiame darbe atliekamas Lietuvos EES, veikiančios su Kontinentinės Europos tinklais sinchroniniu režimu, stabilaus darbo tyrimas, kurio eiga pateikta 11 paveiksle.



11 pav. Tyrimo eiga

Pagal išsikeltus darbo uždavinius, pirmiausia atliekamas inercijos tyrimas bei atliekama FCR užtikrinimo analizė. Atliekant skaičiuojamąją analizę vadovaujamosi formulėmis, aprašytomis 2 skyriuje bei mokslinėje literatūroje [23], [28].

Siekiant surasti optimalų Lietuvos EES inercijos bei dažnio išlaikymo rezervų užtikrinimo sprendinį, bus atliekama tiek techninė, tiek ekonominė analizės. Duomenys imami iš viešai prieinamų šaltinių, tokių kaip Lietuvos elektros energijos perdavimo sistemos operatoriaus internetinės svetainės [29], [30], Komisijos internetinės svetainės bei kitų aktualių informacijos šaltinių [31].



12 pav. Optimalaus sprendinio radimo eiga

3.1. Lietuvos elektros energetikos sistemos inercijos analizė

Atliekant skaičiuojamąją analizę vadovaujamosi formulėmis, pateiktomis 2.4 poskyryje.

Norint nustatyti inercijos dydį, kurį reikės palaikyti Lietuvos elektros energetikos sistemoje, sinchronizacijos prie KET metu, nagrinėjama užsienio valstybių patirtis. Atlikus literatūros apžvalgą,

nustatyta, kad Airijos elektros energetikos sistema panaši į Baltijos valstybių elektros energetikos sistema [32]. Atitinkamai, šiame darbe atliekama inercijos analizė, atsižvelgiant į Airijos elektros energetikos sistemą.

Atlikus Airijos patirties apžvalgą, nustatyta, jog Airijos elektros energetikos sistemai palaikyti reikalingas 15 000 MWs inercijos dydis [33]. Padalijus šį skaičių visoms Baltijos valstybėms, vertinama jog Lietuvai reikės užtikrinti 5 000 MWs dydžio inerciją.

Be kita ko, viename iš 2019 m. gegužės 9-10 d. Latvijoje vykusio Baltijos šalių dujų ir elektros rinkų forumo pranešimų buvo pateikta, jog Baltijos valstybėms reikia 17 100 MWs inercijos dydžio [34]. Analogišku principu, kaip ir aukščiau, šį skaičių padaliję iš 3 gaunama, jog Lietuva turės užtikrinti 5 700 MWs dydžio inerciją. Tai artimas skaičius nustatytas atlikus literatūros analizę dėl reikalingo inercijos kiekio palaikymo, todėl toliau darbe vertinamas 5 700 MWs inercijos dydis.

Norint nustatyti optimalų Lietuvos EES inercijos užtikrinimo sprendinį, t. y. kokios elektrinės turėtų dalyvauti užtikrinant reikiamą 5 700 MWs inercijos dydį, šiame darbe nagrinėjamos šios alternatyvos inercijai užtikrinti:

- 1) kai reikiamą inercijos kiekį užtikrina šiluminės elektrinės (dvejais atvejais);
- 2) kai reikiamą inercijos kiekį užtikrina šiluminės elektrinės ir Kruonio HAE blokai.

Nagrinėjant pirmą alternatyvą, sudaromas šiluminių elektrinių sąstatas pagal elektros energijos gamybą 2018 m. bei nepatikimą galią sistemoje. Išanalizavus 2.5 poskyryje pateiktą informaciją, tyrimui sudaromas toks sąstatas:

1. Lietuvos elektrinės kombinuoto ciklo blokas kaip viena daugiausiai pagaminančių šiluminių elektrinių;
2. Mažeikių elektrinė kaip visada besisukantis generacijos šaltinis;
3. Panevėžio elektrinė.

Norint paskaičiuoti, ar sudarytas tyrimui sąstatas yra pakankamas užtikrinti reikalingą inercijos dydį, tam kad sistema veiktų stabiliai, pirmiausia reikia įvertinti agregatų pilnutines galias. Iš 3 lentelės matyti, jog Lietuvos elektrinės 9 bloko pilnutinė galia lygi 524 MVA, Mažeikių elektrinės pilnutinė galia lygi 250 MVA (du generatoriai po 125 MVA) bei Panevėžio elektrinės pilnutinė galia 41,11 MVA (du generatoriai, atitinkamai 29,25 MVA ir 11,86 MVA).

Iš 1 lentelės matyti, kad dviejų polių turbogeneratorių inercijos laiko pastovioji H svyruoja nuo 2,5 MWs iki 6,0 MWs. Įvertinus H intervalą, apskaičiuojamas inercijos laiko pastoviosios H aritmetinis vidurkis, kuris lygus 4,25 MWs/MVA. Įvertinant inercijos laiko pastoviosios H vidurkį, apskaičiuojamas kiekvienos iš elektrinių sukuriamas inercijos dydis. Atlikus skaičiavimą, matyti, kad Lietuvos elektrinės 9 blokas užtikrina 2 227 MWs inercijos dydį, Mažeikių elektrinė su abiem generatoriais užtikrina 1 062,50 MWs inercijos dydį, o Panevėžio elektrinė – 174,72 MWs. Skaičiavimų rezultatai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant I sąstatą

| | Pilnutinė galia, MVA | Inercijos laiko pastovioji, MWs/MVA | Inercijos dydis, MWs |
|---|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| LE-9 | 524 | 4,25 | 2 227 |
| Mažeikių elektrinė | 250 | 4,25 | 1 062,50 |
| Panevėžio elektrinė | 41,11 | 4,25 | 174,72 |
| VISO: | | | 3 464,22 |
| Reikalingas inercijos dydis: | | | 5 700 |
| Trūkstamas/viršijamas inercijos dydis: | | | -2 235,78 |

Iš 5 lentelėje pateiktų inercijos skaičiavimų nustatyta, kad suminis inercijos kiekis gaunamas 3 464 MWs. Vadinasi, su tokiu sudarytu elektrinių sąstatu (kai inercijos užtikrinime dalyvauja tik trys šiluminės elektrinės), sinchronizacijos metu Lietuvos EES nebūtų užtikrinamas reikiamas inercijos dydis. Įvertinant tai, kad Lietuvai reikės užtikrinti 5 700 MWs dydžio inerciją, nustatyta, kad su šiuo sąstatu, trūksta apie 2 236 MWs dydžio inercijos.

Pritaikant iš 1 lentelės paskaičiuotą inercijos laiko pastoviosios H aritmetinį vidurkį, gaunama, jog stabiliai sistemai palaikyti reiktų generatoriaus su maždaug 526 MVA pilnutine galia. Atsižvelgiant į nepatikimą galią sistemoje bei į kitų šiluminių elektrinių veiklos specifiką bei technines charakteristikas, daroma išvada, jog iš visų esamų sistemoje generatorių sistemai palaikyti tiktų dar ir Lietuvos elektrinės 7 ir 8 blokai, kurių pilnutinių galių suma sudaro 706 MVA. Taigi sudaroma II alternatyva, kai reikiamam inercijos kiekiui palaikyti naudojami ir LE 7 ir 8 blokai (6 lentelė).

6 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant II sąstatą

| | Pilnutinė galia, MVA | Inercijos laiko pastovioji, MWs/MVA | Inercijos dydis, MWs |
|---|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| LE-9 | 524 | 4,25 | 2 227 |
| Mažeikių elektrinė | 250 | 4,25 | 1 062,50 |
| Panevėžio elektrinė | 41,11 | 4,25 | 174,72 |
| LE-7 | 353 | 4,25 | 1 500,25 |
| LE-8 | 353 | 4,25 | 1 500,25 |
| VISO: | | | 6 464,72 |
| Reikalingas inercijos dydis: | | | 5 700 |
| Trūkstamas/viršijamas inercijos dydis: | | | +764,72 |

Iš 6 lentelės, matyti, jog sudarytas sąstatas galėtų užtikrinti reikalingą inercijos dydį (jis netgi būtų didesnis nei reikiamas, plius 764 MWs), tačiau įvertinant tai, jog:

1) Lietuvos elektrinės 7 ir 8 blokai veiklą pradėjo atitinkamai 1968 ir 1971 metais ir šiai dienai įrenginiai yra pasenę;

2) šiuo metu 7 ir 8 blokai yra šaltame rezerve;

3) įrenginių eksploatavimas yra brangus (7 ir 8 blokai užkonservuoti dėl neproporcingai didelių palaikymo kaštų);

4) Lietuvos elektrinės 8 bloko paleidimo iš šaltos būsenos kaina, įvertinus kaštus iki įrenginio sinchronizavimo su sistema, lygi 70 000 EUR, analogiškai ir 7 bloko;

darytina išvada, jog šis sąstatas nėra optimalus kaštų prasme.

Toliau tyrime sudaroma III alternatyva su elektrinių sąstatu, kai panaudojamos šiluminės elektrinės (Lietuvos elektrinės kombinuoto ciklo bloką, Mažeikių elektrinę, Panevėžio elektrinę) bei Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės blokai.

Iš 3 lentelės matyti, jog Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė turi 4 generatorius, o kiekvieno jų pilnutinė galia lygi 248 MVA. Atsižvelgiant į tai, jog Kruonio HAE teikia sisteminės paslaugas, t. y. Kruonio HAE 400 MW yra skirti antrinio aktyviosios galios rezervo užtikrinimo paslaugai, šiame sąstate naudojami tik du generatoriai (žr. 7 lentelę). Iš 1 lentelės taip pat matyti, kad hidrogenatoriaus inercijos laiko pastovioji H svyruoja nuo 2,0 MWs iki 4,0 MWs. Įvertinus H intervalą, apskaičiuojamas inercijos laiko pastoviosios H aritmetinis vidurkis, kuris lygus 3,0 MWs/MVA. Skaičiavimų rezultatai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant III sąstatą

| | Pilnutinė galia, MVA | Inercijos laiko pastovioji, MWs/MVA | Inercijos dydis, MWs |
|---|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| LE-9 | 524 | 4,25 | 2 227 |
| Mažeikių elektrinė | 250 | 4,25 | 1 062,50 |
| Panevėžio elektrinė | 41,11 | 4,25 | 174,72 |
| Kruonio HAE G-1 | 248 | 3,0 | 744 |
| Kruonio HAE G-2 | 248 | 3,0 | 744 |
| VISO: | | | 4 952,22 |
| Reikalingas inercijos dydis: | | | 5 700 |
| Trūkstamas/viršijamas inercijos dydis: | | | -747,78 |

Iš 7 lentelėje pateiktų skaičiavimų matyti, kad šiuo sąstatu inercijos kiekis taip pat nebūtų palaikomas (trūksta apie 748 MWs). Nagrinėjant ekonominę dalį, nustatyta, jog Kruonio HAE faktinės

pastoviosios sąnaudos 2016–2018 m. laikotarpiu vyravo nuo 11 793 tūkst. Eur iki 12 704 tūkst. Eur visiems įrengtiems Kruonio HAE agregatams,. Šios alternatyvos atveju kaštai būtų žymiai mažesni nei I ar II alternatyvos atveju. Todėl patiriamų kaštų prasme šis sąstatas būtų tinkamas, tačiau neoptimalus techniniu aspektu.

Papildomai nagrinėjama alternatyva (IV alternatyva), kai reikiamam inercijos kiekiui palaikyti naudojamas I alternatyvos sąstatas bei EES įrengiamas naujas sinchroninis kompensatorius. Remiantis užsienio šalių patirtimi, nustatyta, kad naujo pažangaus SK inercijos laiko pastovioji (H) yra lygi 7 s. (Italijos perdavimo operatoriaus (TERNA) patirtis įrengiant naują pažangų SK (firma Alstom, kurio pilnutinė galia 290 MVA) Sicilijos elektros energetikos sistemoje).

8 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant IV sąstatą

| | Pilnutinė galia, MVA | Inercijos laiko pastovioji, MWS/MVA | Inercijos dydis, MWs |
|---|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| LE-9 | 524 | 4,25 | 2 227 |
| Mažeikių elektrinė | 250 | 4,25 | 1 062,50 |
| Panevėžio elektrinė | 41,11 | 4,25 | 174,72 |
| Naujas SK | 526 | 7 | 3 682,0 |
| VISO: | | | 7 146,22 |
| Reikalingas inercijos dydis: | | | 5 700 |
| Trūkstamas/viršijamas inercijos dydis: | | | +1 446,22 |

Iš 8 lentelėje pateiktų generatorių generuojamų inercijų, matyti, jog reikalingas inercijos dydis elektros sistemoje būtų didesnis nei reikiamas, tokiu būdu galima inercijos kiekiui palaikyti nenaudoti Mažeikių ir Panevėžio E bloką (žr. 9 lentelę).

9 lentelė. Inercijos skaičiavimas, sudarant V sąstatą

| | Pilnutinė galia, MVA | Inercijos laiko pastovioji, MWS/MVA | Inercijos dydis, MWs |
|---|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| LE-9 | 524 | 4,25 | 2 227 |
| Naujas SK | 526 | 7 | 3 682 |
| VISO: | | | 5 909 |
| Reikalingas inercijos dydis: | | | 5 700 |
| Trūkstamas/viršijamas inercijos dydis: | | | 209 |

Iš 9 lentelės pateiktų generatorių generuojamų inercijų, matyti, jog reikalingas inercijos dydis elektros sistemoje būtų didesnis nei reikiamas, tokiu būdu galima inercijos kiekiui palaikyti nenaudoti Mažeikių ir Panevėžio E bloką.

2018 m. gruodžio 20 d. Taline vykusiame suinteresuotųjų šalių susitikime dėl Baltijos valstybių sinchronizacijos prie KET, viename iš pranešimų nurodyta, jog vieno naujo sinchroninio kompensatoriaus, reikalingo sistemos inercijai užtikrinti, kapitalo kaštai sudaro apie 25 mln. Eur, o operaciniai kaštai siekia apie 0,38 mln. Eur per metus. Įvertinus šiuos kaštus, bei susumavus esamų generatorių bei naujo sinchroninio kompensatoriaus užtikrinamą inercijos dydį (žr. 8 lentelę), nustatyta, jog šis sąstatas yra optimalus sprendinys inercijai palaikyti, nepriklausomai, kad bus reikalingos papildomos investicijos. Tačiau šios alternatyvos atveju būtų įrengiami nauji pažangūs SK, o tai sąlygoja patikimą technologiją su geresnėmis techninėmis savybėmis, būtų ilgesnis eksploataavimo amžius, remiamasi užsienio PSO gerąja patirtimi. Greta to būtų papildomai sprendžiama ir trumpojo jungimo ir įtampų valdymo problemos.

3.2. Lietuvos dažnio išlaikymo rezervų užtikrinimo analizė

Šiai dienai FCR paslaugos teikiamos vadovaujantis BRELL sutartimi [1], kitaip tariant FCR užtikrinimas trečiųjų šalių elektros PSO įsigyjamomis paslaugomis. Kadangi FCR užtikrina išimtinai trečiųjų šalių elektros energetikos sistemoje esantys elektros energijos gamintojai, todėl Lietuvos PSO faktiškai nedalyvauja FCR užsakyme. Kitaip sakant, pirminis galios suregulavimas (aktyviųjų galių balanso palaikymas ir sistemos dažnių nustatytose ribose stabilizavimas), remiantis BRELL sutartimi, yra įsigyjamas trečiųjų šalių elektros perdavimo sistemos operatorių pirminio aktyviosios rezervinės galios paslaugos rinkoje ir palaikomas visoje sinchroninėje zonoje.

Pasikeitus BRELL susitarimui ir (arba) jam nustojus galioti, turėtų būti pakartotinai įvertinti pirminio aktyviosios galios rezervo paslaugų teikimo aspektai ir konkurencija pirminio aktyviosios galios rezervo rinkoje. Nors šiai dienai nėra aišku, kaip keisis FCR teikiamų paslaugų kainodara, prisijungus prie KET, tačiau šiame darbe yra apskaičiuojamas FCR dydis, kurį Lietuva turės užtikrinti, prisijungusi prie KET, t. y. nustojus galioti BRELL sutarčiai.

Atlikus literatūros apžvalgą 2.3 skyriuje nustatyta, jog KET sinchroninėje zonoje privaloma užtikrinti 3000 MW FCR, kuris apskaičiuotas remiantis N-2 kriterijumi (įvertinus du didžiausius blokus). Šis dydis turi būti užtikrintas visų KET valstybių narių kartu. Kiekvienos šalies dalis, teikiant reikalaujamą rezervą, skiriama pagal įnašų koeficientus, remiantis jų ankstesnių metų elektros energijos gamybos dalimi sinchroninėje zonoje.

FCR, kurį kiekvienas regionas teikia KET sinchroninėje zonoje, apskaičiuojamas pagal formules, pateiktas 2.3 poskyryje, t. y. įvertinant bendrą elektros energijos gamybą valstybėje bei visoje sinchroninėje zonoje.

Lietuvos valstybės dalis, reikalinga užtikrinti prisijungus prie KET, apskaičiuojama remiantis 2030 m. prognozuojama gamyba, t. y. ENTSO-E 10-ies metų tinklo plėtros plane prognozuojama, jog KET zonoje elektros energijos gamyba 2030 metais svyruos nuo 3318 iki 3680 TWh [35]. Atsižvelgus į konservatyviausią scenarijų, priimama, jog elektros energijos gamyba KET zonoje 2030 m. bus lygi 3318 TWh.

Lietuvos elektros energetikos sistemos 400-110 kV tinklų plėtros plane 2018-2027 m., kurį rengia Lietuvos elektros PSO, prognozuojama, jog elektros energijos gamyba 2027 m. bus apie 14,47 TWh. Atlikus skaičiavimus, gaunama, jog Lietuva, prisijungusi prie KET, turi užtikrinti 13 MW dažnio išlaikymo rezervą.

10 lentelė. FCR vertinimas

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| KET privalomas FCR dydis | 3 000 MW |
| Elektros energijos gamyba Lietuvoje | 14,47TWh |
| Elektros energijos gamyba KET zonoje | 3 318 TWh |

$$r_{LT} = \frac{14470000}{3318000000} \times 3000 = 13 \text{ MW}$$

Siekiant atlikti ekonominį vertinimą yra atsižvelgiama ne tik į šiai dienai rinkoje esančius pajėgumus, bet ir į Nacionalinę energetinės nepriklausomybės strategiją, patvirtintą Lietuvos Respublikos Seimo 2012 m. liepos 11 d. nutarimu Nr. XI-2133 „Dėl Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos patvirtinimo“ (galiojanti suvestinė redakcija nuo 2018 m. birželio 30 d.). Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos 21 punkte nurodoma, jog pagrindinis tikslas atsinaujinančių energijos išteklių srityje – toliau didinti atsinaujinančių energijos išteklių dalį Lietuvos vidaus energijos gamyboje ir galutiniame energijos suvartojimo balanse, taip mažinant priklausomybę nuo iškastinio kuro importo ir didinant vietinės elektros energijos gamybos pajėgumus. Be kita ko, iki 2050 metų siekiama, jog įgyvendinant strateginį atsinaujinančių energijos išteklių tikslą, bus siekiama didinti atsinaujinančių energijos išteklių dalį, palyginti su šalies bendruoju galutiniu energijos suvartojimu iki 80 proc.¹, t. y. energija iš atsinaujinančių energijos išteklių taps pagrindinė visuose – elektros, šilumos ir vėsumos energijos bei transporto – sektoriuose [36].

Analizuojant esamų generatorių kaštus, nagrinėjamas Kruonio HAE (12 pav.). Nors Kruonio HAE skirta subalansuoti elektros gamybą ir suvartojimą, taip pat avarijų energetikos sistemoje prevencijai bei jų likvidavimui, šiai dienai ji taip pat užtikrina antrinį avarinį Lietuvos elektros energetikos sistemos rezervą.

¹ Iki 2020 metų – 30 proc., iki 2030 metų – 45 proc.



13 pav. Kruonio HAE

Komisijos Dujų ir elektros departamento Elektros skyriaus 2018 m. lapkričio 30 d. pažymyje Nr. O5E-341 „Dėl AB „Lietuvos energijos gamyba“ elektros energijos rezervinės galios užtikrinimo paslaugų kainų viršutinių ribų 2019 metams nustatymo“ nurodyta, jog Kruonio HAE faktinės pastoviosios sąnaudos 2016–2018 m. laikotarpiu vyravo nuo 11 793 tūkst. Eur iki 12 704 tūkst. Eur, o 2019 m. skirta 12 751 tūkst. Eur visiems įrengtiems Kruonio HAE agregatams, kas sudarytų apie 1,45 EUR/MW/val. [37].

Sisteminių avarių prevencijai ir likvidavimui svarbu, kad Kruonio HAE agregatai gali užtikrinti greitą rezervinę galią – visu pajėgumu į tinklą sugeba įsijungti mažiau nei per 2 min. Kruonio HAE agregatai pasiruošę automatiškai leisti nuo sistemos priešavarinės automatikos ir kompensuoti galios deficitą. Kitos ne mažiau svarbios Kruonio HAE funkcijos yra sistemos apkrovos netolygumų lyginimas, įtampos ir dažnio reguliavimas, sugebėjimas pasileisti po sisteminės avarijos. Tačiau, nors šios elektrinės metiniai palaikymo kaštai ganėtinai nedideli, Kruonio HAE paslaugų teikimas FCR užtikrinimui yra tik teorinė prielaida, kadangi per skaičiuojamąjį dažnio išlaikymo rezervo reguliavimo laiką – 30 s, Kruonio HAE nespėja aktyvuoti viso pirminio reguliavimo rezervo. Taip pat ir kiti elektros energijos gamybos šaltiniai iš atsinaujinančių energijos šaltinių laikomi netinkamais teikti pirminio rezervo paslaugai.

Toliau nagrinėjama kita alternatyva – „Tesla Powerwall“ baterija. Pati bendrovė „Tesla“ apibūdina „Powerwall“ kaip įkraunamą ličio jonų bateriją su skysčio terminiu valdymu. Pirmosios kartos baterija „Powerwall“ atsirado 2015 m. balandžio mėnesį, o atnaujinta jos versija paskelbta 2016 m. spalio mėn. Iki 2018 m. balandžio mėn. šios baterijos kaina padidėjo nuo 5 500 JAV dolerių iki 6 700 JAV dolerių, neįskaitant instaliavimo kaštų. Pažymėtina, jog techninė įranga papildomai sudaro 1100 JAV dolerių, todėl bendra suma siekia 7 800 JAV dolerių. Įdiegimas svyruoja nuo 2 000 JAV dolerių iki 8 000 JAV dolerių. Vidutiniškai 5 kW sistema kainuoja nuo 8 600 JAV dolerių iki 15 800 JAV dolerių. Tokia kaina sietina su 5 kW, kai tuo tarpu Lietuva turės užtikrinti 13 MW FCR kiekį [38].

11 lentelė. „Tesla Powerwall“ baterijos instaliavimo kaštai, JAV doleriais, [38]

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Baterijos kaina | 5 500 – 6 700 |
| Techninė įranga | 1100 |
| Įdiegimas | 2 000 – 8 000 |
| VISO: | 8 600 – 15 800 |

Taip pat išanalizavus „Lazard“ rengtą ataskaitą, nustatyta, kad tinklinio tinklo baterijos įrengimo sąnaudos svyruoja maždaug nuo 3,5 mln. JAV dolerių iki 7,5 mln. JAV dolerių. Platus akumuliatorių kainos pasirinkimas yra būdingas besivystančiai technologijai. Taip pat sunku nuspėti, kiek mažos baterijų kainos gali būti ateityje, bet prognozuojama, kad iki 2025 m. ličio jonų baterijos kainuos maždaug 120 JAV dolerių/MWh. Atsižvelgiant į tai, kad baterijas reikia keisti vieną ar du kartus per dešimtmetį, naudojant šiuo metu turimas technologijas, akumuliatoriaus talpą reikės pakeisti keletą kartų per galimą 100 metų eksploatacijos laikotarpį. Baterijų, kurių ekonominis tarnavimo laikas yra 40 metų, pradinė kaina ir pakeitimai gali reikšti, kad visą gyvavimo laikotarpį trunkančios išlaidos bus intervale nuo 200 JAV dolerių/ MWh iki 330 JAV dolerių / MWh. Priėmus tokią prognozę, laikytina, kad baterijos šiai dienai yra per brangus pasirinkimas [39].

Kalbant apie šiluminės elektrinės bei jų kaštus, Komisijos 2017 m. lapkričio 29 d. pažymoje Nr. O5E-367 „Dėl AB „Lietuvos energijos gamyba“ elektros energijos rezervinės galios užtikrinimo paslaugų kainų viršutinių ribų 2018 metams nustatymo“ nurodyta, jog Lietuvos elektrinės KCB 2018 metams prognozuojamos sąnaudos sudaro 17 454 tūkst. EUR, kas sudarytų 17,84 EUR/MW/val.

Lietuvos elektrinės 8 bloko paleidimo iš šaltos būsenos kaina, įvertinus kaštus iki įrenginio sinchronizavimo su sistema, kaina lygi 70 000 EUR, analogiškai ir 7 bloko.

Kadangi atsinaujinančius energijos šaltinius naudojančios elektrinės nėra tinkamos FCR užtikrinimui, o baterijos yra per brangios, laikytina, kad FCR efektyviausia užtikrinti kondensaciniais elektrinių blokais bei kombinuotojo ciklo elektrinių blokais.

Išvados

1. Atlikus kitų valstybių sinchroninio prisijungimo prie kontinentinės Europos tinklų patirtį, nustatyta, kad Lietuva, siekdama prisijungti prie kontinentinės Europos tinklų, turi atitikti visus ENTSO-E keliamus reikalavimus, t. y. Lietuvos elektros energetikos sistema turi atitikti statinio stabilumo reikalavimus bei gebėti dirbti salos bei bandomuoju režimais, užtikrinant saugų sistemų veikimą.
2. Lietuvai prisijungus ir veikiant sinchroniškai su KET bus reikalinga palaikyti 5 700 MWs reikiamą inercijos kiekį. Atlikus inercijos tyrimą, nustatyta, jog I bei III alternatyvų atvejais, t. y. šiluminių elektrinių, esančių Lietuvos elektros energetikos sistemoje, bei šiluminių elektrinių kartu su Kruonio hidroakumuliacine elektrine generuojamas inercijos dydis nėra pakankamas stabiliai elektros sistemai palaikyti, sinchronizacijos prie KET metu. II alternatyvos atveju, įtraukiant į sąstatą ir LE-9 bloką, nustatyta, jog sąstatas pakankamas inercijai palaikyti, tačiau jo palaikymo kaštai ženkliai didesni nei kitais nagrinėtais atvejais. IV sąstato, kuomet inerciją užtikrina sistemoje esančios šiluminės elektrinės bei naujas sinchroninis kompensatorius, užtikrinamas netgi per didesnis inercijos dydis, o kaštai yra ženkliai didesni nei kitų alternatyvų atveju, todėl nagrinėta V alternatyva, kurioje dalyvauja LE-9 blokas bei naujas sinchroninis kompensatorius. V alternatyvos atveju eksploataavimo sąnaudos mažesnės nei IV alternatyvos, tačiau nors ir reikės papildomų investicijų sinchroniniam kompensatoriui įrengti, V alternatyva yra optimali, kadangi naujo SK įrengimo palaikymo kaštai nėra dideli, o ir leistų spręsti ir papildomas problemas, tokias kaip dažnis bei įtampa, kas taip pat yra svarbu stabiliam sistemos veikimui. Be kita ko, V alternatyvos atveju panaudojamas tik vienas AB „Lietuvos energijos gamyba“ blokas, kuris yra naujas.
3. Atlikus dažnio išlaikymo rezervo užtikrinimo tyrimą, nustatyta, jog prisijungus prie KET, Lietuva turės užtikrinti 13 MW dažnio išlaikymo rezervą, kurį galės užtikrinti kondensaciniais elektrinių blokais bei kombinuotojo ciklo elektrinių blokais, nes atsinaujinančius energijos šaltinius naudojančios elektrinės nėra tinkamos FCR užtikrinimui, o baterijos yra per brangios.

Literatūros sąrašas

1. Соглашение о поддержании и использовании нормативно аварийного резерва мощности в электрическом кольце брелл.
2. Central to European power integration, Annual report 2013. NordPool.
3. Daivis Virbickas. Baltijos šalių elektros sistemų sinchronizacija su Kontinentinės Europos Tinklais [žiūrėta 2018 m. birželio 9 d.] Prieiga per internetą: <http://www.lpk.lt/wp-content/uploads/2018/01/180123-Sinchronizacijos-pristatymas-LPK.pdf>
4. Lietuvos energetinis saugumas. Metinė apžvalga 2015–2016. Vytauto Didžiojo universitetas, Lietuvos energetikos institutas, Energetinio saugumo tyrimų centras, 2017. doi.org/10.7220/LESMA.2335.7037.2015.2016
5. Pasirašytas politinis susitarimas dėl Baltijos šalių elektros tinklų sinchronizacijos su kontinentine Europa [žiūrėta 2019 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/lithuania/Synchronisation%20of%20the%20Baltic%20States%27%20electricity%20network%20with%20the%20European%20system_Lt
6. System Operations Committee [žiūrėta 2018 m. birželio 9 d.] Prieiga per internetą: <https://www.entsoe.eu/about/system-operations/#operations>
7. Regional Group Continental Europe [žiūrėta 2018 m. birželio 17 d.]. Prieiga per internetą: <https://docstore.entsoe.eu/about-entso-e/system-operations/regional-groups/continental-europe/Pages/default.aspx>
8. Ibrahim A. Nassar, H. Weber, System Analysis of the Turkish Power System for Interconnection with Continental Europe. IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 21, 2012, Pages 168-173. doi.org/10.3182/20120902-4-FR-2032.00031
9. Prof. Dr.-Eng. Harald Weber, M. Sc. Eng. Ibrahim Nassar, Electrical interconnection between Turkey and Europe: problems and solutions. 13th Middle East Power Systems Conference, 2009.
10. Ukraine signs deal on integrating into European energy grid [žiūrėta 2018 m. birželio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://euromaidanpress.com/2017/06/30/ukraine-signs-deal-on-integrating-into-european-power-grid/>
11. Feasibility Study on Synchronous Interconnection of Ukrainian and Moldovan Power Systems to ENTSO-E Continental Europe Power System [žiūrėta 2018 m. birželio 11 d.] Prieiga per internetą: https://docstore.entsoe.eu/Documents/SOC%20documents/Regional_Groups_Continental_Europe/Joint_operational_programme_Romania_Ukraine_Moldova_2007-2013.pdf
12. Ukraine: Agreement on Synchronisation with ENTSO-E signed [žiūrėta 2018 m. birželio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cms-lawnow.com/ealerts/2017/07/ukraine-agreement-on-synchronisation-with-entsoe-signed>
13. 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
14. Executive summary of Project “Feasibility study on the interconnection variants for the integration of the Baltic States to the EU internal electricity market” [žiūrėta 2018 m. gruodžio 3 d.] Prieiga per internetą: http://www.ast.lv/sites/default/files/editor/Executive%20summary%20of%20FIS-BIS%20project_0.pdf

15. LITGRID AB „Lietuvos elektros energetikos sistemos 400-110 kV tinklų plėtros planas 2018-2027 m.“ [žiūrėta 2018 m. lapkričio 19 d.] Prieiga per internetą: <http://www.litgrid.eu/index.php/tinklo-pletra/lietuvos-elektros-perdavimo-tinklu-10-metu-pletros-planas-/3850>
16. Integration of the Baltic States into the EU electricity system: A technical and economic analysis [žiūrėta 2018 m. lapkričio 19 d.] Prieiga per internetą: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8d3b7da2-562e-11e7-a5ca-01aa75ed71a1/language-en>
17. Pasirašytas politinis susitarimas dėl Baltijos šalių elektros tinklų sinchronizacijos su kontinentine Europa [žiūrėta 2019 m. sausio 3 d.] Prieiga per internetą: https://ec.europa.eu/lithuania/Synchronisation%20of%20the%20Baltic%20States%27%20electricity%20network%20with%20the%20European%20system_Lt
18. Elektros tinklų sinchronizavimas su Europa – svarbiausi įvykiai [žiūrėta 2019 m. sausio 3 d.] Prieiga per internetą: <https://www.lzinios.lt/Lietuva/elektros-tinklu-sinchronizavimas-su-europa-svarbiausi-ivykiai/268226>
19. TYNDP Regional Insight Report. Focus on the Nordic and Baltic Sea [žiūrėta 2019 m. sausio 8 d.] Prieiga per internetą: https://tyndp.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP2018/consultation/PCI%20Region/ENTSO_TYNDP_2018_Nordic_Baltic_Sea.pdf
20. Atidėjo bandymą dirbti „salos“ režimu [žiūrėta 2019 m. vasario 10 d.] Prieiga per internetą: <https://www.lzinios.lt/Ekonomika/atidejo-bandyma-dirbti-salos-rezimu/281406>
21. 2017 m. lapkričio 24 d. Komisijos reglamentas (ES) 2017/2196 dėl tinklo kodekso, kuriame nustatomi elektros sistemos avarijų šalinimo ir veikimo atkūrimo reikalavimai [žiūrėta 2018 m. gruodžio 8 d.] Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:32017R2196>
22. 2017 m. rugpjūčio 2 d. Komisijos reglamentas (ES) 2017/1485, kuriuo nustatomos elektros energijos perdavimo sistemos eksploatavimo gairės [žiūrėta 2018 m. gruodžio 8 d.] Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32017R1485>
23. Load-Frequency Control and Performance. Operation Handbook. ENTSO-E [žiūrėta 2018 m. gruodžio 20 d.] Prieiga per internetą: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf
24. ENTSO-E tinklo kodekso dėl apkrovos ir dažnumo valdymo ir rezervų patvirtinamasis dokumentas (angl. *Supporting Document for the Network Code on Load-Frequency Control and Reserves*) [žiūrėta 2018 m. gruodžio 8 d.] Prieiga per internetą: https://www.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Annexes/ENTSO-E%E2%80%99s%20supporting%20document%20to%20the%20submitted%20Network%20Code%20on%20Load-Frequency%20Control%20and%20Reserves.pdf
25. Rate of Change of Frequency (ROCOF) withstand capability, European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2017 m. kovo 29 d. [žiūrėta 2019 m. balandžio 15 d.] prieiga per internetą: https://docstore.entsoe.eu/Documents/Network%20codes%20documents/Implementation/CNC/IGD-RoCoF_withstand_capability.pdf

26. M. Chan, R. Dunlop, F. Schewepe: "Dynamic Equivalents for Average System Frequency Behaviour Following Major Disturbances," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972 rugpjūtis.
27. Innovation in the Power Systems industry, Cigre, 2018 Birželis
28. Prabha Kundur, Power System Stability and Control, 1993, Pages 132-135, ISBN 0-07-035958
29. Energetikos Sistema. Įrengtoji galia [žiūrėta 2019 m. sausio 8 d.] Prieiga per internetą: <http://www.litgrid.eu/index.php/energetikos-sistema/elektros-energetikos-sistemas-informacija/irengtoji-galia/502>
30. Elektros gamybos ir vartojimo balanso duomenys [žiūrėta 2019 m. balandžio 8 d.] Prieiga per internetą: <http://www.litgrid.eu/index.php/energetikos-sistema/elektros-energetikos-sistemas-informacija/elektros-gamybos-ir-vartojimo-balanso-duomenys/2287>
31. Rinkos stebėsena [žiūrėta 2019 m. balandžio 8 d.] Prieiga per internetą: <https://www.regula.lt/elektra/Puslapiai/elektros-rinkos-apzvalga/rinkos-stebesena.aspx>
32. Cutsem, T. V. Voltage instability: phenomenon, countermeasures and analysis methods. Proc IEEE 88(2): 208, 2000
33. Northern Ireland Constraints Report 2016 [žiūrėta 2019 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per internetą: <http://test.soni.ltd.uk/media/documents/Operations/SONI%20Northern%20Ireland%20Constraints%20May%202016.pdf>
34. Antons Kutjuns. Progress of Baltic synchronization with continental Europe [žiūrėta 2019 m. gegužės 17 d.] Prieiga per internetą: https://sprk-my.sharepoint.com/:p:/r/personal/andriss_sprk_gov_lv/_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7Bc8060e57-8ea9-43a5-b6a0-e37e1368cb08%7D&action=edit&uid=%7BC8060E57-8EA9-43A5-B6A0-E37E1368CB08%7D&ListItemId=138&ListId=%7B4A7E1E48-3792-4D97-8246-8FE685843BEC%7D&odsp=1&env=prod
35. ENTSO-E. TYNDP 2018 Executive Report. Connecting Europe: Electricity 2025-2030-2040. [žiūrėta 2019 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: https://tyndp.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP2018/consultation/Main%20Report/TYNDP2018_Executive%20Report.pdf
36. Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija, patvirtinta Lietuvos Respublikos Seimo 2012 m. liepos 11 d. nutarimu Nr. XI-2133 „Dėl Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijos patvirtinimo“ (galiojanti suvestinė redakcija nuo 2018 m. birželio 30 d.). [žiūrėta 2019 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.E151BC09AE62>
37. Komisijos Dujų ir elektros departamento Elektros skyriaus 2018 m. lapkričio 30 d. pažymoje Nr. O5E-341 „Dėl AB „Lietuvos energijos gamyba“ elektros energijos rezervinės galios užtikrinimo paslaugų kainų viršutinių ribų 2019 metams nustatymo“ [žiūrėta 2019 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: https://www.regula.lt/SiteAssets/posedziai/2018-11-30/1_leg_pazyma.pdf
38. Tesla Powerwall: the complete review [žiūrėta 2019 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/tesla-powerwall-home-battery/>
39. Lazard's levelized cost of storage. Version 2 [žiūrėta 2019 m. gegužės 12 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.lazard.com/media/438042/lazard-levelized-cost-of-storage-v20.pdf>