



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Lina Berškytė

VĖJO ELEKTRINIŲ GENERUOJAMOS GALIOS
BALANSAVIMO TECHNINIŲ PRIEMONIŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Audrius Jonaitis

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**VĖJO ELEKTRINIŲ GENERUOJAMOS GALIOS
BALANSAVIMO TECHNINIŲ PRIEMONIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Audrius Jonaitis
(data)

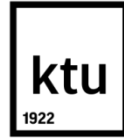
Recenzentas

(parašas) Prof. Dr. Saulius Gudžius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Lina Berškytė
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

LINA BERŠKYTĖ

(Studento vardas, pavardė)

ELEKTROS ENERGETIKOS INŽINERIJOS PROGRAMA - 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Vėjo elektrinių generuojamos galios
balansavimo techninių priemonių tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 23 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Linos Berškytės**, baigiamasis projektas tema „Vėjo elektrinių generuojamos galios balansavimo techninių priemonių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Berškytė, L. Vėjo elektrinių generuojamos galios balansavimo techninių priemonių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 46 psl.

SANTRAUKA

Nagrinėjama vėjo elektrinių sukeliama problematika elektros energetikos sistemai. Ieškoma techniškai ir ekonomiškai palankiausių priemonių tiekti balansavimo elektros energiją, sistemose, kuriose sparčiai daugėja prijungiamų vėjo elektrinių. Literatūros ir sistemos duomenų analizės metodu ieškoma, koks reikalingos balansavimo energijos kiekis.

Reikšminiai žodžiai (iki 8 žodžių): vėjo, balansavimas, sisteminės paslaugos.

Berškytė, Lina. Analysis of Wind Power Plants Generation Balancing Technical Means. Final project of master's degree / supervisor dr. Audrius Jonaitis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2016. 46 psl.

SUMMARY

The present problems caused by wind power in the electricity system. Searching for technically and economically most favorable means of balancing supply electricity in the systems that are rapidly increasing number of connected wind power plants. Literature and the data analysis sought, as required for balancing energy.

Keywords (up to 8 words): wind power, balancing, ancillary service.

TURINYS

ĮVADAS	6
1 ATSINAUJINANČIUS ENERGIJOS IŠTEKLIUS NAUDOJANČIŲ ELEKTRINIŲ IR JŲ ĮTAKOS ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMAI APŽVALGA.....	7
1.1 Atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra Europoje ir Lietuvoje	7
1.2 Vėjo elektrinių įtaka elektros tinklui	9
1.3 Sisteminės paslaugos	12
2 TECHNINIŲ PRIEMONIŲ VĖJO ELEKTRINIŲ GALIAI BALANSUOTI ANALIZĖ IR TYRIMO METODIKA	15
2.1 Vėjo elektrinių generuojamos galios balansavimas	15
2.2 Vėjo elektrinių generuojamos galios ir suminės apkrovos galios prognozavimo paklaidos nustatymas	21
3 VĖJO ELEKTRINIŲ GENERUOJAMOS GALIOS BEI APKROVOS GALIOS PROGNOZAVIMO PAKLAIDŲ IR BALANSAVIMO PRIEMONIŲ TYRIMAS	23
3.1 Vėjo elektrinių galios planavimo paklaidos.....	23
3.2 Apkrovos prognozavimo paklaidos	27
3.3 Disbalanso energijos ekonominis vertinimas.....	33
3.4 VE galios ir apkrovos sukeliama disbalanso įvertinimas	35
3.5 VE balansavimo būdo parinkimas	38
IŠVADOS	41
LITERATŪROS ŠALTINIAI	42
PRIEDAS NR.1 . SU PROGRAMA MATLAB ATLIKTI SKAIČIAVIMAI.	44

IVADAS

Didėjantis susidomėjimas atsinaujinančiais energijos šaltiniais ir jų panaudojimu elektros energijos gamybai atskleidžia ne tik jų panaudojimo privalumus bet ir trūkumus. Išsivysčiusios šalys jau žymiai padidino generaciją iš atsinaujinančių šaltinių per paskutiniuosius 15 metų ir toliau užsibrėžti ambicingi tikslai. Ypatinę vietą šiuose planuose užima vėjo energetika, ypač šalių, kurios turi ekvatorią pasaulio vandenyse. Pabrėžtinai ambicingi Danijos ir Vokietijos planai, kuriuose ketinama iš AEŠ gaminti arti 100% suvartojamos elektros energijos. Lietuvoje iki 2020 metų planuojama generuoti 23 % galios iš atsinaujinančių energijos šaltinių, kurių net 886 MW bus vėjo elektrinės.

Tačiau sunkiai prognozuojami šaltiniai, tokie kaip vėjas, saulė negali padengti viso vartojimo balanso dėl savo nepastovumo, todėl turi būti derinami su labiau prognozuojamais šaltiniais: vandeniu, biokuru, yprastomis šiluminėmis, atominėmis ir kitomis elektrinėmis arba energijos kaupimo sistemomis. Tyrėjai pastebi, kad tinklo stabilumui kyla grėsmė, kai 20% instaliuotos galios sistemoje yra nepastovios generacijos elektrinės.

Europos šalys sistemos nebalansą, kylantį iš nepastovių generacijos šaltinių ir kintančios apkrovos, išlygina skirtingais, jau minėtais techniniais būdais. Nebalanso atsiskaitymo periodai Europoje yra trys: 1 valandos, 30 min, 15 min. ENTSOE planuoja, kad ateityje liks tik vienas nebalanso atsiskaitymo periodas 15 min visoje Europoje. Tuo pačiu planuojama balansavimo atsakomybę dalintis su nebalansą sukeliančiais šaltiniais, tokiais kaip vėjo elektrinės.

Darbe nagrinėjamos vėjo elektrinių instaliuotos galios nebalanso ekonominė ir fizinė žala elektros energetikos sistemai. Pagrindinė darbo tema yra palankiausi techniniai balansavimo būdai vėjo elektrinių galiai balansuoti. Darbe naudojamas literatūros ir elektros sistemos duomenų statistinės analizės metodas. Balansavimui tiekti ieškomas ne tik efektyviausias, bet ir ekonomiškai naudingas būdas.

Tikslas: nustatyti vėjo elektrinių generuojamos galios balansavimo poreikį ir pasiūlyti tinkamas balansavimo technines priemones.

Uždaviniai:

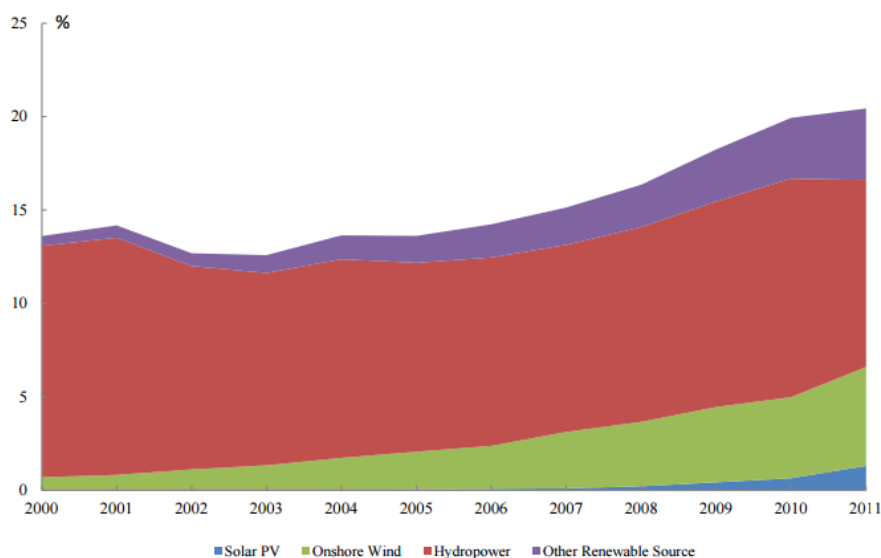
1. Išanalizuoti vėjo elektrinių įtakos rūšis elektros energetikos sistemos darbui.
2. Nustatyti galimas priemones vėjo elektrinių ir apkrovų galiai balansuoti.
3. Sudaryti metodiką, leidžiančią įvertinti vėjo elektrinių prognozavimo paklaidas ir nustatyti reikiamus balansavimo pajėgumus.
4. Iširti vėjo elektrinių ir apkrovų galios planavimo paklaidas.
5. Atlikti disbalanso energijos ekonominį įvertinimą.
6. Parinkti priimtina techninį vėjo elektrinių galios balansavimo būdą.

1 ATSINAUJINANČIUS ENERGIJOS IŠTEKLIUS NAUDOJANČIŲ ELEKTRINIŲ IR JŲ ĮTAKOS ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMAI APŽVALGA

1.1 Atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra Europoje ir Lietuvoje

Elektros gamybai populiariausi atsinaujinantys energijos šaltiniai (AEŠ) yra vanduo, vėjas, saulė ir biomasė. Iki 2007 metų hidroenergija Lietuvoje ir Europoje buvo svarbiausias šaltinis ir generavo daugiausiai elektros energijos (tarp AEŠ), nors per paskutinįjį dešimtmetį hidroelektrinių kiekis beveik nekito, netgi šiek tiek sumažėjo. Tai įvyko dėl kitų AEŠ aktyvaus skatinimo ir dėl 2000 metais ES pasirašytos vandens telkinių apsaugos direktyvos, kuri apriboja naujų hidroelektrinių statybą taip pat ir Lietuvoje. [1]

AEŠ elektrinės žymiai išaugo per paskutinįjį dešimtmetį nuo 13.6% iki 20.4% tarp 2000 m. ir 2011 m. (1.1 pav.). Elektros gamyba iš biomasės žymiai išaugo per paskutinįjį dešimtmetį, tačiau labiausiai šį augimą paveikė (įtakojo) saulės ir vėjo elektrinių gausėjimas (augimas), nes buvo pritaikytos efektyvios paramos schemos. Šios elektrinės išaugo per dešimtmetį beveik nuo nulio iki 5.4% vėjo ir 1.4% saulės 2011-aisiais. Išskirtinas (išsiskiria) vėjo elektrinių indėlis į elektros balansą, kuris žymiai išaugo: palyginus 2011 m. vėjo energija siekė 5.46% visos EU-27 elektros energijos, o periodo pradžioje 2000 m. buvo tik 0.74 % bendrojo elektros balanso. Pažymėtina, kad (Bet) vėjo elektrinių gausėjimas (augimas) buvo monotoniškas, spartesnis tik paskutiniaisiais metais.



1.1 pav. Saulės, vėjo (žemyninės elektrinės), hidroelektrinių ir kitų AEŠ elektros generacija EU- 27.[1]

Lietuvoje panaši situacija kaip Europoje (Lietuvoje taip pat stebima panaši situacija, kaip ir Europoje). Pritaikius paramos schemas atsirado žymus vėjo energijos indėlis, bei elektros energijos gamybos balansui jaučiama saulės, biomasės, biodujų ir atliekų deginimo elektrinių įtaka. 2013 metais elektros, pagamintos iš atsinaujinančių išteklių, dalis sudarė 14,6 proc. visos suvartotos elektros energijos. Lietuvos nacionalinio elektros energijos gamybos balanso duomenimis elektros, pagamintos iš atsinaujinančių išteklių, apimtis 2014 m. išaugo penktadaliu ir toliau integruojama daugiau vėjo elektrinių, kurių bendra įrengtoji galia skirstomajame ir perdavimo tinkluose 2016m sausio 1 d. buvo 438 MW, tai yra 12,3 % nuo suminės tuo metu įrengtosios galios (3558 MW). [2]

1.1 lentelė. Įrengtoji galia Lietuvos EES. [2]

Įrengtoji galia 2016.01.01	MW
<i>Šiluminės elektrinės</i>	1910
<i>Hidroelektrinės</i>	1028
<i>Vėjo elektrinės</i>	438
Vėjo elektrinės prijungtos prie perdavimo tinklo	366
Vėjo elektrinės prijungtos prie skirstomojo tinklo	72
Biokuro elektrinės	108
Saulės elektrinės	73
Iš viso:	3558

Pagal Lietuvos energetikos strategiją, patvirtintą 2011m., siekiant įgyvendinti atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) plėtros strategiją norima iki 2020 metų padidinti atsinaujinančių energijos išteklių dalį, tenkančią galutiniam energijos suvartojimui, iki 23 procentų ir taip reikšmingai sustiprinti Lietuvos energetinę nepriklausomybę bei sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas. [3] O atskirai elektros energijos sektoriuje iki 2020 metų planuojama padidinti AEI dalį elektros gamyboje mažiausiai iki 20 procentų, kur didžioji dalis elektros bus gaminama biomasės kogeneracinėse elektrinėse ir vėjo jėgainėse. Siekiant įgyvendinti šį tikslą buvo planuojama, kad iki 2020 metų Lietuvoje bus instaliuota 500 MW suminės galios vėjo jėgainių, 10 MW saulės elektrinių, mažiausiai 224 MW galios biomasę kūrenančių elektrinių ir 153 MW galios hidroelektrinių. [3] Iš 1.1 lentelės matyti, kad energetikos strategijoje numatyti VE galios kiekiai jau beveik pasiekti, o SE galios kvotų kiekiai jau viršyti, todėl planuojama VE ir SE instaliuotąją galią dar didinti iki 2020 metų atitinkamai iki 886 MW (VE) ir 120 MW (SE). [5]

1.2 Vėjo elektrinių įtaka elektros tinklui

Vėjo energijos naudojimas elektros energijos gamybai vis didėja. Nors vėjo elektrinių sugeneruotos galios dydis gali būti labai žymus bendrame elektros energijos balanse, tačiau didėjantis VE skaičius kelia ir daugiau problemų. VE energijos svyravimai tiesiogiai priklauso nuo vėjo greičio kaitos, o tai lemia, kad VE yra nepastovus energijos šaltinis. Apskaičiuota, kad metinis vėjo kaitos standartinis nuokrypis vietovėje yra tik 10%, tai rodo užtikrintą vėjo energijos gamybą visą vėjo turbinos darbo laiką. Sezoninė vėjo kaita yra labiau nuspėjama, nei metinė, tačiau metrologinė vėjo greičio prognozė galima tik kelioms dienoms į priekį. Vėjo greičio paros prognozės yra ganėtinai nuspėjamos. Vėjo sūkūriai yra svyravimai kas minutę ir net sekundę, kurie gali daryti įtaką elektros kokybei, priklausomai nuo tinklo varžos susijungimo taške ir VE turbinos tipo. Kintančio greičio turbinos geba tolydžiau atiduoti galią palyginus su fiksuoto greičio turbinomis. Taip pat pastebima, kad energijos svyravimai yra mažesni 60-70 % , jeigu VE yra pastatytos skirtingose vietose, o ne viename dideliame VE parke. [7]

Vėjo sugeneruotos elektros energijos įtaka tinklui, bet kokioje sistemoje priklauso nuo instaliuotos galios lygio ir sistemos lankstumo. Iš prigimties labiau lanksčios sistemos gali priimti didesnę kiekį integruotos vėjo energijos ir išvengti nenorimos įtakos iš VE įrenginių. VE įtaka skirstoma į:

- Trumpalaikę įtaką, kur susiduriama su veiklos laiko – faktinės gamybos ir vartojimo balansavimo problemomis;

- Ilgalaikę įtaką, kuri apima (įtraukiamas) apkrovų piko planavimą. [7]

Išskiriamos šios įtakos tinklui sritys:

1. **Gamybos efektyvumas.** VE nepastovi gamyba gali lemti kitų sistemos įrenginių (pavyzdžiui, šiluminių elektrinių) neefektyvų veikimą, taip mažindama sistemos efektyvumą.

2. **Rezervavimo poreikis.** Atsargos rezervai reguliavimui (1 min), apkrovos pokyčio rezervavimas (5 min) ir operaciniai rezervai (10min) reikalingi kiekvienoje sistemoje išlyginti vėjo energijos svyravimams. Atlikus tyrimus, nustatyta, kad didelis kiekis instaliuotų VE neturi didelės reikšmės 1 minutės rezervavimui, kuris užtikrina apkrovos ir gamybos balansą, bet apkrovos ir operaciniam rezervavimui vėjo energijos svyravimai turi daugiau reikšmės ir rezervai turėtų būti didesni, norint apsisaugoti nuo didesnių vėjo gamybos kritimų.

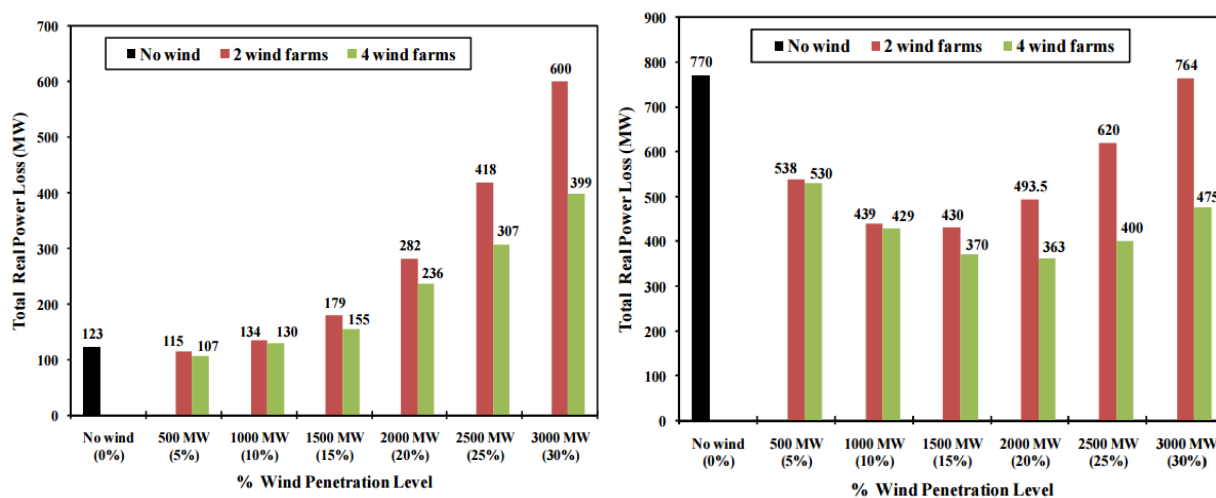
3. **VE atjungimas.** VE gamyba turi būti sumažinama, kad būtų išlaikomas balansuotas, stabilus ir saugus tinko veikimas. Tai gali įvykti, kai VE generuoja labai daug, vietinė apkrova yra maža, o perdavimo linijos į kitus regionus yra apkrautos ir siekia temperatūros ribas. VE atjungimas priklauso nuo tinklo lankstumo ir VE instaliuotos galios.

4. **Patikimumas.** Didelis kiekis instaliuotų VE neužtikrina, kad energija bus generuojama, kai jos labiausiai reikės. Tačiau esant dideliame kiekiui nepastovios vėjo energijos, būtina turėti įprastinių elektrinių, užtikrinančių tinklo saugumą, tad VE negali būti vienintelis energijos tiekėjas.

5. **Perdavimo nuostoliai.** Jie gali atsirasti esant dideliame instaliuotai VE galiai, kai skiriasi VE gamybos ir apkrovos dydis, priklausomai nuo atstumo iki apkrovos centrų. Perdavimo sistemoje dideli galios srautai gali susidaryti, kai VE yra toli nuo apkrovos, todėl reikia didinti perdavimo laidumus, dėl kurių didėja perdavimo nuostoliai.

6. **Įtampa ir reaktyvi galia.** Vėjo turbinose naudojami indukciniai generatoriai (SCIG) naudoja tinklo reaktyviąją galią. Galios svyravimai sukelia ir įtampos svyravimus, kai naudojamos fiksuoto greičio turbinos, kaip SCIG. Tačiau modernios kintančio greičio turbinos (DFIG) gali tiekti reaktyviąją galią į tinklą. [7] Taigi VE turi tiekti arba vartoti reaktyviąją galią, kaip įprasti generatoriai. [8]

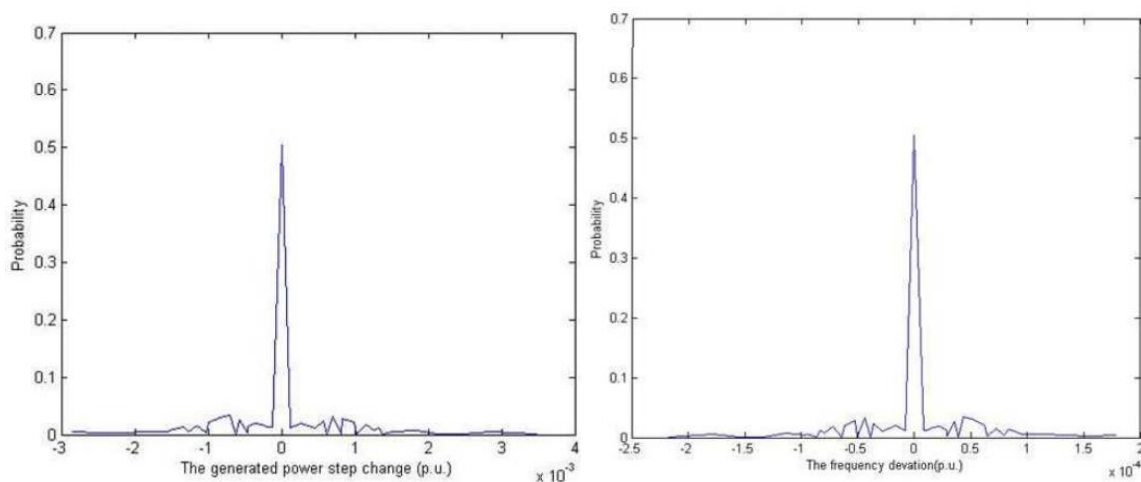
Jeigu prie skirstomojo tinklo prijungta mažai VE, įtampa išlieka stabili, bet prijungus daug VE – įtampa skirstomajame tinkle gali svyruoti. Tai gali sukelti arba tinklo įtampos griūtį arba tinklo nestabilumą esant net mažiems sutrikimams. [8].



1.2 pav. Aktyvios galios nuostoliai priklausomai nuo instaliuotos VE galios ir VE parkų skaičiaus. A) Kai apkrova vidutinė; B) Kai apkrova didelė. [8]

7. **Aktyviosios galios nuostoliai tinkle.** Sumodeliavus sistemą su skirtingu skaičiumi VE parkų ir skirtinga jų galia, paaiškėto, kad mažiau aktyvios galios nuostolių tinkle sukelia didesnis skaičius (atlikus šį tyrimą matyti (šiam tyrimui tai buvo), kad 4 VE parkai sukelia mažiau nuostolių nei du VE parkai) VE parkų, nepriklausomai nuo to, ar tinklo apkrova didelė ar maža. (1.2 pav.) [8]

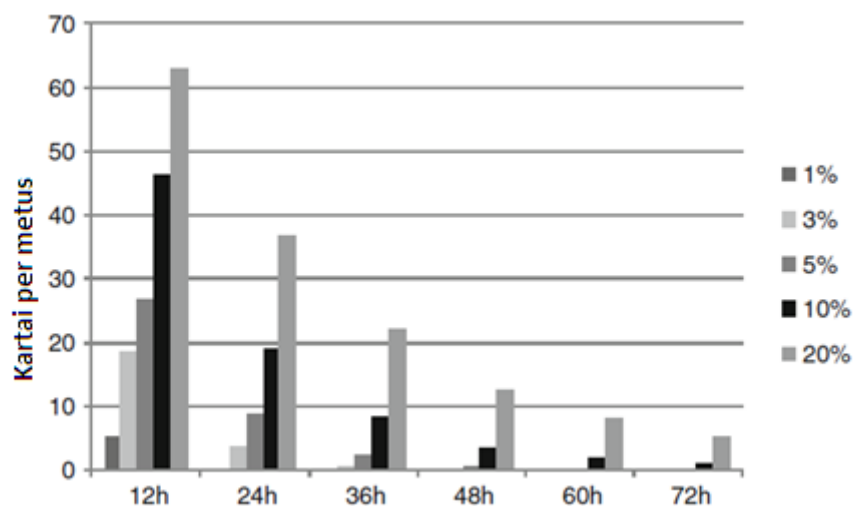
8. **Tinklo dažnio pokytis.** Matematinio modeliu ištirta VE galios pokyčio įtaka tinklo dažniui, rodo, kad dažniausiai VE generuojamos galios pokyčiai būna nedideli, tad ir dažnio mažų nuokrypių (leistinų) tikimybė yra didžiausia (1.3 pav.) [9].



1.3 pav. Didžiausio galios P_w ir dažnio $\Delta\omega_{\max}$ pokyčio tikimybių grafinės priklausomybės. [9]

9. **Trumpo jungimo srovės.** Prijungus VE prie perdavimo tinklo išauga vienfazio ir trifazio jungimo srovės, bet šis padidėjimas neviršija standartuose leistinų ribų (neperžengia leistinų standartuose ribų). [10]

10. **Vėjo elektrinių generacijos sumažėjimas.** Norint nustatyti reikalingą balansavimo energijos rezervą, buvo atliktas tyrimas apie sumažėjusią VE generaciją ir kaip ilgai ji būna mažesnė. Atlikus bandymus, nustatyta, kad Šiaurės jūroje esančių VE elektros gamyba sumažėja iki 10% instaliuotos galios net 72 valandoms, pasitaikė tik vieną kartą per metus. Taigi, iš šios duomenų analizės daroma išvada, kad dažniausiai pasikartojantis vėjo galios sumažėjimas yra iki 20% VE instaliuotos galios trunkantis apie 12 valandų. (1.4 pav.) [11]



1.4 pav. Ilgai trunkanti sumažėjusi VE generacija jūriniame vėjo elektrinių parke.[11]

Šis tyrimas neatsakė, kokio pobūdžio VE galios sumažėjimas turi svarbesnę reikšmę kaupiklių parinkimui: ar trumpai trunkantys ir labai sumažėjusios generacijos momentai, ar ilgiau trunkantys, bet daugiau energijos gaminantys laikotarpiai. Vertinant balansavimui reikalingą galią būtina atsižvelgti į ilgiausiai trunkantį VE galios sumažėjimą.

1.3 Sisteminės paslaugos

Nepastovūs energijos šaltiniai gali staiga nustoti tiekti elektrą į tinklą, nes yra ribotai nuspėjami, ir sukelia didelių nesklaidumų tinkle, ypač kur yra instaliuota didelė tokių energijos šaltinių galia. Kaip pavyzdžiui ERCOT vėjo elektrinės Teksase arba E.on – Vokietijoje, bet didžiausias vėjo elektrinių netikėtas atsijungimas dėl audros įvyko Danijoje – 2000 MW (83% instaliuotos galios) galios sumažėjimas per 6 valandas 2005 metų sausį, Vokietijoje 4000 MW (58% instaliuotos galios) galios sumažėjimas per 10 valandų gruodį 2004 metais. Taigi toliau plėtojant vėjo energetiką, ypač statant galingus elektrinių parkus jūroje, būtina sutelkti daugiau dėmesio ir tobulinti prognozavimą ir balansavimo pasirinkimus. Ir nors atsinaujinantys energijos šaltiniai yra įvairių rūšių, papildomų paslaugų poreikis, kaip energijos balansavimas, yra ypač svarbus remiant nepastovių šaltinių integraciją. [12]

Sisteminės paslaugos, pavyzdžiui, aktyviosios galios rezervai, disbalanso energijos paslaugos, dažnio reguliavimas, yra būtina parama atsinaujinančios energijos integracijai, ypač iš nepastovių išteklių. Be šių papildomų paslaugų, išauga sistemos nebalanso tikimybė, ypatingai sistemose su dideliu AEŠ energijos kiekiu iš šaltinių, kurie yra nepastovūs, kaip saulė ir vėjas. Sisteminių paslaugų pirkimas yra pagrindinis būdas, kaip integruoti AEŠ, taip pat lemiantis „žalios“ energijos integravimo kainą. Kita vertus, jeigu patikimam elektros energijos tiekimui

palaikyti nebūtų naudojamos papildomos sisteminės paslaugos, tuomet galutiniai vartotojai turėtų daug nepatogumų ir patirtų didelius nuostolius dėl dažno elektros tiekimo nutrūkimo. [12]

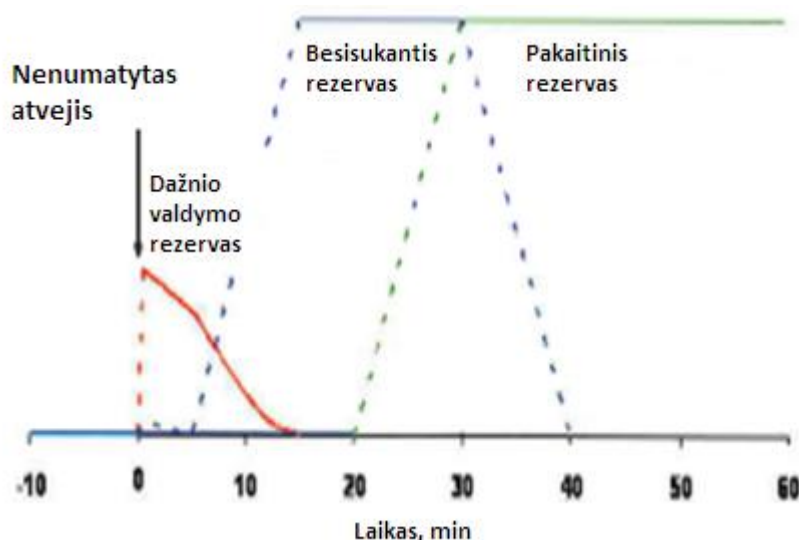
Sisteminės paslaugos yra atskira elektros paslaugų sritis, reikalinga užtikrinti patikimą elektros tiekimą ir perdavimo sistemos darbą. Priklausomai nuo regiono, sisteminės paslaugos gali būti suprantamos skirtingai, tačiau jos visada perkamos elektros energijos rinkos aplinkoje. Pagal atliktus tyrimus galima teigti, kad daugiausiai AEŠ elektrinių integracijos kainą didina patikimumo sąnaudos. Apibendrinant teigiama, kad sisteminių paslaugų kaina yra svarbi „žalios“ energijos tiekimo kainos sudedamoji dalis, todėl ypač svarbu atsižvelgti į išaugančias patikimumo sąnaudas susijusias su nepastovių AEŠ elektrinių prijungimu į tinklą. [12]

Sisteminių paslaugų tipus galima apibendrinti taip:

1. Stabilaus dažnio palaikymas (pvz. dažnio reguliavimo galia, reguliavimo ir operacinai rezervai);
2. Galios balansas (pvz. balansavimo galios planavimas ir paleidimas);
3. Įtampos valdymas (pvz. reaktyvios galios valdymas);
4. Tiekimo atstatymas po sistemos išsijungimo (pvz. įsijungimas po sistemos visiško atsijungimo ir darbas salos režimu);
5. Sistemos valdymas (pvz. elektros kokybės užtikrinimas, operacijų ir turto valdymas).

Išvardintos sisteminės paslaugos yra plačiai perkamos per trumpalaikių konkurencinių rinkos mainų mechanizmus.

Norint saugiai ir stabiliai eksploatuoti elektros tinklą, paklausa ir generuojama pasiūla turi būti nuolatos balanse. [12] Sistemos dažnis yra tiesioginis indikatorius balansui nustatyti ir privalo būti palaikomas, su labai mažais leistinais nuokrypiais, apie 50 Hz Europos šalyse ir apie 60Hz JAV. Tinkamas dažnis ir balansas palaikomi pasitelkus pirminį, antrinį ir minutinį reguliavimą.



1.5 pav. Dažnio valdymo ir operacinių rezervų suveikimo laikas. [12]

Reguliavimas yra generavimo vienetų funkcija, įgyvendinama pasitelkiant tarpusavyje sujungtus valdiklius ir automatinę generavimo kontrolę, kurie seka momentinius vartotojų apkrovos svyravimus ir netyčinius kitų generatorių generacijos svyravimus. Reguliavimo paslaugos yra esminės palaikant stabilų sistemos dažnį, mažinant nukrypimus tarp tiekiamų ir suplanuotų galios srautų valdomose vietose ir parenkant generavimo lygį pagal apkrovą.

Aptarnavimo tarifai priklausantys nuo vidutinės valandinės vartotojų apkrovos arba tinklo vartojimo matavimų yra plačiai naudojami praktikoje. Reguliavimo išlaidos atsiranda dėl apkrovos ir gamybos svyravimų, bet nepriklauso nuo vidutinės apkrovos ar vartojimo tinkle kiekių. Konkurencingose rinkose, reguliavimo kaina svyruoja nuo valandinės iki dar mažesnių intervalų, bei yra priklausoma nuo tuo metu esančios energijos kainos.

Operaciniai rezervai (arba tretinis rezervas ES) susideda iš (1.5 pav.):

- Besisukantis rezervas (šiluminės elektrinės, dujų turbinos ir hidroakumuliacinės saugyklos), tai sinchronizuoti su tinklu ir dalinai apkrauti rezervai, kurie yra greitai prieinami t.y. per 10min nuo nebalanso atsiradimo. Šį rezervą tiekia elektrinės esančios arti energetinės zonos valdymo centro, kad neapkrautų perdavimo linijų ir netrikdytų importo;
- Nesisukantis rezervas, tai galios generavimo šaltiniai arba pertraukiama apkrova. Rezervas taip pat per 10 min gali mažinti nebalansą, bet jam nėra reikalavimo būti veikiančiam ir sinchronizuotam su tinklu, tuo skiriasi nuo besisukančio rezervo;
- Papildomas operacinis rezervas – tai rezervas, kuris pilnai prieinamas per 30-60min nuo informavimo ir yra užsakomas tam tikram laiko tarpui (pvz. 2 val.), kol kiti rezervai bus paruošti tiekti galią. [12]

Taigi, planuojant elektros energiją generuoti iš AEŠ, būtina atsižvelgti į sisteminių paslaugų kainą, kuri sudaro dalį galutinės "žalios" elektros energijos kainos. Energijos kaupimas arba koreguojama apkrova yra galimi būdai, kaip sumažinti nepastovių AEŠ elektrinių balansavimo energijos kaštus. Išlaidos susijusios su tokiais balanso palaikymo būdais taip pat būtų laikomos dalimi bendrų išlaidų tiekti "žalią" energiją.

2 TECHNINIŲ PRIEMONIŲ VĖJO ELEKTRINIŲ GALIAI BALANSUOTI ANALIZĖ IR TYRIMO METODIKA

2.1 Vėjo elektrinių generuojamos galios balansavimas

Taigi jungiant vėjo elektrines į tinklą, kintanti ir tik iš dalies nuspėjama, vėjo elektrinių generuojama galia negali užtikrinti elektros energijos tiekimo visą laiką. Apsunkinamas nuolatinis elektros gamybos ir vartojimo balanso sistemoje užtikrinimas, galių mainai ir prekyba elektra su kaimyninėmis šalimis. Dėl to energetikos sistemoje reikia turėti papildomų operatyvių galių rezervų priklausomai nuo energetikos sistemos dydžio, elektrinių struktūros, elektros tinklų pralaidumo, ryšių su kaimyninėmis energetikos sistemomis. VE galios didinimas privalo būti kombinuojamas su kitais elektros tiekimo būdais. Kitaip vadinama rezervinė galia, gali būti tiekiamas:

- lengvai valdomų ir greitai keičiančių generavimo galių elektrinių: šiluminių arba hidroelektrinių;
- didelių tarptinklinių jungčių, sujungiančių vieną EES su kita EES, kurios galėtų tiekti rezervinę galią, kartu vykdant tikslų vėjo prognozavimą;
- įvairios energijos kaupimo sistemos. Jos gali būti naudojamos vėjo elektrinių rezervavimui ir netgi, kai kuriais atvejais varžosi su dujinėmis elektrinėmis, ypač didėjant dujų kainai.

Tačiau pasirenkamas būdas priklauso nuo vėjo energijos dalies galutiniam energijos balanse. [6]

Atliktose studijose apie paskirstytosios generacijos šaltinių, ypač vėjo elektrinių, skverbtį elektros sistemose nurodoma, kad tinklo stabilumas gali būti pažeistas, jeigu su pertrūkais dirbančių atsinaujinančių šaltinių galia pasiekia 15 % sistemos galios. Energijos tiekėjų nuomone, su pertrūkais dirbančių šaltinių galiai pasiekus 15-20 % visos sistemos apkrovos, elektros tinklo stabilumas atsiduria pavojuje. [7]

Dažniausiai siūlomas sprendimas VE galios balansavimo energijai tiekti yra įvairių rūšių energijos kaupimo technologijos, kurios kol kas nėra nei pigos, ne efektyvios. Kaupimo sistemų tikslas yra tiekti teigiamą ir neigiamą valdymo galią skirtingiais laiko momentais. Žiūrint ne tradiciniu požiūriu, energijos kaupiklais gali būti vadinamos visos technologijos galinčios tiekti teigiamą ir neigiamą reguliavimo galią į tinklą. Šios technologijos gali būti skirstomos į tris grupes ir kiekviena jų turi po tris pogrupius.

A. Kaupiklio tipas ir kaupimo vieta. Skirstomi pagal kaupimo tikslą[11]:

A1. Modulinės saugojimo sistemos dvigubam naudojimui.

A2. Modulinė saugojimo sistema tik tinklų naudojimui.

A3 Centralizuota saugojimo sistema.

Modulinės sistemos yra sudarytos iš sąlyginai mažų įprastinių kaupiklių, kurie gali būti sujungti tarpusavyje, kad suformuoti didesnę sistemą, tačiau didesnės sistemos nėra pranašesnės nei kaina, nei efektyvumu. Tokioms kaupykloms vieta nėra svarbi, reikia tik atsižvelgti į saugumą.

Centralizuoti kaupikliai yra įrengiami specialiose vietose, kurios turi atitikti specialius reikalavimus apimančius geologinę vietos sudėtį (pvz. hidroakumuliacinė sistema su dviem vandens baseiniais skirtinguose aukščiuose). Šios sistemos yra efektyvesnės ir pigesnės, jeigu jų galia ir kaupiama energija didėja ir dažniausiai yra ne mažesnės nei 100MW galios.

Dvigubos paskirties sistemos pagrindinis tikslas yra aptarnauti tam tikrus objektus, o tik antraeilė paskirtis tiekti sistemines paslaugas į tinklą. Pavyzdžiui elektromobilių baterijų tikslas yra tiekti energiją automobiliui, ir tik papildoma galimybė yra tiekti paslaugas EES tinklui.

B. Trukmė ir galios tiekimo dažnis [11]:

B1. Trumpalaikis energijos saugojimas – sekundžių ir minučių intervalas.

B2. Vidutinės trukmės energijos kaupimas – minučių ir valandų intervalas.

B3. Ilgalaikis energijos kaupimas - nuo savaitės iki mėnesio trukmės saugojimas.

Trumpalaikio saugojimo kaupikliai tiekia energiją iš karto, kai tinkle atsiranda poreikis. Jau po kelių sekundžių yra tiekama pilna galia, bet ilgiausiai tik 15 minučių. Tai suteikia galimybę tiekti pirminio valdymo galią arba tarpininkauti sistemose su dažnai besikeičiančiu apkrovos dydžiu. Reikalinga, kad šių sistemų pasikrovimo ir išsikrovimo trukmė būtų itin trumpa, bei būtų galimybė padaryti kelis pakrovimo-iškrovimo ciklus per dieną, o galios koeficientas būtų mažiau nei 0,25 val. (kur kaupiklio talpa kWh yra dalinama iš maksimalios galios kW – E2P).

Vidutinės trukmės kaupiklių galios koeficientas yra 1-10 val., todėl apkrovos kaupiklių yra mažiau, be to jie apsiriboja mažu ciklų skaičiumi, daugiausiai du iškrovimo-įkrovimo ciklai per dieną. Šie kaupikliai išlygina skirtumus tarp elektros energijos gamybos ir vartojimo dienos eigoje, t. y. kaupikliai įkraunami per naktį, o per piko valandas tiekia papildomą galią į tinklą. Šios kaupimo sistemos gali sumažinti svyravimus iš nepastovių AEŠ elektrinių tiekiamai galiai, kai faktinė gamyba skiriasi nuo prognozuoto kiekio. Tačiau šie kaupikliai negali užtikrinti elektros tiekimo saugumo, jeigu nepakankama generacija iš AEŠ tęsiasi keletą dienų ar savaitių.

Ilgalaikės energijos kaupimo sistemos kompensuoja nepakankamą galią iš AEŠ trunkančią kelias dienas ar savaites, kadangi sistemos galios koeficientas svyruoja nuo 50-500 val., todėl yra

apribotas ciklų skaičius per metus. Kad tokios sistemos atsipirktų reikia naudoti pigias medžiagas ir užtikrinti, kad savaiminis išsikrovimas yra mažas.

C. Įeinanti į ir išeinanti iš kaupiklio energijos rūšis [11]:

- C1. "Elektra - elektra", - teigiamos ir neigiamos galios kontrolė,
- C2. "Iš bet kokios energijos į elektrą", - teigiamos galios kontrolė,
- C3. "Iš elektros į bet kokią energiją", - neigiamos galios kontrolė.

Kaupimo sistemų svarbi charakteristika yra kokią galią jie gali tiekti į tinklą. Sistemos, kurios kaupia elektrą ir tiekia elektrą, jos gali tiekti, tiek neigiamą, tiek teigiamą galią. Tokio tipo sistemos yprastai yra vadinamos kaupimo sistemomis.

Iš kitų energijos rūšių gaunama galia yra saugoma ir atiduodama atgal į tinklą elektro energijos pavidalu, bet gali tiekti teigiamą galios valdymą arba sumažinant savo apkrovą arba tiekia kitais būdais sukauptą elektros energiją į tinklą. Ši kategorija įtraukia visas yprastas elektrines, kurios tiekia galią skirtingu metu ją gaudamos iš iškasenų, atomo energijos, vandens ar biokuro degalų. Kontroluojamos apkrovos gali atidėti variklių krovimą ir kitaip valdyti apkrovą, bei ją sumažinti esant galios trūkumui.

Iš elektros į bet ką paversta energija susikoncentruoja energijos nešėjuje su žemesniu eksergijos lygiu. Šiai kategorijai priskiriama cheminių degalų gamyba su elektros energijos pagalba, sitezės būdu pagaminant vandenilį ar metaną. Kombinuota sistema iš elektros į kažką ir iš kažko į elektrą gali atstoti sistemas elektra- elektra, bei tiekti tiek teigiamą, tiek neigiamą galios valdymą.

Šaltiniuose suskirstytos į tris grupes kaupimo priemonės apbendrinai gali būti skirstomos į ilgalaikes ir trumpalaikes energijos kaupimo priemones, kurios yra išvardintos ir jų svarbiausios charakteristikos pateikiamos 2.1 lentelėje, kuria naudojantis bus lyginamos VE galiai balansuoti tinkančios technologijos.

Apibendrintai galima teigti, kad daugelis energijos kaupimo priemonių yra dar tobulinamos ir kuriamos, todėl jų techniniai parametrai ir kaina ateityje tik gerės, kadangi mokslininkai ir įmonės supranta energijos saugojimo būtinybę instaliuojant vis daugiau nepastovios galios elektrinių ir didėjant elektros energijos poreikiams (pvz. elektromobilių atsiradimas EES).

2.1 lentelė. Energijos kaupimo priemonių charakteristikų palyginimas. [14]

Kaupimo technologijos	Galia, MW	Energija, MWh	Ciklo n.k., %	Iškrovos trukmė	Darbo amžius	Kaina, EUR/kWh	Kaina, EUR/kW	Technologijos brandumas
Ilgalaikės energijos kaupimo priemonės								
HAE	100 - 4000	<15000	80%	4-12h	40 m.	35-70	-	Brandi, >100 metų
Baterijos((švino-rūgštinės, NiCd, NiMH, Li-jonų)	0,01-100	<500	50-90%	1-8h	10 ³ -10 ⁴	70-4000	-	Brandžios, yra rinkoje
NaS baterijos	1	1	-	1	-	-	-	Sukurta, yra rinkoje
Srautinės baterijos (SB)	0,1-10	1-100	60-75%	10h	-	-	-	Sukurta, demonstracinių projektų stadija
Suspausto oro energijos kaupikliai (SOEK)	25-3000	50-10000	75%	1-20h	30m	10-70	-	Sukurta, yra demonstraciniai objektai
Vandenilio kaupikliai	<50	Neribota	20-36%	>5h	10 ⁴ h	-	-	Kūrimo stadijoje
Trumpalaikės energijos kaupimo priemonės								
SEK	0,5-10	0,1-100	90%	<5min	10 ⁶	-	140-350	Brandi, yra rinkoje
SMEK	0,01-100	0,01-1000	95%	1-30min	10 ⁶	-	200-500	Sukurta, dar nėra rinkoje
Superkondensatoriai	<10	0,01-3	90%	<1 min	10 ⁶	-	70-4000	Sukurta, yra rinkoje

HAE – hidroakumuliacinė elektrinė, SOEK- suspausto oro energijos kaupikliai, SEK – smagratinė energijos kaupykla, SMEK- superlaidininkų magnetinės energijos kaupiklis, SB- srautinės baterijos.

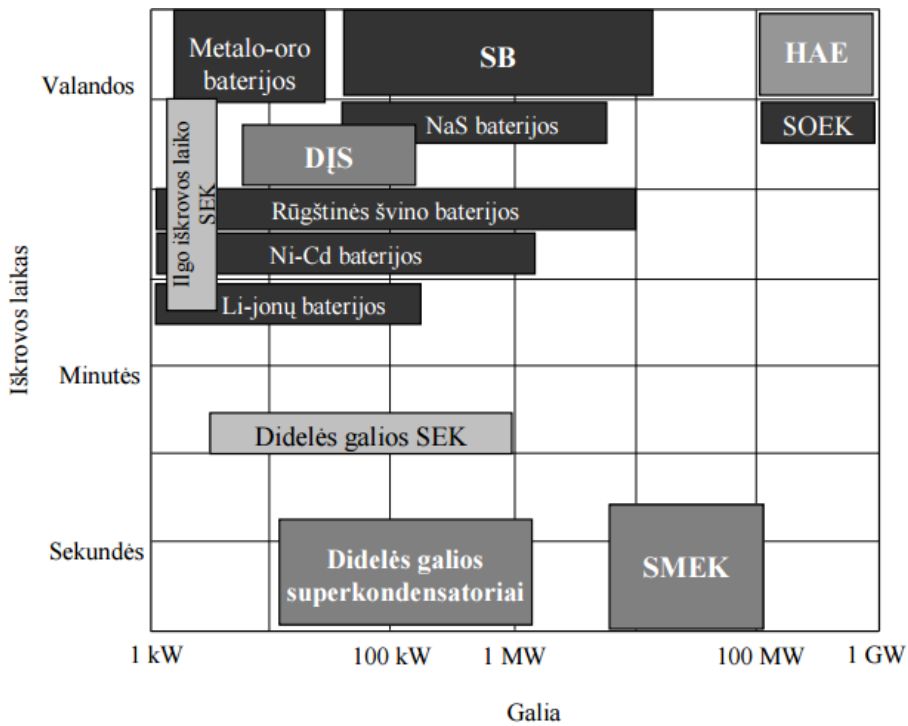
Energetikoje šiuo metu jau yra naudojamos ir geriausias perspektyvas ateityje turi HAE, SOEK, SEK ir SMEK energijos kaupyklos. Baterijos (akumulatoriai) ir superkondensatoriai jau naudojami transporte ir rezerviniuose maitinimo šaltiniuose, o netolimoje ateityje gali būti pradėti naudoti ir elektros energetikoje kaip paskirstyti energijos kaupikliai. Jų galia turėtų būti nedidelė (šimtai kW), bet jų skaičius – labai didelis.[14]

2.2 lentelė. Elektros energijos kaupiklių panaudojimo sritys.[14]

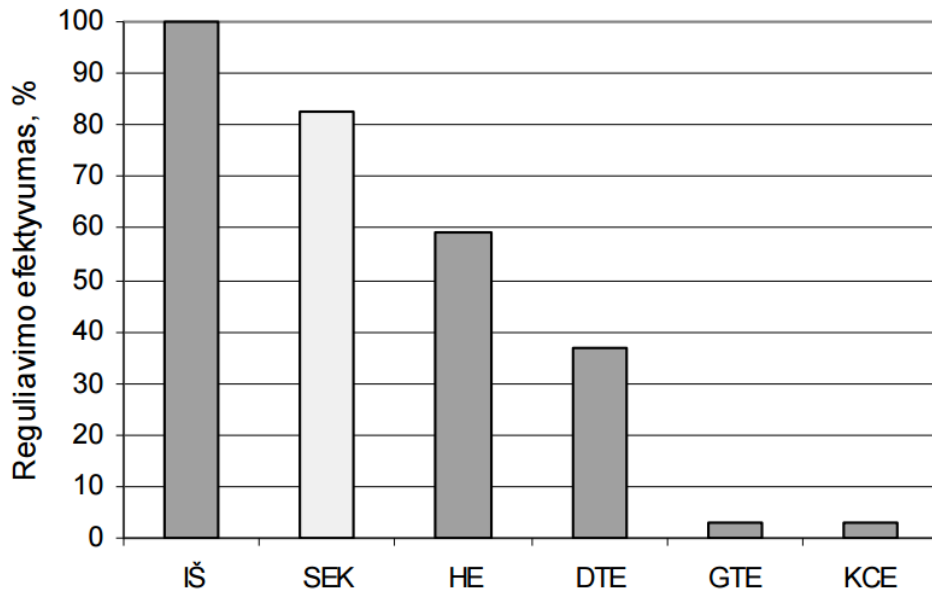
Taikymo sritis	Tipinė galia, MW	Tipinis iškrovimo laikas	Naudojamos technologijos
Galios kokybės gerinimas	<1	1s	Superkondensatoriai, SMEK, SEK, baterijos
Energijos valdymas (ilgalaikiai svyravimai, apkrovos išlyginimas)	10-100	1-10h	HAE, SOEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS baterijos, vandenilio kaupikliai
AEŠ elektrinių integravimas	0,1-100	1min-10h	SEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS
AEŠ elektrinių rezervavimas	~1	1-20h	HAE, SMEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS
Pikinis energijos generavimas	~1	~1h	HAE, SMEK, SEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS baterijos
Energijos perdavimo stabilumas	1-100	1s	SMEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS baterijos

Kaupiklių energetikoje labai svarbus parametras yra energijos iškrovos laikas. Įvairių energijos kaupiklių energijos iškrovos laikų ir jų galių ribinės reikšmės yra palygintos 2.1 ir 2.2 lentelėse, bei 2.1 pav. VE galiai balansuoti reikia turėti didelės galios ilgo iškrovos laiko (val.) ir trumpo iškrovos laiko (s) energijos kaupiklių. Kaip parodyta 2.1 paveikslėlyje, tinkamiausiomis valandinėmis VE parkų galios balansavimo ir rezervavimo priemonės gali būti HAE, SOEK ir SB.

Kaip trumpalaikės VE parkų generuojamos elektrinės galios kokybės valdymo priemonės gali būti naudojamos SMEK, SEK, superkondensatoriai (2.1 pav.). Jų iškrovos laikai dažniausiai neviršija 1 s, tačiau kai kurios elektros energijos kaupimo priemonės yra dar tik eksperimentinėje jų naudojimo stadijoje.



2.1 pav. Kaupiklių iškvos laiko ir jų galių priklausomybių palyginimas (DĮS – didelės įkvos superkondensatoriai) Šaltinis: www.electricitystorage.org [14]



2.2 pav. Galios balansavimo būdų efektyvumo palyginimas naudojant įvairių tipų elektrines. IŠ – idealus šaltinis, SEK – smagratinė energijos kaupykla, HE – hidroelektrinė, DTE – dujų turbininė elektrinė, GTE – garo turbininė elektrinė, KCE – kombinuoto ciklo elektrinė. Šaltinis: Pacific Northwest National Laboratory, JAV.[14]

Balansavimo galiai tiekti vienas iš efektyviausių būdų yra laikomas SEK, kuris pranašesnis už visus kitus balansavimo būdus ir kaip minėta anksčiau yra ypač tinkamas trumpalaikiam VE galios balansavimui (2.2 pav.). Jie naudojami kaip rezerviniai maitinimo šaltiniai arba EES tinkle trumpalaikiams galios perkričiams, kurių trukmė skaičiuojama sekundėmis, išlyginti ir dažniui palaikyti.[14]

Tačiau, kad žinoti kuri sistema efektyviausia ir labiausiai tinkanti konkrečiai EES būtina atlikti jų lyginimą atsižvelgiant į kainą ir techninį potencialą. O be to dar reikėtų atsižvelgti į šiuos aspektus [11]:

- Pradinių investicijų dydis,
- Gyvavimo ciklo sąnaudos,
- Aplinkosaugos gyvavimo ciklo analizė,
- Statybos apribojimai,
- Bendras energijos efektyvumas,
- Bendras poveikis elektros energijos tiekimo sistemai,
- CO₂ emisija,
- Nacionalinis energetinis savarankiškumas,
- Socialinis ir politinis požiūris.

Įprastai, visos technologijos skirstomos pagal iškvovos laiką yra tiesiogiai konkurencingos vienas su kita. Sumanus valdymas modulinių saugojimo sistemų gali teikti tas pačias sistemines paslaugas į tinklą, kaip ir centralizuotos energijos kaupimo technologijos.

2.2 Vėjo elektrinių generuojamos galios ir suminės apkrovos galios prognozavimo paklaidos nustatymas

Siekiant įvertinti VE generuojamos galios patikimumą ir reikalingos balansavimo energijos kiekį būtina atsižvelgti į VE generuojamos galios planavimo paklaidą ir suminės apkrovos prognozavimo paklaidą. Atliekama statistinė duomenų analizė. Analizuojant duomenis randami šie rodikliai: minimali ir maksimali kintamųjų vertės, vidurkis ir standartinis nuokrypis.

Standartinis nuokrypis (kartais vadinamas sigma, SD, angl. Standard deviation) yra absoliutaus variabilumo (dispersijos) matas, rodantis, kaip individualūs stebėjimai išsidėsto vidurkio atžvilgiu. Jis matuojamas tais pačiais vienetais kaip ir vidurkis. Standartinis nuokrypis parodo atsitiktinių reikšmių sklaidą apie vidurkį, reiškiasi, jeigu SD mažas, tuomet atsitiktinės reikšmės išsidėsčiusios apie vidurkį, bet jeigu SD didelis- reikšmės nutolę nuo vidurkio. Jeigu norima atskleisti, kaip plačiai svyruoja matavimai, vartojamas standartinis nuokrypis.

Jeigu duomenys prilygsta normaliam pasiskirstymo dėsniai, apie 99,7 % tiriamųjų turi dydžius, esančius tarp vidurkio minus ir plus, – apie 3 standartinius nuokrypius (arba 3 sigma, 3 σ). Likusios reikšmės 0,3% gali būti išsidėstę labai plačiai nuo vidurkio, tačiau tikimybė kad atsitiktinis dydis bus taip nutolęs nuo vidurkio yra labai maža, artima nuliui.

Vėjo elektrinių generuojamos galios ir suminės apkrovos galios prognozavimo paklaidos nustatomos pagal šias formules:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (6.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta P_i - \mu)^2}; \quad (6.2)$$

čia μ ir σ – prognozavimo paklaidos aritmetinis vidurkis ir standartinis nuokrypis; ΔP_i – i -osios valandos prognozavimo paklaida; n – valandų skaičius metuose.

Normalioji kreivė turi šias savybes:

- atsitiktinio dydžio patekimo į intervalą $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$ tikimybė yra 0,68;
- patekimo į intervalą $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ tikimybė yra 0,95;
- patekimo į intervalą $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$ tikimybė yra 0,997.

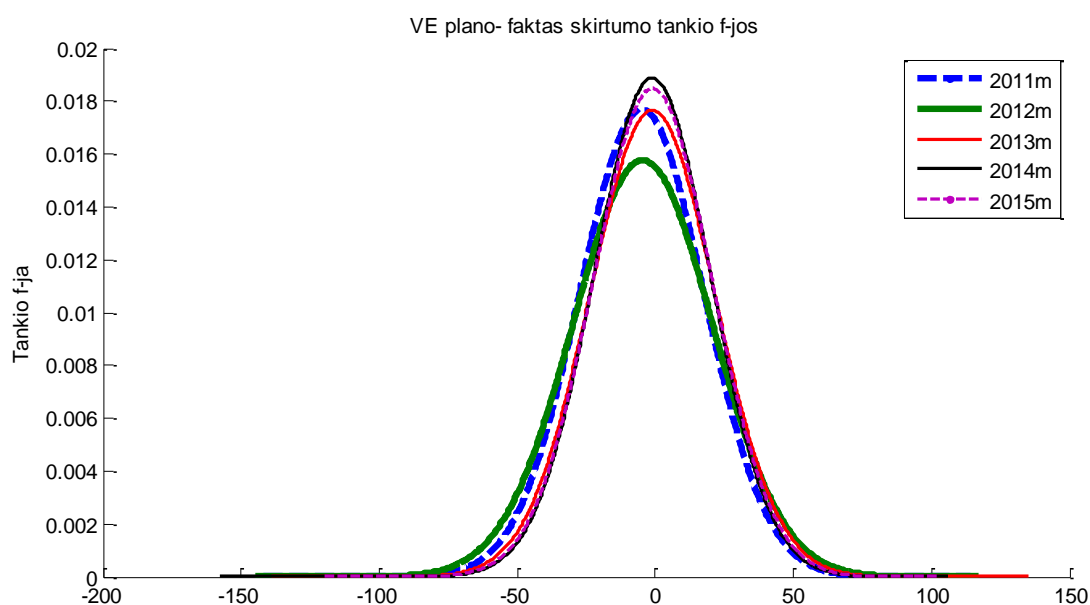
3 VĖJO ELEKTRINIŲ GENERUOJAMOS GALIOS BEI APKROVOS GALIOS PROGNOZAVIMO PAKLAIDŲ IR BALANSAVIMO PRIEMONIŲ TYRIMAS

3.1 Vėjo elektrinių galios planavimo paklaidos

Atlikta Lietuvos EES penkerių metų laikotarpio nuo 2011 m. iki 2015 m. VE, prijungtų prie perdavimo tinklo, generuojamos galios planuotos gamybos ir faktinės gamybos skirtumo statistinė analizė. Paveikslėliuose 3.2 pav. – 3.6 pav. atvaizduoti VE generacijos plano paklaidos statistinis pasiskirstymas, o 3.1 pav. lyginamos paklaidos tankio funkcijos per penkerius metus. Atlikus analizę gauname, kad VE planavimo paklaida svyruoja nuo –158 MW 2014 m. iki 135 MW 2013 m., o tai atitinkamai sudaro 55 % ir 48 % prijungtos prie perdavimo tinklo VE instaliuotos galios.

3.1 lentelė. VE galios prognozavimo paklaidos duomenys.

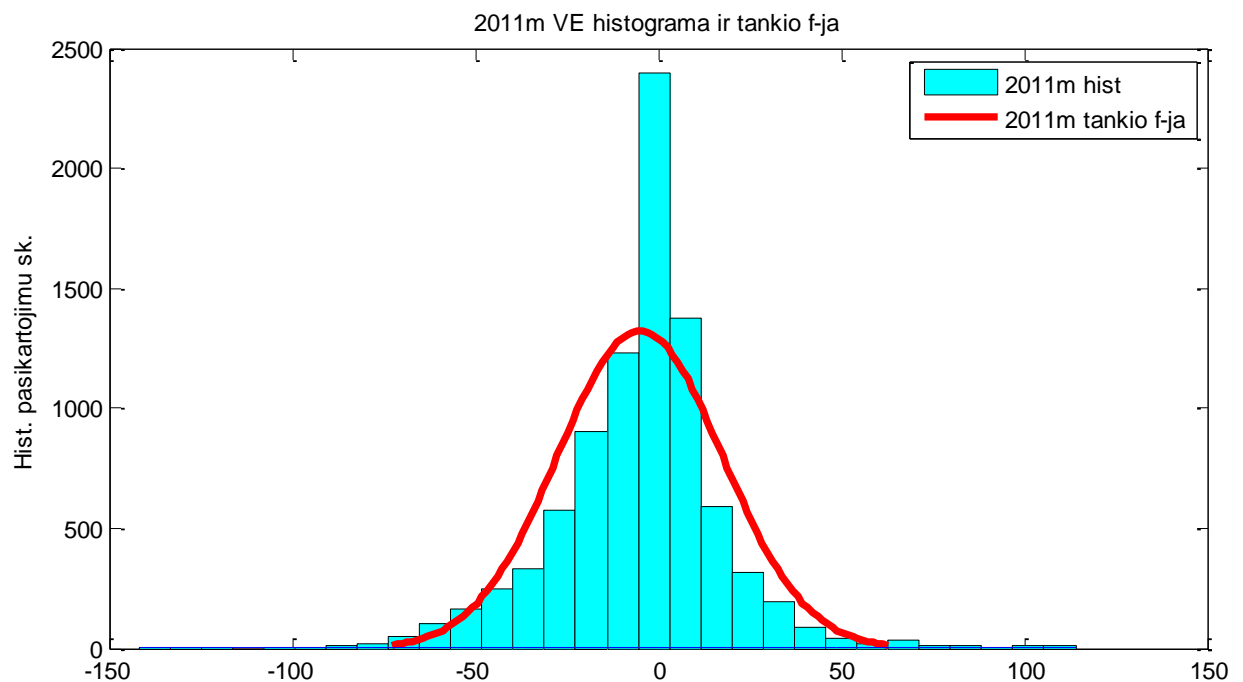
Parametras	2011 m.	2012 m.	2013 m.	2014 m.	2015 m.
Įrengtoji vėjo elektrinių galia, MW	202	275	279	288	366
Vidurkis μ	-4,97	-4,48	-1,09	-1,14	-0,98
Standartinis nuokrypis σ	22,54	25,24	22,61	21,12	21,58
Trys sigmos 3σ	67,63	75,73	67,82	63,37	64,75
Didžiausia neigiama paklaida ΔP_{\min}	-142	-145	-139	-158	-120
Didžiausia teigiama paklaida ΔP_{\max}	114	117	135	106	102
Neigiama paklaida, pagal trijų sigmų taisyklę $\Delta P_{3\sigma,-}$	-72,60	-80,21	-68,91	-64,51	-65,73
Teigiama paklaida, pagal trijų sigmų taisyklę $\Delta P_{3\sigma,+}$	62,66	71,25	66,73	62,23	63,77



3.1 pav. VE paklaidos tankio pasiskirstymo funkcijos, MW.

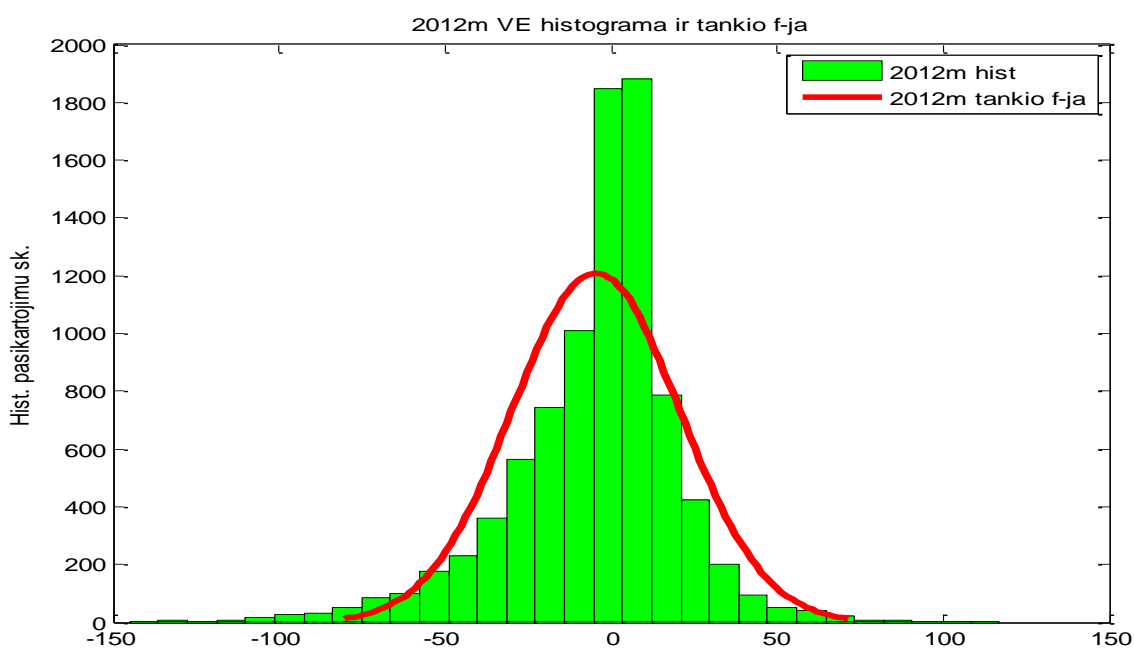
Tiesioginio ryšio tarp didėjančios VE elektrinių instaliuotos galios ir planavimo paklaidos nepastebėta, tai reiškiasi planavimo tikslumas nepriklauso nuo instaliuotos VE galios. Apibendrinti VE prognozavimo paklaidos duomenys pateikiami 3.1 lentelėje atspindi didėjančią VE įrengtąją galią nuo 202 MW (2011 m.) iki 366 MW (2015 m.), bet daromų planavimo paklaidų vidurkis (t.y. kiek vidutiniškai buvo netiksliai suplanuota VE gamyba) mažėja nuo -4,97 MW (2011 m.) iki -0,98 MW (2015 m.). Pabrėžtina, kad planavimo paklaidos ekstremumai nepriklauso nuo instaliuotos galios, nes didžiausia neigiama paklaida užfiksuota 2014 m. (-158 MW), o didžiausia teigiama paklaida 2013 m. (135 MW), kai tuo tarpu mažiausios teigiamos ir neigiamos reikšmės pastebėtos 2015 m. (-120 MW ir 102 MW), kai buvo instaliuota didžiausia galia. Tad galima tikėtis, kad didėjant instaliuotai VE galiai, paklaidų dydis išliks toks pats arba mažesnis, nes taikomi vis tikslesni planavimo būdai.

Iš 3.1 pav. galime palyginti kiekvienų metų paklaidos pasiskirstymo funkcijas. Paklaida pagal standartinį nuokrypį, t.y. $\pm 3\sigma$, kai tikimybė, kad paklaida bus tame ruože yra net 99,7%, svyruoja nuo -80,21 MW iki 71,25 MW 2012 m. Ir kaip matyti iš paveikslėlio yra ribinės (didžiausios) tikimybės vertės per penkerius metus. Mažiausias standartinis nuokrypis 21,12 MW yra 2014 m., tai reiškia, kad atsitiktinės reikšmės buvo arčiausiai vidurkio -1,14, tai rodo, kad šių metų planas buvo arčiausiai faktinių duomenų, reikėjo mažiausiai balansuoti VE galią.



3.2 pav. 2011 m. VE planavimo paklaida, MW.

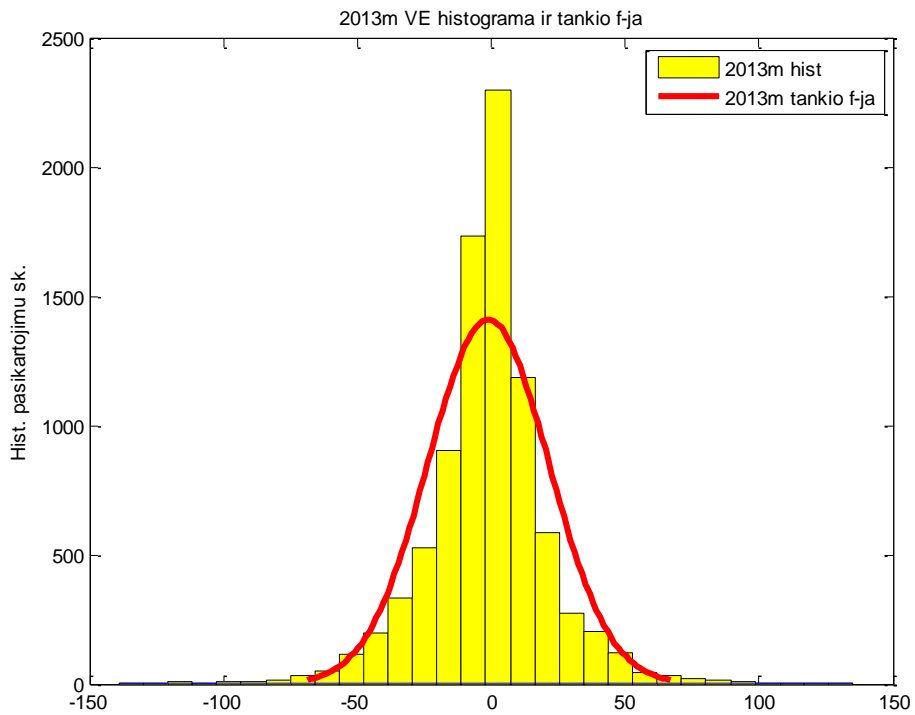
Planavimo paklaida 2011 m. (3.2 pav.) svyravo tarp -142 MW ir 114 MW, o pagal trigubą standartinį nuokrypį (t.y. $\pm 3\sigma$) nuo -72,60 MW iki 62,66 MW, t.y. 36 % ir 31 % šiais metais instaliuotos VE galios. Tai rodo, kad šiame intervale galima balansavimo galia yra nuo 36 % pertekliaus, kurį galima kaupti energijos saugyklose ir iki 31 % trūkumo, kurį būtų galima kompensuoti, energijos kaupikliuose sukauptą galia, t.y. vidutiniškai iki 73 MW kas valandą kaupiamos galios, o iki 63 MW sunaudojamos. Šiuo metu paklaidos sukeliama neplanuoti svyravimai yra išlyginami sistemos operatoriaus. Pagal histogramą taip pat matyti, kad dažniausiai pasikartojančios (apie 2450 val. tai yra 28 % laiko per metus) paklaidos dydis yra tarp -5 MW ir 4 MW per valandą.



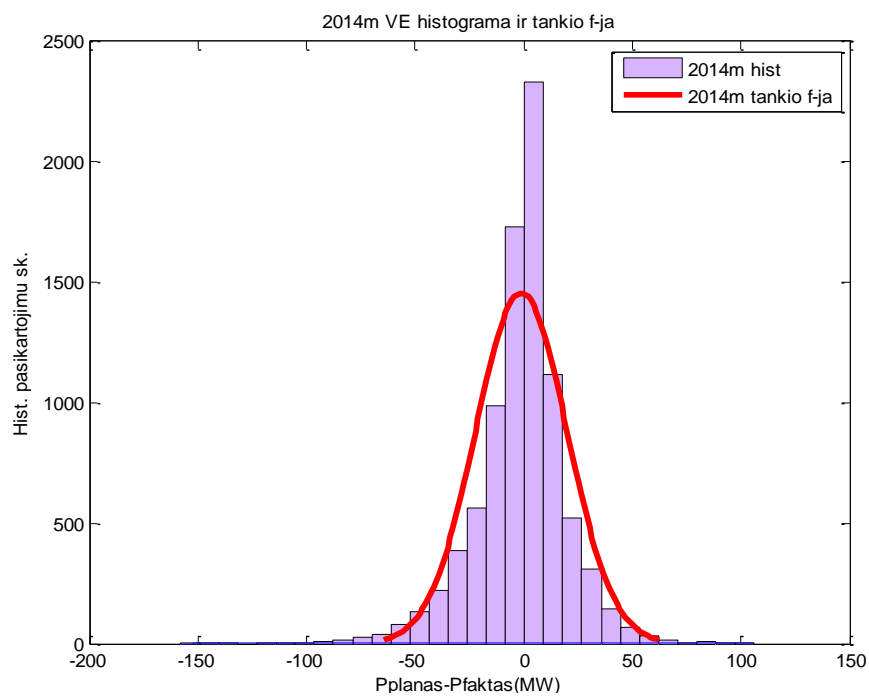
3.3 pav. 2012 m. VE planavimo paklaida, MW.

Planavimo paklaida 2012 m. (3.3 pav.) svyravo tarp -145 MW ir 117 MW, o pagal trigubą standartinį nuokrypį (t.y. $\pm 3\sigma$) -80,21 MW iki 71,25 MW, t.y. 29 % ir 26 % šiais metais instaliuotos VE galios. Pagal histogramą dažniausiai pasikartojanti paklaida, intervale tarp -5 MW iki 13 MW, kartojosi 3750 val., t.y. 42,8 % laiko per metus, tačiau galia, kurią reikėtų saugoti energijos kaupikliuose yra intervale $\pm 3\sigma$, kuris apima 99,7 % pasitaikančių reikšmių.

Planavimo paklaida 2013 m. (3.4 pav.) svyravo tarp -139 MW ir 135 MW, o pagal trigubą standartinį nuokrypį (t.y. $\pm 3\sigma$) -68,91 MW galimos kaupti iki 66,73 MW reikalingos vartoti galios, t.y. 25 % ir 24 % šiais metais instaliuotos VE galios. Pagal histogramą daugiausiai pasikartojančių reikšmių intervalas yra nuo -1 MW iki 8 MW, pasikartojantis apie 2400 val., t.y. 27,4 % laiko per metus.

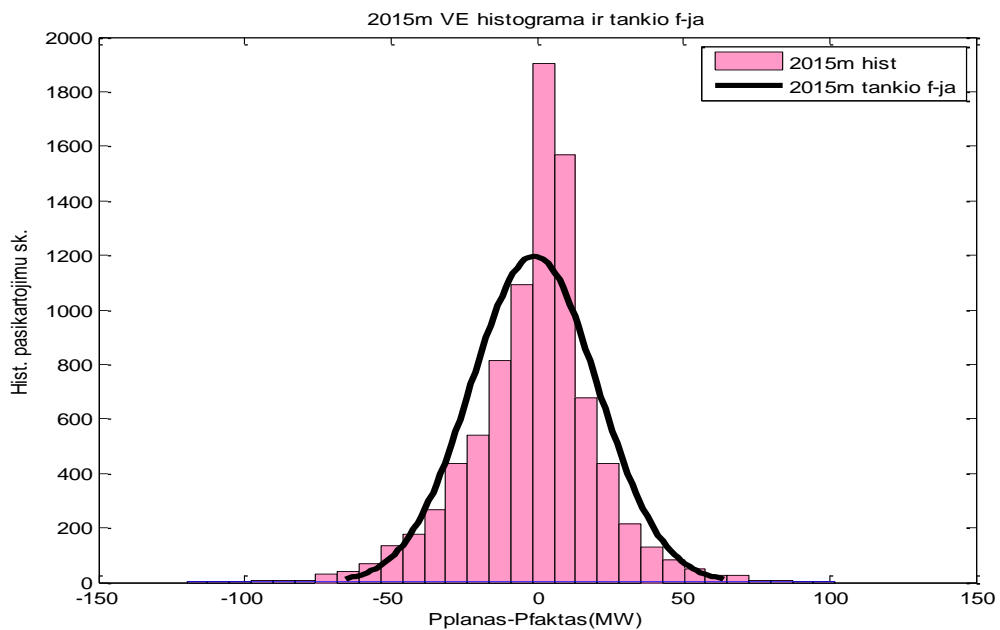


3.4 pav. 2013 m. VE planavimo paklaida, MW.



3.5 pav. 2014 m. VE planavimo paklaida.

Planavimo paklaida 2014 m. (3.5 pav.) svyravo tarp -158 MW ir 106 MW, o pagal trigubą standartinį nuokrypį (t.y. $\pm 3\sigma$) -64,51 MW iki 62,23 MW, t.y. apie 22 % ir 22 % šiais metais instaluotos VE galios. Dažniausiai pasikartojanti paklaida yra intervale nuo 0 MW iki 9 MW, net apytiksliai 2400 val., t.y. 27,4 % laiko per metus.



3.6 pav. 2015 m. VE planavimo paklaida.

Planavimo paklaida 2015 m. (3.6 pav.) svyravo tarp -120 MW ir 102 MW, o pagal trigubą standartinę nuokrypį (t.y. $\pm 3\sigma$) -65,73 MW iki 63,77 MW, t.y. 18 % ir 17 % šiais metais instaliuotos VE galios. Dažniausiai pasikartojanti paklaida yra nuo -1 MW iki 6MW, pasikartojanti net 1900 val., t.y. 21,7 % laiko, per metus.

Taigi vėjo elektrinių galios analizėje nustatyta, kad $\pm 3\sigma$ intervalas, kuriame telpa 99,7 % analizuojamų reikšmių, energijos kaupimui (t.y. reikšmės su minuso ženklu, nes $\Delta P = P_{planas} - P_{faktas}$, reiškiasi generuojama daugiau nei planuota) svyruoja nuo 18 % iki 36%, o netiksliai suplanuota ir reikalinga balansuoti galia yra nuo 17 % iki 31% instaliuotos galios analizuojamais metais. Taip pat pastebima, kad nors instaliuota galia su metais didėja, bet paklaida nuosekliai mažėja, t. y. 2015 m. instaliuota galia didžiausia, 366 MW, bet paklaida mažiausia 18 % ir 17% atitinkamai vėjo galios pervišio ir trūkumo. Todėl galima tikėtis, kad ateityje instaliuojant daugiau VE planavimo paklaidos mažės ir procentaliai reikalingos balansuoti galios skaičius mažės, tačiau sunku nuspėti iki kiek mažės ir kokio dydžio energijos kaupikliai būtų naudingi sistemoje tiek dabar tiek ateityje, kai instaliuota VE galia bus 500 MW, 750MW, ar 886 MW.

3.2 Apkrovos prognozavimo paklaidos

Suminės apkrovos galios, statistinės prognozavimo paklaidų duomenų analizės 2011–2015 m. rezultatai pateikti 3.7 pav., o jų rodikliai 3.2 lentelėje. Analizėje užfiksuota mažiausia apkrova yra periodo pradžioje 2011 m. (1605 MW), o didžiausia apkrovos galia yra analizės periodo pabaigoje 2015 m. (2000 MW), tačiau augimas nėra tolygus (žr. 3.2 lentelė). Didžiausia neigiama

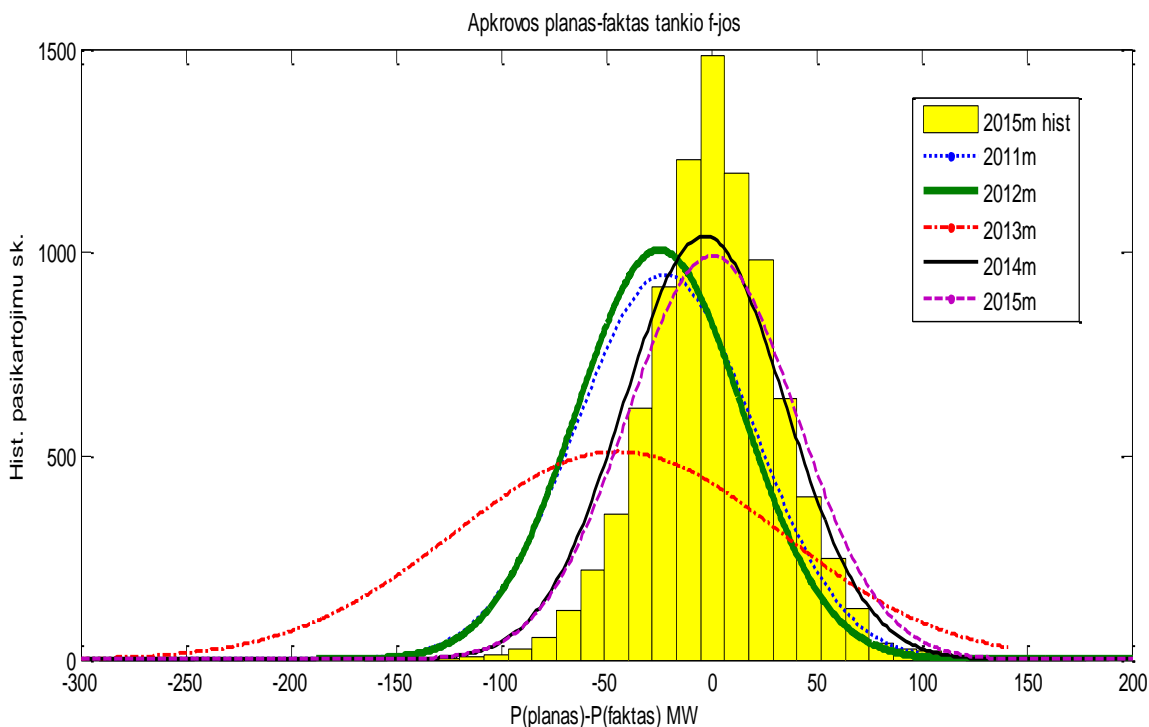
paklaida apskaičiuota 2011 m. -840 MW, didžiausia teigiama paklaida $\Delta P_{\max} = 556$ MW, 2015 m. Svarbiausias rodmuo analizėje yra standartinis nuokrypis, kuris rodo reikšmių išsiskaidymą nuo vidurkio ir 3σ gautos reikšmės, kurios apima 99,7 % planavimo paklaidos reikšmių. Mažiausias standartinis reikšmių nuokrypis apskaičiuotas 2014 m. (38,34 MW), o didžiausias 2013 m. (78,06 MW). Tai rodo, kad 2014 m. atsitiktinės reikšmės daugiausiai išsidėsčiusios apie vidurkį, o 2013 m. reikšmės labiau nutolusios nuo vidurkio. Didžiausias vidurkis yra 2013 m. (-44,53 MW), o mažiausias 2015 m. (0,37 MW). Apibendrinti duomenys pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Apkrovos statistinės analizės duomenys.

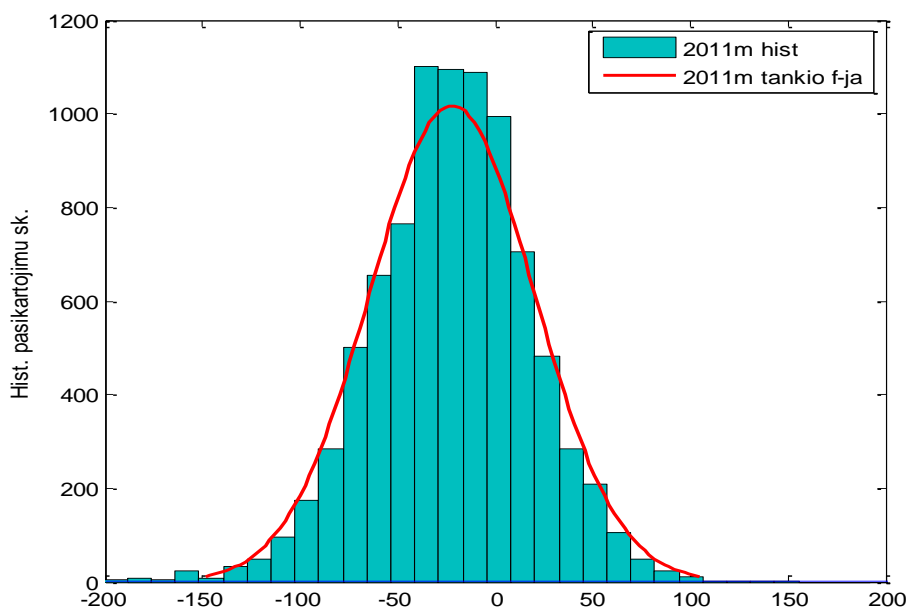
Parametras	2011 m.	2012 m.	2013 m.	2014 m.	2015 m.
Didžiausia apkrovos galia, MW	1605	1741	1686	1654	2000
Vidurkis μ	-22,09	-24,86	-44,53	-3,24	0,37
Standartinis nuokrypis σ	42,19	39,31	78,06	38,34	40,21
Trys sigmos 3σ	126,57	117,94	234,18	115,02	120,65
Didžiausia neigiama paklaida ΔP_{\min}	-840	-188	-765	-298	-589
Didžiausia teigiama paklaida ΔP_{\max}	389	233	141	270	556
Neigiama paklaida, pagal trijų sigmų taisyklę $\Delta P_{3\sigma,-}$	-148,66	-142,80	-278,71	-118,26	-120,28
Teigiama paklaida, pagal trijų sigmų taisyklę $\Delta P_{3\sigma,+}$	104,48	93,08	189,65	111,78	121,02

Lyginant apkrovos planavimo paklaidos tankio funkcijas (3.7 pav.), labiausiai išsiskiria 2013 m. funkcija. Taip pat pastebimas žymus visų rodmenų skirtumas 2013 m. (3.2 lentelė), kai paklaidos vidurkis (-44,53 MW) ir standartinis nuokrypis (78,06 MW) didžiausias, todėl ir pagal trijų sigmų taisyklę atitinkančios prognozavimo paklaidos didžiausios, t.y. neigiama trys sigma - 278,71 MW (faktinė apkrova didesnė nei planas) ir teigiama trys sigma 189,65 MW (apkrovos faktas mažesnis, nei planuota), arba 16,5 % ir 11,2 % didžiausios apkrovos galios. Šis rezultatas rodo didelį reikšmių išsidėstymą ir nutolimą nuo vidurkio.

Taip pat iš 3.7 pav. matome 2014 m. ir 2015 m. tankio funkcijų pasislinkimą į dešinę, kadangi vidurkiai šiais metais mažiausi ir artimi nuliui (-3,24 MW ir 0,37 MW atitinkamai). Dar šiame paveikslėlyje matosi standartinio nuokrypio panašumas tarp 2012 m. ir 2014 m. (atitinkamai 39,31 MW ir 38,34 MW) ir 2011 m. ir 2015 m. (42,19 MW ir 40,21 MW), kadangi tankio funkcijos yra panašiose aukštyje ir panašios formos.



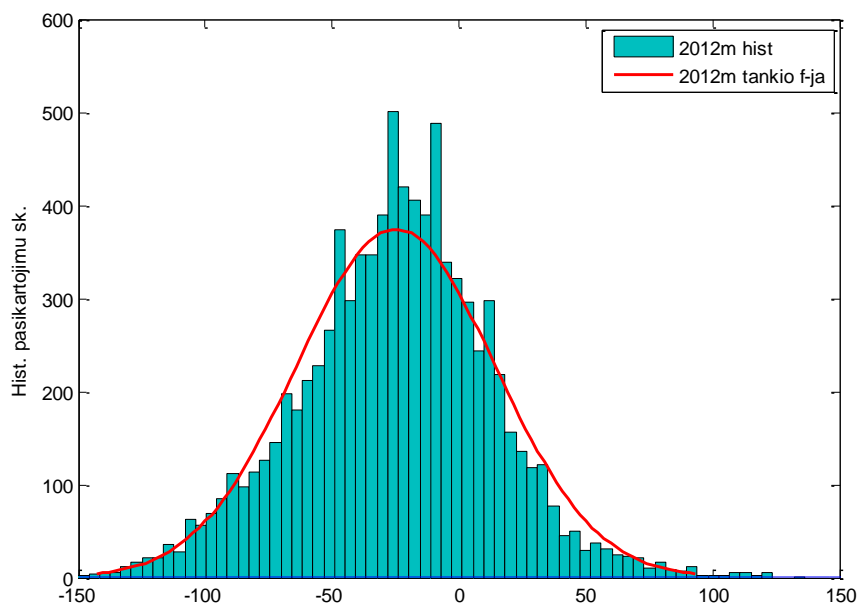
3.7 pav. Apkrovos planavimo paklaidos tankio funkcijos 2011-2015 m.



3.8 pav. Apkrovos planavimo paklaidos 2011 m. tankio funkcija ir histograma, MW.

Apkrovos planavimo paklaidos maksimalios vertės 2011 m. (3.8 pav.) buvo -840 MW ir 389 MW, o pagal trigubą sigma taisyklę $\pm 3\sigma$ yra -148,66 MW ir 104,48 MW, t.y. atitinkamai 9,2 % ir 6,5 % didžiausios apkrovos 2011 m. Pagal historgamą galima išskirti tris beveik vienodai dažnai apie 1100 val., t.y. 12,5 % laiko, pasikartojančių reikšmių intervalus [-48;-34] MW, [-34;-20] MW, [-20;-6] MW, kuriuos apjungus į vieną gautume intervalą [-46;-6] MW, kurios reikšmės pasitaikytų 37,5 % laiko per metus. Pagal tankio funkciją ir histogramą matome, kad iš tiesų 99,7

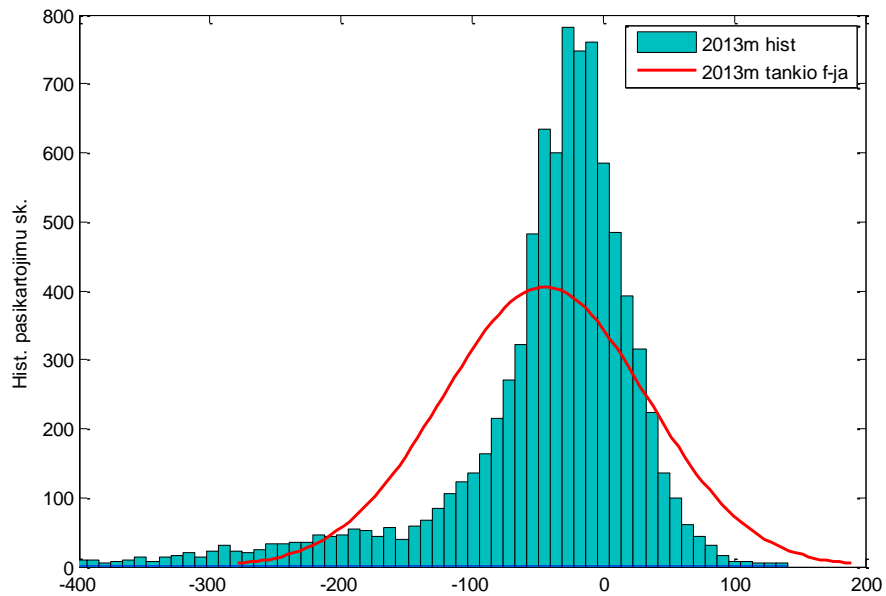
% reikšmių sutelpta $\pm 3\sigma$ intervale, tai rodo, kad reikšmės pasiskirsto pagal normalinį pasiskirstymo dėsnį.



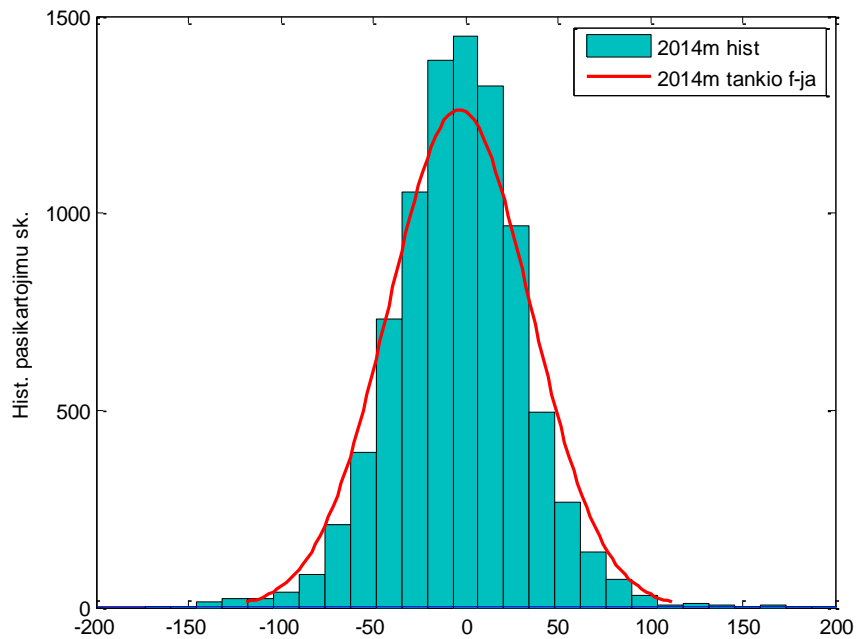
3.9 pav. Apkrovos planavimo paklaidos 2012 m. tankio funkcija ir histograma, MW.

Apkrovos planavimo paklaida 2012 m. (3.9 pav.) buvo nuo -188 MW iki 233 MW, o pagal trigubą sigma taisyklę, 99,7 % reikšmių apima intervalas: [-142,80 MW; 93,08 MW], t.y. atitinkamai 8,2 % ir 5,3 % maksimalios apkrovos tais metais. Pagal tankio funkciją ir histogramos išsidėstymą, matome, kad reikšmės pasiskirsto pagal normalinį pasiskirstymo dėsnį.

Apkrovos planavimo paklaida 2013 m. (3.10 pav.) svyravo nuo -765 MW iki 141 MW, o pagal trigubą sigma taisyklę intervalas yra [-278,71 MW; 189,65 MW], t.y. 16,5 % (faktinė apkrova buvo didesnė nei planuota, reiškiasi reikėjo didinti elektos gamybos pajėgumus arba buvo perkama balansavimo energija) ir 11,2 % (kai apkrova būna mažesnė, nei planuota, todėl gali atsirasti perteklinės energijos, kuri parduodama už mažiausią kainą rinkoje) maksimalios tų metų apkrovos. Dažniausiai histogramoje pasikartoja reikšmės apytiksliai nuo -30 MW iki 20 MW, maždaug 2280 val. arba 26 % laiko per metus. Nors matome, kad už -3σ ribos (-278,71 MW) dar yra reikšmių, bet jos apima tik 0,3 % metinio laiko.

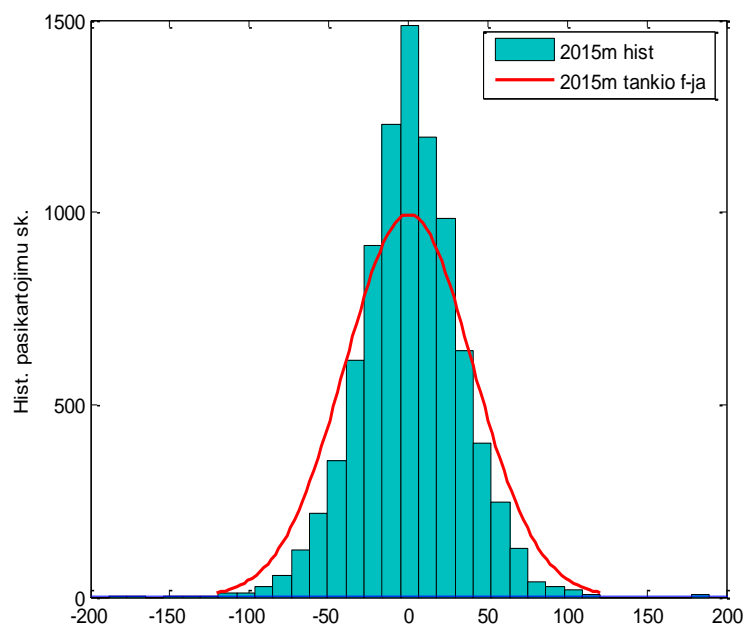


3.10 pav. Apkrovos planavimo paklaidos 2013 m. tankio funkcija ir histograma, MW.



3.11 pav. Apkrovos planavimo paklaidos 2014 m. tankio funkcija ir histograma, MW.

Apkrovos planavimo paklaida 2014 m. (3.11 pav.) buvo nuo -298 MW iki 270 MW, o pagal trigubą sigma taisyklę, 99,7 % reikšmių išsidėliojo intervale nuo -118,26 MW iki 111,78 MW, t.y. atitinkamai 7,1 % ir 6,7 % maksimalios 2014 m. metų galios. Pagal histogramą, daugiausiai t.y. apie 4200 val. arba 48 % laiko per metus pasikartoja reikšmės nuo -20 MW iki 25 MW (trys aukščiausi stulpeliai).



3.12 pav. Apkrovos planavimo paklaidos 2015 m. tankio funkcija ir histograma, MW.

Apkrovos planavimo paklaida 2015 m. (3.12 pav.) buvo nuo -589 MW iki 556 MW, o pagal trigubą sigma taisyklę, intervale nuo -120,28 MW iki 121,02 MW, t.y. atitinkamai 6 % ir 6,05 % suminės apkrovos 2015 m. Iš histogramos matome, kad duomenys pasiskirsto pagal normalinį pasiskirstymo dėsnį, o dažniausiai, net 1500 val., t.y. 17 % laiko, pasikartojanti planavimo paklaida yra intervale [-5;5] MW.

Išanalizavus duomenis matyti, kad apkrovos planavimo paklaida nėra tiesiogiai priklausoma nuo suminės apkrovos dydžio. Apskaičiuota apkrovos planavimo paklaida, kai faktinė apkrova didesnė, nei planas svyruoja nuo 6 % (2015 m.) iki 16,5 % (2013 m.) nuo suminės apkrovos, o valandos kai apkrova buvo mažesnė nei planas svyruoja nuo 5,3 % (2012 m.) iki 11,2 % (2013 m.). Taip pat pastebima, kad visais metais apkrovos plano paklaida, kai suplanuojama per maža apkrova yra didesnė, nei kad planuojama apkrova su pertekliumi (t. y. apkrovos planas didesnis nei faktas). Planuojant rezervus būtina atsižvelgti į šias paklaidas. Per šį laikotarpį maksimalios apkrovos kito nesistemiškai, t.y. nėra pastebimo nei aiškaus didėjimo nei mažėjimo. Taip pat, nerastas akivaizdus ryšys tarp planavimo paklaidos santykio su maksimalia apkrova, tai apsunkina apkrovos rezervavimui reikalingo galios kiekio planavimą.

3.3 Disbalanso energijos ekonominis vertinimas

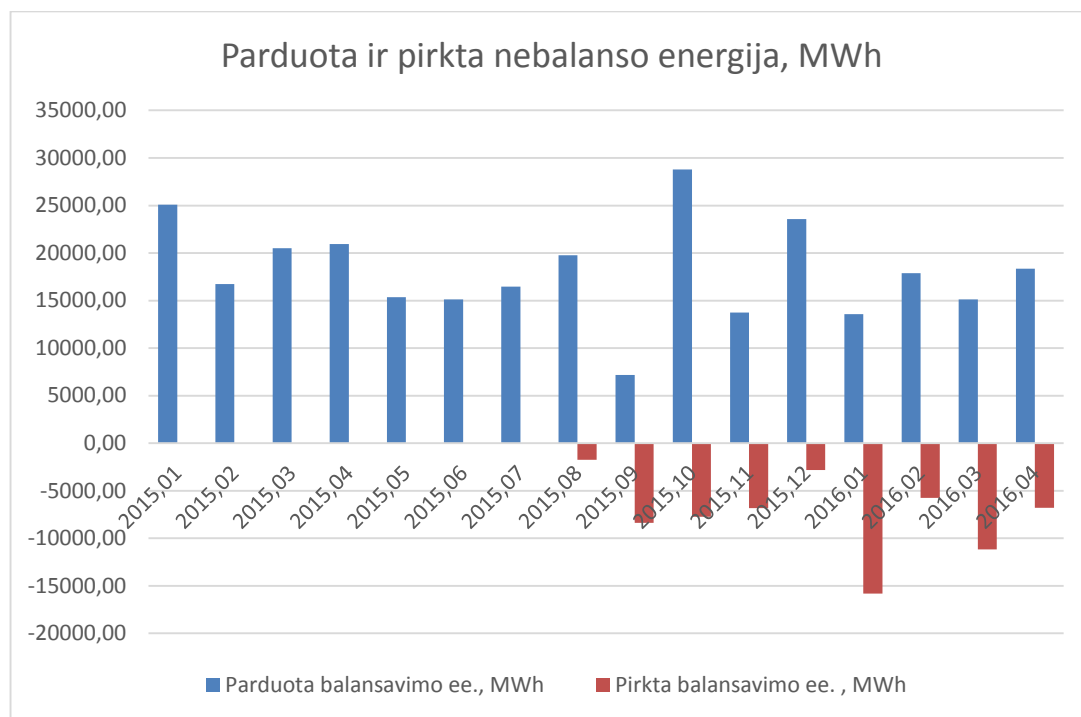
Didinant nestabilių AEŠ, o ypač VE kieki, didėja ir nebalansas EES. Nebalanso energija perdavimo tinklo operatorius (PSO) įsigyja iš balansavimo energijos tiekėjų (BET), o šalys dalyvaujančios elektros rinkoje, kurios netiksliai suplanavo elektros energijos vartojimą arba gamybą, padengia PSO patirtus nebalanso nuostolius.

3.3 lentelė. Parduota ir pirкта balansavimo energija. Šaltinis: //transparency.entsoe.eu/

Data	Parduota balansavimo ee., MWh	Pirкта balansavimo ee. , MWh	Pardavimo suma, EUR	Pirkimo suma, EUR
2015.01	25099.00	0.00	613,627.03 €	- €
2015.02	16720.00	0.00	324,069.33 €	- €
2015.03	20501.00	0.00	432,627.16 €	- €
2015.04	20958.00	0.00	407,704.40 €	- €
2015.05	15347.00	0.00	306,440.25 €	- €
2015.06	15104.00	0.00	389,976.07 €	- €
2015.07	16470.00	0.00	485,670.26 €	- €
2015.08	19759.00	-1737.00	486,494.87 €	(129,882.14) €
2015.09	7187.00	-8368.00	141,833.69 €	(536,773.19) €
2015.10	28788.00	-7740.00	446,166.82 €	(509,020.98) €
2015.11	13743.00	-6842.00	193,997.75 €	(475,176.55) €
2015.12	23560.00	-2820.00	359,541.91 €	(228,058.39) €
Per 2015 m.	223236.00	-27507.00	4,588,149.54 €	(1,878,911.25) €
2016.01	13569.00	-15811.00	315,171.21 €	(1,102,836.11) €
2016.02	17874.00	-5771.00	231,434.67 €	(363,970.28) €
2016.03	15118.00	-11181.00	178,980.64 €	(668,911.72) €
2016.04	18357.00	-6790.00	286,694.17 €	(469,950.29) €
Per 2016 m.	64918.00	-39553.00	1,012,280.69 €	(2,605,668.40) €
Per 2015 08 iki 2016 04	157.955,00	-67.060,00	2.640.315,73 €	(4.484.579,65) €
Iš viso:	288154.00	-67.060.00	5,600,430.23 €	(4,484,579.65) €

Atlikta Lietuvos zonoje 2015m sausio – 2016m balandžio mėnesiais nupirkτος ir parduotos balansavimo energijos analizė, kurios rezultatai pateikti 3.3 lentelėje ir 3.13–3.14 pav. Per šį laikotarpį buvo parduota 4 kartus daugiau balansavimo energijos, nei kad įsigyta (iš viso parduota 288GWh, pirкта 67GWh), tačiau gautos pajamos didesnės už patirtas išlaidas už balansavimą tik 1,3 karto. Tai lemia iki 2015m rugpjūčio mėnesio nepateikti balansavimo energijos pirkimo Lietuvoje duomenys, todėl lyginti balansavimo pirkimą ir parduotą energiją nėra adekvatu. Todėl vertiname laikotarpį, kai žinomi balansavimo energijos pirkimo ir pardavimo kiekiai, tai yra nuo 2015m. rugpjūčio iki 2016m. balandžio mėnesio (9mėnesiai). Šiuo laikotarpiu balansavimui įsigytas energijos kiekis yra 2,35 karto mažesnis, nei parduotas, tačiau sumokėta suma yra 1,69 karto mažesnė, nei gauta suma už parduotą balanso kiekį, kadangi perkant balansavimo energiją, jos kaina vidutiniškai 21 EUR didesnė, nei parduodant.

Iš 3.13 pav. matome, kad 2015 metais iki liepos mėnesio balansavimo energija buvo tik parduodama, bet nuo rugpjūčio kiekvieną mėnesį yra ir perkama ir parduodama skirtingu metu. Paveikslėlyje vizualiai matyti, kad parduodami energijos kiekiai yra žymiai didesni, nei perkami. Labiausiai išsiskiria 2016m sausio mėn. balansavimo energijos pirkimas -15,8 GWh arba 1,1 mln.EUR, tai sudaro 55% per 2015m nupirkto kiekio ir 61% patirtų išlaidų.



3.13 pav. Lietuvoje iš PSO pirktas ir parduotas nebalansas, MWh.

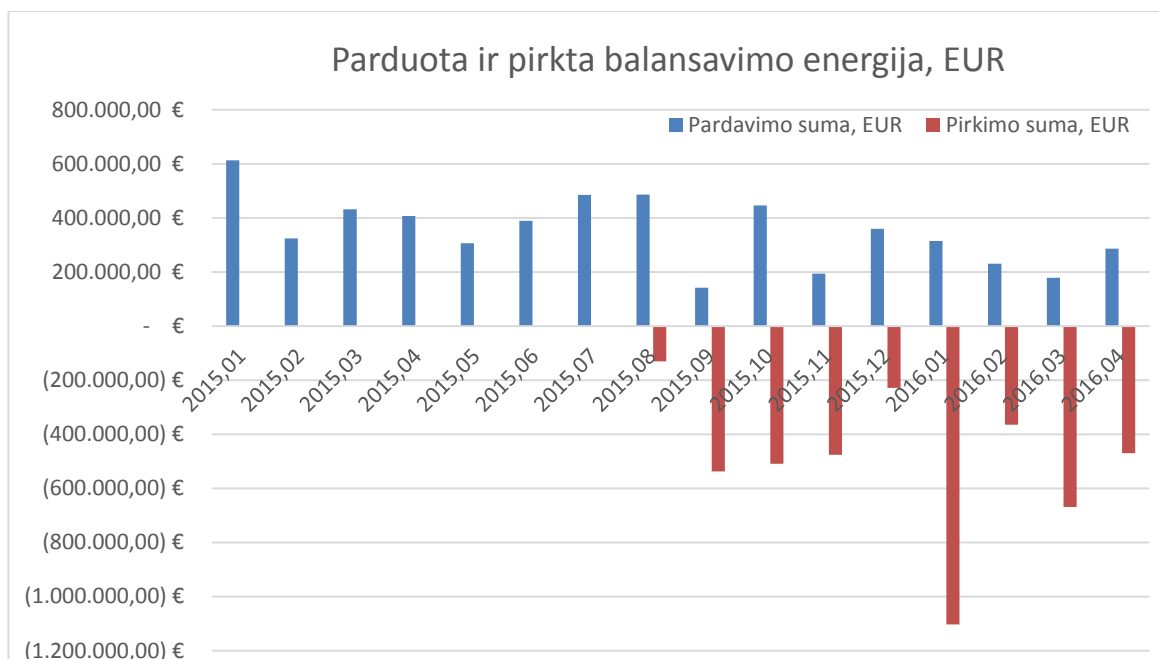
Iš 3.14 pav. matyti, kad balanso pirkimo bendra kaina didesnė, nei pardavimo visais mėnesiais, išskyrus 2015 m. rugpjūčio ir gruodžio, kuomet ir įsigytas balansavimo energijos kiekis buvo mažiausias. Taigi, matome, kad turimas energijos perviršis yra parduodamas žymiai pigiau, nei kad reikiamas įsigyti mažesnis kiekis EES balansuoti.

Įprastais atvejais balansavimo energijos kaina lygi tos valandos elektros energijos kainai biržoje, padaugintai iš pirkimo koeficiento, kuris lygus 1,02 arba pardavimo koeficiento, kuris lygus 0,98. Tačiau jeigu vykdomas sistemos reguliavimas aukštyn arba žemyn tuomet balansavimo energijos supirkimo kaina skaičiuojama taip:

$$C_{sist-bal}^{žemyn} = \frac{P_{reg}^{žemyn} \times C_{reg}^{žemyn} + P_{bal}^{žemyn} \times C_{bal}^{žemyn}}{P_{reg}^{žemyn} + P_{bal}^{žemyn}} \times 0,98 \quad (6.1)$$

$$C_{sist-bal}^{aukštyn} = \frac{P_{reg}^{aukštyn} \times C_{reg}^{aukštyn} + P_{bal}^{aukštyn} \times C_{bal}^{aukštyn}}{P_{reg}^{aukštyn} + P_{bal}^{aukštyn}} \times 1,02 \quad (6.2)$$

čia C-kaina EUR/MWh, atitinkamai balansavimo arba reguliavimo energijos, kai ją superka arba parduoda PSO; P – galia MWh, atitinkamai balansavimo arba reguliavimo energijos, kurią superka arba parduoda PSO.



3.14 pav. Lietuvoje iš PSO pirкто ir parduoto nebalanso suma, EUR.

Taigi, balansavimo energija perkama piko metu, o parduodama esant mažiausiam poreikiui, kai ir kaina mažiausia, todėl yra neefektyviai išnaudojama turima elektros energija. Ši situacija yra pavyzdinė, kuomet efektyvumui didinti gali būti naudojami energijos kaupikliai.

Nebalansas, ne tik apsunkina sistemos valdymą, bet ir didina energijos tiekimo sąnaudas, kurios daro įtaką elektros kainai galutiniam vartojui. Dėl elektros kainos augimo grėsmės, būtina įvertinti šalyje turimas laisvas galias ir investuoti į naujus energijos tiekimo šaltinius.

3.4 VE galios ir apkrovos sukeliama disbalanso įvertinimas

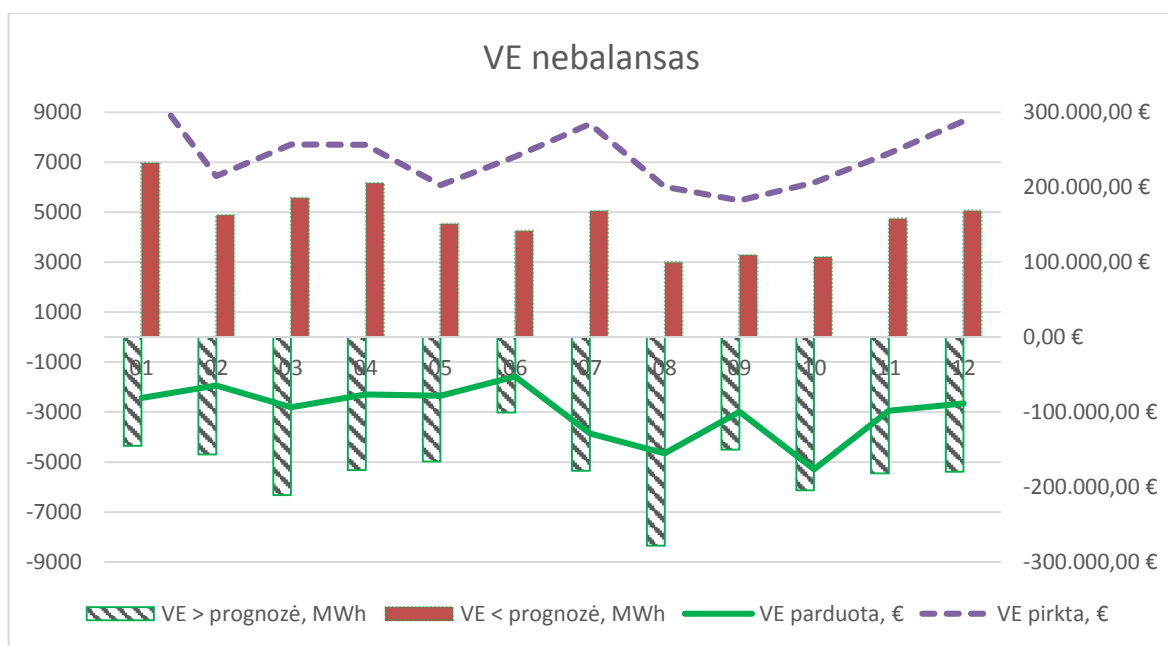
Naudojantis žinoma nebalanso pirkimo ir pardavimo kaina, atliekamas VE ir apkrovos prognozės paklaidos sukiamas nebalansas 2015 m. Priimama, kad VE ir apkrovos galia yra lygi sugeneruotai ir suvartotai energijos paklaidai, pagal kurią yra apskaičiuojama kiekvieną mėnesį nupirкта ir parduota balansavimo energija (3.4 lentelė ir 3.5 lentelė).

3.4 lentelė. Dėl VE prognozės paklaidos atsirandantis nebalansas 2015 m.

Mėnuo	$E_{\text{faktas}} > E_{\text{prognozė}}, \text{ MWh}$	$E_{\text{faktas}} < E_{\text{prognozė}}, \text{ MWh}$	$E_{\text{VE}} \text{ parduota, } \text{€}$	$E_{\text{VE}} \text{ piršta, } \text{€}$
01	-4358	6965	-81.365,53 €	347.555,27 €
02	-4698	4878	-64.690,63 €	214.703,67 €
03	-6326	5581	-93.797,68 €	256.706,27 €
04	-5323	6164	-76.506,80 €	256.652,50 €
05	-4983	4536	-78.324,83 €	202.888,37 €
06	-3015	4251	-52.451,54 €	240.608,20 €
07	-5348	5054	-128.679,62 €	284.330,51 €
08	-8346	2983	-155.016,93 €	200.352,35 €
09	-4502	3283	-99.658,97 €	181.999,19 €
10	-6128	3211	-176.452,89 €	206.256,50 €
11	-5453	4742	-98.501,04 €	245.040,29 €
12	-5386	5065	-88.478,11 €	288.275,34 €
Iš viso:	-63 866	56 713	-1.193.924,57 €	2.925.368,46 €

Pagal 3.4 lentelėje pateiktus skaičiavimus matome, kad atveju, kai faktas buvo didesnis už prognozę bendras vėjo energijos perviršio kiekis (63 866 MWh) yra didesnis, nei vėjo energijos trūkumas (56 713 MWh) per metus. Tačiau, jeigu vėjo energijos prognozavimo paklaidos perviršis ir trūkumas būtų visas parduotas ir pirktas pagal balansavimo energijos tarifus, tai gautos pajamos (1,19 mln.€) už parduotą perviršį būtų mažesnės, nei kad kaštai (2,92 mln.€) išleisti energijos trūkumui padengti 2,45 karto, nors parduodama energija kiekiu viršija įsigyjamą 1,12 karto.

Paveikslėlyje 7.1 pav. matome riekšmių pasiskirstymą pagal mėnesius ir dar kartą įsitikiname, kad kiekvieną mėnesį skirtingas kiekis energijos yra trūkstamas ir viršijamas, tačiau kiekiai yra panašūs tiek perviršio, tiek trūkumo pusėje. Tačiau lyginant pirkimo ir pardavimo kreives, matomas ryškus skirtumas, kur pirkimo kreivė išreiškia žymiai didesnes vertes, nei pardavimo. Didesniu parduodamu energijos kiekiu išsiskiria rugpjūčio mėnuo, o didžiausiu per kamu kiekiu išsiskiria sausis, kovas, liepa ir gruodis, kai taip pat ir mokėtina suma už energiją buvo didžiausia.



3.15 pav. VE energijos prognozės nebalansas 2015m.

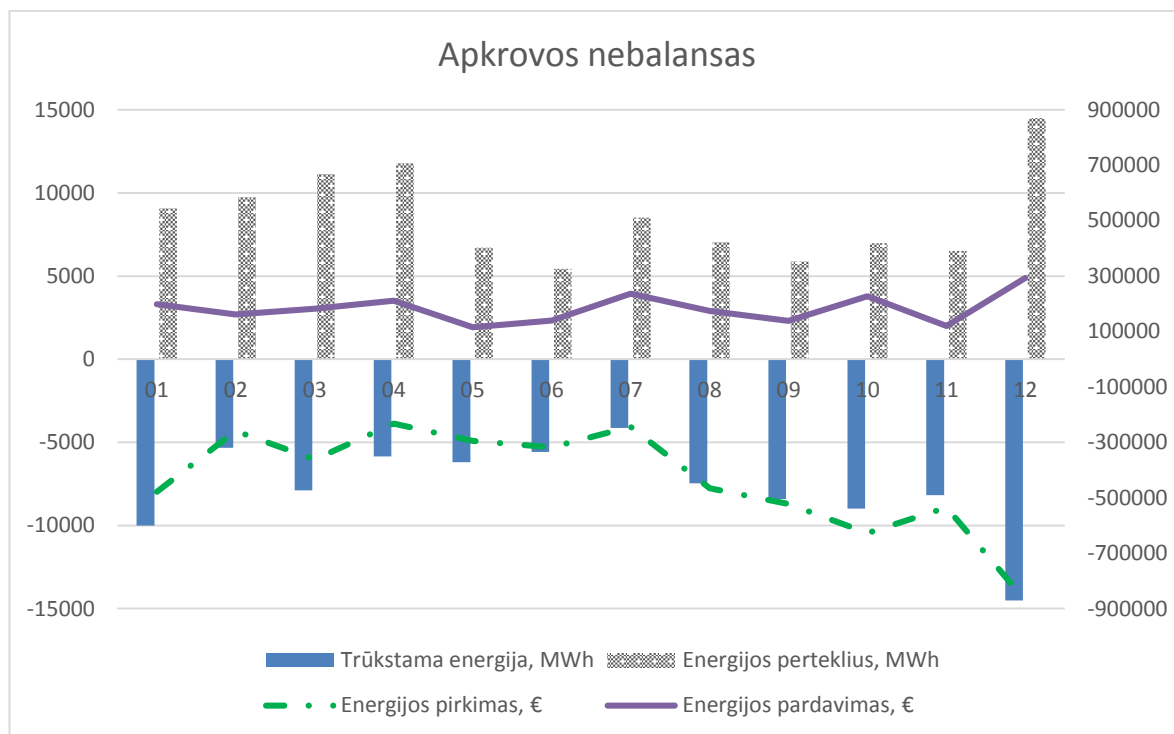
Apkrovos duomenų lentelėje 3.5 taip pat pastebimas didesnis parduodamas atliekamos energijos kiekis, nei perkamos, tačiau patiriamos sąnaudos (5,2 mln.€) įsigijant energiją yra 2,37 karto daugiau, nei už energijos pardavimą gautos pajamos (2,19 mln.€).

3.5 lentelė. Dėl apkrovos prognozės paklaidos atsirandantis nebalansas.

Mėnuo	Trūkstama energija, MWh	Energijos perteklius, MWh	Energijos pirkimas, €	Energijos pardavimas, €
01	-10011	9075	-478196,65	197871,67
02	-5326	9740	-259144,62	160948,79
03	-7892	11134	-361541,5	182479,36
04	-5845	11790	-232822,51	211511
05	-6190	6697	-295057,58	115214,05
06	-5576	5433	-317780,34	139300,71
07	-4139	8523	-244085,31	236937,04
08	-7466	7032	-465514,68	173739,29
09	-8411	5882	-522379,38	138808,65
10	-8984	6982	-627676,25	227332,31
11	-8183	6513	-534727,25	119663,55
12	-14514	14494	-869629,4	293201,55
Iš viso:	-92537	103295	-5.208.555,47 €	2.197.007,97 €

Diagramoje 3.16 pav. palyginame mėnesinius duomenis, kur matome, kad energijos perteklius turėtas pirmus keturis metų mėnesius: sausį, vasarį, kovą, balandį bei gruodį. Sausį ir

gruodį buvo parduoti didžiausi energijos kiekiai. Dėl energijos pirkimo-pardavimo kainų skirtumo, pirkimų suma visais mėnesiais buvo didesnė nei pardavimų.



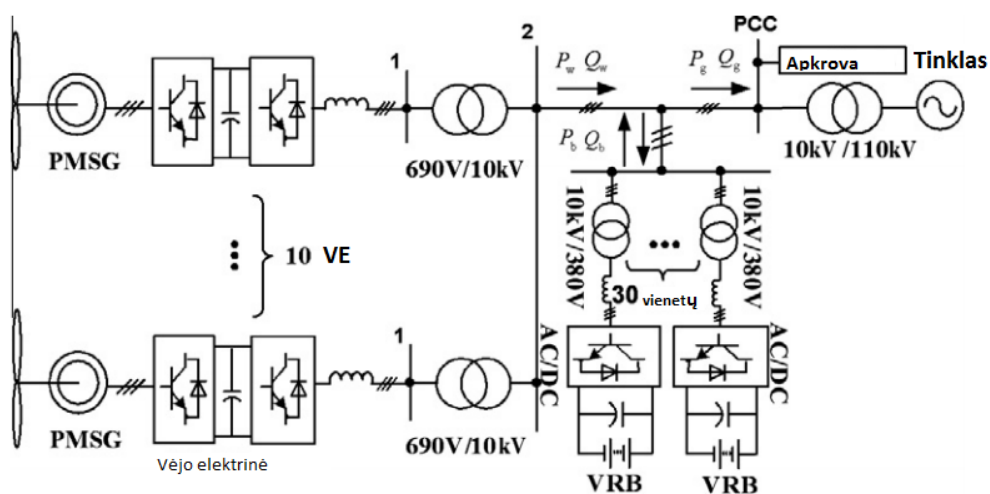
3.16 pav. Apkrovos energijos nebalansas 2015 m.

Taigi iš šių duomenų analizės dar kartą įsitikinta, kad perkama balansavimo energija yra daug brangesnė, nei parduodama dėl balansavimo energijos pirkimo-pardavimo kainų skirtumo. Todėl darome išvadą, kad būtina užtikrinti papildomus būdus lanksčiai tiekti balansavimo energiją.

3.5 VE balansavimo būdo parinkimas

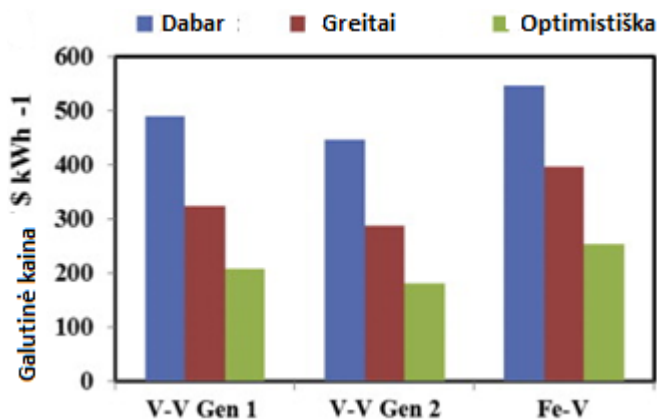
VE galios balansavimui reikia greitai reaguojančių, greitai įsikraunančių ir išsikraunančių energijos kaupimo sistemų, kurios galėtų veikti kelias valandas. VE galiui balansuoti reikia turėti didelės galios ilgo iškrovos laiko (val.) ir trumpo iškrovos laiko (s) energijos kaupiklių elektros kokybei užtikrinti. Tam naudojami suspausto oro energijos kaupikliai (SOEK), hidroakumuliacinės elektrinės (HAE) ir srautinės baterijos. VE galios balansavimui Lietuvoje labiausiai tinka srautinės baterijos, nes SOEK ir HAE naudojimas apribotas gamtinių sąlygų. SOEK įrengimui reikia natūralių ertmių (pvz. šachtų), kurias užsandarinus galima paversti saugykla. Jeigu SOEK saugyklai naudojama dirbtinė talpa, tuomet kaupiklio kaina padidėja ir tampa neekonomiška naudoti. HAE statybai reikia pakankamai vandeningo vandens telkinio, kad įrengta galia būtų ne mažiau 100 MW. Lietuvoje HAE statybos plėtra ribojama įstatymų.

Rinkoje galima rasti kelias rūšis srautinių baterijų, tarp kurių žinomiausios yra cinko bromido, vanadžio redokso ir natrio bromide. Vadinamosios redokso baterijos “Vanadium redox flow battery” (angliška santrumpa VRB) buvo pasiūlytos dar 1985 metais ir šiuo metu Japonijoje, JAV, Kanadoje, Australijoje jau veikia keletas demonstracinių kaupiklių, kurių galia siekia nuo 50 kW iki 1 MW . Šio tipo srautinėse baterijose naudojami elektrolitai, sudaryti iš skirtingų oksidacijos laipsnių vanadžio druskų tirpalų 2-3 mol/l sieros rūgštyje. VRB sistemos vanadžio elektrolitai gali būti naudojami neribotą laiką, nes atlaikius apie 1500 įkrovimo/iškrovimo ciklų, kas vidutiniškai atitinka 10 metų darbo laiko, panaudotą elektrolitą galima filtruoti ir naudoti pakartotinai. Švedijoje atlikti tyrimai parodė, kad aplinkos taršos požiūriu VRB srautinės baterijos yra žymiai pranašesnės už klasikines švino-rūgštines baterijas.



3.17 pav. VRB srautinės baterijos paruoštos tinklo balansavimui.

Vanadžio redokso srautinės baterijos nuolat tobulinamos ir priklausomai nuo naudojamų komponentų kaina 1 MW galios, 4MWh energijos baterijoje šiuo metu yra apie 500 \$/kWh. (3.18 pav.) Galios įrengimo kaina svyruoja tarp 458 \$ kW ir 1066 \$ kW, kai kaupiama energija 0.25 MWh, o atitinkamai 4 MWh energijos sistemai kaina 509–1143 \$ kW. Galutinė 1 kWh kaina svyruoja nuo 3572 iki 4620 \$/kWh.[15]



3.18 pav. Galutinė VRB kaina 1 MW, 4MWh talpos.[15]

Kaupiamos galios ir energijos kiekį parenkame pagal apžvalgoje ir tyrime gautus duomenis. Kaip literatūros apžvalgoje aptarta (1.4 pav.), dažniausiai pasikartojantis vėjo nebuvimas siekia apie 20 % instaliuotos galios ir gali trukti iki 12 valandų. Taip pat atlikta statistinė duomenų analizė patvirtina reikalingą kaupiamą galią, kadangi VE galios paklaida yra kas metai mažėjanti nuo 2011 m. buvusių 31 % iki 17 % 2015 metais. Tad į Lietuvos EES integravus 886 MW vėjo elektrinių kaupikliuose turima galia turėtų būti apie 177 MW (20 % instaliuotos VE), o šiuo metu instaliuotai galiai (438 MW) balansuoti reikėtų turėti 87,6 MW galios kaupiklį.

Taip pat nebalanso dalį sudaro ir apkrovos nukrypimas nuo plano. Šaltiniuose [17], teigiama, kad apkrovos nebalanso išlyginimui reikiamą galią parenka perdavimo sistemos operatorius. Skirtingose šalyse tai svyruoja nuo 5% iki 14 % vidutinės apkrovos. Lietuvoje 2015 m. vidutinė apkrovos galia buvo 1092 MW, todėl apkrovos balansavimui parenkame 55 MW rezervo, tai yra 5 %.

Taigi, dabar įrengti 90 MW galios srautinių baterijų, kurios kauptų 360 MWh visame tinkle, kainuotų apie 1,47mln. \$ arba 1,322mln. € (imant vidutinę 4096 \$/kWh, t.y. 3672 €/kWh kainą). Su šiais kaupikliais gali būti užtikrinama ir dalis vartojimo balansavimo energijos. Tuomet reikėtų įrengti 145 MW galios, 580 MWh energijos kaupiklį, kurio kaina būtų apie 2,13 mln. €.

Ateityje tikimasi, kad baterijų kaina dar mažės, tuomet jų įrengimas bus dar ekonomiškesnis. Tačiau jau iš dabar sistemose turinčiose didelį instaliuotų VE skaičių ir patiriančiose balansavimo galios kaštus, verta apsvarstyti investavimą į šias kaupimo sistemas, kurios veikia daugiau nei 10 metų, yra nedaug kenksmingos aplinkai, kadangi perfiltravus elektrolitą, baterijas galima naudoti ir toliau.

IŠVADOS

1. Pagal sudarytą metodiką, įvertinta vėjo elektrinių prognozavimo paklaida svyruoja nuo 17 % iki 31 % instaliuotos tinkle vėjo elektrinių galios. Pastebėta, kad didėjant vėjo elektrinių instaliuotai galiai, planavimo paklaida mažėja dėl tikslesnių planavimo metodų, bei dėl platesnio elektrinių geografinio išsidėstymo. Apkrovos paklaida svyruoja nuo 6% iki 16,5 % maksimalios apkrovos galios.
2. Nustatyta, kad vėjo elektrinių balansavimui reikalinga galia šiuo metu yra 88 MW, o iki 2020 m. didės iki 177 MW galios rezervo. Apkrovos balansavimui minimali reikalinga galia 55 MW.
3. Nustatyta, kad vėjo elektrinių galiai balansuoti galima naudoti skirtingus balansavimo būdus: elektrines su dujų turbinomis, kombinuoto ciklo elektrines, bei energijos kaupiklius. Vienas iš aplinkai darugiškiausių ir techniškai labiausiai tinkamų būdų yra srautinės vanadžio redokso baterijos.
4. Atlikus balansavimo energijos analizę, nustatyta, kad balansavimo energijos yra 1,02 karto arba dar didesnė nei elektros kaina rinkoje.
5. Siekiant subalansuoti 440 MW įrengtosios vėjo elektrinių galios reiktų įrengti 90 MW (t.y. 20 % nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios) galios ir 360 MWh energijos kaupiklį. Tokio kaupiklio pagrįsto srautinės vanadžio baterijos technologija, įrengimas kainuotų apie 1,322mln. € ir padėtų stabiliau valdyti elektros sistemą, bei pagerintų elektros kokybę. Ši suma palyginus su patiriamais kaštais balansavimo energijos įsigyjimui nėra didelė, nes vien per pirmus ketverius 2016 m. mėnesius buvo įsigyta balansavimo energijos už 2,6 mln. €, parduota už 1,01 mln.€. Tai rodo, kad prarasta 1,59 mln.€, kurie galėtų būti investuoti į energijos kaupimo sistemas vėjo elektrinių ir kitų nepastovių energijos šaltinių balansavimui.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. Elektroninis išteklius: Europos Komisija „Energy Economic Developments in Europe” 2014 <https://www.energy.eu/publications/Energy-economic-developments-in-Europe.pdf> [žiūrėta 2016 03 22]
2. Elektroninis išteklius: <http://www.litgrid.eu/index.php/energetikos-sistema/elektros-energetikos-sistemas-informacija/irengtoji-galia/502> [žiūrėta 2016 05 01]
3. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija, "Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija," patvirtinta Lietuvos Respublikos Seimo 2012 m. birželio 26 d. nutarimu Nr. XI-2133, 2012.
4. Elektroninis išteklius: LEI. Lietuvos energetikos sektoriaus plėtros tyrimas.2015 m. lapkričio 16d. http://www.lei.lt/_img/_up/File/atvir/2016/NES/3Technine_ekonomine_energetikos_sektorius_pletros_analize_Rezultatu_santraukos_Priedas_1-2015.11.16.pdf [žiūrėta 2016 05 17]
5. E. M. Batsaikhan Nyamdash, "The viability of balancing wind generation with large scale energy storage," Energy Policy, vol. 38, pp. 7200-7208, 2010.
6. Ataskaita: Paskirstytos generacijos integracija į elektros energetikos sistemą ir įtaka energijos tiekimo patikimumui, KTU, 2007.
7. M. Albadi and E. El-Saadany, Overview of wind power intermittency impacts on power systems, Electric Power Systems Research, Volume 80, Issue 6, 2010.
8. S. Naser, O. Anaya-Lara and K. L. Lo, Study of the impact of wind generation on voltage stability in transmission networks, 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, July 2011, pp.39-44, 2011.
9. X. Wang and S.S.Choi, A Statistical Approach to Assess the Impact of Wind Power Generation on Network Frequency, IEEE International Conference on Control and Automation, 2009.
10. A. Elansari, A. Musa and A. Alssnoui, Impact of new wind farms on power distribution networks (Derna Wind project case study), International Conference on Renewable Energies for Developing Countries, Nov. 2012, pp.1-6, 2012.
11. B. Droste-Franke, B. P. Paal, C. Rehtanz, D. Uwe Sauer, J. P. Schneider, M. Schreurs, T. Ziesemer, Balancing Renewable Electricity, Ethics of Science and Technology Assessment, Volume 40, 2012.
12. CHUANG, A. S.; SCHWAEGERL, C., Ancillary Services for Renewable Integration, p.1-14, 2009.
13. Elektroninis išteklius: //transparency.entsoe.eu/ [žiūrėta 2016 05 15]

14. Adomavičius, V. Šiuolaikiniai elektros energijos kaupikliai // LTMA mokslo darbai: / Klaipėdos universitetas. Nr. 7. –P. 87-104, 2011.
15. Viswanathan, Crawford, Stephenson, Kim, Wang, Li, Sprenkle. (2014). Cost and performance model for redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, 247, 1040-1051.
16. ENTSOE. Development of a Cost-Benefit Methodology pursuant to Network Code on Electricity Balancing. Part 2. Harmonisation of Imbalance Settlement Periods. 2014
17. Lion Hirth & Inka Ziegenhagen . Balancing Power and Variable Renewables: Three Links

PRIEDAS NR.1 . SU PROGRAMA MATLAB ATLIKTI SKAIČIAVIMAI.

VE planas-faktas

```
A=xlsread('c:\VE2011.xls','Worksheet','E3:E8761')
B=xlsread('c:\VE2012.xls','Worksheet','E3:E8786')
C=xlsread('c:\VE2013.xls','Worksheet','E3:E8761')
D=xlsread('c:\VE2014.xls','Worksheet','E3:E8761')
E=xlsread('c:\VE2015.xls','Worksheet','E3:E8761')
%M- vidurkis
%S- standartinis nuokrypis
M1=mean(A)
S1= std(A);
MAX1 = max(A);
MIN1 = min(A);
STEP1 = (MAX1 - MIN1) / 1000;
PDF1 = normpdf(MIN1:STEP1:MAX1, M1, S1);

M2=mean(B)
S2= std(B);
MAX2 = max(B);
MIN2 = min(B);
STEP2 = (MAX2 - MIN2) / 1000;
PDF2 = normpdf(MIN2:STEP2:MAX2, M2, S2);

M3=mean(C)
S3= std(C);
MAX3 = max(C);
MIN3 = min(C);
STEP3 = (MAX3 - MIN3) / 1000;
PDF3 = normpdf(MIN3:STEP3:MAX3, M3, S3);

M4=mean(D)
S4= std(D);
MAX4 = max(D);
MIN4 = min(D);
STEP4 = (MAX4 - MIN4) / 1000;
PDF4 = normpdf(MIN4:STEP4:MAX4, M4, S4);

M5=mean(E)
S5= std(E);
MAX5 = max(E);
MIN5 = min(E);
STEP5 = (MAX5 - MIN5) / 1000;
PDF5 = normpdf(MIN5:STEP5:MAX5, M5, S5);

figure(1)
hold on
%histfit(A,10,'normal')
plot(MIN1:STEP1:MAX1, PDF1,MIN2:STEP2:MAX2, PDF2,MIN3:STEP3:MAX3,
PDF3,MIN4:STEP4:MAX4, PDF4,MIN5:STEP5:MAX5, PDF5);
xlabel('Pplanas-Pfaktas(MW)')
ylabel('Tankio f-ja')
legend('2011m','2012m','2013m','2014m','2015m')
title('VE plano- faktas skirtumo tankio f-jos')
```

VE paklaida 2011m .

```
A=xlsread('c:\VE2011.xls','Worksheet','E3:E8761')
M1=mean(A)
S1= std(A);
MAX1 = max(A);
MIN1 = min(A);
STEP1 = (MAX1 - MIN1) / 1000;
PDF1 = normpdf(MIN1:STEP1:MAX1, M1, S1);
figure(1)
histfit(A,30,'normal')
hold
plot(MIN1:STEP1:MAX1, PDF1);
xlabel('Pplanas-Pfaktas (MW)')
ylabel('Hist. pasikartojimu sk.')
legend('2011m hist','2011m tankio f-ja')
title('2011m VE histograma ir tankio f-ja')
```

Apkrovos skaičiavimai

```
A=xlsread('c:\MAGIS\load11.xls','Worksheet','E3:E8761')
B=xlsread('c:\MAGIS\load12.xls','Worksheet','E3:E8786')
C=xlsread('c:\MAGIS\load13.xls','Worksheet','E3:E8761')
D=xlsread('c:\MAGIS\load14.xls','Worksheet','E3:E8761')
E=xlsread('c:\MAGIS\load15.xls','Worksheet','E3:E8761')
```

```
M1=mean(A);
S1= std(A);
MAX1 = max(A);
MIN1 = min(A);
STEP1 = (MAX1 - MIN1) / 1000;
PDF1 = normpdf(MIN1:STEP1:MAX1, M1, S1);
```

```
M2=mean(B);
S2= std(B);
MAX2 = max(B);
MIN2 = min(B);
STEP2 = (MAX2 - MIN2) / 1000;
PDF2 = normpdf(MIN2:STEP2:MAX2, M2, S2);
```

```
M3=mean(C);
S3= std(C);
MAX3 = max(C);
MIN3 = min(C);
STEP3 = (MAX3 - MIN3) / 1000;
PDF3 = normpdf(MIN3:STEP3:MAX3, M3, S3);
```

```
M4=mean(D);
S4= std(D);
MAX4 = max(D);
MIN4 = min(D);
STEP4 = (MAX4 - MIN4) / 1000;
PDF4 = normpdf(MIN4:STEP4:MAX4, M4, S4);
```

```
M5=mean(E);
S5= std(E);
MAX5 = max(E);
MIN5 = min(E);
```

```

STEP5 = (MAX5 - MIN5) / 1000;
PDF5 = normpdf(MIN5:STEP5:MAX5, M5, S5);

figure(1)
hold
histfit(C,100,'normal')
plot(MIN1:STEP1:MAX1, PDF1,MIN2:STEP2:MAX2, PDF2,MIN3:STEP3:MAX3,
PDF3,MIN4:STEP4:MAX4, PDF4,MIN5:STEP5:MAX5, PDF5);
xlabel('P(planas)-P(faktas)MW')
ylabel('Tankio f-jos')
legend('2011m', '2012m', '2013m', '2014m', '2015m')
title('Apkrovos plano ir fakto skirtumo tankio f-jos')

```

Vartojimas 2015m.

```

A=xlsread('c:\load15.xls','Worksheet','E3:E8761')
M1=mean(A) %vidurkis
S1= std(A);% standartinis nuokrypis
MAX1 = max(A);
MIN1 = min(A);
STEP1 = (MAX1 - MIN1) / 1000;
PDF1 = normpdf(MIN1:STEP1:MAX1, M1, S1)*10;
figure(1)
histfit(A,100,'normal')
hold
plot(MIN1:STEP1:MAX1, PDF1);
xlabel('Prognozavimo paklaida MW')
ylabel('Hist. pasikartojimu sk.')
legend('2015m hist', '2015m tankio f-ja')

```