



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Justinas Matulevičius**

**DIDELĖS GALIOS VĖJO ELEKTRINIŲ DALYVAVIMAS**  
**PAPILDOMŲ PASLAUGŲ RINKOJE**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**DIDELĖS GALIOS VĖJO ELEKTRINIŲ DALYVAVIMAS**  
**PAPILDOMŲ PASLAUGŲ RINKOJE**

Baigiamasis magistro projektas

**Elektros energetikos sistemos (621H63005)**

**Vadovas**

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

**Recenzentas**

**Projektą atliko**

Justinas Matulevičius

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

JUSTINAS MATULEVIČIUS

(Studento vardas, pavardė)

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS (621H63005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Didelės galios vėjo elektrinių dalyvavimas papildomų paslaugų rinkoje“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Justino Matulevičiaus** baigiamasis projektas tema „Didelės galios vėjo elektrinių dalyvavimas papildomų paslaugų rinkoje“ 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)

Matulevičius, J. Didelės galios vėjo elektrinių dalyvavimas papildomų paslaugų rinkoje. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 44 psl.

## SANTRAUKA

*Šiame tiriamajame darbe nagrinėjama vėjo elektrinių galimybė dalyvauti papildomų paslaugų rinkoje tiekiant galios balansavimo paslaugą elektros energetikos sistemai. Pirmame skyriuje apžvelgtos vėjo elektrinių plėtros tendencijos Lietuvoje ir Europoje. Aprašytas vėjo elektrinių neigiamas poveikis elektros kokybei, išanalizuoti kitų autorių tyrimai šio poveikio mažinimo srityje. Taip pat išanalizuotos pagrindinės energijos kaupimo sistemos galinčios dalyvauti galios balansavime.*

*Antrasis skyrius skirtas identifikuoti pagrindinius balansavimo ir automatinio generavimo valdymo sistemos balansavimo galių paskirstymo principus, bei skaičiavimo metodus. Šiame skyriuje pristatomas sukurtas balansavimo galių dinaminis modelis, kuriame balansavimo problemą sprendžia energijos kaupimo sistemos, hidroelektrinės ir pačios vėjo elektrinės. Modelio rezultatai parodė, kad teisingai parinkus filtrų parametrus, sistemos galių disbalansą, šiais trim generavimo šaltiniais, galima sumažinti iki minimumo.*

*Paskutiniame skyriuje sumodeliuotas dviejų skirtingų gamintojų vėjo elektrinių darbas nepilna galia, paliekant rezervą galių balansavimui. Gauti rezultatai parodė, kad esant tinkamoms sąlygoms ir įrangai, 10 % rezervą nuo nominalios galios, galima pasiekti elektrinei nusikrovus tik iki 80 %. Atlikus ekonominį įvertinimą nustatyta, jog 100 MW galios vėjo elektrinei rezervui pasiekiant 10 MW, prarandama apytiksliai nuo 1,5 iki 5 mln. eurų per metus.*

*Reikšminiai žodžiai: vėjo elektrinė, balansavimas, kaupimo sistema, galios rezervas, dinaminis modelis, elektros kokybė.*

Matulevičius, Justinas. Participation in Ancillary Services Market by High Capacity Wind Power Plants. Final project of *master degree* / supervisor doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2015. 44 psl.

## SUMMARY

*The project analyzes the opportunity of participation in ancillary services market by high capacity wind power plants, supplying power balance energy to electrical power system. In the first section the wind power development trends of Lithuania and Europe are overviewed. The negative impact of wind power plants to electricity quality is described and researches by other authors on reduction of this impact are analyzed. Also the main energy storage systems capable to participate in power balancing were investigated.*

*The second section is intended to identify the basic allocation principles and methods of calculation of balance and automatic generation control system. This section presents the dynamic model designed for power balance, where the problem is solved by using energy storage systems, hydropower plants and wind power plants. The model obtained that the system imbalance can be reduced to minimum by these three generation aggregates when the correct selection of filter parameters is selected.*

*In the last section the model of two wind power turbines, created by different manufacturers was made. The presented turbines work with reserve for the systems balance. The results revealed that under appropriate conditions and optimized equipment reserve of 10 % of the nominal power plant power can be achieved with availability up to 80 %. The economical evaluation founded that a loss of 5 to 10 million euros per year can be caused, when the 100 MW power plant maintain 10 MW of balancing power.*

*Keywords: wind power plant, balance, energy storage, power reserve, dynamic model, electricity quality.*

## **TURINYS**

|  |    |
|--|----|
| SANTRUMPOS .....   | 7  |
| ĮVADAS .....   | 8  |
| 1. VĖJO ELEKTRINIŲ PLĖTROS IR VAIDMENS ELEKTROS ENERGETIKOS<br>SISTEMOJE APŽVALGA .....  | 9  |
| 1.1 Vėjo elektrinių plėtros tendencijos .....  | 9  |
| 1.2 Vėjo elektrinių įtaka elektros energijos kokybei .....                               | 11 |
| 1.3 Vėjo elektrinių galių balanso kitų autorių tyrimai .....                             | 14 |
| 1.4 Pagrindinių energijos kaupimo sistemų modeliai .....                                 | 17 |
| 2. VĖJO ELEKTRINIŲ GALIŲ BALANSAVIMO METODAI .....                                       | 25 |
| 2.1 Pagrindiniai balansavimo principai .....   | 25 |
| 2.2 Automatinio generavimo valdymo sistemos balansavimo galių paskirstymas.....          | 27 |
| 2.3 Dinaminis modelis skirtas galios balansavimo valdymui.....                           | 31 |
| 3. DIDELĖS GALIOS VĖJO ELEKTRINIŲ DALYVAVIMO PAPILDOMŲ PASLAUGŲ<br>RINKOJE TYRIMAS ..... | 34 |
| 3.1 Vėjo elektrinių darbo tiekiant aktyviosios galios rezervą tyrimas.....               | 34 |
| 3.2 Tyrimo ekonominis įvertinimas .....  | 38 |
| IŠVADOS .....  | 40 |
| LITERATŪRA .....   | 41 |

## **SANTRUMPOS**

AC – kintamoji srovė

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai

AGV – automatinis generavimo valdymas

DC – nuolatinė srovė

DVS – dispečerinio valdymo sistema

EES – elektros energetikos sistema

HE – hidroelektrinė

IGA – inercinis generavimo agregatas

PI – proporcinis integralinis (valdiklis)

PID – proporcinis integralinis diferencialinis (valdiklis)

PSO – perdavimo sistemos operatorius

SMM – superlaidžios magnetinės medžiagos

VE – vėjo elektrinė

## **ĮVADAS**

Šiais laikais elektros energetika tapo neatsiejama mūsų gyvenimo dalimi. Sunku įsivaizduoti dieną be elektros energiją naudojančių prietaisų. Dėl teigiamo visuomenės ir politikų požiūrio į atsinaujinančiąją elektros energetiką, vėjo elektrinių (VE) suminė įrengtoji galia greitai auga. Elektrinių, kurioms nereikalingas kuras, generuojama galia labai priklauso nuo vyraujančių vėjo krypčių bei greičio. Šie parametrai pasižymi dideliu nepastovumu, todėl vėjo elektrinėje atsiranda generuojamos galios svyravimai, suprastėja energijos kokybė ir tai kenkia visos elektros energetikos sistemos (EES) darbui. Prognozuojant vėjo elektrinių gamybą susiduriama su nemažomis paklaidomis. Dėl to daugėjant VE parkų, vis sunkiau subalansuoti elektros energijos gamybą ir suvartojimą. Tai labai atsispindi mažos galios elektros energetikos sistemose, tokiose kaip Lietuvos. Mokslininkai teigia, kad norint toliau vystyti VE plėtrą, esamų tradicinės generacijos šaltinių greitu metu nebeužteks. Norint įrengti VE parką, reikės taip pat statyti ir, pavyzdžiui, kombinuoto ciklo elektrinę, vėjo parko prognozavimo paklaidom padengti. Todėl atsinaujinančių energijos šaltinių dalyvavimas papildomų paslaugų rinkoje tampa vis aktualesnis.

### **Darbo tikslas:**

Ištirti vėjo elektrinių galimybę dalyvauti papildomų paslaugų rinkoje sudarant dinaminį modelį skirtą balansavimo galių valdymui, bei išanalizuojant vėjo elektrinės darbą nepilna galia.

### **Darbo uždaviniai:**

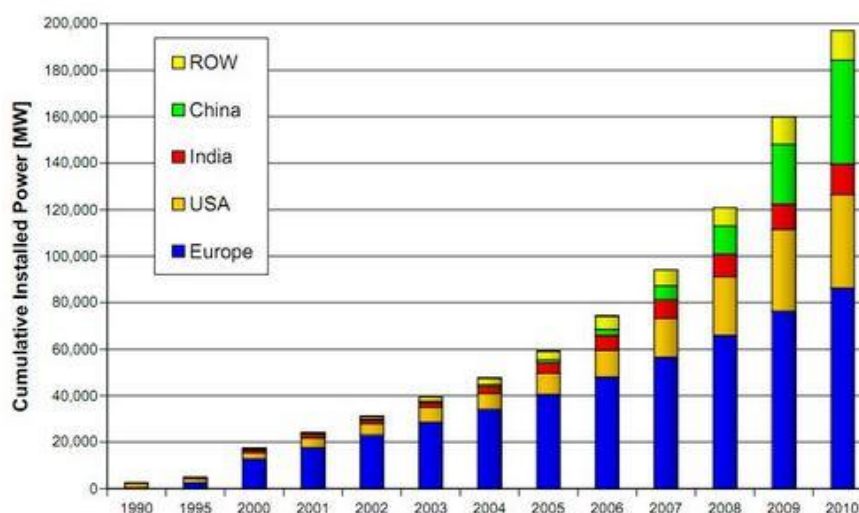
1. Išsiaiškinti, kokia vėjo elektrinių įtaka elektros energijos kokybei ir apžvelgti tyrimus atliktus vėjo elektrinių balansavimo tema.
2. Ištirti pagrindinių energijos kaupimo sistemų veikimo principus ir modelius.
3. Sukurti vėjo elektrinių dinaminį modelį skirtą balansavimo galių valdymui.
4. Nustatyti galios rezervo pasiekiamumą vėjo elektrinei dirbant nepilna galia.
5. Ištirti vėjo elektrinės darbą nepilna galia ekonominiu aspektu.
6. Įvertinti vėjo elektrinės galimybę dalyvauti papildomų paslaugų rinkoje.



# 1. VĖJO ELEKTRINIŲ PLĖTROS IR VAIDMENS ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOJE APŽVALGA

## 1.1 Vėjo elektrinių plėtros tendencijos

Remiantis Europos vėjo asociacijos EWEA parengta ataskaita [1] - 2014 metų pabaigoje visose Europos Sąjungos (ES) šalyse buvo įrengta 128,75 GW suminės galios vėjo elektrinių parkų, kai Europoje jų galia siekia 133,97 GW, o pasaulyje 370 GW. Per 2014 metus ES buvo įrengta 11,791 GW suminės galios vėjo elektrinių parkų. Apie 10 % prieaugis susidaro, nes 2014 metų pradžioje suminė vėjo elektrinių (VE) įrengtoji galia siekė 117,38 GW. Panašus 11 % įrengtosios VE galios padidėjimas buvo ir per 2013 metus. Lyginant 2013 ir 2014 metų vėjo elektrinių galių prieaugius matyti, kad VE galia ES kilo ganėtinai stabilium tempu. 1.1 paveiksle pateiktas VE įrengtosios galios kitimas Europoje ir pasaulyje nuo 1990 metų. Matyti, kad Europoje įrengtų VE parkų galia šiuo metu sudaro daugiau nei pusę visame pasaulyje įrengtos vėjo elektrinių galios.



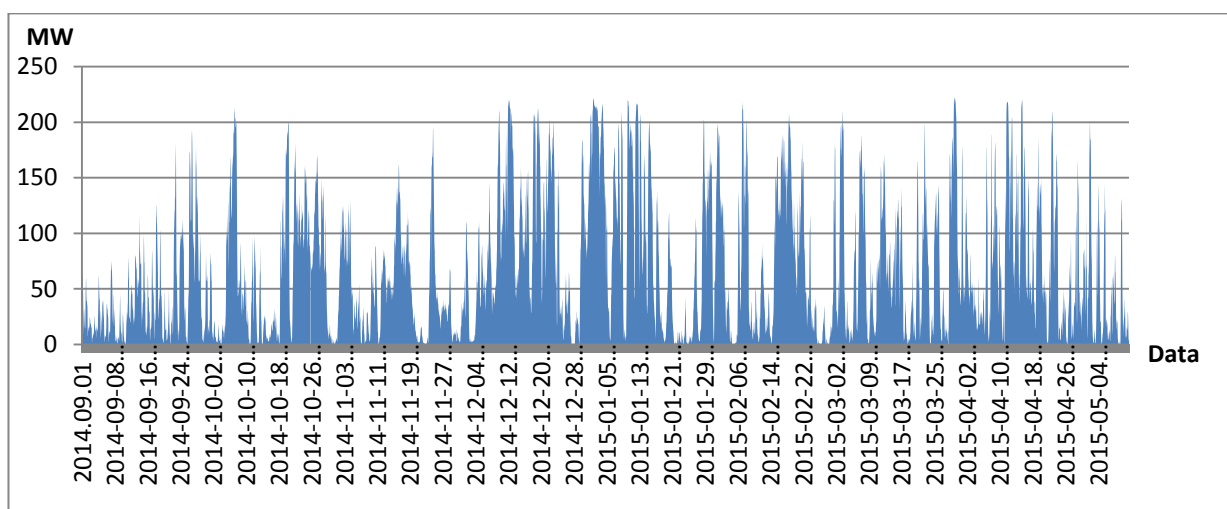
1.1 pav. Įrengtoji VE parkų galia 1990 – 2010 metais [2]

Tokių staigų vėjo elektrinių galios kitimą nulėmė vis labiau pinganti technologija (atpigo apie 30 % per 2007 - 2010 metus) ir ambicinga politika, kurios tikslai - jau 2020 metais pasiekti, kad 20 % visos suvartotos elektros energijos būtų pagaminta naudojant atsinaujinančius energijos išteklius (AEI) [3]. 2009 metais Europos Komisija (EK) nustatė tikslą iki 2050 metų sumažinti išmetamųjų dujų, sukeliančių šiltnamio efektą, kiekį apie 80 %, net iki 95 % lyginant su 1990 metų šių dujų kiekiu. Europos Klimato Fondo užsakytai studijai [4] patvirtinus, kad toks tikslas yra pasiekiamas, EK 2011 metais nustatė iki 2030 metų sumažinti anglies dvideginio kiekius elektros energetikos sektoriuje 54–68 % [5]. 2014-aisiais pirmą kart per paskutinius 40 metų (išskyrus ekonomikos nuopuolio laikotarpį) energetikos sektoriaus išmetamas anglies

dvideginio kiekis nedidėjo. Aplinkos taršos augimas sustojo dėl vis didesnių AEI apimčių. Tikslų įgyvendinimui ir toliau nenumaldomai didės AEI, tuo pačiu ir vėjo elektrinių, sugeneruotų galių dalis elektros energijos balanse. 2010 metų EK dokumentuose [6] 2030 metams iškelti tikslai iš atsinaujinančių energijos išteklių gaminti maždaug 34 % elektros energijos, tai sekantys 2013 metų dokumentai [7] jau kartelę užkėlė iki 45 %. Analizuojant Europos elektros perdavimo sistemų operatorių organizacijos (ENTSO-E) vertinimus [8], jeigu norime neatsilikti nuo ES iškeltų tikslų 2050 metams, reikia, kad atsinaujinančių energijos išteklių dalis EES balanse pasiektų nuo 51,4 iki 59,8 %.

Šiuo metu Europos Sąjungos šalyse, nedidelė dalis, apie 10,2 % suvartojamos elektros energijos yra pagaminama naudojant vėjo energiją, todėl norint įvykdyti keliamus tikslus, vėjo elektrinių įrengtoji galia neišvengiamai turės didėti. EWEA nuomone 2020 metais vėjo elektrinės turėtų sugeneruoti apie 15 % nuo visos suvartotos elektros energijos, o 2050 metais šis parametras turėtų išaugti iki 50 % [2].

Toks pat tikslas Lietuvai 2020 metams siekia 24 %, todėl Lietuvoje vėjo elektrinės taip pat gana intensyviai įrengiamos. 2014 metų pabaigoje suminė vėjo elektrinių įrengtoji galia siekė 279,3 MW. Nors per 2014 metus prie Lietuvos elektros energetikos sistemos buvo prijungta tik 0,5 MW suminės galios vėjo elektrinių, tačiau vėjo energetika pirmauja pagal visų AEI tipų įrengtąją galią. Paskutinių 8 mėnesių (2014-09 – 2015-05) faktinė vėjo elektrinių sugeneruota galia, Lietuvos EES, pavaizduota 1.2 paveiksle [9].



1.2 pav. Faktinė VE gamyba Lietuvoje (2014-09 – 2015-05)

Iš viso 2014 metais vėjo elektrinės pagamino apie 636 GWh elektros energijos, o tai sudarė maždaug 60,7 % nuo visos atsinaujinančių energijos išteklių pagamintos elektros energijos ir apie 5,4 % nuo viso Lietuvos EES suvartojimo. Svarbu, kad 2013 metais įvyko paskutinis paskirstomasis aukcionas, kurio metu buvo išdalintos visos skatinimo kvotos gamintojams, kurie naudoja VE, aukciono metu buvo išdalinta visa skatinimo kvota, kurie siekė

500 MW. Esami ir planuojami ateityje įrengti VE parkai turėtų būti išsidėstę vakarų Lietuvoje (Mažeikiuose, Šilutėje, Pagėgiuose ir Jurbarko ar jų rajonuose), kur tam palankios sąlygos. Geriausias scenarijus būtų vėjo elektrines statyti jūroje, ten vėjo greitis yra žymiai didesnis, o jo pūtimo grafikas daug pastovesnis, toks VE panaudojimas būtų tikrai efektyviausias.

## **1.2 Vėjo elektrinių įtaka elektros energijos kokybei**

Elektros energijos kokybė apibūdinama, kaip dažnio valdymo, įtakos elektros tiekimo patikimumui ir įtampos kokybiniai rodikliai.

Įtampos kokybės reikalavimuose galime išskirti penkis pagrindinius kriterijus - nuostoviosios įtampos pokyčių dydį, staigiuosius įtampos pasikeitimus, VE veikimo sukeltą įtampos mirgėjimą, harmoninių įtampų ar srovių sukeltus iškraipymus bei įjungimų ar išjungimų ir apvijų perjungimų sukeltą įtampos mirgėjimą.

Elektros kokybės elektros tinkluose parametrus kontroliuoti sukurti reikalavimai, nurodyti kokybės standarte [10]. Tačiau vėjo elektrinių atveju kokybės reikalavimai yra sukonkretinti, o nebūtini skaičiuoti, tokie kaip, įtampų nesimetrija – praleisti [11].

### **Vėjo elektrinių įtaka dažnio kokybei**

Elektros energetikos sistemos dažnis yra aktyvios galios esančios toje sistemoje funkcija. Atsinaujinančioji energetika, o labiausiai vėjo elektrinių parkai, dažnio valdymo kokybei daro ženklų įtaką.

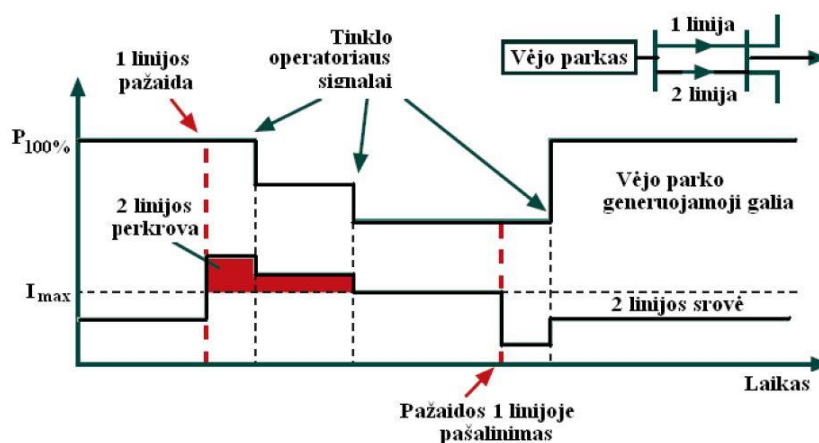
Vėjo elektrinių parkus galima suskirstyti į dvi grupes: jungiamus prie aukštesnės kaip 100 kV įtampos tinklų ir VE parkus, jungiamus prie mažesnės kaip 100 kV įtampos tinklų. Lietuvos atveju prie 110 kV ir 330 kV tinklų jungiami didieji parkai, o mažesnieji parkai ir atskiros elektrinės prie 35 kV, 10 kV ir 0,4 kV linijų.

Dažnio reguliavimo reikalavimai dideliems vėjo parkams ir pavienėms elektrinėms yra skirtingi. Pavyzdžiui, Danijoje nustatyti atskiri reikalavimai elektrinėms, jungiamoms prie didesnės kaip 100 kV įtampos tinklų, praktiškai tai jau yra vėjo elektrinių parkai, keliami paramos dažnio reguliavimui reikalavimai [12].

Pagrindiniai šių reikalavimų tikslai yra, kad elektros sistemoje esant avariniam režimui, vėjo parkai tęsdami elektros generavimą palengvina kitų elektrinių darbą ir tuo pačiu galiu balansavimą bei dažnio reguliavimą. Anksčiau didieji vėjo parkai ar pavienės vėjo elektrinės, kritiškai pasikeitus sistemos įtampai ar dažniui, paprasčiausiai atsijungdavo. Dabar Lietuvoje galiojančios vėjo elektrinių darbą reglamentuojančios taisyklės [13] remiasi Danijos energetikų patirtimi.

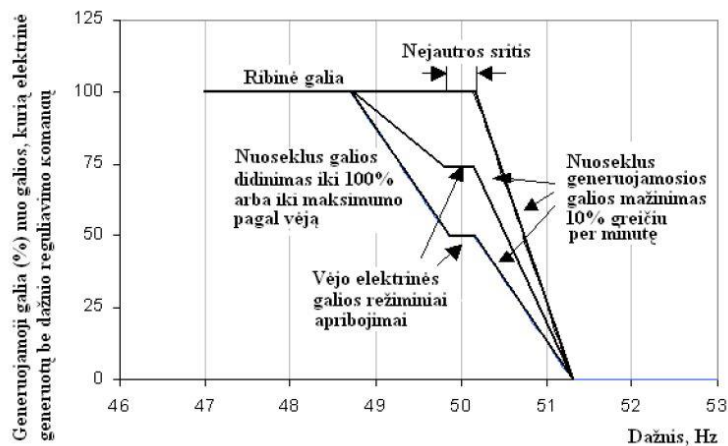
Mažosios vėjo elektrinės, nors jas visas susumavus ir gauname pakankamai ženklius generavimo šaltinius, galime teigti, kad įtakos visos sistemos darbui turi gana nedaug arba apskritai neturi. Svarbiomis jos gali tapti, kai kartu su vietiniais elektros energijos kaupikliais, jeigu mikrotinklas atsiskirtų nuo sistemos, pradeda valdyti tokios mažosios elektros sistemos dažnį. Tokiu atveju joms jau galiotų visoms elektrinėms taikomi reikalavimai. Galima teigti, kad bet kokios VE galia turi būti valdoma, kontroliuojama ir prižiūrima, pavyzdžiui, sugeneruota galia turėtų būti sumažinama, jei sistemoje atsiranda elektros energijos perteklius, o generaciją kartu su prijungtu vietine elektros kaupimo sistema reikia didinti, atsiradus tokiam poreikiui.

Lietuvoje patvirtintose taisyklėse yra užduotas valdymo sistemos kokybės reikalavimas: kiekviena vėjo elektrinė turi galėti savo galią sumažinti iki 20 % jos vardinės galios greičiau kaip per 2 sekundes. Vėjo parkams tai padaryti yra nesudėtinga, nes pakanka dalį veikiančių elektrinių atjungti. Įprastinio darbo režimo metu elektros tinklo operatorius komandas keisti generuojamąją galią pasitaiko labai retai, tačiau jų įvykdymas turi didelę įtaką visos sistemos dažnio valdymo kokybei. Kita priežastis greitai reaguoti yra elektros perdavimo linijų avarijos. Jei, pavyzdžiui, dėl trumpojo jungimo atsijungia viena pagrindinė elektros perdavimo linija, tai likusi veikti antroji ir silpnesnė linija akimirksniu gali būti perkrauta (1.3 pav.). Tinklo operatoriui laiku pranešus vėjo elektrinėms apie įvykį ir susidariusius elektros perdavimo sunkumus (angl. bottleneck), vėjo elektrinės staigiai nusikrauna, o antroji linija išlieka darbe ir neatsijungia. Pašalinus gedimą, vėjo elektrinės vėl gauna komandą dirbti įprastai.



1.3 pav. Vėjo elektrinių darbas įvykus avarijai vienoje iš linijų [14]

Kai kur dar yra seno tipo elektrinių, kurios negali keisti savo generuojamosios galios, nes nėra vėjaračio valdymo įrangos. Šiuolaikinėse vėjo elektrinėse yra įtaisytos menčių pakrypimo kampo keitimo pavaros. Kaip vėjo elektrinė reguliuojama pasikeitus tinklo dažniui pateikta 1.4 pav. Vėjo elektrinių įrengimo taisyklėse yra nustatyta, kad prietaisas skirtas matuoti dažniui turėtų būti  $\pm 10$  mHz tikslumo klasės ir nejautrus harmonikoms.



1.4 pav. Vėjo elektrinės reakcija į dažnio pokyčius [14]

### Vėjo elektrinių įtampos kokybę veikiančios priežastys

Pagrindinės priežastys įtakojančios įtampos kokybę atsiranda dėl specifinių vėjo savybių:

- nepastovi pūtimo kryptis,
- didelis vėjo greičio nepastovumas, nuo ramaus vėjelio (štiliaus) iki viesulų ir uraganinių vėjų;
- vėjo gūšiai arba turbulentiškumas, atsiranda vėjui pučiant labai netolygiai, staigiai sustiprėja, dažnai staiga pasikeičia vėjo kryptis;
- už elektrinės susidaro toks reiškinys, kai vėjas per 5 D atstumą (D yra vėjaračio skersmuo) tampa sukuriuotas. Į šią zoną papuolusi kita vėjo elektrinė užstojama ir jai tenka mažesni vėjo, jos galia stipriai krenta. Dažniausiai pučiančio vėjo kryptimi, VE reikia išdėstyti šachmatiškai, tada jos mažiau užstoja viena kitą (1.5 pav.).



1.5 pav. Turbulencijos efektas už vėjo elektrinės vėjaračio [15]

Šiais laikais dominuoja vėjo elektrinės su pavaromis, kurios yra aktyviai sukamos prieš vėją. Virš elektrinės įrengiami vėjo greičio ir krypties matuokliai, kurių signalus apdoroja elektrinės kompiuteris. Vėjaratis būna visada nukreiptas prieš vėją, todėl tokios elektrinės naudingumo koeficientas padidėja.

Trijų menčių vėjaratis turi savybę: viena iš menčių esanti žemiausioje padėtyje, prasilenkdama su vėjo elektrinės bokštu, trumpą laiko momentą neveikia, nes iš vėjo nebeima energijos dėl nuo bokšto atsispindėjusio antvėjo. Per vieną vėjaračio apsisukimą, vėjo elektrinės generuojama galia tris kartus sumažėja, gaunamas nuolat jaučiamas galios pulsavimas 3p ( kai p vėjaračio sūkliai) dažniu. Tai viena iš mirgėjimo (angl. flicker) atsiradimo priežasčių.

Vėjo elektrinės stiprėjant vėjui įsijungia tik prie pradinės vėjo greičio vertės (angl. cut-in speed), pavyzdžiui prie 3 m/s pučiančio vėjo. Jei vėjas susilpnėja – atsijungia, jei sustiprėja – vėl įsijungia. Turime generuojamos galios šuoliavimą nuo 0 iki tam tikros, nuo turbinos priklausančios, vertės. Taip pat yra elektrinių, kurios vėjui susilpnėjus iki tam tikro, pavyzdžiui 4 m/s greičio, perjungia generatoriaus polių skaičių ir vietoje vardinės, pavyzdžiui 200 kVA galios pradeda generuoti elektrą tik 50 kVA galia. Apvijų perjunginėjimas vėjui keičiantis yra dar viena mirgėjimo priežastis.

Uraganinio vėjo metu, vėjo greičiui pasiekus dažniausiai 25 m/s (priklauso nuo gamintojo), VE automatiškai išsijungia, nes gali sulūžti. Vėjo greičiui sumažėjus vėl įsijungia, padidėjus – išsijungia. Šokinėjimas vyksta iki 0, kai VE atsijungia ir iki maksimumo, kai įsijungia. Tai trečioji mirgėjimo priežastis. Vėjo greičiui sustiprėjus iki VE stiprumo ribos, pavyzdžiui iki 52 m/s, elektrinė gali nugriūti, todėl renkanti vėjo elektrinę svarbu žinoti vietovės savybes, ir nepirkti per daug silpno įrenginio.

Pagal konstrukcijos stiprumą vėjo elektrinės standartiškai yra skirstomos į penkias klases: 1, 2, 3 ir 4 bei S (Super). S klasės elektrinės yra pritaikytos statyti atviroje jūroje. Lietuvoje tikėtų 2 ar 3 klasės elektrinės, nes pasitaiko gana stiprių viesulų..

Vėjaračio mentis gali sulaužyti staigiai sustiprėjusio ir pakeitusio pūtimo kryptį vėjo gūšiai. Tai vietovių, kuriose dominuoja kalvos, miškai, įvairios kliūtys, atvirų laukų ir namų deriniai, vėjo ypatumas. Gūsis vėjaratį arba pristabdo arba pagreitina, todėl turime dar vieną įtampos mirgėjimo priežastį.

### 1.3 Vėjo elektrinių galių balanso kitų autorių tyrimai

Literatūroje, kaip vienas iš geriausių VE galių balansavimo valdymo pavyzdžių pateikiamas atskirų vėjo elektrinių ar ištisų VE parkų generacijos galios kreivės palyginimas remiantis filtrais. Vienos vėjo elektrinės sugeneruota galia atiduota į tinklą tokiu atveju yra [16]:

$$P=(1/(1+T_s))\cdot P_{VT} \quad (1.1)$$

čia  $P$  – VE į tinklą atiduota galia (MW),  $P_{VT}$  – VE sugeneruota galia (MW),  $T_S$  – laiko pastovioji filtre (s).

Šiuo atveju galios svyravimus kompensuoja energijos kaupimo sistema. Esant per daug sugeneruotos galios sistemoje, energijos kaupimo sistema yra įkraunama, o esant galios trūkimui – iškraunama. Šis metodas tinkamas atskirų VE galioms subalansuoti, bet tam reikia įrengti atskiras energijos kaupimo sistemas prie visų vėjo elektrinių ar elektrinių parkų [17]. Be to metodas nėra pritaikytas centriniam vėjo elektrinių galių balansavimui. Taikant tokį valdymo variantą, taip pat reikėtų žinoti nemažai papildomų parametru, pavyzdžiui, kokia norma VE galios svyravimų yra leidžiama elektros tinklų operatoriaus, kurią turėtų subalansuoti kitos EES dalyvaujančios elektrinės. Todėl, kad VE sugeneruota galia nėra visada pastovi, o taip pat ji apsunkina teisingų energijos kaupimo sistemos parametru įvedimą. Labai gera šio metodo ypatybė, kad nereikalinga prognozuoti vėjo elektrinės generuojamas galias [18].

Kitas apžvelgiamas galių balansavimo valdymo metodas skirtas vėjo elektrinėms yra vidutinės VE sugeneruotos galios palaikymo metodas. Remiantis šiuo būdu į tinklą atiduodama VE galia yra tam tikrame, nustatytame, intervale, kuris dažniausiai yra vienos valandos, vidutinė vėjo elektrinės sugeneruota galia [17]:

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P_{VT}(\tau) d\tau \quad (1.2)$$

čia  $P$  – į tinklą VE atiduota galia (MW),  $P_{VT}$  – sugeneruota VE galia (MW),  $t_0$  – pradinis laiko momentas (s),  $T$  – laiko tarpas, kuriame reikalinga suskaičiuoti vėjo elektrinės vidutinę galią (s).

Šiuo atveju, energijos kaupimo sistema yra įkraunama tada, kai faktinė VE galia tampa didesnė nei nustatytas vidurkis, o išsikrauna, vos VE galiai nukritus žemiau nustatytos vidutinės galios. Remiantis šiuo valdymo metodu, kitaip nei prieš tai aprašytu atveju, reikia turėti vėjo elektrinių galios prognozę [19], bet VE galia, kurią ji atiduoda į tinklą, yra pastovi. Didžiausias šio metodo minusas yra, kad reikalinga didelė įrengtoji galia ir talpa pačios energijos kaupimo sistemos. Šis metodas, kaip ir ankstesnis, taip pat neturi galimybės dalyvauti centriniame valdyme.

Iš dalies panašus į prieš tai aptartą, palaikomos vidutinės galios metodą, yra mažiausios ir didžiausios VE galios metodas. Jo esmė yra ta, kad VE galia į tinklą atiduota nustatytu laiko momentu yra pripažįstama kaip mažiausia tuo metu, kai įkraudinėjama energijos kaupimo sistema, o laikoma didžiausia, kai energijos kaupimo sistema iškraudinėjama [20]. Šio metodo pagrindinis plusas yra, kad energijos kaupimo sistema gali dirbti pilnu pakrovimo ir iškrovimo tempu, todėl jos gyvavimo laikotarpis gana stipriai didėja. Bet, kaip ir anksčiau aptartos vidutinės VE galios palaikymo metodu, reikalinga palyginti didelių galių ir talpos energijos

kaupimo sistemos visiems atskiriems VE parkams. Taipogi reikia turėti VE generuojamos galios prognozę.

Sekantis VE galių balanso valdymo metodas, kai naudojamos energijos kaupimo sistemos, būtų galių valdymas pagal VE galios kitimo greičio ribas. Šio metodo esmė yra, kad energijos kaupimo sistema įsikraunama, jeigu VE galia didėja tokiu greičiu, kad pasiekiamą tam tikra, nustatyta, riba, bet iškraunama, jeigu VE galia sumažėja vėlgi kažkokiu greičiu, kuris yra iš anksto nustatytas [16]. Šis metodas yra nesudėtingas, bet, anksčiau aptartu atveju, kai buvo naudojami filtrai, VE galia buvo išlaikoma pastovi, čia ji kinta. Toks generavimas labai apsunkina teisingų parametrų, energijos kaupimo sistemoje, nustatymą. Reikia žinoti visos EES galių balanso kiekius ir galimybes. Šis nagrinėjamas metodas taip pat nėra tinkamas centriniam valdymui, bet turi pliusą, kad nereikalinga VE generuojamos galios prognozė.

Paanalizavus šiuo metu pagrindinius taikomus pasaulyje VE galių balansavimo valdymo metodus, kai naudojamos energijos kaupimo sistemos, galima teigti, kad visi jie turi savo pliusų ir minusų, tačiau yra tinkami ir pritaikyti atskiroms VE ar VE parkams balansuoti galias, bet nėra tinkami šiuo metu PSO naudojamam centralizuotam galių reguliavimui.

JAV nacionalinė atsinaujinančiosios energetikos laboratorija (angl. NREL) išanalizavo VE balansavimą ekonominiu aspektu ir savo ataskaitoje [21] nustatė, kad didėjant AEI plėtrai, reikia lanksčios EES. Sistemos lankstumą labiausiai didina įvairūs energijos kaupimo įrenginiai. Ataskaitoje taip pat teigiama, kad centralizuotas valdymas yra labai efektyvus, tačiau reikalinga daugiau sistemos dinaminio stabilumo analizių. Panašius rezultatus gavo ir Vokietijos mokslininkai. Jie teigia, kad trūksta naujų technologinių sprendimų energijos sandėliavimo ir apkrovimų valdymo srityse [22]. Mokslininkai iš Lenkijos pateikė labai panašias išvadas dėl tikslesnio centrinio galių balanso valdymo, tačiau jų išvados pagrįstos pavienių VE galių balanso tyrimais [23]. Švedai tyrinėjo VE galimybę dalyvauti sistemos galių balansavimo uždavinyje, VE dirbant nepilna galia. Šis tyrimas buvo daugiau nukreiptas ne į pačios galimybės tyrimą, o ne stabilumo analizę [24]. Gautose išvadose teigiama, kad šis metodas yra ekonomiškai nenaudingas. Kinijos mokslininkai bandė ištirti energijos kaupimo sistemų valdymo VE galių balansavimui pasinaudojant filtrais [18], bet sutiko, kad jų pateiktas filtrų parametrų metodas yra nenaudingas sistemos valdymui realiuoju laiku. Kombinuotos vėjo ir dyzelinės elektrinės valdymą, naudojantis energijos kaupimo sistemomis analizavo Indijos tyrėjai [25]. Tyrimo rezultatai parodė, kad jų pasiūlytas valdiklis, paremtas apytiksle logika, yra pranašesnis už proporcinį integralinį valdiklį. Šį tyrimą perdarė Iraniečiai mokslininkai, jie pakeitė aplinkai nedraugišką dyzelinį agregatą į labiau švarią ir greitesnę dujų turbiną. Prie to buvo prijungta ir saulės kolektorius. Norėdami gauti maksimalią saulės ir vėjo elektrinės generuojamą galią, jie



pateikė specializuotą valdiklį, kuris paremtas Liapunovo teorija. Gauti rezultatai nurungė ir apytiksle logika paremtą ir PID (proporcinis integralinis diferencialinis) valdiklį [26].

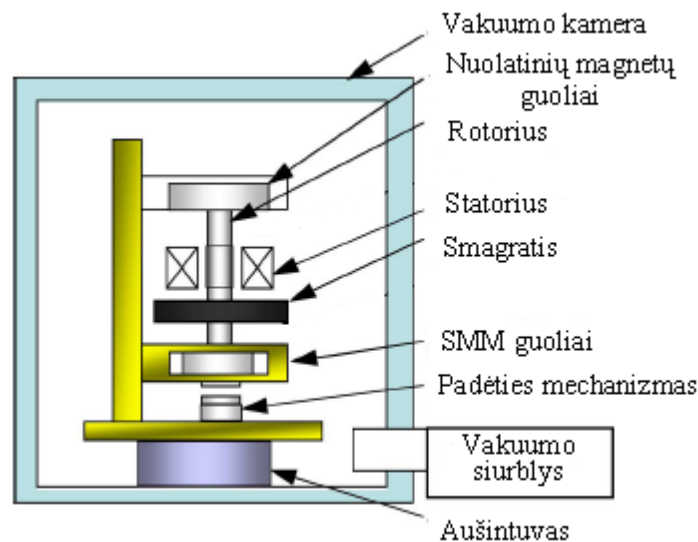
Daugybė mokslininkų intensyviai tyrinėja VE galių balanso valdymą naudojantis energijos kaupimo sistemomis, ieško įvairių būdų užtikrinti galių balansą sistemoje, tačiau jų siūlomi metodai pritaikomi atskirų VE arba nedidelių, izoliuotų EES galių balansavimui. Išnagrinėtoje literatūroje nebuvo rasta metodų, koku būdu energijos kaupimo sistemas ar kitokius metodus pabandyti pritaikyti centrinio VE galių reguliavimo tyrimui ir spręsti ištisos EES galių balansavimo galimybes.

## 1.4 Pagrindinių energijos kaupimo sistemų modeliai

### **Inerciniai generavimo agregatai**

Inerciniai generavimo agregatai sudaryti iš dviejų pagrindinių blokų: energijos kaupimo ir konversijos modulio. Pirmąjį, energijos kaupimo modulį galime pavadinti kinetinės energijos kaupimo įrenginiu, kurį sudaro statorius ir rotorius. Jis gali dirbti ir variklio režimu, ir generatoriaus. Tokiu būdu gali arba generuoti arba naudoti energiją tiesiai iš elektros tinklo. Šio įrenginio rotoriaus greičiai yra labai dideli (virš 10000 aps. per min.), jog pasiektų naudingiausią energijos kaupimo būseną.

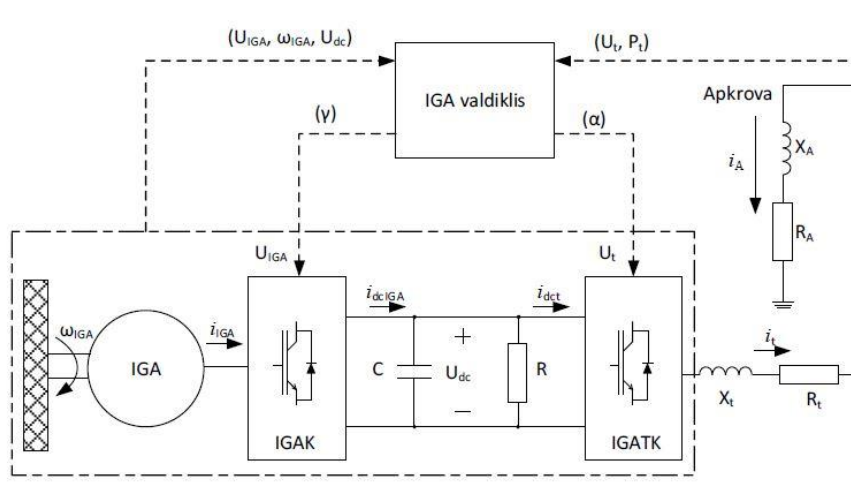
Modulis kaupiantis energiją, pavaizduotas 1.6 pav., jį sudaro dvi guolių sistemos - nuolatinių magnetų ir taip pat superlaidžių magnetinių medžiagų [15]. SMM guolių sistema yra įmontuota rotoriaus apatinėje dalyje. Ji sudaryta iš superlaidininko ir nuolatinių magnetų (4 vnt.). Tokia sistema gali slopinti besisukančio rotoriaus sukiamus virpesius taip neleisdama jam vibruoti. NM guoliai įrengti rotoriaus viršutinėje dalyje. Ji valdo besisukančio rotoriaus poziciją abiejų – vertikaliosios ir horizontaliosios ašių atžvilgiu. Šiame agregate smagratis pagamintas iš tam tikro metalo, tačiau turi sustiprintą anglies ir stiklo pluošto rėmą. Jis yra sumontuotas vidurinėje rotoriaus dalyje. Apatinėje šio energijai tinkančio kaupimo srityje yra pastatytas aušintuvas, kuris atšaldo superlaidininką iki tam tikros žemos temperatūros. Atšaldžius superlaidininką maždaug iki  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , padėties įrenginys atsiskiria ir rotorius pradeda sukintis be jokio mechaninio kontakto. Visa tai vyksta žemo slėgio terpėje – vakuume ( $6 \cdot 10^{-2}\text{ Pa}$ ). Taip dar labiau sumažinami sukimosi nuostoliai. Statorius atlieka pagrindinės jungties tarp energijos kaupimo ir energijos konversijos modulių vaidmenį inerciniame generavimo agregate. Tai yra įprastas, 3 fazių ir 4 polių (nuolatinių magnetų) įrenginys. Į stiklo pluošto mišinio rėmą yra patalpinti statorius ir rotorius, dėl ko inercinis generavimo agregatas įgauna reikiamą tvirtumą, jam besisukant dideliais greičiais.



1.6 pav. Energijos kaupimo modulis [27]

Inerciniai generavimo agregatai nėra galingi, todėl didesniam naudingumui gauti juos galima sujungti į matricas. Konteineris, tai yra matrica sudaryta iš dešimties inercinių agregatų. Šitokios matricos lengvai leidžia pakelti įrengtąją agregatų galią, o taip pat ir talpą kartu padidėja ir reguliavimo efektyvumas. Norint gauti labai dideles reguliavimo galias, galima sujungti inercinių generavimo agregatų konteinerius į didesnes matricas.

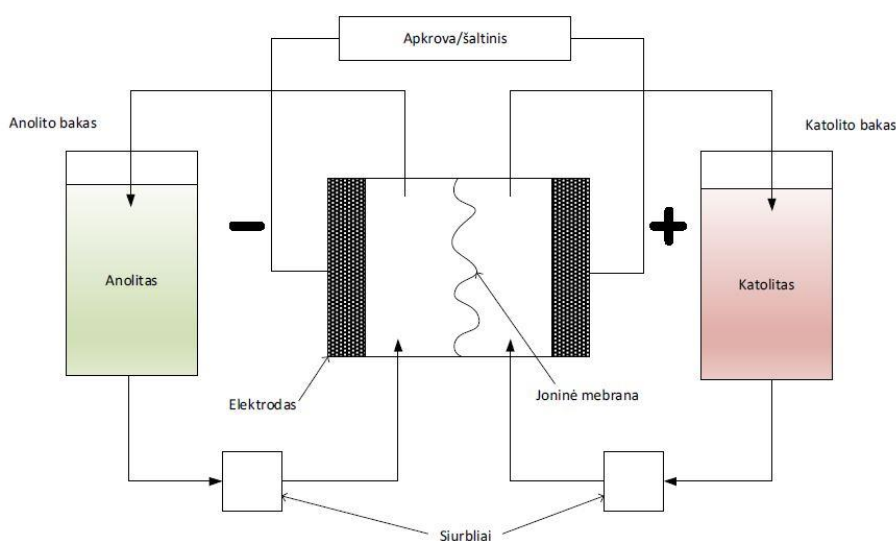
Inercinių generavimo agregatų sistema, kuri yra prijungta pora galios keitiklių, valdant keitiklius atliekamas valdymas (1.7 pav.). Kairėje esantis keitiklis (angl. IGAK) dar yra vadinamas IGA keitikliu. Jis yra skirtas galiai, energijai valdyti. Juo keičiamas smagračio darbo režimas iš variklio į generatorių ir atvirkščiai. Dešinėje esantis keitiklis (angl. IGATK) vadinamas sistemos keitikliu, juo palaikoma tinklo įtampa bei dažnis [28].



1.7 pav. Inercinių generavimo agregatų galios elektronika su energijos kaupimo sistema [28]

## Srauto baterijos

Srauto baterijos, dažnai vadinamos redokso (oksidacijos ir redukcijos) baterijomis. Tai elektrocheminis įrenginys, kuris yra tarpinėje padėtyje tarp įprastų baterijų ir kuro elementų. Kaip ir visos baterijos jos gali būti įkrautos ir gali tiekti energiją, tačiau tik tol, kol yra tiekiamas įkrautas elektrolitas. Šios baterijos turi elektrodus, kurie dalyvauja elektrocheminiame procese bei yra elektronų tekėjimo terpė. Elektrodai neriboja baterijos energijos kaupimo galimybių, o apsprendžia srauto baterijos galią. Elektros energija yra kaupiama ar atiduodama kai vyksta reversinė elektrocheminė reakcija tarp dviejų elektrolitų. Šie elektrolitai pumpuojami atskirais kontūrais, o reakcija vyksta tam pritaikytoje joninėje membranoje (1.8 pav.) [29].



1.8 pav. Srauto baterijos struktūra [29]

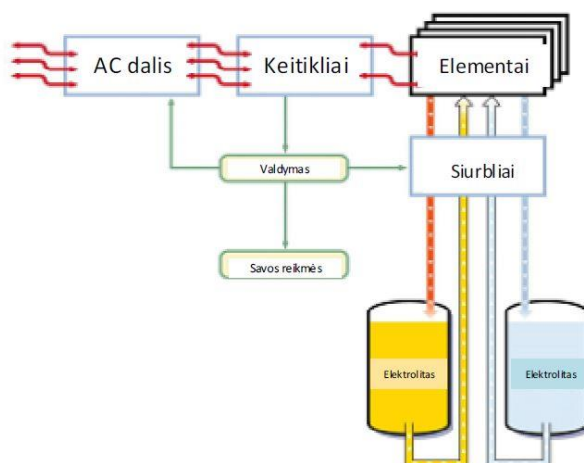
Mažas energijos tankis (25-85 Wh/kg) ir sąlyginai žema elemento įtampa (0,9-2,1 V) (priklausomai nuo naudojamo elektrolito) yra du pagrindiniai šių energijos kaupimo sistemų trūkumai. Tačiau jungiant kelias srauto baterijas į grupes šie trūkumai gali būti greitai išspręsti.

Šių baterijų galią galima pakeisti keičiant elektrodų paviršiaus plotą arba panaudojant kelis dvipolius elektrodus. Kokią energiją (talpą) galima sukaupti priklauso nuo elektrolito kiekio, todėl galima padidinti keičiant elektrolitų rezervuarų tūrį [30]. Srauto baterijų moduliai taip pat gali būti jungiami į grupes (matricas), taip galima gauti didesnes elektros reguliavimo galias. Paprastai šie moduliai sujungiami nuosekliai, taip užtikrinama reikalinga įtampa. Hidrauliškai šie moduliai yra jungiami lygiagrečiai ir naudoja tą patį elektrolitą. Tokiu būdu užtikrinamas visos sistemos vienodas įkrovimo lygis.

Srauto baterijose gali būti skirtingos elektrolitų poros. Dažniausiai naudojamos yra [30]:

- Vanadžio-vanadžio
- Natrio polisulfido-natrio bromido
- Cinko bromido

Srauto baterijos be sutrikimų gali dirbti žemos temperatūros ir slėgio sąlygomis, taip pat elektrolitas gali būti pilnai iškrautas be jokių neigiamų pasekmių srauto baterijų darbui. Tai didelis šių energijos kaupimo sistemų pranašumas lyginant jas su tradicinėmis baterijomis. Elektrocheminiai procesai vykstantys šiose baterijose yra labai greiti, todėl tokių baterijų reakcijos laikas yra mažas ir priklauso nuo galios elektronikos darbo. Jungiant šių baterijų modulius į matricas galima pasiekti megavatų eilės galias, o tokios sistemos nesunkiai gali būti naudojamos elektros sistemų balansavimui (1.9 pav.) [30].



1.9 pav. Srauto baterijų elektrinė [30]

Srauto baterijų pagrindiniai privalumai:

1. veikimas patikimas ir stabilus;
2. aukštas ciklo naudingumo koeficientas siekiantis 75 - 85 %;
3. srauto baterijos energija ar galia gali būti pakeista nepriklausomai viena nuo kitos;
4. labai nedidelis reakcijos laikas (0,001 - 0,01 s.);
5. palyginus ilgas tarnavimo laikas (7-15 metų);
6. elektrolitas gali būti pilnai iškrautas ir įkrautas nepažeidžiant srauto baterijos savybių.

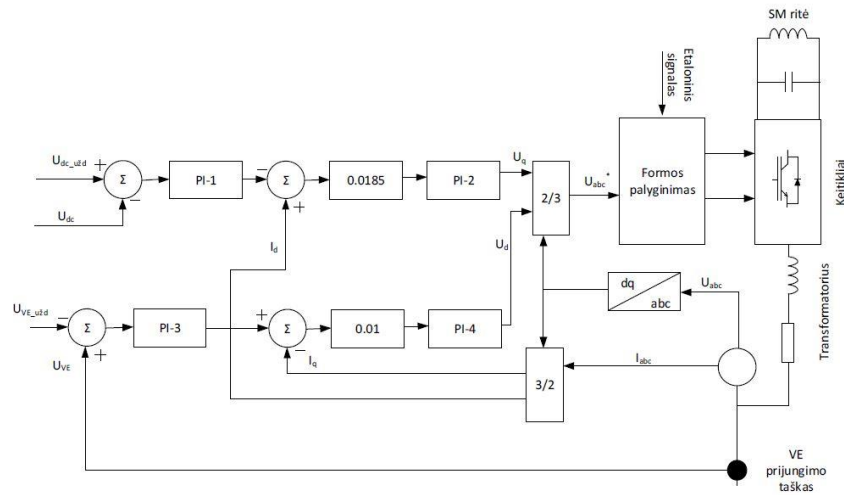
Šios baterijos gali būti pritaikytos:

- kaip atsarginis energijos šaltinis (UPS'as);
- elektros sistemos apkrovos grafiko išlyginimui;
- AEI galios prognozių paklaidų balansavimui;
- visos EES balansavimui;
- elektros energetikos sistemos dažnio nustatytose ribose palaikymui.

Naudojant panašius principus tokios energijos kaupimo sistemos valdomos kaip ir inercinių generavimo agregatų variantu, pasinaudojant galios elektronikos įrenginiais.

## Superlaidžių magnetų energijos kaupimo sistemos

Vienas iš VE ar kitų AEI naudojančių elektrinių balansavimo variantų yra energijos kaupimas į superlaidžių magnetinių medžiagų ritę taip sukaupianti energiją magnetiniame lauke. Šios sistemos pasižymi ilgu tarnavimo laiku, nes jose nėra judančių dalių, mažu reakcijos laiku ir dideliu energijos kaupimo ciklo naudingumu [31]. Aktyvioji arba reaktyvioji galia gali būti generuojama arba suvartojama (kaupiama), priklausomai nuo poreikio, superlaidžių magnetinių medžiagų ritėje, tinkamai ją valdant su galios elektronika. Praktikoje tokių sistemų naudingumas ir reakcijos laikas daugiausiai priklauso nuo galios elektronikos valdymo. Jeigu valdymas stipriai pagerėja tai pagerėja ir tokių sistemų išnaudojimo galimybės. Tokios sistemos sudarytos iš superlaidžios ritės, AC-DC keitiklio, DC-DC pertraukiklio, kondensatoriaus, transformatoriaus ir valdymo elementų (1.10 pav.).



1.10 pav. SMES sistemos valdymas [32]

Kad būtų teisingai valdomas DC/DC pertraukiklis, gautas valdymo signalas lyginamas su pjūkline kreive [32]. Dar vienas būdas kaip valdyti superlaidžių magnetų sistemą ganėtinau yra panašokas į jau ankščiau paminėtą IGA sistemos valdymo variantą pasinaudojant PID reguliatoriumi [33]. Ankščiau paminėtu šios analizuojamos energijos kaupimo sistemos valdymo variantu, reaktyvioji ir aktyvioji galia gali būti reguliuojama teisingai valdant AC/DC keitiklį, keičiant jo moduliacinį indeksą  $M_1$  ir taip pat atidarymo kampą  $\alpha_1$ .

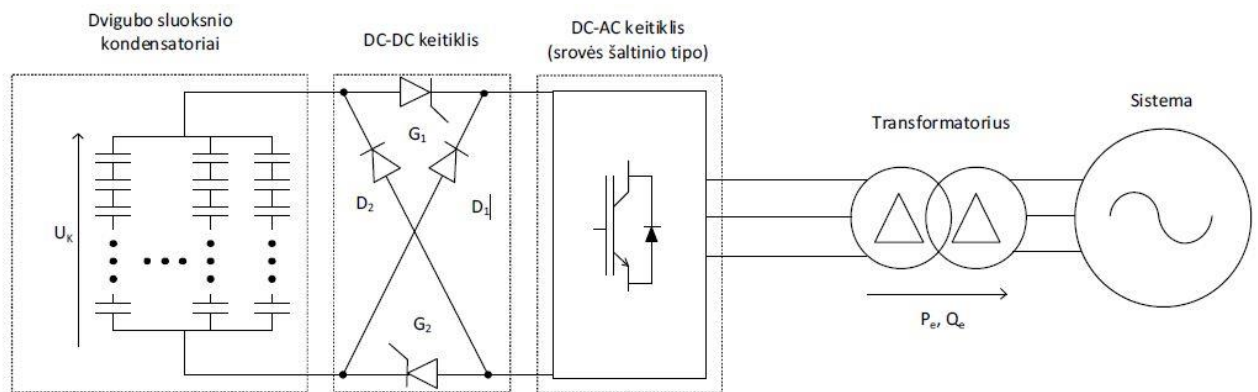
$$P_{SM} = M_1 U_S I_{sm} \cos(\alpha_1) \quad (1.3)$$

$$Q_{SM} = M_1 U_S I_{sm} \sin(\alpha_1) \quad (1.4)$$

čia  $U_S$  – AC šynų įtampa (V),  $I_{sm}$  – DC ritėje (A),  $M_1$  – moduliacinis indeksas,  $\alpha_1$  – keitiklio atsidarymo kampas (°).

## Kondensatorinės energijos kaupimo sistemos

AEI generuojamos galios balansui gerinti gali būti naudojamos dviejų sluoksnių kondensatorių energijos kaupimo sistemos (angl. EDLC). Šios sistemos pasižymi ilgu tarnavimo laiku, nes jose nėra judančių dalių, mažu reakcijos laiku ir dideliu energijos kaupimo ciklo naudingumu [31]. Aktyvioji arba reaktyvioji galia gali būti generuojama arba suvartojama (kaupiama), priklausomai nuo poreikio, superlaidžių magnetinių medžiagų ritėje, tinkamai ją valdant su galios elektronika. Praktikoje tokių sistemų naudingumas ir reakcijos laikas daugiausiai priklauso nuo galios elektronikos valdymo. Jeigu valdymas stipriai pagerėja tai pagerėja ir tokių sistemų išnaudojimo galimybės. Tokios sistemos sudarytos iš superlaidžios ritės, AC-DC keitiklio, DC-DC pertraukiklio, kondensatoriaus, transformatoriaus ir valdymo elementų

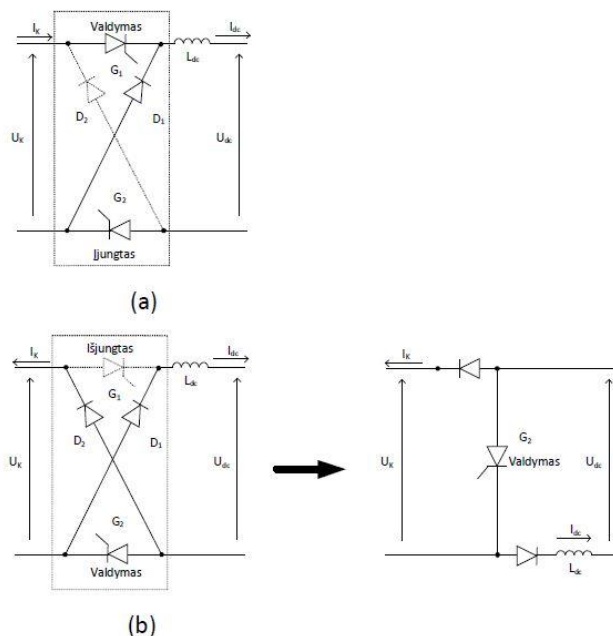


1.11 pav. EDLC energijos kaupimo sistema [34]

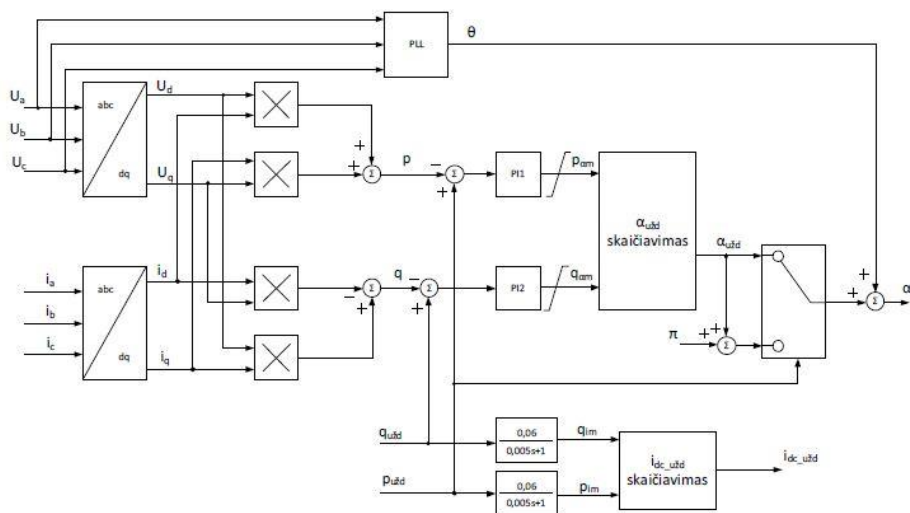
Kad būtų teisingai valdomas DC/DC pertraukiklis, gautas valdymo signalas lyginamas su pjūkline kreive [32]. Dar vienas būdas kaip valdyti superlaidžių magnetų sistemą ganėtinai yra panašokas į jau ankščiau paminėtą IGA sistemos valdymo variantą pasinaudojant PID reguliatoriumi [33]. Ankščiau paminėtu šios analizuojamos energijos kaupimo sistemos valdymo variantu, reaktyvioji ir aktyvioji galia gali būti reguliuojama teisingai valdant AC/DC keitiklį, keičiant jo moduliacinį indeksą  $M_1$  ir taip pat atidarymo kampą  $\alpha$  ir nuolatinę srovę  $i_{dc}$  [34]:

$$\begin{cases} \alpha_{užd} = \tan^{-1} \left( \frac{q_{am}}{p_{am}} \right) \\ i_{acužd} = \sqrt{p_{im}^2 + q_{im}^2} \end{cases} \quad (1.5)$$

čia  $p_{am}$  ir  $q_{am}$  bei  $p_{im}$  ir  $q_{im}$  – aktyv. ir reaktyv. galios dedamosios (W ir Var). Keitiklio atsidarymo kampas yra  $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$  diapazone, dėl to sistemos įkrovimo metu ( $p_{užd} < 0$ ) keitiklio atsidarymo kampas yra  $\alpha^* = \pi - \alpha_{užd}$ . „\*“ žymimas ieškomasis parametras.



1.12 pav. DC-DC keitiklio darbas [34]



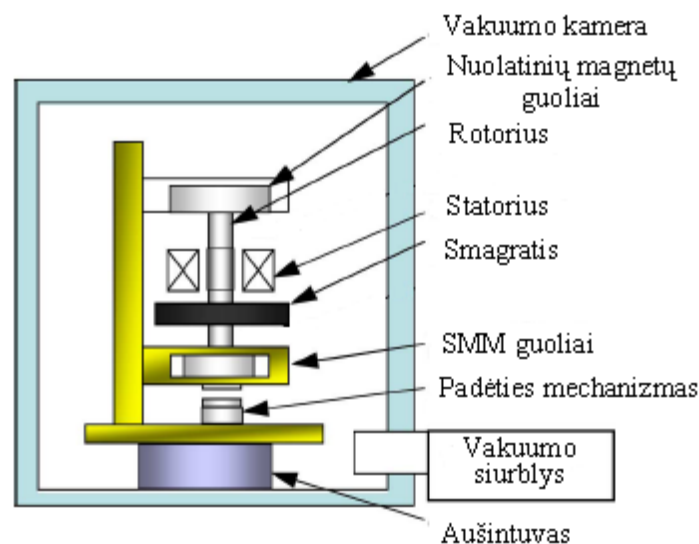
1.13 pav. AC-DC keitiklio valdymas [34]

### Suspausto oro sistemos

Inerciniai generavimo agregatai sudaryti iš dviejų pagrindinių blokų: energijos kaupimo ir konversijos modulio. Pirmąjį, energijos kaupimo modulį galime pavadinti kinetinės energijos kaupimo įrenginiu, kurį sudaro statorius ir rotorius. Jis gali dirbti ir variklio režimu, ir generatoriaus. Tokiu būdu gali arba generuoti arba naudoti energiją tiesiai iš elektros tinklo. Šio įrenginio rotoriaus greičiai yra labai dideli (virš 10000 aps. per min.), jog pasiektų naudingiausią energijos kaupimo būseną.

Modulis kaupiantis energiją, pavaizduotas 1.6 pav., jį sudaro dvi guolių sistemos - nuolatinių magnetų ir taip pat superlaidžių magnetinių medžiagų [15]. SMM guolių sistema yra įmontuota rotoriaus apatinėje dalyje. Ji sudaryta iš superlaidininko ir nuolatinių magnetų (4 vnt.). Tokia sistema gali slopinti besisukančio rotoriaus sukeltus virpesius taip neleidama jam

vibruoti. NM guoliai įrengti rotorius viršutinėje dalyje. Ji valdo besisukančio rotorius poziciją abiejų – vertikaliosios ir horizontaliosios ašių atžvilgiu. Šiame agregate smagratis pagamintas iš tam tikro metalo, tačiau turi sustiprintą anglies ir stiklo pluošto rėmą. Jis yra sumontuotas vidurinėje rotorius dalyje. Apatinėje šio energijai tinkančio kaupimo srityje yra pastatytas aušintuvas, kuris atšaldo superlaidininką iki tam tikros žemos temperatūros. Atšaldžius superlaidininką maždaug iki  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , padėties įrenginys atsiskiria ir rotorius pradeda sukintis be jokio mechaninio kontakto. Visa tai vyksta žemo slėgio terpeje – vakuume ( $6 \cdot 10^{-2}\text{ Pa}$ ). Taip dar labiau sumažinami sukimosi nuostoliai. Statorius atlieka pagrindinės jungties tarp energijos kaupimo ir energijos konversijos modulių vaidmenį inerciniame generavimo agregate. Tai yra įprastas, 3 fazių ir 4 polių (nuolatinių magnetų) įrenginys. Į stiklo pluošto mišinio rėmą yra patalpinti statorius ir rotorius, dėl ko inercinis generavimo agregatas įgauna reikiamą tvirtumą, jam besisukant dideliais greičiais.

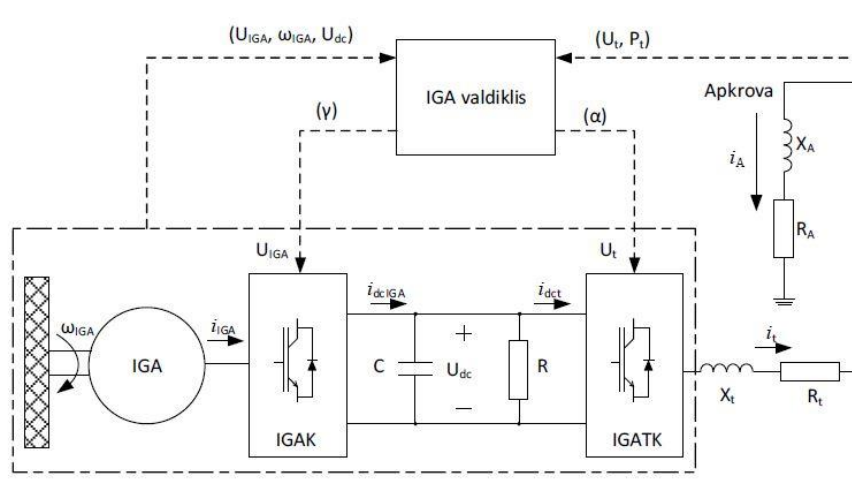


1.6 pav. Energijos kaupimo modulis [27]

Inerciniai generavimo agregatai nėra galingi, todėl didesniai naudingumui gauti juos galima sujungti į matricas. Konteineris, tai yra matrica sudaryta iš dešimties inercinių agregatų. Šitokios matricos lengvai leidžia pakelti įrengtą agregatų galią, o taip pat ir talpą kartu padidėja ir reguliavimo efektyvumas. Norint gauti labai dideles reguliavimo galias, galima sujungti inercinių generavimo agregatų konteinerius į didesnes matricas.

Inercinių generavimo agregatų sistema, kuri yra prijungta pora galios keitiklių, valdant keitiklius atliekamas valdymas (1.7 pav.). Kairėje esantis keitiklis (angl. IGAK) dar yra vadinamas IGA keitikliu. Jis yra skirtas galiai, energijai valdyti. Juo keičiamas smagračio darbo režimas iš variklio į generatorių ir atvirkščiai. Dešinėje esantis keitiklis (angl. IGATK) vadinamas sistemos keitikliu, juo palaikoma tinklo įtampa bei dažnis [28].





1.7 pav. Inercinių generavimo agregatų galios elektronika su energijos kaupimo sistema [28]

## 2. VĖJO ELEKTRINIŲ GALIŲ BALANSAVIMO METODAI

### 2.1 Pagrindiniai balansavimo principai

Pagal elektros energijos tiekimo reikalavimus, kiekvienu laiko momentu elektros energijos gamyba turi atitikti vartojimą. Šio balanso palaikymas yra Perdavimo sistemos operatoriaus uždavinys. Elektros energijos vartojimo galių svyravimai per parą yra žinomi iš praeities, todėl gana tiksliai prognozuojami ir nusakomi apkrovos kreivėmis. Remiantis šiomis kreivėmis nustatomas kitos dienos elektros energijos poreikis ir reikiami generuojančių šaltinių pajėgumai.

Vis daugėjant AEI elektrinių, įprasta tvarka pasikeičia, ypač jeigu naujos atsinaujinančios elektrinės sudaro gana didelę gaminamos elektros energijos dalį. Sistemos balansavimo uždavinys tampa daug sudėtingesnis. Balansuojant laikomasi tokių pagrindinių principų [38]:

1. Pirminio reguliavimo galios rezervas neturi būti mažesnis už didžiausio agregato generuojamą galią, didžiausio VE parko galią ar didžiausią prarandamą galią (N-1 taisyklė) sinchroniniu režimu veikiančioje zonoje.

2. Pirminiame reguliavime nedalyvauja mažos galios hidroelektrinės ir termofikacinės elektrinės ir kombinuoto ciklo elektrinių garo agregatai.

3. Antrinio reguliavimo galios rezervas privalo atkurti pirminio reguliavimo galios rezervo dydį, kompensuoti apkrovų ir VE generuojamų galių kitimus bei paklaidas nuo suplanuotų verčių.

4. Tretinio galios reguliavimo rezervas privalo atkurti pirminio ir antrinio reguliavimo galių rezervus.

5. Dažniausiai pirminiame reguliavime dalyvaujančių agregatų tipinis pirminio reguliavimo galios rezervas yra 5 % agregato vardinės galios. Tik kombinuoto ciklo dujų turbininių agregatų tipinis pirminio reguliavimo galios rezervas lygus 10 % nuo vardinės galios.

6. Kondensacinių elektrinių agregatų antrinio reguliavimo galios rezervas taip pat lygus 5 % agregato vardinės galios, visa veikiančiųjų hidroelektrinių agregatų galia, likusioji iki vardinės ar mažiausios leistinos galios dalis, yra laikoma antrinio reguliavimo galios rezervu.

7. Antrinio reguliavimo galios rezervui priskiriama ir neveikiančių (bet galimų pasileisti) hidroelektrinių agregatų galia.

8. Tretinio reguliavimo rezervu gali būti veikiančių kondensacinių elektrinių galia, likusioji iki vardinės galios, taip pat paleidžiamų dujų turbininių elektrinių agregatų galia.

9. Normalaus režimo hidroelektrinių agregatų galią sąlygoja sanitarinis ar potvynio vandens debitas.

10. Dažnio reguliavime paprastai nedalyvauja mažos galios, įmonių ir biokuro elektrinių agregatai.

11. Visi reguliavimo rezervai skaičiuojami reguliuoti tiek „aukštyn“, tiek ir „žemyn“.

12. Dalyvaujančių reguliavime termifikacinių elektrinių mažiausia nustatyta galia turi būti tokia, kad reguliavimą nustatytu procentu būtų galima vykdyti į abi puses.

13. Vėjo elektrinės paprastai nedalyvauja reguliavimo rezervų palaikyme, nes jų generuojama galia yra atsitiktinio pobūdžio.

Sisteminių paslaugų galios rezervai: pirminio, antrinio ir tretinio reguliavimo galios rezervai gali būti skaičiuojami visai elektros energetikos sistemai arba atskiriems valdymo rajonams. Didžiausią atskirų agregatų ar jų grupių, prijungtų prie vieno šynų, generuojamą galią lemia pirminio reguliavimo rezervo dydis, kuris surandamas sudėjus tą valandą esančių pirminio reguliavimo rezervų dydžius.

Skaičiuojant statistinius vėjo elektrinių generuojamų galių ir apkrovų galių balanso rodiklius (vidutinės reikšmės ir standartinius nuokrypius), apkrovų galios kitimas, vėjo generuojamos galios kitimas ir vėjo generuojamos galios prognozavimas yra laikomi nepriklausomais įvykiais. Tada apkrovų ir vėjo elektrinių generuojamų galių balanso standartinis nuokrypis – vidutinė kvadratinė nuokrypio vertė bus [39]:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_{pVP}^2} \quad (2.1)$$

čia  $\sigma_A$ ,  $\sigma_{pVP}$  – apkrovų galių ir vėjo elektrinių galių prognozavimo standartiniai nuokrypiai (MW).

Antrinio reguliavimo rezervo dydį dėl apkrovų ir vėjo elektrinių generuojamų galių prognozavimo paklaidų  $P_{ARR}$  galima įvertinti pagal apkrovų ir vėjo elektrinių generuojamų galių balanso suminį nuokrypį  $\sigma_{\Sigma}$ :

$$P_{ARR} = 3 \cdot \sigma_{\Sigma} \quad (2.2)$$

Minimali apkrovų ir generuojamų galių balansavimui reikalinga antrinio reguliavimo rezervo galia  $P_{ARRmin}$  gali būti įvertinama pagal ENTSO-E rekomenduojamą išraišką [40]:

$$P_{ARRmin} = \sqrt{a \cdot P_{Amax} + b^2} - b \quad (2.3)$$

čia  $P_{Amax}$  – didžiausia tiriamojo sezono apkrovos galia (MW),  $a$ ,  $b$  – empirinės parametru reikšmės.

Šiame skyriuje aprašytas reguliavimo rezervų galių nustatymas yra paremtas statistinių duomenų analize. Tokiu būdu nustačius reikiamas sumines elektrinių reguliavimo arba vėjo elektrinių balansavimo galias, ne mažiau svarbus uždavinys yra tinkamas šių galių valdymas ir paskirstymas. 2.3 skyriuje pasiūlytas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis, kuris įvertina skirtingas pradinio signalo dažnio dedamąsias ir balansuojančių šaltinių galios keitimo greičių charakteristikas.

## 2.2 Automatinio generavimo valdymo sistemos balansavimo galių paskirstymas

Elektrinių generuojamos galios gali būti reguliuojamos rankiniu arba automatiniu būdu. Siekiant užtikrinti efektyvų galių valdymą realiu laiku yra naudojama automatinio generavimo valdymo (AGV) sistema. Pagrindinis AGV sistemos tikslas yra palaikyti pastovią nustatytą elektros energetikos sistemos dažnio vertę ir suplanuotas elektros energetikos sistemos tarpsteminėms srautų vertes, reguliuojant generatorinių agregatų, dalyvaujančių šios sistemos veikime, generuojamas galias. Tokiu būdu yra balansuojamos, generuojamos ir vartojamos EES galios. Šis uždavinys dažnai vadinamas sistemos galios-dažnio valdymu panaudojant antrinių sistemos reguliatorių [43]. Vėjo elektrinių generuojama galia pasižymi nepastovumu ir priklauso nuo to laiko momentu prieš vėjo elektrinės turbiną esančio vėjo greičio. Dėl šios priežasties vėjo elektrinių generuojamos galios turi neigiamą įtaką sistemos dažnio ir balanso stabilumui. Kiekvieno elektros energetikos sistemos valdymo rajono ar bloko paklaida ( $G_i$ ) turi būti nuolat

reguliuojama iki nulio. Ji lygi galios valdymo paklaidos ( $\Delta P_i$ ) ir dažnio valdymo paklaidos ( $K_i \cdot \Delta f$ ) sumai [44]:

$$G_i = \Delta P_i + K_i \cdot \Delta f \quad (2.4)$$

čia valdymo rajono ar bloko galios valdymo paklaida  $\Delta P_i$  yra lygi visų iš rajono ar bloko ištekantių aktyviosios galios srautų sumos ir valdymo programos galių (planuotų ištekantių aktyviosios galios srautų sumos) skirtumui (MW). Valdymo rajono ar bloko dažnio valdymo paklaida  $K_i \cdot \Delta f$  yra lygi dažnio nuokrypio ir valdymo rajono ar bloko  $K_i$  koeficiento sandaugai (MW).

Valdymo rajono ar bloko antrinio galios reguliavimo  $K_i$  koeficientas yra lygus valdymo rajono dalyvavimo faktoriaus ( $C_i$ ) ir suminės sistemos galios–dažnio charakteristikos ( $\lambda_\Sigma$ ) sandaugai  $K_i = C_i \cdot \lambda_\Sigma$  (MW/Hz).

Kiekvieno generatorinio agregato, dalyvaujančio AGV sistemos veikime, generuojamos galios užduotis yra skaičiuojama priklausomai nuo valdymo rajono paklaidos bei to agregato dalyvavimo uždavinyje faktoriaus [44]:

$$P_{Gi} = P_{Gpi} \pm G_{iN} \cdot K_{GNi} \pm G_{iA} \cdot K_{GAi} \quad (2.5)$$

čia  $P_{Gi}$  – i-ojo generatoriaus skaičiuojama galios užduotis (MW),  $P_{Gpi}$  – pradinė i-ojo generatoriaus generuojama galia, nustatoma atlikus ekonominius galios paskirstymo skaičiavimus (MW),  $G_{iN}$  – i-ojo valdymo rajono paklaidos dedamoji normaliam sistemos reguliavimui (MW),  $G_{iA}$  – i-ojo valdymo rajono paklaidos dedamoji avariniam sistemos reguliavimui (MW),  $K_{GNi}$  – i-ojo generatoriaus dalyvavimo faktorius normaliam sistemos reguliavimui,  $K_{GAi}$  – i-ojo generatoriaus dalyvavimo faktorius avariniam sistemos reguliavimui.

Kaip matyti iš (2.5) formulės, kiekvienas generatorius gali dalyvauti galių reguliavime tiek normalaus, tiek ir avarinio sistemos darbo atveju, be to, pradinė generuojama galia gali būti nustatyta remiantis ekonominiais galios paskirstymo skaičiavimais [45]. Ekonominiai galios paskirstymo skaičiavimai remiasi generatoriaus galios padidinimo sąnaudų metodu, kai labiau apkraunami mažesnes sąnaudas turintys generatoriniai agregatai. Agregatų, dalyvaujančių ekonominio galių paskirstymo uždavinyje, ekonominio reguliavimo faktoriai suskaičiuojami taip [46]:

$$k_{GEi} = \frac{\left(\frac{1}{S_i}\right) \cdot a}{\sum K S_k} \quad (2.6)$$

čia  $S_i$  – i-ojo generatoriaus galios padidinimo sąnaudų kreivės koeficientas (liestinė) pradinės generuojamos galios taške,  $S_k$  – generatorių, dalyvaujančių ekonominio galios paskirstymo uždavinyje, sąnaudų kreivių koeficientai,  $a$  – ekonominiame galios paskirstyme dalyvaujančių generatorinių agregatų galios keitimo greičių dalis nuo visų AGV sistemoje dalyvaujančių agregatų greičių sumos.

Ekonominio galios paskirstymo uždavinyje dalyvaujančių generatorinių agregatų galios keitimo greičių dalis nuo visų automatinio generavimo valdymo sistemoje dalyvaujančių agregatų greičių sumos išreiškiama [46]:

$$a = \frac{R_E}{R_E + R_{N,Av} + R_I} \quad (2.7)$$

čia  $R_E$  – generatorinių agregatų, dalyvaujančių ekonominiame galios paskirstyme galios keitimo greičių suma (MW/min),  $R_{N,Av}$  – generatorinių agregatų, dalyvaujančių normaliaame ir avariniame sistemos reguliavime galios keitimo greičių suma (MW/min),  $R_I$  – generatorinių agregatų, kurie, skaičiuojant dalyvavimo faktorius, keičia savo generuojamą galią dispečerio užduotu greičiu, skirtumų nuo maksimalių galios keitimo greičių suma (MW/min).

Generatorinių agregatų, kurie dalyvauja galių reguliavime normalių elektros energetikos sistemos darbo režimų metu, dalyvavimo faktoriai apskaičiuojami taip [46]:

$$k_{GNI} = \frac{R_i \cdot (1-a)}{(R_{N,Av} + R_I)} \quad (2.8)$$

čia  $R_i$  – i-ojo generatoriaus galios keitimo greitis (MW/min).

Generatorinių agregatų dalyvavimo automatinio generavimo valdymo sistemos veikime faktoriai vertinant ir sistemos dispečerio užduotus dalyvavimo faktorius apskaičiuojami taip [46]:

$$k_{GNI} = \begin{cases} k_{GDi} \cdot k_{GEi} \\ k_{GDi} \cdot k_{GNI} \end{cases} \quad (2.9)$$

čia  $k_{GDi}$  – generatorinio agregato dalyvavimo faktorius, užduotas sistemos dispečerio.

Avarinio galios reguliavimo dalyvavimo faktoriai taikomi nepriklausomai nuo to, ar agregatas dalyvauja normaliaame ir ekonominiame galios reguliavime, ir yra suskaičiuojami taip [46, 10]:

$$k_{GAi} = \frac{R_i}{\sum_A R_a} \quad (2.10)$$

čia  $\sum_A R_a$  – generatorinių agregatų, dalyvaujančių avariniame sistemos reguliavime, galios keitimo greičių suma (MW/min).

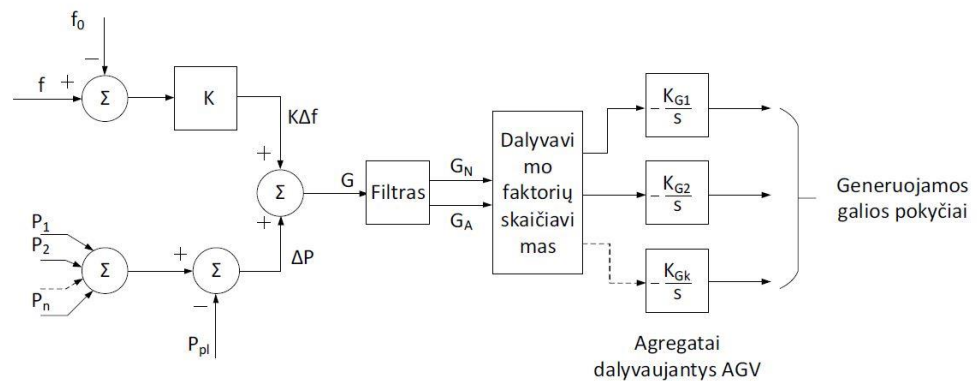
Vertinant sistemos dispečerio užduotus dalyvavimo faktorius, avariniame sistemos reguliavime dalyvaujančių generatorinių agregatų dalyvavimo faktoriai suskaičiuojami taip [46]:

$$k_{GAi} = \frac{k_{GAi} \cdot k_{GDi}}{\sum_K k_{GAk}} \quad (2.11)$$

čia  $\sum_K k_{GAk}$  – generatorinių agregatų, dalyvaujančių avariniame sistemos reguliavime, dalyvavimo faktorių suma.

Pažymėtina, kad visų automatinio generavimo valdymo sistemos veikime dalyvaujančių generatorinių agregatų dalyvavimo faktorių suma turi būti lygi vienetui.

Valdymo rajono paklaidos dedamosios normaliam ( $G_{iN}$ ) ir avariniam ( $G_{iA}$ ) sistemos reguliavimui gaunamos atitinkamai filtruojant pradinę valdymo rajono paklaidą ( $G_i$ ), panaudojant žemų dažnių filtrą. 2.2 paveiksle pateikta AGV sistemos struktūrinė schema [43].



2.2 pav. AGV sistemos struktūrinė schema [43]

Išnagrinėjus šią galių paskirstymo metodiką matyti, kad didžiausi generuojamos galios pokyčiai tenka greičiausiems agregatams (didžiausi dalyvavimo faktoriai), todėl energijos kaupimo sistemos dėl labai gerų galios keitimo greičio charakteristikų gautų dideles generuojamos galios keitimo užduotis ir būtų staigiai iškrautos arba jų talpos ir įrengtosios galios parametrų vertės turėtų būti labai didelės ir būtų ekonomiškai nenaudingos. Be to, dabartinis automatinio generavimo valdymo sistemos veikimas nevertina elektrinių reguliavimo intensyvumo, o tai reiškia elektrinių galios keitimą maksimaliais leistinais greičiais, kas labiau dėvi elektrinių įrangą bei didina išlaidas kurui ir remontui.

Atsižvelgiant į aukščiau paminėtas priežastis dėl energijos kaupimo sistemų integravimo į AGV veikimą ir elektrinių reguliavimo intensyvumo, būtina patobulinti automatinio generavimo valdymo sistemos veikimą ir galių paskirstymo metodiką, siekiant sklandžios tolimesnės vėjo elektrinių plėtros ir energijos kaupimo sistemų integracijos, nepakenkiant stabiliam visos elektros energetikos sistemos darbui.

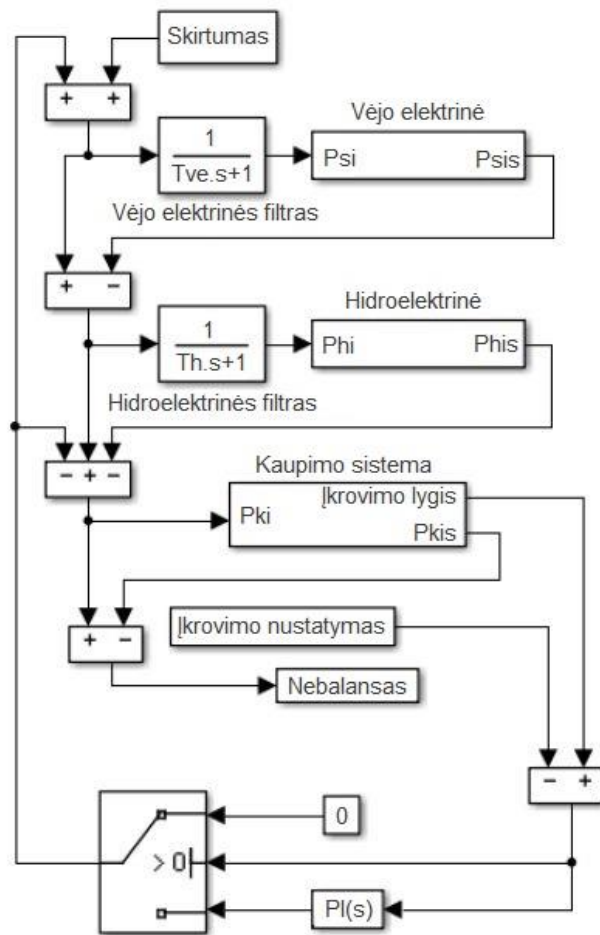
### **2.3 Dinaminis modelis skirtas galios balansavimo valdymui**

Šiame darbe sudarytas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis apima generuojančių šaltinių – hidroelektrinių dalis, kurios gali balansuoti elektros energetikos sistemas (AEI naudojančių elektrinių generuojamas galias ir apkrovų galių kitimus), vėjo elektrines, kurios dirba nusikrovę palaikydamos tam tikrą galios rezervą ir energijos kaupimo sistemas. Balansavimo šaltiniams (vėjo elektrinei ir hidroelektrinei bei energijos kaupimo sistemai) valdyti yra panaudojamos skirtingos pradinio signalo (skirtumo tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių ar apkrovų galių) kitimo greičio dedamosios. Šiam tikslui naudojami filtrai, esantys prieš vėjo elektrinių ir hidroelektrinių dalis – „Vėjo Elektrinės filtras“ ir „Hidroelektrinės filtras“. Balansavimo galių valdymo dinaminio modelio struktūra pateikta 2.1 paveiksle. Modelio sudarymui pasirinkta MatLab SIMULINK dinaminio modeliavimo aplinka. Vėjo elektrinių ir hidroelektrinių dinaminiai modeliai sudaryti pagal šioms elektrinėms būdingas savybes. Pažymėtina, kad šių elektrinių ir energijos kaupimo sistemų modeliai nebuvo tobulinami šiame darbe, o buvo sudaryti naudojant kitų autorių [41, 42] aprašytus metodus. Elektrinių dalys, atitinkamai pažymėtos 2.1 paveiksle – „Vėjo elektrinė“ ir „Hidroelektrinė“. Energijos kaupimo sistema modeliuojama universaliu dinaminio modeliu, kuris yra pritaikytas vėjo elektrinių generuojamų galių balansavimui. Šis modelis sudarytas naudojant mažesnę dinaminio parametrų skaičių [42]. Energijos kaupimo sistemos dalis 2.1 paveiksle atitinkamai pažymėta „Kaupiklis“.

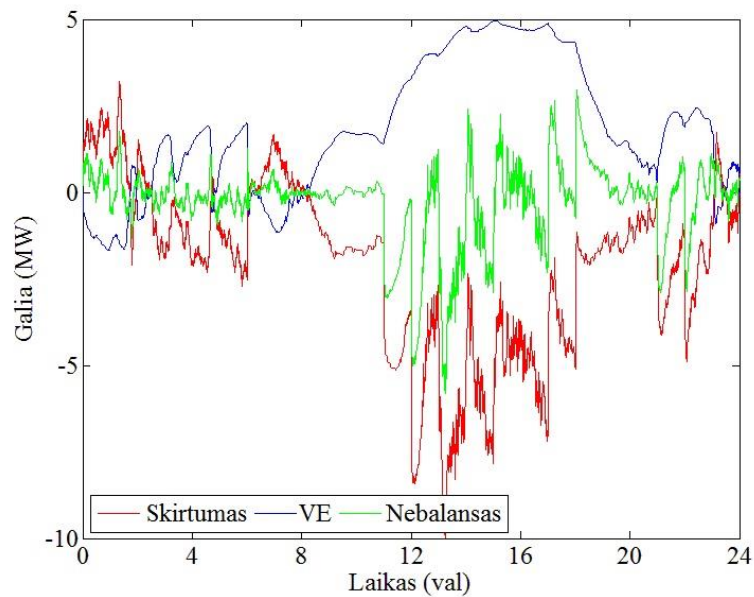
Skirtumai tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių, sistemos apkrovos ar sistemos saldo (2.1 paveiksle dalis „skirtumas“) yra balansuojamas pačios vėjo elektrinės, hidroelektrinės ir energijos kaupimo sistemos. Likęs galių skirtumas po tokios sistemos darbo fiksuojamas dalyje „nebalansas“. Jei elektrinių ir energijos kaupimo sistemos bei filtrų parametrai parinkti teisingai, o reguliavimo rezervų galios pakankamos, likęs galių skirtumas yra lygus nuliui.

Proporcinis integralinis valdiklis „PI(s)“ modelyje naudojamas tinkamam energijos kaupimo sistemos įkrovimo lygiui palaikyti. PI valdiklis pasirinktas dėl savo paprastumo ir tikslumo. Energijos kaupimo sistemos įkrovimo lygį stengiamasi palaikyti apie vidurinę įkrovimo vertę ( $E_{maks}/2$ ) tam, kad būtų galima atlikti reguliavimą tiek teigiama, tiek ir neigiama

kryptimis. Energijos kaupimo sistemoje susidariusiems nuostoliams kompensuoti yra naudojama vėjo elektrinių ir hidroelektrinių energija.

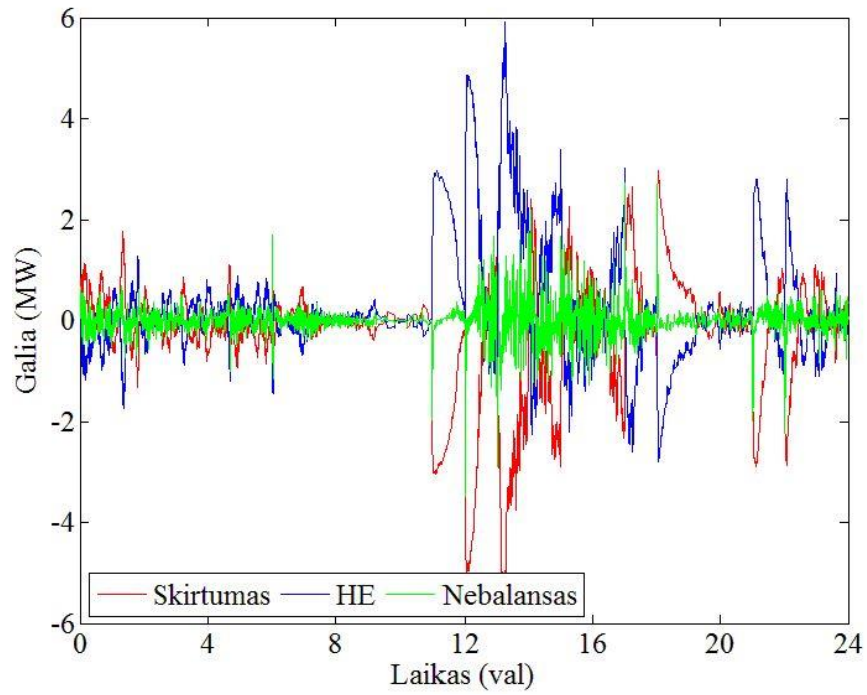


2.1 pav. Balansavimo galių valdymo dinaminis modelis

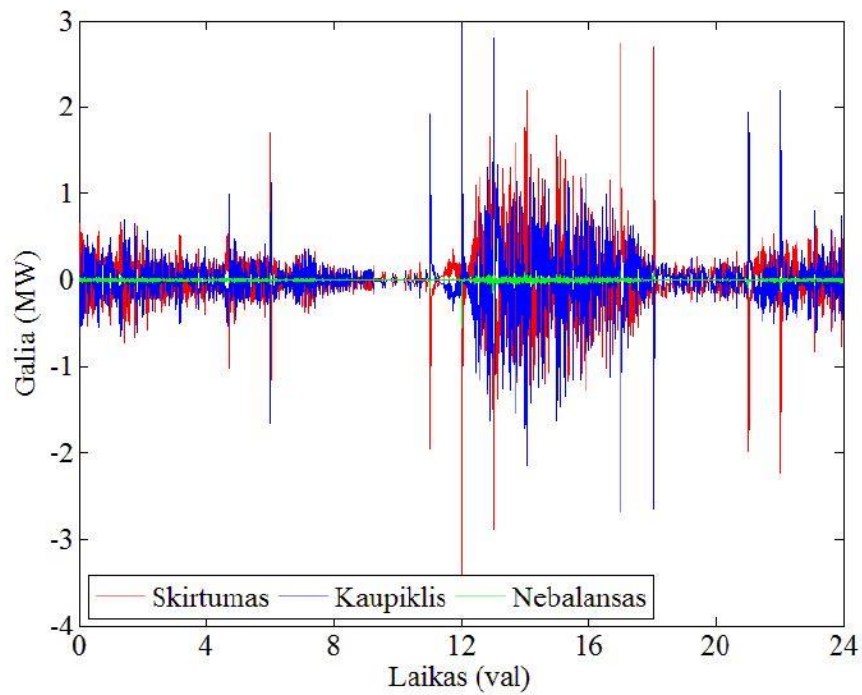


2.2 pav. Vėjo elektrinės darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumą nuo planuotų verčių

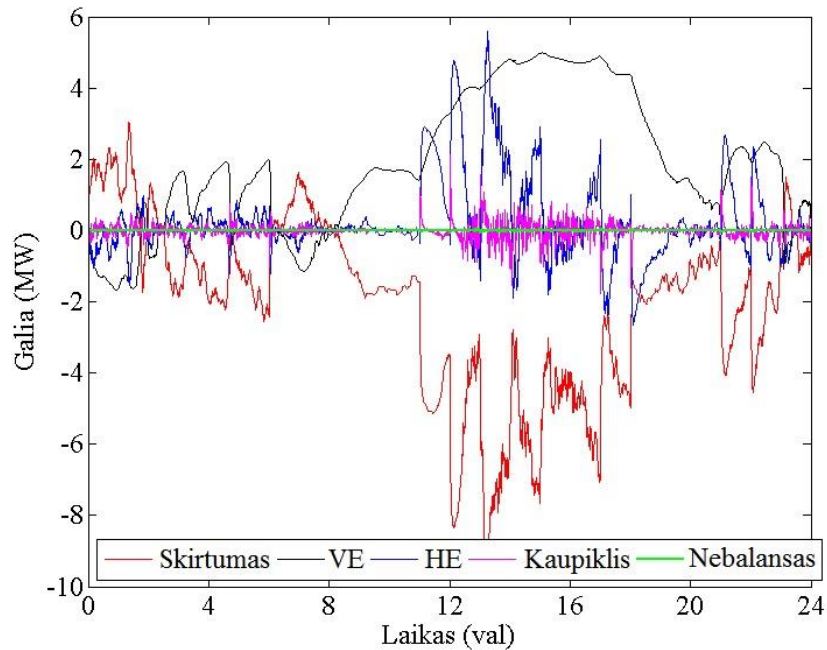




2.3 pav. Hidroelektrinės darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuotų ir prognozuotų galių skirtumus



2.4 pav. Energijos kaupimo sistemos darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuotų ir prognozuotų galių skirtumus



2.5 pav. Balansavimo galių valdymo dinaminio modelio darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumus nuo prognozuotų verčių

### 3. DIDELĖS GALIOS VĖJO ELEKTRINIŲ DALYVAVIMO PAPILDOMŲ PASLAUGŲ RINKOJE TYRIMAS

#### 3.1 Vėjo elektrinių darbo tiekiant aktyviosios galios rezervą tyrimas

Tam, kad įvertinti didelės galios vėjo elektrinių technines galimybes ir ekonominį naudingumą tiekiant aktyviosios galios rezervą, naudojamą dažnio valdymui, skaičiavimai bus atliekami panaudojant realų vėjo greitį ir sumodeliuotą elektrinę. Tai mums leidžia palyginti elektrinės darbą nepilna galia, įvertinant nuostolius (prarastos pajamos už neparduotą elektros energiją), su normaliu vėjo elektrinės darbu nedalyvaujant papildomų paslaugų rinkoje.

Šiam tyrimui atlikti, parinkti trijų skirtingų vietovių realūs 2014 metų valandiniai vėjo greičio duomenys, paimti iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenų bazės: Kaunas (žemynas), Klaipėda (pakrantė) ir Baltijos jūra (priekrantė). Pasirinktos vietovės yra toje pačioje klimato juostoje ir atspindi tipines Lietuvos vėjo charakteristikas. Naudojami duomenys yra gauti kas valandą matuojant 10 minučių vidutinį vėjo greitį, 10 metrų aukštyje. Turimi vėjo greičiai perskaičiuojami kiekvienai turbina, priklausomai nuo jos stebulės aukščio:

$$V=V_1(Z/Z_1)^B \quad (3.1)$$

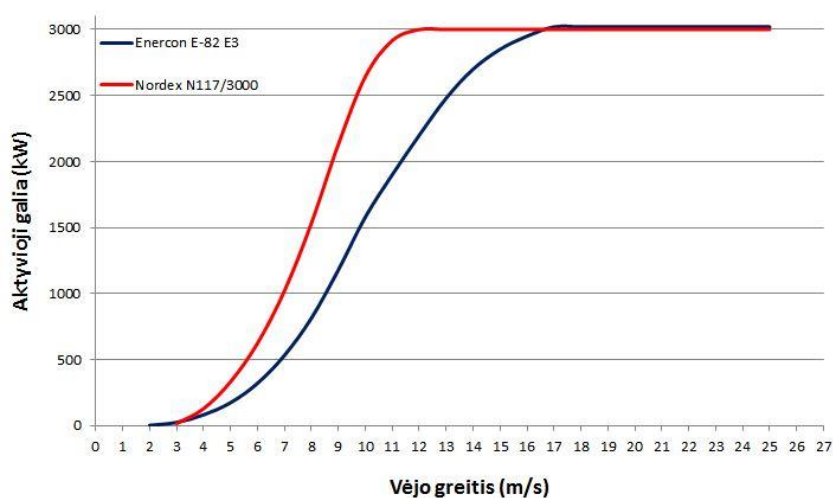
čia  $V_1$  – žinomas vėjo greitis (m/s)  $Z_1$  aukštyje (m),  $V$  – skaičiuojamasis vėjo greitis (m/s)  $Z$  aukštyje (m),  $\beta$  - šiurkštumo koeficientas priklausantis nuo žemės paviršiaus pobūdžio. Klaipėdos ir Kauno atveju šiurkštumo koeficientas pasirinktas 0,077, o Baltijos jūroje – 0,01.

Skaičiuojamasis modelis sukurtas dviejų skirtingų tipų turbinoms. Pirmuoju atveju skaičiavimai yra atlikti Enercon E-82 E3 3MW turbinai, kurios stebulės aukštis yra 98 metrai, o galios kreivė atvaizduota 3.1 pav. Ši turbina yra tinkama gana mažiems vėjo greičiams, elektros energija pradeda generuoti pasiekus vos 2 m/s. Pučiant stipriam vėjui ši turbina išsijungia ties 28 m/s riba, tačiau su įdiegta „Storm control“ įranga turbina gali dirbti iki 34 m/s.

Antroji turbina dalyvaujanti skaičiavimuose pasirinkta kito gamintojo. Taigi tie patys skaičiavimai bus atliekami antrai tyrime dalyvaujančiai turbinai – Nordex N117/3000 3 MW, kurios galios kreivė parodyta 3.1 pav. Kadangi rotorius skersmuo Nordex turbinos yra didesnis, ją įsukti reikalinga didesnė jėga, todėl turbina pradeda generuoti elektros energiją prie 3 m/s vėjo greičio. Šios turbinos stebulės aukštis yra šiek tiek mažesnis ir siekia 91 metrą, bet dėl labai mažų šiurkštumo koeficientų šis skirtumas nevertinamas. Paskaičiuotas naudingumo koeficientas ir laikas procentais, esant tinkamam vėjo greičiui turbinai dirbti nominalia galia, naudojant turimus vėjo greičio duomenis (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Naudingumo koeficientas ir laikas veikiant nominalia galia

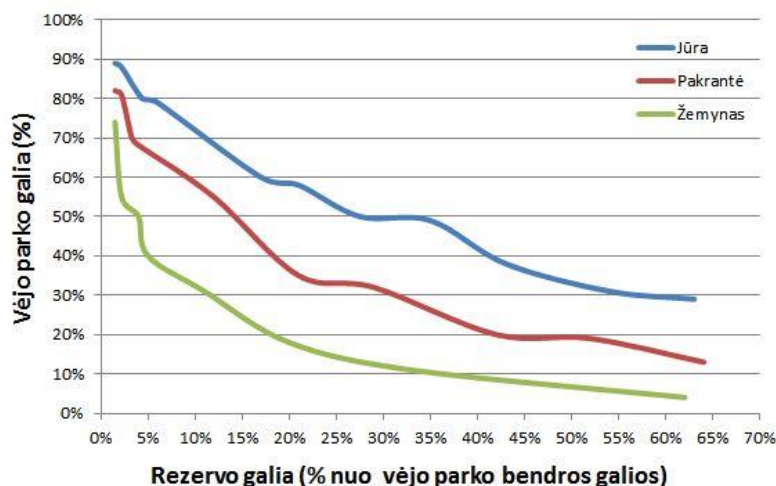
|          | Naudingumo koeficientas, % |        | Laikas veikiant nominalia galia, % |        |
|----------|----------------------------|--------|------------------------------------|--------|
|          | Enercon                    | Nordex | Enercon                            | Nordex |
| Žemynas  | 8,70                       | 14,98  | 0,00                               | 0,54   |
| Pakrantė | 12,16                      | 21,02  | 0,71                               | 3,07   |
| Jūra     | 25,86                      | 42,46  | 1,28                               | 7,22   |



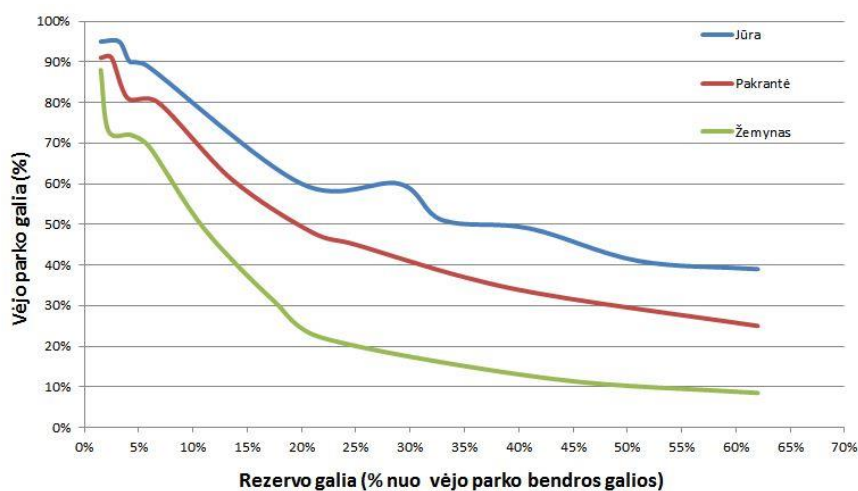
3.1 pav. Enercon E-82 E3 ir Nordex N117/3000 galios kreivės [47, 48]

Sekantis žingsnis - sudaryti viso vėjo elektrinių parko galios kreives. Tai yra gana sudėtinga, nes daug turbinų apimanti kreivė nėra tiesiog suma atskirų turbinų sudarančių parką, reikia įvertinti ir pasileidimo poveikį tarp visų turbinų. Šis poveikis sušvelnina apibendrintą galios kreivę: minimalus greitis sumažėja, maksimalus greitis padidėja, o kreivės trajektorija tampa labiau iškraipyta esant vėjo greičiams artimiems nominaliam. Šiuo atveju, tyrime naudojama kreivė yra be šių korekcijų, nes jokie papildomi duomenys nėra pasiekiami. Tai galima pateisinti tuo, kad vėjo elektrinei neesant labai aukštai virš žemės paviršiaus, tokie kreivę sušvelninantys efektai išlieka minimalūs, nes dideli vėjo greičiai viršijantys maksimalų turbinos greitį būna labai retai.

Remiantis galios kreive, vėjo greičiai perskaičiuojami į vėjo elektrinės aktyviąją galią. Turint šiuos duomenis galima paskaičiuoti teorinę galimybę elektrinei dirbti nusikrovus. 3.2 paveiksle (Enercon) ir 3.3 paveiksle (Nordex) pavaizduotas elektrinės darbas nusikrovus skirtingais dydžiais (išreikštais procentais nuo nominalios elektrinės galios). Pirmiausia, galime pastebėti didelį skirtumą tarp trijų skirtingų vietovių. Kaip parodyta 3.2 lentelėje, šį skirtumą nulemia didesni ir pastovesni vėjo greičiai jūrinėje teritorijoje negu sausumoje. Sekantis pastebimas skirtumas yra tarp dviejų skirtingų tipų turbinų Enercon ir Nordex. Didesnis turbinos našumas pasiekiamas būtent Nordex turbinos, nors jos minimalus greitis ir didesnis, bet prie mažesnių vėjo greičių reikšmių pasiekia nominalią galią (galios kreivė statesnė). Trečiasis pastebėjimas - didėjant vėjo elektrinės parkui, rezervo galimybės vienodėja. Taip nutinka dėl to, kad nepriklausomai nuo elektrinės parko dydžio, būna tokie laiko momentai, kai vėjo greitis yra per mažas ir elektros energija nėra gaminama. Tačiau svarbiausia išvada yra ta, kad 10 MW galios rezervas (minimalus rezervas kai kuriose šalyse) gali būti tiekiamas pasirinkus didesnę vėjo elektrinių parką. Ir tai nebūtinai turi būti jūrinė vėjo elektrinė, gali būti ir pakrantės teritorijoje stovinti elektrinė su tinkamai parinktomis turbinomis.



3.2 pav. Enercon turbinos galios rezervo (%) priklausomybė nuo VE galios (%)



3.3 pav. Nordex turbinos galios rezervo (%) priklausomybė nuo VE galios (%)

3.2 lentelė. Reikalingas parko dydis 5 ir 10 MW rezervui palaikyti, kai VE dirba 70 % galia

|  | Žemynas |        | Pakrantė |        | Jūra    |        |
|--|---------|--------|----------|--------|---------|--------|
|  | Enercon | Nordex | Enercon  | Nordex | Enercon | Nordex |
| Vidutinis vėjo greitis (m/s)             | 4,51    |        | 5,29     |        | 5,83    |        |
| Parko dydis kai dirba 70 % galia (5 MW)  | 461     | 107    | 175      | 68     | 60      | 28     |
| Parko dydis kai dirba 70 % galia (10 MW) | 930     | 214    | 324      | 131    | 98      | 61     |

Taigi VE galios rezervas, siekiantis 10 % nominalios galios, gali būti pasiektas jai veikiant 32%, 58% ir 72% galia su Enercon pagaminta turbina atitinkamai žemyne, pakrantėje ir jūroje. Nordex turbinai šie skaičiai išauga iki 52 %, 71% ir 80% (3.3 lentelė).

3.3 lentelė. VE galia procentais išlaikant 5 ir 10 MW rezervą

| %        | 10 MW   |        | 5 MW    |        |
|----------|---------|--------|---------|--------|
|          | Enercon | Nordex | Enercon | Nordex |
| Žemynas  | 32,07   | 51,55  | 39,23   | 67,21  |
| Pakrantė | 58,48   | 70,87  | 63,79   | 80,16  |
| Jūra     | 72,31   | 80,11  | 81,75   | 87,50  |

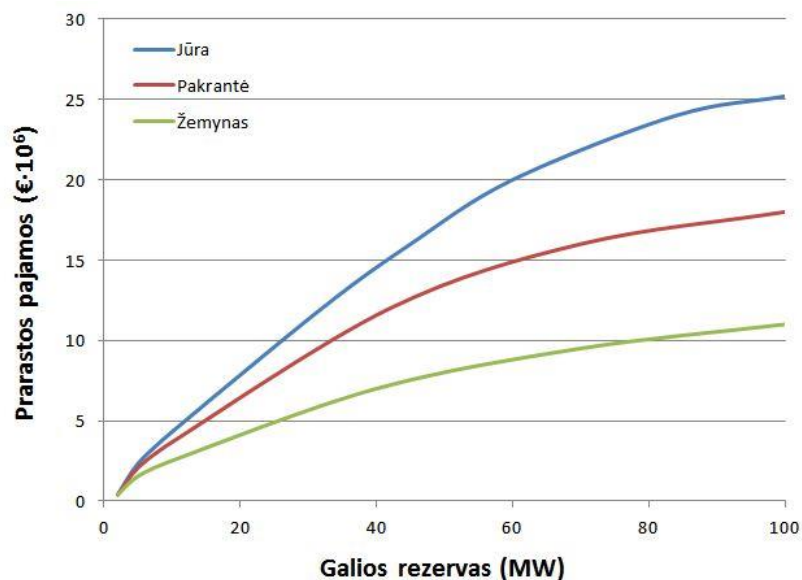
Iš 3.2 ir 3.3 lentelių matosi, kad aktyviosios galios rezervo pasiekiamumas žymiai išauga jeigu jis sumažinamas iki 5 MW. 5 MW aktyviosios galios rezervas galėtų būti pritaikytas tik reguliavimui žemyn arba tik aukštn.

Svarbus šio modelio supaprastinimas yra tai, jog daroma prielaida, kad rezervinė elektrinės galia pasiekama realiu laiku. Iš tikrųjų rezervo galia būtų nupirkta diena prieš, kur galimos prognozavimo paklaidos. Kita vertus pasiūlymą galima koreguoti, tik likus valandai iki operatyvinės valandos visi koregavimai uždraudžiami, taip šis neigiamas poveikis būtų sumažintas.

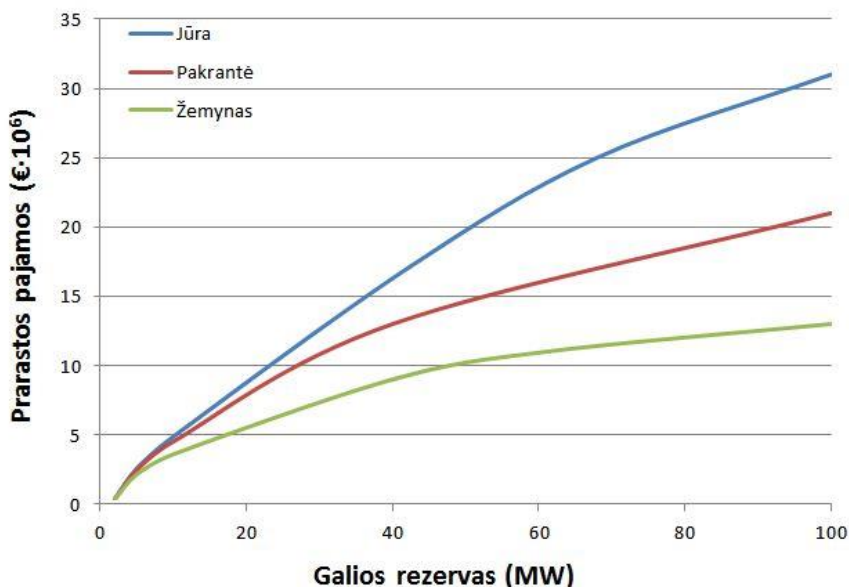
### **3.2 Tyrimo ekonominis įvertinimas**

Praeitame skyriuje gauta išvada, kad galios rezervų pasiekiamumas yra užtenkamas vėjo elektrinių dalyvavimui papildomų paslaugų rinkoje. Pavyzdžiui, kaip parodyta 3.2 lentelėje, protingai parinkus parko dydį, galima pasiekti daugiau nei 70 % naudingumą ir turėti rezervą, kurį galima parduoti perdavimo tinklo operatoriui. Pagrindinė problema dabar yra - ar tai taip pat naudinga ir iš ekonominės pusės? Vėjo elektros gamintojas rezervo rinkoje dalyvaus savanoriškai, jeigu pajamos, kurias gaus už rezervo tiekimą, bent jau padengs papildomas išlaidas. Tos išlaidos yra prarastos pajamos už neparduotą energiją. Jos priklauso nuo tuometinės elektros kainos, vėjo parko naudingumo ir rezervo dydžio.

Šiuo atveju bus remiamasi Lietuvos rinkos situacija. VE savininkas gali sudaryti sutartį su sistemos operatorium dėl galios rezervo 10 MW bloko: 5 MW reguliavimo žemyn ir 5 MW reguliavimo aukštyn. Šiuo atveju prarastos pajamos paskaičiuojamos valandai ir apibendrinamos visiems metams. Prarastos pajamos priklauso nuo elektros kainos. Tyrime naudojamos valandinės elektros kainos (Nord Pool Spot), nes vidutinės kainos iškraipytų rezultatus, kadangi kaina yra aukštesnė dieną negu naktį (kai pagaminama mažiau vėjo). Pagrindinė problema su Nord Pool Spot duomenimis yra ta, kad realybėje elektra yra parduodama sudarant ilgalaikius kontraktus, kurie yra pigesni dėl mažesnės rizikos. Vidutinė elektros kaina 2014 metais buvo 50,13 €/MWh. Išlaidos rezervams išlaikyti kaip rezervo dydžio funkcija pavaizduota 3.4 ir 3.5 paveiksluose. Rezultatai rodo, kad galimos išlaidos auga kartu su rezervo dydžiu, naujesnėms turbinoms ir vietovė artimesnė jūrai. Tai galima paaiškinti faktu, kad prarasti kaštai išauga su didesniu naudingumu.



3.4 pav. Rezervo palaikymo kainos (€·10<sup>6</sup>) priklausomybė nuo rezervo dydžio (MW), kai Enercon vėjo elektrinės galia 100 MW



3.5 pav. Rezervo palaikymo kainos (€·10<sup>6</sup>) priklausomybė nuo rezervo dydžio (MW), kai Nordex vėjo elektrinės galia 100 MW

Be to, visi techniniai reikalavimai, kurie gali būti įvykdyti, kad palengvinti vėjo elektrinių rezervinių galių tiekimą, yra palyginti brangūs. Kadangi vėjo energetikoje nėra kuro sąnaudų, tai negaminant elektros energijos prarandami dideli pinigai (3.4 lentelė). Kainos, kurias mokėtų PSO už rezervo tiekimą turėtų būti gana didelės, kad VE savininkai savanoriškai dalyvautų papildomų paslaugų rinkoje. Išėjis yra įstatymiškai įpareigoti juos laikyti tam tikrą procentą nuo jų maksimalios galios rezerve, kad užtikrinti tinklo stabilumą.

3.4 lentelė. 5 ir 10 MW rezervo palaikymo kaina, kai vėjo elektrinės galia 100 MW

| Prarastos pajamos (€·10 <sup>6</sup> ) | 5 MW    |        | 10 MW   |        |
|--|---------|--------|---------|--------|
|  | Enercon | Nordex | Enercon | Nordex |
| Žemynas                                | 1,56    | 2,15   | 2,52    | 3,60   |
| Pakrantė                               | 2,09    | 2,47   | 3,68    | 4,52   |
| Jūra                                   | 2,35    | 2,58   | 4,32    | 4,88   |

Taip pat galima pritaikyti rinkos taisykles, kad vėjo elektrinių savininkam būtų galima pateikti pasiūlymus tik tam tikram kiekiui reguliavimo žemyn. Tai reiškia, kad gamintojas neprivalo gaminti visus metus žemiau maksimalios galios. Rezervo išlaidos šiuo atveju tampa nulinės, o vienintelės išlaidos – aktyvacijos išlaidos.

## IŠVADOS

1. Prie elektros tinklo prijungtos vėjo elektrinės kenkia elektros kokybei, nors daug tyrimų yra atlikta šia tema, tačiau vis dar nėra priimta jokių sprendimų, kad vėjo elektrinės prisidėtų prie elektros energijos kokybės gerinimo.
2. Ištyrus pagrindines greitaveikes energijos kaupimo sistemas, kurias galima panaudoti vėjo elektrinių balansavimui, nustatyta, kad visos aprašytos energijos kaupimo sistemos, nors turi savų plusų ir minusų, tačiau yra tinkamos vėjo elektrinių galių balansavimui.
3. Sukurtas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis, tinkantis vėjo elektrinių galioms balansuoti panaudojant energijos kaupimo sistemas ir vėjo elektrinių rezervą. Teisingai parinkti filtrų parametrai leidžia sistemos galių disbalansą sumažinti iki minimumo.
4. Nustatyta, kad naujesnio tipo vėjo elektrinė dirbdama 52 % (žemyne), 71 % (pakrantėje) ir 80 % (jūroje) nominalios galios, gali pateikti 10 % rezervinės aktyviosios galios.
5. Tinkamai parinkta vietovė ir įranga lemia, kad suminė vėjo elektrinės galia, kai ji dirba 70 % nominalios galios ir išlaiko 10 MW rezervą, gali būti tik 61 MW.
6. Apskaičiuota, kad 100 MW vėjo elektrinė, dirbanti nusikrovus ir tiekianti 10 MW rezervą, per metus patirtų nuostolių dėl neparduotos elektros energijos nuo 1,56 iki 4,88 mln. eurų, priklausomai nuo jos tipo ir vietovės.



## LITERATŪRA

1. Wind in Power: 2014 European statistics // The European Wind Energy Association. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>
2. Cumulative world-wide installed Wind Power capacity from 1990 to 2010 // Data Source: BTM, EWEA, GWEC, WWEA. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/dgs/energy/newsletter/dg/2011/0919newsletter.html>
3. Direktyva 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją // Oficialus ES leidinys, 2009 m. gegužės 6 d. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>
4. Roadmap 2050: a Practical Guide to a Prosperous, Low Carbon Europe. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Roadmap2050-AllData-MinimalSize.pdf>
5. Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 // Peter Zapfel, DG Climate Action, European Commission. The Hague 8 March 2011 [interaktyvus]. Prieiga per internetą: [http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/docs/roadmap\\_2050\\_ppt\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/roadmap/docs/roadmap_2050_ppt_en.pdf)
6. EU energy trends to 2030: Update 2009 // European commission 4 August 2010. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: [http://ec.europa.eu/clima/policies/package/docs/trends\\_to\\_2030\\_update\\_2009\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/package/docs/trends_to_2030_update_2009_en.pdf)
7. EU energy, transport and GHG emissions. Trends to 2050. Reference scenario 2013 // European Commission. 16 December 2013. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/transport/media/publications/doc/trends-to-2050-update-2013.pdf>
8. ENTSO-E Scenario Outlook and Adequacy Forecast 2013-2030. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/publications/entsoe/So\\_AF\\_2013-2030/130403\\_SOAF\\_2013-2030\\_final.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/entsoe/So_AF_2013-2030/130403_SOAF_2013-2030_final.pdf)
9. Lietuvos perdavimo tinklo operatorius AB „Litgrid“ // Vėjo elektrinių gamybos duomenys. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.litgrid.eu/index.php/sistemas-duomenys/vejo-elektriniu-gamyba>
10. LST EN 50160:2010 Viešųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos
11. LST EN 61400-21:2009 Vėjo turbinos. 21 dalis. Prie tinklo prijungtų vėjo turbinų elektros energijos kokybės charakteristikų matavimas ir vertinimas (IEC 61400-21:2008)
12. Wind Turbines Connected to Grids with Voltages above 100 kV. Technical regulation for the properties and the regulation of wind turbines // Elkraft System and Eltra November 2004. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Engelske%20dokumenter/El/Grid%20Code%203.2.5%20Wind%20Turbines%20connected%20above%20100%20kV.pdf>
13. Vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos elektros energetikos sistemos techninės taisyklės. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: [http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc\\_l?p\\_id=231095&p\\_query=&p\\_tr2=2](http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_l?p_id=231095&p_query=&p_tr2=2)
14. Vėjo elektrinių plėtros galimybių analizė. Antros dalies ataskaita // Kauno technologijos universitetas, Lietuvos energetikos institutas. 2009 m. rugšėjo 1d. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: [http://www.ena.lt/doc\\_atsi/VEPG\\_2\\_dalis.pdf](http://www.ena.lt/doc_atsi/VEPG_2_dalis.pdf)

15. Watts, A.; The wind turbine albedo effect. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://wattsupwiththat.com/2011/04/28/the-wind-turbine-albedo-effect/>
16. Nguyen, C-L; Lee, H-H; A Comparative Analysis among Power Dispatching Control Strategies for Hybrid Wind and Energy Storage System // The 20th International Conference on Electrical Engineering; June 15-19 2014 Jeju, Korea. [interaktyvus].  
Prieiga per internetą:  
[http://www.researchgate.net/publication/263199655\\_A\\_Comparative\\_Analysis\\_among\\_Power\\_Dispatching\\_Control\\_Strategies\\_for\\_Hybrid\\_Wind\\_and\\_Energy\\_Storage\\_System](http://www.researchgate.net/publication/263199655_A_Comparative_Analysis_among_Power_Dispatching_Control_Strategies_for_Hybrid_Wind_and_Energy_Storage_System)
17. Jiang, Q.; Wang, H. Two-Time-Scale Coordination Control for a Battery Energy Storage System to Mitigate Wind Power Fluctuations. // IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 28. March, 2013. P. 52–61. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4075924&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4075924](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4075924&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4075924)
18. Jiang, Q.; Wang, H. Two-Time-Scale Coordination Control for a Battery Energy Storage System to Mitigate Wind Power Fluctuations. // IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 28. March, 2013. P. 52–61. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6365250>
19. Wang, X. Y.; Mahinda, D. V.; Choi, S. S. Determination of Battery Storage Capacity in Energy Buffer for Wind Farm. // IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 23. September, 2008. P. 868–878. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4509448&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4509448](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4509448&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4509448)
20. Li, Q.; Choi, S. S.; Yuan, Y.; Yao, D. L. On the Determination of Battery Energy Storage Capacity and Short-term Power Dispatch of a Wind Farm. // IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2. April, 2011. P. 148–158. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5648364&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5648364](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5648364&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5648364)
21. Denholm, P.; Ela, E.; Kirby, B.; Milligan, M. The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. // National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-6A2-47187. January, 2010. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47187.pdf>
22. Droste-Franke, B. *et al.* Balancing Renewable Electricity. // Advance Publication of Summary, Conclusions and Recommendations of the Correspondent Study of the Europäische Akademie GmbH. September, 2011. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://www.eaaw.de/fileadmin/downloads/Projektgruppen/Balancing\\_Renewable\\_Electricity\\_excerpt.pdf](http://www.eaaw.de/fileadmin/downloads/Projektgruppen/Balancing_Renewable_Electricity_excerpt.pdf)
23. Lubosny, Z.; Bialek, J.W. Supervisory control of a wind farm. // IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 22. August, 2007. P. 985–994. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4282041&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4282041](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4282041&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4282041)
24. Söder, L.; Hamon, C. Power balance regulation at large amounts of wind power. Frequency control and international experience. // Elforsk rapport 13:43. January, 2013. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://www.elforsk.se/Global/Vindforsk/Rapporter%20VFIII/13\\_43\\_report\\_power\\_balance\\_large\\_amounts\\_windpower.pdf](http://www.elforsk.se/Global/Vindforsk/Rapporter%20VFIII/13_43_report_power_balance_large_amounts_windpower.pdf)
25. Mohamed Thameen Ansari, M.; Velusami. DMLHFLC (Dual mode linguistic hedge fuzzy logic controller) for an isolated wind–diesel hybrid power system with BES

- (battery energy storage) unit. // Energy, Vol. 35. Issue 9, September, 2010.  
[interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210003075>
26. Kalantar, M.; Mousavi G, S. M. Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage. // Applied Energy, Vol. 87, Issue 10, October, 2010. P. 3051–3064. [interaktyvus].  
Prieiga per internetą:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910000504>
  27. Murakami, K.; Komori, M.; Mitsuda, H. Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, June, 2007. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=4277617>
  28. Wang, L.; Yu, J.-Y.; Chen, Y.-T. Dynamic stability improvement of an integrated offshore wind and marine-current farm using a flywheel energy-storage system. // IET Renewable Power Generation. 2011. Vol. 5. Iss. 5. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6009135&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6009135](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6009135&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6009135)
  29. Weber, A. Z.; Mench, M. M.; Meyers, J. P.; Ross, P. N.; Gostick, J. T.; Liu, Q. Redox flow batteries: a review. // J Appl Electrochem. Springer. September, 2011.  
[interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10800-011-0348-2#page-1>
  30. Price, A. Technologies for energy storage - present and future: Flow batteries. // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Volume 3. July, 2000. P. 1541-1545.[interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=868758&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D868758](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=868758&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D868758)
  31. Wei, L.; Géza, J. Comparison of Energy Storage System Technologies and Configurations in a Wind Farm. // IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4342177&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4342177](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4342177&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4342177)
  32. Sheikh, M. R. I.; Muyeen, S. M.; Takahashi, R.; Tamura, J. Smoothing control of wind generator output fluctuations by PWM voltage source converter and chopper controlled SMES // EEE department, Kitami institute of technology Japan; 12 July 2010  
[interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etep.469/abstract>
  33. Wang, L.; Chen, S.-S.; Lee, W.-J.; Chen, Z. Dynamic Stability Enhancement and Power Flow Control of a Hybrid Wind and Marine-Current Farm Using SMES. // IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 24. No. 3. September, 2009. P. 626-639.  
[interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5071238&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5071238](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5071238&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5071238)
  34. Kinjo, T.; Senjyu, T.; Urasaki, N.; Fujita, H. Output Levelling of Renewable Energy by Electric Double-Layer Capacitor Applied for Energy Storage System. // IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 21. Maech, 2006.  
[interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1597340&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F60%2F33594%2F01597340.pdf%3Farnumber%3D1597340>
  35. Teleke. S. Energy Storage Overview: Applications, Technologies and Economical

- Evaluation. // Quanta Technology. P. 1-11. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://quanta-technology.com/sites/default/files/doc-files/Energy-Storage-Overview.pdf>
36. Cavallo, A. J. Energy Storage Technologies for Utility Scale Intermittent Renewable Energy Systems. // March, 2000. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://www.agci.org/dB/PDFs/03S2\\_ACavallo\\_Storage.pdf](http://www.agci.org/dB/PDFs/03S2_ACavallo_Storage.pdf)
  37. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6315575&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6297579%2F6314593%2F06315575.pdf%3Farnumber%3D6315575>
  38. Ažubalis, M.; Ažubalis, V.; Jonaitis, A.; Slušnys, D. Estimation of available unit capacity of small power system. // Electrical and Control Technologies : Proceedings of 96 the 6th international conference, ECT 2010 / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-5934. 2010, P. 187-191.
  39. Ažubalis, M.; Ažubalis, V.; Slušnys, D. Estimation of the Feasible Wind Power in a Small Power System // Electronics and Electrical Engineering. T 190 Electrical Engineering. Kaunas: Technologija. 2011, Vol. 107. No. 1. P. 79-82. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/elektros\\_z/z107/18\\_ISSN\\_13921215\\_Estimation%20of%20the%20Feasible%20Wind%20Power%20in%20a%20Small%20Power%20System.pdf](http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/elektros_z/z107/18_ISSN_13921215_Estimation%20of%20the%20Feasible%20Wind%20Power%20in%20a%20Small%20Power%20System.pdf)
  40. UCTE OpHB – Policy 1: Load-Frequency Control // Final version approved by SC, March, 2009. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/publications/entsoe/Operation\\_Handbook/Policy\\_1\\_final.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf)
  41. Tenorio, L. A. L. Hydro Turbine and Governor Modelling. // Norwegian University of Science and Technology. June, 2010. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:356227/FULLTEXT01.pdf>
  42. Baranauskas, A. Elektrinių ir energijos kaupimo sistemų valdymo modelis vėjo elektrinių galiai balansuoti. Daktaro disertacija // Kauno technologijos universitetas; 2014.
  43. Kundur, P. Power System Stability and Control. // ISBN 0-07-035958-X. McGraw-Hill, Inc., 1994.
  44. S102 PowerOn Reliance System Overview. // PowerOn Reliance System. GE Digital Energy. 2013.
  45. Apostolopoulou, D.; W. Sauer, P.; D.Dominguez-Garcia. Automatic Generation Control and its Implementation in Real Time. //47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Januray, 6-9, 2014. P. 2444–2452. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6758906>
  46. S712 Generation Dispatch and Control (GDC). // PowerOn Reliance System. GE Digital Energy. 2013.
  47. Enercon product overview. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
[http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON\\_PU\\_en.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_PU_en.pdf)
  48. Nordex: Noise level, Power curves, Thrust curves; Nordex N117/3000 // Nordex Energy GmbH. 2012-10-24 [interaktyvus]. Prieiga per internetą:  
<http://api.commissiomer.nl/docs/mer/p29/p2959/2959-021noiselevel-powercurves.pdf>