

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

AUDRIUS BARANAUSKAS

ELEKTRINIŲ IR ENERGIJOS KAUPIMO
SISTEMŲ VALDYMO MODELIS VĖJO
ELEKTRINIŲ GALIAI BALANSUOTI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

2014, Kaunas

Disertacija rengta 2010 – 2014 metais Kauno technologijos universiteto elektros ir elektronikos fakulteto elektros energetikos sistemų katedroje.

Moksliniai vadovai:

Prof. dr. Rimantas Pranas DEKSNYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija - 06T), 2010–2011 m.;

Doc. dr. Mindaugas AŽUBALIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija - 06T).

TURINYS

SANTRUMPOS	4
ĮVADAS	5
1. VĖJO ELEKTRINIŲ PLĖTROS IR ENERGIJOS KAUPIMO SISTEMŲ VALDYMO APŽVALGA	9
1.1. Vėjo elektrinių plėtros tendencijos Lietuvoje ir Europoje.....	9
1.2. Automatinio generavimo valdymo sistemos balansavimo galių paskirstymas..	11
1.3. Pagrindinės greitaiveikės energijos kaupimo sistemos ir jų valdymo modeliai..	14
1.3.1. Inerciniai generavimo agregatai (smagračiai).....	14
1.3.2. Srauto baterijos	21
1.3.3. Superlaidžių magnetų energijos kaupimo sistemos.....	24
1.3.4. Energijos kaupimo sistemos panaudojant kondensatorius.....	27
1.3.5. Suspausto oro sistemos.....	29
1.4. Vėjo elektrinių galių balansavimo valdymo metodai ir balansavimo tyrimų apžvalga	31
1.5. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką	34
2. ELEKTRINIŲ IR ENERGIJOS KAUPIMO SISTEMŲ GALIŲ VALDYMO DINAMINIS MODELIS.....	35
2.1. Pagrindiniai balansavimo principai ir reguliavimo galių nustatymas	35
2.2. Balansavimo galių valdymo dinaminis modelis	37
2.3. Šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės dinaminiai modeliai	43
2.4. Universalus energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis	59
2.5. Patobulinta balansavimo galių paskirstymo metodika	61
2.6. Pagrindiniai skyriaus rezultatai.....	63
3. LIETUVOS ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS BALANSAVIMO GALIŲ VALDYMO TYRIMAI.....	64
3.1. Vėjo elektrinių galios prognozavimo modeliai	64
3.2. Vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozavimo paklaidų tyrimai	68
3.3. Balansavimo galių valdymo modelio parametrai.....	76
3.4. Signalų filtrų parametrų nustatymas	77
3.5. Balansavimo galių valdymo tyrimas	83
3.6. Pagrindiniai skyriaus rezultatai.....	88
IŠVADOS.....	90
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	91
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS DISERTACIJOS TEMA.....	98

SANTRUMPOS

AC	– kintamoji srovė
AEI	– atsinaujinantys energijos ištekliai
AGV	– automatinis generavimo valdymas
AS	– aukštas slėgis
DC	– nuolatinė srovė
DVS	– dispečerinio valdymo sistema
EES	– elektros energetikos sistema
HAE	– hidroakumuliacinė elektrinė
HE	– hidroelektrinė
IGA	– inercinis generavimo agregatas
KPS	– kuro padavimo sistema
NM	– nuolatinis magnetas
PI	– proporcinis integralinis
PID	– proporcinis integralinis diferencialinis
PSO	– perdavimo sistemos operatorius
PUV	– perkaitintuvo uždarymo vožtuvas
PVV	– pagrindinis valdymo vožtuvas
SD	– standartinis nuokrypis
SMM	– superlaidžios magnetinės medžiagos
SOP	– skaitmeninė orų prognozė
SV	– stabdymo vožtuvas
s.v.	– santykiniai vienetai
ŠE	– šiluminė elektrinė
VE	– vėjo elektrinė
VS	– vidutinis slėgis
VSVV	– vidutinio slėgio valdymo vožtuvas
ŽS	– žemas slėgis

IVADAS

Darbo aktualumas

Elektros energetika yra viena iš svarbiausių energetikos sudedamųjų dalių, be kurios sunku įsivaizduoti šių dienų gyvenimą, darbą, mokslą, todėl elektros energija turi būti tiekiamą be pertrūkių ir atitikti šių dienų keliamus kokybės reikalavimus. Dėl palankaus politikų ir visuomenės požiūrio, vėjo elektrinių (VE) suminė įrengtoji galia sparčiai didėja. Tokių elektrinių generuojama galia labai priklauso nuo vietovės vyraujančių vėjo kryptių bei vėjo greičių, o vėjo parametrai pasižymi dideliu nepastovumu ir tai sukelia vėjo elektrinių generuojamų galių svyravimus, blogina į elektros tinklą tiekiamos energijos kokybę ir apsunkina visos elektros energetikos sistemos (EES) darbo režimus. Vėjo elektrinių galių prognozavimo paklaidos sukelia nemažai iššūkių stengiantis subalansuoti sistemos generuojamas ir vartojamas galias, juolab kad ir šiluminių bei hidroelektrinių esamos charakteristikos ne visada pakankamos tinkamai reaguoti į VE galios pokyčius. Tai ypač aktualu mažos galios elektros energetikos sistemoms, tokioms kaip Lietuvos ar Baltijos šalių, kai vėjo elektrinių skverbtis yra (ar numatoma kad bus) didelė.

Tinkamas vėjo elektrinių generuojamų galių prognozavimo paklaidų kompensavimas yra esminis veiksnys siekiant stabilios elektros energetikos sistemų veikimo normaliu režimu, nes, nors ir sparčiai tobulinamų, prognozavimo modelių tikslumas vis dar siekia keliasdešimt procentų. Elektros energijos kaupimas galėtų būti nebloga išeitis balansuojant vėjo elektrinių galias, tačiau trūksta apibendrinto požiūrio bei sprendinių integruojant tokius įrenginius į EES darbą bei bendrą (centralizuotą) valdymą. Literatūroje plačiai sutinkami konkrečių kaupimo technologijų detalūs tyrimai bei jų valdymo modeliai, kurie yra pritaikyti vidinių kaupimo sistemų procesų modeliavimui, o jų sudarymui reikalinga identifikuoti daugybę parametrų, kurie reikšmingos įtakos galutinio galių balansavimo rezultatui neturi. Todėl tinkamas elektrinių ir energijos kaupimo sistemų balansavimo galių valdymas ir modeliai tampa vis aktualesni ypač, kai elektros energetikos sistema dirba „salos“ režimu.

Automatinio generavimo valdymo (AGV) sistemos dabartinė balansavimo galių paskirstymo metodika nevertina elektrinių reguliavimo intensyvumo, o tai reiškia elektrinių galios keitimą maksimaliais leistiniais greičiais ir didesnes išlaidas kurui bei įrangos remontams. Be to, metodika neleidžia integruoti greitaveikių energijos kaupimo sistemų į antrinio regulatoriaus veikimą, tai savo ruožtu stabdo šių sistemų praktinį panaudojimą balansuojant vėjo elektrinių generuojamas galias. Todėl šiame darbe siūlomi sprendimai yra ypač aktualūs ne tik tolimesnei vėjo bei kitus atsinaujinančius energijos išteklius (AEI) naudojančių elektrinių plėtrai, bet ir energijos kaupimo sistemų platesniam panaudojimui, užtikrinant geresnę sistemos režimo parametrų valdymo kokybę.

Darbo tikslas

Sudaryti vėjo elektrinių generuojamų galių balansavimo valdymo dinaminį modelį, leidžiantį sumažinti balansuojančių elektrinių galios reguliavimo intensyvumus.

Darbo uždaviniai

1. Ištirti vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozavimo paklaidų įtaką balansavimo galioms ir nustatyti balansuojančių elektrinių galios keitimo greičius, kintant apkrovų ir vėjo elektrinių galioms.
2. Sudaryti elektros energijos kaupimo sistemos galios valdymo dinaminį modelį, tinkantį vėjo elektrinių generuojamai galiai balansuoti.
3. Sudaryti elektrinių ir energijos kaupimo sistemų balansavimo galių valdymo dinaminį modelį, įvertinant valdymo signalo kitimo greitį ir balansuojančių elektrinių galios keitimo spartą.
4. Nustatyti energijos kaupimo sistemos parametrus Lietuvoje veikiančių vėjo elektrinių galių subalansavimui.

Darbo metodologija ir įrankiai

Moksliniame tiriamajame darbe vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozavimo įtaka balansavimo galioms, reikiamos nuokrypių reguliavimo rezervo galios bei balansuojančių elektrinių galios keitimo greičiai buvo nustatyti panaudojant vėjo elektrinių ir apkrovų galių kitimo bei prognozavimo kiekybinius duomenis su laiko žymomis, apdorojant juos statistinės analizės metodais. Elektrinių ir energijos kaupimo sistemų galių valdymo dinaminį modelių sudarymui buvo naudotos atskirų elementų (turbinų, reguliatorių, galios elektronikos) dinamines savybes atspindinčios charakteristikos ir automatinio valdymo teorija. Šiluminių elektrinių, hidroelektrinių ir energijos kaupimo sistemų valdymo signalai buvo nustatyti pagal vėjo elektrinių prognozuotų ir generuotų galių skirtumų kitimo greitį, kuris identifiukuotas panaudojant signalų filtrų teoriją. Elektrinių ir energijos kaupimo sistemų galios vėjo elektrinių generuojamai galiai balansuoti buvo paskirstytos atsižvelgiant į automatinio generavimo valdymo sistemos galių paskirstymo metodiką, panaudojant modifikuotų dalyvavimo faktorių skaičiavimus. Balansavimo galių valdymo dinaminį tyrimų rezultatai buvo atvaizduoti laiko ir dažnio srityse, o energijos kaupimo sistemų įrengtosios galios ir talpos (energijos) parametrai įvertinti panaudojant tikimybių teoriją.

Balansavimo galių valdymo dinaminiais modeliais sudaryti ir skaičiavimams atlikti buvo naudojamas programinis paketas MatLab SIMULINK®.

Faktinės vėjo elektrinių ir apkrovų galių kitimo vertės tirtais laiko periodais buvo registruotos Lietuvos elektros perdavimo sistemos operatoriaus LITGRID AB dispečerinio valdymo sistemos (DVS) GE XA/21 (SCADA). Ši sistema leidžia registruoti ir saugoti režimų parametrų kitimo vertes vienos sekundės intervalu. Tirtų periodų vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozei, kurią vykdo perdavimo sistemos operatorius, buvo naudotas Švedijos įmonės „Vitec“ programinis paketas „Aiolos“.

Mokslinis naujumas

1. Pasiūlytu elektros energetikos sistemos balansavimo galių valdymo dinaminio modeliu praplečiamos vėjo elektrinių balansavimo galimybės, papildomai įvertinant valdymo signalo kitimo greitį ir elektrinių bei energijos kaupimo sistemų galios keitimo greičių charakteristikas.
2. Patobulintu automatinio generavimo valdymo sistemos galių paskirstymu koreguojant elektrinių dalyvavimo faktorius tiksliau įvertinamos aktyviosios galios reguliavimo rezervo apimtys.

Praktinė darbo vertė

1. Sukurtas energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis su mažesniu parametru kiekiu supaprastina vėjo elektrinių galių balansavimo modeliavimą.
2. Pasiūlytas vėjo elektrinių galių balansavimo valdymas sumažina šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių reguliavimo galių rezervą ir reguliavimo intensyvumą bei su tuo susijusias išlaidas kurui ir įrangos remontams.
3. Pasiūlyti automatinio generavimo valdymo sistemos galių paskirstymo metodikos pakeitimai, leidžiantys integruoti greitaveikes energijos kaupimo sistemas į antrinio reguliatoriaus veikimą.
4. Balansavimo galių valdymo dinaminis modelis padidina atsinaujinančius energijos išteklius naudojančių elektrinių plėtros ir energijos kaupimo sistemų integracijos galimybes bei pagerina sistemos režimo parametru valdymo kokybę.

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozavimo paklaidų tyrimas leidžia nustatyti nuokrypių reguliavimo rezervo galias ir balansuojančių elektrinių galios keitimo greičius.
2. Sukurtas universalus energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis su mažesniu parametru kiekiu vėjo elektrinių galioms balansuoti.
3. Sudarytas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis pagal valdymo signalo kitimo greitį bei dalyvavimo faktorių perskaičiavimas leis sumažinti šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių reguliavimo intensyvumą bei integruoti greitaveikes energijos kaupimo sistemas į automatinio generavimo valdymo sistemos veikimą.
4. Panaudojant sudarytą balansavimo galių valdymo modelį galima nustatyti elektros energijos kaupimo sistemos įrengtosios galios ir energijos (talpos) vertes, reikalingas vėjo elektrinių galios balansui pasiekti, atsižvelgiant į balansavime dalyvaujančių agregatų sudėtį ir tipus.

Darbo aprobavimas

Disertacijoje pateikiama medžiaga buvo skelbta 6 mokslinėse publikacijose (straipsniuose), kurios buvo išspausdintos Tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose. Iš jų 2 straipsniai išspausdinti mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidinyje, turinčiame citavimo indeksą ir 4 straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose. Disertacijos medžiaga buvo

paskelbta 4 mokslinėse tarptautinėse konferencijose, iš kurių 1 organizuota užsienyje.

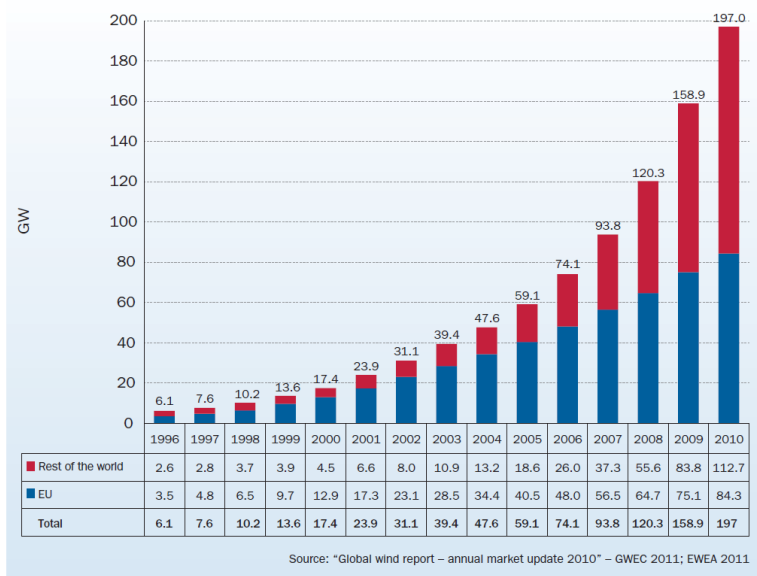
Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, pagrindinės išvados ir naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 98 puslapiai, įskaitant 70 paveikslų, 11 lentelių ir 69 pavadinimų literatūros sąrašą.

1. VĖJO ELEKTRINIŲ PLĖTROS IR ENERGIJOS KAUPIMO SISTEMŲ VALDYMO APŽVALGA

1.1. Vėjo elektrinių plėtros tendencijos Lietuvoje ir Europoje

Europos vėjo energijos asociacija EWEA (*angl.* The European Wind Energy Asociacion) savo ataskaitoje [1] teigia, kad 2013 metais visoje Europos Sąjungoje (ES) buvo įrengta 106,04 GW suminės galios vėjo jėgainių parkų, tuo tarpu Europoje šis skaičius siekia 109,581 GW. Per 2012 metus Europos Sąjungoje buvo įrengta 11,895 GW suminės galios vėjo elektrinių parkų. Tai sudaro apie 11 % prieaugį, nes 2012 metų pradžioje suminė vėjo elektrinių (VE) įrengtoji galia siekė 94,352 GW. Toks pats 11 % įrengtosios VE galios prieaugis buvo ir per 2011 metus. Lyginant 2011 ir 2012 metų VE galių prieaugius matyti, kad VE galia Europos Sąjungoje kilo stabiliu tempu. 1.1 paveiksle pateiktas VE įrengtosios galios kitimas Europoje ir pasaulyje nuo 1996 metų. Matyti, kad Europoje įrengtų VE parkų galia siekia apie pusę visame pasaulyje įrengtos VE galios.



1.1 pav. Įrengtoji VE galia [2]

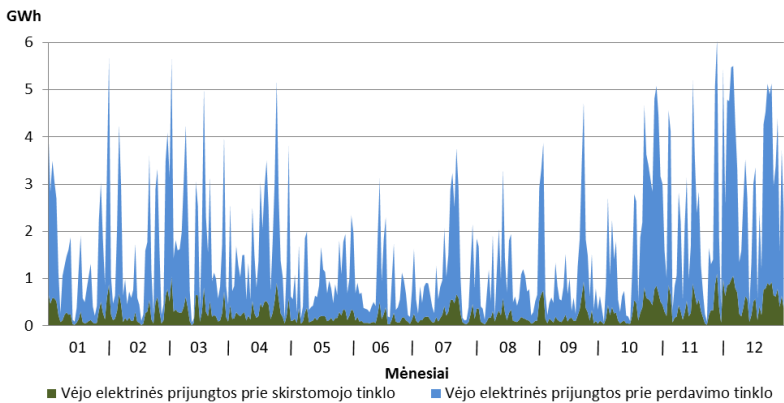
Tokių staigų vėjo elektrinių galios kitimą lėmė ženkliai atpigusi technologija (apie 30 % per 2007-2010 metus) bei ambicinga politika, kuri kelia tikslą jau 2020 metais pasiekti, kad 20 % visos suvartotos elektros energijos būtų pagaminta naudojant atsinaujinančius energijos išteklius (AEI) [3].

Dar 2009 metais Europos Komisija nustatė tikslą iki 2050 metų sumažinti išmetamųjų dujų, sukeliančių šiltnamio efektą, kiekį 80–95 % lyginant su 1990 metų šių dujų kiekiu. Po to, kai Europos Klimato Fondo inicijuota studija [4] patvirtino, kad toks tikslas yra pasiekiamas, Europos Komisija 2011 metais nustatė iki 2030 metų sumažinti anglies dvideginio kiekius elektros energetikos sektoriuje 54–68 %

[5]. Tokie tikslai neišvengiamai didins atsinaujinančiųjų energijos išteklių, tuo pačiu ir vėjo elektrinių, generuojamų galių dalį elektros energijos balanse. Jei 2010 metų Europos Komisijos dokumentai [6] 2030 metams kėlė tikslus iš AEI gaminti 32–36 % elektros energijos, tai analogiški 2013 metų dokumentai [7] jau kelia 45 % tikslą. Vertinant Europos elektros perdavimo sistemų operatorių organizacijos (ENTSO-E) išvalgas [8], norint neatsilikti nuo Europos Sąjungos tikslų 2050 metams, reikia, kad AEI dalis elektros energijos balanse pasiektų 51,4–59,8 %.

Šiuo metu ES šalyse tik apie 5-6 % suvartojamos elektros energijos yra pagaminama iš vėjo energijos, todėl norint pasiekti keliamus tikslus, VE įrengtoji galia neišvengiamai turės didėti. EWEA mano, kad 2020 metais VE turėtų pagaminti apie 15-16 % visos suvartotos elektros energijos, 2050 metai šis skaičius turėtų ir galėtų pasiekti 50 % [2].

Analogiškas Lietuvos 2020 metų tikslas siekia 24 %, todėl Lietuvoje VE taip pat gana sparčiai statomos. 2013 metų pabaigoje suminė vėjo elektrinių įrengtoji galia siekė 281 MW. Nors per 2013 metus prie Lietuvos elektros energetikos sistemos (EES) buvo prijungta tik 7 MW suminės galios VE, reikia pasakyti, kad vėjo energetika lyderiauja pagal visų AEI tipų įrengtąją galią. 2013 metų faktinė VE gamyba Lietuvos EES pateikta 1.2 paveiksle [9].



1.2 pav. VE gamyba, 2013 metai [9]

Iš viso 2013 metais vėjo elektrinės pagamino apie 600 GWh elektros energijos ir tai sudarė apie 40 % visos AEI pagamintos elektros energijos bei apie 5,7 % bendrojo Lietuvos elektros energetikos sistemos suvartojimo.

Reikia paminėti, kad 2013 metais įvyko paskutinis skatinimo kvotų paskirstymo aukcionas gamintojams, naudojantiems vėjo energiją, kurio metu buvo laimėta visa skatinimo kvota – 500 MW. Kaip ir esami, taip ir planuojami statyti vėjo elektrinių parkai bus išsidėstę vakarų Lietuvoje (Mažeikių, Šilutės, Jurbarko ir Pagėgių rajonų savivaldybėse). Tikėtina, kad ES iškelti ambicingi tikslai be papildomo skatinimo bus sunkiai pasiekti, todėl vėjo elektrinių įrengtoji galia turės didėti virš 500 MW. Vienas iš tikėtinų scenarijų yra VE statyba jūroje, kur vėjo greičiai yra ženkliai didesni ir VE išnaudojimas paprastai yra geresnis.

1.2. Automatinio generavimo valdymo sistemos balansavimo galių paskirstymas

Paprastai elektrinių generuojamos galios gali būti reguliuojamos rankiniu arba automatinio būdu. Siekiant efektyvesnio galių valdymo realiu laiku yra naudojama automatinio generavimo valdymo (AGV) sistema. Pagrindinis automatinio generavimo valdymo sistemos tikslas yra palaikyti pastovią nustatytą elektros energetikos sistemos dažnio vertę ir planuotas elektros energetikos sistemos tarp sisteminių srautų vertes, reguliuojant generatorinių agregatų, dalyvaujančių šios sistemos veikime, generuojamas galias. Tokiu būdu yra balansuojamos generuojamos ir vartojamos sistemos galios. Šis uždavinys dažnai vadinamas sistemos galios-dažnio valdymu panaudojant antrinį sistemos reguliatorių [10]. Kaip žinia, vėjo elektrinių (VE) 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 stabilaus sistemos dažnio ir balanso palaikymui. Kiekvieno elektros energetikos sistemos valdymo rajono ar bloko paklaida (G_i) turi būti nuolat reguliuojama iki nulio. Ji lygi galios valdymo paklaidos (ΔP_i) ir dažnio valdymo paklaidos ($K_i \cdot \Delta f$) sumai [11]:

$$G_i = \Delta P_i + K_i \cdot \Delta f \quad (1.1)$$

čia valdymo rajono ar bloko galios valdymo paklaida ΔP_i yra lygi visų iš rajono ar bloko ištekančių aktyviosios galios srautų sumos ir valdymo programos galių (planuotų ištekančių 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 (λ_Σ) sandaugai $K_i = C_i \times \lambda_\Sigma$ (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 [11]:

$$P_{Gi} = P_{Gpi} \pm G_{iN} \cdot K_{GNi} \pm G_{iA} \cdot K_{GAi} \quad (1.2)$$

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 (1.2) 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 [12]. Ekonominiai galios paskirstymo skaičiavimai remiasi generatoriaus galios padidinimo sąnaudų metodu, kai labiau apkraunami mažesnes

šnaudas turintys generatoriniai agregatai. Agregatų, dalyvaujančių ekonominio galios paskirstymo uždavinyje, ekonominio reguliavimo faktoriai suskaičiuojami taip [13]:

$$k_{GEi} = \frac{\left(\frac{1}{S_i}\right) \cdot a}{\sum_K \frac{1}{S_k}} \quad (1.3)$$

čia S_i – i-ojo generatoriaus galios padidavimo šnaudų kreivės koeficientas (liestinė) pradinės generuojamos galios taške, S_k – generatorių, dalyvaujančių ekonominio galios paskirstymo uždavinyje, šnaudų 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 gali būti išreikšta [13]:

$$a = \frac{R_E}{(R_E + R_{N,Av} + R_l)} \quad (1.4)$$

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_l – generatorinių agregatų, kurie, skaičiuojant dalyvavimo faktorius, keičia savo generuojamą galią dispečerio užduotu greičiu, skirtumą 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 [13]:

$$k_{GNi} = \frac{R_i \cdot (1 - a)}{(R_{N,Av} + R_l)} \quad (1.5)$$

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 [13]:

$$K_{GNi} = \begin{cases} k_{GD_i} \cdot k_{GEi} \\ k_{GD_i} \cdot k_{GNi} \end{cases} \quad (1.6)$$

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

Avarinio galios reguliavimo dalyvavimo faktoriai taikomi nepriklausomai nuo to, ar agregatas dalyvauja normaliam ir ekonominiame galios reguliavime, ir yra suskaičiuojami taip [13, 14]:

$$k_{GAi} = \frac{R_i}{\sum_A R_a} \quad (1.7)$$

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

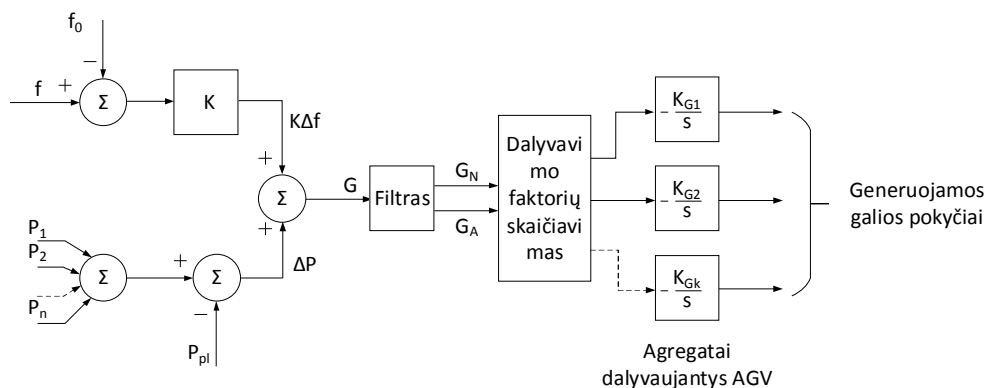
Vertinant sistemos dispečerio užduotus dalyvavimo faktorius, avariniame sistemos reguliavime dalyvaujančių generatorinių agregatų dalyvavimo faktoriai suskaičiuojami taip [13]:

$$K_{GAi} = \frac{k_{GAi} \cdot k_{GDi}}{\sum_K k_{GAk}} \quad (1.8)$$

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. 1.3 paveiksle pateikta AGV sistemos struktūrinė schema [10].



1.3 pav. AGV sistemos struktūrinė schema [10]

Išnagrinėjus esamą 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 viršytų praktinio panaudojimo galimybes. Be to, dabartinis automatinio generavimo valdymo sistemos veikimas nevertina elektrinių reguliavimo intensyvumo, o tai reiškia elektrinių galios keitimą maksimaliais leistiniais greičiais, kas labiau dėvi elektrinių įrangą bei didina išlaidas kurui ir remontams.

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.

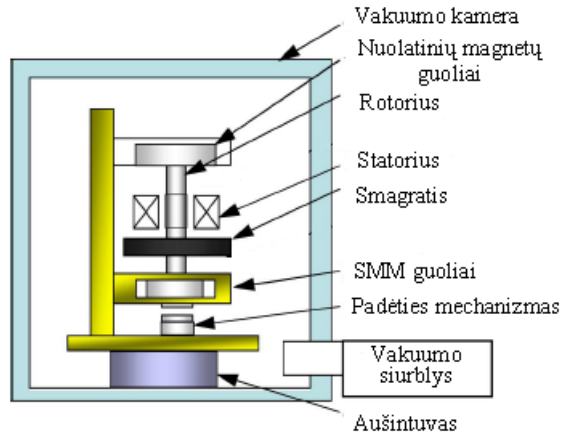
1.3. Pagrindinės greitaveikės energijos kaupimo sistemos ir jų valdymo modeliai

Šiame skyriuje pateikiama pagrindinių greitaveikių energijos kaupimo sistemų, skirtų vėjo elektrinių generuojamos galios balansavimui, valdymo modelių apžvalga.

1.3.1. Inerciniai generavimo agregatai (smagračiai)

Inercinis generavimo agregatas susideda iš dviejų dalių: energijos kaupimo modulio ir energijos konversijos modulio. Energijos kaupimo modulis – tai kinetinės energijos kaupimo įrenginys, sudarytas iš statoriaus ir rotorius, kuris gali dirbti ir kaip variklis, ir kaip generatorius. Tai yra gali atiduoti arba vartoti energiją iš elektros tinklo. Rotorius gali sukis labai dideliais greičiais (daugiau nei 10000 apsisukimų per minutę), kad pasiektų efektyviausią energijos saugojimo būseną.

Energijos kaupimo modulis (1.4 paveikslas) turi dvi guolių sistemas: nuolatinių magnetų (NM) ir superlaidžių magnetinių medžiagų (SMM) [15]. Superlaidžių magnetinių medžiagų guolių sistema įrengta rotorius apačioje. Ji susideda iš superlaidininko ir keturių nuolatinių magnetų. Ši guolių sistema slopina besisukančio rotorius virpesius ir neleidžia jam vibruoti. Nuolatinių magnetų guolių sistema įrengta rotorius viršuje, kuri kontroliuoja besisukančio rotorius padėtį horizontaliosios ir vertikaliosios ašių atžvilgiu. Smagratis pagamintas iš metalo, bet turi sustiprinto anglies–stiklo pluošto rėmelį ir yra sumontuotas centrinėje rotorius dalyje. Pavyzdžiui, „Beaconpower“ firmos gaminamų smagračių masė siekia 1360 kilogramų. Apatinėje energijos kaupimo modelio dalyje įmontuotas aušintuvas, kuris skirtas atšaldyti superlaidininką iki labai žemų temperatūrų. Kai superlaidininkas atšaldomas maždaug iki $-203\text{ }^{\circ}\text{C}$, padėties mechanizmas atsiskiria ir rotorius sukasi be mechaninio kontakto, žemo slėgio aplinkoje – vakuume ($6\cdot 10^{-2}$ Pa). Tai leidžia dar labiau sumažinti sukimosi nuostolius. Statorius yra pagrindinė jungtis tarp energijos kaupimo ir energijos konversijos modulių inerciniame generavimo agregate. Jis yra tradicinis, trijų fazių ir keturių polių (nuolatinių magnetų) įrenginys. Statorius ir rotorius yra patalpinti į anglies ir stiklo pluošto mišinio rėmą, tai suteikia inerciniam generavimo agregatui reikiamą tvirtumą, besisukant dideliais greičiais.



1.4 pav. Energijos kaupimo modulis [15]

Inercinių agregatų energijos kaupimo technologija pagrįsta kinetine energija E_{IGA} (Ws), kurios parametrai yra rotoriaus sukimosi kampinis greitis ω_{IGA} (rad/s) ir besisukančios masės inercijos momentas J_{IGA} ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$). Smagračio kinetinė energija gali būti išreikšta [16]:

$$E_{IGA} = \frac{1}{2} J_{IGA} \cdot \omega_{IGA}^2, \quad (1.9)$$

$$E_{IGA\text{maks}} = \frac{1}{2} J_{IGA} \cdot \omega_{IGA\text{maks}}^2. \quad (1.10)$$

čia dydžiai pažymėti indeksu „maks“ atitinka maksimalias parametrų vertes.

Ne visą smagratyje sukauptą kinetinę energiją galima panaudoti. Panaudojimo faktorių k galima išreikšti taip:

$$k = \frac{E_{IGA\text{maks}} - E_{IGA\text{min}}}{E_{IGA\text{maks}}}. \quad (1.11)$$

čia dydžiai pažymėti indeksu „min“ atitinka minimalias parametrų vertes.

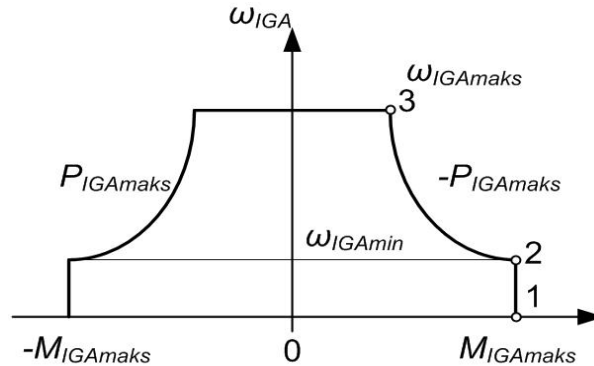
Inercinio generavimo agregato kinetinė energija yra valdoma elektros variklio sukimo momentu m_{IGA} (Nm)((arba elektrine galia p_{IGA} (W)):

$$p_{IGA} = -\frac{dE_{IGA}}{dt} = -m_{IGA} \cdot \omega_{IGA}. \quad (1.12)$$

Paprastai yra priimama, kad elektros mašinos, veikiančios generatoriaus režimu atiduodama į tinklą elektros energija laikoma teigiama ($p_{IGA} > 0$), o veikiant variklio režimu – neigiama ($p_{IGA} < 0$).

Inercinio generavimo agregato darbo zona yra tokiaame intervale – $\omega_{IGA\text{min}} \leq \omega_{IGA} \leq \omega_{IGA\text{maks}}$ (1.5 paveikslas). Maksimali (užkrovimo metu) suvartojama galia yra

$-P_{IGAmaks}$, maksimali generuojama galia $+P_{IGAmaks}$ (iškrovimo metu). Maksimalus sukimo momentas yra $M_{IGAmaks} = P_{IGAmaks}/\omega_{IGAmaks}$, maksimalus stabdymo momentas $-M_{IGAmaks}$. Nominalūs inercinio agregato parametrai nustatomi antrame taške. Čia $M_{IGAN} = M_{IGAmaks}$, $\omega_{IGAN} = \omega_{IGAmin}$ ir $P_{IGAN} = -M_{IGAN} \cdot \omega_{IGAN} = -P_{IGAmaks}$.



1.5 pav. Inercinių generavimo agregatų darbo zona [16]

Inercinio generavimo agregato energijos konversijos modelis susideda iš tradicinio lygintuvo, sudaryto bipolinių (IGBT) galios tranzistorių pagrindu, ir valdomo keitiklio. Energijos keitimo modulis valdo energijos kaupimo įrenginį, gali keisti jo darbo režimus t. y. pakrauti energija iš tinklo arba iškrauti – paleisti dirbti generatoriaus režimu. Šis modulis taip pat kontroliuoja visus energijos kaupimo įrenginio jutiklius ir siunčia signalus stebėjimo sistemai. Ši stebėjimo sistema tikrina sistemos būklę ir gali pakeisti energijos kaupimo modulio darbo režimą [17].

Ketvirtosios kartos „Beaconpower“ firmos inercinių generavimo agregatų techninės charakteristikos pateiktos 1.1 lent.

1.1 lentelė. Inercinio generavimo agregato techninės charakteristikos [17]

Maksimali galia P_{maks} , kW	250
Nominali galia P_N , kW	100
Nominali energija W_N , kWh	25
Galios nuostoliai ΔP , %	<2% P_N
Apsisukimų skaičius, aps/min	>10000
Smagračio masė, kg	1360
Diametras, m	0,9
Aukštis, m	1,5

Inerciniai generavimo agregatai nėra didelių galių, todėl didesnam efektyvumui gauti jie yra jungiami į grupes – matricas. Konteineris – dešimties inercinių agregatų matrica. Tokios matricos leidžia lengviau padidinti įrengtąją agregatų galią ir talpą bei reguliavimo efektyvumą. Matricos techniniai parametrai pateikti 1.2 lent.

Siekiant gauti dar didesnes reguliavimo galias, galima sujungti inercinių generavimo agregatų konteinerius į didesnes matricas. Matricų agregatų skaičius ir generuojama galia pateikta 1.3 lent. [17]

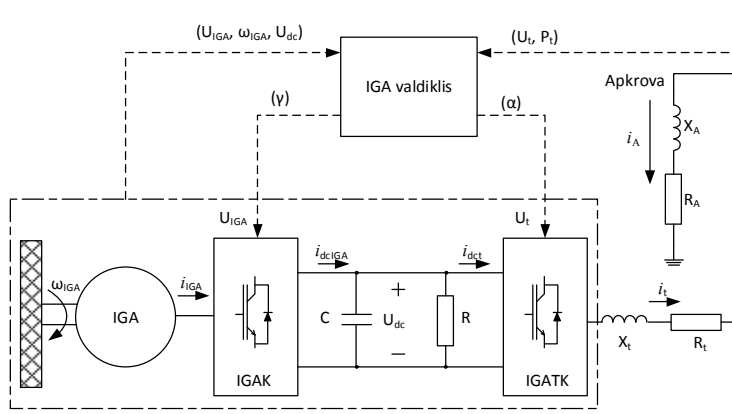
Inercinių generavimo agregatų sistemos, kuri prijungta dviem galios keitikliais, valdymas atliekamas valdant šiuos keitiklius (1.6 paveikslas). Kairysis keitiklis (IGAK) vadinamas IGA keitikliu ir yra skirtas galiai ir energijai valdyti. Tai yra keisti smagračio darbo režimą iš generatoriaus į variklio ir atvirkščiai. Dešinysis keitiklis (IGATK) vadinamas sistemos keitikliu ir yra skirtas tinklo įtampai bei dažniui palaikyti [18].

1.2 lentelė. Inercinių generavimo agregatų matricos techniniai parametrai

Maksimali galia P_{maks} , MW	2,5
Nominali galia P_N , MW	1
Nominali energija W_N , MWh	0,25
Galios nuostoliai ΔP , %	$<2\% P_N$
Apsisukimų skaičius, aps/min	>10000
Konteinerio matmenys, m	2,6 x 2,4 x 9,1

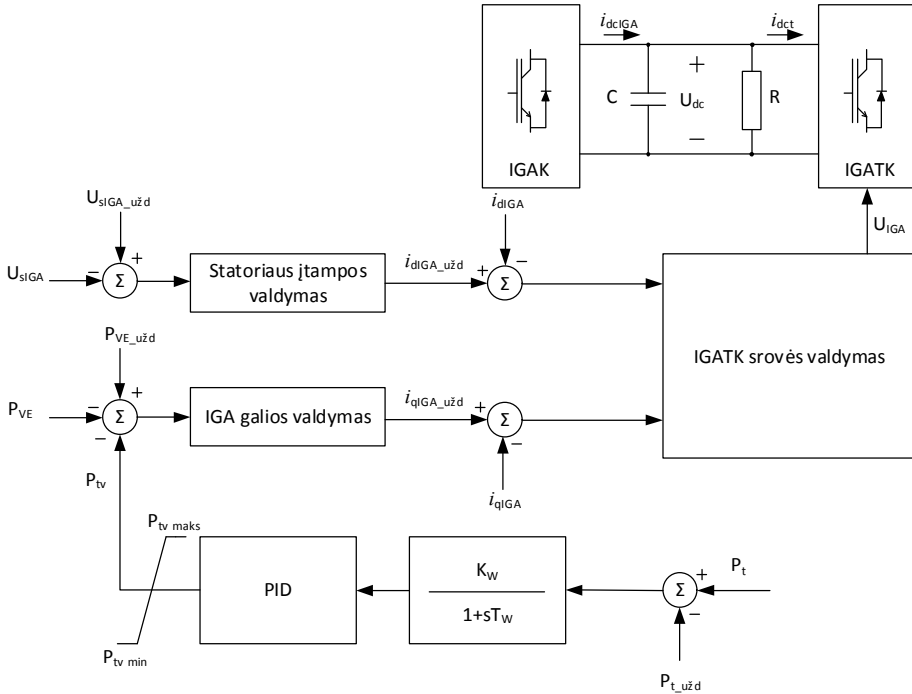
1.3 lentelė. Inercinių generavimo agregatų matricių atiduodamos galios

Laikas Agregatų sk.	Galija, MW		
	5 min	10 min	30 min
1	0,25	0,15	0,05
2	0,5	0,3	0,1
4	1	0,6	0,2
8	2	1,2	0,4
10	2,5	1,5	0,5
30	7,5	4,5	1,5
50	12,5	7,5	2,5
100	25	15	5

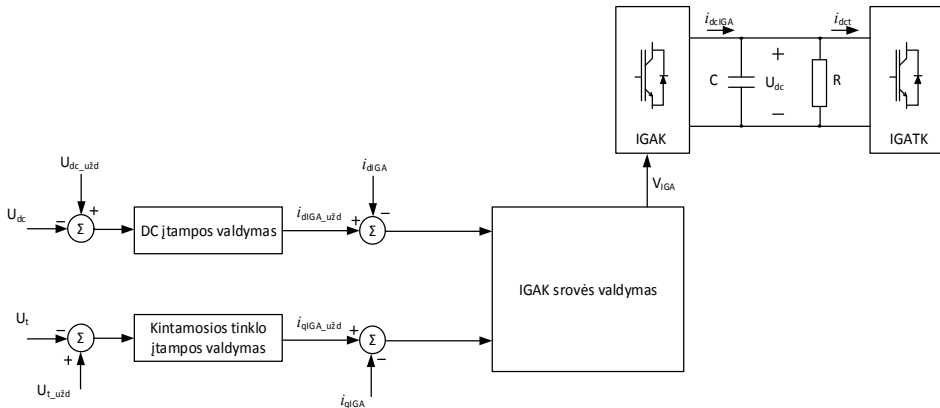


1.6 pav. Inercinių generavimo agregatų energijos kaupimo sistema su atskira galios elektronika [18]

Inercinio generavimo agregato ir sistemos keitikliai valdomi atitinkamai tarpusavyje lyginant aktyviosios galios bei kintamosios ir nuolatinės srovės šynų įtampos (IGA ir tinklo pusėje) vertes su užduotomis jų vertėmis. Tai pavaizduota 1.7 ir 1.8 paveiksluose [18]. 1.7 paveiksle pavaizduotas sistemos keitiklio valdymo modelis su dviem valdymo lygiais – IGA statoriaus įtampos ir smagračio aktyviosios galios. 1.8 paveiksle matomas IGA keitiklio valdymo modelis su kintamosios ir nuolatinės srovės šynų įtampų valdymo lygiais.



1.7 pav. Sistemos keitiklio valdymo modelis su PID reguliatoriumi [18]



1.8 pav. Inercinių generavimo agregatų energijos kaupimo sistemos keitiklio valdymo modelis [18]

1.7 paveiksle taip pat pavaizduotas proporcinis integralinis diferencialinis (PID) reguliatorius, kuris skirtas slopinti aktyviosios galios svyravimams elektros perdavimo linijoje, jungiančioje atsinaujinančiosios energijos sistemą (vėjo, saulės, bangų energijos ir t. t.), IGA energijos kaupimo sistemą ir elektros tinklą. Tam tikslui PID reguliatoriuje aktyviosios galios srautas linijoje panaudojamas, kaip grįžtamasis ryšys. Tokio reguliatoriaus įėjimo (Y) ir išėjimo (U) signalai yra:

$$\begin{aligned} Y &= \Delta P_t \\ U &= P_{iv} \end{aligned} \quad (1.13)$$

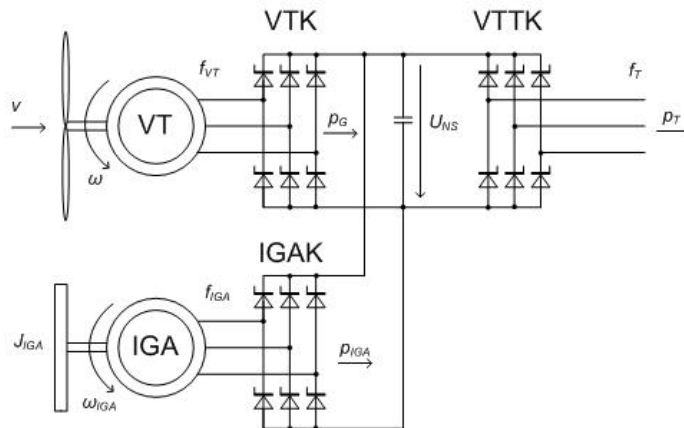
čia ΔP_t – galios pokytis tinklo linijoje (W), P_{iv} – valdymo signalas galios svyravimams slopinti (W).

PID reguliatoriaus perdavimo funkcija išreiškiama tokia formule [18]:

$$H(s) = \frac{U(s)}{Y(s)} = \left(\frac{sT_W}{1+sT_W} \right) \left(K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D \right) \quad (1.14)$$

čia T_W – filtro laiko pastovioji (s), K_P , K_I ir K_D – proporcinio, integralinio ir diferencialinio stiprinimo koeficientai.

Inercinių generavimo agregatų sistema, prijungta prie tinklo per vieną IGA keitiklį (IGAK keitiklis 1.9 paveiksle) ir bendrą IGA kaupimo sistemos bei atsinaujinančiosios energijos generavimo sistemos keitiklį (VTTK keitiklis 1.9 paveiksle), valdoma reguliuojant šių keitiklių darbą [16].

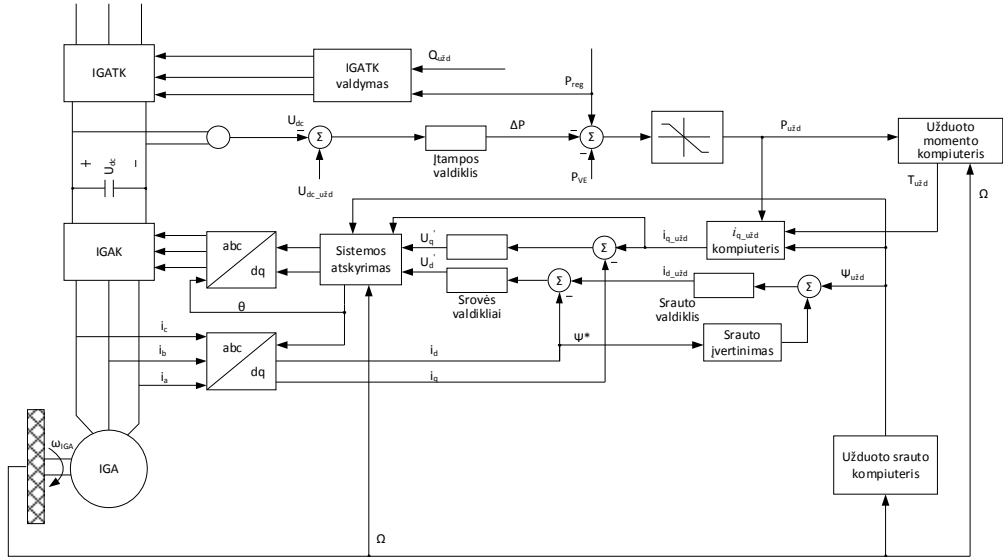


1.9 pav. Inercinių generavimo agregatų energijos kaupimo sistema su bendra galios elektronika [16]

Keitiklių valdymo modelis reguliuojant inercinio generavimo agregato sukimo momentą pateiktas 1.10 paveiksle. Toks valdymas įgalina išlaikyti pastovią nuolatinės srovės šynų įtampą ir vėjo ar kitos atsinaujinančiosios elektrinės generuojamą galią [19]. IGA turima generuoti galia nustatoma taip:

$$P_{užd} = P_{reg} - P_{ve} - \Delta P \quad (1.15)$$

čia P_{reg} – vėjo ir IGA sistemos suminė generuojama galia (W), P_{ve} – vėjo elektrinės generuojama galia (W), ΔP – galia, kuri reikalinga norint palaikyti pastovią nuolatinės srovės šynų įtampą (W).



1.10 pav. Galios elektronikos valdymo modelis reguliuojant inercinių generavimo agregatų sukimo momentą [19]

Inercinio generavimo agregato sukimo momentas nustatomas tokia formule [19]:

$$T_{užd} = \frac{P_{užd}}{\Omega} + B \cdot \Omega + T_S. \quad (1.16)$$

čia Ω – smagračio sukimosi greitis (rad/s), T_S – statinis sukimo momentas (Nm), B – trinties koeficientas ($N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$)

Kai smagračio ir IGA indukcinio generatoriaus nominalūs greičiai skiriasi, reikia valdyti ir rotoriaus įmagnetinimą. Reikalinga magnetinio srauto reikšmė nustatoma [19]:

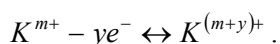
$$\Psi_{užd} = \frac{P_{IMr} \cdot L_r^*}{p \cdot M^* \cdot i_{sqmaks}} \cdot \frac{1}{\Omega_{mes}}. \quad (1.17)$$

čia P_{IMr} – indukcinio generatoriaus nominalios galios ir galios nuostolių suma (W), Ω_{mes} – matuotas sukimosi greitis (rad/s), L_r^* – rotoriaus induktyvumas (H), p – polių porų skaičius, i_{sqmaks} – didžiausia statoriaus srovės projekcija q ašyje (A), M^* – statoriaus ir rotoriaus grandinių abipusis induktyvumas (H). Žvaigždutėmis pažymėti dydžiai reiškia skaičiuojamuosius parametrus.

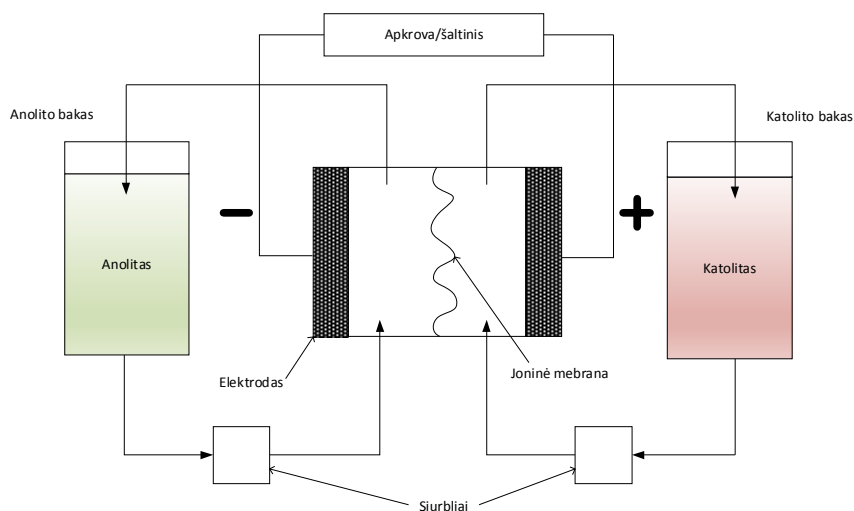
1.3.2. Srauto baterijos

Srauto baterijos, kartais dar vadinamos redokso (oksidacijos ir redukcijos) baterijomis yra elektrocheminis įrenginys, kuris užima tarpinę padėtį tarp įprastų baterijų ir kuro elementų. Kaip ir paprastos baterijos jos gali būti įkrautos ir gali tiekti energiją, tačiau tol, kol yra tiekiamas įkrovas elektrolitas. Tokios baterijos turi elektrodus, kurie dalyvauja elektrocheminiame procese bei yra elektronų tekėjimo terpė. Elektrodai neriboja baterijos energijos kaupimo galimybių, o apsprendžia srauto baterijos galią [20]. Elektros energija yra kaupiama arba atiduodama vykstant reversinei elektrocheminei reakcijai tarp dviejų elektrolitų. Pastarieji pumpuojami atskirais kontūrais, o reakcija vyksta specialioje joninėje membranoje (1.11 paveikslas) [20].

Bendru atveju oksidacijos ir redukcijos reakcijas neigiamam elektrodui (anodui) ir teigiamam elektrodui (katodui) galima parašyti [20]:



čia A – neigiamo krūvio elektrolitas, K – teigiamo krūvio elektrolitas, e^{-} – elektronas, n , m , x , y – elektronų skaičius.



1.11 pav. Srauto baterijos struktūra [20]

Ryšys tarp srauto baterijos išorinės srovės tankio (A/cm^2) ir elektrinio potencialo (V) bendru atveju gali būti išreikštas taip [21]:

$$i = i_0 \left[\left(\frac{c_O(0,t)}{c_O^*} \right) \exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta \right) - \left(\frac{c_R(0,t)}{c_R^*} \right) \exp\left(- \frac{(1-\alpha)F}{RT} \eta \right) \right]. \quad (1.19)$$

čia i_0 – joninės membranos srovės tankis (A/cm^2), α – elektronų pernešimo koeficientas, F – Faradėjaus konstanta ($96487 C \cdot mol^{-1}$), R – universalioji dujų

konstanta ($8,3143 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$), T – absoliutinė temperatūra (K), c_O ir c_R yra oksiduoto ir redukuoto elektrolito koncentracijos (mol/cm^3), η – elektrinis potencialas (V). „*“ pažymėtos koncentracijos atitinka nustatytas pradines (pusiausvyros) vertes.

Elektrinis potencialas η nusakomas, kaip potencialų skirtumas tarp nulinio potencialo (elektrodais srovė neteka) ir potencialo, kai elektrodais teka elektros srovė [21]:

$$\eta = \Phi_k - \Phi_p - E_{eq} . \quad (1.20)$$

čia Φ_k – elektronų potencialas (V), Φ_p – jonų potencialas (V), E_{eq} – pusiausvyros potencialas (V).

Pusiausvyros potencialas E_{eq} nusakomas lygtimi (Nersnto dėsnis) [21]:

$$E_{eq} = E_0 + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{c_O^*}{c_R^*} \right) . \quad (1.21)$$

čia E_0 – vardinis elemento potencialas (V).

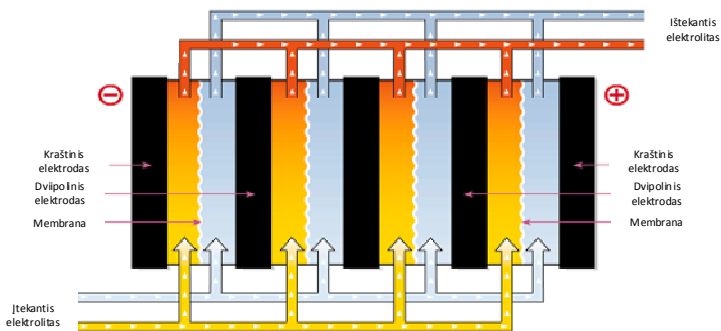
Joninės membranos srovės tankis gali būti išreikštas [21]:

$$i_0 = Fk^0 c_O^{*(1-\alpha)} c_R^{*\alpha} . \quad (1.22)$$

čia – k^0 koeficientas, nusakantis reakcijos tempą.

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

Šių baterijų galia keičiama keičiant elektrodų paviršiaus plotą arba naudojant kelis dvipolinius elektrodus. Galima sukaupti energija (talpa) priklauso nuo elektrolito kiekio, todėl gali būti padidinta didinant elektrolitų rezervuarų tūrį [22]. Srauto baterijų moduliai (dvipolinė srauto baterija) pavaizduota 1.12 paveiksle. Tokie moduliai gali būti jungiami į grupes (matricas), siekiant gauti didesnes elektros reguliavimo galias. Paprastai šie moduliai sujungiami elektriškai nuosekliai tam, kad būtų užtikrinta reikalinga įtampa. Hidrauliškai šie moduliai jungiami lygiagrečiai ir naudoja tą patį elektrolitą. Tokiu būdu yra užtikrintas visos sistemos vienodas įkrovimo lygis.

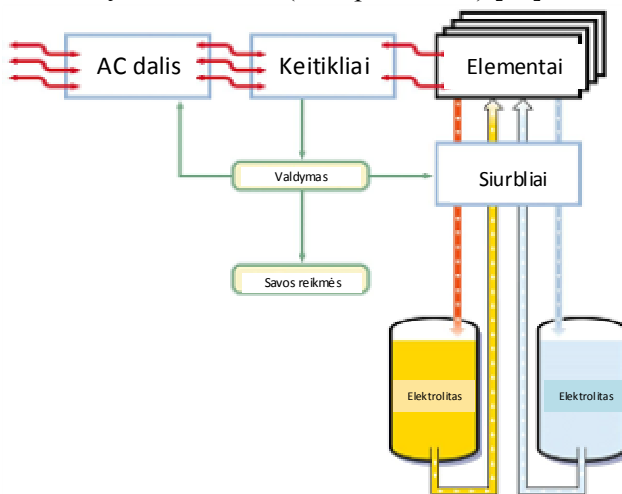


1.12 pav. Dvipolinė srauto baterija [22]

Skirtingos elektrolitų poros gali būti panaudotos srauto baterijose. Labiausiai išvystytos yra [22]:

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

Srauto baterijos gali dirbti žemos temperatūros ir slėgio sąlygomis, be to elektrolitas gali būti pilnai iškrautas be neigiamų pasekmių srauto baterijų darbui. Tai didelis šių energijos kaupimo sistemų pranašumas lyginant jas su tradicinėmis baterijomis. Elektrocheminiai procesai yra labai greiti, todėl tokių baterijų reakcijos laikas yra mažas ir priklauso nuo galios elektronikos darbo. Jungiant baterijų modulius į matricas galima pasiekti megavatų eilės galias, o tokios sistemos gali būti naudojamos elektros sistemų balansavimui (1.13 paveikslas) [22].



1.13 pav. Srauto baterijų elektrinė [22]

Srauto baterijų pagrindiniai privalumai [21, 23]:

- patikimas ir stabilus veikimas natūralioje aplinkoje;
- aukštas ciklo naudingo veikimo koeficientas (75-85 %);
- srauto baterijos galia ir energija gali būti keičiama nepriklausomai viena nuo kitos;
- labai mažas reakcijos laikas (0,001-0,01 s.);
- ilgas tarnavimo laikas (>10000 ciklų, 7-15 metų);
- elektrolitas gali būti pilnai iškrautas ir vėl įkrautas be jokios žalos srauto baterijos savybėms.

Tokios baterijos gali būti pritaikytos:

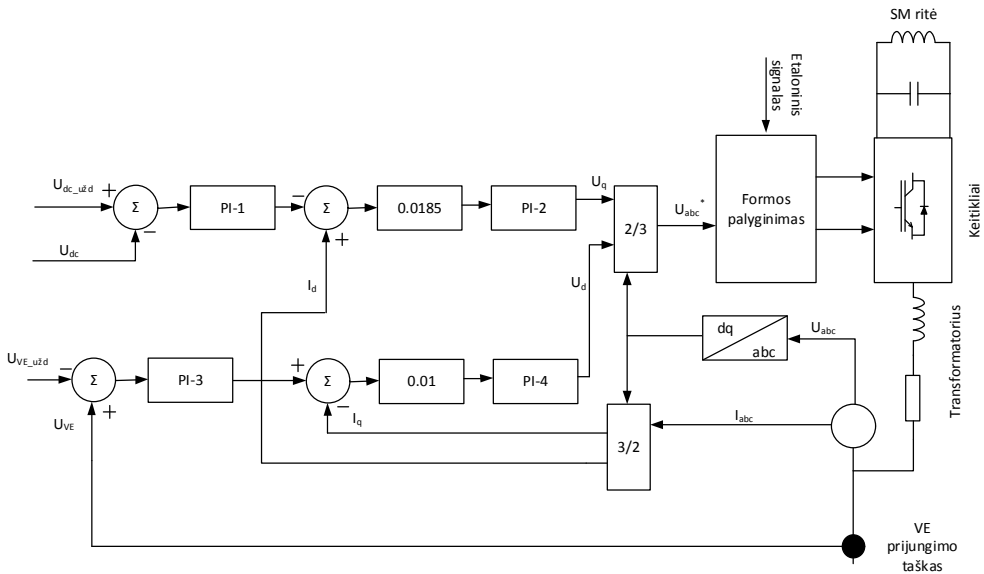
- kaip rezervinis energijos šaltinis (UPS įrenginys);
- elektros sistemos apkrovos grafiko lyginimui;
- atsinaujinančių elektros energijos šaltinių galios nepastovumo balansavimui;

- visos elektros energetikos sistemos balansavimui;
- Elektros energetikos sistemos dažnio nustatytose ribose palaikymui.

Tokios energijos kaupimo sistemos valdomos naudojant panašius principus kaip ir inercinių generavimo agregatų atveju, pasitelkiant galios elektronikos įrenginius.

1.3.3. Superlaidžių magnetų energijos kaupimo sistemos

Vienas iš vėjo elektrinių ar kitų atsinaujinančius energijos išteklius naudojančių elektrinių balansavimo variantų yra energijos kaupimas panaudojant superlaidžių magnetinių medžiagų ritę ir kaupti energiją magnetiniame lauke. Tokios sistemos angliškai vadinamos – superconducting magnetic energy storage systems (SMES). Šios sistemos pasižymi ilgu tarnavimo laiku, nes jose nėra judančių mechaninių dalių, mažu reakcijos laiku ir aukštu energijos kaupimo ciklo efektyvumu [24]. Priklausomai nuo poreikio aktyvioji ir reaktyvioji galia gali būti atiduodama arba suvartojama (kaupiama) superlaidžių magnetinių medžiagų ritėje, ją tinkamai valdant galios elektronikos pagalba. Praktiškai tokių sistemų efektyvumas ir reakcijos laikas didžiąja dalimi priklauso nuo galios elektronikos valdymo efektyvumo. Pagerinus valdymą stipriai pagerėja ir tokių sistemų panaudojimo galimybės. Šios sistemos susideda iš superlaidžios ritės, kondensatoriaus, DC-DC pertraukiklio, AC-DC keitiklio, transformatoriaus ir valdymo elementų (1.14 paveikslas) [25].



1.14 pav. SMES sistemos valdymas [25]

Superlaidžių magnetų sistemos sukaupta energija gali būti išreikšta [25]:

$$E = \frac{1}{2} I_{sm}^2 L_{sm} \quad (1.23)$$

čia L_{sm} – ritės induktyvumas (H), I_{sm} – rite tekanti nuolatinė srovė (A).

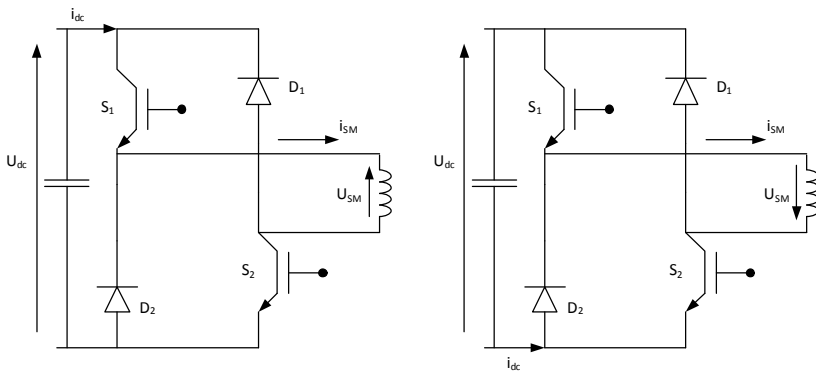
Vardinė sistemos galia yra [25]:

$$P = \frac{dE}{dt} = L_{sm} I_{sm} \frac{dI_{sm}}{dt} = U_{sm} I_{sm} \quad (1.24)$$

čia U_{sm} – įtampos kritimas ritėje (V).

Dviejų pakopų valdymo modelis su atskiru aktyviosios ir reaktyviosios srovių valdymu pavaizduotas 1.14 paveiksle. Tokio valdymo tikslas – palaikyti pastovią įtampą sistemos prijungimo vietoje (VE prijungimo taškas), išlaikant pastovią nuolatinės srovės šynų įtampą bei suformuoti valdymo signalą AC-DC keitikliui.

Priklausomai nuo DC-DC pertraukiklio darbo (D), galima išskirti tris tokios energijos kaupimo sistemos darbo režimus – įkrovimas, iškrovimas ir budėjimo būseną (1.15 paveikslas). Pertraukiklio darbas yra lygus izoliuotos užtūros dvipolinio tranzistoriaus (*angl.* IGBT) perjungimo ciklui, todėl kai $D > 0,5$ s.v. superlaidžių medžiagų ritė yra pakraunama iš tinklo, kai $D < 0,5$ s.v. – sistema išsikrauna ir atiduoda energiją į tinklą. Sistemos budėjimo režime rite tekanti nuolatinė srovė yra pastovi nepriklausomai nuo sistemos įkrovimo lygio, o DC-DC pertraukiklio darbas lygus 50 % [24]. Tokiu atveju įtampos kritimas ritėje lygus nuliui.



1.15 pav. DC-DC pertraukiklio darbas (įkrovimas ir iškrovimas) [24]

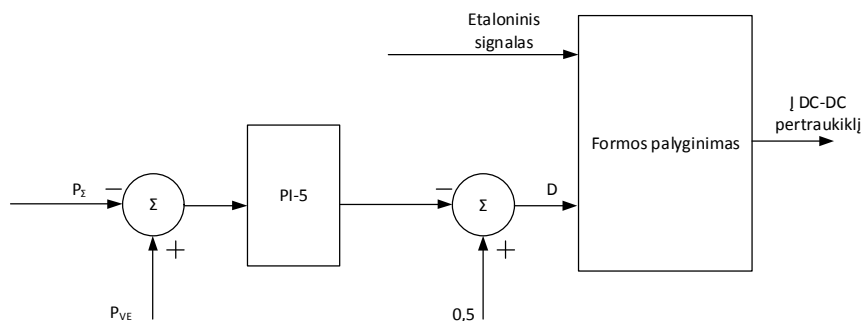
Tam, kad būtų tinkamai valdomas DC-DC pertraukiklis, suformuotas valdymo signalas palyginamas su pjūkline kreive (1.16 paveikslas) [25]

Kitas būdas valdyti superlaidžių magnetų sistemą yra panašus į jau paminėtą IGA sistemos valdymo būdą panaudojant PID reguliatorių [26]. Kaip ir aukščiau minėtu šios energijos kaupimo sistemos valdymo atveju, aktyvioji ir reaktyvioji galia reguliuojama tinkamai valdant AC-DC keitiklį, tačiau keičiant jo moduliacijos indeksą M_I ir atidarymo kampą α_I .

$$P_{SM} = M_1 U_S I_{sm} \cos(\alpha_1) \quad (1.25)$$

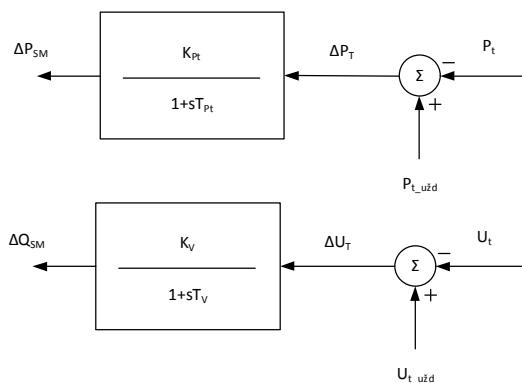
$$Q_{SM} = M_1 U_S I_{sm} \sin(\alpha_1) \quad (1.26)$$

čia U_S – kintamosios srovės šynų įtampa (V), I_{sm} – nuolatinė srovė ritėje (A), M_1 – moduliacijos indeksas, α_1 – keitiklio atidarymo kampas ($^\circ$).



1.16 pav. DC-DC pertraukiklio valdymas (P_z – suminė energijos kaupimo sistemos ir vėjo generuojama galia, P_{VE} – vėjo generuojama galia) [25]

Valdymo tikslas, kaip ir aukščiau minėtu atveju, yra palaikyti pastovią suminę vėjo ir energijos kaupimo sistemos generuojamą galią bei pastovią kintamosios srovės šynų įtampą. Iš čia nustatoma reikalinga energijos kaupimo sistemos generuoti arba absorbuoti aktyvioji ir reaktyvioji galia (ΔP_{SM} ir ΔQ_{SM}) (1.17 paveikslas) [26].

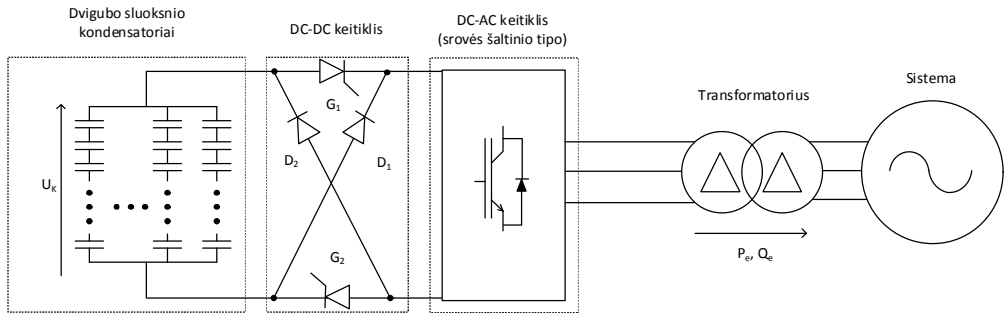


1.17 pav. Reikalingos SMES aktyviosios ir reaktyviosios galios nustatymas [26]

Šie dydžiai toliau panaudojami nustatant valdymo parametrus AC-DC keitikliui. Kaip ir inercinių generavimo agregatų valdymo atveju, panaudojant PID, šiame reguliatoriuje suminis energijos kaupimo sistemos ir vėjo generuojamos aktyviosios galios srautas panaudojamas kaip grįžtamasis ryšys tam, kad tinkamai slopinti galios svyravimus. Regulatoriaus perdavimo funkcija šiuo atveju atitinka (1.14) formulėje pateiktą išraišką [26].

1.3.4. Energijos kaupimo sistemos panaudojant kondensatorius

Atsinaujinančių energijos šaltinių generuojamos galios balansavimui gali būti panaudotos dvigubo sluoksnio kondensatorių energijos kaupimo sistemos (*angl.* EDLC). Tokia sistema susideda iš dvigubo sluoksnio kondensatoriaus bei nekryptinių DC-DC ir DC-AC keitiklių (1.18 paveikslas) [27]. Dvigubo sluoksnio kondensatoriai yra saugesni aplinkai ir turi ilgesnį tarnavimo laiką nei įprastos akumuliatorių baterijos, tačiau jų įtampa sąlyginai žema (≤ 3 V), o nuostoliai gana nemaži, todėl tokios sistemos naudojamos rečiau [28].



1.18 pav. EDLC energijos kaupimo sistema [27]

Energijos kaupimo sistema panaudojant kondensatorius kaupia energiją, kai nuolatinės srovės šynų įtampa U_{dc} yra neigiama ir išsikrauna, kai U_{dc} yra teigiama, nes šioje sistemoje nuolatinė srovė visada yra teigiamos krypties. DC-DC keitiklio darbo principą ir energijos kaupimo sistemos darbo režimo valdymą iliustruoja 1.18 paveikslas. Kai tiristorius $G1$ ir diodas $D1$ dirba kaip žeminantysis keitiklis (tiristorius $G2$ atidarytas), nuolatinės srovės šynų įtampa U_{dc} yra teigiama ir sistema atiduota sukauptą energiją į tinklą (1.19 paveikslo a dalis). Kai tiristorius $G2$ ir diodas $D2$ dirba kaip aukštinantysis keitiklis (tiristorius $G1$ uždarytas), nuolatinės srovės šynų įtampa U_{dc} yra neigiama, o sistema naudoja energiją iš tinklo – įsikrauna (1.19 paveikslo b dalis) [27].

AC-DC keitiklio valdymo schema pavaizduota 1.20 paveiksle. Aktyvioji ir reaktyvioji energijos kaupimo sistemos galia yra reguliuojama valdant keitiklio atidarymo kampą α ir nuolatinę srovę i_{dc} [27]:

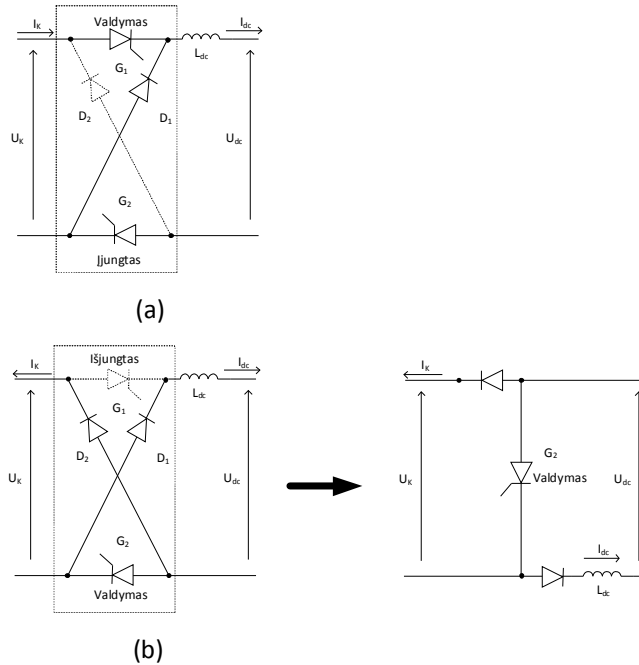
$$\begin{cases} \alpha_{užd} = \tan^{-1}\left(\frac{q_{\alpha m}}{p_{\alpha m}}\right); \\ i_{dcužd} = \sqrt{p_{im}^2 + q_{im}^2}. \end{cases} \quad (1.27)$$

čia $p_{\alpha m}$ ir $q_{\alpha m}$ bei p_{im} ir q_{im} – aktyviosios ir reaktyviosios galios dedamosios (W ir Var).

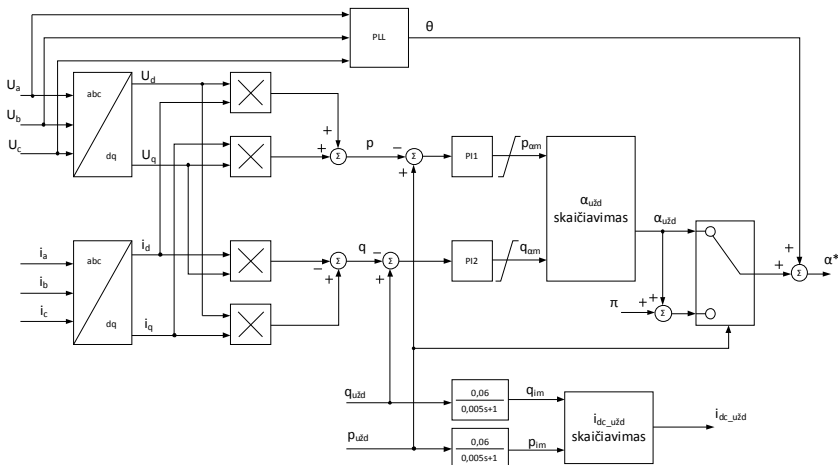
Keitiklio atidarymo kampas yra $-\pi/2 < \alpha > \pi/2$ diapazone, todėl sistemos užkrovimo metu ($p_{užd} < 0$) keitiklio atidarymo kampas lygus $\alpha^* = \pi - \alpha_{užd}$. „*“ pažymėtas skaičiuojamasis parametras.

Nuolatinė srovė $i_{dc_užd}$ valdo DC-DC keitiklį ir yra naudojama jo valdymo grandinių įėjime (1.21 paveikslas).

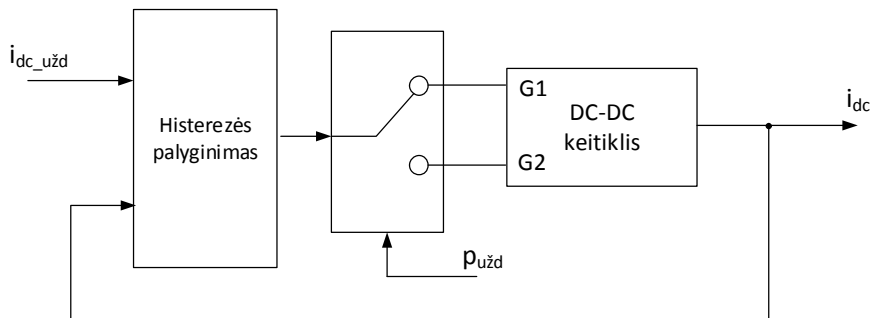
Aktyviosios ir reaktyviosios galių numatytųjų verčių ($p_{užd}$ ir $q_{užd}$) nustatymui gali būti naudojama schema, parodyta 1.22 paveiksle.



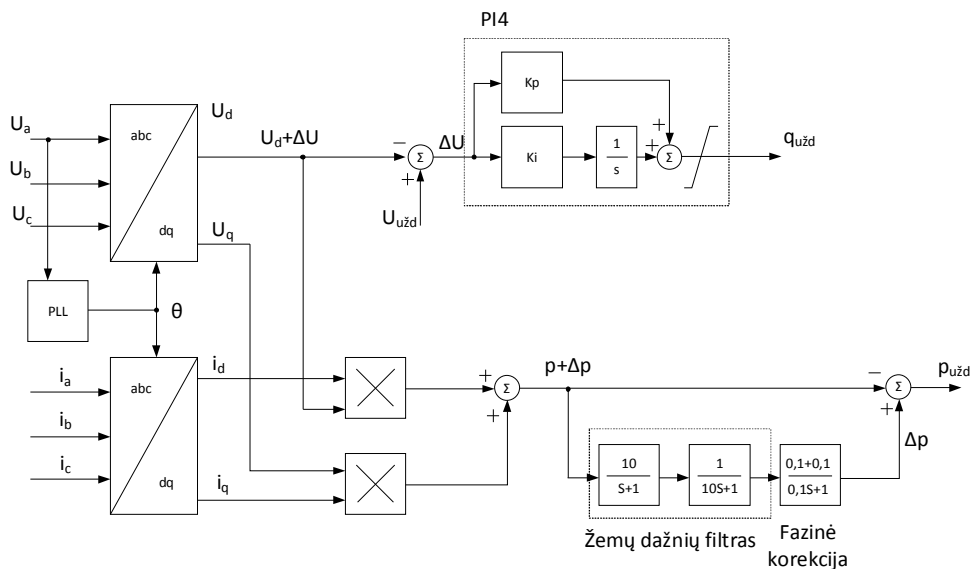
1.19 pav. DC-DC keitiklio darbas [27]



1.20 pav. AC-DC keitiklio valdymas [27]



1.21 pav. DC-DC keitiklio valdymas [27]



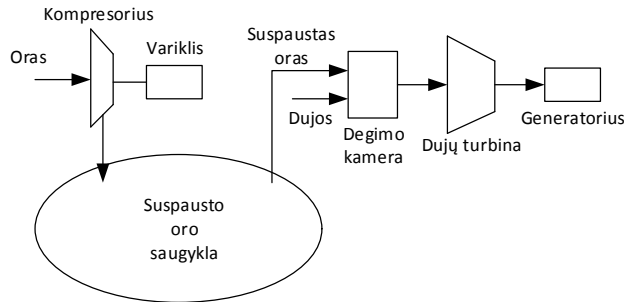
1.22 pav. $p_{užd}$ ir $q_{užd}$ nustatymas [27]

1.3.5. Suspausto oro sistemos

Suspausto oro energijos kaupimo sistemos (*angl.* CAES) veikimas paremtas tradicinės dujų turbinos veikimu, kuriai be kuro (dujų) taip pat tiekiamas ir suspaustas oras. Tai leidžia ženkliai sutaupyti reikalingą kuro kiekį ir taip padidinti turbinos darbo efektyvumą. Tokių sistemų efektyvumas gali siekti 80 % [28]. Šios energijos kaupimo sistemos turi kompresorių, kuris naudojamas orui suspausti. Suspaustas oras talpinamas rezervuaruose. Tam tikslui panaudojama natūraliai žemėje susiformavę kietų uolinių urvai arba senos, nenaudojamos druskų ar anglių kasyklos (1.23 paveikslas).

Suspausto oro sistema gali generuoti elektros energiją tiekiant kurą ir suspaustą orą į dujų turbiną, kuri suka elektros generatorių. Tokią sistemą galima užkrauti iš tinklo, t. y. kompresoriaus pagalba spausti orą į rezervuarą ir taip kaupti

energiją. Suspausto oro sistemos yra gana paprastos, patikimos ir nebrangios (dujų turbina ir kompresorius sąlyginai nebrangūs), tačiau suspaustam orui talpinti reikalingi požeminiai rezervuarai stipriai riboja jų panaudojimą [29]. Kaip ir hidroelektrinių ar hidroakumuliacinių elektrinių statybai reikalinga tinkama vieta, taip ir šių sistemų įrengimui reikia surasti urvą ar seną kasyklą, kuri turi būti arti išvystyto elektros tinklo. Nepaisant to, šios sistemos geriau tinka atsinaujinančiosios energijos šaltinių balansavimui nei hidroelektrinės ar hidroakumuliacinės elektrinės, nes dujų turbina yra manevringesnė nei hidroturbina [29].



1.23 pav. Suspausto oro energijos kaupimo sistema

Tokios sistemos generuojamos galios valdymas pagrįstas tradicinės dujų turbina valdymu, kai kontroliuojamas dujų turbina sukimosi greitis, o generuojama galia keičiama keičiant paduodamo kuro ir oro kiekius [30, 31]. Todėl vėjo elektrinių ar visos elektros energetikos sistemos galių balansavimas gali būti vykdomas gana sklandžiai. Energijos kaupimo sistemos įkrovimo lygio valdymas remiasi kompresoriais, kurie spaudžia orą į rezervuarus, darbo valdymu.

Kompresoriai paprastai dirba pastovaus slėgio palaikymo režimu, todėl jų galia reguliuojama priklausomai nuo suspaudžiamo oro slėgio pokyčių [32]. Pats paprasčiausias valdymo būdas yra kai kompresoriaus įjungiamas arba išjungiamas reikiamam slėgiui palaikyti. Toks būdas netinka staigiai kintančioms slėgio apkrovoms bei labiau dėvi įrangą. Kitas valdymo būdas yra kompresorių apkrovos pakeitimas, kai didėjant slėgiui, dalis jų nukraunama iki 15–35 % savo maksimalios galios. Centrifuginiams kompresoriams valdyti gali būti panaudotas įtekančio oro ribojimo metodas, kai priklausomai nuo slėgio pokyčių ribojamas įtekančias oras, keičiant įleidimo vožtuvo atidarymą. Pats lanksčiausias kompresorių valdymo būdas yra naudojant dažnio keitiklius, kai kompresoriaus apkrova gali būti lanksčiai reguliuojama, priklausomai nuo slėgio pokyčių.

Ryšys tarp oro slėgio, srauto ir kompresoriaus sukimo momento bei greičio gali būti užrašytas [33, 34]:

$$q = V \cdot \omega$$

$$T = -V \cdot p \quad (1.28)$$

čia q – oro srautas (m^3/s), V – oro tūris (m^3), ω – sukimosi greitis (rad/s), p – oro slėgis (Pa), T – sukimo momentas (Nm).

Energijos kaupimo sistemos sukauptą energiją priklausai nuo oro tūrio ir slėgio:

$$E = p_0 \cdot V \cdot (r \ln r - r + 1) \quad (1.29)$$

čia E – energija (W), V – oro tūris (m^3), p_0 – atmosferos slėgis (Pa), r – suspausto oro slėgio ir atmosferos slėgio santykis.

1.4. Vėjo elektrinių galių balansavimo valdymo metodai ir balansavimo tyrimų apžvalga

Šiame skyriuje trumpai aprašyti pagrindiniai vėjo elektrinių galių balansavimo valdymo metodai, panaudojant greitaveikes energijos kaupimo sistemas. Tradicinis balansavimo galių valdymo metodas, kai sistemos galias balansuoja šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės, valdomos automatinio generavimo valdymo sistemos, buvo pateiktas 1.2. skyriuje. Taip pat šiame skyriuje pateikiama vėjo elektrinių galių balansavimo tyrimų, vykdomų pasaulyje, apžvalga.

Vienas iš galimų vėjo elektrinių galių balansavimo valdymo būdų yra atskirų vėjo elektrinių ar vėjo elektrinių parkų generuojamos galio kreivės lyginimas panaudojant filtrus. Atskiros vėjo elektrinės generuojama galia į tinklą šiuo atveju yra [35]:

$$P = \frac{1}{1 + T_S} \cdot P_{VT} \quad (1.30)$$

čia P – vėjo elektrinės į tinklą atiduodama galia (MW), P_{VT} – vėjo elektrinės generuojama galia (MW), T – filtro laiko pastovioji (s).

Galios svyravimai yra kompensuojami energijos kaupimo sistemos. Esant generuojamos galios pertekliui energijos kaupimo sistema yra įkraunama, o esant galios trūkimui, energijos kaupimo sistema išsikrauna. Šis metodas gerai tinka atskirų vėjo elektrinių galioms balansuoti, tačiau reikia ir atskirų energijos kaupimo sistemų kiekvienai vėjo elektrinei ar elektrinių parkui [36]. Be to jis nepritaikytas centriniam vėjo elektrinių galių balansavimui. Taikant tokį valdymo būdą, taip pat reikia žinoti, kokie vėjo elektrinės galios svyravimai yra leidžiami elektros tinklų operatorių, kuriuos turės subalansuoti kitos sistemoje veikiančios elektrinės. Tai reiškia, kad vėjo elektrinės generuojama galia nėra išlaikoma pastovi, be to tai apsunkina reikiamų energijos kaupimo sistemos parametrų nustatymą. Gera metodo savybė yra ta, kad nėra būtina vėjo elektrinės generuojamos galios prognozė [37].

Kitas vėjo elektrinių galių balansavimo valdymo metodas yra vidutinės vėjo elektrinės generuojamosios galios išlaikymo metodas. Taikant šį būdą į tinklą atiduodama vėjo elektrinės galia yra lygi nustatyto intervalo, paprastai vienos valandos, vidutinei vėjo elektrinės generuojamai galiai [35]:

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P_{VT}(\tau) d\tau \quad (1.31)$$

čia P – vėjo elektrinės į tinklą atiduodama galia (MW), P_{VT} – vėjo elektrinės generuojama galia (MW), t_0 – pradinis laiko momentas (s), T – laikotarpis, kuriam skaičiuojama vėjo elektrinės vidutinė galia (s).

Energijos kaupimo sistema įkraunama, kai faktinė vėjo elektrinės galia didesnė nei vidutinė ir išsikrauna, kai vėjo elektrinės galia nesiekia nustatytos vidutinės galios. Naudojant šį valdymo metodą, priešingai nei aukščiau aprašytu atveju, reikalinga vėjo elektrinių galios prognozė [38], tačiau vėjo elektrinės atiduodama į tinklą galia išlaikoma pastovi. Pagrindinis metodo trūkumas yra tas, kad reikia didelių įrengtosios galios ir talpos verčių energijos kaupimo sistemų. Šis metodas taip pat nepritaikytas centriniam valdymui.

Panašus į vidutinės galios išlaikymo metodą yra minimalios ir maksimalios vėjo elektrinių galios metodas. Pastarojo metodo esmė yra tokia, kad vėjo elektrinės į tinklą atiduodama galia tam tikru nustatytu laikotarpiu yra laikoma minimali, kai energijos kaupimo sistema yra įkraunama ir maksimali, kai energijos kaupimo sistema išsikrauna [39]. Šio metodo didžiausias privalumas toks, kad energijos kaupimo sistema dirba pilnu įkrovimo ir iškrovimo ciklu ir jos darbo resursas stipriai padidėja [40]. Tačiau, kaip ir vidutinės vėjo elektrinės galios išlaikymo metodu, reikia didelių galių ir talpų energijos kaupimo sistemų atskiriems vėjo elektrinių parkams. Taip pat reikalinga vėjo elektrinių generuojamos galios prognozė.

Dar vienas vėjo elektrinių galių balansavimo valdymo metodas, panaudojant energijos kaupimo sistemas, yra generuojamų galių valdymas pagal vėjo elektrinės galios kitimo greičio ribas. Taikant šį metodą, energijos kaupimo sistema yra įkraunama, kai vėjo elektrinės galios didėjimo greitis pasiekia tam tikrą nustatytą ribą ir išsikrauna, kai vėjo elektrinės galia mažėja tam tikru nustatytu greičiu [35]. Toks metodas nėra sudėtingas, tačiau, kaip ir pirmu atveju panaudojant filtrus, vėjo elektrinės galia nėra išlaikoma pastovi. Tai apsunkina reikiamų energijos kaupimo sistemos parametrų nustatymą, nes reikia žinoti visos elektros sistemos galių balansavimo galimybes. Kaip ir kitais, šiame skyriuje aprašytais valdymo metodais, jis netinka centriniam valdymui, tačiau nereikalauja vėjo elektrinių generuojamos galios prognozavimo.

Apžvelgus pagrindinius pasaulyje taikomus vėjo elektrinių galių balansavimo valdymo metodus panaudojant energijos kaupimo sistemas matyti, kad kiekvienas iš jų turi tiek teigiamų tiek ir neigiamų savybių, tačiau visi jie yra pritaikyti atskirų vėjo elektrinių ar vėjo elektrinių parkų galių balansavimui ir netinka dabartiniu metu elektros perdavimo sistemų operatorių naudojamam centriniam galių reguliavimui. Toliau pateikiamoje vėjo elektrinių galių balansavimo tyrimų apžvalgoje, būtent centrinis galių reguliavimas pasaulio mokslininkų yra įvardinamas, kaip efektyviausias ir ekonomiškiausias elektros energetikos sistemų valdymo būdas.

Jungtinių Amerikos Valstijų nacionalinė atsinaujinančiosios energetikos laboratorija išnagrino vėjo elektrinių balansavimą ekonominiu požiūriu ir savo ataskaitoje [41] konstatavo, kad didėjant atsinaujinančius energijos išteklius naudojančių elektrinių skverbčiai, reikalinga lanksti elektros energetikos sistema. O sistemos lankstumą labai padidina energijos kaupimo įrenginiai. Ataskaitoje taip pat identifikuota, kad centralizuotas valdymas yra efektyviausias, tačiau reikalingi papildomi sistemos dinaminio stabilumo tyrimai šioje srityje. Ataskaitos rezultatams iš esmės pritaria ir Vokietijos mokslininkai, kurie teigia, kad technologinis progresas reikalingas energijos kaupimo ir apkrovų valdymo srityse [42]. Lenkijos mokslininkai gavo analogiškas išvadas dėl efektyvesnio centrinio galių balansavimo

valdymo, nors jų išvados buvo pagrįstos atskirų vėjo elektrinių galių balansavimo tyrimais [43]. Tuo tarpu Švedijos mokslininkai tyrinėjo vėjo elektrinių galimybes dalyvauti sistemos galių balansavime, sumažinant vėjo elektrinių generuojamą galią. Tačiau tokiu atveju yra neišnaudojamas didelis vėjo elektrinių galios potencialas [44] ir tai daro šį metodą mažiau patrauklų. Tai verčia ieškoti kitų būdų vėjo elektrinių balansavimo problemai spręsti. Kiniečiai tyrinėjo energijos kaupimo sistemų valdymą balansuojant vėjo elektrinių galias naudodami filtras [37] ir pripažino, kad jų pasiūlytas filtro parametru optimizavimo metodas yra nepraktiškas sistemos valdymui realiuoju laiku. Be to jų suskaičiuotos energijos kaupimo sistemos įrengtosios galios vertės siekia net 33 % nuo tyrinėto vėjo elektrinių parko galios. Tai rodo, kad jų parinktos filtro parametru vertės nėra optimalios, o energijos kaupimo sistemų valdymas pagal vėjo elektrinių galių kitimo tendencijas yra netinkamas. Jų kolegos pasiūlė naudoti skirtingas energijos kaupimo sistemas teigiamoms ir neigiamoms prognozavimo paklaidoms kompensuoti [45]. Tokios sistemos valdymo efektyvumui įvertinti buvo pasiūlyti specialūs rodikliai, kurie būtų skaičiuojami jų pasiūlytu modifikuotu Monte Karlo metodu. Šių tyrimų pagrindinis trūkumas yra tas, kad jie pritaikyti valandos intervalo vėjo elektrinių galios balansavimui, o tai reiškia, kad sprendžiamas tik energijos balanso uždavinys. Tuo tarpu momentinių galių kitimo kompensavimo uždavinys čia nėra sprendžiamas. Kanados ir Australijos tyrėjai savo darbuose [46–48] pasiūlė naudoti skirtingų tipų energijos kaupimo sistemas, valdomas neuroninių tinklų pagalba, tačiau vėjo elektrinių generuojamų galių balansavimui realiuoju laiku, toks valdymas yra sunkiai įgyvendinamas. Be to kelių tipų energijos kaupimo sistemos nėra reikalingos, kai vėjo elektrinės dirba jungtinėse energetikos sistemose su dideliu kiekiu generuojančių šaltinių, tokių kaip šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės. Jų pasiūlyti metodai gerai tinka mažų, izoliuotų elektros sistemų, tokių kaip namų ūkių, atveju. Tokių izoliuotų sistemų darbą, su kelių tipų atsinaujinančius energijos išteklius naudojančiomis elektrinėmis, gerai ištyrinėjo Indijos ir Irano mokslininkai. Jungtinės vėjo ir dyzelinės elektrinės sistemos valdymą, panaudojant energijos kaupimo sistemas nagrinėjo M. Mohamed Thameen Ansari ir S. Velusami iš Indijos [49]. Jie parodė, kad jų siūlomas valdiklis, paremtas „fuzzy“ logika, yra pranašesnis nei proporcinis integralinis valdiklis, tačiau jų darbą patobulino Irano mokslininkai, kurie pakeitė teršiantį dyzelinį agregatą į labiau aplinkai draugišką ir manevringesnę dujų turbiną. Papildomai buvo įtraukta ir saulės elektrinė. Siekdami maksimalios saulės ir vėjo elektrinės generuojamos galios, jie pasiūlė specialų valdiklį, paremtą Liapunovo teorija, kuris davė dar geresnius rezultatus nei „fuzzy“ logika paremtas ar proporcinis integralinis diferencialinis (PID) valdiklis [50]. Savo metodą jie taip pat patikrino tirdami jūrinės vėjo elektrinės, bangų energijos elektrinės, dujų turbinos ir baterijų energijos kaupimo sistemos bendro darbo atvejį [51].

Nors pasaulio mokslininkai intensyviai tiria vėjo elektrinių galių balansavimo valdymą panaudojant energijos kaupimo sistemas, jų pasiūlyti metodai yra pritaikyti atskirų vėjo elektrinių ar mažų, izoliuotų elektros energetikos sistemų galių balansavimui. Nagrinėtoje literatūroje nepavyko rasti metodų, kaip greitaveikes energijos kaupimo sistemas pritaikyti centriniam vėjo elektrinių galių reguliavimui ir spręsti visos elektros energetikos sistemos galių balansavimo galimybes.

1.5. Autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką

Apžvelgus vėjo elektrinių plėtros tendencijas Lietuvoje ir pasaulyje, matyti, kad tokių elektrinių statyba sparčiai didėja dėl palankaus politikų ir visuomenės požiūrio į „žalią“ elektros energijos gamybą. Elektros energijos kaupimas galėtų būti nebloga išeitis balansuojant vėjo elektrinių galias, tačiau trūksta apibendrinto požiūrio bei sprendinių į tokių įrenginių integravimą į elektros energetikos sistemos darbą bei centralizuotą jų valdymą [35–51]. Literatūroje [15–34] plačiai sutinkami konkrečių technologijų detalūs tyrimai bei jų valdymo modeliai, kurie yra pritaikyti vidinių kaupimo sistemų procesų modeliavimui. Jų sudarymui reikalinga identifikuoti daugybę parametru, kurie reikšmingos įtakos galių balansavimo rezultatui neturi. Išnagrinėjus esamą automatinio generavimo valdymo sistemos galių paskirstymo metodiką [10–14], matyti, kad didžiausi generuojamos galios pokyčiai tenka greičiausiems agregatams, todėl tai riboja energijos kaupimo sistemų integravimą į automatinio generavimo valdymo sistemos veikimą galimybes, nes jų galios keitimo greičio charakteristikos yra labai geros. Be to, dabartinis AGV sistemos veikimas nevertina elektrinių reguliavimo intensyvumo, o tai reiškia elektrinių galios keitimą maksimaliais leistiniais greičiais, kas labiau dėvi elektrinių įrangą bei didina išlaidas kurui ir remontams.

Siekiant palengvinti vėjo elektrinių galių balansavimo modeliavimą panaudojant energijos kaupimo sistemas, buvo sukurtas universalus energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis, leidžiantis modeliuoti įvairias energijos kaupimo technologijas mažesniu dinaminių parametru skaičiumi, vertinant pagrindinius tokių įrenginių parametrus – galios ir energijos (talpos) vertes, reakcijos laiką, našumo faktorių (nuostolius) bei kontroliuoti jų įkrovimo lygį.

Sudarius šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių dinaminis modelius buvo sukurtas elektrinių ir energijos kaupimo sistemų balansavimo galių valdymo modelis elektrinių ir energijos kaupimo sistemų galioms valdyti, įvertinant valdymo signalo kitimo greitį ir balansuojančių šaltinių galios keitimo greičių charakteristikas. Toks valdymo būdas leidžia tinkamai išnaudoti tradicines elektrines ir energijos kaupimo sistemas. Pasiūlyti esamos automatinio generavimo valdymo sistemos galių paskirstymo metodikos pakeitimai, leidžiantys integruoti energijos kaupimo sistemas į antrinio reguliatoriaus veikimą.

Atlikto darbo metu buvo ištirta vėjo elektrinių galių prognozavimo paklaidų įtaka sistemos balansavimo galioms bei nustatyta, kokių parametru elektrinių reikia vėjo elektrinių bei apkrovų galių subalansavimui. Taip pat buvo ištirtas vėjo elektrinių galių balansavimas panaudojant sudarytą balansavimo galių valdymo modelį. Modeliuojant buvo naudoti realių vėjo elektrinių generuotų bei prognozuotų galių duomenys bei Lietuvoje veikiančių elektrinių (Lietuvos E bei Kruonio HAE) dinaminiai parametrai. Atlikta filtrų parametru jautrumo analizė ir identifikuoti filtrų atkirtos dažniai, leidžiantys sumažinti elektrinių reguliavimo intensyvumus bei aktyviosios galios rezervus. Nustatyti elektros energijos kaupimo sistemos parametrai, reikalingi vėjo elektrinių galių balansui pasiekti. Taip pat atliktas reikiamų parametru kitimo įvertinimas toleruojant mažesnę balanso lygį.

2. ELEKTRINIŲ IR ENERGIJOS KAUPIMO SISTEMŲ GALIŲ VALDYMO DINAMINIS MODELIS

2.1. Pagrindiniai balansavimo principai ir reguliavimo galių nustatymas

Pagal elektros energijos tiekimo saugumo reikalavimus, kiekvienu laiko momentu elektros energijos gamyba turi kuo tiksliau atitikti vartojimą. Šio balanso palaikymas yra Perdavimo sistemos operatoriaus (PSO) uždavinys. Elektros energijos vartojimo galių svyravimai per parą pakankamai gerai žinomi iš praeities ir nusakomi apkrovos kreivėmis. Pagal šias kreives gali būti nustatomos kitos dienos elektros energijos poreikis ir identifikuojami reikiami generuojančių šaltinių pajėgumai.

Įdiegus atsinaujinančiosios elektros energijos šaltinių elektrines ir elektros energetikos sistemas, įprasta tvarka pasikeičia, ypač jei naujos atsinaujinančios elektrinės sudaro žymią gaminamos elektros energijos dalį. Todėl sistemos balansavimo uždavinys tampa sudėtingesnis. Balansuojant yra laikomasi tokių pagrindinių principų [52]:

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

2. Antrinio reguliavimo galios rezervas privalo atkurti pirminio reguliavimo galios rezervo dydį ir kompensuoti apkrovų ir vėjo elektrinių generuojamų galių kitimus bei paklaidas nuo suplanuotų verčių.

3. Tretinio galios reguliavimo rezervas privalo atkurti reikalingus pirminio ir antrinio reguliavimo galių rezervas.

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

5. Daugumos agregatų, dalyvaujančių pirminiame reguliavime, tipinis pirminio reguliavimo galios rezervas yra lygus 5 % agregato vardinės galios. Tik kombinuoto ciklo dujų turbininių agregatų tipinis pirminio reguliavimo galios rezervas yra lygus 10 % jų 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 gali būti priskiriama ir stabdomų hidroakumuliacinių elektrinių siurblių galia bei neveikiančių (bet galimų paleisti) 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 termofikacinių agregatų galią riboja šiluminės energijos poreikiai.

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

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

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

13. Dalyvaujančių reguliavime termofikacinių elektrinių mažiausia nustatyta galia taip pat turi būti tokia, kad reguliavimą nustatytu procentu būtų galima vykdyti į abi puses.

14. 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 yra skaičiuojami visai elektros energetikos sistemai arba atskiriems valdymo rajonams. Didžiausią atskirų agregatų ar jų grupių, prijungtų prie vienu šynų, generuojamą galią lemia pirminio reguliavimo rezervo dydis, surandamas sudėjus tą valandą esančių pirminio reguliavimo rezervų dydžius.

Skaičiuojant statistinius vėjo elektrinių generuojamų galių ir apkrovų galių balanso rodiklius (vidutines reikšmes 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 [53]:

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

čia σ_A , σ_{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 σ_{Σ} :

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

Minimali apkrovų ir generuojamų galių balansavimui reikalinga antrinio reguliavimo rezervo galia P_{ARRmin} gali būti įvertinama pagal ENTSO-E rekomenduojamą išraišką [54]:

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

čia P_{Amaks} – didžiausia tiriamojo sezono apkrovos galia (MW). a , b – empirinės parametrų 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. Kitame skyriuje pasiūlytas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis, kuris įvertina skirtingas pradinio signalo dažnio dedamąsias ir balansuojančių šaltinių galios keitimo greičių charakteristikas.

2.2. Balansavimo galių valdymo dinaminis modelis

Šiame darbe sudarytas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis apima pagrindinių generuojančių šaltinių – šiluminių ir hidroelektrinių, kurios gali balansuoti elektros energetikos sistemas (atsinaujinančius energijos išteklius naudojančių elektrinių generuojamas galias ir apkrovų galių kitimus), dalis ir energijos kaupimo sistemas. Balansavimo šaltiniams (šiluminei 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 šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių dalis – „Šiluminės E filtras“ ir „Hidroelektrinės filtras“. Balansavimo galių valdymo dinaminio modelio struktūra pateikta 2.1 paveiksle. Modelio sudarymui pasirinkta MatLab SIMULINK dinaminio modeliavimo aplinka. Šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių dinaminiai modeliai sudaryti pagal 2.3. skyriuje aprašytus elektrinių dinaminio modeliavimo principus ir šioms elektrinėms būdingas savybes. Pažymėtina, kad tradicinių elektrinių modeliai nebuvo tobulinami šio darbo apimtyje, o buvo sudaryti naudojant kitų autorių [30–33] aprašytus metodus. Elektrinių dalys atitinkamai pažymėtos 2.1 paveiksle – „Šiluminė elektrinė“ ir „Hidroelektrinė“. Energijos kaupimo sistema modeliuojama universaliu dinaminio modeliu, kuris yra pritaikytas vėjo elektrinių generuojamų galių balansavimui. Šis modelis sudarytas naudojant mažesnę dinaminį parametrų skaičių. Detalus sukurto modelio aprašymas pateiktas 2.4. skyriuje, o 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 šiluminės 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 pakankamo 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 šiluminių ir hidroelektrinių energija.

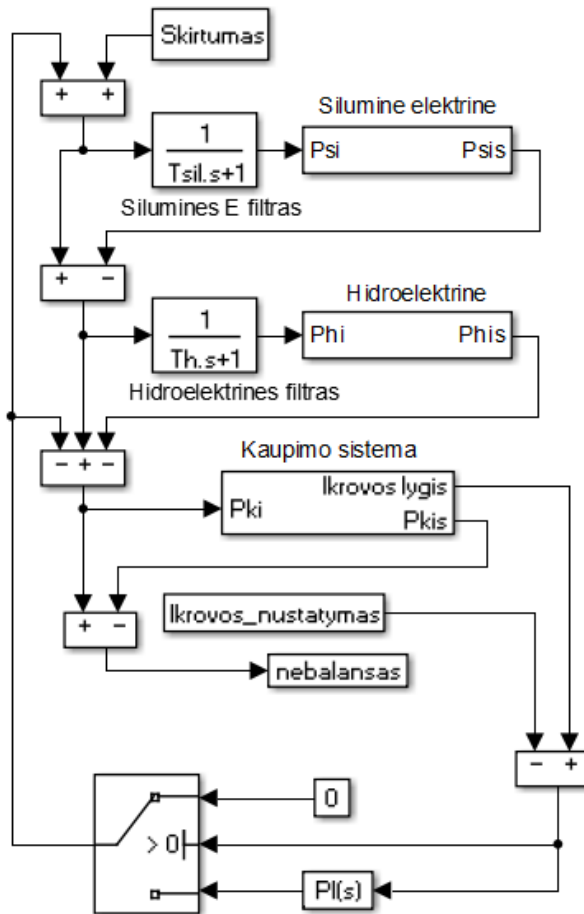
Šiluminės elektrinės dinaminis modelis apima kondensacinės elektrinės garo turbinos, garo katilo, bei elektrinės galios-greičio regulatoriaus dalis. Šios elektrinės valdymo signalas (užduotis) yra:

$$P_{ši} = (P_{Skirtumas} + P_{PI}) \cdot \frac{1}{T_{ši}s + 1} \quad (2.4)$$

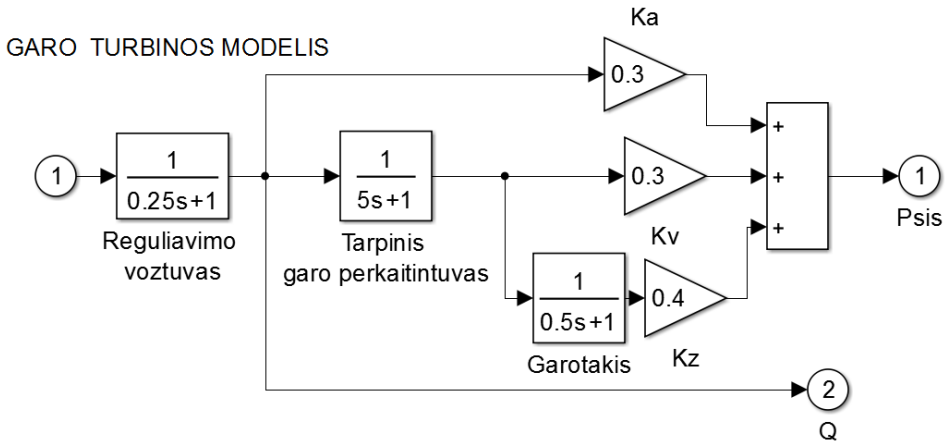
čia $P_{skirtumas}$ – skirtumo galia tarp faktinės ir prognozuotos vėjo elektrinių galių (MW), P_{PI} – energijos kaupiklių įkrovimo lygiui palaikyti reikalinga galia (MW), $T_{šil}$ – filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastovioji (s).

Šiuo atveju filtruojama tik mažo valdymo signalo kitimo greičio dedamoji ir lėčiausia elektrinė (šiluminė kondensacinė), valdoma pagal skirtumų tarp prognozuotų ir generuotų vėjo elektrinių galių kitimų tendencijas.

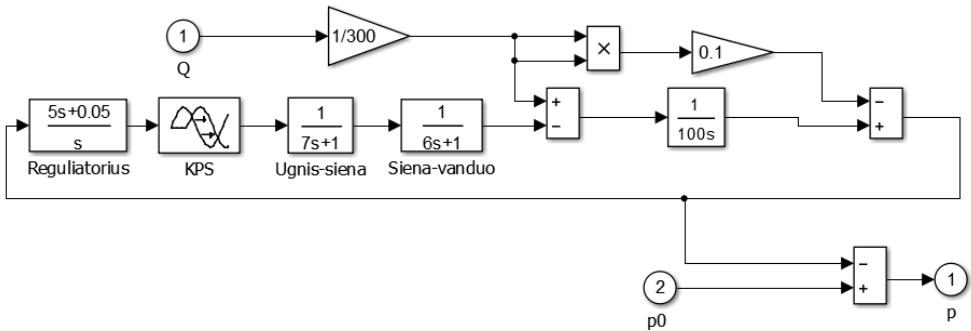
Garų turbinos modelis su aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrais pateiktas 2.2 paveiksle. Garo katilo modelis, kuris įvertina ir kuro tiekimo sistemos bei kūryklos darbą pateiktas 2.3 paveiksle. Elektrinės bei jos galios-greičio regulatoriaus modelis pavaizduotas 2.4 paveiksle. Kondensacinės šiluminės elektrinės darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumų kitimo tendencijas nuo planuotų verčių (šiluminės elektrinės modelio veikimo iliustracija), pateiktas 2.5 paveiksle.



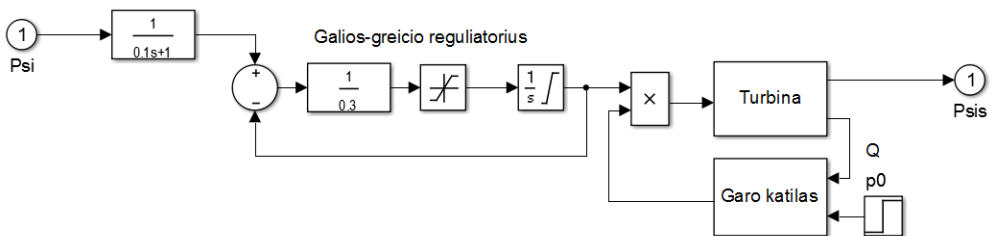
2.1 pav. Balansavimo galių valdymo dinaminis modelis



2.2 pav. Garo turbinos dinaminis modelis



2.3 pav. Garo katilo dinaminis modelis

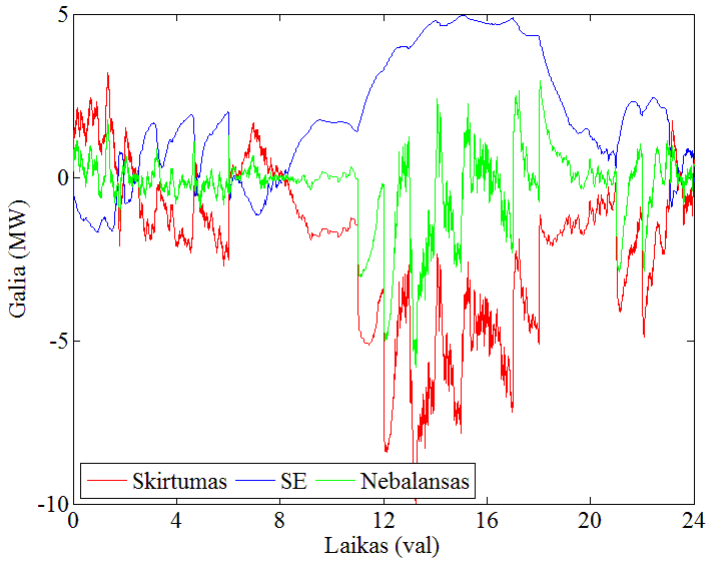


2.4 pav. Šiluminės elektrinės ir jos galios-greičio regulatoriaus dinaminis modelis

Hidroelektrinės dinaminis modelis apima hidroturbinos bei hidroelektrinės galios-greičio regulatoriaus dalis. Pažymėtina, kad šis modelis tinka modeliuoti ir hidroakumuliacinės elektrinės darbą, kai hidroakumuliacinė elektrinė veikia generatoriaus režimu. Hidroelektrinės valdymo signalas (užduotis) yra:

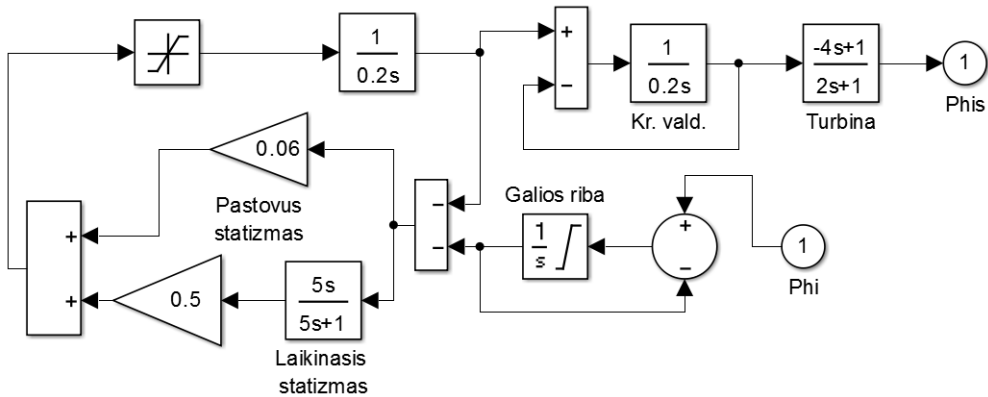
$$P_{hi} = (P_{Skirtumas} + P_{PI} - P_{Sis}) \cdot \frac{1}{T_h s + 1} \quad (2.5)$$

čia $P_{S_{i\bar{s}}}$ – šiluminės elektrinės generuojama galia (MW), T_h – filtro, esančio prieš hidroelektrinę, laiko pastovioji (s).

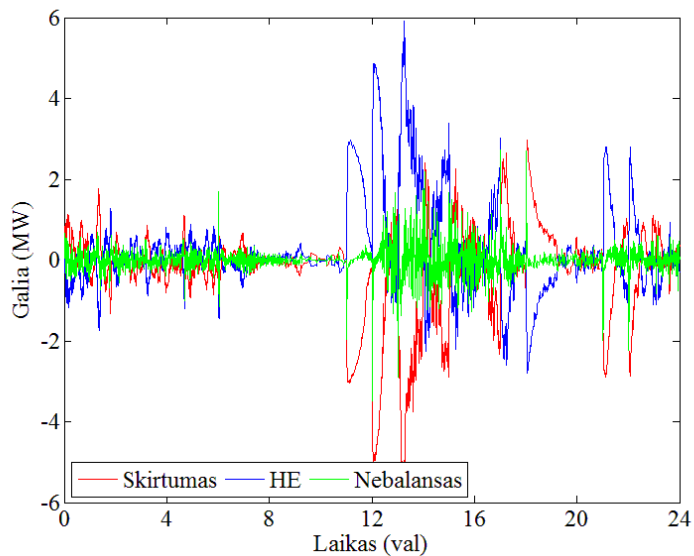


2.5 pav. Šiluminės elektrinės darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumų kitimo tendencijas nuo planuotų verčių

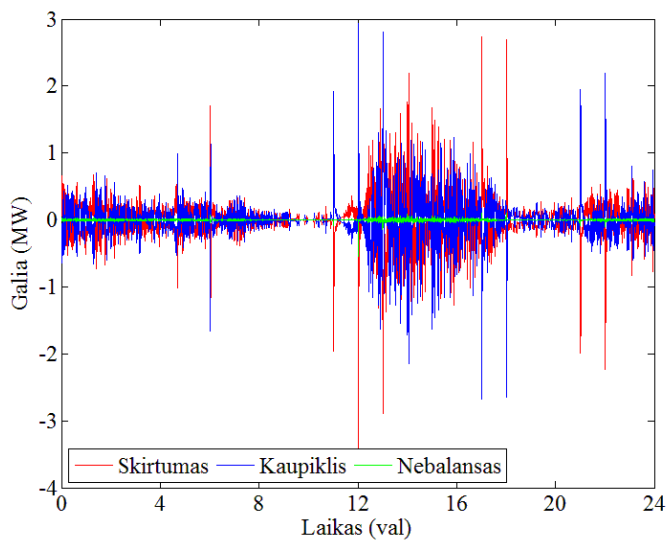
HIDROELEKTRINĖS MODELIS



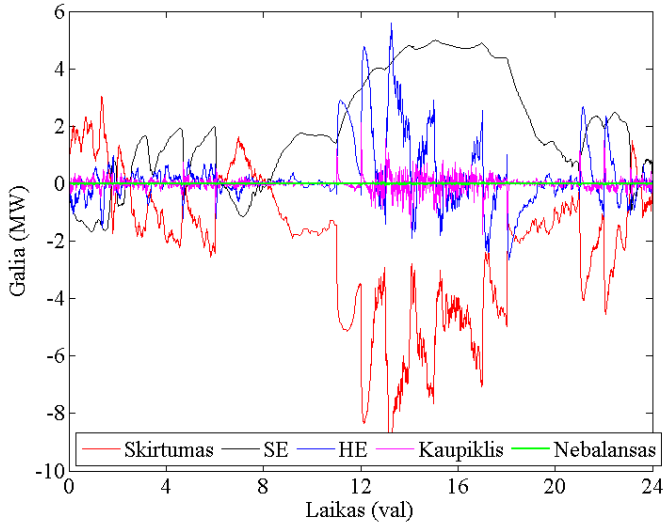
2.6 pav. Hidroelektrinės ir jos galios-greičio regulatoriaus dinaminis modelis



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



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



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

Šiuo atveju yra filtruojama vidutinio valdymo signalo kitimo greičio dedamoji ir vidutinio galios keitimo greičio charakteristikas turinti hidroelektrinė yra valdoma pagal vidutinius vėjo elektrinių generuojamų galių kitimus.

Hidroelektrinės dinaminio modelio struktūra pateikta 2.6 paveiksle, o hidroelektrinės darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumus nuo prognozuotų verčių (hidroelektrinės modelio veikimo iliustracija), pateiktas 2.7 paveiksle. Šiame paveiksle vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumas (tarp faktinių ir prognozuotų verčių) suprantamas, kaip galių likutis po šiluminės elektrinės veikimo (raudona kreivė).

Energijos kaupimo sistemos dinaminio modelio, kurio struktūra ir veikimas detalai aprašyti 2.4. skyriuje, valdymo signalas (užduotis) šiuo atveju yra:

$$P_{kj} = P_{Skirtumas} - P_{\xi_{i\bar{s}}} - P_{hi\bar{s}} - P_{PI} \quad (2.6)$$

čia $P_{hi\bar{s}}$ – hidroelektrinės generuojama galia (MW).

Šiuo atveju energijos kaupimo sistema valdoma pagal likusią didelio valdymo signalo kitimo greičio dedamąją, nes jos galios keitimo greičio charakteristikos yra geriausios.

Energijos kaupimo sistemos darbas, siekiant subalansuoti vėjo elektrinių galių skirtumus nuo prognozuotų verčių (energijos kaupimo sistemos modelio veikimo iliustracija), pateiktas 2.8. paveiksle. Šiame paveiksle vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumas (tarp faktinių ir prognozuotų verčių) suprantamas, kaip galių likutis po šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės veikimo (raudona kreivė).

Šiluminės elektrinės, hidroelektrinės ir energijos kaupimo sistemos bendras darbas (balansavimo galių valdymo dinaminio modelio veikimo iliustracija),

siekiant subalansuoti vėjo elektrinių generuojamų galių skirtumus nuo prognozuotų verčių pateiktas 2.9. paveiksle.

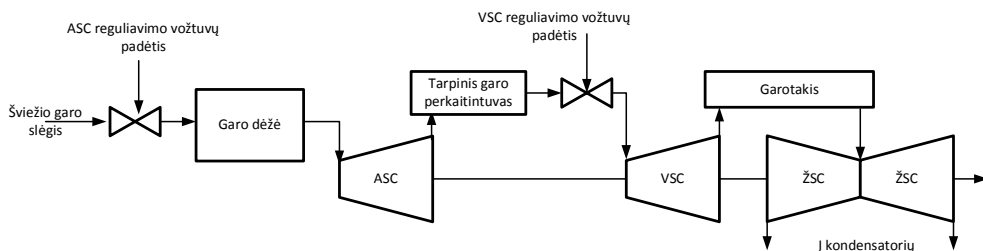
2.3. Šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės dinaminiai modeliai

Modeliuojant šiluminės elektrinės veikimą balansuojant atsinaujinančius energijos išteklius, naudojančius generuojančius šaltinius, reikia modeliuoti garo turbinos bei jos greičio regulatoriaus darbą, taip pat garo katilo ir kuro tiekimo sistemos veikimą, nes, pavyzdžiui, turbulentiniai vėjo elektrinių generuojamos galios pikai gali trukti kelias minutes, todėl garo katilo darbo režimas yra svarbus veiksnys, lemiantis tokios elektrinės galimybę tinkamai balansuoti vėjo elektrinių galias.

Garo turbinos šiluminėse elektrinėse būna trijų tipų [55]:

- kondensacinės, be tarpinio garo nuėmimo;
- termofikacinės, su garo nuėmimu šildymui ir pramonei;
- termofikacinės, su garo nuėmimu šildymui.

Garo turbiną sudaro aukšto slėgio (AS), vidutinio slėgio (VS) ir žemo slėgio (ŽS) cilindrai (2.10 paveikslas). Tipinės turbinos gali turėti tarpinį garo perkaitinimą arba jo neturėti. Jei yra garo perkaitintuvas, garas iš AS cilindro grįžta į garo katilą, ten jis yra perkaitinamas, ir patenka į VS cilindrą. Kitos elektrinės neturi VS turbinos cilindro ir tarpinio garo perkaitintuvo, tuomet garas patenka tiesiogiai į ŽS cilindrą. Kai kurios elektrinės turi dvi perkaitintuvo sekcijas.



2.10 pav. Garo turbinos su tarpiniu garo perkaitintuvu technologinė schema [10]

Klasikinės turbinos aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindruose plečiantis garui jo šiluminė energija transformuojama į mechaninį darbą. Garo turbinos galia P_T yra lygi atskirų jos cilindrų galių sumai. Bendruoju atveju, kiekvieno cilindro galia yra proporcinga tuo cilindru tekančio garo srautui [55]:

$$P_T = P_A + P_V + P_Z = Q_A \cdot K_A + Q_V \cdot K_V + Q_Z \cdot K_Z \quad (2.7)$$

čia P_A , P_V , P_Z , Q_A , Q_V , Q_Z , K_A , K_V , K_Z – aukšto, vidutinio ir žemo slėgių cilindrų galios, garo srautai ir galios proporcingumo koeficientai (s.v.).

Visų cilindrų garo srautai gali būti laikomi vienodais, kai nėra tarpinio garo nuėmimo. Tuomet garo turbinos galios išraiška tampa paprastesnė [55]:

$$P_T = Q_T \cdot (K_A + K_V + K_Z) \quad (2.8)$$

čia Q_T – turbinos garo srautas (s.v.). Normaliu režimu lygus aukšto slėgio cilindro garo srautui ($Q_T=Q_A$).

Elektros energetikos sistemų darbo režimų tyrimo kompleksuose naudojami garo turbinos modeliai yra sudaryti (2.8) išraiškos pagrindu.

Be šių pagrindinių garo turbinos dalių didelę įtaką galios ir dažnio kitimo pereinamiesiems procesams turi tarpinis garo perkaitintuvas, pagrindinio reguliavimo vožtuvo garo dėžė, cilindrų jungiantys vamzdiniai. Didžiausios šilumą akumuliuojančios talpos yra tarpiniame garo perkaitintuve. Dėl jų įtakos, šuoliu pasikeitus reguliavimo vožtuvų padėčiai, tik dalis galios (su nedidele inercija, kuri charakterizuojama garo dėžės šilumos akumuliacija) perduodama garo turbinos velenui. Kita galios dalis, kurią išvysto vidutinio ir žemo slėgio cilindrai, velenui perduodama su žymiai didesne inercija, kuri apibūdinama tarpinio garo perkaitintuvo šiluminės akumuliacijos geba.

Tiriant pereinamuosius procesus garo turbinoje, su tarpiniu garo perkaitintuvu, paprastai naudojamas šešių dalių dinaminis modelis (2.10 paveikslas). Kiekviena iš šių dalių yra aprašoma charakteringa matematine išraiška, priklausomai nuo joje vykstančių dinaminių procesų. Šių matematinių išraiškų visuma sudaro garo turbinos tiesinį matematinį modelį.

Didelės galios garo turbinos paprastai turi keturis reguliavimo vožtuvus [10]: pagrindinį stabdymo vožtuvą (SV), pagrindinį valdymo vožtuvą (PVV), perkaitintuvo uždarymo vožtuvą (PUV) ir vidutinio slėgio valdymo vožtuvą (VSVV). Paprastai PVV yra sudarytas iš keturių (arba daugiau) valdymo vožtuvų, dirbančių lygiagrečiai (arba nuosekliai). Stabdymo vožtuvai yra skirti avariniam turbinos sustabdymui ir normalaus režimo metu yra atidaryti. Pagrindinis valdymo vožtuvas reguliuoja garo srautą turbinoje normalaus jos darbo metu. Vidutinio slėgio garo valdymo vožtuvas dažniausiai yra naudojamas greitam turbinos mechaninės galios valdymui – pagreitėjimo atveju ar garo nuėmimų slėgiui valdyti.

Bet kurį garo indą galima aprašyti tūrio lygtimi [10]:

$$\frac{dW}{dt} = V \cdot \frac{d\rho}{dt} = Q_i - Q_{is} \quad (2.9)$$

čia W , Q_i , Q_{is} – garo kiekis inde (kg) ir įeinantis bei išeinantis garo srautai (kg/s); V – tūris (m^3); ρ – garo tankis (kg/m^3).

Garų srautas (iš garo indo) yra proporcingas slėgiui inde [10]:

$$Q_{is} = \frac{Q_N}{p_N} \cdot p \quad (2.10)$$

čia p – garo slėgis inde (kPa); p_N , Q_N – vardiniai slėgis ir garo srautas iš indo (kg/s).

Nekintant temperatūrai inde (2.9) išraiška gali būti užrašyta taip:

$$Q_i - Q_{is} = V \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} = V \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{p_N}{Q_N} \cdot \frac{dQ_{is}}{dt} = T_v \cdot \frac{dQ_{is}}{dt} \quad (2.11)$$

$$T_v = \frac{p_N}{Q_N} \cdot V \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (2.12)$$

čia T_V – garo tūrio laiko pastovioji (s).

Vadinasi, garo tūrį galima aprašyti aperiodinės grandinės perdavimo lygtimi [10]:

$$\frac{Q_{is}}{Q_i} = \frac{1}{1 + s \cdot T_V} \quad (2.13)$$

Pastaroji išraiška rodo, kad garo turbinos sukimo momentas yra proporcingas garo srautui.

Santykinių vienetų sistemoje nusistovėjusio režimo turbinos galią P_{T^*} galima prilyginti garo srautui Q_{T^*} , o į turbiną patenkančią garo srautą galima išreikšti pagrindinio valdymo vožtuvo ploto μ_* ir slėgio p_{T^*} sandauga [10]:

$$P_{T^*} = Q_{T^*} = \mu_* \cdot p_{T^*} \quad (2.14)$$

Pereinamojo proceso metu atskirų turbinos cilindrų ar mažesnių jos sekcijų galia keisis nevienodai. Ji priklausys nuo sekcijos santykinės galios ir garo tūrių, esančių tarp reguliavimo vožtuvo ir sekcijos, bei laiko pastoviųjų, nusakančių garo srauto inerciją.

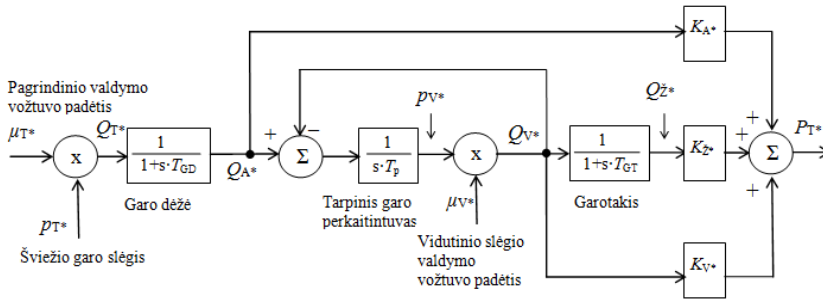
Garo srauto priklausomybę nuo PVV atidarymo pokyčio apsprendžia garo tūrio (garo dėžėje) laiko pastovioji T_{GD} . Tipinė jos vertė yra 0,1 – 0,4 s. Kondensacinės turbinos AS cilindro santykinė galios dalis K_{A^*} paprastai būna apie 0,3 (30% turbinos galios).

Vidutinio slėgio valdymo vožtuvas valdo garo srautą, patenkančią į vidutinio ir žemo slėgio cilindrų, kurie kondensacinių elektrinių agregatuose generuoja apie 0,7 s.v. (70%) turbinos galios. Tarpinio garo perkaitintuvo laiko pastovioji T_P yra gana didelė, siekia apie 5-10 s. Garotakio tarp VS ir ŽS cilindrų laiko pastovioji T_{GT} yra gana maža – apie 0,5 s. ŽS cilindro santykinė galios dalis yra – $K_{Z^*}=0,3-0,4$ s.v. (30-40% turbinos galios).

Kondensacinių turbinų be tarpinio garo nuėmimo atskirų cilindrų galios proporcingumo koeficientų (santykinių cilindrų galių) suma yra lygi vienetui [10]:

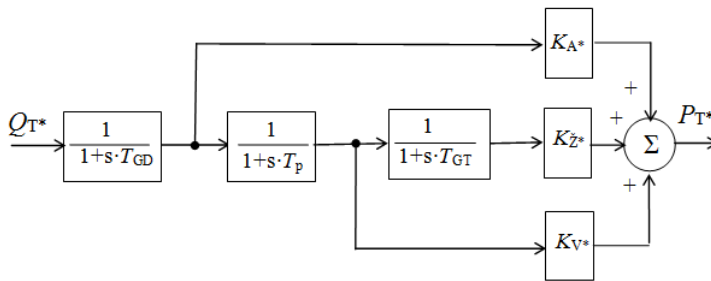
$$K_{A^*} + K_{V^*} + K_{Z^*} = 1 \quad (2.15)$$

Klasikinės sudėties (vieno veleno) garo turbinos, sudarytos iš aukšto, vidutinio ir žemo garo slėgio cilindrų bei tarpinio garo perkaitintuvo, garotakio tarp vidutinio ir žemo slėgio cilindrų bei turbinos pagrindinio valdymo ir vidutinio slėgio valdymo vožtuvų dinaminio modelio struktūrinė schema, atitinkanti 2.10 paveikslą, pateikta 2.11 paveiksle [55]. Čia p_{T^*} , p_{V^*} , μ_{T^*} , μ_{V^*} , – garo slėgiai turbinos įėjime ir tarpiniame garo perkaitintuve bei pagrindinio valdymo vožtuvo ir vidutinio slėgio valdymo vožtuvų plotai s.v.; T_{GD} , T_P , T_{GT} , – garo dėžės, tarpinio garo perkaitintuvo ir garotakio tarp vidutinio ir žemo slėgio cilindrų laiko pastoviosios; Q_{A^*} , Q_{V^*} , Q_{Z^*} – aukšto, vidutinio ir žemo slėgio turbinos cilindrų garo srautai santykiniais vienetas.



2.11 pav. Klasikinės vieno veleno garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema [55]

Jei VSVV yra nereguliuojamas garo turbinos darbo metu, tai garo turbinos dinaminio modelio schema gali būti suprastinta [56] (2.12 paveikslas).



2.12 pav. Suprastinta vieno veleno garo turbinos dinaminio modelio struktūrinė schema [56]

Garo turbinos su aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrais dinaminio modelio pilna matematinė išraiška gali būti aprašyta trečios eilės perdavimo funkcija [57]:

$$\begin{aligned}
 W_T(s) = \frac{P_{T^*}}{Q_{T^*}} &= \frac{1}{(1+s \cdot T_{GD})} \cdot \left[\left(\frac{K_{Z^*}}{(1+s \cdot T_{GT})} + K_{V^*} \right) \cdot \frac{1}{(1+s \cdot T_P)} + K_{A^*} \right] = \\
 &= \frac{K_{A^*} \cdot (1+s \cdot T_{GT}) \cdot (1+s \cdot T_P) + K_{V^*} \cdot (1+s \cdot T_{GT}) + K_{Z^*}}{(1+s \cdot T_{GD}) \cdot (1+s \cdot T_P) \cdot (1+s \cdot T_{GT})} \quad (2.16)
 \end{aligned}$$

čia K_{A^*} , K_{V^*} , K_{Z^*} – turbinos aukšto, vidutinio ir žemo slėgio cilindrų galios proporcingumo koeficientai; T_{GD} , T_P , T_{GT} – garo dėžės, tarpinio garo perkaitintuvo ir garotakio tarp vidutinio ir žemo slėgio cilindrų laiko pastoviosios; Q_{T^*} – turbinos garo srautas s.v. lygus aukšto slėgio turbinos cilindro garo srautui Q_{A^*} ; s – Laplaso operatorius.

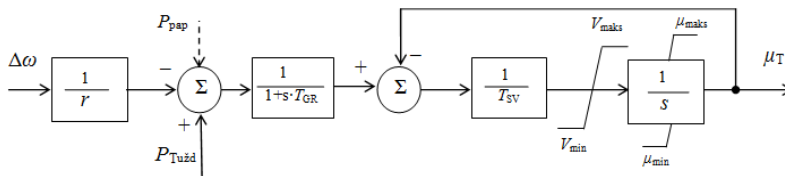
Paprastai garo turbinos galios reguliatorių sudaro greičio reguliatorius, kuris reaguoja į turbinos veleno greičio nuokrypį nuo užduotos vertės, ir turbinos valdymo mechanizmas, kuris keičia turbinos darbo tašką (užduotąją turbinos galią $P_{Tužd}$). Turbinos galia $P_{Tužd}$ ir jos veleno sukimosi greičio pokytis $\Delta\omega$ atspindi garo turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo plotą. Pereinamojo proceso metu PVV ploto ar

poslinkio kitimo pobūdis priklauso nuo turbinos reguliatoriaus statizmo r ir greičio reguliatoriaus bei servo-variklio laiko pastoviųjų T_{GR} , T_{SV} [10]. Modeliuojant garo turbinos greičio reguliavimo sistemą, reguliatorius ir servo-variklis yra įvertinami aperiodinėmis grandimis arba integravimo grandimis su tiesioginiu neigiamu grįžtamuoju ryšiu, dėl kurio tiesinėje darbo zonos dalyje, kai nepasiekiamos greičio ir poslinkio ribos, jos elgiasi kaip aperiodinė grandis. Suprastinta greičio reguliatoriaus dinaminio modelio struktūra pateikta 2.13 paveiksle, kur V_{maks} , V_{min} , μ_{maks} , μ_{min} – yra didžiausios PVV atidarymo ir uždarymo greičių vertės bei didžiausia ir mažiausia leistinosios vožtuvo ploto vertės [55].

Garso turbinos greičio reguliavimo procesų tiesinį matematinį modelį, kai neatsižvelgiama į servo-variklio greičio ir eigos apribojimus, galima aprašyti antros eilės perdavimo funkcija W_{GR} : [55]

$$W_{GR} = \frac{\mu_{T^*}}{r \cdot P_{Tužd} - \Delta\omega_*} = \frac{1}{r \cdot (s^2 \cdot T_{GR} \cdot T_{SV} + s \cdot (T_{GR} + T_{SV}) + 1)} \quad (2.17)$$

čia r , T_{GR} , T_{SV} – turbinos greičio reguliatoriaus statizmas ir jo bei servo-variklio laiko pastoviosios (s); $P_{Tužd}$, μ_{T^*} , $\Delta\omega_*$ – turbinos užduotoji galia, pagrindinio valdymo vožtuvo padėtis s.v. ir santykinis rotoriaus greičio pokytis.



2.13 pav. Garo turbinos pagrindinio valdymo vožtuvo valdymo struktūrinė schema [55]

Analogiškai galima modeliuoti ir turbinos valdymo mechanizmą, keičiantį turbinos darbo tašką – galią $P_{Tužd}$, pagal nustatytosios galios vertę ir papildomus slėgio ar galios reguliavimo bei EES centrinio reguliatoriaus signalus [55].

Jei elektrinės agregato reguliatorius veikia pastovaus slėgio palaikymo („prieš save“) režimu, į pirmąjį struktūrinės schemos sumatorių (2.13 paveikslas) yra paduodamas slėgio reguliavimo signalas P_{pap} , kuris proporcingas slėgio prieš turbiną nuokrypiui nuo nustatytosios vertės ir koreguoja turbinos užduotosios galios $P_{Tužd}$ vertę. Toks slėgio reguliatorius dažniausiai dirba su neįturtumo zona.

Garso katilo šilumos akumuliacijos savybės lemia į garo turbiną paduodamo garo slėgio dinamiką. Pagrindinė šilumos akumuliacijos charakteristika yra katilo šiluminė laiko pastovioji T_K . [10]. Garso katilas modeliuojamas suskirstant jį į atskiras dalis ir sudarant jų matematinius modelius:

1. Garso katilo šiluminės akumuliacijos modelis,
2. Kuro reguliavimo sistemos modelis,
3. Kuro degimo proceso modelis.

Analitinė katilo šiluminės laiko pastoviosios T_K vertė gali būti gauta išsprendus garo katilo ir būgno masių balanso, tūrio balanso ir energijos balanso lygtis šios laiko pastoviosios atžvilgiu [57]. Išraiška yra gana sudėtinga. Joje pagrindinės dedamosios yra proporcingos garo katilo ir būgno įšotinto vandens ir garo masėms,

o vyraujanti dedamoji yra proporcinga vandens masei. Vadinasi, kuo didesnė įsotinto vandens masė, tuo didesnė garo katilo šiluminė laiko pastovioji T_K .

Garų katilo šiluminės akumuliacijos modelio perdavimo funkcija $W_{K\dot{s}}$ yra [57]:

$$W_{K\dot{s}} = \frac{p_K}{Q_T} = \frac{1}{s \cdot T_K} \quad (2.18)$$

čia T_K – garo katilo šiluminė laiko pastovioji (s); Q_T – garo srautas iš būgno (s.v.); p_K – katilo garo slėgis (s.v.).

Staiga pakeitus PVV plotą ir registruojant būgno slėgio kitimą gana patogu nustatyti suminę garo katilo ir pirmojo perkaitintuvo laiko pastoviąją $T_K + T_{1P}$, ji gali būti išreikšta [10]:

$$T_K + T_{1P} = \frac{\Delta Q_T}{\left. \frac{dp}{dt} \right|_{t=0}} \quad (2.19)$$

čia ΔQ_T – garo srauto iš būgno pokytis (s.v.); $dp/dt|_{t=0}$ – pradinis būgno slėgio kitimo greitis.

Pirmojo perkaitintuvo garo slėgio nuostoliai yra proporcingi garo srauto kvadratui [57]:

$$\Delta p_{1P} = K_{1P} \cdot Q_T^2 \quad (2.20)$$

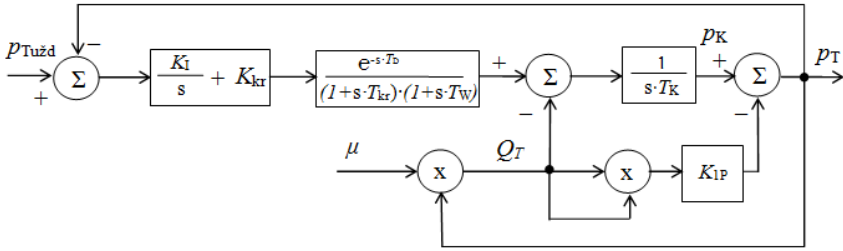
čia Q_T – garo srautas iš būgno (s.v.); K_{1P} – proporcingumo koeficientas.

Proporcingumo koeficientą K_{1P} galima įvertinti pagal vardinio režimo slėgių skirtumą tarp turbinos PVV ir būgno ($p_{KN} - p_{TN}$) bei vardinį garo srautą Q_{TN} [57]:

$$K_{1P} = \frac{p_{KN} - p_{TN}}{Q_{TN}^2} \quad (2.21)$$

Slėgio kitimas garo katile priklauso nuo šilumos srauto iš garo katilo ir būgno į turbiną (garo srautas Q_T) bei šilumos srauto iš liepsnos į vandenį katilo sienose (kuro srautas Q_{kr}). Supaprastintai garo katilą galima modeliuoti integravimo grandimi, nusakančia būgno slėgio kitimą priklausomai nuo garo ir kuro srautų kitimo.

Garų katilo reguliatorius dirbdamas pastovaus slėgio palaikymo režimu reguliuoja garo slėgį, valdydamas kuro sistemą. Toks valdymas leidžia reguliuoti šilumos srautą į vandenį katilo sienose, keičiant kuro srautą. Tam gali būti panaudotas proporcinis integralinis (PI) reguliatorius. Kuro sistemos darbas gali būti įvertintas inercinėmis ir aperiodinėmis grandinėmis, kurios nusako kuro šiluminio srauto atidavimą katilo sienoms ir katilo sienų šiluminio srauto atidavimą vandeniui. Garo katilo ir kuro sistemos dinaminis modelis, kai nevertinama papildomai vamzdžių perduodamos šilumos vandeniui ir garui inercija, pateiktas 2.14 paveiksle.



2.14 pav. Garo katilo ir kuro sistemos dinaminis modelis [10]

Kuro valdymo sistemos matematinis modelis, vertinantis paduodamo kuro kiekio pokytį, kai pasikeičia slėgis garo katile, gali būti užrašytas tokia perdavimo funkcija [57]:

$$W_{KR} = \frac{Q_{kr}}{p_{Tužd} - p_T} = \frac{s \cdot K_{kr} + K_I}{s} \quad (2.22)$$

čia Q_{kr} , p_T , $p_{Tužd}$ – kuro srauto, turbinos slėgio ir turbinos slėgio užduotoji vertės (s.v.); K_{kr} , K_I – regulatoriaus proporcinio ir integralinio kanalų stiprinimo koeficientai.

Garų katilo modelis, vertinantis kuro degimo procesą, susideda iš dviejų dalių: katilo šiluminės akumuliacijos modelio ir kuro degimo proceso modelio. Paprastai kuro degimo proceso matematinis modelis (W_D) vertina kuro padavimo grynųjų vėlavimo laiką T_D (s), kuro degimo metu perduodamos šilumos vamzdžiams inercijos laiko pastoviąją T_{kr} (s) bei vamzdžių perduodamos šilumos vandeniui ir garui inercijos laiko pastoviąją T_W (s) [55]:

$$W_D = \frac{e^{-s \cdot T_D}}{(1 + s \cdot T_{kr}) \cdot (1 + s \cdot T_W)} \quad (2.23)$$

Bendrą garo katilo modelio perdavimo funkciją W_K – santykį tarp katilo slėgio p_K (s.v.) ir kuro srauto m'_{kr} (s.v.), kai katilo garo srautas yra pastovus, galia išreikšti:

$$W_K = \frac{p_K}{m'_{kr}} = \frac{e^{-s \cdot T_D}}{s \cdot T_K \cdot (1 + s \cdot T_{kr}) \cdot (1 + s \cdot T_W)} = \frac{1}{s^3 \cdot T_{K1} + s^2 \cdot T_{K2} + s \cdot T_K} \cdot e^{-s \cdot T_D} \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} T_{K1} = T_{kr} \cdot T_W \cdot T_K \\ T_{K2} = T_K \cdot (T_{kr} + T_W) \end{cases}; \quad (2.25)$$

čia T_K , T_{kr} , T_D , T_W , p_K – katilo šiluminės inercijos laiko pastovioji (s), kuro sistemos laiko pastovioji (s) ir grynųjų vėlavimo laikas (s), katilo sienų šiluminės inercijos laiko pastovioji (s), katilo garo slėgis (s.v.).

Hidroelektrinės dinaminis modelis

Modeliuojant hidraulines turbinas taikomos pagrindinės prielaidos [58]:

1. Nevertinama hidraulinė trintis (hidraulinė varža).
2. Tariama, kad slėgio vamzdžių sienelės yra neelastingos ir vanduo yra nespūdas.
3. Vandens tėkmės greitis tiesiogiai priklauso nuo kreipračio menčių atidarymo padėties.
4. Turbinos galia proporcinga slėgio aukščiui ir pratekėjusio vandens debitui.

Hidraulinės turbinos charakteristikos nusakomos [58]:

1. Vandens tėkmės greičiu slėgimo vamzdyje.
2. Turbinos mechanine galia.
3. Vandens srauto pagreičiu.

Vandens tėkmės greitis (m/s) slėgimo vamzdyje lygus [10]:

$$U = K_U \cdot G \cdot \sqrt{H} \quad (2.26)$$

čia K_U - proporcingumo koeficientas ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-0,5}$), H - hidrostatinis slėgis (Pa), G - kreipračio menčių atidarymo padėtis (s.v.).

Elementarusis greičio pokytis [10]:

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G \quad (2.27)$$

Eliminavus dalines išvestines gaunama [17]:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0} \quad (2.28)$$

arba

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (2.29)$$

čia „0“ – pradinio laiko momento reikšmės, „-“ – nusistovėjusio režimo reikšmės.

Turbinos mechaninė galia proporcinga hidrostatiniam slėgiui H ir vandens srauto tėkmės greičiui U [10]:

$$P_m = K_p \cdot H \cdot U \quad (2.30)$$

čia K_p – proporcingumo koeficientas.

Elementarusis galios pokytis:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_0} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0} \quad (2.31)$$

arba

$$\Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} \quad (2.32)$$

Įvertinus (2.29) išraišką gaunama:

$$\Delta \bar{P}_m = 1,5 \cdot \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (2.33)$$

Taigi turbino mechaninės galios pokytis priklausantis nuo vandens srauto greičio ir kreipračio menčių padėties pokyčių [10]:

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \cdot \Delta \bar{H} - 2 \cdot \Delta \bar{G} \quad (2.34)$$

Vandens srauto pagreitis lygus [10]:

$$(\rho \cdot L \cdot A) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho \cdot a_g) \Delta H \quad (2.35)$$

čia L – vamzdyno ilgis (m), A – vamzdyno plotas (m^2), ρ – vandens masės tankis (kg/m^3), a_g – laisvojo kritimo pagreitis (m/s^2), $\rho \cdot L \cdot A$ – vandens masė vamzdyne (kg), $\rho \cdot a_g \cdot \Delta H$ – slėgio prieaugis prieš turbiną (Pa).

Padalinus abi lygybės puses iš $A \cdot \rho \cdot a_g \cdot H_0 \cdot U_0$ gaunama [10]:

$$\frac{L \cdot U_0}{a_g \cdot H_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta U}{U_0} \right) = - \frac{\Delta H}{H_0} \quad (2.36)$$

arba

$$T_V \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = -\Delta \bar{H} \quad (2.37)$$

čia $T_V = \frac{L U_0}{a_g H_0}$ vandens laiko pastovioji (s).

Vandens laiko pastovioji nurodo laiko tarpą, reikalingą stovinčio vandens srauto įsibėgėjimui iki greičio U_0 , kai hidrostatinis slėgis H_0 . Reikia pasakyti, kad T_V kinta keičiantis apkrovai [58]. Tipinės reikšmės $T_V = 0,5s \div 4s$.

Iš (2.29) ir (2.37) išraiškų galima gauti priklausomybę tarp vandens srauto greičio ir kreipračio menčių padėties [10]:

$$T_V \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = 2 \cdot (\Delta \bar{G} - \Delta \bar{U}) \quad (2.38)$$

Išvestines pakeitus Laplaso operatoriumi s gaunama [10]:

$$T_V \cdot s \cdot \Delta \bar{U} = 2 \cdot (\Delta \bar{G} - \Delta \bar{U}) \quad (2.39)$$

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} T_V \cdot s} \cdot \Delta \bar{G} \quad (2.40)$$

Eliminavus $\overline{\Delta U}$ gaunama [10, 58]:

$$\frac{\overline{\Delta P}_m}{\overline{\Delta G}} = \frac{1 - T_v \cdot s}{1 + \frac{1}{2} T_v \cdot s} \quad (2.41)$$

Pastaroji (2.41) išraiška yra klasikinė hidraulinės turbino perdavimo funkcija. Ji parodo, kaip keičiasi turbino galia pasikeitus kreipračio menčių padėčiai, t.y. jo atidarymui.

Pagrindinė turbino regulatoriaus funkcija yra valdyti turbino greitį ir galią. Pirminis greičio/galios valdymas vykdomas pagal greičio pokytį (grįžtamasis ryšys), keičiant kreipračio atidarymo kampą. Kaip jau buvo minėta, dėl vandens laiko pastoviosios, hidraulinių turbinų galios pokytis pradinio laiko momentu būna priešingas nei tikėtasi, todėl jų regulatoriams reikalingos tiek pastovaus, tiek laikinojo statizmo charakteristikos. Laikinis statizmas yra reikalingas dėl vandens turbino stabilumo – negėstančių svyravimų slopinimui turbino ir regulatoriaus sistemoje.

Pastovusis statizmas išreiškiamas, kaip dažnio ar kampinio greičio pokyčio ir galios pokyčio santykis [10]:

$$R = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \quad (2.42)$$

Čia $\Delta \omega$ – kampinio greičio pokytis (s.v.), ΔP – aktyviosios galios pokytis (s.v.).

Dažnai naudojama procentinė statizmo išraiška [10]:

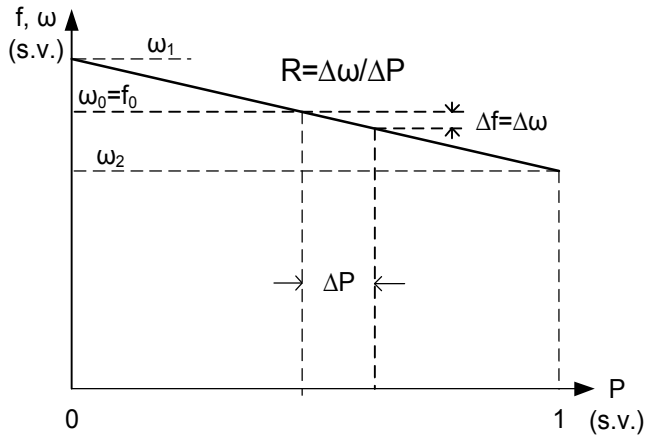
$$R = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \cdot 100\% \quad (2.43)$$

Pavyzdžiui, 5 % statizmas suprantamas, kad 5% kampinio greičio pokytis lemia 100% galios pokytį. Pastovųjį statizmą galima iliustruoti 2.15 paveikslu kreive.

Laikinojo statizmo charakteristika išreiškiama perdavimo funkcija [58]:

$$W(s) = r \frac{s T_r}{1 + s T_r} \quad (2.44)$$

čia r – laikinis statizmas (s.v.), T_r – laikinojo statizmo laiko pastovioji (s).

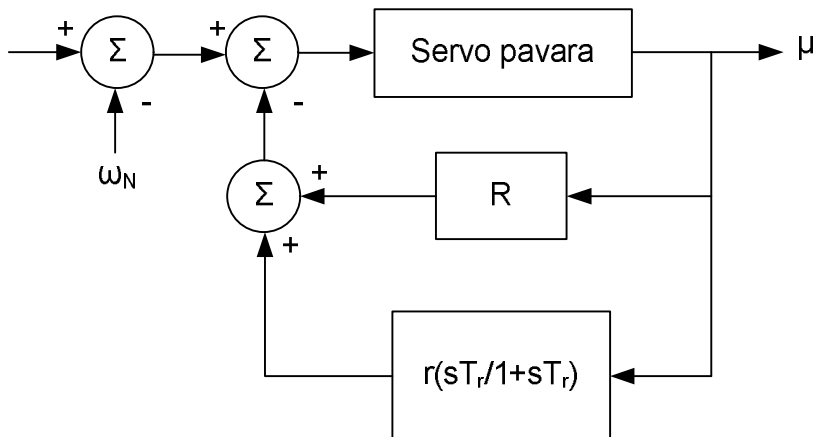


2.15 pav. Turbinos galios reguliatoriaus pastoviojo statizmo charakteristika [10]

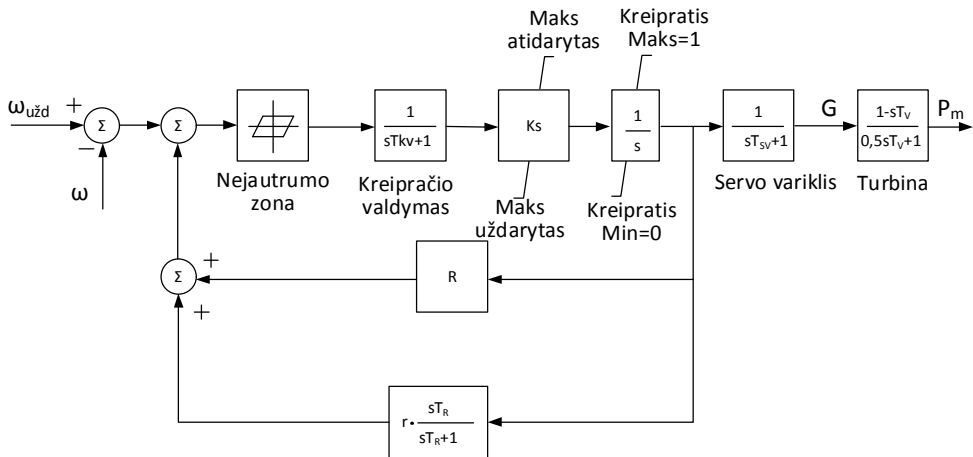
Pastoviojo ir laikinojo statizmų charakteristikos modeliuojamos dviem grįžtamaisiais ryšiais (2.16 paveikslas).

Laikinis statizmas neleidžia staiga pakisti kreipračio padėčiai tol, kol turbinos galia nepakinta. Taigi pastovusis statizmas reikalingas normalių režimų valdymui (statisis režimas, maži trikdžiai), o laikinis statizmas kompensuoja staigius galios ir greičio pasikeitimus (dinaminis režimas, dideli trikdžiai). Taip atkuriamas taip vadinamas izodrominis turbinos galios ir greičio reguliatorius.

Hidraulinės elektrinės dinaminio modelio struktūra, vertinant elektrinės galios-greičio (izodrominį) reguliatorių, pateikta 2.17 paveiksle.



2.16 pav. Turbinos galios ir greičio reguliatorius [10]



2.17 pav. Hidroelektrinės dinaminis modelis [10]

Šiluminėms ir hidroelektrinėms būdingos savybės

Paprastai šiluminės elektrinės gali būti valdomos dviem pagrindiniais metodais [10]:

- valdomas visas generatorinis agregatas;
- valdomi pagrindiniai procesų kintamieji.

Viso generatorinio agregato valdymas gali būti suskirstytas į keturis darbo režimus – katilo sekimo režimas, turbinos sekimo režimas (dar vadinamas pastovaus slėgio palaikymo režimu), koordinuoto valdymo režimas ir „slystančio“ slėgio valdymas.

Esant katilo sekimo valdymo režimui, elektrinės generuojamos galios pokytis yra inicijuojamas keičiant turbinos valdymo vožtuvo atidarymą. Daugiau atidarius valdymo vožtuvą, garo srautas ir slėgis katile sumažėja. Atsiradę skirtumai tarp faktinio garo slėgio katile ir užduotosios šio parametro vertės yra panaudojami, kaip valdymo signalai degimo proceso valdikliui didinti paduodamą kuro ir oro kiekį. Tam paprastai naudojami proporciniai integraliniai (PI tipo) valdikliai.

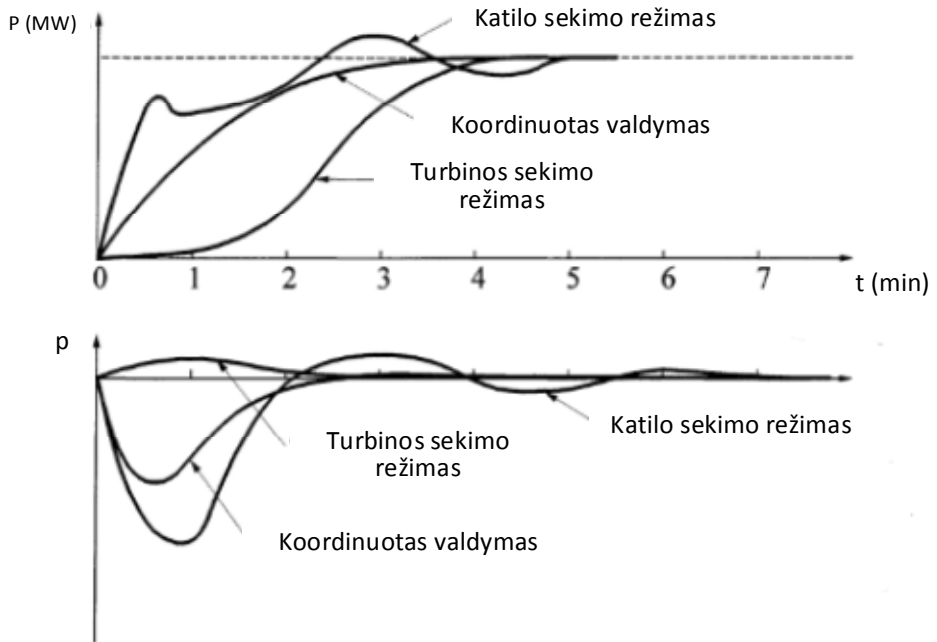
Esant turbinos sekimo valdymo režimui, elektrinės generuojamos galios pokytis (MW) tiesiogiai panaudojamas degimo valdymo procese. Turbinos valdymo vožtuvai tokiu atveju reguliuoja ne turbinos generuojamą galią, o garo slėgį katile. Toks valdymas sąlygoja beveik pastovų garo katilo slėgį.

Paveikslas 2.18 iliustruoja garo turbinos galios ir katilo garo slėgio pokyčius, staiga padidinus šiluminės elektrinės generuojamą galią.

Elektrinę valdant katilo sekimo režimu, pakeitus elektrinės generuojamą galią, katile sukaupta energija (garas) sąlygoja greitą turbinos generuojamos galios pokytį, tačiau garo slėgis katile stipriai sumažėja. Garo katilo slėgiui sumažėjus, turbinos generuojama galia taip pat krenta ir toliau didėja žymiai mažesniu greičiu, kurį sąlygoja kuro degimo procesas ir garo gamyba katile. Reikia paminėti, kad pernelyg didelis elektrinės generuojamos galios pokytis gali sukelti neleistinus garo katilo darbo režimus.

Jei elektrinė valdoma turbinos sekimo arba pastovaus slėgio palaikymo režimu, generuojamos galios pokytis nebus greitas. Jį tiesiogiai sąlygos šiluminių

procesų katile laiko pastoviosios, tačiau garo slėgis išliks stabilus. Jei nėra reikalinga dažnai keisti elektrinės generuojamos galios, toks valdymo režimas yra ekonomiškėsnis.



2.18 pav. Garo turbinos galios ir katilo garo slėgio pokytis, padidinus elektrinės generuojamą galią [10]

Koordinuotas valdymo režimas leidžia gana greitai reaguoti į elektrinės generuojamos galios pokyčius bei užtikrinti stabilų katilo darbą.

„Slystančio“ slėgio valdymo režimas iš esmės atitinka pastovaus slėgio palaikymo (turbinos sekimo) valdymo režimą, tačiau katilo slėgis tokiu atveju priklauso nuo elektrinės generuojamos galios nustatytosios vertės ir nėra pastovus. Turbinos valdymo vožtuvas yra paliekamas atviras, todėl jos darbo režimas priklauso nuo katilo valdymo. Šio valdymo režimo pagrindinis privalumas – pastovi turbinos aukšto slėgio cilindro temperatūros vertė, nes turbinos valdymo vožtuvas nereaguoja į elektrinės generuojamos galios pasikeitimus.

Pagrindinių procesų kintamųjų valdymas apima agregato galios, pagrindinio garo srauto ir slėgio, į katilą paduodamo vandens, oro ir kuro valdymą bei valdymo sistemas.

Charakteristikos, būdingos tik hidraulinėms turbinoms, gali būti aptartos, atsižvelgiant į hidraulinės turbinos perdavimo funkcijos atsaką, pakeitus kreipračio atidarymo kampą.

Turbinos mechaninės galios pokytis, staiga pakeitus kreipračio atidarymo kampą, pradiniu laiko momentu bus [10]:

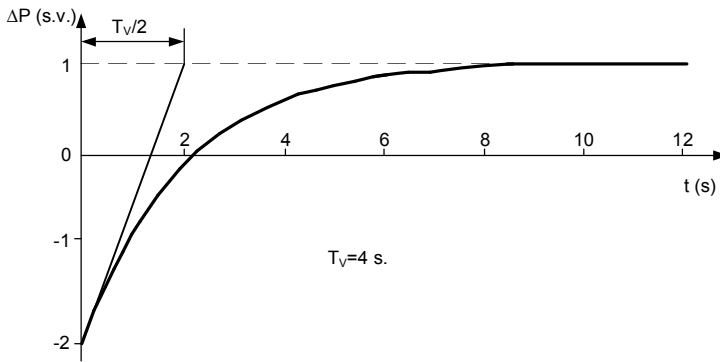
$$\Delta \bar{P}_m(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1 - T_V s}{1 + 0,5 \cdot T_V s} = -2 \quad (2.45)$$

O nusistovėjus režimui:

$$\Delta \bar{P}_m(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1 - T_V s}{1 + 0,5 \cdot T_V s} = 1 \quad (2.46)$$

Bendru atveju, įvertinus vandens inerciją, turbinos mechaninės galios pokytis, išreikštas per perėjimo funkciją, bus:

$$\Delta \bar{P}_m(t) = (1 - 3e^{-(2/T_V)t}) \cdot \Delta \bar{G} \quad (2.47)$$

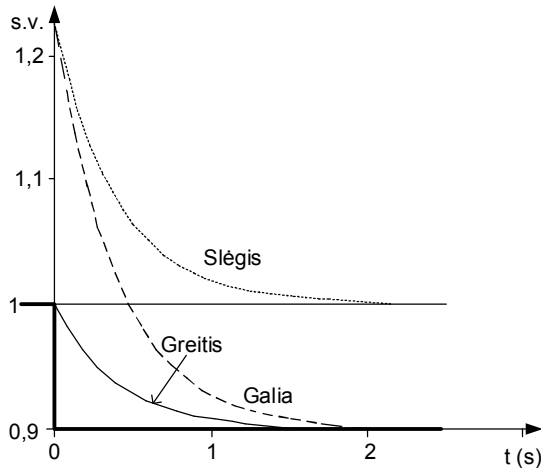


2.19 pav. Hidraulinės turbinos mechaninės galios pokytis padidinus kreipračio atidarymo kampą [10]

Paveikslas 2.19 iliustruoja hidroturbinos galios pokytį, pasikeitus (padidėjus) kreipračio atidarymo kampui, kai $T_V = 4$ s. Padidinus kreipračio atidarymo kampą vienu santykinio vienetu (nulinė vertikaliųjų ašies atžyma), mechaninė turbinos galia pirmiausiai dvigubai sumažėja (-2 s.v.), vėliau eksponentiniu dėsniu pasiekia vieno santykinio vieneto galios padidėjimą su laiko pastoviąja $T_V/2$. Taigi, pradinis galios pokytis yra priešingas nei tikėtasi. Taip yra dėl jau aptartos vandens laiko pastoviosios. Staiga atidarius kreipratį, vandens srautas dėl inercijos nespėja padidėti, slėgis sumažėja ir turbinos generuojama galia krenta.

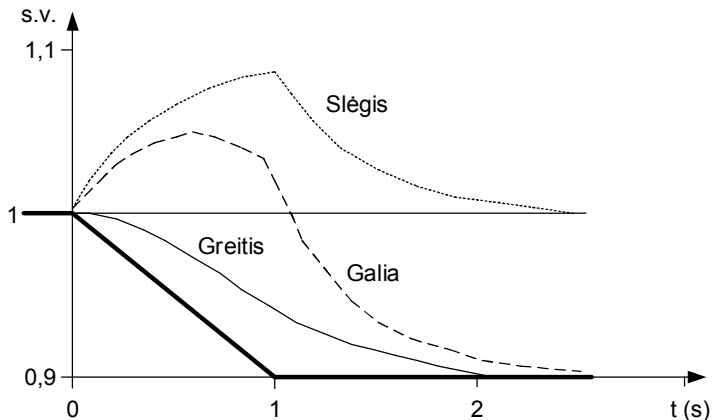
2.20 paveiksle parodyta hidraulinės turbinos galios, vandens hidrostatinio slėgio ir srauto greičio priklausomybė nuo kreipračio atidarymo kampo, jį staiga sumažinus 0,1 santykinio vieneto, kai vandens laiko pastovioji $T_V = 1$ s.

2.21 paveiksle atvaizduota hidraulinės turbinos galios, vandens hidrostatinio slėgio ir srauto greičio priklausomybė nuo kreipračio atidarymo kampo, jį palaipsniui mažinant 0,1 santykinio vieneto intervale, kai vandens laiko pastovioji $T_V = 1$ s.



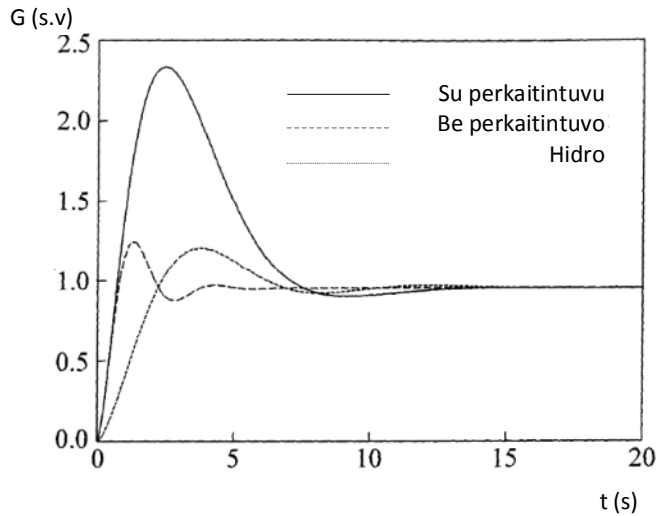
2.20 pav. Turbinos galios, vandens hidrostatinio slėgio ir srauto greičio priklausomybė staiga sumažinus kreipračio atidarymo kampą [10]

Iš 2.20 ir 2.21 paveikslų matyti, kad staiga pakeitus (sumažinus) kreipračio atidarymo kampą, turbinos ir vandens charakteristikos (galia, slėgis ir greitis) iškart mažėja eksponentiniais dėsniais su skirtingomis laiko pastoviosiomis. Palaipsniui mažinant kreipračio atidarymo kampą jaučiamas galios ir slėgio didėjimas ir tik vėliau (vandens laiko pastovioji) tiek galia, tiek slėgis mažėja eksponentiniu dėsniu. Vandens srauto greitis abiem atvejais iš karto mažėja.

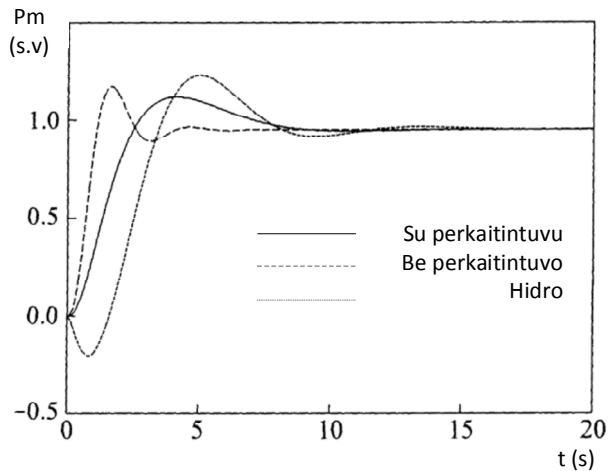


2.21 pav. Turbinos galios, vandens hidrostatinio slėgio ir srauto greičio priklausomybė palaipsniui mažinant kreipračio atidarymo kampą [10]

Tipiniai šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių mechaninės galios pokyčiai pakeitus jų reguliavimo vožtuvų (hidroelektrinėms kreipračių) atidarymą pateikti 2.22 paveiksle.



(a)



(b)

2.22 pav. Šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių mechaninės galios pokyčiai (b), pakeitus valdymo vožtuvo/kreipračio atidarymą (a) [10]

Reikia paminėti, kad priklausomai nuo garo katilo tipo ir valdymo režimo, taip pat nuo užduotojo generuojamos galios pokyčio, garo turbinos galios pokytis gali būti ženkliai lėtesnis, nei parodytas. Kalbant apie hidroturbinų darbą, reikia pasakyti, kad elektrinių su mažu slėgių aukščiu, galios pokytis gali būti ženkliai greitesnis nei vaizduoja paveikslas. Paveikslu norėta parodyti skirtingas šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių charakteristikas pereinamuoju procesu. Bendru atveju, jų galios pokytis priklausys nuo daugelio veiksnių, tokių, kaip elektrinės tipas, valdymo režimas, darbo taškas prieš keičiant galią ir kitų.

Tipinis šiluminės elektrinės galios keitimo greitis normaliu režimu siekia apie 2 % per minutę nuo įrengtosios galios, kai tuo tarpu hidroelektrinė gali pasiekti ir 100 %.

2.4. Universalus energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis

Kaip jau buvo minėta pirmame skyriuje, įvairios energijos kaupimo technologijos yra gana neblogai išnagrinėtos, o jų dinaminiai modeliai pritaikyti vidinių kaupimo sistemų procesų modeliavimui [15–34]. Jų sudarymui reikalinga identifikuoti daugybę dinaminų parametrų. Todėl šiame skyriuje pasiūlytas universalus energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis, tinkantis modeliuoti įvairių elektros energijos kaupimo technologijų veikimą, balansuojant vėjo elektrinių generuojamas galias, apkrovų galių kitimus ar visos elektros energetikos sistemos generuojamas ir vartojamas galias. Modeliuojant vėjo elektrinių galių balansavimą elektros energijos kaupimo sistemomis, pagrindinis tikslas ar uždavinys yra nustatyti reikiamus šių sistemų parametrus galios balansui pasiekti. Todėl šiuo atveju detalai nemodeliuojami procesai, vykstantys energijos kaupimo sistemų viduje, tokie kaip elektrocheminiai (vykstantys baterijų ir srauto baterijų viduje), kinetiniai (būdingi inercinių generavimo agregatų sistemoms) ir elektriniai ar elektromagnetiniai (būdingi superlaidžių magnetinių medžiagų ir kondensatorių sistemoms), o yra vertinami pagrindiniai energijos kaupimo sistemų darba atspindintys parametrai – įrengtosios galios ir energijos (talpos), ciklo našumo faktorius arba energijos nuostoliai, įkrovimo lygis bei reakcijos laikas. Paprastai energijos kaupimo sistemų gamintojų deklaruojami reakcijos laikai yra labai nedideli, todėl modeliuojant šių sistemų veikimą reikia vertinti ir galios keitiklių inerciją. Dinaminiam modeliui sudaryti pasirinkta MatLab SIMULINK dinaminio modeliavimo aplinka.

Pagrindinis principas, kuriuo vadovaujantis sudarytas modelis, yra pastovios vėjo elektrinių generuojamos galios ir energijos išlaikymo principas. Todėl energijos kaupimo sistemos valdymo signalas (užduotis) yra skirtumas tarp faktinių P_f (MW) ir prognozuotų P_{pr} (MW) vėjo elektrinių galių:

$$P_{ki} = P_{pr} - P_f \quad (2.48)$$

čia galioja sąlyga, kad energijos kaupimo sistemos galia P_{EK} būtų intervale $\pm P_{EKmaks}$, o elektros energijos svyravimai $\Delta E_{EK} = \int P_{EK} dt$ (MWh) išliktų ribose $E_{EKmin} - E_{EKmaks}$. Valdant energijos kaupimo sistemos darbo režimą (įkrovimą ir iškrovimą) bei kontroliuojant įkrovimo lygį, galima sekti vėjo elektrinių generuojamą galią. Šis valdymo principas iliustruotas 2.23 paveiksle, o sudaryto modelio struktūra pateikta 2.24 paveiksle.

Energijos kaupimo sistemos reakcijos laikas ir galios elektronikos inercija modeliuojama paprasta inercine grandimi, vertinant suminę inercijos laiko pastoviąją T_{EK} ($T_{EK}=0,06$ s, 2.24 paveiksle).

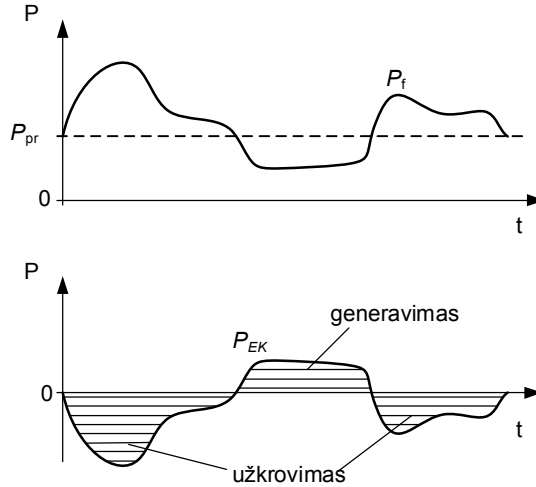
Energijos kaupimo sistemos įkrovimo ir iškrovimo nuostoliai laikomi lygiais ir yra nustatomi pagal įkrovimo ir iškrovimo ciklo našumo faktorių:

$$\eta_{i\text{skr} / i\text{skr}} = \sqrt{\eta_{\text{ciklo}}}$$

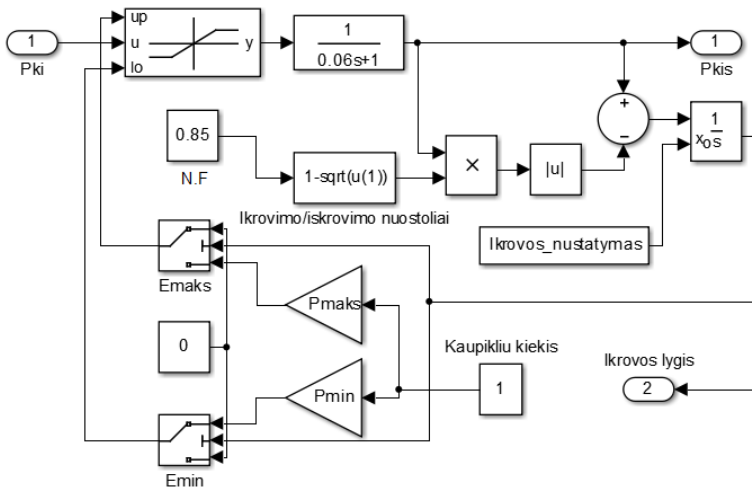
$$\Delta_{i\text{skr} / i\text{skr}} = 1 - \eta_{i\text{skr} / i\text{skr}}$$

$$\Delta_{i\text{skr} / i\text{skr}} = 1 - \sqrt{\eta_{\text{ciklo}}} \quad (2.49)$$

čia $\eta_{i\text{skr} / i\text{skr}}$ – įkrovimo ar iškrovimo našumo faktorius, η_{ciklo} – įkrovimo ir iškrovimo našumo faktorius, $\Delta_{i\text{skr} / i\text{skr}}$ – įkrovimo ar iškrovimo nuostoliai.



2.23 pav. Elektros energijos kaupiklio valdymo principas



2.24 pav. Universalios elektros energijos kaupimo sistemos modelio struktūra

Sudarant modelį ir vėjo elektrinių generuojamų galių balansavimo tyrimuose buvo laikyta, kad:

- ciklo našumo faktorius yra 85 % [59];
- inercijos laiko pastovioji lygi $T_{EK}=0,06$ s, (įvertinant ir galios elektronikos inerciją) [10, 17];
- energijos kaupimo sistemą galima pilnai iškrauti ($E_{min}=0$) be neigiamų pasekmių įrenginių darbui [21].

Energijos kaupimo sistemos įrengtosios galios ir energijos (talpos) ribos (P_{maks} , P_{min} ir E_{maks}) kinta priklausomai nuo keliamų uždavinių (balansuojamos sistemos dydžio ar naudojamo valdymo signalo kitimo greičio) ir yra pagrindiniai tolimesniuose tyrimuose ieškomi dydžiai. Pradinė sistemos įkrovimo vertė (2.24 paveiksle žymima „Įkrovos nustatymas“) balansavimo galių valdymo tyrimuose laikoma lygi pusei kaupiklio maksimalios energijos E_{maks} tam, kad būtų galima atlikti galios reguliavimą teigiama ir neigiama kryptimis arba įkrauti ir iškrauti energijos kaupimo sistemą.

2.5. Patobulinta balansavimo galių paskirstymo metodika

Kaip jau minėta pirmame skyriuje, esama automatinio generavimo valdymo sistemos galių paskirstymo metodika neleidžia integruoti greitaveikių energijos kaupimo sistemų (inercinių generavimo agregatų, srauto baterijų ar superkondensatorių) į AGV veikimą. Skaičiuojant balansuojančių elektrinių generatorinių agregatų dalyvavimo faktorius antrinio sistemos reguliatoriaus uždavinyje, didžiausi generuojamos galios pokyčiai tenka greičiausiems agregatams, o energijos kaupimo sistemos dėl labai gerų galios keitimo greičio charakteristikų gautų dideles generuojamos galios keitimo užduotis ir būtų staigiai iškrautos arba jų įrengtosios talpos ir galios parametrų vertės turėtų būti labai didelės ir viršytų praktinio panaudojimo galimybes.

Vėjo elektrinių generuojamų galių ar visos elektros energetikos sistemos generuojamų ir vartojamų galių balansavimas, panaudojant automatinio generavimo valdymo sistemos valdomas greitaveikes energijos kaupimo sistemas, būtų galimas tuomet, kai tokios sistemos nedalyvauja ekonominio galios pasiskirstymo uždavinyje. Jos turėtų dalyvauti galių reguliavime normalių elektros energetikos sistemos darbo režimų metu. Ekonominio galios paskirstymo uždavinyje galėtų dalyvauti hidroakumuliacinių elektrinių ar suspausto oro technologijų kaupimo agregatai, nes jų veikimas pagrįstas tradicinių generatorių veikimu, o dabartinis AGV algoritmas leidžia integruoti tradicinius generatorinius agregatus į antrinio reguliatoriaus veikimą. Dėl šios priežasties, integruojant greitaveikius energijos kaupimo įrenginius į antrinio reguliatoriaus AGV sistemos veikimą, reikalinga pakeisti agregatų galių reguliavimo dalyvavimo faktorių skaičiavimą normalių elektros energetikos sistemos darbo režimų metu. Apibendrintai galima teigti, kad (1.5) pažymėta išraiška apskaičiuotų normalaus sistemos reguliavimo agregatų dalyvavimo faktorių vertės surandamos konkretaus agregato galios keitimo greičio charakteristikas padalinus iš visų sistemos reguliavime dalyvaujančių agregatų galios keitimo greičių charakteristikų sumos $\sum_j R_j$:

$$k_{G_{Ni}} = \frac{R_i}{\sum_J R_j} \quad (2.50)$$

čia R_i – i-ojo generatoriaus galios keitimo greitis (MW/s), $\sum_J R_j$ – visų reguliavime dalyvaujančių agregatų galios keitimo greičio charakteristikų suma (MW/s).

Norint integruoti greitaveikes energijos kaupimo sistemas į AGV galių reguliavimo algoritmą normalių elektros energetikos sistemos darbo režimų metu, balansuojančių elektrinių dalyvavimo faktorių vertės turėtų būti koreguojamos atsižvelgiant į 2.2. skyriuje pasiūlytą elektrinių ir energijos kaupimo sistemų balansavimo galių valdymo modelį. Pasiūlytas modelis balansuojančių elektrinių galias valdo pagal valdymo signalo kitimo greitį, todėl reikalingos tokios agregatų dalyvavimo faktorių skaičiavimo korekcijos:

$$k_{G_{Ni}}^* = k_{G_{Ni}} + \Delta k_{G_{Ni}} = \frac{R_i}{\sum_G R_g} \quad (2.51)$$

čia $\sum_G R_g$ – generatorinių agregatų ir energijos kaupimo sistemų, valdomų pagal tą patį pradinio signalo kitimo greitį, galios keitimo greičių suma (MW/s).

Vertinant (2.50) ir (2.51) pateiktas išraiškas:

$$\begin{aligned} \Delta k_{G_{Ni}} &= k_{G_{Ni}}^* - k_{G_{Ni}} = \frac{R_i}{\sum_G R_g} - \frac{R_i}{\sum_J R_j} = \frac{R_i \cdot \left(\sum_J R_j - \sum_G R_g \right)}{\sum_J R_j \cdot \sum_G R_g} = \\ &= k_{G_{Ni}} \cdot \left(\frac{\sum_J R_j}{\sum_G R_g} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2.52)$$

Atsižvelgus į (2.51) ir (2.52) išraiškas, agregatų dalyvavimo faktoriai vertinant valdymo signalo kitimo greitį turėtų būti skaičiuojami taip:

$$k_{G_{Ni}}^* = k_{G_{Ni}} + \Delta k_{G_{Ni}} = k_{G_{Ni}} + k_{G_{Ni}} \cdot \frac{\sum_J R_j}{\sum_G R_g} - k_{G_{Ni}} = k_{G_{Ni}} \cdot \frac{\sum_J R_j}{\sum_G R_g} \quad (2.53)$$

Atitinkamai agregatų, valdomų pagal mažą, vidutinį ir didelį signalo kitimo greitį, dalyvavimo faktoriai turėtų būti skaičiuojami:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{GNMi}^* = k_{GNI} \cdot \frac{\sum_J R_j}{\sum_M R_m} \\ k_{GNVi}^* = k_{GNI} \cdot \frac{\sum_J R_j}{\sum_V R_v} \\ k_{GNDi}^* = k_{GNI} \cdot \frac{\sum_J R_j}{\sum_D R_d} \end{array} \right. \quad (2.54)$$

čia k_{GNMi}^* , k_{GNVi}^* , k_{GNDi}^* – agregatų, valdomų pagal mažą, vidutinį ir didelį signalo kitimo greitį, modifikuoti dalyvavimo faktoriai, $\sum_M R_m$, $\sum_V R_v$, $\sum_D R_d$ – agregatų, valdomų pagal mažą, vidutinį ir didelį signalo kitimo greitį, galios keitimo greičių sumos (MW/s).

Naudojant 2.2. skyriuje pasiūlytą balansavimo galių valdymo modelį, kai tradicinės elektrinės, valdomos pagal mažą ir vidutinį signalo kitimo greitį, kompensuoja didžiausius galios ir energijos pokyčius (vėjo generuojamų galių kitimo tendencijas), greitaveikės energijos kaupimo sistemos, valdomos pagal didelį signalo kitimo greitį, suskaičiavus jų galių reguliavimo dalyvavimo faktorius pagal (2.54) išraiškoje pateiktą formulę, galėtų būti integruotos į automatinio generavimo valdymo sistemos veikimą. Šiuo atveju jų generuojamos ar absorbuojamos galios pokyčiai būtų sąlygoti tik didelio signalo kitimo greičio ir galių likučio po šiluminių ir hidroelektrinių darbo. Be to, tradicinių elektrinių valdymas pagal mažą ir vidutinį signalo kitimo greitį, atitinkamai pagal (2.54) išraišką skaičiuojant jų dalyvavimo AGV galių reguliavimo uždavinyje faktorius, leistų sumažinti šių elektrinių reguliavimo intensyvumą, nes didelio signalo kitimo greičio dedamoji būtų kompensuojama greitaveikių energijos kaupimo sistemų.

2.6. Pagrindiniai skyriaus rezultatai

1. Sukurtas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis balansuojančių elektrinių (šiluminių elektrinių ir hidroelektrinių) bei energijos kaupimo sistemų galioms reguliuoti (valdyti) pagal valdymo signalo kitimo greitį. Toks valdymo modelis leidžia sumažinti nuokrypių reguliavimo rezervo galias šiluminėse elektrinėse ir hidroelektrinėse bei sumažinti jų reguliavimo intensyvumą.
2. Sudaryti šiluminės kondensacinės elektrinės garo turbinos ir katilo galių ir hidroelektrinės turbinos galių pokyčių bei šių elektrinių galios-greičio reguliatorių dinaminiai modeliai.
3. Sukurtas universalus energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis su mažesniu dinaminių parametrų skaičiumi, tinkantis vėjo elektrinių galioms balansuoti.

Modeliuojant energijos kaupimo sistemų veikimą balansuojant vėjo elektrinių generuojamas galias, vertinti pagrindiniai energijos kaupimo sistemų darbą atspindintys parametrai – įrengtos galios ir energijos (talpos), ciklo našumo faktorius arba energijos nuostoliai, įkrovimo lygis bei reakcijos laikas.

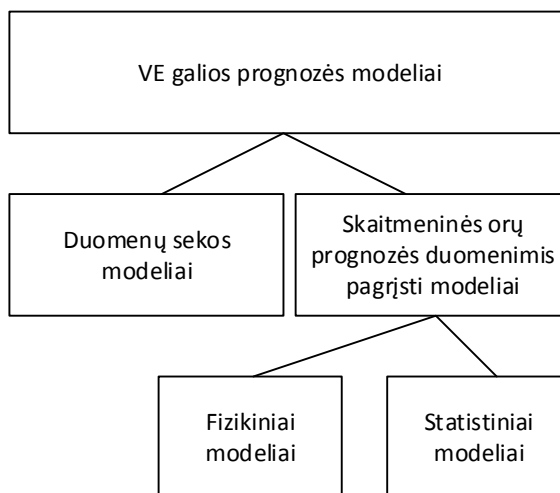
4. Patobulintas automatinio generavimo valdymo sistemos reguliavimo galių paskirstymo skaičiavimas įvedant generatorinių agregatų dalyvavimo faktorių korekcijas (modifikuotus dalyvavimo faktorius). Tai leidžia greitaveikes energijos kaupimo sistemas integruoti į automatinio generavimo valdymo sistemos veikimą.

3. LIETUVOS ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS BALANSAVIMO GALIŲ VALDYMO TYRIMAI

3.1. Vėjo elektrinių galios prognozavimo modeliai

Šiuo metu visame pasaulyje yra naudojama dešimtys įvairių vėjo prognozės modelių, kurie padeda sėkmingiau planuoti vėjo elektrinių darbą. Vėjo elektrinių galios prognozės modeliai pagal naudojamus pradinis duomenų tipus skirstomi į (3.1 paveikslas) [60]:

- Duomenų sekos modelius, kuriuose naudojami tiesioginiai vėjo greičių arba vėjo elektrinių generuojamų galių matavimo duomenys. Juos analizuojant duomenų sekos analizės metodais yra sudaromos vėjo elektrinių galių prognozės kelioms valandoms į priekį.
- Modelius, naudojančius skaitmeninės orų prognozės (SOP) rezultatus. Šie modeliai sudaro ilgesnio periodo (iki 48 valandų) vėjo elektrinių galių prognozes ir yra pranašesni už duomenų sekos modelius.



3.1 pav. Vėjo prognozavimo modeliai [59]

Duomenų sekos modeliai

Duomenų sekos modeliai yra paprasčiausi vėjo elektrinių generuojamų galių prognozės modeliai. Jiems pakanka pastarųjų kelių valandų vėjo greičių ar vėjo elektrinių galių matavimo duomenų. Naudojant tokius modelius, generuojamų galių prognozės yra sudaromos kelioms artimiausioms valandoms – paprastai 4 ar 6.

Paprasčiausias duomenų sekos vėjo elektrinių galių prognozės modelis yra „išsilaikymo“ modelis. Pagal šį modelį prognozuojamo parametro (vėjo greičio arba VE galios) reikšmė yra lygi paskutinio matavimo reikšmei [60]:

$$X_{t+l} = X_t. \quad (3.1)$$

čia X_t – parametro reikšmė laiko momentu t , l – laiko žingsnis.

Trumpiems periodams, tokiems kaip kelios minutės ar valanda, šis modelis yra gana tikslus. Gaunama generuojamų galių prognozės paklaida yra pakankamai maža, nes atmosferoje procesai vyksta lėčiau. Ilgesniems periodams prognozavimo paklaida didėja. Pagal „išsilaikymo“ modelio rezultatus gali būti vertinami kitų vėjo galių prognozės modelių rezultatai. Jei modelio paklaidos trumpuoju periodu yra didesnės už „išsilaikymo“ modelio, tas modelis turėtų būti tobulinamas.

Sudėtingesnis duomenų sekos modelis yra paskutinių n reikšmių tiesinės kombinacijos modelis, kuris vadinamas n -tosios eilės autoregresiniu modeliu arba AR(n) [61]:

$$\overline{X}_t = \sum_{i=1}^n a_i X_{t-i}. \quad (3.2)$$

čia X_{t-i} – reikšmė, išmatuota laiko momentu $t-i$, a_i – modelio parametras.

Dažniausi duomenų sekos tipo prognozavimo modeliai yra autoregresiniai slenkančio vidurkio modeliai – ARMA [61]:

$$\overline{X}_t = \sum_{i=1}^n a_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j e_{t-j}. \quad (3.3)$$

čia e – prognozės paklaida, a ir b – modelio parametrai, dažniausiai nustatomi mažiausių kvadratų metodu.

Šie modeliai gali būti išplečiami iki ARMAX modelių, kuriuose naudojamas papildomas kintamasis x , turintis įtakos prognozavimo tikslumui. Taip pat gali būti naudojamos papildomos funkcijos, aprašančios vėjo greičio svyravimus ir kitus veiksnius.

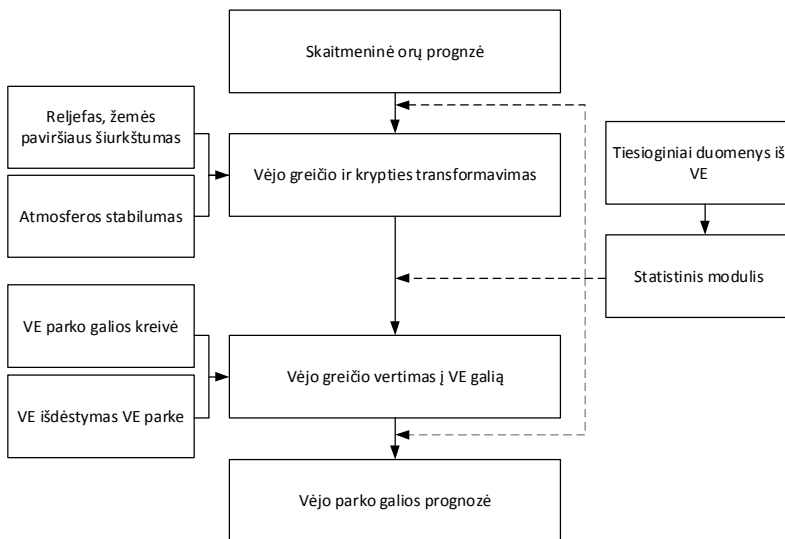
Skaitmeninės orų prognozės (SOP) modeliai

Kaip jau buvo minėta aukščiau, norint prognozuoti vėjo greičio ar vėjo elektrinių generuojamų galių kitimus trumpam periodui tam tikroje vietovėje, užtenka tos vietovės vėjo greičio ar vėjo elektrinių generuojamų galių matavimo duomenų statistinės analizės. Tačiau valdant elektros energetikos sistemą ir užtikrinant generuojamų galių balansą, reikia ilgesnio periodo vėjo prognozės. Tokiam tikslui gali būti naudojami skaitmeninės orų prognozės fizikiniai modeliai [60, 62].

Šiuose vėjo prognozės modeliuose, kaip pradiniai duomenys yra naudojami bendros atmosferos cirkuliacijos skaitmeninės orų prognozės modelių rezultatai. SOP – tai atmosferoje vykstančių procesų skaitmeninis modeliavimas siekiant nustatyti būsimą atmosferos būklę. Tai atliekama pagal pradinę atmosferos būklę, kuri įvertinama matavimų duomenimis meteorologijos stotyse bei naudojant palydovų duomenis. Todėl pradinių duomenų tikslumas yra labai svarbus ir lemia šių modelių kokybę.

Skaitmeninės orų prognozės modeliai yra skirti prognozuoti plataus regiono bendrajam atmosferos oro srautų judėjimui (kitimui). Šių modelių pagrindas yra daugiasluoksnis tinklelis, kurio kiekvienam mazgui yra priskiriamos atmosferos būklę aprašančių kintamųjų, tokių kaip atmosferos slėgio, oro tankio, vėjo greičio, krypties ir kitų, reikšmės. Modelį sudaro netiesinių diferencialinių lygčių su dalinėmis išvestinėmis sistema, kuri neturi analitinių sprendinių. Dėl šios priežasties, remiantis matavimų duomenimis, yra apskaičiuojami skaitmeniniai sprendiniai kiekviename tinklelio mazge.

Kol kas SOP modelių skiriamoji geba siekia apie 5 kilometrus, todėl yra per maža norint gauti pakankamai tikslią prognozę konkrečiam vėjo elektrinių parkui. Be to, nėra vertinami mažesnės apimties atmosferos reiškiniai, tokie kaip oro srautų tekėjimas slėniuose, virš miškų, kalvų ar miestų, taip pat įvairių kliūčių aptekėjimas bei pajūrio oro srautų judėjimo ypatumai. Dėl šių priežasčių, atliekant fizikinių vėjo srautų modeliavimą, skaitmeninės orų prognozės duomenys yra transformuojami iki vėjo elektrinės vėjaračio aukščio, įvertinant vietovės reljefą bei atsižvelgiant į atmosferos stabilumą. Tipinė fizikinių vėjo elektrinių galių prognozavimo modelių veikimo schema pavaizduota 3.2 paveiksle [60, 62].



3.2 pav. Tipinė VE galios prognozės fizikinio modelio schema [62]

Naudojant fizikinius prognozavimo modelius, neišvengiamai atsiranda sisteminių paklaidų. Norint šias paklaidas sumažinti ir pagerinti vėjo elektrinių galių prognozavimo kokybę, gali būti naudojami statistiniai moduliai. Maksimaliai

sumažinti paklaidas galima panaudojus tiesinę priklausomybę tarp pradinio ir patikslinto vėjo greičių [60]:

$$U_{SM} = a \cdot U + b. \quad (3.4)$$

čia U_{SM} – statistiniu moduli patikslintas vėjo greitis (m/s), U – tikslinamas (pradinis) vėjo greitis (m/s), a ir b – statistiniai parametrai.

Statistiniuose skaitmeninės orų prognozės modeliuose pagal vėjo elektrinių parkų galių matavimo duomenis ir atitinkamus SOP modelio prognozės duomenis yra apskaičiuojami statistiniai parametrai, kurie nusako šių duomenų ryšį, o vėjo elektrinių galios apskaičiuojamos tiesiogiai. Šie modeliai patogūs dar ir tuo, kad nereikia atsižvelgti į fizikinius veiksnius, kurie lemia vėjo srautų dinamiką konkrečioje vietovėje, o yra atliekama tik duomenų analizė, kuri neturi jokio ryšio su meteorologiniais reiškiniais.

Skaitmeninės orų prognozės ir vėjo elektrinių galių matavimo duomenų ryšiu nustatyti gali būti naudojami keli metodai [62]:

- Regresiniai adaptyvūs statistiniai metodai – šiais metodais nustatomi statistiniai tam tikro laikotarpio skaitmeninės orų prognozės ir vėjo elektrinių galių duomenų ryšiai. Jei žinomi duomenys apie vietovės reljefą, įvairias kliūtis, atmosferos stabilumą bei kitus veiksnius, tai jų poveikio nereikia perskaičiuoti, nes modelis juos įvertina automatiškai ir prisitaiko prie duomenų pokyčių.
- Neuroninių tinklų metodas – tai netiesinio statistinio duomenų modeliavimo priemonė, naudojama modeliuojant sudėtingus įvairių duomenų ryšius panaudojant apmokomus neuroninius tinklus.

Vėjo elektrinių galių prognozės modelių paklaidos būna dviejų tipų: dydžio ir fazinės. Dydžio paklaidos atsiranda, kai nepakankamai įvertinamas arba pervertinamas vėjo greitis (atitinkamai ir VE galia), pavyzdžiui, audros metu. Fazinės paklaidos – tai tokios paklaidos, kurios atsiranda kai realūs atmosferos reiškiniai įvyksta anksčiau arba vėliau nei prognozuota, pavyzdžiui, jei atmosferos frontas pasiekia vėjo elektrinių parką greičiau arba vėliau nei numatyta. Liberalios rinkos sąlygomis tokia situacija turi nemažą įtaką elektros energijos kainai, nes, tarkim, atmosferos frontui pasiekus vėjo elektrinių parką anksčiau, susidarys galios perteklius, ir, laikotarpiu nuo faktinės fronto pradžios iki prognozuotos pradžios, elektros kaina nukris. Realiam atmosferos frontui pavėlavus, susidaręs elektros energijos trūkumas turėtų būti kompensuojamas iš kitų energijos šaltinių. Tai, tikėtina, pakeltų elektros energijos kainą bei sukeltų papildomą sistemos balansavimo galių poreikį. Priešingi reiškiniai vyksta atmosferos frontui palikus vėjo elektrinių parkus. Abiejų tipų prognozės paklaidos yra nepageidautinos, nes jos lemia papildomas perdavimo sistemų operatorių išlaidas elektrinių reguliavimui dėl vėjo elektrinių galios pertekliaus ar trūkumo.

Dydžio paklaidas gana nesunku apskaičiuoti naudojant standartines paklaidų skaičiavimo išraiškas, o fazines paklaidas įvertinti sudėtingiau. Fazinės paklaidos turi didesnę įtaką suminei vėjo prognozės paklaidos reikšmei (taip pat ir balansavimo galioms bei su tuo susijusioms išlaidoms) nei dydžio paklaidos. Dviejų

– trijų valandų fazinės paklaidos yra priimtinos prognozuojant orų pasikeitimus, tačiau net ir 30 minučių paklaida gali būti kritinė vėjo elektrinių generuojamų galių prognozei. Dėl šios priežasties vėjo elektrinių generuojamų galių prognozės modeliai yra nuolat tobulinami, kad būtų sumažinta fazinių paklaidų dedamoji.

Vėjo elektrinių generuojamų galių prognozės paklaidų ir atstumų tarp vėjo elektrinių ryšys yra silpnas, todėl vėjo elektrinių galių prognozės, sudarytos didesniai regionui, yra tikslesnės nei prognozės atskiriems vėjo elektrinių parkams [62]. Tai yra vadinama erdvinio išlyginimo efektu [63]. Paklaidų autokoreliacija regionui taip pat yra didesnė nei atskiriems vėjo elektrinių parkams. Taigi vėjo elektrinių generuojamų galių prognozės paklaidos yra tuo mažesnės, kuo didesnėje teritorijoje išsidėstę atskiri vėjo elektrinių parkai [64]. Prognozės modelių kokybę rodo paklaidos tarp prognozuotų vėjo elektrinių galių P_{pr} ir faktinių generuojamų VE galių P_f . Vėjo elektrinių galių prognozės modelių rezultatai dažniausiai vertinami pagal trijų tipų paklaidas. Jų matematinės išraiškos pateiktos žemiau.

Vidutinė paklaida:

$$VP = \frac{1}{n} \sum_1^N (P_f - P_{pr}) \quad (3.5)$$

Vidutinė absoliutinė paklaida:

$$VAP = \frac{1}{n} \sum_1^N |P_f - P_{pr}| \quad (3.6)$$

Vidutinė kvadratinė paklaida:

$$VKP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^N (P_f - P_{pr})^2} \quad (3.7)$$

čia P_f – faktinė galia (MW), P_{pr} – prognozuota galia (MW), n – duomenų reikšmių skaičius (vnt.).

3.2. Vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozavimo paklaidų tyrimai

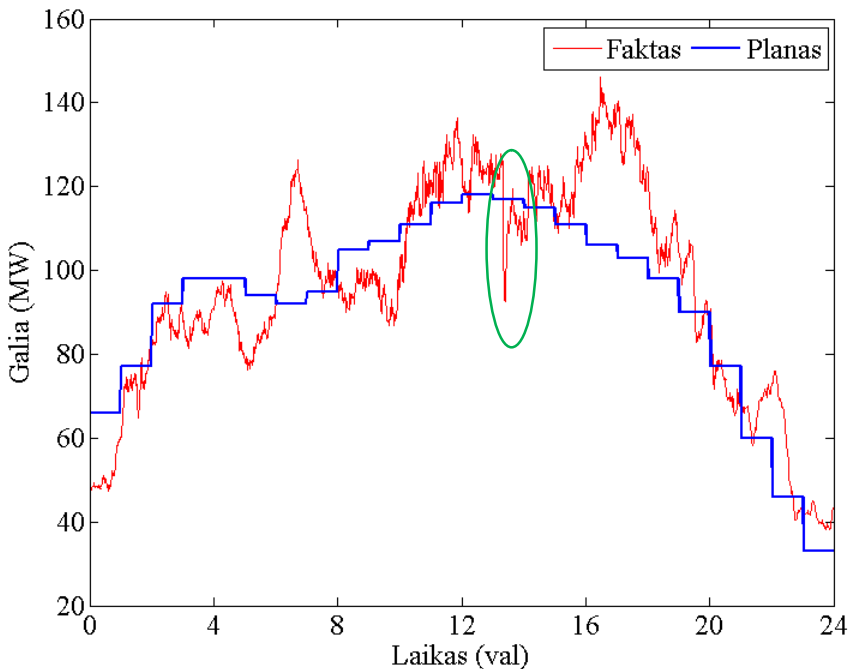
Vėjo elektrinių generuojamų galių kitimo bei prognozavimo paklaidų įtakos balansavimo galioms tyrimui buvo naudojami faktinių Lietuvos elektros energetikos sistemos vėjo elektrinių galių kitimo duomenys. Pasirinkta 2012 metų kovo 27 dienos kitimo duomenys sekundės intervalu (3.3 paveikslas), nes tą dieną užfiksuotas žymus vėjo generuojamų galių nepastovumas. Be to apie 13 valandą 20 minučių elektros perdavimo linijoje (EPL), prie kurios prijungtas vienas vėjo elektrinių parkas, įvyko trumpasis jungimas, dėl to atsijungė minėta EPL ir vėjo elektrinės, veikiančios sumine 35 MW galia. Šio vėjo elektrinių parko pilnas galios atkūrimas įvyko maždaug po 4 minučių (3.3 paveiksle pažymėta žaliai). Dėl šios priežasties, galima laikyti, kad tyrimas apima ir avarinius elektros energetikos sistemos darbo režimus. Paveiksle taip pat pavaizduota ir vėjo elektrinių galios

planas 24 valandoms. Pažymėtina, kad dabar daugelio elektros energetikos sistemos operatyvinis planavimas vykdomas vienos valandos intervalu.

Paprasčiausias statistinis duomenų parametras yra vidutinis vėjo greičio kitimas arba vėjo elektrinių generuojamų galių kitimas:

$$P_{V_{vid}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} \quad (3.8)$$

čia $P_{V_{vid}}$ – vėjo elektrinių vidutinė galia (MW), n – duomenų reikšmių skaičius (vnt.).



3.3 pav. Vėjo elektrinių generuotos ir prognozuotos galios

Tyrinėjant vėjo elektrinių generuojamų galių įtaką balansavimo galioms buvo skaičiuoti vidutiniai vėjo elektrinių galių kitimai valandos, 15 minučių ir minutės intervalais bei atitinkamai nustatyti vidutiniai skirtumai nuo suplanuotų vėjo elektrinių galių verčių. Galių skirtumai tarp planuotų ir faktinių vėjo elektrinių generuojamų galių buvo skaičiuojami taip:

$$\Delta P_V = P_{Vf} - P_{Vpr} \quad (3.9)$$

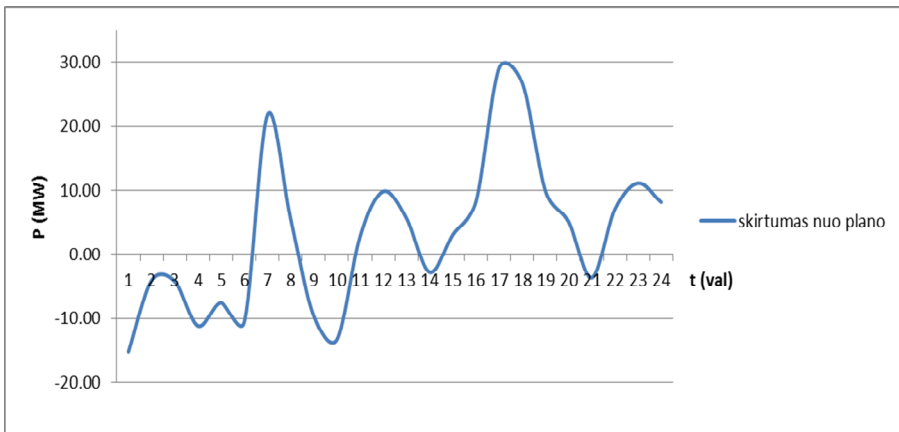
čia P_{Vf} ir P_{Vpr} – faktinė ir planuota vėjo elektrinių generuojama galia (MW).

Vėjo elektrinių generuojamų galių prognozavimo standartinius nuokrypius galima nustatyti pagal tokią išraišką [65]:

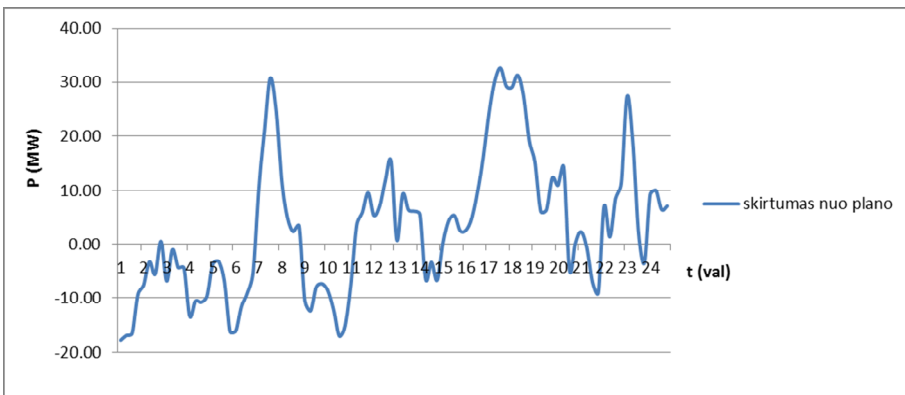
$$\sigma_V = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n-1} (\Delta P_{Vi} - \overline{\Delta P_V})^2} \quad (3.10)$$

čia $\overline{\Delta P_V}$ – vidutinis vėjo galios pokytis (MW), n – duomenų reikšmių skaičius (vnt.).

Išanalizavus vėjo elektrinių generuojamų galių kitimo duomenis, nustatyta, kad vidutinė vėjo elektrinių generuojama galia tiriamuoju periodu siekė 95,73 MW, o vidutinė paklaida minėtais valandos, 15 minučių ir minutės galių vidurkio intervalais buvo atitinkamai 9,83 MW, 10,34 MW ir 10,64 MW. Vidutinė kvadratinė paklaida siekė 12,05 MW, 13,00 MW ir 13,36 MW. Kaip matyti, didėjant vidurkio intervalui, prognozavimo paklaidos mažėja. Valandos, 15 minučių ir minutės vidutinių vėjo elektrinių generuojamų galių kitimo skirtumai nuo suplanuotų galių verčių pateikti 3.4, 3.5 ir 3.6 paveiksluose. Iš pateiktų paveikslų matyti, kad skirtumų maksimumai siekia 29,07 MW, 32,62 MW ir 40,10 MW, o minimumai – -15,12 MW, -17,72 MW ir -24,31 MW. Suskaičiuotas standartinis nuokrypis atitinkamai yra 11,92 MW, 12,71 MW ir 13,02 MW.



3.4 pav. Valandiniai vėjo galių skirtumai nuo plano

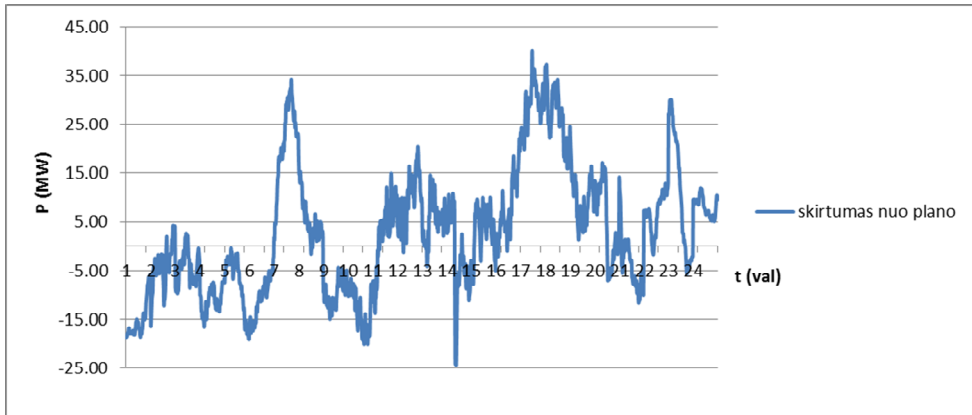


3.5 pav. 15 minučių vėjo generuojamų galių skirtumai nuo plano

Labai svarbūs vėjo elektrinių generuojamų galių kitimo parametrai yra galių didėjimo ir mažėjimo greičiai, nes, žinant balansuojančių elektrinių reguliavimo aukštyn ir žemyn greičius, galima spręsti apie tokių vėjo elektrinių galių kitimų subalansavimą. Paprastai vėjo elektrinių galių didėjimo ir mažėjimo greičius galima rasti iš galių pokyčio:

$$\Delta P_{Vi} = P_{Vi+1} - P_{Vi} \quad (3.11)$$

Čia P_{Vi} – vėjo elektrinių galia laiko momentu i (MW), P_{Vi+1} – vėjo elektrinių galia laiko momentu $i+1$ (MW).



3.6 pav. Minutės vėjo generuojamų galių skirtumai nuo plano

Išnagrinėjus vėjo elektrinių galių kitimų duomenis minėtu laikotarpiu, nustatyta, kad vidutinis vėjo elektrinių galios didėjimo greitis siekė 1,52 MW/min, o mažėjimo – -1,48 MW/min. Galios kitimo aukštyn maksimumas siekė 7,41 MW/min, o žemyn – -19,13 MW/min.

Apibendrinti vėjo elektrinių generuojamų galių prognozavimo tyrimo rezultatai pateikti 3.1 lent.

Apkrovų galių kitimo bei prognozavimo paklaidų įtakos balansavimo galioms tyrimui buvo naudojami tos pačios dienos, kaip ir vėjo elektrinių galių prognozavimo tyrime naudoti duomenys. Faktiniai Lietuvos elektros energetikos sistemos apkrovų galių kitimo duomenys pateikti 3.7 paveiksle. Šiame paveiksle taip pat pavaizduotas 24 valandų apkrovų galių planas. Kaip ir vėjo elektrinių generuojamos galios, taip ir apkrovų galios operatyviai planuojamos vienos valandos intervalu.

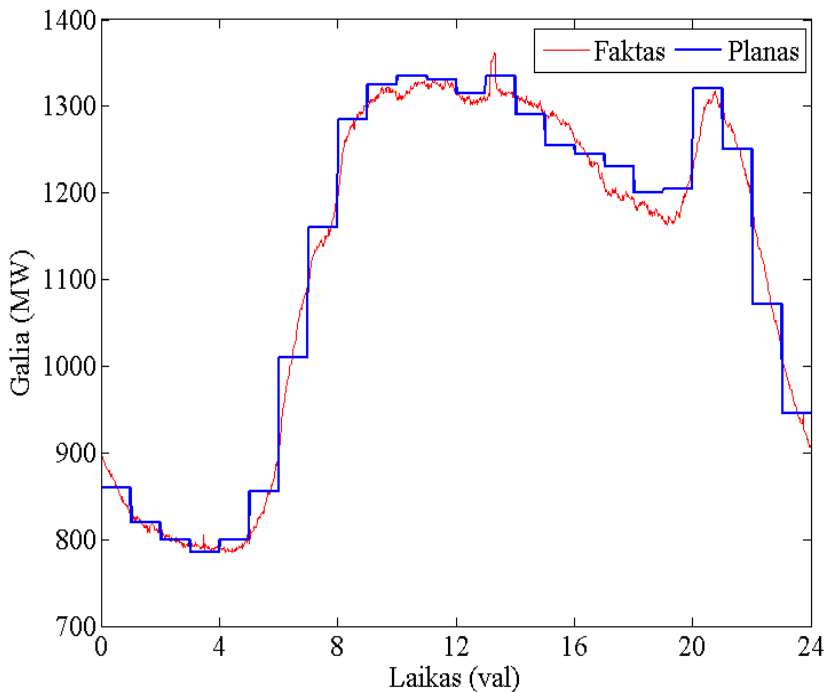
Paprasčiausias statistinis apkrovų galių kitimo parametras yra vidutinis apkrovų galių kitimas. Jis apskaičiuojamas analogiškai, kaip ir vėjo elektrinių galių kitimo atveju, pagal (3.8) formulę.

3.1 lentelė. Vėjo elektrinių galių prognozavimo paklaidų tyrimo rezultatai

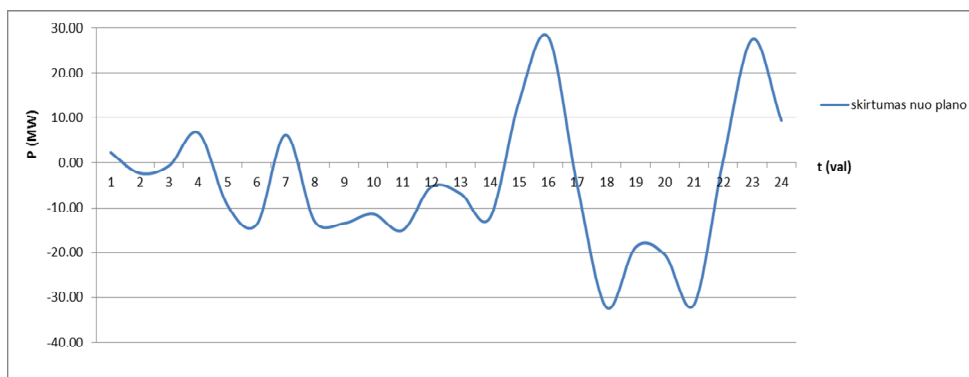
	Vėjas		
	Valandos intervalas	15 min intervalas	1 min intervalas
Vidutinė vertė, MW	95,73	95,73	95,73
Vidutinė paklaida, MW	9,83	10,34	10,64
Didžiausia teigiama paklaida, MW	29,07	32,62	40,10
Didžiausia neigiama paklaida, MW	-15,12	-17,72	-24,31
Standartinis nuokrypis, MW	11,92	12,71	13,02
Vidutinė kvadratinė paklaida, MW	12,05	13,00	13,36
Vidutinė absoliutinė procentinė paklaida, %	10,88	11,31	11,64
Vidutinis kitimas aukštyn, MW/min	-	-	1,52
Vidutinis kitimas žemyn, MW/min	-	-	-1,48
Kitimo aukštyn maksimumas, MW/min	-	-	7,41
Kitimo žemyn maksimumas, MW/min	-	-	-19,13

Analizuojant apkrovų galių prognozavimo įtaką balansavimo galioms, analogiškai vėjo elektrinių generuojamų galių tyrimui, buvo skaičiuotos vidutinės apkrovų galių kitimo vertės valandos, 15 minučių ir minutės intervalais bei ieškoti vidutiniai galių skirtumai nuo suplanuotų apkrovų galių verčių. Galių skirtumai tarp planuotų ir faktinių apkrovų galių gali būti skaičiuojami pagal (3.9) išraišką, analogiškai, kaip ir vėjo elektrinių generuojamų galių atveju. Apkrovų galių prognozavimo standartiniai nuokrypiai skaičiuojami atitinkamai pagal (3.10) išraiškoje pateiktą išraišką.

Ištyrus apkrovų galių kitimo duomenis nustatyta, kad vidutinė apkrovos galia tiriamuoju laikotarpiu siekė 1121,17 MW, o vidutinė paklaida minėtais valandos, 15 minučių ir minutės intervalais buvo atitinkamai 12,74 MW, 19,27 MW ir 19,87 MW. Vidutinė kvadratinė paklaida siekė 15,75 MW, 25,55 MW ir 26,56 MW. Kaip ir vėjo elektrinių generuojamų galių tyrime, didėjant vidurkio intervalui, prognozavimo paklaidos mažėja. Valandos, 15 minučių ir minutės vidutinių apkrovų galių kitimo skirtumai nuo suplanuotų verčių pateikti 3.8, 3.9 ir 3.10 paveiksluose. Iš pateiktų paveikslų matyti, kad šiuo atveju skirtumo maksimumas siekia 28,06 MW, 85,87 MW ir 117,19 MW, o minimumas atitinkamai – -32,18 MW, -70,62 MW ir -109,31 MW. Suskaičiuotas standartinis nuokrypis siekia 15,29 MW, 25,21 MW ir 26,11 MW.

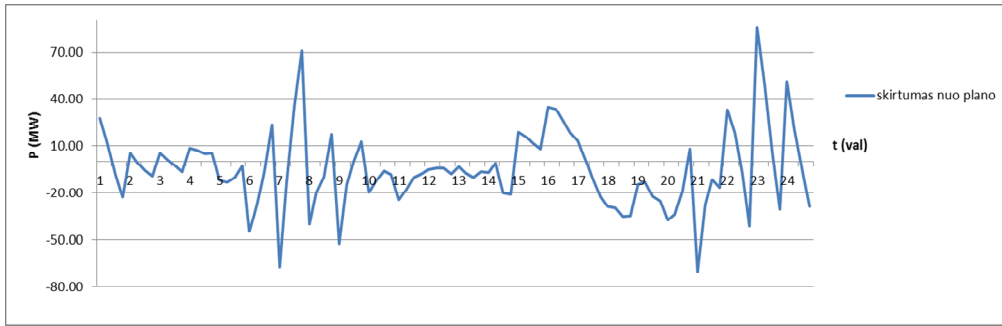


3.7 pav. Apkrovų prognozuotos ir faktinės galios



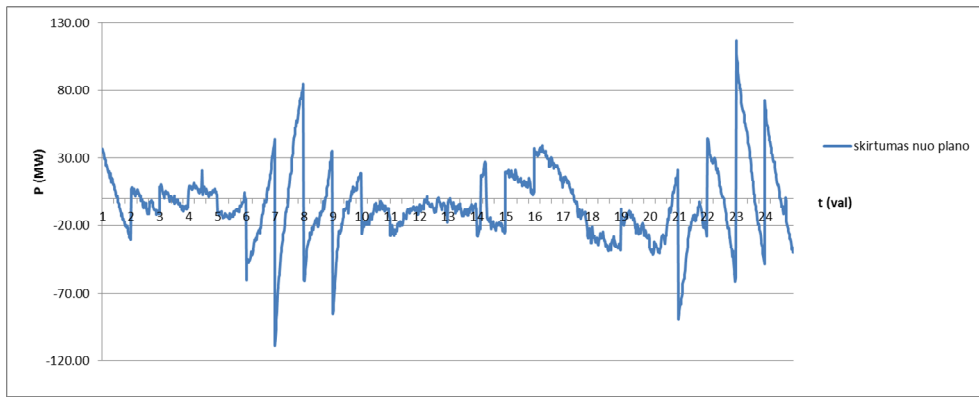
3.8 pav. Valandinių apkrovų galių skirtumai nuo plano

Analogiškai vėjo elektrinių generuojamų galių kitimo parametrų, labai svarbūs yra ir apkrovų galių didėjimo ir mažėjimo greičiai. Žinant balansuojančių elektrinių reguliavimo aukštyn ir žemyn greičius galima spręsti apie tokių apkrovų galių kitimų subalansavimą. Apkrovų galių didėjimo ir mažėjimo greičius galima suskaičiuoti pagal (3.11) išraišką, naudojant faktinius apkrovų galių kitimo duomenis.



3.9 pav. 15 minučių apkrovų galių skirtumai nuo plano

Išnagrinėjus apkrovų galių kitimo duomenis minėtu laikotarpiu nustatyta, kad vidutinis apkrovų galių didėjimo greitis siekė 2,23 MW/min, o mažėjimo – -2,04 MW/min. Apkrovų galių kitimo aukštyn maksimumas siekė 31,26 MW/min, o žemyn – 22,33 MW/min.



3.10 pav. Minutės apkrovų galių skirtumai nuo plano

Apibendrinti apkrovų galių prognozavimo tyrimo rezultatai pateikti 3.2 lent.

Kaip buvo minėta 2.1. skyriuje, skaičiuojant statistinius vėjo elektrinių generuojamų galių ir apkrovų galių balanso rodiklius (vidutines reikšmes ir standartinius nuokrypius), apkrovų galių kitimas, vėjo elektrinių generuojamų galių kitimas ir vėjo elektrinių generuojamų galių prognozavimas gali būti laikomi nepriklausomais įvykiais. Tuomet apkrovų ir vėjo elektrinių generuojamų galių balanso standartinis nuokrypis – vidutinė kvadratinė nuokrypio vertė surandama pagal (2.1) pažymėtą formulę. Reguliavimo rezervo dydį $P_{R\Sigma}$ (MW), bendroju atveju, esant vėjo elektrinių generacijai, galima įvertinti pagal galių balanso suminį nuokrypį σ_{Σ} (MW):

$$P_{R\Sigma} = 3 \cdot \sigma_{\Sigma} \quad (3.12)$$

3.2 lentelė. Apkrovų galių prognozavimo paklaidų tyrimo rezultatai

	Apkrova		
	Valandos intervalas	15 min intervalas	1 min intervalas
Vidutinė vertė, MW	1121,17	1121,17	1121,17
Vidutinė paklaida, MW	12,74	19,27	19,87
Didžiausia teigiama paklaida, MW	28,06	85,87	117,19
Didžiausia neigiama paklaida, MW	-32,18	-70,62	-109,31
Standartinis nuokrypis, MW	15,29	25,21	26,11
Vidutinė kvadratinė paklaida, MW	15,75	25,55	26,56
Vidutinė absoliutinė procentinė paklaida, %	1,11	1,74	1,79
Vidutinis kitimas aukštyn, MW/min	-	-	2,23
Vidutinis kitimas žemyn, MW/min	-	-	-2,04
Kitimo aukštyn maksimumas, MW/min	-	-	31,26
Kitimo žemyn maksimumas, MW/min	-	-	-22,33

Šiuo metodu suskaičiuotas reguliavimo galių rezervas ir suminis standartinis nuokrypis, vertinant valandos, 15 minučių ir minutės vidutinius vėjo elektrinių ir apkrovų galių kitimus, yra pateikti 3.3 lent.

3.3 lentelė. Nuokrypių reguliavimo galių rezervas

	Valandos intervalas	15 min intervalas	1 min intervalas
Suminis standartinis nuokrypis, MW	19	28	29
Reguliavimo rezervo galia, MW	58	85	88

Iš pateiktų skaičiavimų rezultatų matyti, kad vertinant 15 minučių ir 1 minutės vidutinius galių kitimus, nuokrypių reguliavimo galių rezervas praktiškai nesiskiria, tačiau valandos vidutinio galios kitimo atveju, šis rezervas yra trečdaliu mažesnis. Iš čia galima daryti išvadą, kad siekiant mažesnės vėjo elektrinių ir apkrovų galių kitimo įtakos stabiliam elektros energetikos sistemos darbui, galių prognozavimo tikslumo ir mažesnių nuokrypių reguliavimo rezervų, tikslinga vėjo elektrinių ir apkrovų galias prognozuoti mažesniu intervalu, pavyzdžiui, pereinant prie 15 minučių operatyvinio planavimo.

3.3. Balansavimo galių valdymo modelio parametrai

Sudarytas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis apima šiluminės elektrinės, hidroelektrinės ir energijos kaupimo sistemos dalis bei valdymo sistemos elementus – signalo filtrus ir PI valdiklį (2.2. skyrius).

Tolesniems Lietuvos elektros energetikos sistemos balansavimo galių valdymo tyrimams, hidroelektrinės dinaminiai parametrai buvo parinkti pagal Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės generatorinių agregatų dinamines savybes, elektrinei veikiant generatoriaus režimu. Hidroelektrinės modelio dinaminiai parametrai pateikti 3.4 lent. [10,52,53,58,66]. Modeliuotas šios elektrinės galios keitimo greitis siekia ± 4 MW/s.

Šiluminės elektrinės dinaminiai parametrai buvo nustatyti pagal Lietuvos elektrinės 6 generatorinio agregato dinamines savybes. Šis agregatas pasirinktas dėl jo galimybės dalyvauti antriniame automatiname dažnio ir galių reguliavime, valdant automatinio generavimo valdymo sistemai. Šiluminės elektrinės modelio dinaminiai parametrai pateikti 3.5 lent. [10,52,53,55,56,57] Modeliuojant šiluminę elektrinę laikyta, kad elektrinės galios kėlimo ir mažinimo greitis siekia 1 % per minutę nuo nominalios galios P_N , o tai siekia ± 3 MW/min. galios keitimo greitį.

Energijos kaupimo sistemos universalus modelio pagrindiniai parametrai ir skaičiavimų prielaidos pateiktos 2.4. skyriuje, aprašant šio modelio veikimą.

Vėjo elektrinių galių balansavimo dinaminiais skaičiavimams buvo naudojami faktiniai 2014 metų vasario 1–10 dienų vėjo elektrinių generuotų galių duomenys sekundės intervalu (3.11 paveikslas). Vėjo elektrinių galia šiuo periodu Lietuvoje buvo prognozuojama valandos intervalu, tikslinant galios prognozę du kartus per parą.

Proporcinio integralinio valdiklio (PI) koeficientams nustatyti buvo naudojama standartinė programinio paketo MatLab SIMULINK funkcija, leidžianti nustatyti PI valdiklio parametrus konkrečiu skaičiavimo atveju.

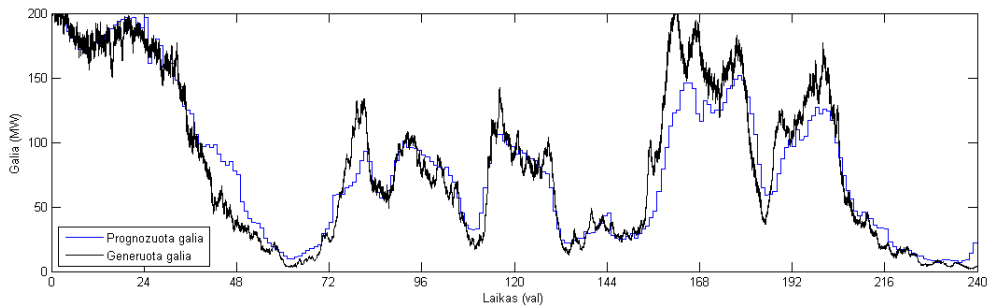
Valdymo signalo kitimo greičio dedamųjų nustatymui naudojamų filtrų parametrai identifikuoti atlikus šių parametrų jautrumo analizę, kuri aprašyta kitame skyriuje.

3.4 lentelė. Hidroelektrinės dinaminiai parametrai

Parametras	Žymėjimas	Vertė
Pastovusis statizmas	R	0,06 s.v.
Laikinis statizmas	r	0,5 s.v.
Laikinojo statizmo laiko pastovioji	T_r	5 s.
Servo variklio laiko pastovioji	T_{sv}	0,2 s.
Kreipračio valdymo laiko pastovioji	T_{kv}	0,2 s.
Vandens laiko pastovioji	T_v	4 s.

3.5 lentelė. Šiluminės elektrinės dinaminiai parametrai

Parametras	Žymėjimas	Vertė
Garų dėžės laiko pastovioji	T_{GD}	0,25 s.
Tarpinio garo perkaitintuvo laiko pastovioji	T_P	5 s.
Garotakio tarp vidutinio ir žemo slėgio cilindro laiko pastovioji	T_{GT}	0,5 s.
Turbinos aukšto slėgio cilindro galia	K_A	0,3 s.v.
Turbinos vidutinio slėgio cilindro galia	K_V	0,3 s.v.
Turbinos žemo slėgio cilindro galia	K_Z	0,4 s.v.
Turbinos greičio regulatoriaus laiko pastovioji	T_{GR}	0,1 s.
Servo variklio laiko pastovioji	T_{SV}	0,3 s.
Kuro padavimo laiko pastovioji (grynasis vėlavimas)	T_D	10 s.
Katilo šiluminės inercijos laiko pastovioji	T_K	100 s.
Kuro degimo metu perduodamos šilumos vamzdžiams inercijos laiko pastovioji	T_{kr}	7 s.
Vamzdžių perduodamos šilumos vandeniui ir garui inercijos laiko pastovioji	T_W	6 s.



3.11 pav. Lietuvos VE prognozuotos ir faktiškai generuotos galios (2014 02 01-10)

3.4. Signalų filtrų parametrų nustatymas

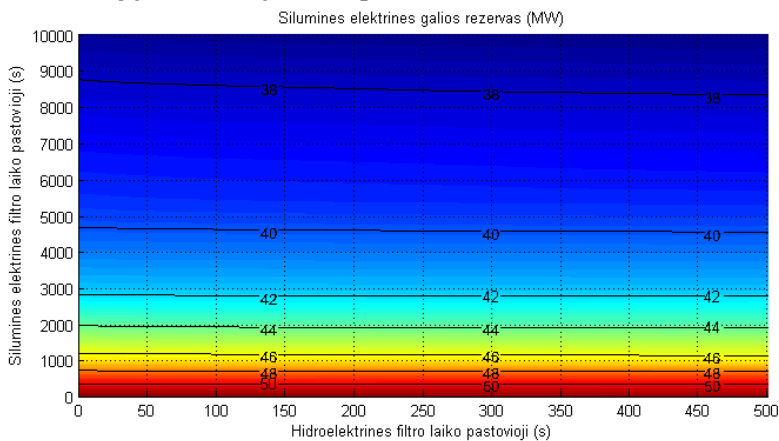
Siekiant nustatyti valdymo signalo filtrų, esančių prieš šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės dalis, įtaką šių elektrinių reguliavimo rezervo galioms bei reguliavimo intensyvumo parametrams ir energijos kaupimo sistemų galios ir energijos (talpos) verčių kitimui, taip pat nustatyti valdymo signalo kitimo greičius kiekvienos balansuojančios elektrinės valdymui, buvo atlikta filtrų parametrų (laiko pastoviųjų) jautrumo analizė. Filtru, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastovioji buvo keičiama nuo 0 iki 10000 s, o filtro, esančio prieš hidroelektrinę – 0–500 s ribose. Šiam tikslui pasiekti buvo atlikta daugybė skaičiavimų balansuojant vėjo elektrinių galias – skirtumą tarp faktinių ir prognozuotų verčių kompensuojant iki 0.

Šiluminės elektrinės reguliavimo rezervo priklausomybė nuo filtrų laiko pastoviųjų pateikta 3.12 paveiksle. Šiame ir kituose jautrumo analizės grafikuose abscisų ašyje atidėta filtro, esančio prieš hidroelektrinę, laiko pastovioji, o ordinačių ašyje filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastovioji. Iš 3.12 paveikslo matyti, kad reikiamas aktyviosios galios rezervas šiluminėje elektrinėje, didėjant

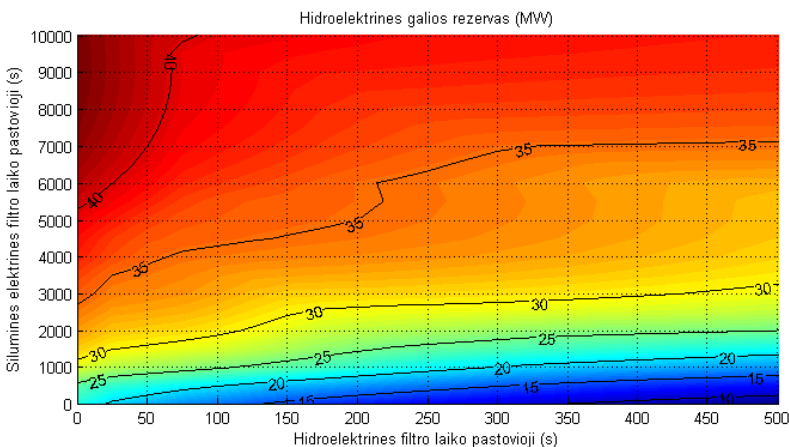
filto, esančio prieš šiluminę elektrinę laiko pastoviai, mažėja. Filto, esančio prieš hidroelektrinę, laiko pastovioji didelės įtakos šiluminės elektrinės galios rezervui neturi.

Aktyviosios galios rezervo hidroelektrinėje priklausomybė nuo filtrų laiko pastoviųjų pateikta 3.13 paveiksle. Šiuo atveju galios rezervo priklausomybė sudėtingesnė. Galios rezervas hidroelektrinėje priklauso nuo abiejų filtrų parametrų ir didėja didėjant filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastoviai ir mažėjant filtro, esančio prieš hidroelektrinę, laiko pastoviai.

Vidutinių šių elektrinių sugeneruotų balansavimo galių kitimo priklausomybės nuo skirtingų filtrų parametrų verčių yra analogiškos, kaip ir aktyviosios galios rezervų kitimų atveju (3.12 ir 3.13 paveikslai). Šios priklausomybės darbe nėra atvaizduotos, tačiau yra vertinamos tolimesniuose filtrų parametrų nustatymo skaičiavimuose. Iš vidutinių balansavimo galių verčių galima spręsti apie reikiamą balansavimo energiją tiriamuoju laiko periodu.



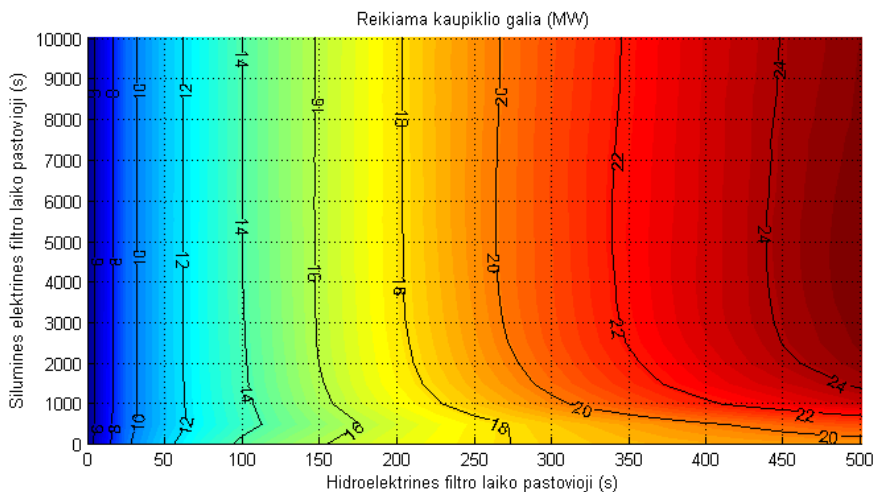
3.12 pav. Šiluminės elektrinės aktyviosios galios rezervas balansuojant VE



3.13 pav. Hidroelektrinės aktyviosios galios rezervas balansuojant VE

Ištyrus elektros energijos kaupimo sistemų parametru (įrengtosios galios ir energijos (talpos)) verčių priklausomybę nuo signalo filtrų laiko pastoviųjų, matyti, kad šie parametrai atvirkščiai proporcingi tradicinių elektrinių reguliavimo galių rezervų kitimui. Didėjant filtrų laiko pastoviosioms, reikiami kaupimo sistemų parametrai didėja (3.14 ir 3.15 paveikslai).

Kitas svarbus parametras balansuojant vėjo elektrinių galias yra balansuojančių elektrinių reguliavimo intensyvumas. Šiame darbe reguliavimo intensyvumas suprantamas, kaip vidutinio galios keitimo greičio parametras. Sumažinus elektrinių reguliavimo intensyvumą, tikėtina, sumažėtų ir išlaidos kurui bei įrangos remontui, nes mažiau reguliuojant elektrinės generuojamą galią, įranga dėvisi mažiau. Filtrų parametru jautrumo analizėje buvo skaičiuota ir tolimesniuose šių parametru parinkimo skaičiavimuose vertinta elektrinių reguliavimo intensyvumo priklausomybė nuo abiejų filtrų laiko pastoviųjų, tačiau vaizdumo dėlei, čia šiluminės elektrinės reguliavimo intensyvumo priklausomybė atvaizduojama nuo filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę laiko pastoviosios, kai filtro, esančio prieš hidroelektrinę, laiko pastovioji nekinta (3.16 paveikslas). Analogiškai atvaizduota ir hidroelektrinės reguliavimo intensyvumo priklausomybė nuo filtro, esančio prieš hidroelektrinę, laiko pastoviosios, kai filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, parametrai yra pastovūs (3.17 paveikslas).

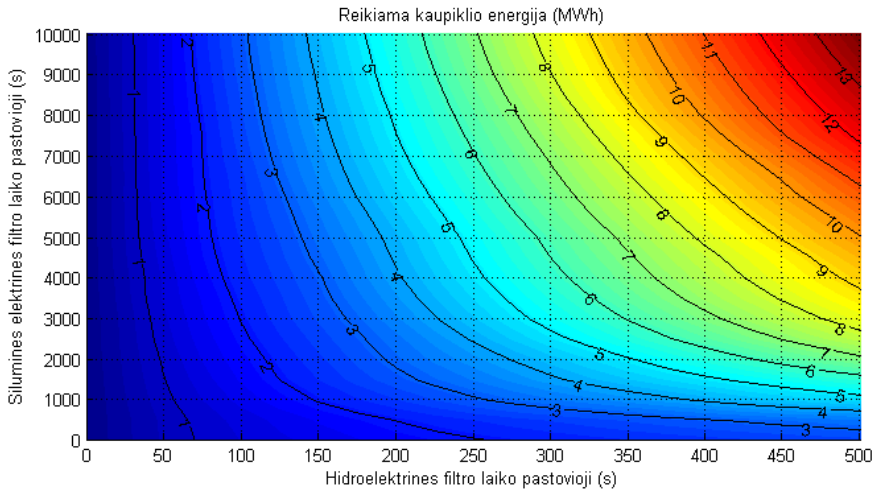


3.14 pav. Įrengtoji elektros energijos kaupimo sistemos galia balansuojant VE

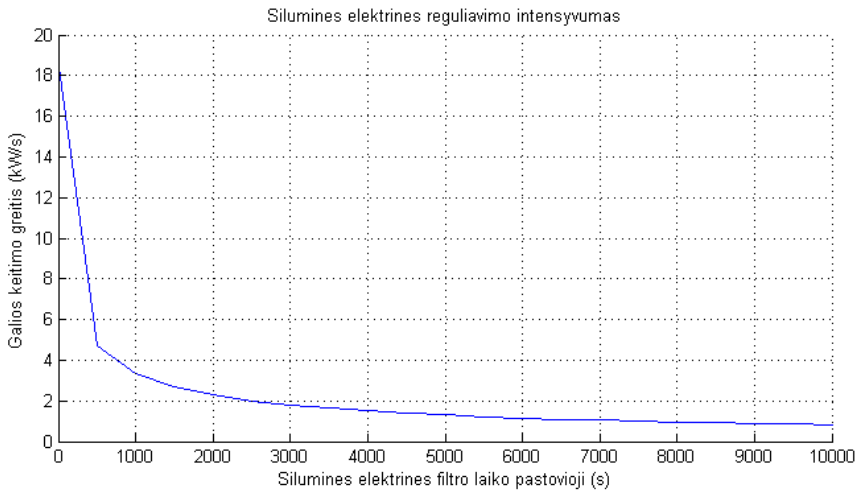
Paveiksluose (3.16 ir 3.17) matyti, kad didėjant filtrų, esančių prieš elektrines, laiko pastoviosioms, elektrinių reguliavimo intensyvumas mažėja. Tinkamai parinkus filtrų laiko pastoviasias, elektrinių reguliavimo intensyvumą galima sumažinti 10 ir daugiau kartų.

Vėjo elektrinių balansavimo galių valdymo modelio pagrindinių parametru, tokiu, kaip aktyviosios galios rezervų šiluminėse elektrinėse ir hidroelektrinėse, šių elektrinių vidutinių sugeneruotų galių (balansavimo energijų) bei galios keitimo (reguliavimo) intensyvumu, taip pat energijos kaupimo sistemų pagrindinių parametru – įrengtųjų galių ir talpų kitimo priklausomybės nuo filtrų laiko

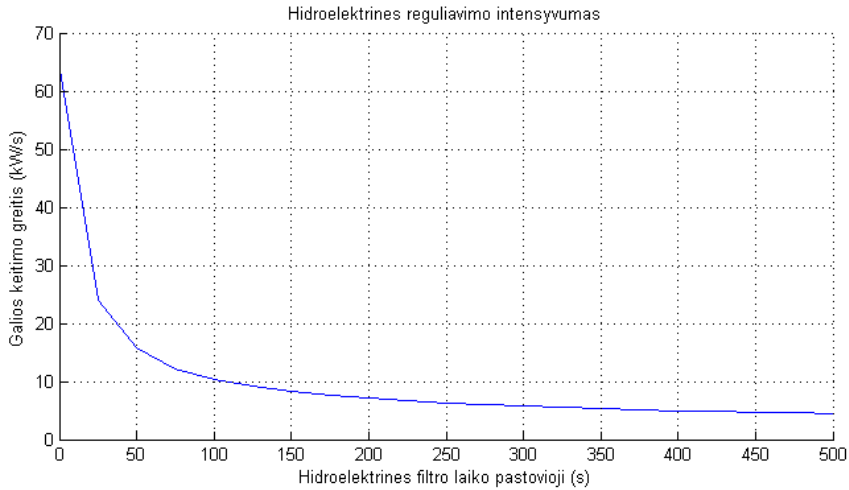
pastoviųjų buvo identifikuotos atlikus šių filtrų parametų jautrumo analizę. Siekiant tinkamai išnaudoti elektrines balansuojant vėjo elektrinių galias, taupyti elektrinių įrangą ir kurą dėl intensyvaus reguliavimo ir tuo pat metu nepagrįstai nepadidinti reikiamų kaupimo įrenginių parametų (įrengtosios galios ir talpos), reikia parinkti tinkamas signalo filtrų, esančių prieš elektrinių dalis, parametų vertes.



3.15 pav. Įrengtoji elektros energijos kaupimo sistemos talpa balansuojant VE



3.16 pav. Šiluminės elektrinės reguliavimo intensyvumas balansuojant VE



3.17 pav. Hidroelektrinės reguliavimo intensyvumas balansuojant VE

Šiam uždaviniui pasiekti sudaryta tikslo funkcija, kurią minimizavus, išlaidos balansuojant vėjo elektrinių galias būtų mažiausios:

$$\min C = c_1 \cdot P_{\text{SE}} + c_2 \cdot P_{\text{HE}} + c_3 \cdot E_{\text{SE}} + c_4 \cdot E_{\text{HE}} + c_5 \cdot R_{\text{SE}} + c_6 \cdot R_{\text{HE}} + c_7 \cdot P_K + c_8 \cdot E_K \quad (3.13)$$

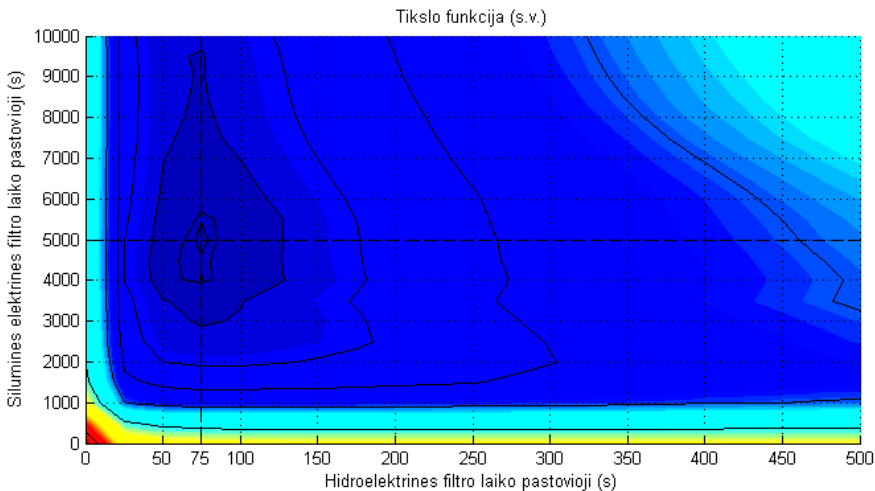
čia P_{SE} , P_{HE} – reikiamas aktyviosios galios rezervas šiluminėje elektrinėje ir hidroelektrinėje (MW), E_{SE} , E_{HE} – šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės sugeneruota balansavimo energija (vidutinė šių elektrinių galia balansuojant VE galias) (MWh), R_{SE} , R_{HE} – šiluminės elektrinės ir hidroelektrinių reguliavimo intensyvumas (MW/s), P_K , E_K – reikiami energijos kaupimo sistemų parametrai (įrengtoji galia ir talpa) (MW ir MWh), c_{1-8} – tikslo funkcijos dedamųjų santykiniai kainų koeficientai.

Siekiant išvengti netikslumų vertinant kiekvienos tikslo funkcijos dedamosios kainas, buvo naudotos santykinės kainų vertės, išlaikant pagrindines proporcijas ir skirtumus tarp realių kainų. Kitas veiksnys, kodėl nebuvo naudotos realios kainų vertės, yra kai kurių šių duomenų konfidencialumas. Koeficientų vertės, naudotos šiame tyrime pateiktos 3.6 lent.

3.6 lentelė. Tikslo funkcijos dedamųjų santykiniai kainų koeficientai [23, 67]

Tikslo funkcijos dedamoji	Žymėjimas	Vertė
Galios rezervas šiluminėse elektrinėse	c_1	0,01
Galios rezervas hidroelektrinėse	c_2	0,009
Šiluminių elektrinių balansavimo energija	c_3	0,15
Hidroelektrinių balansavimo energija	c_4	0,08
Šiluminių elektrinių reguliavimo intensyvumas	c_5	300
Hidroelektrinių reguliavimo intensyvumas	c_6	100
Reikiama energijos kaupimo sistemos galia	c_7	0,25
Reikiama energijos kaupimo sistemos talpa	c_8	0,005

Šiame tyrime nebuvo spręstas klasikinis tikslo funkcijos optimizavimo uždavinys, nes atliekant signalo filtrų parametrų jautrumo analizę buvo suskaičiuota kiekvienos tikslo funkcijos dedamosios priklausomybė atskirai. Skaičiavimų metu, vėjo elektrinių galių skirtumai tarp faktinių ir prognozuotų verčių buvo balansuojami iki nulio, todėl šiame etape, žinant kiekvienos tikslo funkcijos dedamosios priklausomybę nuo filtrų parametrų, galima identifikuoti ir visos tikslo funkcijos kitimo priklausomybę. Tuo tikslu kiekviena dedamoji buvo atvaizduota vienoje koordinatų plokštumoje, atitinkamai įvertinant ir kainų dedamąsias (3.18 paveikslas). Šiame paveiksle matyti, kad tikslo funkcijos minimumas formuojasi, kai filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastovioji yra intervale nuo 4000 s iki 5500 s, o filtro, esančio prieš hidroelektrinę, – intervale nuo 60 s iki 80 s. Tolimesniuose tyrimų skaičiavimuose vertinta, kad filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę, laiko pastovioji siekia 5000 sekundžių, o filtro, esančio prieš hidroelektrinę – 75 sekundes.



3.18 pav. Tikslo funkcijos priklausomybė nuo filtrų laiko pastoviųjų

Ryšį tarp signalo filtro parametrų – laiko pastoviosios ir filtravimo (atkitros) dažnio, galima išreikšti tokia priklausomybe [68]:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \quad (3.14)$$

čia f – filtro atkitros dažnis (Hz), τ – filtro laiko pastovioji (s).

Suskaičiavus filtrų atkitros dažnius matyti, kad filtro, esančio prieš šiluminę elektrinę atkitros dažnis siekia $3,18 \cdot 10^{-5}$ Hz, o filtro, esančio prieš hidroelektrinę – $2,12 \cdot 10^{-3}$ Hz. Tai rodo, kad šiluminės elektrinės įėjimo signalas apima tik žemus skirtumų tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių dažnius, o hidroelektrinės įėjimo signalas apima vidutinius šio signalo dažnius. Vadinasi, šiluminė elektrinė balansuodama vėjo elektrinių galias seks skirtumų tarp faktinių ir prognozuotų galių parų kitimo tendencijas, o hidroelektrinė kompensuos valandų ir minučių galių

skirtumų kitimus. Tuo tarpu elektros energijos kaupimo sistemų uždavinys – staigūs, momentiniai galių skirtumo pokyčiai.

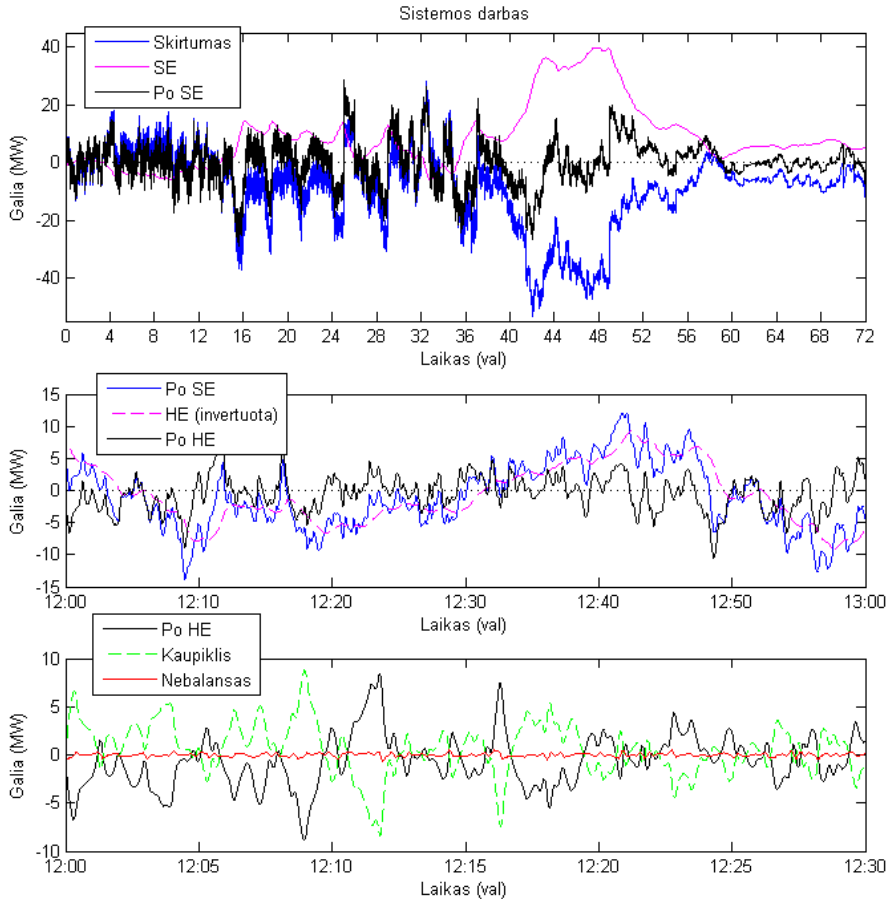
3.5. Balansavimo galių valdymo tyrimas

Atlikus filtrų, esančių prieš šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės dalis, jautrumo analizę bei nustačius reikiamus filtrų parametrus – laiko pastoviasias ir atkirtos dažnius, buvo atlikti vėjo elektrinių galių balansavimo dinaminiai skaičiavimai, panaudojant balansavimo galių valdymo modelį. Kiekvienos balansuojančios elektrinės ir energijos kaupimo sistemos darbas balansuojant vėjo elektrinių galias, laiko srityje arba laiko atžvilgiu, pavaizduotas 3.19 paveiksle. Viršutinė grafiko dalis rodo šiluminės elektrinės darbą. Kaip ir tikėtasi, šiluminė elektrinė seka skirtumo tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių, pateiktų 3.11 paveiksle, paros kitimo tendencijas. Vaizdumo dėlei, grafike atvaizduota pirmųjų trijų parų elektrinės darbas, tačiau tyrime vertintas visas dešimties parų laikotarpis. Šiuo atveju elektrinės uždavinys – maksimaliai kompensuoti parų kitimo tendencijas, o nekompensuoti vėjo elektrinių galių skirtumų iki 0. Šios elektrinės vidutinis galios keitimo greitis tiriamuoju periodu yra apie 2 kW/s, kai tuo tarpu Lietuvos elektrinės 6 generatorinio agregato maksimalus leistinas galios keitimo greitis normaliu režimu siekia apie 50 kW/s (3 MW/min). Reikalingas aktyviosios galios rezervas nuokrypiams reguliuoti, šioje elektrinėje tiriamuoju 10 parų laikotarpiu, siekia apie ± 40 MW, o vidutinė elektrinės reguliavimo galia siekia 11–12 MW, todėl elektrinė pagamintų 2880 MWh reguliavimo elektros energijos.

Vidurinė 3.19 paveikslo dalis iliustruoja hidroelektrinės darbą, kuri seka skirtumų tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių likutį po šiluminės elektrinės darbo, papildomai nufiltravus vidutinės valdymo signalo kitimo greičio dedamąsias. Siekiant parodyti šios elektrinės darbą kompensuojant minučių galios pokyčius, paveiksle pavaizduotas vienos valandos laikotarpis, tačiau tyrime vertintas visas dešimties parų laikotarpis. Hidroelektrinės vidutinis galios keitimo greitis tiriamuoju periodu siekia apie 12 kW/s. Kruonio HAE maksimalus galios keitimo greitis normaliu režimu siekia 4 MW/s. Reikalingas aktyviosios galios rezervas nuokrypiams reguliuoti hidroelektrinėje siekia apie ± 37 MW. Kruonio HAE vieno agregato darbo diapazonas yra nuo 150 MW iki 225 MW, todėl operuojant vienu elektrinės agregatu, jo apkrovimas pradiniu momentu neturi viršyti 188 MW, kad būtų galima atlikti reguliavimą teigiama ir neigiama kryptimis. Vidutinė elektrinės reguliavimo galia tiriamuoju laikotarpiu siekia 6–7 MW, todėl elektrinė pagamintų 1680 MWh reguliavimo elektros energijos.

Galiausiai, apatinė 3.19 paveikslo dalis rodo energijos kaupimo sistemų darbą, kompensuojant likusį skirtumą tarp faktinių ir prognozuotų vėjo elektrinių galių po šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės darbo. Kadangi šiluminė elektrinė kompensuoja mažo, o hidroelektrinė vidutinio kitimo greičio galių skirtumus, energijos kaupimo sistemai lieka tik didelio signalo kitimo greičio dedamosios kompensavimas. Paveiksle 3.19 atvaizduotas energijos kaupimo sistemos darbas pusės valandos laikotarpiu, tačiau tyrime vertintas visas dešimties parų laikotarpis. Identifikuota, kad šiuo 10 parų laikotarpiu reikalinga elektros kaupimo sistemos įrengtoji galia siekia apie 55 MW, o talpa 1,9 MWh. Tai sudaro 24,8 % nuo

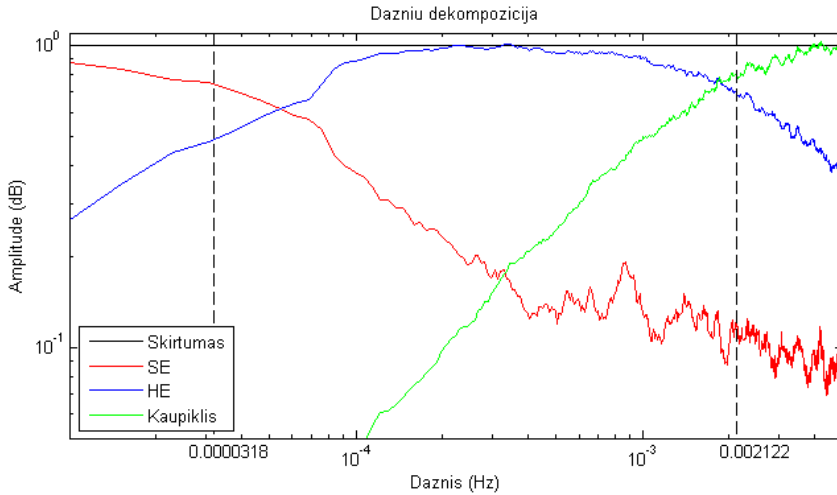
įrengtosios vėjo elektrinių galios Lietuvoje tiriamuoju laikotarpiu. Pažymėtina, kad esant tokiai kaupimo sistemos įrengtajai galiai ir energijai, elektros energijos balansas būtų užtikrintas praktiškai 100 % kiekvienu laiko momentu. Vidutinė energijos kaupimo sistemos galia siekia apie 1 MW, todėl ši sistema pagamintų apie 240 MWh reguliavimo elektros energijos tiriamuoju laikotarpiu.



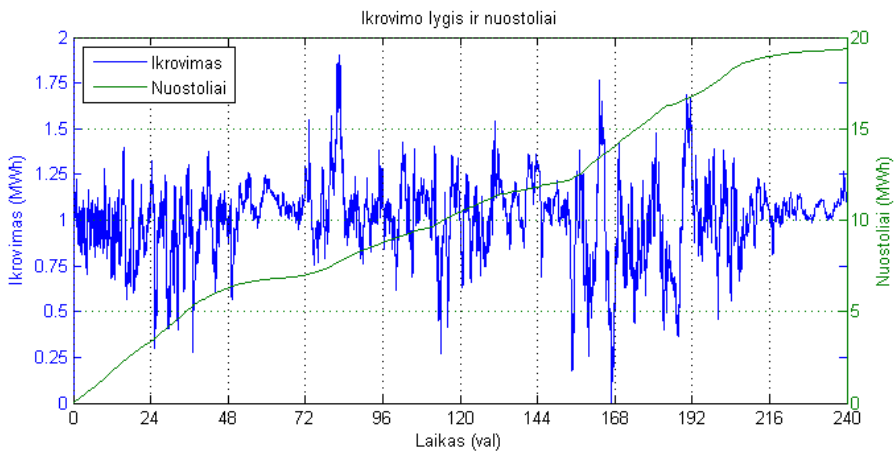
3.19 pav. Elektrinių darbas balansuojant VE galias

Atlikus elektrinių ir energijos kaupimo sistemos išėjimų galių dažnių dekompoziciją (3.20 paveikslas) matyti, kad šiluminė elektrinė dirba žemų, hidroelektrinė – vidutinių, o energijos kaupimo sistema aukštų dažnių diapazonuose. Vertikaliomis brūkšninėmis linijomis šiame grafike atvaizduoti dažnio filtrų, esančių prieš šiluminę elektrinę ir hidroelektrinę atkirtos dažniai. Pažymėtina, kad signalo amplitudė ordinačių ašyje atvaizduota logaritminėje skalėje.

Elektros energijos kaupimo sistemos įkrovimo lygis tiriamuoju laikotarpiu pavaizduotas 3.21 paveiksle. Kaip ir buvo užduota, įkrovimo vertė palaikoma apie pusę reikalingos reguliavimo energijos, todėl yra įmanomas tiek kaupimo sistemos įkrovimas, tiek ir iškrovimas. Paveiksle taip pat pavaizduoti ir energijos kaupimo sistemos nuostoliai, kuriuos kompensuoja šiluminė elektrinė ir hidroelektrinė.



3.20 pav. Elektrinių darbas dažnio srityje

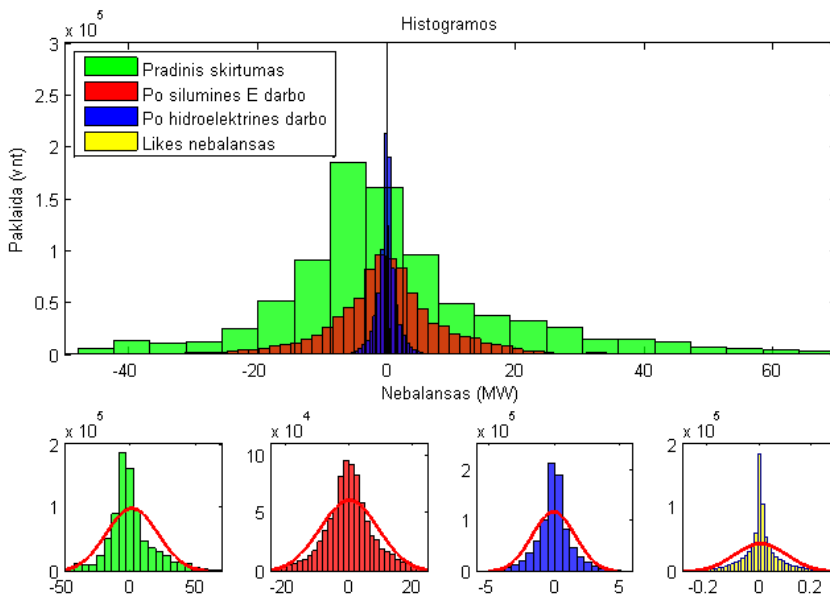


3.21 pav. Energijos kaupimo sistemos įkrovimo lygis ir nuostoliai

Paveikslai 3.19, 3.20 ir 3.21 rodo, kad vėjo elektrinių balansavimo galių valdymo modelis veikia teisingai ir likęs galių skirtumas tarp prognozuotų ir generuotų verčių bet kuriuo laiko momentu yra lygus nuliui, o energijos kaupimo sistema yra paruošta darbui. Vėjo elektrinių prognozuotų ir generuotų galių skirtumų po šiluminės elektrinės, hidroelektrinės ir energijos kaupimo sistemos darbo mažėjimas gerai matomas histogramose, kurios pateiktos 3.22 paveiksle. Žalios spalvos stulpeliai rodo pradinį vėjo elektrinių galių skirtumą. Tiriamuoju periodu vėjo elektrinių galia buvo prognozuota vidutiniškai 32 % tikslumu su 19,52 MW standartiniu nuokrypiu (SD). Pradėjus dirbti šiluminei elektrinei, kuri dirba tik žemų dažnių diapazone, galių skirtumai tarp prognozuotų ir generuotų verčių mažėja iki 24,36 % (SD siekia 9,2 MW). Histogramoje tai atvaizduota raudonos spalvos stulpeliais. Įsijungus į darbą hidroelektrinei (dirba vidutinių dažnių diapazone), galių

skirtumai toliau mažėja iki 1,44 % (SD – 1,16 MW, mėlynos spalvos stulpeliai histogramoje), o po elektros energijos kaupimo sistemos darbo yra pasiekiamas praktiškai 100 % vėjo elektrinių generuojamų galių balansas (geltonos spalvos stulpeliai histogramoje). Galių skirtumų mažėjimo dinamika taip pat pateikta 3.7 lent.

Kaip jau buvo minėta, praktiškai 100 % balanso lygis yra pasiekiamas, kai energijos kaupimo sistema sudaro 24,8 % įrengtosios vėjo elektrinių galios. Tokiam tikslui pasiekti reikalingas 55 MW įrengtosios galios ir 1,9 MWh talpos elektros energijos kaupimo įrenginys (sistema). Matyti, kad dominuoja galios, o ne energijos dedamoji, todėl Lietuvos elektros energetikos sistemoje būtų reikalinga įrengti galios kompensavimui skirtą energijos kaupimo sistemą. Galiai kompensuoti geriausiai tinka superkondensatorių, smagračių ar srauto baterijų energijos kaupimo technologijos. Srauto baterijų technologija pranaši dar ir tuo, kad galios ir energijos dedamosios yra nepriklausomos viena nuo kitos t. y. srauto baterijos įrengtąją galią galima didinti didinant elementų skaičių, o energiją – didinant naudojamo elektrolito tūrį. Tačiau 55 MW energijos kaupimo sistemos įrengimas yra mažiau tikėtinas, nes didelių galių energijos kaupimo įrenginiai (superkondensatoriai, smagračiai ar srauto baterijos) tebėra tobulinimo stadijoje ir pasaulyje yra vos keli praktiniai įrengimo pavyzdžiai. Šiuo metu Jungtinėse Amerikos Valstijose bendrovė „Beacon Power“ stato antrą 20 MW galios smagračių energijos kaupimo elektrinę. Pietų Korėja vykdo 54 MW Ličio jonų baterijų sistemos statybas, Japonija – 30 MW. Italijoje Europos Komisija patvirtino 35 MW galios Natrio-sieros baterijų energijos kaupimo sistemos statybas [69].



3.22 pav. VE galių skirtumų mažėjimas

3.7 lentelė. VE galių skirtumų mažėjimo dinamika

Galių skirtumai	Vidutinė paklaida, %	Standartinis nuokrypis, MW
Pradinis	32,00	19,52
Po šiluminės elektrinės darbo	24,36	9,20
Po hidroelektrinės darbo	1,44	1,16
Po energijos kaupimo sistemos darbo	0,068	0,58

Kita vertus, Lietuvos elektros energetikos sistema nedirba izoliuotai, o kartu su kitomis Baltijos Šalių elektros energetikos sistemomis veikia jungtinėje energetikos sistemoje sinchroniniu režimu. Kelių elektros energetikos sistemų sujungimas į vieną sinchroninę zoną turi daug privalumų. Vienas iš jų yra vieningas sistemos dažnio valdymas. Nukrypęs sistemos dažniui, visų sinchroniškai veikiančių elektros energetikos sistemų generatoriniai agregatai, dalyvaujantys dažnio valdyme, reaguoja į dažnio nuokrypį pagal užduotas statizmo charakteristikas. Dėl šios priežasties vėjo elektrinių galios balanso užtikrinimas kiekvienu laiko momentu nėra kritinis patikimam ir stabiliam Lietuvos EES veikimui.

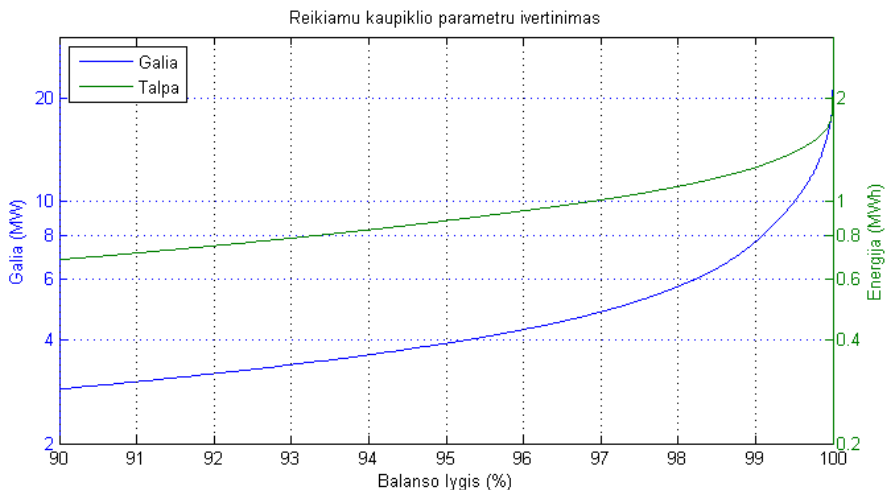
Paprastai galios rezervai vėjo elektrinių ir apkrovų galių nuokrypiams reguliuoti nustatomi nagrinėjant statistinius duomenis ir vertinant taip vadinamą trijų standartinių nuokrypių taisyklę (2.1 skyrius). Ši taisyklė reiškia, kad nustatyti galios rezervai padengs 99,7 % būsimų galios nuokrypių. Arba vėjo elektrinių ir apkrovų galių balansas bus užtikrintas su 99,7 % tikimybe.

Įvertinus Lietuvos elektros energetikos sistemoje veikiančių vėjo elektrinių galių balansą pagal trijų standartinių nuokrypių taisyklę gauta, kad tokiam balanso lygiui pasiekti pakanka 14,1 MW įrengtosios galios ir 1,41 MWh talpos energijos kaupimo sistemos. Tai žymus (beveik 4 kartus) energijos kaupimo sistemos įrengtosios galios sumažėjimas, darantis tokios sistemos įgyvendinimą įmanomą praktikoje. Šiuo atveju įrengtoji energijos kaupimo sistemos galia siekia 6,3 % nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios Lietuvos EES tiriamuoju laikotarpiu.

Toleruojant dar mažesnę vėjo elektrinių galių balanso lygį, pavyzdžiui, vertinant dviejų sigmų taisyklę arba 95 % tikimybę, galima dar labiau sumažinti reikiamas energijos kaupimo sistemos parametrų vertes. Reikiamų energijos kaupimo sistemos parametrų priklausomybė nuo užtikrinamo vėjo elektrinių galių balanso lygio ir jų mažėjimo dinamika pateikta 3.23 paveiksle ir 3.8 lent.

3.8 lentelė. Reikiami energijos kaupimo sistemos parametrai

VE galių balanso lygis, %	Kaupiklio galia, MW	Kaupiklio energija, MWh
~100	55,3	1,90
99,7	14,1	1,41
95	3,9	0,88



3.23 pav. Reikiamų kaupimo sistemų parametų kitimo dinamika

3.6. Pagrindiniai skyriaus rezultatai

1. Suskaičiuotos vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozavimo paklaidos rodo, kad Lietuvos elektros energetikos sistemoje apkrovų galios yra prognozuojamos tiksliau negu vėjo elektrinių generuojama galia. Vėjo elektrinių galių prognozavimo paklaida tiriamu periodu siekė 11,64 %, apkrovų galių – 1,79 %.
2. Pagal vienos minutės laikotarpių vidutinius vėjo elektrinių ir apkrovų galių kitimus nustatyta, kad vidutinių vėjo elektrinių generuojamų galių kitimų balansavimui reikalinga elektrinė, kurios galios keitimo greitis turi būti ne mažesnis nei $\pm 1,5$ MW/min, o apkrovų galių vidutinių kitimų balansavimui – $\pm 2,5$ MW/min. Tuo tarpu maksimalių vėjo elektrinių galių kitimų balansavimui reikalinga elektrinė, kurios generuojamos galios keitimo greitis yra ne mažesnis nei ± 20 MW/min, o apkrovų galių maksimalių kitimų padengimui atitinkamai ± 35 MW/min.
3. Vertinant 15 minučių ir 1 minutės vidutinius vėjo elektrinių ir apkrovų galių kitimus, reikiamas nuokrypių reguliavimo galių rezervas praktiškai nesiskiria ir sudaro apie 6,5 % nuo tos dienos apkrovos maksimumo ir apie 55 % nuo tiriamojo laikotarpio įrengtosios vėjo elektrinių galios. Tačiau valandos vidutinių galių kitimo atveju, šis rezervas yra trečdaliu mažesnis, todėl siekiant mažesnės vėjo elektrinių ir apkrovų galių kitimo įtakos stabiliam elektros energetikos sistemos darbui, galių prognozavimo tikslumo ir mažesnių nuokrypių reguliavimo rezervų, tikslinga vėjo elektrinių ir apkrovų galias prognozuoti mažesniu intervalu, pavyzdžiui, pereinant prie 15 minučių operatyvinio planavimo.
4. Sudaryto balansavimo galių valdymo dinaminio modelio parametrai nustatyti pagal Lietuvoje veikiančių Lietuvos Elektrinės ir Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės dinamines charakteristikas. Naudojant faktinius ir prognozuotus

Lietuvos vėjo elektrinių galių kitimus, atlikta signalo filtrų parametų jautrumo analizė ir nustatyti atkirtos dažniai parodė, kad Lietuvos E agregatą tikslinga valdyti pagal mažą valdymo signalo kitimo greitį, Kruonio HAE agregatą – pagal vidutinį valdymo signalo kitimo greitį, o energijos kaupimo sistemą atitinkamai pagal didelį valdymo signalo kitimo greitį.

5. Nustatyti filtrų atkirtos dažniai leido sumažinti šiluminės elektrinės vidutinį reguliavimo intensyvumą apie 10 kartų, o hidroelektrinės apie 5 kartus. Be to, aktyviosios galios rezervo vertė šiluminėje elektrinėje sumažėjo apie 20 %.
6. Vėjo elektrinių galių skirtumai tarp faktinių ir prognozuotų verčių tirtu periodu siekė 32 % su beveik 20 MW standartiniu nuokrypiu. Po šiluminės elektrinės darbo šie skirtumai mažėjo iki 24,4 % su 9 MW standartiniu nuokrypiu, o po hidroelektrinės darbo – atitinkamai iki 1,4 % su 1,2 MW SD. Energijos kaupimo sistemos darbas leido sumažinti minėtus parametrus iki 0,07 % su 0.6 MW SD. Tai rodo beveik 100 % pasiektą vėjo elektrinių generuojamų galių balansą ir teisingą balansavimo galių valdymo modelio veikimą.
7. Nustatyta, kad tirtu periodo vėjo elektrinių generuojamų galių kitimo subalansavimui reikia ± 40 MW aktyviosios galios rezervo Lietuvos E ir ± 37 MW Kruonio HAE. Tai sudaro apie 13 % nuo šiluminės elektrinės agregato įrengtosios galios ir apie 16 % nuo hidroakumuliacinės elektrinės agregato įrengtosios galios. Pažymėtina, kad operuojant vienu Kruonio HAE agregatu ir norint užtikrinti nustatytą galios rezervą, jo apkrovimas pradiniu momentu neturi viršyti 188 MW.
8. Nustatyta energijos kaupimo sistemos įrengtoji galia tiriamojo laikotarpio vėjo elektrinių galių balanso užtikrinimui siekia 55,3 MW, o talpa – 1,9 MWh. Tai sudaro 24,8 % nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios Lietuvos EES dirbant „salos“ režimu. Tačiau elektros energetikos sistemai dirbant jungtinėje sistemoje ir toleruojant mažesnę balanso lygį, energijos kaupimo sistemos parametrus galima ženkliai (4 kartus) sumažinti. Vertinant trijų standartinių nuokrypių taisyklę arba 99,7 % tikimybę, charakteringi energijos kaupimo sistemos parametrai (reikalinga galia ir energija) sumažėtų iki 14,1 MW ir 1,41 MWh. Tai sudarytų 6,3 % nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios tiriamuoju periodu.

IŠVADOS

1. Ištirus Lietuvos vėjo elektrinių ir apkrovų galių prognozavimo paklaidas ir jų įtaką balansavimo galioms, nustatyta, kad vidutinių vėjo elektrinių generuojamų galių kitimų balansavimui reikalinga elektrinė, kurios galios keitimo greitis būtų ne mažesnis nei $\pm 0,94$ %/min nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios, o apkrovų galių vidutinių kitimų balansavimui – $\pm 0,15$ %/min nuo didžiausios apkrovos galios. Tuo tarpu maksimalių vėjo elektrinių galių kitimų balansavimui reikalinga elektrinė, kurios generuojamos galios keitimo greitis būtų ne mažesnis nei $\pm 12,5$ %/min nuo įrengtosios vėjo elektrinių galios, o apkrovų galių maksimalių kitimų padengimui – ± 2 %/min nuo didžiausios apkrovos galios.
2. Sukurtas universalus energijos kaupimo sistemų dinaminis modelis su mažesniu dinaminių parametrų skaičiumi, tinkantis vėjo elektrinių galioms balansuoti ir vertinantis šiuos pagrindinius parametrus – įrengtąją galią ir talpą, ciklo našumo faktorių arba energijos nuostolius, įkrovimo lygį bei reakcijos laiką.
3. Sukurtas balansavimo galių valdymo dinaminis modelis balansuojančių elektrinių galioms reguliuoti pagal valdymo signalo kitimo greitį. Toks valdymo modelis leidžia sumažinti nuokrypių reguliavimo rezervo galią šiluminėje elektrinėje 20 %, o šiluminės elektrinės ir hidroelektrinės reguliavimo intensyvumą – iki 10 kartų. Taip pat patobulintas automatinio generavimo valdymo sistemos galių paskirstymas leidžia integruoti greitaveikes energijos kaupimo sistemas į automatinio generavimo valdymo sistemą.
4. Ištirta, kad Lietuvos elektros energetikos sistemos vėjo elektrinių galių balansui pasiekti reikia energijos kaupimo sistemos, kurios galia siekia apie 6 % įrengtosios vėjo elektrinių galios, kai Lietuvos EES veikia jungtinėje energetikos sistemoje, ir apie 25 % – Lietuvos EES veikiant „salos“ režimu.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. United in tough times. // The European Wind Energy Association. Annual report 2012, ISSN: 2032-9024., June 2013. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA_Annual_Report_2012.pdf
2. Pure Power. Wind Energy Targets for 2020 and 2030. // A report by the European Wind Energy Association – 2011, July 2011. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/Pure_Power_III.pdf
3. Direktyva 2009/28/EB dėl skatinimo naudoti atsinaujinančių išteklių energiją // Oficialus ES leidinys, 2009 m. gegužės 6 d. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.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. A Roadmap for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.cbss.org/wp-content/uploads/2012/12/EU-Low-Carbon-Road-Map-2050.pdf>
6. EU energy trends to 2030 — UPDATE 2009. European Commission Directorate-General for Energy in collaboration with Climate Action DG and Mobility and Transport DG. – European Union, 2010. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ec.europa.eu/energy/observatory/trends_2030/doc/trends_to_2030_update_2009.pdf
7. EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050. Reference scenario 2013. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ec.europa.eu/energy/observatory/trends_2030/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/about-entso-e/system-development/system-adequacy-and-market-modeling/soaf-2013-2030/>
9. Sistemos valdymo veiklos statistika už 2013 metus. // LITGRID AB, Vilnius, 2014.
10. Kundur, P. Power System Stability and Control. // ISBN 0-07-035958-X. McGraw-Hill, Inc., 1994.
11. S102 PowerOn Reliance System Overview. // PowerOn Reliance System. GE Digital Energy. 2013.
12. 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), January, 6-9, 2014. P. 2444–2452. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&number=6758906&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6758906

13. S712 Generation Dispatch and Control (GDC). // PowerOn Reliance System. GE Digital Energy. 2013.
14. Wang, Lu.; Chen, D. Extended Term Dynamic Simulation for AGC with Smart Grids. // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July, 24-29, 2011. P. 1–7. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6039379&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6039379
15. Murakami, K.; Komori, M.; Mitsuda, H. Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, June, 2007. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=4277617>
16. Veszpremi, K.; Schmidt, I. Flywheel Energy Storage Drive for Wind Turbines. // IEEE 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'07. P. 916-923. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4487814>
17. Rojas, A. Flywheel Energy Matrix Systems – Today’s Technology, Tomorrow’s Energy Storage Solution. // Applications Engineering. Beacon Power Corp. Wilmington, MA 01887. 2003. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.battcon.com/papersfinal2003/rojaspaperfinal2003.pdf>
18. 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. P. 387-396. [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
19. Cimuca, G. O.; Saudemont, C.; Robyns, B.; Radulescu, M. M. Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 53. No. 4. August, 2006. P. 1074-1085. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1667905&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1667905
20. 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>
21. You, D.; Zhang, H.; Chen, J. A simple model for the vanadium redox battery. // Electrochimica Acta 54. 2009. P. 6827–6836. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://pemfckt.dicp.ac.cn/paper/2009_08.pdf
22. 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

23. Electric Energy Storage Systems. // Cigre working group C6.15. April, 2011. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.scribd.com/doc/161730215/458-Electric-Energy-Storage-Systems>
24. Wei, L.; Géza, J. Comparison of Energy Storage System Technologies and Configurations in a Wind Farm. // IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. P. 1280-1285. [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
25. 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. // European Transactions on Electrical Power 21. July, 2011. P. 680-697. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etep.469/abstract>
26. 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
27. 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. No. 1. Maech, 2006. P. 221-227. [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>
28. 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>
29. 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
30. Mahat, P.; Chen, Z.; Bak-Jensen, B. Gas Turbine Control for Islanding Operation of Distribution Systems. // IEEE Power and Energy Society General meeting PES'09, July, 26-30, 2009. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5275701&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5275701
31. Massucco, S.; Pitto, A.; Silvestro, F. A Gas Turbine Model for Studies on Distributed Generation Penetration Into Distribution Networks. // IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 26, No. 3, August, 2001. P. 992-999. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5669372&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5669372
32. Improving Compressed Air System Performance, Compressed Air System Controls. // USA Department of Energy, Office of Industrial Technologies, April, 1998. P. F6-1-

- F6-4. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<https://www.compressedairchallenge.org/library/factsheets/factsheet06.pdf>
33. Saadat, M.; Y. Li, P. Modeling and Control of a Novel Compressed Air Energy Storage System for Offshore Wind Turbine. // American Control Conference (ACC), June, 27-29, 2012. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6315575&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6297579%2F6314593%2F06315575.pdf%3Farnumber%3D6315575>
 34. SedighNejad, H.; Iqbal, T.; Quaicoe, J. Compressed Air Energy Storage System Control and Performance Assessment Using Energy Harvested Index. // Electronics 2014, Vol. 3, January, 2014. P. 1–21. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<http://www.mdpi.com/2079-9292/3/1/1>
 35. Nguyen, C-L.; Lee H-L. 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
 36. Yoshimoto, K.; Nanahara, T.; Koshimizu, G. New Control Method for Regulating State-of-Charge of a Battery in Hybrid Wind Power/Battery Energy Storage System. // IEEE Power Systems Conference and Exposition PSCE 2006. October 29 – November 1, 2006. P. 1244–1251. [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
 37. 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, No. 1. March, 2013. P. 52–61. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6365250>
 38. 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, No. 3. 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
 39. 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, No. 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
 40. Long, N. C.; Chun, T. W.; Lee, H. H. Determination of the Optimal Battery Capacity Based on a Life Time Cost Function in Wind Farm. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. September, 2013. P. 51–58. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6646680>
 41. 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>

42. 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.ea-aw.de/fileadmin/downloads/Projektgruppen/Balancing_Renewable_Electricity_excerpt.pdf
43. Lubosny, Z.; Bialek, J.W. Supervisory control of a wind farm. // IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 22, No. 3. 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
44. 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
45. Yuan, Y. *et al.* Applications of battery energy storage system for wind power dispatchability purpose. // Electric Power Systems Research, Vol. 93. December, 2012. P. 54–60. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612002088>
46. Khalid, M.; Savkin, A.V. Minimization and control of battery energy storage for wind power smoothing: Aggregated, distributed and semi-distributed storage. // Renewable Energy, Vol. 64. April, 2014. P. 105–112. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113005223>
47. Khalid, M.; Savkin, A.V. A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage. // Renewable Energy, Vol. 35. July, 2010. P. 1520–1526. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109005175>
48. Abbey, C.; Strunz, K.; Joys, G. A knowledge-based approach for control of two level energy storage for wind energy systems. // IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24. No. 2, June, 2009. P. 539–547. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4738387&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4738387
49. 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. P. 3827–3837. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210003075>
50. 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>
51. Mousavi G, S. M. An autonomous hybrid energy system of wind/tidal/microturbine/battery storage. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 43, Issue 1, December, 2012. P. 1144–1154. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512002505>
52. Ažubalis, M.; Ažubalis, V.; Jonaitis, A.; Slušnys, D. Estimation of available unit capacity of small power system. // Electrical and Control Technologies : Proceedings of

the 6th international conference, ECT 2010 / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association, Full Member of EUROELECTRIC. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-5934. 2010, P. 187-191.

53. 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. ISSN 1392 – 1215. 2011, Vol. 107. No. 1. P. 79-82. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/elektros_z/z107/18_ISSN_1392-1215_Estimation%20of%20the%20Feasible%20Wind%20Power%20in%20a%20Small%20Power%20System.pdf
54. 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
55. Ponešis, R.; Ažubalis, V. Šiluminių elektrinių generatorinių agregatų režimų modeliavimas // Energetika, Lietuvos mokslų akademijos leidykla. ISSN 0235-7208. 2012, T. 58, Nr. 1, P. 21-29. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<http://www.lmaleidykla.lt/ojs/index.php/energetika/article/view/2281>
56. Gao, L.; Dai, Y. Modeling Large Modern Fossil-Fueled Steam-Electric Power Plant and Its Coordinated Control System for Power System Dynamic Analysis. // From the selected works of Lin Gao. October, 2010. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1004&context=gao>
57. Machowski, J.; Bialek, J.W.; Bumby, J. R. Power system dynamics: stability and control. // John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2012. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
http://www.researchgate.net/publication/41231911_Power_system_dynamics__stability_and_control
58. 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>
59. Teleke, S.; Baran, M. E.; Huang, A. Q.; Bhattacharya, S.; Anderson, L. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching. // IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 24. No. 3. September, 2009. P. 725-732. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5071241&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5071241
60. Marčiukaitis, M. Vėjo elektrinių prognozavimo galimybės Lietuvoje. // Lietuvos energetikos institutas, Lietuvos mokslų akademijos leidykla, Energetika 2007. T. 53. Nr. 3. P. 72-76. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2007/3/Ener_072_076.pdf
61. Boone, A. Simulation of a Short-term Wind speed Forecast Errors using Multi-variate ARMA (1,1) Time-series Model // Master thesis. Dept of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 2005. 95 p. [interaktyvus]. Prieiga per internetą:
<http://www.ee.kth.se/php/modules/publications/reports/2005/X-ETS-EES-0513.pdf>

62. Kariniotakis, G.; Pinson, P.; Siebert, N.; Giebel, G.; Barthelmie, R. The State of the Art in Short-term Prediction of Wind Power – From an Offshore Perspective // Proceedings of 2004 SeaTechWeek, Brest, France, October 2004.
63. Marčiukaitis, M.; Erlickytė-Marčiukaitienė, R.; Tumosa, A. Vėjo greičio kitimo dėsningumų Lietuvos pajūrio regione tyrimas. // Lietuvos energetikos institutas, Lietuvos mokslų akademijos leidykla, Energetika 2009. T.55. Nr. 1. P. 27-34. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2009/1/27-34.pdf>
64. Birgiolas, E.; Katinas, V. Vėjo srauto parametrų kitimo dėsningumų tyrimas Lietuvos pajūryje. // Lietuvos energetikos institutas, Lietuvos mokslų akademijos leidykla, Energetika 2006. Nr. 2. P. 29-33. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2006/2/Ener029_033.pdf
65. Deksnys, R. P.; Stankevičius, A. Investigation of Wind Power Generation in Lithuania. // Oil Shale 2011. Vol. 28. No. 1S. 2011. P. 203–213. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://www.kirj.ee/public/oilshale_pdf/2011/issue_1s/Oil-2011-1-203-213.pdf
66. Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės plėtra. // Lietuvos energija. Pranešimas. 2012 gruodžio 10 d., Vilnius.
67. Electricity Generation Cost 2013. // Department on Energy and Climate Change, July, 2013. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/223940/DECC_Electricity_Generation_Costs_for_publication_-_24_07_13.pdf
68. Carter, B. Filter Design and Thirty Seconds. // Texas Instruments. Application report. SLOA- 093. December, 2011. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/an/sloa093/sloa093.pdf>
69. Grid Energy Storage. // U.S. Department of Energy. December, 2013. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <http://energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/Grid%20Energy%20Storage%20December%202013.pdf>

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS DISERTACIJOS TEMA

STRAIPSNIAI

Tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. Šiožinys, Vytautas; **Baranauskas, Audrius**. Smart protection for enhancement of stability conditions of distributed generators // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1215. 2012, nr. 1(117), p. 71-74. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Computers & Applied Sciences Complete; Central & Eastern European Academic Source]. [IF (E): 0,411 (2012)]
2. Ažubalis, Mindaugas; **Baranauskas, Audrius**; Tamulis, Giedrius. Wind power balancing using flywheel energy storage system // Elektronika ir elektrotechnika = Electronics and Electrical Engineering. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1215. 2013, Vol. 19, no. 1, p. 19-22. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Computers & Applied Sciences Complete; Central & Eastern European Academic Source]. [IF (E): 0,445 (2013)]

Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

3. **Baranauskas, Audrius**; Baranskas, Vitalijus; Šiožinys, Vytautas. The investigation of working conditions of distributed 5.4 mW generator in Putinai substation // Electrical and Control Technologies : proceedings of the 6th international conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011 / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association. Kaunas : Technologija. ISSN 1822-5934. 2011, p. 351-354. [Conference Proceedings Citation Index].
4. **Baranauskas, Audrius**; Gelažanskas, Linas; Ažubalis, Mindaugas; Gamage, Kelum A.A. Control strategy for balancing wind power using hydro power and flow batteries // ENERGYCON 2014 : IEEE International Energy Conference, 13-16 May, 2014 Dubrovnik, Croatia. Piscataway, NJ : IEEE, 2014. ISBN 9781479924486. p. 372-377. [IEEE/IEE]. [M.kr. 01T].

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai Konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

5. **Baranauskas, Audrius**; Matelionis, Donatas. Inercinių generavimo agregatų pritaikymas vėjo elektrinių generuojamos galios balansavimui // Elektros ir valdymo technologijos ECT-2009 : 4-osios tarptautinės konferencijos straipsnių lietuvių kalba rinkinys / Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas. Kaunas : Technologija, 2009. ISBN 9789955256687. p. 35-39.
6. **Baranauskas, Audrius**; Ažubalis, Mindaugas. The evaluation of the load and wind power forecasting errors // Electrical and control technologies : proceedings of the 9th international conference on electrical and control technologies ECT 2014 / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association. Kaunas : Technologija. ISSN 1822-5934. 2014, p. 162-167.