

Lietuvos elektros energetikos sistemos dažnio ir tarpsteminųjų galių nuokrypių priklausomybė nuo vėjo elektrinių darbo

Virginijus Radziukynas,

Antanas Nemura

*Lietuvos energetikos institutas,
Sistemų valdymo ir automatizavimo
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas
El. paštas: virginijus@mail.lei.lt*

Albertas Nargėlas

*Kauno technologijos universitetas,
Elektros sistemų katedra,
Studentų g. 48, LT-51367 Kaunas*

Lietuvoje vykstant vėjo energetikos plėtrai svarbu iširti vėjo elektrinių įtaką elektros energetikos sistemos darbui. Šiame straipsnyje pateikiama Lietuvos elektros energetikos sistemos dažnio ir tarpsteminųjų galių nuokrypių priklausomybė nuo vėjo elektrinių darbo, pasiūlyti tinkamiausi dažnio ir galios reguliavimo metodai bei reguliavime dalyvaujančios elektrinės.

Raktažodžiai: elektros energetikos sistema, generatorius, vėjo elektrinė, dažnis, aktyvioji galia, reguliavimas

1. ĮVADAS

Šiuo metu vėjo energetika yra viena sparčiausiai besivystančių ir vis plačiau naudojamų elektros energijos gamybos šaltinių daugelyje pasaulio šalių. Greitas vėjo elektrinių (VE) generacijos globalinis augimas prasidėjo 1990 m. 2003 m. vėjo energija pagamino apie 2% elektros energijos, suvartojamos Europos Sąjungoje (ES). Šiuo metu ES vėjo elektrinių įrengtoji galia sudaro apie 30 GW, 2010 m. planuojama 75 GW galia [1]. 2006 m. pabaigoje visame pasaulyje VE įrengtoji galia sudarė apie 73 904 MW ir kasmet didėja po 25%; planuojama, kad 2010 m. VE įrengtoji galia pasieks 160 GW [2].

Toks spartus VE generacijos augimo tempas paaiškinamas elektrinių ir jų generuojamos elektros energijos kainos sumažėjimu 1990 m., taip pat daugelio šalių valstybinėmis subsidijomis siekiant padidinti atsinaujinančių energijos šaltinių plėtrą ir sumažinti CO₂ emisijas.

Lietuva ES yra išsipareigojusi iki 2010-ųjų metų padidinti elektros energijos gamybą iš atsinaujinančių išteklių iki 7%. Vyriausybė vėjo energetiką nustatė prioritetine ir patvirtinta tvarka nurodė, kiek MW vėjo jėgainių turi būti įdiegta kasmet iki 2009-ųjų. Šiuo metu elektros gamyba iš atsinaujinančių išteklių sudaro apie 3,5%. Daugiausia tai – hidroelektrinių gaminama elektros energija. Vėjo energijos gamybos daliai užtikrinti reikia pastatyti iki 200 MW VE galios [3].

Prijungiant dideles VE prie perdavimo tinklo yra aktualu išnagrinėti jų įtaką elektros energetikos sistemos (EES) darbui.

EES keliami reikalavimai VE daugiausia priklauso nuo įrengtosios VE galios, EES konfigūracijos ir generuojamos galios kitimo laike. VE generuojama galia priklauso nuo vėjo greičio, todėl jų darbą sudėtinga planuoti, tam būtina tiksliai ir patikimai vėjo prognozė, tačiau tai sunkiai įgyvendinamas uždavinys. Todėl reikia turėti papildomus galios reguliavimo šaltinius Lietuvos elektrinėse VE generacijos pokyčiams padengti. Svarbu iširti VE darbo įtaką sistemos dažniui ir tarpsteminiam aktyviosios galios balanso palaikymui nustatytose ribose, galimus nuokrypius taikant skirtingus dažnio ir galios reguliavimo metodus. Šiame straipsnyje pasiūlyti tinkamiausi LEES dažnio ir galios reguliavimo metodai bei antriniame reguliavime dalyvaujančių elektrinių sudėtis, keičiantis EES darbo režimams ir sistemos agregatų reguliavimo charakteristikoms.

2. ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS GALIŲ BALANSO IR DAŽNIO TARPUSAVIO RYŠYS

Bet kurioje EES aktyvioji galia turi būti generuojama ir suvartojama tuo pačiu metu. Galios generavimas ir suvartojimas turi būti palaikomas pastovioje pusiausvyroje, priešingu atveju atsiranda galios nebalansas ir dažnio nuokrypis nuo vardinio dažnio. Trikdžiai, sukelti sistemos dažnio nuokrypius nuo jo vardinės reikšmės, iš pradžių padengiami besisukančių generuojančių agregatų ir variklių kinetine energija. Sistema turi pakankamai lanksčiai keisti savo generacijos lygį, akimirksniu reguliuoti apkrovos bei generacijos nuokrypius. Dažnis yra vienas

pagrindinių elektros energijos kokybės rodiklių [4–6]. Elektros energijos tiekimo kokybė nusakoma generuojamos ir vartojamos elektros energijos balansu esant vardiniam dažniui, t. y.

$$\Sigma P_g - \Sigma P_a = 0; \quad (1)$$

čia ΣP_g – suminė generuojama galia esant vardiniam dažniui, ΣP_a – visų vartotojų pareikalaujama galia (apkrovos) kartu su nuostoliais elektros tinkle, elektrinių saviosiomis reikmėmis ir t. t. esant vardiniam dažniui. Balanso lygtis (1) yra būtina nustovėjusio režimo egzistavimo sąlyga. Tačiau galių balansas gali būti ne tik esant vardiniam dažniui f_v , bet ir esant bet kuriam pastoviam dažniui f , t. y.

$$\Sigma P_{gf} - \Sigma P_{af} = 0; \quad (2)$$

čia ΣP_{gf} ir ΣP_{af} – generuojama suminė galia ir vartotojų apkrovos suminė galia esant dažniui f .

Generuojama galia ΣP_{gf} ir vartotojų pareikalaujama galia ΣP_{af} priklauso nuo dažnio f . Šios priklausomybės yra tokios, kad, atsiradus nedideliame galių nebalansui esant dažniui f , automatiškai vėl nusistovi balansas esant kitam dažniui f_1 . Ši EES savaiminio reguliavimo savybė garantuoja EES darbo stabilumą. Tačiau, atsiradus dideliame nebalansui, gali sutrikti saviregulavimas ir netgi gali susidaryti avarinė situacija EES.

Vadinasi, EES dažnis yra galių balanso rodiklis, ir galių balanso palaikymo uždavinys yra vardinio dažnio palaikymo uždavinys. EES režimo reguliavimas pagal dažnį yra nuolatinis rankinis arba automatinis suminės generuojamos galios ΣP_{gf} keitimas taip, kad, kintant suminei apkrovai ΣP_{af} dažnis f visą laiką būtų artimas vardiniam. Elektros energijos kokybės standartai reikalauja palaikyti elektros srovės dažnį tam tikrose ribose. Šios ribos daugelyje EES skirtingos.

EES režimo pagal dažnį reguliavimas susideda iš planinių ir neplaninių generatorių generuojamų galių reguliavimo. Planinių generacijų reguliavimas įgyvendinamas tiksliai vykdant visoms elektrinėms numatytus generavimo grafikus. Visoms elektrinėms aktyviosios galios generavimo grafikai sudaromi remiantis vartotojų suminių poreikių grafiko prognoze kiekvienai paros valandai. Tačiau palaikyti absoliučiai tiksliai galių balansą, kartu ir pastovų vardinį dažnį f_v nepavyksta, nes faktinės apkrovos kiekvienu laiko momentu kažkiek skiriasi nuo prognozuojamų, be to, apkrovų prognoziniai grafikai sudaromi kiekvienai valandai, o apkrovos realiai kinta nuolatos; staigiai pasikeitus suminei apkrovai ΣP_{af} , elektrinės nespėja laiku reikiamai pakeisti generuojamos galios, o tai laikinai pažeidžia galių balansą. Taip pat reikėtų įvertinti ir atsinaujinančių išteklių generuojamos galios kitimą, kurį tiksliai prognozuoti sudėtinga. Reikia pažymėti, kad dėl nenumatytų aplinkybių, pvz., dėl oro sąlygų, debesuotumo kitimo, gali žymiai pasikeisti vartotojų suminė galia, arba dėl avarinės būklės gali būti staiga atjungiamas stambus generuojantis agregatas, transformatorius ar perdavimo linija, o tai pakeičia EES galių balansą.

Suminės pareikalaujamos galios prognozės būna gana tikslios, paklaidos neviršija kelių procentų. Elektrinės taip pat gana tiksliai vykdo numatytus generacijos grafikus, todėl normaliai galių balansas palaikomas pakankamai tiksliai, o dažnis būna artimas vardiniam. Siekiant palaikyti dažnį reikiamu tikslumu,

būtina nuolatos nustatyti ir šalinti skirtumą tarp generuojamų ir pareikalaujamų (suvartojamų) galių. Neplaninių EES generacijų reguliavimas susideda iš einamojo (momentinio) generuojamų ir vartojamų galių skirtumo nustatymo ir rankinio arba automatinio specialiai tam skirtų elektrinių generuojamų galių keitimo taip, kad būtų minimizuotas nebalansas. Apie EES neplaninės apkrovos dydį ir ženklą kiekvienu laiko momentu sprendžiama pagal dažnio nuokrypio dydį ir ženklą kiekvienu laiko momentu. Todėl neplaninis generacijų reguliavimas papildoma dažnio reguliavimą atitinkamai keičiant, koreguojant planines elektrinių generacijas.

Taip pat pažymėtina, kad EES režimo valdymas neapsiriboja vien galių balanso ir pastovaus dažnio palaikymu, nes generavimo ir poreikių mazgai elektros tinkle yra išdėstyti EES teritorijoje netolygiai. Be to, stambūs energetiniai mazgai arba energetiniai rajonai tarpusavyje yra sujungti elektros perdavimo linijomis, kurių pralaidumas yra ribotas. Todėl būtina riboti linijomis perduodamus galių srautus, kad linijos nebūtų perkraunamos.

Suminis i -ojo rajono galių srautas ΣP_{i-j} , tekantis per visas nagrinėjamo rajono išorinių ryšių linijas, vadinamas suminiu tarpsteminio galios srautu (saldo), t. y.

$$P_{tsi} = \sum_j P_{i-j}. \quad (3)$$

Tada i -ojo energetinio rajono balansas užrašomas taip:

$$\Sigma P_{gi} - \Sigma P_{ai} - P_{tsi} = 0. \quad (4)$$

Esant naujam dažniui nusistovi balansas:

$$\Sigma P_{gfi} - \Sigma P_{afi} - P_{tsfi} = 0; \quad (5)$$

Visos JEES balansas yra visų JEES rajonų balansų suma. Dažnio nuokrypis atsiranda dėl nebalanso. Esant nebalansui $\Delta P \neq 0$, dažnis pasikeičia taip, kad esant tam tikram dažniui f , nusistovi naujas balansas. JEES sudarantys valdymo rajonai turi proporcingai dalyvauti reguliuojant dažnį ir galią, kad pusiausvyra tarp generuojamos ir suvartojamos galios būtų atstatoma pakankamai greitai, užtikrinant dažnio palaikymą nustatytose ribose.

3. LIETUVOS ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS DAŽNIO IR TARPSISTEMINIŲ GALIŲ NUOKRYPIŲ PRIKLAUSOMYBĖS NUO VĖJO ELEKTRINIŲ DARBO TYRIMAS

Siekiant ištirti vėjo elektrinių parkų (VEP) darbo įtaką sistemos dažniui ir tarpsteminiam aktyviosios galios balanso palaikymui, skaičiavimams naudojamas EES matematinis modelis, sudarytas panaudojant tipines dinamines grandis, sujungtas pagal tam tikrą struktūrinę schemą. EES modelio parametrai parinkti taip, kad kuo tiksliau atitiktų procesus, vykstančius Jungtinėje elektros energetikos sistemoje (JEES), kurios sudėtyje yra sinchroniškai dirbančios Lietuvos EES, Latvijos EES, Estijos EES, Rusijos EES, Baltarusijos EES, Ukrainos EES, bei izoliuotoje Baltijos elektros energetikos sistemoje (BEES), kurią sudaro Lietuvos EES, Latvijos EES, Estijos EES ir Rusijos Federacijos

Kaliningrado srities EES. Pereinamųjų procesų modeliavimas atliktas panaudojant MATLAB 6.5/SIMULINK programinį paketą [8]. **Detalus EES matematinis modeliavimas, kai veikia VEP, bei dažnio ir galios antrinio reguliavimo algoritmai aprašyti literatūroje [9].**

VE darbas labai priklauso nuo vėjo greičio, kurį sudėtinga tiksliai prognozuoti, dėl to būtina atlikti skaičiavimus ekstremaliais atvejais, kurie atspindėtų sudėtingą situaciją sistemoje. Tyrimas atliktas, kai LEES dirba JEES bei izoliuotos BEES sudėtyje vasaros minimalių apkrovų metu.

1) Nagrinėjamas skaičiuojamasis režimas, kai LEES VE įrengtoji galia yra 200 MW ir LEES **dirba JEES sudėtyje**. Daroma prielaida, kad VE dirba maksimalia 200 MW galia, kuri staigiai sumažėja iki 0 MW. Sistemos kintamos galios reguliavimui naudojami du 150 MW galios Lietuvos elektrinės (LE) blokai (G1, G2). Keičiant LE abiejų blokų galią po 2 MW/min., pereinamasis procesas nusistovi per 50 minučių. Netekus VE generacijos, jų įtaka JEES dažniui maža, dažnio nuokrypis – 33 mHz. Dirbant dviem LE agregatams nepavyktų visiškai atstatyti tarpsteminųjų galios srautų nuokrypio dėl per mažo galios reguliavimo rezervo LEES, todėl reiktų maždaug 24 MW galios iš kaimyninių EES. Dėl apkrovos kitimo JEES reikalingas galios rezervo dydis LEES gali dar labiau išaugti arba sumažėti, tačiau mažai tikėtina visiškai prarasti VE generaciją, todėl turėtų pakakti dviejų LE agregatų, dalyvaujančių galios reguliavime.

Uždarius IAE pirmąjį bloką ir išlaikant to paties lygio generaciją, atsirastų galimybė šeštąjį LE bloką (G6) panaudoti ir galios reguliavimui, tai užtikrintų greitesnę prarastos galios atstatymą. Tokiu atveju galia tarpsteminėse linijose visiškai būtų atstatoma per 33 minutes.

Kai sistemos kintamos galios reguliavimui naudojami du Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės (KHAE) generatoriai (G1, G2) ir netenkama 200 MW vėjo generacijos, dėl hidrogenatorių charakteristikų pradiniu momentu hidraulinės turbinos galia sumažėja ir dar labiau padidina galios nebalansą, tačiau galia atstatoma greitai ir KHAE esantis galios reguliavimo rezervas baigiamas aktyvuoti beveik po minutės. Tačiau galios nuokrypis tarpsteminėse linijose nėra visai pašalinamas dėl per mažo galios reguliavimo rezervo LEES, todėl, atsižvelgus į apkrovos kitimą, reiktų maždaug 70 MW galios iš kaimyninių EES arba didesnio galios reguliavimo rezervo LEES. Šis sprendimas turi būti pagrįstas ekonomiškai, įvertinant ir tai, kad visiškai VE generuojamos galios netekimas yra mažai tikėtinas. Papildomo galios reguliavimo rezervo laikymas sistemos patikimumui didelės įtakos neturėtų, nes LEES sudaro tik 2,79% JEES galios vasaros minimalių apkrovų metu.

2) Nagrinėjamas skaičiuojamasis režimas, kai LEES VE įrengtoji galia yra 200 MW ir LEES **dirba izoliuotos BEES sudėtyje**. Daroma prielaida, kad VE dirba maksimalia 200 MW galia, kuri sumažėja iki 0 MW. Sistemos kintamos galios reguliavimui naudojami du 150 MW LE blokai (G1, G2), kurių galią galima keisti 2 MW/min., tuomet pereinamasis procesas nusistovi per 50 minučių. VE generacijos netekimo įtaka BEES dažniui didelė, dažnio nuokrypis – 593 mHz. Tokį didelį dažnio nuokrypį lemia mažesnė galios generacija vasaros minimalių apkrovų metu nei kitu laikotarpiu, pvz., žiemos maksimalių apkrovų metu, taip pat didelės daugelio generuojančių agregatų reguliatorių neįtakos zonos. Galios nuokrypis tarpsteminėse linijose,

kuris yra lygus maždaug 24 MW, nėra visiškai pašalinamas dėl per mažo reguliavimo rezervo LEES.

Kai sistemos kintamos galios reguliavimui naudojama KHAE (G1, G2), izoliuotoje BEES aktyvioji galia atstatoma greitai, ir rezervas visiškai aktyvuojamas beveik po minutės. Maksimalus dažnio nuokrypis – 597 mHz. Galios nuokrypis tarpsteminėse linijose, kuris yra lygus maždaug 70 MW, nėra visiškai pašalinamas dėl per mažo rezervo LEES.

Įvertinus, kokius dažnio nuokrypius gali sukelti visiškai VE generacijos netekimas ir apkrovos kitimas, kad būtų visiškai atstatyti VE generuojamos galios netekimai ir sumažinta apkrovos kitimo įtaka galios nuokrypiams tarpsteminėse linijose bei dažnio kitimui, būtina turėti didesnius galios reguliavimo rezervas izoliuotoje BEES vasaros minimalių apkrovų metu. Iš dalies šių problemų padėtų išvengti papildomas LE šeštojo bloko (G6) arba dar vieno KHAE hidroagregato (G3 arba G4) panaudojimas galios reguliavimui. Uždarius IAE antrąjį bloką, didesne galia dirbs LE, kuri suteiks LEES didesnes galimybes dalyvauti pirminiame ir antriniame dažnio bei galios reguliavime, nes šiuo metu IAE agregatų pirminių reguliatorių neįtakos zonos yra didelės (apie 500 mHz), o antriniame reguliavime dėl techninių charakteristikų šios elektrinės dalyvavimas yra negalimas. Šios priemonės padidintų sistemos patikimumą, kai BEES yra izoliuota.

3) Skaičiavimai taip pat atlikti naudojant dviejų valandų intervalo realius vėjo matavimo duomenis ir darant prielaidą, kad **visuose parkuose vėjo greitis tas pats** (vėjo koreliacija tarp VE didelė) [9], antrinis reguliavimas atliekamas pagal tarpsteminųjų galių balanso ir sisteminės charakteristikos metodą proporcingai sistemos dydžiui ir kai LEES antrinio reguliavimo parametrai parinkti taip, kad antriniame reguliavime dalyvaujančių elektrinių galimybės būtų panaudojamos maksimaliai.

Buvo skaičiuojami **keturi skirtingi variantai**. Šiuo atveju atliekant skaičiavimus buvo daroma prielaida, kad visuose parkuose vėjo greitis tas pats, t. y. vėjo koreliacija tarp VE didelė [9], gauti dažnio ir galios kitimo standartiniai nuokrypiai pateikti lentelėje (eil. nr. 1–13).

JEES antrinį reguliavimą atlieka Rusijos EES dažnio stabilizavimo metodu, o BEES sudėtyje esančios EES – tarpsteminųjų galių balanso metodu. Iš gautų rezultatų (lentelė, eil. nr. 2–4) matyti, kad proporcingai sistemos dydžiui antriniame dažnio reguliavime dalyvaujantys agregatai nespėja sureguliuoti tarpsteminųjų galios srautų. To priežastis – per mažas jų galios keitimo greitis. Blogiausiai reguliuojama, kai proporcingai sistemos dydžiui antriniame dažnio reguliavime dalyvauja du LE generatoriai (G1, G2) (lentelėje eil. nr. 1). Matyti, kad geriausiai reguliavimas atliekamas, kai jame dalyvauja du KHAE generatoriai (G1, G2) (lentelėje eil. nr. 2, 1 pav.).

Kai LEES antrinio reguliavimo parametrai parinkti taip, kad antriniame reguliavime dalyvaujančių elektrinių galimybės būtų panaudojamos maksimaliai (lentelė, eil. nr. 5–7), geriausiai reguliavimas atliekamas, kai jame dalyvauja du KHAE generatoriai (G1, G2). Kadangi LEES galia yra santykinai maža, lyginant su JEES, tai antrinis reguliavimas LEES įtakos JEES dažniui beveik neturi.

Kadangi VE tarpusavyje yra nutolę, esant skirtingam vėjo greičio VE bendrosios generuojamos galios svyravimai sumažės dėl sumažėjusios tarpusavio koreliacijos. Kai vėjo koreliacija tarp

VE maža ir reguliavimas atliekamas pagal bendrus proporcingai visoje JEES nustatytus antrinio reguliavimo parametrus, Rusijos EES taikant dažnio stabilizavimo metodą, o BEES sudėtyje esančioms EES – tarp sisteminių galių balanso, dažnio ir tarp sisteminių galių srautų nuokrypiai (lentelė, eil. nr. 15–17) beveik nepriklauso nuo antriniame reguliavime dalyvaujančių elektrinių: LE ar KHAE agregatų. Jų dalyvavimas reguliavime tik padidina tarp sisteminių galių srautų nuokrypį, tai sąlygoja LE ir KHAE skirtingos elektrinių charakteristikos. Dėl šios priežasties šiame režime įvyksta tarp sisteminių galių srautų perregulavimas.

Kai antriniame reguliavime dalyvaujančių LEES elektrinių galimybės panaudojamos maksimaliai, LEES tarp sisteminių galių srautų ir dažnio nuokrypiai (lentelė, eil. nr. 18–20) praktiškai nesikeičia, lyginant su reguliavimu, atliekamu pagal bendrai visoje JEES nustatytus antrinio reguliavimo parametrus.

Iš skaičiavimo metu gautų rezultatų (lentelė, eil. nr. 21–23) pastebime, kad pagal bendrus visoje JEES nustatytus antrinio reguliavimo parametrus ir taikant sisteminės charakteristikos metodą, geriau LEES tarp sisteminių galių srautus sureguliuoja antriniame reguliavime dalyvaujantis vienas KHAE (G1) ir vienas LE (G1) generatorius. Kai antriniame reguliavime LEES elektrinių galimybės panaudojamos maksimaliai, tarp sisteminių galių srautų nuokrypiai mažiausi (lentelė, eil. nr. 24–26), kai antriniame reguliavime dalyvauja du LE generatoriai (G1, G2).

4) Analogiški skaičiavimai atlikti, kai BEES dirba atsiskyrusi nuo JEES. BEES antrinį reguliavimą atlieka Latvijos EES dažnio

stabilizavimo, o LEES – tarp sisteminių galių balanso metodu. Kai visuose parkuose vėjo greitis tas pats, LEES tarp sisteminių galių srautų ir dažnio nuokrypiai pateikti lentelėje (eil. nr. 28–30). Didelį dažnio nuokrypį BEES, kuriuos sukelia generuojamos galios ir apkrovos kitimas, sąlygoja mažas sistemos dažninės charakteristikos statusas vasaros minimalių apkrovų metu. Be to, šiuo metu yra elektrinių, kurių pirminių reguliatorių neįtakojamos zonos viršija ± 200 mHz (± 150 mHz). Geriausiai dažnio ir tarp sisteminių galių srautų nuokrypį reguliuoja du KHAE generatoriai (G1, G2), blogiausiai – LE (G1, G2).

Antriniam reguliavimui BEES taikant sisteminės charakteristikos metodą, LEES tarp sisteminių galių srautų ir dažnio nuokrypiai (lentelė, eil. nr. 31–33) yra mažiausi, kai antriniame reguliavime dalyvauja du KHAE agregatai (G1, G2), o didžiausi, kai antriniame reguliavime dalyvauja du LE generatoriai (G1, G2).

BEES yra generatorių, kurių pirminių reguliatorių neįtakojama zona yra didesnė nei ± 200 mHz, tai prieštarauja Baltijos DC koncepcijai, pagal kurią neįtakojama zona turi neviršyti ± 200 mHz. Kai BEES pirminiame reguliavime dalyvaujančių elektrinių neįtakojamos zonos neviršija nurodytų ribų ir vėjo greičio kitimo, o koreliacija tarp VE didelė, pastebėta, kad reguliavimą atliekant sisteminės charakteristikos metodu geriausiai LEES tarp sisteminių galių srautų ir dažnio nuokrypį (lentelė, eil. Nr. 34–37) sureguliuoja antriniame reguliavime dalyvaujantys du KHAE generatoriai (G1, G2), o blogiausiai – LE generatoriai (G1, G2).

Lentelė. Tarp sisteminių galių srautų ir dažnio standartiniai nuokrypiai

Eilės Nr.	EES	Vėjo koreliacija tarp VE	LEES elektrinių dalyvavimas antriniame reguliavime	Reguliavimo metodas LEES	Elektrinės, dalyvaujančios antriniame reguliavime LEES	σ_{ps} (MW)	σ_f (mHz)
1			Nedalyvauja	Nereguliuojama	–	29,38	8,09
2			Prop. EES	P	LE (G1, G2)	29,2	8,084
3			Prop. EES	P	KHAE (G1, G2)	29	8,082
4			Prop. EES	P	LE (G1), KHAE (G1)	29,09	8,083
5			Max. LEES	P	LE (G1, G2)	28,44	8,084
6			Max. LEES	P	KHAE (G1, G2)	23,8	8,082
7		Didelė	Max. LEES	P	LE (G1), KHAE (G1)	24,47	8,086
8			Prop. EES	PF	LE (G1, G2)	27,83	8,05
9			Prop. EES	PF	KHAE (G1, G2)	27,45	8,04
10			Prop. EES	PF	LE (G1), KHAE (G1)	27,64	8,05
11			Max. LEES	PF	LE (G1, G2)	26,41	7,97
12			Max. LEES	PF	KHAE (G1, G2)	27,98	7,89
13			Max. LEES	PF	LE (G1), KHAE (G1)	26,22	7,66
14	JEES		Nedalyvauja	Nereguliuojama	–	17,34	7,13
15			Prop. EES	P	LE (G1, G2)	17,6	7,15
16			Prop. EES	P	KHAE (G1, G2)	17,61	7,15
17			Prop. EES	P	LE (G1), KHAE (G1)	17,59	7,15
18			Max. LEES	P	LE (G1, G2)	17,63	7,25
19			Max. LEES	P	KHAE (G1, G2)	17,35	7,69
20		Maža	Max. LEES	P	LE (G1), KHAE (G1)	17,53	7,49
21			Prop. EES	PF	LE (G1, G2)	17,34	7,032
22			Prop. EES	PF	KHAE (G1, G2)	17,33	7,028
23			Prop. EES	PF	LE (G1), KHAE (G1)	17,32	7,027
24			Max. LEES	PF	LE (G1, G2)	17,34	6,87
25			Max. LEES	PF	KHAE (G1, G2)	23,12	7,11
26			Max. LEES	PF	LE (G1), KHAE (G1)	20,77	6,98

Lentelė (tęsinys)

27		Nedalyvauja	Nereguluojama	–	21,47	137	
28		Prop. EES	P	LE (G1, G2)	21,95	101	
29		Prop. EES	P	KHAE (G1, G2)	17,97	89	
30		Prop. EES	P	LE (G1), KHAE (G1)	19,4	94	
31		Prop. EES	PF	LE (G1, G2)	19,23	100	
32		Prop. EES	PF	KHAE (G1, G2)	16,33	88	
33		Prop. EES	PF	LE(G1)KHAE(G1)	17,23	93	
34	Didelė	Nedalyvauja(DC)	Nereguluojama	–	20,1	136	
35		Prop. EES (DC)	PF	LE (G1, G2)	18,34	98	
36		Prop. EES (DC)	PF	KHAE (G1,G2)	16,56	87	
37		Prop. EES (DC)	PF	LE (G1), KHAE (G1)	17,12	91	
38		Nedalyv. (UCTE)	PF	–	24,46	62	
39		Prop. EES (UCTE)	PF	LE (G1, G2)	22,12	60	
40		Prop. EES (UCTE)	PF	KHAE (G1,G2)	19,07	55	
41	BEES	Prop. EES (UCTE)	PF	LE(G1)KHAE(G1)	20	56	
42		Nedalyvauja	Nereguluojama	–	9,72	91	
43		Prop. EES	P	LE (G1, G2)	9,81	66	
44		Prop. EES	P	KHAE (G1, G2)	11	56	
45		Prop. EES	P	LE (G1), KHAE (G1)	9,73	60	
46		Prop. EES	PF	LE (G1, G2)	9,64	66	
47		Maža	Prop. EES	PF	KHAE (G1, G2)	9,8	56
48			Prop. EES	PF	LE (G1), KHAE (G1)	9,56	60
49			Nedalyv. (UCTE)	Nereguluojama	–	9,9	36
50			Prop. EES(UCTE)	PF	LE (G1, G2)	9,93	36
51			Prop. EES(UCTE)	PF	KHAE (G1, G2)	9,6	34
52			Prop. EES(UCTE)	PF	LE (G1), KHAE (G1)	9,7	35

Pastabos: Prop. EES – antrinis reguliavimas atliekamas proporcingai sistemos dydžiui; Max. LEES – antrinis reguliavimas atliekamas, kai jame dalyvaujančių LEES elektrinių galimybes panaudojamos maksimaliai; P – JEES atveju antriniam reguliavimui Rusijos EES taiko dažnio stabilizavimo metodą, o BEES sudėtyje esančios EES taiko tarpsteminų galių balanso metodą; BEES atveju Latvijos EES taiko dažnio stabilizavimo metodą, o LEES antrinį reguliavimą atlieka tarpsteminų galių balanso metodu; PF – reguliavimas visose EES atliekamas sisteminės charakteristikos metodu; σ_{ps} , σ_f – tarpsteminų galios srautų ir dažnio dviejų valandų imties standartiniai nuokrypiai.

LEES laikoma nereguluojama, kai joje nenaudojamas automatinis dažnio ir galios antrinis reguliavimas, kurį JEES-oje atlieka Rusijos EES dažnio stabilizavimo metodu.

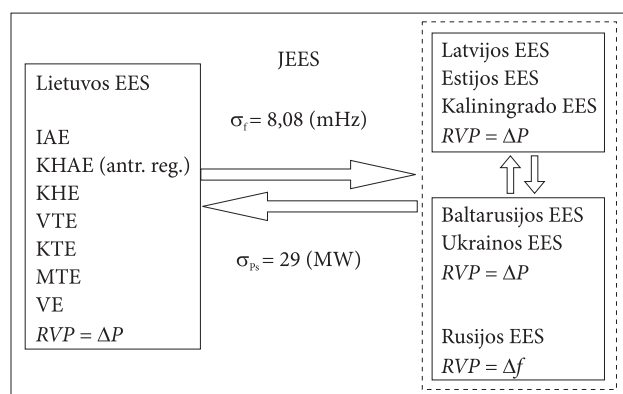
Šiuo metu plačiai svarstoma galimybė BEES ir JEES jungtis prie Vakarų Europos jungtinės energetikos sistemos (UCTE) lygiagrečiam sinchroniniam darbui, todėl LEES ateityje turėtų atitikti UCTE keliamus galios ir dažnio reguliavimo reikalavimus. Kai izoliuota BEES dirba pagal UCTE keliamus reguliavimo reikalavimus ir vėjo greičio kitimo koreliacija tarp VE yra didelė, LEES tarpsteminų galios srautų ir dažnio nuokrypiai, kurie pateikti lentelėje (eil. nr. 38–41), yra mažiausi, kai antriniame re-

gulivime dalyvauja du KHAE agregatai (G1, G2), o didžiausi, kai antriniame reguliavime dalyvauja du LE generatoriai (G1, G2).

Kai vėjo greičio kitimo koreliacija tarp VE maža ir antriniam reguliavimui BEES Latvijos EES taiko dažnio stabilizavimo metodą, o LEES – tarpsteminų galių balanso, LEES dažnio ir tarpsteminų galios srautų nuokrypiai pateikti lentelėje (eil. nr. 43–45). Kai antriniame reguliavime dalyvauja du KHAE agregatai (G1, G2), gaunami didžiausi galios nuokrypiai, nors dažnio nuokrypiai sistemoje yra mažiausi. Tai galima paaiškinti tuo, kad, kintant apkrovai kaimyninėse sistemose, jų antrinis reguliatorius nespėja pašalinti dažnio nuokrypių, todėl LEES prisideda prie dažnio reguliavimo daugiau nei kitos EES.

Kai antriniam reguliavimui BEES taikomas sisteminės charakteristikos metodas ir vėjo koreliacija tarp VE yra maža, gauti rezultatai panašūs kaip ir prieš tai buvusiu atveju – dažnio nuokrypiai yra mažiausi, o tarpsteminų galios srautų nuokrypiai LEES yra didžiausi, kai antriniame reguliavime dalyvauja KHAE. Mažiausi LEES tarpsteminų galios srautų nuokrypiai gaunami, kai antriniame reguliavime dalyvauja vienas KHAE generatorius (G1) ir vienas LE generatorius (G1). Tačiau norint įsitikinti, ar tai būdinga kiekvienam atvejui, reikia daugiau duomenų apie apkrovos kitimą kaimyninėse EES.

Atliekant reguliavimą pagal UCTE reikalavimus, kai LEES vėjo greičio kitimo koreliacija tarp VE yra maža, tarpsteminų



1 pav. JEES struktūrinė schema, bei tarpsteminų galios srautų ir dažnio dviejų valandų imties standartiniai nuokrypiai

galios srautų ir dažnio nuokrypiai (lentelė, eil. nr. 50–52) yra mažiausi, kai antriniame reguliavime dalyvauja du KHAE agregatai (G1, G2), didžiausi – kai antriniame reguliavime dalyvauja du LE generatoriai (G1, G2).

Apibendrinant gautus rezultatus, galime teigti, kad izoliuotos BEES atveju, LEES veikiant VE, nepriklausomai nuo vėjo generuojamos galios kitimo geriausia antrinio reguliavimo kokybė pasiekama, kai LEES antriniame reguliavime dalyvauja KHAE agregatai (G1, G2).

Iš atlikto tyrimo matome, kad, veikiant VE ir LEES dirbant JEES sudėtyje, LEES atliekamas antrinis reguliavimas praktiškai neturi įtakos dažnio kitimui JEES (lentelė, eil. nr. 1–26), tačiau sumažina LEES tarp sisteminių galios srautų nuokrypius. Dėl šios priežasties galime teigti, kad ir artimiausiu metu netikslinga dalyvauti antriniame dažnio reguliavime (reguliavime pagal dažnio kanalo įėjimą), nes dalyvavimas reguliavime praktiškai nepadidintų JEES funkcionavimo patikimumo, nebent ši paslauga būtų pakankamai gerai apmokama arba tai būtų numatyta dvišaliuose susitarimuose tarp EES. LEES nedalyvaujant ir tarp sisteminių srautų reguliavime, galios srautai neviršytų susitarimuose nustatytų ribų, todėl LEES prisidėti prie antrinio dažnio ir galios reguliavimo reikėtų kuo mažiau. Atlikus skaičiavimus, kai veikia VE ir LEES nevykdomas antrinis dažnio ir galios reguliavimas, gauti maksimalūs 116 MW galios ir 21 MWh/h energijos nuokrypiai. Tam tikrais atvejais šios reikšmės gali būti viršijamos, pavyzdžiui, sutapus vėjo generuojamos galios ir apkrovos kitimo pikams arba padidėjus apkrovos galios kitimui. Norint patikslinti galimus maksimalius nuokrypius, reikėtų atlikti detalesnį apkrovos kitimo tyrimą. Šiuo metu tarp Estijos EES, Latvijos EES ir LEES yra suderintos galios ir elektros energijos balanso palaikymo ribos. LEES momentinės galios palaikymo riba yra ± 120 MW, o nacionalinio energijos balanso nuokrypis ± 50 MWh per valandą.

Planuojant LEES darbo režimus ir neturint tikslios vėjo prognozės, tikslinga naudoti vidutinį metinį arba paros (dienos ir nakties) prognozuojamą vėjo greitį. Toks vėjo generacijos įvertinimas palengvintų rezervo, reikalingo reguliavimui aukštyn ir žemyn, nustatymą. Reguliavimas realioje LEES atliekamas įvertinus ne tik galios padidėjimą ar sumažėjimą, bet ir elektros energijos gamybą per valandą. KHAE reguliavimo galimybės priklauso nuo vandens kiekio baseine, tačiau hidroagregatų generuojamą galią galima keisti daug greičiau nei šiluminių elektrinių. Tiek žiemą, tiek vasarą pakankamą rezervinių galių kiekį gali užtikrinti LE. Tačiau turboagregatams dalyvaujant reguliavime, reikia dažniau ir didesne amplitude keisti jų galią, dėl to sutrumpėja agregatų eksploatavimo laikas, sumažėja naudingumo koeficientas, o tai sąlygoja papildomas kuro sąnaudas [10]. Dėl šios priežasties LEES tarp sisteminių galių srautų verta nereguliuoti kuo platesniame diapazone, neviršijant dvišaliuose susitarimuose numatytų ribų, nes šiuo metu atlikti tikslesnį tarp sisteminių galių srautų reguliavimą ekonomiškai netikslinga.

Tarp sisteminiai galios srautai geriausiai reguliuojami, kai antrinis reguliavimas atliekamas tarp sisteminių galių balanso metodu. Norint padidinti reguliavimo tikslumą, reikia modernizuoti telematavimų įrenginius, kad išmatuoto signalo vėlinimo laikas sumažėtų maždaug nuo 10 sekundžių iki 1–2 sekundžių. Taip pat antrinio reguliatoriaus laiko pastovioji turėtų būti parinkta optimaliai, o koeficientas, apibūdinantis valdymo rajono

dalyvavimo dažnio reguliavime apimtį, lygus sistemos dažninės charakteristikos statumui, kad reguliavimo procesas neužtrukėtų per ilgai ir kad nebūtų perreguliuojama [11].

LEES dirbant izoliuotos BEES sudėtyje, labai svarbus yra sistemos patikimumas. Įvertinant tai, kad BEES generuojama galia santykinai maža, lyginant su kitomis EES, o LEES sudaro nemažą BEES bendros generacijos dalį, todėl kurio nors generuojančio vieneto netekimas gali sukelti nemažus svyravimus, o susiklosčius tam tikrai nenumatytų įvykių eigai gali būti pažeistas BEES stabilumas (mažas BEES dažninės charakteristikos statumas vasaros minimaliųjų apkrovų metu). Net ir nedidelis apkrovos ir VE generacijos kitimas sistemoje sukelia ženklus dažnio pokyčius. Todėl daug dėmesio turi būti skirta dažnio palaikymui nustatytose ribose, o tarp sisteminių srautų reguliavimas tampa antraeilu uždaviniu, nes tarp LEES, Latvijos EES ir Estijos EES yra stiprūs tarp sisteminiai ryšiai. Iš atliktų skaičiavimų matome (lentelė, eil. nr. 27–52), kad siekiant užtikrinti gerą valdymo kokybę ir patikimą sistemos darbą turi būti numatyti pakankami galios rezervai bei ypač svarbu teisingai parinkti antrinio reguliavimo algoritmus ir parametrus. Kadangi yra pirminiame dažnio reguliavime dalyvaujančių agregatų, kurių neįėjimo zonos didesnės nei ± 200 mHz, sistemos darbo režimas turi būti labai atsakingai suplanuotas. Iš tyrimo rezultatų pastebime, kad šiuo atveju antriniam reguliavimui geriausiai tiktų sisteminės charakteristikos metodas. Norint padidinti BEES patikimumą ir užtikrinti aukštą sistemos darbo kokybę, būtina modernizuoti daugelio agregatų pirminius reguliatorius, kad jų neįėjimo zonos neviršytų ± 10 mHz. EES funkcionavimo kokybę pagerintų šiluminių agregatų reguliavimo pervedimas iš pagrindinio katilo režimo į pagrindinės turbino režimą. Dažnio nuokrypius sumažintų antriniame reguliavime dalyvaujančių modernizuotų agregatų pirminių reguliatorių neveikimo zonų nustatymas ± 10 mHz (KHAE, LE pirmasis, antrasis, penktasis, šeštasis blokai). Taip pat BEES patikimumą galėtų padidinti nuolatinės srovės linijos, jungiančios Estijos EES ir Suomijos EES, LEES ir Švedijos EES bei LEES ir Lenkijos EES, arba kintamos srovės linijos LEES – Lenkijos EES, nes elektros energijos eksporto atveju BEES padidėtų generuojama galia, taip pat sistemos dažninės charakteristikos statumas. Vykdamas šiomis linijomis importą, būtų galima greitai keisti importuojamos galios kiekį, o tai iš dalies kritiniais atvejais galėtų atstoti papildomai reikalingą rezervą.

4. IŠVADOS

1. LEES darbas turi mažai įtakos JEES dažnio kitimui. Todėl galime teigti, kad šiuo metu antriniam dažnio ir galios reguliavimui tikslingiausia taikyti tarp sisteminių galių balanso metodą, o reguliatoriaus parametrus parinkti taip, kad atliekant reguliavimą nebūtų viršytos dvišaliuose susitarimuose numatytos galios ir elektros energijos balanso palaikymo ribos (labai tikslus reguliavimas ekonomiškai nenaudingas).

2. Kai vėjo koreliacija tarp VE didelė, jų generacija izoliuotoje BEES sukelia ženklus dažnio nuokrypius (iki 137 mHz). Kai vėjo elektrinės dirba maksimalia 200 MW galia ir jai staigiai sumažėjus iki nulio, dažnio nuokrypiai vasaros minimaliųjų apkrovų metu gali siekti iki 597 mHz.

3. Reguliavimo procesų kokybė izoliuotoje BEES labai priklauso nuo antrinio reguliavimo algoritmų ir parametrų. Kai LEES dirba izoliuotos BEES sudėtyje, antriniam dažnio ir galios

reguliavimui geriausia taikyti sisteminės charakteristikos metodą, nes atliekant reguliavimą šiuo metodu gaunami mažiausi dažnio nuokrypiai.

4. LEES tarp sisteminių galios srautų ir dažnio nuokrypius galima labiausiai sumažinti, kai antriniame dažnio ir galios reguliavime dalyvauja KHAЕ agregatai.

5. Būtina modernizuoti daugelio agregatų pirminius reguliatorius, kad jų neįtampymo zona neviršytų ± 10 mHz.

Gauta 2007 06 15

Priimta 2007 09 10

Literatūra

1. <http://www.ewea.org>
2. http://www.wwindea.org/home/images/stories/pdfs/pr_statistics2006_290107.pdf
3. <http://www.lpc.lt/lt>
4. Коган Ф. Л. Научно-технические проблемы и программные задачи повышения эффективности регулирования частоты и мощности в ЕЭС России в условиях конкурентного рынка // Электрические станции. 2002. № 4. С. 2–9.
5. Bienarcka I. Принципы оперативной работы энергосистем CENTREL сотрудничество CENTREL-UCTE. Рабочий семинар по проблеме регулирования частоты, 24–25 мая 2001 г. С. 46–62.
6. Ažubalis V. Statinis ir dinaminis elektros sistemų stabilumas. Vilnius, 1989. P. 109.
7. Беркович М. А., Комаров А. Н., Семенов В. А. Основы автоматики энергосистем. Москва: Энергоиздат, 1981. С. 343.
8. MATLAB 6.5. Tutorial. Simulink.
9. Radziukynas V., Nemura A., Nargėlas A. Elektros energetikos sistemos matematinis modeliavimas // Energetika. 2008. Nr. 1 (spaudoje).
10. Макарьян В. А., Фотин Л. П. Изменение экономичности энергоблока 300 МВт при его работе в регулировочном режиме // Теплоэнергетика. 1977. № 8. С. 13–18.
11. Беркович М., Комаров А. Н., Семенов В. Основы автоматики энергосистем. Москва: Энергоиздат, 1981.

Virginijus Radziukynas, Antanas Nemura, Albertas Nargėlas

DEPENDENCY OF FREQUENCY AND CROSS-BORDER POWER INTERCHANGE DEVIATIONS ON WIND POWER PLANTS OPERATING IN THE LITHUANIAN ELECTRIC POWER SYSTEM

Summary

It is important to investigate the effect of wind power plants on electric power system operation when the wind power energy proportion is increasing in Lithuania. In this paper, the dependence of frequency and cross-border power interchange deviations on wind power plants' operation in the Lithuanian electric power system is presented; the most suitable load frequency control algorithms and the composition of power plants participating in control are proposed.

Key words: electric power system, generator, wind power plant, frequency, active power, control

Виргиниус Радзюкинас, Антанас Немура, Альбертас Наргелас

ЗАВИСИМОСТЬ ОТКЛОНЕНИЙ ЧАСТОТЫ И МЕЖСИСТЕМНЫХ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛИТВЫ ОТ РАБОТЫ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Резюме

В Литве развивается ветровая электроэнергетика, поэтому важно исследовать её воздействие на работу электроэнергетической системы. Представлена зависимость частоты и перетоков межсистемной мощности в электроэнергетической системе Литвы от работы ветроэлектростанций. Предложены методы регулирования частоты и мощности, количество электростанций, задействованных в системе регулирования.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, генератор, ветроэлектростанция, частота, активная мощность, регулирование