



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Atsinaujinančių šaltinių įtakos elektros sistemos režimų
patikimumui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Kastytis Karvelis

Projekto autorius

Doc. Audrius Jonaitis

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Atsinaujinančių šaltinių įtakos elektros sistemos režimų patikimumui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Kastytis Karvelis

Projekto autorius

Doc. Audrius Jonaitis

Vadovas

Doc. Almantas Bandza

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Kastytis Karvelis

Atsinaujinančių šaltinių įtakos elektros sistemos režimų patikimumui tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Kastyčio Karvelio, baigiamasis projektas tema „Atsinaujinančių šaltinių įtakos elektros sistemos režimų patikimumui tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Karvelis, Kastytis. Atsinaujinančių šaltinių įtakos elektros sistemos režimų patikimumui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Vėjo jėgainių parkas, sistemos modeliavimas, IEEE 9 mazgų sistema, elektros energetika .

Kaunas, 2020. 50 p.

Santrauka

Sparčiai tobulėjant atsinaujinančios energijos gamybos technologijoms, pasaulyje vis daugiau pagaminama elektros energijos iš jos. Labai sunku tiksliai prognozuoti pagaminamos elektros energijos kiekį iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Tai mažina elektros energijos sistemos patikimumą.

Šiame projekte sudarytas IEEE 9 mazgų sistemos modelis skirtas įvertinti atsinaujinančios energijos šaltinių įtaką sistemos patikimumui. Modelį sudaro elektrinė G1 su pastovaus dažnio sinchroniniu generatoriumi, elektrinė G3 su kintamo dažnio sinchroniniu generatoriumi ir vėjo jėgainių parkas. Visos elektrinės sujungtos perdavimo tinklu, pagal IEEE 9 mazgų sistemos modelį. Prie perdavimo tinklo prijungtas trumpojo jungimo modelis, kuris leidžia detaliau ištirti atsinaujinančių energijos šaltinių įtaką elektros sistemai.

Atlikti tyrimai rodo, kad atsinaujinantys energijos šaltiniai daro įtaką sistemos įtampai ir jos dažniui.

Kastytis, Karvelis. Analysis of Renewable Energy Sources Influence on Power System Operational Reliability. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Audrius Jonaitis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): energy engineering, group of fields - engineering sciences.

Keywords: The wind farm, system modeling, IEEE 9 bus system, electrical energy.

Kaunas, 2020. 50p.

Summary

With the rapid development of renewable energy production technologies, the world is increasingly producing electricity from it. It is very difficult to accurately forecast the amount of electricity produced from renewable energy sources. This reduces the reliability of the power system.

The paper develops an IEEE 9 bus system model to evaluate the impact of renewable energy sources on system reliability. The model consists of a power plant G1 with a constant frequency synchronous generator, a power plant G3 with a variable frequency synchronous generator and a wind farm. All power plants are connected by a transmission network, according to the IEEE 9 bus system model. A short-circuit model is connected to the transmission network, which allows a detailed study of the impact of renewable energy sources on the electricity system.

Studies show that renewable energy sources affect the system voltage and its frequency.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	9
1. Literatūros apžvalga	10
1.1. Mokslinių straipsnių apžvalga.....	10
1.2. Vėjo elektrinės.....	11
1.3. Elektros energijos apkrovos grafikai	12
1.4. Įtampos reguliavimo būdai	14
1.5. Patikimumas	16
1.6. Reikalavimai elektros sistemos darbui ir jo planavimui.....	18
2. Elektros sistemos modelio sudarymas	20
2.1. Vėjo jėgainių parko modeliavimas	20
2.2. Elektrinės G1 modeliavimas.....	22
2.3. Elektrinės G3 modeliavimas.....	24
2.4. Elektros energijos perdavimo sistemos modeliavimas.....	26
2.5. Elektros energijos perdavimo sistemos su trumpuoju jungimu modeliavimas	30
3. Energetinės sistemos su vėjo jėgainių parku tyrimas	32
3.1. Sistemos priklausomybės nuo vėjo greičio tyrimas	32
3.2. Sistemos priklausomybės nuo vėjo jėgainių parko galios tyrimas.....	35
3.3. Sistemos patikimumo, įvykus trumpajam jungimui, tyrimas.....	41
Išvados	47
Literatūros sąrašas	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Elektros sistemos darbo ir planavimo funkcijos.....	18
3.2 lentelė. Elektros energijos sistemos šaltinių ir apkrovų nustatymai	32
3.2 lentelė. Vėjo jėgainių generuojamos galios priklausomybė nuo vėjo greičio.....	33
3.3 lentelė. Generatoriaus G3 maksimalaus ir nusistovėjusio rotoriaus sukimosi greičio, santykiniais vienetais, priklausomybė nuo vėjo greičio	35
3.4 lentelė. Sistemos apkrovų nustatymai	36
3.5 lentelė. Sistemos elektrinių galia.....	36
3.6 lentelė. Generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greičio priklausomybė nuo vėjo jėgainių galios sistemoje	37
3.7 lentelė. Sistemos įtampos priklausomybė nuo vėjo jėgainių galios sistemoje.....	39
3.8 lentelė. Vėjo jėgainių galios priklausomybė nuo jų dalies elektros sistemoje	40
3.9 lentelė. Sistemos apkrovų nustatymai	41
3.10 lentelė. Sistemos šaltinių galių nustatymai	42
3.11 lentelė. Elektrinės G3 rotoriaus sukimosi greičio atsistatymas po trumpojo jungimo sistemoje	42
3.12 lentelė. Sistemos įtampos priklausomybė nuo vėjo jėgainių galios sistemoje.....	44
3.13 lentelė. Maksimalus trumpojo jungimo laikas sistemoje	45

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Maksimalių apkrovų grafikas [11].	13
2.2 pav. Maksimalių apkrovų grafikas įrenginių veikimo laiko atžvilgiu [11].	13
3.3 pav. Paros apkrovos grafikas [11].	14
4.4 pav. Įtampos nuostoliai linijoje ir įtampos pakėlimas naudojantis transformatoriais [14].	15
2.1 pav. Vėjo jėgainė su dvigubu indukciniu generatoriumi.	20
2.2 pav. Vėjo jėgainių parko generatoriaus ir turbinos parametrai.	21
2.3 pav. Vėjo jėgainių parko sistemos modelis.	22
2.4 pav. Generatoriaus G1 parametrai.	23
2.5 pav. Elektrinės G1 modelis.	24
2.6 pav. Generatoriaus G3 parametrai.	25
2.7 pav. Elektrinės G3 modelis.	26
2.8 pav. IEEE 9 mazgų sistemos modelis.	27
2.9 pav. Nustatymų bloko (powergui) parametrai.	27
2.10 pav. Elektros perdavimo tinklas su apkrovomis.	28
2.11 pav. IEEE 9 mazgų sistemos modelis su vėjo jėgainių parku.	29
2.12 pav. Trumpojo jungimo modelis.	30
2.13 pav. IEEE 9 mazgų perdavimo tinklo su trumpuoju jungimu sistemoje modelis.	31
3.1 pav. Vėjo jėgainės generuojamos galios priklausomybės nuo vėjo greičio charakteristika.	32
3.2 pav. Generatoriaus G3 sukimosi greičio priklausomybė nuo vėjo greičio vėjo jėgainių parke. .	35
3.3 pav. Generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greičio priklausomybės, nuo vėjo jėgainių galios sistemoje, diagrama.	38
3.4 pav. Generatoriaus G3 sukimosi greitis, prie 65 procentų vėjo jėgainių galios sistemoje.	38
3.5 pav. Sistemos įtampos priklausomybės, nuo vėjo jėgainių galios sistemoje, diagrama.	40
3.6 pav. Generatoriaus G3 rotoriaus minimalaus ir maksimalaus sukimosi greičio, diagrama.	43
3.7 pav. Sistemos įtampos priklausomybės, nuo vėjo jėgainių galios, diagrama.	45

Įvadas

Sparčiai augantys energetiniai poreikiai skatina ieškoti pigesnių ir aplinkai ne tokių kenksmingų energijos gavimo būdų. Senosios technologijos ne visada gali tenkinti mūsų poreikius, dažnai jos yra žalingos gamtai. Pasaulyje į energetines sistemas vis dažniau diegiama atsinaujinanti energetika, kuri užtikrina ne tik pigią elektros energiją, bet ir yra nekenksminga aplinkai. Europos Sąjungoje 2018 metais buvo priimti nauji įsipareigojimai energetikos sektoriui. Jais buvo įsipareigota iki 2030 metų padidinti atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimą iki 32,5 proc., ir tai turėtų sudaryti bent 32 proc. visos Europoje naudojamos elektros energijos [1]. Siekiant tokių ambicingų tikslų, susiduriama su įvairiais sunkumais. Labai svarbu įvertinti visus galimus pasikeitimus energetikos sistemoje.

Vėjo elektrinės yra pagrindinės atsinaujinančios energijos išteklius naudojančios elektrinės, jungiamos prie elektros perdavimo tinklo. Šiuo metu ir artimiausioje perspektyvoje regione saulės elektrinės jungiamos prie elektros skirstomųjų tinklų ir turi mažą įtaką elektros perdavimo tinklo darbui. Todėl šiame darbe analizuojama vėjo elektrinių įtaka elektros tinklo režimams.

Tiriamąojo darbo tikslas – ištirti, kokią įtaką vėjo elektrinės turi elektros sistemų darbo režimams.

Tiriamąojo darbo uždaviniai:

- identifikuoti kriterijus, pagal kuriuos būtų galima tirti vėjo elektrinių įtaką elektros sistemai;
- sudaryti elektros sistemos modelį, leidžiantį tirti vėjo elektrinių įtaką režimų parametrms;
- nustatyti elektros sistemos su vėjo elektrinėmis režimų ribines sąlygas;
- atlikti vėjo elektrinių įtakos elektros sistemos režimams jautrumo analizę.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Mokslinių straipsnių apžvalga

Straipsnyje „Evaluation of the Moroccan Electrical Grid Dynamic Stability after Large Scale Renewable Energies Integration“ [2] aprašomas Maroko valstybės planas iki 2030 metų padidinti atsinaujinančios elektros energijos gamybą. Elektros energijos gamyba iš atsinaujinančių šaltinių turėtų pasiekti 52 procentus visos šalyje pagaminamos elektros energijos. Tokia didelė elektros energijos dalis iš atsinaujinančių šaltinių kelia didelį susirūpinimą dėl elektros tinklo stabilumo. Tai gali turėti įtakos dažnio stabilumui ir sistemos galimybei reguliuoti dažnį, taip pat įtakoti nevienodą galių padidėjimą ar sumažėjimą tinkle. Šios problemos kyla dėl to, kad atsinaujinančios energijos šaltiniai nesuteikia tinklui pastovios inercijos, inercija bet kuriuo laiko momentu gali atsirasti arba išnykti. Kaip problemos sprendimą straipsnyje siūloma naudoti energijos kaupiklius, kurie padėtų užtikrinti elektros tiekimą į sistemą, atsiradus poreikiui.

Straipsnyje „Challenges of integrating wind power plants into the electric power system: Lithuania case“ [3] rašoma apie technines kliūtis, kurias privaloma išspręsti, norint toliau sėkmingai Lietuvoje plėtoti vėjo elektrinėmis gaminamą energiją. Išskiriamos dvi pagrindinės problemos: tai nustatyti elektros energijos tinklo galios perdavimo pajėgumus ir subalansuoti vėjo jėgainių pagamintą energiją, kuri priklauso nuo vėjo prognozavimo kontrolės. Norint išspręsti šias problema, buvo atkreiptas dėmesys į 2016 metai vėjo elektrinių darbo grafiką. Nustatyta, kad daugiausiai problemų sukėlė vėjo prognozavimo kontrolė, kuri neleido užtikrinti patikimos sistemos apkrovos. Tam priverstinai buvo įjungti rezerviniai elektros generatoriai, kad būtų subalansuota elektros energijos sistema.

Straipsnyje „Experiment Analysis on Motor-Generator Pair System for Providing Inertia of Renewable Energy“ [4] aptariama didėjanti atsinaujinančių energijos šaltinių skvarba į energetiką. Didėjantis atsinaujinančių šaltinių naudojimas neprisideda prie sistemos inercijos ir didina dažnio išbalansavimo tikimybę. Norint sumažinti dažnio sumažėjimo tikimybę, nuosekliai prijungiamas sinchroninis variklis su sinchroniniu generatoriumi. Tokių būdų suteikiama papildoma inercija į tinklą ir išsprendžiama galimo dažnio kritimo problema.

Straipsnyje „Analysis of alternative frequency control schemes for increasing renewable energy penetration in El Hierro Island power system“ [5] aprašoma „El Hierro“ sala, kurią 2000 m. UNESCO paskelbė biosferos rezervatu. Ji siekia tapti savarankiška energijos šaltinių atžvilgiu ir visiškai neskleisti šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Ši izoliuota elektros sistema susideda iš dyzelinių blokų ir hibridinių vėjo siurblių sandėliavimo hidroelektrinių, turinčių kintamo greičio vėjo turbinas „Pelton“ ir siurblinę su fiksuoto ir kintamo greičio siurbliais. Didinant sistemoje atsinaujinančios energijos šaltinių kiekį, sistema susiduria su dažnio inercijos ir jo išlaikymo problema. Gaminant daug elektros energijos iš vėjo elektrinių ir tos elektros energijos nesuvartojant, dažnis sistemoje pakyla. Tokiais atvejais elektros energijos gaminamas kiekis reguliuojamas ne tik sistemoje, bet ir vėjo elektrinėse, pasitelkus kintamo greičio vėjo turbinas. Tokios turbinos leidžia išlaikyti sistemos balansą.

Straipsnyje „Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system“ [6] rašoma apie atsinaujinančios energetikos ateitį ir jos įjungimą į tinklą. Straipsnyje analizuojamas pasaulinis energetikos sistemos modelis. Energetikos sistemoje yra didelė atsinaujinančios energijos dalis. Straipsnyje analizuojami keturi skirtingi scenarijai, diferencijuoti pagal biomasės potencialą ir

elektros transporto priemonių rinkos dalį. Palyginimui naudojamas įprastas scenarijus su išmetamųjų teršalų mokesčiais, bet be atsinaujinančios energijos. Atsinaujinančių energijos šaltinių atveju, atsinaujinantys energijos išteklių palaipsniui įtraukiami iki 2050 m., o modelio rentabilumas - nuo 2010 iki 2050 m. Rezultatai rodo, kad didelė atsinaujinančios energijos dalis kelia didelių pokyčių kiekviename energetikos sistemos sektoriuje, ypač elektros energijos gamybos sektoriuje, pramonėje ir transporte. Didinant atsinaujinančios energijos gamybos kiekius, išauga didelis biomasės kiekio poreikis. Padidinus elektros energijos gamybą iš saulės ir vėjo elektrinių, reikalinga didesnė energetikos sistemos elektrifikacija, ypač pramonės sektoriuje. Saulės fotoelementai (SF) gamina 39–44 proc. pirminės energijos ir atstoja 75 proc. elektros energijos gamybos, nes teigiama SF technologijų plėtra skatina energijos gamybą iš saulės energijos, ypač Azijoje. Pereinant prie atsinaujinančios energijos sistemos nuo 2010 m. iki 2050 m., mažėja elektros energijos kainos, nes mažiau sunaudojama iškastinio kuro, tuo pačiu 90 proc. mažėja CO₂ išmetimas.

Straipsnyje „Optimization of Renewable energy penetration in Regional Energy System“ [7] rašoma apie Kiniją susiduriančią su dideliu energijos tiekimo ir paklausos iššūkiu. 2016 m. Kinijoje anglies dioksido emisija buvo 27,3 proc. - didžiausia pasaulyje. Todėl labai svarbu yra pagerinti ir mūsų energetikos struktūrą. Atsinaujinančios energijos integravimas į energetikos sistemą yra alternatyvus būdais. Svarbu optimizuoti atsinaujinančios energijos skverbimąsi, t. y. analizuoti energijos sistemos elgseną po integruotos atsinaujinančios energijos, taip galima pasiekti optimalų energijos įsiskverbimą ir stebėti energijos sistemos elgseną.

Straipsnyje „Evaluation of the power system reliability if a nuclear power plant is replaced with wind power plants“ [15] pateikiama atominės elektrinės pakeitimo vėjo jėgainių parkais idėja. Straipsnyje nagrinėjama, kaip pasikeistų sistemos patikimumas. Nagrinėjama galios sumažėjimo galimybė, kuri priklauso nuo oro sąlygų. Palyginus galutinius rezultatus, išvadoje pateikiama, kad sistemos patikimumas stipriai nukentčia, padidėja nestabilios galios sistemoje tikimybė. Pabrėžiama pagrindinė sistemos problema- tai nestabilus vėjo jėgainių galios perdavimas į sistemą, kurį lemia kintamos oro sąlygos.

1.2. Vėjo elektrinės

Vėjo jėgainės yra skirstomos į du pagrindinius tipus – vertikaliuos ir horizontaliosios ašies jėgainės. Dažniausiai naudojamos yra horizontaliosios ašies jėgainės, nes jų naudingumo koeficientas yra aukštesnis ir prilyginamas 0,5, o vertikaliųjų- 0,15–0,2 [9]. Vėjo jėgainės elektros gamybai naudoja vėjo mechaninę energiją. Vėjyje besisukančios turbinos teorinis naudingumo koeficientas siekia 60% visos jėgainės galios. Dabartinės didžiausios vėjo jėgainės galia siekia 9,5 MW, jos sparnuotės ilgis- 82 metrus [8]. Vėjo elektrinės pagaminamas energijos kiekis apskaičiuojamas kWh pagal formulę:

$$W = C_n(P_T * 8760); \quad (1)$$

čia P_T – vardinė turbinos galia kW; C_n – našumo koeficientas.

Mūsų šalyje vėjo jėgainių našumo koeficientas pajūryje yra lygus 0,25 – 0,26, o jūroje jis siekia 0,40 [19].

Dažniausiai pasaulyje yra statomos trijų menčių vėjo jėgainės. Retais atvejais galima pamatyti daugiau menčių turinčių jėgainių, bet papildomo pranašumo joms tai nesuteikia. Daugiau sraigčių turinčios vėjo jėgainės tik sumažina sukimosi greitį. Vėjo jėgainės galia reguliuojama, keičiant sparnų

atakos kampą vėjo atžvilgiu. Sparnai jėgainėse sukasi ganėtinai lėtai. Norit perduoti didesnę sukimosi momentą į generatorių, naudojami pagreitinimo reduktoriai. Reduktoriai pagreitina sukimosi momentą, ir tokiu būdu galima naudoti įprastą generatorių, išvengiama didelių gabaritų lėtaeigių generatorių. Generatorius dažniausiai sinchronizuojamas su tinklu tiesiogiai, nenaudojama sudėtingų keitiklių, reikalinga tik patikima generatoriaus valdymo ir orientavimo automatika. Naudojami ir asinchroniniai generatoriai, tokiu atveju generuojama elektros energija kintamu greičiu. Dažnu atveju naudojami keli asinchroniniai generatoriai, priklausomai nuo darbo eigos galingumo. Sparnuotėms besisukant lėtai, naudojamas mažos galios generatorius, o atsiradus dideliame galingumui, persijungia didelės galios generatorius. Elektrines statyti patartina toliau nuo gyvenamųjų zonų, nes jos kelia gana didelį triukšmą [20].

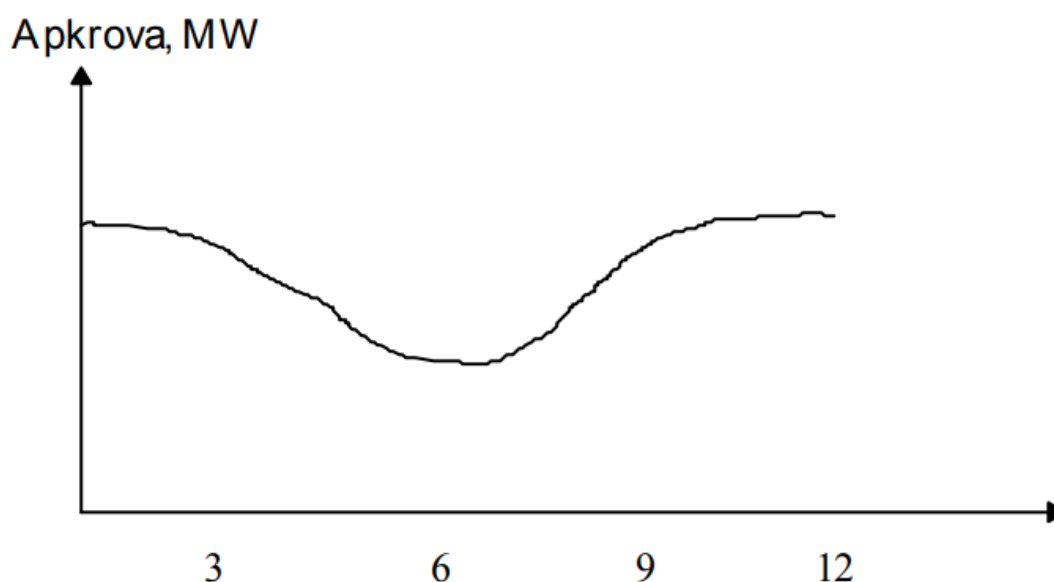
Lietuvos teritorijoje patartina vėjo elektrines statyti pajūryje, nes daugumoje regionų vyraujantys vėjai yra per silpni. Vėjo stiprumas pagaminamos energijos kiekiui turi didelę reikšmę. Jis yra proporcingas vėjo greičio kubui. Tad elektrinės, pastatytos pajūryje, kur vidutinis vėjo greitis yra 7m/s, ir tokios pat elektrinės, pvz., Utenos apskrityje, kur pučia 4 m/s vėjas, pagaminamas energijos kiekis skirsis 6 kartus [10].

1.3. Elektros energijos apkrovos grafikai

Elektros energijos apkrova susidaro iš daugelio jos vartotojų. Taip nutinka dėl nepastovaus aktyviosios ir reaktyviosios energijos vartojimo. Elektros gamyba ir perdavimas priklauso nuo elektros sunaudojimo, todėl ir elektrinių, ir elektros tinklų darbo režimai turi nuolatos keistis. Tokį nepastovumą patartina pateikti grafiškai, ir tai vadinama apkrovos grafiku. Jis susideda iš 4 pagrindinių kintamų komponentų: P, Q, S, I. Dažniausiai naudojama supaprastinta šio grafiko versija, kurioje naudojame tik P ir Q reikšmes. Pagrindiniai grafikai yra paros ir metiniai. Taip pat jie gali būti ir pagal poreikį, tai tinklo, el. sistemos, elektrinių ar kitų komponentų, kurie pasižymi energijos perdavimo ar suvartojimo nepastovumu [24]

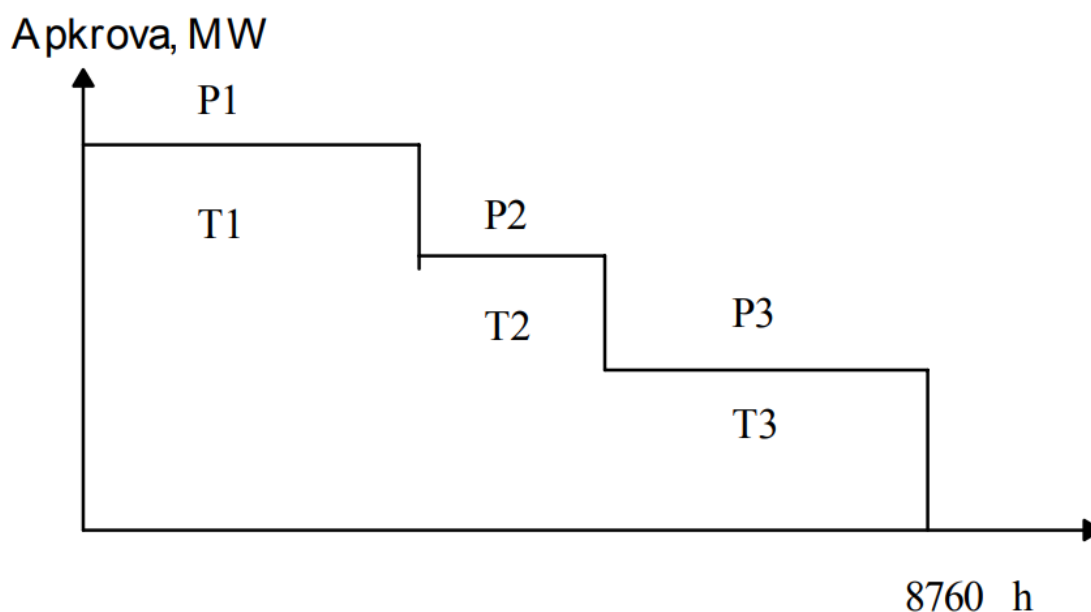
1.3.1. Metiniai apkrovos grafikai

Metiniai apkrovos grafikai gali būti skirstomi į maksimalių apkrovų grafikus ir apkrovos trukmės grafikus. Maksimalių apkrovų grafiką sudaro laiko skalė ir skaičiuojamosios apkrovos kitimas per metus. Laiko skalė yra sudaroma, atidedant pusvalandžių maksimumų vidurkį per metus (žr. 1.1 pav.). [27]



1.1 pav. Maksimalių apkrovų grafikas [11].

Naudojantis maksimalių apkrovų grafiku, galima grafiškai matyti apkrovų pikus. Šis grafikas taip pat gali būti labai naudingas, norint planuoti trumpą laiką trunkančius įrenginių apžiūros ar remonto darbus. Ne piko valandomis elektrinių ar perdavimo tinklo sistemos būna mažiau apkrautos nei piko valandomis ir juos galima laikinai sustabdyti. Taip pat šį grafiką galima pateikti, analizuojant įrenginių darbo laiką per parą. Tai parodyta 1.2 pav..

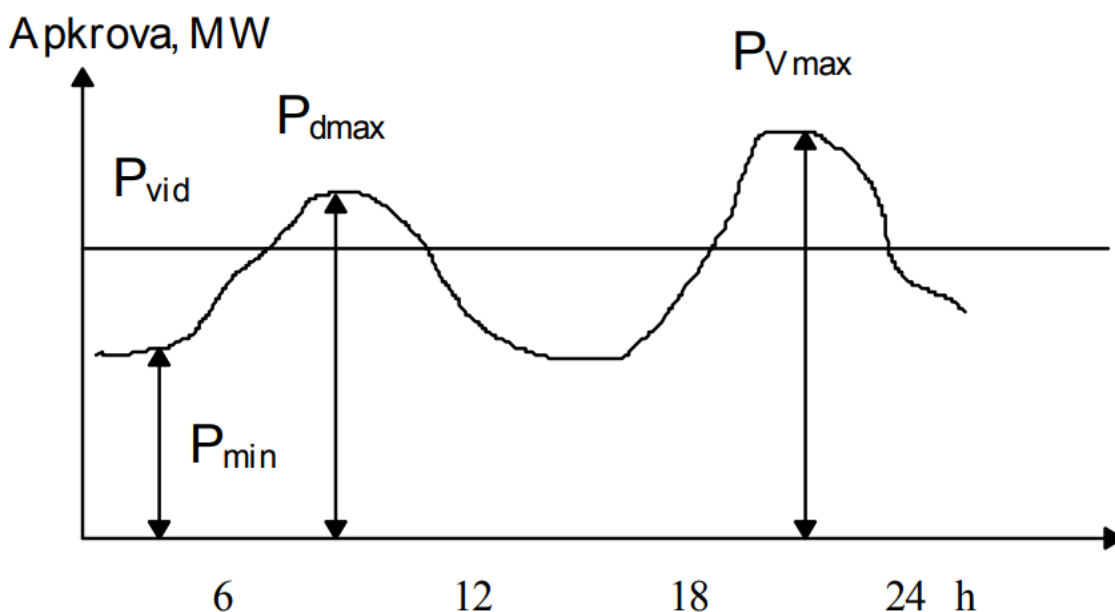


2.2 pav. Maksimalių apkrovų grafikas įrenginių veikimo laiko atžvilgiu [11].

Maksimalių apkrovų grafike parodytas įrenginių veikimas laiko atžvilgiu (žr. 1.2 pav.), atvaizduotas reikalingos galios kiekis maksimaliam elektros poreikiui užtikrinti. Laiko žymė T1 žymi daugiausiai galios reikalaujančią laiko žymą. Atitinkamai T2 ir T3 žymi mažiau generuojamos galios reikalaujančias laiko žymas. P1, P2 ir P3 žymi kokios maksimalios apkrovos reikalauja vartotojai.

1.3.2. Paros apkrovos grafikai

Realiai paros apkrovos grafikai yra nuoseklūs, jie kinta nenutrūkstamai. Grafikas kinta nuo sistemoje vyraujančios apkrovos laiko atžvilgiu. Taip pat paros apkrovos grafiką galima braižyti laiptuotą. Žinant laiptuoto grafiko parametrus, nesunku apskaičiuoti per visą parą sunaudotą elektros energiją kWh [28]. Ji atsispindi grafike užpildytame plote.



3.3 pav. Paros apkrovos grafikas [11].

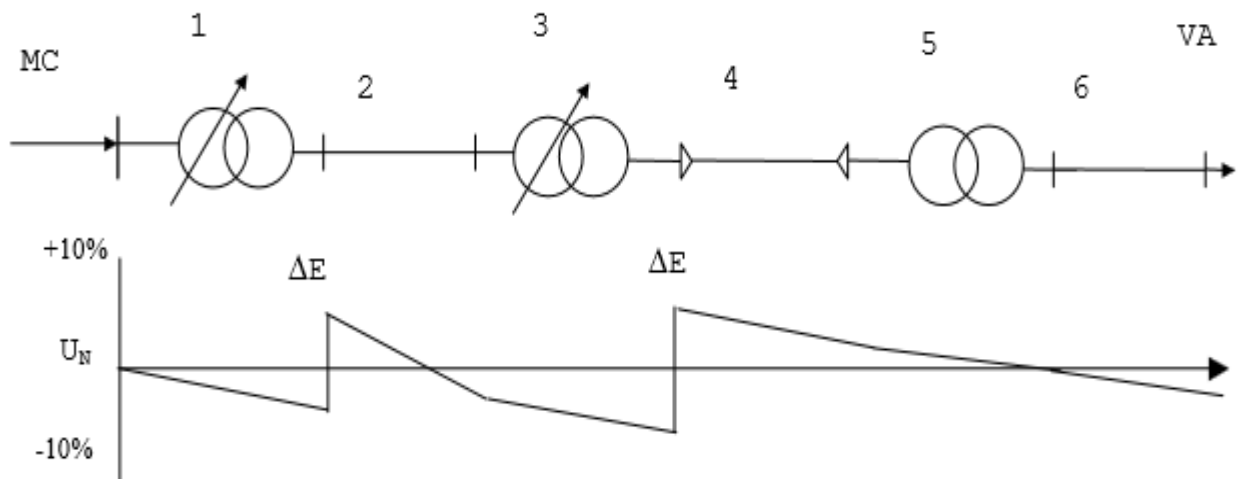
Paros apkrovos grafike išskiriamos trys pagrindinės dalys:

- bazinė - $P < P_{max}$
- pusiau pikinė – $P_{min} < P < P_{vid}$
- pikinė $P < P_{vid}$.

Paros apkrovos grafikai pasižymi sezoniškumu. Žiemos ir vasaros grafikai labai skiriasi vienas nuo kito. Vasaromis Lietuvoje sunaudojama daug mažiau elektros energijos, lyginant su žiemos periodu. Taip nutinka dėl žiemos laiku trumpų dienų ir prasidėjusio šildymo sezono. Pasaulyje paros apkrovos grafikas labai skiriasi šiaurinėse ir vidurinėse platumose. Tai susiję su besikeičiančiomis klimato sąlygomis. Dėl skirtingų sezoniškumų jų charakteristikos išskiriamos būtent į vasaros ir žiemos laiko charakteristikas. Šie du grafikai gali skirtis ne tik vartotojų sunaudojama galia, bet ir elektros energijos naudojimo įpročiais. Taip pat galima išskirti įmonių ir gyventojų elektros sunaudojimo įpročius. Tai sudaro ir elektros energijos galutinių vartotojų pasiskirstymą, todėl paros grafikus galima naudoti ir atskiriems energetikos sistemos objektams [11].

1.4. Įtampos reguliavimo būdai

Energetinėje sistemoje labai svarbu palaikyti standartais numatytą įtampą perdavimo ir skirstymo linijose. Įtampos lygiai nuolat kinta. Tai nutinka dėl varžos elektros linijose. Norint sugrąžinti įtampą į numatytas normas, reikia padidinti įtampą, naudojantis transformatoriais [29]. Ketvirtame paveiksle (žr. 1.4 pav.) pavaizduoti nuolatiniai įtampos sumažėjimai linijoje, kuriuos kompensuoja reguliuojami transformatoriai.



4.4 pav. Įtampos nuostoliai linijoje ir įtampos pakėlimas naudojantis transformatoriais [14].

čia 1 - maitinimo centras (MC), 2 - maitinančio tinklo linijos; 3 - linijinis reguliatorius, 4.- vidutinės įtampos tinklo kabelinė linija, 5 - žemos įtampos transformatorius, 6 - žemos įtampos linija, 7 - vartotojų apkrovos (VA)

Santykis tarp nukrypimų vartotojo gnybtuose VA ir įtampos nukrypimų MC parodytas formulėje.

$$U_{VA} = U_{MC} - \Delta U_{MC-VA} + \sum_{j=1}^m E_j. \quad (2)$$

Čia, $\Delta U_{MC-VA} = \frac{100}{U_N^2} \sum_{i=1}^k (P_i R_i + Q_i X_i) \%$, k – tinklo elementų skaičius, $\sum_{i=1}^m E_i$ – įtampos prieaugių m elementuose skaičius. Parinkus tinkamą koeficientą K_T nustatomi kokie turėtų būti transformatoriai ir auto transformatoriai perdavimo tinkle. K_T tinka nustatant maksimalų ir minimalų apkrovos režimą.

$$U_{VA}^{MAX} = U_{MC}^{MAX} - \Delta U_{MC-VA}^{MAX} + \sum_{j=1}^m E_j^{MAX}. \quad (3)$$

$$U_{VA}^{MIN} = U_{MC}^{MIN} - \Delta U_{MC-VA}^{MIN} + \sum_{j=1}^m E_j^{MIN}. \quad (4)$$

Formulėse (3) ir (4) pavaizduotas įtampų minimalus ir maksimalus svyravimų diapazonas galutiniame elektros skirstymo taške.

$$U_{VA}^{MAX} - U_{VA}^{MIN} = U_{MC}^{MAX} - U_{MC}^{MIN} - (\Delta U_{MC-VA}^{MAX} - \Delta U_{MC-VA}^{MIN}) + \sum_{j=1}^m (E_j^{MAX} - E_j^{MIN}). \quad (5)$$

Formulėje (5) matyti, kad, reguliuojant įtampą, transformatoriai gali sumažinti vartotojų įtampos nuokrypius. Taip pat įtampą galima valdyti MC šynų paduodama įtampa, koreguojant transformatorių, auto transformatorių ar perdavimo linijos koeficientus. Padidinti ar sumažinti įtampą tinkle galima iš maitinimo centro, tai vadinama centralizuotu įtampos reguliavimu. Visi kiti metodai neduos įtakos visai sistemai, o tik tam tikroms sistemos grandinėms. Tai vadinama vietiniu įtampos reguliavimu.

1.5. Patikimumas

Vienas iš pagrindinių elektros sistemos rodiklių yra jos patikimumas. Sistema turi gebėti nenutraukiamai tiekti elektros energiją, o susidūrus su elektros linijų sutrikimu, kuo skubiau ją vėl atstatyti iki normomis numatytos įtampos ir dažnio. Vartotojai turi teisę pasirinkti, kokio tipo elektros energijos jiems reikia, ar elektros energija turėtų būti tiekiamą be sustojimo ir už ją mokėti brangiau, ar su galimais trumpalaikiais elektros energijos sutrikimais, bet už ją mokėti mažiau.

Labai sudėtinga yra įsivertinti galimus elektros energijos tiekimo kitimus įmonėse. Būtina atsižvelgti į gamybos mastus ir galimus elektros energijos tiekimo sutrikimus. Tiksliai to įvertinti neįmanoma, nes tai priklauso nuo laiko, kiek elektros energijos nebuvo tiekta, kaip dažnai nutrūksta tiekimas ir kiek tai trunka, kaip vartotojas pasiruošęs galimiems elektros tiekimo nutraukimams, koks vartotojo tipas (gyventojai, pramonės įmonė ir pan.), koku paros, savaitės, sezono metu nutrūko tiekimas.

Siekiant padidinti patikimumą elektros sistemoje, tampa sudėtinga suskaičiuoti tam reikalingas išlaidas ir parinkti elektros sistemos vietas, reikalaujančias patikimumo didinimo. Pagrindinės to priežastys yra vis kitose vietose atsitinkantys trumpieji jungimai ir netolygi apkrova elektros sistemoje. Taip pat generatorių apkrova vis kinta, todėl negalima teigti, kad vienas ar kitas generatorius yra per daug apkrautas. Sistemoje nuolatos keičiasi apkrova, dėl šios priežasties taip pat labai sunku prognozuoti ateities tendencijas ir galimus nutikimus elektros sistemoje. [25]

Elektros tinklų ar elektrinių darbą gali sutrikdyti sunkiai nuspėjami įvykiai (audra, įrangos nestabilus veikimas ir pan.), todėl, patyrus neprognozuojamą gedimą elektros generatoriuje ar elektros perdavimo linijose, generavimo ar perdavimo galia gali drastiškai ir neprognozuotai sumažėti. Išskirtinai vienam generatoriui ar specifinei perdavimo linijai atlikti patikimumo analizę yra ypač sudėtinga. Dėl plataus skirtingų elektros energijos sistemos elementų skaičiaus įprastais analizės būdais negalima nustatyti ryšio tarp jų sąveikos ir galimų veiksmų, todėl ypač sunku nuspėti, kaip patikimumą gali pagerinti naujai įrengtas įrenginys elektrinėje ar elektros tinkluose.

Nepaisant to, net ir tvarkingai eksploatuojamos didelės elektros energijos sistemos gali būti netikėtai pažeistos. Kita vertus, net ir didelis gedimas sistemoje lems elektros tiekimo sutrikimą ne visiems vartotojams. Įvykus neplanuotam masyviam elektros energijos sutrikimui, perdavimo sistemoje nukenčia ne visi vartotojai. Tai paliečia apie 20 procentų gyventojų. Daugiausiai problemų elektros sistemoje sukelia maži perdavimo linijos gedimai. Jie atsitinka dažniausiai dėl nepalankių oro sąlygų arba netikėto žmogiškojo faktoriaus. Dėl šios priežasties buvo paruoštas EN50160 standartas, kuris perspėja vartotojus apie galimus elektros energijos sutrikimus sistemoje. Jie gali įvykti nuo 10 iki 50 kartų per metus ir negali trukti ilgiau nei 3 minutes [12].

Patikimumo standartai yra reikalingi elektros sistemų planavimui ir remiasi įvairiomis taisyklėmis bei praktiniais duomenimis. Planuojant elektros sistemos darbą, patikimumas gali būti apibendrintas trimis rodikliais:

- apkrovos praradimo tikimybe (angl. loss of load probability – LOLP), pavyzdžiui, vieną kartą per 10 metų; [13]
- sistemos gyvybingumu, įvykus 1 ar 2 netikėtiems gedimams (taisyklė N-1 ar N-2);
- nustatyto galios rezervo (santykinio, pavyzdžiui, 15–20 procentų) užtikrinimu.

Apkrova elektros sistemoje yra ypač svarbi. Elektros tinklų pagrindinis tikslas yra patenkinti visų vartotojų elektros energijos poreikį. Žinoma, visada atsiranda tikimybė, kad bus nepakankamas apkrovos kompensavimas ir elektros sistema nustos veikti. Tai būtų neįtikėtinais retas atvejis, todėl elektros tinklų ir elektrinių savininkai visomis išgalėmis stengiasi to išvengti. Vartotojų pasirašytose elektros tiekimo sutartyse yra įrašyta tokia tikimybė, ji negali pasikartoti dažniau nei 1 kartą per 10 metų. Neparašytas nepateiktos elektros energijos laikas, nes niekas negali nuspėti, kiek gali trukti toks nutikimas. Apibrėžimo sąlyga yra kiekvienos šalies asmeninis reikalas, nes nėra bendro nutarimo, kaip reikėtų šią tikimybę įvertinti ar apskaičiuoti.

Sugedus svarbiems elektros sistemos elementams, generatoriams ar perdavimo linijoms, persiskirstę elektros energijos srautai likusioje sistemos dalyje ne visada automatiškai gali patenkinti vartotojų apkrovą. Nestabilioje sistemoje galima pastebėti atvejus, kai elektrinės generuoja užtekinai galios elektros sistemai, bet viena arba kelios elektros perdavimo linijos neatitinka numatytų įtampos ir srovės standartų. Tokiu atveju linija yra laikinai išjungiamą, norint apsaugoti visą bendrą sistemą nuo griūties. Linija prijungiama iš naujo prie sistemos, kai tik ji būna pilnai išsikrovusi. Tokiu būdu atnaujinamas tiekimas vartotojams ir energetinė sistema apsaugoma nuo jos griūties. Įprastai elektros sistema planuojama taip, kad, atjungus vieną ar kelias pagrindines linijas, sistema liktų veikianti ir vartotojai nepajustų galios sumažėjimo. Tai vadinama N-1 (ar N-2) principu. Taisyklė N-1 turi veikti visada, pavyzdžiui, jei yra atjungtos dvi elektros linijos, sistemos operatorius turi imtis veiksmų, kad, atsijungus trečiai linijai, sistemos darbas nesutriktų [30].

Generatoriai arba labiausiai apkrautos linijos yra svarbiausi arba kitaip dar vadinami kritiniais elementais energetinėje sistemoje. Įprastai laikoma, kad energetinėje sistemoje gali sugesti vienas arba du pagrindiniai įrenginiai. Kadangi visų įmanomų gedimų atvejų neįmanoma numatyti, atsitiktinumų analizei ir jų sprendimui, reikalinga inžinerinė patirtis.

Labai svarbu sistemoje turėti daugiau galios rezervo nei reikalauja apkrova. Tai galima sakyti bene seniausia ir dažniausiai praktikoje taikoma tradicija. Rezervinę galią turi galėti atiduoti ne tik elektrinės, bet ir perdavimo linijos. Užtikrinant patikimą elektros tiekimą, galios rezervas turėtų būti 15-20 procentų didesnis už maksimalią galimą apkrovą piko metu elektros sistemoje. Galios rezervas sistemoje gali kisti priklausomai nuo įrenginių joje. Jeigu sistemą sudaro keli dideli generatoriai, tada galios rezervas turi būti didesnis, lyginant su sistema, turinčia daug mažų generatorių. Ši taisyklė yra taikoma, norint palaikyti patikimą elektros sistemą. Jeigu sugestų vienas didelis generatorius, kiti sistemos įrenginiai turėtų tai kompensuoti ir palaikyti sklandų sistemos veikimą. Todėl sistemoje energijos rezervas turėtų būti didesnis už didžiausią sistemoje esantį generatorių. [26]

Aukščiau minėti patikimumo normų dydžiai parodo, kokia generuojama galia turi būti įdiegta sistemoje ir kaip ši turi būti naudojama, kad darbas būtų pakankamai patikimas. Santykinis rezervas ir apkrovos praradimo tikimybė yra svarbiausi rodikliai projektuojant, o sistemos darbą planuojant ir koordinuojant, atliekama atsitiktinumų analizė sistemos gyvybingumui patikrinti (principas N-1).

Visi jau aukščiau minėti metodai yra labai plačiai naudojami visose šalyse, tačiau visos šalys turi teisę rinktis, kaip šiuos metodus naudoti savo šalyse. Taip yra dėl nevienodų elektros tiekimo sąlygų šalyse. Pavyzdžiui, šalys, kurios eksportuoja didžiąją dalį pagaminamos elektros energijos, gali turėti mažesnę galios rezervo rodiklį, lyginant su importuojančiomis šalimis. Šalys, kurios daugiausiai elektros energijos importuoja, turėtų įvertinti tikimybę nebegauti elektros energijos iš vieno ar kito

elektros energijos tiekėjo. Taip pat reikėtų užsitikrinti nors trumpalaikį galios rezervą. Taigi, skirtingos šalys turėtų atskirai vertinti savo šalių energetinį patikimumą.

Šalys būtinai turėtų įsivertinti prognozuojamą šalyje elektros poreikį. Neįsivertinus poreikio, galimi du variantai. Sistema, turinti per mažą galios rezervą, gali netikėtai patirti gedimą, ir sistema, to neatlaikiusi, gali sugriūti. Turint per didelę galios rezervą, padidinamas sistemos patikimumas, bet tuo pačiu tampa labai brangu išlaikyti pačią sistemą. Rezerve laukiančių generatorių atsipirkimo laikas labai padidėja arba gali visai neatsipirkti. Labai svarbu įvertinti, kas yra svarbiau energetinei sistemai: ar pigi, bet nepatikima elektros energija, ar daug brangesnė, bet patikimumu pasižyminti energija. Taip pat nereikia pamiršti augančios elektros energijos paklausos. Sistema turi būti pasiruošusi elektros energijos vartojimo padidėjimui ir turi atlaikyti visus išskylančius nesklandumus.[14]

1.6. Reikalavimai elektros sistemos darbui ir jo planavimui

Užtikrinant stabilų elektros sistemos darbą ir aukščiau paminėtas tiekimo normas, reikalingas tikslingas energetikos sektoriaus koordinavimas ir sudaryto plano laikymasis. Siekiant išlaikyti gyvybingą elektros sistemą, reikia laikytis trijų pagrindinių funkcijų: būtina nuolatos stebėti apkrovos kitimą, užtikrinti patikimą tiekimą ir koordinuoti galios mainus.

Stengiantis užtikrinti pagrindines sistemos funkcijas, elektros energijos tiekėjai susiduria su milžiniškais informacijos duomenų kiekiais. Siekiant juos susisteminti ir koordinuoti, reikalingi dideli kompiuterių ir telekomunikacijos pajėgumai. Taip pat visas šias užduotis elektros sistemų valdytojai stengiasi įgyvendinti kuo mažesniais kaštais, taip išlaikydami žemą elektros energijos kainą rinkoje.

Tinkamas elektros energijos gamybos ir perdavimo įrenginių parinkimas yra vienas iš pagrindinių sistemos organizavimo darbų. Parenkant įrangą sistemoje, būtina atsižvelgti į prognozuojamą apkrovų kitimą ir sistemos adekvatumo užtikrinimą. Vienu metu veikiančios elektrinės yra parenkamos elektros sistemos valdymo centro. Valdymo centro pagrindinis darbo tikslas yra kontroliuoti elektros gaminimo procesus skirtingose sistemos vietose ir paskirstyti reikiamą galią sistemoje. Valdymo centras atsižvelgia į elektros pirkimo kainą įvairiose elektrinėse ir, pasirinkę pigiausią rinkoje variantą, nustato jam gamybos terminus. Šis metodas skatina konkurenciją rinkoje ir užtikrina mažiausią elektros energijos kainą vartotojams. [31]

Nuolatinis elektros sistemos valdymas reikalauja visada sekti sistemos apkrovas, užtikrinti galios mainų funkcijas ir išsaugoti sistemos patikimumą. Siekiant geriausio įmanomo rezultato, taikomos kelios sistemos darbo ir jo planavimo procedūros. Procedūros yra stebimos pagal laiko intervalus ir kintamus elektros sistemos parametrus (1 lentelė).

1 lentelė. Elektros sistemos darbo ir planavimo funkcijos

Funkcija	Tikslas	Priemonės
Apkrovos sekimas Dažnio reguliavimas	Nuolatinis apkrovos kitimo sekimas	<ul style="list-style-type: none"> • Reguliatorių reguliavimas • AGV ir apkrovų paskirstymas • AGV, galių paskirstymas
Apkrovų grafikų sudarymas	Paros, savaitės, sezono apkrovų grafikai (įrenginių įtampų ir galių ribos)	<ul style="list-style-type: none"> • Agregatų sudėties parinkimas • Įtampų reguliavimas

Patikimumo užtikrinimas Gyvybingumo užtikrinimas	Parengtis netikėtiems gedimams	<ul style="list-style-type: none"> • Agregatų sudėties parinkimas įvertinant momentinį ir greitą rezervą • Generacijos perskirstymas įvertinant gyvybingumą
Adekvatumo užtikrinimas	Apsirūpinimas reikiamaiais tiekimų ištekliais	<ul style="list-style-type: none"> • Įtampų reguliavimas • Agregatų sudėties parinkimas • Įrenginių priežiūros ir remontų grafikų sudarymas • Naujų pajėgumų planavimas
Galių mainų koordinavimas	Tarp sisteminė prekyba elektra, tarp sisteminiai galių tranzitai	<ul style="list-style-type: none"> • AGV, apkrovų paskirstymas • Agregatų sudėties parinkimas

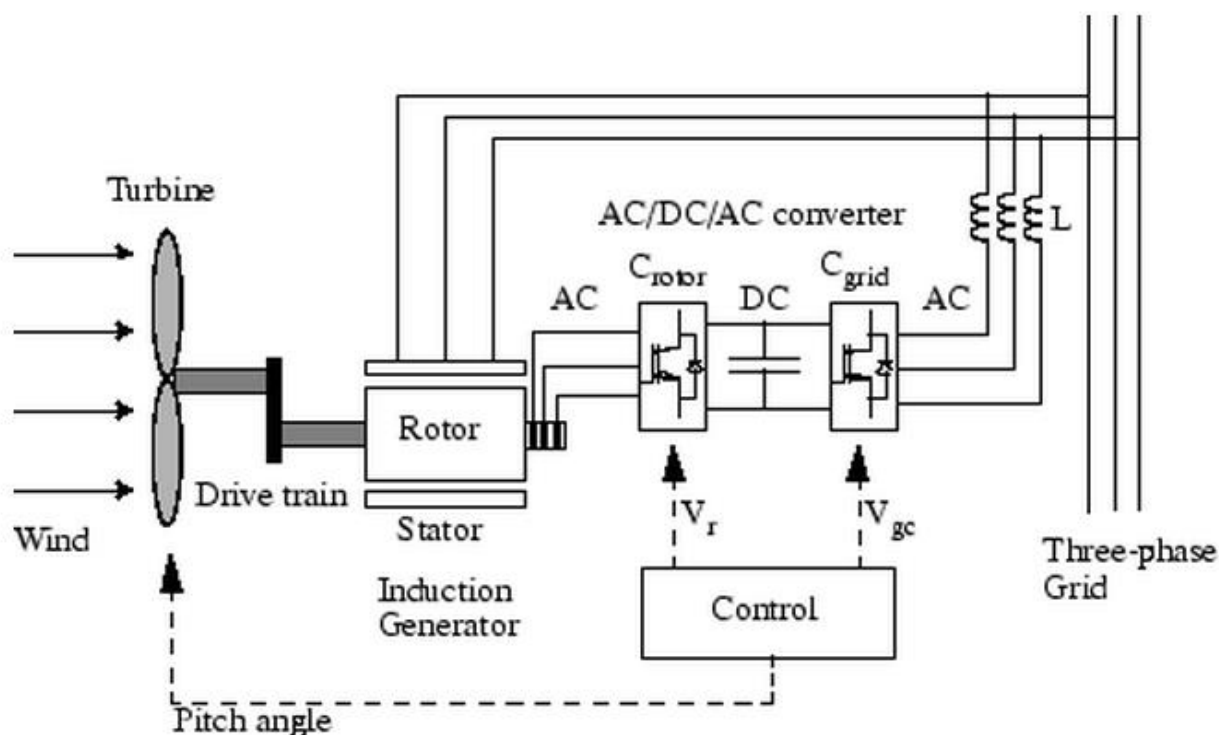
Energetinėje sistemoje nuolatos yra tikrinamos elektros energijos gamybos ir jos paklausos balanso užtikrinimo procedūros. Daug rečiau atliekamos kitos procedūros, pavyzdžiui naujų elektrinių elektros generavimo planavimas. Procedūros rengimo dažnumas priklauso nuo procedūros proceso ilgio. Pavyzdžiui, generatoriaus galios reguliavimas apima labai trumpą laiko periodą, dažniausiai trumpesnę nei viena minutė. Ilgo laiko reikalaujančios procedūros rengiamos rečiau, pavyzdžiui, naujos elektrinės statybos periodas gali trukti nuo 5 iki 10 metų, o jų darbo amžius siekia dešimtis metų. Ilgalaiškės procedūros paruošimo ir įgyvendinimo procesas yra žymiai ilgesnis, todėl jos daromos rečiau. Vis dėlto, kiekviena laiko perspektyva reikalauja apkrovų ir elektros įrenginių darbo prognozės.[14]

2. Elektros sistemos modelio sudarymas

Šioje dalyje bus aprašomi projektinės sistemos įrenginių parametrai ir modeliavimo metodika MATLAB/SIMULINK programoje. Modeliams sudaryti naudojama MATLAB grandinių teorijos[21] ir sistemų modeliavimo ir identifikavimo [22] knygomis. Sudarinėjant modelius, aprašomos naudojamų įrenginių charakteristikos, stengiamasi atkartoti realios elektros energijos sistemos perdavimo tinklą. MATLAB/SIMULINK programoje

2.1. Vėjo jėgainių parko modeliavimas

Modeliuojant vėjo jėgainių parko sistemą, svarbu atsižvelgti į jos parametrus. Sistemoje turi būti galimybė keisti vėjo greitį, prijungtų jėgainių kiekį ir jų generuojamą galią. Sistema taip pat turi turėti galimybę prisijungti prie trifazio tinklo. Pagal šiuos parametrus iš MATLAB/SIMULINK bibliotekos pasirinktas vėjo turbina modelis su dvigubu indukciniu generatoriumi (angl. Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type)). Šis modelio blokas atitinka visus aukščiau išvardintus parametrus. Vėjo turbina su dvigubu indukciniu generatoriumi yra pavaizduota žemiau (2.1 pav.)



2.1 pav. Vėjo jėgainė su dvigubu indukciniu generatoriumi.

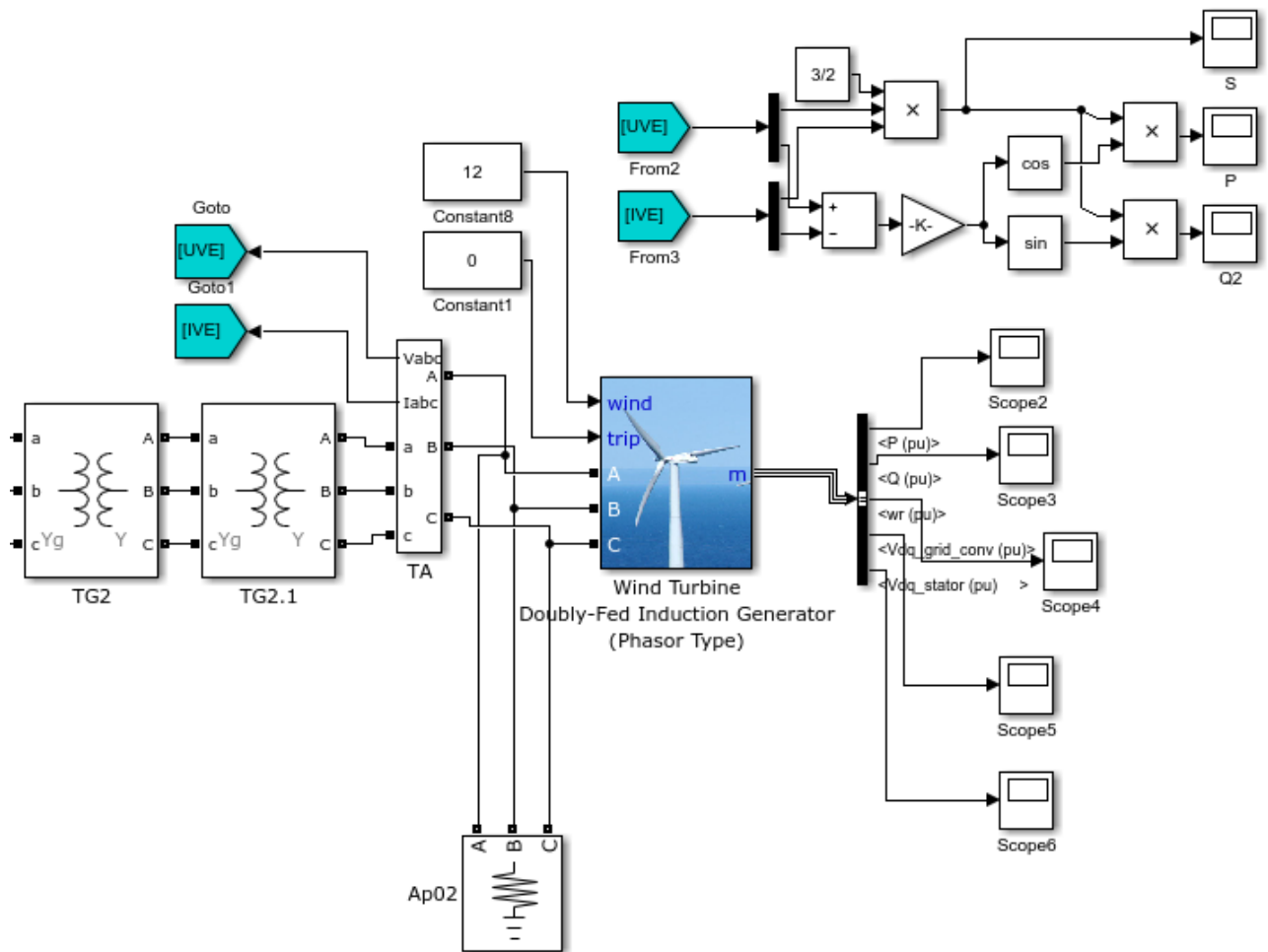
AC/DC/AC keitiklis yra padalintas į du komponentus: rotoriaus įtampos keitiklį C_{rotor} ir tinklo įtampos keitiklį C_{grid} . Prie rotoriaus ir tinklo įtampos keitiklio yra prijungtas komutuojamos galios elektroninis prietaisas „Control“, jo paskirtis- sinchronizuoti kintamą įtampą iš nuolatinės įtampos šaltinio. Nuolatinės įtampos atkarpoje yra prijungtas kondensatorius, jis veikia kaip nuolatinės srovės įtampos šaltinis. C_{grid} prijungimui prie tinklo yra naudojama induktyvi varža L . Trifazio rotoriaus apvija yra sujungta su C_{rotor} slydimo žiedais ir šepetėliais, trifazė statoriaus apvija yra tiesiogiai sujungta su tinklu. Vėjo turbina užfiksuota galia indukcinio generatoriumi paverčiama į elektros energiją, o statoriaus ir rotoriaus apvijomis ji perduodama į tinklą. Valdymo sistema „Control“ sukuria žingsnio kampo komandą ir įtampos komandinius signalus V_r ir V_{gc} , atitinkamai „Crotor“ ir

„Cgrid“, kad būtų galima valdyti vėjo turbinos galią, nuolatinės srovės magistralės įtampą ir reaktyviają galią arba įtampą tinklo gnybtuose [16]. Vėjo jėgainės parko parametrai parodyti 2.2 paveiksle.

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:	[10*2e6/1 575 50]
Stator [Rs, Lls] (pu):	[0.00706 0.171]
Rotor [Rr', Llr'] (pu):	[0.005 0.156]
Magnetizing inductance Lm (pu):	2.9
Inertia constant, friction factor, and pairs of poles [H(s), F(pu), p]:	[5.04 0.01 3]
Initial conditions [s, th(deg), Is(pu), ph_Is(deg), Ir(pu), ph_Ir(deg)]:	[0.01 0 0 0 0 0]
Nominal wind turbine mechanical output power (W):	10*2e6
Tracking characteristic speeds: [speed_A(pu) ... speed_D(pu)]	[0.7 0.71 1.2 1.21]
Power at point C (pu/mechanical power):	0.73
Wind speed at point C (m/s):	12
Pitch angle controller gain [Kp]:	500
Maximum pitch angle (deg):	45
Maximum rate of change of pitch angle (deg/s):	2

2.2 pav. Vėjo jėgainių parko generatoriaus ir turbinos parametrai.

Tyrimo metu keičiama nominali vėjo jėgainės parko ir turbinos galia. Pasirinktas vėjo jėgainės modelis turi vėjo greičio parinkimo gnybtą (wind), atjungimo pasiekus maksimalią galią elektrinėje gnybtą (trip), trifazio tinklo prijungimo gnybtus (A,B,C) ir jėgainių parametrų matavimo gnybtą (m). Prie matavimo gnybto prijungti aktyvios (scope2), reaktyvios (Scope3) ir pilnutinės (Scope4) galios matavimo prietaisai. Taip pat C_{rotor} (Scope5) ir C_{grid} (Scope6) įtampų matavimo prietaisai. Prie vėjo jėgainės greičio parinkimo gnybto prijungtas konstantos langelis (Constant8), kuriame keičiamas vėjo greitis sistemoje. Konstantos blokelis (Constant1) taip pat priskirtas prie atjungimo pasiekus maksimalią galią gnybto. Konstanta tyrimo metu parinkta 0, tai reiškia, kad vėjo jėgainių parkas neišsijunginės pasiekus maksimalią galią. Toks nustatymas pasirinktas norit sistemą ištirti kuo tiksliau. Prie trifazio tinklo gnybtų (A, B, C) yra prijungta apkrova (Ap02), kuri sistemoje atstoja vėjo jėgainių tinklo savąsias reikmes. Jos galia viso tyrimo metu 10kW. Prie trifazio tinklo gnybtų taip pat prijungtas įtampos ir srovės matavimo įrenginys (TA). Jis reikalingas stebėti į tinklą atiduodamą įtampą (UVE) ir srovę (IVE). Iš jo matavimo išėjimų išskaičiuojama pilnutinė galia (S), aktyvioji galia (P) ir reaktyvioji galia (Q2). Iš matavimų bloko trifazis tinklas sujungiamas su transformatoriumi (TG2.1). Transformatorius aukština įtampą gautą iš vėjo jėgainių 575V į 13,8kV. Transformatorius (TG2.1) sujungtas su kitu įtampą aukštinančiu transformatoriumi (TG2). Jis įtampą pakelia nuo 13,8kV iki 330kV. Tokiu būdu vėjo jėgainių parko sistema pasiruošusi sujungimui su bendra tinklo sistema. Vėjo jėgainių parko sistemos modelis pateikiamas paveiksle žemiau (2.3 pav.).



2.3 pav. Vėjo jėginių parko sistemos modelis.

2.2. Elektrinės G1 modeliavimas

Elektrinės G1 paskirtis yra generuoti pastovią ir nekintamą įtampą į tinklą. Dėl šios priežasties iš MATLAB/SIMULINK bibliotekos pasirenkamas sinchroninės mašinos blokas. Šis blokas veikia generatoriaus arba variklio režimu. Darbinį režimą diktuoja mechaninės galios ženklas (teigiamas generatoriaus režimui, neigiamas variklio režimui). Modelis atsižvelgia į statoriaus, lauko ir sklendės apvijų dinamiką. Rotoriaus parametrai ir elektriniai dydžiai yra žiūrimi iš statoriaus parametrų [17]. Generatoriaus G1 parametrai parodyti žemiau (2.4 pav.).

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]: [190E6 13800 50]

Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl] (pu): [1.305, 0.296, 0.252, 0.474, 0.243, 0.18]

Time constants

d axis: Open-circuit

q axis: Short-circuit

[Tdo' Tdo'' Tq''] (s): [4.49 0.0681 0.0513]

Stator resistance Rs (pu): 0.003

Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]: [3.7 0 20]

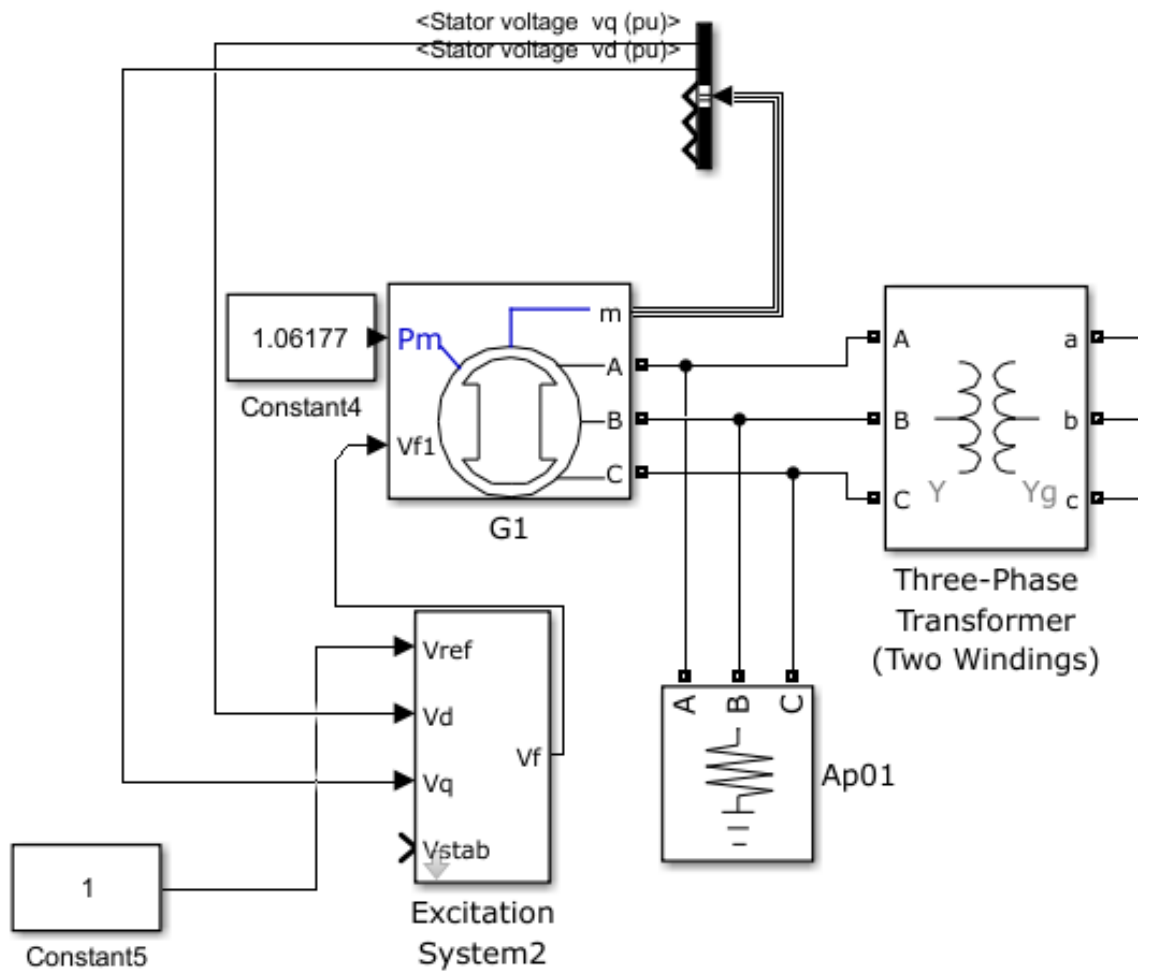
Initial conditions [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]: [25.75 114.25 1.62473]

Simulate saturation Plot

[ifd; vt] (pu): [56,1.082,1.19,1.316,1.457;0.7,0.7698,0.8872,0.9466,0.9969,1.046,1.1,1.151,1.201]

2.4 pav. Generatoriaus G1 parametrai.

Pasirinktas generatoriaus G1 blokas turi matavimų išėjimo gnybtą (m), trifazio tinklo pajungimo gnybtus (A, B, C), mašinos sukimosi greičio reguliavimo gnybtą (Pm) ir įtampos – srovės reguliavimo gnybtą (Vf1). Iš generatoriaus matavimo gnybto išduodami greičio parametrai surenkami žadinimo sistemos bloke (Excitation System2). Taip pat į žadinimo sistemos bloko, norimos įtampos gnybtą (Vref), yra prijungtas konstantos blokas su reikšme 1. Tai reiškia jog nominali generatoriaus įtampa bus palaikoma generatoriuje nustatytų parametru. Žadinimo sistemos blokas prijungtas į sinchroninės mašinos žadinimo apviją (Vf1) Prie generatoriaus greičio reguliavimo gnybto yra priskirtas konstantos blokas (Constant4), kurio nominalus nustatymas yra 1.06177. Greičio reguliavimo nustatymas yra parinktas pagal MATLAB/SIMULINK aprašymų rekomendacijas. Generatoriaus G1 trifazio tinklo gnybtai prijunkti prie apkrovos bloko (Ap01). Šis blokas simbolizuoja savąsias generatoriaus reikmes ir jo apkrova yra 10kW Lygiagrečiai apkrovai yra prijungtas transformatorius, kuris kelia įtampą nuo 13.8kV iki 330kV. Žemiau pavaizduotas elektrinės G1 modelis (2.5 pav.).



2.5 pav. Elektrinės G1 modelis.

2.3. Elektrinės G3 modeliavimas

Elektrinės G3 paskirtis yra subalansuoti tinklo įtampą ir palaikyti stabilų dažnį sistemoje. Pagrindiniu sistemos elementu parenkamas sinchroninės mašinos blokas iš MATLAB/SIMULINK bibliotekos. Jis parenkamas toks pat kaip ir generatoriaus G1. Generatoriaus G3 parametrai parodyti žemiau (2.6 pav.).

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]: [190E6 13800 50]

Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl] (pu): [1.305, 0.296, 0.252, 0.474, 0.243, 0.18]

Time constants

d axis: Open-circuit

q axis: Short-circuit

[Tdo' Tdo'' Tq''] (s): [4.49 0.0681 0.0513]

Stator resistance Rs (pu): 0.003

Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]: [3.7 0 20]

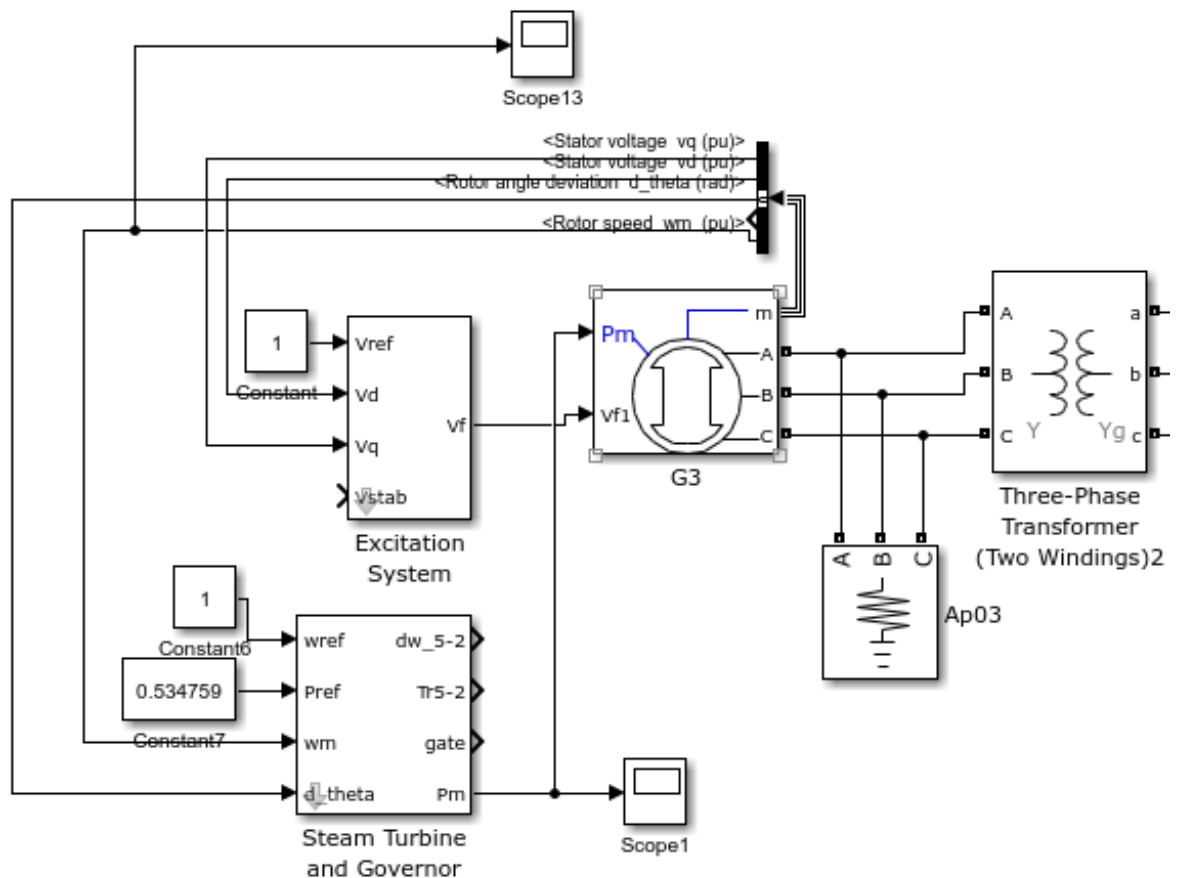
Initial conditions [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]: [541 108.459 1.23258]

Simulate saturation Plot

[ifd; vt] (pu): [56,1.082,1.19,1.316,1.457;0.7,0.7698,0.8872,0.9466,0.9969,1.046,1.1,1.151,1.201]

2.6 pav. Generatoriaus G3 parametrai.

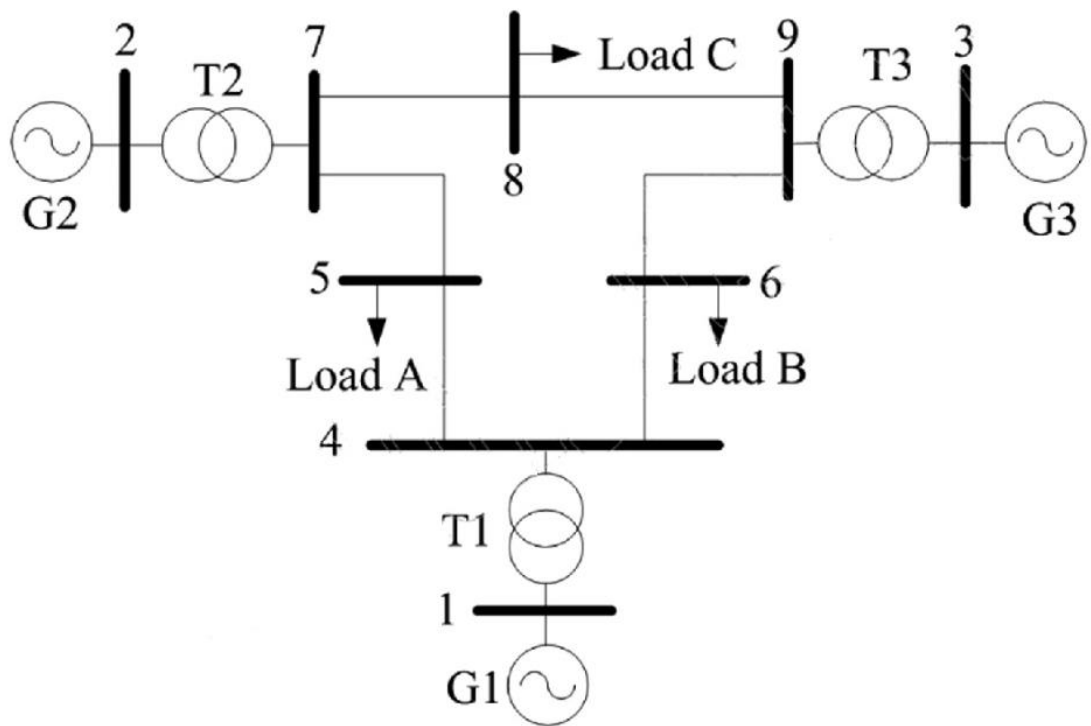
Ši sistema reikalauja daugiau komponentų nei elektrinė G1. Iš sinchroninės mašinos matavimo gnybto išduodami statoriaus įtampos, rotoriaus sukimosi kampo ir jo sukimosi greičio matavimai. Statoriaus įtampos matavimai perduodami į žadinimo sistemos bloką (Excitation System). Į žadinimo sistemos bloko, palaikomos įtampos gnybtą (V_{ref}), yra prijungtas konstantos blokas su reikšme 1. Tai reiškia jog nominali generatoriaus įtampa bus palaikoma generatoriuje nustatytų parametru. Žadinimo sistemos blokas prijungtas į sinchroninės mašinos žadinimo apviją (V_{f1}) Rotoriaus sukimosi kampo ir jo sukimosi greičio matavimai perduodami į greičio reguliavimo sistemos bloką. Rotoriaus sukimosi greitis yra matuojamas lygiagrečiai prie sistemos prijungtu matavimo įrenginiu (Scope13). Jis parodo rotoriaus sukimosi greiti ir dažnį sistemoje. Prie greičio reguliavimo sistemos norimo greičio gnybto (w_{ref}) yra prijungtas konstantos blokas su nustatymu 1. Jis nurodo, kad įtampa sistemoje turi būti artima generatoriaus nominaliai nustatytai įtampai. Prie greičio reguliavimo bloko mažiausio galimo greičio gnybto (P_{ref}) yra prijungta konstanta su reikšme 0,534759. Ši reikšmė parinkta pagal MATLAB/SIMULINK bibliotekos rekomendacijas. Greičio reguliavimo sistemos blokas sujungtas su sinchroninės mašinos greičio reguliavimo gnybtu. Taip pat lygiagrečiai prijungtas matavimo blokas, kuris parodo greičio reguliavimo sistemos parametrus. Generatoriaus G3 trifazio tinklo gnybtai prijungti prie apkrovos bloko (Ap03). Šis blokas simbolizuoja savąsias generatoriaus reikmes ir jo apkrova yra 10kW Lygiagrečiai apkrovai yra prijungtas transformatorius, kuris kelia įtampą nuo 13.8kV iki 330kV. Žemiau pavaizduotas elektrinės G3 modelis (2.7 pav.).



2.7 pav. Elektrinės G3 modelis.

2.4. Elektros energijos perdavimo sistemos modeliavimas

Elektros energijos sistemos pagrindu pasirenkamas tarptautinis, elektros ir elektronikos instituto, 9 mazgų modelis („IEEE 9 bus system“). Modelį sudaro trys energijos šaltiniai ir trys apkrovos. IEEE 9 mazgų modelyje visos apkrovos turi maitinimą iš dviejų pusių. Trumpojo jungimo metu pažeista linija yra atjungiama ir vartotojams toliau tiekiamas elektros energija, sistema yra atspari vieno elemento atsijungimui. IEEE 9 mazgų modelis pavaizduotas žemiau (2.8 pav.) [18]



2.8 pav. IEEE 9 mazgų sistemos modelis.

MATLAB/SIMULINK programoje, nustatymų bloke (powergui) parenkamas sistemos skaičiavimo tipas „Phasors“. Šis skaičiavimo metodas visus sistemos parametrus rodo santykiniais vienetais, išskyrus įtampą. Jį pateikiama kaip vienos fazės amplitudinė įtampa. Perskaičiuojant įtampą į fazinę, reikia gautus parametrus padalinti iš šaknis iš dviejų ir ją padauginti iš šaknis iš trijų. Nustatymų bloko (powergui) parametrai pateikti žemiau (2.9 pav.).

- Disable Simscape Power Systems ST warnings
- Display Simscape Power Systems ST compilation messages
- Use TLC file when in Accelerator Simulation Mode and for code generation

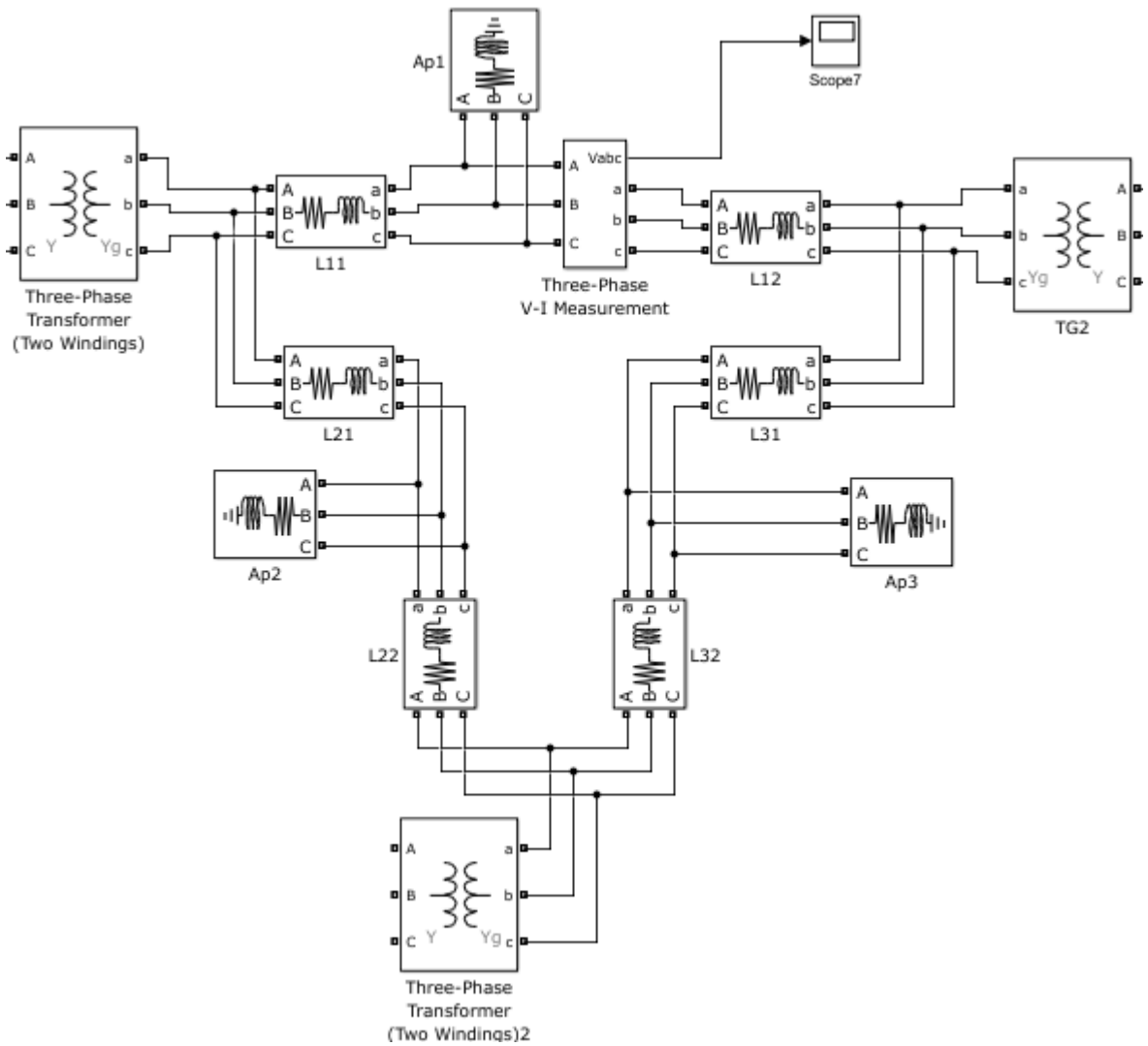
Start simulation with initial electrical states from: blocks

Load Flow

Frequency (Hz): <input style="width: 80%;" type="text" value="50"/>	Base power (VA): <input style="width: 80%;" type="text" value="100e6"/>
PQ tolerance (pu): <input style="width: 80%;" type="text" value="1e-4"/>	Max iterations: <input style="width: 80%;" type="text" value="50"/>
Voltage units: kV	Power units: MW

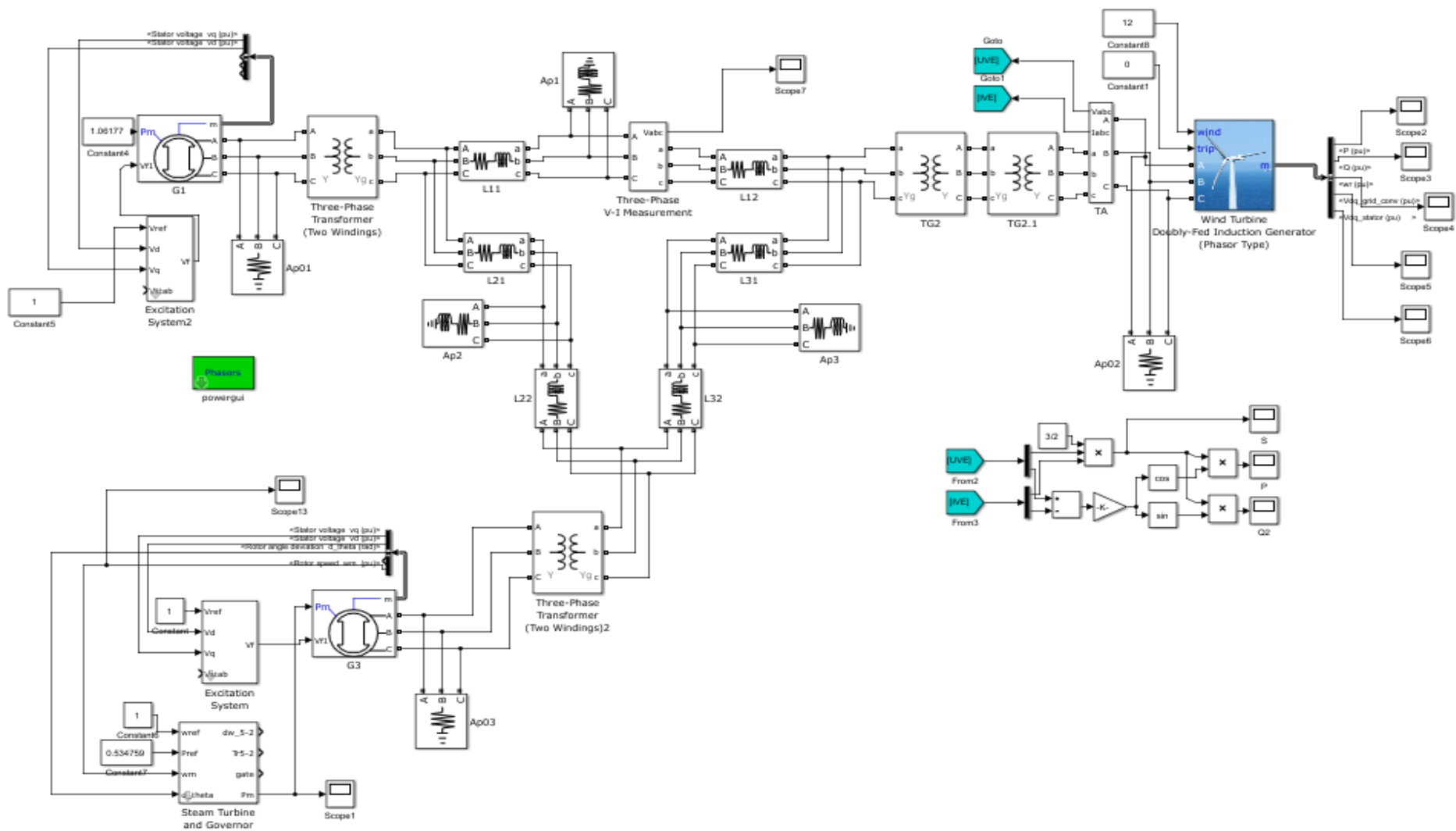
2.9 pav. Nustatymų bloko (powergui) parametrai.

Modeliuojant elektros energetikos sistemą pasitelkiamos visos aukščiau sumodeliuotos sistemos. Jos sujungiamos su žemiau pavaizduotu perdavimo tinklu (2.10 pav.).



2.10 pav. Elektros perdavimo tinklas su apkrovomis.

Paveiksle aukščiau (2.10) pavaizduotas perdavimo tinklas su apkrovomis. Prie trifazio transformatoriaus (Three-Phase Transformer (Two Windings)) iš žemos įtampos pusės prijungtas G1 sistemos modelis, o prie aukštos įtampos prijungtos dvi lygiagrečios linijos (L11 ir L21). Prie linijos (L11) prijungta apkrova (Ap1) ir lygiagrečiai jai prijungtas trifazis įtampos ir srovės matavimo blokas (Three-Phase V-I Measurement). Prie matavimo bloko įtampos išėjimo gnybto yra prijungtas matavimo įrenginys (Scope7). Jis rodo sistemoje vyraujančią įtampą. Trijų fazių matavimo blokas taip pat prijungtas prie linijos (L12). Linija (L12) yra sujungta su transformatoriumi TG2 ir lygiagrečia linija (L31). Prie transformatoriaus (TG2) žemos įtampos gnybtų yra prijungiamas aukščiau sumodeliuotas vėjo jėgainių parkas. Aukštos įtampos perdavimo linija (L31) yra sujungta su apkrova (Ap3) ir su linija (L32). Linija (L32) yra sujungta su linija (L22) ir su trifaziu generatoriumi (Three-Phase Transformer (Two Windings)2). Prie transformatoriaus kitos pusės yra prijungta aukščiau sumodeliuota generatoriaus G3 sistema. Linija (L22) yra sujungta su apkrova (Ap2) ir su aukščiau jau paminėta linija (L21). Pilnas elektros energijos sistemos modelio paveikslas pavaizduotas žemiau (2.11 pav.).



2.11 pav. IEEE 9 mazgų sistemos modelis su vėjo jėgainių parku.

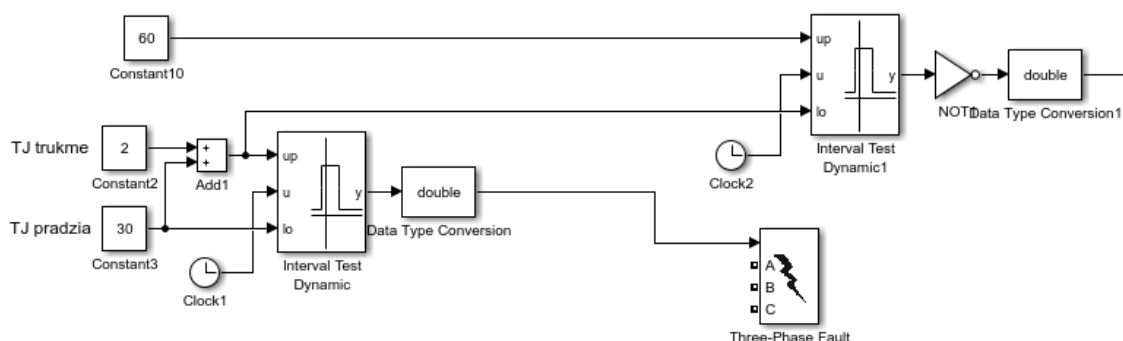
2.5. Elektros energijos perdavimo sistemos su trumpuoju jungimu modeliavimas

Sistemai veikiant normaliomis darbo sąlygomis, trumpasis jungimas išbalansuoja energetinę sistemą. Vienfazio trumpojo jungimo metu įtampa ir srovė sistemoje persiskirsto tarp nepažeistų fazių, o trifazio t. j. metu įtampa trumpojo jungimo vietoje nukrenta arti nulio voltų [21]. Sumodeliuotas trumpojo jungimo režimas geriau padės atskleisti temos aktualumą.

Modeliuojant perdavimo sistemą su trumpuoju jungimu pasitelkiama aukščiau sumodeliuota sistema (žr. 2.11 pav.). Prie sistemos per skyriklį (Tree-Phase Breaker2) papildomai prijungiama apkrova (Ap4). Jos pagrindinis tikslas pagreitinti sistemos nusistovėjimo procesus ir jos veikimo laikas yra 1 sekundė nuo sistemos modeliavimo pradžios. Sistemoje yra pridėti 2 papildomi įtampos ir srovės matavimo įrenginiai. Pirmasis (Three-Phase V-I Measurement2) įtampos ir srovės matavimo įrenginys yra prijungtas prie elektrinės G1 transformatoriaus išėjimo gnybtų. Antrasis (Three-Phase V-I Measurement1) prijungtas prie vėjo jėgainių parko transformatoriaus (TG2) išėjimo gnybtų. Tarp linijos (L11) ir matavimo bloko (Three-Phase V-I Measurement) yra sumodeliuotas trifazis jungtuvas (TreePhase Breaker1). Antras trifazis jungtuvas (TreePhase Breaker) yra sumodeliuotas tarp linijos (L12) ir linijos (L31). Jungtuvų paskirtis yra izoliuoti trumpojo jungimo vietą (Three-Phase Fault), kuri lygiagrečiai prijungta prie jungtuvo (TreePhase Breaker1) ir matavimo įrenginio (Three-Phase V-I Measurement) gnybtų.

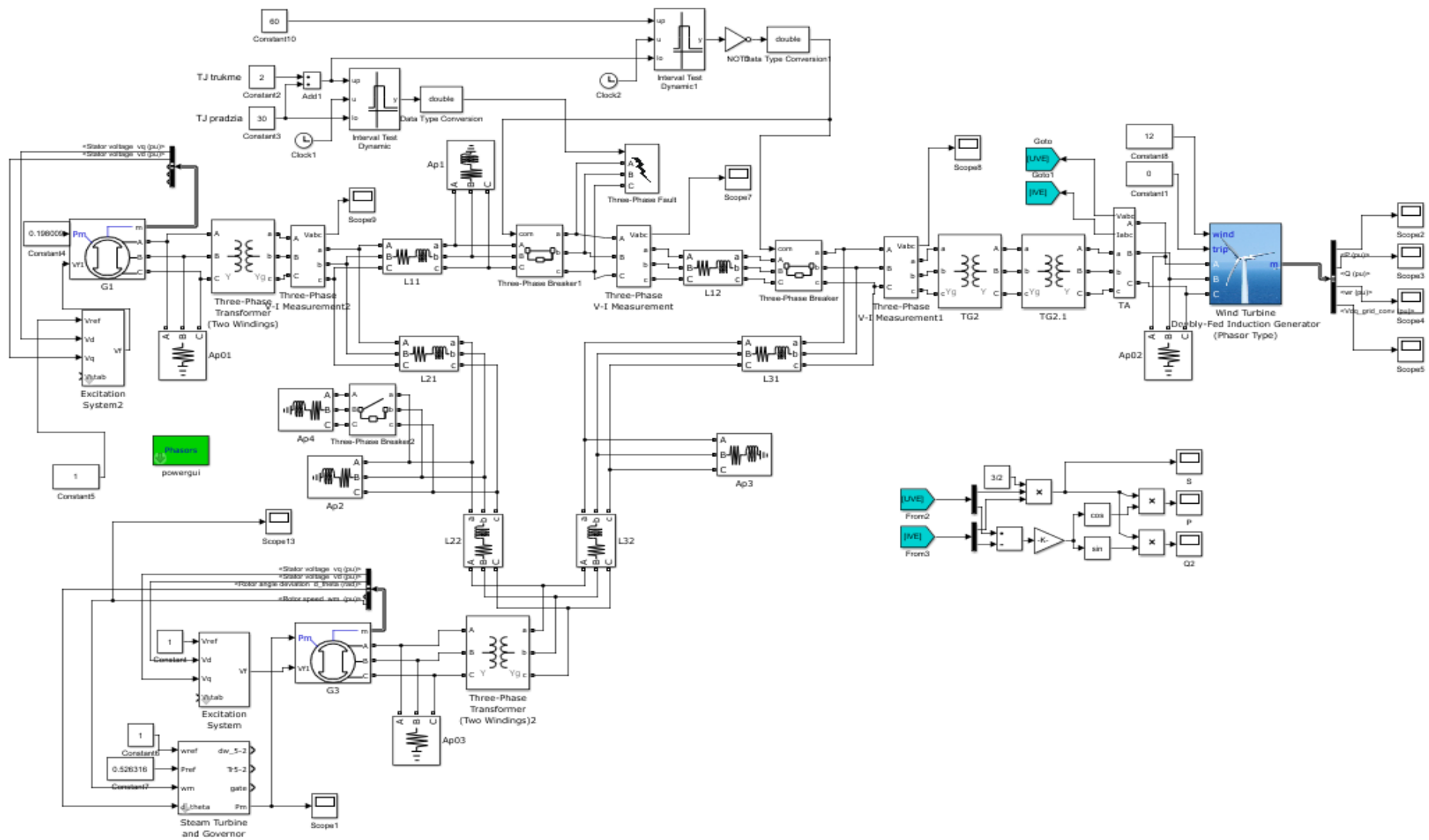
Trumpojo jungimo modelis susideda iš t. j. pradžios konstantos bloko (Constant3), t. j. trukmės konstantos bloko (Constant2), tyrimo trukmės konstantos bloko (Constant10), suminio elemento (Add1), laikrodžių blokų (Clock ir Clock2), intervalinių bandymų blokų (Interval Test Dynamic ir Interval Test Dynamic1), loginės operacijos bloko (Not) ir duomenų konvertavimo bloko (Data Type Conversion).

Trumpasis jungimas prasideda pasiekus t. j. konstantos bloke įrašytai reikšmei. Jis trunka t.j. trukmės bloke nustatytą laiką. Laikui pasibaigus signalas perduodamas į jungtuvus ir t. j. vieta atskiriama nuo bendros sistemos. Loginėje sistemoje naudojami vienetai neatitinka sistemoje naudojamų duomenų, dėl šios priežasties naudojami duomenų konvertavimo blokai. Trumpojo jungimo modelis pavaizduotas žemiau (2.12 pav.).



2.12 pav. Trumpojo jungimo modelis.

Elektros energijos perdavimo sistemos su trumpuoju jungimu modelis pavaizduotas žemiau (2.13 pav.).

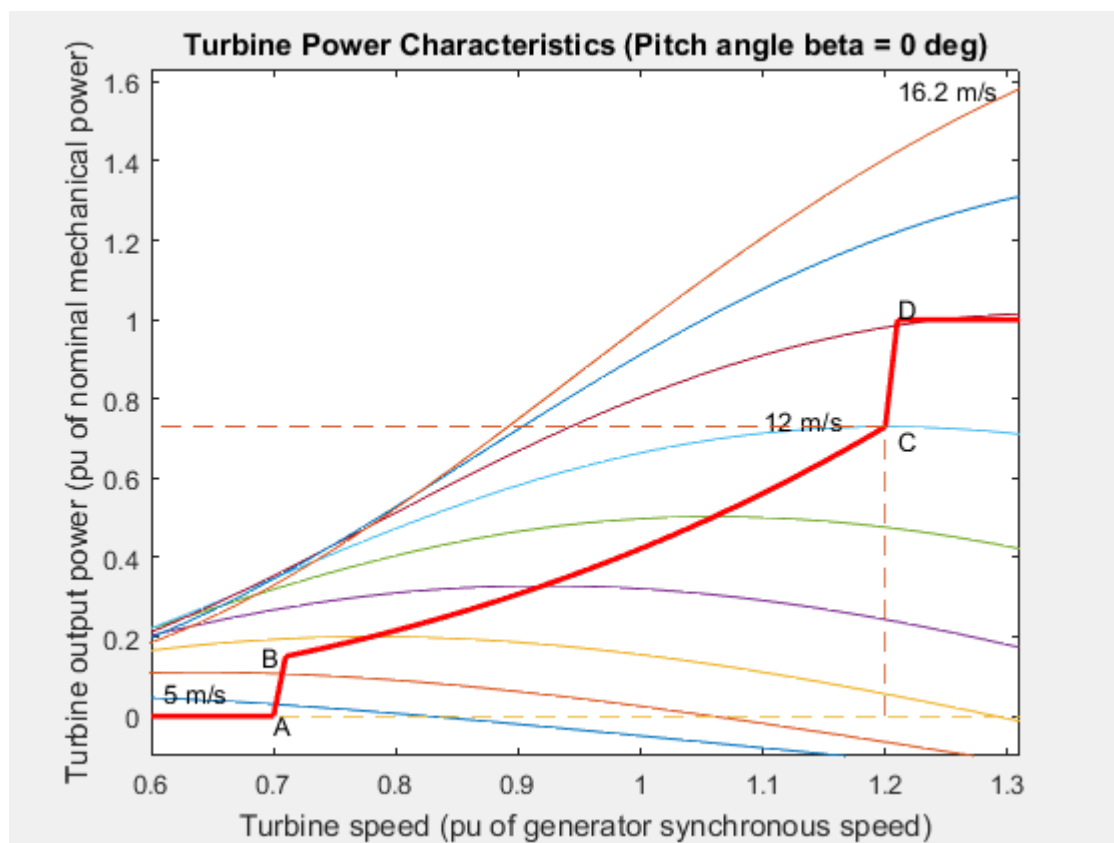


2.13 pav. IEEE 9 mazgu perdavimo tinklo su trumpuoju jungimu sistemoje modelis.

3. Energetinės sistemos su vėjo jėgainių parku tyrimas

3.1. Sistemos priklausomybės nuo vėjo greičio tyrimas

Tyrimas atliekamas, keičiant pastovų vėjo greitį vėjo jėgainių parke ir stebint sistemoje pasikeičiančius parametrus. Sistemą sudaro trys elektros energijos šaltiniai ir šešios skirtingose sistemos vietose išdėliotos apkrovos. Generatorius G1 stabiliai tiekia elektros energiją į tinklą, nepriklausomai nuo sistemoje esančios įtampos ar jos dažnio. Generatorius G3 stebi sistemoje vyraujančius pokyčius ir palaiko sistemos stabilumą. Taip pat sistemoje elektros energiją generuoja vėjo parkas, kurio generuojama galia priklauso nuo vėjo greičio. MATLAB/SIMULINK programoje yra išduodama vėjo jėgainės generuojamos galios nuo vėjo greičio charakteristika (3.1 pav.).



3.1 pav. Vėjo jėgainės generuojamos galios priklausomybės nuo vėjo greičio charakteristika.

Iš vėjo jėgainės generuojamos galios priklausomybės nuo vėjo greičio charakteristikoje matyti, kad elektros energijos gamyba prasideda nuo 7 m/s vėjo greičio ir, esant pastoviam vėjo greičiui, jėgainė generuoja 0,18 nominalios jėgainės galios. Vėjo greičiui augant, generuojama galia taip pat didėja. Pasiėkus 12 m/s vėjo greitį, jėgainė generuoja 0,73 nominalios elektrinės galios. Pilnutinė jėgainės galia išvystoma pučiant stipresniam nei 12 m/s vėjo greičiui. Tyrimo metu nustatyti parametrai pateikiami lentelėje (3.1 lentelė).

3.2 lentelė. Elektros energijos sistemos šaltinių ir apkrovų nustatymai

Sistemos galios šaltiniai		Sistemos apkrovos	
Šaltinio pavadinimas	Galia, MW	Apkrovos pavadinimas	Apkrova, MW
Generatorius 1 (G1)	187	Apkrova 1 (Ap1)	100

Generatorius 2 (G3)	187	Apkrova 2 (Ap2)	100
Vėjo jėgainės	10*1.5=15	Apkrova 3 (Ap3)	100
		Apkrova 4 (Ap01)	0.01
		Apkrova 5 (Ap02)	0.01
		Apkrova 6 (Ap03)	0.01
Iš viso:	389	Iš viso:	300.03

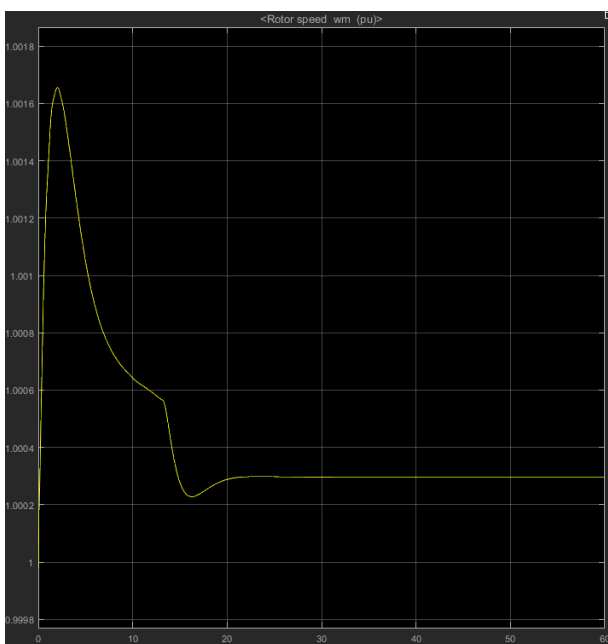
Tyrimo metu vėjo jėgainių parką sudaro dešimt identiškų vėjo jėgainių, todėl pilnutinė vėjo jėgainių parko galia gaunama sudauginus jų kiekį su vienos jėgainės nominalia galia. Sistemos stabilumas išlaikomas įdiegus 23% daugiau nominalios galios nei reikalauja apkrovos. Tyrimo laikas 60 sekundžių.

Tyrimo rezultatai parodė, kaip keitėsi vėjo jėgainių generuojama galia priklausomai nuo vėjo greičio. Rezultatai pateikiami lentelėje žemiau (3.2 lentelė).

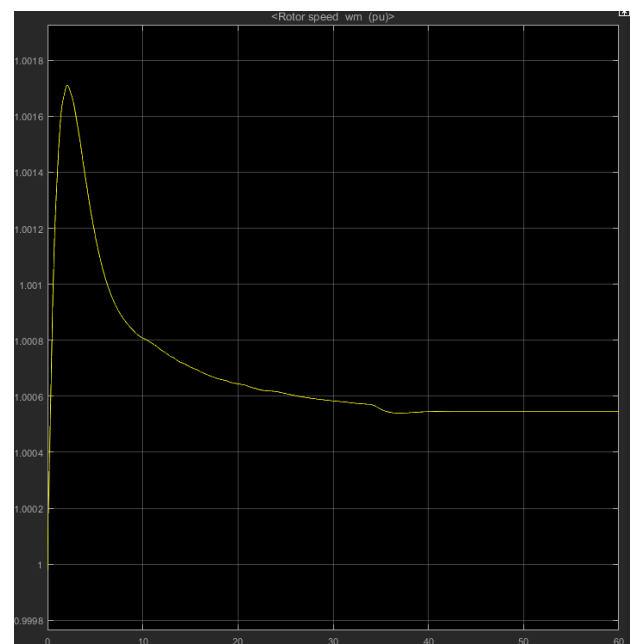
3.2 lentelė. Vėjo jėgainių generuojamos galios priklausomybė nuo vėjo greičio

Vėjo greitis, m/s	6	7	8	9	10	11	12	13
Vėjo jėgainių generuojama galia, santykiniais vienetais	0,00	0,14	0,21	0,31	0,42	0,56	0,73	1,00
Realiai nusistovėjusi galia, MW	0.00	2,10	3,15	4,65	6,30	8,40	10.95	15,00

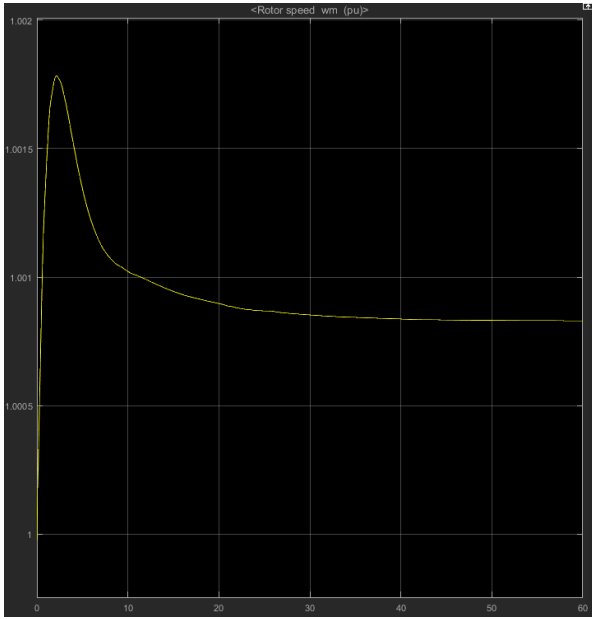
Tyrimo metu nustatyta, kad įtampa sistemoje lieka stabili ir žymiai nekinta. Įtampos stabilumą palaiko generatorius G3. Generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greitis kinta priklausomai nuo vėjo jėgainių galios generavimo į sistemą. Žemiau pateikiami generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greičiai, priklausomai nuo vėjo greičio vėjo jėgainėse.



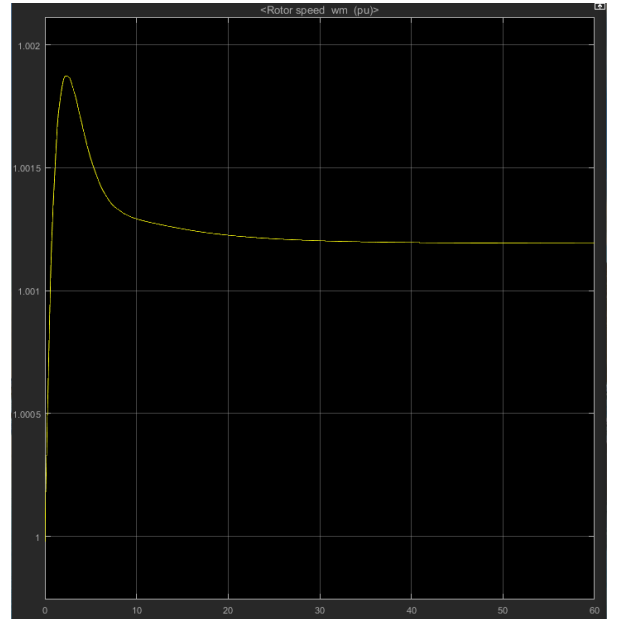
6m/s



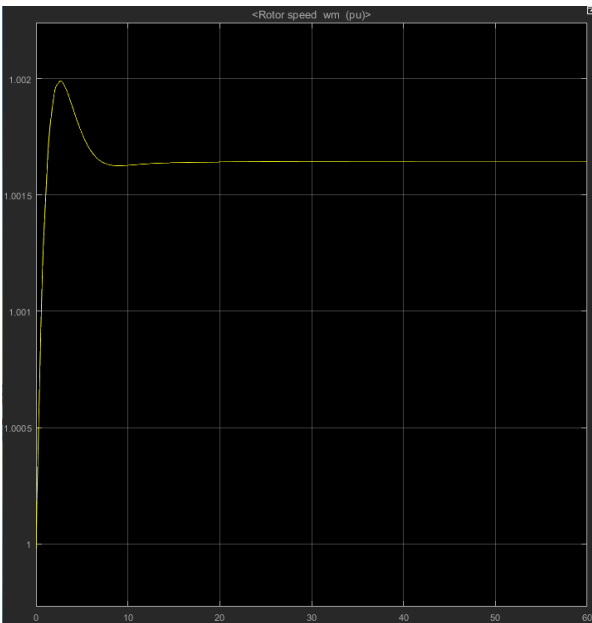
7m/s



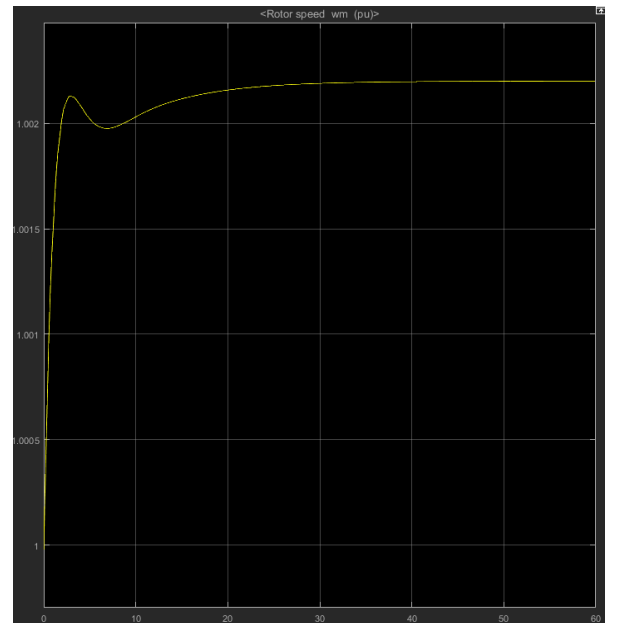
8m/s



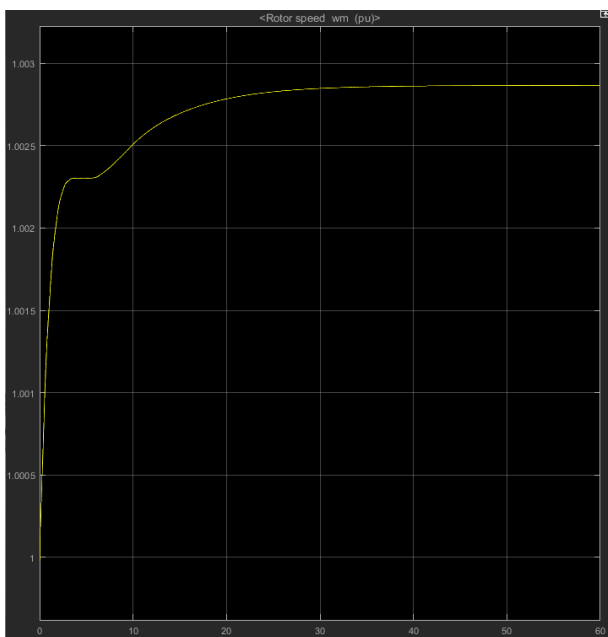
9m/s



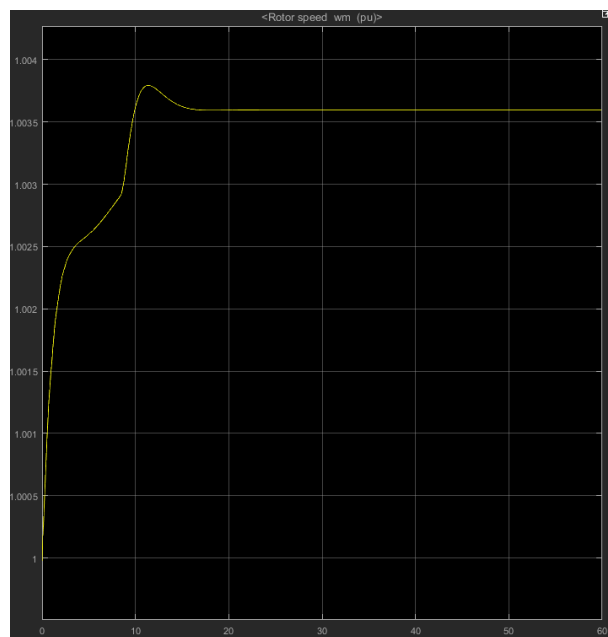
10m/s



11m/s



12m/s



13m/s

3.2 pav. Generatoriaus G3 sukimosi greičio priklausomybė nuo vėjo greičio vėjo jėginių parke.

Aukščiau pateiktame paveiksle (3.2 pav.) atvaizduotas generatoriaus G3 sukimosi greitis vis daugiau galios sistemoje generuojant iš vėjo jėginių parko. Diagramose x ašis yra sistemos veikimo laikas, o y ašis generatoriaus sukimosi greitis.

Iš aukščiau pateiktų grafikų matyti, kad generatorius G3 reaguoja į pasikeitusį vėjo greitį vėjo jėgainėse. Grafikuose matyti sistemos dažnio stabilizavimo procesas. Maksimalius ir nusistovėjusius rotoriaus sukimosi greičius santykiniais vienetais galima matyti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Generatoriaus G3 maksimalaus ir nusistovėjusio rotoriaus sukimosi greičio, santykiniais vienetais, priklausomybė nuo vėjo greičio

Vėjo greitis, m/s	6	7	8	9	10	11	12	13
Maksimalus rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	1,0016	1,0017	1,0018	1,0018	1,0020	1,0023	1,0028	1,0037
Nusistovėjęs rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	1,0003	1,0005	1,0007	1,0013	1,0017	1,0023	1,0028	1,0036

Lentelėje pateikti duomenys byloja, kad vėjo jėginių generuojama elektros energija daro įtaką energijos sistemai. Kuo daugiau vėjo jėginių parkas pagamina elektros energijos, tuo greičiau sukasi generatorius G3, didindamas dažnį ir tokiu būdu stabilizuodamas sistemos dažnį. Šio tyrimo metu nustatyta, jog sistemos dažnis priklauso nuo vėjo stiprumo vėjo jėginių parke.

3.2. Sistemos priklausomybės nuo vėjo jėginių parko galios tyrimas

Atlikto tyrimo metu nagrinėjama vėjo jėginių parko galios įtaka elektros energijos sistemai. Tyrime tolygiai mažinamos generatorių nominalios galios, tuo pačiu metu didinant vėjo parko nominalią galią. Tyrimas atliekamas nustačius pastovų 12 metrų per sekundę vėjo greitį. Apkrovos sistemoje paskirstytos tolygiai ir yra nekintamos. Apkrovų parametrai pateikiami 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Sistemos apkrovų nustatymai

Sistemos apkrovos	
Apkrovos pavadinimas	Apkrova
Apkrova 1 (Ap1)	100MW
Apkrova 2 (Ap2)	100MW
Apkrova 3 (Ap3)	100MW
Apkrova 4 (Ap01)	0.01MW
Apkrova 5 (Ap02)	0.01MW
Apkrova 6 (Ap03)	0.01MW
Iš viso:	300.03MW

Pirmojo bandymo metu sistemos generatorių ir vėjo jėginių nustatytos galios keičiamos proporcingai, neatsižvelgiant į vėjo jėginių parko gaminamą energijos kiekį. Vėjo jėginių parkas dirba ne pilnu pajėgumu, todėl reali galia yra 0,73 karto mažesnė nei nurodoma generatoriaus nustatymuose. Vėjo jėginių parką sudaro 10 jėginių ir jų galia keičiama kartu. Generatorių G1 ir G3 nominalios galios yra identiškos ir tyrimo metu keičiamos tolygiai. Nustatytų generatorių ir vėjo jėginių galios parodytos lentelėje 3.5.

3.5 lentelė. Sistemos elektrinių galia

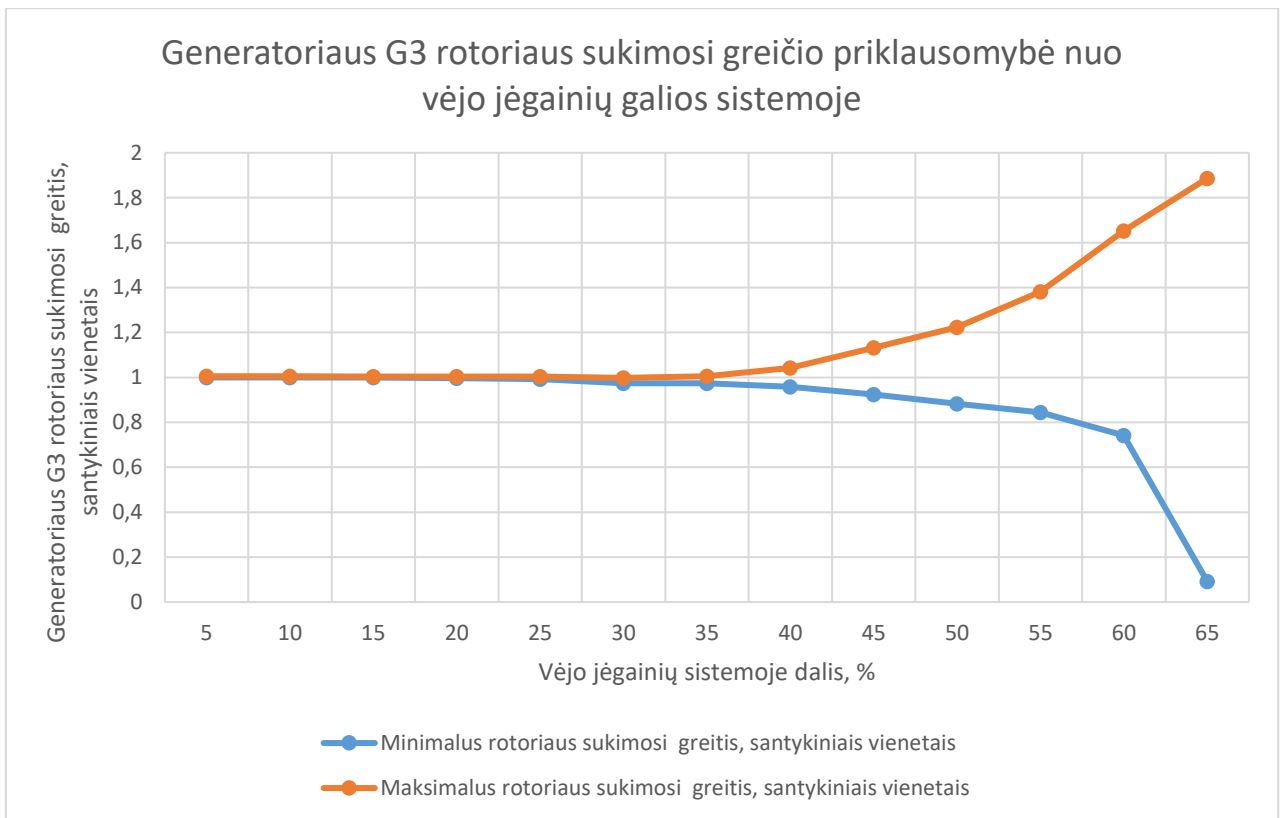
Vėjo jėginių sistemoje dalis, %	Vėjo jėginių nustatyta galia, MW	Vėjo jėginių reali galia, MW	Generatorių G1 ir G3 kombinuota galia, MW
5	20	14,6	380
10	40	29,2	360
15	60	43,8	340
20	80	58,4	320
25	100	73,0	300
30	120	87,6	280
35	140	102,2	260
40	160	116,8	240
45	180	131,4	220
50	200	146,0	200
55	220	160,6	180
60	240	175,2	160
65	260	189,8	140

Atlikto tyrimo laikas yra 60 sekundžių nuo sistemos paleidimo. Tyrimo metu vertinamas sistemos įtampos stabilumas, generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greitis ir vėjo jėginių parko atiduotos įtampos stabilumas. Generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greičio priklausomybė nuo vėjo jėginių galios sistemoje pateikiama 3.6 lentelė.

3.6 lentelė. Generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greičio priklausomybė nuo vėjo jėgainių galios sistemoje

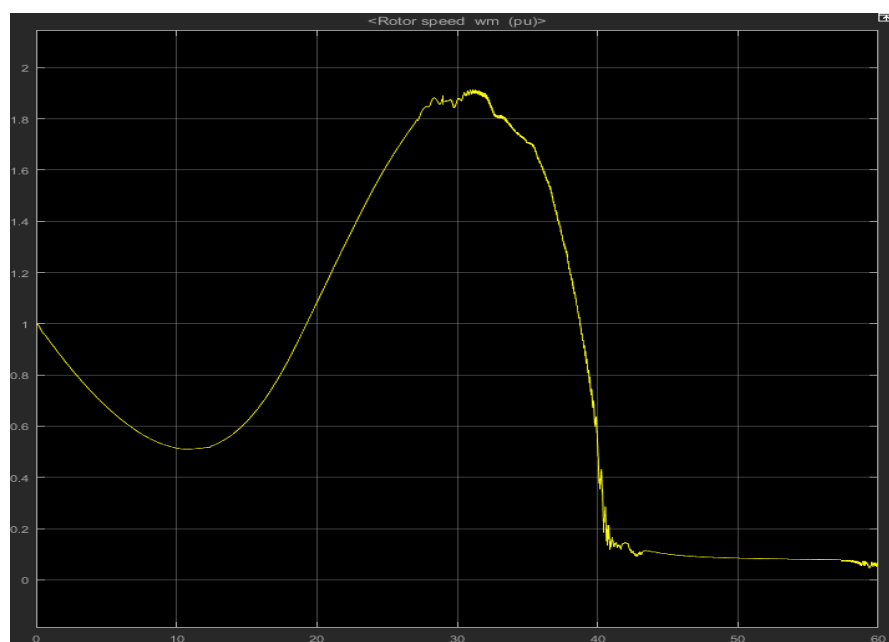
Vėjo jėgainių sistemoje dalis, %	Minimalus rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	Maksimalus rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	Nusistovėjęs rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	Sistemos nusistovėjimo laikas, s
5	1,0000	1,0051	1,0051	30
10	1,0000	1,0048	1,0048	46
15	0,9995	1,0045	1,0045	43
20	0,9967	1,0043	1,0043	48
25	0,9930	1,0040	1,0040	48
30	0,9743	0,9980	0,9980	46
35	0,9740	1,0060	1,0040	40
40	0,9580	1,0420	1,0040	43
45	0,9240	1,1320	nusistovėjęs	nusistovėjęs
50	0,8830	1,2230	nusistovėjęs	nusistovėjęs
55	0,8450	1,3820	nusistovėjęs	nusistovėjęs
60	0,7418	1,6520	nusistovėjęs	nusistovėjęs
65	0,0923	1,8860	nusistovėjęs	nusistovėjęs

Lentelės duomenys rodo rotoriaus sukimosi greičio priklausomybę nuo vėjo jėgainių galios sistemoje. Kuo daugiau sistemoje elektros energijos yra gaminama iš vėjo jėgainių parko, tuo didesnis sukimosi diapazonas generatoriuje (žr. 3.9 pav.). Taip pat pastebėta, kad nuo 45 procentų vėjo jėgainių galios sistemoje, generatorius G3 nepajėgia kompensuoti sistemos tinklo ir sistema per 60 sekundžių nusistovėjęs. Nusistovėjęs sistema reiškia normų neatitinkantį sistemos darbą. Tokia sistema perduos netinkamą elektros energiją vartotojams. Sistemoje, pasiekus 65 procentus generuojamos galios iš vėjo parko elektrinių, sistema sutrinka ir destabilizuojasi.



3.3 pav. Generatoriaus G3 rotoriaus sukimosi greičio priklausomybės, nuo vėjo jėginių galios sistemoje, diagrama.

Grafike aukščiau vaizdžiai perteikta generatoriaus G3 sukimosi greičio priklausomybė nuo vėjo jėginių galios sistemoje. Iš grafiko matyti, kad maksimalaus ir minimalaus rotoriaus sukimosi greičiai atsiskiria ties 25 procentų tašku. Jų atotrūkis didėja, didinant vėjų jėginių dalį sistemoje. Nuo 45 procentų taško sistema nenusistovi per 60 sekundžių ir tampa nepatikima. Padidinus vėjo jėginių įtaką sistemai iki 65 procentų, sistema nepajėgi stabilizuotis ir sugriūna. Tai parodyta 3.4 paveiksle (3.4pav.).



3.4 pav. Generatoriaus G3 sukimosi greitis, prie 65 procentų vėjo jėginių galios sistemoje.

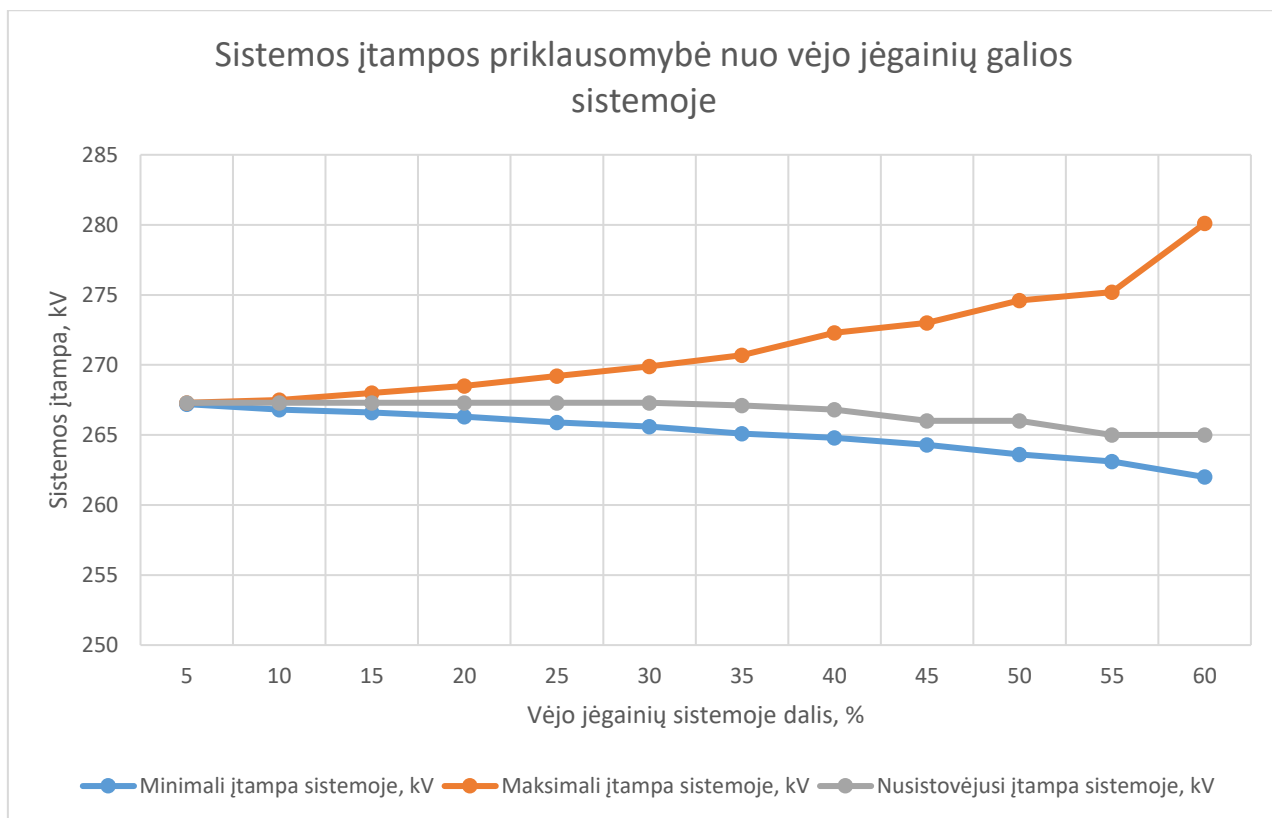
Paveiksle 3.4 parodytas generatoriaus G3 sukimosi greitis, esant 65 procentams sistemoje, vyraujant vėjo jėgainėms. Paveiksle 3.4 x ašis yra sistemos veikimo laikas, o y ašis generatoriaus sukimosi greitis. Tyrimui prasidėjus, sistema reikalavo daugiau galios nei energijos šaltiniai galėjo tiekti į sistemą. Generatoriaus sukimosi greitis sumažėjo iki 0,53 nominalaus greičio. Vėjo jėgainėms pradėjus tiekti vis daugiau galios į sistemą, generatoriaus greitis pradėjo stabilizuotis. Vis daugiau galios į sistemą gaunant iš vėjo jėgainių parko, generatorius G3 stengiasi stabilizuoti įtampą tinkle, bet, 28 sekundę, pasiekus maksimalią generuojamą galią iš vėjo elektrinių parko, generatorius pradeda mažinti apsukas. Mažindamas apsukas, generatorius G3 padaro įtampos šuolį sistemoje ir vėjo jėgainių galios nestabilumą. Sistema tampa nekontroliuojama ir įtampa joje pradeda šokinėti. Sistemai tapus nevaldomai, generatoriaus G3 apsukos nukrenta arti nulio ir daugiau neatsistato.

Žemiau pateikta tyrimo metu gautos įtampos sistemoje rezultatai (3.7 lentelė).

3.7 lentelė. Sistemos įtampos priklausomybė nuo vėjo jėgainių galios sistemoje

Vėjo jėgainių sistemoje dalis, %	Minimali įtampa sistemoje, kV	Maksimali įtampa sistemoje, kV	Nusistovėjusi įtampa sistemoje, kV	Nusistovėjusi fazinė įtampa sistemoje, kV	Nusistovėjusios įtampos laikas, s
5	267,2	267,3	267,3	327,4	1
10	266,8	267,5	267,3	327,4	2,6
15	266,6	268,0	267,3	327,4	6
20	266,3	268,5	267,3	327,4	7,1
25	265,9	269,2	267,3	327,4	18,2
30	265,6	269,9	267,3	327,4	25
35	265,1	270,7	267,1	327,1	25
40	264,8	272,3	266,8	326,7	29
45	264,3	273,0	266-267	325,8-327,0	nenusistovi
50	263,6	274,6	266-267	325,8-327,0	nenusistovi
55	263,1	275,2	265-266	324,6-325,8	nenusistovi
60	262,0	280,1	265-266	324,6-325,8	nenusistovi
65	0	2561,5	nenusistovi	nenusistovi	nenusistovi

Lentelėje (3.6 lentelė) parodyti įtampos kitimo nuo vėjo jėgainių galios sistemoje rezultatai. Rezultatuose matyti nusistovėjusios įtampos laikas. Jis didėja priklausomai nuo vėjo jėgainių parko galios. Sistemoje, esant 5 procentams vėjo jėgainių galios, sistema stabilizuojasi po 1 sekundės nuo tyrimo pradžios. Sistemoje, naudojant 45 procentus ir daugiau galios iš vėjo parko, sistema per 60 sekundžių tyrimo laiko nenusistovi. O, pasiekus 65 procentus galios, sistema destabilizuojasi. Minimalios ir maksimalios įtampos iš lentelės duomenų perteiktos diagramoje žemiau (3.5 pav.)



3.5 pav. Sistemos įtampos priklausomybės, nuo vėjo jėginių galios sistemoje, diagrama.

Diagramoje (žr. 3.5 pav.) grafiškai atvaizduoti maksimalios ir minimalios įtampos atotrūkis nuo sistemoje nusistovėjusios įtampos. Vienas iš sistemos patikimumo rodiklių yra stabili įtampa sistemoje. Kuo didesni įtampos šuoliai sistemoje, tuo sistema mažiau patikima. Iš sistemos įtampos lentelės (žr. 3.6 lentelė) matyti, jog, esant 45 procentams ir daugiau vėjo jėginių galios, įtampa nenusistovi per 60 sekundžių. Dėl šios priežasties diagramoje pateikiama vidutinė nusistovėjusi įtampa. Diagrama pateikiama priėmus nusistovėjusios įtampos vidurkį, kad vizualiai matytųsi maksimalios ir minimalios įtampos šuoliai nuo nusistovėjusios įtampos sistemoje. Diagramoje neparodyti įtampos šuoliai, esant 65 procentams vėjo jėginių galios, nes diagramoje vizualizacija iškraipoma per didelių įtampos šuolių. Sistemos įtampos priklausomybė nuo vėjo jėginių galios yra akivaizdi. Įtampos šuoliai didėja nuo didesnės vėjo jėginių galios sistemoje, o nusistovėjusi įtampa mažėja.

Tyrimo metu atlikta vėjo jėginių tiekiamos galios į sistemą analizė. Analizės duomenys pateikti lentelėje žemiau (3.8 lentelė).

3.8 lentelė. Vėjo jėginių galios priklausomybė nuo jų dalies elektros sistemoje

Vėjo jėginių sistemoje dalis procentais	Nustatyta vėjo jėginių galia sistemoje, MW	Nusistovėjusi generuojama vėjo jėginių galia, santykiniais vienetais	Maksimali generuojama vėjo jėginių galia, santykiniais vienetais	Reali nusistovėjusi vėjo jėginių galia sistemoje, MW	Nusistovėjusios vėjo jėginių galios laikas, s
5	20	0,73	0,73	14,6	28
10	40	0,73	0,73	29,2	28
15	60	0,73	0,73	43,8	28

20	80	0,73	0,73	58,4	28
25	100	0,73	0,73	73	28
30	120	0,73	0,73	87,6	28
35	140	0,73	0,73	102,2	28
40	160	0,73	0,73	116,8	28
45	180	0,73	0,73	131,4	42
50	200	0,73	0,73	146	42
55	220	0,71	0,71	156,2	42
60	240	0,71	0,75	180	43
65	260	nenusistovi	131,36	Nenusistovi	Nenusistovi

Lentelėje aukščiau (3.8 lentelė) parodyti tyrimo metu gauti vėjo jėgainių duomenys. Tyrimo metu buvo keičiama vėjo jėgainių parko galia, kurią sudaro 10 elektrinių. Iš lentelės duomenų matyti, kad maksimali vėjo jėgainių generuojama galia skiriasi, pasiekus sistemoje 55 procentus pilnutinės generuojamos galios iš vėjo jėgainių. Taip pat lentelėje parodytas nusistovėjusios vėjo jėgainių galios laikas. Jis keičiasi, sistemoje pasiekus 45 procentus pilnutinės generuojamos galios iš vėjo jėgainių parko. Laikas prailgėja ir pasiekus 60 procentų. Ties 65 procentų riba sistema destabilizuojasi ir galia vėjo jėgainių parke tampa nestabili, laikas nenusistovi.

3.3. Sistemos patikimumo, įvykus trumpajam jungimui, tyrimas

Tyrimas atliekamas sistemoje sumodeliavus trifazį trumpąjį jungimą, kuris sistemoje įvyksta 30-tą sekundę nuo modelio veikimo pradžios. Tyrimo laikas nesikeičia nuo aukščiau atliktų tyrimų ir lieka 60 sekundžių. Tyrimo metu keičiamas generatoriaus G3 ir vėjo jėgainės parko galios santykis. Generatoriaus G3 galia išlieka stabili. Žemiau 3.9 lentelėje parodyti apkrovų duomenys.

3.9 lentelė. Sistemos apkrovų nustatymai

Sistemos apkrovos	
Apkrovos pavadinimas	Apkrova, MW
Apkrova 1 (Ap1)	100
Apkrova 2 (Ap2)	100
Apkrova 3 (Ap3)	100
Apkrova 4 (Ap4)	16
Apkrova 5 (Ap01)	0.01
Apkrova 6 (Ap02)	0.01
Apkrova 7 (Ap03)	0.01
Iš viso:	316.03

Žemiau 3.10 lentelėje yra parodyta sistemos galių nustatymai skirtingais tyrimo atvejais.

3.10 lentelė. Sistemos šaltinių galių nustatymai

Vėjo jėgainių parko galios santykis su generatoriumi G3, procentais	Vėjo jėgainių nustatyta galia, MW	Vėjo jėgainių reali galia, MW	Generatoriaus G3 galia, MW	Generatoriaus G1 galia, MW
5	10	7,3	190	1000
10	20	14,6	180	1000
15	30	21,9	170	1000
20	40	29,2	160	1000
25	50	36,5	150	1000
30	60	43,8	140	1000
35	70	51,1	130	1000
40	80	58,4	120	1000
45	90	65,7	110	1000
50	100	73,0	100	1000
55	110	80,3	90	1000
60	120	87,6	80	1000
65	130	94,9	70	1000
70	140	102,2	60	1000
75	150	109,5	50	1000
80	160	116,8	40	1000
85	170	124,1	30	1000
90	180	131,4	20	1000
95	190	138,7	10	1000

Tyrimo metu sistemoje įvykus trumpajam jungimui stebimas elektrinės G3 rotoriaus sukimosi greitis ir sistemos nusistovėjimo laikas. Bandymas atliekamas kai trumpojo jungimo laikas 0,14 sekundės. Trumpasis jungimas sistemoje įvyksta 30 sekundę. 3.11 lentelėje parodyti bandymo rezultatai.

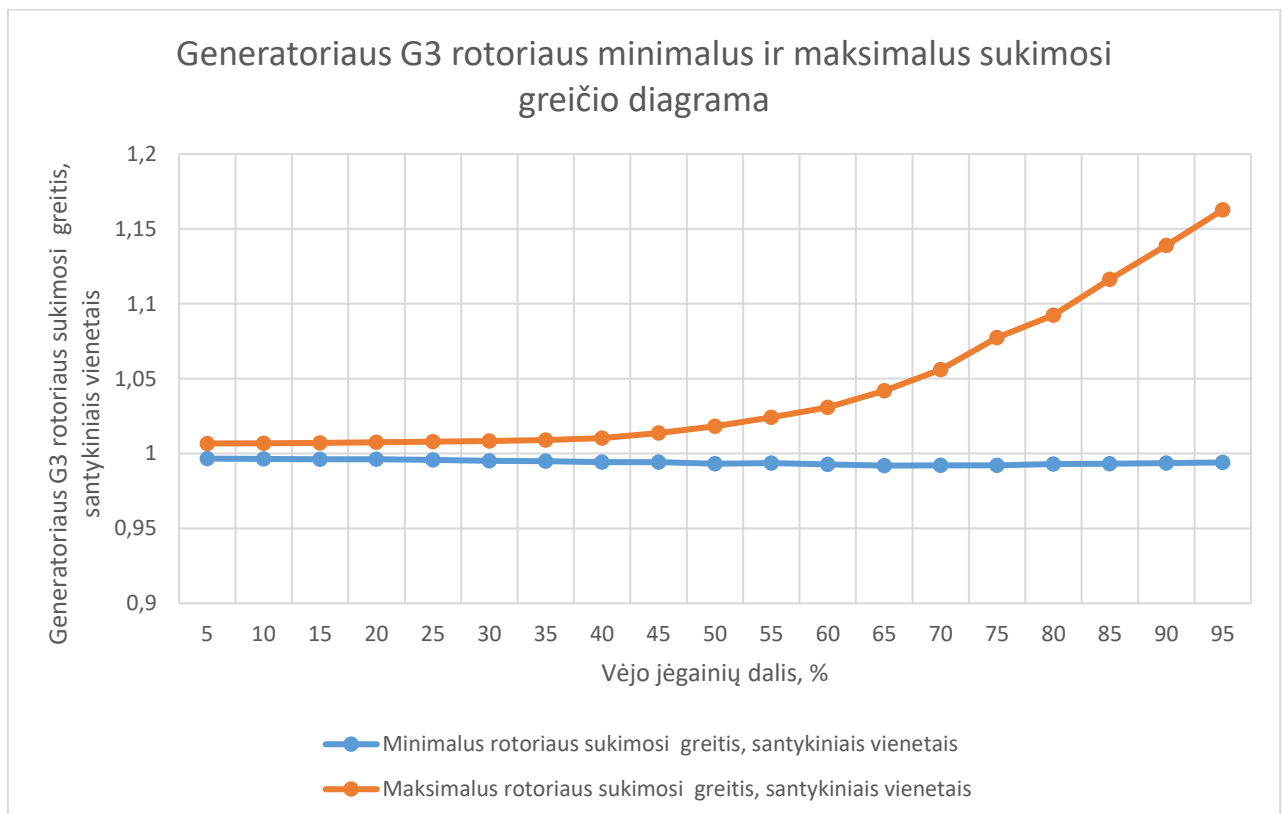
3.11 lentelė. Elektrinės G3 rotoriaus sukimosi greičio atsistatymas po trumpojo jungimo sistemoje

Vėjo jėgainių dalis, %	Minimalus rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	Maksimalus rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	Nusistovėjęs rotoriaus sukimosi greitis, santykiniais vienetais	Generatoriaus G3 nusistovėjimo laikas, s
5	0,9966	1,0067	0,9983	52
10	0,9963	1,0069	0,9984	52
15	0,9962	1,0071	0,9990	53
20	0,9961	1,0074	0,9993	53
25	0,9957	1,0079	1,0003	53
30	0,9952	1,0083	1,0010	54
35	0,9948	1,0089	1,0018	55
40	0,9943	1,0102	1,0024	55

45	0,9943	1,0138	1,0038	56
50	0,9932	1,0181	1,0049*	nenusistovi
55	0,9937	1,0241	1,0033*	nenusistovi
60	0,9928	1,0309	1,0135*	nenusistovi
65	0,9919	1,0420	1,0342*	nenusistovi
70	0,9922	1,0561	1,0558*	nenusistovi
75	0,9920	1,0773	1,0773*	nenusistovi
80	0,9930	1,0924	1,0924*	nenusistovi
85	0,9932	1,1163	1,1163*	nenusistovi
90	0,9935	1,1389	1,1389*	nenusistovi
95	0,9941	1,1627	1,1627*	nenusistovi

* Generatoriaus G3 sukimosi greitis 60 tyrimo sekundę, kai greitis nenusistovi.

Tyrimo metu generatoriaus G3 minimalus sukimosi greitis kito minimaliai, tuo tarp maksimalus greitis didėjo priklausomai nuo didesnės vėjo jėginių galios sistemoje. Nusistovėjęs rotoriaus sukimosi greitis nežymiai didėjo iki 45 procentų vėjo jėginių galios santykio su G3 elektrine. Elektrinės G3 nusistovėjimo laikas taip pat priklauso nuo elektrinės galios sistemoje. Viršijus 45 procentų ribą, generatoriaus G3 greitis nenusistovėdavo iki tyrimo laiko pabaigos. Mažinant G3 įtaką sistemai jo greitis didėdavo. Minimalus ir maksimalus sukimosi greitis atvaizduotas 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Generatoriaus G3 rotoriaus minimalaus ir maksimalaus sukimosi greičio, diagrama.

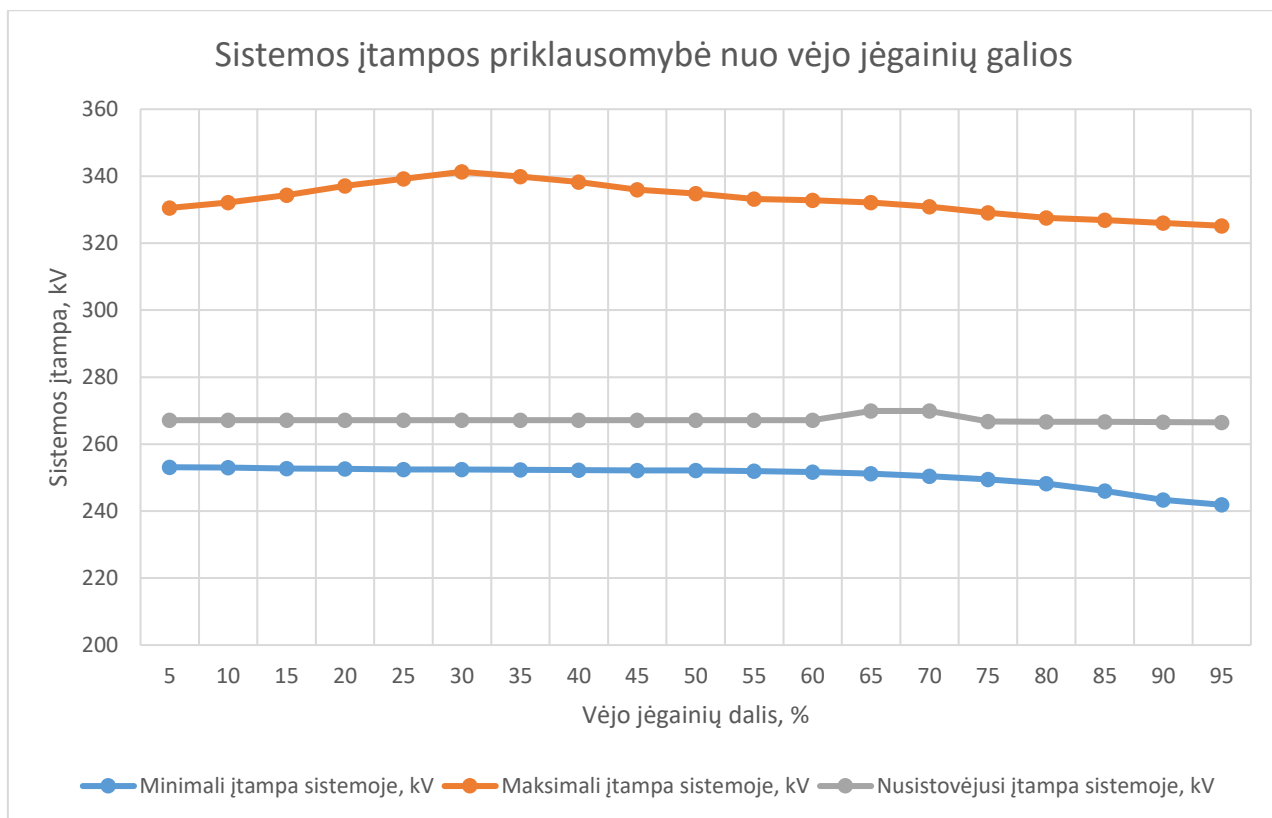
Paveiksle aukščiau (žr. 3.6 pav.) matosi minimalaus ir maksimalaus rotoriaus sukimosi greičio atotrūkio priklausomybė nuo vėjo jėginių dalies. Kuo vėjo jėginių parkas didesnis, tuo generatorius sukasi greičiau.

Tyrimo metu buvo stebima įtampa sistemoje. Tyrimo duomenys parodyti lentelėje žemiau (3.12 lentelė).

3.12 lentelė. Sistemos įtampos priklausomybė nuo vėjo jėginių galios sistemoje

Vėjo jėginių parko galios santykis su generatoriumi G3, procentais	Minimali įtampa sistemoje, kV	Maksimali įtampa sistemoje, kV	Nusistovėjusi įtampa sistemoje, kV	Minimali įtampa t. j. metu, kV	Maksimali įtampa pasibaigus t. j., kV	Nusistovėjusios įtampos laikas, s
5	253,1	330,5	267,2	0	1639,0	31
10	253,0	332,1	267,2	0	1593,8	31
15	252,7	334,3	267,2	0	1579,2	31
20	252,6	337,1	267,2	0	1559,5	31
25	252,4	339,2	267,2	0	1532,0	31
30	252,4	341,3	267,2	0	1529,3	31
35	252,3	339,9	267,2	0	1527,1	31
40	252,2	338,3	267,2	0	1519,5	31
45	252,1	336,0	267,2	0	1511,0	31
50	252,1	334,8	267,2	0	1500,9	31
55	252,0	333,2	267,2	0	1493,6	31
60	251,7	332,8	267,2	0	1483,2	31
65	251,2	332,1	269,9	0	1438,3	31
70	250,4	330,9	269,9	0	1379,1	31
75	249,5	329,1	266,8	0	1335,8	31
80	248,2	327,6	266,7	0	1289,9	31
85	246,0	326,9	266,7	0	1253,8	31
90	243,4	326,0	266,6	0	1229,4	31
95	241,9	325,2	266,5	0	1200,6	31

Tyrimo metu minimasi įtampa sistemoje mažėja priklausomai nuo įdiegtos galios vėjo jėginių parke. Maksimali įtampa savo piką pasiekia, kai vėjo jėginių parko ir generatoriaus G3 galių santykis yra 30 procentų. Viršijus 30 procentų ribą maksimali įtampa pradeda mažėti. Minimali ir maksimali įtampa pasiekiami pasibaigus trumpojo jungimo laikui, neskaitant pirmo įtampos šuolio pasibaigus trumpajam jungimui. Primas įtampos šuolis pasibaigus t. j. mažėja priklausomai nuo vėjo jėginių parko ir elektrinės G3 galių santykio. Nusistovėjusios įtampos laikas nesikeičia ir lieka stabilus. Diagramoje žemiau (3.7 pav.) vaizdžiai atvaizduotas įtampos kitimas sistemoje.



3.7 pav. Sistemos įtampos priklausomybės, nuo vėjo jėginių galios, diagrama.

Atliktas maksimalaus trumpojo jungimo laiko sistemoje tyrimas. Keičiant elektrinės G3 ir vėjo jėginių galių priklausomybę išsiaiškintas maksimalus t. j. laikas sistemoje ir nusistovėjusios įtampos laikas. Tyrimas prasideda 30-tą sekundę nuo modeliavimo pradžios. Gauti tyrimo duomenys pateikti 3.13 lentelėje.

3.13 lentelė. Maksimalus trumpojo jungimo laikas sistemoje

Vėjo jėginių parko galios santykis su generatoriumi G3, procentais	Generatoriaus G3 galia, MW	Vėjo jėginių parko galia sistemoje, MW	Maksimalus trumpojo jungimo laikas sistemoje, s	Nusistovėjusios įtampos laikas, s
5	190	10	1,60	41
10	180	20	1,64	41
15	170	30	1,68	42
20	160	40	1,73	41
25	150	50	1,79	42
30	140	60	1,86	37
35	130	70	1,98	56
40	120	80	2,36	41
45	110	90	1,94	39
50	100	100	1,80	39
55	90	110	1,71	35
60	80	120	1,65	37

65	70	130	1,61	40
70	60	140	1,61	39
75	50	150	9,71	53
80	40	160	14,76	54
85	30	170	25,34	58
90	20	180	1,16	54
95	10	190	0,76	56

Tyrimo metu nustatytas ilgiausias galimas trumpasis jungimas, kad sistema liktų stabili. Iš tyrimo duomenų matyti, kad maksimalus trumpojo jungimo laikas, prie 5 procentų vėjo jėginių parko galios santykio su elektrine G3, yra 1,60 sekundės. Maksimalus trumpojo jungimo laikas didėja iki 40 procentų. Pasiėkus 40 procentų ribą ilgiausias t. j. sistemoje gali trukti iki 2,36 sekundžių. Nuo 40 iki 75 procentų vėjo jėginių galios, maksimalus trumpojo jungimo laikas krenta iki 1,61 sekundės. Nuo 75 iki 85 procentų trumpojo jungimo laikas labai išauga. Ties 85 procentų riba maksimalaus trumpojo jungimo laikas siekia net 25,34 sekundžių. Ties 90 ir 95 procentų riba maksimalus t. j. laikas labai sumažėja ir tampa atitinkamas 1,16 ir 0,76 sekundės. Nusistovėjusios įtampos laikas kinta nepriklausomai nuo elektrinių galių ar maksimalaus trumpojo jungimo laiko sistemoje.

Išvados

1. Vėjo elektrinių įtaką elektros sistemai galim tirti keičiant vėjo elektrinių ir tradicinių generatorių galių santykį, keičiant vidinius vėjo elektrinių parametrus arba imituojant trumpąjį jungimą sistemoje. Vėjo elektrinės sistemoje daro įtaką jos įtampai, dažniui ir trumpojo jungimo maksimaliam laikui.
2. Sudarytas elektros sistemos modelis, leidžiantį tirti vėjo elektrinių įtaką režimų parametrus. Jį sudaro elektrinė G1 su pastovaus dažnio sinchroniniu generatoriumi, elektrinė G3 su kintamo dažnio sinchroniniu generatoriumi ir vėjo jėgainių parkas. Visos elektrinės sujungtos perdavimo tinklu, pagal IEEE 9 mazgų sistemos modelį.
3. Nustatyta, kad vėjo jėgainių parkui gaminant daugiau nei 45 % visos sistemoje pagaminamos elektros energijos, sistemos įtampa ir dažnis išsibalansuoja ir nenusistovi per minutę laiko. Padidinus generuojamą galią iki 65 % ir daugiau, sistema išsibalansuoja ir niekada nenusistovi. Taip pat nustatyta, kad sistemoje, kurioje daugiausiai galios generuojama iš pagrindinio tradicinio energijos šaltinio, keičiant vėjo jėgainių parko ir mažesnės, tradicinės elektrinės galių santykį, keičiasi maksimalaus trumpojo jungimo laikas sistemoje. Jis kinta nuo 0,76 iki 25,34 sekundžių.
4. Atlikus jautrumo analizę pastebėta, kad sistema reaguoja į vėjo elektrinių generuojamos elektros energijos pokyčius. Kuo didesnę procentinę dalį galios sistemoje generuoja vėjo jėgainių parkas, tuo sistema tampa mažiau patikima, sistemos įtampa ir dažnis tampa nestabilūs.
5. Nustatyta, kad nedidelė vėjo elektrinių skverbtiis pagerina elektros sistemos atsparumą trikdžiams (trumpiesiems jungimams). Modeliuojamoje scheme, vėjo elektrinių įrengtosios galios ir generatoriaus G3 galios santykiui didėjant iki 40 %, ribinė trumpojo jungimo trukmė padidėja nuo 1,60 s iki 2,36 s, o šiam santykiui viršijus 40 % ir didėjant iki 70 %, ribinė trumpojo jungimo trukmė ima mažėti. Galių santykiui pasiekus daugiau kaip 75-85 %, tradicinio sinchroninio generatoriaus įtaka pasidaro labai maža, todėl sistemos stabilumas trumpajam jungimui ženkliai padidėja.

Literatūros sąrašas

1. EP patvirtino ryžtingus energetikos efektyvumo ir tvarumo tikslus. 2018m. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<http://www.europarl.europa.eu/news/lt/press-room/20181106IPR18315/ep-patvirtino-ryztingus-energetikos-efektyvumo-ir-tvarumo-tikslus>
2. Evaluation of the Moroccan Electrical Grid Dynamic Stability after Large Scale Renewable Energies Integration. 2018m. Ismail Drhorhi, Abderrahim El Fadili, Driss El Kasmi ir Mohamed Stitou. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25].
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8488847>
3. Challenges of integrating wind power plants into the electric power system: Lithuanian case. 2018m. Audrius Jonaitis, Saulius Gudžius, Alfonsas Morkvėnas, Mindaugas Ažubalis, Inga Konstantinavičiūtė, Audrius Baranauskas, Vidmantas Ticka. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032118304684?token=59889B79CEBF8B2B9F3C5E9CF123E97BAA1A02CD0B47612BB5A029094B3DE8EB1197FB9A8797DC490DBD291032844998>
4. Experiment Analysis on Motor-Generator Pair System for Providing Inertia of Renewable Energy. 2018m. Yingkun Zhou, Guorui Xu ir Yongzhang Huang Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8549047>
5. Analysis of alternative frequency control schemes for increasing renewable energy penetration in El Hierro Island power system. 2019m. José Ignacio Sarasúaa, Guillermo Martínez-Lucasa ir Marcos Lafoz. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519301255?via%3Dihub>
6. Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system. 2019m. Esa Pursiheimo, Hannele Holttinen ir Tiina Koljonen Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811831156X>
7. Optimization of Renewable energy penetration in Regional Energy System. 2018m. Ding Zhangab, Shujun Mua, C.C. Chan ir George YouZhoua Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218306386>
8. The world's most powerful available wind turbine gets major power boost. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<http://www.mhivestasoffshore.com/worlds-most-powerful-available-wind-turbine-gets-major-power-boost/>
9. Are government subsidies effective in improving innovation efficiency? Based on the research of China's wind power industry. 2020m. Boqiang Lin ir Ranran Luan Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719363351>
10. Lietuvos vėjuotumo žemėlapiai. . Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2019-06-20]
<http://www.zir.lt/news.php?extend.11>
11. Elektros energetika. Paskaitų konspektas. Paruošė doc. dr. Gytis Svinkūnas. 2008m, Kaunas

12. Voltage Characteristics in Public Distribution Systems. 2004m. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<http://copperalliance.org.uk/uploads/2018/03/542-standard-en-50160-voltage-characteristics-in.pdf>
13. Loss of Load Probability Calculation Statement. 2019m. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-04-16]
<https://www.elexon.co.uk/documents/bsc-codes/lolp/loss-of-load-probability-calculation-statement/>
14. Apie elektros energetikos sistemų technologijas be formulių. Anzelmas Bačauskas 2010m.
15. Evaluation of the power system reliability if a nuclear power plant is replaced with wind power plants. Marko Čepin. 2019m. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832018310627>
16. The Phasor Simulation of Wind Turbines with Double Fed Induction Generator. 2016m. Nedzmiya Demirovic, Amir Tokic ir Nerdina Mehinovic Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
https://www.researchgate.net/publication/290946628_The_Phasor_Simulation_of_Wind_Turbines_with_Double_Fed_Induction_Generator
17. Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine – simulink. 2014m. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://vdocuments.mx/document/model-the-dynamics-of-three-phase-round-rotor-or-salient-pole-synchronous-machine.html>
18. Performance Evaluation and Improvement in Transient Instability of IEEE 9 bus System using exciter and governor control. 2015m. Divya Asija ir Pallavi Choudekar. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915032755>
19. Vidutinis metinis vėjo greitis Lietuvoje. Standartinė klimato norma, 1981–2010 m. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<http://www.meteo.lt/lt/vejas?inheritRedirect=true>
20. Wind Turbine Power: The Betz Limit and Beyond. 2012m. Mahmoud Huleihil ir Gedalya Mazor. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/wind-turbine-power-the-betz-limit-and-beyond>
21. Elektros energetikos pagrindai. Gytis Svinkūnas ir Algimantas Navickas. 2013m.
22. Matlab grandinių teorijoje. Renaldas Raišutis ir Olgirdas Tumšys. 2018m.
23. Sistemų modeliavimas ir identifikavimas. Rimvydas Simutis. 2008m.
24. Atsinaujinančiosios ir alternatyviosios energetikos praktikumas. Vytautas Adomavičius, Povilas Balčiūnas, Kęstutis Buinevičius ir Egidijus Puida. 2003m.
25. Power system stability and control.. P. Kundor. 1993m.
26. Power System Stability. Kenneth Eloghene Okedu. 2019m.
27. Triple seasonal methods for short-term electricity demand forecasting. 2010m. James W.Taylor. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722170900705X>

28. Time of day effects of temperature and daylight on short term electricity load. 2019m. Julián Moral-Carcedo ir Julián Pérez-García. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219303573#bib1>
29. Robust model predictive control based voltage regulation method for a distribution system with renewable energy sources and energy storage systems. 2020m. Xie Yunyuna, Liu Lina, Wu Qiuweibc ir Zhou Qiand. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519330868#b0025>
30. Optimal (n-1)-reliable design of distributed energy supply systems. 2019m. Dinah Elena Hollermann, Dörthe Franzisca Hoffrogge, Fabian Mayera ir Maike Hennena. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135418310160>
31. Optimal operation of hybrid electrical and thermal energy storage systems under uncertain loading condition. 2019m. Hasan Mehrjerdia ir Elyas Rakhshani. Prieiga per internetą: [žiūrėta: 2020-05-25]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431119313638>