



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

**Andrius Abakas**

**PASKIRSTYTOJO GENERAVIMO ŠALTINIŲ PANAUDOJIMAS**  
**SISTEMOS DAŽNIO REGULIAVIMUI**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Audrius Jonaitis

**KAUNAS, 2017**

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

**PASKIRSTYTOJO GENERAVIMO ŠALTINIŲ PANAUDOJIMAS**  
**SISTEMOS DAŽNIO REGULIAVIMUI**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektros energetikos sistemos (621H63005)

**Vadovas**  
Doc. dr. Audrius Jonaitis

**Recenzentas**  
Lekt. dr. Dainius Slušnys

**Projektą atliko**  
Andrius Abakas

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Andrius Abakas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 612H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Paskirstytojo generavimo šaltinių panaudojimas sistemos dažnio reguliavimui“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 05 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Andriaus Abako** baigiamasis projektas tema „Paskirstytojo generavimo šaltinių panaudojimas sistemos dažnio reguliavimui“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Abakas, Andrius. Paskirstytojo generavimo šaltinių panaudojimas sistemos dažnio reguliavimui. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Audrius Jonaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *paskirstytasis generatorius, skirstomasis tinklas, dažnio reguliavimas.*

Kaunas, 2017. 76 p.

## SANTRAUKA

Visame pasaulyje, tiek mažose gyvenvietėse, tiek dideliuose miestuose, didėja decentralizuotų, santykinai mažos galios elektrinių skaičius. Tai gali būti dujų turbinos, vėjo ir saulės elektrinės, ar kitus resursus naudojantys generatoriai. Didėjantis paskirstytųjų generatorių skaičius padeda užtikrinti elektros tiekimo patikimumą, sumažinti elektros perdavimo nuostolius ir išlaidas, bei gali būti panaudotas sistemos dažniui reguliuoti.

Mano darbo tikslas yra nustatyti paskirstytųjų generatorių poveikį skirstomojo elektros tinklo darbui, jų valdymo ir dažnio reguliavimo ypatumus, bei sumodeliuoti elektros sistemą MATLAB Simulink aplinkoje, dažnio reguliavimui panaudojant paskirstytuosius generatorius.

Abakas, Andrius. Usage of Distributed Generation Sources for Power System Frequency Control: Master's thesis / supervisor assoc. prof. Audrius Jonaitis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *distributed generator, power distribution network, frequency control.*

Kaunas, 2017. 76 p.

## SUMMARY

Across the world, in small settlements and large cities alike, there is an increase of decentralized power plants of relatively small power. Those may be gas turbines, wind and solar power plants, or generators which use different resources altogether. The increasing number of distributed generators helps to secure the reliability of electricity supply, diminishes the losses and cost of power transmission and is able to be used for power system frequency control.

The aim of my final project is to determine what effects distributed generation has on power distribution networks, the specifics in control and usage for frequency regulation of before mentioned generators and, also, to create a model of power system in MATLAB Simulink environment, where distributed generators would be used for power frequency control.

# Turinys

1	SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS.....	12
2	ĮVADAS.....	13
3	PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ APIBRĖŽIMAS .....	14
4	PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ PRIJUNGIMO PRIE TINKLO GALIMYBIŲ ĮVERTINIMAS .....	16
4.1	Tikslo funkcijos .....	16
4.2	Standartizuotasis algoritmas ir optimalaus paskirstytųjų generatorių išdėstymo ir galios parinkimo metodai .....	19
5	PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ POVEIKIS TINKLO DARBUI .....	21
5.1	Gedimų tinkle skaičiaus padidėjimas .....	21
5.2	Įtampos lygio svyravimai.....	22
5.3	Sistemos stabilumas .....	25
6	PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ PANAUDOJIMAS SISTEMOS DAŽNIO REGULIAVIMUI.....	30
6.1	Pirminis dažnio valdymas .....	33
6.2	Antrinis dažnio valdymas .....	34
6.3	Tretinis dažnio valdymas .....	34
7	ELEKTROS TINKLO SCHEMŲ SUDARYMAS.....	36
7.1	Skirstomųjų tinklų schemų sudarymas .....	37
7.1.1	Linijų parametrai ir jų varžų skaičiavimas .....	38
7.1.2	Linijų generuojamų reaktyviųjų galių vertinimas .....	39
7.1.3	Vėjo elektrinių parametų skaičiavimas .....	39
7.1.4	Transformatorių parinkimas ir jų parametų skaičiavimas.....	40
7.1.5	Galios ir įtampos nuostolių transformatoriuose skaičiavimas.....	41
7.1.6	Galios ir įtampos nuostolių bei galios srautų skaičiavimas vėjo elektrinių linijose ....	43
7.1.7	Mazgų skaičiuojamųjų apkrovų skaičiavimas .....	45
7.1.8	Galios srautų pasiskirstymo skaičiavimas .....	46
7.1.9	Galios srautų ir nuostolių linijose skaičiavimas .....	47
7.1.10	Įtampos nuostolių linijose skaičiavimas .....	48
7.1.11	110/35 kV transformatoriaus parinkimas .....	50
7.1.12	Skaičiavimai skirstomajam tinklui, kai atjungti paskirstytieji generatoriai .....	51
7.2	Perdavimo tinklo schemos sudarymas .....	52
7.2.1	Linijų parametrai ir jų varžų skaičiavimas .....	53
7.2.2	Linijų generuojamų reaktyviųjų galių vertinimas .....	54

7.2.3	Šiluminių elektrinių parametų skaičiavimas .....	55
7.2.4	Transformatorių parinkimas ir jų parametų skaičiavimas.....	55
7.2.5	Galios ir įtampos nuostolių transformatoriuose skaičiavimas.....	56
7.2.6	Mazgų skaičiuojamųjų apkrovų skaičiavimas .....	56
7.2.7	Galios srautų pasiskirstymo skaičiavimas .....	57
7.2.8	Galios srautų ir nuostolių linijose skaičiavimas .....	58
7.2.9	Įtampos nuostolių linijose skaičiavimas .....	59
7.2.10	330/110 kV transformatoriaus parinkimas .....	60
8	MODELIŲ SUDARYMAS IR MODELIAVIMO REZULTATAI .....	61
8.1	Perdavimo ir skirstomojo tinklo modeliai .....	61
8.2	Elektrinių modeliai .....	62
8.2.1	Vėjo elektrinės modelis .....	62
8.2.2	Hidroelektrinės modelis.....	62
8.2.3	Saulės elektrinės modelis .....	62
8.2.4	Šiluminės elektrinės modelis .....	63
8.3	Modeliavimo rezultatai .....	63
9	IŠVADOS.....	68
10	LITERATŪRA .....	70
11	PRIEDAI .....	71
11.1	Priedas 1. Perdavimo tinklo modelis .....	71
11.2	Priedas 2. Skirstomojo tinklo modelis .....	72
11.3	Priedas 3. Vėjo elektrinės modelis.....	73
11.4	Priedas 4. Hidroelektrinės modelis .....	74
11.5	Priedas 5. Saulės elektrinės modelis .....	75
11.6	Priedas 6. Šiluminės elektrinės modelis .....	76

## ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1 pav. Standartizuoto paskirstytųjų generatorių galios ir vietos nustatymo algoritmo schema. [2]..	19
2 pav. Galios – įtampos kitimo kreivės esant skirtingoms k vertėms. [3].....	23
3 pav. Nominaliosios tinklo įtampos priklausomybė nuo generatoriaus prijungimo vietos. [3].....	24
4 pav. Spindulinio skirstomojo tinklo schema. [4].....	26
5 pav. Rotoriaus kampo, aktyviosios (mėlyna), reaktyviosios (raudona) ir pilnosios (žalia) galios laikinės priklausomybės įvykus trumpajam jungimui pirmuoju atveju. [4].....	27
6 pav. 4-to ir 19-to mazgo įtampos pirmuoju atveju. [4].....	27
7 pav. Rotoriaus kampo, aktyviosios, reaktyviosios ir pilnosios galios laikinės priklausomybės įvykus trumpajam jungimui antruoju atveju. [4].....	28
8 pav. 4-to ir 19-to mazgo įtampos antruoju atveju. [4].....	28
9 pav. Rotoriaus kampo, aktyviosios, reaktyviosios ir pilnosios galios laikinės priklausomybės įvykus trumpajam jungimui trečiuoju atveju. [4].....	29
10 pav. Įtampos lygis 27-ame mazge. [4].....	30
11 pav. Galios rezervo poreikio kitimas Italijos elektros sistemoje. [6] .....	31
12 pav. Dujų turbinų ir vidaus degimo variklių maksimalios apkrovos pasiekimo grafikas. [7].....	32
13 pav. Generatorių su skirtingu statizmu galios valdymas. [8] .....	33
14 pav. Dažnio kritimas, atsijungus elektrinei. [8].....	34
15 pav. Dažnio kontrolės schema. [8] .....	35
16 pav. Dažnio valdymo reikalavimai. [1] .....	36
17 pav. Skirstomasis tinklas su vėjo elektrinėmis. ....	37
18 pav. Skirstomojo tinklo atstojamoji schema.....	46
19 pav. Skirstomojo tinklo skaičiuojamoji schema 1.....	47
20 pav. Skirstomojo tinklo skaičiuojamoji schema 2.....	48
21 pav. Perdavimo tinklo schema.....	53
22 pav. Perdavimo tinklo atstojamoji schema.....	57
23 pav. Skaičiuojamoji schema perdavimo tinklui 1.....	58
24 pav. Skaičiuojamoji schema perdavimo tinklui 2.....	59



25 pav. Įtampos, iš perdavimo tinklo elektrinės ŠE2, grafikas. ....	64
26 pav. Hidro generatoriaus gnybtų įtampos grafikas. ....	65
27 pav. Šiluminės elektrinės gnybtų įtampos grafikas. ....	65
28 pav. Vėjo ir saulės elektrinės įtampos grafikas. ....	66
29 pav. Tinklo dažnio kitimo grafikas. ....	67

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 Lentelė. Staigiųjų įtampos pokyčių ir mirgėjimo leistinosios ribos. [1] .....	25
2 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų laidininkų parametrai [9].....	38
3 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų ilgiai.....	38
4 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų varžų skaičiavimo rezultatų lentelė.....	38
5 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų generuojamos reaktyviosios galios skaičiavimo rezultatų lentelė. .....	39
6 Lentelė. 10/35 kV transformatorių duomenys. [12] .....	40
7 Lentelė. Skirstomojo tinklo mazgų skaičiuojamosios apkrovos. ....	45
8 Lentelė. Galios srautų skirstomojo tinklo linijose skaičiavimo rezultatai.....	47
9 Lentelė. Galios nuostolių ir srautų skirstomajame tinkle skaičiavimo rezultatai.....	48
10 Lentelė. Įtampos nuostolių skirstomojo tinklo linijose skaičiavimo rezultatai.....	49
11 Lentelė. Apskaičiuotos skirstomojo tinklo mazgų įtampos.....	49
12 Lentelė. Įtampos ir galios nuostoliai žiedinio skirstomojo tinklo linijose.....	50
13 Lentelė. 35/110 kV transformatoriaus duomenys. [11].....	50
14 Lentelė. Galios nuostolių ir srautų skirstomajame tinkle, be generatorių, skaičiavimo rezultatai. .....	51
15 Lentelė. Apskaičiuotos skirstomojo tinklo, be generatorių, mazgų įtampos.....	52
16 Lentelė. Įtampos ir galios nuostoliai žiedinio skirstomojo tinklo, be generatorių, linijose.....	52
17 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų laidininkų parametrai [9].....	53
18 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų ilgiai.....	54
16 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų varžų skaičiavimo rezultatų lentelė.....	54
19 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų generuojamos reaktyviosios galios skaičiavimo rezultatų lentelė. .....	54
20 Lentelė. 10/110 kV transformatorių duomenys.[10] .....	55
21 Lentelė. Perdavimo tinklo mazgų skaičiuojamosios apkrovos.....	56
22 Lentelė. Galios srautų perdavimo tinklo linijose skaičiavimo rezultatai.....	58
23 Lentelė. Galios nuostolių ir srautų skaičiavimo perdavimo tinkle rezultatai.....	59

24 Lentelė. Įtampos nuostolių perdavimo tinklo linijose skaičiavimo rezultatai.....	60
25 Lentelė. Apskaičiuotos mazgų įtampos perdavimo tinkle.....	60
26 Lentelė. Įtampos ir galios nuostoliai žiedinio perdavimo tinklo linijose. ....	60
27 Lentelė. 330/110 kV transformatoriaus duomenys. [13].....	61
28 Lentelė. 330/110 kV transformatoriaus parametrai.....	61
29 Lentelė. Apskaičiuotų ir modeliavimo metu gautų skirstomojo tinklo mazgų įtampų palyginimas. .....	63
30 Lentelė. Apskaičiuotų ir modeliavimo metu gautų perdavimo tinklo mazgų įtampų palyginimas. .....	64

## 1 SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

CIGRE (angl. *International Conference on High Voltage Electric Systems*) – tarptautinė aukštos įtampos sistemų konferencija.

IEA (angl. *International Energy Agency*) – tarptautinė energetikos agentūra.

DPCA (angl. *Distributed Power Coalition of America*) – Amerikos paskirstytosios energijos koalicija.

## 2 ĮVADAS

Visų pasaulio šalių energetikos sistemose didelę dalį elektros gamybos pajėgumo sudaro centralizuoti gamybos šaltiniai. Elektros ir šilumos energija gaminama didelės galios atominėse, šiluminėse ir atsinaujinančių energijos šaltinių elektrinėse. Siekiant sumažinti priklausomybę nuo centralizuoto tiekimo, o tuo pačiu ir siekiant pelno, dalis elektros vartotojų įsirengė nedidelės galios, lyginant su tradicinėmis elektrinėmis, elektros generavimo šaltinius – saulės, vėjo, biokuro ir nedideles tradicinį kurą deginančias elektrines. Tokie decentralizuoti elektros generavimo šaltiniai vadinami paskirstytaisiais generatoriais. Šių nedidelių elektrinių skaičiaus augimas tęsiasi, todėl jų pagaminamos energijos kiekis tinkle didėja. Dėl šios priežasties būtina įvertinti jų įtaką ir panaudojimo galimybes darniam elektros tinklo darbui užtikrinti.

Pagrindiniai uždaviniai:

1. paskirstytųjų generavimo šaltinių apibrėžimo sudarymas;
2. paskirstytųjų generavimo šaltinių prijungimo prie tinklo galimybių analizė;
3. paskirstytųjų generavimo šaltinių poveikio tinklo darbui tyrimas;
4. paskirstytųjų generavimo šaltinių panaudojimo sistemos dažnio reguliavimui tyrimas – modeliavimas.

Darbo tikslas – atlikti paskirstytųjų generavimo šaltinių poveikio skirstomajam tinklui vertinimą ir sudaryti sistemos modelį, kuriame paskirstytieji šaltiniai gali reguliuoti sistemos dažnį.

### 3 PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ APIBRĖŽIMAS

Elektros energetikos sistemoje yra įdiegta generatorių, kurių galia yra nuo keleto kilovatų iki šimtų megavatų. Šie šaltiniai gali sudaryti tiek mažas, tiek ir dideles ar net jungtines elektros energetikos sistemas. Generatorių prijungimas prie elektros energetikos tinklo gali būti taip pat įvairus, tai yra jie gali būti prijungti tik prie apkrovos, prie apkrovos ir prie skirstomojo tinklo, prie skirstomojo tinklo arba prie perdavimo tinklo. Jei generatorius prijungtas prie elektros energetikos sistemos, vartotojas gali būti prie pat jo, šiek tiek nutolęs arba labai nutolęs. Tokia įvairovė sudaro keblumą tiksliam paskirstytųjų generatorių apibrėžimo nustatymui. Elektros energetikos organizacijos ir įmonės paskirstytųjų generatorių apibrėžimus pateikia skirtingai. [1]

Paprastai, jeigu šaltinio tipas neatitinka tradicinio centralizuoto šaltinio sąvokos yra laikoma, kad jis yra paskirstytasis. Remiantis atskirų organizacijų apibrėžimais negalima tiksliai pasakyti kada yra ta riba, kai generatorius tampa paskirstytuoju, o kada ne, todėl yra būtina tikslinti paskirstytųjų generatorių apibrėžimą. Didžiausios pasaulinės elektros energetikos organizacijos paskirstytųjų generatorių sąvoką pateikia įvairiai: [1]

1. Pagal CIGRE (angl. *International Conference on High Voltage Electric Systems*) paskirstytaisiais vadinami tokie generatoriai: [1]

- galia mažesnė už 100 MW;
- prijungti prie skirstomojo tinklo;
- centralizuotas valdymas netaikomas;
- elektros energijos kiekis neplanuojamas.

2. Pagal IEA (angl. *International Energy Agency*) paskirstytaisiais vadinami tokie generatoriai: [1]

- prijungti prie skirstomojo tinklo;
- prijungti šalia vartotojų;
- mažos galios elektros energijos šaltiniai (vidaus degimo variklių generatoriai, mažos galios turbinų generatoriai, mikroturbinos, kuro elementai ir saulės energijos šaltiniai).

3. Pagal DPCA (angl. *Distributed Power Coalition of America*) paskirstytaisiais vadinami tokie generatoriai: [1]

- prijungti šalia vartotojų;
- mažos galios elektros energijos šaltiniai;
- prijungti prie apkrovos tinklo, skirstomojo tinklo arba prie perdavimo tinklo.

4. Pagal JAV energetikos departamentą (angl. *US Department of Energy*) paskirstytaisiais vadinami tokie generatoriai: [1]

- prijungti tiesiogiai prie apkrovų;
- mažos galios elektros energijos šaltiniai.

5. Pagal Švedijos elektros energijos tinklų operatorių (angl. *Swedish Electric Power Utilities*) paskirstytaisiais vadinami tokie generatoriai: [1]

- bet kokios galios elektros energijos šaltiniai;
- prijungti netoli apkrovų arba tiesiogiai prie apkrovų.

Pateiktuose apibrėžimuose paskirstytieji generatoriai nustatomi tokiais kriterijais: [1]

1. pagal galią;
2. pagal elektros energijos šaltinių tipą;
3. pagal prijungimo vietą;
4. pagal atstumą iki apkrovos;
5. pagal apkrovos prijungimą prie šaltinio;
6. pagal sisteminę šaltinių būseną (centralizuoti arba decentralizuoti);
7. pagal sisteminį šaltinių elektros energijos kiekio planavimą (planuojamas elektros energijos kiekis ar ne);
8. pagal šaltinio priklausomumą energetikos sistemai (šaltinis dirba kartu su energetine sistema, šaltinis dirba autonominiu režimu, tačiau gali prisijungti prie sistemos arba šaltinis visiškai negali prisijungti prie sistemos).

Matomi keturi pagrindiniai kriterijai įtakojantys paskirstytųjų generatorių apibrėžimo kilmę: [1]

1. šaltinio elektros energijos gamybos pajėgumas arba galia;
2. šaltinio tipas ir vieta;
3. šaltinio būseną organizaciniu sisteminiu požiūriu;
4. apkrovų vieta.

Paskirstytųjų generatorių apibrėžimą galima taikyti tokiems elektros energijos šaltiniams, kurie tenkina tokias sąlygas: [1]

1. generatorius ar generatoriai prijungti prie skirstomojo tinklo toje pačioje įtampos pakopoje arba vienos įtampos pakopos ribose priklausomai nuo apkrovos prijungimo įtampos pakopos skirstomajame tinkle;
2. generatoriaus ar generatorių galia tokia pati kaip apkrovų (reikiamas galios rezervas pridedamas papildomai, priklausomai nuo technologinių sąlygų ir poreikio), jei nėra galimybės prisijungti prie sistemos;

3. generatoriaus ar generatorių galia yra nedaugiau nei dvigubai didesnė už apkrovų (reikiamas galios rezervas gali būti pridėtas papildomai, priklausomai nuo technologinių sąlygų ir poreikio), jei yra galimybė prisijungti prie sistemos;
4. dalinai ar pilnai padengti skirstomojo tinklo apkrovų elektros energijos poreikius;
5. normalus režimas.

Įvertinus pagrindinius kriterijus galima suformuluoti pilną paskirstytojo generatoriaus apibrėžimą: paskirstytieji generatoriai yra tokie elektros energijos šaltiniai, kurie yra prijungti prie skirstomojo tinklo netoliau negu per vieną įtampos pakopą nuo apkrovos, dirba normaliomis darbo sąlygomis, galia yra nedaugiau kaip dvigubai didesnė už apkrovų, jei yra galimybė prisijungti prie sistemos ir, jei nėra galimybės prisijungti prie sistemos galia nedidesnė už apkrovų ir dalinai arba visiškai padengia apkrovas nepriklausomai nuo kitų techninių parametrų ar organizacinių prioritetų. [1]

#### 4 PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ PRIJUNGIMO PRIE TINKLO GALIMYBIŲ ĮVERTINIMAS

Paskirstytųjų generatorių padėtis ir galingumas skirstomajame tinkle yra labai svarbi, nes gerai parinkus vietą galima sumažinti galios nuostolius, padidinti tinklo patikimumą, apkraunamumą, stabilumą, pagerinti įtampos reguliavimo galimybes, energijos kokybę, ir galios faktoriaus vertę. Netinkamas paskirstytųjų generatorių išdėstymas gali sukelti daug problemų, priešingų anksčiau minėtiems tinkamo išdėstymo privalumams, bei sutrikdyti tinklo apsaugos sistemų darbą dėl susidarančio dvikrypčio galios srauto, nes sistemos yra pritaikytos darbui, esant vienos krypties galios srautui. Toks sutrikdymas gali padidinti elektros sistemos galios nuostolius. [2]

Paskirstytųjų generavimo šaltinių prijungimo į tinklą galimybės priklauso nuo keleto faktorių: [2]

1. naudojamo generatoriaus tipo – saulės, vėjo, hidro, vidaus degimo variklio varomi, bei kiti generatoriai;
2. pastatymo vietos ir vietinio elektros tinklo parametrų;
3. didžiausio galimo paskirstytųjų generatorių skaičiaus ir galios elektros sistemoje;
4. sistemos techninių parametrų, tokių kaip įtampos, galios nuostolių, linijų pralaidumo ir dažnio, įvertinimas.

##### 4.1 Tikslų funkcijos

Paskirstytųjų generatorių optimaliam išdėstymui ir galingumo parinkimui skirstomajame tinkle, galima naudoti tikslines funkcijas. Tikslinės funkcijos sudaromos, pasirenkant vieną arba keletą norimų rezultatų – tikslų. Tai gali būti galios nuostolių sumažinimas, kainos sumažinimas, sistemos patikimumo padidinimas, įtampos lygio palaikymas ir panašūs techniniai parametrai jau minėti



anksčiau. Pasirinkus norimus tikslus, įvertinami tinkami parametrai, darantys įtaką siekiamiems tikslams ir sudaroma tikslo funkcija. Funkcijos pavyzdys: [2]

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n = \sum_{k=1}^n x_k, \quad (1)$$

čia  $x$  – parametrai, nuo kurių priklauso funkcija;  $n$  – parametru skaičius.

Galimi parametrai tikslo funkcijoje: [2]

1. sistemos galios nuostoliai:

$$x_1 = \beta_j \frac{P_L^{\text{po PG}}}{P_L^{\text{prieš PG}}}, \quad (2)$$

čia  $\beta$  – nuostolių svorio faktorius;  $j$  – šynos, prie kurios jungiamas paskirstytasis generatorius numeris;  $P_L^{\text{po PG}}$  – sistemos nuostoliai prijungus paskirstytąjį generatorių;  $P_L^{\text{prieš PG}}$  – sistemos nuostoliai prieš prijungiant paskirstytąjį generatorių.

2. įtampos lygis:

$$x_2 = \mu_j \left( U_j^{\text{po PG}} \right)^2,$$

čia  $\mu_j$  – įtampos lygio svorio faktorius;  $U_j^{\text{po PG}}$  – įtampa šynoje, prie kurios prijungtas generatorius, po jo prijungimo.

3. trumpojo jungimo srovių faktorius:

$$SLC_j = \frac{i_{sclj}^{\text{po PG}} - i_{sclj}^{\text{prieš PG}}}{i_{sclj}^{\text{po PG}}}, \quad (3)$$

čia  $i_{sclj}$  – trumpojo jungimo srovė paskirstytojo generatoriaus prijungimo šynoje prieš ir po prijungimo.

$$x_3 = \eta_j (SCL_j)^2, \quad (4)$$

čia  $\eta_j$  – trumpojo jungimo srovės lygio svorio faktorius.

4. generatoriaus dydžio (galios) faktorius:

$$x_4 = \sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{CP_j}{S_{\text{bazinė}}}, \quad (5)$$

čia  $\lambda_j$  – generatoriaus galios dydžio svorio faktorius;  $CP_j$  – prie šynos galima prijungti maksimali galia;  $S_{\text{bazinė}}$  – prie šynos prijungta galia.

Sudėjus 1-ą, 2-ą, 3-ą ir 5-ą lygtis, gaunama pilna tikslo funkcijos forma:

$$y = \sum_{j=1}^N \left( \beta_j \frac{P_L^{po\ PG}}{P_L^{prieš\ PG}} \right) + \sum_{j=1}^N \mu_j (U_j^{po\ PG})^2 + \sum_{j=1}^N \eta_j (SCL_j)^2 + \sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{CP_j}{S_{bazinė}}. \quad (6)$$

Tikslo funkcijoms yra labai svarbu tenkinti eilę atitinkamų reikalavimų arba sąlygų. Netenkinant šių sąlygų, gali būti klaidingai parinktos paskirstytųjų generatorių prijungimo vietos, o tai gali privesti prie gedimų elektros tinkle. Pagrindinės sąlygos: [2]

1. šnų įtampa neturi išeiti iš leistino intervalo, prijungus paskirstytąjį generatorių:

$$U_{\min} < U_j^{po\ PG} < U_{\max}. \quad (7)$$

Minimali ir maksimali įtampos atitinkamai yra lygios  $\pm 5\%$  nominalios tinklo įtampos.

2. trumpojo jungimo srovių dydis neturi viršyti apsaugos įrenginių galimo atjungti trumpojo jungimo srovės dydžio.
3. prie tinkle prijungtų paskirstytųjų generatorių aktyvioji galia neturi viršyti suminio sistemoje prijungtų apkrovų galios poreikio.
4. prie tinklo prijungto paskirstytojo generatoriaus galios faktorius turi būti atitinkamose ribose:

$$0,8 \leq \cos\varphi_{PG} \leq 1. \quad (8)$$

5. tikslo funkcijose naudojamų svorių faktorių suma turi būti lygi 1:

$$\beta + \mu + \eta + \lambda = 1. \quad (9)$$

Tikslo funkcijose naudojami svorio faktoriai įvertinami taip:

1.  $\beta = \frac{P_L^{prieš\ PG}}{P_L^{po\ PG}}, \quad (10)$

2.  $\mu = \frac{1}{(U_j^{po\ PG} - 1)^2}, \quad (11)$

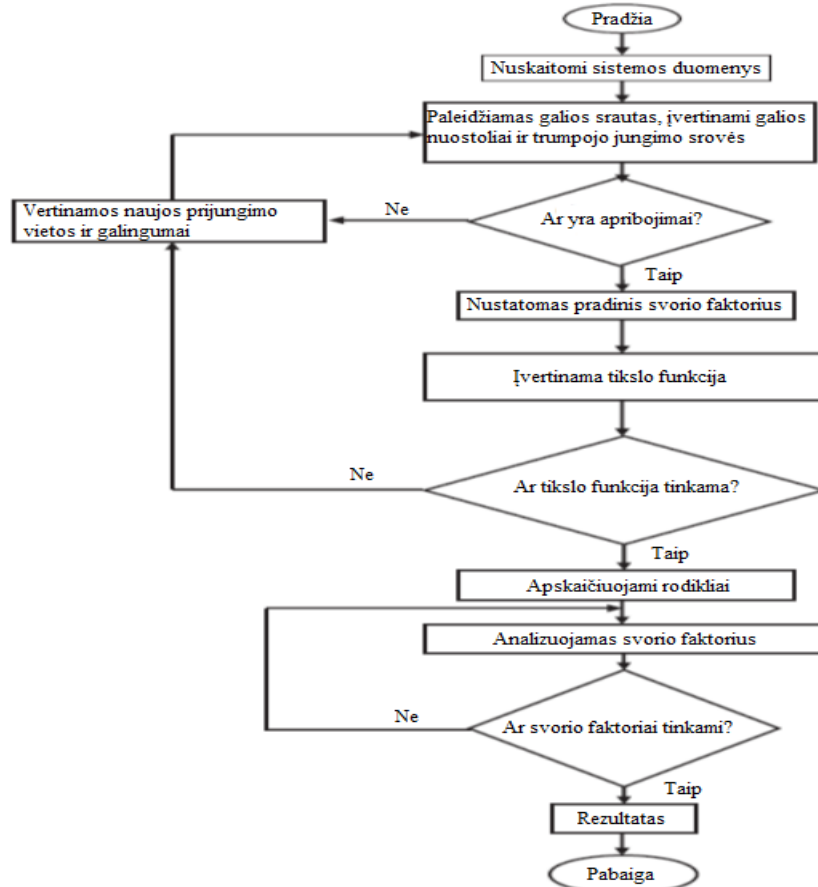
3.  $\eta = \left( \frac{i_{sclj}^{po\ PG}}{i_{sclj}^{po\ PG} - i_{sclj}^{prieš\ PG}} \right)^2, \quad (12)$

4.  $\lambda = \frac{S_{bazinė}}{CP_j}. \quad (13)$

## 4.2 Standartizuotasis algoritmas ir optimalaus paskirstytųjų generatorių išdėstymo ir galios parinkimo metodai

Paskirstytųjų generatorių galios ir vietos parinkimui galima naudoti standartizuotą algoritmą: [2]

1. sistemos duomenų įvertinimas - linijų varžų, šynų skaičiaus, aktyviųjų ir reaktyviųjų apkrovų;
2. paleidžiamas galios srautas;
  - 2.1. nustatomos šynų įtampos;
  - 2.2. nustatomi sistemos nuostoliai;
  - 2.3. nustatomos šynų trumpojo jungimo srovės;
3. nustatoma, ar yra kokie suvaržymai;
4. jei yra tam tikri suvaržymai – nustatomas pradinis svorio faktorius ir tikslo funkcija;
5. jei suvaržymų nėra, grįžtama į antrą žingsnį;
6. taikomas tinkamas optimizavimo būdas tikslo funkcijai nustatyti;
7. tikrinama, ar nustatyta tikslo funkcija tinka geriausiai;
8. apskaičiuojami reikiami rodikliai;
9. įvertinami svorio faktoriai – jei jie tinkami, operacijos baigiamos, jei ne – grįžtama į šeštą žingsnį;
10. jei apskaičiuota tikslo funkcija netinka, grįžtama į antrą žingsnį ir parenkamos naujos generatorių galios ir išdėstymo vietos.



1 pav. Standartizuoto paskirstytųjų generatorių galios ir vietos nustatymo algoritmo schema. [2]

Norint maksimaliai išnaudoti paskirstytųjų generatorių privalumus, reikia juos tinkamai išdėstyti skirstomajame tinkle. Tinkamas išdėstymas padeda pasiekti anksčiau minėtų tinklo energetinių ir techninių parametrų pagerėjimo. Optimaliausiam paskirstytųjų generatorių galios ir išdėstymo parinkimui naudojami tokie pagrindiniai metodai: [2]

1. Analitiniai metodai. Naudojantis šiais metodais, sistema pavaizduojama kaip matematinis modelis, kuriam apskaičiuojamas tiesioginis skaitinis sprendimas. Analitiniais metodais gaunami labai tikslūs rezultatai, jie nėra labai imlūs laikui. Geriausiai tinka nedidelėms paprastoms sistemoms su nedideliu kintamųjų skaičiumi. [2]
  - Tikrinių verčių analizė (EVA). Ši analizė naudojama energijos sistemos stabilumo vertinimui. Stabilumas tampa labai svarbus, kai apkrovos yra nestatinės. [2]
  - Indeksų metodas. Šis metodas paremtas, bet kurio parametro nukrypimu nuo jo tikrosios vertės. Indeksų metodas naudojamas sistemos patikimumo vertinimui. [2]
  - Jautrumo metodas. Šis metodas remiasi tuo, kad pasikeitus bet kuriam kintamajam, keisis ir ieškomo dydžio vertė. Pagrindinis metodo tikslas yra sumažinti galimą paklaidą. Metodas naudojamas paskirstytųjų generatorių ir kondensatorių baterijų dydžio ir vietos skirstomajame tinkle nustatymui. [2]
2. Klasikiniai optimizaciniai metodai. Šie metodai naudojami norint sumažinti arba padidinti sudarytą formuluotę, atitinkamai nurodytoms sąlygoms ir anksčiau minėtų suvaržymų ribose. [2]
  - Optimalaus galios srauto metodas. Šis metodas labai svarbus tolimesniam elektros sistemų plėtojimui, nes juo nustatoma optimalus esamų sistemų darbas. Taip pat metodu galima nustatyti šynų įtampos lygį ir tekančią reaktyviąją galią. [2]
  - Eilinis optimizavimas. Šis optimizavimas naudojamas supaprastinti skaičiavimams simuliacijomis paremtuose optimizavimo užduotyse. Metodas tinkamas paskirstytųjų generatorių vietos ir dydžio nustatymui skirstomajame tinkle, siekiant sumažinti sistemos nuostolius arba norint surasti pusiausvyrą tarp sistemos nuostolių ir generatorių dydžio. [2]
  - Dinaminis programavimas – kelių lygių tipo nuoseklus optimizavimo metodas, naudojamas spręsti sudėtingiems uždaviniams realiame laike. Sprendimas atliekamas kitoje laiko srityje, siekiant išskaidyti uždavinį į keletą mažesnių dalių. [2]
3. Neuroninio tinklo metodai. Šie metodai yra pakankamai efektingi pasiekti tikslius ir optimalius elektrinių išdėstymo rezultatus. Jie yra paremti dirbtinio intelekto neuroninių tinklų mokymu, įvedant į tinklą užduoties kintamuosius ir gaunant reikiamus atsakymus. [2]
  - Genetinis algoritmas. Neuronų tinklo veikimas pagrįstas natūralios atrankos ir genetiniais procesais. Algoritme veikia, mutacijos, paveldimumas, atranka ir kryžminimas. Reikalauja daug skaičiavimų, nes vertinama ir susiejama daug parametrų. Sprendžiant optimizacinius uždavinius, išrenkamas tam tikras skaičius galimų sprendinių, kurie evoliucionuojami į geresnius. Evoliucija vykdoma tol, kol gaunamas sprendinys, geriausiai atitinkantis tikslo funkciją. [2]

- Augalų augimo simuliacijos algoritmas. Šis algoritmas yra paprastas ir greitas optimizavimo metodas, kuriam nereikalingas parametru reguliavimas. Metodą galima pritaikyti keliems skirtingų sistemų optimizavimo uždaviniams, tokiems kaip paskirstytųjų generatorių optimalios galios ir išdėstymo bei kondensatorių baterijų talpos nustatymas spinduliniame tinkle. [2]
4. Įvairiapusiai (maišyti) metodai. Šie metodai nepriskiriami prie anksčiau minėtų grupių, nes remiasi kitokiais principais arba yra jau minėtų metodikų deriniai. Pagrindinės metodikos: Monte Carlo simuliacija, klasterinė analizė, brutaliųjų jėgos algoritmas, didžiojo sprogimo-didžiojo susitraukimo optimizacinis algoritmas. [2]

Skyriuje nurodyti pagrindiniai tinkamo paskirstytųjų generatorių išdėstymo privalumai bei metodai, leidžiantys pasiekti norimus rezultatus. Tinkamas išdėstymas padeda užtikrinti elektros tinklo patikimą veikimą, palaiko stabilius elektrinius parametrus bei palengvina tolimesnę tinklo plėtojimą ir leidžia sumažinti ekonominių resursų panaudojimą.

## 5 PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ POVEIKIS TINKLO DARBUI

Didelis kiekis prijungtųjų paskirstytųjų generatorių gali sukelti daug problemų. Pagrindinės problemos:

1. gedimų skaičiaus tinkle padidėjimas;
2. įtampos lygio svyravimai;
3. sistemos stabilumas;
4. galios srautų kitimai.

### 5.1 Gedimų tinkle skaičiaus padidėjimas

Paskirstytųjų generatorių prijungimas veikia sistemos darbą įvairiais būdais. Ne išimtis yra ir tinkle veikiantys įrenginiai. Prietaisai, kurie atlieka prijungimus ir atjungimus įvykus gedimui, grindžiami pažaidos atjungimu tuo laiko momentu (angl. *dead time*), kuriuo darbo srovės vertė yra lygi nuliui – srovė neteka ir galima elektrinio gedimo dejonizacija. Maksimalus reikiamas laikas, degančiam elektros lankui dejonizuotis, tinkle iki 35 kV, neviršija 300 ms. Naudojant paskirstytuosius generatorius spinduliniėje sistemoje, gedimo atjungimas aukštesnėje apsaugos zonoje sumažina tekančią srovę visiškai jos nepanaikinant, nes papildomas generatorius tiekia energiją gedimui, todėl lanko dejonizacija tampa negalima. Dėl šios priežasties reikalinga selektyvi komunikacijos sistema tarp visų generatoriaus apsaugos sistemų. [3]

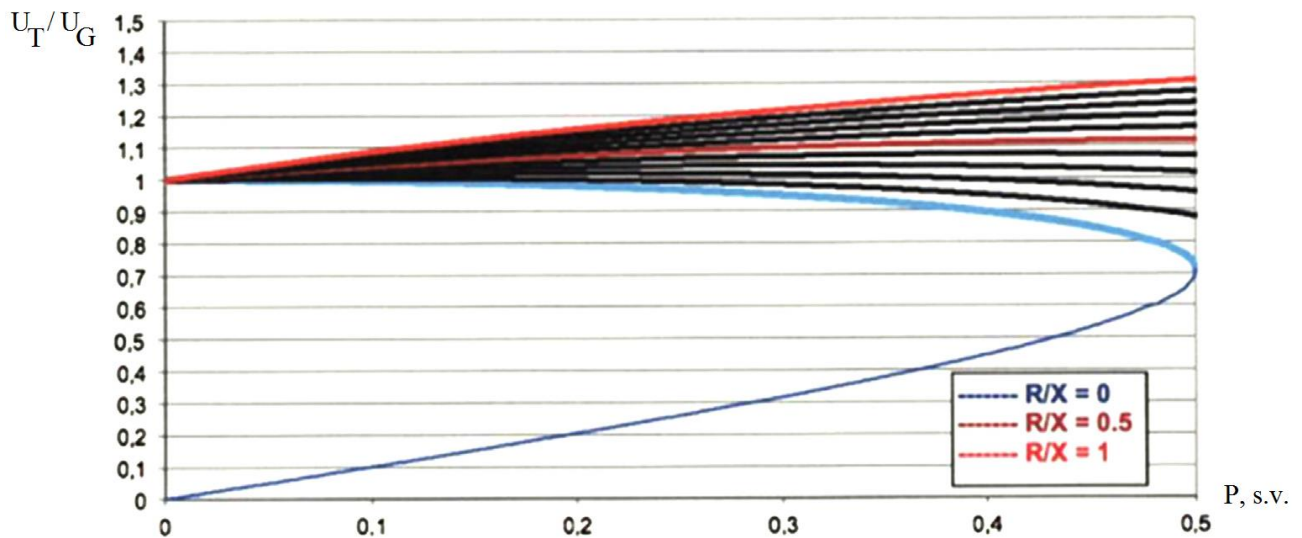
Fazių skirtumas yra viena dažniausių priežasčių, kodėl nenorima prie tinklo jungti paskirstytųjų generatorių, o ypač tų, kurie gali dirbti salos režimu ir prisijungti prie elektros sistemos. Dėl šių generatorių tiekiamos įtampos fazių skirtumo, elektros sistemoje galimi labai dideli elektriniai ir mechaniniai trukdžiai, kurie gali sugadinti generatorių ir kitus prie tinklo prijungtus įrenginius. Šiai problemai spręsti reikia naudoti fazės kampo tarp generatorių ir elektros tinklo kontrolės sistemą. [3]

Prijungiant paskirstytuosius generatorius, turi būti išlaikyti energijos kokybės reikalavimai. Tam tikslui keičiamos apsaugos įrenginių schemos, kad būtų sumažintas elektros tiekimo sutrikimų skaičius ir jų paveiktų teritorijų plotas, dėl to sumažėja paveiktų elektros vartotojų skaičius. Iki prijungiant paskirstytuosius generatorius, minėti tikslai būdavo pasiekiami kaip įmanoma padidinant apsaugų vėlinimą, kai jungiantieji prietaisai yra žemesnėse apsaugos zonose. Taip padidinamas perjungimų skaičius ir tikimybė, kad gedimai išnyks savaime, pavyzdžiui dejonizuosis degantis elektros lankas. Naudojant tokią metodiką, vėlinimo laikas didėja ir apsaugos įrenginiams, esantiems aukštesnėse apsaugos zonose, dėl apsaugų koordinavimo. Prijungiant paskirstytuosius generatorius, tokios metodikos naudoti nebegalima, nes ji prieštarauja energijos kokybės reikalavimams, tokiems kaip trumpalaikių įtampos atsijungimų skaičiui. Dėl šios priežasties naudojami greito veikimo apsaugos įrenginiai ir trikdžių stebėjimo prietaisai. [3]

## 5.2 Įtampos lygio svyravimai

Poveikis įtampai, atsirandantis dėl paskirstytųjų generatorių prijungimo, priklauso nuo skirtingų kintamųjų, tokių kaip tinklo tipas, vartotojų apkrovų lygis, generatorių vietos tinkle ir jų pagaminamos energijos skvarbos. Pagal Europos standartą EN 50610, generatoriaus ir tinklo bendro jungimo taške, žemos ir vidutinės įtampos tinkluose, leidžiamas 10 % įtampos kitimas. Įtampa šiose ribose turi būti išlaikoma bent 95 % savaitės. Sąlygai patikrinti, savaitę kas dešimt minučių atliekami įtampos vidutinės efektinės vertės matavimai. [3]

Prijungus paskirstytuosius generatorius, padidėja  $k$  parametras, kuris sieja aktyviają ir reaktyviają laidininko varžą su įtampos kitimu prijungimo prie tinklo taške, kaip aktyviosios galios perdavimo funkcija. Žemoms parametro  $k$  vertėms aktyvioji galia nedaro praktiškai jokio poveikio įtampos lygiui (2 pav., mėlyna kreivė), bet  $k$  parametrai kylant minėta galios įtaka pasidaro labai ryški (2 pav., raudona kreivė). Parametro vertė, esanti didesnė už 1, parodo, jog paskirstytojo generatoriaus perduodama galia sukelia įtampos padidėjimą kitose prijungtose tinklo įrenginiuose. Šis efektas gali pridaryti daug žalos žemos ir vidutinės įtampos tinkluose, nes jie dažnai suprojektuoti vienkrypčiam galios srauto tekėjimui nuo ribos su perdavimo tinklu iki galutinio vartotojo. [3]



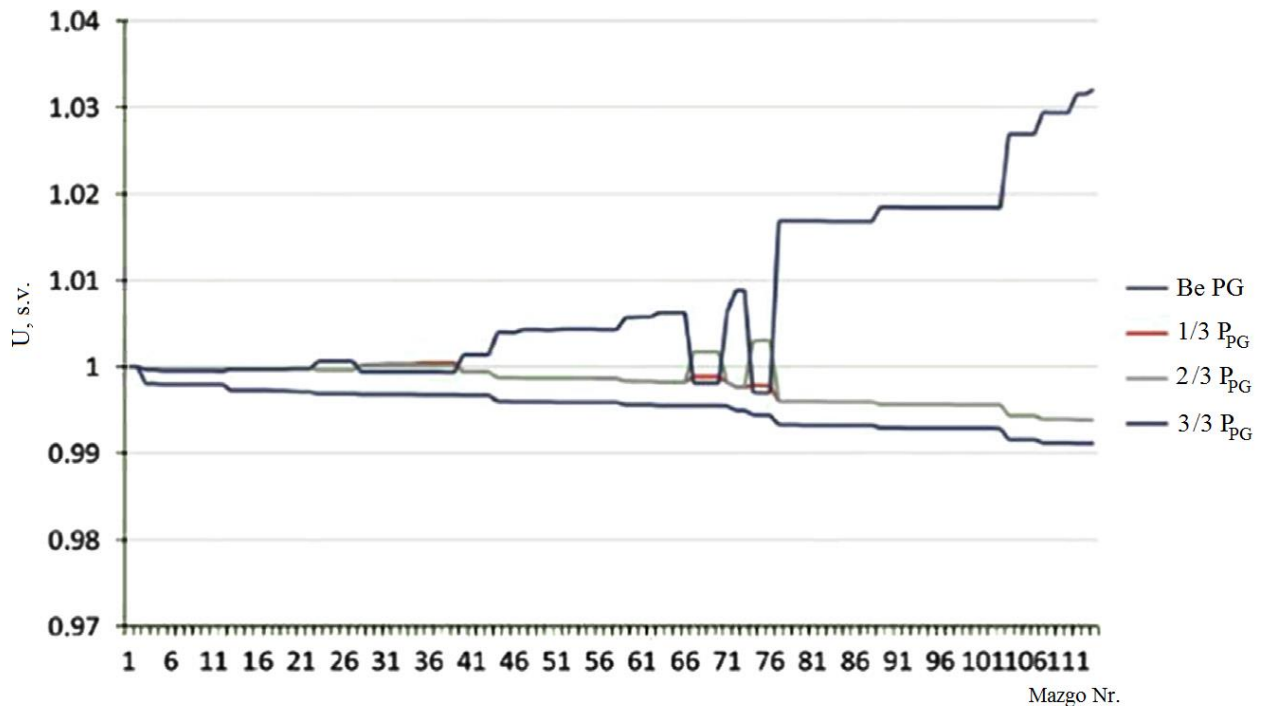
2 pav. Galios – įtampos kitimo kreivės esant skirtingoms  $k$  vertėms. [3]

Ši įtampos padidėjimą suvaldyti galima vartojant arba tiekiant tinklui papildomą reaktyviąją galią. Reikalingos reaktyviosios galios kiekis, reikalingas nominaliam įtampos lygiui prijungimo taške palaikyti, išreiškiamas kaip generatoriaus įtampos kvadrato ir laidininko reaktyviosios varžos santykis: [3]

$$Q = \frac{U_G^2}{X_L}. \quad (14)$$

Ši kontrolės būdą galima panaudoti tik iki tam tikro lygio, nes reikiamas reaktyviosios galios ir į tinklą perduodamo aktyviosios galios kiekio santykis yra lygus 2, o tai reiškia, kad labai padidėtų išlaidos reaktyviosios galios kompensavimo įrenginiams. [3]

Skirtingos įtampos tinkluose paskirstytųjų generatorių poveikis įtampos lygiui skiriasi. Vidutinės įtampos tinkle aktyviosios galios srautai turi didesnę poveikį nei reaktyviosios, nes  $k$  parametras juose tinkluose dažniausiai yra didesnis už vienetą. Tai reiškia, kad įtampos didėjimas yra tiesiogiai proporcingas aktyviosios galios tiekimui į mazgą. 3-ame paveiksle parodytas paskirstytojo generatoriaus vietos poveikis įtampai vidutinės įtampos segmentuotame tinkle:



3 pav. Nominaliosios tinklo įtampos priklausomybė nuo generatoriaus prijungimo vietos. [3]

Mazge tiekiant aktyviają galią į tinklą, galios srautas sekcijose, artimesnėse pastotei, sumažėja. Šis sumažėjimas sukelia mažesnį įtampos lygio kritimą tose sekcijose. Dėl tos priežasties, tinklo įtampa padidėja ir išlaiko panašų lygį. Kuo paskirstytasis generatorius arčiau linijos pradžios, tuo mažesnę įtaką jis daro tolimesnių linijų įtampoms, nes tada yra mažiau sekcijų, kuriuose sumažėja galios srautai. Didžiausi įtampos lygio kitimai atsiranda tada, jei galia tiekama į tinklą linijos gale, nes sumažėjęs galios srautas paveikia daugiau tinklo sekcijų ir taip išauga įtampa. [3]

Žemosios įtampos tinkluose aktyviosios galios tiekimas turi didesnę įtaką įtampos lygiui nei reaktyvioji galia, nes  $k$  parametras žemosios įtampos linijose yra daug didesnis už 1. Šiuo atveju, reguliuojant galios srautus linijose, keičiasi galios srautas per pastotės transformatorių iš vidutinės įtampos į žemos įtampos tinklą. Galima daryti tokias prielaidas: [3]

- jei aktyvioji galia yra tiekama į tinklą, įtampos kritimas pastotės transformatoriuje pasikeis nežymiai, tačiau įtampos tinkle keisis pastebimai; [3]
- jei reaktyvioji galia yra tiekama į tinklą, įtampos kritimas linijoje beveik nesikeis, bet keisis įtampos kritimas pastotės transformatoriuje, taip paveikiant visus žemosios įtampos tinklo mazgus, prijungtus prie to transformatoriaus; [3]
- galios tiekimas į tinklą galutiniame linijos mazge sukelia įtampos padidėjimą mazguose, šalia paskirstytojo generatoriaus prijungimo mazgo; [3]
- jei galia perduodama į tinklą paskutiniame linijos mazge, pastebimi du įtampos kritimo efektai – kritimas linijose, kurį sukelia aktyviosios galios kitimas ir kritimas transformatoriuje, kuriam įtaką daro reaktyviosios galios pokyčiai; [3]



- jei į tinklą elektros energiją vienu metu tiekia keletas generatorių, įtampa gali labai išaugti. Kuo galios tiekimas į tinklą labiau išsklaidytas, tuo mažesnis poveikis įtampos didėjimui. [3]

Prijungus paskirstytuosius generatorius prie tinklo, taip pat reikia įvertinti ir įtampos mirgėjimą ir staigiuosius įtampos pokyčius. Staigusis įtampos pokytis yra apibrėžiamas kaip pavienis staigus įtampos kitimas. Mažųjų generatorių elektrinė yra prijungimo taško įtampos staigiųjų pokyčių priežastimi ir turi atitikti jų dydį (d) ribojančius reikalavimus. Šių parametrų ribos nurodomos lentelėje: [1]

1 Lentelė. Staigiųjų įtampos pokyčių ir mirgėjimo leistinosios ribos. [1]

Įtampos pokyčių ir mirgėjimo dažnis r (kartais per valandą)	Leistinasis įtampos pokytis ir mirgėjimas, %	
	35 kV ir žemesnė įtampa	110 kV ir aukštesnė įtampa
$r \leq 1$	4	3
$1 < r \leq 10$	3	2,5
$10 < r \leq 100$	2	1,5
$100 < r \leq 1000$	1,25	1

Paskirstytųjų generatorių elektrinės generatoriaus įjungimo ar išjungimo sukeliamas įtampos pokytis elektrinės atitikties sertifikate apibrėžiamas  $k_u(\Psi_K)$  koeficientu. Šis koeficientas nustatomas per elektrinės tipo bandymus ir tikrinamas matavimais elektrinei veikiant. Staigiojo įtampos pokyčio (d) ir įtampos pokyčio koeficiento santykis yra: [1]

$$d(\%) = k_u(\Psi_K) \cdot \frac{S_N}{S_K} 100, \quad (15)$$

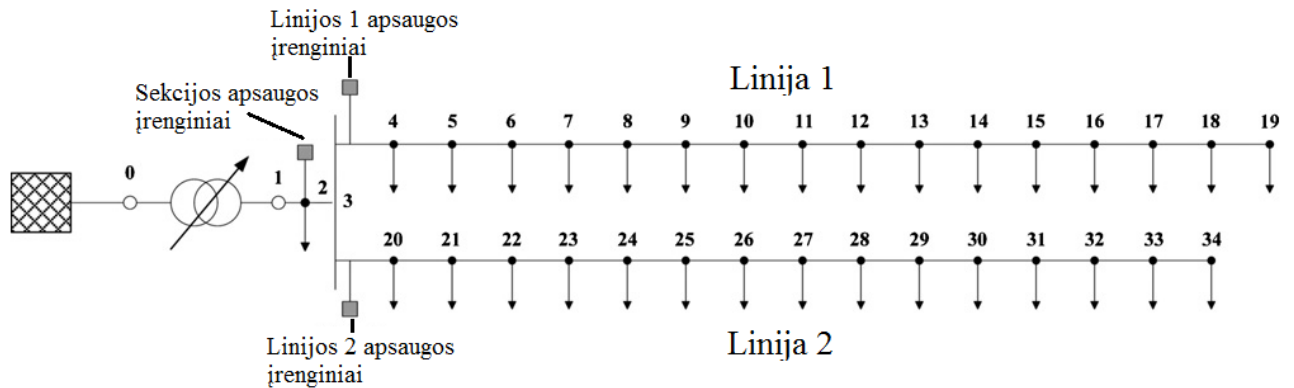
čia  $\Psi_K$  – trumpojo jungimo grandinės fazinis kampas prijungimo taške;  $S_N$  – mažųjų generatorių elektrinės vardinė pilnutinė galia;  $S_K$  – trumpojo jungimo galia prijungimo taške.

Matoma, kad įtampos lygio kitimas labai priklausomas nuo tiekiamos į tinklą galios. Galios augimui suvaldyti, nustatomos generavimo ribos, kurias reguliuoja perdavimo tinklo dispečeris, arba jos nustatomos pagal atliktus matavimus prijungimo taške. Paskirstytųjų generatorių galios ir dažnio valdymas yra labai svarbus ir turi būti atliekamas ne lėčiau kaip per 30 sekundžių. Tai labai svarbu mikro ir izoliuotuose tinkluose, kur nevaldomas dažnis gali sukelti įtampos griūtį. [1]

### 5.3 Sistemos stabilumas

Kaip jau minėta anksčiau, paskirstytieji generatoriai skirstomajame tinkle gali labai pagerinti tinklo darbą – palaikyti nominalų įtampos lygį, padengti pikines apkrovas, bet gali sudaryti ir sunkumų. Vienas iš jų – stabilaus tinklo darbo sutrikdymas. Su stabilumu susijusios problemos aktualiausias sinchroninius generatorius naudojančioms elektrinėms, nes jų daugiausia naudojama šiluminėse, vėjo, hidro ir dujų turbinų elektrinėse. Be to, naudojant sinchroninius generatorius, trumpojo jungimo srovės būna didesnės. [4]

Atliekant sistemos stabilumo tyrimus, užtenka vertinti tinklo darbą įvykus trifaziam trumpajam jungimui, nes jis apibrėžia pačias sunkiausias sąlygas pereinamųjų procesų stabilumui. Stabilumo tyrimas atliktas Italijos spinduliniam skirstomajam tinklui, bet rezultatai tinka ir kitose šalyse, nes jie yra plačiai naudojami visose elektros sistemose. [4]



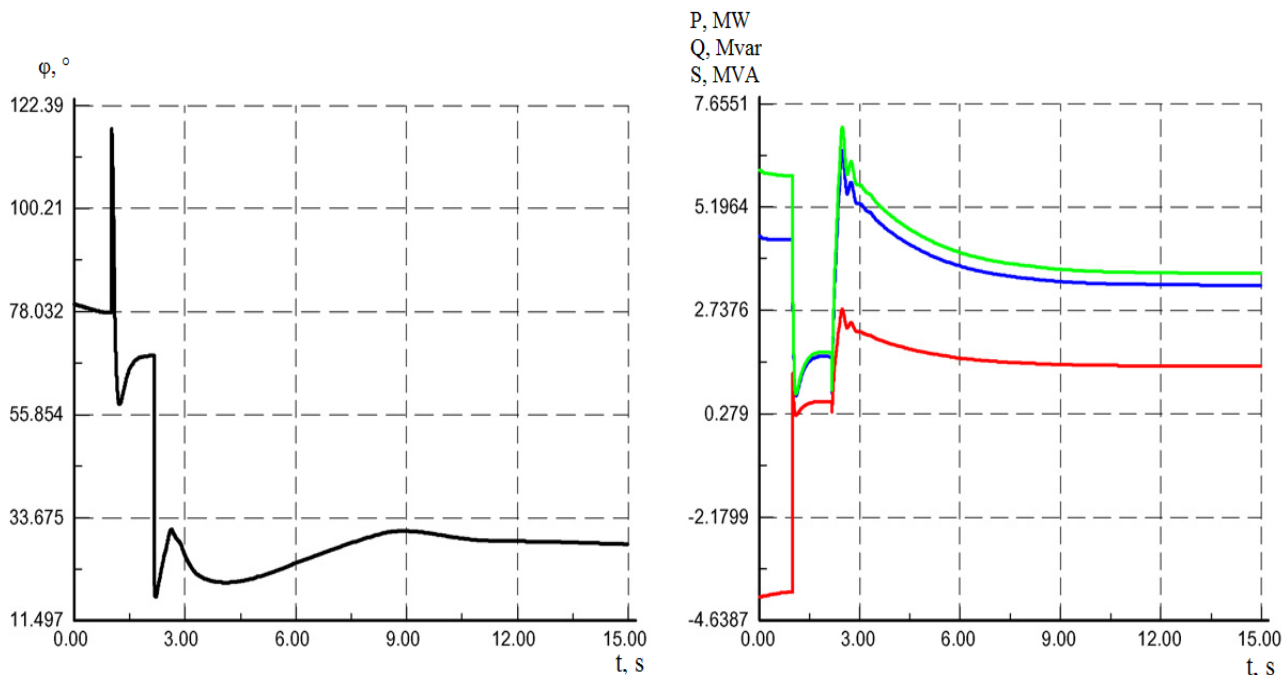
4 pav. Spindulinio skirstomojo tinklo schema. [4]

Jei skirstomajame tinkle įvyksta gedimas, paskirstytasis generatorius atsijungia ir negamina energijos, kol gedimas nepašalinamas. Šiuo atveju, kadangi paskirstytojo generatoriaus tikslas yra tiekti galią į tinklą, pereinamųjų procesų stabilumas nėra labai svarbus. Nepaisant to, jei paskirstytasis generatorius naudojamas įtampai palaikyti kritinių procesų metu, tada reikia užtikrinti, kad generatorius neatsijungtų, esant tolimiems sistemos gedimams. Be to, paskirstytojo generatoriaus inercijos pastoviajai dažnai esant nedidelei, o apsaugų suveikimo laikui esant ilgam, gali nepavykti užtikrinti stabilumo visiems gedimams skirstomajame tinkle, todėl pereinamųjų procesų stabilumas tampa labai svarbus. [4]

Pereinamųjų procesų analizė atlikta skirstomojo tinklo stabilumo patikrinimui, kai trumpasis jungimas įvyksta maitinančiose šynose. Kadangi trumpųjų jungimų metu sinchroninis generatorius pradeda sukintis greičiau, jis gali prarasti sinchronizmą ir pasidaryti nestabilus. Generatoriaus stabilumas nustatomas įvertinant rotoriaus kampą. Pereinamųjų procesų stabilumas vertinamas palyginant tiriamojo generatoriaus rotoriaus kampą su atstojamojo generatoriaus, kuris imituoja elektros sistemą, rotoriaus kampu. Pereinamųjų procesų analizė atlikta tokiomis sąlygomis: [4]

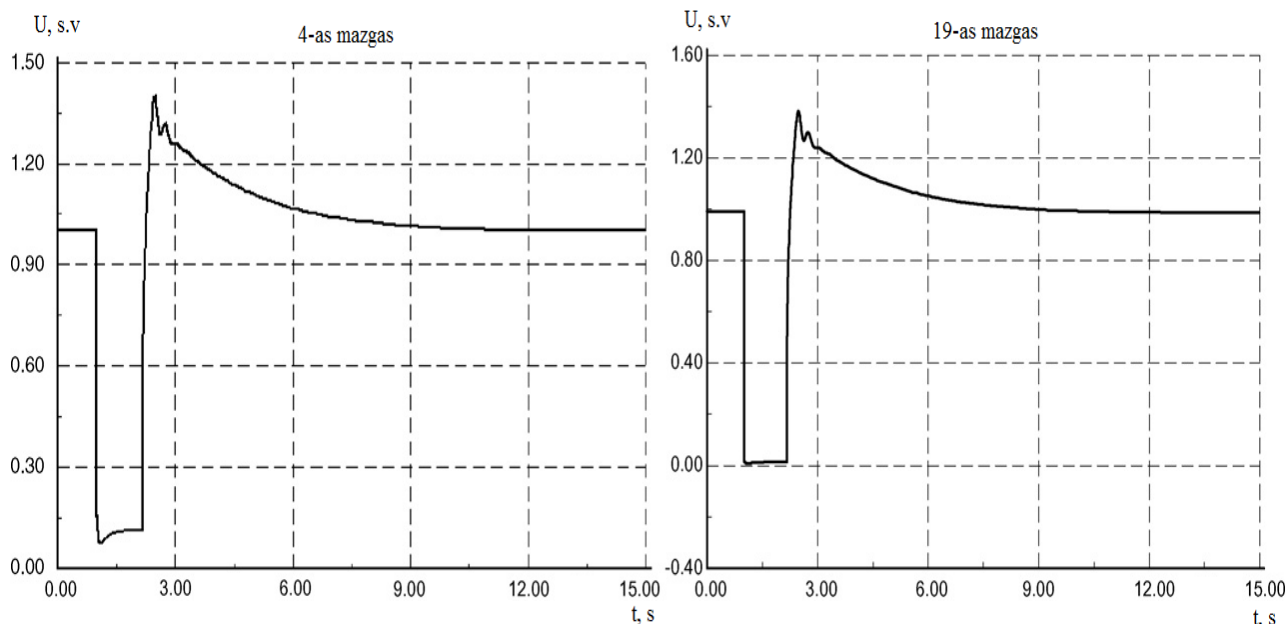
- trifazis ilgalaikis trumpasis jungimas maitinančiose šynose be kartotinio jungimo;
- trifazis trumpalaikis trumpasis jungimas maitinančiose šynose be kartotinio jungimo;
- trifazis trumpalaikis trumpasis jungimas maitinančiose šynose su kartotiniu jungimu.

Pirmuoju atveju 4,5 MW galios paskirstytasis generatorius prijungtas prie 19-os šynos ir trumpasis jungimas įvyksta, kai generatorius tiekia galią į tinklą. 5-ame paveiksle pavaizduoti gauti dinamiųjų procesų grafikai.



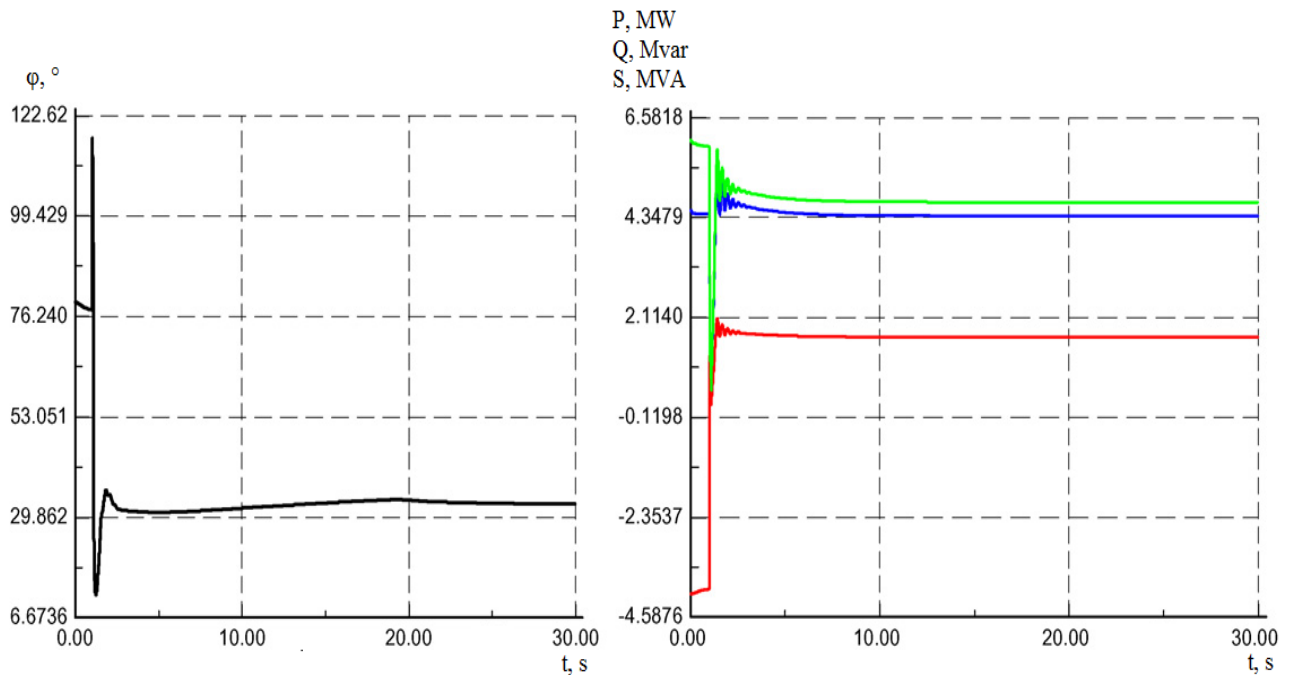
5 pav. Rotoriaus kampo, aktyviosios (mėlyna), reaktyviosios (raudona) ir pilnosios (žalia) galios laikinės priklausomybės įvykus trumpajam jungimui pirmuoju atveju. [4]

Iš grafikų matoma, kad stabilumas atgaunamas po kelių sekundžių. Pirmoji linija lieka dirbti salos režimu, suveikus šynų ir linijos apsaugoms. 6-ame paveiksle pavaizduotos įtampos 1-os linijos pradžioje ir pabaigoje – atitinkamai 4-ame ir 19-ame mazge. Išskyrus trumpojo jungimo laikotarpį, įtampa palaikoma paskirstytojo generatoriaus. [4]

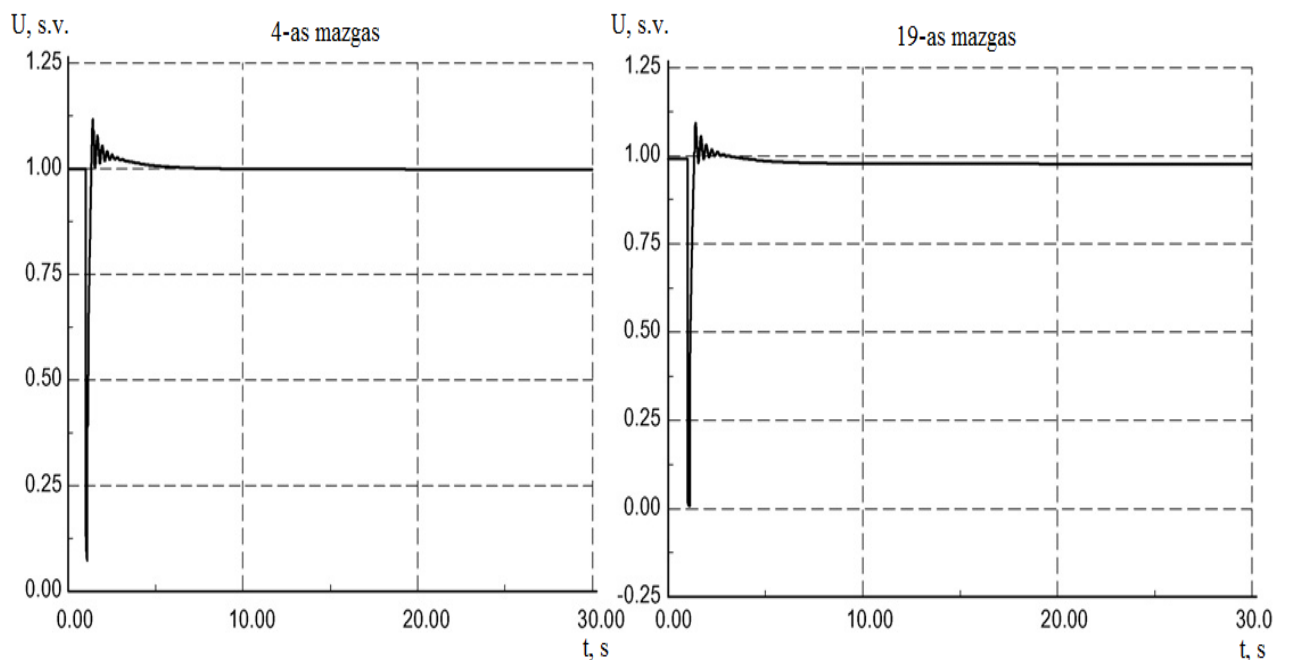


6 pav. 4-to ir 19-to mazgo įtampos pirmuoju atveju. [4]

Antruoju ir trečiuoju atveju, generatorius prijungtas 19-ame mazge, galia – 4,5 MW, vyksta trumpalaikis trumpasis jungimas, be ir su pakartotiniu jungimu, tinklo apkrova maksimali. Kai pakartotinis jungimas nenaudojamas, 1-a ir 2-a linijos suformuoja dirba salos režimu. 7-ame paveiksle pavaizduotos galios ir rotoriaus kampas, o 8-ame – įtampos 1-os linijos ribiniuose mazguose. [4]

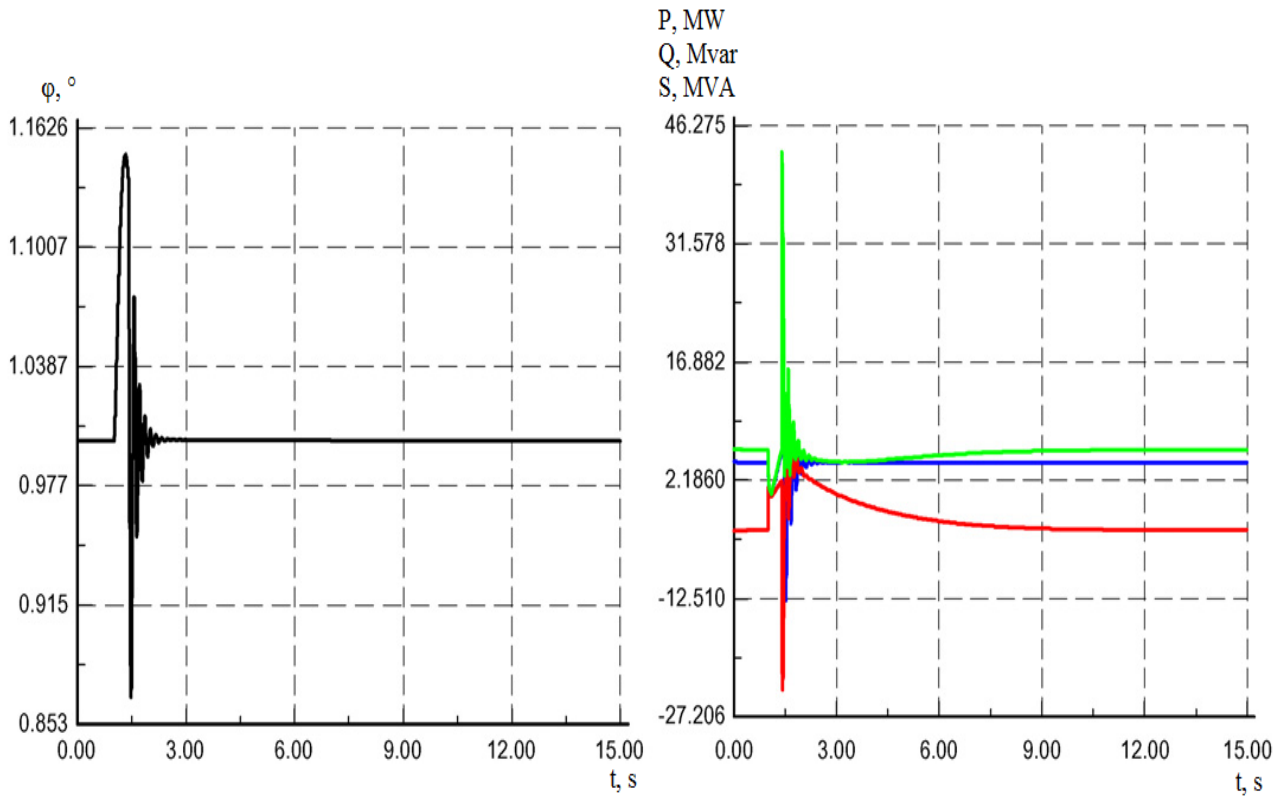


7 pav. Rotoriaus kampo, aktyviosios, reaktyviosios ir pilnosios galios laikinės priklausomybės įvykus trumpajam jungimui antruoju atveju. [4]



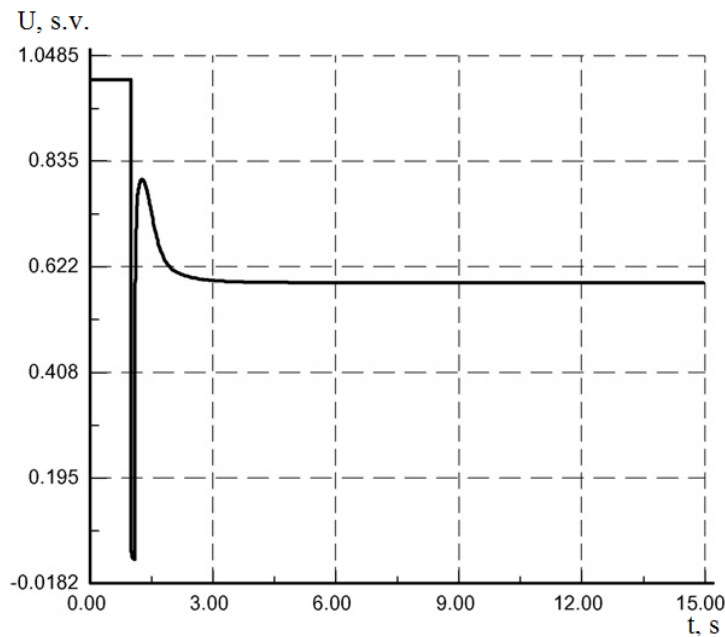
8 pav. 4-to ir 19-to mazgo įtampos antruoju atveju. [4]

Kai naudojamas pakartotinis jungimas, tinklas išlaiko pradinę struktūrą be jokių sinchronizacijos problemų. Trikdžio metu suveikia tik maitinančiųjų šynų apsauga ir, kadangi trumpasis jungimas yra savaime dingstantis, pakartotinis jungimas jungiamas tik iš maitinančiųjų šynų apsaugos. Rotoriaus kampo ir galių grafikai parodyti 9-ame paveiksle. [4]



9 pav. Rotoriaus kampo, aktyviosios, reaktyviosios ir pilnosios galios laikinės priklausomybės įvykus trumpajam jungimui trečiuoju atveju. [4]

Taip pat nagrinėtas atvejis, kai sistema prarado stabilumą. Generatorius prijungtas 27-ame mazge, atiduodama galia – 1,5 MW, trikdis savaime išnykstantis, esant maksimaliai apkrovai. 10-ame paveiksle parodyta šios situacijos sukelta įtampos griūtis 27-ame mazge, nustojus veikti trikdžiui. [4]



10 pav. Įtampos lygis 27-ame mazge. [4]

Pagal atliktus bandymus matoma, kad tinklo sugebėjimas išlaikyti stabilumą priklauso nuo generatoriaus prijungimo vietos, tinklo apkrovos ir generatorių perduodamos galios. [4]

## 6 PASKIRSTYTŲJŲ GENERAVIMO ŠALTINIŲ PANAUDOJIMAS SISTEMOS DAŽNIO REGULIAVIMUI

Dažnis yra labai svarbi sistemos darbo charakteristika, kuris pokyčiai daro įtaką visos sistemos darbui. Nuo 47,0 Hz iki 53,0 Hz dažnių juostoje dažnio matavimo paklaida neturi viršyti  $\pm 10$  mHz. Šis reikalavimas turi būti vykdomas, net jei įtampos kreivė būtų iškreipta harmonikų. Fazės pokytis (iki  $20^\circ$ ) šios charakteristikos neturi paveikti. [1]

Pakitęs dažniui, jis reguliuojamas naudojantis aktyviąja galia. Pirmiausia aprašoma sistemos dinamika, remiantis balanso lygtimi: [8]

$$\frac{dW_k}{dt} = P_g - P_c, \quad (16)$$

čia  $W_k$  – besisukančių mašinų kinetinė energija, J;  $P_g$  – generuojama galia, W;  $P_c$  – vartojama galia, W.

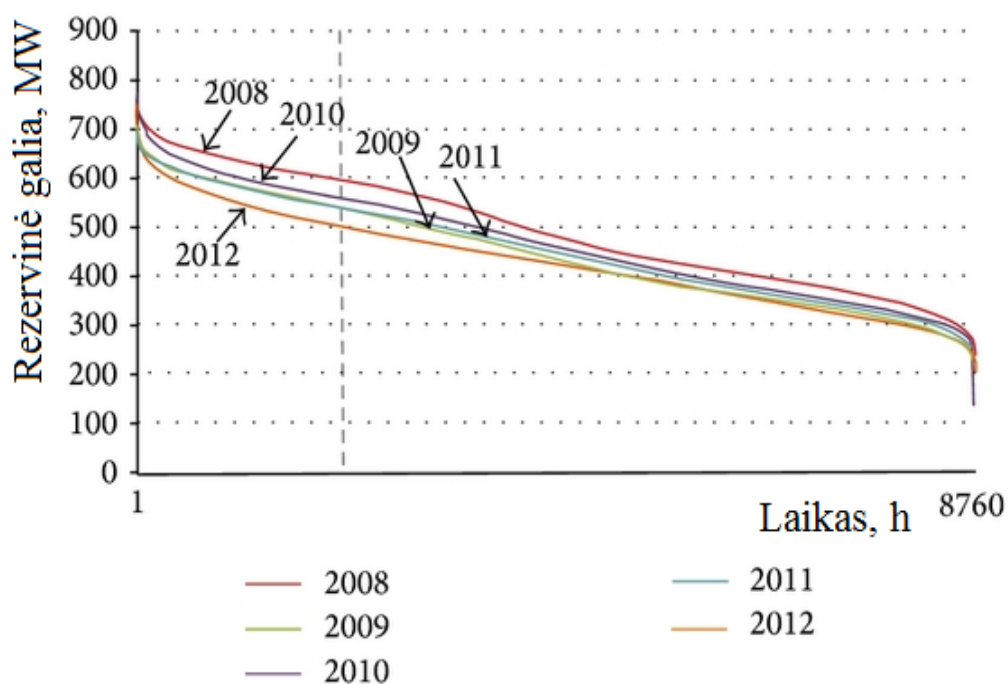
Ši lygtis nurodo, kaip generuojamos ir vartojamos energijos ne balansas veikia sukimosi energiją sistemoje. Diferencijuojant 16-ąją lygtį ir atliekant kitus veiksmus, gaunama dažnio pokyčio lygtis: [8]

$$\Delta f = \frac{\Delta P_g}{K_n(1 - e^{-\frac{f_N K_n}{(2W_k)t}})}, \quad (17)$$

čia  $\frac{f_N K_n}{2W_k}$  – laiko pastovioji, paprastai 5 – 10 s;  $K_n$  – sistemos valdymo stiprinimas.

Be dažnio valdymo, dažnio pokytis proporcingas galiai  $\frac{1}{K_n}$  karto. [8]

Sistemos dažnio reguliavimą atliekant paskirstytaisiais generavimo šaltiniais, galima sumažinti reikalingos rezervinės galios kiekį. Remiantis Italijos patirtimi, jiems reikalingas galios rezervas sumažėjo nuo 600 MW 2008-iais iki 500 MW 2012-iais. [6]



11 pav. Galios rezervo poreikio kitimas Italijos elektros sistemoje. [6]

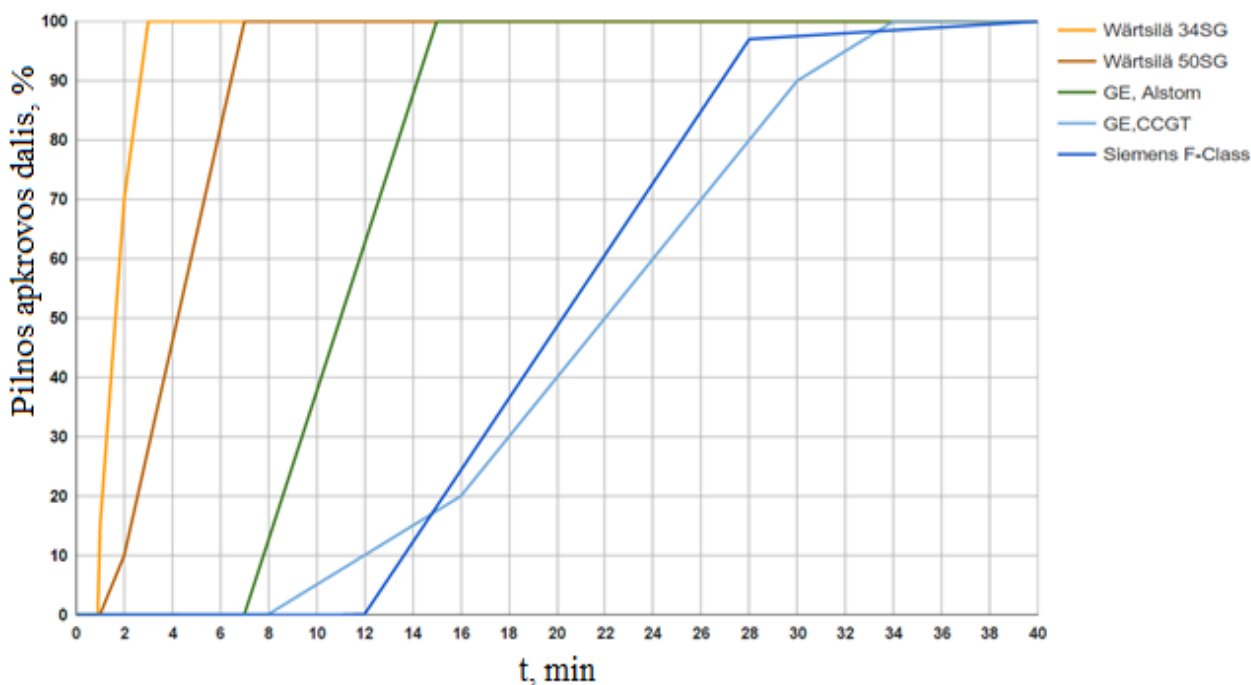
Paskirstytųjų šaltinių tinkamumas sistemos dažnio reguliavimui įvertinamas pagal laiką, per kurį šaltinis gali pradėti tiekti galią į tinklą.

Vėjo ir saulės elektrinių generuojami energijos kiekiai dažnai yra nepastovūs ir jų įvertinimui reikia atlikti prognozes. Taip yra dėl šių elektrinių priklausomybės nuo gamtos sąlygų, kurios nuolat kinta, bet išlaiko tam tikrą sezoniškumą. Elektros sistemos dažniui palaikyti reikalingas tam tikras pastovumas ir garantija, jog reikiamas elektros energijos kiekis tinklą pasieks tam tikru nustatytu laiku. Dėl savo nepastovumo, saulės ir vėjo elektrines dažnio reguliavimui tikslinga naudoti kartu su elektros energijos kaupimo prietaisais. Energijos kaupiklių panaudojimas kompensuoja elektrinių nepastovumą, nes gali greitai reaguoti į aktyviosios galios trūkumą tinkle. [6]

Hydroelektrinės pasižymi pastovesne elektros generacija, negu saulės ar vėjo elektrinės. Vienintelis apribojimas yra prieinami vandens resursai, kurie gali sumažėti sausros periodu. Užtvankinės hidroelektrinės dažnio reguliavime gali dalyvauti keisdamos iš rezervuaro į turbiną paduodamo

vandens srautą. Upės tėkmės hidroelektrinių atveju nenaudojami vandens rezervuarai, todėl negalima padidinti generacijos išaugus elektros energijos poreikiui. Hidroakumuliacinės elektrinės yra labiausiai tinkantis hidro įrenginys sistemos dažnio reguliavimui. Šių elektrinių agregatai gali dirbti tiek siurblio, tiek generatoriaus režimu. Atsiradus elektros energijos poreikiui, vanduo iš viršutinio rezervuaro per vamzdžius paleidžiamas į apatinį, taip sukant generatorių turbinas. Generatorių atiduodama galia reguliuojama atidarant arba uždarant srauto reguliavimo sklendes. Užtvankinės ir hidroakumuliacinės elektrinės gali greitai reaguoti į dažnio pokyčius tinkle, nes turi paruoštą vandens rezervą. Hidro elektrinių paleidimui užtenka kelių minučių.

Bio ir gamtines dujas deginančios elektrinėse naudojamos dujų turbinos tiek kogeneracinėse, tiek kombinuoto ciklo elektrinėse. Jų paleidimas trunka iki keliolikos minučių, o vardinei galiai pasiekti užtenka 40 minučių. Spartesniu paleidimu pasižymi stūmokliniai vidaus degimo varikliai – maksimalią galią pasiekia per keletą minučių. Jie gali būti varomi dujiniu arba skystu kuru. [7]



12 pav. Dujų turbinų ir vidaus degimo variklių maksimalios apkrovos pasiekimo grafikas. [7]

Elektrinės, kuriose naudojamos garo turbinos, dažniausiai deginamas kietas arba skystas kuras. Šios elektrinės paskirstytajame generavime dažniausiai dalyvauja prie paskirstymo tinklo esant prisijungus įmonėms su nuosavomis tokio tipo elektrinėmis. Taip pat gali būti statomos nedidelės galios garo turbinų elektrinės, kurios kaip kurą naudoja medienos atliekas. Priklausomai nuo galios, garo turbinų elektrinių paleidimas gali užtrukti iki kelių valandų, todėl greitam dažnio reguliavimui sistemoje jos nėra tinkamos. Išimtis yra pirminis galios rezervas – elektrinės dirba tik 90-95 % visos galios, kad atsiradus poreikiui galėtų padidinti generavimą ir padengti apkrovos poreikius.

Dažnio valdymui naudojamos kelios sistemos – pirminis, antrinis ir tretinis valdymas.



## 6.1 Pirminis dažnio valdymas

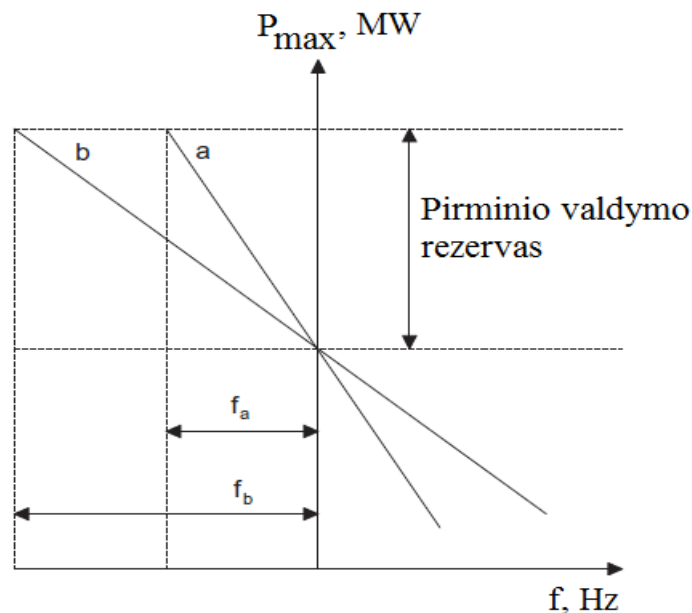
Pirminis valdymas atliekamas dažnio reguliatoriais elektrinėse. Regulatoriai keičia elektrinės generuojamą galią tiesiogiai proporcingai dažnio pokyčiui: [8]

$$\frac{\Delta P_g}{P_{gn}} = -\frac{1}{s_G f_N} \Delta f = -K \frac{\Delta f}{f_N}, \quad (18)$$

kur  $\Delta P_g$  – generatoriaus atiduodamos galios pokytis, MW;  $P_{gn}$  – generatoriaus galia, MW;  $s_G$  – generatoriaus statizmas, %;  $\Delta f$  – dažnio pokytis, Hz;  $f_N$  – nominalus dažnis, Hz.

Pirminis valdymas dažniausiai yra proporcinis P valdiklio valdymas. Dažnis iš pradžių svyruoja, o vėliau nusistovi pastovus nuokrypis. Laiko pastovioji pirminiam valdymui siekia keletą sekundžių. [8]

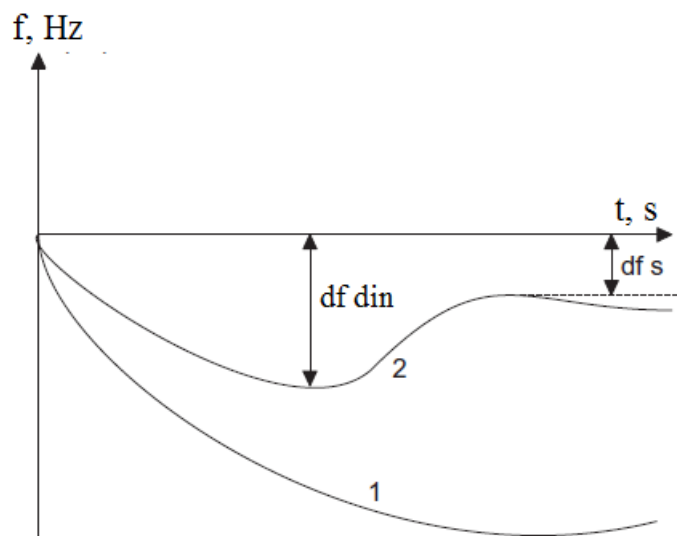
11 –ame paveiksle parodytos dviejų generatorių su skirtingu statizmu galios-dažnio charakteristikos. Mažo dažnio kritimo atveju generatorius a padidina savo atiduodamą galią daugiau nei generatorius b. Jei dažnio kritimas didesnis nei  $f_a$ , generatorius b padidina savo atiduodamą galią tol, kol dažnis nukrenta iki  $f_b$ , kuriam esant generatorius taip pat dirba maksimaliu galingumu. generatoriaus reguliuojamoji galia tada yra lygi pirminiam galios rezervui, padalintam iš dažnio pokyčio. Reguluojančioji galia elektrinėje a yra didesnė nei elektrinėje b. [8]



13 pav. Generatorių su skirtingu statizmu galios valdymas. [8]

## 6.2 Antrinis dažnio valdymas

Pirminis dažnio valdymas gali užkirsti kelią dideliems dažnio svyravimams įvykus gedimams sistemoje, tačiau jis neatstato dažnio į nustatytą lygį. Pagrindinė antrinio valdymo funkcija yra ištaisyti nuokrypį  $df_s$  ir atstatyti nominalią dažnio vertę. Antrinis valdymas taip pat apriboja dažnio kritimą iki leistino lygio 12-ame paveiksle pavaizduotas dažnio kitimas sistemoje, kurioje Linija 1 neturi dažnio kontrolės, o Linija 2 turi antrinį dažnio valdymą. [8]

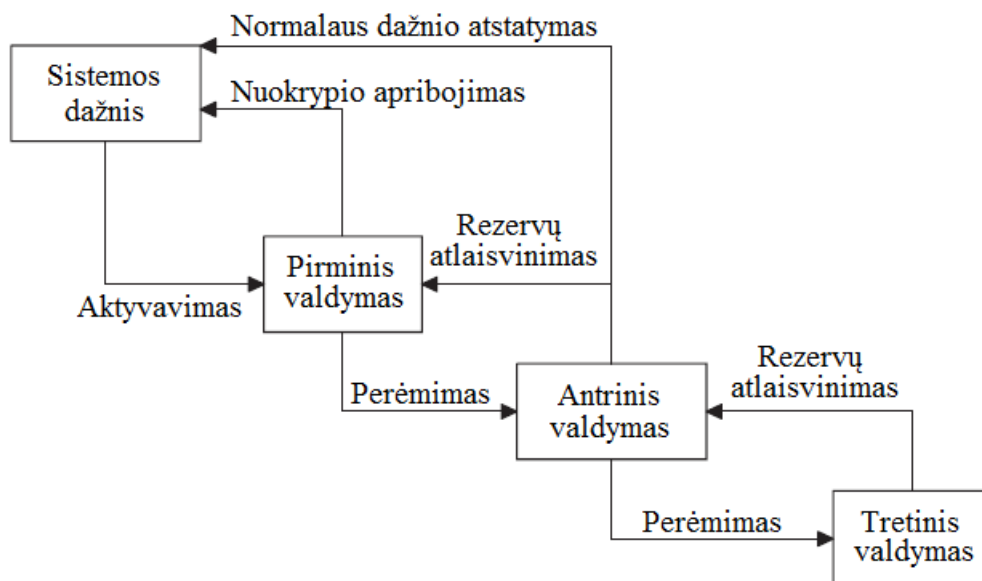


14 pav. Dažnio kritimas, atsijungus elektrinei. [8]

Antriniai rezervai turėtų būti paleidžiami per 30 sekundžių ir pilną galingumą pasiekti per 15 minučių taip atlaisvinant pirminius rezervus kitam gedimui sistemoje.[8]

## 6.3 Tretinis dažnio valdymas

Tretinis valdymas yra paremtas tinklo operatorių savarankiškais veiksmais, tokiais kaip rezervinių elektrinių paleidimas. Sistemoje įvykus gedimui, tretinis valdymas turi pakeisti antrinį per 15 minučių. 13-ame paveiksle pavaizduota dažnio kontrolės schema. Kai kurie veiksmai atliekami automatikos prietaisų pagalba, kai kurie – rankiniu būdu. Automatika suveikia, kai dažnis nukrenta žemiau leistinų ribų. [8]



15 pav. Dažnio kontrolės schema. [8]

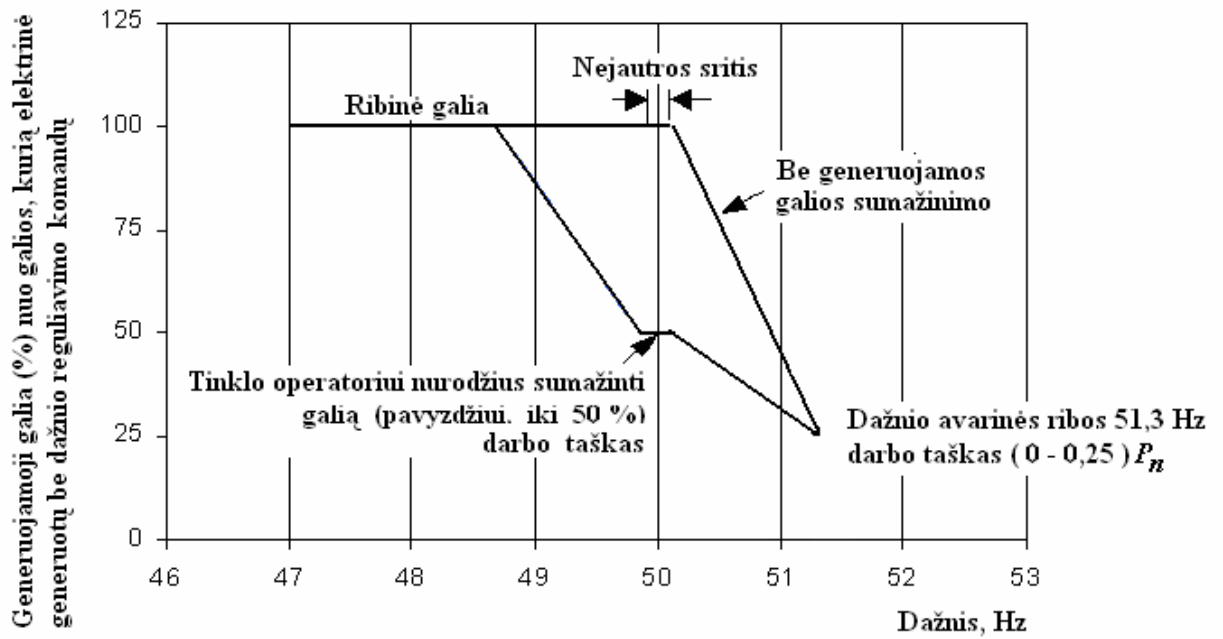
Paskirstytųjų generatorių elektrinių galią būtina valdyti iš tinklo operatoriaus dispečerinio valdymo centro dėl šių priežasčių: [1]

- jei prijungimo tinkle atsijungtų viena iš energiją priimančių linijų, tai saugant kitas linijas nuo perkrovos, didžiausioji elektrinės leistinoji generavimo riba turi būti mažinama.
- įvykus tinkle pažaidai arba jai peraugus į gedimą, paskirstytųjų generatorių elektrinių ir tinklo veikos pastovumui užtikrinti paskirstytųjų generatorių elektrinių galia turi būti mažinama, apribojama ar net visai laikinai išjungžiama.
- galios mažinimo signalą gali sukelti elektrinės prijungimo taške pasikeitęs dažnis ir (arba) dėl kylančios įtampos turi būti numatytas.

Paskirstytajam generatoriui tapus mikrotinklo dalimi, elektrinės generatorių galios valdymą turi perimti mikrotinklo valdiklis dėl šių priežasčių: [1]

- jei nedidelė tinklo dalis kartu su paskirstytųjų generatorių elektrine dėl tinklo pažaidų atsijungia nuo likusios sistemos dalies, atsiskyrusioje dalyje pradeda keistis dažnis;
- jei dažnis didėja, generuojamoji galia turi būti mažinama;
- jei dažnis krenta, elektrinės galia turi būti didinama;
- dažniui pasiekus ribines vertes, paskirstytųjų generatorių elektrinė dėl padidėjusio sūkių skaičiaus turi būti išjungta, atvirkščiai, jei dažnis per daug žemas, elektrinės generatoriams gresia stabilumo praradimas ir įvairios pažaidos, todėl ji taip pat turi būti išjungta;
- jei dėl tinklo pažaidos paskirstytųjų generatorių elektrinių mikrotinklo įtampa tampa per žema, įtampos griūčiai išvengti ir paskirstytųjų generatorių mikrotinklo reaktyviosios galios

balansui atkurti pirmiausia pradedamas staigus generuojamos aktyviosios galios mažinimas, įjungiant galios kompensavimo kondensatorius, keliama įtampa, ir, jei to pakanka įtampai atkurti, pradedamas valdomas pagal įtampą generuojamos galios didinimas. Jei įtampa neatkuriama, mikro tinklas ir jo elektrinės išjungiamos.



16 pav. Dažnio valdymo reikalavimai. [1]

Paskirstytieji generatoriai dažnio reguliavimui gali būti panaudojami, kai staiga sumažėja į sistemą patiekiamos elektros energijos kiekis. Kaip pavyzdys, biodujomis varomos turbinos yra greitai paleidžiamos ir gali tiekti energiją į tinklą. Kiti atsinaujinančios energijos šaltiniai taip pat gali tiekti energiją tiesiai į tinklą esant staigiam jos trūkumui, tačiau dalies jų generuojama energija priklauso nuo gamtinių reiškinių prognozavimo tikslumo, todėl jų pagamintą energiją į tinklą patikimiau būtų atiduoti iš jų generuojama energija įkraunamų baterijų. [5, 6]

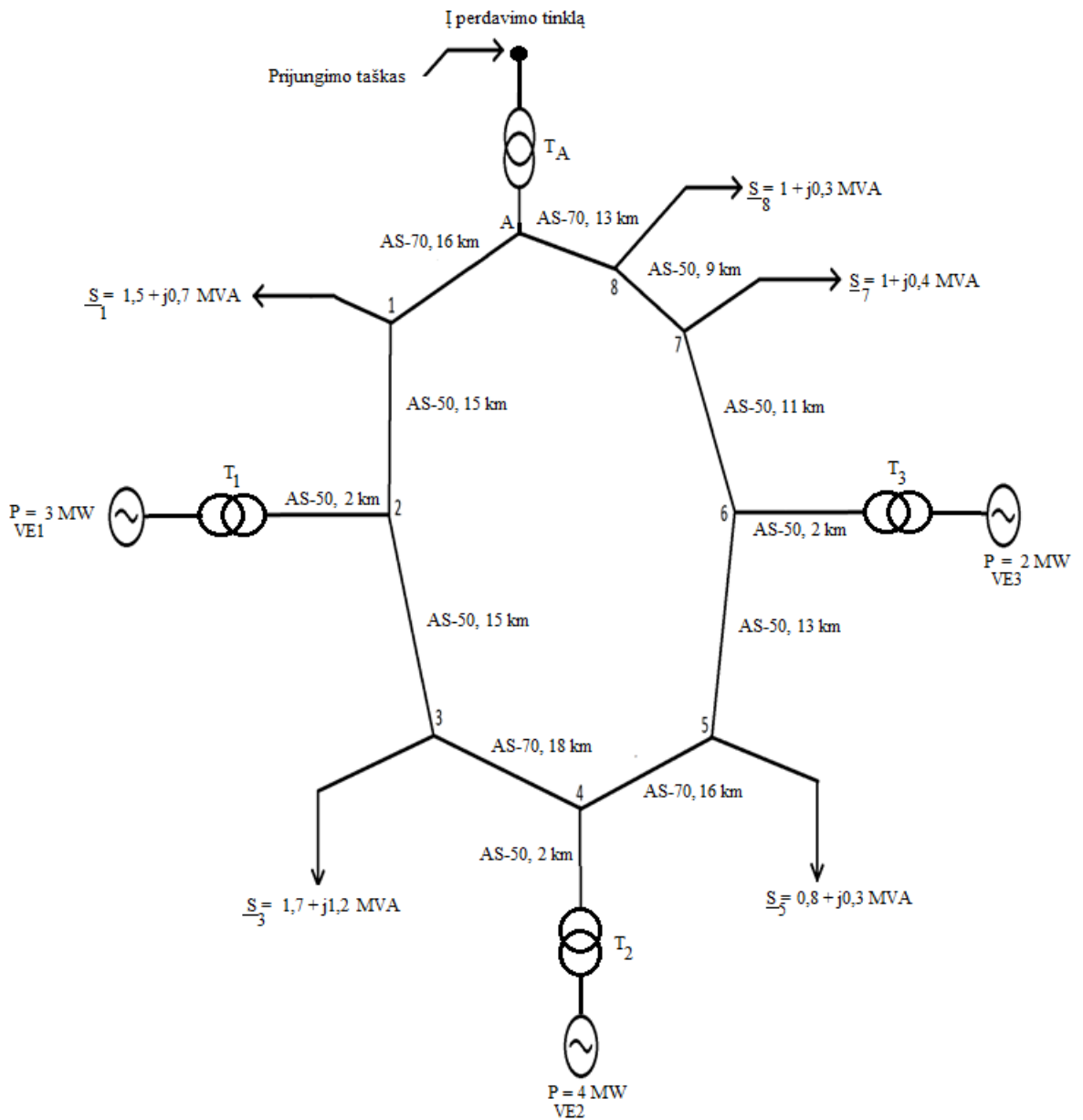
## 7 ELEKTROS TINKLO SCHEMŲ SUDARYMAS

Baigiamajame darbe sudaroma elektros energijos tiekimo sistema su perdavimo tinklu ir prie jo prijungtais skirstomaisiais tinklais. Skirstomuosiuose tinkluose prijungti paskirstytieji generatoriai ir 10 kV apkrovos – gamyklos, gyvenvietės ir panašūs vartotojai. Prie 110 kV perdavimo tinklo jungiami skirstomieji tinklai ir sisteminės elektrinės, bei sisteminė tranzitinė 330 kV linija. Modeliavimo metu parenkami linijų, transformatorių parametrai, pasirenkamas apkrovų ir generavimo šaltinių galių dydis.

## 7.1 Skirstomųjų tinklų schemų sudarymas

Skirstomųjų tinklų schemas sudaromo prie jų prijungus vartotojus ir paskirstytojo generavimo šaltinius. Skirstomieji tinklai jungiami prie perdavimo tinklo per galios transformatorius. Skirstomuosiuose tinkluose prijungiami kelių tipų paskirstytieji generatoriai, kurių detalūs modeliai bus sudaromi Matlab Simulink aplinkoje. Sudaromos tokios skirstomųjų tinklų schemas:

1. Tinklas su trimis 3 MW, 4 MW ir 2 MW galios vėjo elektrinėmis –  $\cos\varphi = 0,85$ . Tinkle prijungtos 5 apkrovos, kurių galios nurodytos brėžinyje.



17 pav. Skirstomasis tinklas su vėjo elektrinėmis.

### 7.1.1 Linijų parametrai ir jų varžų skaičiavimas

Sudaroma schemoje parodytų linijų laidininkų parametų lentelė:

2 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų laidininkų parametrai [9].

Tipas	$r_0, \Omega/\text{km}$	$X_0, \Omega/\text{km}$	$b_0 \cdot 10^{-6}, \text{S}/\text{km}$
AS-70	0,43	0,41	2,77
AS-50	0,6	0,421	2,7

Toliau sudaroma linijų lentelė:

3 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų ilgiai.

Linija	Laidininkas	Linijos ilgis, km
L <sub>A1</sub>	AS-70	16
L <sub>12</sub>	AS-50	15
L <sub>23</sub>	AS-50	15
L <sub>34</sub>	AS-70	18
L <sub>45</sub>	AS-70	16
L <sub>56</sub>	AS-50	13
L <sub>67</sub>	AS-50	11
L <sub>78</sub>	AS-50	9
L <sub>8A</sub>	AS-70	13
L <sub>VE12</sub>	AS-50	2
L <sub>VE24</sub>	AS-50	2
L <sub>VE36</sub>	AS-50	2

Turint linijų parametrus, pagal formulę skaičiuojamos linijų varžos [9, p. 109, 110]:

$$\underline{Z}_L = (r_0 + jX_0) \cdot L, \quad (19)$$

čia L – linijos ilgis, km.

$$\underline{Z}_{A1} = (0,43 + j0,41) \cdot 16 = 6,88 + j6,568 \Omega.$$

Analogiškai suskaičiuojamos likusių linijų varžos ir surašomos į rezultatų lentelę:

4 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų varžų skaičiavimo rezultatų lentelė.

Linija	Varža, $\Omega$
L <sub>A1</sub>	6,88 + j6,568
L <sub>12</sub>	9 + j6,315
L <sub>23</sub>	9 + j6,315
L <sub>34</sub>	7,74 + j7,389

Linija	Varža, $\Omega$
L <sub>45</sub>	6,88 + j6,568
L <sub>56</sub>	7,8 + j5,473
L <sub>67</sub>	6,6 + j4,631
L <sub>78</sub>	5,4 + j3,789
L <sub>8A</sub>	5,59 + j5,336
L <sub>VE12</sub>	1,2 + j0,842
L <sub>VE24</sub>	1,2 + j0,842
L <sub>VE36</sub>	1,2 + j0,842

### 7.1.2 Linijų generuojamų reaktyviųjų galių vertinimas

Žinant linijų parametrus, galima apskaičiuoti jų generuojamas reaktyviasias galias [9, p. 22]:

$$Q_L = U_L^2 \cdot b_0 \cdot \frac{L}{2}, \quad (20)$$

čia  $U_L$  – linijos įtampa, kV;  $b_0$  – linijos laidis,  $10^{-6}$  S/km.

$$Q_{A1} = 35^2 \cdot 2,77 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{16}{2} = 27,19 \text{ kVAr.}$$

Analogiškai suskaičiuojamos likusių linijų reaktyviosios galios ir surašomos į rezultatų lentelę:

5 Lentelė. Skirstomojo tinklo linijų generuojamos reaktyviosios galios skaičiavimo rezultatų lentelė.

Linija	Reaktyvioji galia, kVAr
L <sub>A1</sub>	27,19
L <sub>12</sub>	24,83
L <sub>23</sub>	24,83
L <sub>34</sub>	30,59
L <sub>45</sub>	27,19
L <sub>56</sub>	21,52
L <sub>67</sub>	18,21
L <sub>78</sub>	14,9
L <sub>8A</sub>	22,09
L <sub>VE12</sub>	3,31
L <sub>VE24</sub>	3,31
L <sub>VE36</sub>	3,31

### 7.1.3 Vėjo elektrinių parametų skaičiavimas

Tinkle prijungtos 3 vėjo elektrinės: VE1 = 3 MW, VE2 = 4 MW, VE3 = 2 MW. Elektrinių galios faktorius –  $\cos\varphi_{VE} = 0,85$ . Turint vėjo elektrinių aktyviasias galias ir galios faktorių, galima apskaičiuoti elektrinių reaktyviasias galias [2, p. 108]:

$$Q_{VE} = P_{VE} \cdot \operatorname{tg}\varphi_{VE} = P_{VE} \cdot \operatorname{tg}(\arccos\varphi_{VE}). \quad (21)$$

$$Q_{VE1} = 3 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,85) = 1,859 \text{ MVar};$$

$$Q_{VE2} = 4 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,85) = 2,479 \text{ MVar};$$

$$Q_{VE3} = 2 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,85) = 1,239 \text{ MVar}.$$

Tada vėjo elektrinių kompleksinės pilnosios galios lygios:

$$\underline{S_{VE1}} = 3 + j1,859 \text{ MVA};$$

$$\underline{S_{VE2}} = 4 + j2,479 \text{ MVA};$$

$$\underline{S_{VE3}} = 2 + j1,239 \text{ MVA}.$$

#### 7.1.4 Transformatorių parinkimas ir jų parametrų skaičiavimas

Transformatoriai parenkami pagal vėjo elektrinių pilnšias galias, kurios apskaičiuojamos taip [10, p. 108]:

$$S_{VE} = \frac{P_{VE}}{\cos\varphi_{VE}}. \quad (22)$$

$$S_{VE1} = \frac{3}{0,85} = 3,529 \text{ MVA};$$

$$S_{VE2} = \frac{4}{0,85} = 4,705 \text{ MVA};$$

$$S_{VE3} = \frac{2}{0,85} = 2,352 \text{ MVA}.$$

Pagal apskaičiuotas galias vėjo elektrinėms parenkami TM-6300/35 galios transformatoriai. Transformatorių duomenys:

6 Lentelė. 10/35 kV transformatorių duomenys. [12]

Tipas	$S_T$ , kVA	$U_{N1}$ , kV	$U_{N2}$ , kV	$\Delta P_{TV}$ , kW	$\Delta P_{TJ}$ , kW	$U_{TJ}$ , %	$I_{TV}$ , %
TM	6300	10	35	5,6	46,5	7,5	0,3



Turint transformatorių duomenis, apskaičiuojamos transformatorių varžos ir tuščiosios veikos reaktyviosios galios. Skaičiavimų formulės [10, p. 114]:

$$Z_T = \frac{U_{TJ,\%} \cdot U_p^2}{100 \cdot S_{T,N}}, \quad (23)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{TJ} \cdot U_p^2}{S_{T,N}^2 \cdot 1000}, \quad (24)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (25)$$

$$\Delta Q_{TV} = \frac{I_{TV,\%}}{100} \cdot S_{T,N}, \quad (26)$$

kur  $U_{TJ,\%}$  - trumpojo jungimo įtampa, % ;  $U_p$  - pasirinktoji įtampa, kV ;  $S_{T,N}$  – transformatoriaus vardinė pilnoji galia, MVA ;  $\Delta P_{TJ}$  – trumpojo jungimo aktyviosios galios nuostoliai, kW ;  $I_{TV,\%}$  - tuščiosios veikos srovė, %.

Parinkti transformatoriai veiks aukštinančiuoju režimu, o skaičiuojamas tinklas yra 35 kV įtampos, todėl pasirinktoji įtampa prilyginama 35 kV. Skaičiavimai transformatoriams T1, T2 ir T3:

$$Z_T = \frac{7,5 \cdot 35^2}{100 \cdot 6,3} = 14,583 \Omega;$$

$$R_T = \frac{46,5 \cdot 35^2}{6,3^2 \cdot 1000} = 1,435 \Omega;$$

$$X_T = \sqrt{14,583^2 - 1,435^2} = 14,512 \Omega;$$

$$\Delta Q_{TVT} = \frac{1}{100} \cdot 6,3 = 0,0189 \text{ MVA}.$$

#### 7.1.5 Galios ir įtampos nuostolių transformatoriuose skaičiavimas

Transformatorių galios nuostoliai skaičiuojami pagal formules [10, p. 114]:

$$\Delta P_T = \frac{S^2}{S_{TN}^2} \cdot \Delta P_{TJ} + \Delta P_{TV}, \quad (27)$$

$$\Delta Q_T = \frac{S^2}{S_{TN}} \cdot \frac{U_{TJ\%}}{100} + \Delta Q_{TV}, \quad (28)$$

kur  $S$  – apkrovos pilnoji galia, MVA.

Skaičiavimai transformatoriui T1:

$$\Delta P_{T1} = \frac{3,529^2}{6,3^2} \cdot 46,5 + 5,6 = 20,194 \text{ kW};$$

$$\Delta Q_{T1} = \frac{3,529^2}{6,3} \cdot \frac{7,5}{100} + 0,0189 = 0,167 \text{ MVar.}$$

Skaičiavimai transformatoriui T2:

$$\Delta P_{T2} = \frac{4,705^2}{6,3^2} \cdot 46,5 + 5,6 = 31,545 \text{ kW;}$$

$$\Delta Q_{T2} = \frac{4,705^2}{6,3} \cdot \frac{7,5}{100} + 0,0189 = 0,282 \text{ MVar.}$$

Skaičiavimai transformatoriui T3:

$$\Delta P_{T3} = \frac{2,352^2}{6,3^2} \cdot 46,5 + 5,6 = 12,086 \text{ kW;}$$

$$\Delta Q_{T3} = \frac{2,352^2}{6,3} \cdot \frac{7,5}{100} + 0,0189 = 0,084 \text{ MVar.}$$

Toliau skaičiuojami transformatorių įtampos nuostoliai. Įtampos nuostolių skaičiavimas atliekamas tokiomis formulėmis [10, p. 116, 117]:

Skersinė nuostolių dedamoji:

$$\Delta U^* = \frac{P_{T,p} \cdot R_T + Q_{T,p} \cdot X_T}{U_{T,p}}, \quad (29)$$

čia  $P_{T,p}$  – aktyvioji galia transformatoriaus pradžioje, MW;  $Q_{T,p}$  – reaktyvioji galia transformatoriaus pradžioje, MVar;  $U_{T,p}$  – įtampa tinkle, kV.

Išilginė nuostolių dedamoji:

$$\delta U = \frac{P_{T,p} \cdot X_T - Q_{T,p} \cdot R_T}{U_{T,p}}, \quad (30)$$

Įtampos nuostoliai:

$$\Delta U = \Delta U^* - \frac{\delta U^2}{2 \cdot U_{T,p}}. \quad (31)$$

Skaičiavimai transformatoriui T1:

$$\Delta U_{T1}^* = \frac{3 \cdot 1,435 + 1,859 \cdot 14,512}{35} = 0,89 \text{ kV;}$$

$$\delta U_{T1} = \frac{3 \cdot 14,512 - 1,859 \cdot 1,435}{35} = 1,17 \text{ kV;}$$

$$\Delta U_{T1} = 3,13 - \frac{4,09^2}{2 \cdot 35} = 0,87 \text{ kV.}$$

Skaičiavimai transformatoriui T2:

$$\Delta U_{T2}^* = \frac{4 \cdot 1,435 + 2,479 \cdot 14,512}{35} = 1,19 \text{ kV;}$$

$$\delta U_{T2} = \frac{4 \cdot 14,512 - 2,479 \cdot 1,435}{35} = 1,56 \text{ kV;}$$

$$\Delta U_{T2} = 4,17 - \frac{5,45^2}{2 \cdot 35} = 1,07 \text{ kV.}$$

Skaičiavimai transformatoriui T3:

$$\Delta U_{T3}^* = \frac{2 \cdot 1,435 + 1,239 \cdot 14,512}{35} = 0,6 \text{ kV;}$$

$$\delta U_{T3} = \frac{2 \cdot 14,512 - 1,239 \cdot 1,435}{35} = 0,78 \text{ kV;}$$

$$\Delta U_{T3} = 2,09 - \frac{2,72^2}{2 \cdot 35} = 0,59 \text{ kV.}$$

#### 7.1.6 Galios ir įtampos nuostolių bei galios srautų skaičiavimas vėjo elektrinių linijose

Žinant galios nuostolius transformatoriuose, galima apskaičiuoti, kokia galia apkraunamos vėjo elektrinių linijos:

$$\underline{S}_{VE12,p} = \underline{S}_{VE1} - \underline{\Delta S}_{T1} = 3 + j1,859 - 0,02 - j0,167 = 2,979 + j1,692 \text{ MVA;}$$

$$\underline{S}_{VE24,p} = \underline{S}_{VE2} - \underline{\Delta S}_{T2} = 4 + j2,478 - 0,031 - j0,282 = 3,968 + j2,196 \text{ MVA;}$$

$$\underline{S}_{VE36,p} = \underline{S}_{VE3} - \underline{\Delta S}_{T3} = 2 + j1,239 - 0,012 - j0,084 = 1,987 + j1,154 \text{ MVA.}$$

Turint galias linijų pradžioje, galima apskaičiuoti linijų galios nuostolius. Galios nuostolių linijoje skaičiavimo formulė [10, p. 111]:

$$\underline{\Delta S}_L = \frac{P_{L,p}^2 + Q_{L,p}^2}{U_L^2} \cdot \underline{Z}_L, \quad (32)$$

čia  $P_{L,p}$  – aktyvioji galia linijos pradžioje, MVA;  $Q_{L,p}$  – reaktyvioji galia linijos pradžioje, MVAr.

$$\underline{\Delta S}_{VE12} = \frac{2,979^2 + 1,692^2}{35^2} \cdot (1,2 + j0,842) = 0,011 + j0,008 \text{ MVA;}$$

$$\underline{\Delta S}_{VE24} = \frac{3,968^2 + 2,196^2}{35^2} \cdot (1,2 + j0,842) = 0,02 + j0,014 \text{ MVA;}$$

$$\underline{\Delta S_{VE36}} = \frac{1,987^2 + 1,154^2}{35^2} \cdot (1,2 + j0,842) = 0,005 + j0,003 \text{ MVA.}$$

Žinant nuostolius linijose ir linijų generuojamas galias, apskaičiuojami galios srautai linijų gale:

$$\underline{S_{VE12,g}} = \underline{S_{VE1}} - \underline{\Delta S_{VE12}} - jQ_{VE12} = 2,979 + j1,692 - 0,011 - j0,008 - j0,00331 = 2,968 + j1,68 \text{ MVA;}$$

$$\underline{S_{VE24,g}} = \underline{S_{VE2}} - \underline{\Delta S_{VE24}} - jQ_{VE24} = 3,968 + j2,196 - 0,02 - j0,014 - j0,00331 = 3,948 + j2,178 \text{ MVA;}$$

$$\underline{S_{VE36,g}} = \underline{S_{VE3}} - \underline{\Delta S_{VE36}} - jQ_{VE36} = 1,987 + j1,154 - 0,005 - j0,003 - j0,00331 = 1,982 + j1,147 \text{ MVA.}$$

Toliau skaičiuojami linijų įtampos nuostoliai. Įtampos nuostoliams linijose įvertinti naudojamos tokios pačios formulės kaip ir transformatoriams (formulės 29, 30, 31), tik naudojamos linijų varžos [10, p. 118].

Skaičiavimai linijai  $L_{VE12}$ :

$$\Delta U_{VE12}^* = \frac{2,968 \cdot 1,2 + 1,68 \cdot 0,842}{35} = 0,14 \text{ kV;}$$

$$\delta U_{VE12} = \frac{2,968 \cdot 0,842 + 1,68 \cdot 1,2}{35} = 0,01 \text{ kV;}$$

$$\Delta U_{VE12} = 0,14 - \frac{0,01^2}{2 \cdot 35} = 0,14 \text{ kV.}$$

Skaičiavimai linijai  $L_{VE24}$ :

$$\Delta U_{VE24}^* = \frac{3,948 \cdot 1,2 + 2,178 \cdot 0,842}{35} = 0,19 \text{ kV;}$$

$$\delta U_{VE24} = \frac{3,948 \cdot 0,842 + 2,178 \cdot 1,2}{35} = 0,02 \text{ kV;}$$

$$\Delta U_{VE24} = 0,19 - \frac{0,02^2}{2 \cdot 35} = 0,19 \text{ kV.}$$

Skaičiavimai linijai  $L_{VE36}$ :

$$\Delta U_{VE36}^* = \frac{1,982 \cdot 1,2 + 1,147 \cdot 0,842}{35} = 0,1 \text{ kV;}$$

$$\delta U_{VE36} = \frac{1,982 \cdot 0,842 - 1,147 \cdot 1,2}{35} = 0,01 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{VE36} = 0,1 - \frac{0,01^2}{2 \cdot 35} = 0,1 \text{ kV}.$$

### 7.1.7 Mazgų skaičiuojamųjų apkrovų skaičiavimas

Žinant linijų generuojamas ir vėjo elektrinių linijomis perduodamas galias, apskaičiuojamos mazgų skaičiuojamosios apkrovos:

$$\underline{S}'_1 = \underline{S}_1 - jQ_{A1} - jQ_{12} = 1,5 + j0,7 - j0,02719 - j0,02483 = 1,5 + j0,647 \text{ MVA};$$

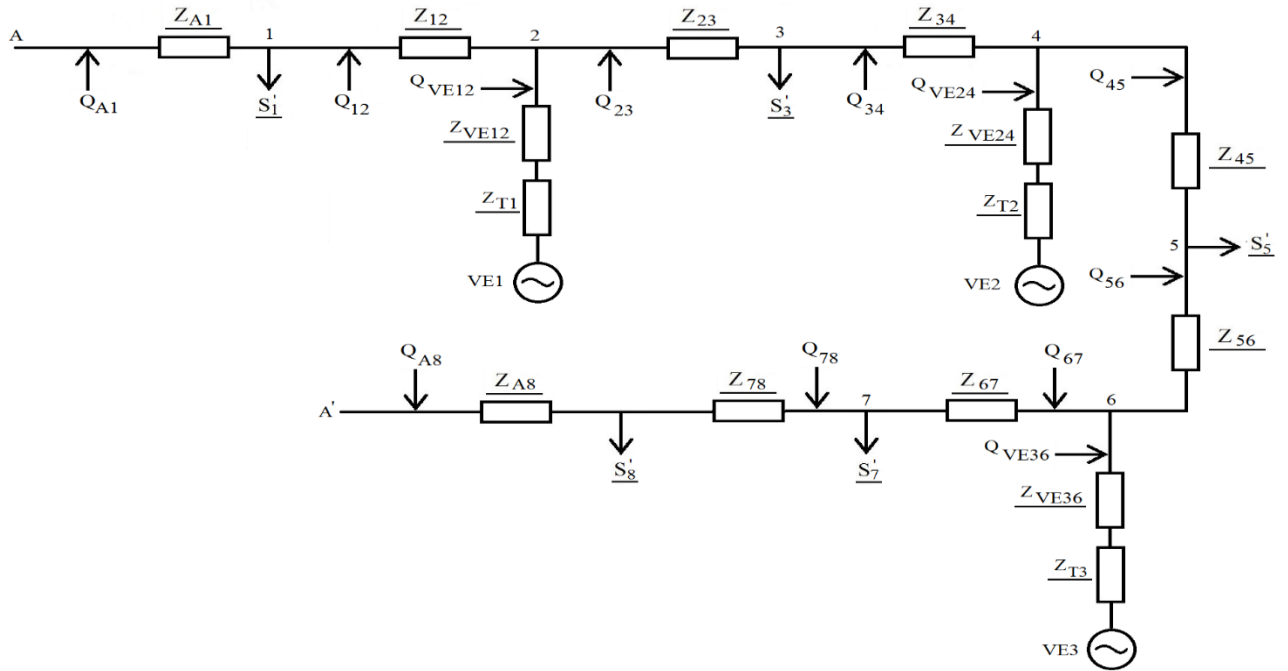
$$\underline{S}'_2 = \underline{S}_{VE12,g} - jQ_{12} - jQ_{23} = 2,968 + j1,68 - j0,02483 - j0,02483 = 2,968 + j1,631 \text{ MVA};$$

Analogiškai apskaičiuojamos ir likusiųjų mazgų apkrovos, bei sudaroma rezultatų lentelė:

7 Lentelė. Skirstomojo tinklo mazgų skaičiuojamosios apkrovos.

Mazgas	$\underline{S}'$ , MVA
1	1,5 + j0,647
2	2,968 + j1,631
3	1,7 + j1,445
4	3,948 + j2,121
5	0,8 + j0,251
6	1,982 + j1,108
7	1 + j0,366
8	1 + j0,263

Sudaroma tinklo atstojamoji schema:



18 pav. Skirstomojo tinklo atstojamoji schema.

### 7.1.8 Galios srautų pasiskirstymo skaičiavimas

Žinant mazgų skaičiuojamąsias apkrovas, galima apskaičiuoti galios srautų pasiskirstymą. Srautai  $\underline{S}_{A1}$  ir  $\underline{S}_{A8}$  apskaičiuojami pagal formulę [9, p. 43]:

$$\underline{S} = \frac{\sum_i \underline{S}_i \cdot \underline{Z}_{1A'}}{\underline{Z}_{AA'}}, \quad (33)$$

čia  $\underline{S}_i$  – i-tojo mazgo apkrova, MVA;  $\underline{Z}_{AA'}$  – visos linijos kompleksinė jungtinė varža,  $\Omega$ ;  $\underline{Z}_{1A'}$  – kompleksinė jungtinė varža nuo mazgo iki maitinimo taško,  $\Omega$ .

$$\underline{S}_{A1} = \frac{\underline{S}'_1 \cdot (\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}) + \underline{S}'_2 \cdot (\underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}) + \underline{S}'_3 \cdot (\underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}) + \underline{S}'_4 \cdot (\underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}) + \underline{S}'_5 \cdot (\underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}) + \underline{S}'_6 \cdot (\underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}) + \underline{S}'_7 \cdot (\underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}) + \underline{S}'_8 \cdot \underline{Z}_{8A}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}} = -1,861 - j1,049 \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{A8} = \frac{\begin{aligned} & \underline{S}'_1 \cdot \underline{Z}_{A1} + \underline{S}'_2 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12}) + \\ & + \underline{S}'_3 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23}) + \underline{S}'_4 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34}) + \underline{S}'_5 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45}) + \\ & + \underline{S}'_6 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56}) + \underline{S}'_7 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67}) \\ & + \underline{S}'_8 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78}) \end{aligned}}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}} = -1,299 - j1,199 \text{ MVA};$$

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{A1} - \underline{S}'_1 = -1,861 - j1,049 - (1,5 + j0,647) = -3,361 - j1,697 \text{ MVA};$$

Analogiškai apskaičiuojami likę galios srautai:

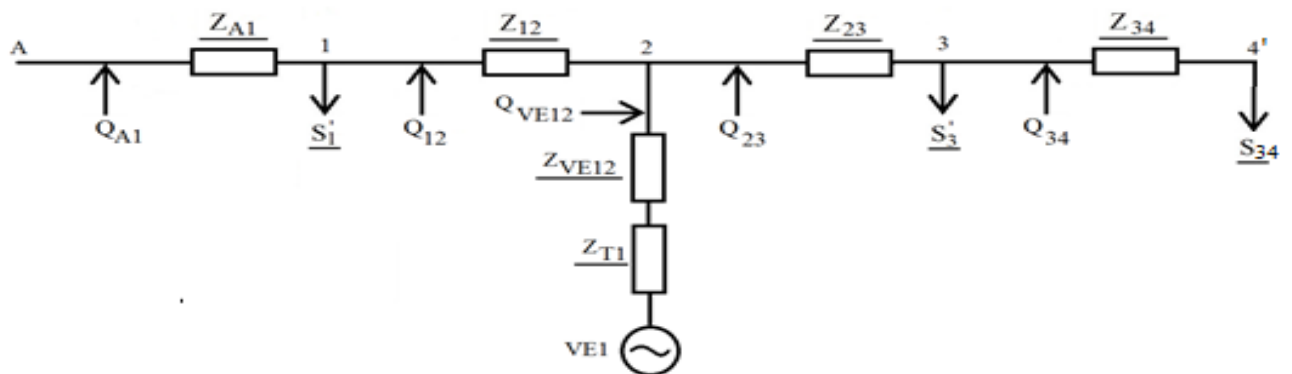
8 Lentelė. Galios srautų skirstomojo tinko linijose skaičiavimo rezultatai.

Linija	Galios srautas, MVA
L <sub>12</sub>	-3,361 – j1,697
L <sub>23</sub>	-0,393 – j0,066
L <sub>34</sub>	-2,093 – j1,21
L <sub>45</sub>	1,854 + j0,91
L <sub>56</sub>	1,054 + j0,659
L <sub>67</sub>	3,037 + j1,767
L <sub>78</sub>	2,037 + j1,4
L <sub>8A</sub>	1,037 + j1,137

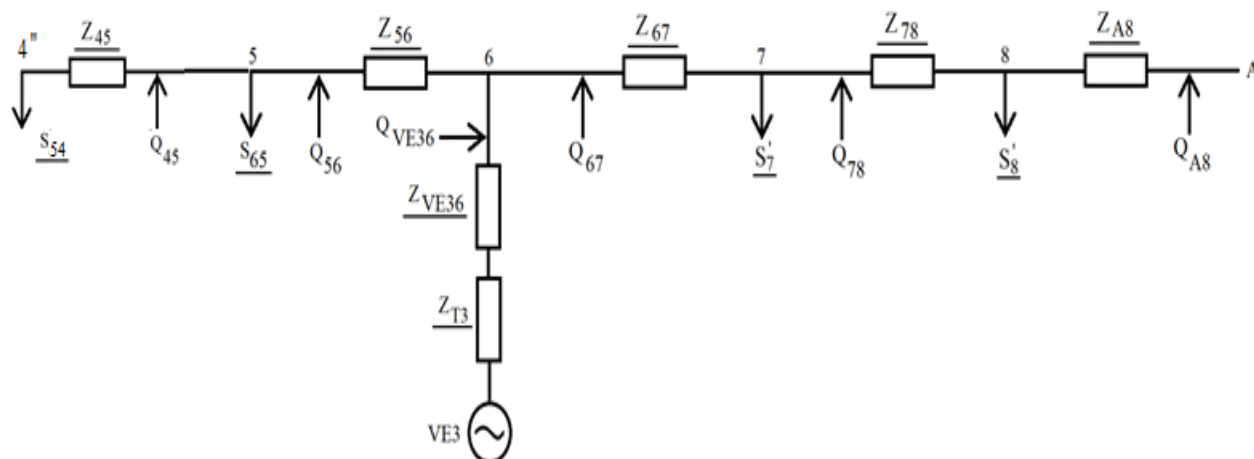
Pagal skaičiavimus nustatoma, kad pagrindinis srautas išteka iš ketvirto mazgo – antros vėjo elektrinės.

### 7.1.9 Galios srautų ir nuostolių linijose skaičiavimas

Nustačius srautų sutekėjimo tašką, sudaromos dvi skaičiuojamosios schemos:



19 pav. Skirstomojo tinklo skaičiuojamoji schema 1.



20 pav. Skirstomojo tinklo skaičiuojamoji schema 2.

Pagal anksčiau naudotą metodiką, atliekami galios nuostolių ir srautų skaičiavimai, bei sudaroma rezultatų lentelė:

9 Lentelė. Galios nuostolių ir srautų skirstomajame tinkle skaičiavimo rezultatai.

Linija	$\underline{S}_p$ , MVA	$\underline{S}_g$ , MVA	$\underline{\Delta S}$ , MVA
L43	2,056 + j1,206	2,093 + j1,21	0,036 + j0,035
L32	0,355 + j0,085	0,356 + j0,061	0,001 + j0,0006
L21	3,221 + j1,669	3,324 + j1,716	0,102 + j0,072
L1A	1,698 - j1,026	1,721 + j1,021	0,022 + j0,021
L45	1,854 + j0,91	1,83 + j0,86	0,023 + j0,022
L56	1,03 + j0,609	1,02 + j0,581	0,009 + j0,006
L67	3,004 + j1,689	2,94 + j1,626	0,064 + j0,044
L78	1,94 + j1,259	1,916 + j1,227	0,023 + j0,016
L8A	0,916 + j0,964	0,908 + 0,934	0,008 + j0,007

Lentelėje  $\underline{S}_p$  – galios srautas linijos pradžioje, MVA;  $\underline{S}_g$  - galios srautas linijos pradžioje, MVA;  $\underline{\Delta S}$  – galios nuostoliai linijoje, MVA.

#### 7.1.10 Įtampos nuostolių linijose skaičiavimas

Kadangi srautai išteka iš ketvirto mazgo, nuo jo pradedami skaičiuoti įtampos nuostoliai. Mazgo įtampa – 36,56 kV. Ji gaunama, iš transformatoriaus antrinių apvijų įtampos atėmus nuostolius vėjo elektrinės linijoje.



Skaičiavimai linijai L<sub>43</sub>:

$$\Delta U_{L43}^* = \frac{2,093 \cdot 7,74 + 1,21 \cdot 7,389}{36,56} = 0,68 \text{ kV};$$

$$\delta U_{L43} = \frac{2,093 \cdot 7,389 - 1,21 \cdot 7,74}{36,56} = 0,16 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{L43} = 0,68 - \frac{0,16^2}{2 \cdot 36,56} = 0,68 \text{ kV};$$

Įtampa taške 3:

$$U_3 = U_4 - \Delta U_{L43} = 36,56 - 0,68 = 35,87 \text{ kV}.$$

Taško 4 įtampa didesnė, nes prie jo prijungto transformatoriaus apvijų vadinė įtampa 5% didesnė už tinklo. Taip kompensuojami įtampos nuostoliai.

Tokiu pat būdu atliekami skaičiavimai ir kitoms linijoms, bei užpildoma rezultatų lentelė:

10 Lentelė. Įtampos nuostolių skirstomojo tinklo linijose skaičiavimo rezultatai.

Linija	$\Delta U_L^*$ , kV	$\delta U_L$ , kV	$\Delta U_L$ , kV
L <sub>43</sub>	0,68	0,16	0,68
L <sub>32</sub>	0,1	0,04	0,1
L <sub>21</sub>	1,11	0,15	1,11
L <sub>1A</sub>	0,52	0,12	0,52
L <sub>45</sub>	0,51	0,16	0,51
L <sub>56</sub>	0,31	0,02	0,31
L <sub>67</sub>	0,75	0,07	0,75
L <sub>78</sub>	0,42	0,01	0,42
L <sub>8A</sub>	0,29	-0,01	0,29

11 Lentelė. Apskaičiuotos skirstomojo tinklo mazgų įtampos.

Mazgas	1	2	3	4	5	6	7	8	A'	A''
Įtampa, kV	35,49	36,61	35,87	36,56	36,05	36,43	35,67	35,24	34,97	34,95

Atlikus skaičiavimus gauta:

Įtampos ir galios nuostoliai vėjo elektrinių linijose:

$$\Delta S_{VE12} = 0,014 \text{ MVA} = 0,41 \%;$$

$$\Delta S_{VE24} = 0,024 \text{ MVA} = 0,54 \%;$$

$$\Delta S_{VE36} = 0,006 \text{ MVA} = 0,27 \%;$$

$$\Delta U_{VE12} = 0,14 \text{ kV} = 0,4 \%;$$

$$\Delta U_{VE24} = 0,19 \text{ kV} = 0,54 \%;$$

$$\Delta U_{VE36} = 0,1 \text{ kV} = 0,27 \%.$$

12 Lentelė. Įtampos ir galios nuostoliai žiedinio skirstomojo tinklo linijose.

Linija	L <sub>A1</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>23</sub>	L <sub>34</sub>	L <sub>45</sub>	L <sub>65</sub>	L <sub>76</sub>	L <sub>87</sub>	L <sub>A8</sub>
$\Delta S_L$ , MVA	0,001	0,125	0,031	0,011	0,051	0,033	0,011	0,078	0,028
$\Delta S_L$ , %	0,32	3,46	1,56	0,85	2,14	1,63	0,94	2,32	1,26
$\Delta U_L$ , kV	0,52	1,11	0,1	0,68	0,51	0,31	0,75	0,42	0,29
$\Delta U_L$ , %	1,54	3,18	0,27	1,88	1,4	0,87	2,16	1,24	0,86

#### 7.1.11 110/35 kV transformatoriaus parinkimas

Turint iš A taško ištekančius galios srautus, parenkamas jungties prie 110 kV tinklo galios transformatorius. Pirmą apskaičiuojamas bendras srautas A taške:

$$\underline{S}_A = \underline{S}_{A1} + \underline{S}_{A8} = 1,698 + j1,026 + 0,908 + j0,934 = 2,607 + j1,961 \text{ MVA}.$$

$$S_A = \sqrt{2,607^2 + 1,961^2} = 3,263 \text{ MVA}.$$

Pagal apskaičiuotą pilną galios srautą taške A, parenkamas TDN-10000/110-Y1 galios transformatorius.

13 Lentelė. 35/110 kV transformatoriaus duomenys. [11]

Tipas	S <sub>T</sub> , kVA	U <sub>N1</sub> , kV	U <sub>N2</sub> , kV	$\Delta P_{TV}$ , kW	$\Delta P_{TJ}$ , kW	U <sub>TJ</sub> , %	I <sub>TV</sub> , %
TDN	10000	115	38,5	10	56	10,5	0,3

Turint transformatoriaus duomenis, pagal anksčiau naudotas formules apskaičiuojami jo parametrai:

$$Z_T = \frac{10,5 \cdot 38,5^2}{100 \cdot 10} = 14,18 \Omega;$$

$$R_T = \frac{56 \cdot 38,5^2}{10^2 \cdot 1000} = 0,756 \Omega;$$

$$X_T = \sqrt{14,18^2 - 0,756^2} = 14,16 \Omega;$$

$$\Delta Q_{TVT} = \frac{0,3}{100} \cdot 10 = 0,03 \text{ MVar}.$$

Transformatoriaus galios nuostoliai skaičiuojami pagal anksčiau naudotą metodiką:

$$\Delta P_{TA} = \frac{3,263^2}{10^2} \cdot 56 + 10 = 15,962 \text{ kW};$$

$$\Delta Q_{TA} = \frac{3,263^2}{10} \cdot \frac{10,5}{100} + 0,03 = 0,141 \text{ MVar.}$$

Toliau skaičiuojami transformatoriaus įtampos nuostoliai:

$$\Delta U_{TA}^* = \frac{2,607 \cdot 0,756 + 1,961 \cdot 14,16}{38,5} = 0,77 \text{ kV};$$

$$\delta U_{TA} = \frac{2,607 \cdot 14,16 - 1,961 \cdot 0,756}{38,5} = 0,99 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{TA} = 1,22 - \frac{2,54^2}{2 \cdot 38,5} = 0,76 \text{ kV.}$$

Pagal atliktus skaičiavimus, į tinklą perduodama galia:

$$\underline{S}_T = \underline{S}_A - \Delta P_{TA} - j\Delta Q_{TA} = 2,607 + j1,961 - 0,016 - j0,141 = 2,591 + j1,82 \text{ MVA};$$

$$S_T = \sqrt{2,591^2 + 1,82^2} = 3,166 \text{ MVA.}$$

Modeliavimo MATLAB Simulink aplinkoje metu, bus naudojami tokie patys skirstomojo tinklo modeliai su vienodais parametrais, bet skirsis juose prijungtos elektrinės. Skaičiavimai skirstomajam tinklui atlikti, kai šaltinių generavimas yra maksimalus ir viršijantis vietinį poreikį.

#### 7.1.12 Skaičiavimai skirstomajam tinklui, kai atjungti paskirstytieji generatoriai

Atlikus skaičiavimus su prijungtais generatoriais, atliekami skaičiavimai, kai generatoriai atjungti. Skaičiavimams naudojama analogiška metodika, tik principinėje ir skaičiuojamosiose schemose nelieka paskirstytųjų generatorių. Dėl šios priežasties lieka tik apkrovų mazgai S1, S2, S3, S4 ir S5 bei susijungia kelios linijos: L12 ir L23 susijungia į L13, L34 ir L45 susijungia į L35 ir L56 ir L67 – į L57. Kadangi skaičiavimo metodika analogiška anksčiau naudotajai, pagrindiniai skaičiavimo rezultatai pateikiami lentelėse:

14 Lentelė. Galios nuostolių ir srautų skirstomajame tinkle, be generatorių, skaičiavimo rezultatai.

Linija	$\underline{S}_p$ , MVA	$\underline{S}_g$ , MVA	$\underline{\Delta S}$ , MVA
L <sub>A1</sub>	3,066 + j1,363	3,002 + j1,378	0,064 + j0,062
L <sub>13</sub>	1,502 + j0,753	1,462 + j0,775	0,04 + j0,028
L <sub>53</sub>	0,239 + j0,269	0,237 + j0,321	0,001 + j0,001
L <sub>75</sub>	1,055 + j0,447	1,039 + j0,476	0,015 + j0,01
L <sub>87</sub>	2,076 + j0,792	2,055 + j0,792	0,021 + j0,015
L <sub>A8</sub>	3,127 + j1,076	3,076 + j1,052	0,05 + j0,049

15 Lentelė. Apskaičiuotos skirstomojo tinklo, be generatorių, mazgų įtampos.

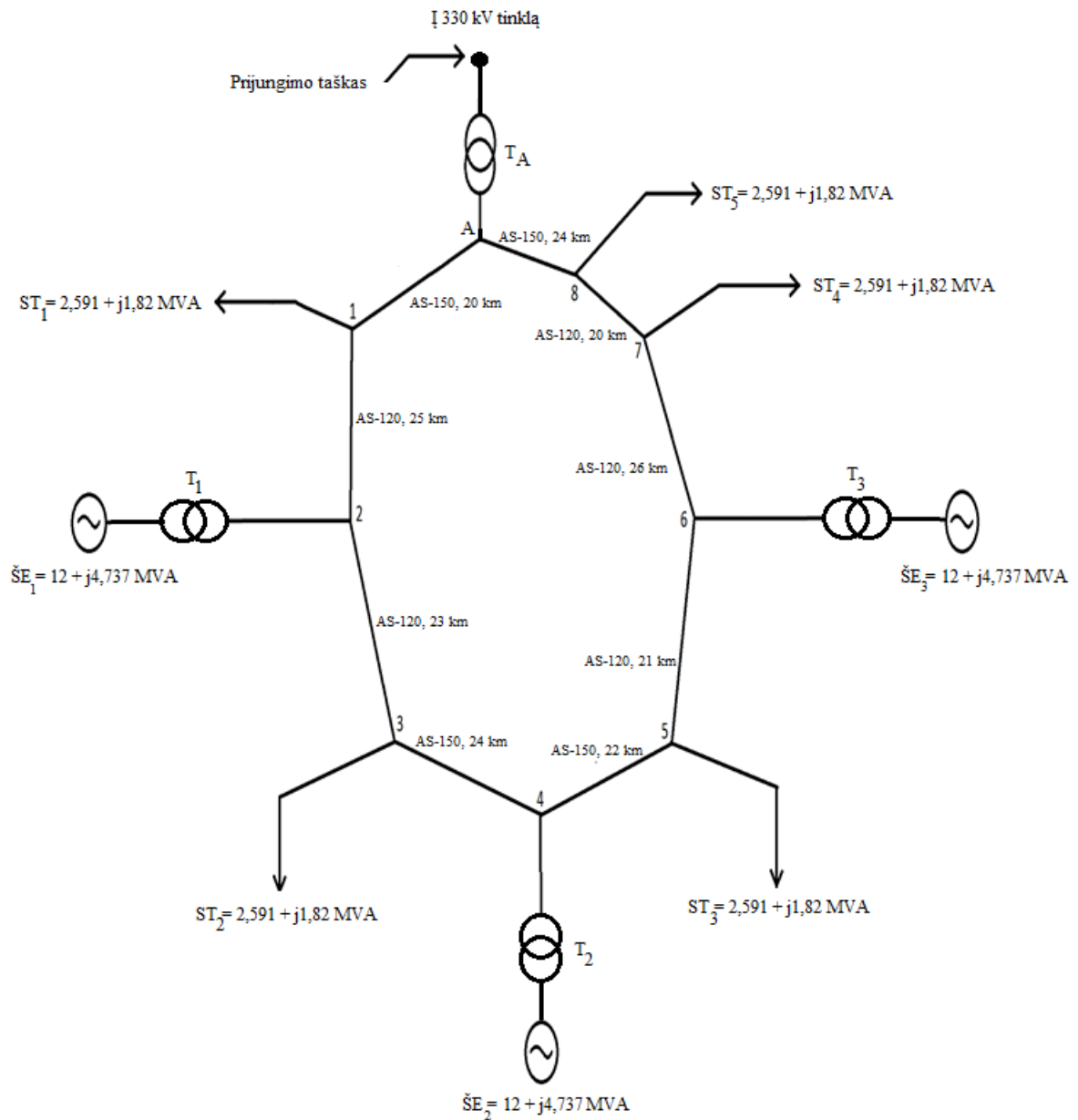
Mazgas	1	3'	3''	5	7	8
Įtampa, kV	35,63	34,62	34,58	34,85	35,42	35,82

16 Lentelė. Įtampos ir galios nuostoliai žiedinio skirstomojo tinklo, be generatorių, linijose.

Linija	L <sub>A1</sub>	L <sub>13</sub>	L <sub>35</sub>	L <sub>57</sub>	L <sub>78</sub>	L <sub>8A</sub>
$\Delta S_L$ , MW	0,064	0,04	0,001	0,013	0,021	0,05
$\Delta S_L$ , %	2,09	2,67	0,83	1,45	1,03	1,61
$\Delta U_L$ , kV	0,87	1,02	0,43	0,55	0,39	0,66
$\Delta U_L$ , %	2,4	2,88	1,23	1,59	1,1	1,83

## 7.2 Perdavimo tinklo schemos sudarymas

Sudaromas žiedinio perdavimo tinklo modelis su prie jo prijungtais skirstomaisiais tinklais ir sisteminėmis elektrinėmis. Skaičiavimo metodika ir tvarka analogiška skirstomojo tinklo skaičiavimams.



21 pav. Perdavimo tinklo schema.

### 7.2.1 Linijų parametrai ir jų varžų skaičiavimas

Sudaroma schemoje parodytų linijų laidininkų parametrų lentelė:

17 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų laidininkų parametrai [9].

Tipas	$r_0, \Omega/\text{km}$	$X_0, \Omega/\text{km}$	$b_0 \cdot 10^{-6}, \text{S}/\text{km}$
AS-150	0,2	0,42	2,71
AS-120	0,25	0,425	2,89

Toliau sudaroma linijų lentelė:

18 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų ilgiai.

Linija	Laidininkas	Linijos ilgis, km
L <sub>A1</sub>	AS-150	20
L <sub>12</sub>	AS-120	25
L <sub>23</sub>	AS-120	23
L <sub>34</sub>	AS-150	24
L <sub>45</sub>	AS-150	22
L <sub>56</sub>	AS-120	21
L <sub>67</sub>	AS-120	26
L <sub>78</sub>	AS-120	20
L <sub>8A</sub>	AS-150	24

Šiluminių elektrinių linijų ilgiai nevertinami, nes sisteminės elektrinės yra arti perdavimo linijų.

Pagal jau naudotą metodiką, apskaičiuojamos linijų varžos ir surašomos į rezultatų lentelę:

16 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų varžų skaičiavimo rezultatų lentelė.

Linija	Varža, $\Omega$
L <sub>A1</sub>	$4 + j8,382$
L <sub>12</sub>	$6,25 + j10,643$
L <sub>23</sub>	$5,75 + j9,792$
L <sub>34</sub>	$4,8 + j10,059$
L <sub>45</sub>	$4,4 + j9,221$
L <sub>56</sub>	$5,25 + j8,94$
L <sub>67</sub>	$6,5 + j11,069$
L <sub>78</sub>	$5 + j8,515$
L <sub>8A</sub>	$4,8 + j10,059$

## 7.2.2 Linijų generuojamų reaktyviųjų galių vertinimas

Suskaičiuojamos likusių linijų generuojamos reaktyviosios galios ir surašomos į rezultatų lentelę:

19 Lentelė. Perdavimo tinklo linijų generuojamos reaktyviosios galios skaičiavimo rezultatų lentelė.

Linija	Reaktyvioji galia, kVAr
L <sub>A1</sub>	328,52
L <sub>12</sub>	438,3
L <sub>23</sub>	403,24
L <sub>34</sub>	394,23
L <sub>45</sub>	361,38
L <sub>56</sub>	368,17

Linija	Reaktyvioji galia, kVAr
L <sub>67</sub>	455,83
L <sub>78</sub>	350,64
L <sub>8A</sub>	394,23

### 7.2.3 Šiluminių elektrinių parametų skaičiavimas

Tinkle prijungtos 3 vienodos galios šiluminės elektrinės:  $\check{S}E1 = \check{S}E2 = \check{S}E3 = \check{S}E = 12 \text{ MW}$ . Elektrinių galios faktorius –  $\cos\varphi_{\check{S}E} = 0,85$ . Turint elektrinių aktyviasias galias ir galios faktorių, galima apskaičiuoti elektrinių reaktyviasias galias :

$$Q_{\check{S}E} = 12 \cdot \text{tg}(\arccos 0,85) = 7,437 \text{ MVar.}$$

Tada elektrinių kompleksinės pilnosios galios lygios:

$$\underline{S}_{\check{S}E} = 12 + j7,437 \text{ MVA};$$

### 7.2.4 Transformatorių parinkimas ir jų parametų skaičiavimas

Transformatoriai parenkami pagal šiluminių elektrinių pilnšias galias:

$$S_{\check{S}E} = \frac{12}{0,85} = 14,117 \text{ MVA.}$$

Pagal apskaičiuotas galias vėjo elektrinėms parenkami TRDN-25000/110 galios transformatoriai. Transformatorių duomenys:

20 Lentelė. 10/110 kV transformatorių duomenys.[10]

Tipas	S <sub>T</sub> , kVA	U <sub>N1</sub> , kV	U <sub>N2</sub> , kV	ΔP <sub>TV</sub> , kW	ΔP <sub>TJ</sub> , kW	U <sub>TJ</sub> , %	I <sub>TV</sub> , %
TRDN	25000	10,5	115	25	120	10,5	0,75

Turint transformatorių duomenis, apskaičiuojamos transformatorių varžos ir tuščiosios veikos reaktyviosios galios.

Parinkti transformatoriai veiks aukštinančiuoju režimu, o skaičiuojamas tinklas yra 110 kV įtampos, todėl pasirinktoji įtampa prilyginama aukštosios įtampos transformatoriaus apvijų įtampai - 115 kV.

Skaičiavimai transformatoriams:

$$Z_{T\check{S}E} = \frac{10,5 \cdot 115^2}{100 \cdot 25} = 55,545 \Omega;$$

$$R_{T\check{S}E} = \frac{120 \cdot 115^2}{25^2 \cdot 1000} = 2,539 \Omega;$$

$$X_{T\check{S}E} = \sqrt{55,545^2 - 2,539^2} = 54,486 \Omega;$$

$$\Delta Q_{TVT\check{S}E} = \frac{0,75}{100} \cdot 25 = 0,187 \text{ MVar.}$$

### 7.2.5 Galios ir įtampos nuostolių transformatoriuose skaičiavimas

Transformatorių galios nuostoliai skaičiuojami pagal anksčiau naudotą metodiką. Skaičiavimai transformatoriams:

$$\Delta P_{T\check{S}E} = \frac{14,117^2}{25^2} \cdot 120 + 25 = 63,267 \text{ kW};$$

$$\Delta Q_{T\check{S}E} = \frac{14,117^2}{25} \cdot \frac{10,5}{100} + 0,187 = 1,024 \text{ MVar.}$$

Toliau skaičiuojami transformatorių įtampos nuostoliai. Skaičiavimai transformatoriams:

$$\Delta U_{T\check{S}E}^* = \frac{12 \cdot 2,539 + 7,437 \cdot 55,486}{115} = 3,85 \text{ kV};$$

$$\delta U_{T\check{S}E} = \frac{12 \cdot 55,86 - 7,437 \cdot 2,539}{115} = 5,63 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{T\check{S}E} = 3,85 - \frac{5,63^2}{2 \cdot 115} = 3,72 \text{ kV.}$$

### 7.2.6 Mazgų skaičiuojamųjų apkrovų skaičiavimas

Žinant linijų generuojamas galias, apskaičiuojamos mazgų skaičiuojamosios apkrovos. Skaičiavimai atliekami analogiškai skirstomojo tinklo skaičiavimams:

21 Lentelė. Perdavimo tinklo mazgų skaičiuojamosios apkrovos.

Mazgas	$\underline{S}'$ , MVA
1	-2,591 – j2,586
2	11,936 + j5,57
3	-2,591 - j2,617
4	11,936 + j5,656
5	-2,591 – j2,549





$$\begin{aligned}
 \underline{S}_{A8} = & \frac{\underline{S}'_1 \cdot \underline{Z}_{A1} + \underline{S}'_2 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12}) + \\
 & + \underline{S}'_3 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23}) + \underline{S}'_4 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34}) + \underline{S}'_5 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45}) + \\
 & + \underline{S}'_6 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56}) + \underline{S}'_7 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67}) \\
 & + \underline{S}'_8 \cdot (\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78})}{\underline{Z}_{A1} + \underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{34} + \underline{Z}_{45} + \underline{Z}_{56} + \underline{Z}_{67} + \underline{Z}_{78} + \underline{Z}_{8A}} = -23,299 - \\
 & j14,566 \text{ MVA};
 \end{aligned}$$

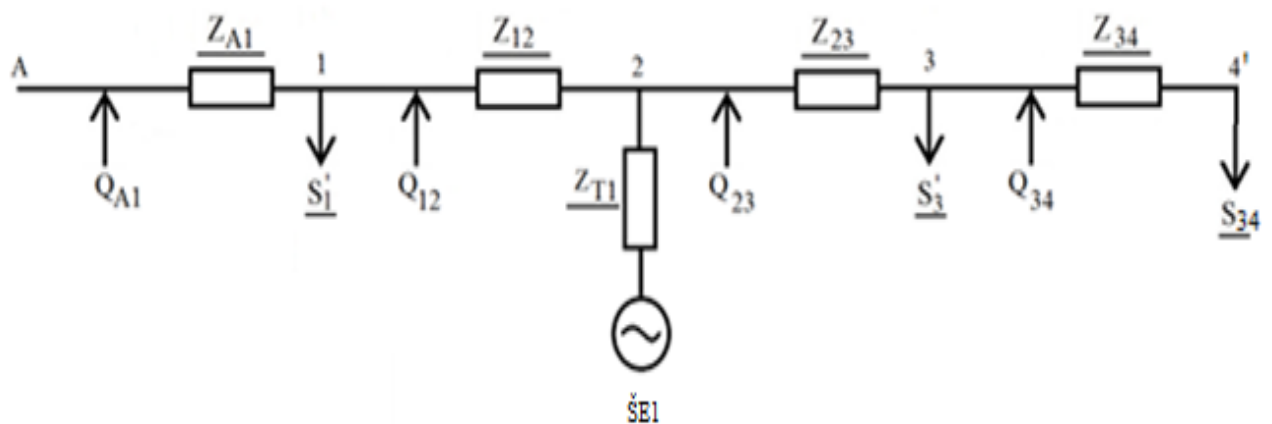
22 Lentelė. Galios srautų perdavimo tinklo linijose skaičiavimo rezultatai.

Linija	Galios srautas, MVA
L <sub>12</sub>	-22,759 – j12,725
L <sub>23</sub>	-10,823 – j7,154
L <sub>34</sub>	-8,232 – j4,537
L <sub>45</sub>	3,704 + j1,119
L <sub>56</sub>	6,295 + j3,669
L <sub>67</sub>	18,232 + j9,257
L <sub>78</sub>	20,823 + j11,883
L <sub>8A</sub>	23,414 + j14,448

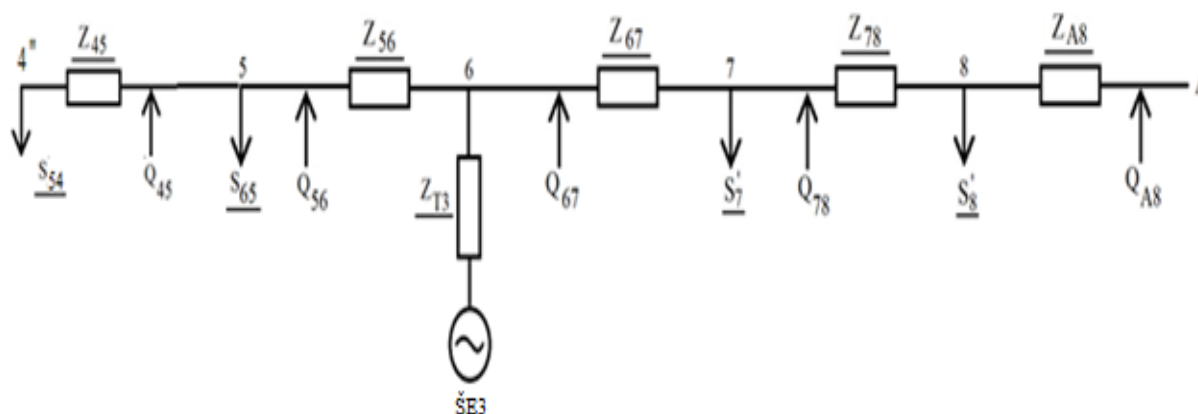
Pagal skaičiavimus nustatoma, kad pagrindinis srautas išteka iš ketvirto mazgo – antros šiluminės elektrinės.

### 7.2.8 Galios srautų ir nuostolių linijose skaičiavimas

Nustačius srautų sutekėjimo tašką, sudaromos dvi skaičiuojamosios schemos:



23 pav. Skaičiuojamoji schema perdavimo tinklui 1.



24 pav. Skaičiuojamoji schema perdavimo tinklui 2.

Pagal anksčiau naudotą metodiką, atliekami galios nuostolių ir srautų skaičiavimai, bei sudaroma rezultatų lentelė:

23 Lentelė. Galios nuostolių ir srautų skaičiavimo perdavimo tinkle rezultatai.

Linija	$\underline{S}_p$ , MVA	$\underline{S}_g$ , MVA	$\underline{\Delta S}$ , MVA
L <sub>43</sub>	8,232 + j4,537	8,197 + j4,857	0,035 + j0,073
L <sub>32</sub>	10,788 + j7,475	10,706 + j7,739	0,081 + j0,139
L <sub>21</sub>	22,642 + j13,31	22,286 + j13,141	0,356 + j0,606
L <sub>1A</sub>	24,877 + j15,728	24,591 + j15,456	0,286 + j0,6
L <sub>45</sub>	3,704 + j1,119	3,699 + j0,746	0,005 + j0,011
L <sub>56</sub>	6,29 + j3,296	6,268 + j2,89	0,021 + j0,037
L <sub>67</sub>	18,205 + j8,479	17,988 + j7,654	0,216 + j0,368
L <sub>78</sub>	20,579 + j10,28	20,36 + j9,557	0,218 + j0,372
L <sub>8A</sub>	22,951 + j12,122	22,684 + j11,168	0,267 + j0,56

Lentelėje  $\underline{S}_p$  – galios srautas linijos pradžioje, MVA;  $\underline{S}_g$  - galios srautas linijos pradžioje, MVA;  $\underline{\Delta S}$  – galios nuostoliai linijoje, MVA.

### 7.2.9 Įtampos nuostolių linijose skaičiavimas

Kadangi srautai išteka iš ketvirto mazgo, nuo jo pradedami skaičiuoti įtampos nuostoliai. Mazgo įtampa – 115 kV.

Taško 4 įtampa didesnė, nes prie jo prijungto transformatoriaus apvijų vadinė įtampa 5% didesnė už tinklo. Taip kompensuojami įtampos nuostoliai.

24 Lentelė. Įtampos nuostolių perdavimo tinklo linijose skaičiavimo rezultatai.

Linija	$\Delta U_L^*$ , kV	$\delta U_L$ , kV	$\Delta U_L$ , kV
L <sub>43</sub>	0,74	0,53	0,73
L <sub>32</sub>	1,18	0,54	1,18
L <sub>21</sub>	2,5	1,39	2,49
L <sub>1A</sub>	2,09	1,31	2,49
L <sub>45</sub>	0,23	0,25	0,23
L <sub>56</sub>	0,52	0,33	0,54
L <sub>67</sub>	1,85	1,28	1,85
L <sub>78</sub>	1,69	1,1	1,68
L <sub>8A</sub>	2,09	1,56	2,08

25 Lentelė. Apskaičiuotos mazgų įtampos perdavimo tinkle.

Mazgas	1	2	3	4	5	6	7	8	A'	A''
Įtampa, kV	110,58	113,07	114,26	115	114,76	114,22	112,37	110,68	108,49	108,59

Atlikus skaičiavimus gauta:

26 Lentelė. Įtampos ir galios nuostoliai žiedinio perdavimo tinklo linijose.

Linija	L <sub>1A</sub>	L <sub>21</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>43</sub>	L <sub>45</sub>	L <sub>56</sub>	L <sub>67</sub>	L <sub>78</sub>	L <sub>8A</sub>
$\Delta S_L$ , MVA	0,161	0,703	0,664	0,62	0,081	0,012	0,043	0,427	0,431
$\Delta S_L$ , %	1,22	2,71	2,28	2,45	0,854	0,335	0,626	2,188	1,92
$\Delta U_L$ , kV	2,08	2,49	1,18	0,739	0,231	0,544	1,85	1,68	2,08
$\Delta U_L$ , %	1,88	2,2	1,03	0,64	0,2	0,47	1,62	1,5	1,88

#### 7.2.10 330/110 kV transformatoriaus parinkimas

Toliau parenkamas 330/110 kV transformatorius, 110 kV perdavimo tinklo prijungimui prie tranzitinio 330 kV tinklo. Parinkimui atliekami analogiški, jau anksčiau atlikti, skaičiavimai. Pirma apskaičiuojamas bendras srautas A taške:

$$\underline{S}_A = \underline{S}_{A1} + \underline{S}_{A8} = 24,591 + j15,456 + 22,684 + j11,168 = 47,275 + j26,625 \text{ MVA.}$$

$$S_A = \sqrt{47,275^2 + 26,625^2} = 54,275 \text{ MVA.}$$

Pagal apskaičiuotą galios srautą parenkamas ATDCTN - 125000/330/110 - Y1 transformatorius:

27 Lentelė. 330/110 kV transformatoriaus duomenys. [13]

Tipas	$S_T$ , kVA	$U_{N1}$ , kV	$U_{N2}$ , kV	$\Delta P_{TV}$ , kW	$\Delta P_{TJ}$ , kW	$U_{TJ}$ , %	$I_{TV}$ , %
ATDCTN	125000	115	330	85	290	10	0,45

Turint transformatoriaus duomenis, pagal anksčiau naudotas formules apskaičiuojami jo parametrai:

28 Lentelė. 330/110 kV transformatoriaus parametrai.

Parametrai								
$Z_T$ , $\Omega$	$R_T$ , $\Omega$	$X_T$ , $\Omega$	$\Delta Q_{TVT}$ , MVA <sub>r</sub>	$\Delta P_{TA}$ , kW	$\Delta Q_{TA}$ , MVA <sub>r</sub>	$\Delta U_{TA}^*$ , kV	$\delta U_{TA}$ , kV	$\Delta U_{TA}$ , kV
10,58	0,245	10,577	0,562	139,638	2,917	0,89	1,5	0,89

Pagal atliktus skaičiavimus, į tinklą perduodama galia:

$$\underline{S}_T = 47,136 + j23,707 \text{ MVA};$$

$$S_T = \sqrt{47,136^2 + 23,707^2} = 52,762 \text{ MVA}.$$

## 8 MODELIŲ SUDARYMAS IR MODELIAVIMO REZULTATAI

### 8.1 Perdavimo ir skirstomojo tinklo modeliai

Tyrimui atlikti, MATLAB Simulink aplinkoje sudaromi perdavimo ir skirstomojo tinklo, bei elektrinių modeliai. Turint sudarytus modelius, jie apjungiami į vieną kelių lygmenų modelį. Modeliai kartu su aprašymais pateikiami prieduose.

Pirmasis lygmuo – perdavimo tinklas. Modeliuojamas žiedinis perdavimo tinklas (Priedas 1), prijungtas prie 330 kV tinklo. Tinkle linijomis sujungtos trys šiluminės elektrinės ir penki skirstomieji tinklai. Prie vienos iš šiluminių elektrinių modeliuojamas trumpasis jungimas, dėl kurio elektrinė atjungiamą neribotam laikui. Prie A fazės prijungti galios srautų skaičiavimo blokai (angl. *Load Flow Bus*), kurie taip pat nurodo įtampą ir fazės kampą. Posistemėje „Matavimų grafikai“ atliekami elektrinių dydžių matavimai. Galios valdymo blokas (angl. *powergui*) atlieka srautų skaičiavimą ir pradinių sąlygų apibrėžimą.

Sekantis modeliavimo lygmuo – skirstomasis tinklas. Skirstomojo tinklo (Priedas 2) topologija panaši perdavimo tinklo, išskyrus prijungtas apkrovas  $S_1 - S_5$ . Prie perdavimo tinklo jungiami penki skirstomieji tinklai, su skirtingo tipo elektrinėmis.

## 8.2 Elektrinių modeliai

Modeliuojant elektros tinklus, naudojamos kelių skirtingų tipų elektrinės – vėjo, saulės, šiluminės ir hidroelektrinės. Šios elektrinės yra trečias bendro modelio lygmuo.

### 8.2.1 Vėjo elektrinės modelis

Vėjo elektrinės modelyje (Priedas 3 ) prie VE generatoriaus bloko prijungtas vėjo turbinos blokas, kuris generatoriui perduoda sukimosi momentą, priklausomai nuo generatoriaus sukimosi greičio, vėjo atakos kampo ir greičio. Generatoriaus pagaminama energija perduodama į DC/AC keitikliui. Prie šio keitiklio nuolatinės srovės grandies, per savo atskirą DC/DC keitiklį, prijungta akumuliatorių baterija. Ji naudojama perteklinei energijai sukaupti ir dažnio reguliavimo patikimumui padidinti.

Iš inverterio išeinanti kintamoji įtampa praleidžiama per LC filtrą, aukštesniųjų harmonikų, gautų formuojant AC įtampą ir srovę, filtravimui. Matavimo blokas atlieka įtampos matavimus, pagal kurių rezultatus įtampos reguliatorius keičia kintamosios įtampos dydį.

### 8.2.2 Hidroelektrinės modelis

Modelyje (Priedas 4), prie hidroelektrinės sinchroninio generatoriaus bloko, prijungtas hidroturbinos ir greičio reguliatoriaus, bei žadinimo sistemos blokas. Šie blokai reguliuoja generatoriaus sukimosi greitį ir gnybtų įtampą, įvertindami iš generatoriaus ateinančius jo galios, sukimosi greičio ir įtampos dydžio signalus. Lygiagrečiai generatoriui jungiamas svyravimų slopintuvas, nes srovės šaltiniai kitu atveju negali būti modeliuojami nuosekliai su induktyviaisiais elementais, šiuo atveju, transformatoriumi.

### 8.2.3 Saulės elektrinės modelis

Modelyje (Priedas 5), į saulės elektrinės bloką (SE) įvedamos apšvietos ir temperatūros reikšmės. Nuolatinės srovės grandyje prijungti induktyvieji ir talpiniai filtrai, srovės ir įtampos svyravimams išlyginti. Diodai ir tranzistorius naudojami saulės elektrinės apsaugai nuo priešingos krypties srovių, taip išvengiant perkaitimo ir gaisro. Kaip ir vėjo elektrinės modelyje, naudojami DC/DC keitikliai ir akumuliatorių baterija, bei atliekami matavimai impulsų generatoriaus valdymui. Iš inverterio išeinanti įtampa transformuojama vietiniame 0,4/10 kV transformatoriuje ir tada perduodama į 10/35 kV tinklo transformatorių. Dėl programinės įrangos apribojimų, saulės elektrinės detalusis modelis pakeičiamas dinaminės apkrovos bloku.

## 8.2.4 Šiluminės elektrinės modelis

Šiluminės elektrinės modelis (Priedas 6) yra analogiškas hidroelektrinės modeliui. Vienintelis skirtumas – hidroturbinos ir greičio reguliavimo bloką pakeičia garo turbinos ir greičio reguliavimo blokas.

## 8.3 Modeliavimo rezultatai.

Turint pilną trijų lygių modelį, pradedama modeliuoti. Trumpojo jungimo bloke nurodoma, kad trumpasis jungimas atjungs perdavimo tinklo elektrinę ŠE2 laiko momentu  $t = 0,8$  s. Tada atidaromas galios valdymo blokas ir pasirenkama srautų pasiskirstymo skaičiavimo (angl. *Load Flow*) funkcija. Srautų skaičiavimo lange pasirenkamos skaičiavimo (angl. *Compute*) ir pritaikymo (angl. *Apply*). Taip nustatomos generatorių pradinės paleidimo sąlygos, apskaičiuojami galios srautai ir mazgų įtampos, kurios nurodomos srautų skaičiavimo blokuose. Skaičiavimo rezultatų pavyzdys pateiktas Priede 2.

Priede 2 pateiktas antrojo skirstomojo tinklo modelis, su prijungtomis hidroelektrinėmis. Prie srautų skaičiavimo blokų nurodytos elektrinių mazgų įtampos yra didesnės už nominalią 35 kV įtampą. Taip yra todėl, kad prijungti paskirstytieji generatoriai sukelia įtampos padidėjimą tinkle. Palyginimui sudaroma apskaičiuotų ir modeliavimo metu gautų įtampų palyginimo lentelė:

29 Lentelė. Apskaičiuotų ir modeliavimo metu gautų skirstomojo tinklo mazgų įtampų palyginimas.

Mazgas	1	2	3	4	5	6	7	8	A
$U_{\text{apSKSG}}$ , kV	35,49	36,61	35,87	36,56	36,05	36,43	35,67	35,24	34,95
$\Delta U_N$ , %	1,4	4,6	2,48	4,45	3	4,08	1,91	0,68	0,14
$U_{\text{apSKBG}}$ , kV	35,62	-	34,59	-	34,87	-	35,43	35,83	36,5
$\Delta U_N$ , %	1,77	-	1,17	-	0,37	-	1,22	2,37	4,28
$U_{\text{modSG}}$ , kV	34,63	35,77	35,66	36,36	35,98	35,73	34,95	34,52	34,1
$\Delta U_N$ , %	1,05	2,2	1,88	3,88	2,8	2,08	0,14	1,37	2,57

Pagal gautus skaičiavimų rezultatus matoma, kad esant prijungtiems paskirstytiesiems generatoriams, mazgų, nuo kurių maitinamos apkrovos, įtampa pakyla. Ši tendencija nepastebima tik tuo atveju, kai apkrovos yra arčiau tinklo maitinimo taško, o generatoriai tinkle neprijungti. Šį skirtumą sukelia priešinga galios srauto tekėjimo kryptis. Apskaičiuotos įtampos palyginamos su nominalia tinklo darbo įtampa ir apskaičiuojamas jų skirtumas procentais.

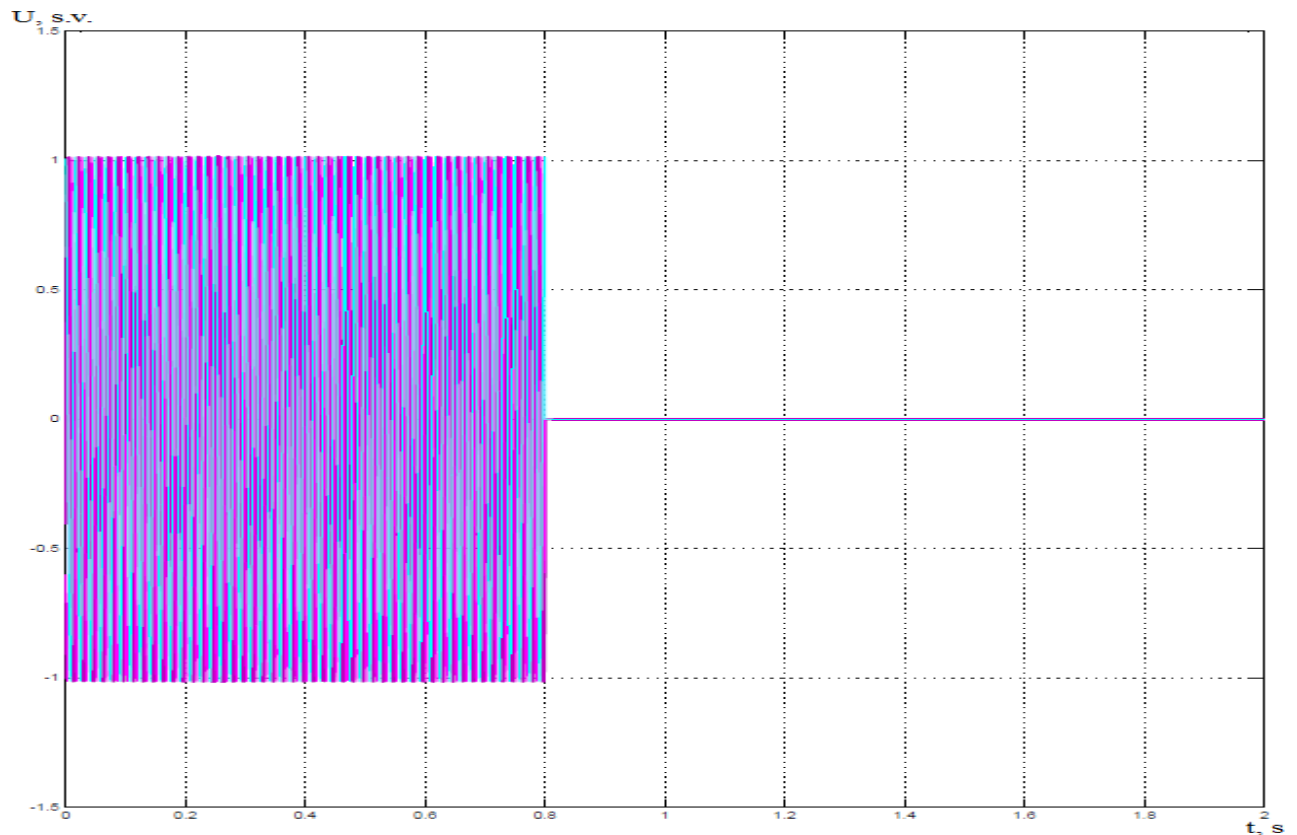
Taip pat pateikiamos ir įtampos perdavimo tinklo mazguose:

30 Lentelė. Apskaičiuotų ir modeliavimo metu gautų perdavimo tinklo mazgų įtampų palyginimas.

Mazgas	1	2	3	4	5	6	7	8	A
$U_{\text{ap.sk.}}$ kV	110,58	113,08	114,26	115	114,77	114,22	112,37	110,68	108,59
$\Delta U_N, \%$	0,52	2,8	3,87	4,54	4,33	3,83	2,15	0,61	1,28
$U_{\text{mod.}}$ kV	111,77	113,31	114,82	114,96	114,38	113,3	112,85	112,41	109,37
$\Delta U_N, \%$	1,61	3	4,38	4,51	3,98	2,91	2,59	2,19	0,57

Pagal gautus rezultatus matoma, kad įtampos skiriasi nežymiai. Esantys skirtumai galimi dėl skaičiavimo programų ypatumų, tokių kaip apvalinimas ir skaičiavimo koduose naudojamų formulių. Kadangi skirstomieji tinklai vieni nuo kitų skyrėsi tik prijungtomis elektrinėmis, gauti mazgų įtampų rezultatai visiems tinklams yra vienodi.

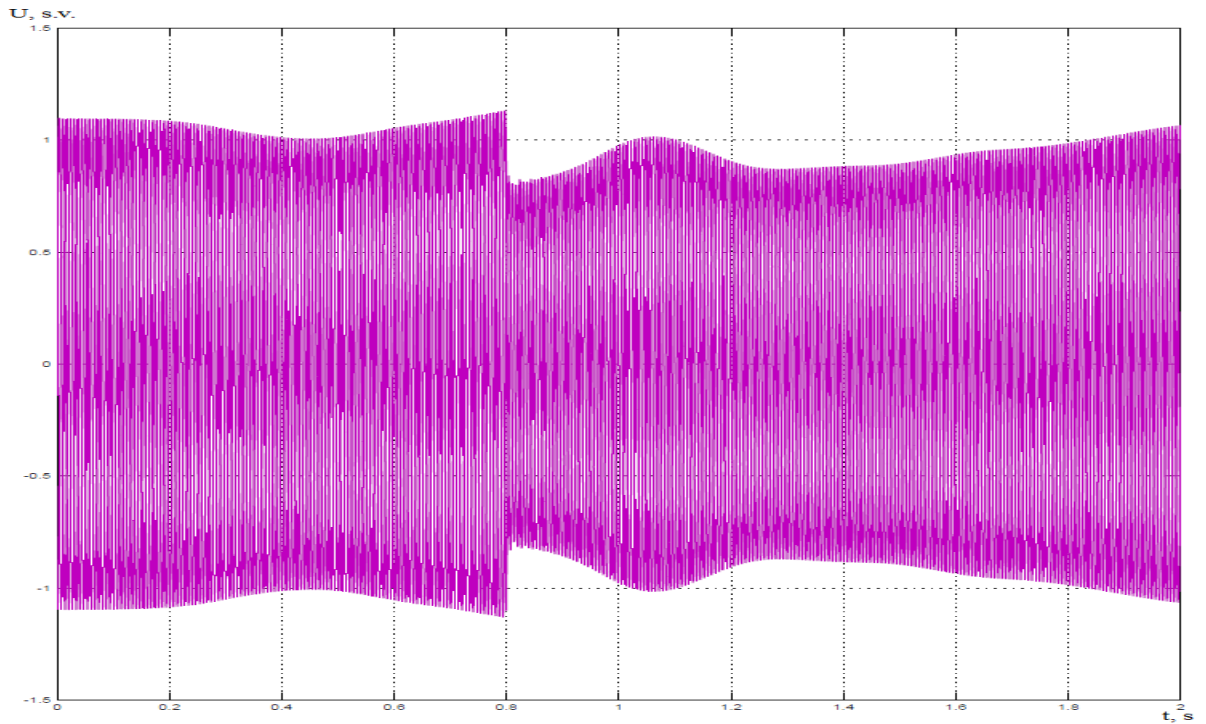
Toliau pateikiami modeliavimo metu gautų matavimų rezultatai.



25 pav. Įtampos, iš perdavimo tinklo elektrinės ŠE2, grafikas.

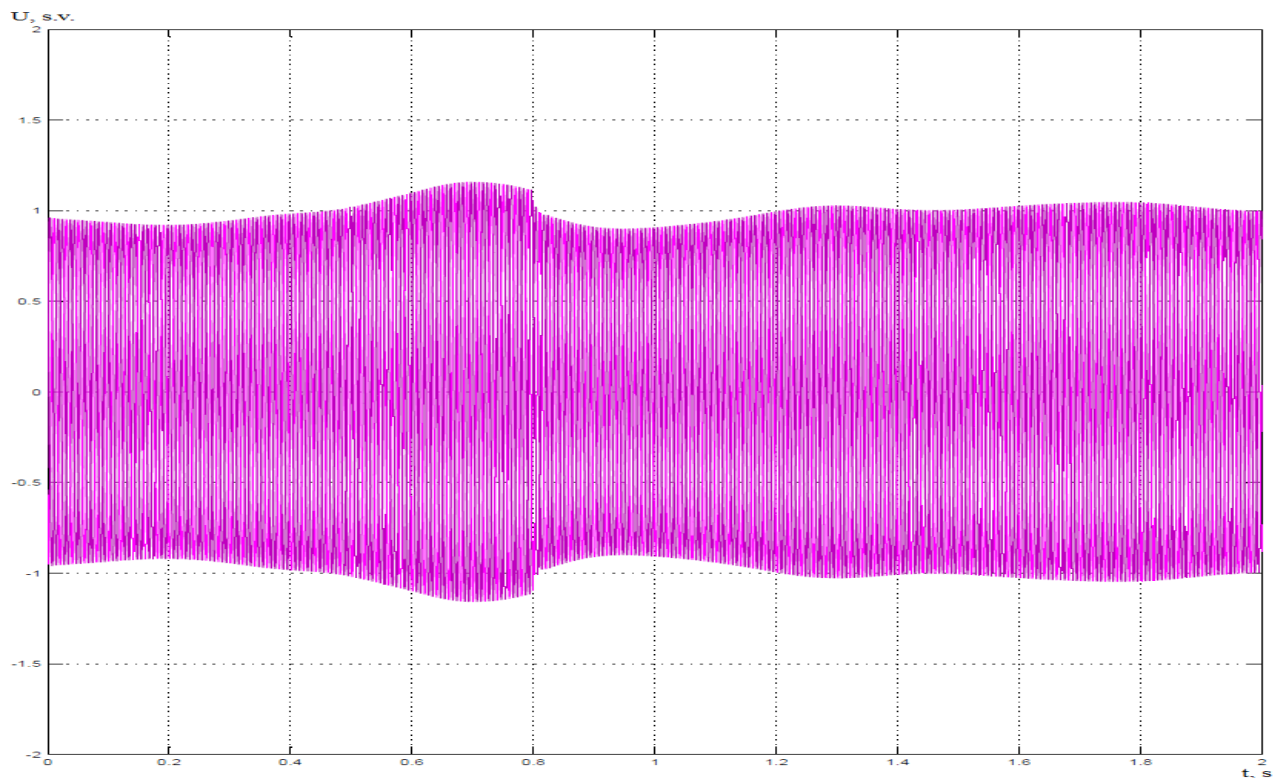
Pateiktame grafike parodytas elektrinės atsijungimas. Įvykus trumpajam jungimui, elektrinė atjungiamą neapibrėžtam laikui, todėl įtampos į tinklą netiekia.





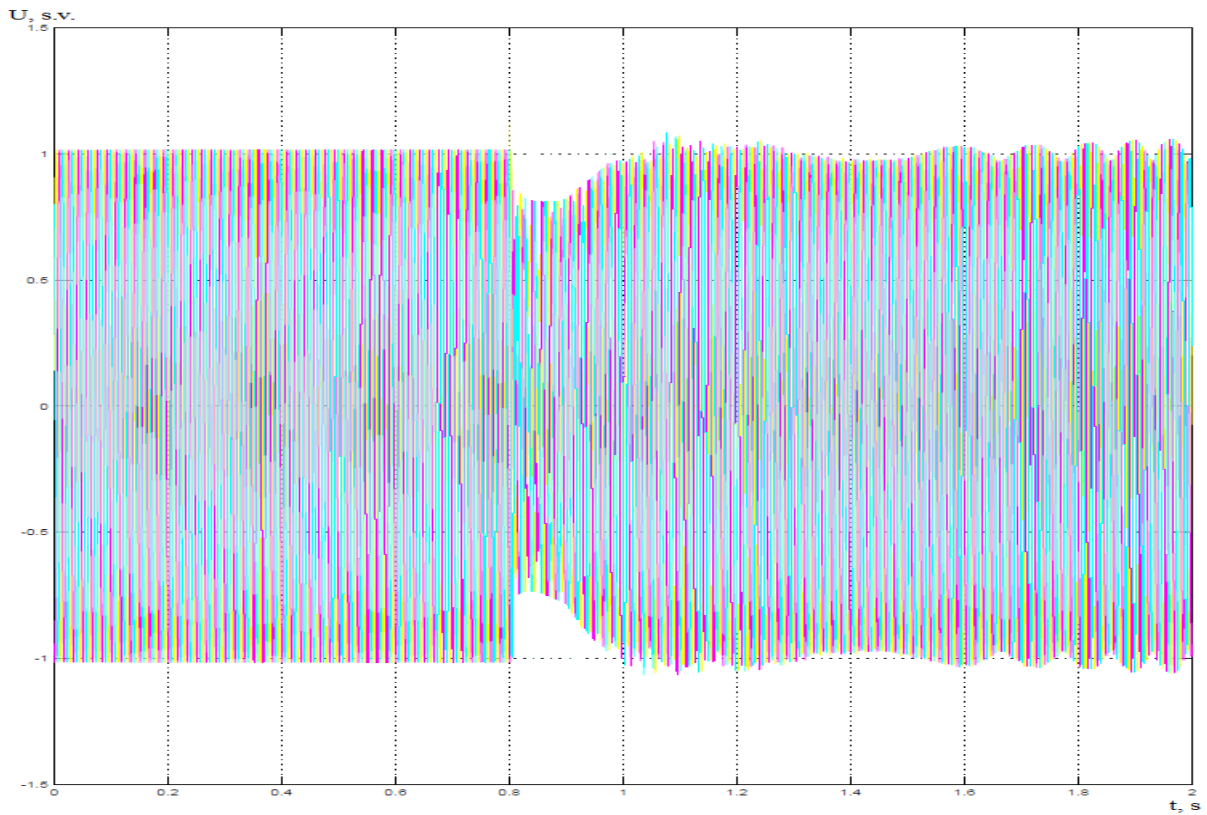
26 pav. Hidro generatoriaus gnybtų įtampos grafikas.

Grafike matomas hidro generatoriaus gnybtų įtampos kitimo grafikas. Laiko momentu  $t = 0,8$  s, įvykus trumpajam jungimui, gnybtų įtampa nukrenta. Po kurio laiko suveikia sukimosi greičio reguliavimo sistema, generatorius pradeda tiekti į tinklą daugiau galios ir įtampa pasiekia vardinę vertę.



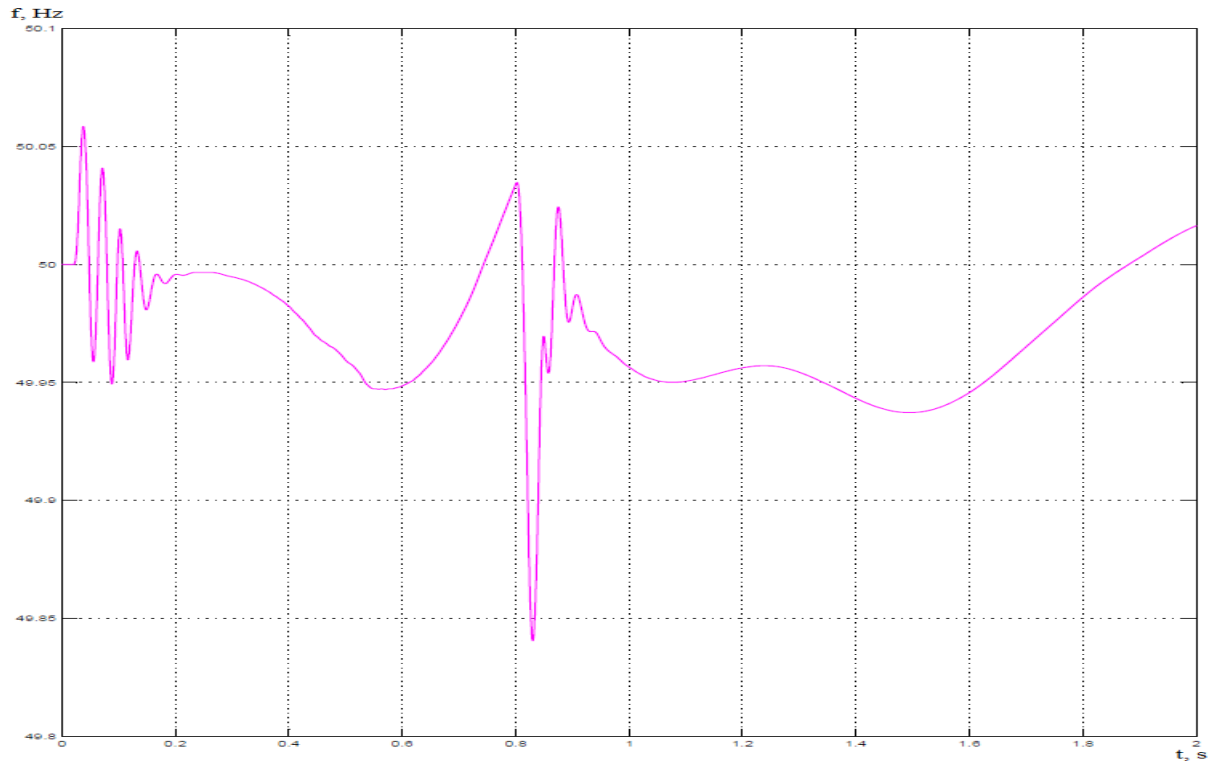
27 pav. Šiluminės elektrinės gnybtų įtampos grafikas.

Kaip ir hidro elektrinės atveju, šiluminės elektrinės gnybtų įtampa nukrinta trumpojo jungimo metu, bet po to yra atstatoma, padidinus tiekiamą galios srautą į tinklą.



28 pav. Vėjo ir saulės elektrinės įtampos grafikas.

Gautame grafike parodytas saulės ir vėjo elektrinių tiekiamos įtampos grafikas. Jis abiejų tipų elektrinėms yra vienodas, nes iki trumpojo jungimo momento į tinklą perduodama tik jų pačių generuojama galia, o įvykus trumpajam jungimui ir atsijungus sisteminei elektrinei, į tinklą perduodama papildoma akumuliatoriuose sukauptą galia. Dėl papildomos galios prijungimo ir tiekimo, įtampos grafike atsiranda svyravimai.



29 pav. Tinklo dažnio kitimo grafikas.

Grafiko pradžioje pastebimas dažnio svyravimas, sukeltas mašinų pirminio paleidimo, modeliavimo pradžioje. Laiko momentu  $t = 0,8$  s, įvykus trumpajam jungimui, dažnis nukrenta, nes tinklas netenka galios šaltinio. Po kurio laiko, paskirstytieji generatoriai pradeda tiekti daugiau galios į tinklą ir dažnis pradeda kilti bei pasiekia nominalią 50 Hz vertę.

## 9 IŠVADOS

1. Įvertinus skirtingų šalių ir organizacijų pateiktus paskirstytųjų generatorių apibrėžimus, sudarytas bendras šio energijos šaltinio apibrėžimas: paskirstytieji generatoriai yra tokie elektros energijos šaltiniai, kurie yra prijungti prie skirstomojo tinklo netoliau negu per vieną įtampos pakopą nuo apkrovos, dirba normaliomis darbo sąlygomis, jų galia yra ne daugiau kaip dvigubai didesnė už apkrovą, jei yra galimybė prisijungti prie sistemos ir, jei nėra galimybės prisijungti prie sistemos galia nedidesnė už apkrovą ir dalinai arba visiškai padengia apkrovą nepriklausomai nuo kitų techninių parametrų ar organizacinių prioritetų.
2. Atliekant paskirstytųjų generatorių prijungimo prie tinklo galimybių vertinimą, nustatyta, kad jos priklauso nuo generatoriaus tipo, vietinio elektros tinklo parametrų, didžiausio galimo šaltinių prijungimo skaičiaus bei techninių-elektrinių parametrų. Šiems veiksniams įvertinti naudojamos tikslo funkcijos, standartizuoti algoritmai ir kelių rūšių optimizaciniai metodai – analitiniai, klasikiniai ir kitų rūšių metodai.
3. Įvertintas paskirstytųjų generatorių poveikis tinklo darbui. Nustatyta, kad paskirstytieji generatoriai gali padidinti elektros gedimų skaičių tinkle. Šis padidėjimas susijęs su komutacinių įrenginių gesinamu elektros lanku, kuriam energiją gali tiekti to komutacinio įrenginio apsaugos zonoje prijungtas paskirstytasis generatorius. Paskirstytųjų generatorių įtaka įtampos lygiui priklauso nuo technologijos: sinchroniniais generatoriais galima sklandžiai reguliuoti tinklo įtampos lygį ir slopinti svyravimus, o atsinaujinančios energijos šaltinių (saulės ir vėjo) prijungimo taško įtampa priklauso nuo jų generuojamos galios.
4. Atliktas paskirstytųjų generavimo šaltinių panaudojimo sistemos dažnio reguliavimui vertinimas. Šie generatoriai, priklausomai nuo naudojamos technologijos, gali dalyvauti, pirminiame, antriniame ir tretiniame dažnio valdyme. Taip pat, paskirstytųjų generatorių elektrinių galią būtina valdyti iš tinklo operatoriaus dispečerinio valdymo centro dėl šių priežasčių:
  - įvykus tinkle pažaidai arba jai peraugus į gedimą, paskirstytųjų generatorių elektrinių ir tinklo veikos pastovumui užtikrinti paskirstytųjų generatorių elektrinių galia turi būti mažinama, apribojama ar net visai laikinai išjungiama.
  - galios mažinimo signalą gali sukelti elektrinės prijungimo taške pasikeitęs dažnis ir (arba) dėl kylančios įtampos turi būti numatytas.

Sumodeliavus perdavimo ir skirstomuosius tinklus, bei paskirstytuosius generatorius, paleistas modelis ir gautos mazgų įtampos vertės ir apskaičiuotas jų procentinis skirtumas nuo nominalios vertės. Didžiausias nuokrypis 35 kV skirstomajam tinklui 4,45 %, o 110 kV perdavimo tinklui – 4,54 %.

Be mazgų įtampų, gauti ir generatorių gnybtų įtampos grafikai, bei tinklo dažnio grafikas.

Gautose įtampos priklausomybėse nuo laiko matoma tendencija – įvykus trumpajam jungimui krenta gnybtų įtampa, kuri laikui bėgant stabilizuojasi. Tai vyksta, nes suveikia generatorių greičio

regulatoriai, padidinantys generatorių sukimosi greitį, arba energijos kaupikliai, kurie atiduoda papildomą galią į tinklą.

Tinklo dažnio grafiko pradžioje pastebimas dažnio svyravimas, sukeltas mašinų pirminio paleidimo, modeliavimo pradžioje. Laiko momentu  $t = 0,8$  s, įvykus trumpajam jungimui, dažnis nukrenta, nes tinklas netenka galios šaltinio. Po kurio laiko, paskirstytieji generatoriai pradeda tiekti daugiau galios į tinklą ir dažnis pradeda kilti bei pasiekia nominalią 50 Hz vertę.

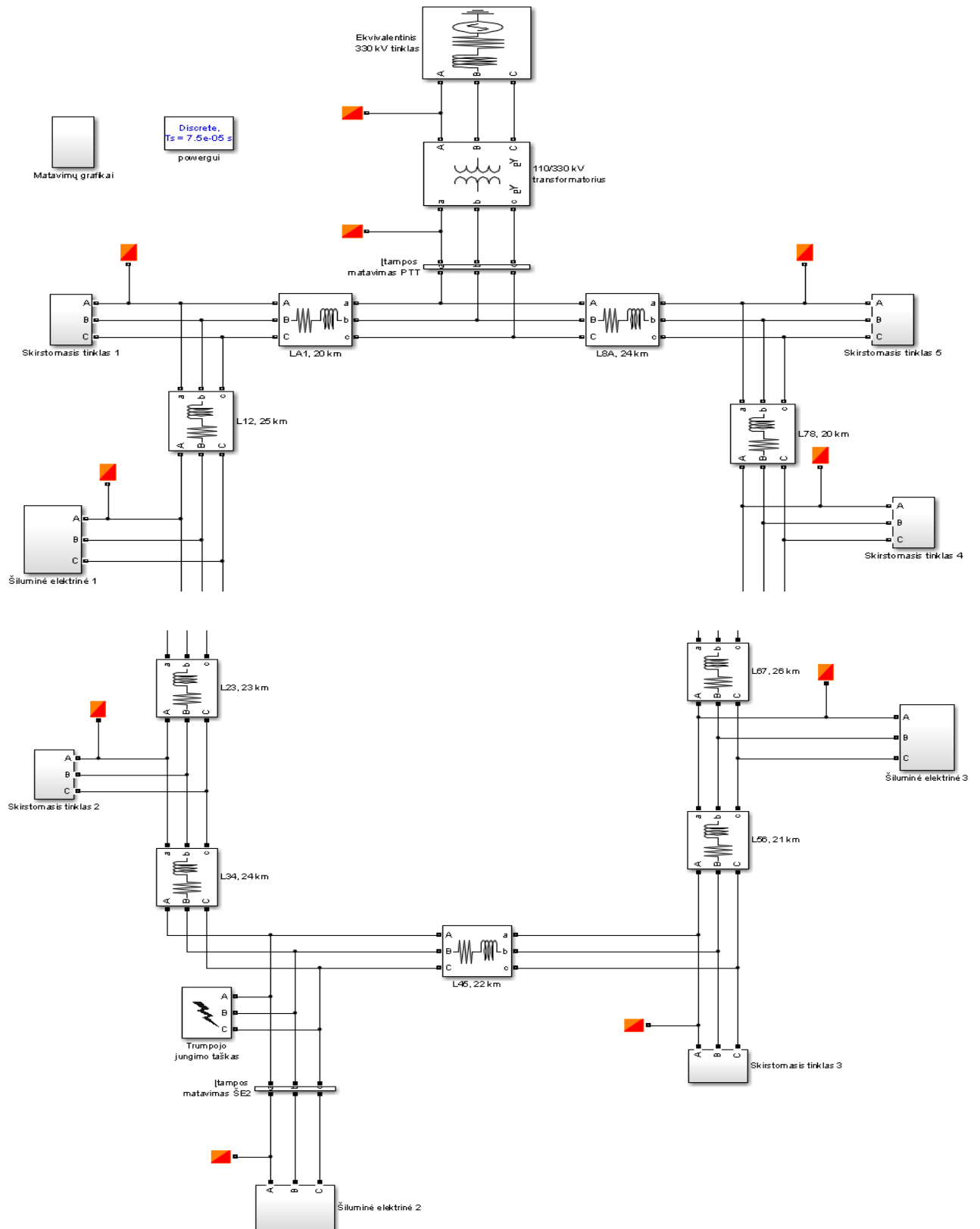
Pagal gautus įtampos ir dažnio grafikus, bei mazgų įtampų palyginimo rezultatus, galima daryti išvadą, kad paskirstytieji generatoriai tinkle veikia bei sudarytas tinklo modelis veikia tinkamai, nes sėkmingai atliekamos įtampos palaikymo ir dažnio reguliavimo funkcijos.

## 10 LITERATŪRA

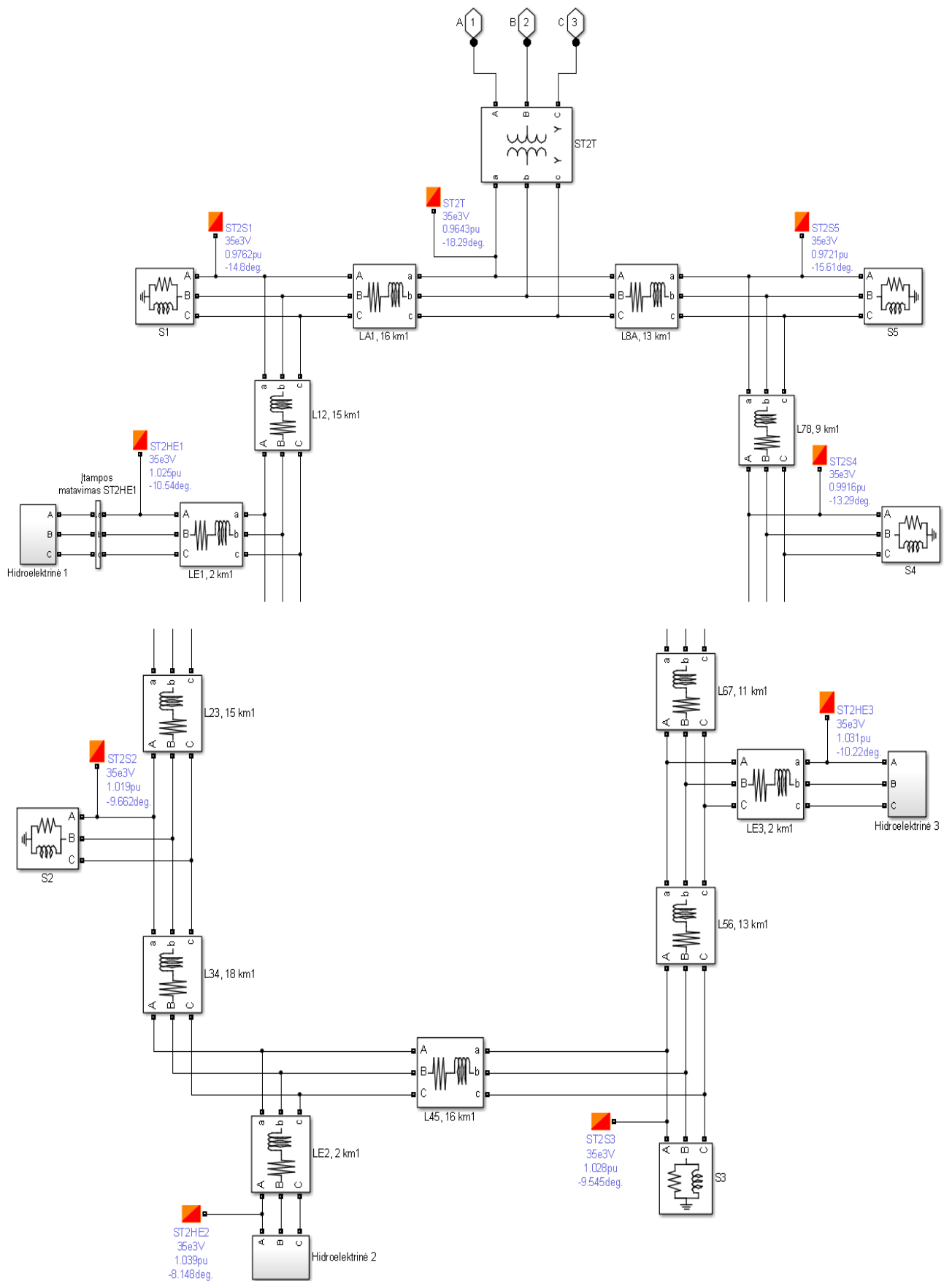
1. SLUŠNYS, D. Paskirstytieji elektros energijos šaltiniai. Paskaitų medžiaga. 2015 m.
2. PRAKASH, P, KHATOD K., D. „Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review” – 2015. Prieiga internete: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115014823> – žiūrėta 2017.02.21
3. ROMERO-RUIZ, S, COLMENAR-SANTOS, A. „Integration of distributed generation in the power distribution network: The need for smart grid control systems, communication and equipment for a smart city — Use cases” – 2014. Prieiga internete: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400416X> – žiūrėta 2017.03.12
4. CALDERADO, V, MILANOVIC, J. V, KAYICKI, M, PICCOLO, A. “The impact of distributed synchronous generators on quality of electricity supply and transient stability of real distribution network” – 2009 m. Prieiga internete: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779608001636> – žiūrėta 2017.03.17
5. BEVRANI, H. “Robust power system frequency control”. “Springer” – 2009 m.
6. DELFANTI, M, FALABRETTI, D, MERLO, M, MONFREDINI, G. „Distributed generation integration in the electric grid: energy storage system for frequency control“ – 2014. Prieiga internete: <https://www.hindawi.com/journals/jam/2014/198427/> - žiūrėta 2017.04.09
7. Prieiga internete: <http://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/combustion-engine-vs-gas-turbine-startup-time> – žiūrėta 2017.04.13
8. KILIC, A, ARSOY, A, B. „Evaluation of frequency control application for distributed generation in Turkey“ – 2015. Prieiga internete: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514007674> – žiūrėta 2017.04.19
9. BAČAUSKAS, A; GRĖBLIKAS, P; KAULAKIS, L. Elektros sistemos ir tinklai. Vilnius: Lietuvos TSR aukštojo ir specialiojo vidurinio mokslo ministerijos leidybinė redakcinė taryba, 1979.
10. SVINKŪNAS, G; NAVICKAS, A. Elektros energetikos pagrindai. Kaunas: Technologija, 2013.
11. Prieiga internete: [http://transformator.com.ru/ttproduction/transform/tr\\_110kv.php?GALLERY\\_ID=12](http://transformator.com.ru/ttproduction/transform/tr_110kv.php?GALLERY_ID=12) – žiūrėta 2017.04.09
12. Prieiga internete: [http://www.alageum.com/files/Tech\\_catalog\\_KTZ.pdf](http://www.alageum.com/files/Tech_catalog_KTZ.pdf) – žiūrėta 2017.04.09.
13. Prieiga internete: [http://www.elektrozavod.ru/sites/default/files/production/catalog/pdf/additional/Autotransformer\\_330\\_kV.pdf](http://www.elektrozavod.ru/sites/default/files/production/catalog/pdf/additional/Autotransformer_330_kV.pdf) – žiūrėta 2017.04.09

# 11 PRIEDAI

## 11.1 Priedas1. Perdavimo tinklo modelis

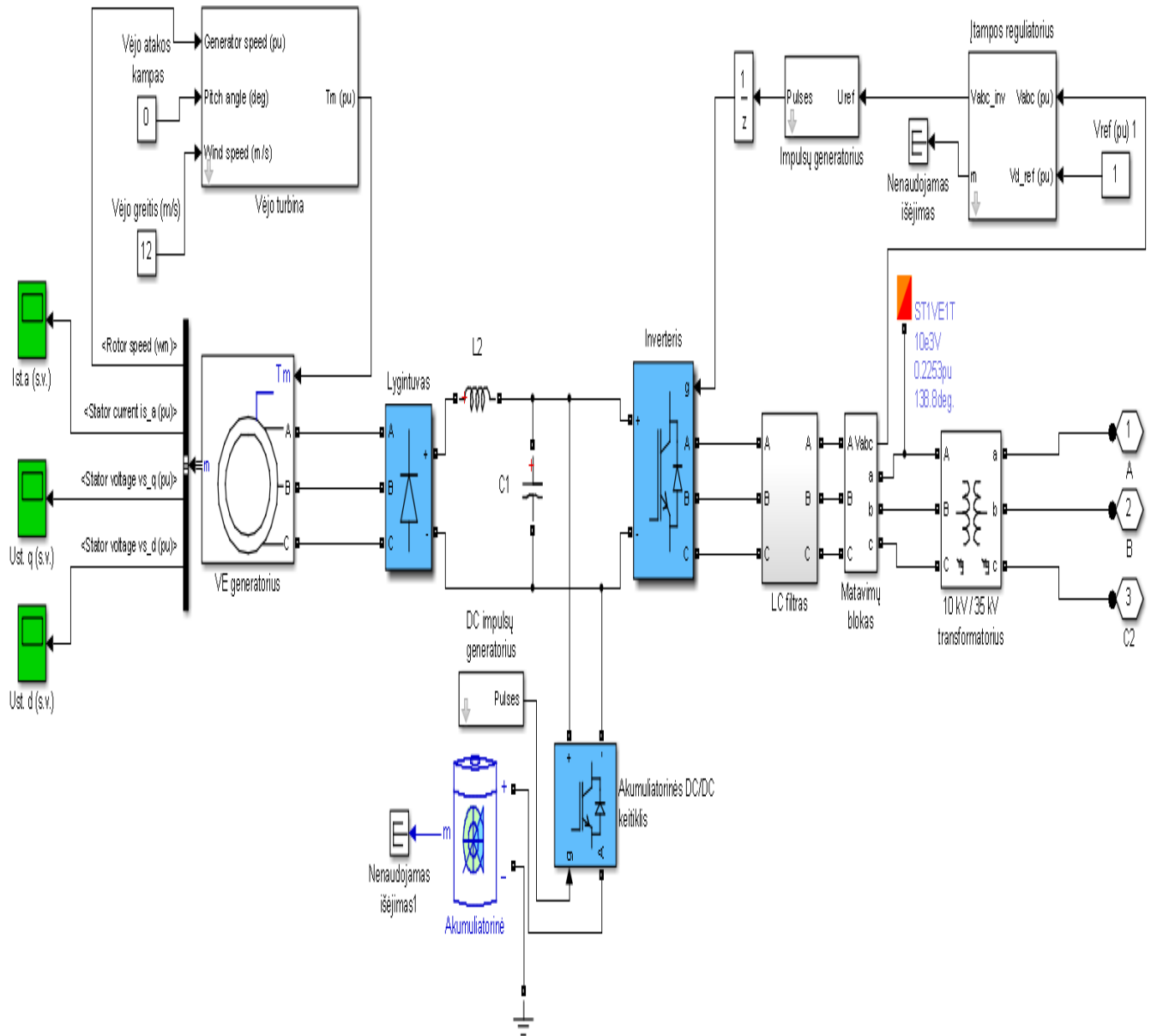


## 11.2 Priedas 2. Skirstomojo tinklo modelis

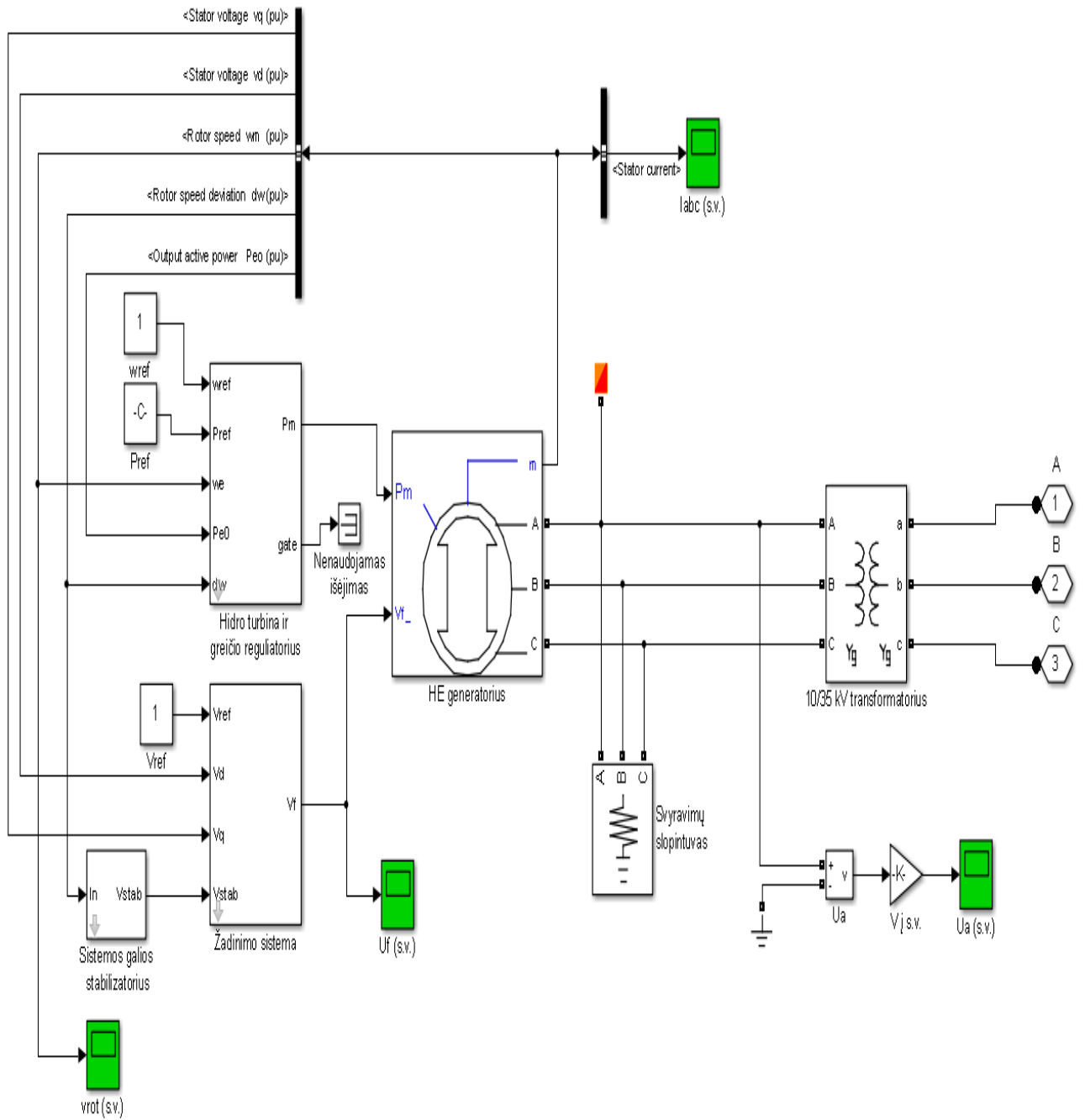




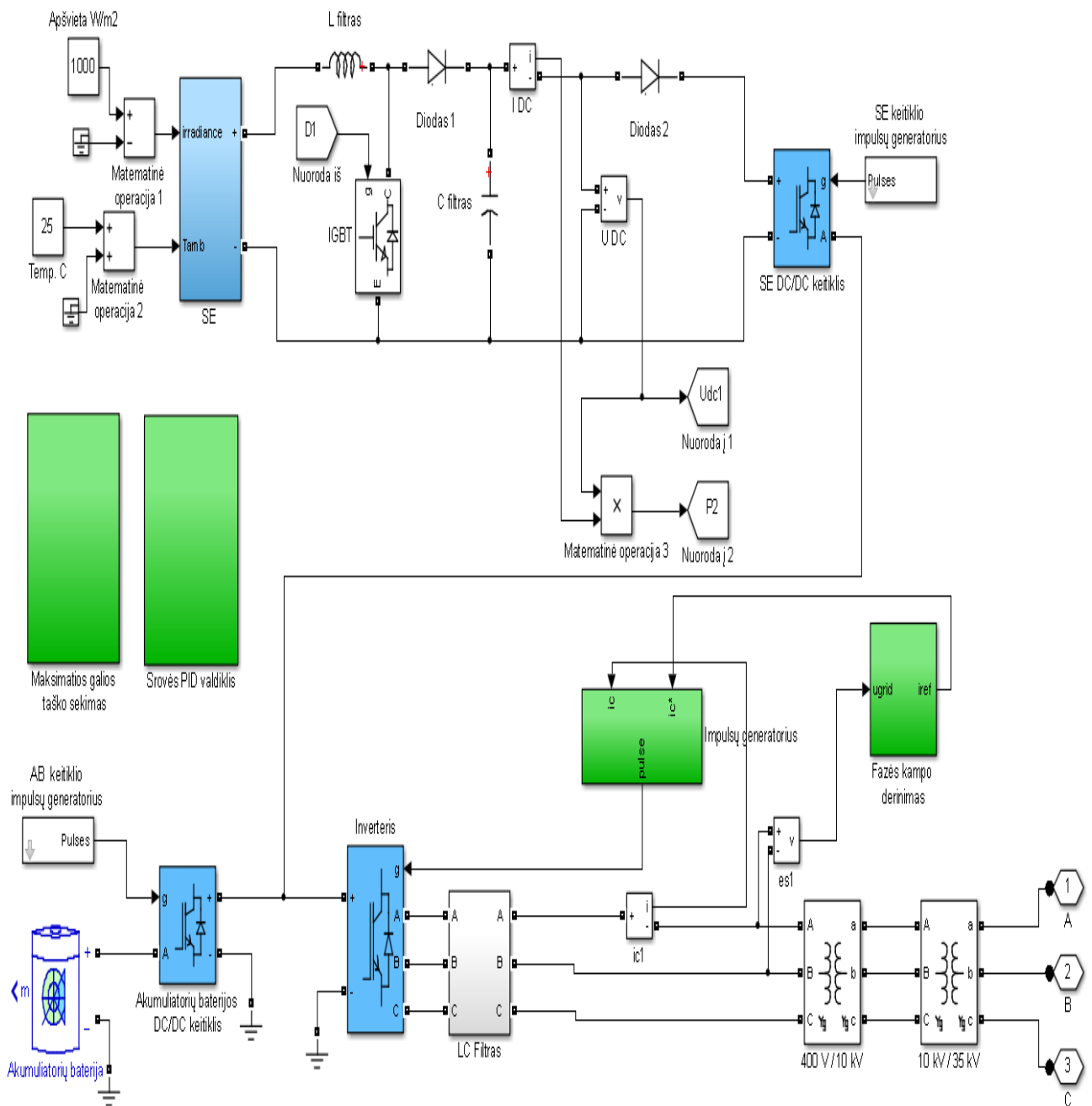
### 11.3 Priedas 3. Vėjo elektrinės modelis



## 11.4 Priedas 4. Hidroelektrinės modelis



## 11.5 Priedas 5. Saulės elektrinės modelis



## 11.6 Priedas 6. Šiluminės elektrinės modelis

