



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Vytautas Remeikis

**PASKIRSTYTŲJŲ GENERATORIŲ SISTEMOS DARBO
REŽIMŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Dainius Slušnys

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**PASKIRSTYTŲJŲ GENERATORIŲ SISTEMOS DARBO
REŽIMŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos sistemos (621H63005)

Vadovas

Lekt. dr. Dainius Slušnys

2017-06-05

Recenzentas

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

Projektą atliko

Vytautas Remeikis

2017-06-05

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Vytautas Remeikis

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Paskirstytųjų generatorių sistemos darbo režimų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 5 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vytauto Remeikio** baigiamasis projektas tema „Paskirstytųjų generatorių sistemos darbo režimų tyrimas“ 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)

Remeikis, Vytautas. Paskirstytųjų generatorių sistemos darbo režimų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Dainius Slušnys; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *Paskirstytieji generatoriai, sinchroninis generatorius, saulės elektrinė, darbo režimai, trumpasis jungimas.*

Kaunas, 2017. 64 p.

SANTRAUKA

Magistro studijų baigiamojo darbo užduotis yra paskirstytųjų generatorių sistemos darbo režimų tyrimas.

Pasirenkami du paskirstytųjų generatorių tipai. Atsižvelgiant į jų galią pasirenkamos apkrovos ir apskaičiuojamos linijų varžos. Sudarius tinklo schema ji perkeliama į Matlab/simulink programą, kur bus modeliuojami darbo režimai.

Darbo režimų tyrimas atliekamas norint išsiaiškinti kokias sąlygas reikia užtikrinti norint paskirstytuosius generatorius integruoti į tinklą. Taip pat tiriama tinklo reakcija į įvairius trikdžius, kurie blogina perduodamos elektros energijos kokybę.

Remeikis, Vytautas. Research on Operation Processes of Power System of Distributed Generators. Master's of Science qualification degree / supervisor dr. Dainius Slušnys. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power system.

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

Key words: *Distributed Generators, synchronous generator, solar power station, Operation Processes, Short circuit.*

Kaunas, 2017. 64 p.

SUMMARY

Final degree project task is research on operation processes of power system of distributed generators.

Selected for the two types of distributed generators. According generators active power selected load power and calculated resistance for lines. This power system simulated with Matlab/simulink program and research on operation processes.

This research is necessary to find a way how distributed generators integrate in power system. As well as research on operation processes with various fault and find out who reduce the quality of transmitted power.

TURINYS

IVADAS.....	8
1. TEORINĖ DALIS	9
1.1. PASKIRSTYTASIS GENERAVIMAS.....	9
1.2. SAULĖS ENERGIJA.....	11
1.2.1. Saulės spinduliuotė	11
1.2.2. Saulės spinduliuotę apibūdinantys parametrai	12
1.2.3. Fotolektrinės elementas, jo veikimo principas.....	12
1.3. SAULĖS ELEKTRINĖS.....	14
1.3.1. Saulės energijos privalumai ir trūkimai	14
1.3.2. Autonominės saulės elektrinės sandara.....	15
1.3.3. Integruotosios saulės elektrinės	17
1.3.4. Saulės elektrinės apsaugos	19
1.3.5. Voltamperinės charakteristikos.....	20
1.4. BLOKURO ELEKTRINĖ.....	21
1.4.2. Sinchroninio generatoriaus sandara ir veikimo principas	23
1.4.3. Fizinė interpretacija d _q transformacijos.....	25
1.4.5. Sinchroninio generatoriaus perdavimo funkcija	30
1.4.4. Rotoriaus kampo stabilumas	31
1.5 DARBO REŽIMAI.....	32
2. PRAKTINĖ DALIS	35
2.1. ELEKTROS TINKLO SUDARYMAS	35
2.2. KABELIŲ PARINKIMAS	36
2.3. Transformatorių parinkimas	39
2.4. PASKIRSTYTŲJŲ GENERATORIŲ SISTEMOS SUDARYMAS	41
2.4.1. Saulės elektrinės modelis	42
2.4.2. Biokuro elektrinės modelis	44

3. EKSPERIMENTAS	46
3.1. NUSISTOVĖJĘS NORMALUS DARBO REŽIMAS.....	46
3.2. AVARINIAI DARBO REŽIMAI.....	50
3.2.1. Apkrovų atsijungimas ir prisijungimas	50
3.2.2. Generacijos atsijungimas	55
3.2.3. 3-fazis trumpasis režimas.....	56
IŠVADOS.....	63
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	64

ĮVADAS

Šiuo metu elektros energijai gaminti ir jai perduoti elektros energijos vartotojams reikalingos naujos technologijos. Kintanti energetikos ekonominė ir reguliavimo aplinka lėmė paskirstytosios elektros energijos gamybos suaktyvėjimą. Paskirstytoji energija vis labiau populiarėja įvairių pasaulio šalių elektros energetikos sektoriuje.

Paskirstytojo generavimo šaltiniai yra pasiskirstę po visą elektros sistemą. Vieni jų naudoja atsinaujinančiosios energijos išteklius, o kiti neatsinaujinančius. Tačiau, dėl globalinio gamtos atšilimo pasaulio visuomenė yra skatinama naudoti atsinaujinančiųjų energijos šaltinius ir kitus, aplinkos neteršiančius, energijos generavimo būdus. Kol kas atsinaujinančiosios energijos šaltiniai gali pakeisti tik nedidelę tradicinės energetikos dalį, todėl skatinti jų plėtrą yra svarbu.

Norint paskirstytuosius generatorius tinkamai integruoti į bendrą tinklą, šių šaltinių elektros energija turi atitikti elektros tinklo keliamus kokybės reikalavimus.

Šio darbo tikslas yra paskirstytųjų generatorių sistemos darbo režimų tyrimas.

Išsikelti uždaviniai:

- pasirinkus paskirstytojo generavimo šaltinius, išsiaiškinti jų struktūrą, valdymo sistemas;
- sudaryti paskirstytųjų generatorių sistemą;
- „MATLAB simulink“ aplinkoje sumodeliuoti pasirinktąją sistemą;
- atlikti darbo režimų analizę.

1. TEORINĖ DALIS

1.1. PASKIRSTYTASIS GENERAVIMAS

Paskirstytasis elektros energijos generavimas yra elektros energijos generavimas, kai prie tradicinio skirstomojo tinklo yra prijungti mažo galingumo elektros generavimo šaltiniai. Paskirstytojo generavimo šaltiniai yra pasiskirstę po visą elektros sistemą. Dažniausiai tai yra atsinaujinančių energijos šaltinių generuojama elektros energija, tokių kaip mažos hidro-, vėjo, saulės ir kogeneracines jėgaines. Paskirstyto elektros energijos generavimas dar vadinamas įterptuoju generavimu arba decentralizuotu.

Paskirstytieji generatoriai prijungti prie skirstomojo tinklo netoliau negu per vieną įtampos pakopą nuo apkrovos, dirba normaliomis darbo sąlygomis, jei yra galimybė prisijungti prie sistemos galia yra nedaugiau kaip dvigubai didesnė už apkrovų, jei nėra galimybės prisijungti prie sistemos galia nedidesnė už apkrovų ir dalinai arba visiškai padengia apkrovas.

Paskirstytas elektros energijos generavimas vis labiau reikalauja aktyvių skirstomųjų tinklų, kurie leidžia elektros srovei tekėti dviem kryptimis – arba elektros vartotojams, arba į tinklą kai vartotojas eksportuoja perteklinį kiekį sugeneruotos elektros energijos. Tačiau, paskirstyto elektros energijos diegimo pagrindinė problema yra ta jog skirstomuosius generatorius yra sudėtinga sumontuoti ir visa įranga yra brangi.

Paskirstytųjų generatorių rūšys:

Paskirstytųjų generatorių rūšių yra įvairių. Jie yra su įvairiomis darbo ir pirminio energijos nešiklio savybėmis.

Pagrindiniai paskirstytųjų generatorių technologiniai tipai:

Saulės elektrinės – jos yra statomos ten, kur tikėtinas didžiausias saulės energijos kiekis, taip pat turi būti pakankamai nemažai ploto saulės panelėms pastatyti ir turi nekristi šešėlis nuo kitų pastatų ar augalų.

Vėjo elektrinės – tokio tipo šaltiniai siekia iki keleto megavatų. Vėjo elektrinei yra reikia parinkti tokią vietą, kurioje būtų geriausios vėjo charakteristikos. Vėjo generatoriuose gali būti naudojami ir sinchroniniai, ir asinchroniniai generatoriai. Prie skirstomojo tinklo gali būti prijungti dviem būdais – tiesioginis prijungimas ir prijungimas per lyginimo – invertavimo įtaisus.

Mažos galios hidroelektrinės – gali būti įrengtos visur, kur yra susikaupę vandens resursai. Mažosios hidroelektrinės dažniausiai neturi vandens baseinų, todėl dauguma jų dirba tik tada, kai yra vandens.

Mažos galios termofikacinės elektrinės – jose kaip kuras gali būti naudojamas mineralinis kuras, biokuras arba komunalinės atliekos.

Dujų turbinos – jų panaudojimas laikiniais elektros energijos šaltiniais yra apribotas, nes jie skleidžia didelį triukšmą ir gali būti statomi tik ten, kur yra pakankamai gera apsauga nuo triukšmo. Dujų turbina yra pakankamai lengvai valdoma, todėl nesunkiai gali būti panaudota elektros tinklo darbinių parametrų palaikymui.

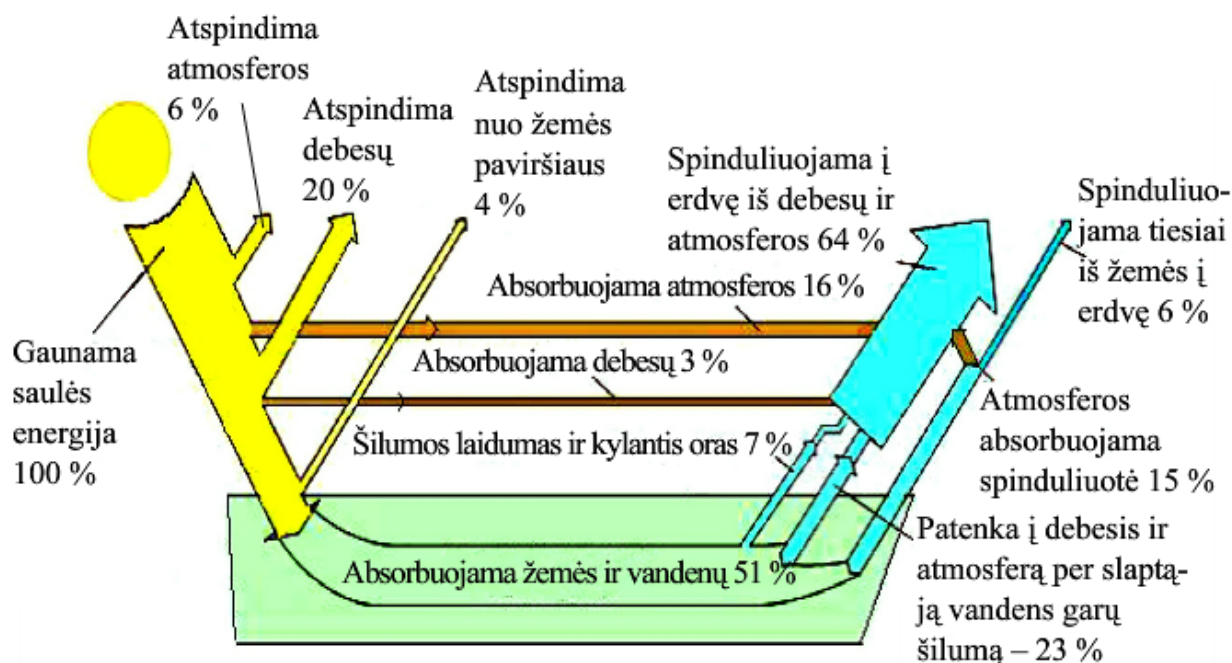
Kuro elementai – yra elektrocheminiai įrenginiai, kurie reakcijos cheminę energiją tiesiogiai paverčia į elektros energiją. Kuro elementų generatorius yra pakankamai stabilus šaltinis, tačiau jo dinaminiai procesai yra palyginti lėti todėl šis šaltinis netinkamas elektros energijos parametrų palaikymui.

Vidaus degimo variklių generatoriai – kaip kurą jie gali naudoti benzina, dyzeliną, gamtines dujas, biodyzeliną ir biodujas. Šie generatoriai gali būti tiek pastoviu, tiek ir laikinu energijos šaltiniu. Jie yra lengvai valdomi ir stabilūs.

1.2. SAULĖS ENERGIJA

Saulė yra žvaigždė nutolusi nuo žemės apie 150 milijono km. Žinant, kad šviesos greitis yra 300000 km/s tai šviesa pasiekia žemę per 8 min. 19 s. Saulės paviršiaus temperatūra yra 5700 K. ir ji yra vienintelis išorinės energijos šaltinis Žemei. Tik labai maža saulės energijos dalis pasiekia žemės paviršių ir dar 1/3 tos energijos dalis atspindi nuo mūsų planetos ir grįžta atgal į kosmosą. Saulės energijos dalis, kuria gauna Žemė 10000 kartų viršija žmonių energijos poreikius.

Ne visa Saulės išspinduliuota energija pasiekia Žemės paviršių. Dalis atspindi nuo atmosferos, dalį sugeria atmosfera, žemė ir vandenys. Iš saulės gautos spindulinės energijos pasiskirstymas pavaizduotas 1.2.1 paveiksle.



1.2.1 pav. Iš saulės gautos spindulinės energijos pasiskirstymas žemėje [1]

1.2.1. Saulės spinduliuotė

Saulės optinis energijos reiškiny – vadinamas saulės spinduliuote arba Saulės skleidžiama elektromagnetine spinduliuote.

Saulės spinduliuotė skiriama į tris tipus:

- tiesioginę spinduliuotę – ją sudaro tiesioginiai saulės spinduliai;
- skleidžiamąją spinduliuotę – ją sukelia nuo atmosferos debesų, pastatų, žemės paviršiaus ir kitų objektų atspindėję spinduliai;

- visuotinę spinduliuotę – sudaro tiesioginės ir skleidžiamosios spinduliuotė suma.

1.2.2. Saulės spinduliuotę apibūdinantys parametrai

Apšviestumas – parametras apibūdinantis regėjimo sąlygas, matuojamas liuksais [Lx].

Apšvieta – įvertina šviesos spindulių akimirkinė galia krentanti į plokštumos ploto vienetą [W/m²]

Saulės ekspozicija – energijos kiekis gaunamas per tam tikrą laiką iš saulės spindulių esant kintamai saulės apšvitai [kWh/m² arba J/m²]

1.2.3. Fotoelektrinės elementas, jo veikimo principas

Fotoelektros elementu vadinamas puslaidininkinis įtaisas skirtas šviesos energijai paversti į elektros energiją. Jame naudojamas fotoelektrinis efektas. Šį reiškinį dar 1839 metais atrado prancūzų mokslininkas Edmondas Bekerelas. Tačiau reiškinys paaiškintas buvo tik 1905 metais Alberto Einšteino. 1954 metais sukurtas puslaidininkinis silicio SE, kurio naudingumo koeficientas buvo 4 %

Fotoelektros efekto puslaidininkiuose paaiškinamas :

Į fotoelektrinį elementą pateka fotonas, kurio energija E apskaičiuojama taip:

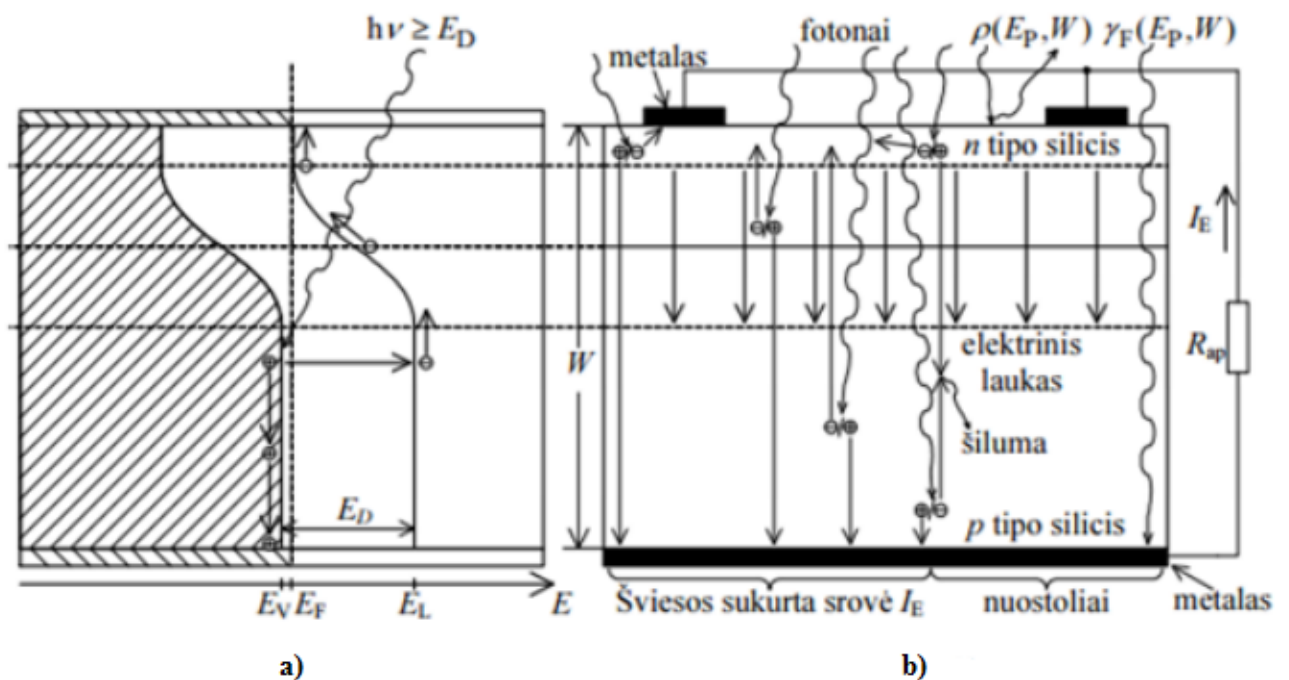
$$E = h\nu \geq E_D \quad (1.2.3.1)$$

čia: $h = 4,135 \cdot 10^{-15}$ eVs – Planko konstanta,

ν – fotono dažnis, Hz;

E_D – puslaidininkio draustinės energijos juostos plotis, nm.

Toks fotonas, patekęs į saulės elementą, abiejuose p-n sandūros pusėse gali perkelti elektroną iš valentinės į laidumo juostą (1.2.3.1 pav. a)). Taip susidaro laisvų krūvininkų – elektronų ir skylių poros. Dėl p-n sandūros elektrinio lauko laisvų krūvininkų poros išskiriamos ir elektronai pernešami į n tipo, o skylės į p tipo sritį (1.2.3.1 pav. b)). Pertekliniai elektronai n tipo Si, veikiami susidariusio elektrinio lauko, per metalinį elektrodą juda išorine grandine per apkrovą R_{ap} iki metalinio p-Si kontakto.



1.2.3.1 pav. Fotoelektros efektas kristalinio silicio puslaidininkyje

Visus fotoelektros elementus apibūdina keli pagrindiniai parametrai:

- naudingumo faktorius η , kuris apskaičiuojamas kaip fotoelektros elemento pagamintos elektros energijos ir jam tenkančios saulės spindulinės energijos santykis;
- fotoelektros elemento tuščiosios veikos įtampa U_0 ;
- fotoelektros elemento trumpojo jungimo srovė I_K ;
- fotoelektros elemento užpildymo faktorius FF.

Saulės elementų rūšys:

Monokristaliniai saulės elementai. Gaminant monokristalinius saulės elementus naudojamas visiškai grynas silicis. Jų efektyvumas siekia $\sim 24\%$ (iš vieno kW krintančios saulės šviesos pagamina 240 W elektros energijos)

Polikristaliniai saulės elementai. Gaminant polikristalinius saulės elementus gamybos procese pakinta dalies silicio kristalų struktūra. Jų mažesnis efektyvumo lygis $\sim 18\%$.

Fotovoltiniai saulės elementai. Fotovoltiniai moduliai EA G-60, gaminami pagal plėvelinę technologiją. Šios rūšies moduliai, nežiūrint gero kainos ir kokybės santykio, puikiai generuoja elektros energiją net esant aukštoms temperatūroms.

Amorfiniai saulės elementai. Amorfiniai arba plonų celių elementai gaminami siliciu padengiant stiklą ar kitą skaidrų paviršių. Jų gamybos procesas yra pats pigiausias, efektyvumo lygis ~ 13%. Naudojami tik mažos galios įrenginiuose (laikrodžiuose, kišeniniuose kalkuliatoriuose).

1.3. SAULĖS ELEKTRINĖS

Saulės elektrinės arba fotoelektros modulynas (PV) – tai sparčiausiai pasaulyje auganti energijos technologija. Jis gali būti naudojama įvairiai, nuo vieno buto saulės elektrinių iki ištisas bendruomenes aprūpinančias elektros energija elektrinių. Saulės elektrinė gali būti integruotas į esamus elektros tinklus santykinai paprastai, o tai reiškia, kad nedideliems saulės energijos vartotojai gali toliau gauti galią iš tinklo, kai saulės elektrinė neužtikrina esamo poreikio arba parduoti į tinklą pelningai, kai jų elektros energijos gamyba viršija poreikį, kurią jie naudoja. Įrangos kainos kritimas kartu su įvairių skatinimo schemas visame pasaulyje padarė PV pelningu.

1.3.1. Saulės energijos privalumai ir trūkumai

Privalumai

- saulės baterijų generuojama energija yra nemokama. Saulės šiluma nieko nekainuoja ir tai gausiai atsinaujinanti energija.
- energetinė nepriklausomybė. Saulės baterijų įrengimas namuose ar kituose objektuose leidžia atsiriboti nuo bendrųjų elektros tinklų.
- ekologiškumas. Saulės baterijos – tai ekologiški, atsinaujinančios elektros energijos generavimo įrenginiai, tai reiškia ji negamina dujų, galinčių sukelti šiltnamio efektą.
- tylus veikimas. Tai begarsė technologija, joje nėra judančių energijos generavimo įrenginių
- ilgaamžiškumas. Saulės baterija – itin ilgaamžis saulės energijos generavimo prietaisas.
- įvairios panaudojimo galimybės. Šviesos energiją generuojančius saulės elementus galima įrengti visuose objektuose, kuriuose naudojama elektros energija. Labiausiai prieinama alternatyva tiekiant elektrą atokiose kaimo vietovėse, kuriose energijos paklausa yra didelė ir kur yra daug vietos saulės kolektoriams montuoti.
- priežiūros paprastumas. Šis energijos gaminimas reikalauja mažai priežiūros

Trūkumai

- brangi technologija. Pradinės šios technologijos sąnaudos yra aukštos. Dauguma projektų yra kompensuojami vyriausybės
- gamybos ir vartojimo piko neatitikimas. Saulės energija yra prieinama tik dienos metu. Dauguma apkrovos profilių rodo maksimalią apkrovą nakties metu. Tai reikalauja brangių įrenginių, tokių kaip baterijos.
- užima daug vietos. Kadangi efektyvumo lygis yra žemas. Dabartinėmis sąlygomis reikia 6 – 9 arų žemės pastatyti 1MW saulės fotoelektrinę.
- nepastovus šaltinis. Saulės energija yra labai priklausoma nuo atmosferos sąlygų.

1.3.2. Autonominės saulės elektrinės sandara

Autonominės saulės elektrinės energiją tiekia tiesiogiai elektros vartotojui, o jeigu elektros energijos poreikio nėra, ji tiekiami į kaupiklį (akumuliatorių baterija). Autonominė sistema sudaro galimybę elektros gamybą perkelti į toli nutolusias vietas, kur nėra centralizuoto elektros skirstymo tinklo.

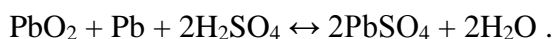
Pagrindinės autonominės sistemos dalys yra tokios:

- fotoelektros moduliai (PV moduliai);
- akumuliatorių baterija;
- įkrovos reguliatorius;
- inverteris.

Akumuliatorių baterija

Akumuliatoriuje energija kaupiama tam, kad ją būtų galima naudoti, kai ji reikalinga vartotojui, taip pat kai saulė nešviečia arba labai mažai šviečia. Akumuliatoriuose elektros energija kečiama į cheminę energiją.

Saulės elektrinėse dažniausiai naudojami rūgštiniai akumuliatoriai. Ant anodo ir katodo vyksta tokia cheminė reakcija:



(1.3.2.1)

Pagrindinis akumulatoriaus parametras yra talpa Q matuojama Ah. Tai visiškai įkrautos baterijos elektros krūvis, kurį ji gali atiduoti per iškrovimo laikotarpį. Talpa galima apskaičiuoti taip:

$$Q_i = I_i \cdot t_i . \quad (1.3.2.2)$$

Čia:

I_i – įkrovimo srovė;

t_i – įkrovimo trukmė.

Taip pat skaičiuojama ir iškrovimo talpa.

Didžiausią leistiną akumulatoriaus įkrovimo srovę skaičiuojama taip:

$$I_i = Q_N / 10 . \quad (1.3.2.3)$$

Čia : Q_N – Akumulatoriaus nurodytoji talpa. Dažniausiai pateikiama techniniame pase.

Naudingumo faktorius nurodo akumulatoriaus kokybę, apskaičiuojamas taip:

$$\eta_{ak} = \frac{Q_{i5}}{Q_i} = \frac{I_{i5} + t_{i5}}{I_i + t_i} \cdot 100 \% . \quad (1.3.2.4)$$

Kadangi akumuliatorių negalima visiškai iškrauti, skaičiuojama darbinė baterijos talpa:

$$Q_D = Q_N \cdot k_i . \quad (1.3.2.5)$$

Čia: k_i – leistinasis akumulatoriaus iškrovos gylio faktorius (0,2 – 0,8).

Akumuliatorių talpa pagal saulės elektrinę parenkama taikant dvi sąlygas:

$$Q_N \geq N_b \cdot \frac{Q_1}{k_i} \quad (1.3.2.6)$$

ir

$$Q_N \leq I_K \cdot T . \quad (1.3.2.7)$$

Čia:

N_b – dienų skaičius kai nešviečia saulė;

Q_1 – per viena dieną sunaudotos elektros krūvis, Ah;

I_K – fotoelektros modulių trumpo jungimo srovė, A;

T – baterijos įsikrovimo trukmė, h.

Pridėjus baterijos į sistemą, ateina keletą trūkumų, kuriuos reikia pasverti:

- baterijos suvartoja energijos įkrovimo ir iškrovimo metu, taip mažina Efektyvumą. 10 procentų švino-rūgštinių baterijų;
- baterijos padidinti sistemos sudėtingumą. Taip pat padidėja montavimo išlaidos.
- dauguma pigesnių baterijų reikalauja priežiūros.
- elementai dažniausiai turi būti pakeisti anksčiau nei kitos sistemos dalys ir priveda prie didelių sistemos išlaidų.

Akumuliatorių įkrovikliai

Akumuliatorių įkrovikliai naudojami saulės elektrinėse turi atlikti šias funkcijas:

- apsaugoti akumuliatorių nuo trumpųjų jungimų;
- apsaugoti akumuliatorių nuo perkrovimo;
- apsaugoti nuo priešingo poliškumo prijungiant saulės elektrinę;
- neleisti nutekėti krūviui iš akumuliatoriaus į saulės elektrinę, dėl nakties metu

susidariusio priešingo potencialių skirtumo;

- rodyti akumuliatoriaus įtampą;
- rodyti akumuliatoriaus įkrovos lygį ir likusį krūvio kiekį;
- perspėti ir automatiškai atjungti, kai akumuliatorius artėja prie leistino išsikrovimo

ribos.

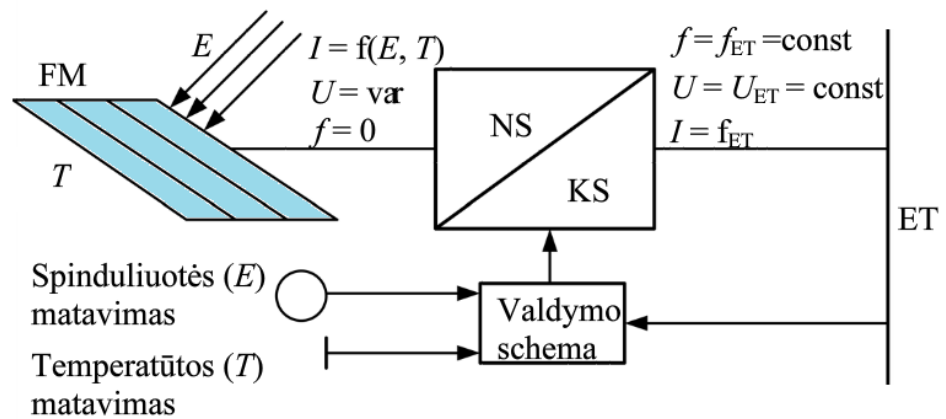
Autonominėse saulės elektrinėse yra naudojami 4 akumuliatorių įkrovimo reguliavimo būdai:

- savaiminis įkrovimo srovės suregulavimas;
- įkrovos valdymas lygiagrečiuoju reguliatoriumi;
- įkrovos valdymas nuosekliau puslaidininkiniu reguliatoriumi;
- įkrovos valdymas nuosekliau elektromechaniniu reguliatoriumi.

1.3.3. Integruotosios saulės elektrinės

Integruotosios saulės elektrinės energiją tiekia į elektros sistemos tinklą, kuris perduoda elektros energiją vartotojams. Tada, saulės elektrinė gali būti be energijos kaupiklio.

Norint saulės elektrinės pagamintą elektros energiją tiekti į tinklą turi būti naudojama tarpinė grandis, tai yra keitiklis (inverteris).



1.3.3.1 pav. Saulės elektrinės struktūrinė schema [1]

Inverteris, kai saulės elektrinė yra integruota į tinklą, atlieka tokias funkcijas:

- keičia nuolatinę srovę ir įtampą į tinkamo dažnio kintamąją srovę ir įtampą;
- inverterio išėjimo įtampos fazes suderina su bendro tinklo fazėmis;
- nuolat maksimizuoti modulių didžiausią galia, proporcinga akimirkinei apšvietai.

Taip pat norint, kad saulės elektrinė, susieta su bendru elektros tinklu, lygiagrečiai veiktų, elektrinė turi būti priderinta prie sistemos pagal pagrindinius parametrus:

- įtampos nuokrypis gali būti +/- 10% nuo nominalios vertė 95% laiko;
- dažnis turi būti $50 \pm 0,1$ Hz;
- bendras harmoninis iškreipymas negali viršyti 8%;
- fazių seka turi sutapti.

Prie bendro tinklo prijungtų elektrinių įtampą reikia derinti su visos šalies elektros sistemos įtampų eile (1.3.3.2 pav).



1.3.3.2 pav. Lietuvos elektros sistemos įtampų eilė

Elektrinės prijungimas prie vienokios ar kitokios įtampos lygmens priklauso nuo elektrinės galios (1.3.3.1 lentelė).

1.3.3.1 lentelė. Rekomenduojamos elektros tinklo įtampos ir elektrinių galia

Tinklo įtampa, kV	Elektrinės galia, MW	Linijos ilgis, km
Iki 0,4	Iki 0,03	Iki 3
10	0,03 - 3	3 - 15
30	3 - 15	10 - 30

Parinkus reikiama įtampą, tikrinama, ar linijos tenkins apkrovos sąlygas pagal įtampos nuostolius, kurie negali viršyti 5 %.

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} \quad (1.3.3.1)$$

Čia:

n – linijų atkarpų skaičius;

P ir Q – linijos atkarpų apkrovos aktyvioji ir reaktyvioji galia;

R ir X – linijos aktyvioji ir induktyvioji varžos;

U – linijos įtampa.

1.3.4. Saulės elektrinės apsaugos

Saulės elektrinė turi būti įrengtos elektrinės apsaugos – nuolatinės įtampos saugikliai ir viršįtampių ribotuvai.

Kiekviena celė generuoja tam tikrą įtampą ir iki srovę. Kad pasiekti didesnę įtampą, celės jungiamos nuosekliai, o kad padidinti srovę – lygiagrečiai. Nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtos fotoelektrinės celės sudaro saulės modulių masyvą. Jungiant saulės modulius nuosekliai atsižvelgiant į elektrinės galią, yra gaunama iki 1000 V išėjimo įtampa. Įtampos vertė nėra pastovi ir gali kisti, kai saulės spinduliai neapšviečia saulės modulių.

Kiekvienas saulės modulis generuoja išėjimo srovę nuo 4 iki 9 A (priklauso nuo modulio tipo). Norint pasiekti didesnę srovę (o tuo pačiu ir sistemos galią), saulės moduliai yra jungiami lygiagrečiai. Tokiu būdu sujungti moduliai generuoja bendrą srovę.

Saulės modulių trumpo jungimo srovė yra 15 – 20 % didesnė už nominalią srovę. Todėl modulių instaliacijai reikia naudoti ne standartinius saugiklius arba automatinius jungiklius, kurių suveikimo srovė kelis kartus didesnė už nominalią srovę, o nuolatinės įtampos saugiklius.

Per modulius tekanti trumpo jungimo srovė gali sukelti net gaisrą.

Saulės elektrinių įranga turi pakankamai žemą atsparumą nuo viršįtampių ir smūginių srovių. Priklausomai nuo saulės modulių išdėstymo, jie turi būti apsaugoti nuo tiesioginių atmosferinių iškrovų, naudojant žaibolaidžius. Nuo viršįtampių saugo viršįtampių ribotuvai.

1.3.5. Voltamperinės charakteristikos

Saulės modulio voltamperinės charakteristikos priklauso nuo išorinių ir vidinių parametrų:

Išoriniai parametrai:

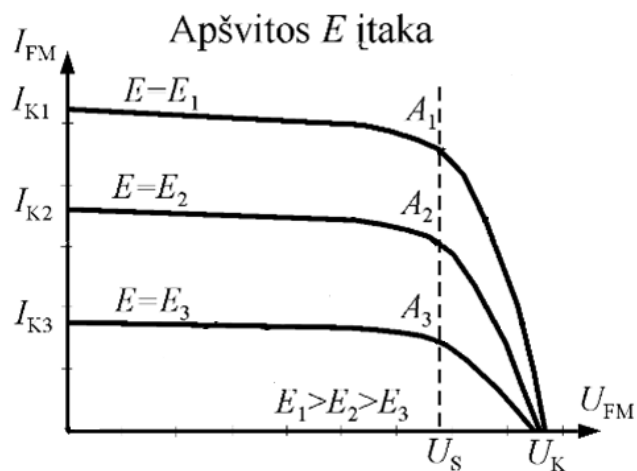
Apšvieta E ;

Temperatūra T .

Vidiniai parametrai:

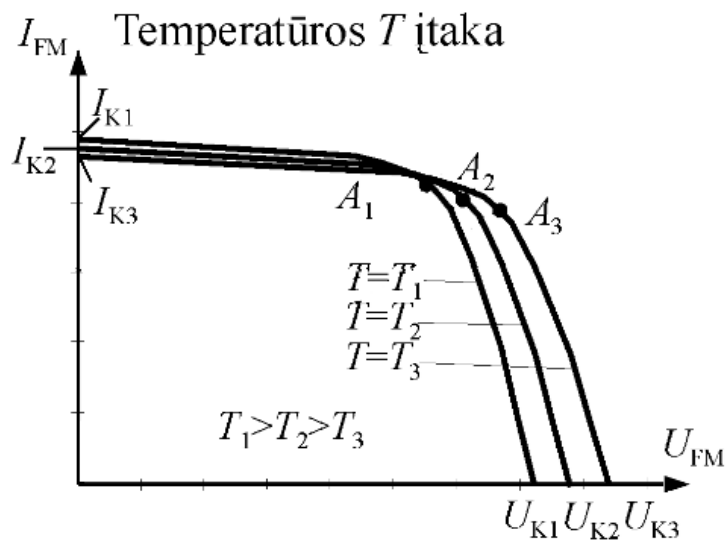
Lygiagrečioji varža R_{SH} ;

Nuoseklioji varža R_{SR} .



1.3.5.1 pav. Apšvitos įtaka voltamperinei charakteristikai [1]

Iš 1.3.5.1 pav. Matyti, kad saulės modulių išėjom srovė tiesiogiai proporcinga apšvietai. Kuo didesnė apšvieta tuo didesnę srovę galima išgauti iš fotomodulių.



1.3.5.1 pav. Temperatūros įtaka voltamperinei charakteristikai [1]

Aukščiau pateiktuose paveiksluose A reiškia didžiausios galios taškus.

1.4. BIOKURO ELEKTRINĖ

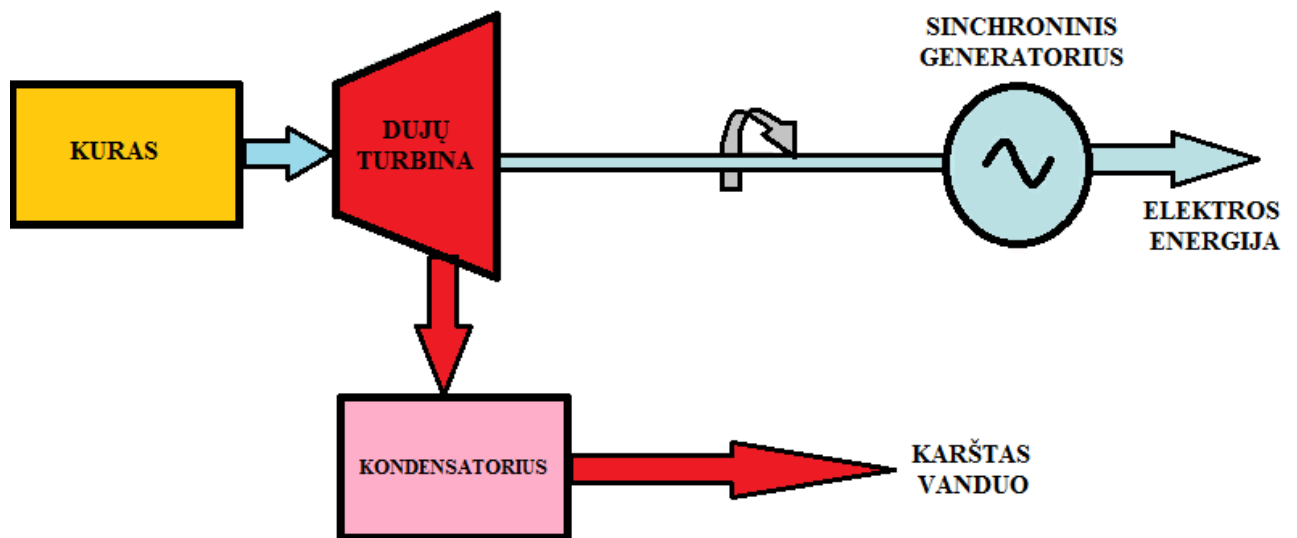
Biokuras yra vienas iš atsinaujinančių energijos šaltinių, tai degūs dujiniai, skystieji ir kietieji produktai, pagaminti iš biomasės ir jos atliekų. Biokuras yra ekologiškas energijos šaltinis. Šis kuras patrauklus tuo, kad turi didelius išteklius, paplitusius beveik visame Žemės paviršiuje.

Veikimo principas: biokuro elektrinė veikia kogeneracijos principu, kai tuo pačiu metu gaminama ir šilumos, ir elektros energija.

Kogeneracinėje elektrinėje deginamo biokuro šilumos energija panaudojama vandens garinimui. Susidaręs garas tiekiamas į garo turbiną, kuri suka elektros generatorių ir gamina elektros energiją. Vėliau šis garas iš turbinos patenka į kondensatorių, kuriame kondensuojasi ir šilumos energiją perduoda termofikaciniam vandeniui (4.1 pav.). Garas gražinamas atgal į katilą ir ciklas kartojamas. Papildoma šilumos energija gaminama dūmų kondensaciniame ekonomaizeryje ir taip pat perduodama termofikaciniam vandeniui.

Garų turbiną dažniausiai sudaryta iš dviejų ar daugiau cilindų, kurie varomi aukšto, vidutinio ar žemo slėgio garu. Priklausomai nuo cilindro jungimo būdo, jie skirstomi į dvi grupes:

- kai turbinos cilindrai jungiami ant vieno veleno, ant kurio taip pat, jungiamas ir generatorius. Turbina sukasi 3000 aps/min greičiu, jeigu $f = 50$ Hz arba 3600 aps/min, jeigu $f = 60$ Hz.
- kai turbina turi du velenus, kiekvienas velenas sujungtas su generatoriumi. Dažniausiai antras velenas sukasi du kartus lėčiau už pirmąjį.



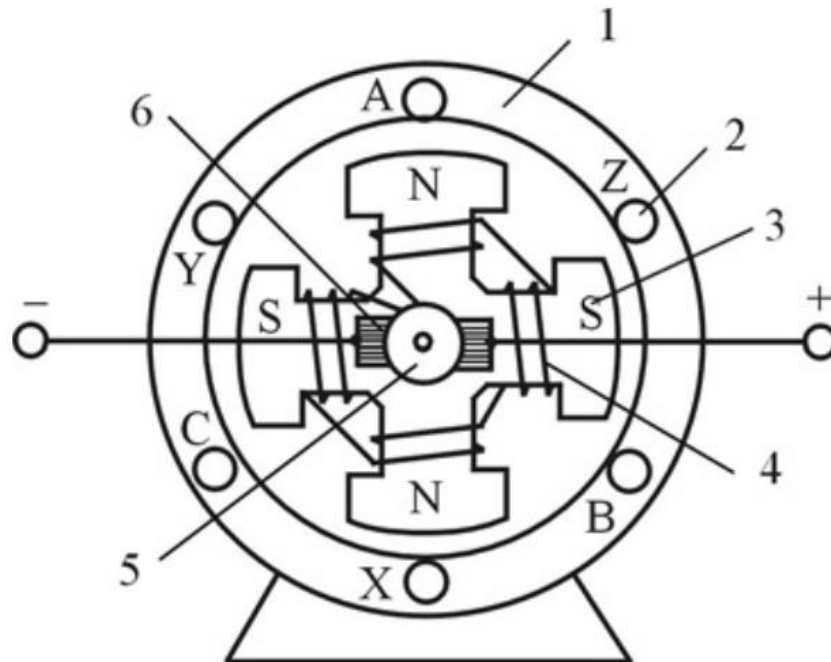
1.4.1 pav. Kogeneracinės elektrinės veikimo principas

Kogracinių jėginių privalumai

- Mažinama priklausomybė nuo importuojamo kuro ir elektros – vartotojas gauna energetinę nepriklausomybę nuo elektros energijos tiekimo surikimų ir šilumos tiekimo avarių, kurios vyksta šilumos tiekimo sistemose.
- mažesni elektros skirstymo kaštai – elektros energija suvartojama gamybos vietoje, be energijos tiekėjų papildomų išlaidų
- šilumos energija sunaudojama vietoje, tai kainuoja pigiau, negu statyti ilgas šilumines trasas.
- vietinio pigesnio kuro panaudojimas elektros gamybai, biokuro elektrinėje naudojamo kuro išteklių yra didžiuliai.
- mažesni teršalų išmetimai (ekologiškumas)

1.4.2. Sinchroninio generatoriaus sandara ir veikimo principas

Sinchroninis generatorius bus naudojamas modeliuojant biokuro elektrinę. Sinchroninis generatorius sudarytas iš dviejų pagrindinių dalių: statoriaus, kuris yra nejudama mašinos dalis ir besisukančio rotoriaus (1.4.1.1 pav.)



1.4.1.1 pav. Sinchroninis generatorius: 1 – statorius; 2 – statoriaus apvija; 3 – rotorius; 4 – žadinimo apvija; 5 – kontaktiniai žiedai; 6 – šepečiai. [2]

Statoriaus grioveluose yra trifazė apvija, kurios ritės erdvėje sudaro 120 laipsnių kampą.

Rotorius gali būti ryškiapolis arba neryškiapolis. Ryškiapolis rotorius naudojamos, kai rotoriaus sukimosi greitis nedidelis, o neryškiapolis rotorius naudojamas, kai rotorius sukasi dideliu greičiu. Abejais atvejais rotoriaus žadinimo apvija kontaktinių žiedų ir šepečių pagalba prijungiama prie nuolatinės srovės šaltinio. Nuolatinės srovės generatorius-žadintuvas, sumontuojamas ant to paties mašinos veleno.

Rotoriui sukantis pastoviu greičiu, jo apvijos sukuriama laukas kerta statoriaus apvijas ir indukuoja jose elektrovėras. Vienoje apvijoje indukuota elektrovėra:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \cdot k \quad (1.4.1.1)$$

Čia:

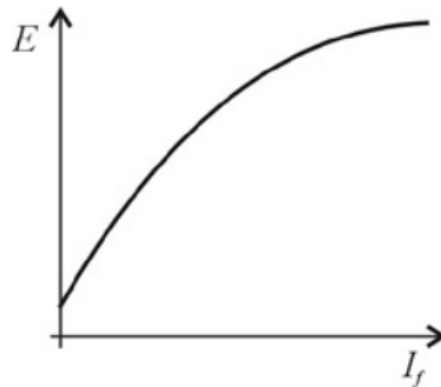
f – elektrovaros dažnis;

N – vijų skaičius apvijoje;

Φ – vieno poliaus magnetinis srautas, jis priklauso nuo žadinimo apvija tekančios srovės I_f didumo;

k – apvijos koeficientas.

Kai generatorius veikia dirba tuščiąja veikai, o apsisukimai pastovūs $n = \text{const.}$, elektrovara proporcinga magnetiniam srautui Φ , kuris priklauso nuo žadinimo apvija tekančios srovės I_f didumo. Elektrovaros priklausomybė nuo žadinimo srovės $E = f(I_f)$ vadinama generatoriaus tuščiosios veikos charakteristika (1.4.1.2 pav.).



1.4.1.2 pav. Generatoriaus tuščiosios veikos charakteristika [2]

Kai prie generatoriaus prijungiama apkrova, generatoriaus apvijose teka srovės. Tada apie statoriaus laidus susikuria savi magnetiniai laukai. Šie laukai kuria savas elektrovaras, kurios veikia generatoriaus įtampos didumą. Šis veikimas įvertinamas įtampos kritimu induktyviojoje varžoje, kuri vadinama sinchronine varža X_{sin} . Taigi generatoriaus apvijų įtampa bus mažesnė už elektrovarą:

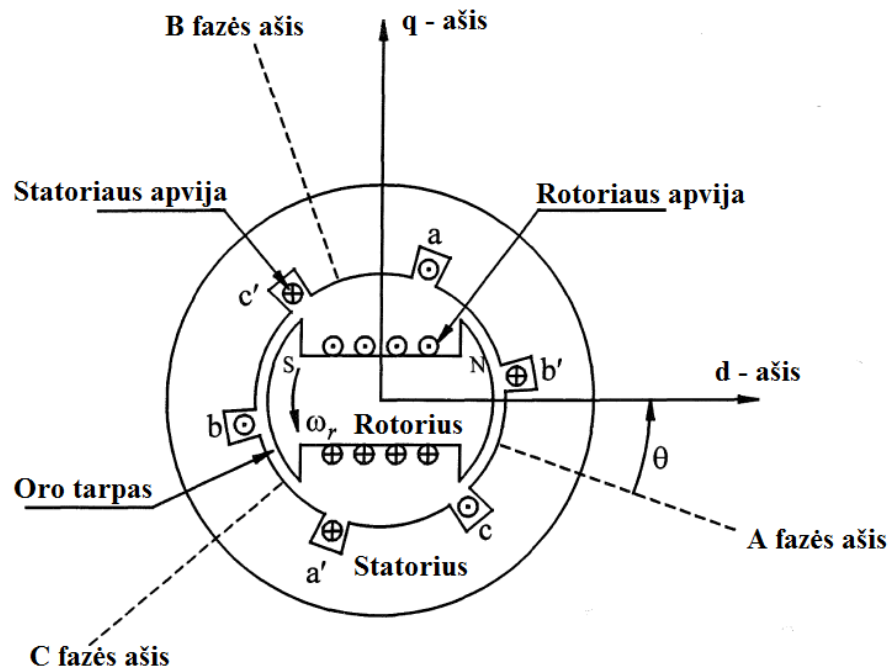
$$\underline{U} = \underline{E} - \underline{I} \cdot \underline{Z} . \quad (1.4.1.2)$$

Čia:

Z – statoriaus apvijų pilnutinė varža.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{sin}^2} . \quad (1.4.1.3)$$

1.4.1.3 paveiksle pavaizduotas schematinis trijų fazių sinchroninės mašinos skerspjuvis.



1.4.1.3 pav. Schematinė trijų fazių sinchroninės mašinos diagrama [3]

Mechaninis rotoriaus greitis priklauso nuo elektrinio dažnio ir magnetinio lauko polių skaičiaus:

$$V_{rot} = \frac{120 \cdot f}{n_f} . \quad (1.4.1.4)$$

Čia: v_{rot} – greitis aps/min;

f – dažnis, Hz.

n_f – magnetinio lauko polių skaičius.

Ryšys tarp elektrinio kampo θ ir mechaninio kampo θ_m :

$$\theta = \frac{n_f}{2} \cdot \theta_m . \quad (1.4.1.5)$$

1.4.3. Fizinė interpretacija dq transformacijos.

Sinchroniniame generatoriuje statorius modeliuojamas trijose magnetinėse ašyse a , b ir c , kurių kiekviena atstoja trijų fazių apvijas. O rotorius yra modeliuojamas dvejomis ašimis – išilgine (d ašimi), kuri yra induktoriaus magnetinė ašis ir skersine (q ašimi), kuri yra simetrijos ašis tarp dviejų polių.

Srovės trifazėje sistemoje užrašomos taip:

$$i_a = I_m \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \Phi) ; \quad (1.4.2.1)$$

$$i_b = I_m \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \Phi - \frac{2 \cdot \pi}{3}) ; \quad (1.4.2.2)$$

$$i_c = I_m \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \Phi + \frac{2 \cdot \pi}{3}) . \quad (1.4.2.3)$$

čia: ω_s – statoriaus srovių kampinis dažnis ($\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f$)

Φ – srautas.

Naudojant dq0 transformacija:

$$i_d = I_m \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \Phi - \theta) ; \quad (1.4.2.4)$$

$$i_q = I_m \cdot \cos(\omega_s \cdot t + \Phi - \theta) ; \quad (1.4.2.5)$$

$$i_0 = 0 . \quad (1.4.2.6)$$

Rotoriaus greitis ω_r yra lygus statoriaus srovių kampiniui dažniui:

$$\theta = \omega_r \cdot t = \omega_s \cdot t ; \quad (1.4.2.7)$$

Tai gauname kad:

$$i_d = I_m \cdot \sin \Phi = \text{const} ; \quad (1.4.2.8)$$

$$i_q = - I_m \cdot \cos \Phi = \text{const} . \quad (1.4.2.9)$$

Įtampos lygtys statoriui:

$$e_d = p \cdot \psi_d - \psi_q \cdot \omega_r - R_a \cdot i_d ; \quad (1.4.2.10)$$

$$e_q = p \cdot \psi_q + \psi_d \cdot \omega_r - R_a \cdot i_q ; \quad (1.4.2.11)$$

$$e_0 = p \cdot \psi_0 - R_a \cdot i_0 . \quad (1.4.2.12)$$

Įtampos lygtys rotoriumi:

$$e_{fd} = p \cdot \psi_{fd} + R_{fd} \cdot i_{fd} ; \quad (1.4.2.13)$$

$$0 = p \cdot \psi_{1d} + R_{1d} \cdot i_{1d} ; \quad (1.4.2.14)$$

$$0 = p \cdot \psi_{1q} + R_{1q} \cdot i_{1q} ; \quad (1.4.2.15)$$

$$0 = p \cdot \psi_{2q} + R_{2q} \cdot i_{2q} . \quad (1.4.2.16)$$

Statoriaus srautų lygtys:

$$\psi_d = -(L_{ad}+L_l)i_d + L_{ad}i_{fd} + L_{ad}i_{1d}; \quad (1.4.2.17)$$

$$\psi_q = -(L_{aq}+L_l)i_q + L_{aq}i_{1q} + L_{aq}i_{2q}; \quad (1.4.2.18)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0. \quad (1.4.2.19)$$

Rotoriaus srautų lygtys:

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{f1d}i_{1d} - L_{ad}i_d; \quad (1.4.2.20)$$

$$\psi_{1d} = L_{f1d}i_{fd} + L_{11d}i_{1d} - L_{ad}i_d; \quad (1.4.2.21)$$

$$\psi_{1q} = L_{11q}i_{1q} + L_{aq}i_{2q} - L_{aq}i_q; \quad (1.4.2.22)$$

$$\psi_{2q} = L_{aq}i_{1q} + L_{22q}i_{2q} - L_{aq}i_q. \quad (1.4.2.24)$$

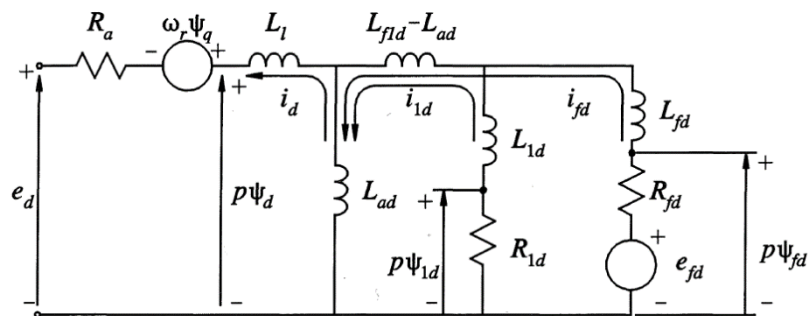
Elektromagnetinis momentas oro tarpe:

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d. \quad (1.4.2.25)$$

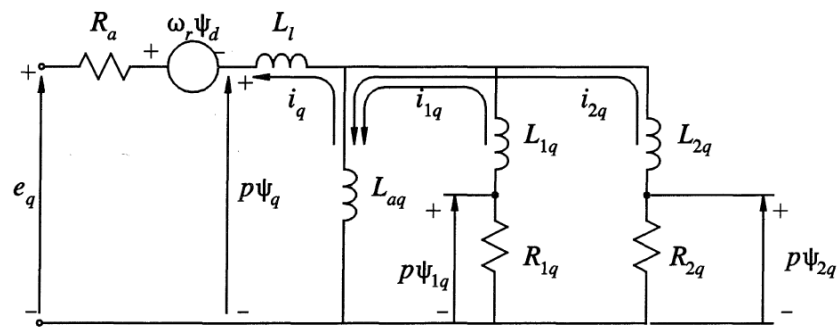
Reaktyvioji varža:

$$X_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_d \quad \Omega. \quad (1.4.2.26)$$

Ekvivalentinės schemos parodo užbaigtas charakteristikas įskaitant įtampos lygtis (1.4.2.1 ir 1.4.2.2 pav).

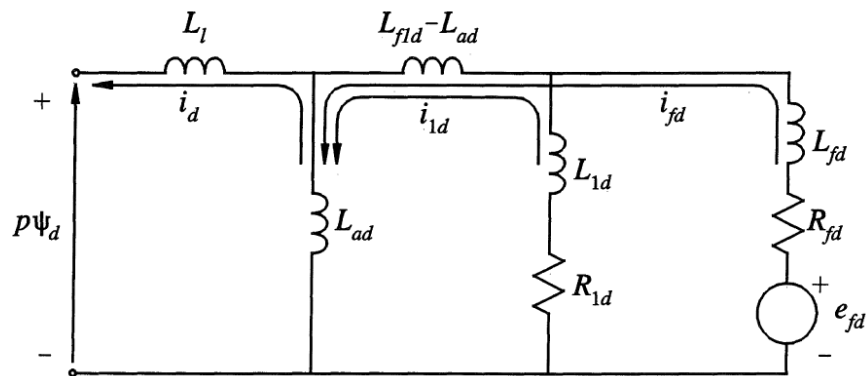


1.4.2.1 pav. d ašies ekvivalentinė schema [3]

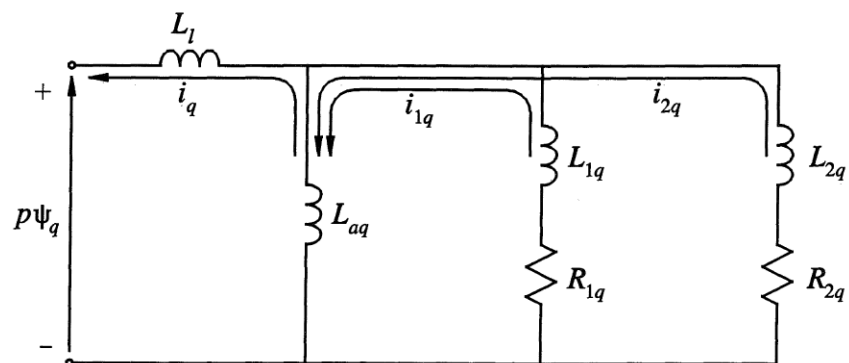


1.4.2.2 pav. q ašies ekvivalentinė schema [3]

Literatūroje yra priimta naudoti supaprastintas ekvivalentines schemas(1.4.2.3 ir 1.4.2.4pav.).



1.4.2.3 pav. d ašies supaprastinta ekvivalentinė schema [3]



1.4.2.4 pav. q ašies supaprastinta ekvivalentinė schema [3]

Šios schemas parodo ryšį tarp srautų ir įtampų lygčių. Taip pat parodo, kaip statoriaus srautai ψ_d , ψ_q susiję su srovėmis i_d , i_q .

Įtampos ir srovės dedamosios dq ašyse parodytos 1.4.2.5 pav. Formulėmis jas išreikšti galime taip:

Įtampos projekcija į dq ašis:

$$e_d = E_t \cdot \sin \delta_i ; \quad (1.4.2.27)$$

$$e_q = E_t \cdot \cos \delta_i . \quad (1.4.2.28)$$

Srovės projekcija į dq ašis:

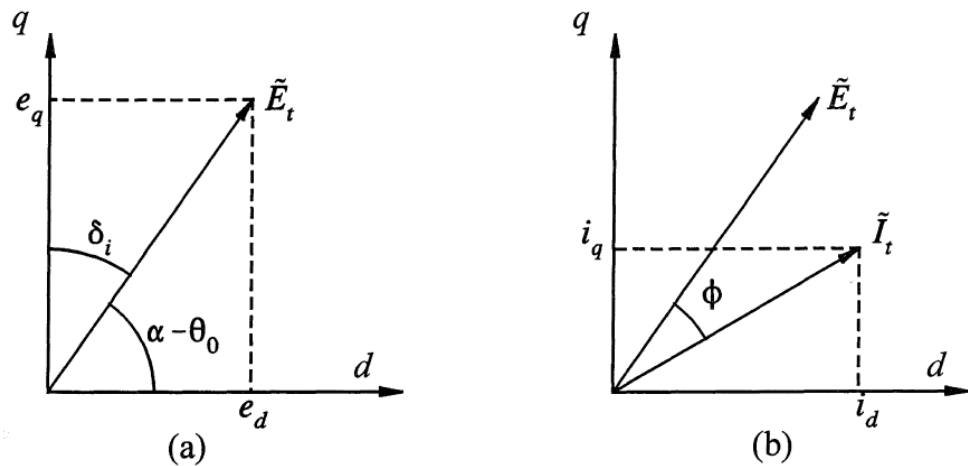
$$i_d = I_t \cdot \sin(\delta_i + \Phi) ; \quad (1.4.2.30)$$

$$i_q = I_t \cdot \cos(\delta_i + \Phi) . \quad (1.4.2.31)$$

Srovė ir įtampa ant statoriaus gnybtų gali būti išreiškiama kompleksine forma:

$$\tilde{E}_t = e_d + j e_q ; \quad (1.4.2.32)$$

$$\tilde{I}_t = i_d + j i_q . \quad (1.4.2.33)$$



1.4.2.5 pav. Įtampos (a) ir srovės (b) dedamosios dq ašyse [3]

1.4.5. Sinchroninio generatoriaus perdavimo funkcija

Sinchroninio generatoriaus perdavimo funkciją galima nustatyti iš judesio lygties, kuri yra tokia:

$$T_J \frac{d}{dt}(\omega_r) = P_t - P_e - K_D \omega_r, \quad (1.4.3.1)$$

Čia:

P_t – mechaninė pirminio variklio galia.

P_e – elektrinė galia.

K_D – Slopinimo koeficientas;

ω_s – Sinchroninio generatoriaus rotoriaus greitis;

T_J – Inercijos momentas.

Perdavimo funkcija nustatoma taip:

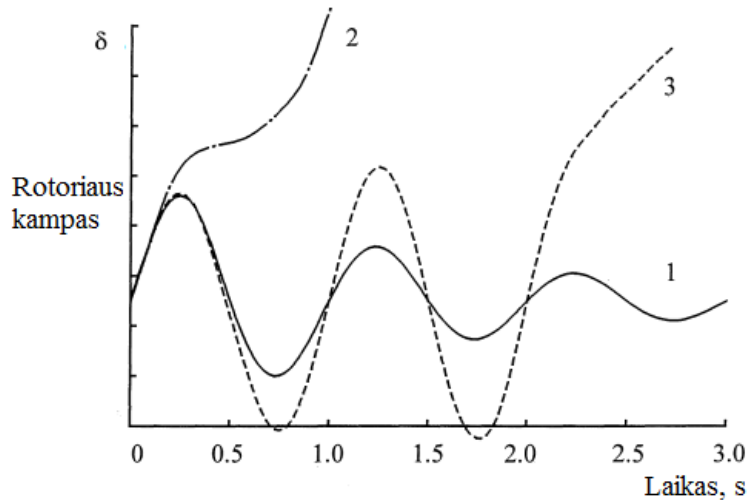
$$T_J p \omega_r = P_t(p) - P_e(p) - K_D \omega_r; \quad (1.4.3.2)$$

$$\frac{\omega_r}{P_t(p) - P_e(p)} = \frac{1}{K_D + pT_J}. \quad (1.4.3.3)$$

Bet kokios rūšies elektros modeliavimas prasideda nuo realių modelių matavimų, nes būtina nustatyti esminius parametrus. Kita galimybė yra gauti gamintojo parametrus. Po to generatoriaus modelis gali būti sudarytas naudojantis matematinės lygtis, kurie apibūdina generatorių.

1.4.4. Rotoriaus kampo stabilumas

Rotoriaus kampo stabilumas susijęs su sinchroninės mašinos sinchroniniu režimu. Stabilumas priklauso nuo trikdžių sunkumo. 1.4.4.1 paveiksle pavaizduota sinchroninės mašinos stabilus ir nestabilus režimai. Pateikti rotoriaus kampo reakcija į du nestabilius režimus ir vieną stabilų.



1.4.4.1 pav. Rotoriaus kampo reakcija į laikinus sutrikimus [3]

Stabilus režimas yra 1, rotoriaus kampas didėja iki maksimumo, tada mažėja ir svyruoja mažėjančia amplitude, kol pasiekia nusistovėjusį režimą.

Antru atveju rotoriaus kampas didėja stabiliai iki tol, kol praranda stabilumą. Šitos nestabilios kreivės priežastis yra nepakankamas sinchronizavimo sukimo momentas.

Trečiu atveju sistema stabili pirma periodą, paskui pereina į nestabilumą. Toks kreivės svyravimas dažniausiai atsiranda po laikino sutrikimo.

Praktinėje dalyje pasirinktos sinchroninio generatoriaus modelio leistinas trikdys bus stebimas pagal rotoriaus kampo nuokrypį $\Delta\delta$, korio vertė negalės viršyti 30° arba $0,52$ rad.

1.5 DARBO REŽIMAI

Darbo režimus galima sujungti į dvi pagrindines grupes, tai yra į normalius ir avarinius režimus. Normalus režimas susijęs su minimalia ir maksimalia apkrova, kuomet elektros sistema dar atitinka EN standartą.

Energijos srautai turi būti tiksliai kontroliuojami, kad būtų išvengta dažnio ir įtampos kontrolės problemų:

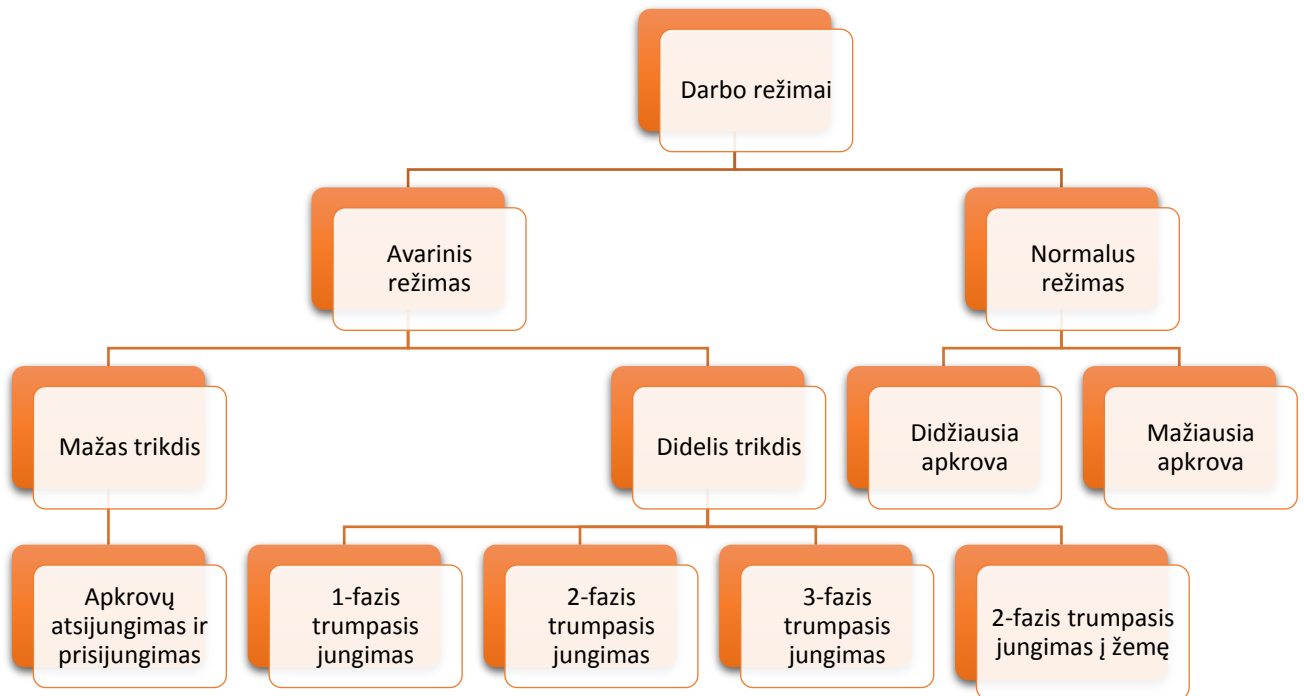
- **Įtampos kitimas** - vienas iš pagrindinių veiksnių tinkle yra įtampa. Kuri turi tendencija padidėti, tačiau esant papildomoms apkrovos rūšims (pavyzdžiui, elektrinių transporto priemonių ar šilumos siurblių) turėti priešingą poveikį. EN 50160 nustatyta, kad įtampos nuokrypis gali būti +/- 10% nuo nominalios vertė 95% laiko. Jungtinėje Karalystėje nominalus įtampos lygis yra 230 V.
- **Harmonikos** - geriausia, kad kintamos srovės elektros sistemoje srovės ir įtampos signalų bangos formos pristatytas į apkrovą būtų neiškraipytos sinusoidės formos ir su vienu pagrindiniu dažniu f . Tačiau realių energetinių sistemų abu signalai yra iškreipti. Harmonikų iškraipymas susijęs su tuo, kaip toli jis yra nuo idealios sinusoidės formos. Bendras harmoninis išsikraipymas turi būti 0%. Priešingai - kintamosios srovės ir įtampa yra kvadratinės, bangos turės 50% bendrus harmoninius iškraipymus. Bet kokia kintamos įtampos ar srovės bangos forma (deformuotas arba kitaip), gali būti suformuojama iš idealios sinusoidės dalies serijos, kurie yra pagrindinio dažnio sveikojo skaičiaus kartotiniai. Bendras harmoninis iškraipymas negali viršyti 8%.

Avarinis režimas toliau skirstomas į mažus ir didelius trikdžius. Mažas trikdys suprantamas kaip staigus apkrovų atsijungimas arba prisijungimas, tai lemia dažnio kitimą tinkle.

Dideli trikdžiai yra tokie [4]:

- ***vienfazis trumpasis jungimas*** – trumpasis jungimas tarp fazinio laido ir žemės tiesiogiai įžemintos neutralės tinkle.
- ***dvifazis trumpasis jungimas*** – trumpasis jungimas tarp dviejų fazių.
- ***trifazis trumpasis jungimas*** – trumpasis jungimas tarp trijų fazių.
- ***dvifazis trumpasis jungimas su žeme*** – trumpasis jungimas tarp dviejų fazinių laidų ir žemės tiesiogiai įžemintos neutralės tinkle.

Visi darbo režimai ir jų susiskirstymas parodytas 1.5.1 paveiksle.



1.5.1 pav. Darbo režimai

Avarinius darbo režimus sudarantys veiksniai:

- generavimo pajėgumų sumažėjimas;
- linijų atsijungimas, kurios eina į pastotes;
- ilgalaikis 3-fazis jungimas generatoriuose, perdavimo linijose, transformatoriuose ar kituose įrenginiuose su užvėlintu trumpo jungimo pašalinimo automatika;
- staigus didelės apkrovos atsijungimas;
- staigūs didelės galios svyravimai, kai atsijungia generavimo šaltiniai.

Norint, kad tinklas veiktų stabiliai ir be trikdžių reikia tinkamai parinkti elektros įrenginių apsaugas, kurios šaliną gedimus tinkamu laiko intervalu.

Avarinių režimų projektavimas:

- ilgalaikis trumpasis jungimas, vykstantis generatoriuje, transformatoriuje, perdavimo linijose arba šinose, turi būti šalinamas su pakartotiniu įjungimu arba elementas kuriame jis įvyko turi būti atjungiamas;
- ilgalaikis 2-fazis trumpasis jungimas su žeme vykstantis perdavimo linijose turi būti pašalintas per atitinkamą laiką;

- trumpas jungimas tarp fazės ir žemės, vykstantis perdavimo linijose, prie transformatorių ar šinių sekcijose, turi būti su užvėlintu išjungimu, kad gedimo signalą gautų jungtuvas;
- turi būti pašalinamas bet kuris įrenginys su gedimu;
- trumpas jungimas tarp fazės ir žemės, vykstantis jungtuve, turi būti šalinamas per tinkamą laiką.

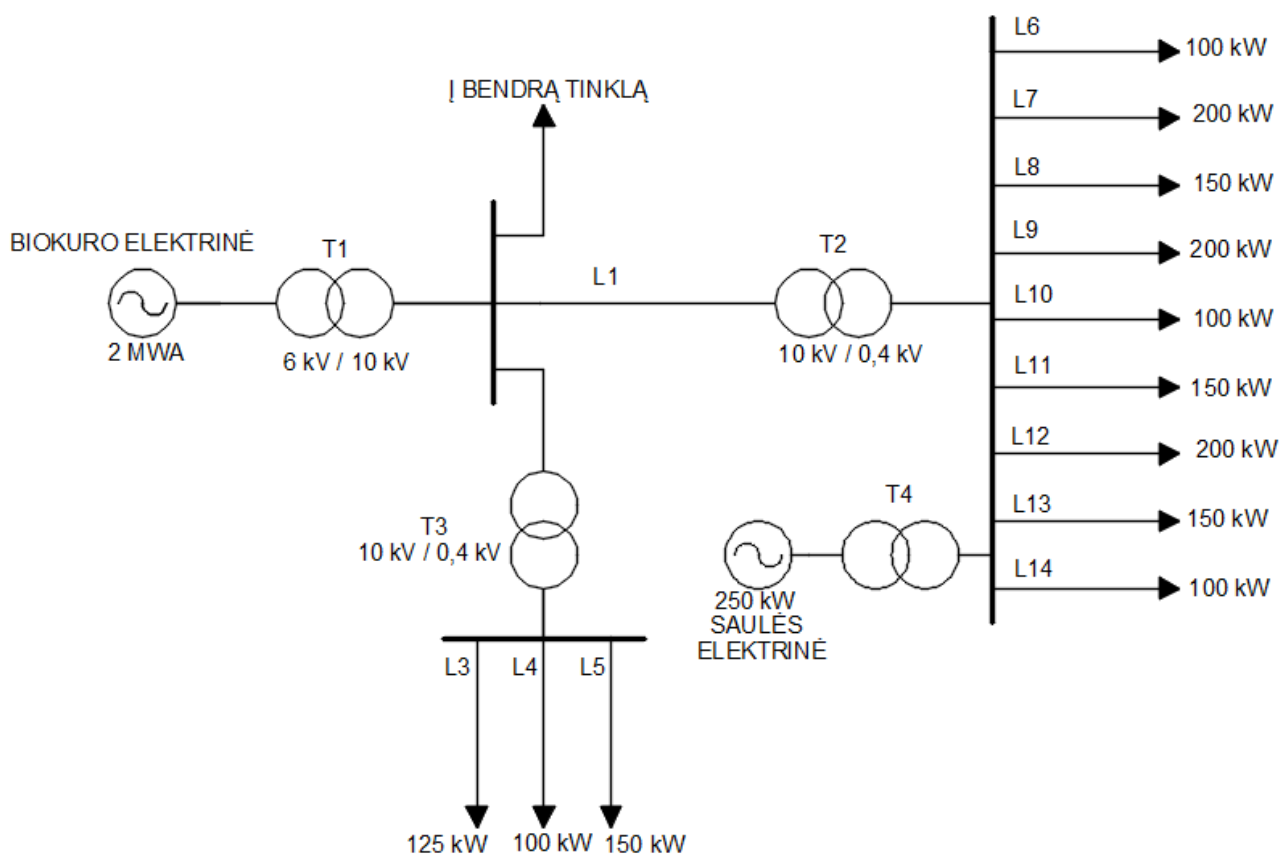
2. PRAKTINĖ DALIS

2.1. ELEKTROS TINKLO SUDARYMAS

Norint ištirti paskirstytųjų generatorių darbo režimus pirmiausia susidaroma tinklo schema, kurioje išdėstomos apkrovos. Apkrovų galia atitinka generatorių generuojamą bendrą galią.

Taip pat parenkami paskirstytieji generatoriai iš kurių vienas jungiamas į 10 kV tinklą, o kitas į 0,4 kV tinklą. Biokuro elektrinė jungiama į 10 kV tinklą, jos pilnutinė galia yra 2 MVA. Saulės elektrinė jungiama į 0,4 kV tinklą, jos galia yra 250 kW. Toks jungimas pasirinktas atsižvelgiant į 1.3.3.1 lentelę.

Visas sudarytas tinklas prijungiamas prie bendro tinklo.



2.1.1 pav. Principinė tinklo schema

2.1.1. lentelėje patektų ir elektros sistemoje vaizduojamų linijų ilgiai parenkami atsitiktinai.

2.1.1 lentelė. Elektros tinklo linijos ir jų ilgiai

Linijos	Apkrovos / šaltinio galia	Linijų ilgiai <i>l</i>
L1	1350 kW	5 km
L2	375 kW	6 km
L3	125 kW	2 km
L4	100 kW	1 km
L5	150 kW	2 km
L6	100 kW	1 km
L7	200 kW	3 km
L8	150 kW	1 km
L9	200 kW	2 km
L10	100 kW	1 km
L11	150 kW	2 km
L12	200 kW	2 km
L13	150 kW	1 km
L14	100 kW	2 km

2.2. KABELIŲ PARINKIMAS

Elektros linijos turi varžas, todėl norint jas modeliuoti reikia parinkti kabelius, todėl pirmiausiai apskaičiuojamos linijomis perduodamos apkrovos galia.

Apkrovos apskaičiuojamos taip:

$$Q = P \cdot \operatorname{tg}\varphi \quad (2.2.1)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.2.2)$$

Q – reaktyvioji galia

P - aktyvioji galia

S – pilnutinė galia

$\cos\varphi$ – galios faktorius (priimame, kad jis yra 0,85. $\cos\varphi$ perskaičiuojamas į $\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{1 - (\cos\varphi)^2} / \cos\varphi$).

Parinkant kabelius reikia įvertinti jais tekėsančią srovę, laidininko tipą ir darbo aplinką. Kabelių skerspjūviai parenkami pirmiausia apskaičiuojant elektros linijomis tekėsančias sroves I_{sk} . Imtuvų grupės skaičiuojamoji srovė nustatoma iš Omo dėsnio:

$$I_{sk} = \frac{S_{sk}}{\sqrt{3} \cdot U_T} \quad (2.2.3)$$

U_T – Tinklo įtampa, V;

S_{sk} – Skaičiuojamoji pilnutinė galia MVA.

Skaičiavimo rezultatai pateikiami 2.2.1 lentelėje.

2.2.1 lentelė. Šaltinių galios ir skaičiuojamosios linijų srovės

Linijos	Apkrovos / šaltinio galia P	Reaktyvioji galia Q	Pilnutinė galia S	Skaičiuojamoji srovė I _{sk}
L1	1725 kW	837 kVAr	1,588 MVA	87,3 A
L2	375 kW	232,5 kVAr	441,2 kVA	24,3 A
L3	125 kW	77,5 kVAr	147,1 kVA	212,3 A
L4	100 kW	62 kVAr	117,7 kVA	169,8 A
L5	150 kW	93 kVAr	176,5 kVA	254,7 A
L6	100 kW	62 kVAr	117,7 kVA	169,8 A
L7	200 kW	124 kVAr	235,3 kVA	339,7 A
L8	150 kW	93 kVAr	176,5 kVA	254,7 A
L9	200 kW	124 kVAr	235,3 kVA	339,7 A
L10	100 kW	62 kVAr	117,7 kVA	169,8 A
L11	150 kW	93 kVAr	176,5 kVA	254,7 A
L12	200 kW	124 kVAr	235,3 kVA	339,7 A
L13	150 kW	93 kVAr	176,5 kVA	254,7 A
L14	100 kW	62 kVAr	117,7 kVA	169,8 A

Pagrindinis elektros linijos parametras yra jos leistinoji srovė $I_{leist.}$. Kuri parenkama iš kabelių katalogo pagal apskaičiuotą linijos srovę I_{sk} . Leistinoji srovė turi būti didesnė už apskaičiuotą:

$$I_{leist} \geq I_{sk} \quad (2.2.4)$$

Pagal aukščiau pateiktą sąlygą iš katalogų [8] parenkami kabelių skerspjūviai ir jų varžos (2.2.2. lentelė). Parenkami kabeliai klojami žemėje. Reaktyviosios varžos parenkamos iš knygos „Elektros energetikos pagrindai“ 7.4 lentelės.

2.2.2 lentelė. Kabelinių linijų leistinosios srovės ir varžos Ω/km

Linijos	Skaičiuojamoji srovė I_{sk}, A	Leistinoji srovė I_{leist}, A	Skerspjūvis mm^2	Aktyvioji varža $R_0, \Omega/\text{km}$	Reaktyvioji varža $X_0, \Omega/\text{km}$	Trumpo Jungimo Srovė, kA
L1	87,34	145	3x50	0,641	0,11	2,5
L2	24,3	100	3x25	1,2	0,12	5,1
L3	212,3	220	4x95	0,39	0,06	8,9
L4	169,8	185	4x70	0,53	0,06	6,6
L5	254,7	290	4x150	0,25	0,06	14,1
L6	169,8	185	4x70	0,53	0,06	6,6
L7	339,7	375	4x240	0,16	0,06	22,6
L8	254,7	290	4x150	0,25	0,06	14,1
L9	339,7	375	4x240	0,16	0,06	22,6
L10	169,8	185	4x70	0,53	0,06	6,6
L11	254,7	290	4x150	0,25	0,06	14,1
L12	339,7	375	4x240	0,16	0,06	22,6
L13	254,7	290	4x150	0,25	0,06	14,1
L14	169,8	185	4x70	0,53	0,06	6,6

Pagal 2.2.2 lentelės duomenis skaičiuojamos viso kabelio ilgio varžos, nes „Matlab simulink“ aplinkoje kabelių nuostoliai bus modeliuojami kaip sutelktieji srautai:

$$R_l = R_0 \cdot l \quad (2.2.5)$$

$$X_l = X_0 \cdot l \quad (2.2.6)$$

R_l – Aktyvioji varža, Ω ;

X_l – Reaktyvioji varža, Ω .

Toliau, skaičiuojamas induktyvumas L :

$$L = X_l / \omega \quad (2.2.7)$$

ω – yra $2 \cdot \pi \cdot f$.

Varžų ir induktyvumo, kuris yra sutelktas per visą kabelio ilgį, skaičiavimo rezultatai pateikti 2.2.3 lentelėje.

2.2.3 lentelė. Kabelinių linijų varžos

Linijos	Aktyvioji varža R, Ω	Reaktyvioji varža X, Ω	Induktyvumas L, H
L1	3,21	0,55	$1,75 \cdot 10^{-3}$
L2	7,2	0,72	$2,29 \cdot 10^{-3}$
L3	0,78	0,12	$0,38 \cdot 10^{-3}$
L4	0,53	0,06	$0,19 \cdot 10^{-3}$
L5	0,5	0,12	$0,38 \cdot 10^{-3}$
L6	0,53	0,06	$0,19 \cdot 10^{-3}$
L7	0,48	0,18	$0,57 \cdot 10^{-3}$
L8	0,25	0,06	$0,19 \cdot 10^{-3}$
L9	0,32	0,12	$0,38 \cdot 10^{-3}$
L10	0,53	0,06	$0,19 \cdot 10^{-3}$
L11	0,5	0,12	$0,38 \cdot 10^{-3}$
L12	0,32	0,12	$0,38 \cdot 10^{-3}$
L13	0,25	0,06	$0,19 \cdot 10^{-3}$
L14	1,06	0,12	$0,38 \cdot 10^{-3}$

2.3. Transformatorių parinkimas

Galios transformatoriai, skirti elektros skirstomiesiems tinklams. Transformatoriai parenkami pagal vardines įtampas U_{N1} ir U_{N2} ir vardinę galią S_{nom} . Pagrindinė parinkimo sąlyga – apkrovimo skaičiuojamoji galia S_{sk} neturi viršyti vardinės:

$$S_{nom} \geq S_{sk}; \quad (2.3.1)$$

2.3.1 lentelė. Transformatorių skaičiuojamosios galios

Transformatoriai	Skaičiuojamosios galios
T1	2 MVA
T2	1.588 MVA
T3	441 kVA

Pagal 2.3.1 lentelės duomenis iš katalogų [9] parenkami transformatoriai ir 2.3.2 lentelėje pateikiami jų techniniai parametrai. Parenkami trifaziai skirstomieji transformatoriai atitinkantys EN (IEC) 60076, EN 50464, EN 50216 standartus.

2.3.2 lentelė. Transformatorių duomenys

Transformatoriai	Nominali galia S_{TN} , kVA	U_{N1} , kV	U_{N2} , kV	Tuščios eigos nuostoliai ΔP_0 , kW	Trumpojo jungimo nuostoliai ΔP_k , kW	u_k , %
T2	1600	10	0,4	1,450	12	6
T3	500	10	0,4	0,610	3.9	4

Kitų dviejų transformatorių (T1 ir T2) neskaičiuosime, nes jų parametrai bus nustatyti pagal generavimo šaltinių parametrus.

Skaičiuojame transformatoriaus varžas:

Transformatoriaus aktyvioji varža:

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{1000} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_{TN}^2}; \quad (2.3.2)$$

Transformatoriaus pilnutinė varža:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{N1}^2}{S_{TN}}; \quad (2.3.3)$$

Transformatoriaus reaktyvioji varža:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}; \quad (2.3.4)$$

Skaičiavimo rezultatai pateikiami 2.3.3 lentelėje.

2.3.3 lentelė. Transformatorių varžos

Transformatoriai	aktyvioji varža Ω	pilnutinė varža Ω	reaktyvioji varža Ω
T2	0,469	3,75	3,721
T3	4,8	8	6,4

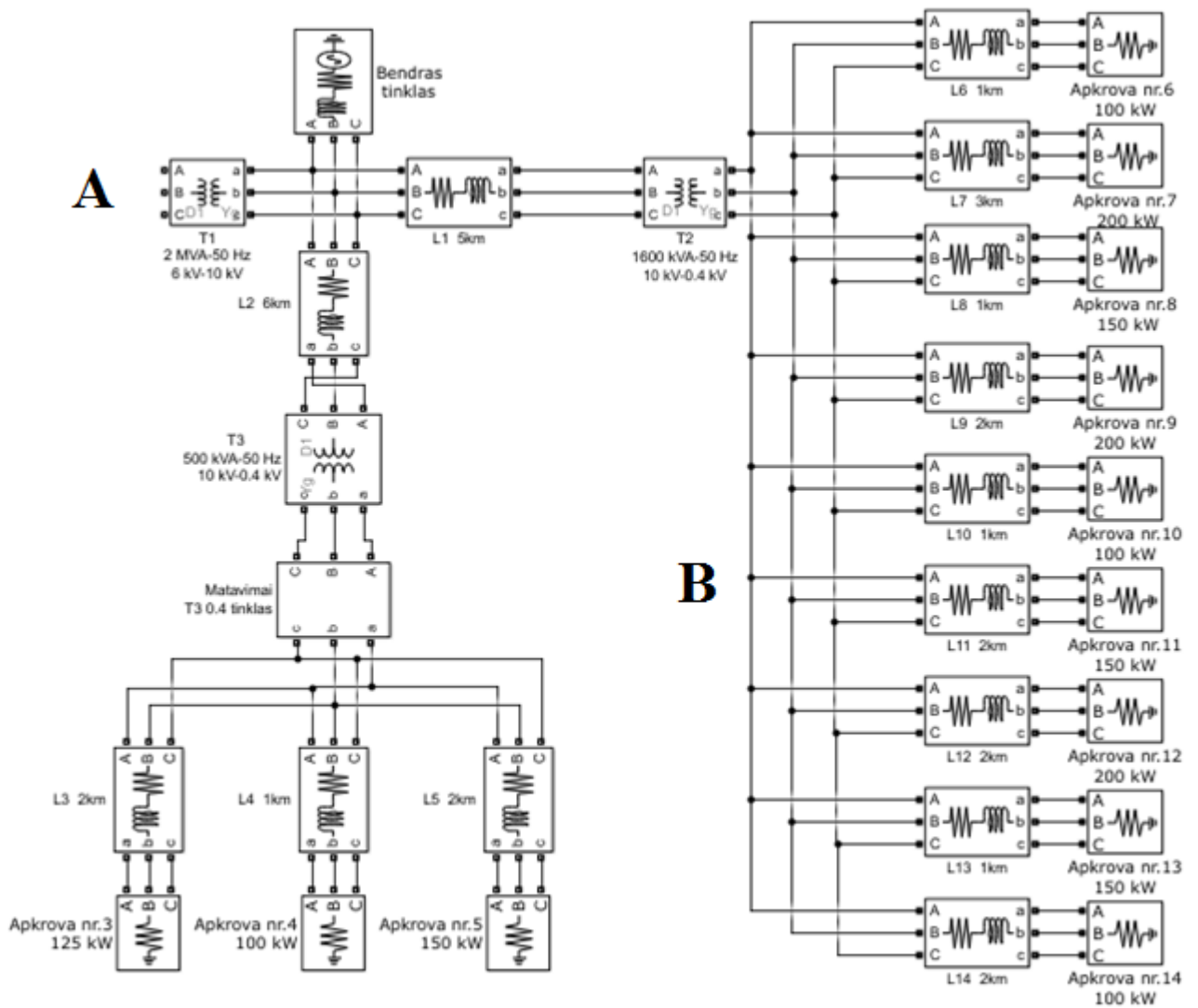
2.4. PASKIRSTYTŲJŲ GENERATORIŲ SISTEMOS SUDARYMAS

Pagal parinktų ir apskaičiuotų elektros sistemos dalių parametrus „Matlab simulink“ aplinkoje sumodeliuojamas elektros tinklas (2.4.1 pav.).

Tinklą sudaro 12 apkrovų, kurių galia svyruoja nuo 100 kW iki 200 kW. Apkrovos sudaro dvi grupes, vienos grupės galia yra 375 kW, o kitos 1350 kW. Taip pat, tinkle yra 14 linijų, kurios vaizduojamos kaip varžos ir 4 transformatoriai.

Prie šito sudaryto tinklo bus prijungti elektros energijos generavimo šaltiniai:

- taške A bus prijungtas sinchroninis 2MVA galios generatorius;
- taške B bus prijungta 250 kW saulės elektrinė.



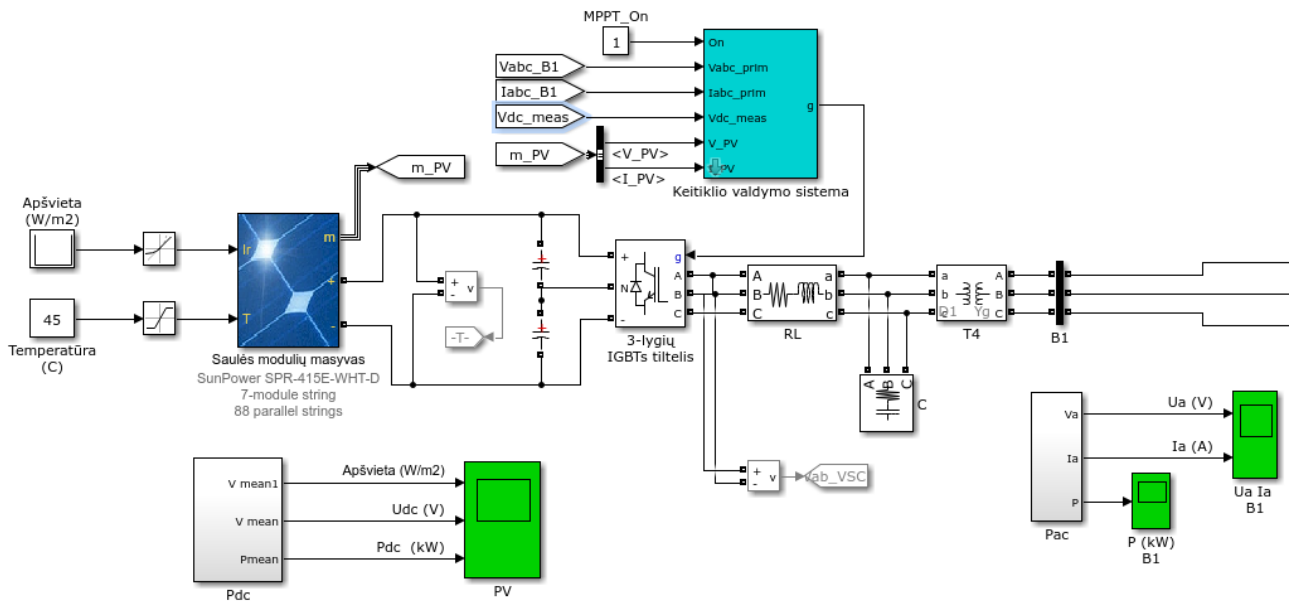
2.4.1 pav. Tinklo schema be elektros energijos generavimo šaltinių

2.4.1. Saulės elektrinės modelis

Iš „Matlab simulink“ programos parenkamas 250 kW saulės elektrinės modelis (2.4.1.1 pav.), jo parametrai pritaikomi 2.4.1 paveiksle sudarytai schemai ir jis prijungiamas į 0,4 kV tinklą.

Visas saulės modulių masyvas sudarytas iš 88 lygiagrečiai sujungtų blokų. Kiekvienas blokas sudarytas iš 7 „SunPower SPR-415E“ modulių sujungtas į eiles. Modelio meniu leidžia nubraižyti pasirinkto modulio ar viso masyvo I-V ir P-V charakteristikas.

Modulių nustatyta apšvieta yra 1000 W/m^2 o darbinė temperatūra $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

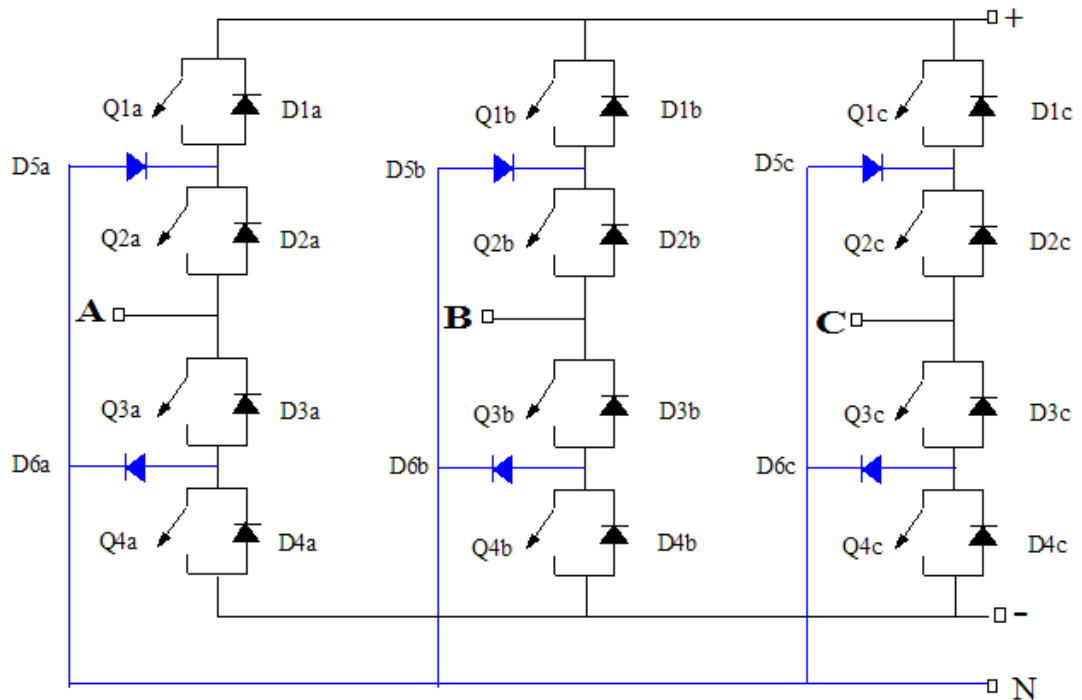


2.4.1.1 pav. Saulės elektrinės modelio schema.

3 – fazis DC/AC keitiklis

Konverteris modeliuojamas naudojant 3 lygių IGBT tiltelį, prie kurio prijungiami RL droselis ir mažų harmonikų filtras C, kurie naudojami filtruoti IGBT tiltelio harmonikoms. Toliau keitiklis jungiamas prie trifazio transformatoriaus ir elektros energija perduodama į tinklą.

Trijų lygių IGBT tiltelis atstoja 3 lygių galios keitiklį, kuris susideda iš 1, 2 ar 3 atšakų - galios perjungimo įrenginių. Kiekviena atšaka susideda iš 4 perjungiklių, kurių kiekvienas turi priešingos krypties diodą. Taip pat atšaka turi du neutralės diodus (2.4.1.2 pav.).



2.4.1.2 pav. Trijų lygių IGBT tiltelio schema.

Keitiklio valdymo sistema

Pagrindiniai keitiklio valdymo sistemos komponentai yra šie:

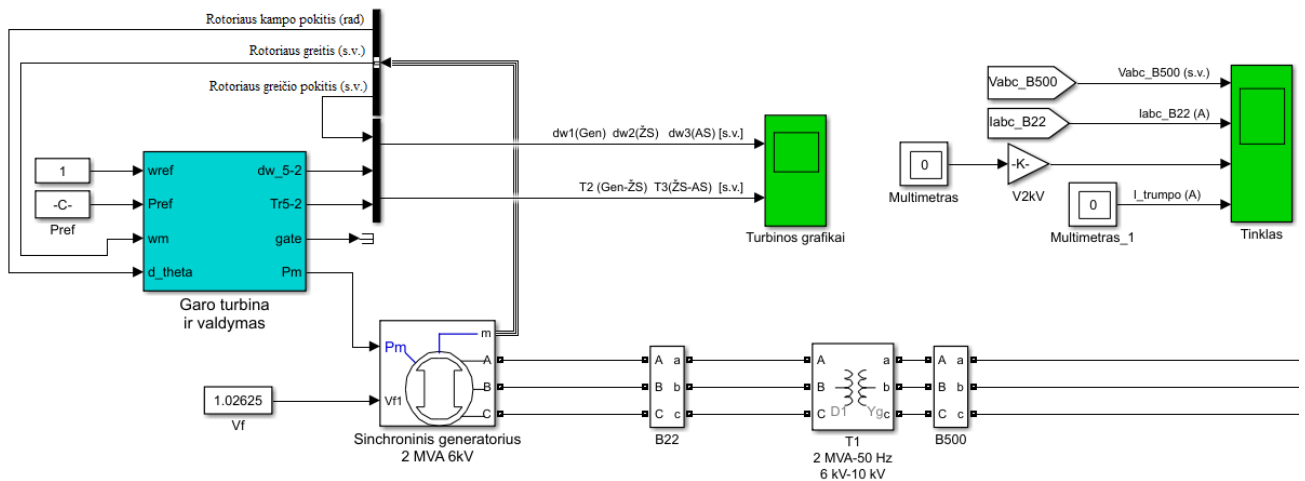
- 1 MPPT sistema (Maximum Power Point Tracker systems) – Maksimalios galios taško sekimo sistema. Šis reguliatorius automatiškai keičia VDC reguliatoriaus signalą siekiant gauti nuolatine įtampa, kuri išgaus maksimalią galią iš saulės panelių bloko.
- VDC reguliatorius – nustato reikalingą aktyviąją srovę I_d , kurią nustato srovės reguliatorius.
- srovės reguliatorius – pagal nustatytas sroves I_d ir I_q (reaktyvioji srovė) reguliatorius nustato reikalingą nustatytąją inverterio įtampą. Pavyzdyje $I_q = 0$.
- PLL ir srovės bei įtampos matavimai – PLL reikalingas sinchronizacijai.
- PWM generatorius – generuoja pulsinius signalus į IGBT, atsižvelgiant į reikalingos įtampos vertę. .

2.4.2. Biokuro elektrinės modelis

Biokuro elektrinei modeliuoti pasirinktas garo turbinos su sinchroniniu generatoriumi modelis iš „Matlab simulink“ programos (2.4.2.1 pav.).

Sistema susideda iš vieno generatoriaus (2 MVA, 6kV, 50 Hz 3000 aps/min) ir garo turbinos. Šis modelis per transformatorių prijungiamas į 10 kV tinklą.

Mechaninė sistema modelyje sudaro trys dalys: generatorius, žemo slėgio turbina ir aukšto slėgio turbina.



2.4.2.1 pav. Sinchroninio generatoriaus modelio schema

Garo turbina ir valdymas

Šitas blokas modeliuoja greičio valdymo sistemą, garo turbiną ir veleno dinamika.

Garo turbina turi keturis etapus, kurių kiekvienas modeliuojama pirmos eilės perdavimo funkcija. Pirmasis etapas atstovauja garui, o kitos trys etapai sudaro arba kaitintuvai arba vamzdynai. Katilas yra nemodeliuojamas ir katilo slėgis yra pastovus 1,0 s.v.

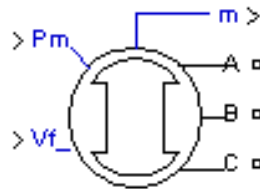
Garo turbinos įeinantys ir išeinantys signalai:

- Wref – greitis (s.v.). Jis paprastai prijungtas prie pastovaus bloko su nustatyta verte (1,0 s.v.).
- Pref – elektros energija (s.v.). Ji yra nustatyta pastoviai vertei, atitinkančiai pradinei aktyviosios sinchroninės mašinos bloko aktyviajai galiai.
- wm – generatoriaus greitis (s.v.).
- d_theta – generatoriaus galios kampo nuokrypis.
- dw_5-2 – greičio nuokrypio išėjimo vektorius (s.v.).

- Tr5-2 – sukimo momento išėjimo vektorius (pu).
- gate – vartų atidarymas (s.v.).
- Pm – mechaninė galia, (s.v.).

Sinchroninis generatorius

Šis blokas modeliuojamas kaip 3 fazių sinchroninė mašina su neryškiapoliumi rotoriumi. Jam nustatoma 2 MVA pilnutinė galia, 6kV įtampa, 50 Hz dažnis ir 3600 aps/min. greitis.



2.4.2.2 pav. Sinchroninės mašinos blokas

Sinchroninio generatoriaus įėjimo ir išėjimo signalai:

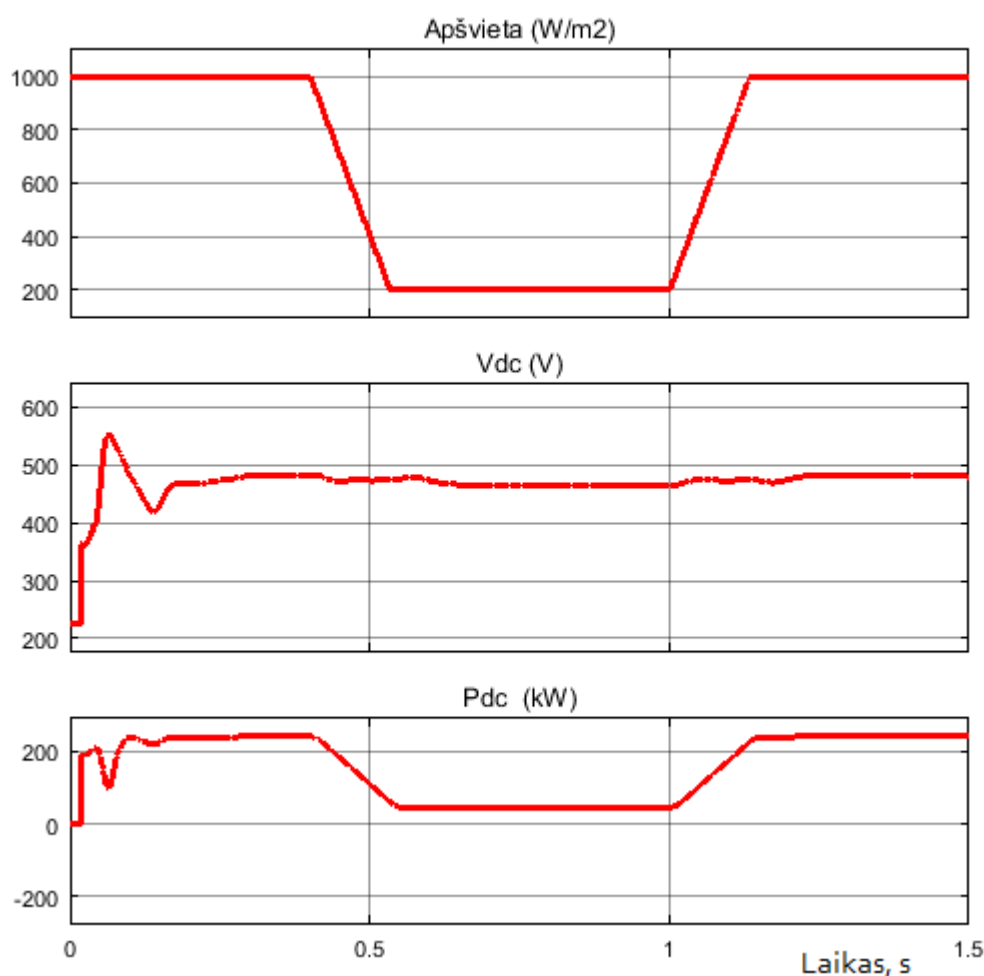
- Pm – mašinos veleno mechaninė galia (W arba s.v.);
- ω – greitis, priklausantis nuo Pm (rad/s);
- Vf – žadinimo įtampa (s.v.);
- m – išėjimo vektorius turinti matavimo signalus.

3. EKSPERIMENTAS

3.1. NUSISTOVĖJĘS NORMALUS DARBO REŽIMAS

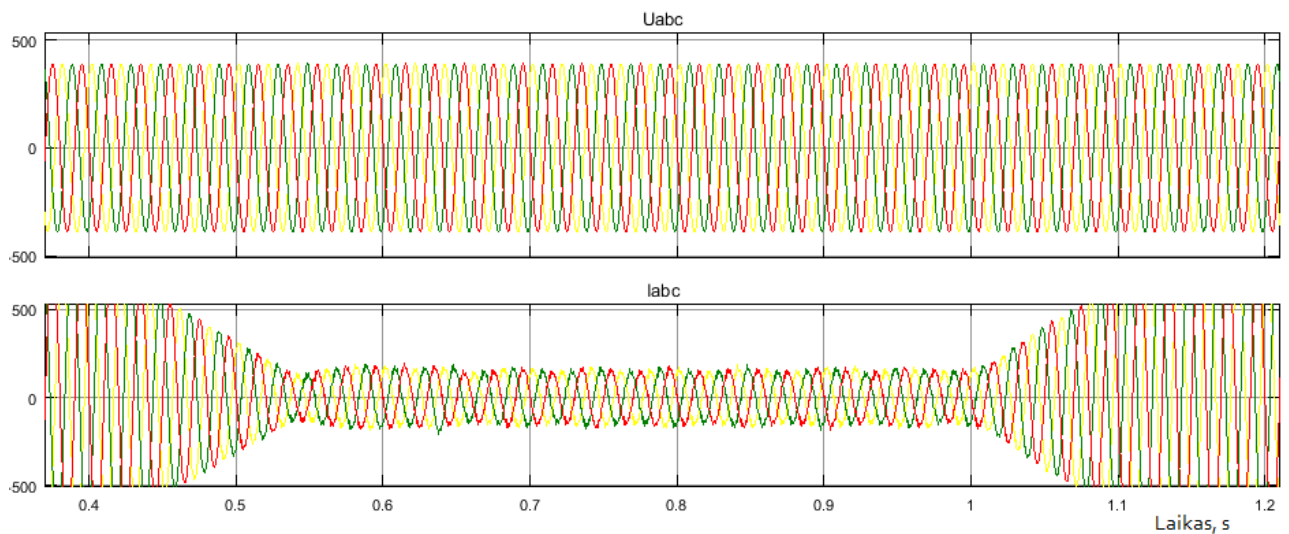
Norint ištirti darbo režimus pirmiausiai reikia suderinti pasirinktų generavimo šaltinių parametrus su bendro sudaryto tinklo parametrais ir išanalizuoti nusistovėjusį normalų darbo režimą.

Pirmiausiai stebimas saulės elektrinės normalus darbo režimas (3.1.1 pav.).



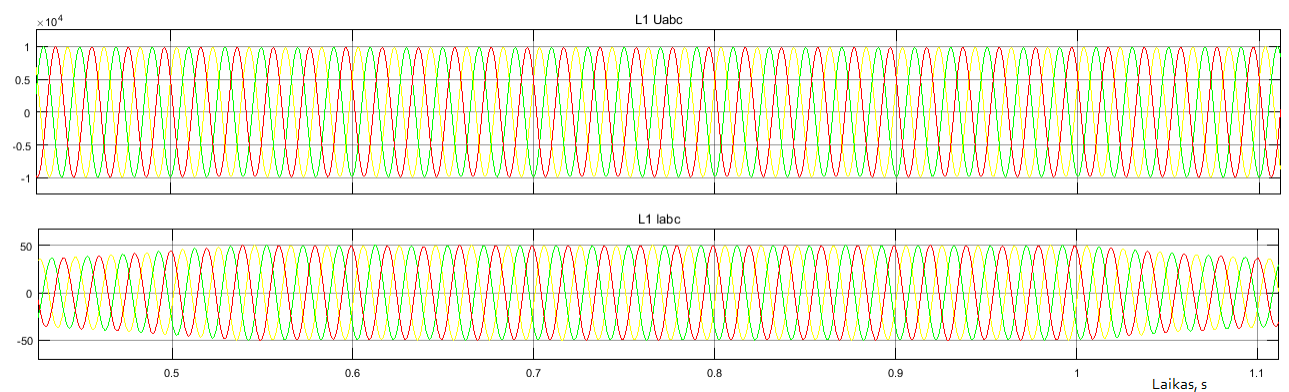
3.1.1 pav. Saulės elektrinės reakcija į sumažintą apšvietą.

Modulių nustatyta apšvieta yra 1000 W/m^2 , o darbinė temperatūra $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Kai pasiekiamo nusistovėjusį režimą ($t = 0,29 \text{ s.}$), gauname PV modulių nuolatinę įtampą $V_{dc} = 480 \text{ V}$, o išgaunama galia yra $P_{dc} = 240 \text{ kW}$. Laiku $t = 0,4 \text{ s.}$ apšvieta krenta iki nuo 1000 iki 200, tada maksimalios galios taško sekimo sistema sumažina įtampą V_{dc} iki 463 V, siekiant išgauti didžiausią galią iš PV masyvo (47 kW). Kai apšvieta vėl sugrįžta į pradinę vertę sistema atsistato į pradinį režimą. Tai yra MPPT sistemos normalus režimas.



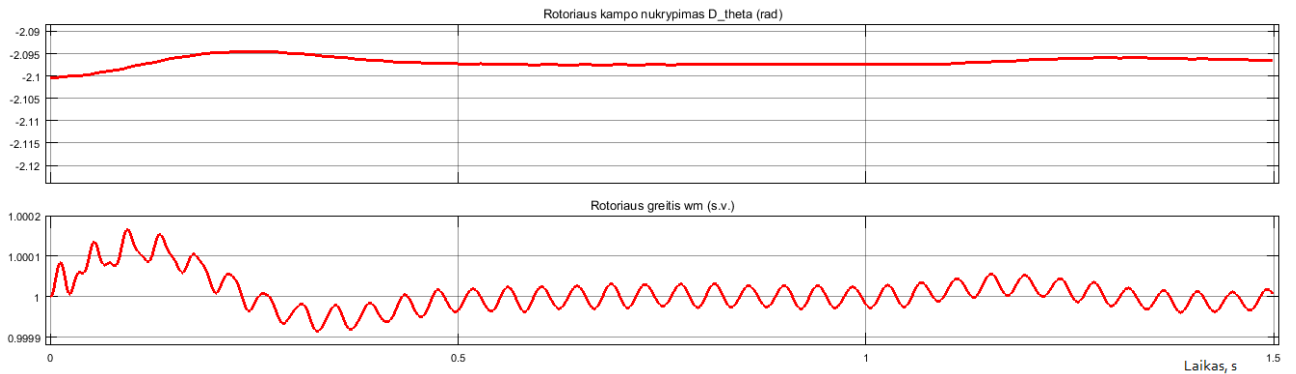
3.1.2 pav. 3 fazių įtamos ir srovės oscilogramos SE prijungimo į 0.4 kV tinklą vietoje

3.1.2 pav. Pavaizduota įtamos ir srovės grafikai už saulės elektrinės transformatoriaus T4. Iš jų matyti, kad įtampa palaikoma pastovi, o srovė sumažėja kol apšvieta būna mažesnė.



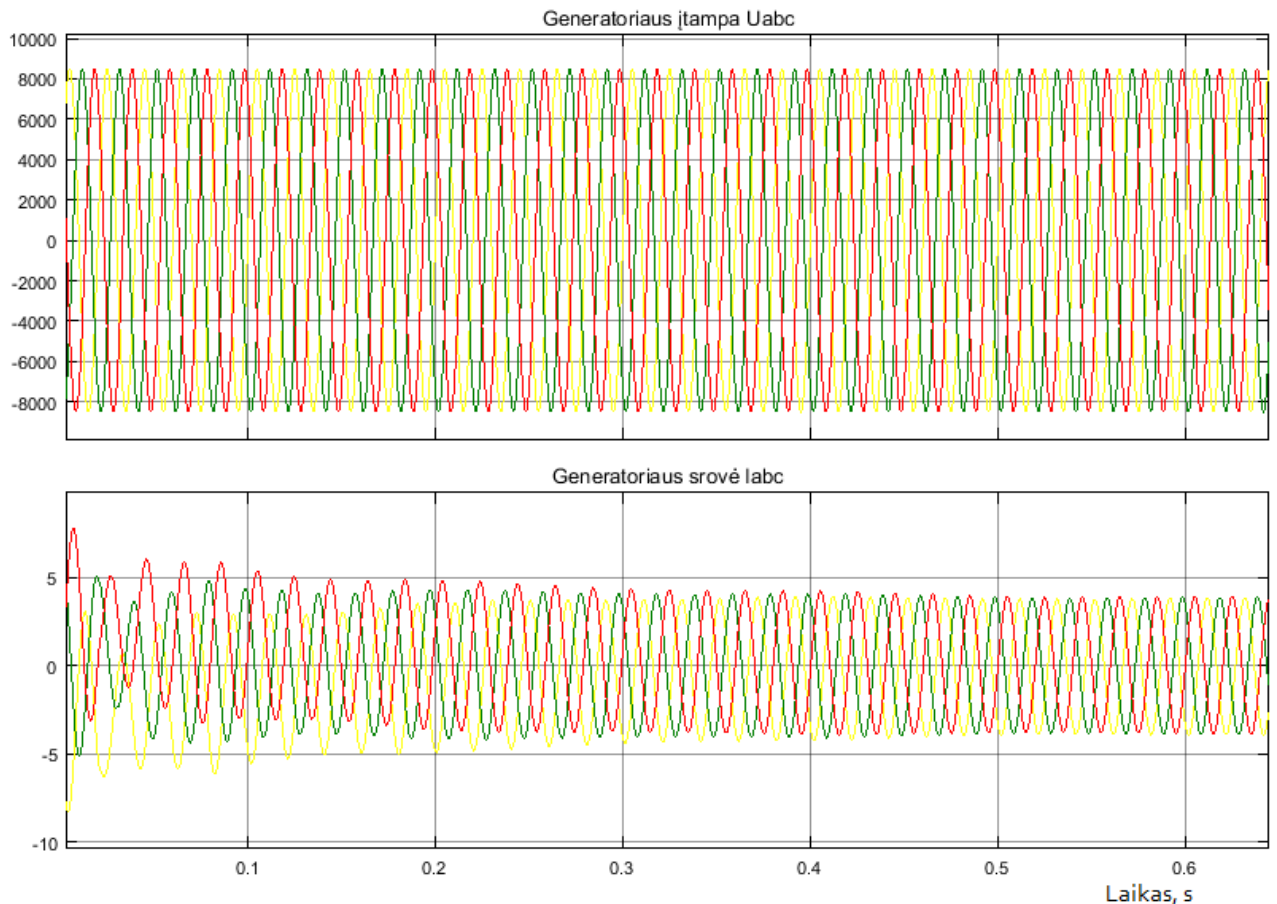
3.1.3 pav. 3 fazių įtamos ir srovės oscilogramos L1 linijoje (10kV tinklas)

Priešinga situacija matosi 3.1.3 pav. kur srovė sumažėjus apšvietai padidėja taip yra todėl, kad sinchroninis generatorius ir bendras tinklas generuoja daugiau srovės tam, kad išlaikytų reikiamą apkrovos galią.



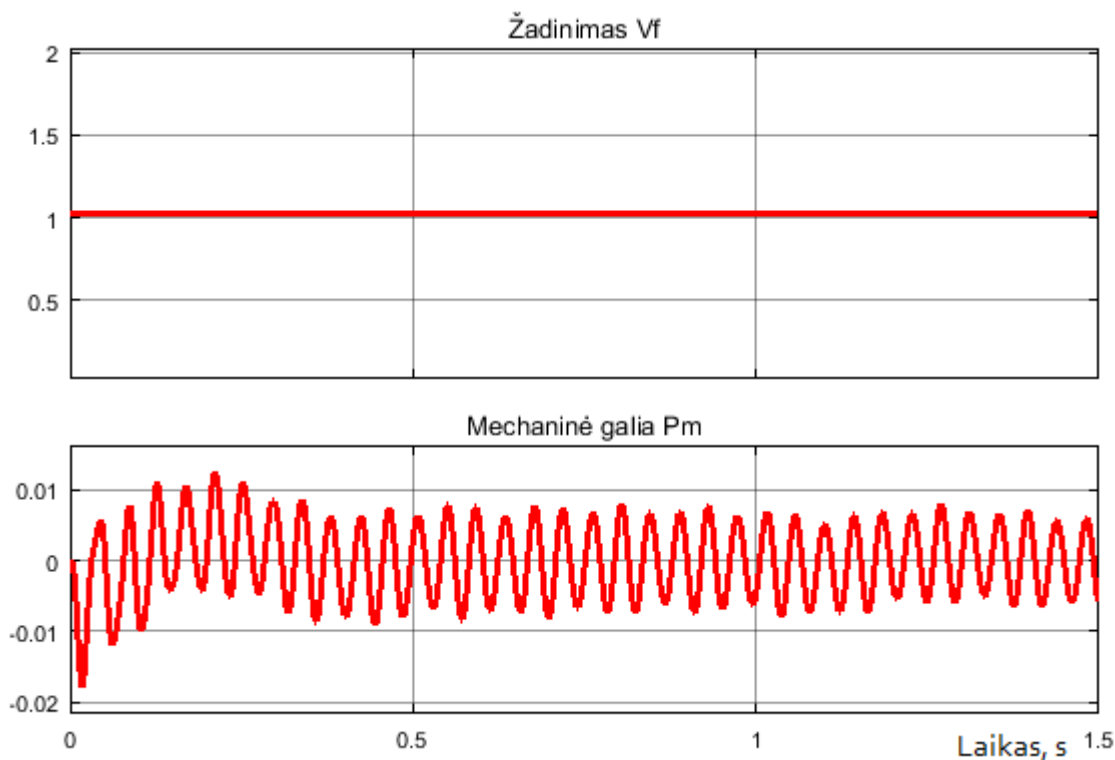
3.1.4 pav. Rotoriaus kampo nuokrypi ir rotoriaus greitis.

Generatoriaus nusistovėjęs stabilus darbo režimas matosi 3.1.4 pav. Rotoriaus kampo nuokrypis mažas, praktiškai nekinta. O rotoriaus greitis praktiškai lygus 1 matuojant santykiniais vienetais.



3.1.5 pav. Generatoriaus įtampos ir srovės oscilogramos

Iš oscilogramos matyti, kad generatoriaus srovės ir įtampos pereina į nusistovėjusį periodinį režimą. Tai yra normalus darbo režimas.



3.1.6 pav. Generatoriaus žadinimo ir mechaninės galios oscilogramos.

Aukščiau pateiktas grafikas rodo generatoriaus žadinimą, kuris yra nustatytas pastovus ir pritaikytas nusistovėjusiam režimui.

3.1.1 lentelėje pateiktas normalaus nusistovėjusio režimo bendras harmonikų išsikraipymas (THD). Išsikraipymas matuotas visose sudaryto tinklo vietose. Kaip jau buvo minėta 5.1 skyriuje jis negali viršyti 8 %. Didžiausias išsikraipymas buvo užfiksuotas prie saulės elektrinės, tačiau jis neviršija leistinų normų.

3.1.1 lentelė. Bendras harmonikų išsikraipymas nusistovėjusiame režime

Matavimo vieta	Bendras harmonikų išsikraipymas THD	
	$U_{THD}, \%$	$I_{THD}, \%$
T1 generatoriaus pusė	0,8	1
T1 tinklo pusė	0,13	0,14
T3 0,4 kV tinklas	0,85	0,1
L1 linija	0,16	0,3
T2 0.4 kV tinklas	0,53	0,35
Apkrova nr.6	0,38	0,38
Apkrova nr.10	0,4	0,35
T4 tinklo pusė	0,68	2,4
T4 SE pusė	2,4	5,0

Iš visų pateiktų duomenų ir oscilogramų matyti, kad tinklo parametrai tarpusavyje suderinti tinkamai, sistemos darbas yra stabilus.

3.2. AVARINIAI DARBO REŽIMAI

3.2.1. Apkrovų atsijungimas ir prisijungimas

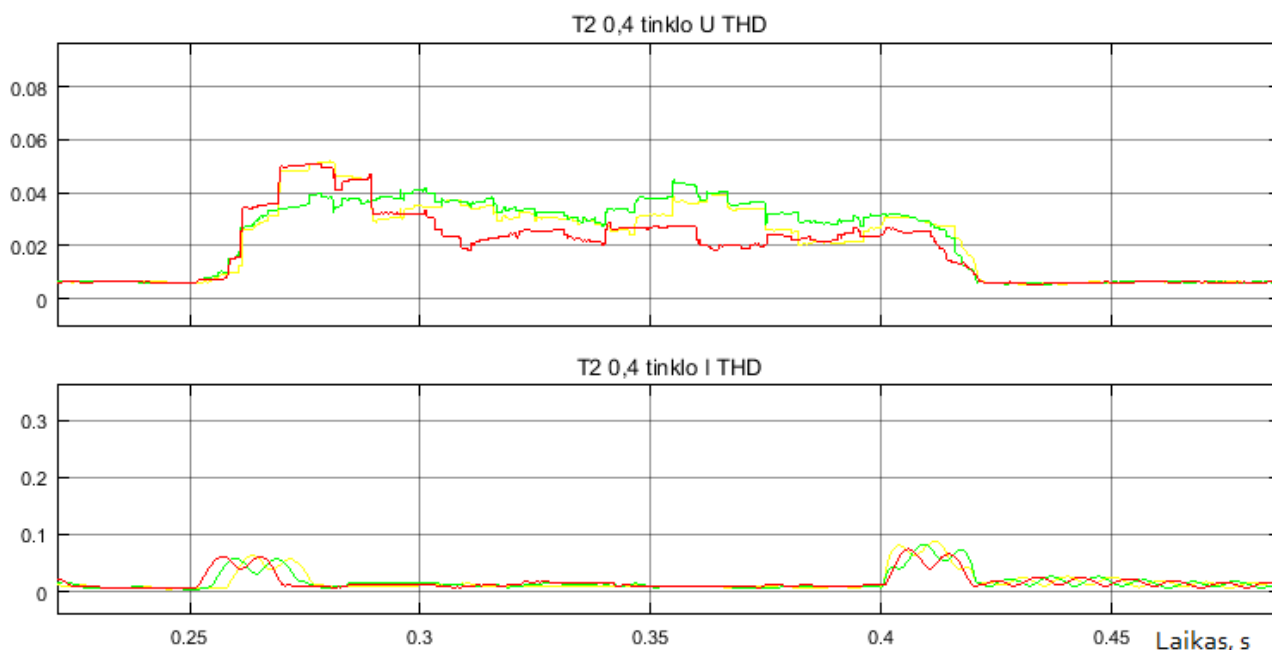
Modeliuojant šį darbo režimą, pirmiausiai atjungiama 10 % apkrovų ir stebima sistemos reakcija į sumažėjusią apkrovą.

Įvairiose sistemos vietose matuojamas bendras harmonikų išsikraipymas (3.2.1.1 lentelė.). Iš lentelės matyti, kad didžiausias srovės harmonikų išsikraipymas yra 10 kV linijos tinkle, o įtampos harmonikų išsikraipymas 0,4 kV tinklo dalyje.

3.2.1.1 lentelė. Bendras harmonikų išsikraipymas kai atsijungia 10% apkrovų

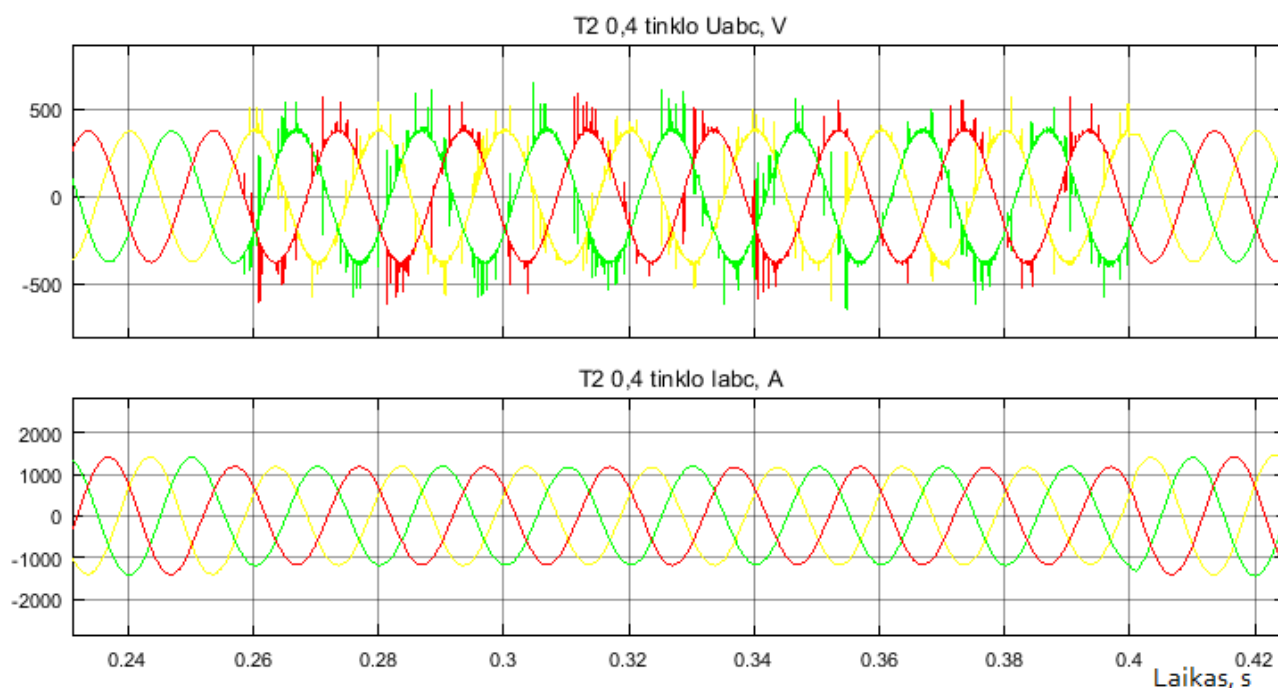
Matavimo vieta	Bendras harmonikų išsikraipymas THD	
	U_{THD} , %	I_{THD} , %
T1 generatoriaus pusė	0,28	8,5
T1 10kV tinklas	0,44	9
T3 0,4 kV tinklas	0,38	0,3
L1 linija	0,63	8,9
T2 0.4 kV tinklas	5,2	8,7
Apkrova nr.10	1,8	1,7
T4 tinklo pusė	5,4	2,6

Visose matuojamose vietose harmonikų išsikraipymas buvo trumpalaikis, tai yra prisijungiant ir atsijungiant apkrovai, tik 0,4 kV tinkle išsikraipymas buvo visą atsijungimo laikotarpį (3.2.1.1 pav.).



3.2.1.1 pav. Įtampos ir srovės bendras harmonikų išsikraipymas 0,4kV tinkle atsijungiant 10 % apkrovos

Kai atsijungia 10 % apkrovos bendras harmonikų išsikraipymas pastebimas ir 0,4 kV tinklo oscilogramoje (3.2.1.2 pav.).



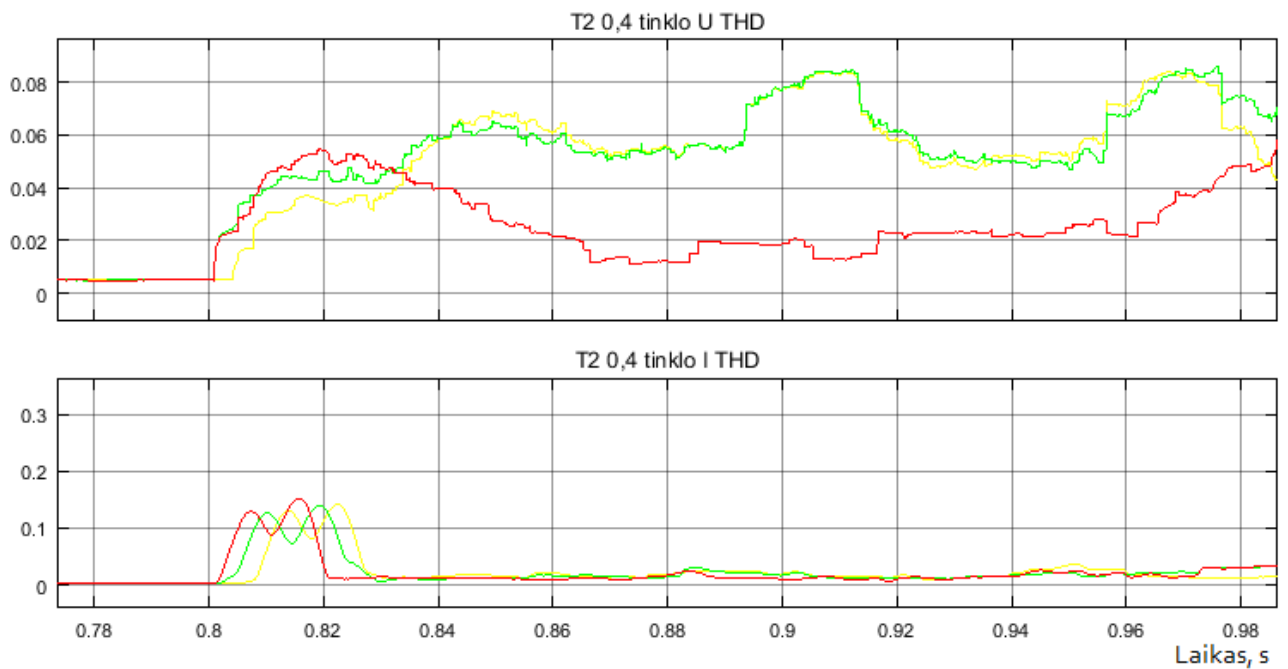
3.2.1.2 pav. 0,4 kV tinklo įtampos ir srovės oscilograma, atsijungus 10 % apkrovų

Atsijungiant 30 % apkrovų bendras harmonikų išsikraipymas padidėja beveik dvigubai. Labiausiai THD padidėja 0.4 kV tinkle saulės elektrinės prijungimo vietoje (3.2.1.2 lentelė.).

3.2.1.2 lentelė. Bendras harmonikų išsikraipymas kai atsijungia 30% apkrovų

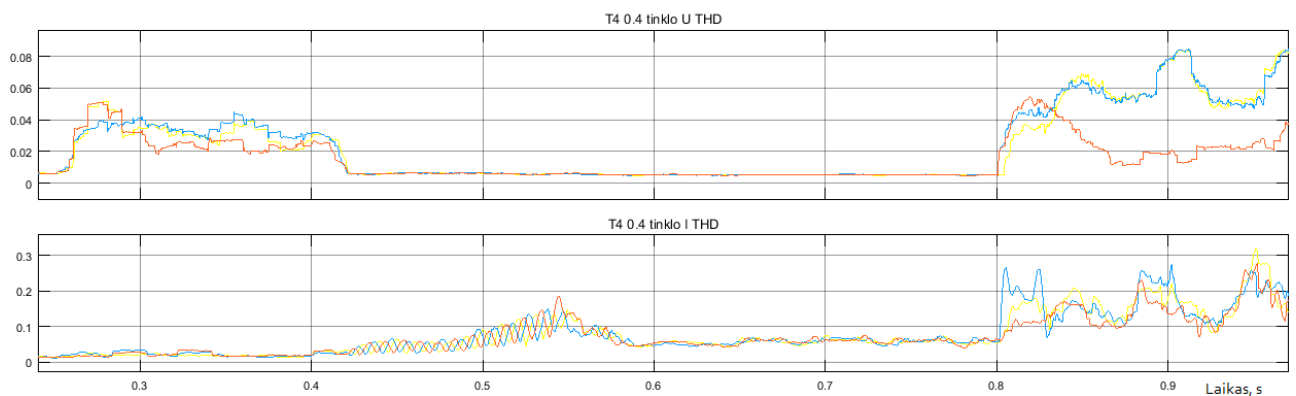
Matavimo vieta	Bendras harmonikų išsikraipymas THD	
	$U_{THD}, \%$	$I_{THD}, \%$
T1 generatoriaus pusė	0,33	16
T1 tinklo pusė	0,51	19
T3 0,4 kV tinklas	0,47	0,47
L1 linija	0,85	15,2
T2 0.4 kV tinklas	8,4	15,2
Apkrova nr.10	2	2
T4 tinklo pusė	8,5	32

Kaip ir pirmu atveju ilgalaikis bendro harmonikų išsikraipymas pastebimas (3.2.1.3 pav.)



3.2.1.3 pav. Įtampos ir srovės bendras harmonikų išsikraipymas 0,4kV tinkle atsijungiant 30 % apkrovos.

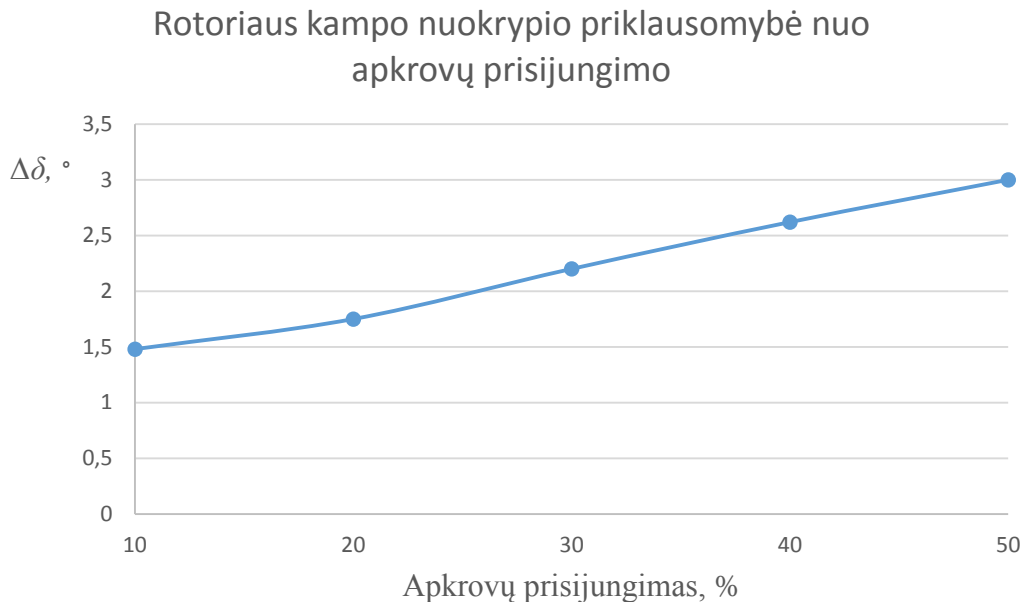
Peržiūrėjus visą apkrovų atsijungimo ir prisijungimo oscilogramą, galima pamatyti, kad apkrovai prisijungiant atgal į tinklą labai padidėja srovės bendras harmonikų išsikraipymas saulės elektrinės prijungimo į tinklą taške. Tai reiškia, kad apkrovų prisijungimas, po atsijungimo, saulės elektrinei daro didesnę žalą, nei atsijungimas (3.2.1.4 pav.).



3.2.1.4 pav. Įtampos ir srovės bendras harmonikų išsikraipymas 0,4kV tinkle.

Toliau modeliuojamas apkrovų prisijungimas nuo 10 % iki 50 % skaičiuojant nuo bendros apkrovų sumos ir stebimas sinchroninio generatoriaus rotoriaus kampo nuokrypis ir viso tinklo darbas.

3.2.1.5 paveiksle pateikta rotoriaus kampo nuokrypio priklausomybė nuo apkrovų prisijungimo. Grafikas parodo, kad netgi prisijungus 50 % daugiau apkrovos rotoriaus kampo nuokrypis yra nedidelis tik 3 %.



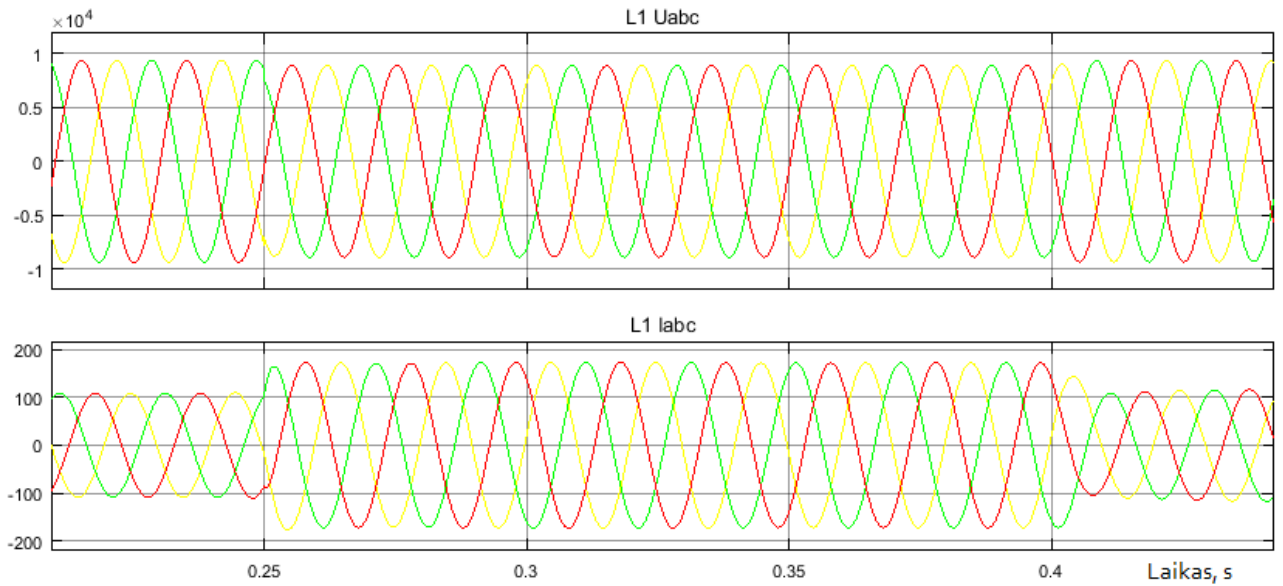
3.2.1.5 pav. Rotoriaus kampo nuokrypio priklausomybė nuo apkrovų prisijungimo

Žemiau pateiktoje lentelėje galima pamatyti, kokia yra tinklo reakcija atsijungus didžiausiai apkrovai. 10 kV linijos ir 0,4 kV tinklo reakcija į apkrovos padidėjimą yra panaši – įtampa sumažėja, o srovė padidėja.

3.2.1.2 lentelė. Tinklo reakcija į apkrovos prisijungimą.

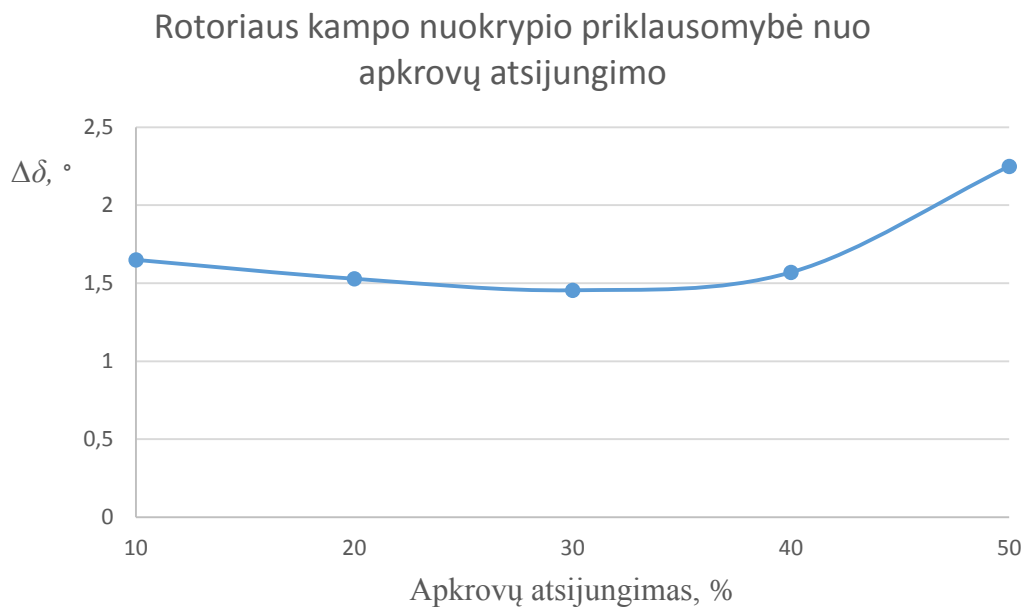
Matavimo vieta	Įtampos ir srovės pokytis prisijungus 50 % apkrovos	
	U pokytis,	I pokytis,
10 kV linija	-5 %	+60 %
0,4 kV tinklas	-6,6 %	59,8 %

3.2.1.6 paveiksle pateikta 10 kV linijos įtampos ir tinklo oscilogramos. Prisijungus didžiausiai apkrovai tinkle įtampa sumažėja iki 6,6 %, o srovė padidėja iki 60 %.



3.2.1.6 pav. L1 linijos reakcija į 50 % apkrovų prisijungimą.

Tokiu pačiu principu modeliuojamas ir apkrovų atsijungimas. 3.2.1.7 paveiksle pateikta kaip kinta rotoriaus kampo nuokrypis mažėjant apkrovai. Iš pradžių nuokrypis mažėja, o paskui nuo 30 % pradeda didėti. Pasiekus 50 % ribą rotoriaus kampo nuokrypis būna 2,25 %.



3.2.1.7 pav. Rotoriaus kampo nuokrypio priklausomybė nuo apkrovų atsijungimo

Likusio tinklo reakcija į apkrovų atsijungimą pateikta 3.2.1.3 lentelėje. Šiuo atveju tinkle įtampa padidėja, o srovė sumažėja.

3.2.1.3 lentelė. Tinklo reakcija į apkrovos prisijungimą.

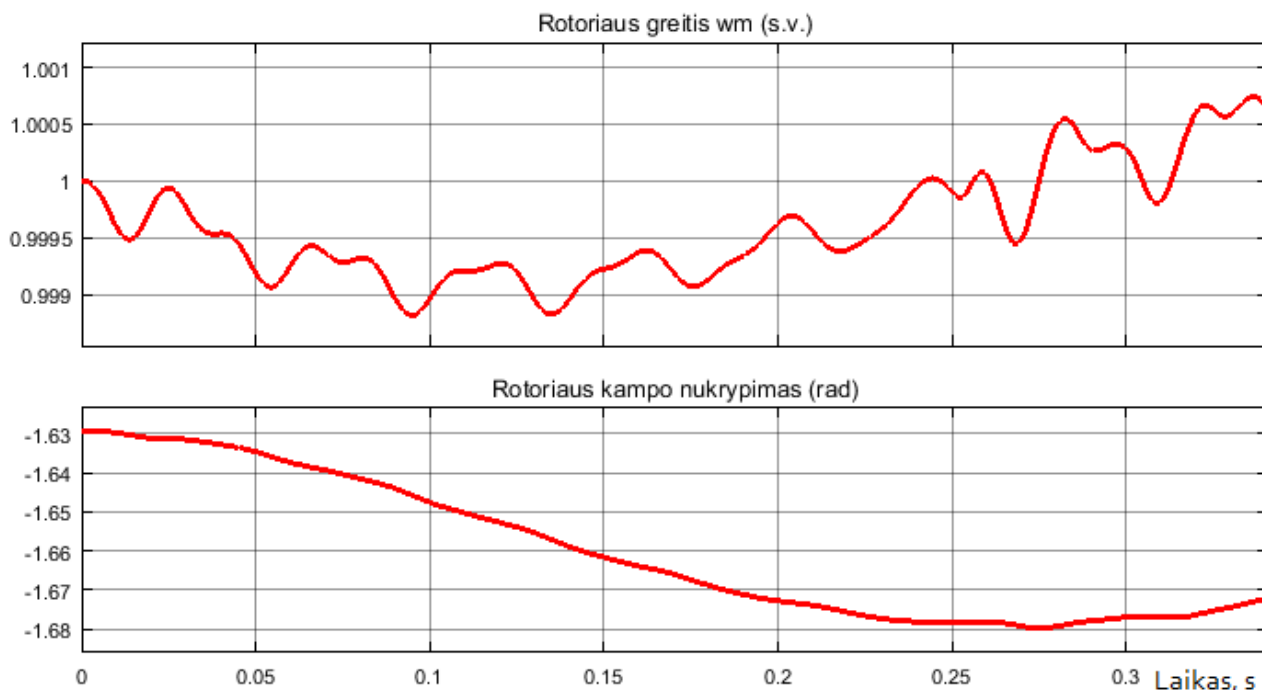
Matavimo vieta	Įtampos ir srovės pokytis atsijungus 50 % apkrovos	
	U pokytis,	I pokytis,
10 kV linija	+4,9 %	-71 %
0,4 kV tinklas	+6,3 %	-69 %
Prie SE	+6,7 %	-18 %

Taigi apkrovų atsijungimas ir prisijungimas paskirstytųjų generatorių sistemai sukelia mažus trikdžius ir jų dydis praktiškai vienodas.

3.2.2. Generacijos atsijungimas

Modeliuojant saulės elektrinės atjungimą, taip pat stebimas sinchroninio generatoriaus ir visos sistemos reakcija į generacijos praradimą.

Saulės elektrinė atjungiamą 0.25 s. kai visa sistema jau nusistovėjusi, tada stebimas rotoriaus kampo nuokrypis (3.2.2.1 pav.).



3.2.2.1 pav. saulės elektrinės atsijungimo įtaka rotoriaus kampo nuokrypiui

Sinchroninio generatoriaus rotoriaus kampo nuokrypis atsijungus saulės elektrinei yra 0,05 rad. tai yra $2,9^\circ$. Likusiame tinkle sumažėja įtampa ir padidėja srovė.

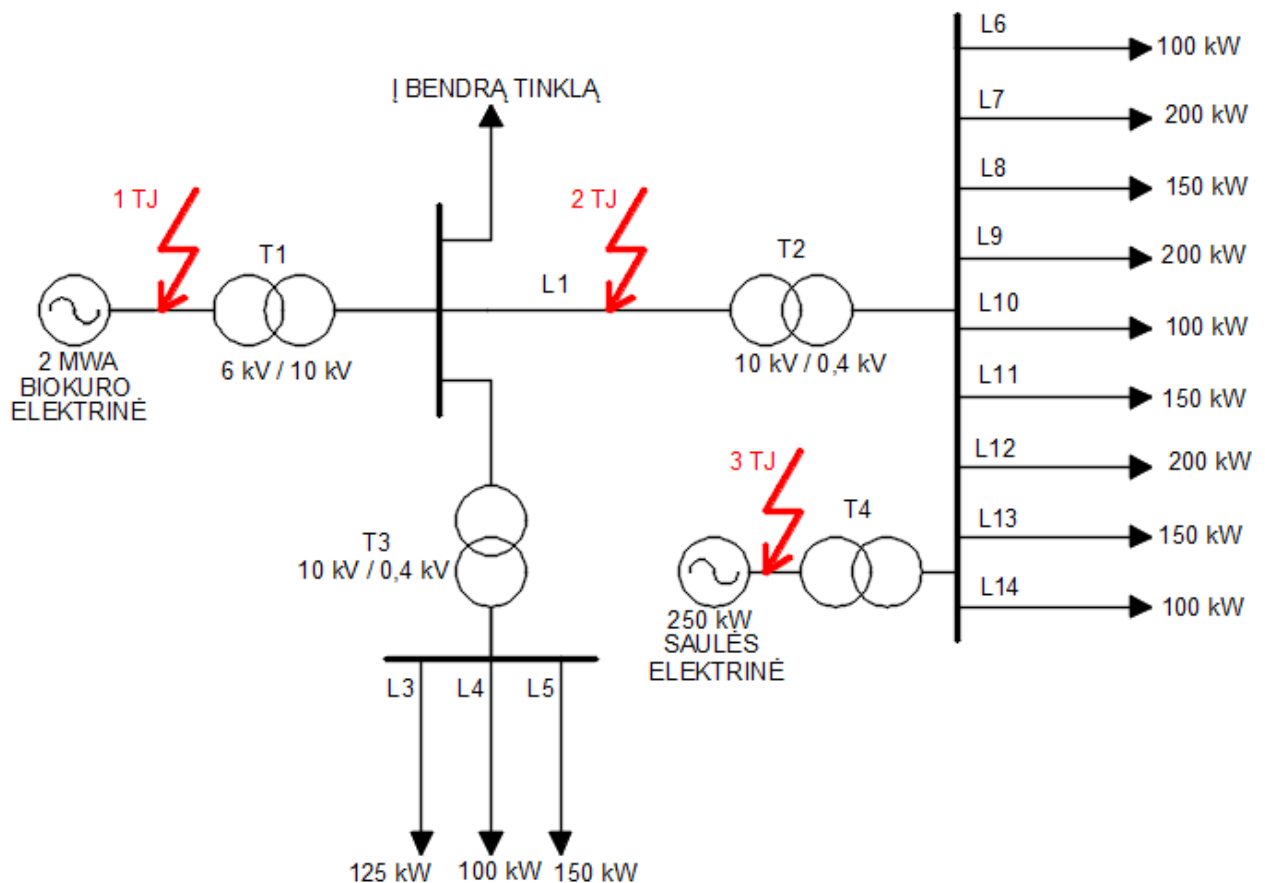
Saulės elektrinė yra 250 kW, o pagal rotoriaus kampo nuokrypį, šiuos generuojamos galios atsijungimas prilygsta 47 % apkrovos padidėjimui, tai yra 811 kW. Taigi generuojamos galios praradimas yra didesnis trikdžis už apkrovos prisijungimą ar atsijungimą.

3.2.3. 3-fazis trumpasis režimas

Iš visų trumpųjų jungimų modeliuojamas didžiausius trikdžius visoje sistemoje sukeliantis jungimas, tai yra 3-fazis trumpasis jungimas. Šis jungimas pagal 1.5.1 paveikslą, priskiriamas avarinių režimų grupei.

Modeliuojant trumpąjį jungimą ieškomą ilgiausio laiko, kiek gali trukti trumpasis jungimas, kol sistema pasidaro nebestabili. Suradus kritinį laiką, stebimi viso tinklo pokyčiai. Trumpieji jungimai modeliuojami 3 tinklo vietose (3.2.2.1 pav.):

- ant sinchroninio generatoriaus gnybtų 1TJ;
- 10 kV įtampos linijoje 2TJ;
- prie saulės elektrinės 3TJ.



3.2.3.1 pav. Trumpųjų jungimų schema.

1 trumpasis 3-fazis jungimas

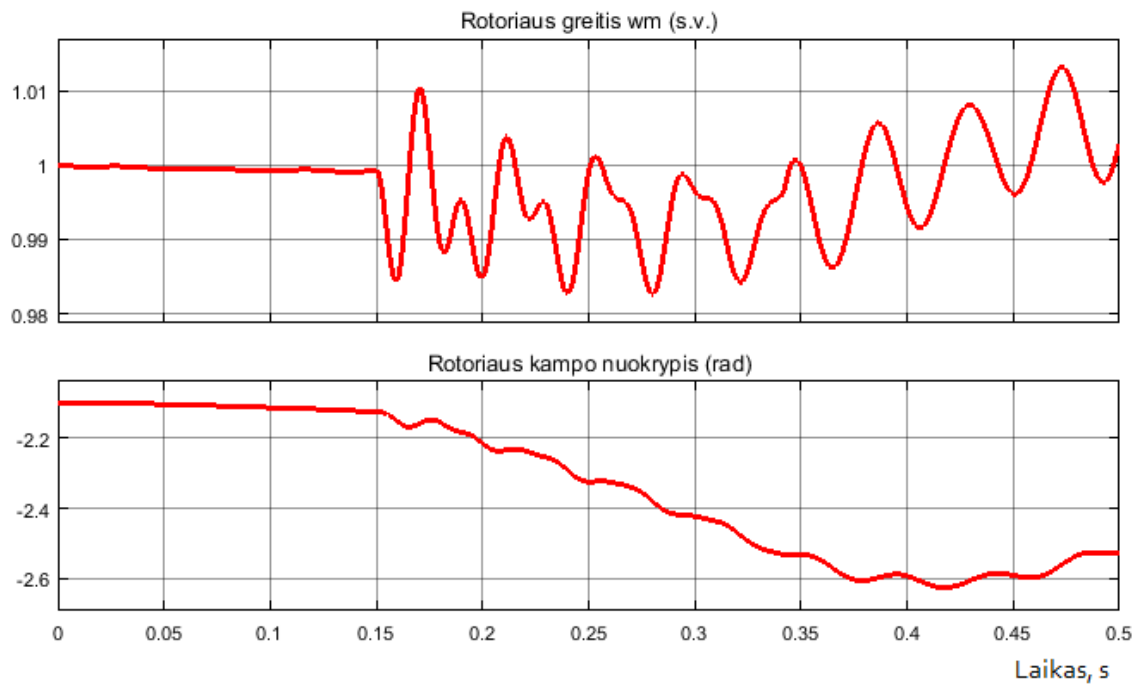
Pirmasis 3-fazis trumpasis jungimas modeliuojamas ant sinchroninio generatoriaus gnybtų. Didinant trumpojo jungimo laiką stebimas sinchroninio generatoriaus rotoriaus kampo pokytis $\Delta\delta$ (3.2.3.2 pav.).



3.2.3.2 pav. Rotoriaus kampo nuokrypio priklausomybė nuo 3-fazio trumpojo jungimo laiko

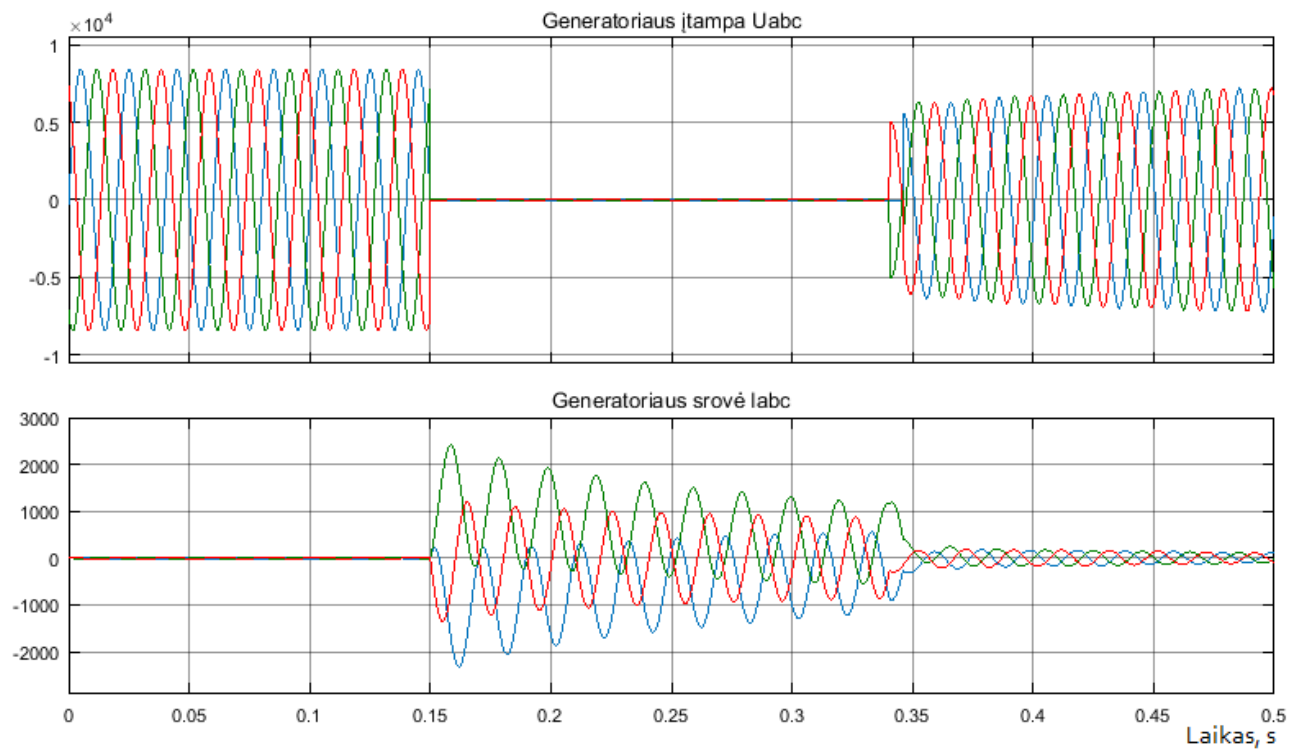
Pagal 1.4.4 skyriuje priimtą sąlygą didžiausias rotoriaus kampo pokytis gali būti 30° arba 0.52 rad. Šitas pokytis pasiekiamas, kai trumpo jungimo laikas $0,19$ s. Tai galima pamatyti iš 3.2.3.3 paveikslo, trumpasis jungimas prasideda nuo $0,15$ s.

Taigi, kai 3-fazis trumpasis jungimas vyksta ant generatoriaus gnybtų, jis turėtų būti pašalintas greičiau nei per $0,19$ s, kitu atveju sistema pasidarys nestabili, generatorius pradeda dirbti nesinchroniniu režimu.



3.2.3.3 pav. Rotoriaus kampo nuokrypis 0,52 rad.

Įvykus trifaziam trumpajam jungimui generatoriaus įtampa visą trumpojo jungimo laiką yra lygi 0, o srovė stipriai išauga (3.2.3.4 pav.).



3.2.3.4 pav. Generatoriaus įtampų ir srovų oscilogramos 3-fazio trumpojo jungimo metu.

Toliau stebima 3-fazio trumpojo jungimo įtaka visam likusiam tinklui. Iš 3.2.3.1 lentelės galima matyti įtamos ir srovės pokyčius po trumpojo jungimo.

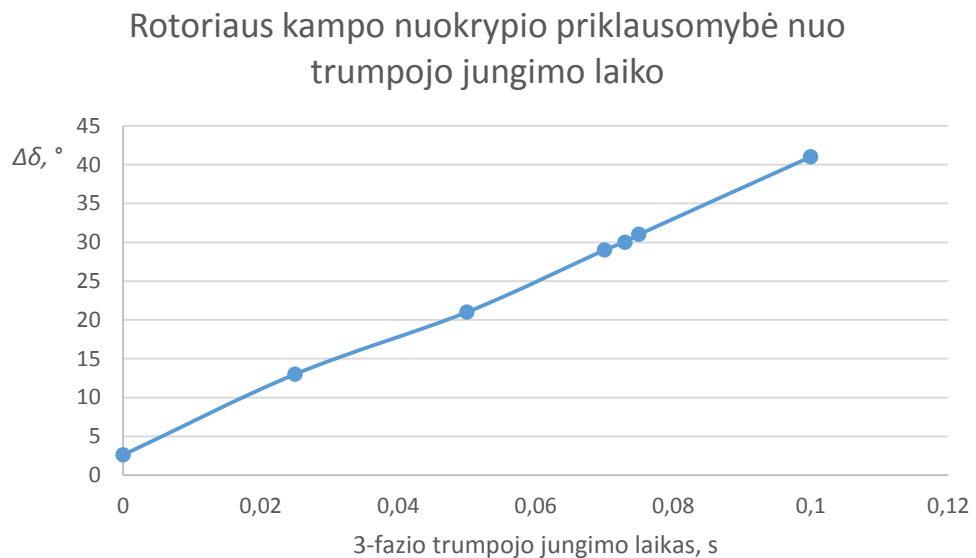
3.2.3.1 lentelė. Tinklo reakcija į 3-fazį trumpąjį jungimą 1TJ vietoje.

Matavimo vieta	Įtampos ir srovės pokytis po 3-fazio trumpo jungimo 2TJ	
	U pokytis,	I pokytis,
Generatoriaus gnybtai	= 0 V	+241 karto
T1 10 kV tinklas	-71 %	+93 karto
L1 linija	-54 %	+37 karto
T2 0.4 kV tinklas	-2,5 %	+33,5 karto
T4 tinklo pusė	-2,4 %	+16 %
Saulės elektrinės KS	-3,89 %	+11 %

Iš lentelės matyti, kad trumpojo jungimo metu visoje sistemoje sumažėja įtampa ir daug kartų išauga srovė, tačiau tolstant nuo trumpojo jungimo vietos per įtampos pakopas apkrovos link, įtampų ir srovių pokyčiai būna mažesni.

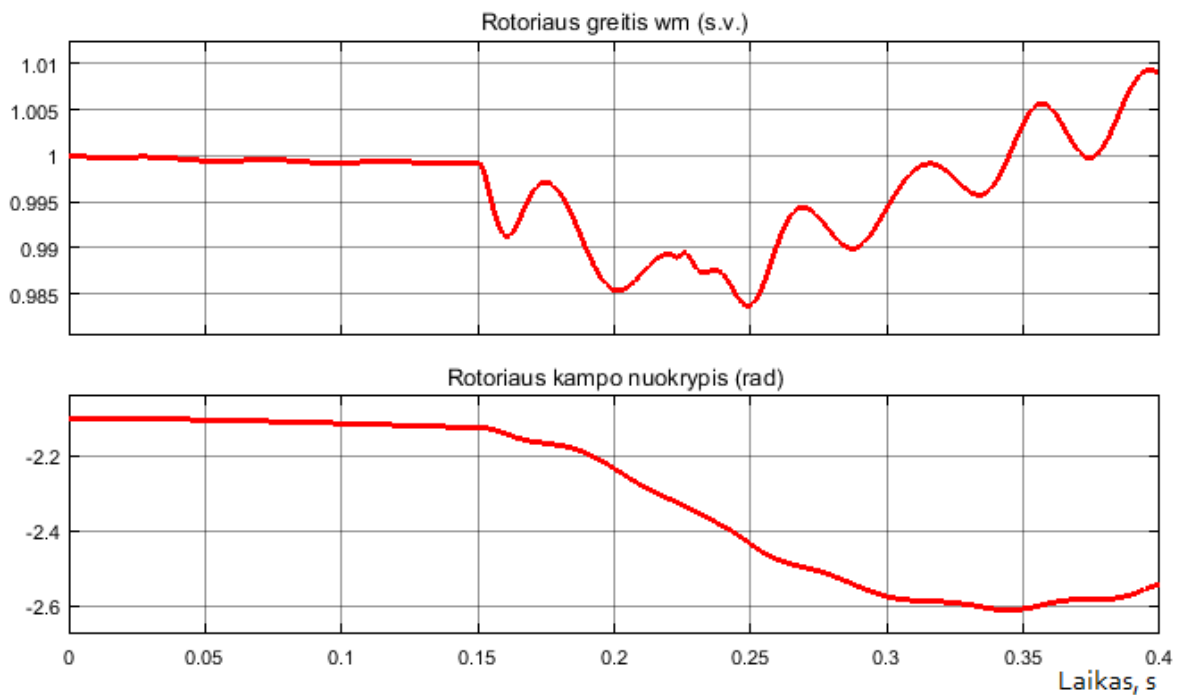
2 trumpasis 3-fazis jungimas

Antrasis 3-fazis trumpasis jungimas modeliuojamas 10 kV įtampos linijoje. Didinant trumpojo jungimo laiką stebimas rotoriaus kampo pokytis $\Delta\delta$ (3.2.3.5 pav.).



3.2.3.5 pav. Rotoriaus kampo nuokrypio priklausomybė nuo 3-fazio trumpojo jungimo laiko

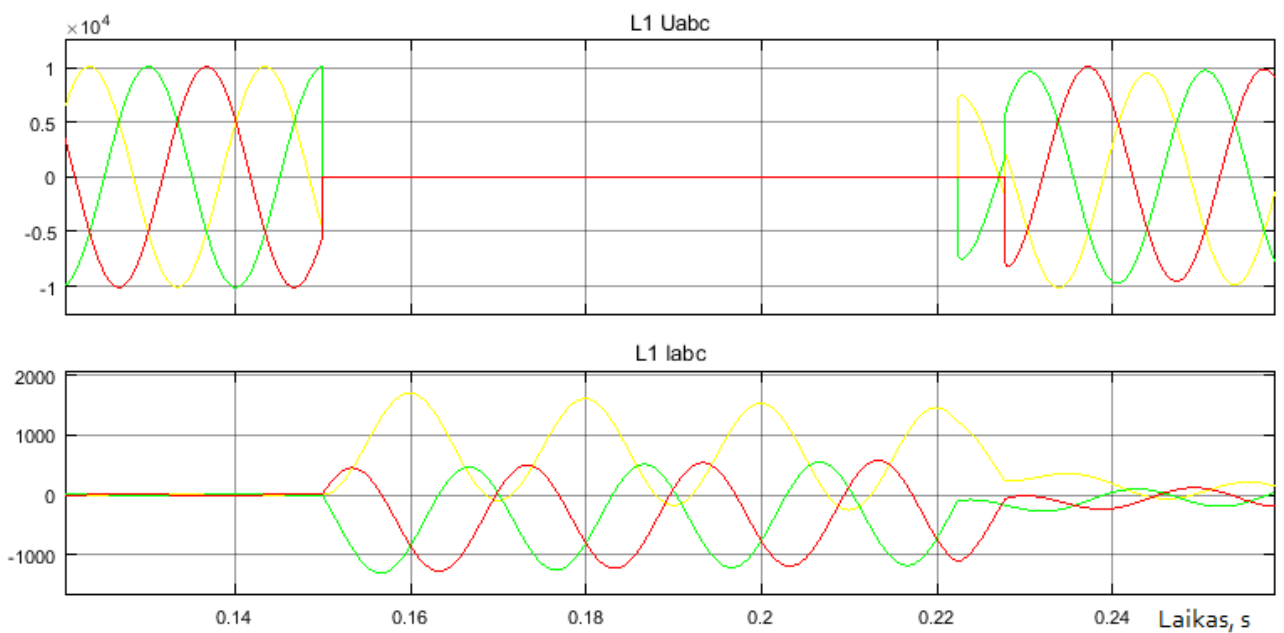
30° rotoriaus kampo nuokrypis pasiekiamas, kai trumpo jungimo laikas 0,073 s. Kaip tai atrodo galima pamatyti 3.2.3.6 paveiksle, trumpasis jungimas prasideda nuo 0,15 s.



3.2.3.6 pav. Rotoriaus kampo nuokrypis 0,52 rad. antro trumpojo jungimo metu

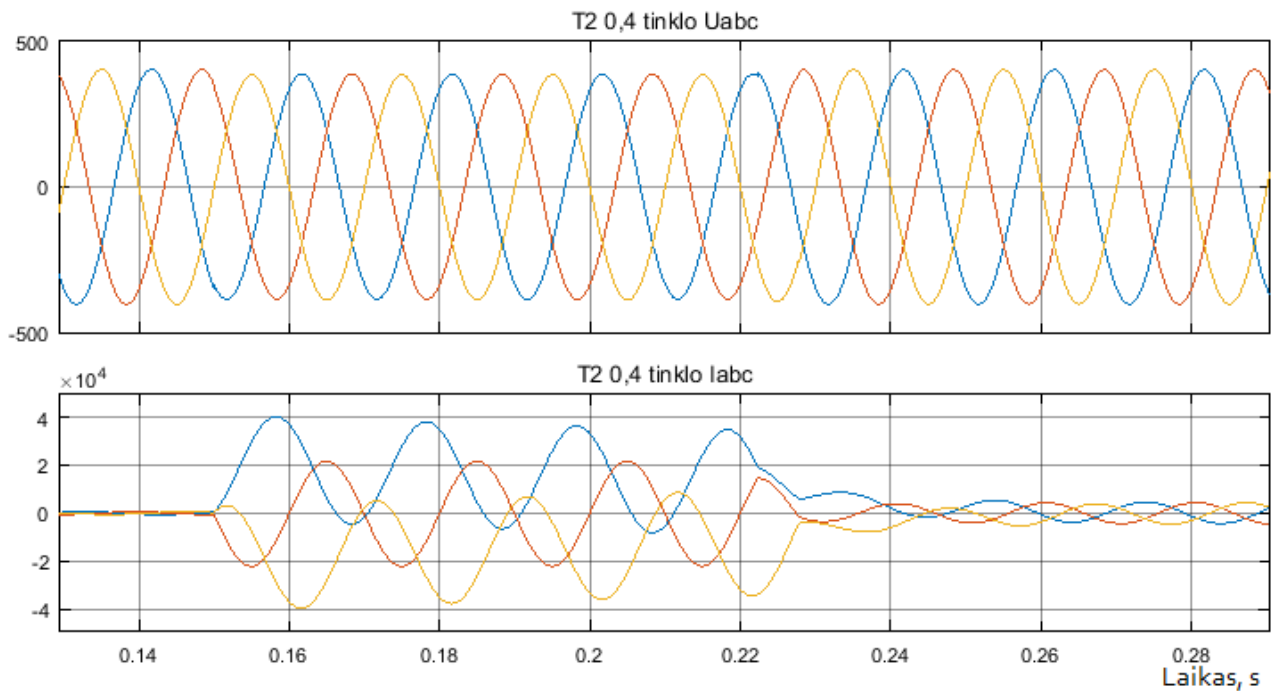
Taigi, kai 3-fazis trumpasis jungimas vyksta 10 kV įtampos linijoje, jis tinklo apsaugos įrenginiais turėtų būti pašalintas greičiau nei per 0,073 s, kitu atveju sistema pasidarys nestabili, generatorius pradeda dirbti nesinchroniniu režimu.

Įvykus trifaziam trumpajam jungimui 10 kV įtampos linijoje įtampa visą trumpojo jungimo laiką yra lygi 0, o srovė stipriai išauga (3.2.3.7 pav.). Tai normali reakcija į trumpąjį jungimą.



3.2.3.7 pav. Trumpojo jungimo vietos įtampų ir srovių oscilogramos

0,4 kV tinkle po trumpojo jungimo įtampa sumažėja 4,6 % o srovė išauga 71 karta (3.2.3.8 pav.).



3.2.3.8 pav. 0,4 kV tinklo įtampų ir srovių oscilogramos trumpojo jungimo metu.

Toliau kaip ir pirmu atveju stebima 3-fazio trumpojo jungimo įtaka visam likusiam tinklui. Iš 3.2.3.2 lentelės galima matyti įtampos ir srovės pokyčius visoje sistemoje po trumpojo jungimo.

3.2.3.2 lentelė. Tinklo reakcija į 3-fazį trumpąjį jungimą 2TJ vietoje.

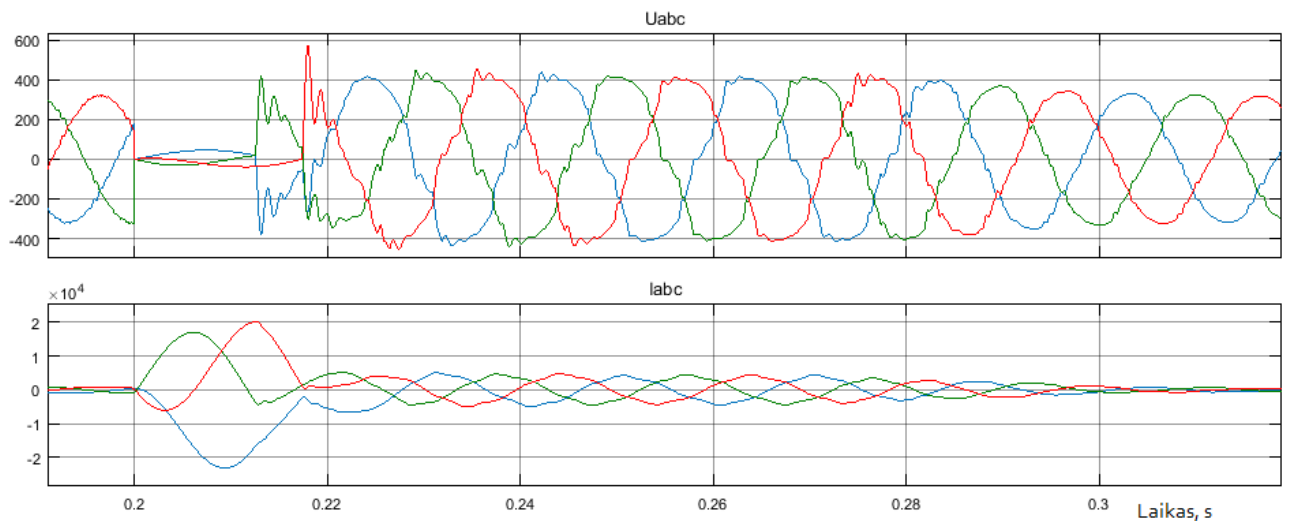
Matavimo vieta	Įtampos ir srovės pokytis po 3-fazio trumpo jungimo 2TJ	
	U pokytis	I pokytis
Generatoriaus gnybtai	-51 %	+93 karto
T1 10 kV tinklas	-68 %	+89 karto
L1 linija	= 0 V	+85 karto
T2 0.4 kV tinklas	-4,6 %	+71 karto
T4 tinklo pusė	-4,6 %	+19 %
Saulės elektrinės KS	-4,9 %	+18 %

Kai trumpasis jungimas 10 kV įtampos linijoje didžiausi įtampos ir srovės pokyčiai yra prie sinchroninio generatoriaus, o mažiausi 0,4 kV tinkle.

3 trumpasis 3-fazis jungimas

Trečiasis 3-fazis trumpasis jungimas modeliuojamas tarp saulės elektrinės ir transformatoriaus. Didinant trumpojo jungimo laiką ir stebint rotoriaus kampo pokytis $\Delta\delta$ pastebėta, kad didžiausias nuokrypis gali būti $3,2^\circ$. Tai pastebėta kai trumpojo jungimo laikas buvo 0,1 s, toliau ilginant laiką rotoriaus kampo nuokrypis nesikeitė.

Kai trumpasis jungimas vyksta prie saulės elektrinės 0,075 s laiko pastebėta, kad po trumpojo jungimo įtampa padidėja 93 V ir sinusoidės išsidraiko, taip tęsiasi 3 periodus, kol nusistovi (3.2.3.9 pav.). Toliau ilginant trumpojo jungimo laiką nusistovėjimo laikas ilgėja. Toks režimas negalimas ir nebūdingas. Todėl trumpasis jungimas prie saulės elektrinės turėtų būti pašalintas greičiau nei per 0,075 s.



3.2.3.9 pav. Įtampų ir srovių oscilogramos trumpojo jungimo vietoje.

IŠVADOS

1. Paskirstytųjų generatorių sistemos darbo režimų tyrimui pirmiausia išsiaiškinami paskirstytųjų generatorių, šiuo atveju saulės (250kV) ir biokuro elektrinių (2MVA), konstrukciniai ypatumai, valdymo struktūra ir sudaromi matematiniai modeliai.
2. Pagal praktinės dalies sudaryta paskirstytųjų generatorių sistema, kuri sumodeliuojama su „MATLAB simulink“ programa, matyti kad sistema puikiai veikia normaliam darbo režime ir sistema yra stabili. Rotoriaus kampo nuokrypis lygus nuliui, rotoriaus greitis lygus 1 s.v. Bendras harmonikų iškraipymas neviršija 8 %.
3. Toliau modeliuojant apkrovų atsijungimą ir prisijungimą sistemoje atsiranda mažas trikdys, padidėja rotoriaus kampo nuokrypis, kinta visos sistemos įtampos ir srovės. Atsiradusio trikdžio dydis priklauso nuo prarandamų arba staiga įjungiamų apkrovų dydžio. Todėl apkrovas įjungti arba atjungti nuo sistemos reikia palaiptiui didinant arba mažinant apkrovas arba prijunginėti skirtingais laiko intervalais.
4. Modeliuojant sunkius trikdžius, šiuo atveju 3-fazius trumpuosius jungimus, skirtingose tinklo vietose surasti laikai per kuriuos trumpasis jungimas automatikos įrenginiais turi būti pašalintas. Greičiausiai gedimas turi būti pašalintas 10 kV linijoje, greičiau nei per 0,073 s. To nepadarius sistema pereina į nestabilų darbo režimą, nuo ko gali sugesti įrenginiai.
5. Kai trumpasis jungimas vyksta vienoje vietoje, visoje sistemoje priklausomai kaip toli nuo trumpojo jungimo vietos, sumažėja įtampa ir išauga srovė, todėl įranga ir automatikos įrenginiai turi būti atitinkamai parinkti, kad atlaikytų trumpojo jungimo srovę ir laiku išjungtų gedimą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. G. Petrauskas, V. Adomavičius. Mokomoji knyga. „Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti“. Kaunas, KTU leidykla „Technologija“, 2012
2. V. Zaveckas. Mokomoji knyga. „Elektrotechnikos pagrindai“. Vilnius „Technika“ 2012
3. P. Kundur. “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1994
4. Elektros įrenginių įrengimo bendrosios taisyklės. Patvirtinta Lietuvos Respublikos energetikos ministro. įsakymo Nr. 1-22. 2012 m. vasario 3 d. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalActPrint?documentId=TAR.6AF8895BD875> - žiūrėta 2017-01-23.
5. V. Miškinis, E. Norvaiša. „Paskirstytieji elektros energijos gamyba Europoje ir Lietuvoje“ Lietuvos mokslų akademijos leidykla. Energetika. 2007. Prieiga per internetą http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2007/4/Ener_001_008.pdf - žiūrėta 2017-01-23.
6. R. P. Deksnys, R. Staniulis, D. Šulga. Ataskaita. „Paskirstytos generacijos integracija į elektros energetikos sistemą ir įtaka energijos tiekimo patikimumui“. Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas. Elektros sistemų katedra. 2007-12-01. Prieiga per internetą: http://www.lsta.lt/files/studijos/2007/7_Integr.pdf - žiūrėta 2017-01-23.
7. Svinkūnas G. Navickas A. Elektros energetikos pagrindai. Mokomoji knyga. Kaunas: Technologija 2011.
8. Kabelių katalogai:
Prieiga per internetą: <http://www.ecosprendimai.lt/pdf/draka%20AXPK.pdf> - žiūrėta 2017-01-23.
Prieiga per internetą: <http://www.draka.ee/public/product/AXLJ-RMF%207-12%20kV%20lit.pdf> - žiūrėta 2017-01-23.
9. Transformatoriai:
Prieiga per internetą: http://ebas.lt/file/repository/BAS_pilnas_katalogas_2014.pdf - žiūrėta 2017-01-23.