



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Relinės apsaugos panaudojimo mikrotinklo salos režimui aptikti tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Eglė Saldytė

Projekto autorė

Doc.dr. Almantas Bandza

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Relinės apsaugos panaudojimo mikrotinklo salos režimui aptikti tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Eglė Saldytė

Projekto autorė

Doc. dr. Almantas Bandza

Vadovas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Eglė Saldytė

Relinės apsaugos panaudojimo mikrotinklo salos režimui aptikti tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Eglės Saldytės, baigiamasis projektas tema „Relinės apsaugos panaudojimo mikrotinklo salos režimui aptikti tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Saldytė, Eglė. Relinės apsaugos panaudojimo mikrotinklo salos režimui aptikti tyrimas. Magistro krypties studijų baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: mikrotinklas, mikrotinklo salos režimas, salos režimo aptikimas, apsaugos.

Kaunas, 2019. 56 p.

Santrauka

Pasaulyje sparčiai didėja mikrotinklų skaičius. Dažnu atveju, mikrotinklas su paskirstytaisiais generatoriais yra prijungiamas prie vidutinės įtampos skirstomojo tinklo, norint užtikrinti stabilų elektros energijos tiekimą vartotojams. Įvykus gedimui skirstomajame tinkle, ar kitam nenumatytam atvejui, mikrotinklas pradeda veikti salos režimu, t.y., mikrotinklo generacijos šaltiniai toliau tiekia elektros energiją vartotojams nepaisant to, ar apkrova su generacija yra suderinta, ar ne ir toks scenarijus gali ne tik sugadinti vartotojų įrenginius, dėl staigių dažnio ar įtampos kitimų, tačiau taip pat kelia grėsmę tinklą prižiūrinčiam personalui. Tokiu atveju reikalingos apsaugos, kurios geba greitai ir patikimai aptikti salos režimą ir atjungti mikrotinklą nuo pagrindinio tinklo. Šio tiriamojo darbo tikslas – apžvelgti galimas salos režimo aptikimo apsaugas bei atlikti pasyvių apsaugų patikimumo palyginimą esant įvairiems tinklo gedimo atvejams.

Saldytė, Eglė. Investigation of Microgrid Islanding Detection Based on Relay Protection. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Almantas Bandza; Faculty of Electrical and Electronical Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electrical and Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: microgrid, microgrid island mode, island detection, protection.

Kaunas, 2019. 56 p.

Summary

The number of microgrids in the world is growing drastically. In many cases, microgrids based on distributed generators, are connected to a medium voltage distribution network to ensure a stable supply of electricity to consumers. In the case of a fault in the distribution network or other unforeseen events, the microgrid starts operating in the island mode, i.e., the sources of microgrid generation continue to supply electricity to consumers, regardless of whether the load with the generation is matched or not, and this scenario may not only damage the consumer devices. because of a sudden changes in frequency and voltage, but also endangers the network's maintenance staff. In this case, there is a need for protection that can detect the island mode quickly and reliably and disconnect the microgrid from the main network. The purpose of this research is to review the potential protection of the island detection and to compare the reliability of passive protection methods in case of various network faults.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Relinės apsaugos iššūkiai mikrotinkle.....	12
1.1. Mikrotinklų tipai.....	12
1.2. Pokyčiai srovių lygyje	13
1.3. Distancinių apsaugų galimybių sumažėjimas.....	13
1.4. Dvikryptis galios srautas	14
1.5. Galimi gedimų scenarijai.....	14
1.5.1. Mikrotinklas prijungtas prie pagrindinio tinklo – išoriniai gedimai	15
1.5.2. Mikrotinklas prijungtas prie pagrindinio tinklo – gedimai mikrotinkle.....	15
1.5.3. Mikrotinklas prijungtas prie pagrindinio tinklo –gedimas vartotojo pusėje	16
1.5.4. Salos režimas – gedimas mikrotinkle	16
1.5.5. Salos režimas – gedimas vartotojo pusėje	16
2. Salos režimų tipai pagal IEEE 1547.4 standartą	18
3. Salos režimo aptikimo būdai	23
3.1. Pasyvūs salos aptikimo metodai	23
3.2. Aktyvūs aptikimo metodai	28
3.3. Hibridiniai metodai.....	30
3.4. Nuotoliniai metodai	31
Skyriaus apibendrinimas	33
4. Mikrotinklo ir apsaugų modeliavimas.....	35
4.1. Mikrotinklo modelis, paremtas PQ inverterio valdymo veikimo principu.....	35
4.2. Pasyvių apsaugų modeliai	37
5. Modelio simuliacijos eiga ir rezultatai	39
5.1. Apsaugų tikrinimas, kai jungtuvas įjungiamas.....	39
5.2. Apsaugų tikrinimas, kai įvyksta gedimas pagrindiniame tinke.....	47
Skyriaus apibendrinimas	51
Išvados.....	53
Literatūros šaltiniai.....	54

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Apsaugų palyginimas	33
2 lentelė. Apsaugų suveikimo laiko palyginimas.....	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Mikrotinklo ir pagrindinio skirstomojo tinklo gedimo srovės	13
2 pav. Distancinių apsaugų suveikimo palyginimas	14
3 pav. Mikrotinklo schema su galimais gedimų scenarijais.....	15
4 pav. Lokali sala	18
5 pav. Mikrotinklo sistema prijungta prie skirstomojo tinklo per J1 jungtuvą	19
6 pav. Antrinė sala	19
7 pav. Šoninė sala.....	20
8 pav. Grandinės sala	20
9 pav. Pastotės šynų sekcijos sala	21
10 pav. Pastotės sala.....	21
11 pav. Greta esančios grandinės sala.....	22
12 pav. Mikrotinklas prijungtas prie skirstomojo tinklo	23
13 pav. Sistemos dažnio apskaičiavimo modelis	25
14 pav. Supaprastinta ROCOF apsaugos schema	26
15 pav. Įtampos vektorių kampas; a) prieš mikrotinklo atsijungimą nuo tinklo, b) atsijungimo momentu	27
16 pav. PQ kontrolės veikimo principas	35
17 pav. PQ valdymo schema.....	35
18 pav. Prie pagrindinio tinkle prijungto mikrotinklo modelis Matlab Simulink programoje	36
19 pav. Mikrotinklo veikimas normaliomis sąlygomis.....	36
20 pav. Dažnio padidėjimo/sumažėjimo apsaugos modelis.....	37
21 pav. Įtampos padidėjimo/sumažėjimo apsaugos modelis	37
22 pav. Vektorių poslinkio apsaugos modelis	38
23 pav. ROCOF apsaugos modelis	38
24 pav. Bendrai apjungtos apsaugos	38
25 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vietinė apkrova didesnė nei vietinė gamyba	40
26 pav. Įtampos relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba	40
27 pav. Dažnio relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba.....	41
28 pav. ROCOF relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba.....	41
29 pav. Vektorių poslinkio relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba	42
30 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba	42
31 pav. Įtampos relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba.....	43
32 pav. Dažnio relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba	43
33 pav. ROCOF relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba	44
34 pav. ROCOF relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba	44
35 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vietinė apkrova sutampa su vietine gamyba	45
36 pav. Įtampos, dažnio, ROCOF ir vektorių poslinkio relių suveikimas, kai vietinė gamyba sutampa su vietine apkrova.....	46
37 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vienfazis trumpasis jungimasis žeme 10 kV pusėje	47

38 pav. ROCOF ir vektorių poslinkio apsaugų suveikimas, kai kai vienfazis trumpasis jungimas su žeme 10 kV pusėje.....	47
39 pav. Dažnio apsaugų suveikimas, kai kai vienfazis trumpasis jungimas su žeme 10 kV pusėje.	48
40 pav. Įtampos apsaugų suveikimas, kai vienfazis trumpasis jungimas su žeme 10 kV pusėje	48
41 pav. Apsaugų suveikimas dvifazio ir dvifazio su žeme trumpojo jungimo metu	49
42 pav. Apsaugų suveikimas trifazio ir trifazio su žeme trumpojo jungimo metu	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

CERTS - JAV elektrinių patikimumo technologijų sprendimų konsorciumas;

MG – mikrotinklas;

DG – paskirstytosios generacijos šaltinis;

NDZ – neaptikimo zona;

ROCOF – dažnio kitimo greičio apsauga;

PCC – bendrojo prijungimo taškas;

PLCC – linijos ryšio komunikacija;

SPD – signalas, sukurtas atjungiant;

THD – suminis harmonikų iškraipymas;

ROCOFOP - dažnio kitimo greitis priklausomai nuo galios;

ADF – aktyvus dažnio poslinkis;

SFS – *Sandia* dažnio poslinkis;

IM – varžos matavimai;

SMS – slankiojo režimo dažnio poslinkis.

Įvadas

Pastaraisiais metais mokslininkai vis daugiau dėmesio skiria paskirstytosios generacijos ir mikrotinklų sistemoms, kurias sudaro vienas ar keli atsinaujinantys šaltiniai, kaupiklis, ir / ar generatorius bei vartotojai. Kadangi, skirtingos šalys dėmesį skiria skirtingiems mikrotinklo aspektams, visame pasaulyje nėra visuotinio mikrotinklo sąvokos apibrėžimo. Plačiausiai priimtą apibrėžimą pateikia JAV elektrinių patikimumo technologijų sprendimų konsorciumas (CERTS), kuriame teigiama, kad vienas iš pagrindinių mikrotinklo bruožų yra jos gebėjimas padidinti naujų energijos šaltinių panaudojimo lygį ir padidinti energijos tiekimo patikimumą esant kritinėms apkrovoms. Viena didžiausių problemų, atsiradusių mikrotinklui, kuris veikia sujungtas su pagrindiniu tinklu, yra salos režimas. Šio režimo metu, mikrotinklui atsijungus nuo pagrindinio tinklo, paskirstytieji mikrotinklo generatoriai toliau tiekia elektros energiją. Kadangi, salos režimas gali būti tiek planuotas, tiek neplanuotas, tai sukuria naują terpę tinklo apsaugų analizėms.

Darbo problema:

- Įvykus gedimui tinkle, ar kitam nenumatytam atvejui, mikrotinklas pradeda veikti salos režimu, t.y., mikrotinklo generacijos šaltiniai toliau tiekia elektros energiją vartotojams ir toks scenarijus gali ne tik sugadinti vartotojų įrenginius, dėl staigių dažnio ar įtampos kitimų, tačiau taip pat kelia grėsmę tinklą prižiūrinčiam personalui. Tokiu atveju reikalingos apsaugos, kurios geba greitai ir patikimai aptikti salos režimą ir izoliuoti mikrotinklą nuo pagrindinio tinklo.

Darbo tikslai:

- išsiaiškinti mikrotinklų relinės apsaugos iššūkius;
- aprašyti galimus mikrotinklo salos tipus pagal IEEE 1547.4 standartą;
- išanalizuoti salos režimo tipus;
- aprašyti salos režimo aptikimo būdus;
- sumodeliuoti mikrotinklą veikiančią sujungtą su pagrindiniu tinklu;
- sumodeliuoti pasyvias apsaugas salos režimui aptikti;
- atlikti pasyvių apsaugų suveikimo palyginimą esant įvairiems tinklo atsijungimo ir gedimo scenarijams.

1. Relinės apsaugos iššūkiai mikrotinkle

Mikrotinklo sąvoka apima žemos įtampos skirstymo sistemas su paskirstytais energijos generatoriais ir valdomas apkrovas, kurios gali veikti prijungtos prie vidutinės įtampos tinklo arba salos režime. Gedimų srovės tarp režimo, kai mikrotinklas yra sujungtas su tinklu ir kai dirba salos režime, yra skirtingos. Mikrotinkle veikiančios relės turi skirtis nuo įprastinio tinklo apsauginių relių dėl to, kad:

- Mikrotinklas dažnai susideda iš kelių atsinaujinančių energijos šaltinių, ko pasekoje, srovės gali tekėti dvejomis kryptimis. Tuo tarpu, tradiciniame tinkle, srovė teka viena kryptimi, t.y., nuo generatoriaus iki vartotojo.
- Didžioji dalis mikrogeneratorių į tinklą yra pajungti naudojant inverterius. Didelė dalis didelės galios elektronikos atsiradusi tinkle iššaukia naujus gedimus, kurie neegzistavo tradiciniame tinkle.
- Mikrotinklas gali veikti dviejuose režimuose: prijungtas prie vidutinės įtampos tinklo arba salos režimu. Relinė apsauga privalo aptikti gedimus mikrotinklo viduje abiem režimais – tiek salos, tiek sujungto su tinklu, užtikrinant apsaugų greitį, selektyvumą ir patikimumą. [2]

Salos režimas yra gan naujas reiškinys, atsirandantis dėl vis didėjančios atsinaujinančių energijos šaltinių integracijos į elektros tinklą. Nacionaliniai ir tarptautiniai standartai (pvz., IEEE st. 929 ÷ 2000 ir GB / T 19939-2005) aprašo, kad visi fotovoltinių elektrinių inverteriai turi turėti apsaugą nuo salos režimo ir taip pat suteikė didžiausią leistiną inverterio išjungimo laiką, kai mikrotinklas atsijungia nuo pagrindinio tinklo. Būtina, kad apsaugos nuo salos režimo, išjungtų naujus energijos šaltinius per 2 sekundes, išskyrus atvejus, kai atsiranda didelis viršįtampis, kuris turi būti aptiktas per 0,1 s. [1]

1.1. Mikrotinklų tipai

Remiantis charakteristikomis, kurios sudaro mikrotinklo pagrindą, galima būtų išskirti sekančius tipus:

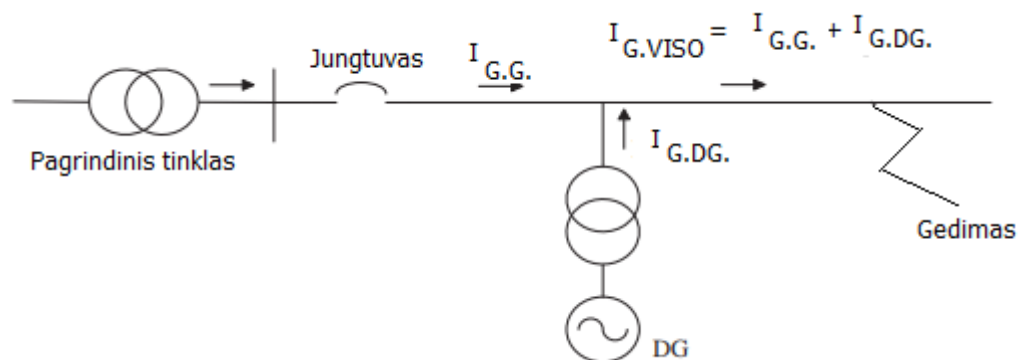
- Miesto mikrotinklai. Šioje kategorijoje mikrotinklo linijos yra urbanizuotose vietovėse, kuriose taip pat gausu gamybinių įmonių, fabrikų. Generatoriai yra nuolat apkrauti, atstumai nuo apkrovos iki generacijos šaltinio nedideli ir disbalanso laipsnis nėra didelis.
- Kaimo vietovių mikrotinklai. Šioje kategorijoje generatoriai yra naudojami retai apgyvendintose vietovėse, apkrova tampa išskaidyta ir nepastovi. Generacijos šaltiniai dažnu

atveju gan nutolę nuo vartotojų. Atsiranda gan dideli tinklo įtampos ir dažnio svyravimai dėl didelių atstumų nuo vartotojų iki generacijos bei nepastovios apkrovos.

- Nepriklausomi mikrotinklai (*angl. off – grid*). Dažnu atveju toks mikrotinklas būna geografiškai nutolęs nuo tradicinio tinklo ir neturi galimybės būti prijungtas prie jo esant nepastovioms elektros energijos tiekimo sąlygoms. Pagal šį apibrėžimą, nepriklausomas mikrotinklas visuomet dirba, vadinamoju, salos režimu, todėl, jam nėra taikomi griežti reikalavimai ar apibrėžimai. [5]

1.2. Pokyčiai srovių lygyje

Kai prie skirstomojo tinklo pajungiamas didelis kiekis mažų paskirstytų generacijos šaltinių (DG), naudojančių sinchroninius arba indukcinis generatorius, jie pakeičia gedimų srovės lygį, nes abiejų tipų generatoriai prisideda prie gedimo srovių. Naudojant inverterio sąsajas su DG įrenginiais, gedimo srovė yra ribojama inverterio. Kadangi, gedimo srovė nėra didelė, lyginant su apkrovos srovėmis, kai kurios relės nesuveikia, o kitos, kurios sureaguoja į gedimą, veikia su laiko atidėjimu. Nenustatytas gedimas plinta sistemoje ir gali sugadinti įrangą. Gedimų varža taip pat mažėja, kai DG yra prijungti prie tinklo lygiagrečiai su kitais įrenginiais. Kai gedimai atsiranda toliau nuo bendrojo prijungimo taško, tiek pagrindinis šaltinis, tiek DG prisideda prie gedimo srovės. Relė, esanti virš bendrojo prijungimo taško, matuoja gedimo srovę, kurią tiekia tinklas. Faktinė gedimo srovė skiriasi, relės neveiks tinkamai ir bus koordinavimo problemų. [4],[6]

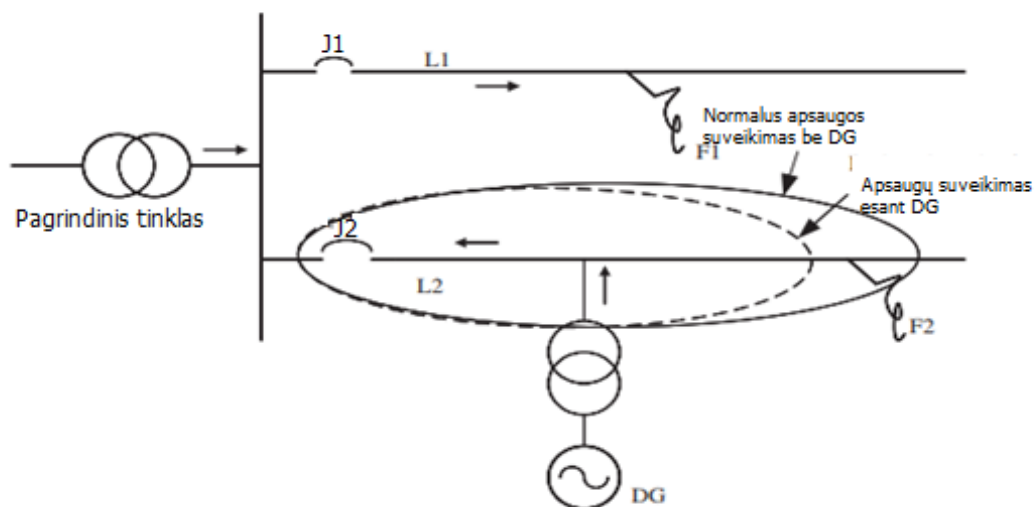


1 pav. Mikrotinklo ir pagrindinio skirstomojo tinklo gedimo srovės

1.3. Distancinių apsaugų galimybių sumažėjimas

Distancinės relės pasiekiamumas priklauso nuo atstumo tarp relės vietos ir gedimo taško, didžiausias atstumas reiškia minimalią gedimo srovę, kuri aptinkama. Kai klaida atsiranda pasroviui nuo šynu, prie kurių paskirstytasis generatorius prijungtas prie elektros tinklo, varža, išmatuota relės kuri yra

tinklo pusėje, yra didesnė nei tikroji gedimo varža. Tai turi įtakos relijų gradavimui ir sukelia vėlavimą arba kartais relė net nesuveikia.[4], [6]



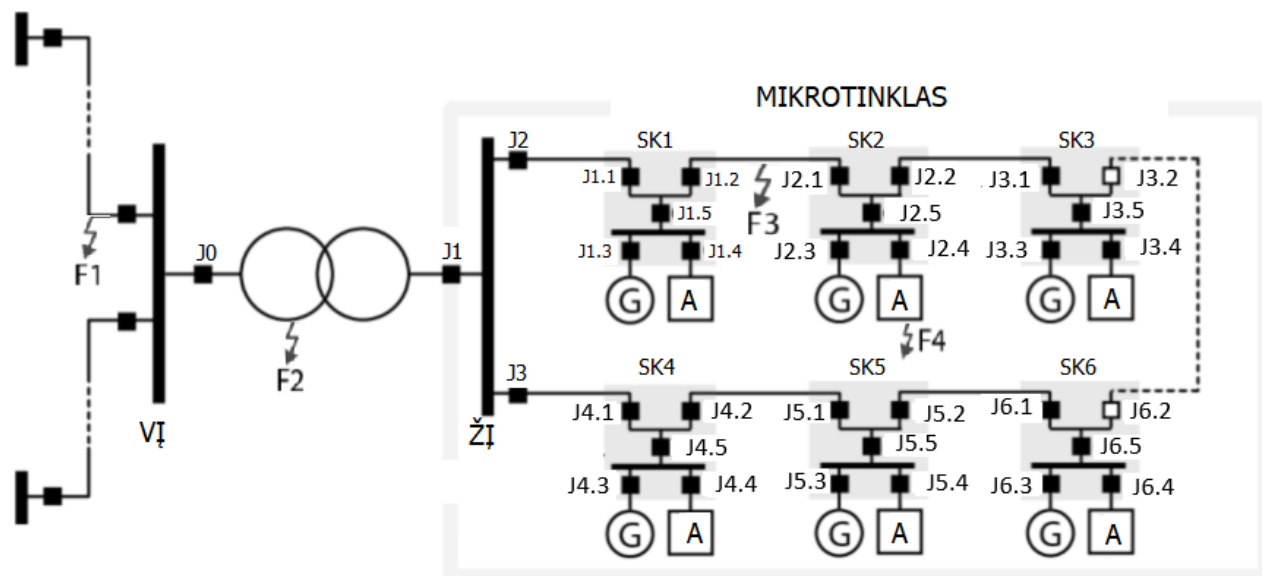
2 pav. Distancinių apsaugų suveikimo palyginimas

1.4. Dvikryptis galios srautas

Pagrindinis iššūkis apsaugant mikrotinklą atsiranda dėl to, kad galia gali tekėti abiem kryptimis kiekvienoje mikrotinklo linijoje. Šaltiniai yra abiejose apkrovos pusėse, dėl kurių galia teka priešinga kryptimi – iš dviejų šaltinių į apkrovą. Galios srautas taip pat keičia savo kryptį skirstomajame tinkle, kai vietinė gamyba viršija vietinį vartojimą. Atvirkštinis galios srautas taip pat gali sukelti energijos kokybės problemas, dėl kurių gali kisti įtampa.[5]

1.5. Galimi gedimų scenarijai

Žemiau pateikta mikrotinklo schema su galimais gedimų variantais. Schemoje vaizduojamos pajungtos dvi žemos įtampos linijos prie vidutinės įtampos šynų per įtampos transformatorių. Kiekviena linija turi po tris skirstyklas, kurios sujungia vietinius paskirstytuosius generatorius su apkrovomis prie linijos. Visi žemosios įtampos jungtuvai apsaugoti nuo srovės padidėjimo. Bus analizuojami keturi galimi gedimo variantai: du išoriniai (F1 ir F2) bei du vidiniai (F3,F4).



3 pav. Mikrotinklo schema su galimais gedimų scenarijais

1.5.1. Mikrotinklas prijungtas prie pagrindinio tinklo – išoriniai gedimai

F1 gedimo atveju, pagrindinis tinklas privalo susitvarkyti su gedimu. Jei mikrotinkle yra jautrių apkrovų, jungtuvas J1 turi izoliuoti mikrotinklą ne lėčiau nei per 70ms. Taip pat J1 jungtuvo pagalba mikrotinklas turi būti izoliuojamas, jei vidutinės įtampos tinkle apsaugų nėra arba jos nesuveikė.

F1 gedimo aptikimas, su bendrąja srovės padidėjimo rele, gali būti problemiškas tuo atveju, kai daugelis mikrošaltinių yra prijungti naudojant galios elektronikos sąsajas, turinčias įmontuotą gedimo srovės apribojimą. Paprastai jie sugeba tiekti 1.1-1.2 apskaičiuotos gedimo srovės, išskyrus atvejus, kai keitikliai yra specialiai suprojektuoti taip, kad užtikrintų dideles gedimo sroves. Šie skaičiai yra gerokai mažesni už trumpojo jungimo srovę, kuri gali atsirasti pagrindiniame tinkle. Kryptinė srovės padidėjimo relė, veikianti J1, yra galimas sprendimas tik tuo atveju, jei srovė naudojama gedimų nustatymui. Siekiant padidinti relės jautrumą, atvirkštinės srovės nustatymas apibrėžiamas kaip visų prijungtų paskirstytųjų energijos šaltinių gedimo srovių suma. Ši vertė gali skirtis, jei bus daug skirtingų paskirstytųjų generatorių tipų. Taigi, relės nustatymai turi būti nuolat stebimi ir pritaikomi pagal realią situaciją,

F2 gedimo atveju, transformatoriaus srovės padidėjimo apsauga turi pašalinti gedimą atidarydama jungtuvą J0. J1 jungtuvas atidaromas vienu metu su J0.[3]

1.5.2. Mikrotinklas prijungtas prie pagrindinio tinklo – gedimai mikrotinkle

F3 gedimo atveju, mikrotinklo apsauga turi atjungti mažiausią galimą žemos įtampos linijos dalį J.1.2 ir J.2.1 jungtuvo pagalba. J.1.2 jungtuvas įsijungia dėl didelės trumpojo jungimo srovės iš vidutinės

įtampos tinklo. Jeigu jungtuvas J1.2 neįsijungia, F3 gedimas turi būti pašalintas J1.1 jungtuvo pagalba, kuris yra įrengtas tam atvejui, jeigu J1.2 nesuveiktų (kaip pagalbinė apsauga). Tačiau, J1.1 srovės padidėjimo apsaugos relės jautrumas gali būti potencialiai sutrikdytas tuo atveju, kai paskirstytieji generatoriai yra sumontuoti ir įjungti SK1 skirstykloje (t.y., tarp J1.1 ir F3 gedimo). Tuo atveju, gedimo srovė tekanti per J1.1, bus mažesnė. Šis efektas vadinamas apsaugos aklumu ir tai gali nulemti J1.1 jungtuvo suveikimo vėlavimą dėl gedimo srovės perėjimo iš apibrėžtos laiko dalies į atvirkštinio laiko relės išjungimo charakteristiką. Paveluotas gedimo šalinimas sukelia nereikalingą vietinių paskirstytųjų generatorių atjungimą (paprastai mažos galios dyzeliniai generatoriai turi labai mažą inerciją ir gali prarasti sinchronizaciją, jei gedimas aptinkamas per lėtai). [3]

1.5.3. Mikrotinklas prijungtas prie pagrindinio tinklo –gedimas vartotojo pusėje

F4 gedimo atveju, iš pagrindinio tinklo, kartu su paskirstytųjų generatorių srove, teka didelė trumpojo jungimo srovė. Šiuo atveju turi suveikti jungtuvas J2.4. Dažnai jungtuvo vietoje yra saugiklis, kuris yra įvertintas taip, kad būtų užtikrintas trumpiausias įmanomas gedimo vietos izoliavimo laikas. Tuo atveju, jeigu nesuveiktų J2.4 jungtuvas, skirstykla SK2 būtų izoliuojama J2.5 pagalba ir tokiu atveju, vietiniai paskirstytieji generatoriai būtų atjungti nuo tinklo. Šiame scenarijuje nėra numatytos jokios jautrumo ar selektyvumo problemos.[3]

1.5.4. Salos režimas – gedimas mikrotinkle

Mikrotinklas veikia salos režimu tada, kai jungtuvu J1 arba bet kuriuo kitu jungtuvu, kuris yra arčiausiai žemos įtampos linijos, atjungia apkrovą su paskirstytuoju generatoriumi nuo pagrindinio tinklo. Šis režimas pasižymi tuo, kad trumpojo jungimo srovė, ateinanti iš pagrindinio tinklo, nepasiekia mikrotinklo segmento dirbančio salos režime. F3 gedimo atveju, srovės padidėjimo apsaugos relės turėtų būti pakeistos iš vienkrypčių į dvikryptes, kadangi gedimo srovės gali tekėti iš abiejų pusių. Jeigu jungtuvas J1.2 ir J2.1 naudoja bendrus nustatymus, kurie yra parinkti režimui, kuomet mikrotinklas dirba kartu su tinklu, gali atsirasti selektyvumo problemos ir taip gali būti sunku aptikti F3 gedimą - gedimo srovė gali pereiti nuo nustatytos laiko dalies į relės išjungimo charakteristikos atvirkštinio laiko dalį.[3]

1.5.5. Salos režimas – gedimas vartotojo pusėje

F4 gedimo atveju, atsiranda maža trumpojo jungimo srovė iš vietinių paskirstytųjų generatorių. Iš tinklo jokia trumpojo jungimo srovė neatiteka. Tačiau jungtuvo J2.4 nustatymai sukonfiguruoti mikrotinklo darbo režimui kartu su pagrindiniu tinklu. Tai reiškia, kad nustatyti dydžiai bus kiek didesni nei vardinė apkrovos srovė. Tai užtikrina, kad vartotojas bus atjungtas ir tuo atveju, jei tik

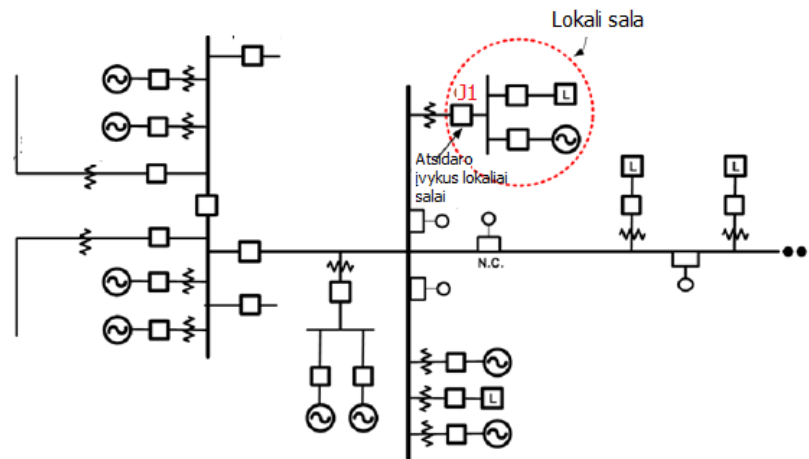
paskirstytieji generatoriai su inverterio sąsaja veiks mikrotinkle. Jeigu jungtuvas J2.4 nesuveikia, skirstykla SK2 turi būti izoliuota naudojant J2.5 jungtuvą su kryptine srovės rele. [3]

2. Salos režimų tipai pagal IEEE 1547.4 standartą

Mikrotinklo, su integruotais paskirstytaisiais generatoriais, salos režimo veikimo konfigūracijų yra įvairių. Šiame skyriuje bus aprašomos septynios planuotos salos režimo konfigūracijos pagal IEEE 1547.4 standartą, kurios apima didžiąją dalį galimų scenarijų.

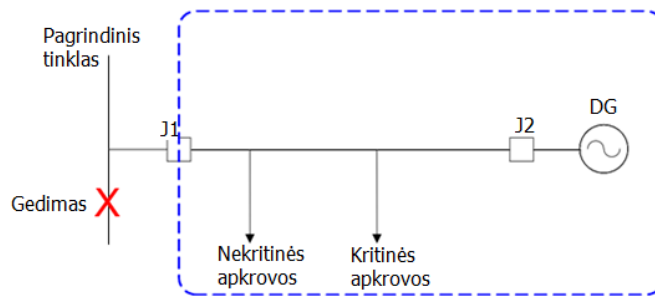
Lokali salos režimas

Lokali mikrotinklo sistema yra sukurta iš vietinės gamybos ir vietinės apkrovos. Ši sistema turi tik vieną prijungimo tašką su tinklu ties jungtuvu J1. Įvykus gedimui pagrindiniame tinkle, mikrotinklo generacijos šaltiniai turi toliau tiekti elektros energiją tik vietinei apkrovai. Įvykus neplanuotam mikrotinklo atsijungimui nuo pagrindinio tinklo (įvykus gedimui ar pan.), tinklo operatorius turi būti kuo greičiau išpėtas apie šį scenarijų ir stebėti, ar mikrotinklo generatoriai laiku atsijungė nuo pagrindinio tinklo. [7]



4 pav. Lokali sala

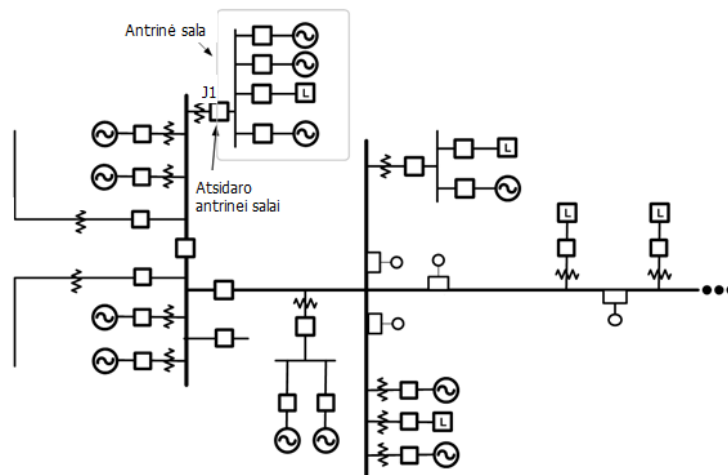
Įvykus gedimui pagrindinio tinklo pusėje, tinklo operatorius tikisi, jog paskirstytieji generatoriai, esantys lokaliaje saloje, atsijungs nuo pagrindinio tinklo. Žemiau pateiktame paveikslėlyje matyti, kad įvykus gedimui tinkle, jungtuvas J1 įsijungs prieš generatoriaus jungtuvą J2. Tokiu atveju, vietinė mikrotinklo generacija toliau tieks elektros energiją vietiniam mikrotinklo vartotojui. [7]



5 pav. Mikrotinklo sistema prijungta prie skirstomojo tinklo per J1 jungtuvą

Antrinės salos režimas

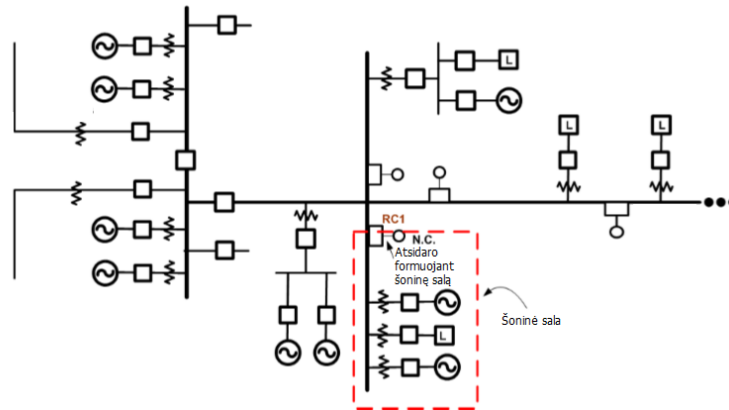
Kuomet keli paskirstytosios generacijos šaltiniai ir vietinė apkrova suformuoja mikrotinklą antrinėje transformatoriaus pusėje ir įvykus gedimui pagrindiniame tinkle ar mikrotinklui atsijungus nuo pagrindinio tinklo, ties jungtuvu J1, susiformuoja antrinės salos režimas. Prie vienos transformatoriaus antrinės apvijos pusės gali būti prijungti keli tokio pobūdžio mikrotinklai. Salos režimo metu tokios konfigūracijos mikrotinklui būdingi vietiniai kaupikliai. [7]



6 pav. Antrinė sala

Šoninės salos režimas

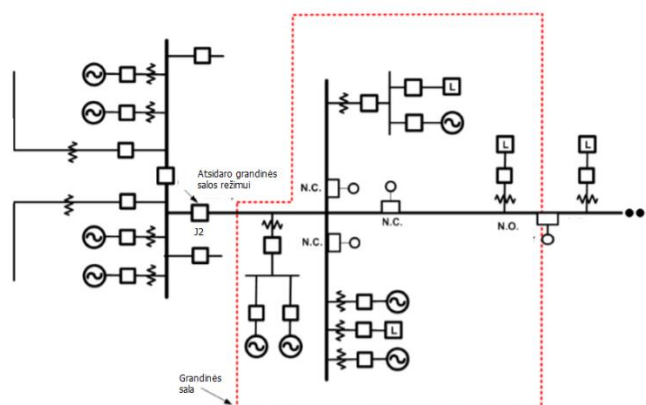
Ši mikrotinklą sudaro keli paskirstytieji generatoriai, kurie tiekia vartotojui elektros energiją iš dviejų pusių. Kuomet įvyksta gedimas tinkle, šoninis komutavimo įrenginys RC1 (jungtuvas, sekcionavimo įrenginys) atjungia mikrotinklą nuo pagrindinio tinklo taip sudarydamas šoninę salą. [7]



7 pav. Šoninė sala

Grandinės salos režimas

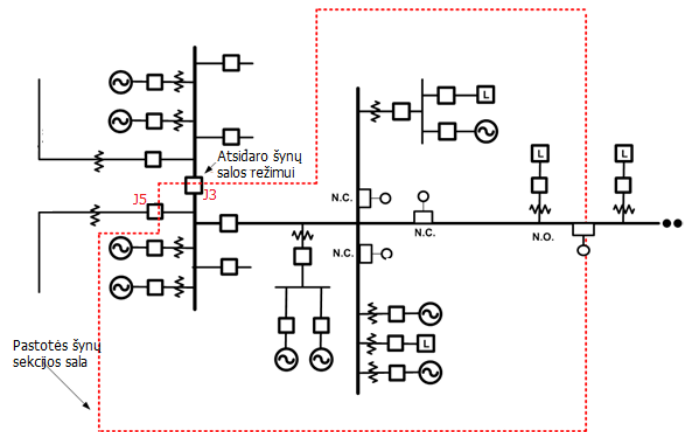
Šiuo atveju, sala susidaro iš apkrovos, kuri normaliomis sąlygomis yra aptarnaujama iš vienos paskirstymo grandinės. Praradus elektros energijos tiekimą iš pastotės pusės, mikrotinklas gali būti atjungtas jungtuvo J2 pagalba.



8 pav. Grandinės sala

Pastotės šynų sekcijos salos režimas

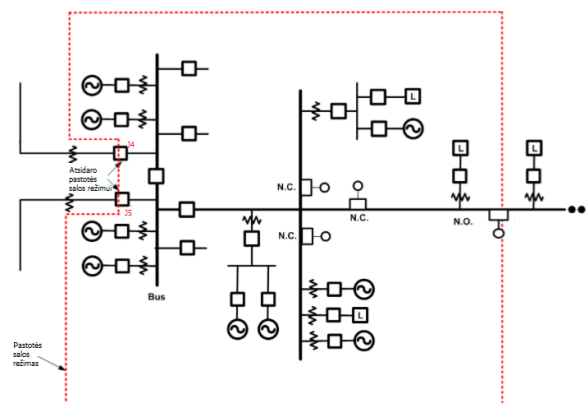
Įvykus gedimui vienoje iš šynų sekcijų, kuomet mikrotinklas yra aptarnaujamas iš abiejų sekcijų, formuojasi pastotės šynų sekcijos sala. Šis salos režimas įsijungia tuomet, kai žemos įtampos pusėje esantis jungtuvas J5 gavęs gedimo signalą įsijungia. Jungtuvas J3 šiuo atveju gali būti tiek įjungtas, tiek išjungtas, kadangi salos režime lieka didelė dalis tinklo, su paskirstytaisiais generatoriais bei kaupikliais.[7]



9 pav. Pastotės šynų sekcijos sala

Pastotės sala

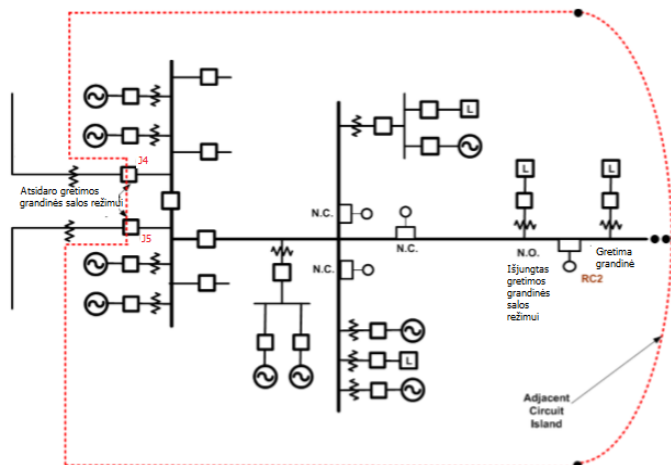
Pastotės saloje, sala susidaro iš apkrovos, kurią paprastai aptarnauja viena pastotė. Ši sala gali būti naudojama, kai skirstomoji pastotė neveikia arba kai vienas transformatorius neveikia, o likęs transformatorius negali tiekti visos apkrovos. Ši sala gali būti naudojama perkrovos arba įtampos problemoms, susijusioms su pastotės tiekimo sistemomis, sumažinti. [7]



10 pav. Pastotės sala

Greta esančios grandinės salos režimas

Gretimose grandinėse saloje apkrova iš gretimos grandinės gali būti aptarnaujama iš salos dalies grandinės. Tai užtikrina aptarnavimą, kai prarandama gretimą grandinę ir prarandamas elektros energijos tiekimas iš transformatorinės pastotės pusės. [7]



11 pav. Greta esančios grandinės sala

3. Salos režimo aptikimo būdai

Salos režimą galima suskirstyti į planuojamą ir neplanuojamą. Planuojamas salos režimas yra tada, kai mikrotinklas, nors ir atjungtas nuo pagrindinio tinklo, toliau geba tiekti kokybišką elektros energiją vartotojams. Kitaip tariant, tai valdomas darbo režimas. Neplanuotas salos režimas yra nepageidaujamas įvykis, atsirandantis dėl linijos išjungimo, įrangos gedimo, žmogiškųjų klaidų ir pan.[19]

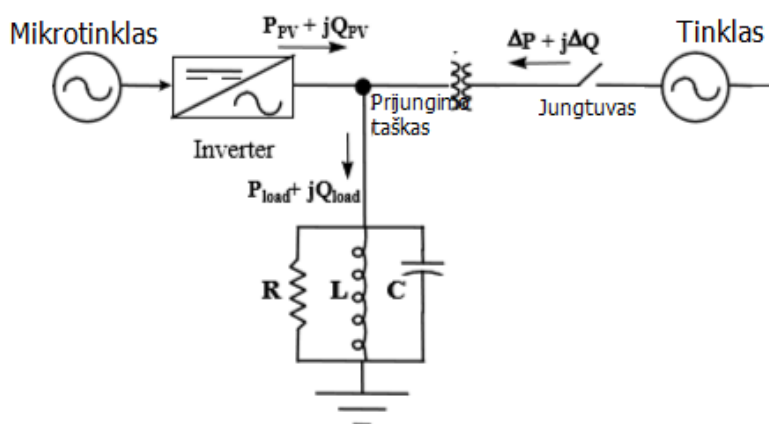
Mikrotinklas turi teikti aukštos kokybės elektros energiją be pertraukimo vartotojams per vietinius atsinaujinančių energijos šaltinių generatorius. Jų našumas salų režimu turėtų būti pagrįstas standartais, pvz., IEEE Std. 1547, UL 1741 ir IEC 61727. Tačiau kai kuriose šalyse taikomi skirtingi vertinimo standartai, pavyzdžiui, DIN VDE 0126 Vokietijoje ir C22.2 Nr. 107.1-01 Kanadoje. [8]

Pagrindiniai salos aptikimo metodai yra sekantys:

- Pasyvus metodai
- Aktyvūs metodai
- Hibridiniai metodai
- Nuotoliniai aptikimo metodai [8]

3.1. Pasyvūs salos aptikimo metodai

Pasyviuose metoduose nuolat stebima įtampa, dažnis ir sistemos harmoniniai iškreipymai prijungimo taške. Iš tiesų, šie parametrai skiriasi dėl atsinaujinančių energijos šaltinių generatorių dinaminio darbo. Todėl, tinkamas maksimalaus ir minimalaus leidžiamo keitimo nustatymas pagerina galimybę atskirti jungtis. Šie metodai nepažeidžia sistemos ir įgalina greitą relės suveikimą. Tačiau, šie metodai yra blogi tuo, jog atsiranda didelės neaptikimo zonos, arba kitaip tariant, apsaugų aklumas esant tam tikromis apkrovų sąlygomis. [9]



12 pav. Mikrotinklas prijungtas prie skirstomojo tinklo

Įtampos ir dažnio padidėjimo / sumažėjimo apsaugos

Šis metodas pagrįstas leistinos įtampos ir dažnio diapazono nustatymu. Inverteriai atsijungs, kad sustabdytų elektros energijos tiekimą, jei įtampa arba dažnis prijungimo taške viršys nustatytas ribas.

Dažnis arba įtampos nuokrypis po mikrotinklo atjungimo labiausiai priklauso nuo paskirstytųjų generatorių generacijos ir esančių apkrovų mikrotinklo prijungimo taške:

$$\Delta P = P_{apkr.} - P_{DG} \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_{apkr.} - Q_{DG} \quad (2)$$

Kai mikrotinklas dirba su tinklu sujungtu režimu, ΔP ir ΔQ imama iš pagrindinio tinklo, kad būtų išlaikyta aktyviosios ir reaktyviosios galios pusiausvyra. Įvykus salos režimui, įtampos ir dažnio nuokrypis priklauso nuo mikrotinklo paskirstytųjų generatorių gamybos ir vartotojų suvartojimo apkrovų disbalanso.[9],[11]

Įtampos ir dažnio padidėjimo / sumažėjimo apsaugos yra reikalingos ir dėl kitų priežasčių, ne tik salos režimui aptikti. Tai perspektyvi apsauga dėl to, jog tinklas naudoja tokias pat apsaugas norint užtikrinti, kad įranga nebūtų sugadinta dėl netinkamo tinklo veikimo. Dar vienas iš privalumų yra šios apsaugos maža kaina.[26]

Pagrindinė šių apsaugų silpnoji vieta - santykinai didelė neaptikimo zona, kuri aptariama toliau. Be to, šių apsauginių metodų reakcijos laikas gali būti nenuspėjamas.[24]

Jei mikrotinklas dirbs režimu tenkinančiu $\Delta P = \Delta Q = 0$, kai tinklas atsijungs ar bus prijungtas, nebus reikšmingų pokyčių įtampos amplitudėje ir dažnyje, tad įtampos ir dažnio apsaugos nesuveiks.[26]

ΔP neaptikimo zona kyla iš Omo dėsnio, kuriame teigiama, kad apkrovos įtampa yra apkrovos varžos ir inverterio srovės sandauga. Jei inverterio įtampos padidėjimo / sumažėjimo apsaugai turint atitinkamai 110 proc. ir 88 proc. tolerancijos ribas nuo nominalios įtampos, tai reiškia jog ΔP NDZ yra esant 91 – 114 proc apkrovos vertėms. ΔQ NDZ gali būti apskaičiuojamas naudojant lygtis reaktyviosios apkrovos disbalansui ir rezonansiniam dažniui:

$$\Delta Q = V^2 \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) \quad (3)$$

Įtampos disbalanso apsauga

Kai mikrotinklas atjungtas nuo pagrindinio tinklo, įtampos disbalansas paskirstytojo generatoriaus išėjime kinta. Jei disbalansas viršija nustatytą ribą, tai gali būti traktuojamas kaip salos režimo aptikimas.[25]

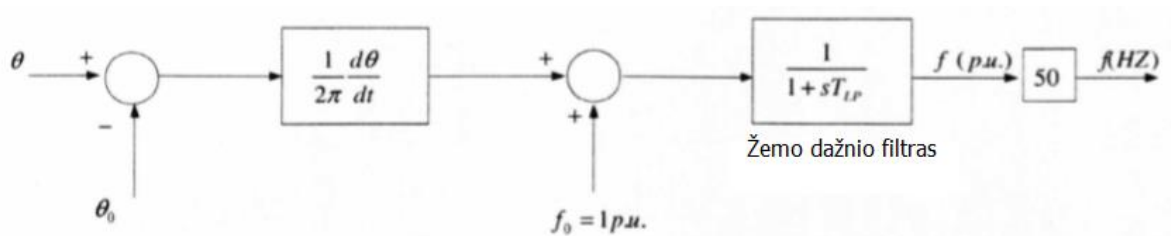
$$VU_t = \frac{NS_t}{PS_t} \quad (4)$$

Čia NS_t ir PS_t yra neigiamos ir teigiamos sekos įtampos amplitudės laike t .

Aptikimo laikas yra apie 53ms. Šis metodas nėra jautrus sistemos trikdžiams. Šio metodo silpnybė yra ta, jog neigiamos sekos atskyrimas yra paveikiamas harmonikų, taip sukeldamas sunkumus tolerancijos ribų nustatymui.[26]

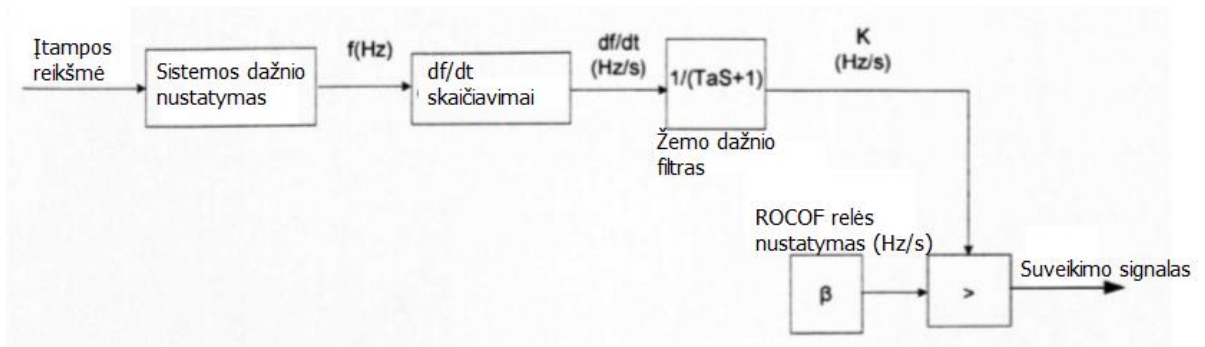
Dažnio kitimo greičio apsauga (ROCOF)

Dažnio kitimo greitis apskaičiuojamas naudojant kelių ciklų (paprastai nuo 2 iki 40) matavimus, atliekamus šynų sekcijų išvaduose. Šį signalą apdoroja filtrai, kurie paverčia šį signalą į tinkamą aptikti salos režimui. Jeigu dažnio kitimo greičio vertė yra didesnė, nei nustatytas relės parametras β , jungtuvui nusiunčiamas signalas atjungti generatorių. Sistemos dažnis f apskaičiuojamas iš sistemos įtampos sinusoidės taikant diferencinę funkciją. [25],[23]



13 pav. Sistemos dažnio apskaičiavimo modelis

Apskaičiuotas sistemos dažnis yra paduodamas kaip įėjimo signalas dažnio kitimo greičio skaičiavimo blokui. [22]



14 pav. Supaprastinta ROCOF apsaugos schema

Faktinė dažnio pokyčio vertė apskaičiuojama pagal vidutinę dviejų ciklų išmatuotą vertę, pagal formulę:

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \frac{\Delta f_i}{\Delta t_i} \quad (5)$$

kur:

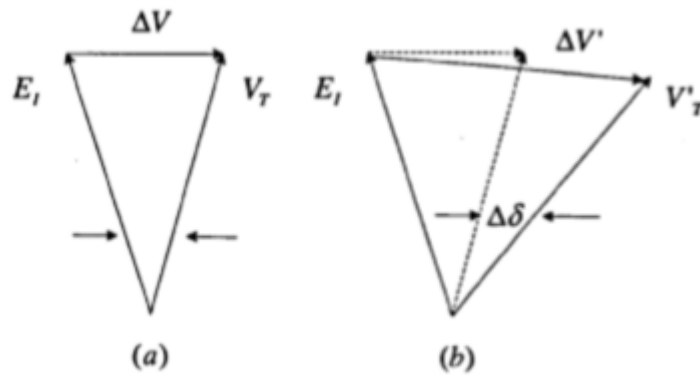
Δf_i – dažnio pokytis per vieną ciklą;

Δt_i – ciklo trukmė.

ROCOF yra jautresnė apsauga, nei įtampos padidėjimo / sumažėjimo apsauga ir jos aptikimo greitis yra didesnis. Jei galios neatitikimas tarp inverterio ir apkrovos yra didelis, šis metodas yra labai patikimas ir greitas. Aptikimo laikas yra iki 24 ms. Netgi esant pusiausvyrai tarp inverterio generacijos ir apkrovos, bet kokie sutrikimai, atsiradę dėl apkrovos pokyčių, gali nutraukti šią pusiausvyrą, o dėl to dažnis pasikeičia ir tokiu būdu ši apsauga geba aptikti salos režimą. ROCOF trūkumai yra tokie, kad ši apsauga yra jautri apkrovos perjungimui ir svyravimams, o tai gali sukelti klaidingą apsaugos suveikimą ir apsunkinti suveikimo ribos nustatymą. Šis metodas negali atskirti, ar dažnio pokytį sukelia salos režimas ar apkrovos pokyčiai. Taigi ROCOF tinka apkrovoms su mažais svyravimais.[26],[20]

Vektorių kampo padidėjimo apsauga

Vektorių kampo padidėjimo relė dar kitaip vadinama vektorių poslinkio relė, arba įtampos šuolio relė. Šios relės veikimo principas pagrįstas visų trijų fazių įtampos kampo skaičiavimu prijungimo taške. Matavimai imami kas pusę ciklo iš kiekvienos fazės atskirai. Sprendimas, ar relei reikia suveikti, priimamas po pilno ciklo. Įtampos kampo skirtumas skaičiuojamas pagal tai, kokių laiku įtampos sinusoidė kirto nulio zoną. Tuomet, palygina rezultata su prieš tai darytais matavimais. Jeigu 5 iš 6 matavimų viršija nustatytą relės ribą, relė suveikia nusiųsdama signalą jungtuvui. [22]



15 pav. Įtampos vektorių kampas; a) prieš mikrotinklo atsijungimą nuo tinklo, b) atsijungimo momentu

Šią apsaugą tinkamai įrengti yra gan sudėtinga, nes sunku pasirinkti ribas, kurios užtikrintų patikimą salos režimo aptikimą, kadangi jos dažnai suveikia klaidingai ir gali be reikalo atjungti generatorių ar mikrotinklą. Tam tikrų apkrovų, ypač variklių paleidimas, dažnai sukelia reikšmingo dydžio pereinamuosius procesus fazėse, kas gali sukelti nereikalingą generatoriaus atjungimą, jei ribos bus nustatytos per mažos. Šios apsaugos ribos gali būti pakeistos priklausant nuo įrengimo vietos. [12],[26],[20]

Įtampos ir srovių harmonikų aptikimo apsauga

Šis metodas pagrįstas suminio harmoninio iškraipymo (THD) matavimu prijungimo taške, kad būtų galima aptikti salos režimą, kai THD viršija ribą. Normaliomis sąlygomis, kai mikrotinklas yra sujungtas su pagrindiniu tinklu, prijungimo taške įtampa yra standartinė sinusinė banga, todėl apkrovų generuojamos harmonikos yra nereikšmingos. Kadangi tinklo varža yra labai maža, iš inverterio išeinančios harmonikos perduodamos į tinklą nesukeliant iškraipymų prijungimo taške. Kai mikrotinklas veikia salos režimo sąlygomis, inverterio sukurtos harmonikos perduodamos apkrovoms ir histerezės efektas sustiprina harmoninį iškraipymą prijungimo taške, kas padeda aptikti salos režimą. Taikant šią apsaugą, salos režimo aptikimo laikas yra apie 45 ms. Tačiau, šiam metodui yra sunku parinkti tinkamas suveikimo reikšmes, nes menki tinklo nestabilumai galis sukelti netikrą salos aptikimą. [25]

Dažnio kitimo greitis priklausomai nuo galios (ROCOFOP)

Šis metodas pagrįstas vertės $\Delta f/\Delta P_L$ matavimu, siekiant nustatyti, ar mikrotinklas veikia salos režime, kur P_L yra apkrovos galia. Šis metodas yra patikimas, mažesnis klaidingų aptikimų santykis ir jo NDZ yra mažesnis nei ROCOF. Jis gali efektyviau aptikti salos režimą, kai tarp paskirstytojo generatoriaus inverterio ir apkrovos yra mažas galios neatitikimas. Šio metodo aptikimo laikas yra

apie 100 ms . Palyginti su ROCOF, šis metodas galėtų būti taikomas įvairesnėse situacijose. Jis gali veiksmingai aptikti salos režimą mikrotinkle su nedideliu galios disbalansu.[25],[26]

Galios pokytis generatoriaus išėjime

Šio metodo veikimo principas yra aptikti galios pokytį $\Delta P_L / \Delta t$ DG išėjime, kadangi tinklui atsijungus, atsiranda dideli galios pokyčiai. Salos režimu išmatuotas $\Delta P_L / \Delta t$ bus gerokai didesnis nei išmatavus prieš salos režimą. Tokie matavimai atliekami keletą ciklų. Kuomet išmatuota vertė viršys nustatytas ribas, mikrotinklas arba generatorius bus atjungtas nuo tinklo. Šio metodo aptikimo laikas yra apie 24 – 26 ms. Šio metodo vienas iš privalumų – gebėjimas greitai aptikti nesinchronizuotą pakartotinį įjungimą.[25],[26]

3.2. Aktyvūs aptikimo metodai

Antrasis salų aptikimo metodo tipas yra pagrįstas grįžtamojo ryšio metodais ir stebėjimu, kaip reaguojama į iškraipymus, kurie sąmoningai sukeliama tinkle. Iš tiesų, aktyvūs metodai turi tuos pačius principus, kaip ir pasyvios apsaugos, ir aptinka tiek dažnio, tiek įtampos svyravimus prijungimo taške. Tačiau šie metodai pasižymi mažesne neaptikimo zona, palyginti su pasyviaisiais metodais, tačiau, tai gali lemti sistemos perduodamos elektros energijos kokybės pablogėjimą.

Aktyvus dažnio poslinkis (ADF)

Šis metodas grindžiamas šiek tiek iškreipiant srovės sinusoidę, kurią inverteris generuoja ties prijungimo tašku. Prijungus mikrotinklą prie pagrindinio tinklo, prijungimo taške esanti įtampa ir dažnis nesikeis, dėl pagrindinio tinklo stabilumo. Inverterio išėjimo srovės dažnis taip pat nepasikeis. Kai tinklas atjungiamas, dėl iškraipymo, įtampos sinusoidės nulinę ašį kerta anksčiau, nei tikėtasi, taip generuodama klaidos signalą, dėl esančio fazės skirtumo tarp įtampos ir keitiklio generuojamos srovės. Dėl sugeneruotos klaidos signalo, keitiklis lėtai mažina srovės dažnį. Įtampos atsakas į šį srovės dažnio mažėjimą yra toks, jog sinusoidė vėl kerta nulinę ašį anksčiau, nei tikėtasi, ir tai vyksta tol kol suveikia dažnio sumažėjimo apsauga.[23]

ADF stiprybės yra tai, kad ją lengva įdiegti bei ši apsauga pasižymi maža neaptikimo zona, o esant aktyviajai apkrovai, NDZ nebelieka. Ši apsauga gedimą gali aptikti per 2 sekundes. Pagrindinis trūkumas yra tas, kad kelių inverterių atveju, šis metodas gali neaptikti salos režimo dėl inverterių su skirtingais dažnio nuokrypiais. Apkrovos parametrai vaidina svarbų vaidmenį metodo efektyvumui. Jei apkrova nėra aktyvinė, aptikimo laikas ir NDZ padidės, kai bus didesnė Q vertė. Todėl AFD yra geriausia naudoti salos režimo aptikimui tik tada, kai apkrovą sudaro tik aktyvioji apkrova ir tinkle yra tik vienas inverteris. [26]

Sandia dažnio poslinkis (SFS)

Šis metodas yra AFD metodo praplėtimas. AFD metodas naudojamas smulkinimo frakciją (*chooping fraction*)(cf) įgalina salos režimo aptikimą, sumažinant arba padidint dažnį. Tačiau, įprastinių AFD metodų, turinčių tik tam tikrą cf reikšmę, veikimas yra neveiksmingas ir sunku sukurti tinkamą cf vertę, kad atitiktų harmonikų ribą. Dėl šios problemos grįžtamasis ryšys taikomas keitiklio įtampai, kurios smulkinimo frakcija yra:

$$cf = cf_0 + K(f_{PCC} - f_{grid}) \quad (5)$$

Čia cf_0 yra smulkinimo frakcija, kai nėra įtampos svyravimų, K – didinantis koef.; f_{PCC} - dažnis prijungimo taške; f_{grid} – tinklo dažnis[23]

Prijungus mikrotinklą prie pagrindinio tinklo, metodas bando pakeisti prijungimo taško įtampos dažnį, tačiau to neleidžia padaryti pagrindinis tinklas. Atsijungus nuo pagrindinio tinklo, smulkinimo frakcija didėja padidėjus f_{pcc} . Todėl, keitiklio dažnis taip pat didėja, o visi šie procesai ir toliau stiprina dažnio poslinkį, kad būtų galima efektyviai aptikti salą. SFS aptikimo laikas neviršija 0,5 s ir netgi gali aptikti salos režimą per 7 ciklus. Šis metodas, palyginti su kitais aktyviais metodais, turi mažiausią NDZ. Be to, SFS yra labai veiksmingas kompromisas aptikimo efektyvumui ir energijos kokybei.[26]

Varžos matavimai

Šis metodas matuoja inverterio maitinimo grandinės bendrą varžą. Tai daroma truputį padidinant generuojamos srovės amplitudę. Normaliomis sąlygomis, tai neturi įtakos įtampos reikšmei, nes tinklas yra stiprus įtampos šaltinis. Dirbant salos režime, net ir nedidelis srovės padidėjimas, sukelia pastebimus pasikeitimus įtampoje.[25]

Pagrindinis šio metodo privalumas yra tas, kad jis turi mažą NDZ esant vieno inverterio atveju, bet pagrindinė jo silpnybė yra atvejis su keliais inverteriais. Ši problema gali būti išsprendžiama palaikant ryšį tarp inverterių, kad būtų užtikrinta, jog jie visi veikia tuo pačiu grafiku [26]

Slankiojo režimo dažnio poslinkis (SMS)

SMS naudoja teigiamą grįžtamąjį ryšį, kad pakeistų PCC įtampos fazę, ir stebėtų dažnio nuokrypį, kad būtų galima nustatyti salos režimą. Naudojant šį inverterio srovės ir įtampos fazės kampas nustatytas kaip:

$$\theta = \theta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f^{k-1} - f_n}{f_m - f_n}\right) \quad (6)$$

Čia θ_m yra maksimalus fazės kampas, esant dažniui f_m , f_n yra nominalus dažnis, f_{k-1} yra praeito ciklo dažnis.[25]

Kai mikrotinklas veikia sujungtas su tinklu, jo galios faktorius yra toks, kaip tinkle. Fazės kampas tarp inverterių srovės ir prijungimo taško įtampos yra kontroliuojamas, kad būtų 0, arba kuo arčiau jo. Atsijungus nuo pagrindinio tinklo, apkrovos fazės kampas ir dažnis svyruos pagal SMS kreivę, todėl salos režimas gali būti aptiktas jei dažnio pokytis viršija nustatyta ribą. SMS privalumai yra tai, kad juos lengva įdiegti, bei turi mažą NDZ. Beje, SMS yra veiksminga esant kelių inverterių atvejui. Didžiausias šios apsaugos minusas, jog šis metodas turi įtakos tinklo energijos kokybei.[26]

Aktyvios ir reaktyvios galios kitimas

Šis metodas keičia inverterių išėjimo galią ir stebi pasikeitimus įtampos amplitudėje ir dažnyje tam, kad aptiktų salos režimą. Kai mikrotinklas veikia salos režime, aktyvioji galia iš inverterių tekės į apkrovą. Norint subalansuoti aktyviają galią tarp inverterio ir apkrovos, įtampos pokytis turi atitikti sąlygą:

$$P_{DG} = P_{LOAD} = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

Salos režimą galima aptikti, kai įtampa viršija įtampos padidėjimo apsaugos ribą. Panašiu būdu reaktyviosios galios keitimas turės įtakos dažnio kitimui, o salos režimas gali būti aptiktas matuojant ar dažnis viršija ribą, ar ne.

Šio metodo aptikimo laikas yra nuo 0,3 s iki 0,75 s, o jo privalumai yra tai, kad jį lengva įdiegti, ir turi nedidelę NDZ. Didžiausias trūkumas yra tas, kad jis sukels klaidingą aptikimą, kai keli inverteriai yra sujungti lygiagrečiai tame pačiame prijungimo taške. Metodas nuolat keičia inverterių galingumą, labai paveikdamas tinklo galios kokybę ir trumpalaikį stabilumą. Aktyviosios ir reaktyviosios galios kitimo salos režimo aptikimo metodas paprastai taikomas mikrotinkluose su vienu paskirstytuju generatoriumi.[26]

3.3. Hibridiniai metodai

Hibridiniai salų aptikimo metodai yra pasyviojo metodo su aktyviuoju metodu derinys. Iš tiesų pasyvus metodas turi pirmenybę šiems salų aptikimo metodams, o aktyvūs metodai veikia po pasyvaus aptikimo. Pagrindinis hibridinių metodų privalumas yra tai, kad jie sumažina neaptikimo zoną, palyginti pasyviais metodais. Dėl šio svarbaus pranašumo hibridiniai metodai yra daug efektyvesni salų režimo aptikimui. Iš tiesų skirtumai yra matuojant ir stebint: pasyviuose metoduose tik matuojant, o aktyvūs metodai yra pagrįsti signalų grįžtamuoju ryšiu. [10]

3.4. Nuotoliniai metodai

Tokių metodų projektavimas grindžiamas komunikacijos ryšiu tarp paskirstyto generatoriaus ir pagrindinio tinklo. Didesnis patikimumas yra pagrindinis šio metodo privalumas, palyginti su vietiniais metodais. Tačiau šis metodas yra neekonomiškas mažoms sistemoms.

Linijos ryšio komunikacija (PLCC)

Siųstuvai yra įdiegti tinklo pusėje, kurie gali sukurti ryšio signalą kartu su elektros linija per PLCC sistemą. DG pusėje įrengtas imtuvas. Jei PLCC signalas nutraukiamas, tai rodo, kad mikrotinklas yra saloje. PLCC signalo laikotarpis yra paremtas keturiais nuosekliais ciklais. Salą galima aptikti, jei signalas išnyksta per tris iš eilės einančius ciklus. Aptikimo laikas yra apie 200 ms. Šis metodas nesumažina galios kokybės ir neturi įtakos tinklo trumpalaikiam nestabilumui. Šis metodas yra labai naudingas, kuomet sistemoje yra daug skirtingų inverterių. Tačiau, siųstuvai yra brangūs ir nėra ekonomiškai mažose DG sistemose. Taigi, šį metodą galima taikyti mikrotinkluose, kuriuose yra daugiau nei keli paskirstytieji generatoriai. [21]

Signalas, sukurtas atjungiant (SPD)

Šis metodas yra panašus į PLCC, aptinkant salą pagal signalų perdavimą tarp DG inverterių ir išorinio elektros tinklo. Skirtumas tarp jų yra tas, kad signalų perdavimas yra pagrįstas mikrobangų, telefoniniu ryšiu ir kitomis formomis. Šis metodas taip pat naudoja nuoseklaus nešlio signalą, kad būtų išvengta gedimo, kurį sukelia generatorius, kanalas ar imtuvas.

SPD neturi NDZ ir leidžia pagrindiniam tinklui papildomai kontroliuoti DG, koordinuojant DG ir tinklo maitinimo šaltinį, kuris būtų naudingas juodam startui. Šiuo koordinavimu taip pat galima pagerinti sistemos paleidimo charakteristikas. SPD metodo trūkumas yra tas, kad jam reikia didelių investicijų. Jei signalų perdavimui naudojama telefono linija, reikia įsivertinti ryšio kabelių sąnaudas ir nustatyti ryšio protokolą. Jei signalui perduoti naudojama mikrobangos, reikia įdiegti kartotuvus.[21]

SCADA

Taikant šį metodą, iš papildomų kontaktų, prijungtų, pavyzdžiui, prie jungtuvo, gaunama informacija apie tinklo būklę. Šio metodo pranašumas yra panašus į SPD, kad jis gali imtis papildomos DG kontrolės. Jei sistema yra pritaikyta veikti komunikacijoms, taikant šį metodą galima išvengti neaptikimo zonos (apsaugos aklumo) ir pagerinti darbo efektyvumą. Šio metodo trūkumas yra tas, kad aptikimo greitis yra gana lėtas, ypač esant užimtai sistemai. Taip pat reikalingos didelės investicijos dėl sistemos sudėtingumo, nes atsiranda daug reikalingos ryšio

įrangos (komutatoriai, multiplekseriai ir t.t.) Šis metodas reikalauja sudėtingo montavimo ir sertifikavimo, kuris netinka mažos apimties sistemai.[21]

Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje aprašyti pasyvūs, aktyvūs, hibridiniai ir nuotoliniai salos režimo aptikimo metodai. Lentelėje, pateiktoje žemiau, apibendrintos visų nagrinėtų apsaugų palyginimas.

1 lentelė. Apsaugų palyginimas

Kategorija	Salos režimo aptikimo metodas	Neaptikimo zona (apsaugų aklumas)	Aptikimo laikas	Įtaka galios kokybei	Efektyvumas esant ne vienai inverterio sąsajai tinkle	Privalumai	Trūkumai	Pritaikomumas
Pasyvūs metodai	Įtampos ir srovės harmonikų aptikimas	Didelė, jeigu didelė Q vertė	45ms	Nėra	Labai efektyvi	Didžiausias pasyvių apsaugų privalumas – greitas salos režimo aptikimas bei jokios įtakos galios kokybei.	Didelės neaptikimo zonos bei didesnė rizika klaidingam suveikimui, nei aktyvių apsaugų.	Dažniausiai taikoma mažose mikrotinklų sistemose su vienu ar keliais mažos galios paskirstytisiais generatoriais.
	OUV/OUF	Didelė	Nuo 4ms iki 2s	Nėra	Labai efektyvi			
	ROCOF	Maža	24 ms	Nėra	Labai efektyvi			
	ROCOFOP	Mažesnė nei ROCOF	100 ms	Nėra	Labai efektyvi			
	ROCOP	Mažesnė, nei OUV/OUF	24-26 ms	Nėra	Labai efektyvi			
	PJD	-	10-20 ms	Nėra	Labai efektyvi			
	VU	-	53 ms	Nėra	Labai efektyvi			
Aktyvūs metodai	AFD	Zona didėja didėjant Q	Apie 2s	Stipriai įtakoja	Veikimas sulėtėja	Didžiausias aktyvių apsaugų privalumas – sumažėjusi neaptikimo zona ir mažesnis apsaugų klaidingas suveikimas.	Šios apsaugos daro neigiamą įtaką tinklo galios kokybei.	Aktyvūs metodai dažniausiai taikomi mikrotinkluose patvirtinti, jog tikrai įvyko salos režimas. Dažnai jos kombinuojamos su pasyviomis apsaugomis.
	SFS	Minimali	Apie 0,5s	Šiek tiek įtakoja	-			
	SMS	Mažesnė nei AFD	Apie 0,4s	Turi laikinai įtakos sistemos stabilumui	Itin efektyvus			
	Galios kitimas	Maža	0,3-0,75s	Turi įtakos galios kokybei ir tinklo stabilum.	Šiek tiek sulėtėja			
	Neigiamos sekos srovės įleidimas	Nėra	60 ms	-	-			
	IM	Maža, vieno generatoriaus sistemoje	0,77-0,95s	Generuoja harmonikas	Veikimas sulėtėja			

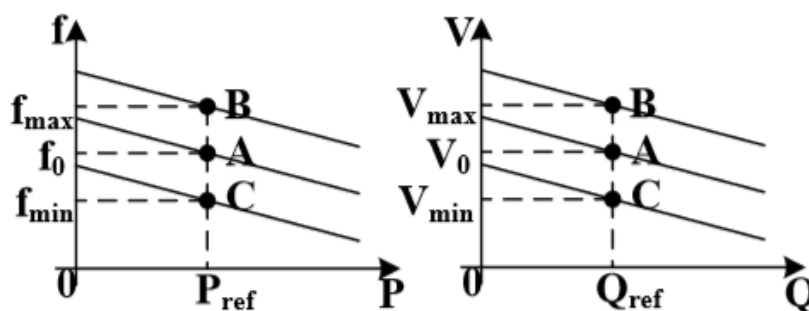
Kategorija	Salos režimo aptikimo metodas	Neaptikimo zona (apsaugų aklumas)	Aptikimo laikas	Įtaka galios kokybei	Efektyvumas esant ne vienai inverterio sąsajai tinkle	Privalumai	Trūkumai	Pritaikomumas
Nuotoliniai metodai	PLCC	Esant normalios apkrovoms nėra	200 ms	Nėra	Itin efektyvi	Didžiausias šių metodų pliusas, jog nelieka neaptikimo zonos, taip pat neįtakoja tinklo galios kokybės bei padeda sumažinti klaidingo suveikimo riziką.	Didžiausias šio metodo minusas – didelės investicijos, tad mažoms sistemoms toks apsaugų modelis nėra ekonomiškas.	Dažniausiai taikoma didelio tankio paskirstytųjų generatorių sistemoms.
	SPD	Nėra	100-300ms	Nėra	Itin efektyvi			
	SCADA	Nėra	Aptikimas lėtas, jeigu sistema yra užimta	Nėra	Itin efektyvi			

4. Mikrotinklo ir apsaugų modeliavimas

Šiame skyriuje aprašomas modeliuojamas mikrotinklo modelis, kuris veikia kartu su pagrindiniu tinklu bei keturios mikrotinklo pasysiosios apsaugos, skirtos salos režimui aptikti. Mikrotinklo veikimas su tinklu paremtas PQ inverterio valdymo veikimo principu. Apsaugos modeliuojamos sekančios: įtampos sumažėjimo/padidėjimo, dažnio sumažėjimo/padidėjimo, vektorių kampo poslinkio ir dažnio kitimo.

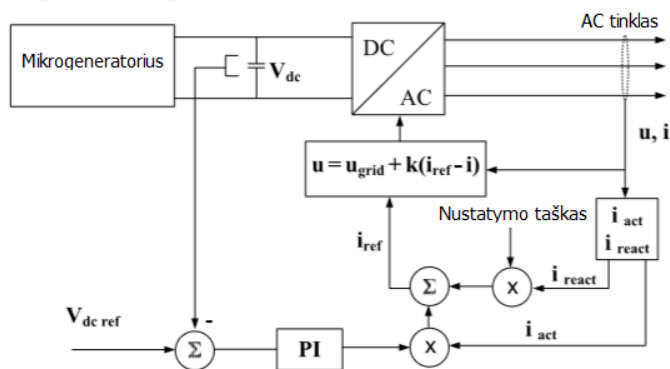
4.1. Mikrotinklo modelis, paremtas PQ inverterio valdymo veikimo principu

Pagrindinis PQ inverterio valdymo veikimo principas yra paduoti į tinklą aktyvios ir reaktyvios galios kieki pagal nustatytą vertę. Jeigu mikrotinkle esantys vartotojai reikalauja daugiau galios, nei paskirstytieji generatoriai gali pagaminti, likusi galia yra imam iš pagrindinio tinklo. Atvirkščiai, jeigu vartotojo reikalaujama galia yra mažesnė, nei mikrošaltiniai pagamina, likutinė galios vertė turi būti perduodama į pagrindinį tinklą. [13]



16 pav. PQ kontrolės veikimo principas

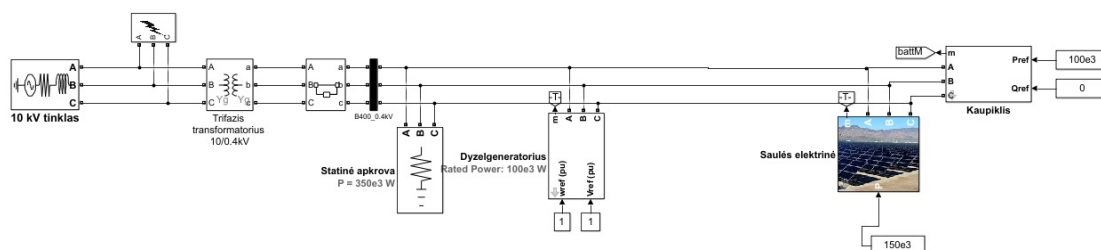
Kuomet mikrotinklo šynose dažnis pasikeičia leistinose ribose ($f_{min} \leq f \leq f_{max}$), inverteris toliau tiekia aktyviąją energiją pagal nustatytą vertę P_{ref} . Kai mikrotinklo šynose įtampa kinta leistiname diapazone ($V_{min} \leq V \leq V_{max}$), inverteris toliau tiekia nustatytą reaktyviąją galią Q_{ref} . [14]



17 pav. PQ valdymo schema

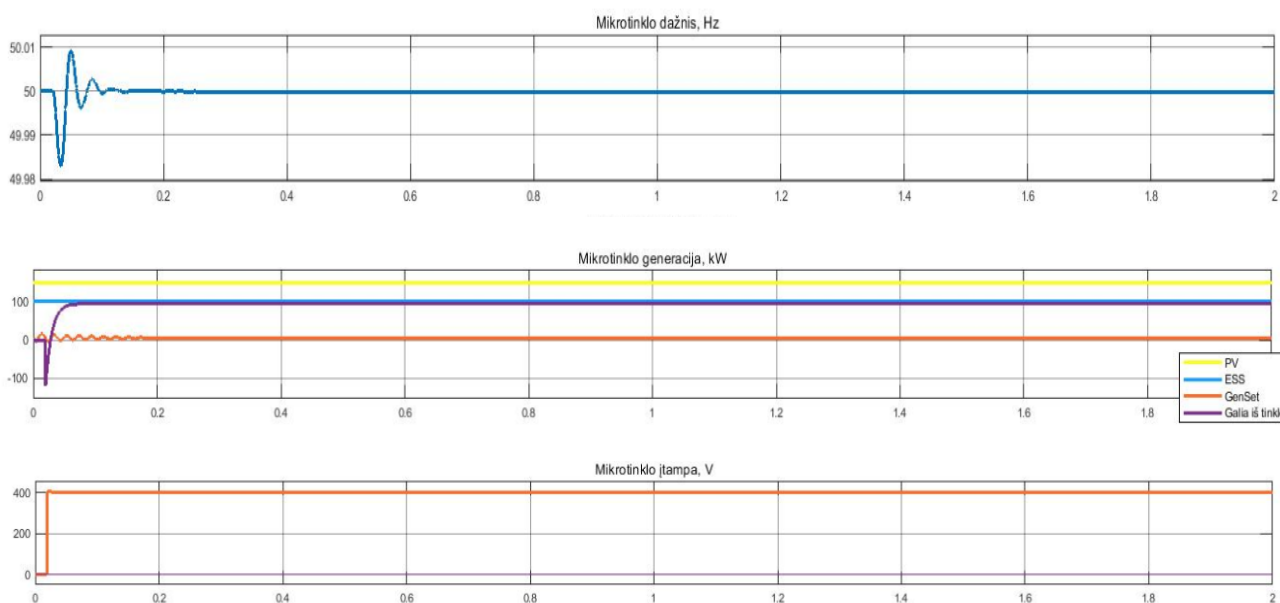
Aktyvusis komponentas naudojamas nuolatinės srovės grandinės įtampai ir atitinkamai inverterio aktyviai išėjimo galiai valdyti, kad būtų subalansuota mikrogeneratoriaus ir inverterio aktyvioji galia, o reaktyvus komponentas valdo inverterio reaktyviosios galios išėjimą. Maitinimo svyravimai mikrogeneratoriuje sąlygoja nuolatinės srovės grandinės įtampos pokyčius, kurie koreguojami per PI reguliatorių, reguliuojant aktyviosios srovės išėjimą. Šis keitiklis gali būti valdomas galios koeficientu arba nustatyta verte, gauta iš centrinio ar vietinio valdiklio.

Mikrotinklas prijungtas prie tinklo modeliuojamas remiantis [13], [14], [15], [18] ir [16] šaltinių informacija. Tyrimo metu, naudojamame mikrotinklo modelyje, PQ veikimo principu sumodeliuota saulės elektrinė bei kaupiklis.



18 pav. Prie pagrindinio tinkle prijungto mikrotinklo modelis Matlab Simulink programoje

Žemiau pateikiami mikrotinklo modeliavimo rezultatai, esant normalioms veikimo sąlygoms (t.y., mikrotinklas veikia prijungtas prie pagrindinio tinklo be jokių trikdžių), kai vartotojo apkrova 350 kW, saulės elektrinės perduodama galia 150 kW, baterijos 100 kW, iš tinklo gaunama galia 100 kW:



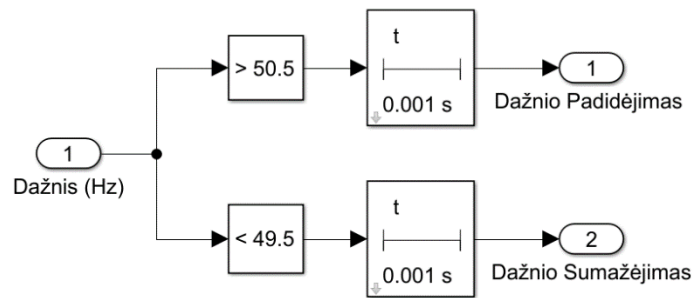
19 pav. Mikrotinklo veikimas normaliomis sąlygomis

4.2. Pasyvių apsaugų modeliai

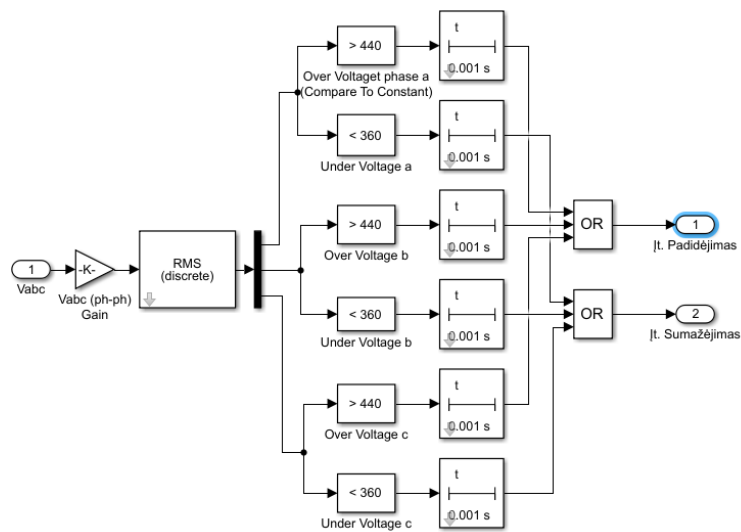
Salos režimo aptikimui modeliuojamos keturios pasyvios apsaugos:

- Įtampos padidėjimo/sumažėjimo apsauga
- Dažnio padidėjimo/sumažėjimo apsauga
- Dažnio greičio kitimo apsauga (ROCOF)
- Vektorių poslinkio apsauga

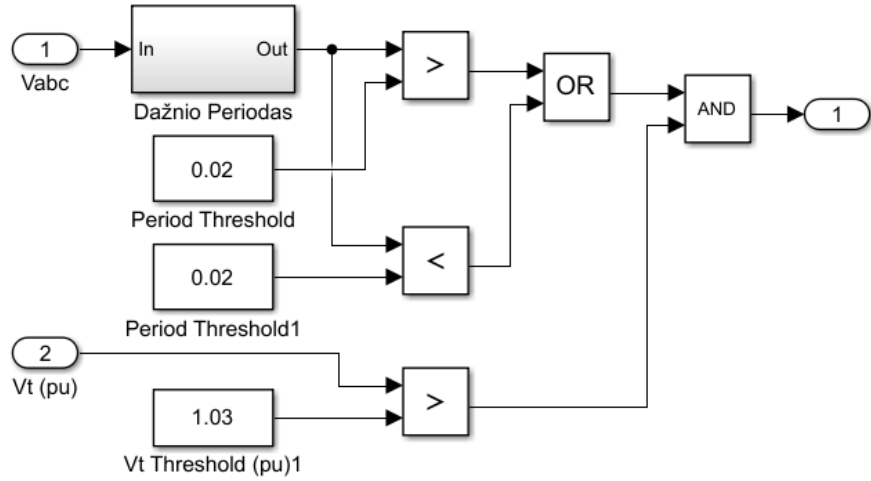
Žemiau pateikiami Matlab Simulink sistemoje sumodeliuotų apsaugų modeliai. Modeliai sukurti remiantis [17] ir [22] šaltiniuose pateikta informacija.



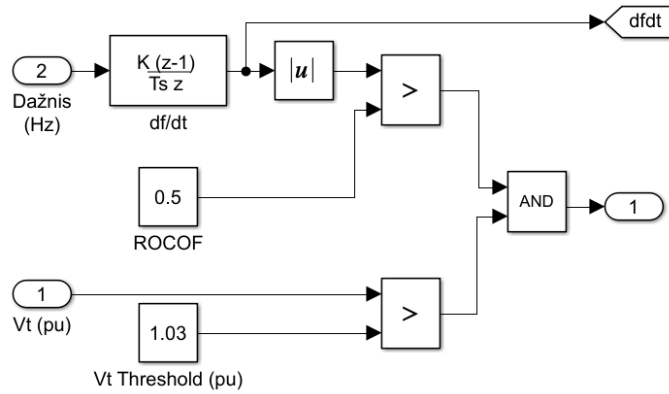
20 pav. Dažnio padidėjimo/sumažėjimo apsaugos modelis



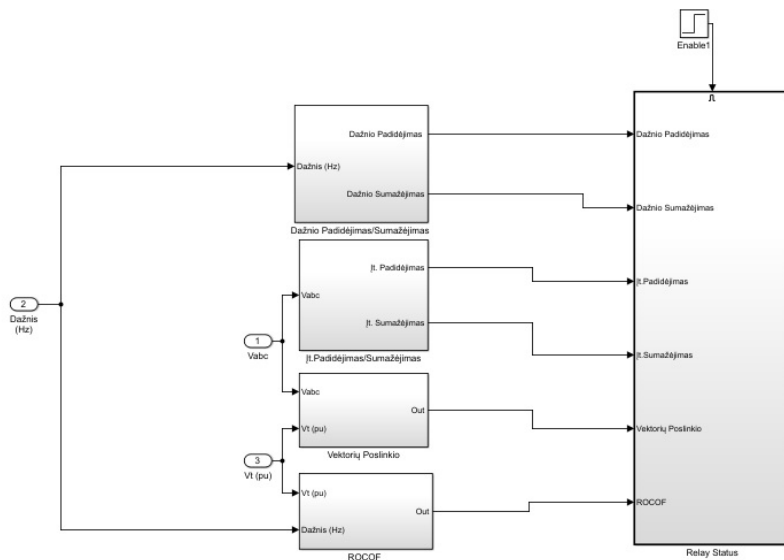
21 pav. Įtampos padidėjimo/sumažėjimo apsaugos modelis



22 pav. Vektorių poslinkio apsaugos modelis



23 pav. ROCOF apsaugos modelis



24 pav. Bendrai apjungtos apsaugos

5. Modelio simuliacijos eiga ir rezultatai

Modelis sukurtas taip, kad mikrotinklas veiktų kartu su pagrindiniu tinklu. Mikrotinklas prie pagrindinio tinklo yra prijungtas per trifazi jungtuvą ir 10/0,4 kV įtampos transformatorių. Vardinis apkrovos dydis 350 kW, saulės elektrinės 150 kW, kaupiklio 100 kW, generatoriaus 100 kW. Apsaugų suveikimui patikrinti, modeliuojami sekantys gedimų scenarijai:

Kai jungtuvo įjungtas:

- vietinė apkrova didesnė nei vietinė gamyba;
- vietinė apkrova mažesnė, nei vietinė gamyba;
- vietinė apkrova sutampa su vietine generacija.

Gedimas tinkle:

- vienfazis trumpasis jungimas su žeme;
- dvifazis trumpasis jungimas;
- dvifazis trumpasis jungimas su žeme;
- trifazis trumpasis jungimas;
- trifazis trumpasis jungimas su žeme.

Trumpieji jungimai simuliuojami 10 kV pusėje, Matlab Simulink trifazio gedimo (*angl. three-phase fault*) bloko pagalba (žr. **18 pav.**). Matavimai atliekami 0,4 kV pusėje. Apsaugų suveikimo vertės nustatytos sekančios:

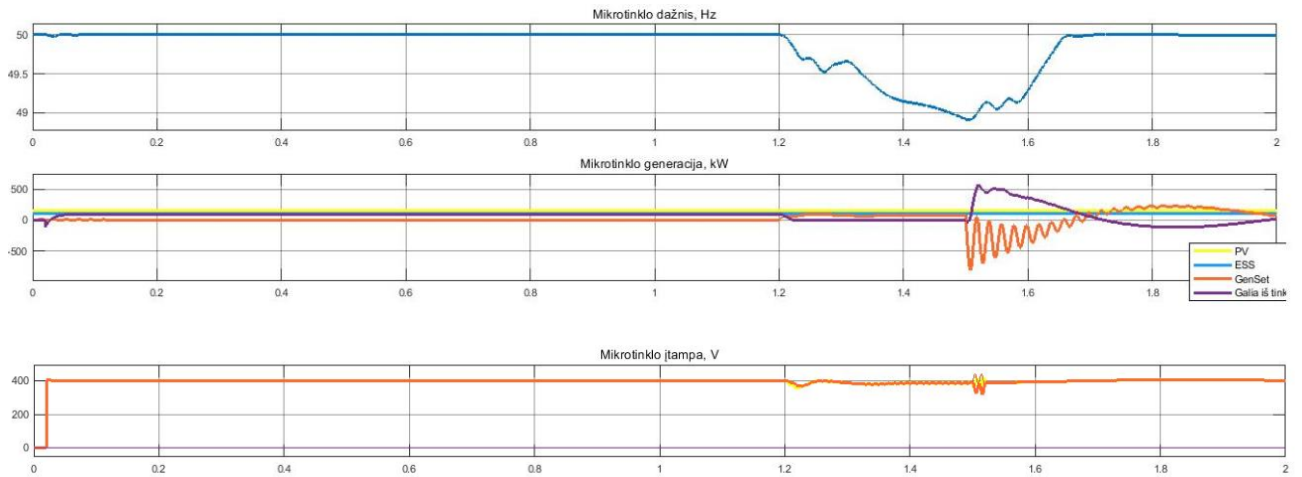
- Įtampos padidėjimas – 440 V, įtampos sumažėjimas – 360 V.
- Dažnio padidėjimas – 50,5 Hz, dažnio sumažėjimas – 49,5 Hz.
- ROCOF slenkstis – 0,5 Hz/s (pagal IEEE 1547 standartą, 50 Hz tinkle, ši vertė gali būti nuo 0,1 Hz/s iki 1 Hz/s)

5.1. Apsaugų tikrinimas, kai jungtuvas įjungiamas

Pirmasis scenarijus.

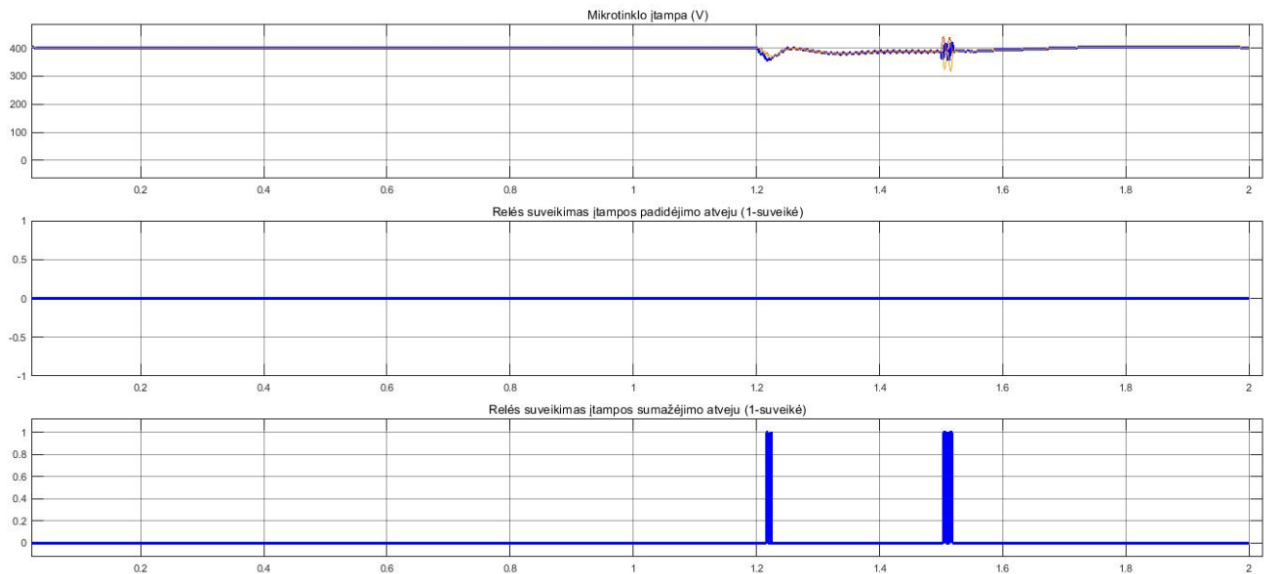
Mikrotinkle esanti apkrova yra didesnė, nei vietinė gamyba. Apkrovos dydis – 350 kW. Jungtuvas atjungia mikrotinklą nuo tinklo ties 1,2 s ir vėl įsijungia ties 1,5 s.

Bendras mikrotinklo vaizdas, jungtuvui atsijungus:



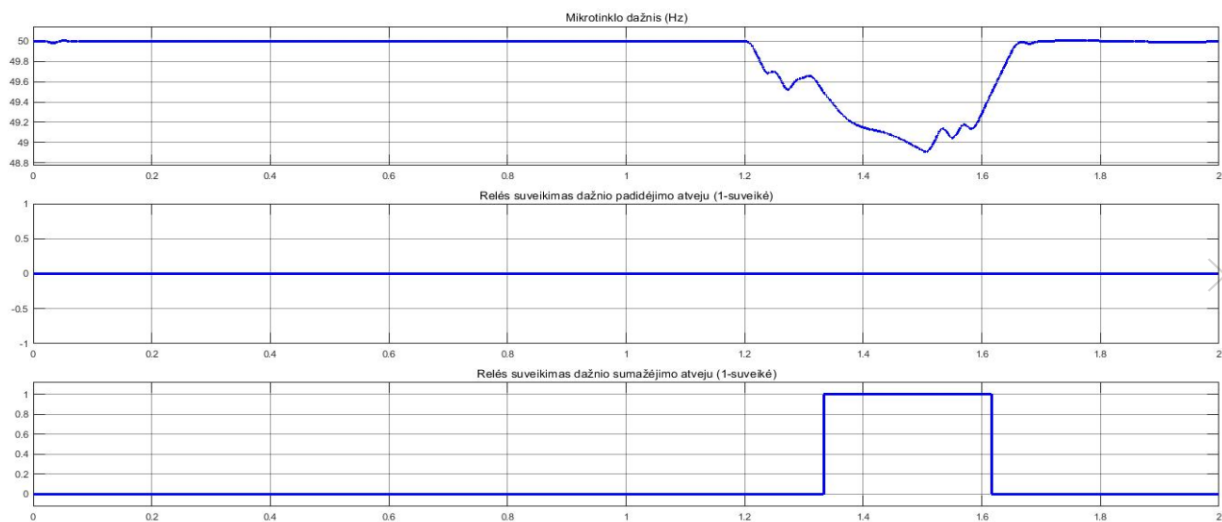
25 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vietinė apkrova didesnė nei vietinė gamyba

Įtampos sumažėjimo relė suveikė ties 1,216 s, kuomet įtampa nukrito iki 359,4 V. Įtampai pakilus iki 366 V, apsauga išsijungė iki 1,501 s. Įtampai vėl nukritus žemiau 360 V ties 1,502 s, apsauga pakartotinai įsijungia ir išsijungia ties 368,2 V, 1,52 s.



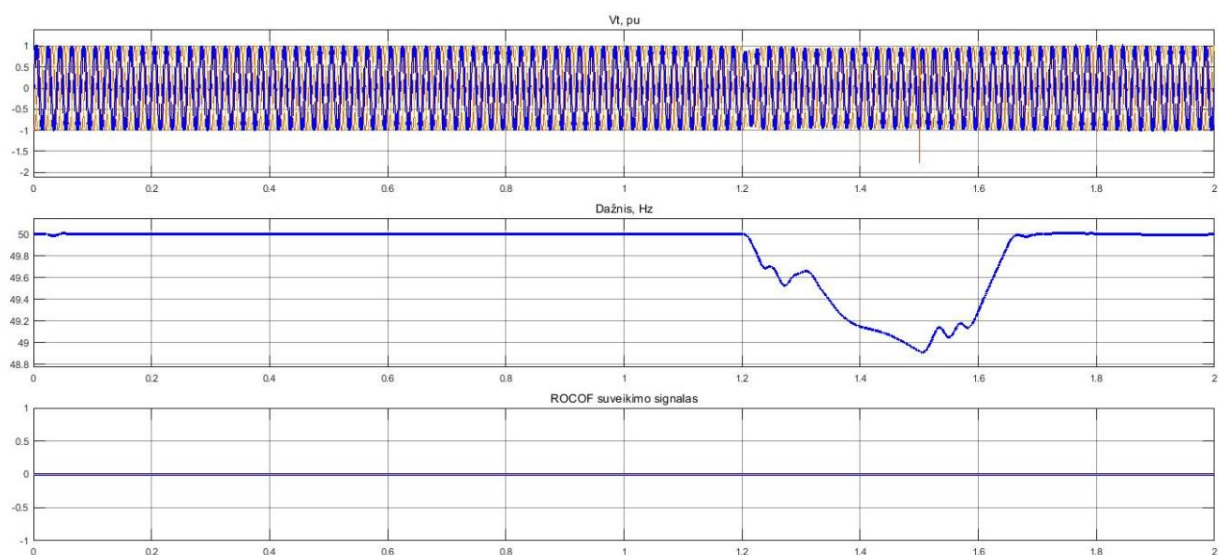
26 pav. Įtampos relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba

Dažnio relė sureaguoja į tinklo gedimą ties 49,48 Hz, 1,334 s. Dažnio vertei pakilus iki 49,50 Hz ties 1,617 s.



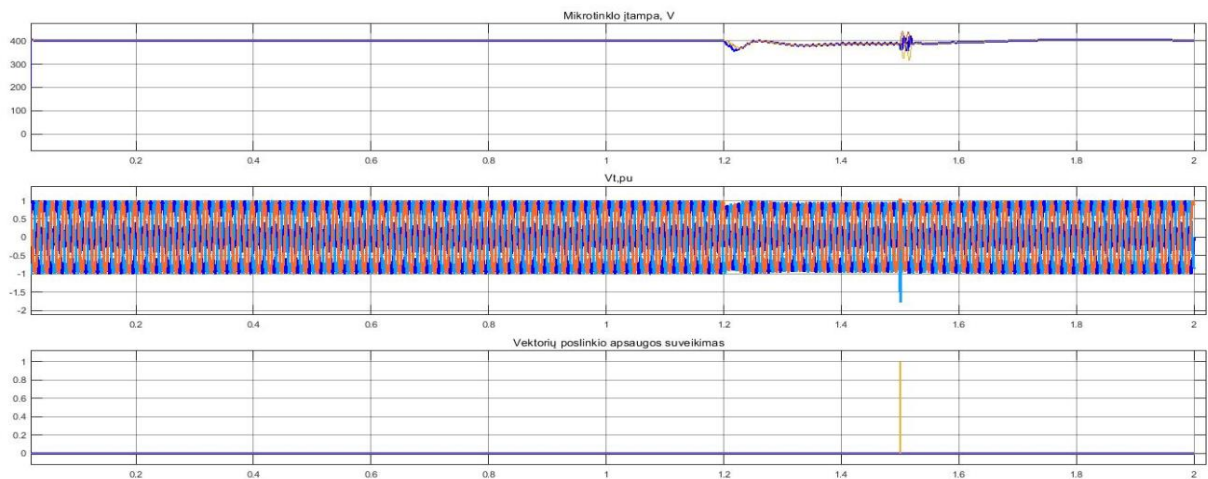
27 pav. Dažnio relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba

ROCOF apsauga nesureaguoja į mikrotinklo atsijungimą.



28 pav. ROCOF relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba

Vektorių poslinkio apsauga tik sureaguoja į vienos fazės nuokrypį, tačiau nesuveikia.

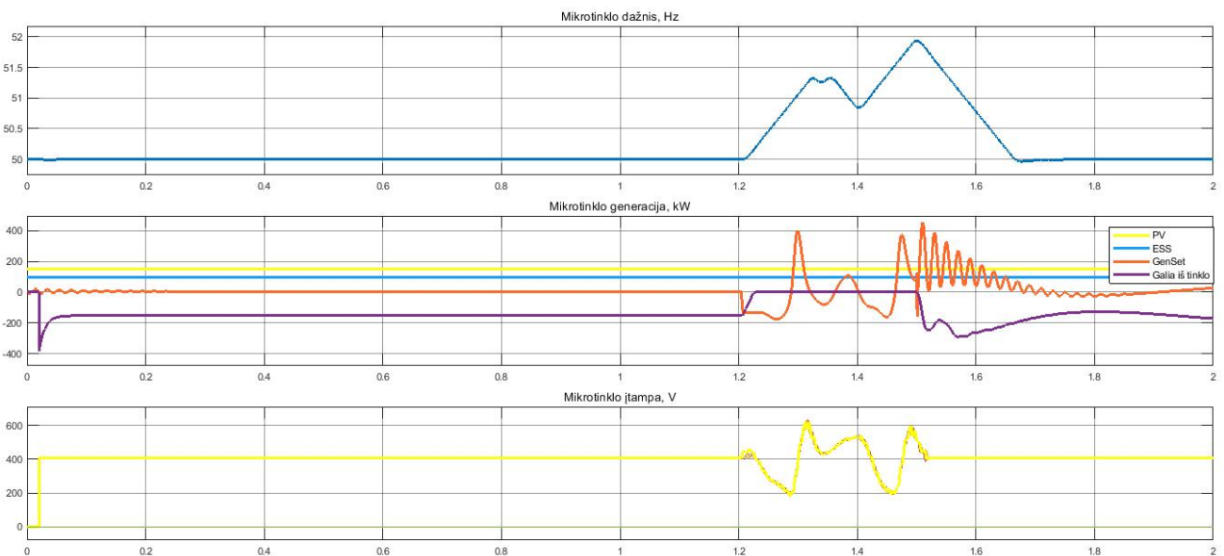


29 pav. Vektorių poslinkio relės suveikimas, kai vietinė apkrova didesnė, nei vietinė gamyba

Antrasis scenarijus.

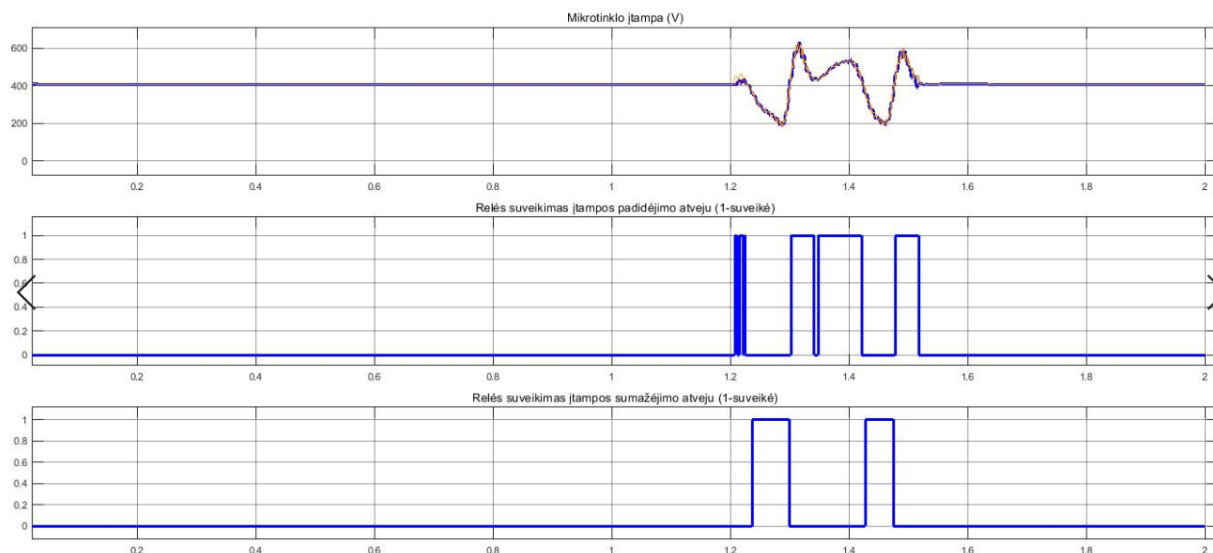
Mikrotinkle esanti apkrova yra mažesnė, nei vietinė gamyba. Apkrovos dydis – 100 kW. Jungtuvas atjungia mikrotinklą nuo tinklo ties 1,2 s ir vėl įsijungia ties 1,5 s.

Bendras mikrotinklo vaizdas jungtuvui atsijungus:



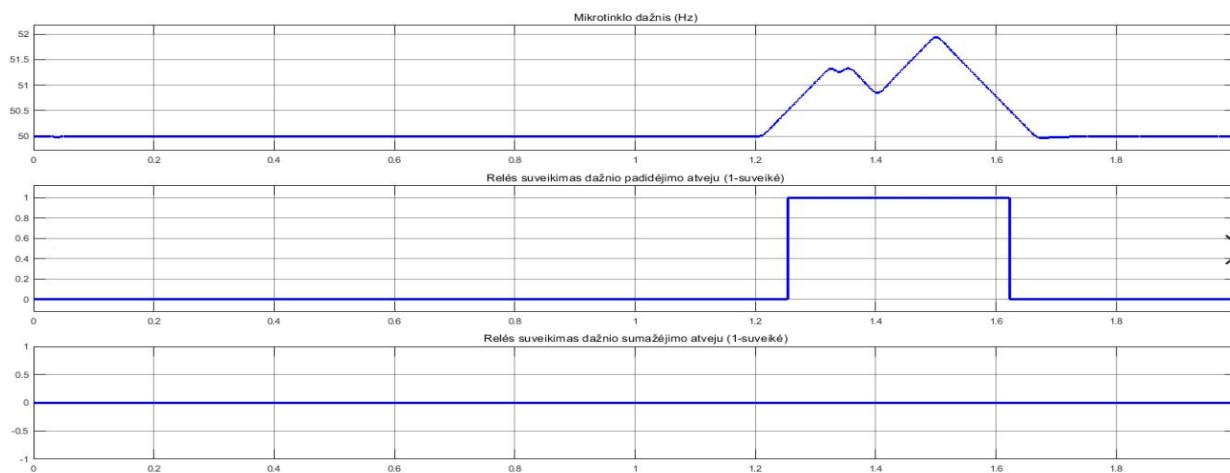
30 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba

Įtampos padidėjimo relė suveikė ties 1,208 s, kuomet įtampa pakilo iki 440,2 V. Įtampai nukritus iki 364 V, ties 1,237 s įsijungė įtampos sumažėjimo relė. Kylant ir krentant įtampoms, dėl didelio skirtumo tarp suvartojimo ir gamybos viena po kitos iš naujo suveikė įtampos sumažėjimo ir padidėjimo relės. Įtampa stabilizavosi ties 1,521 s. Abi apsaugos išsijungė.



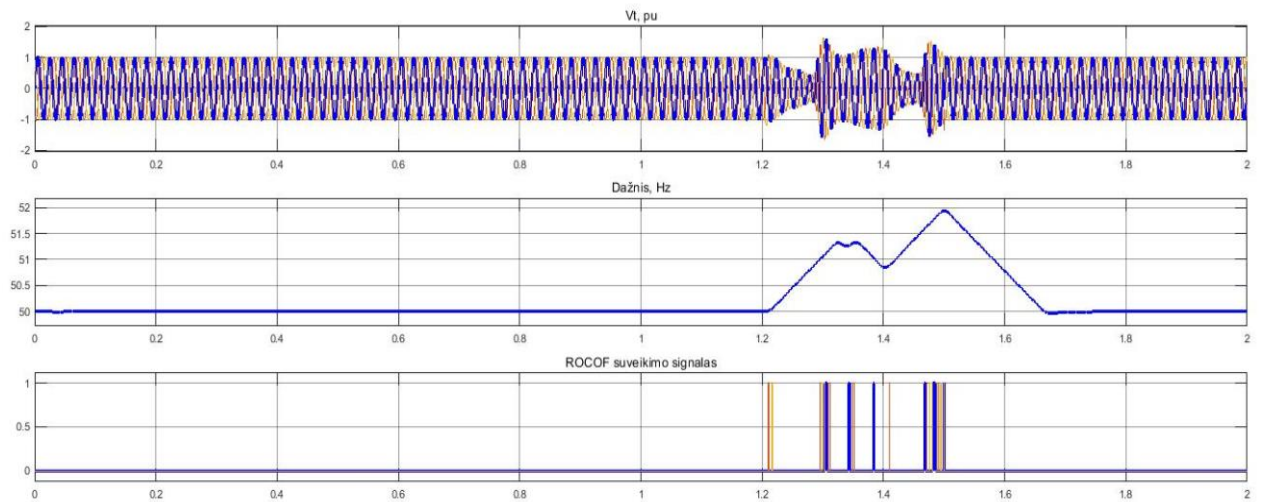
31 pav. Įtampos relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba

Mikrotinklo dažniui padidėjus virš nustatytos ribos, apsauga išsijungia ties 1,254 s. Dažniui nukritus iki leistinos ribos, apsauga išsijungia ties 1,625 s.



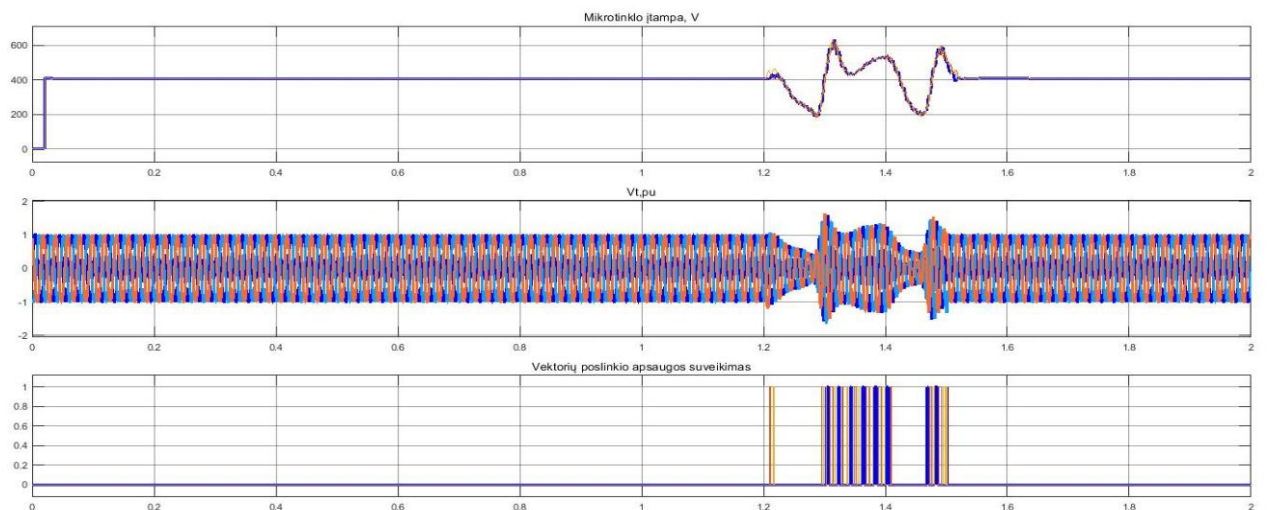
32 pav. Dažnio relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba

Šiuo atveju suveikia ROCOF relė. Nors pirmieji signalai apie tinklo nestabilumą gaunami jau 1,208 s, tačiau, apsauga suveikia tik tuomet, kuomet nuokrypiai nuo nustatytos vertės atsiranda visose trijose fazėse. Taigi, ROCOF relė suveikia ties 1,304 s.



33 pav. ROCOF relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba

Šiuo atveju suveikia ir vektorių poslinkio relė. Kaip ir ROCOF relės atveju, pirmieji signalai apie tinklo nestabilumą gaunami jau 1,208 s, tačiau, apsauga suveikia tik tuomet, kuomet nuokrypiai nuo nustatytos vertės atsiranda visose trijose fazėse - ties 1,276 s.

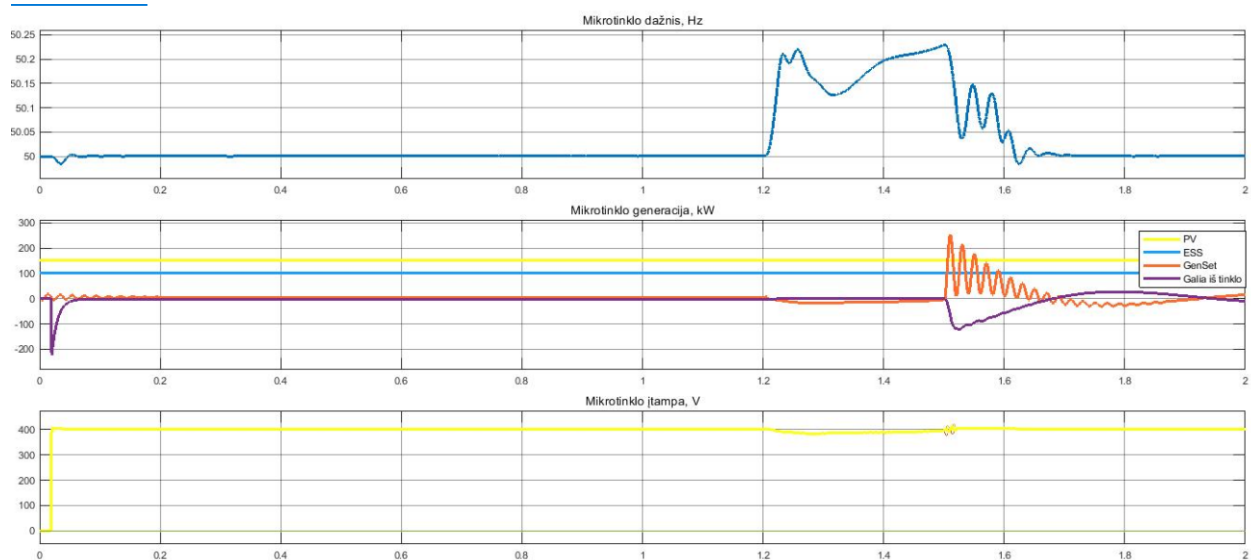


34 pav. ROCOF relės suveikimas, kai vietinė apkrova mažesnė nei vietinė gamyba

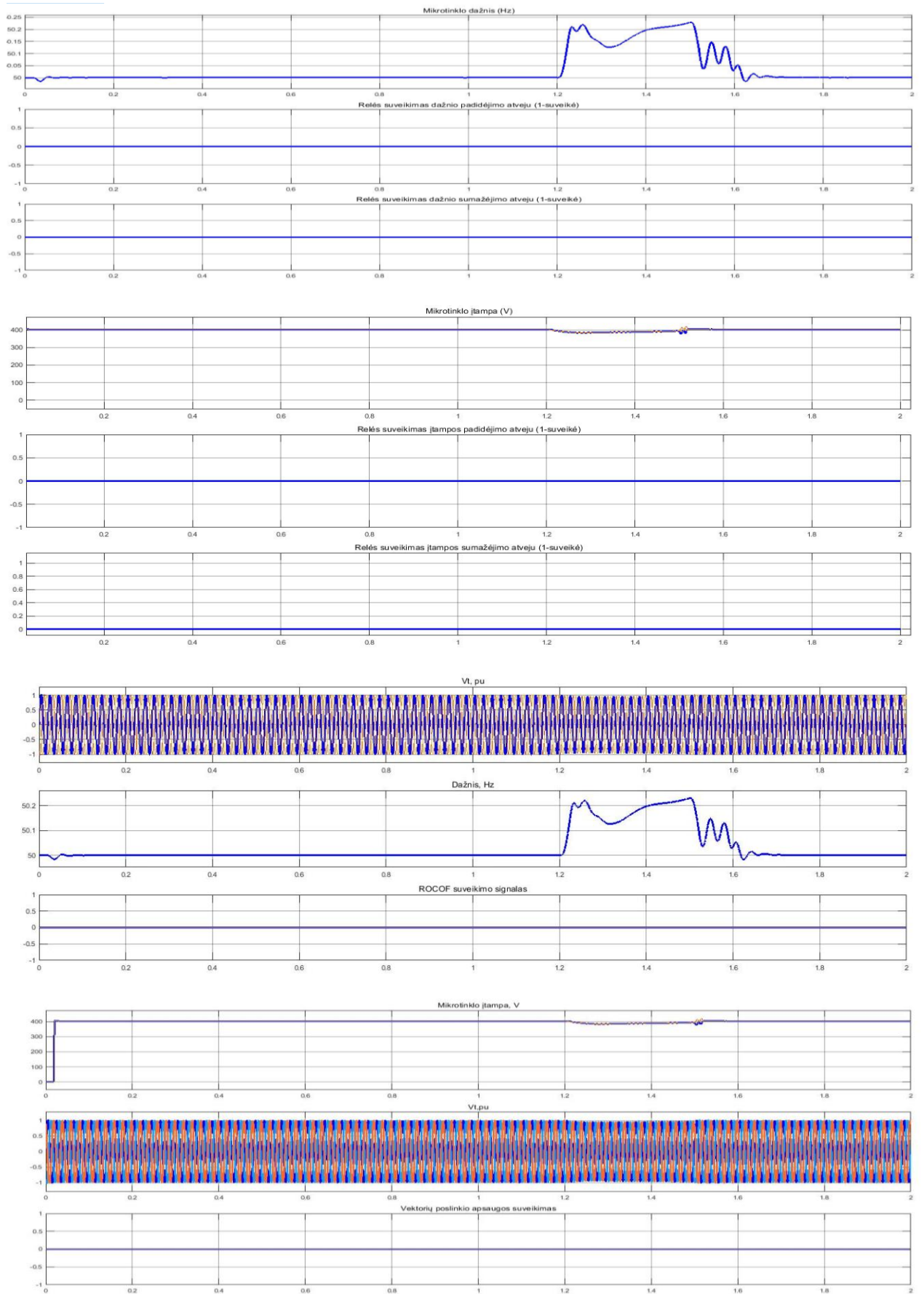
Trečiasis scenarijus.

Šiame modeliavimo scenarijuje, apkrovai reikalinga galia sutampa su saulės elektrinės ir baterijos generuojama galia – 250 kW. Tinklas atsijungia ties 1,2 s, įsijungia ties 1,5 s.

Bendras mikrotinklo vaizdas:



35 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vietinė apkrova sutampa su vietine gamyba



36 pav. Įtampos, dažnio, ROCOF ir vektorių poslinkio relių suveikimas, kai vietinė gamyba sutampa su vietine apkrova

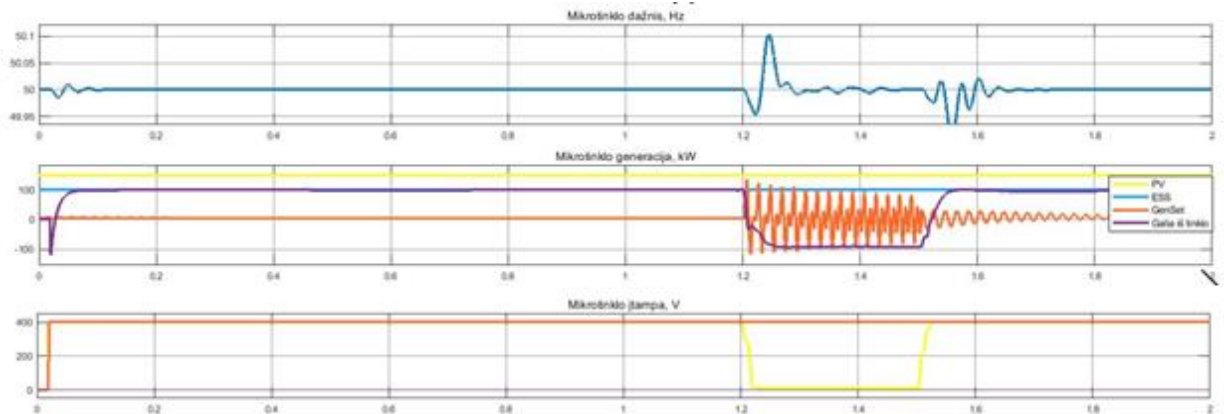
Šiuo atveju, nei viena apsauga nesuveikė, nes neviršijo nei vienos leistinos vertės.

5.2. Apsaugų tikrinimas, kai įvyksta gedimas pagrindiniame tinke

Pirmasis scenarijus.

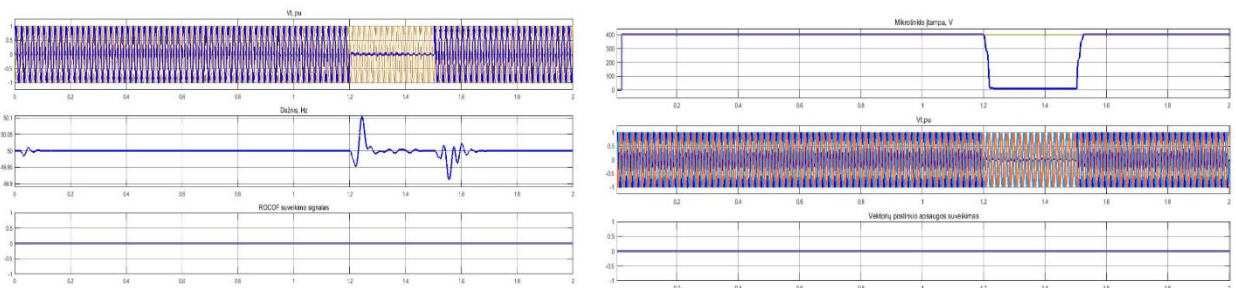
Vienfazis trumpasis jungimas su žeme, kuomet mikrotinklo vartotojo apkrovos dydis 350 kW.

Bendras mikrotinklo vaizdas:

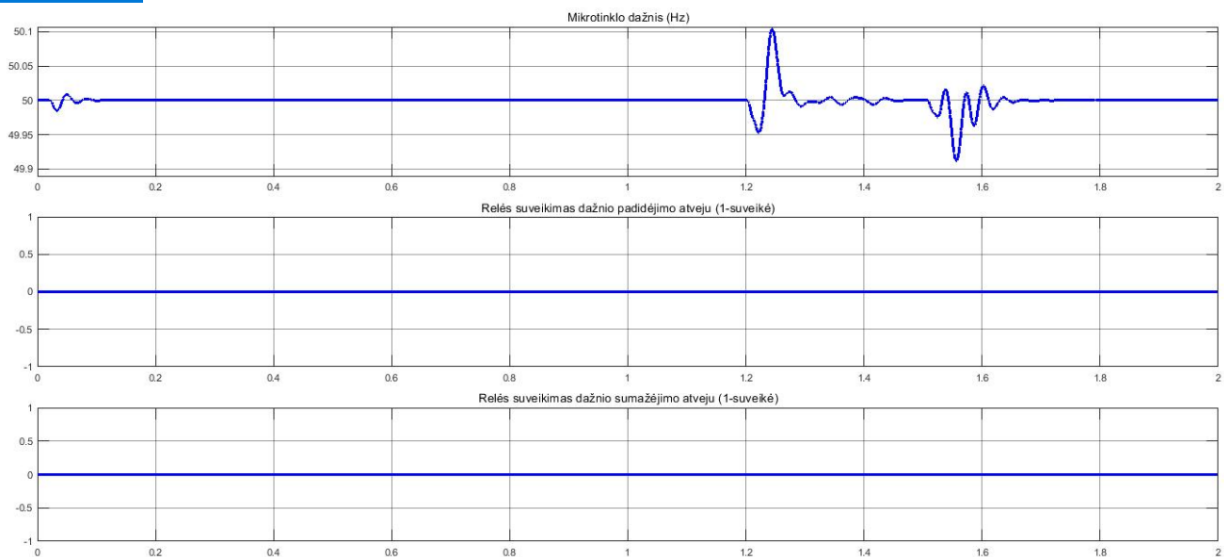


37 pav. Dažnio, galios ir tinklo įtampos oscilograma, kai vienfazis trumpasis jungimas su žeme 10 kV pusėje

Vektorių kampo, ROCOF ir dažnio sumažėjimo / padidėjimo apsaugos nesuveikia.

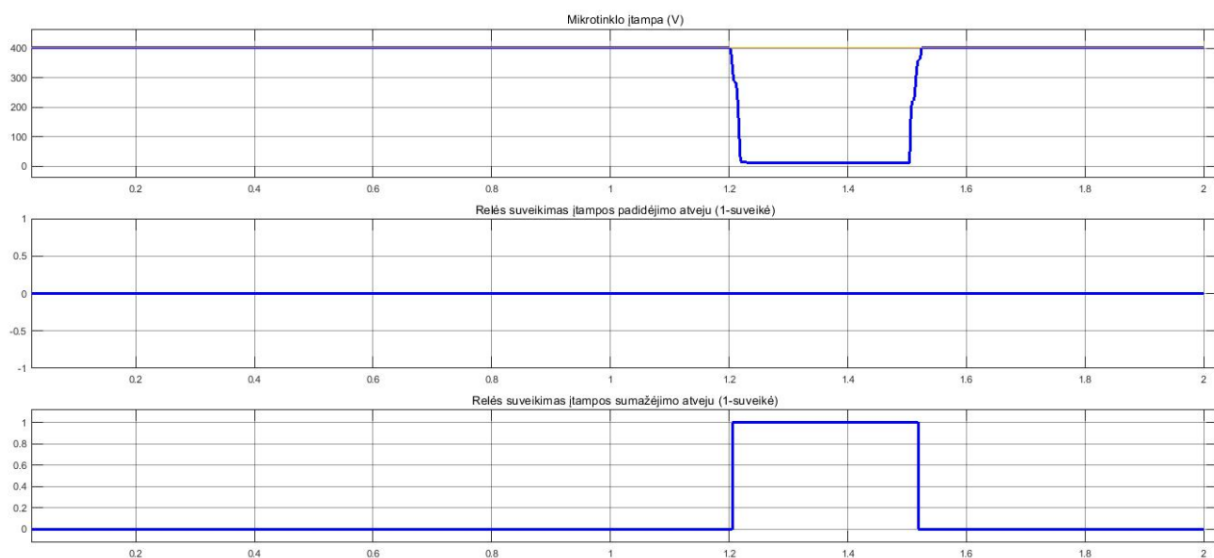


38 pav. ROCOF ir vektorių poslinkio apsaugų suveikimas, kai vienfazis trumpasis jungimas su žeme 10 kV pusėje



39 pav. Dažnio apsaugų suveikimas, kai vienfazis trumpasis jungimas su žeme 10 kV pusėje

Įtampa krenta vienoje fazėje, tad įtampos sumažėjimo apsauga užfiksuoja šį gedimą ties 1,210 s.

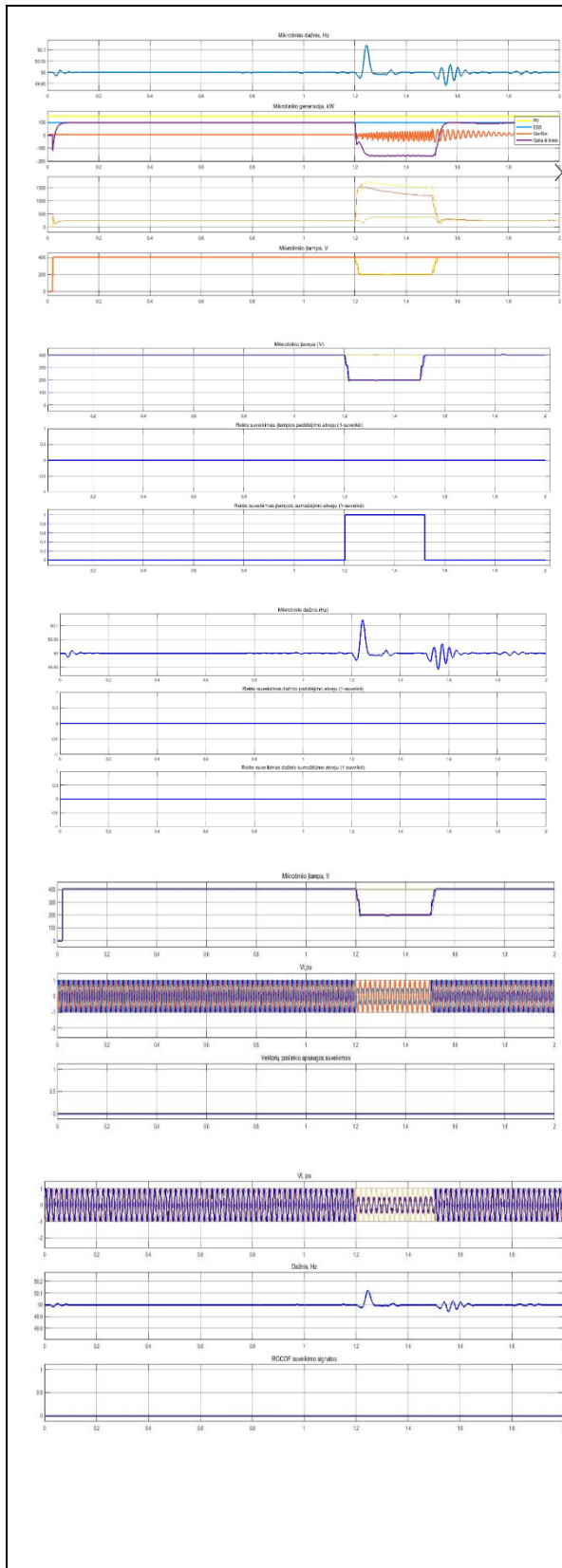


40 pav. Įtampos apsaugų suveikimas, kai vienfazis trumpasis jungimas su žeme 10 kV pusėje

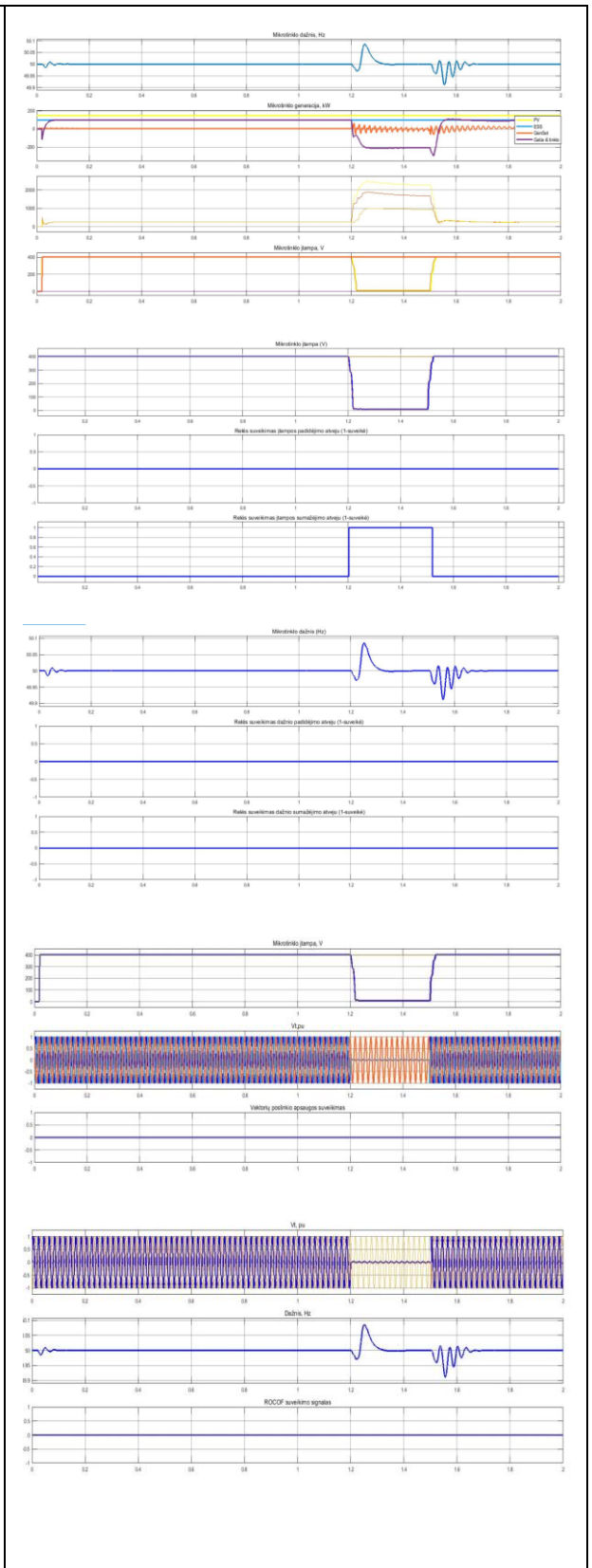
Antras scenarijus.

Modeliuojamas dvifazis trumpasis jungimas bei dvifazis trumpasis jungimas su žeme.

a) Dvifazis trumpasis jungimas:



b) Dvifazis trumpasis jungimas su žeme:



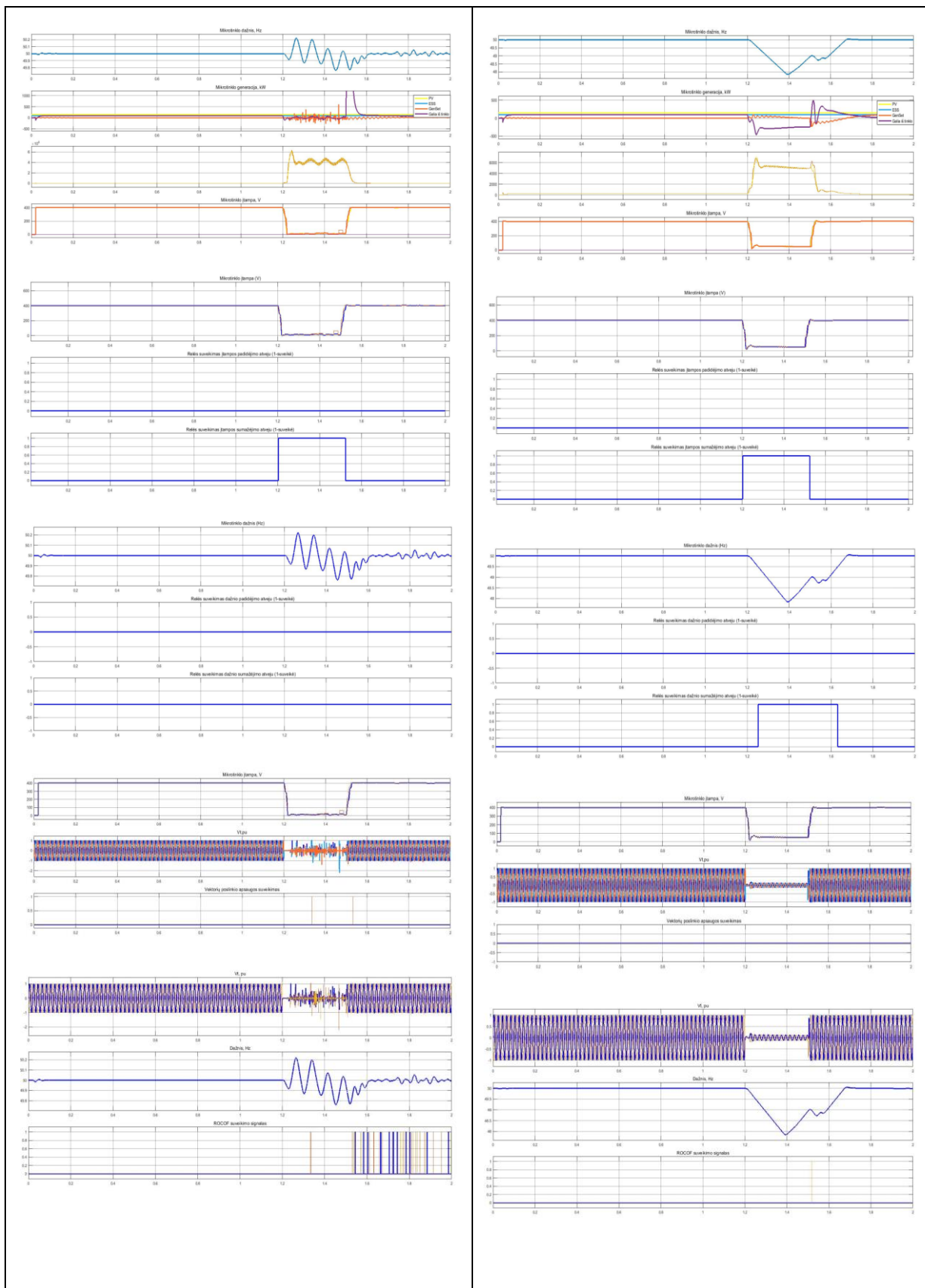
41 pav. Apsaugų suveikimas dvifazio ir dvifazio su žeme trumpojo jungimo metu

Trečias scenarijus.

Modeliuojamas trifazis trumpasis jungimas ir trifazis trumpasis jungimas su žeme.

a) Trifazis trumpasis jungimas:

b) Trifazis trumpasis jungimas su žeme:



42 pav. Apsaugų suveikimas trifazio ir trifazio su žeme trumpojo jungimo metu

Skyriaus apibendrinimas

Žemiau lentelėje pateikiami laikai, kuomet apsaugos aptiko salos režimą:

2 lentelė. Apsaugų suveikimo laiko palyginimas

	Scenarijus	Dažnio padidėjimas	Dažnio sumažėjimas	Įtampos padidėjimas	Įtampos sumažėjimas	ROCOF	Vektorių poslinkio
Jungtuvas ijungtas	Vietinė apkrova didesnė nei vietinė gamyba	-	1.334	-	1.216	-	-
	Vietinė apkrova mažesnė, nei vietinė gamyba	1.254	-	1.208	1.237	1.304	1.276
	Vietinė apkrova beveik sutampa su vietine generacija	-	-	-	-	-	-
Gedimas tinkle	Vienfazis trumpasis jungimas su žeme	-	-	-	1.210	-	-
	Dvifazis trumpasis jungimas	-	-	-	1.207	-	-
	Dvifazis trumpasis jungimas su žeme	-	-	-	1.209	-	-
	Trifazis trumpasis jungimas	-	-	-	1.203	1.545	-
	Trifazis trumpasis jungimas su žeme	-	1.252	-	1.203	-	-

Atlikti pasyvių apsaugų bandymai, esant skirtingoms mikrotinklo veikimo sąlygoms. Iš gautų rezultatų galima matyti, jog patikimiausiai veikė įtampos sumažėjimo apsauga. Tuo tarpu ROCOF ir vektorių poslinkio apsauga suveikė tik keliais atvejais, kai vietinė apkrova buvo mažesnė, nei vietinė gamyba bei trifazio trumpojo jungimo metu. Kai vietinė apkrova mažesnė už vietinę gamybą, oscilogramoje galima matyti, jog tiek ROCOF, tiek vektorių poslinkio relės suveikė tik tuomet, kai visų trijų fazių sinusoidė kirto vieneto reikšmę. Taip pat trifazio trumpojo jungimo metu, ROCOF pradeda klaidingą veikimą tuomet, kai mikrotinklas beveik stabilizuoja savo veiklą po gedimo. Taip atsitinka dėl to, jog ROCOF apsauga ne visada geba aptikti tikrą salos režimą ir suveikia klaidingai esant nestabiliam galios tiekimui tinkle.

ROCOF ir vektorių poslinkio apsauga, kaip teigiama šaltiniuose [27],[28], suveikia greičiau ir patikimiau už įtampos ir dažnio padidėjimo/sumažėjimo apsaugas tuomet, kai atsijungimo momentu yra didelis skirtumas tarp vietinio suvartojimo ir vietinės gamybos. Naudojant šias apsaugas, yra būtinas tikslus parametrų parinkimas (df/dt , slenksčio, kampo tarp fazių), norint išvengti klaidingo suveikimo arba nesuveikimo. Kaip teigiama šaltinyje [29], norint, kad šios apsaugos veiktų tinkamai, reikia atsižvelgti į kiekvieno tinklo ar generatoriaus technologiją. Nėra vienos teisingos apsaugos, kuri galėtų sureaguoti į visus galimus gedimų variantus [29]. Kaip teigiama literatūroje, ROCOF ir vektorių poslinkio relių veikimo algoritmai, tarp skirtingų gamintojų, skiriasi, tad ta pati relė gali reaguoti skirtingai į tą pačią situaciją.

Taigi, galima daryti išvadą, jog šiuo modeliuotu atveju, patikimiausiai suveikė dažnio ir įtampos sumažėjimo/padidėjimo apsaugos. Taip pat ROCOF ir vektorių poslinkio apsaugų veikimo principai bei skirtingų algoritmų bandymai yra plati sfera tyrimams atlikti.

Išvados

1. Aptarti iššūkiai, kylantys relinei apsaugai atsiradus didelei mikrotinklų integracijai į vidutinės įtampos tradicinį skirstomąjį tinklą.
2. Aprašyti salos režimų tipai pagal IEEE 1547.4 standartą. Šis standartas išskiria septynis skirtingus salos režimų scenarijus, kurie apima didžiąją dalį galimų salos režimo scenarijų.
3. Išanalizuoti pasyvūs, aktyvūs, hibridiniai ir nuotoliniai salos režimo aptikimo būdai. Pasyvūs salos režimai veikia patikimai, jų įrengimas, lyginant su kitomis apsaugomis, nėra brangus, tačiau šio metodo trūkumas – didelė neaptikimo zona. Aktyvūs salos režimo aptikimo metodai pasižymi greitu veikimu, maža neaptikimo zona, tačiau jų įrengimas yra brangus ir ekonomiškai nenaudingas mažai mikrotinklo sistemai. Hibridiniai metodai yra aktyvių ir pasyvių metodų derinys. Šis metodas padeda sumažinti pasyvių apsaugų neaptikimo zonas. Nuotoliniai metodai yra labai patikimi, tačiau jie taip pat nėra ekonomiškai mažoms sistemoms, kadangi reikalingi brangūs įrenginiai, tokie kaip multiplekseriai, komutatoriai ir pan.
4. Sumodeliuotas mikrotinklas Matlab Simulink programinio paketo pagalba, veikiantis prijungtas prie pagrindinio vidutinės įtampos (10 kV) tinklo. Mikrotinklas sumodeliuotas su 150 kW saulės elektrine, 100 kW energijos kaupikliu, 100 kW dyzelgeneratoriumi ir statine apkrova. Kad užtikrinti patikimą mikrotinklo veikimą su pagrindiniu tinklu, saulės elektrinės ir kaupiklio inverterių valdymas sumodeliuotas PQ valdymo principu, kuris užtikrina, jog mikrotinklo generuojamos galios perteklius bus atiduotas į pagrindinį tinklą, ir atvirkščiai – pritrūkus galios mikrotinkle, vartotojas gaus reikiamą galios kiekį iš pagrindinio tinklo.
5. Sumodeliuotos keturios pasyvios apsaugos bei mikrotinklas, veikiantis prijungtas prie pagrindinio skirstomojo tinklo, Matlab Simulink programinio paketo pagalba.
6. Atliktas apsaugų veikimo tyrimas įvairiomis tinklo gedimo sąlygomis. Atliekant tyrimą pastebėta, jog įtampos ir dažnio apsaugos suveikė patikimiausiai, kuomet prijungimo taške įtampa bei dažnis peržengė nustatytas ribas. Tuo tarpu vektorinių poslinkio apsauga suveikė tik tuo atveju, kuomet vietinė mikrotinklo gamyba buvo didesnė nei vietinės apkrovos suvartojimas. ROCOF apsauga suveikė, kai vietinė gamyba buvo daug mažesnė, nei vietinė generacija. Taip pat trifazio trumpojo jungimo metu, apsauga pradėjo veikti klaidingai. Šie du suveikimo atvejai patvirtina literatūroje aprašomus atvejus, kuomet ROCOF apsauga suveikia, kai apkrova yra gerokai mažesnė už gamybą, taip pat naudojant šią apsaugą išauga didelė tikimybė klaidingam tinklo atjungimui.

Literatūros šaltiniai

1. ZHANG Z., CHEN W., *Research on the relay protection system of micro-grid* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-11-25]. Publikuota 2015-02. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/279322669_Research_on_the_relay_protection_system_of_micro-grid
2. HOOSHYAR A., FELLOW I.R., *Microgrid protection* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-11-27]. Publikuota 2017-07. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7885003>
3. OUDALOV A., FIDIGATTI A., *Adaptive network protection in microgrids* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-05].
4. HOSSEINI A.S., ABYANEH A.H., SADEGHI H.H.S., RAZAVI F., NASIRI A., *An overview of microgrid protection methods and the factors involved* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-07]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116302088>
5. MIRSAEIDI S., SAID M.D., MUSTAFA W.M., HABIBUDDIN H.M., GHAFARI K., *Progress and problems in microgrid protection schemes* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-01-05] Publikuota 2014-06. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003694>
6. ZHANG Z., LI Y., CHEN W., *Research of the Microgrid Protection Relay* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-01-07]. Publikuota 2015-02. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/279322669_Research_on_the_relay_protection_system_of_micro-grid
7. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., *IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems IEEE Std 1547.4™-2011* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-01-12]
8. LI C., CAO C., CAO Y., KUANG Y., ZENG L., FANG B., *A review of islanding detection methods for microgrid* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-10-20]. Publikuota 2014-04. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002536>
9. AHMAD K.E.N., SELVARAJ J., RAHIM A.N., *Review of the islanding detection methods in grid-connected PV inverters* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-10-25]. Publikuota 2013-02. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211300049X>
10. KONG X., XU X., YAN Z., CHEN S., YANG H., HAN D., *Deep learning hybrid method for islanding detection in distributed generation* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-11-05]. Publikuota 2018-01. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310267>
11. SKOK S., FRLAN K., UGARKOVIC K., *Detection and protection of distributed generation from island operation by using PMUs* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-11-05]. Publikuota 2017-09. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217354632>
12. ROPP E.M., BEGOVIC M., ROHATGI A., KERN A.G., BONN H.R., GONZALEZ S., *Determining the Relative Effectiveness of Islanding Detection Methods Using Phase Criteria and Nondetection Zone* [interaktyvus]. [žiūrėtas 2018-11-07]. Prieiga per: https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=875495&fbclid=IwAR1yn5qcBojn3Ey31gHVxJLWemLQDAoprVMAVjFwRW_LQKwSbxuUin3bKF0&tag=1
13. ZHOU X., GUO T., MA Y., *An overview on operation and control of microgrid* [interaktyvus]. [žiūrėtas 2018-11-11]

14. QIANG L., LIBIN Y., LIANGYU M., WEILIANG L./ YINSONG W., Modeling and control of Wind/PV/Battery microgrid based on Matlab/Simulink [interaktyvus]. [žiūrėtas 2018-12-10]. Prieiga per: <https://www.atlantis-pess.com/proceedings/icitmi-15/25840015>
15. LIU Y., CHEN S., CHANG Y., LEE Y., Development of a Modelling and Simulation Method for Residential Electricity Consumption Analysis in a Community Microgrid System [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-12]. Publikuota 2017-07. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/318497881_Development_of_a_Modelling_and_Simulation_Method_for_Residential_Electricity_Consumption_Analysis_in_a_Community_Microgrid_System
16. AKHTAR Z., SAQIB A.M., *Microgrids formed by renewable energy integration into power grids pose electrical protection challenge* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-03-15]. Publikuota 2016-06. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116305778>
17. BANU V.I., ISTRATE M., *A Study on Anti-Islanding Detection Algorithms for Grid-Tied Photovoltaic Systems* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-03-02]. Publikuota 2014-05. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6850940>
18. ATIQ J., *Modelling of a grid connected solar PV system using MATLAB/simulink* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-02-15]. Publikuota 2017-03. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/314719630_Modelling_of_a_grid_connected_solar_PV_system_using_MATLABsimulink
19. GUPTA P., BHATIA S.R., JAN K.D., *ROCOF Relay for Islanding Detection* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-02-01] Publikuota 2017-04. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7497479>
20. BUGDAL R., DYSKO A., BURT M.G., MCDONALD R.J., *Performance analysis of the ROCOF and Vector Shift methods using a dynamic protection modelling approach* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-03-02]. Prieiga per: https://www.academia.edu/19657739/Performance_analysis_of_the_ROCOF_and_Vector_Shift_methods_using_a_dynamic_protection_modelling_approach
21. BAYRAK G., *A Communication Based Islanding Detection Method for Photovoltaic Distributed Generation Systems* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-02-18]. Publikuota 2014-07. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/267155135_A_Communication_Based_Islanding_Detection_Method_for_Photovoltaic_Distributed_Generation_Systems
22. BOHAN L., *Advanced ROCOF protection of distribution systems. PhD thesis, University of Nottingham* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-02-17]. Prieiga per: <http://eprints.nottingham.ac.uk/14344/>
23. SKOČIL W., GOMIS-BELLMUNT O., MONTESINOS-MIRACLE D., *Passive and Active Methods of Islanding for PV systems* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-03-11]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/224600391_Passive_and_active_methods_of_islanding_for_PV_systems
24. ISA A.I.M, MOHAMAD H., YASIN Z.M., *Evaluation on Non-detection Zone of Passive Islanding Detection Techniques for Synchronous Distributed Generation* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-03-14]. Publikuota 2015-04. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7298336>

25. MAHAT P., CHEN Z., BAK-JENSEN B., *Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-04-15]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/224313886_Review_of_islanding_detection_methods_for_distributed_generation
26. BOWER W., ROPP M., *Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utilityinteractive power systems* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-04-20].
27. DYSKO A., *Loss of Main Protection. University of Strathclyde Glasgow, UK* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-05-10].
28. CHANDRAKAR S.C., DEWANI B., CHANDRAKAR D., *AN ASSESSMENT OF DISTRIBUTED GENERATION ISLANDING DETECTION METHODS* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-05-15].
29. BUGDAL R., DYSKO A., BURT G.M., MCDONALD J.R *Performance analysis of the ROCOF and Vector Shift methods using a dynamic protection modelling approach* [interaktyvus]. [žiūrėta 2019-05-15].