



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės elektrinių parko įtakos distancinės apsaugos veikimui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Andrius Kasparavičius

Projekto autorius

Doc. Almantas Bandza

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Saulės elektrinių parko įtakos distancinės apsaugos veikimui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Andrius Kasparavičius

Projekto autorius

Doc. Almantas Bandza

Vadovas

Doc. Audrius Jonaitis

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Andrius Kasparavičius

Saulės elektrinių parko įtakos distancinės apsaugos veikimui tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Andrius Kasparavičius

Patvirtinta elektroniniu būdu

Kasparavičius, Andrius. Saulės elektrinių parko įtakos distancinės apsaugos veikimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Saulės elektrinė, keitiklis, sinchroninis generatorius, distancinė apsauga.

Kaunas, 2023. 51 p.

Santrauka

Šio tyrimo tikslas ištirti didelės galios saulės elektrinės įtaką aukštos įtampos linijų distancinėms apsaugoms. Išnagrinėti netipines saulės elektrinių keitiklių gedimų charakteristikas, sukurti distancinės apsaugos ir didelės galios saulės elektrinės modelius.

Kasparavičius, Andrius. Investigation of Solar Power Park Impact over Operation of Distant Protection. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. dr. Almantas Bandza; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): study field – electrical engineering, study field group – engineering science.

Keywords: Solar power park, inverter, synchronous generator, distance protection.

Kaunas, 2023. 51 p.

Summary

The aim of this research is to discuss the impact of solar power park to high voltage overhead line distance protection. To analyze not typical electronic inverter short circuit characteristics, create distance protection and solar power park models.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Teorinė dalis.....	12
1.1. Distancinė apsauga	12
1.1.1. Simetrinės komponentės.....	12
1.1.2. Distancinės apsaugos veikimo principas	15
1.1.3. Distancinės apsaugos veikimo pakopos	17
1.1.4. Distancinės apsaugos veikimo charakteristikos	18
1.1.5. Avarinių verčių varžų skaičiavimai.....	21
1.2. Saulės elektrinių įtaka perdavimo tinklo gedimų charakteristikoms.....	22
1.2.1. Pereinamieji procesai.....	23
1.3. Keitiklio avarinių srovių reguliavimas	23
1.4. Įtaka distancinės apsaugos veikimui	25
1.5. Tinklo kodeksas.....	27
2. Tiriamoji dalis.....	30
2.1. Distancinė apsauga	30
2.2. Saulės elektrinė.....	39
2.3. Modelio eksperimentinė dalis.....	40
2.3.1. Saulės elektrinės gedimų charakteristikos.....	40
2.3.2. Distancinės apsaugos tyrimas su prijungta saulės elektrine	44
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Įtampos ir srovės verčių skaičiavimas pagal TJ tipą.....	21
2 lentelė. Modeliuojamos sistemos duomenys.....	34
3 lentelė. Sinchroninio generatoriaus ir saulės elektrinės trumpųjų jungimų rezultatai.....	44
4 lentelė. Atstumo ir TJ varžos įtaka distancinės apsaugos veikimui.....	44
5 lentelė. Distancinės apsaugos bandymas prie skirtingų generacijos lygių.....	47

Paveikslų sąrašas

1 pav. Simetrinės dedamosios.....	12
2 pav. Simetrinių dedamųjų ekvivalentinė schema.....	13
3 pav. Distancinės apsaugos schema.....	16
4 pav. Apkrovos ir trumpojo jungimo charakteristika.....	17
5 pav. Distancinės apsaugos veikimo pakopų schema.....	18
6 pav. Pagrindinės distancinės apsaugos charakteristikos.....	19
7 pav. Nekryptinės apsaugos varžos charakteristika.....	19
8 pav. Kryptinės apsaugos varžos charakteristika.....	20
9 pav. Kryptinės apsaugos varžos daugiakampė charakteristika.....	20
10 pav. Keitiklio pereinamųjų procesų ir distancinės apsaugos sąryšio grafikas.....	23
11 pav. abc ir $\alpha\beta$ sistemos.....	24
12 pav. Saulės elektrinės prijungtos prie perdavimo linijos vienlinijinė schema.....	26
13 pav. „Fault ride through“ charakteristika.....	28
14 pav. Reaktyviosios galios palaikymas.....	29
15 pav. Simulink modeliuojama schema.....	31
16 pav. Distancinės apsaugos blokelis.....	31
17 pav. Furjė transformacijos įtaka įtampos matavimui.....	33
18 pav. Varžos charakteristika vienfazio trumpojo jungimo metu su SG.....	36
19 pav. Modelio srovių ir įtampų matavimai.....	36
20 pav. SG pažeistos fazės srovės dedamosios.....	37
21 pav. Varžos charakteristika dvifazio trumpojo jungimo metu.....	38
22 pav. Trumpojo jungimo srovių dedamosios su SG.....	38
23 pav. Saulės elektrinės modelis.....	39
24 pav. PLL funkcijos išpildymas modelyje.....	39
25 pav. Varžos charakteristika vienfazio trumpojo jungimo metu su prijungta SE.....	41
26 pav. Avarijos srovės vertės dedamosios su prijungta saulės elektrine.....	41
27 pav. Varžos charakteristika dvifazio trumpojo jungimo metu su prijungta saulės elektrine.....	42
28 pav. SE srovės dedamųjų pasiskirstymas dvifazio trumpojo jungimo metu.....	43
29 pav. Saulės elektrinės srovių pasiskirstymas trumpojo jungimo metu.....	43

30 pav. SG ir SE atvirkštinės sekos generacijos skirtumas.	43
31 pav. Papildomos varžos įtaka distancinei apsaugai su saulės elektrine.....	46
32 pav. Reaktyviosios galios generacija.....	47
33 pav. Pažeistos fazės srovės kampas avarijos vietoje.....	47

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AEI – Atsinaujinantys energijos ištekliai

RAA – Relinė apsauga ir automatika

TJ – Trumpasis jungimas

SG – Sinchroninis generatorius

SE – Saulės elektrinė

DA – Distancinė apsauga

Įvadas

Patikimas elektros energijos tiekimas yra viena iš svarbiausių šalies ekonominės pažangos dalių. Oro ir požeminės kabelinės linijos naudojamos elektros energijos tiekimui nutolusiems nuo generacijos taškų vartotojams. Bet koks aukštos įtampos perdavimo linijos sutrikimas gali, palikti vartotojus be elektros energijos, sudaryti didelius nuostolius tiek perdavimo tinklo operatoriui, tiek elektros energijos gamyba užsiimančioms įmonėms. Blogiausiu atveju sutrikimas gali sukelti grandininę reakciją ir sukelti visuotinę EES griūtį. Todėl svarbu, jog perdavimo tinklo relinės apsaugos įtaisų veikimas būtų teisingas ir atitiktų patikimumo, selektyvumo, greičio ir jautrumo kriterijus.

Šalies elektros perdavimo tinklo operatorius „Litgrid“ ruošiasi atsinaujinančių energijos išteklių proveržiui. Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje nurodoma, jog 2030 metais 45% suvartojamos energijos privalo būti pagaminta iš AEI. Taip pat, Europos sąjunga išleido Europos Parlamento ir Tarybos direktyva (ES) 2018/2001, pagal kuria skatinama atsinaujinančių energijos išteklių plėtra. Pagal šią direktyvą numatoma, jog privalomas AEI procentinės dalies tikslas būtų bent 32%. Elektros energijos sistemos plėtra neįmanoma be naujai integruojamų energijos gamybos sistemų, skirstyklų, pastočių bei tinklų. Spartus galios elektronikos tobulėjimas įtakoja didelės galios saulės elektrinių ir vėjo parkų gamybos ir įdiegimo kainas, palyginus su tradicinėmis elektrinėmis. Didinant AEI kiekį elektros sistemose, nauja tendencija yra didelio galingumo saulės elektrinių ir vėjo jėgainių parkai, kurių galia siekia šimtus megavatų. Šie parkai jungiami prie aukštos įtampos perdavimo linijų, kurių apsaugos privalo atitikti selektyvumo, greičio bei jautrumo reikalavimus.

Visi išvardinti aspektai leidžia suprasti, jog saulės elektrinių parkų kiekis elektros tinkle didės, todėl svarbu ištirti kokia yra tokių parkų įtaka aukštos įtampos perdavimo linijų distancinėms apsaugoms.

Problema: Saulės elektrinių netipinių gedimų charakteristikų įtaka perdavimo tinklo distancinės apsaugos veikimui.

Darbo tikslas: Ištirti prie didelės galios saulės elektrinės prijungtos linijos distancinės apsaugos veikimą.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti distancinės apsaugos veikimo principus;
2. Išanalizuoti literatūrą susijusią su saulės elektrinių parko įtaka distancinės apsaugos veikimui;
3. Sumodeliuoti saulės elektrinių parko bei distancinės apsaugos modelius;
4. Nustatyti netipines saulės elektrinės keitiklio gedimų charakteristikas;
5. Ištirti saulės elektrinių parko įtaką perdavimo linijų distancinės apsaugos veikimui.

Tyrimo metodai – mokslinės literatūros analizė, modeliavimas naudojant Matlab Simulink programinį paketą.

1. Teorinė dalis

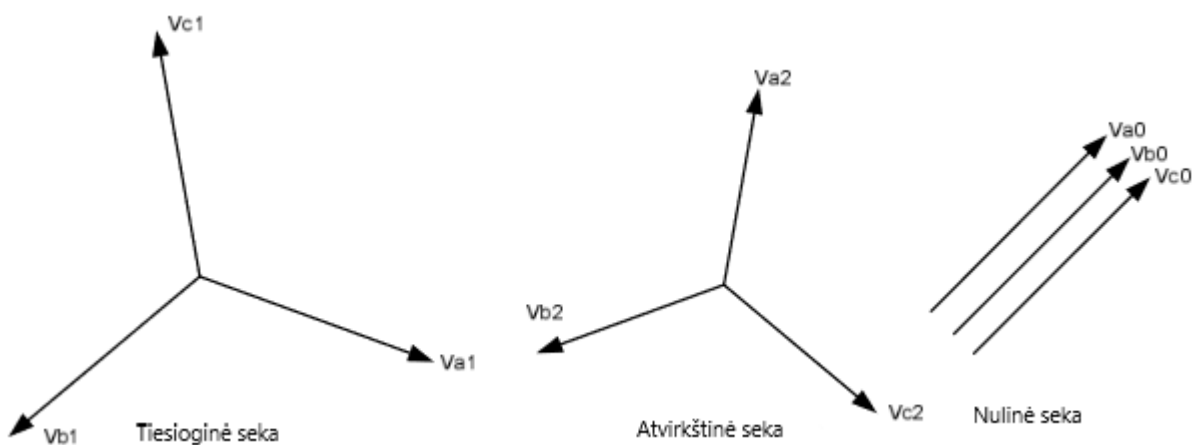
1.1. Distancinė apsauga

Selektyvus bei greitas perdavimo linijų apsaugų veikimas yra svarbus elektros sistemos saugumui. Bet kokie gedimai tinkle privalo būti izoliuoti nuo elektros energijos sistemos. Srovinės apsaugos tokios kaip: MSA, srovės atkirta, negali užtikrinti selektyvumo ir greitaveikos, dėl sudėtingo perdavimo tinklo išsidėstymo. Linijos diferencinės apsaugos atitinka nurodytus reikalavimus, tačiau ši apsauga reikalauja sudėtingų ir brangių komunikacinių jungčių. Todėl dažniausiai naudojamos apsaugos perdavimo linijoms apsaugoti – distancinė apsauga ir kryptinės nulinės sekos srovės apsaugos. Priklausomai nuo tinklo išdėstymo ir jo parametrų, apsaugų terminalai gali turėti ir kitas apsaugas tokias kaip: blokuotės nuo švytavimų, automatinis apsaugų pagreitinimas, atkirta nuo įžemėjimų, linijos galiuko apsauga, įtampos žemėjimo apribojimo apsauga, linijos perkrova. Distancinė apsauga gali būti naudojama kaip transformatorių rezervinė apsauga[1].

Šiame skyriuje bus nagrinėjamas distancinės apsaugos veikimo principas, charakteristikos ir pritaikymas.

1.1.1. Simetrinės komponentės

Normalaus darbo režimu, EES veikia simetriniu subalansuotu trifaziu režimu. Sistemoje atsiradus trikdžiui – nesimetriniam trumpajam jungimui, iš simetrinio subalansuoto režimo pereinama į nesimetrinį. Tam jog, būtų supaprastintas vienfazių, dvifazių, dvifazių su žeme trumpųjų jungimų verčių skaičiavimas, naudojamas simetrinių komponentių metodas. Esant išvardintiems trumpiesiems jungimams, sistemą galima pakeisti į trijų simetrinių sistemų sumą. Pirmoji sistema – tiesioginės sekos sistema, įprastai joje fazės sukasi prieš laikrodžio rodyklę ($V_{a1} \rightarrow V_{b1} \rightarrow V_{c1}$). Antroji sistema – atvirkštinės sekos sistema. Pagal ją fazės susikeičia vietomis ir sukasi prieš laikrodžio rodyklę ($V_{a1} \rightarrow V_{c1} \rightarrow V_{b1}$). Trečioji sistema vadinama nulinės sekos sistema. Šios sistemos vektoriai nesisuka[1].



1 pav. Simetrinės dedamosios [5].

Pagal simetrinių dedamųjų metodą:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}; \quad (1)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}; \quad (2)$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}; \quad (3)$$

Čia, V_a, V_b, V_c – fazinės įtampos vektoriai, V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} – tiesioginės sekos įtampos vektoriai, V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} – atvirkštinės sekos įtampos vektoriai, V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} – nulinės sekos įtampos vektoriai.

Žinodami A fazės simetrines dedamąsias, B ir C fazių simetrines dedamosios apskaičiuojamos taip:

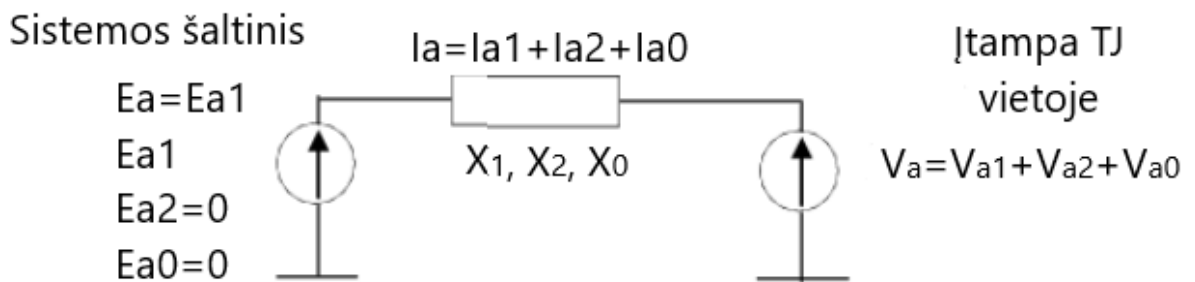
$$V_{a1}; V_{b1} = V_{a1} \cdot a^2; V_{c1} = V_{a1} \cdot a; \quad (4)$$

$$V_{a2}; V_{b2} = V_{a2} \cdot a; V_{c2} = V_{a2} \cdot a^2; \quad (5)$$

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}; \quad (6)$$

Čia, $a = e^{j120}$ vektoriaus padėtis. Daugyba iš a reiškia vektoriaus padėties pakeitimą prieš laikrodžio rodyklę 120 laipsnių.

Nesimetrinių trumpųjų jungimų srovėms apskaičiuoti patogiu naudoti ekvivalentinę schemą:



2 pav. Simetrinių dedamųjų ekvivalentinė schema [2].

Ekvivalentinė schema susideda iš elektrovaros ir elemento, kurio tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės sekos varžos yra X_1, X_2 ir X_0 . Avarijos vietoje atsiranda nesimetrinės trumpojo jungimo įtampos dedamosios U_{A1}, U_{A2}, U_{A0} . Pagal schemą sudaromos trys lygtys, kurias sudaro atskirų sekų srovės įtampos ir varžos:

$$V_{a1} = E_{a1} - j \cdot I_{a1} \cdot X_1; \quad (7)$$

$$V_{a2} = 0 - j \cdot I_{a2} \cdot X_2; \quad (8)$$

$$V_{a0} = 0 - j \cdot I_{a0} \cdot X_0; \quad (9)$$

Laikoma, jog sistemos šaltinis generuoja simetrišką tiesioginės sekos įtampą. Tokiu atveju atvirkštinės ir nulinės sekų įtampos yra lygios nuliui. Laikome, jog TJ vyksta A fazėje, išvedamos šešios lygtys[2]:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_0; \quad (10)$$

$$I_b = a^2 \cdot I_{a1} + a \cdot I_{a2} + I_0; \quad (11)$$

$$I_c = a \cdot I_{a1} + a^2 \cdot I_{a2} + I_0; \quad (12)$$

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_0; \quad (13)$$

$$V_b = a^2 \cdot V_{a1} + a \cdot V_{a2} + V_0; \quad (14)$$

$$V_c = a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2} + V_0; \quad (15)$$

Pagal šias išraiškas galima surasti srovę bei įtampą bet kuriame tinklo taške, tačiau jos turi dvyliką nežinomųjų. Tam kad jie būtų apskaičiuoti, reikia remtis avarijos ypatumais ir išskirti papildomai tris lygtis.

Vienfazis trumpasis jungimas

Vykstant trumpajam jungimui, pažeistos fazės įtampa yra lygi nuliui, o kitų fazių srovės lygios nuliui. Įsivaizduojame, jog TJ vyksta A fazėje:

$$V_A^{(1)} = 0;$$

$$I_B^{(1)} = 0;$$

$$I_C^{(1)} = 0;$$

Pagal ankstesnes išraiškas, gaunamos A fazės TJ tiesioginės sekos lygtys:

$$I_{A1}^{(1)} = I_{A2}^{(1)} = I_{A0}^{(1)}; \quad (16)$$

$$I_{A1}^{(1)} = \frac{E_{A\Delta}}{j(X_1 + X_2 + X_0)}; \quad (17)$$

Gaunama vienfazio TJ A fazės srovė:

$$I_{A1tj}^{(1)} = 3 \cdot I_{A1}^{(1)}; \quad (18)$$

Dvifazis trumpasis jungimas

Trumpojo jungimo vietoje, vienos fazės srovė lygi nuliui, o kitų fazių įtampos ir srovės susilygina. Įsivaizduojame, jog TJ vyksta tarp B ir C fazių:

$$I_A^{(2)} = 0;$$

$$I_B^{(2)} = I_C^{(2)};$$

$$V_B^{(2)} = V_C^{(2)};$$

Tiesioginės sekos išraiškos:

$$I_{A1}^{(2)} = -I_{A2}^{(2)}; \quad (19)$$

$$I_{A1}^{(2)} = \frac{E_{A\Delta}}{j(X_1 + X_2)}; \quad (20)$$

Dvifazis trumpasis jungimas su žeme

Trumpojo jungimo vietoje, vienos fazės srovė lygi nuliui, o kitų fazių įtampos ir srovės susilygina. Įsivaizduojame, jog TJ vyksta tarp B, C fazių ir žemės[2]:

$$I_A^{(1,1)} = 0;$$

$$V_B^{(1,1)} = V_C^{(1,1)} = 0;$$

Tiesioginės sekos išraiškos:

$$I_{A1}^{(1,1)} + I_{A2}^{(1,1)} + I_{A0}^{(1,1)} = 0; \quad (21)$$

$$I_{A1}^{(1,1)} + I_{A2}^{(1,1)} + I_{A0}^{(1,1)} = 0; \quad (22)$$

$$I_{A1}^{(1,1)} = \frac{E}{j(X_1 + \frac{X_2 \cdot X_0}{X_2 \cdot X_0})}; \quad (23)$$

$$I_{A1}^{(1,1)} = \frac{E}{j(X_1 + \frac{X_2 \cdot X_0}{X_2 \cdot X_0})}; \quad (24)$$

$$I_{A0}^{(1,1)} = -I_{A1}^{(1,1)} \frac{X_2}{X_2 + X_0}; \quad (25)$$

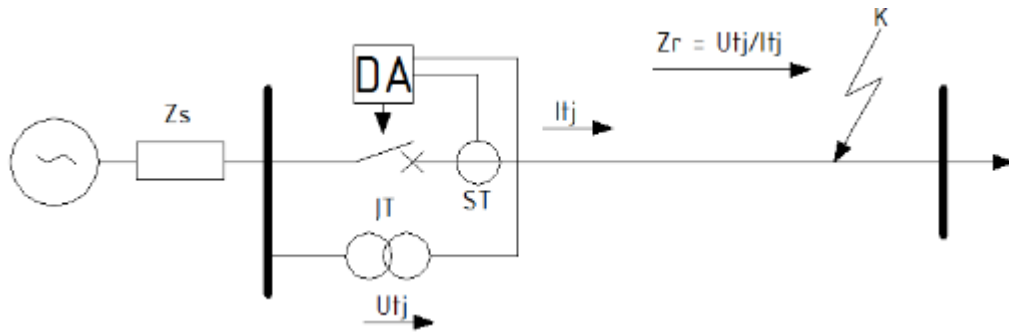
1.1.2. Distancinės apsaugos veikimo principas

Distancinės apsaugos terminalas apskaičiuoja varžą iš srovės ir įtampos transformatorių, perduodamų matavimų. Perdavimo linijos varža paprastai paskirstoma tolygiai per visą jos ilgį. Todėl terminalas pakankamai tiksliai gali išskirti gedimo vietą linijoje. Trumpojo jungimo metu linijoje įtampa sumažėja, o srovė padidėja. Terminalas išmatuotą varžą lygina su atitinkamai įvestomis reikšmėmis terminale, nustato atitinkamą pakopos veikimą ir suformuoja jungtuvo išjungimo signalą.[5]

Linijos pilnutinė varža skaičiuojama pagal formulę:

$$Z_L = \frac{U_L}{I_L} = R_L + jX_L; \quad (26)$$

čia, U_L – saugomos linijos įtampa, V , I_L – saugomos linijos srovė, A ; R_L – aktyvioji linijos varža, Ω ; X_L – linijos reaktyvioji varža, Ω .



3 pav. Distancinės apsaugos schema. [5]

Distancinė apsauga apibūdinama aktyviosios - reaktyviosios varžos charakteristikomis, kuriose vaizduojama saugomos linijos, apkrovos ir trumpojo jungimo varža.

Normaliomis darbo sąlygomis, išmatuota varža yra lygi apkrovos varžai. Jos dydis yra atvirkščiai proporcingas nuo linijos perduodamos galios:

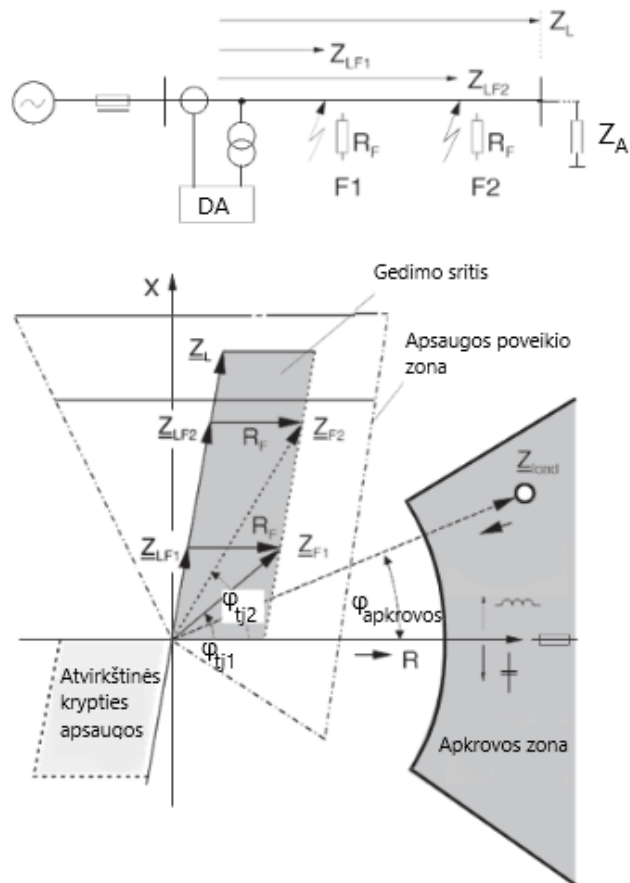
$$Z_{apkrovos} = \frac{U_{linijos}^2}{P_{apkrovos}}; \quad (27)$$

Šiuo atveju kampas tarp įtampos ir srovės dedamųjų priklauso nuo į liniją perduodamos aktyviosios ir reaktyviosios galios kiekio:

$$\varphi_{apkrovos} = \text{atan} \left(\frac{Q_{linijos}}{P_{linijos}} \right); \quad (28)$$

Linijoje vykstant trumpajam jungimui, varžos vertė sumažėja ir pasiekia trumpojo jungimo vertę. Avarijos metu išmatuotos varžos dydis priklauso nuo atstumo tarp avarijos ir matavimo transformatorių vietos. 3 paveikslėlyje parodyta, kaip trumpojo jungimo vieta įtakoja varžos tašką apsaugos veikimo charakteristikoje. Z_{LF1} – arti linijos vykstantis trumpasis jungimas, Z_{LF2} – nutolęs trumpasis jungimas. Taip pat įvertinama avarijos metu atsiradusio elektros lanko varža R_F . Dydžiais φ_{tj1} ir φ_{tj2} vaizduojami kampai tarp trumpojo jungimo srovės ir įtampos atitinkamai avarijai vykstant artimesniame bei tolimesniame taškuose.

Charakteristikoje išskiriama apkrovos zona, kurioje varžos taškas vyrauja esant normalioms darbo sąlygoms. Priklausomai nuo apkrovos dydžio galima spręsti ar varžos siekimas R kryptimi yra panašus numatomo gedimo atsparumui. Taip pat charakteristikoje išskirtos dvi varžos sritys, pagal kurias terminalas nusprendžia ar trumpojo jungimo srovė teka į linijos pusę, ar į šynų pusę.[4]



4 pav. Apkrovos ir trumpojo jungimo charakteristika.[5]

1.1.3. Distancinės apsaugos veikimo pakopos

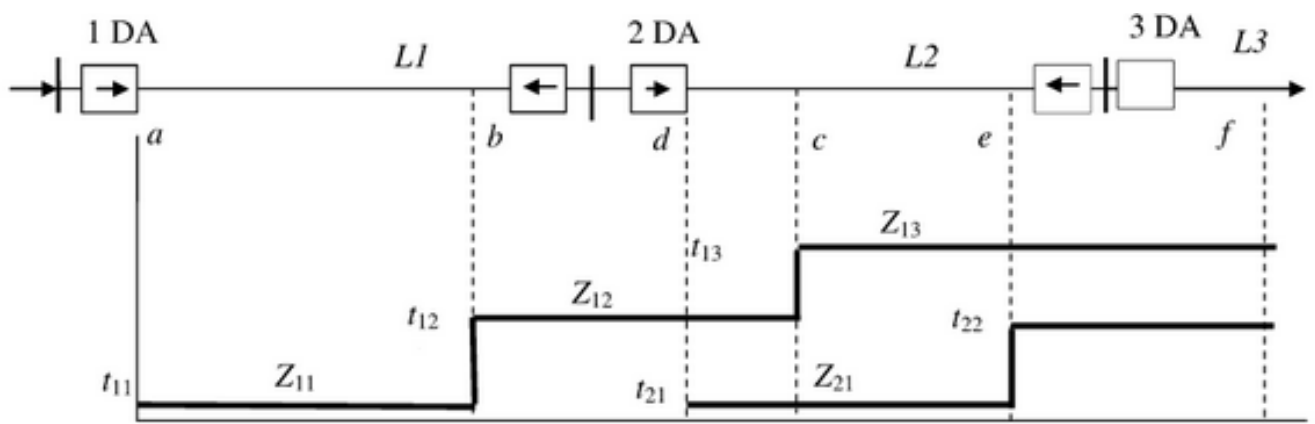
Įprastai distancinės apsaugos terminaluose naudojamos trys suveikimo pakopos pilnai linijos apsaugai ir aplink esančių linijų apsaugų rezervavimui. Kai kurie skaitmeniniai terminalai turi papildomas dvi pakopas, kurios gali būti naudojamos tolesnių linijų rezervavimui arba pastotėje esančių šynų apsaugų rezervavimui. Daugeliu atvejų trijų pakopų distancinė apsauga sudaroma pagal šiuos kriterijus:

- *1-oji pakopa*: Ši pakopa traktuojama kaip pagrindinė ir apsaugo 80-85% saugomos linijos.
- *2-oji pakopa*: Ši pakopa naudojama likusios linijos apsaugai ir kitos artimiausios linijos 50 % ilgio rezervavimui.
- *3-ioji*: Pakopa skirta rezervuoti visą saugomą liniją, visą artimiausią liniją ir apie 25 % trečiosios linijos ilgio.

Kiekviena pakopa turi papildoma laiko suveikimo nustatymą. Pirmosios pakopos veikimo delsa įprastai nustatoma pagal terminalo gamintoją taip, jog veikimas būtų vykdomas kuo greičiau, nelaukiant kitų įtaisų poveikio. Antrosios pakopos veikimo laikas paprastai yra 0,25 – 0,4 sekundės, o trečiosios pakopos laikas gali svyruoti nuo 0,6- 1 s. Svarbu įvertinti tai, jog prie gretimų linijų prijungtų transformatorių apsaugų poveikio laikas privalo būti trumpesnis, nei jas rezervuojančios pakopos laikas.[2]

Kadangi pirmosios pakopos veikimo laikas yra minimalus, į apsaugos zoną neturi patekti linijos gale esančios šynos, todėl apsaugai naudojama tik 80-85 % pirmosios linijos. Taip pritaikoma įvertinant galima matavimo transformatorių paklaidą ir varžos apskaičiavimo netikslumus [5].

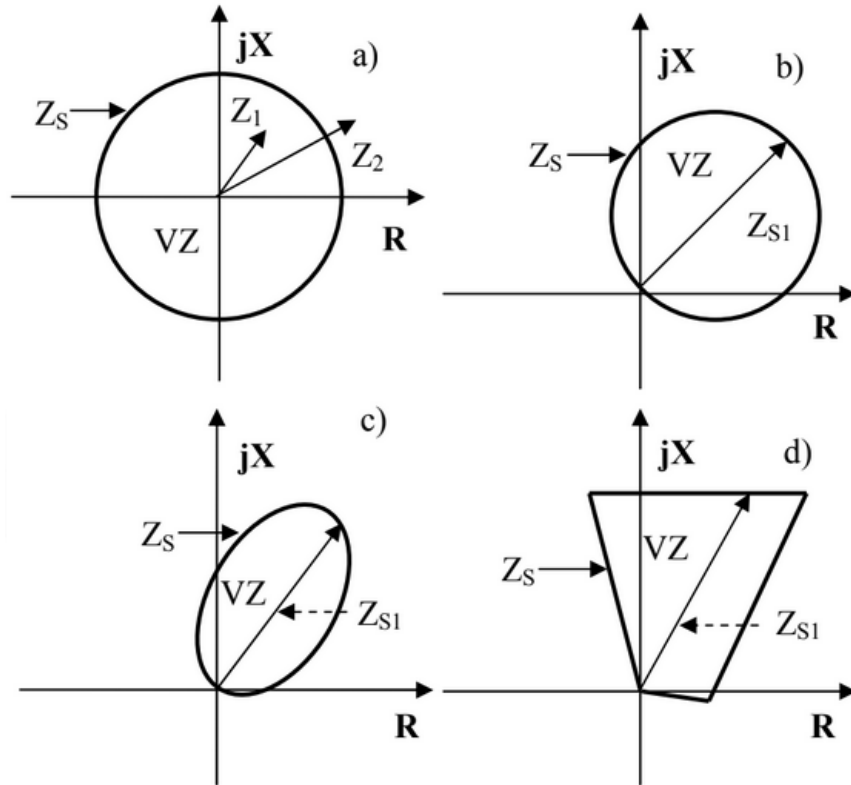
5 paveikslėlyje pavaizduota dvipusio maitinimo linijos apsaugos veikimo pakopų schema. Pirmosios zonos Z_{11} aktyviosios ir reaktyviosios varžos parametrai parenkami, jog apsaugos veikimo pakopa apimtų 80-85 % L1 linijos dalies (dalis ab) t. y. trumpajam jungimui esant tos linijos dalyje, veikia pirmoji pakopa, kuri jungtuvą atjungia po t_{11} delsos. Antroji pakopa Z_{12} apima likusią L1 linijos dalį ir rezervuoja apie 50 % linijos L2 dalies (dalis bc). Trečioji pakopa parinkta taip, jog rezervuotų likusią L2 linijos dalį ir apimtų linijos L3 dalį. Tokiu principu pirmoji, antroji ir trečioji distancinės apsaugos (1 DA, 2 DA, 3 DA) rezervuoja viena kita. Todėl sugedus vienai iš linijų distancinių apsaugų, pažeista linija bus atjungiamą su didesniu laiko uždelsimu.[2]



5 pav. Distancinės apsaugos veikimo pakopų schema.[2]

1.1.4. Distancinės apsaugos veikimo charakteristikos

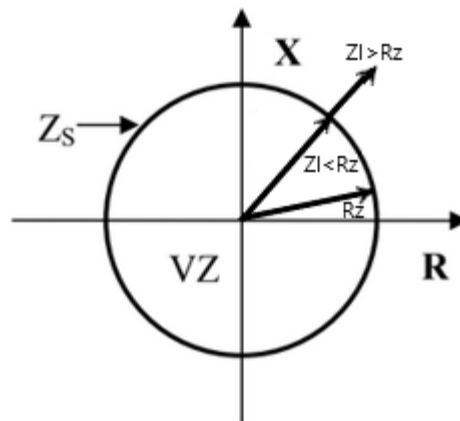
Varžos relių charakteristikų pasirinkimas priklauso nuo linijos parametrų, tinklo konfigūracijos, režimo pobūdžių. Charakteristikos, kurios nepereina į trečiąją ketvirtį (paveikslėlyje 6b, 6c, 6d) yra kryptinės ir yra naudojamos linijose su dvipusiu maitinimu. Naudojant tokias charakteristikas svarbu atsižvelgti į srovės ir įtampos transformatorių apvijų poliariškumą. Paveiksle 6a esanti charakteristika gali būti naudojama vienpusio maitinimo linijos apsaugai.[5]



6 pav. Pagrindinės distancinės apsaugos charakteristikos[5]

Nekryptinės apsaugos varžos charakteristika

Paprastoji nekryptinė varžos charakteristika nevertina kampo tarp srovės ir įtampos matavimo, todėl šios charakteristikos aktyviosios – reaktyviosios varžos plokštuma yra apskritimo forma, kurio centras yra ant koordinatinių plokštumos centro. Veikimo charakteristika apibrėžiama Z_s , kuris lygus apskritimo diametru R_z :



7 pav. Nekryptinės apsaugos varžos charakteristika[5].

Apsauga veikia kai $Z_1 \leq R_z$ prie bet kokio kampo φ reikšmės tarp vektorių Z_1 ir aktyviosios varžos ašies R . Saugomos linijos varža vertinama:

$$R^2 + X^2 \leq Z_l^2; \quad (29)$$

čia, R - linijos aktyvioji varža Ω ; X – linijos reaktyvioji varža, Ω ; Z_l - linijos pilnutinė varža, Ω .

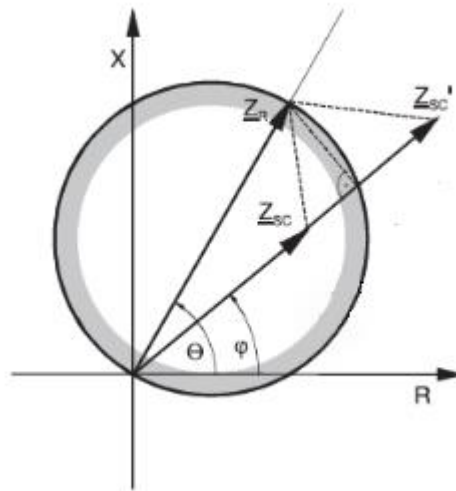
Kryptinės apsaugos varžos charakteristika

Tokios charakteristikos naudojamos linijose su dvipusiu maitinimu (110kV, 330kV). Kryptinės apsaugos varžos charakteristikos suveikimą galima apibrėžti formulę:

$$Z_{SC} = Z_R \cdot (\cos(\theta - \varphi)); \quad (30)$$

čia, Z_{SC} – apsaugos varžos poveikio varža, Ω ; Z_R – linijos varža, Ω ; θ – maksimalus jautrumo kampas, $^\circ$; φ – kampas tarp srovės ir įtampos vektorių, $^\circ$.

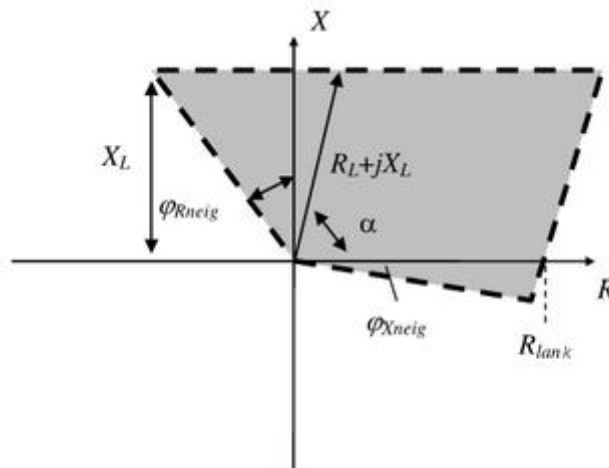
Apsauga veikia kai varžos taškas patenka į apskritimo zoną. Maksimalaus jautrumo kampas nusako, prie kokio kampo tarp srovės ir įtampos apsauga veikia jautriausiai.



8 pav. Kryptinės apsaugos varžos charakteristika [5].

Daugiakampė apsaugos varžos charakteristika

Skaitmeninėse linijų apsaugose plačiai naudojama daugiakampė varžos charakteristika. Relės su šią charakteristika pasižymi lanksčiu veikimu ir elektros lanko varžos įvertinimu.



9 pav. Kryptinės apsaugos varžos daugiakampė charakteristika.[5]

Daugiakampė charakteristika nusakoma dydžiais:

$R_L + jX_L$ – linijos pilnutinė varža;

R_{lank} – elektros lanko varža;

φ_{Rneig} – atvirkštinės varžos kampas (vertinamas apie 25°)

φ_{Xneig} – talpinės varžos kampas (vertinamas apie 15°)

α - kampas tarp aktyvios varžos ašies ir linijos pilnutinės varžos vektoriaus.

Beveik 70% avarių linijose yra vienfaziai trumpieji jungimai. Tokiu atveju įvertinama elektros lanko varža, kuria praplečiama daugiakampės varžos charakteristika. Elektros lanko varža apskaičiuojama[5]:

$$R_{lank} = \frac{28707 \cdot L}{I^{1.4}}; \quad (31)$$

čia, L – lanko ilgis metrais, m ; I – trumpojo jungimo srovė, A .

1.1.5. Avarinių verčių varžų skaičiavimai

Kompleksinių varžų matavimai privalo būti lygūs perdavimo linijos kompleksinei varžai. Skaičiuojama dalinant įtampos reikšmes iš srovės reikšmių (V_R/I_R). Įtampos ir srovės reikšmės skaičiuojamos priklausomai nuo trumpojo jungimo tipo [5]:

1 lentelė. Įtampos ir srovės verčių skaičiavimas priklausomai nuo TJ tipo.

	Trumpojo jungimo tipas	V_R	I_R
K^1	AG	U_{L1-E}	$I_{L1} + K I_0$
	BG	U_{L2-E}	$I_{L2} + K I_0$
	CG	U_{L3-E}	$I_{L3} + K I_0$
$K^{1,1}, K^2$	AB/ABG	$U_{L1-E} - U_{L2-E}$	$I_{L1} - I_{L2}$
	AC/ACG	$U_{L1-E} - U_{L3-E}$	$I_{L1} - I_{L3}$
	BC/BCG	$U_{L2-E} - U_{L3-E}$	$I_{L2} - I_{L3}$
K^3	ABC/ABCG	$U_{L1-E} = U_{L2-E} = U_{L3-E}$	$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$

čia,

AG, BG, CG – vienfaziai trumpieji jungimai;

V_{Af}, V_{Bf}, V_{Cf} – fazinės įtampos;

I_A, I_B, I_C – fazinės srovės;

K - atsargos koeficientas:

$$K = \frac{(Z_0 - Z_1)}{Z_1}; \quad (32)$$

čia, Z_0, Z_1 – nulinės sekos ir tiesioginės sekos kompleksinės varžos.

Skaitmeniniuose distancinės apsaugos terminaluose varžos skaičiavimas vykdomas visoms šešioms galimoms kontūrų sujungimams: L1-E, L2-E, L3-E, L1-L2, L2-L3, L3-L1.

Dvifazio trumpojo jungimo kontūro skaičiavimas

Trumpasis jungimas L1-L2 kontūre:

$$I_{L1} \cdot Z_L - I_{L2} \cdot Z_L = U_{L1-E} - U_{L2-E}; \quad (33)$$

čia, U_{L1-E}, U_{L2-E} – išmatuotos įtampos A ir B fazinės reikšmės, V; I_{L1}, I_{L2} – išmatuotos srovė A ir B fazių reikšmės, A; Z_L – pilnutinė linijos varža.

Linijos varža:

$$Z_L = \frac{U_{L1-E} - U_{L2-E}}{I_{L1} - I_{L2}}; \quad (34)$$

Vienfazio trumpojo jungimo kontūro skaičiavimas

Trumpasis jungimas L1 – E kontūre:

$$U_{L1-E} = I_{L1} \cdot (R_L - jX_L) - I_E \cdot \left(\frac{R_E}{R_L} \cdot R_L + j \left(\frac{X_E}{X_L} \right) \cdot X_L \right); \quad (35)$$

čia, R_L – linijos aktyvioji varža, jX_L – reaktyvioji linijos varža, I_E – srovė tekanti žemės kontūru, R_E – aktyvioji žemės kontūro varža, X_E – reaktyvioji žemės kontūro varža [5].

1.2. Saulės elektrinių įtaka perdavimo tinklo gedimų charakteristikoms

Distancinė apsaugos relės veikimas pagrįstas tiesioginės sekos varžos matavimo principu. Matavimo elementas matuoja varžos vertę nuo matavimo vietos (srovės ir įtampos transformatorių įrengimo vietos). Distancinė apsauga pritaikyta veikti tinkle, kuriame energijos generacija vykdoma iš įtampos šaltinių (pvz. sinchroniniai generatoriai). Šių šaltinių gedimų charakteristikos yra gerai žinomos. Atsinaujinančių energijos šaltinių, kurie jungiami prie tinklo per keitiklius gedimų charakteristikos skiriasi nuo įtampos šaltinių. Gedimų charakteristikas gali įtakoti pačių valdymo parametrai, gedimo sąlygos. Jų reakcija į gedimą nėra tiesinė ir skiriasi priklausomai nuo gamintojo bei valdymo strategijos trumpojo jungimo metu.

Straipsnyje [11] analizuojama per keitiklius prijungtų AE šaltinių įtaka trumpiesiems jungimas perdavimo linijoje. Lyginant įprastais įtampos šaltiniais (toliau SG – sinchr. generatoriai), kurių trumpojo jungimo srovė siekia nuo 3 iki 6 karto vardinės srovės (esant mažos varžos trumpajam jungimui gali būti iki 10 kartų vardinės srovės), keitiklio srovės yra ribotos 1.1 – 1.5 karto vardinės reikšmės. Ribojimas reikalingas apsaugoti keitiklio elektroninius komponentus nuo didelės srovės sukeltamų defektų. Įprastų šaltinių atveju yra didelis skirtumas tarp apkrovos srovių ir trumpojo jungimo srovių. Tai supaprastina apsaugą nuo srovės padidėjimo veikimą.

Dauguma atvejų, SG generuojama trumpojo jungimo srovė įprastai siekia 80-90° ir yra induktyvinio pobūdžio. Tuo tarpu sistemos su keitikliais, generuojamos srovės kampas gali būti įvairus. Jis priklauso nuo tinklo konfigūracijos, TJ tipo bei keitiklio valdymo strategijos. Įprastai naudojama

valdymo strategija, kurios veikimas nurodo palaikyti reaktyviosios ir aktyvios galios balansą esant įtampos kritimui. Tokiu atveju į tinklą generuojama arba vartojama reaktyvioji galia.

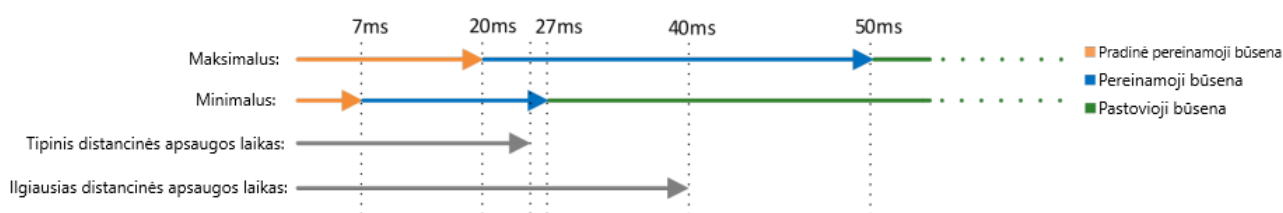
Įprastų šaltinių gedimų charakteristikų analizė rodo, jog gedimo metu generuojant tiesioginės sekos srovę, taip pat atsiranda atvirkštinės sekos srovė (asimetrinių TJ jungimų metu). Sistemose, kurios prijungtos per keitiklį, pagal valdymo strategiją atvirkštinės sekos srovė yra pilnai arba dalinai slopinama. Tik keli nacionaliniai tinklo kodeksai reglamentuoja atvirkštinės sekos srovės tiekimą į tinklą. Keitiklio srovės ribojimas taikomas tiesioginės sekos srovės (aktyviosios ir reaktyviosios) ir atvirkštinės sekos srovės fazorių sumai, bet kurioje fazėje, todėl atvirkštinės sekos srovė yra ribojama.

1.2.1. Pereinamieji procesai

AEŠ prijungtų per keitiklį atsakas į gedimą sudarytas iš trijų pakopų: pradinis pereinamasis laikotarpis, pereinamasis laikotarpis ir pastovioji būseną. Pradinis pereinamasis laiko tarpas yra tarp gedimo linijoje pradžios ir keitiklio gedimo atpažinimo, po kurio pakeičiama kontroliavimo strategija. Trumpasis jungimas sukelia įtampos kritimą, tuo pačiu ir srovės padidėjimą pažeistoje fazėje. Vykstant šiam periodui, srovių ribojimas gali būti viršytas ir pasiekti iki 3 kartų vardinės vertės. Pradinis pereinamasis laikotarpis trunka 7-20 ms.[13]

Po pradinio pereinamojo laikotarpio, seka pereinamasis laikotarpis, kuris trunka 20-30 ms. Šis laikotarpis apima laiko tarpą tarp keitiklio kontroliavimo strategijos keitimo ir pastoviosios būsenos. Kontroliuojamos srovės dydis pradeda mažėti, tačiau dalį tiesioginės sekos srovės gali sudaryti ir atvirkštinė seka.

Pastovioji būseną charakterizuota pagal apribotos srovės dydį. Šis periodas pasiekiamas praėjus 27-50 ms po gedimo pradžios. Pastovioji būseną tęsiasi iki gedimo pašalinimo arba esant FRT (angl. fault ride through) reikalavimui. 10 paveikslėlyje atvaizduota minimali ir maksimali kiekvieno periodo trukmė ryšium su distancinės apsaugos pirmosios pakopos suveikimo laiku.



10 pav. Keitiklio pereinamųjų procesų ir distancinės apsaugos sąryšio grafikas [13]

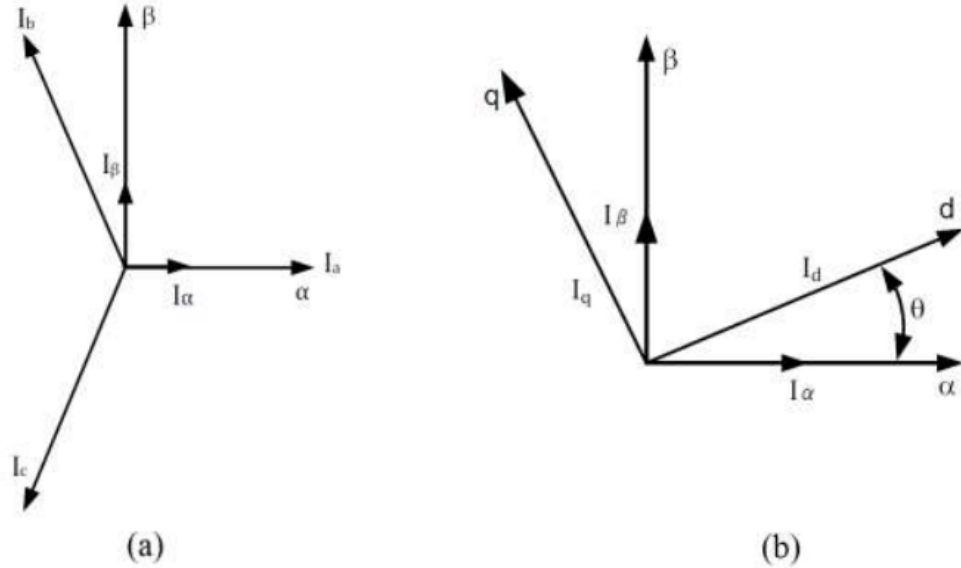
1.3. Keitiklio avarinių srovių reguliavimas

Tinkle atsiradus asimetrijai, vykdomos keitiklio valdymo strategijos, kurios paprastai slopina atvirkštinės sekos srovę, slopina aktyviosios arba reaktyviosios galios svyravimus. Siekiant išpildyti valdymo strategiją, keitiklis reguliuoja tiesioginės ir atvirkštinės sekos etalonines reikšmes pasitelkiant dq transformaciją.[12]

D-q transformacija

D-q transformacija pasižymi, jog ji nėra stacionari, o sukasi pagal tam tikrą kampinį dažnį. Ši sistema naudojama srovei, įtampai ir magnetiniam srautui aprašyti pagal dvi komponentes [8].

Pirmiausia pasitelkus Clarke transformaciją, trifazė sistema keičiama į dvifazę $\alpha\beta$ stacionarią sistemą. Park transformacijos būdu stacionari $\alpha\beta$ sistema keičiama į dvifazę $d-q$ besisukančią sistemą. Ši sistema sukasi kampiniu greičiu ω . Ašis d yra pasukta α ašies atžvilgiu, priklausomai nuo kampo θ [8].



11 pav. a – abc ir $\alpha\beta$ sistemos; b – $\alpha\beta$ ir dq sistemos.

Srovių išraiškos po Clarke transformacijos matricos pavidalu:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad (36)$$

Srovių išraiškos po Park transformacijos matricos pavidalu:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; \quad (37)$$

Srovės dydžius esančius dq formoje, taip pat galima paversti į trifazę sistema pagal atvirkštines Park ir Clarke transformacijas. Lygtys gali būti taikomos įtampos bei statoriaus magnetinio srauto skaičiavimams [8].

Tiesioginės ir atvirkštinės sekos srovių matricos išraiška, kai keitiklio valdymo strategija – atvirkštinės sekos srovės eliminavimas:

$$\begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_d^+ & e_q^+ \\ e_d^- & -e_q^- \\ -Ke_d^- & Ke_q^- \\ -Ke_q^- & -Ke_d^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ \bar{M} \\ Q^* \\ \bar{N} \end{bmatrix}; \quad (38)$$

Čia, e_d^+ , e_q^+ , e_d^- ir e_q^- tiesioginės ir atvirkštinės sekos įtampos. P^* ir Q^* yra nustatomos aktyviosios ir reaktyviosios galios dydžiai. Toliau:

$$M = (e_d^+)^2 + (e_q^+)^2 - K \left[(e_d^-)^2 + (e_q^-)^2 \right]; \quad (38)$$

$$N = (e_d^+)^2 + (e_q^+)^2 + K \left[(e_d^-)^2 + (e_q^-)^2 \right]; \quad (39)$$

Čia, K - kintamasis, kuris lygus 0, 1, -1, skirtas slopinti atvirkštinės sekos srovę, aktyviosios galios arba reaktyviosios galios svyravimus gedimo pereinamuoju laiku.

Pavyzdžiui keitiklio valdymo strategija, kuria siekiama subalansuoti trijų fazių sistemą nesimetrinio trumpojo jungimo metu, apima tik teigiamosios sekos komponentę. Strategija išreiškiama taip [13]:

$$i_\phi = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(P^*)^2 + (Q^*)^2}{(e_d^+)^2 + (e_q^+)^2}} \cos(\omega t + \theta_0 + \varphi + \theta_\phi); \quad (40)$$

Čia, ϕ – indeksas atitinkantis A, B arba C fazę; ω – kampinis greitis; θ_0 – kampas tarp d^+ ir α – ašies, vykstant trumpajam jungimui tinkle. Laikoma, jog: $\theta_a = 0^\circ$, $\theta_b = -120^\circ$ ir $\theta_c = 120^\circ$. φ kampas išreiškiamas:

$$\varphi = \text{atan} \left(\frac{(e_q^+ \cdot P^* - e_d^+ \cdot Q^*)}{(e_d^+ \cdot P^* + e_q^+ \cdot Q^*)} \right); \quad (41)$$

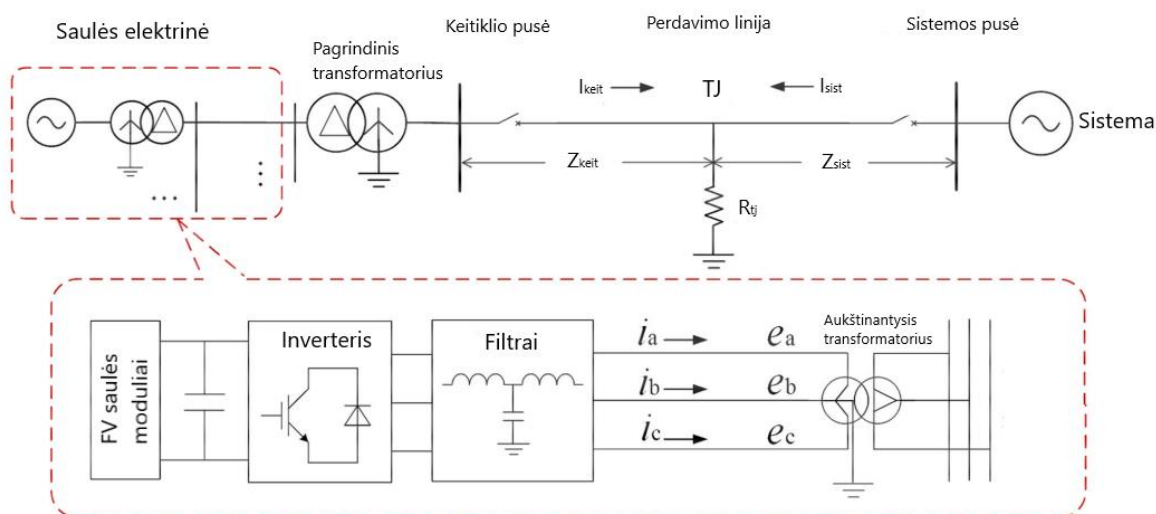
Iš formulės (40) žinoma, jog trumpojo jungimo srovės dydis priklauso nuo įtampos lygio, užduotų aktyviosios ir reaktyviosios galios komandų. Vykstant gedimui tinkle, srovės amplitudė viršija maksimalią leistiną keitiklio reikšmę. Siekiant apsaugoti keitiklio elementus, d ir q ašių srovių reikšmės yra ribojamos. Kai maksimali srovė – i_{max} viršija keitiklio leistiną srovės reikšmę - i_{lim} , tiesioginės sekos srovės vertės nustatomos [13]:

$$i_d^+ \cdot \left(\frac{i_{lim}}{i_{max}} \right); \quad (42)$$

$$i_q^+ \cdot \left(\frac{i_{lim}}{i_{max}} \right); \quad (43)$$

1.4. Įtaka distancinės apsaugos veikimui

Straipsnyje [13] analizuojama AEI šaltinių prijungtų per keitiklį, įtaka distancinei apsaugai. Aprašoma sistema sudaryta iš atsinaujinančios energijos šaltinio prijungto prie tinklo per keitiklį, aukštos įtampos linijos bei sistemos. Naudojamos dvi distancinės apsaugos, dėl dvipusio linijos maitinimo:



12 pav. Saulės elektrinės prijungtos prie perdavimo linijos vienlinijinė schema.

Vienfazio trumpojo jungimo analizė

Matuojama A fazės kontūro varža iš sistemos ir keitiklio pusės gali būti išreikšta:

$$Z_{AGsist} = Z_{AGs1} + \left(1 + \frac{I_{Akeit}}{I_{Asist}}\right) \cdot R_{TJ}; \quad (44)$$

$$Z_{AGkeit} = Z_{AGk1} + \left(1 + \frac{I_{Asist}}{I_{Akeit}}\right) \cdot R_{TJ}; \quad (45)$$

Čia, Z_{AGs1} – teigiamos sekos, A fazės varžos dydis nuo matavimo taško sistemos pusėje iki TJ vietos, Ω ; I_{Akeit} ir I_{Asist} – pažeistos fazės srovės iš keitiklio ir sistemos pusės, A; R_{TJ} – trumpojo jungimo varža, Ω ; Z_{Asist} – Išmatuota DA varžos vertė iš sistemos pusės, Ω ; Z_{AGkeit} – Išmatuota DA varžos vertė iš keitiklio pusės, Ω .

Linijoje vykstant gedimui, generuojama TJ srovės vertė iš keitiklio gali siekti tik 1,1-1,3 karto vardinės srovės, kuri yra ženkliai mažesnė už sinchroninio generatoriaus (apytiksliai 10 kartų didesnė). Pagal (44) išraišką, srovių santykis I_{keit}/I_{sist} – gaunamas nedidelis, tokiu atveju TJ varža iš sistemos pusės - Z_{sist} bus taip pat nedidelė. Tikimybė, jog distancinė apsauga nesuveiks yra maža. Tačiau, varžos matavimo atveju iš keitiklio pusės (pagal išraišką (45)) , avarinių srovių verčių santykis I_{sist}/I_{keit} yra didelis, todėl bendroji avarijos varža Z_{keit} TJ metu taps didelė. Taip pat verta paminėti, jog priklausomai nuo keitiklio valdymo strategijos, pažeistos fazės srovės kampas teoriškai gali kisti nuo 0° iki 360° dėl laike besikeičiančios srovės. Tai įtakoja trumpojo jungimo vietos varžos pobūdį – induktyvinė arba talpinė, todėl, avarijos vertės varžos gali nepatekti į distancinės apsaugos suveikimo zoną [13].

Tarpfazio trumpojo jungimo analizė

Matuojama trumpojo jungimo varža BC fazių kontūru gali būti išreikšta:

$$Z_{BCsist} = Z_{BCs1} + \left(\frac{I_{Bkeit} + I_{Bsist}}{I_{Bsist} - I_{Csist}} \right) \cdot R_{TJ}; \quad (46)$$

$$Z_{BCKeit} = Z_{BCK1} + \left(\frac{I_{Bkeit} + I_{Bsist}}{I_{Bkeit} - I_{Ckeit}} \right) \cdot R_{TJ}; \quad (47)$$

Keitiklio tiekiamą TJ srovę ganėtinai maža, todėl galima priimti: $I_{Bkeit} + I_{Bsist} \approx I_{Bsist}$, $I_{Bsist} - I_{Csist} \approx 2 \cdot I_{Bsist}$. Dėl ribojamos keitiklių generuojamos srovės, sumažėja poveikis matuojamai varžai iš sistemos pusės. Pritaikius atvirkštinės sekos slopinimo strategiją keitiklyje, priimama: $I_{Bkeit} + I_{Bsist} \approx I_{Bsist}$, taip pat $I_{Bkeit} - I_{Ckeit} = \sqrt{3} I_{Bkeit} \cdot e^{j30^\circ}$. Kaip ir vienfazio TJ metu, DA veikimas priklauso nuo srovės kampo. Jeigu srovės kampas vyrauja nuo 30° iki 210° , tai papildoma varža (TJ vietoje) bus induktyvinio pobūdžio. Tai gali įtakoti sistemos pusės DA veikimą. Atveju kai srovės kampas vyrauja nuo -150° iki 30° papildoma varža bus talpinio pobūdžio ir tai gali įtakoti keitiklio pusės DA veikimą [13].

1.5. Tinklo kodeksas

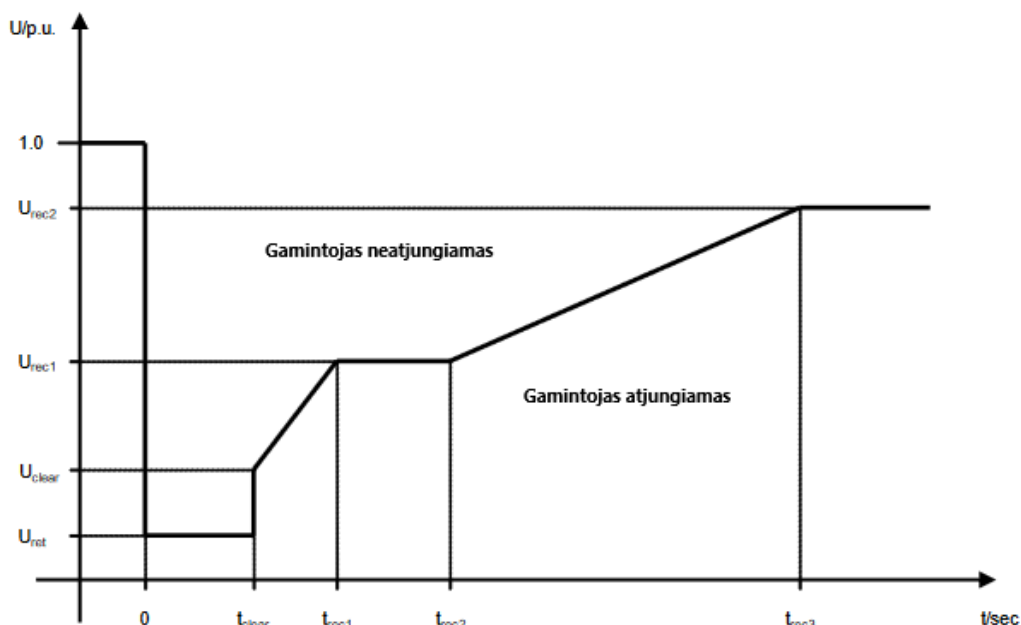
Tinklo kodeksas yra techninis dokumentas, kuriuo nustatomos EES tinklo eksploatavimo, priežiūros ir plėtros taisyklės bei visų EES naudotojų veiksmų reglamentavimo tvarka. Lietuvos elektros tinklų kodekso tikslai:

- užtikrinti elektros energijos gamybos, perdavimo ir skirstymo efektyvumą ir patikimumą;
- reglamentuoti elektros energetikos subjektų teises, pareigas, jiems keliamus reikalavimus, tarpusavio santykius eksploatuojant ir naudojantis elektros energetikos sistema;
- nustatyti perdavimo tinklų Lietuvos teritorijoje ir jungiamųjų linijų su kitomis elektros energetikos sistemomis bei skirstomųjų tinklų eksploatavimo, valdymo bei plėtros tvarką atsižvelgiant į perdavimo ir skirstomųjų tinklų naudotojų poreikius;
- nustatyti nediskriminuojančias gamintojų, skirstomųjų tinklų ir vartotojų įrenginių prijungimo sąlygas;
- sudaryti objektyvias ir nediskriminuojančias naudojimosi tinklais sąlygas visiems elektros energijos rinkos dalyviams;
- sudaryti sąlygas konkurencija pagrįstai elektros energijos rinkai funkcionuoti, sąžiningos konkurencijos tarp gamintojų ir tiekėjų principams įtvirtinti;
- nustatyti informacijos, reikalingos užtikrinant elektros energetikos sistemos saugų ir efektyvų darbą, apsikeitimo tarp elektros energetikos sistemos subjektų koordinuotą plėtrą, vientisumą ir suderinamumą. [21]

Tinklo kodekse aprašomi reikalavimai, kurie skirti gamintojams norintiems prisijungti ir dalyvauti elektros energetikos sistemoje. Bendrieji reikalavimai išskiriami skirtingos galios generacijos šaltiniams. Reikalavimai saulės elektrinių prijungimui virš 15 MW aprašyti žemiau.

Elektrinės veikimas esant tinklo sutrikimui (angl. fault ride through)

Pirmą kartą reikalavimas pristatytas 2005 metais, Didžiosios Britanijos tinklo kodekse. Tinkle vykstant sutrikimui elektrinė (gamintojas) lieka prijungta prie sistemos ir saugo nuo sistemos dažnio griūties. Elektrinės atjungimas priklauso nuo įtampos kritimo dydžio ir ilgio.



13 pav. „Fault ride through“ charakteristika[20]

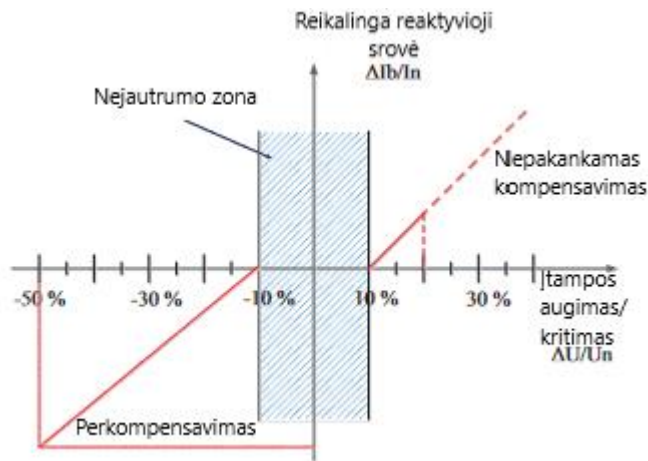
3 lentelė. ENTSO – E „fault ride through“ nustatymai šalių operatoriams.

Įtampos nustatymai		Laiko nustatymai, s	
U_{ret}	0,05-0,15	t_{clear}	0,14-0,25
U_{clear}	$U_{ret}-0,9$	t_{rec1}	t_{clear}
U_{rec1}	U_{clear}	t_{rec2}	t_{rec1}
U_{rec2}	0,85	t_{rec3}	1,5-3,0

Kiekvienas tinklo operatorius privalo nustatyti laiko ir įtampos nuostatus atsižvelgiant į 12 paveikslėlyje esančią įtampos nuo laiko priklausomybę. Priklausomai nuo įtampos charakteristikos, elektrinė privalo išlikti prijungta prie tinklo ir tiekti galią po pašalinto gedimo. Šiuo atveju skaičiavimams naudojama žemiausia galima linijinė įtampa esant simetriniams trumpiesiems jungimams.

Įtampos palaikymas avarijos metu

Gedimo metu, kai įtampa kinta daugiau nei 10% nominalios vertės, srovės šaltinis turi užtikrinti reaktyvią srovę pagal raudoną liniją nubraižyta 4 paveikslėlyje. Kai įtampa yra žemesnė nei 10% nominalios vertės, taikoma žemosios įtampos charakteristika (LVRT), kitu atveju naudojama (HVRT) charakteristika. [20] Atsinaujinantys šaltiniai privalo palaikyti įtampą visų gedimų metu ne tik teigiamos, tačiau ir neigiamos trumpojo jungimo reaktyviosios srovės injekcijomis.[20]



14 pav. Reaktyviosios galios palaikymas[20]

Literatūros analizės išvados:

- Saulės elektrinės gedimo charakteristika skiriasi palyginus su sinchroninio generatoriaus charakteristika dėl atvirkštinės sekos, aktyviosios arba reaktyviosios galios nebalansų slopinimo. Tiesioginės ir atvirkštinės sekų dedamosios yra pilnai kontroliuojamos keitiklio. Tradicinių sinchroninių generatorių sekų dedamosios yra nekontroliuojamos.
- Keitikliuose naudojami srovės ribojimai, kurie neleidžia srovei perkopti 1,1-1,3 vardinės srovės. Šis ribojimas naudojamas siekiant apsaugoti keitiklio elementus.
- Linijoje, prie kurios prijungta saulės elektrinė atsiradus asimetriniam trumpajam jungimui, generuojamos TJ srovės iš keitiklio fazinis kampas gali kisti 0° iki 360° . TJ varža gali būti stipraus induktyvinio arba talpinio pobūdžio, todėl distancinė apsauga gali neveikti tinkamai.
- Įtampos kritimo arba didėjimo metu, keitiklis palaiko leistiną įtampos lygį generuodamas arba vartodamas reaktyviąją energiją.

2. Tiriamoji dalis

Klimato kaita, aukštos elektros energijos kainos paspartino atsinaujinančių elektros energijų išteklių plėtrą. 2016 metais išleista Europos komisijos reglamento nuostata nurodo, jog didesnės nei 15 MW galios elektrinės turi būti jungiamos prie perdavimo tinklo aukštos įtampos linijų. Tikslus, greitas bei selektyvus apsaugų veikimas yra privalomas net ir didėjant AEI kiekiui tinkle. Todėl privaloma ištirti, kokia įtaka daroma linijų apsaugų veikimui. Perdavimo tinklo linijų apsaugai naudojama distancinė apsauga. Jos veikimas pagrįstas varžos kitimu, bei srovės tekėjimo kryptimi saugomoje linijoje. Apsauga veikia selektyviai, kadangi suveikimo laikas priklauso nuo atstumo tarp RAA įtaiso ir trumpojo jungimo vietos linijoje. Distancinės apsaugos veikimas su įprastais įtampos šaltiniais yra gerai ištirtas. Tačiau, trūksta informacijos, kokią įtaką apsaugos veikimui daro per keitiklius jungiami atsinaujinantys šaltiniai. Pasitelkiant specialius modeliavimui skirtus programinius paketus bei sukauptas žinias galima ištirti, distancinės apsaugos veikimą aukščiau aprašytomis sąlygomis.

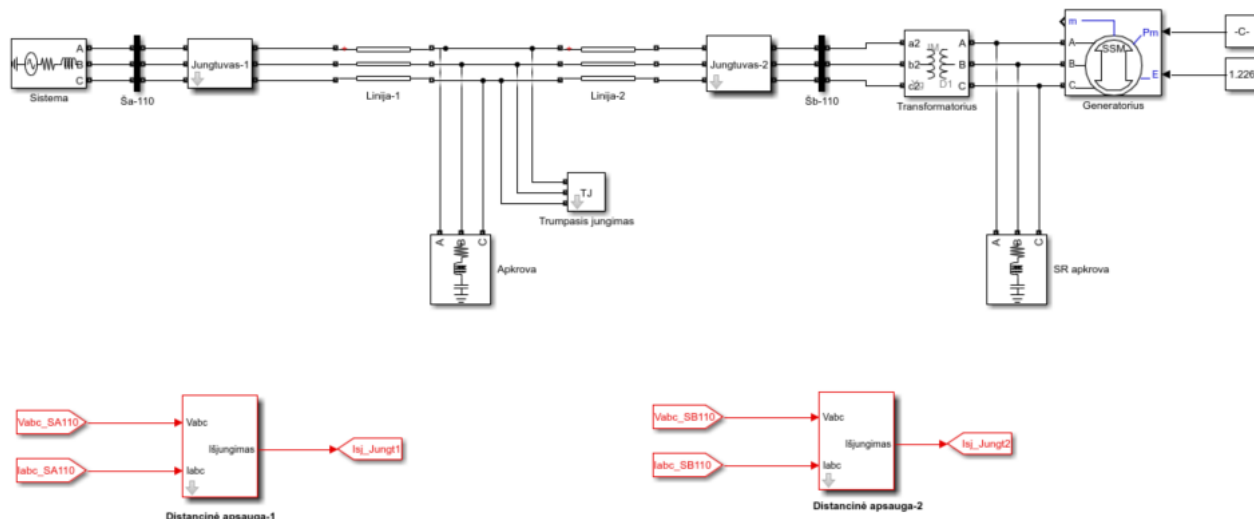
Tiriamajame darbe kuriami distancinės apsaugos, didelės galios saulės elektrinės ir aukštos įtampos linijos modeliai. Pirmajame etape modeliuojama distancinė apsauga su įprastais maitinimo šaltiniais, tam, kad nustatyti ar distancinės apsaugos modelis veikia teisingai. Nustačius, jog sumodeliuota apsauga veikia su visų tipų trumpaisiais jungimais, vietoje įprasto šaltinio, per keitiklį prijungiama saulės elektrinė. Toliau modeliuojant visų tipų trumpuosius jungimus stebima, ar distancinė apsauga veikia tiksliai.

Modeliavimas atliekamas „Matlab Simulink“ programiniu paketu. MATLAB (angl. MATrix LABoratory – matricų laboratorija) sukurta JAV, paplito visame pasaulyje. Šis programinis paketas pasižymi paprastumu – nereikalingos specifinės programavimo žinios. Su Simulink atliekamos įvairios matematinės operacijos, taip pat yra galimybė modeliuoti įvairias sudėtingas sistemas, viena iš jų – elektros energetikos sistemos. Programiniame pakete jau yra paruošti komponentai: transformatorius, linija, elektros energijos šaltinis ir kt. Tai pagreitina darbą ir išsprendžia didelę dalį modeliavimo metu kilusių klausimų.

2.1. Distancinė apsauga

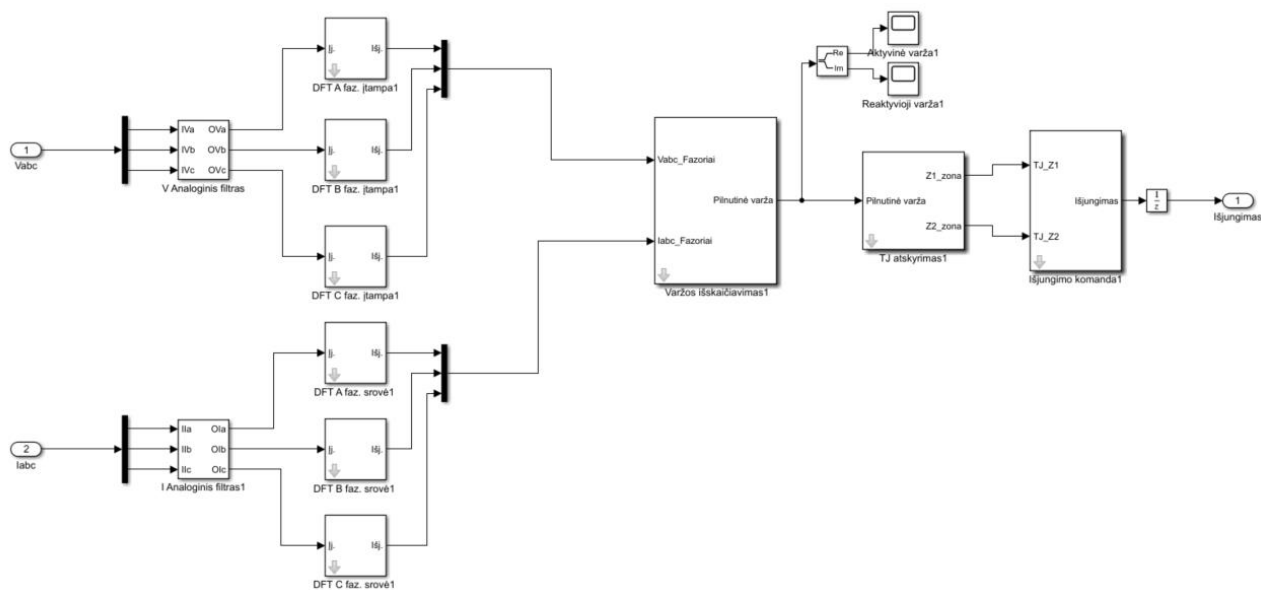
Distancinės apsaugos veikimas pagrįstas varžos kitimo principu. Matuojant saugomo objekto įtampą bei tekančią srovę, RAA įrenginys išskaičiuoja jo varžą. Vykstant trumpajam jungimui – įtampa krenta, o srovė didėja. Tuo metu išskaičiuojama trumpojo jungimo varža ir lyginama su nustatytais parametrais. Jeigu avarijos metu išmatuota varžos vertė yra mažesnė už nustatytą, įrenginys nustato, jog vyksta trumpasis jungimas saugomajame objekte ir formuoja išjungimo signalą į linijos jungtuvą.

Modelyje, aukštos įtampos linija yra dvipusio maitinimo, todėl kuriami du distancinės apsaugos įrenginiai – abiejuose linijos galuose. Modelis sudarytas iš sistemos, dviejų jungtuvų, aukštos įtampos linijos, apkrovos bei sinchroninės mašinos – generatoriaus. Distancinės apsaugos veikimui reikalingi saugomos linijos įtampos ir srovės matavimai. Modeliuojamoje sistemoje blokams *Distancinė apsauga-1* ir *Distancinė apsauga-2* matavimai perduodami atitinkamai iš šynų *Ša-110* ir *Šb-110*.



15 pav. Simulink modeliuojama schema.

Faziųjų įtampų ir srovių matavimai keliauja į analoginių filtrų blokus „V Analoginis filtras“ ir „I Analoginis filtras1“, kuriuose panaudotas žemųjų dažnių filtras, trumpojo jungimo metu atsiradusiems triukšmams nufiltruoti. Filtruoti matavimai pereina į Furjė transformacijos blokus (FFT). Ši transformacija leidžia nustatyti visų faziųjų srovių ir įtampų vektorių dydžius bei jų fazinius kampus. Toliau, šie matavimai perduodami į varžos skaičiavimo bloką, kuris skaičiuoja pilnutines varžas kontūrams (Z_a , Z_b , Z_c , Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca}). Varžų matavimai keliauja į varžos lyginimo bloką, kuriame išskaičiuotą pilnutinę varžą bei kampus lygina su užduotomis apsaugos zonų reikšmėmis. Jeigu išmatuotas varžos dydis patenka į aprašytą varžos charakteristiką, siunčiama komanda į jungtuvo išjungimą.



16 pav. Distancinės apsaugos blokelis

Furjė transformacija

Perduodamų matavimų sinusoidės nėra pakankamai informatyvios. Varžos skaičiavimo atveju reikalingi vektoriniai dydžiai, todėl Furjė transformacija naudojama srovės ir įtampos matavimų absoliutinių verčių ir kampų nustatymui.

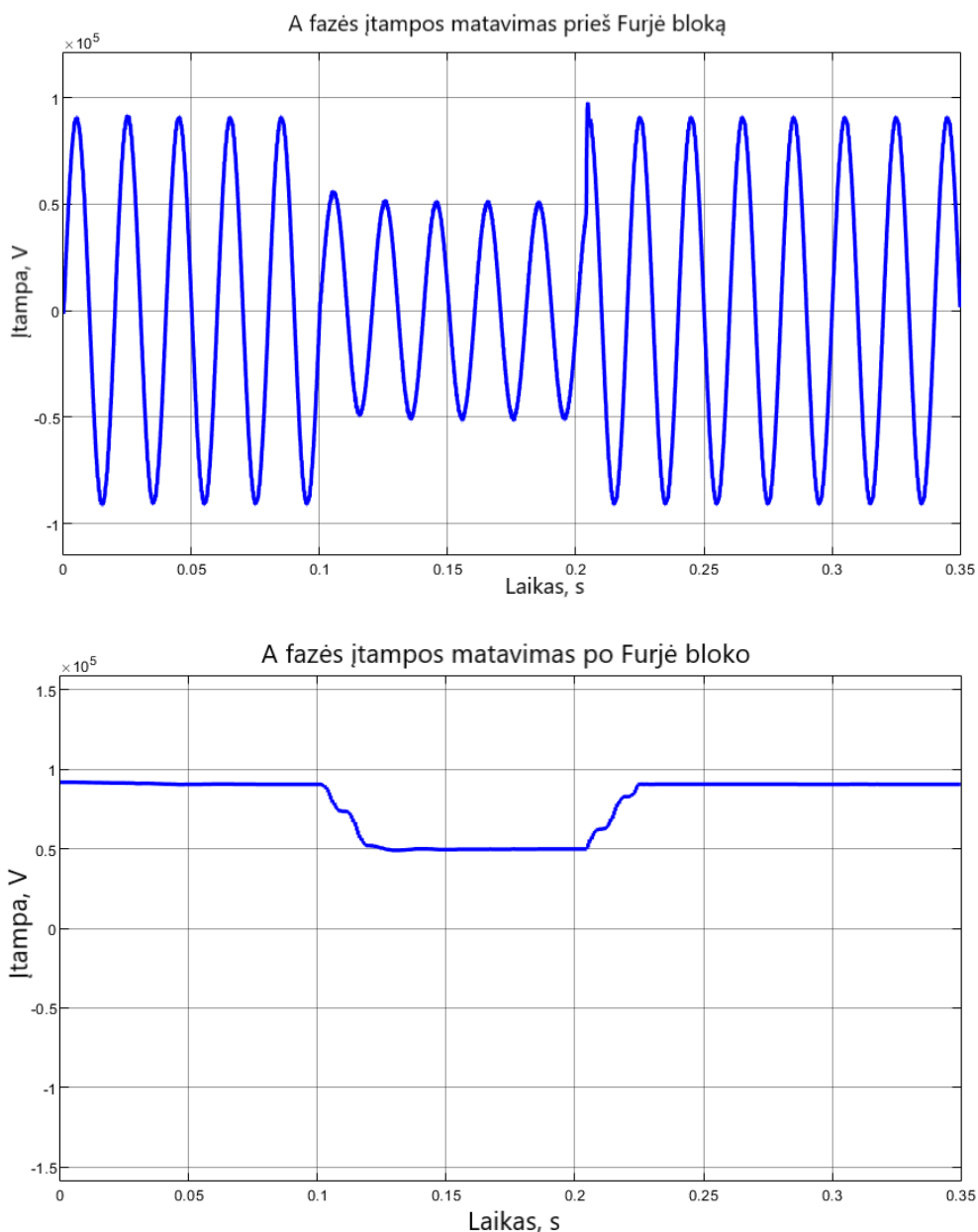
Tikrosios ir menamosios dalys išreiškiamos:

$$X_{v1} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N v_i \sin(\omega i \Delta t); \quad (48)$$

$$X_{v2} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N v_i \cos(\omega i \Delta t); \quad (49)$$

čia, X_{v1} ir X_{v2} – tikrosios ir menamosios dalies dydžiai; N - skaičiavimų kiekis; v_i – analizuojamas sinusoidinis matavimas; Δt – laiko tarpas tarp užfiksuojamų verčių [5].

Matavimai užfiksuoti prieš ir po transformacijos:



17 pav. Furjė transformacijos įtaka įtampos matavimui.

Varžos skaičiavimo blokas

Matavimų vertės gautos iš Furjė transformacijos bloką, panaudojamos pilnutinės varžos skaičiavimui. Skaičiavimas atliekamas kiekvienam trumpojo jungimo kontūrai atskirai. Jeigu bent vieno apskaičiuoto kontūro varža yra mažesnė negu užduota, modelis supranta, jog saugomoje linijoje vyksta trumpasis jungimas ir siunčia išjungimo komandą į jungtuvą.

Vienfazis kontūras:

$$Z_a = \frac{U_a}{(I_a + k \cdot I_0)}; \quad (50)$$

čia, Z_a – pilnutinė A fazės varža; U_a – fazinė įtampa, V; I_a – A fazės srovės dydis, A; k – atsargos koeficientas; I_0 – nulinės sekos srovės dydis, A.

Dvifazis kontūras:

$$Z_{ab} = \frac{(U_a - U_b)}{(I_a - I_b)}; \quad (51)$$

čia, Z_{ab} – pilnutinė AB kontūro varža, Ω ; U_a, U_b – fazinės įtampos, V; I_a, I_b – fazių srovės dydžiai, A. Apskaičiuotu pilnutinių varžų reikšmės perduodamos į verčių lyginimo bloką „TJ atskyrimas“.

2 lentelė. Modeliuojamos sistemos duomenys.

Modeliuojama dalis	Parametras	Nustatymas
Sistema	Įtampa	110 kV
	Dažnis	50 Hz
	Sistemos trumpojo jungimo galia	1100 MVA
	Fazės poslinkio kampas	0°
Linija	Ilgis	50 km
	Aktyvioji varža	0,196 Ω /km
	Reaktyvioji varža	0,293 Ω /km
	Talpa	12e-9 F/km
	Induktyvumas	0,93e-3 H/km
Apkrova	Aktyvioji galia	27 MW
	Reaktyvioji galia	3 MVar
Transformatorius	Koeficientas	110/11 kV
	Galia	30 MW
Generatorius	Įtampa	11 kV
	Dažnis	50 Hz
	Galia	20 MW
	Fazės poslinkio kampas	0°

Distancinės apsaugos pakopų skaičiavimas

Modeliuojama dviejų zonų, kryptinė apvalios charakteristikos apsauga. Priimama jog pirmoji apsaugos pakopa saugo 80% ilgio, o antroji – 150%.

Pagal 4 lentelėje aprašytus parametrus apskaičiuojama aktyvioji ir reaktyvioji varža:

$$R_l = R_{l1} \cdot l = 0,196 \Omega \cdot 50 \text{ km} = 9,8 \Omega; \quad (52)$$

čia, R_l – linijos aktyvioji varža, Ω ; R_{l1} – linijos aktyvioji varža vienam kilometrui, Ω .

$$X_l = X_{l1} \cdot l = 0,418 \Omega \cdot 50 \text{ km} = 20,9 \Omega; \quad (53)$$

čia, X_l – linijos reaktyvioji varža, Ω ; X_{l1} – linijos reaktyvioji varža vienam kilometrui, Ω .

Apskaičiuojama pilnutinė linijos varža:

$$Z_l = \sqrt{R_{l1}^2 + X_{l1}^2} = \sqrt{9,8^2 + 20,9^2} = \sqrt{96,04 + 436,81} = 23,08 \Omega; \quad (54)$$

čia, Z_l – linijos pilnutinė varža, Ω .

Pirmoji distancinės apsaugos zona saugo 80 % linijos ilgio:

$$Z_1 = Z_l \cdot 0,8 = 23,08 \cdot 0,8 = 18,46 \Omega; \quad (55)$$

Antroji distancinės apsaugos zona saugo 150 % linijos ilgio:

$$Z_2 = Z_l \cdot 1,5 = 23,08 \cdot 1,5 = 34,62 \Omega; \quad (56)$$

Saugomos linijos varžos kampas:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{X_l}{R_l} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{9,8}{20,9} \right) = 64,85^\circ; \quad (57)$$

čia, R_l – linijos aktyvioji varža, Ω ; X_l – linijos reaktyvioji varža, Ω .

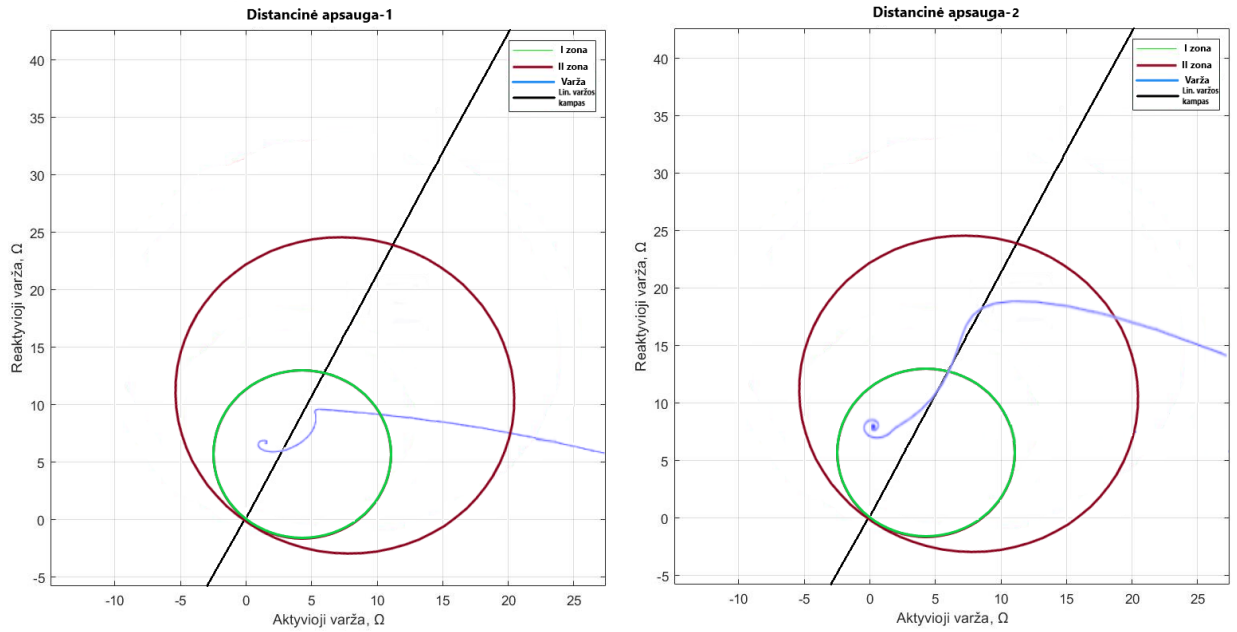
Nustatyti distancinės apsaugos pakopų parametrai suvedami į modelį. Apsaugos patikrinimas vykdomas imituojant vienfazį ir dvifazį trumpuosius jungimus. Modelis trumpojo jungimo metu matuoja varža ir atvaizduoja ją distancinės apsaugos charakteristikoje.

Vienfazis trumpasis jungimas

Aukštos įtampos linijoje modeliuojamas A fazės vienfazis trumpasis jungimas, 25 kilometrų atstumu. Apsauga matuoja pilnutinę Z_a kontūro varžą. Užfiksuota varžos vertė TJ metu, matoma 18 paveikslėlyje. Nustatyta reaktyvioji varža gali būti patikrinta pagal formulę:

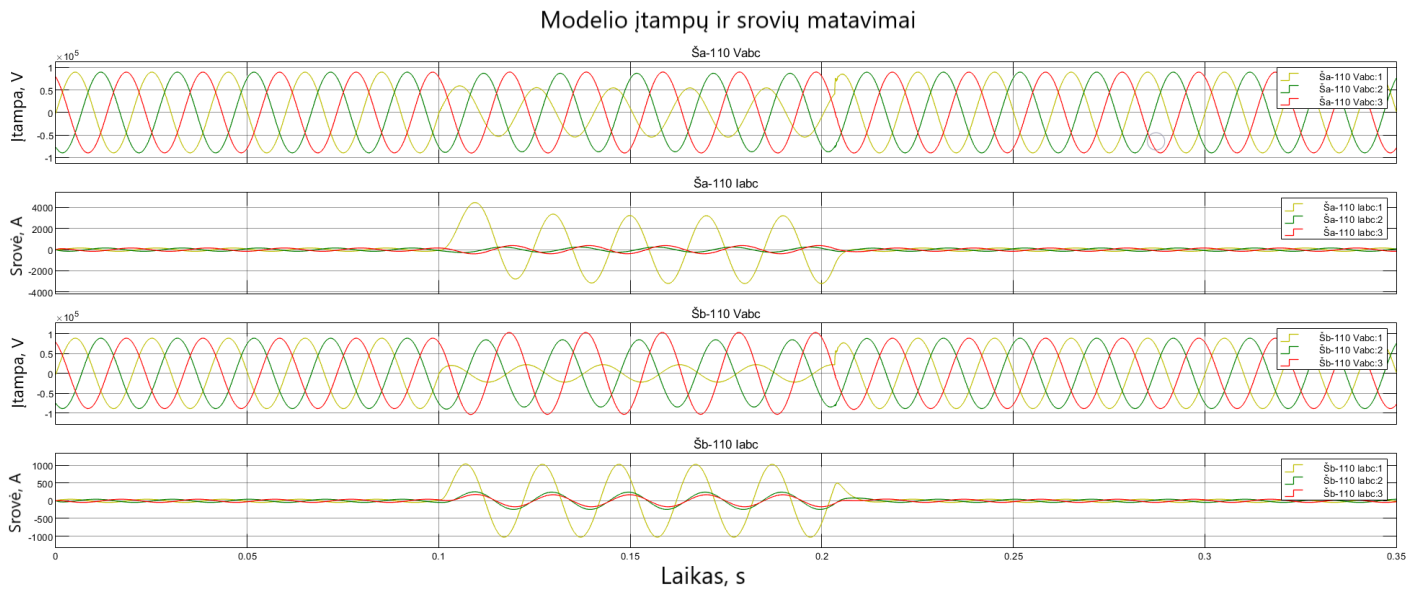
$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot l = 2 \cdot 50 \cdot 0,93 \cdot 10^{-3} \cdot 25 = 7,3 \Omega; \quad (58)$$

čia, f – dažnis, Hz; L - induktyvumas, H; l – linijos ilgis, km.

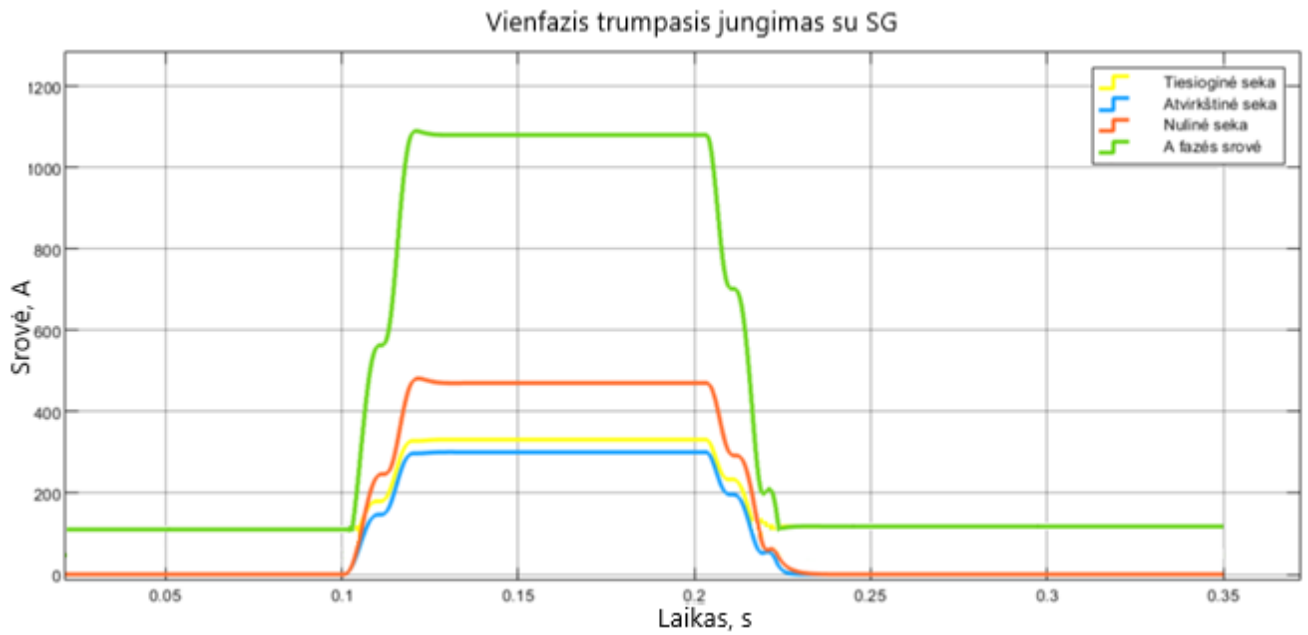


18 pav. Varžos charakteristika vienfazio trumpojo jungimo metu su SG.

Trumpasis jungimas simuliuojamas nuo 0,1 s iki 0,2s. Bendras simuliacijos laikas siekia 0,35 s. 19 paveikslėlyje pavaizduoti įtampos ir srovės grafikai iš abiejų linijos galų. Prie Šb-110 prijungtas sinchroninis generatorius, kurio galia yra mažesnė nei sistemos (prijungtos prie Ša-110), todėl trumpojo jungimo metu SG generuojamos TJ srovės dydis mažesnis nei iš sistemos pusės.



19 pav. Modelio srovių ir įtampų matavimai.



20 pav SG pažeistos fazės srovės dedamosios.

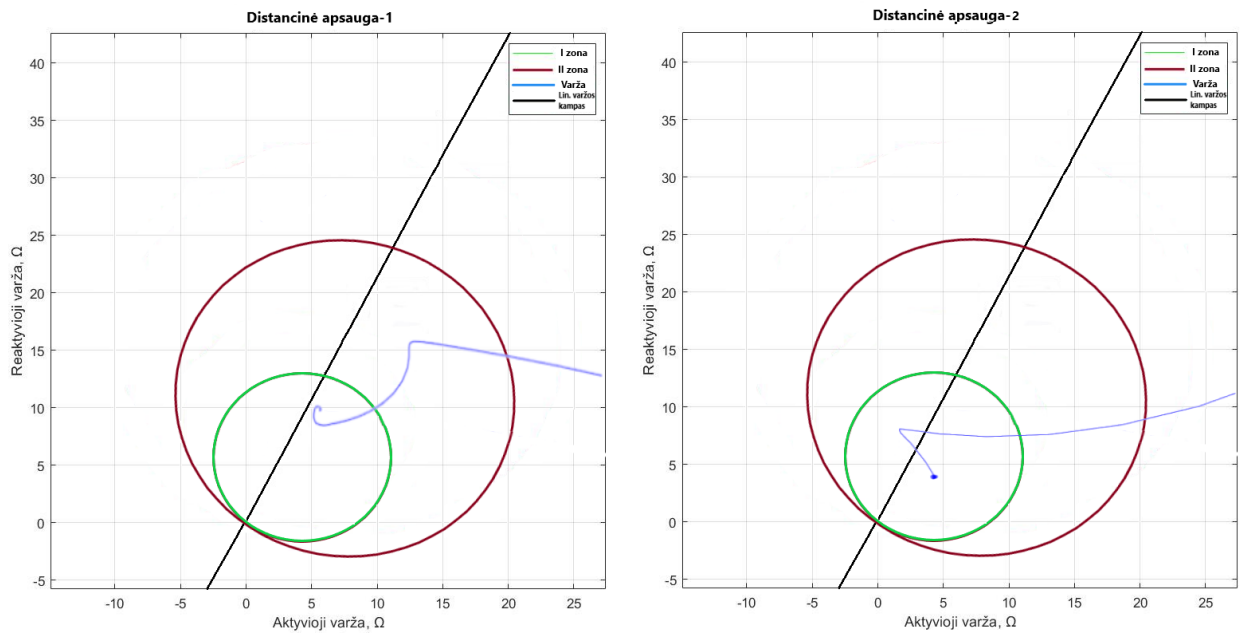
20 paveikslėlyje pavaizduotos simuliuoto vienfazio trumpojo jungimo srovės dedamosios. Avarijos metu generuojamos visos trys sekos: tiesioginė, atvirkštinė ir nulinė, kurias susumavus gaunamas A fazės srovės dydis – 1094 A.

Dvifazis trumpasis jungimas

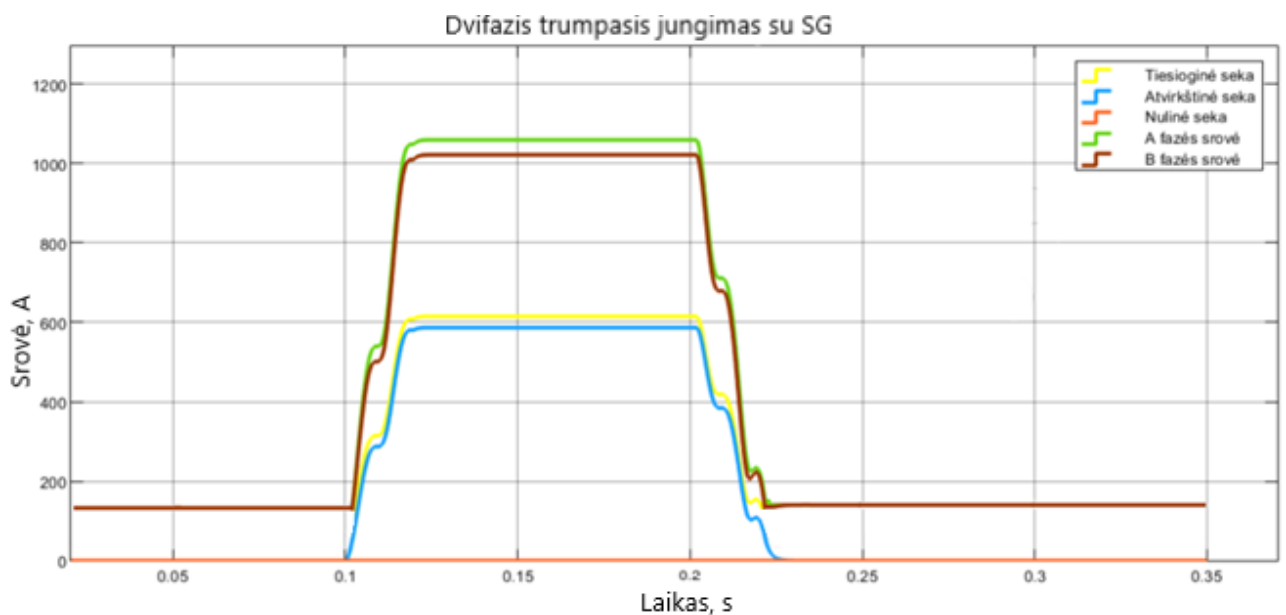
Modeliuojamas dvifazis trumpasis jungimas tarp A ir B fazių, nutolęs nuo Ša-110 40 km atstumu, o Šb-110 10 km atstumu. Kontūro Zab varžos charakteristikos matomos 21 paveikslėlyje. Apskaičiuotos reaktyviosios varžos:

$$\text{Distancinė apsauga-1} = 10,22 \Omega$$

$$\text{Distancinė apsauga-2} = 4,38 \Omega$$



21 pav. Varžos charakteristika dvifazio trumpojo jungimo metu su SG.

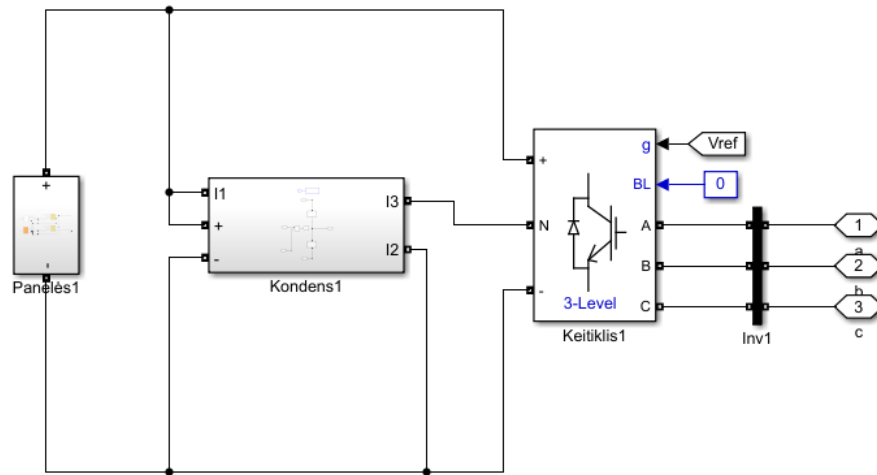


22 pav. Trumpojo jungimo srovių dedamosios su SG.

Pagal 20 ir 21 paveikslėlius, matuojamos avarinės varžos vertės dydis patenka į pirmosios pakopos distancinės apsaugos veikimo charakteristikos zoną. Taškui patekus į pirmą veikimo zoną, be papildomos delsos išsiunčiama komanda išjungti linijos jungtuvą, varžos taškui patekus į antra zoną, taikoma 0,3 sekundės delsa. Pagal pateiktas charakteristikas galima teigti, jog apsaugos modelis reaguoja į vienfazius ir dvifazius trumpuosius jungimus. Pasitelkus 20 paveikslėlį galima teigti, jog vienfazio TJ srovės dydis iš sumodeliuoto sinchroninio generatoriaus susideda iš trijų dedamųjų: tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės sekos. Tuo tarpu paveikslėlis 22 parodo, dvifazio TJ dedamosios yra tiesioginė ir atvirkštinė seka, kurių dydis atitinkamai siekia 510 ir 490 amperų. Avarinės srovės vertės kampas siekia 76 laipsnius, todėl varžos pobūdis yra induktyvinis.

2.2. Saulės elektrinė

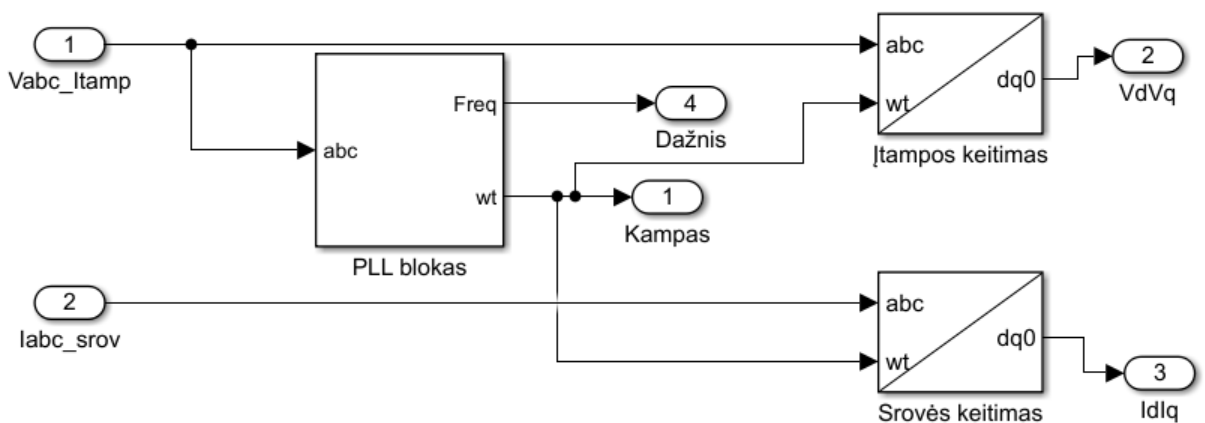
Sumodeliavus ir patikrinus distancinės apsaugos veikimą su sinchroniniu generatoriumi, toliau modeliuojama tokio pačio galingumo saulės elektrinė. Parkas sudarytas iš trijų dalių, kurio vienos dalies galia siekia 6,7 MW. Saulės elektrinės modelis sudarytas iš saulės panelių, MPPT ieškiklio, keitiklio, filtro iš aukštinančiųjų transformatorių, kurių jungimo grupė – Yg/D11. Išvardintai galiai pasiekti, naudojami 60,120 vienetų saulės panelių, kurios vienos galia siekia 355 W.



23 pav. Saulės elektrinės modelis.

Keitiklio modeliavimas

Keitiklio sinchronizavimui su tinklu naudojama fazės užrakto kilpa (PLL). Šia funkcija užtikrinama, jog išeinantis signalas atitiktų užduotąją arba įėjimo reikšmę.



24 pav. PLL funkcijos išpildymas modelyje

PLL sudaryta iš įtampos valdomo oscilatoriaus, fazės ieškiklio, žemo dažnio filtro. Į PLL bloką perduodama įtampa, kurios signalas yra:

$$v = V \sin(\omega t + \varphi); \quad (59)$$

čia, v – įėjimo signalas; w – kampinis dažnis; t – laikas.

Įtampos valdomo oscilatoriaus signalas:

$$v_2 = V \sin(\omega_2 t + \varphi_2); \quad (60)$$

čia, v_2 – oscilatoriaus įėjimo signalas; w_2 – oscilatoriaus kampinis dažnis; t – laikas.

$$\epsilon_{pd} = \frac{V k_{pd}}{2} \sin((\omega - \omega_t)t + (\varphi + \varphi_2)); \quad (61)$$

čia, ϵ_{pd} – įėjimo klaidos signalas; $V k_{pd}$ – įėjimo signalas po k_{pd} koeficiento;

Padarius prielaidą, jog kampinio dažnio paklaidos beveik nėra išreiškiamas:

$$\epsilon_{pd} = \frac{V k_{pd}}{2} \sin((\varphi + \varphi_2)); \quad (62)$$

P/Q valdymo strategija

Modeliuojamas keitiklis bus prijungtas prie tinklo ir neveiks salos režimu, todėl jo valdymas veiks pagal P/Q strategija, kuri įtakoja išėjimo įtampos dydį.

Sumodeliuota saulės elektrinė prijungiama prie aukštos įtampos perdavimo linijos (prie Šb-110, vietoj sinchroninio generatoriaus). Eksperimentas vykdomas trimis dalimis: pirmoje dalyje tiriamas distancinės apsaugos veikimas ir avarijų charakteristikos modeliuojant trumpuosius jungimus linijos viduryje ir esant maksimaliai saulės elektrinės generacijai. Antroje dalyje tiriama, kokią įtaką distancinės apsaugos veikimui turi trumpojo jungimo varža ir atstumas nuo saulės elektrinės. Ir trečioje dalyje tiriamos trumpųjų jungimų charakteristikos skirtingos generuojamos galios metu.

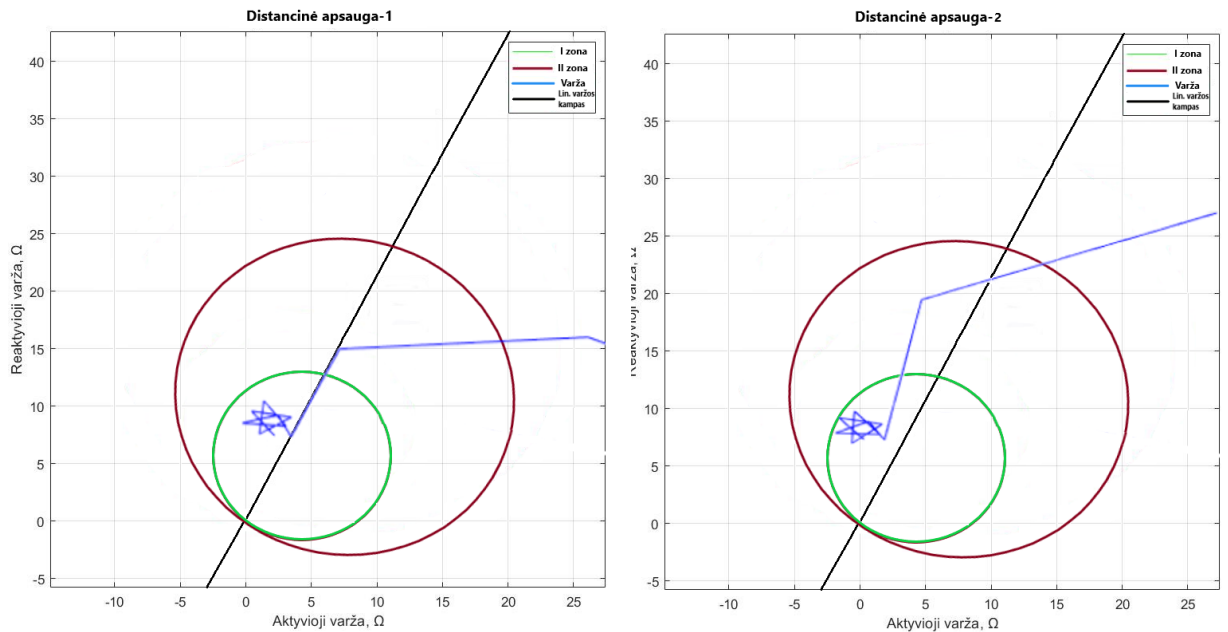
2.3. Modelio eksperimentinė dalis

Eksperimentinėje dalyje siekiama išsiaiškinti saulės elektrinės netipines gedimų charakteristikas ir įtaką distancinės apsaugos veikimui. Pirmoje eksperimento dalyje sujungiami distancinės apsaugos ir saulės elektrinės modeliai. Imituojami gedimai perdavimo linijoje ir stebimi avarinių verčių dydžiai, kurie palyginami su tradicinių šaltinių gedimo charakteristikomis. Antroje bandymo dalyje imituojami trumpieji jungimai skirtingose linijos vietose bei su skirtingos reikšmės papildoma varža. Stebimas distancinės apsaugos veikimas. Trečioje dalyje tiriama kokią įtaką apsaugos veikimui daro saulės elektrinės generuojamos galios kiekis.

2.3.1. Saulės elektrinės gedimų charakteristikos

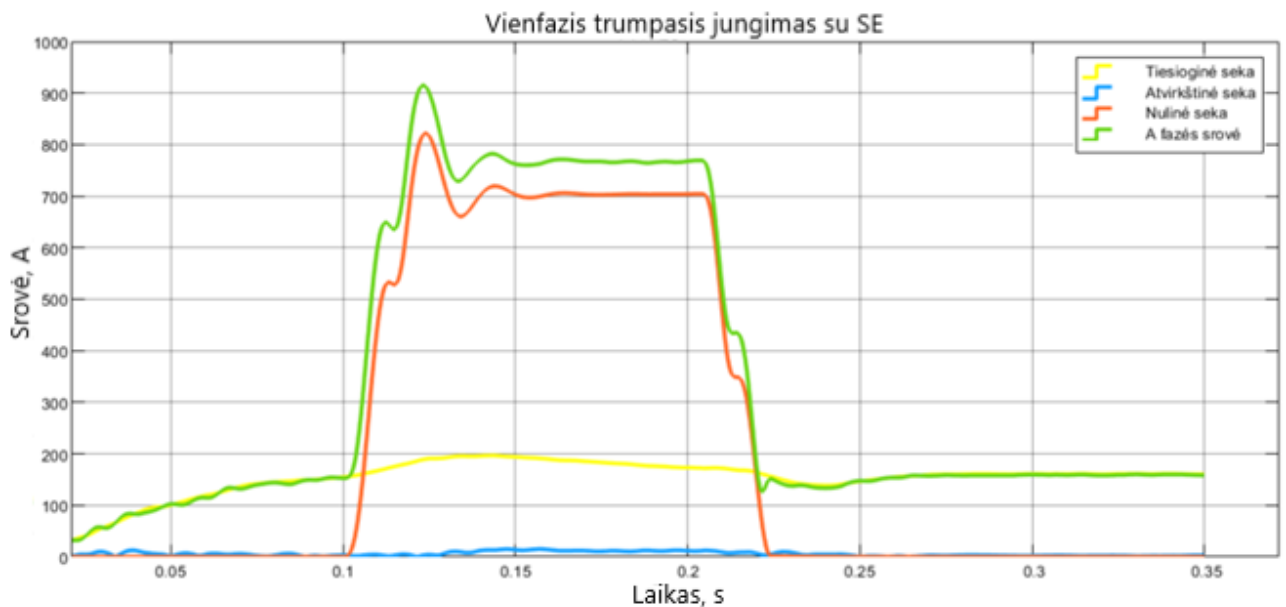
Vienfazis trumpasis jungimas

Pirmasis bandymas vykdomas imituojant A fazės vienfazį trumpąjį jungimą. Avarijos vieta nuo distancinės apsaugos terminalų nutolusi vienodu 25 kilometrų atstumu. Trumpasis jungimas simuliuojamas nuo 0,1 s. iki 0,2 s.



25 pav. Varžos charakteristika vienfazio trumpojo jungimo metu su prijungta SE.

Pagal 25 paveikslėlį matuojamas varžos taškas pateko į abiejų distancinių apsaugų pirmosios pakopos veikimo zonas. Trumpasis jungimas eliminuojamas selektyviai, be laiko delsos. Išmatuota reaktyvioji varža - 7,3 Ω.

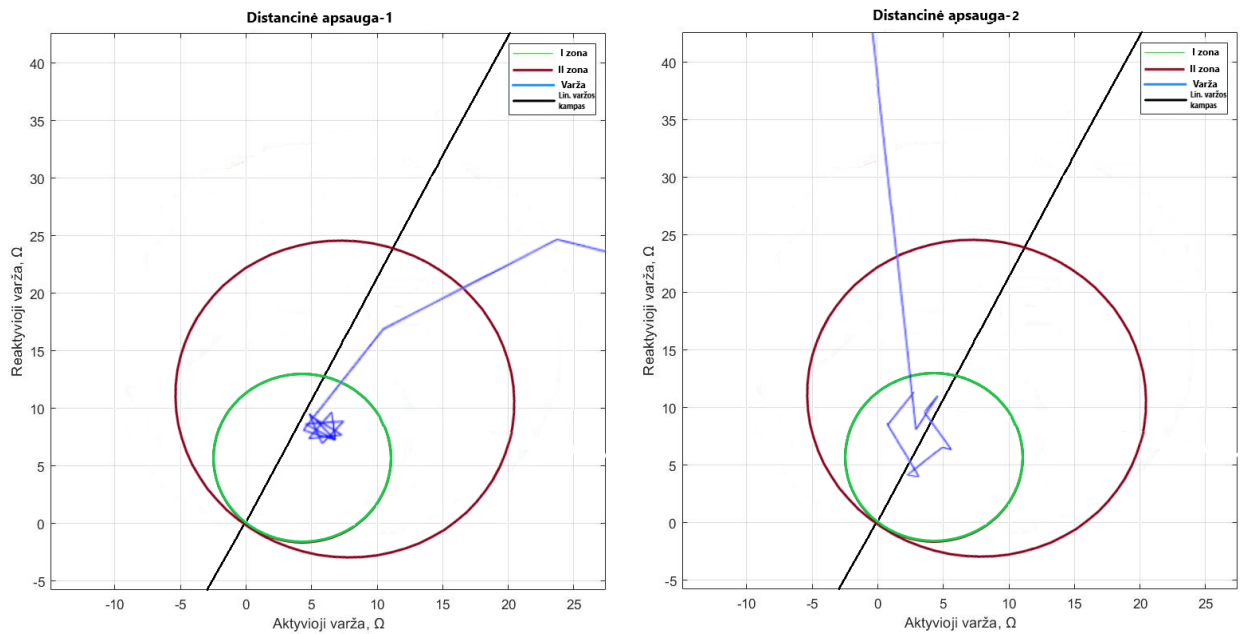


26 pav. Avarijos srovės vertės dedamosios su prijungta saulės elektrine.

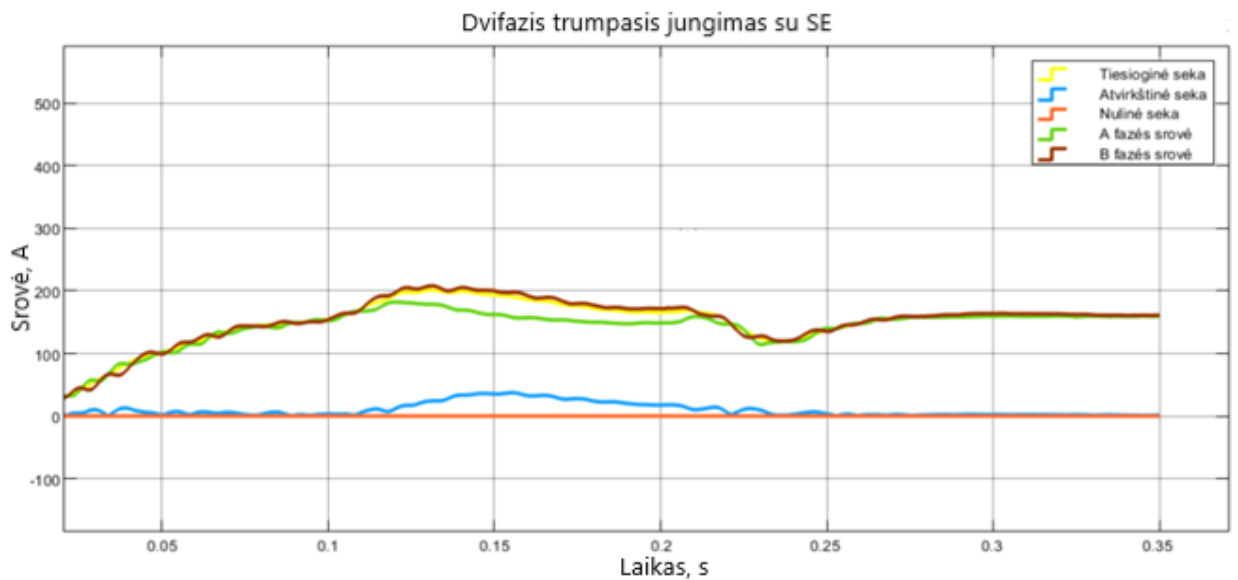
26 paveikslėlyje pateikti srovių matavimai iš saulės elektrinės pusės. Pagal gautus simuliacijos nustatyta, jog didžiausią trumpojo jungimo srovės dalį sudaro nulinės sekos srovė – 703 A. Vienfazio trumpojo jungimo metu nulinės sekos srovė atsiranda dėl SE aukštinančiųjų galios transformatorių jungimo grupės – Yg/D11. Atvirkštinės sekos srovės vertė siekia vos 18 A. SE keitikliu aptikę

asimetriją tinkle generuoja reaktyviają galią tinklo įtampos palaikymui, taip slopindami atvirkštinės sekos srovę.

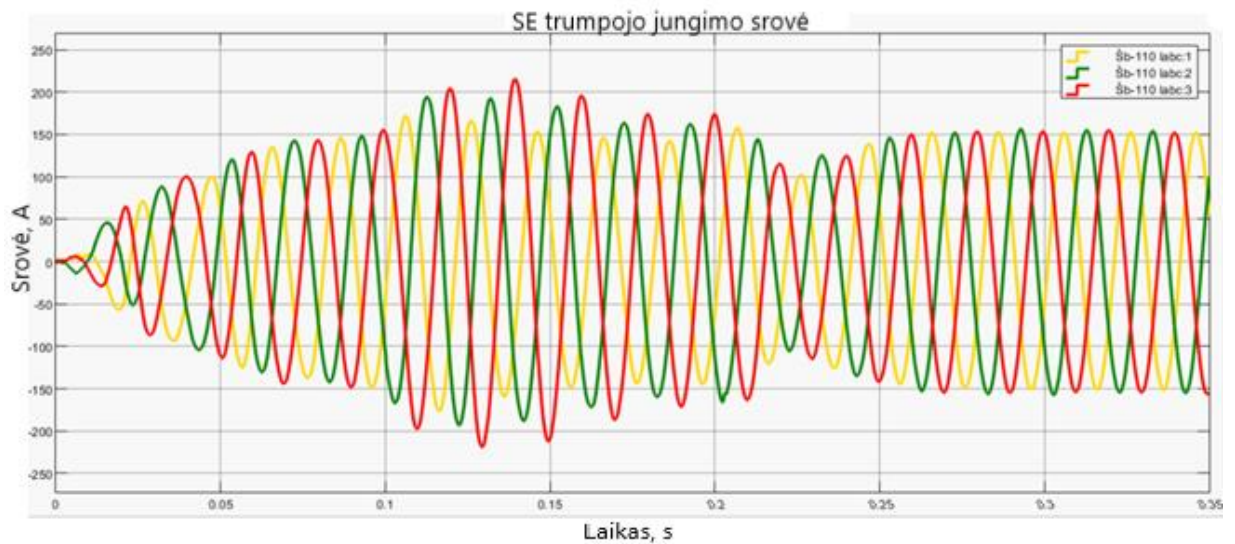
Dvifazis trumpasis jungimas



27 pav. Varžos charakteristika dvifazio trumpojo jungimo metu su prijungta saulės elektrine.



28 pav. SE srovės dedamųjų pasiskirstymas dvifazio trumpojo jungimo metu.



29 pav. Saulės elektrinės srovių pasiskirstymas trumpojo jungimo metu.

Pagal 28 paveikslėlį, saulės elektrinė generuoja visas tris srovės sekas. Pradiniu trumpojo jungimo metu nuo 0,1 – 0,15s fiksuojamas srovės padidėjimas. Tai pereinamasis procesas, kai keitiklio algoritmas neatpažįsta gedimo linijoje ir neribuoja generuojamos srovės. Nuo 0,15 sekundės srovės generacija pradeda riboti. Pagal 29 paveikslėlį, laiko momentu 0,15-0,2 sekundės, keitiklio srovės vertė siekia:

$$k_{keit} = \frac{I_{tj}}{I_{vard}} = \frac{191,2 A}{160,1 A} = 1,194; \quad (63)$$

Čia, I_{tj} – trumpojo jungimo srovė iš keitiklio pusės esant nusistovėjusiam pereinamajam procesui, A;
 I_{vard} – keitiklio vardinė srovė, A.



30 pav. SG ir SE atvirkštinės sekos generacijos skirtumas.

Dvifazio trumpojo jungimo metu palygintos SG ir SE generuojamos atvirkštinės sekos srovės vertės pavaizduotos 30 paveikslėlyje. Sinchroninio generatoriaus atveju, ši srovė yra nereguliuojama, saulės elektrinės atveju, dėl keitiklio kontroliavimo strategijos atvirkštinė seka yra ribojama. Srovių bei kampų rezultatai matomi 3 lentelėje.

3 lentelė. Sinchroninio generatoriaus ir saulės elektrinės trumpųjų jungimų rezultatai.

Šaltinio tipas	Trumpojo jungimo tipas	Veikimas		Matavimai iš SG/SE prijungimo pusės			
		Distancinė apsauga -1	Distancinė apsauga -2	Tiesioginės sekos srovė, A	Atvirkštinės sekos srovė, A	Nulinės sekos srovė, A	Pažeistos fazės srovės kampas, °
Sinchroninis generatorius	K ⁽¹⁾	Taip	Taip	331,6	303,2	471,4	89
Sinchroninis generatorius	K ⁽²⁾	Taip	Taip	615,7	586,3	-	86
Sinchroninis generatorius	K ⁽³⁾	Taip	Taip	1201,2	-	-	83
Sinchroninis generatorius	K ^(1,1)	Taip	Taip	737,8	465,6	381	88
Saulės elektrinė	K ⁽¹⁾	Taip	Taip	184,7	14,5	703,3	-36
Saulės elektrinė	K ⁽²⁾	Taip	Taip	192	36,6	-	-59
Saulės elektrinė	K ⁽³⁾	Taip	Taip	188,3	-	-	-63
Saulės elektrinė	K ^(1,1)	Taip	Taip	191,6	26,4	668,3	-43

Pagal 3 lentelėje surašytus rezultatus ir pateiktus grafikus nustatyta, jog saulės elektrinės, prijungtos per keitiklį, trumpųjų jungimų charakteristikos skiriasi nuo įprastų šaltinių. Saulės elektrinės keitiklis pagal valdymo strategiją, reguliuodamas aktyviąją ir reaktyviąją galią tinklo stabilumui, riboja neigiamos sekos srovės generavimą. Tokios pačios galios SG ir SE atvirkštinės sekos srovės generacija dvifazio trumpojo jungimo metu skiriasi beveik 16 kartų. Taip pat saulės elektrinės srovės išdavimas avarijos metu siekia tik 1,19 karto nominalios vertės.

2.3.2. Distancinės apsaugos tyrimas su prijungta saulės elektrine

Pastebėta, jog prijungus saulės elektrinę, AEŠ varža yra nepastovi, todėl toliau tiriama kokią įtaką distancinei apsaugai daro trumpojo jungimo atstumas ir avarijos varžos dydis vietoje. Bandyto metu, prie skirtingo TJ tipo keičiamas atstumas nuo distancinės apsaugos terminalo iki avarijos vietos. Vėliau modelyje papildomai įterpiama 5 omų aktyvioji varža. Kiekvieno testo metu fiksuojamos aktyviosios bei reaktyviosios varžos matavimai ir distancinės apsaugos veikimas. Simuliacijos rezultatai pateikti 5 lentelėje. Priimama, jog visais atvejais saulės elektrinė generuoja maksimalią galią.

4 lentelė. Atstumo ir TJ varžos įtaka distancinės apsaugos veikimui

Trumpo jo jungimo tipas	Atstumas nuo apaugos įrengimo vietos iki TJ vietos, km		Trumpo jo jungimo varžos dydis, Ω	Išmatuotas varžos dydis				Veikimas	
	Distancinė apsauga -1	Distancinė apsauga - 2		Distancinė apsauga - 1		Distancinė apsauga - 2		Distancinė apsauga -1	Distancinė apsauga - 2
				Aktyvioji varža	Reaktyvioji varža	Aktyvioji varža	Reaktyvioji varža		
K ⁽¹⁾	10	40	0	1,37	3,75	2,46	12,88	Taip	Taip
K ⁽²⁾	10	40	0	2,54	4,34	10,34	8,414	Taip	Taip
K ⁽³⁾	10	40	0	2,57	4,04	11,62	9,98	Taip	Taip
K ^(1.1)	10	40	0	2,58	2,59	13,87	15,37	Taip	Taip
K ⁽¹⁾	40	10	0	6,26	10,64	4,38	3,78	Taip	Taip
K ⁽²⁾	40	10	0	6,01	10,49	3,38	3,65	Taip	Taip
K ⁽³⁾	40	10	0	6,02	10,49	4,35	6,42	Taip	Taip
K ^(1.1)	40	10	0	7,28	8,81	1,89	6,87	Taip	Taip
K ⁽¹⁾	10	40	5	4,25	4,09	10,87	14,43	Taip	Taip
K ⁽²⁾	10	40	5	6,03	4,26	46,32	-11,56	Taip	Ne
K ⁽³⁾	10	40	5	4,76	1,64	34,32	-32,51	Taip	Ne
K ^(1.1)	10	40	5	2,55	2,58	12,02	11,89	Taip	Taip
K ⁽¹⁾	40	10	5	10,23	10,91	4,57	5,56	Taip	Taip
K ⁽²⁾	40	10	5	9,51	12,89	29,53	-14,32	Taip	Ne
K ⁽³⁾	40	10	5	9,52	8,18	26,53	-13,58	Taip	Ne
K ^(1.1)	40	10	5	9,48	9,53	9,89	10,48	Taip	Taip

Imituojant dvifazius ir trifazius trumpuosius jungimus su papildoma varža, SE pusės distancinė apsauga neveikia. Dvifazio TJ atveju apsaugos išskaičiuota pilnutinė avarijos varža – 44,85 Ω . Tokią varžos reikšmę lemia sistemos ir keitiklio srovių koeficientas avarijos vietoje:

$$Z_{ABkeit} = Z_{ABk1} + \left(\frac{I_{Akeit} + I_{Asist}}{I_{Akeit} - I_{Bkeit}} \right) \cdot R_{TJ}; \quad (64)$$

čia, Z_{ABk1} – pilnutinė avarijos varža iki TJ vietos iš keitiklio pusės, Ω ; I_{Akeit} – keitiklio A fazės srovės dydis, A; I_{Asist} – sistemos A fazės srovės dydis, A; I_{Bkeit} – keitiklio B fazės srovės dydis, A.

Priimama $I_{Akeit} + I_{Asist} \approx I_{Asist}$, taip pat $I_{Akeit} - I_{Bkeit} = \sqrt{3}I_{Akeit}$, dėl keitiklio atvirkštinės srovės sekos eliminavimo:

$$Z_{ABkeit} = Z_{ABk1} + \left(\frac{I_{Asist}}{\sqrt{3}I_{Akeit}} \right) \cdot R_{TJ}; \quad (65)$$

$$Z_{ABkeit} = 4,97 + \left(\frac{4502}{\sqrt{3} \cdot 188} \right) \cdot 5 = 44,53 \Omega; \quad (66)$$

$$44,85 \Omega \approx 44,53 \Omega$$

Distancinė apsauga iš sistemos pusė veikia tinkamai dėl mažo srovių koeficiento varžos vietoje:

$$Z_{ABsist} = Z_{ABs1} + \left(\frac{I_{Akeit} + I_{Asist}}{I_{Asist} - I_{Bsist}} \right) \cdot R_{TJ}; \quad (67)$$

čia, Z_{ABs1} – pilnutinė avarijos varža iki TJ vietos iš sistemos pusės, Ω ; I_{Akeit} – keitiklio A fazės srovės dydis, A; I_{Asist} – sistemos A fazės srovės dydis, A; I_{Bsist} – sistemos B fazės srovės dydis, A.

Priimama $I_{Akeit} + I_{Asist} \approx I_{Asist}$, $I_{Asist} - I_{Bsist} \approx 2 \cdot I_{Bsist}$. Išreiškus formulę:

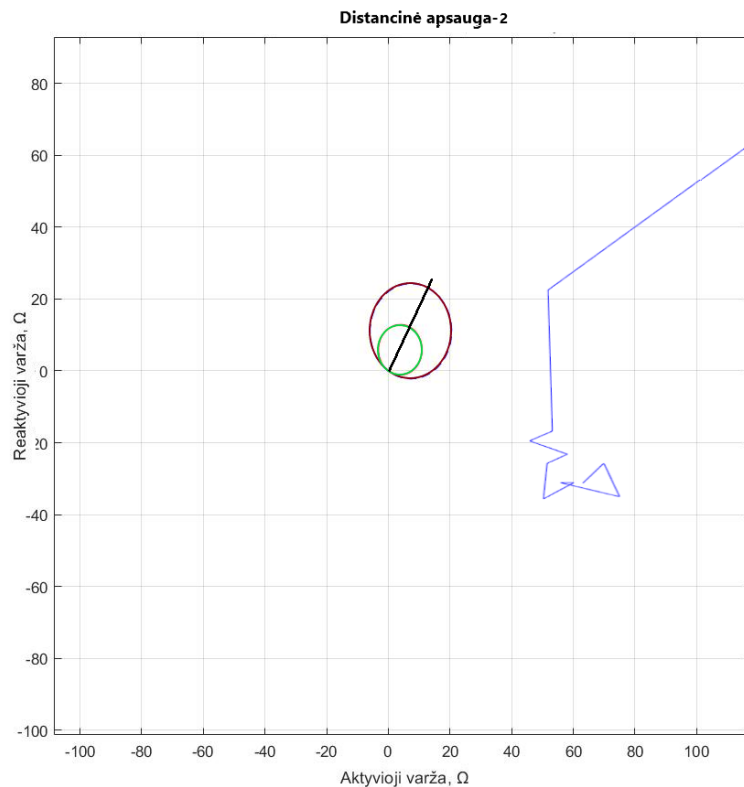
$$Z_{ABsist} = Z_{ABs1} + \left(\frac{I_{Akeit} + I_{Asist}}{2 \cdot I_{Bsist}} \right) \cdot R_{TJ}; \quad (68)$$

Apskaičiavus, gaunama vertė:

$$Z_{ABsist} = 5,02 + \left(\frac{4502}{9004} \right) \cdot 5 = 7,52 \Omega; \quad (69)$$

Išmatuotų ir apskaičiuotų pilnutinių varžų dydžiai:

$$7,52 \Omega \approx 7,38 \Omega;$$



31 pav. Papildomos varžos įtaka distancinei apsaugai su saulės elektrine.

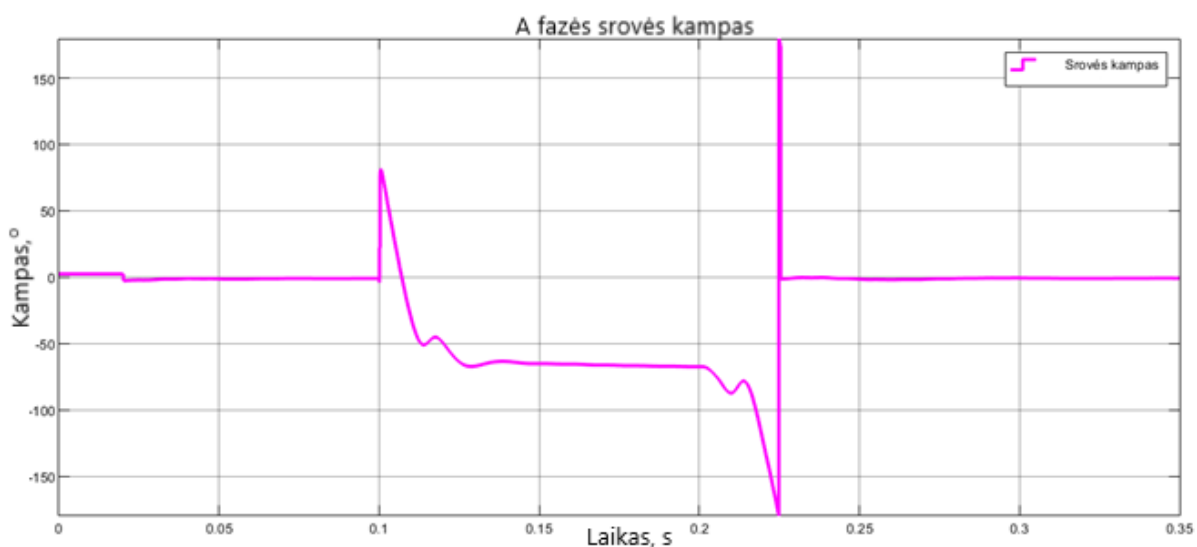
Simuliacijos metu pastebėta reaktyviosios galios generacija iš keitiklio (33 paveikslėlis). Laiko tarpu nuo 0,1 iki 0,2 sekundės reaktyviosios galios generacija kito nuo -200 kVAr iki 4,8 MVar. Dėl

keitiklio tiekiamos reaktyviosios galios įtampos palaikymui tinkle, pastebėtas ir vienos iš pažeistų fazių srovės kampo kitimas avarijos vietoje (34 paveikslėlis).



32 pav. Reaktyviosios galios generacija.

Laiko momentu 0,13 – 0,2 sekundės srovės kampas kito nuo -61 iki -69 laipsnių.



33 pav. Pažeistos fazės srovės kampas avarijos vietoje.

Kadangi saulės elektrinės yra atsinaujinantis energijos šaltinis, jų generuojama galia nėra pastovi. Šia tiriamojo darbo dalimi siekiama išsiaiškinti, kaip distancinės apsaugos veikimą įtakoja saulės skirtingas generuojamos galios kiekis.

5 lentelė. Atstumo ir TJ varžos įtaka distancinės apsaugos veikimui

Trumpojo jungimo tipas	Saulės elektrinės galios generacija, %	Trumpojo jungimo varžos dydis, Ω	Išmatuotas varžos dydis				Veikimas	
			Distancinė apsauga -1		Distancinė apsauga -2		Distancinė apsauga -1	Distancinė apsauga -2
			Aktyvioji varža	Reaktyvioji varža	Aktyvioji varža	Reaktyvioji varža		
K ⁽¹⁾	50	5	6,2	9,77	7,24	9,99	Taip	Taip
K ⁽²⁾	50	5	7,39	6,23	21,89	-7,92	Taip	Ne
K ⁽³⁾	50	5	7,41	5,16	35,82	-9,28	Taip	Ne

$K^{(1,1)}$	50	5	7,69	4,83	26,89	-7,08	Taip	Ne
$K^{(1)}$	25	5	6,57	8,02	15,75	12,73	Taip	Taip
$K^{(2)}$	25	5	7,47	6,25	46,92	-0,89	Taip	Ne
$K^{(3)}$	25	5	5,06	5,87	51,05	-0,33	Taip	Ne
$K^{(1,1)}$	25	5	7,71	5,65	38,64	-0,89	Taip	Ne

Trumpieji jungimai nutolę nuo abiejų distancinės apsaugos terminalų vienodu – 25 kilometrų atstumu. Eksperimentas parodė, jog krentant saulės elektrinės generacijai, mažėja tiekiamas srovė, todėl srovės santykis $I_{\text{sis}}/I_{\text{keit}}$ didėja. Dėl didėjančio srovių santykio, didėja matuojama varža iš saulės elektrinės pusės. Tai lemia distancinės apsaugos neveikimą. Tuo metu sistemos pusės distancinė apsauga veikia be jokių trikdžių.

Išvados

1. Baigiamojo darbo metu išanalizuoti distancinės apsaugos veikimo principai. Nustatyta, jog pagal linijos įtampos ir srovės matavimus išskaičiuojama pilnutinė varža, kurios vertė avarijos metu sumažėja. Varžos taškui patekus į veikimo zoną, išsiunčiama komanda išjungi jungtuvą.
2. Išanalizavus mokslinę literatūrą apie saulės elektrinių įtaką distancinių apsaugų veikimui, išskirtos pagrindinės problemos. Saulės elektrinės keitiklis slopina atvirkštinės sekos srovės generavimą dėl kontroliavimo strategijos ir išduodamos srovės dydis neviršija 1,1-1,5 karto vardinės srovės.
3. Sukurti distancinės apsaugos ir saulės elektrinės modeliai. Distancinės apsaugos modelio veikimas patikrintas panaudojus 20 MW galios sinchroninį generatorių prie visų trumpųjų jungimų tipų. Sumodeliuota 20 MW galios saulės elektrinė su keitikliu prijungimui prie tinklo.
4. Atlikus saulės elektrinių parko netipinių gedimų charakteristikų tyrimą nustatyta, jog atvirkštinės sekos srovės generacija dvifazio trumpojo jungimo metu nuo tokios pačios galios sinchroninio generatoriaus skiriasi 16 kartų. Keitiklio išduodamos srovės amplitudė neviršija 1,2 karto vardinės reikšmės.
5. Modeliuojant visų tipų trumpuosius jungimus skirtinguose linijos taškuose bei su papildoma TJ varža nustatyta, jog saulės elektrinės pusės distancinė apsauga yra nejautri dvifaziams ir trifaziams trumpiesiems jungimams, dėl padidėjusios varžos. Išmatuotą varžos dydį avarijos vietoje įtakoja sistemos ir keitiklio išduodamos srovės santykis. Taip pat nustatyta, jog mažėjant saulės elektrinės generacijai, varžos vertė didėja dėl srovių santykio avarijos vietoje. Mažesnis saulės elektrinės srovės tiekimas didina srovių santykį.

Literatūros sąrašas

1. KUNDUR P. „*Power system stability and control*“. 2014. ISBN 0-07-035958-X
2. G. SVINKŪNAS „*Elektros energetikos pagrindai*“, 2013, Kaunas [žiūrėta 2023-01-14] prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1260/elektros-energetikos-pagrindai/>
3. B. KASZTENNY, D FINNEY „*Fundamentals of Distance protection*“ 2008, JAV, ISBN:978-1-4244-1949-4
4. IEEE „*Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines*“ 2018, JAV [žiūrėta 2023-03-23] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7502047/>
5. ZIEGLER G. „*Numerical distance protection: Principles and Applications*“ 4th edition, 2011, England ISBN:978-3895783814
6. HADDADI A. „*Impact of Inverter Based Resources on System Protection*“ 2021, JAV [žiūrėta 2023-04-06] Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/1050>
7. HOOSHYAR A. ; MAHER A. „*Distance Protection of Lines Emanating From Full-Scale Converter-Interfaced Renewable Energy Power Plants – Part I: Problem Statement*“, 2014, [žiūrėta 2023-04-08] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/6954572>
8. CHANSOPHEA O. ; ZHANG Y. „*Modelling of Large-scale Grid-connected PV system with Reactive Power Control Methods*“ 2022, Kinija, [žiūrėta 2023-05-06] Prieiga per internetą: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2213/1/012020>
9. ADHIKARI P. „*Addressing the Performance of Distance relays in Presence of Inverter Based Resources*“ 2022 USA [žiūrėta 2023-05-08] Prieiga per internetą: https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4726&context=all_theses
10. PATEL P „*Modeling and control of three phase grid-connected PV inverters in the presence of grid faults*“, 2018, JAV [žiūrėta 2023-05-06] Prieiga per internetą: https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=8806&context=masters_theses
11. QUISPE J.C. ; E. ORDUNA „*Transmission line protection challenges influenced by inverter based resources: a review*“, 2022, Argentina [žiūrėta 2020-05-09] Prieiga per internetą: <https://pcmp.springeropen.com/articles/10.1186/s41601-022-00249-8>
12. CHOWDHURY R. „*Transmission Line Protection for Systems With Invert-Based resources – Part I: Problems*“ 2020, JAV [žiūrėta 2023-05-10] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/9180079>
13. FANG Y. ; JIA K. „*Impact of Inverter-Interfaced Renewable energy generators on Distance protection and Improved Scheme*“ 2018, Kinija, [žiūrėta 2023-05-12] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8506376>
14. NIMPITIWAN G. ; HEYDT T. ; AYYANAR R. „*Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators*“ 2007, Kinija [žiūrėta 2023-05-05] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4039460>
15. HADDADI A. ; KOCAR I. „*Negative sequence quantities-based protection under inverter based resources Challenges and impact of the German grid code*“ 2020, JAV [žiūrėta 2023-05-03] Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/343119160_Negative_sequence_quantities-based_protection_under_inverter-based_resources_-_Challenges_and_impact_of_the_German_grid_code

16. RENO M. ; BRAHMA S. ; BIDRAM A. „*Influence of Inverter Based resources on Microgrid protection*“ JAV, 2014 [žiūrėta 2023-04-28] Prieiga per internetą: <https://www.osti.gov/pages/servlets/purl/1870461>
17. CHAKRAPANI V. ; VOLOH I. „*Impact of Renewable generation resources on the distance protection and solutions*“ 2022, Anglija [žiūrėta 2023-05-06] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/9841889>
18. KOU G. ; COCKERHAM B. „*Negative Sequence Current Injection of Transmisson Solar Farms*“ 2020 [žiūrėta 2023-05-10] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/9163285>
19. HOOSHYAR A. ; AZZOUZ M. „*Distance protection of Lines Emanating from Full-Scale Converter Interfaced Renewable Energy Power Plants – Part II: Solution Description and Evaluation*“ 2014 [žiūrėta 2023-05-06] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/6954549>
20. HAGH M. ; JALILIAN A. ; NADERI S. Improving Fault Ride-Through of Three Phase Voltage Source Inverter During Symmetrical Fault Using DC Link Fault Current Limiter. Interaktyvus. [žiūrėta 2021-06-17]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7324862&tag=1>
21. LIETUVOS RESPUBLIKOS ŪKIO MINISTRAS. Įsakymas dėl elektros tinklų kodekso bei elektros energijos tiekimo ir naudojimo taisyklių patvirtinimo. Interaktyvus [žiūrėta 2021-10-27]. Interaktyvus prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.157875?positionInSearchResults=24&searchModelUID=2b8e8391-a68f-4df5-ba6a-7a53bf0838c7>