



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos analizė

Baigiamasis magistro projektas

Karolis Šiuka

Projekto autorius

Doc. Almantas Bandza

Vadovas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos analizė

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Karolis Šiuika

Projekto autorius

Doc. Almantas Bandza

Vadovas

Prof. Robertas Lukočius

Recenzentas

Kaunas, 2023



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Karolis Šiuika

Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos analizė

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.

Karolis Šiuika

Patvirtinta elektroniniu būdu

Šiuika, Karolis. Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos analizė. Magistro 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: nulinės sekos srovės diferencinė apsauga, transformatoriaus įžemėjimas, Simulink, diferencinė apsauga.

Kaunas, 2023. 55 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame darbe nagrinėjama nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos veikimas esant skirtingiems transformatoriaus gedimams.

Apžvalginėje dalyje aprašomas galios transformatorius ir jo įžemėjimas, nulinės sekos srovės diferencinė apsauga ir jos veikimo principas ir diferencinė apsauga ir jos veikimo principas, analizuojami faktoriai, lemiantys transformatoriaus įžemėjimo gedimą.

Tiriamajoje dalyje aprašoma transformatoriaus ekvivalentinė schema, bei apskaičiuojami pagrindiniai jo parametrai. Atsižvelgus į gautus parametrus parengiamas modelis „Simulink“ aplinkoje simuluoti skirtingiems transformatoriaus įžemėjimo gedimams, detalai aprašoma sudaroma transformatoriaus schema ir naudojami modelyje elementai.

Tyrimo rezultatų dalyje patikrinamas modelio veikimas ir analizuojami skirtingo tipo transformatoriaus gedimai, aptariami faktoriai, kurie lemia gaunamus rezultatus.

Šiuika, Karolis. Research of Transformers Zero-Sequence Differential Current 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): electrical engineering, engineering science.

Keywords: Restricted Earth Fault, Transformer Ground Fault, Zero-Sequence Differential Current Protection, Differential Protection, Simulink

Kaunas, 2023. 55.

Summary

The master's thesis studies the operation of transformer zero-sequence differential current protection in case of different transformer ground faults.

In the overview section, power transformer and power transformer ground faults are described, zero-sequence differential protection and differential current protection are analyzed, additionally factor that can influence power transformers ground faults are analyzed.

Research section describes transformer equivalent circuit, as well as main parameters for power transformer. According to calculated main transformer parameters, model is created in "Simulink" model space, different ground faults are prepared for simulation.

Research results section presents protection operation and fault parameters during different ground faults, analyze factors that influence mentioned fault parameters.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Apžvalginė dalis.....	12
1.1. Galios transformatorius	12
1.2. Transformatoriaus įžemėjimas	13
1.3. Nulinė seka	14
1.4. Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinė apsauga	15
1.5. Transformatoriaus diferencinė apsauga.....	18
1.6. Literatūros analizė	20
2. Tiriamoji dalis.....	26
2.1. Transformatoriaus schema.....	26
2.2. Tiriamasis modelis.....	32
3. Tyrimo rezultatai.....	36
3.1. Normalaus darbo režimas	36
3.2. Bandymas Nr. 1	37
3.3. Bandymas Nr. 2	40
3.4. Bandymas Nr. 3.....	42
3.5. Bandymas Nr. 4.....	45
3.6. Bandymas Nr. 5.....	47
3.7. Bandymas Nr. 6.....	50
Išvados	53
Literatūros sąrašas	54

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Transformatoriaus parametrai.....	30
2 lentelė. Bandymo nr.1 rezultatai.....	39
3 lentelė. Bandymo nr. 2 rezultatai.....	41
4 lentelė. Bandymo nr. 3 rezultatai.....	44
5 lentelė. Bandymo nr. 4 rezultatai.....	46
6 lentelė. Bandymo nr. 5 rezultatai.....	49
7 lentelė. Bandymo nr. 6 rezultatai.....	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Dviejų ir trijų apvijų transformatoriaus sujungimo schemas	12
2 pav. Simetrinės komponentės.....	14
3 pav. Nulinės sekos srovės diferencinė apsaugos veikimas esant išoriniam gedimui.....	16
4 pav. Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos veikimas esant vidiniam gedimui	16
5 pav. Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos charakteristika.....	17
6 pav. Srovių adaptacija skaitmeninėje transformatoriaus diferencinėje apsaugoje.....	18
7 pav. Diferencinės apsaugos charakteristika	19
8 pav. Tiriamo transformatoriaus schema	20
9 pav. Gedimo srovės priklausomybė esant skirtingiems nuotėkio induktyvumo skaičiavimo metodams.....	21
10 pav. Gedimo srovės priklausomybė esant skirtingoms gedimo varžomis	21
11 pav. Gedimo srovės priklausomybė esant skirtingoms grunto varžomis.....	22
12 pav. Nulinės sekos srovė diferencinės apsaugos dviejų nuolydžių charakteristika	22
13 pav. Transformatoriaus įmagnetinimo srovė.....	23
14 pav. Nulinės sekos srovė diferencinės apsaugos fazių srovių sumų charakteristika.....	23
15 pav. REF veikimas esant transformatoriaus įmagnetinimo srovėms su fazių srovių sumavimo charakteristika.....	24
16 pav. REF veikimas esant transformatoriaus įmagnetinimo srovėms su tradicine charakteristika	24
17 pav. REF veikimas esant srovės transformatoriaus įsisotinimui srovėms su tradicine charakteristika.....	24
18 pav. REF veikimas esant srovės transformatoriaus įsisotinimui srovėms su fazių srovių sumavimo charakteristika.....	25
19 pav. transformatoriaus ekvivalentinė schema	27
20 pav. transformatoriaus parametrai.....	31
21 pav. YnD11 transformatoriaus modelis	31
22 pav. YnYn transformatoriaus modelis	32
23 pav. Sistemos modelis.....	32
24 pav. Diferencinės apsaugos modelis	35
25 pav. Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos modelis	35
26 pav. Principinė modelio schema	36
27 pav. Srovės ir įtampos esant normaliam sistemos darbui	36
28 pav. Bandymo nr. 1 principinės gedimo schema	37
29 pav. Bandymo nr. 1 srovės.....	37
30 pav. Bandymo nr. 1 įtampos	38
31 pav. Bandymo nr. 2 srovės.....	40
32 pav. Bandymo nr. 2 įtampos	40
33 pav. Bandymo nr. 3 principinė schema.....	42
34 pav. Bandymo nr. 3 srovės.....	43
35 pav. Bandymo nr. 3 įtampos	43
36 pav. Bandymo nr. 4 srovės.....	45
37 pav. Bandymo nr. 4 įtampos	45
38 pav. Bandymo nr. 5 principinė schema.....	47
39 pav. Bandymo nr. 5 srovės.....	48
40 pav. Bandymo nr. 5 įtampos	48

41 pav. Bandyto nr. 6 srovės.....	50
42 pav. Bandyto nr. 6 įtampos	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

TJ – trumpasis jungimas;

ST- srovės transformatorius;

REF – (angl. *Restricted Earth Fault*) nulinės sekos srovės diferencinė apsauga

DIF – diferencinė srovė

DIFF – diferencinė apsauga

ŽĮ – žema įtampa

AĮ – aukšta įtampa

Įvadas

Norint apsaugoti transformatorių nuo gedimų ir avarijų privaloma naudoti relines apsaugas. Paprastai taikomi trys kriterijai nustatyti transformatoriaus gedimui, tokie kaip fazių srovių padidėjimas, diferencinės srovės padidėjimas ir dujų susidarymas, kurios atsiranda degant elektros lankui. Norint apsaugoti transformatorių nuo rimtų pažeidimų ir gedimų, kai avarija vyksta transformatoriaus viduje ar šalia jo, jis turi būti nedelsiant išjungiamas, kitaip pažeidimai gali būti kritiški ir transformatoriaus nebeišeitų sutaisyti arba tai būtų itin brangu. Paprastai įvykus gedimui naudojamos šios apsaugos: maksimalios srovės apsauga, skirta saugoti nuo srovių padidėjimo, diferencinė apsauga, fazių srovių skirtumo padidėjimui nustatyti, o dujų srauto apsauga, apsaugoti nuo elektros lanko. Tačiau šios apsaugos ne visada gali užfiksuoti gedimą ant transformatoriaus vijų, ypač varža įžemintos neutralės tinkluose, todėl norint to išvengti taikoma nulinės sekos srovės diferencinė apsauga, kuri padidina saugomą transformatoriaus vijų zoną.

Kadangi avarijos metu vyksta pereinamieji procesai, kurių metu susidaro nulinės sekos srovė, nagrinėjama apsauga visada turi gauti patikimą nulinės sekos srovės matavimą iš transformatoriaus neutralės ir transformatoriaus išvadų, tam kad nesuveiktų klaidingai:

- kai trumpasis jungimas įvyksta už saugomos zonos ribų apsauga privalo ignoruoti avariją, tačiau dingus bent vienam nulinės sekos srovės matavimui, apsauga gali suveikti klaidingai ir išjungti transformatorių, taip sukeldami daug nuostolių ir pažeidžiant tinklo stabilumą.
- kai trumpasis jungimas įvyksta saugomos zonos ribose, apsauga privalo be laiko užlaikymo atjungti įrenginį, neteisingai parinkus nulinės sekos srovių matavimų kryptis, apsaugos logika gali fiksuoti, kad gedimas įvyko už saugomos zonos ribų, taip neatjungiant saugomo įrenginio ir potencialiai sukeldami nepataisomą įrenginio gedimą.

Baigiamojo magistrinio **darbo tikslas** – nustatyti kaip veiks transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinė apsauga esant gedimams skirtingose transformatoriaus apvijos vietose.

Tikslui pasiekti išsikelti **uždaviniai**:

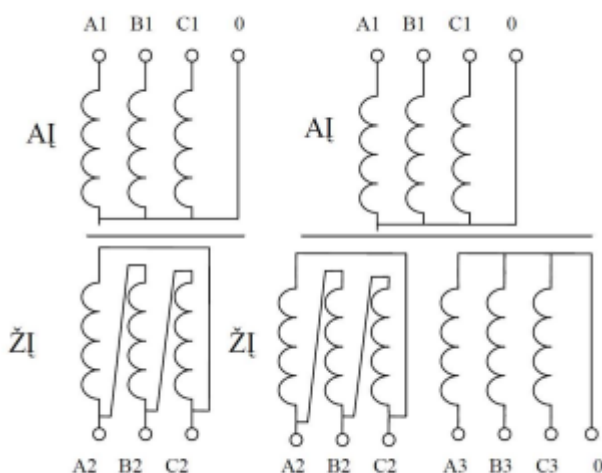
1. išsiaiškinti skirtumus tarp transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos ir diferencinės apsaugos;
2. sukurti modelį Matlab Simulink aplinkoje, apsaugos veikimo tikrinimui esant gedimui transformatoriaus apvijoje, palyginti nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos ir diferencinės apsaugos saugomą apvijos dalį;
3. išanalizuoti rezultatus ir išnagrinėti faktorius, darančius įtaką nulinės sekos srovės diferenciniai ir diferencinės apsaugoms.

1. Apžvalginė dalis

1.1. Galios transformatorius

Galios transformatoriai yra vieni pagrindinių įrenginių naudojamų elektros energijos sistemoje. Jų tikslas yra paaukštinti arba pažeminti įtampą iki perdavimo ar paskirstymo tinkle naudojamos įtampos. Galingi ir didelių gabaritų aukštos įtampos transformatoriais yra sudėtingi įrenginiai. Jų pagrindiniai konstrukciniai elementai yra išsiplėtimo bakas, įvadai, aušinimo sistema, įtampos reguliavimo mechanizmas, magnetinė sistema (magnetolaidis), apvijos, matavimo prietaisai ir RAA įrenginiai. [2] Transformatorių sudaro geležinė šerdis ir ant jos užmautos dvi varinės vielos ritės. Transformatoriuje, ritė, prie kurios yra jungiamas maitinimo šaltinis, vadinama pirmine, o ritė, kurioje indukuojama pakeista įtampa yra antrinė. Lietuvos elektros energijos sistemoje naudojami ne tik vienos antrinės ritės transformatoriai, yra naudojami ir transformatoriai, kurie turi dvi ir daugiau antrines rites. Paprastai Lietuvos paskirstymo ir perdavimo tinkluose sutinkami trifaziai transformatoriai, nes jų nuostoliai yra mažesni (lyginant su vienfaziais, 8-14%), bei gamybos kaštai yra mažesni (25% pigiau, nei tokios pat galios vienfaziai transformatoriai). [14]

Lietuvoje sutinkami galios transformatoriai būna dviejų arba trijų apvijų. Aukštos, vidutinės ir žemos įtampos. Dviejų įtampų transformatorių pagrindiniai parametrai yra vardinis galingumas S_N , vardinė įtampa U_N , trumpojo jungimo įtampa $U_{T\%}$, tuščios veikos srovė I_0 , tuščios veikos nuostoliai ΔP_0 ir trumpojo jungimo nuostoliai ΔP_K . Trijų įtampų transformatoriaus pagrindiniai parametrai yra vardinis galingumas S_N , vardinė įtampa U_N , trumpojo jungimo įtampos visoms transformatoriaus apvijų poroms $U_{T12\%}, U_{T13\%}, U_{T23\%}$, tuščios veikos srovė I_0 , tuščios veikos nuostoliai ΔP_0 ir trumpojo jungimo nuostoliai visoms apvijų poroms $\Delta P_{K12}, \Delta P_{K13}, \Delta P_{K23}$. [14]



1 pav. Dviejų ir trijų apvijų transformatoriaus sujungimo schemas

Galios transformatoriaus jungimo grupė parodo fazių skirtumą tarp transformatoriaus aukštos ir žemos įtampos apvijų. Ji yra žymima pagal jungimo grupę ir kampą tarp aukštos ir žemos įtampos. Galimos jungimo grupės yra žvaigždė Y, žvaigždė su nulių laidu YN, trikampis Δ ir zigzagas Zo. Kampas tarp aukštos ir žemos įtampos yra žymimas valandomis nuo 0 iki 11. 0 reiškia, kad aukštos ir žemos įtampos fazės yra vienodų kampų, 11 reikštų, kad žema įtampos fazės lenkia 30 elektrinių laipsnių. Lietuvos elektros energijos sistemoje aukštos ir vidutinės įtampos dalyje transformatoriais dažniausiai jungiami žvaigžde, nes taip jungtame transformatoriuje pakanka mažesnės izoliacijos,

taip transformatoriaus kaina sumažėja. Žemos įtampos dalyje transformatoriai dažnai jungiami trikampiui, dėl tokios jungimo grupės galimybės sumažinti fazines sroves, bei slopinti aukštesnes harmonikas. [14]

Transformatoriaus veikimas yra paremtas Faradėjaus indukcijos dėsniumi, kuris teigia, kad indukuota elektrovara E_i , proporcinga magnetiniam srautui per laidininko kontūro ribojamą plotą kitimo greičiui ($d\Phi/dt$). Elektrovaros indukuotos elektros srovės kryptis yra tokia, kad jos magnetinis laukas mažintų pirminės apvijos magnetinio srauto kitimą. [14]

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt};$$

Dviejų įtampų transformatorių sudaro dvi apvijos – pirminė ir antrinė, o trijų apvijų transformatorių sudaro viena pirminė ir dvi antrinės apvijos. Apvijos yra suvyniotos ant šerdies, kuri yra pagaminta iš medžiagos, kuri turi didelę magnetinę skvarbą, paprastai tai yra pagaminta iš izoliuotų lakštinio plieno plokščių, tam, kad magnetinis srautas koncentruotųsi pačioje šerdyje. Transformatoriaus pirminę apviją prijungus prie kintamos įtampos šaltinio, o antrinę apviją palikus atvirą (transformatoriaus tuščios veikos režimas), šerdyje atsiranda kintamasis magnetinis srautas Φ . Šis srautas kirs abi apvijas ir sukurs indukcijos elektrovaras. Abi apvijas kerta tas pats magnetinis srautas ir kiekvienoje apvijoje atsiranda vienoda elektrovara. Jeigu pirminėje apvijoje yra N_1 vijų, o antrinėje N_2 vijų, tai pirminėje apvijoje indukuojasi elektrovara:

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

O antrinėje elektrovara:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

1.2. Transformatoriaus įžemėjimas

Transformatoriaus įžemėjimas yra transformatoriaus gedimas, kuomet dėl pažeistos izoliacijos ar mechaninio gedimo susidaro takas, srovei tekėti iš pažeistos apvijos vietos į žemę. Tokio tipo gedimas galimas galios, paskirstymo ar įrenginių transformatoriuose. [15]

Transformatoriaus įžemėjimo metu, susidaro nedidelės srovės, tekančios gedimo taku, kurios sukelia disbalansą sistemoje, bei sukelia šiluminius nuostolius gedimo take, kas gali sukelti didesnius izoliacijos pažeidimus. Kritiškai pažeidus transformatoriaus apvijų izoliaciją, gali kilti tarpfazis trumpasis jungimas, kuris gali stipriai pažeisti transformatoriaus apvijas, bei pažeisti tinklo stabilumą. [4]

Norint išvengti tokio tipo gedimų itin svarbu kuo anksčiau pastebėti transformatoriaus įžemėjimą. Tai paprastai yra atliekama, transformatoriams pritaikant relinės apsaugos įtaisus, tokius kaip diferencinė apsauga, maksimalios srovės apsauga, bei įžemėjimo apsauga.

Įžemėjimo apsaugos yra pritaikytos stebėti srovės tekėjimą per transformatoriaus apvijas ir jas lyginti su srove tekančia per neutralę. Esant įžemėjimui, srovės tekančios per transformatoriaus apvijas sukelia disbalansą tarp fazių, pagal kurį yra išskaičiuojama nulinės sekos srovė. Normaliomis sąlygomis apskaičiuota nulinės sekos srovė turi atitikti srovei, tekančiai per neutralę. Įžemėjimo apsaugos aptikusios disbalansą ar staigų srovių padidėjimą išsiunčia signalą arba išjungimo komandą, norint apsaugos prijunginį nuo didesnių pažeidimų. [7]

Maksimalios srovės apsaugos gali būti paprasti saugikliai arba relinės apsaugos įtaisai, kurie fiksuoja srovės padidėjimą. Srovei pasiekus nustatytą limitą saugikliai perdega arba relinės apsaugos įtaisai išsiunčia išjungimo komandą, prijunginiui apsaugoti nuo tolimesnių pažeidimų. [7]

Diferencinės apsaugos įtaisais yra vieni pagrindinių galios transformatorių apsaugos įtaisų. Šio tipo apsaugos stebi ir lygina srovių tekėjimą per prijunginį, bei išduoda išjungimo komandą kuomet disbalansas tarp įtekančių ir ištekančių srovių yra per didelis. Diferencinės apsaugos įtaisas yra itin efektyvūs aptinkant transformatoriaus įžemėjimus, nes jie gali pastebėti labai mažą srovės pokytį saugomoje sistemoje. [7]

Dėl didelės galios transformatorių svarbos Lietuvos elektros energijos tinklui. Itin svarbu bet kokius šių įrenginių gedimus pastebėti laiku, bei izoliuoti pažeistą vietą. Atsiradus mažiausiam gedimui, jis gali greitai išsivystyti į kritinį gedimą, jeigu nebus laiku pastebėtas. Kadangi galios transformatoriai yra vieni brangiausių elementų elektros energijos tinkle, jų gedimai yra labai skausmingi finansiškai, bei sukelia didelę riziką tinklo stabilumui išlaikyti.

1.3. Nulinė seka

Elektros inžinerijoje, nulinė seka yra trijų fazių srovių arba įtampų vektorinė suma. Normaliomis sąlygomis ir tinklui esant subalansuotame režime, kuomet visų fazių dydžiai yra vienodi ir kampas tarp fazių skiriasi per 120 laipsnių, ši suma yra lygi 0. Atsiradus disbalansui, šios sumos vertė yra nulinės sekos srovė. Ši srovė teka per neutralę trifazėje sistemoje, ją taip pat galima išmatuoti statant srovės transformatorius ant galios transformatorių neutralės išvadų. [14]



2 pav. Simetrinės komponentės

Nulinės sekos srovė yra labai svarbi, nes esant padidėjus šiai srovei elektros energijos perdavimo tinkle gali atsirasti papildomų problemų. Nulinės sekos srovė gali sukelti klaidingus apsaugų poveikis, bei kaitina neutralės laidininkus. Dėl šių priežasčių svarbu analizuoti ir stebėti nulinės sekos srovę elektros energijos perdavimo tinkle. [14]

Paprastai nulinės sekos srovė yra matuojama specialiais nulinės sekos transformatoriais. Nulinės sekos įtampa matuojama, įtampos transformatoriaus apviją sujungiant į atvirą trikampį. Šie prietaisai yra pritaikyti matuoti sumą tarp visų trijų fazių įtampų ar srovių, bei išduoti matavimo vertę, atitinkančią nulinės sekos komponentės dydžiams. [20]

Pagal nulinės sekos srovės ir įtampos matavimus elektros energijos perdavimo tinkle yra nustatomi įžemėjimai. Kuomet tinklas yra izoliuotos neutralės, nėra vienfazių trumpųjų jungimų. Vienos fazės gedimas su neutrале arba žeme yra laikomas įžemėjimu. Esant subalansuotam elektros energijos tinklui, nulinės sekos komponentų dydis yra 0 arba artimas jam. Tačiau atsiradus įžemėjimui tinkle, nedidelio dydžio srovės pradeda tekėti atgal į galios transformatoriaus neutrалę, sukeliančias disbalansą sistemoje. Šį disbalansą užfiksuoja minėti nulinės sekos srovės transformatoriai, bei taip yra užfiksuojamas įžemėjimo gedimas. [3]

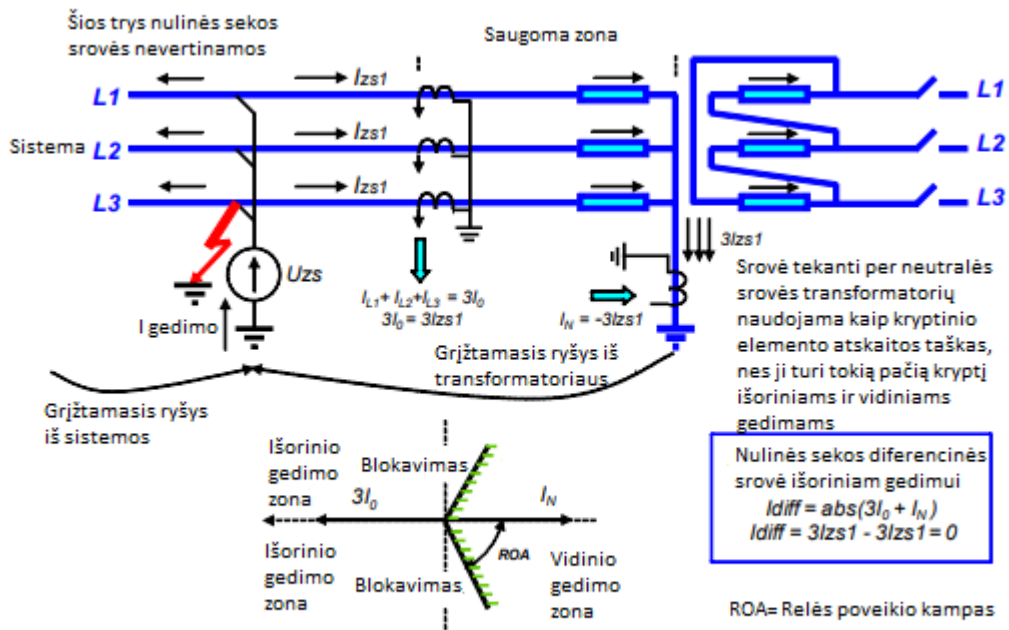
Nulinės sekos įtampa gali būti naudojama transformatoriaus perkaitimui, bei disbalansui tinkle stebėti. Normaliomis sąlygoms galios transformatoriais yra pritaikyti dirbti subalansuotu režimu, kuomet visų trijų fazių įtampų dydis yra vienodas ir kampas tarp jų 120 laipsnių. Atsiradus disbalansui, galios transformatorius gali pradėti kaisti, taip mažinamas jo tarnavimo amžius, bei padidėja eksploatacijos kaina. Todėl stebint nulinės sekos įtampas, galima pastebėti tinklo disbalansą ir jį pakoreguoti laiku, nesukeliant potencialių įrangos gedimų ar sukeliant pavojaus sistemos stabilumui palaikyti. [2]

1.4. Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinė apsauga

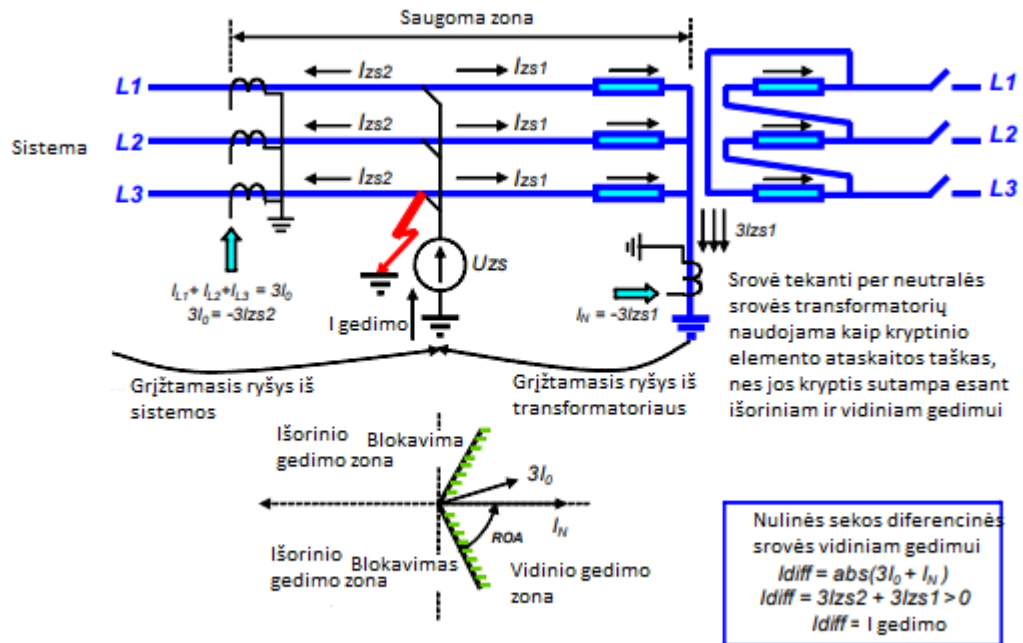
Nulinės sekos srovės apsaugos veikia nustatydamos ir izoliuodamos gedimą, atsirandantį įžemėjimo metu. Paprastai izoliuotos neutralės tinkle laidininkui sukėlus gedimą tarp vienos fazės ir žemės arba apvijos gedimus transformatoriaus ar besisukančius elementus turinčiuose elektros energijos tinklo įrenginiuose. Nulinės sekos srovės apsaugos sistema paprastai turi nulinės sekos srovės transformatorių, kuris yra statomas ant neutralės. Ši apsauga pastoviai matuoja nulinės sekos srovės dydį yra jam padidėjus virš nustatytos normos indikuoja gedimą, bei tam tikrais atvejais išsiunčia išjungimo komandą.

Nulinės sekos srovės diferencinė apsauga yra nulinės sekos srovės apsaugos ir diferencinės apsaugos kombinacija, kuomet yra lyginama išmatuota nulinės sekos srovės ant neutralės srovės transformatoriaus ir išskaičiuota nulinės sekos srovė pagal trijų fazių srovės transformatorių matavimus. Nulinės sekos srovės diferencinė apsauga yra svarbi elektros energijos tinklui, dėl galimybės daug anksčiau užfiksuoti ir izoliuoti gedimus, kurių neužfiksuoja tradicinės diferencinės ir maksimalios srovės apsaugos.

Nulinės sekos srovės apsauga pasižymi didesniu jautrumu. Dėl didelio šios apsaugos jautrumo iškyla papildomų problemų. Atsiradus įžemėjimui už apsaugos saugomos zonos ribų, neteisingai parinkus minėtos apsaugos parametrus, iškyla potenciali galimybė, kad apsauga suveiks klaidingai ir išjungs prijunginį be prie priežasties. Tam nulinės sekos srovės diferencinė apsauga naudoja kryptinį elementą, kuris nustato įžemėjimas įvyksta į saugomą objektą ar už jo ir pagal tai algoritmas skaičiuoja ar reikalinga išsiųsti išjungimo komandą. [10]



3 pav. Nulinės sekos srovės diferencinė apsaugos veikimas esant išoriniam gedimui



4 pav. Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos veikimas esant vidiniam gedimui

Skaitmeninė diferencinė apsauga veikia pagal charakteristiką, įrašytą jos atmintyje. Apsaugoje lyginama veikimo srovė su stabdymo srove. Veikimo srovė, paprastai vadinama diferencine srove, I_{dif} apskaičiuojama sumuojant per saugomą įrenginį tekančių srovių vektorius

$$I_{dif} = |IN^{\rightarrow} + 3I_0^{\rightarrow}|;$$

Kur I_N yra srovė tekanti per transformatoriaus neutralę; $3I_0$ nulinės sekos srovė galios transformatoriuje

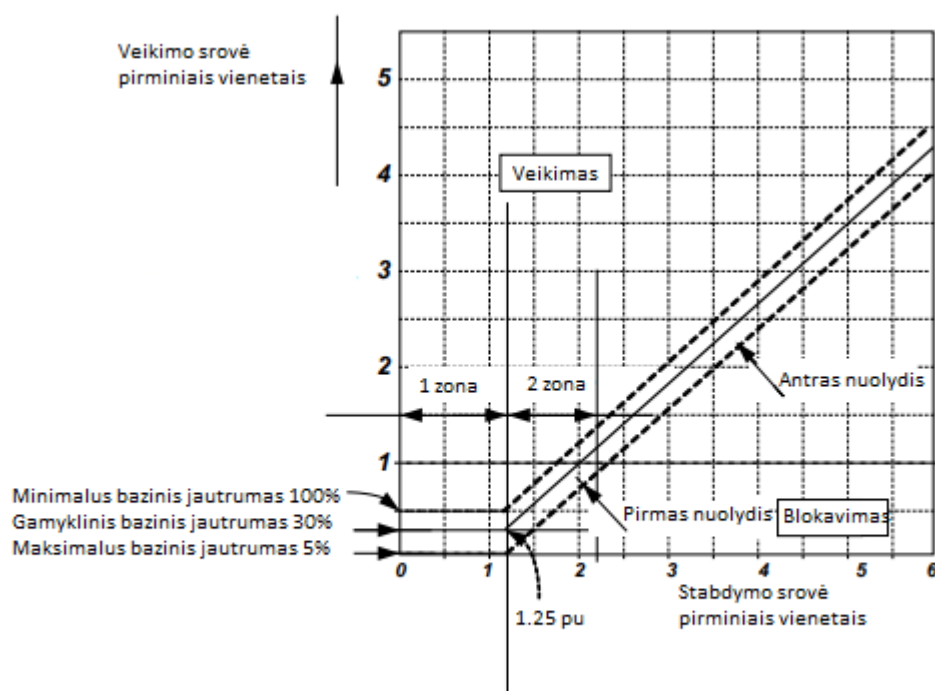
Stabdymo srovė paprastai yra lygi didžiausiai srovei kažkurioje fazėje

Nulinės sekos srovė diferencinė apsauga generuoja išjungimo signalą, jeigu suveikimo srovė yra didesnė nei procentinė stabdymo srovė :

$$I_{dif} > SLP \times I_{stab}.$$

Čia SLP (angl. *Slope*) – nuolydis

Tradiciškai nulinės sekos srovės apsauga naudoja dviejų nuolydžių apsaugos charakteristiką. Zona virš charakteristikos yra veikimo zona, kuomet apsaugai įvertinus parametrus ir nustatiusi tašką virš veikimo zonos išduoda išjungimo komandą. Zona žemiau charakteristikos yra blokavimo zona, apsaugai įvertinus parametrus ir nustatius tašką blokavimo zonoje, išjungimo komanda neišduodama.



5 pav. Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos charakteristika

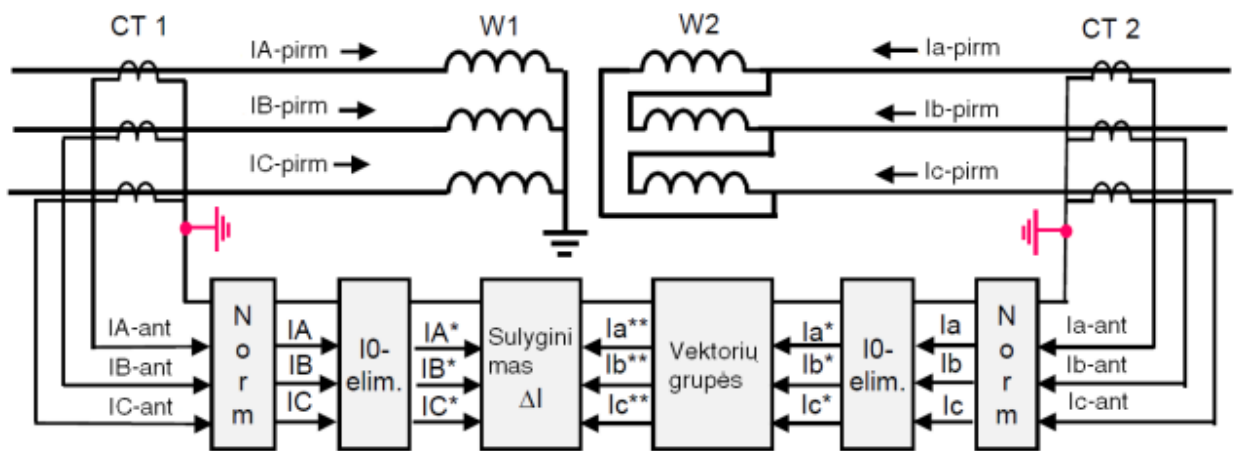
Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos charakteristika turi du pagrindinius laiptus, būdingus skaitmeninėms relėms:

- pirmasis laiptas (1 zona), bazinis slenkstis yra nepriklausomas nuo stabdymo srovės. Kuomet teka itin mažos srovės yra vertinamas tik apsaugos I_{diff} parametras suveikimui
- antrasis laiptas (2 zona), vertina stabdymo srovę, šis laiptas tampa aktyvus kuomet pradeda tekėti didesnės srovės transformatoriuje, jo jautrumas sumažėja dėl atsirandančių srovės transformatorių įsisotinimų tekant didelėms srovėms

Įprastai nulinės sekos srovės diferencinė apsauga efektyviausiai veikia žemintos neutralės tinkle, bei Yn-Yn jungimo grupės transformatoriuose, tačiau ją galima pritaikyti bet kokios neutralė ar jungimo grupės tinklams. [10]

1.5. Transformatoriaus diferencinė apsauga

Diferencinė apsauga yra viena iš pagrindinių galio transformatoriaus apsaugų. Ji yra paremta išilginės srovės diferencinės apsaugos principu, todėl matavimams reikalingi srovės transformatoriai yra statomi prieš ir už saugomo objekto, šiuo atveju transformatoriaus. Šios apsaugos privalumai yra jautrumas, greitas veikimas ir selektyvumas apsaugant nuo trumpųjų jungimų atsirandančių saugomo objekto viduje ar saugomoje zonoje. Diferencinė apsauga taikoma galios transformatoriams, kurių galia yra didesnė nei 6,3 MVA, išimtiniais atvejais 1,6 MVA, jeigu srovės atkirta netenkina jautrumo reikalavimų. [2]



6 pav. Srovių adaptacija skaitmeninėje transformatoriaus diferencinėje apsaugoje

Skaitmeninė diferencinė apsauga veikia pagal charakteristiką, įrašytą jos atmintyje. Apsaugoje lyginama veikimo srovė su stabdymo srove. Veikimo srovė, paprastai vadinama diferencine srove, I_{dif} apskaičiuojama sumuojant per saugomą įrenginį tekančių srovių vektorius

$$I_{dif} = |I_1^{\vec{}} + I_2^{\vec{}}|;$$

Kur I_{dif} yra proporcinga avarijos srovei, kai avarija įvyksta saugomoje zonoje, ir lygi 0 normaliu režimu.

Stabdymo srovei I_{stab} apskaičiuoti yra keli skirtingi būdai. Dažniausiai naudojami pateikiami žemiau:

$$I_{stab} = k|I_1^{\vec{}} - I_2^{\vec{}}|;$$

$$I_{stab} = k(|I_1^{\vec{}}| + |I_2^{\vec{}}|);$$

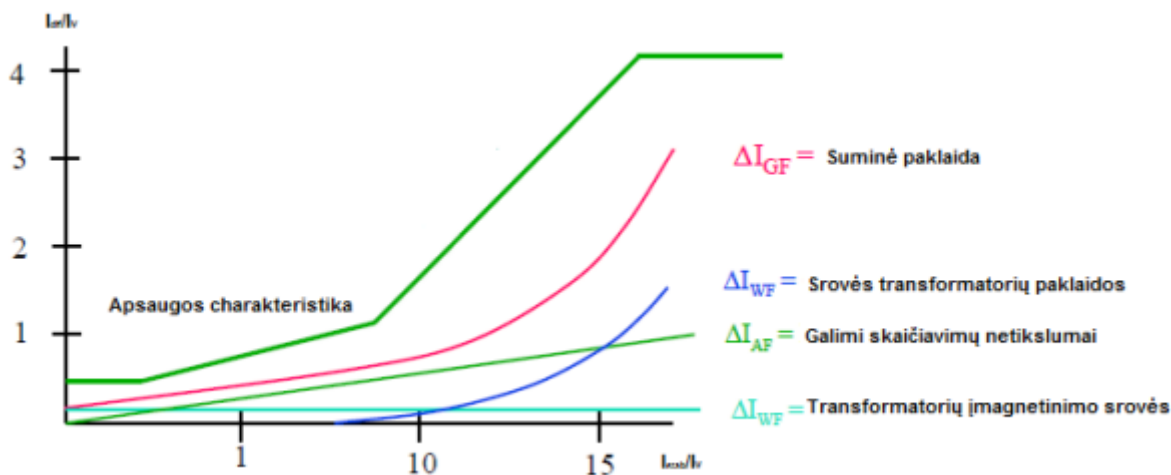
$$I_{stab} = Max(|I_1^{\vec{}}|, |I_2^{\vec{}}|);$$

Kur k yra kompensacijos faktoriaus, dažniausiai priimamas 1 arba 0,5

Diferencinė apsauga generuoja išjungimo signalą, jeigu suveikimo srovė yra didesnė nei procentinė stabdymo srovė [2]:

$$I_{dif} > SLP \times I_{stab};$$

Čia SLP (angl. Slope) – nuolydis



7 pav. Diferencinės apsaugos charakteristika

Virš nuolydžio esanti zona yra veikimo zona, po juo – neveikimo zona.

Diferencinės apsaugos charakteristika turi tris pagrindinius laiptus, būdingus skaitmeninėms relėms:

- Pirmasis laiptas, bazinis slenkstis $I_{d>}$ ir pirmoji nuolydžio atšaka turi būti nejautri galios transformatoriaus įmagnetinimo srovėms ir paklaidoms, kurios atsiranda dėl atšakų perjungėjo. Transformatoriui, kuris neturi atšakų perjungėjo, bendroji vertė yra $20\% I_N$ ir iki $30\% I_N$ transformatoriui su atšakų perjungėju. Paprastai yra priimta nustatyti 25% nuolydį pirmajai atšakai ir 50% antrajai atšakai.
- Antrasis laiptas, priklausomai nuo gamintojo, aprašomas intervale $(0-10)I_V$, kuriame diferencinės apsaugos charakteristika yra pakeliama aukščiau, nes tekant didelėms srovėms, srovės transformatoriai įsisotina ir atsiranda didesnės paklaidos.
- Trečias laiptas, aukščiausias slenkstis $I_{d>>}$ nustatomas įvertinus visas paklaidas

$$I_{D>} = \left(\frac{p_{STA} + p_{STž} + p_{RA} + p_{IR}}{100} \right) \times k_{at};$$

$$I_{D>>} = \frac{k_{sm} \times I_{kmaxA}^{(3)}}{I_{VA}}$$

Kur p_{STA} – srovės transformatoriaus, esančio aukštoje įtampos pusėje paklaida, $p_{STž}$ – srovės transformatoriaus, esančio žemoje įtampos pusėje paklaida, p_{RA} – relinės apsaugos terminalo paklaida, p_{IR} – atšakų reguliatorius, $I_{kmaxA}^{(3)}$ – trifazio trumpojo jungimo srovė aukštos įtampos pusėje, I_{VA} galios transformatoriaus vardinė srovė aukštos įtampos pusėje.

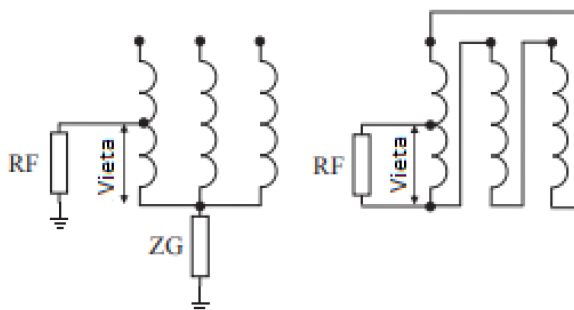
1.6. Literatūros analizė

Galios transformatoriaus avarijos metu, kuomet įvyksta trumpasis jungimas tarp apvijų ar apvija įžemėja, avarijos srovė dydis priklauso nuo apvijos gedimo vietos. Straipsnio „Testint Sensitivity of Restricted Earth Fault Protection by Simulation of Faults Inside Transformer“ autoriai simuliuodami gedimus nustatė šias priklausomybes, kurias aptarsime.

Nulinės sekos srovės diferencinę apsaugą gali įtakoti ir aplinkos veiksniai, kuriuos gali būti sunku įvertinti arba jie yra specifiški vietai. Atlikus literatūros šaltinių analizę baigiamojo projekto modeliui sudaryti, remiantis šaltiniais buvo priimti tokie sprendimai:

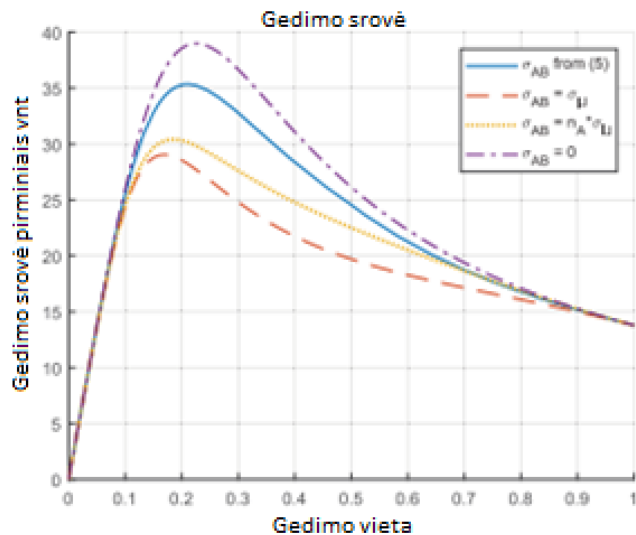
- nuotekio induktyvumas prilyginamas 0;
- grunto varža tiriamoje aplinkoje ideali, 0Ω ;
- gedimo tako varža artima idealiai, 0.1;
- nulinės sekos diferencinei apsaugai taikoma vieno nuolydžio charakteristika.

Nuotekio induktyvumas, grunto varža ir gedimo tako varža buvo parinkta remiantis straipsniu „Testint Sensitivity of Restricted Earth Fault Protection by Simulation of Faults Inside Transformer“. [8] Straipsnio autoriai modeliavo transformatoriaus gedimus esant skirtingiems parametrams, bei palygino jų rezultatus.



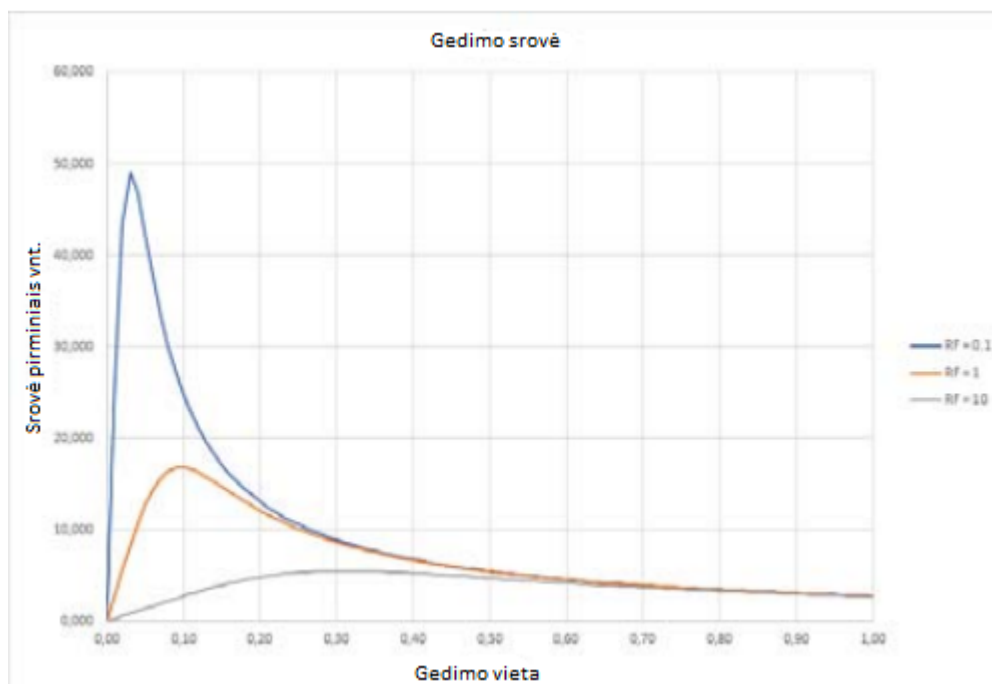
8 pav. Tiriamo transformatoriaus schema

Gedimo vieta žymima procentais 0% parodo, kad gedimas prie neutralės. Papildomai buvo iširta srovių pokytis esant skirtingomis avarijos varžomis (RF) ir skirtingomis įžeminimo varžomis (ZG). Testuojant buvo užsiduodamos skirtingos transformatoriaus maitinimo kryptys.



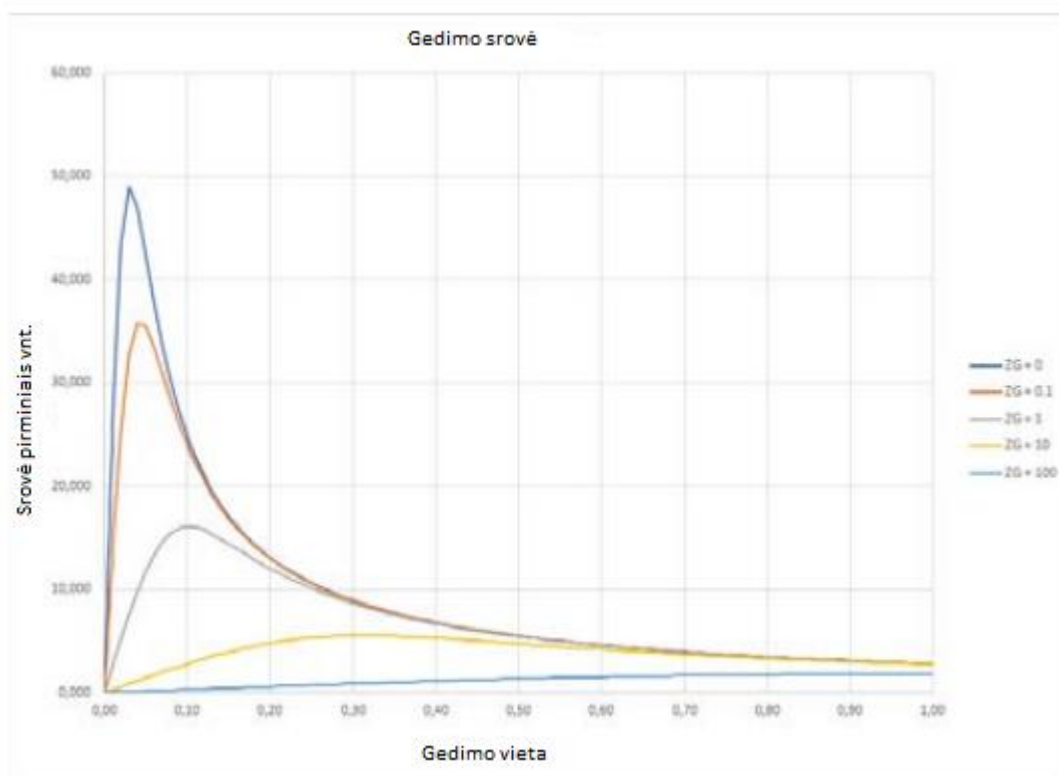
9 pav. Gedimo srovės priklausomybė esant skirtingiems nuotėkio induktyvumo skaičiavimo metodams

Rezultatai pateikti paveikslėliuose (14pav.) rodo skirtingus rezultatus simuliacijos metu, kuomet buvo taikomos skirtingi metodai nuotėkio induktyvumui skaičiuoti. Taip pat iš gautų rezultatų matome, kad esant gedimui arti transformatoriaus neutralės, diferencinės srovės yra labai mažos. Todėl paprasta diferencinė apsauga tokio gedimo gali neužfiksuoti. Išanalizavus gautus rezultatus baigiamojo projekto darbe nuotėkio induktyvumas bus prilyginamas 0, simuliacijų optimizavimui.



10 pav. Gedimo srovės priklausomybė esant skirtingoms gedimo varžomis

Iš bandymų su skirtingomis gedimo varžomis (15pav.), matome, kad esant didelei gedimo tako varžai, srovės pokytis yra itin mažas. Gedimo tako varžai mažėjant, gedimo srovės padidėja kelis kartus. Sudarant baigiamojo projekto modelį buvo pasirinkta gedimo tako varža artima idealiai, 0.1 Ω . Taip buvo nuspręsta norint kiek įmanoma labiau padidinti gedimo varžas, tiriant kritinius atvejus.



11 pav. Gedimo srovės priklausomybė esant skirtingoms grunto varžomis

Iš pateiktų rezultatų (16 pav.) matome gedimo srovės dydžio priklausomybę nuo grunto varžos. Didėjant varžai, gedimo srovė mažėja. Esant itin didelei grunto varžai, srovės pokytis yra itin minimalus. Baigiamojo projekto modelyje buvo parinkta ideali, 0Ω grunto varža. Taip buvo pasirinkta, norint užtikrinti didžiausią galimą gedimo srovę.

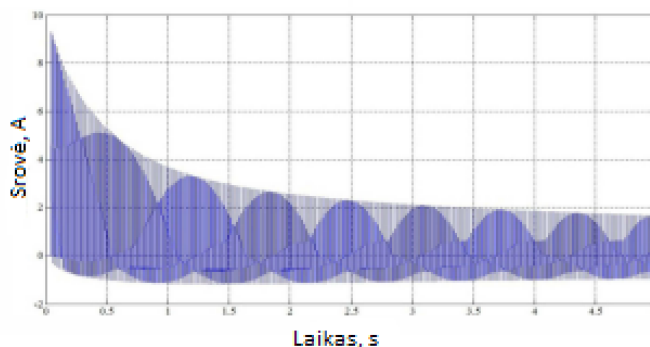
Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos charakteristikos jautrumas vykstant transformatoriaus įsismagnetinimui ir srovės transformatorių sotinimuisi aptiriamas straipsniuose „A New Restricted Earth Fault Protection“ [3] ir „Performance of Restricted Earth Fault Protection in the Presence of Current Transformer Remanence“ [5]. Autoriams pristačius galimas problemas lemiančias apsaugos veikimą, buvo pasiūlytas naujo tipo charakteristikos skaičiavimo metodas. Tradiciškai nulinės sekos srovės apsauga naudoja dviejų nuolydžių apsaugos charakteristiką.



12 pav. Nulinės sekos srovė diferencinės apsaugos dviejų nuolydžių charakteristika

Dėl atsirandančių įsismagnetinimo srovių atsirandančių tik vienoje transformatoriaus pusėje, kol transformatorius įsismagnetina, nulinės sekos srovės diferencinė apsauga gali klaidingai suveikti,

atjungdama transformatorių[17]. Taip pat srovės transformatoriaus įsisotinimo srovė paprastai būna 100-200% didesnė nei nominali srovė [16]. Tam reikalingas labai status antrasis apsaugos charakteristikos nuolydis (m2), kad esant išoriniam trumpajam jungimui srovės transformatoriui įsisotinant, apsaugą nesuveiktų klaidingai. Parinkus labai statų antrąjį charakteristikos laiptą, tekant didelėms srovėms apsaugos jautrumas suprastėja.



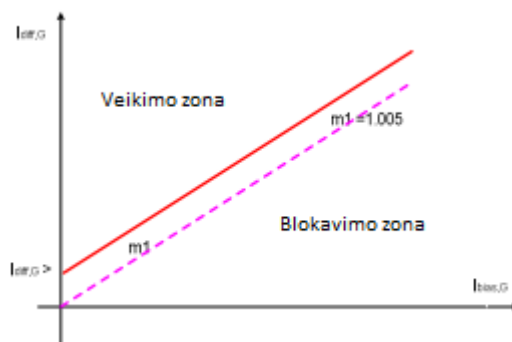
13 pav. Transformatoriaus įmagnetinimo srovė

Dėl šių atsirandančių problemų straipsnio autoriai pasiūlė naujo tipo stabdymo charakteristiką, kurioje sumuojama fazių srovių vertė, kurią apžvelgsime. Naujai charakteristikai skaičiuojama diferencinė ir stabdymo srovės:

$$I_{dif} = K_{amp.N} \times (I_A + I_B + I_C) + K_{amp.Y} \times I_Y;$$

$$I_{stab} = K_{amp.N} \times |I_A + I_B + I_C|.$$

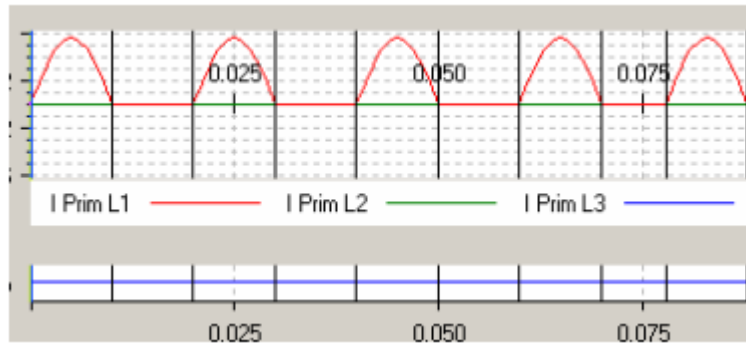
Čia $K_{amp.N}$ kompensacijos faktorius fazių srovėms $K_{amp.Y}$ kompensacijos faktorius nulinės sekos srovei.



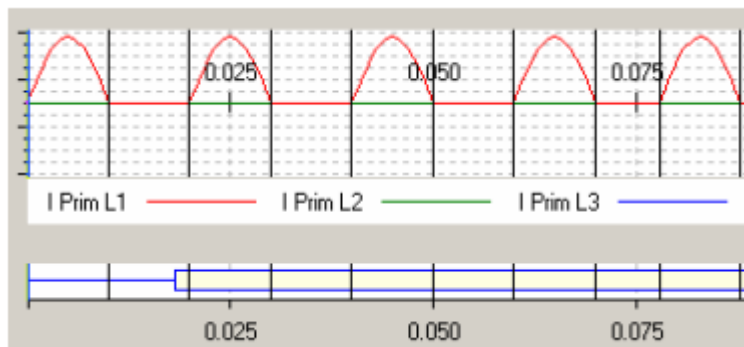
14 pav. Nulinės sekos srovė diferencinės apsaugos fazių srovių sumų charakteristika

Iš gautos charakteristikos matome, kad nulinės sekos diferencinei srovei suveikti, reikalinga liekamoji srovė, tačiau bet kokie srovių nebalansai atsiradę dėl įjungimo srovių, srovės transformatorių įsisotinimo ar išorinių TJ lieka charakteristikos stabdymo zonoje. Apsauga suveiks tik tada, kai srovė tekės neutralėje ir bus didesnė nei nustatytas pirmasis diferencinės apsaugos jautrumo laiptas.

Atlikus bandymus su transformatoriaus įmagnetinimo srovėmis ir srovės transformatorių įsisotinimu, gauti rezultatai:

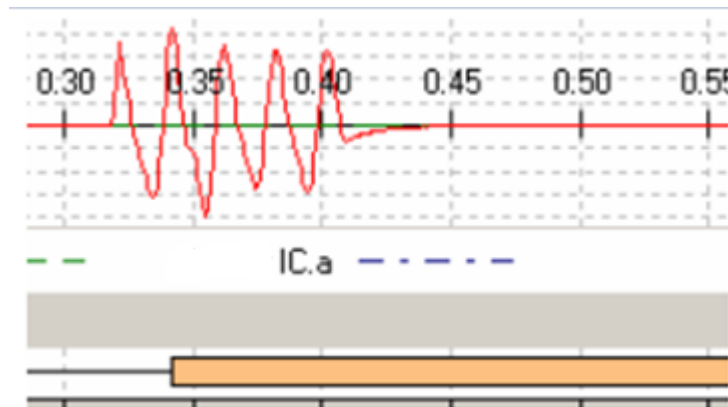


15 pav. REF veikimas esant transformatoriaus įmagnetinimo srovėms su fazių srovių sumavimo charakteristika

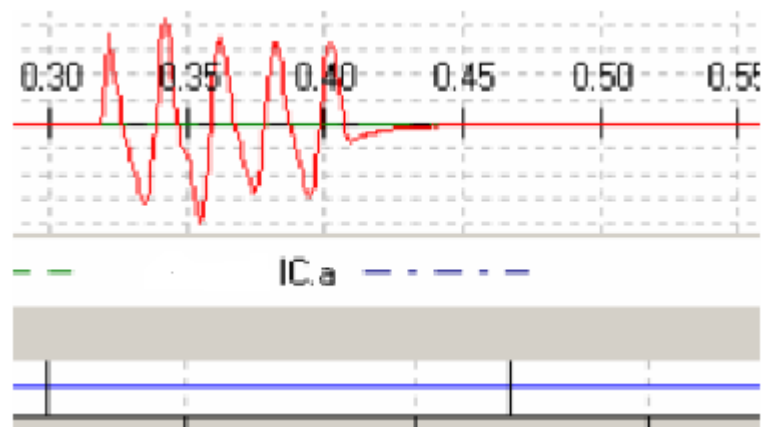


16 pav. REF veikimas esant transformatoriaus įmagnetinimo srovėms su tradicine charakteristika

Iš gautų rezultatų matome, kad tradicinė REF charakteristika veikia klaidingai esant transformatoriaus įmagnetinimo srovėms ir išduoda išjungimo komandą, kurios neturėtų būti.



17 pav. REF veikimas esant srovės transformatoriaus įsisotinimui srovėms su tradicine charakteristika



18 pav. REF veikimas esant srovės transformatoriaus įsisotinimui srovėms su fazių srovių sumavimo charakteristika

Iš gautų rezultatų matome, kad atsiradus srovės transformatorių įsisotinimui, apsauga su tradicine charakteristika veikia klaidingai, ko neturėtų būti. Fazių srovių sumavimo charakteristika ignoruoja srovės transformatorių įsisotinimą, neišduoda klaidingos išjungimo komandos.

Straipsnyje „Restricted Earth-Fault (REF) Protection Challenges due to Extensive Use of Cables: A Case Study“ aptariamas nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos veikimas tinkle, kuriame linijos yra kabelinės. [11] Esant kabeliniam tinklui, susidaro didelės talpuminės srovės, kurios atsiradus įžemėjimui pasuka srovės vektorius, todėl nulinės sekos srovės diferencinė apsauga gali suveikti klaidingai, jos kryptinis elementas nustato gedimą už saugomos zonos ribų, nors iš tikrųjų jis vyksta transformatoriuje. Minėto straipsnio autoriai analizuoja tokio tipo gedimą, įžemėjimas atsirado ant transformatoriaus išvadų, už srovės transformatoriaus, t.y. saugumoje apsaugos zonoje. Tačiau nulinės sekos srovės diferencinė apsauga neatjungė saugomo objekto, tai padarė diferencinė apsauga po 300ms, kuomet gedimas perėjo į dvifazį trumpąjį jungimą. Išanalizavus sutrikimo registratoriaus duomenis, buvo nustatyta, kad kampas tarp matuojamos nulinės sekos srovės I_N ir apskaičiuojamos nulinės sekos srovės $3I_0$ buvo 95° , o nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos kryptinis elementas buvo nustatytas, kad jo veikimo zona yra 60° , todėl apsauga nesuveikė, algoritmas apskaičiavo, kad gedimas vyksta už saugomos zonos ribų, neatjungė laiku transformatoriaus ir tik gedimui perėjus į dvifazį TJ, suveikus diferencinei apsauga, objektas buvo atjungtas.

Nulinės sekos srovės diferencinė apsauga yra taikoma ne tik galios transformatoriams, bet ir autotransformatoriams. Straipsnyje „Analysis of an Autotransformer Restricted Earth Fault Application“ yra aptariamas klaidingas nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos veikimas esant išoriniam vienfaziam trumpajam jungimui. [1] Straipsnio autoriai analizuoja klaidingą apsaugos veikimą, kuomet įvyko vienfazis trumpasis jungimas B fazėje vidutinės įtampos tinkle. Autotransformatorius turėjo tretinę apviją, kuri yra sujungta trikampiui ir magnetiškai atskirta nuo aukštos ir vidutinės įtampos. Suveikus apsaugoms, linija buvo atjungta, tačiau atsijungė ir autotransformatorius. Taip nutiko todėl, nes nulinės sekos srovės diferencinės matavimai buvo gaunami iš autotransformatoriaus neutralės ir vidutinės įtampos fazių. Atsijungus vidutinės įtampos jungtuvams, autotransformatorius liko darbe, kadangi tretinės apvijos tinklas nebuvo pažeistas. Dingus matavimams iš vidutinės įtampos srovės transformatorių, matavimai iš neutralės srovės transformatoriaus liko. Todėl apsaugos algoritmas apskaičiavo, kad gedimas įvyko autotransformatoriuje ir jį atjungė.

2. Tiriamoji dalis

Norint užtikrinti teisingą apsaugos veikimą, būtina sukurtą arba patobulintą algoritmą kaip įmanoma daugiau ištestuoti. Geriausia tam patikrinti yra natūriniai bandymai, kuomet gedimas yra ne imituojamas, o padaromas realiai. Tačiau tai ne visada yra įmanoma arba yra per brangu. Todėl dažnai tenka pasitelkti simuliacijas ir skaičiavimus, norint įsitikinti, kad norima apsauga veiks teisingai ir be pašalinių trikdžių. Tam tiriamojoje dalyje nagrinėsime nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos poveikį esant įvairiems gedimams transformatoriaus apvijoje.

Norint užtikrinti bandymų tikslumą, sudaromas modelis atitinkantis Lietuvos elektros energijos perdavimo ir paskirstymo tinklo parametrus. Bandomasis modelis bus kuriamas Matlab Simulink aplinkoje. Transformatoriaus apsaugų modelyje srovės transformatorių antrinės grandinės bus prijungiamos prie nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos ir transformatoriaus diferencinės apsaugos, tam kad patikrintume, kokią įtaką minėtų apsaugų veikimui turi gedimai, skirtingose transformatoriaus apvijos vietose. Bus atliekama keletas bandymų:

- Normalus darbo režimas;
- Transformatoriaus apvijos gedimai kuomet transformatoriaus jungimo grupė: žvaigždė-trikampis YnD11 gedimas aukštos įtampos pusėje, Nž įjungtas;
- Transformatoriaus apvijos gedimai kuomet transformatoriaus jungimo grupė: žvaigždė-trikampis YnD11 gedimas aukštos įtampos pusėje, Nž išjungtas;
- Transformatoriaus apvijos gedimai kuomet transformatoriaus jungimo grupė: žvaigždė-žvaigždė YnYn, gedimas aukštos įtampos pusėje, Nž įjungtas;
- Transformatoriaus apvijos gedimai kuomet transformatoriaus jungimo grupė: žvaigždė-žvaigždė YnYn, gedimas aukštos įtampos pusėje, Nž išjungtas;
- Transformatoriaus apvijos gedimai kuomet transformatoriaus jungimo grupė: žvaigždė-žvaigždė YnYn, gedimas žemos įtampos pusėje. Nž įjungtas;
- Transformatoriaus apvijos gedimai kuomet transformatoriaus jungimo grupė: žvaigždė-žvaigždė YnYn, gedimas žemos įtampos pusėje, Nž išjungtas.

Minėtais atvejais patikrinsime, kaip veikia modelis normaliame sistemos darbo režime, kuomet transformatorius apkrautas 2MW apkrova. Tada imituosime gedimus keliose pasirinktose transformatoriaus apvijos vietose.

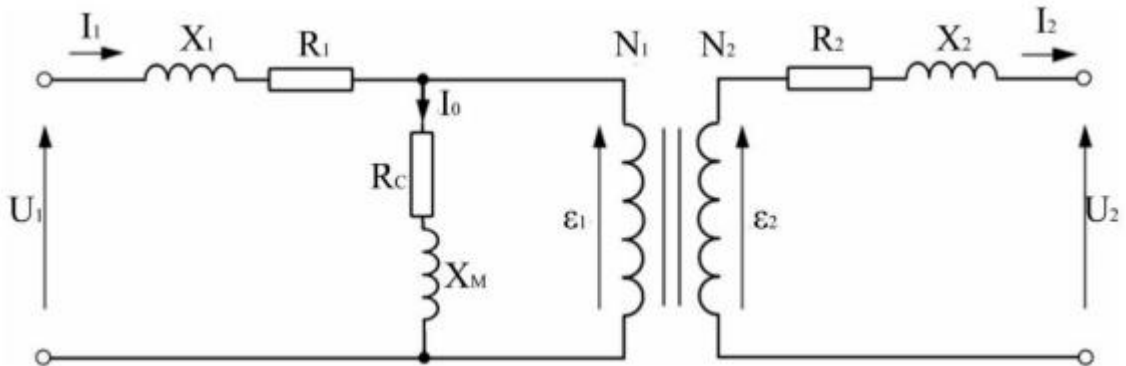
Atlikę bandymus, rezultatus palyginsime, kaip veikia nulinės sekos srovės diferencinė ir transformatoriaus diferencinė apsauga. Ar atsiradus transformatoriaus gedimui užtenka transformatoriaus diferencinės apsaugos greitai ir patikimai jį atjungti, ar atsiranda nesaugoma transformatoriaus diferencinės apsaugos apvijos zona, kurioje kilus gedimui apsauga nesuveikia. Reikalinga didesnio jautrumo transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinė apsauga.

2.1. Transformatoriaus schema

Norint teisingai sumodeliuoti transformatoriaus modelyje Matlab Simulink aplinkoje, būti susiskaičiuoti pagrindinius transformatoriaus apvijos ir įsimagnetinimo parametrus. Tam susidarome ekvivalentinę transformatoriaus vienos fazės schemą, pagal kurią išskaičiuojame parametrus.

Skaičiavimams reikalingi duomenys:

- Tuščios veikos galios nuostoliai P_0 , kW;
- Santykinė tuščios veikos srovė, $i_0\%$, %;
- Trumpojo jungimo galios nuostoliai P_K , kW;
- Santykinė trumpojo jungimo įtampa, $u_K\%$, %.



19 pav. transformatoriaus ekvivalentinė schema

Čia ε indukuota elektrovara

Santykis tarp pirminės ir antrinės apvijos yra laikomas transformacijos koeficientu.

Čia U_1 įtampa pirminėje apvijoje, U_2 įtampa antrinėje apvijoje. N_1 vijų skaičius pirminėje apvijoje, N_2 vijų skaičiu antrinėje apvijoje:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2};$$

Fazinė įtampa:

$$U_{1f} = \frac{U_1}{\sqrt{3}};$$

Apvijos nominali fazinė srovė:

$$I_{1f} = \frac{S}{3 \times U_{1f}};$$

Apskaičiavus pagrindinius transformatoriaus parametrus ir turint transformatoriaus bandymų duomenis (žr. priedą) randami pagrindiniai apvijos parametrai reikalingi simuliacijai.

Tuščios veikos srovė, A:

$$I_{0f} = \frac{I_{1f} \times i_0\%}{100};$$

Ekvivalentinės schemos pilnutinė varža, Ω :

$$Z_0 = \frac{U_{1f}}{I_{0f}};$$

Ekvivalentinės schemos aktyvioji varža, Ω :

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \times I_{0f}^2};$$

Ekvivalentinės schemos induktyvioji varža, Ω :

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

Atliekant transformatoriaus tuščios eigos bandymą, transformatorius nėra apkrautas, todėl visi nuostoliai atsiranda įsimagnetinant magnetolaidžiui ir aktyvieji plieno šilimo. Kadangi varžos X_0 ir R_0 yra daug kartų didesnės už X_1 ir R_1 , galima laikyti, kad $X_0 \approx X_m$ ir $R_0 \approx R_c$.

Čia X_m – transformatoriaus įsimagnetinimo energija

R_c – aktyvieji plieno nuostoliai atsirandantys šylant magnetolaidžiui

Pagal transformatoriaus trumpojo jungimo bandymo duomenis, galima apskaičiuoti pagrindinius transformatoriaus apvijų parametrus.

Trumpojo jungimo įtampa

$$U_{Kf} = \frac{U_{1f} \times u_k \%}{100};$$

Fazės trumpojo jungimo pilnutinė varža

$$Z_k = \frac{U_{1f}}{I_{1f}};$$

Fazės trumpojo jungimo aktyvioji varža

$$R_k = \frac{P_K}{3 \times I_{1f}^2};$$

Fazės trumpojo jungimo sklaidos induktyvumo varža

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2};$$

Transformatoriaus pirminės apvijos induktyvumas

$$L_{1m} = \frac{X_k}{\omega}.$$

Čia $\omega = 2\pi f$ (kampinis dažnis, $f = 50\text{Hz}$)

Įvertinus jau apskaičiuota transformatoriaus transformacijos koeficientą, galima apskaičiuoti antrinės apvijos parametrus.

Trumpojo jungimo aktyvioji varža antrinei apvijai

$$R_2 = \frac{R_k}{k^2};$$

Trumpojo jungimo sklaidos induktyvumo varža antrinei apvijai

$$X_2 = \frac{X_k}{k^2};$$

Transformatoriaus antrinės apvijos induktyvumas

$$L_{2m} = \frac{X_2}{\omega}.$$

Norint imituoti transformatoriaus gedimą, modelyje apvija padalinama į dvi dalis, kuriai apvijos parametrai yra proporcingai, pagal gedimo vietą, perskaičiuojami. Kadangi apvijos aktyvioji varža yra aktyvus elementas, nekuriantis magnetinio lauko, ją perskaičiuoti galima paprastai, dalinant apviją į sveiką ir pažeistą dalis.

Sveiko ir pažeisto apvijos santykis

$$m = \frac{n_a}{n_b};$$

Čia n_a - sveikos apvijos vijų skaičius;

n_b - pažeistos apvijos vijų skaičius.

Sveikos apvijos dalies aktyvioji varža

$$R_a = R \times \frac{n_a}{n};$$

Čia R – apvijos varža;

n - apvijos vijų skaičius.

Pažeistos apvijos dalies aktyvioji varža

$$R_b = R \times \frac{n_b}{n}.$$

Skaidant apvijos induktyvumą į sveiką, bei pažeista dalis, to negalima daryti taip pat, kaip aktyvaus elemento, nes induktyvumas kuria magnetinį lauką, kuris sąveikauja tarp sveikos ir pažeistos apvijos dalies.

Sveikos apvijos dalies induktyvumas

$$L_a = \frac{L_{1m}}{\frac{1}{m^2} + \frac{2}{m} + 1};$$

Pažeistos apvijos dalies induktyvumas

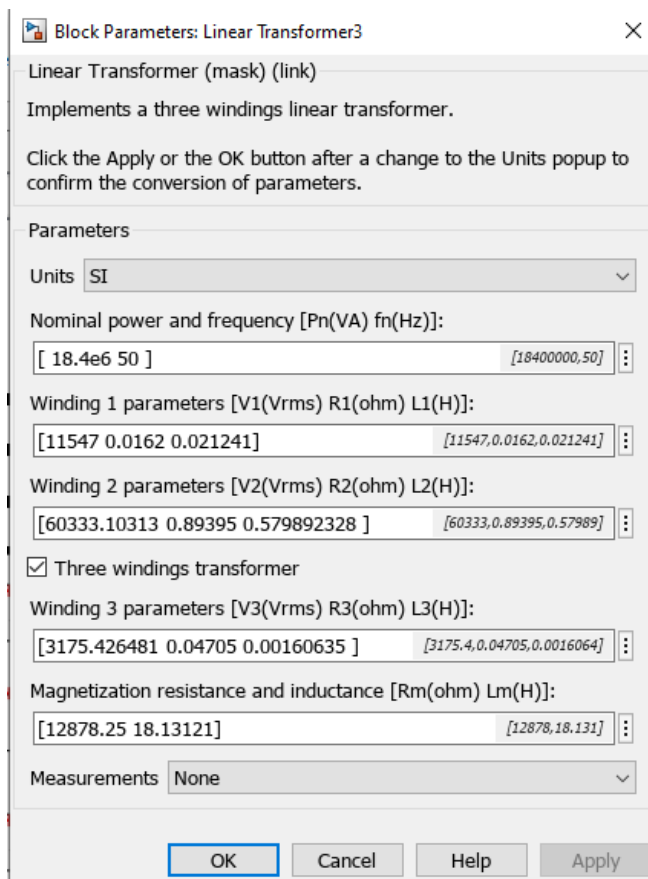
$$L_b = \frac{L_{1m}}{m^2 + 2m + 1}.$$

Pagal pateiktus skaičiavimus, transformatoriaus apvija suskaidoma 25% intervale, kas 1%, pagal šiuos duomenis atliekamas modeliavimas. Rezultatai pateikiami lentelėje pirmoje.

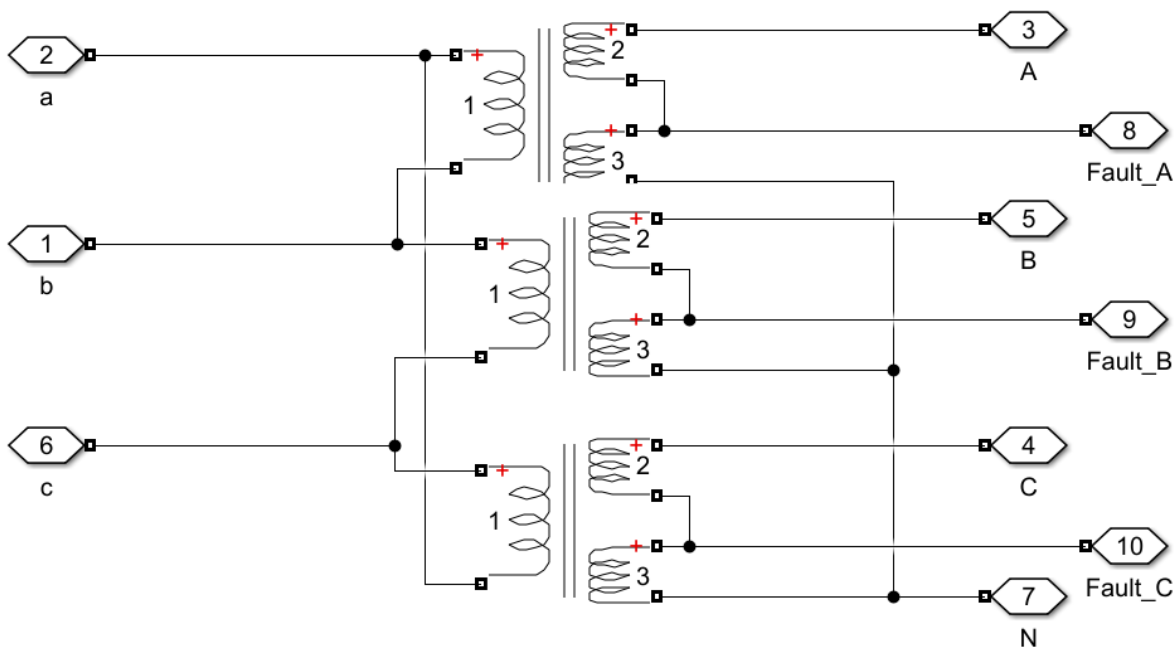
Gedimo procentas	Aukštos įtampos dalis						Žemos įtampos dalis					
	U_{1a}	R_a	L_a	U_{1b}	R_b	L_b	U_{2a}	R_a	L_a	U_{2b}	R_b	L_b
1%	62873.44	0.93159	0.62975	635.09	0.0094	0.000064	11431.54	0.01604	0.02082	115.47	0.00016	0.00000
2%	62238.36	0.92218	0.61710	1270.17	0.0188	0.000257	11316.07	0.01588	0.02040	230.94	0.00032	0.00001
3%	61603.27	0.91277	0.60457	1905.26	0.0282	0.000578	11200.60	0.01571	0.01999	346.41	0.00049	0.00002
4%	60968.19	0.90336	0.59216	2540.34	0.0376	0.001028	11085.13	0.01555	0.01958	461.88	0.00065	0.00003
5%	60333.10	0.89395	0.57989	3175.43	0.0471	0.001606	10969.66	0.01539	0.01917	577.35	0.00081	0.00005
6%	59698.02	0.88454	0.56775	3810.51	0.0565	0.002313	10854.19	0.01523	0.01877	692.82	0.00097	0.00008
7%	59062.93	0.87513	0.55573	4445.60	0.0659	0.003148	10738.72	0.01507	0.01837	808.29	0.00113	0.00010
8%	58427.85	0.86572	0.54385	5080.68	0.0753	0.004112	10623.24	0.01490	0.01798	923.76	0.00130	0.00014
9%	57792.76	0.85631	0.53209	5715.77	0.0847	0.005205	10507.77	0.01474	0.01759	1039.23	0.00146	0.00017
10%	57157.68	0.84690	0.52046	6350.85	0.0941	0.006425	10392.30	0.01458	0.01721	1154.70	0.00162	0.00021
11%	56522.59	0.83749	0.50896	6985.94	0.1035	0.007775	10276.83	0.01442	0.01682	1270.17	0.00178	0.00026
12%	55887.51	0.82808	0.49758	7621.02	0.1129	0.009253	10161.36	0.01426	0.01645	1385.64	0.00194	0.00031
13%	55252.42	0.81867	0.48634	8256.11	0.1223	0.010859	10045.89	0.01409	0.01608	1501.11	0.00211	0.00036
14%	54617.34	0.80926	0.47522	8891.19	0.1317	0.012594	9930.42	0.01393	0.01571	1616.58	0.00227	0.00042
15%	53982.25	0.79985	0.46424	9526.28	0.1412	0.014457	9814.95	0.01377	0.01535	1732.05	0.00243	0.00048
16%	53347.16	0.79044	0.45338	10161.36	0.1506	0.016449	9699.48	0.01361	0.01499	1847.52	0.00259	0.00054
17%	52712.08	0.78103	0.44265	10796.45	0.1600	0.018569	9584.01	0.01345	0.01463	1962.99	0.00275	0.00061
18%	52076.99	0.77162	0.43204	11431.54	0.1694	0.020818	9468.54	0.01328	0.01428	2078.46	0.00292	0.00069
19%	51441.91	0.76221	0.42157	12066.62	0.1788	0.023196	9353.07	0.01312	0.01394	2193.93	0.00308	0.00077
20%	50806.82	0.75280	0.41123	12701.71	0.1882	0.025702	9237.60	0.01296	0.01359	2309.40	0.00324	0.00085
21%	50171.74	0.74339	0.40101	13336.79	0.1976	0.028336	9122.13	0.01280	0.01326	2424.87	0.00340	0.00094
22%	49536.65	0.73398	0.39092	13971.88	0.2070	0.031099	9006.66	0.01264	0.01292	2540.34	0.00356	0.00103
23%	48901.57	0.72457	0.38096	14606.96	0.2164	0.033990	8891.19	0.01247	0.01259	2655.81	0.00373	0.00112
24%	48266.48	0.71516	0.37113	15242.05	0.2258	0.037010	8775.72	0.01231	0.01227	2771.28	0.00389	0.00122
25%	47631.40	0.70575	0.36143	15877.13	0.2353	0.040159	8660.25	0.01215	0.01195	2886.75	0.00405	0.00133

1 lentelė. Transformatoriaus parametrai

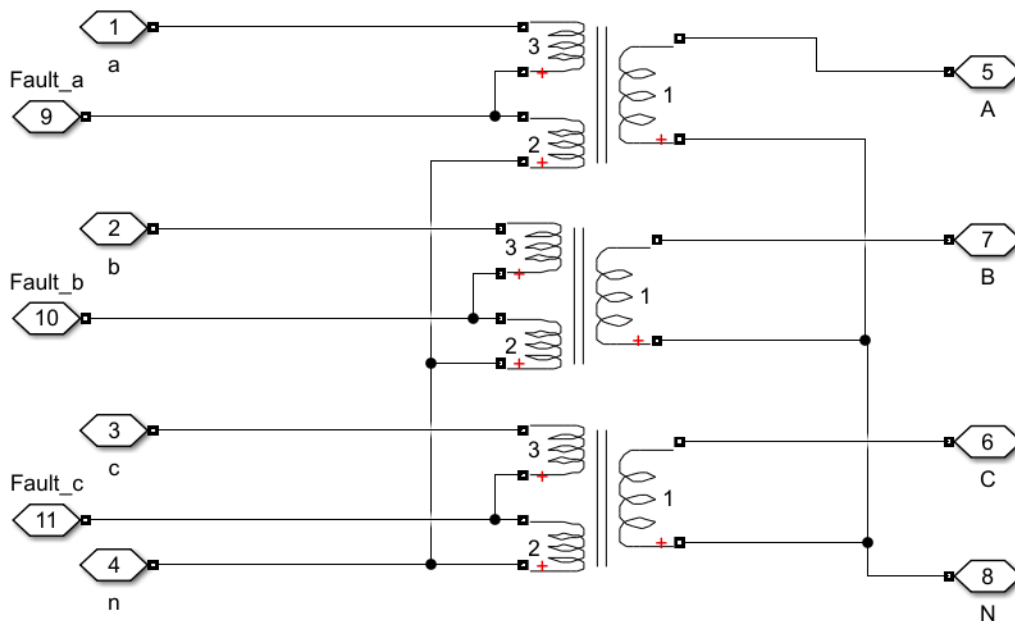
Pagal gautus rezultatus *Matlab Simulink* aplinkoje sukuriami trys galios transformatoriaus modeliai, bei suvedami apvijos parametrai



20 pav. transformatoriaus parametrai

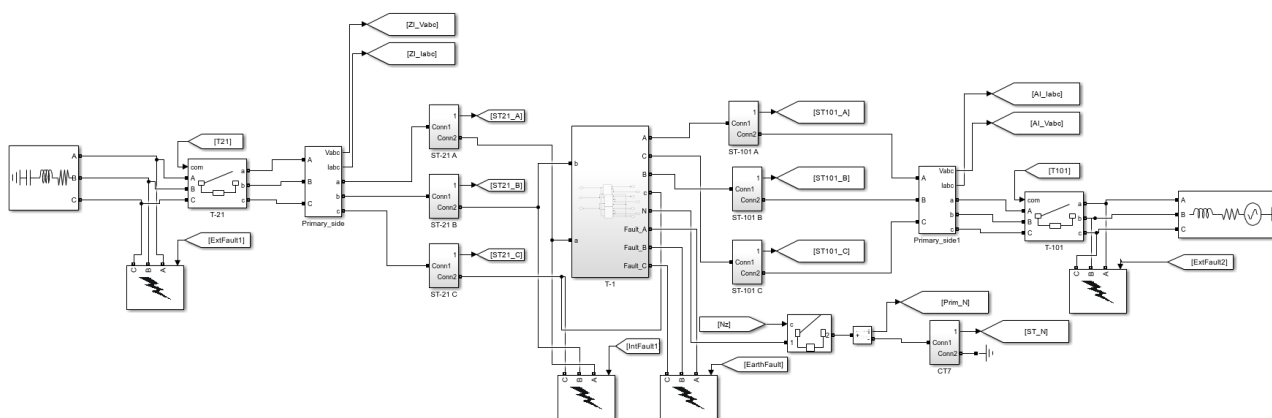


21 pav. YnD11 transformatoriaus modelis



22 pav. YnYn transformatoriaus modelis

2.2. Tiriamasis modelis

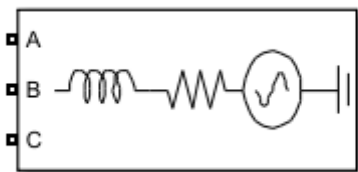


23 pav. Sistemos modelis

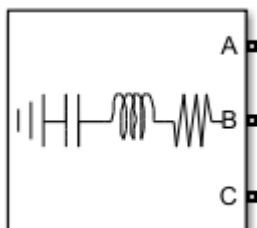
Transformatoriaus gedimo modelis *Matlab Simulink* aplinkoje (žr. 23 pav.) aprašomas prie galios transformatoriaus T-1 prijungiant srovės transformatorius ST-101 110kV pusėje ir ST-21 20kV pusėje. Srovės transformatorių matavimai prijungiami prie apsaugų kompleksų, kur yra generuojamas jungtuvų išjungimo signalas į aukštos bei žemos įtampos jungtuvus.

Modelyje naudojami elementai

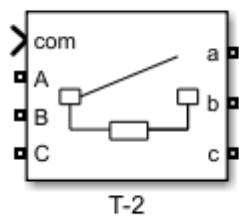
1. Trifazis įtampos šaltinis



2. Trifazė apkrova



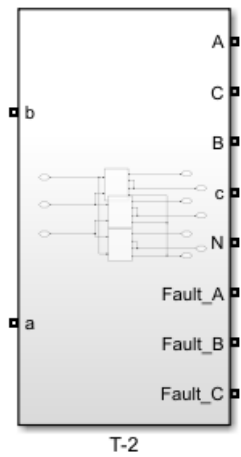
3. Jungtuvai



4. Srovės transformatoriai



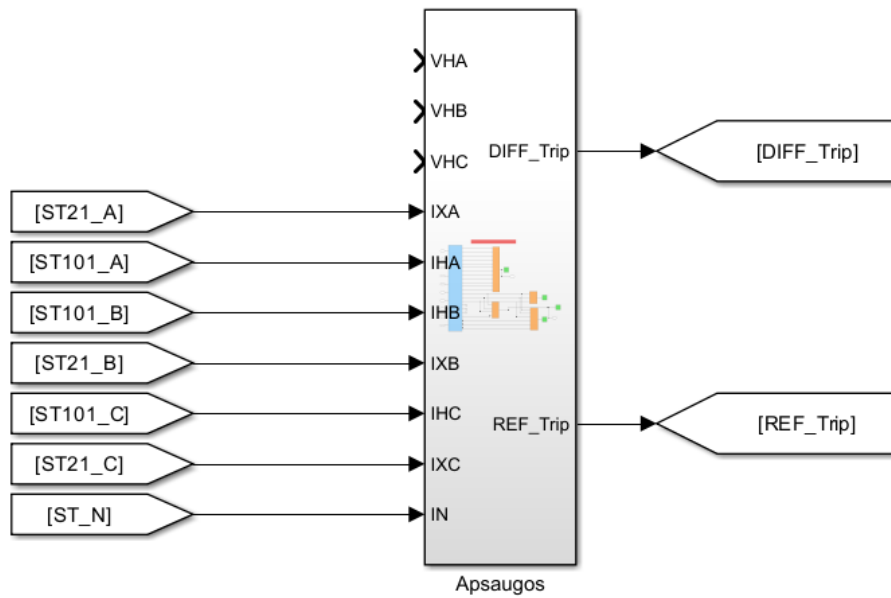
5. Galios transformatorius

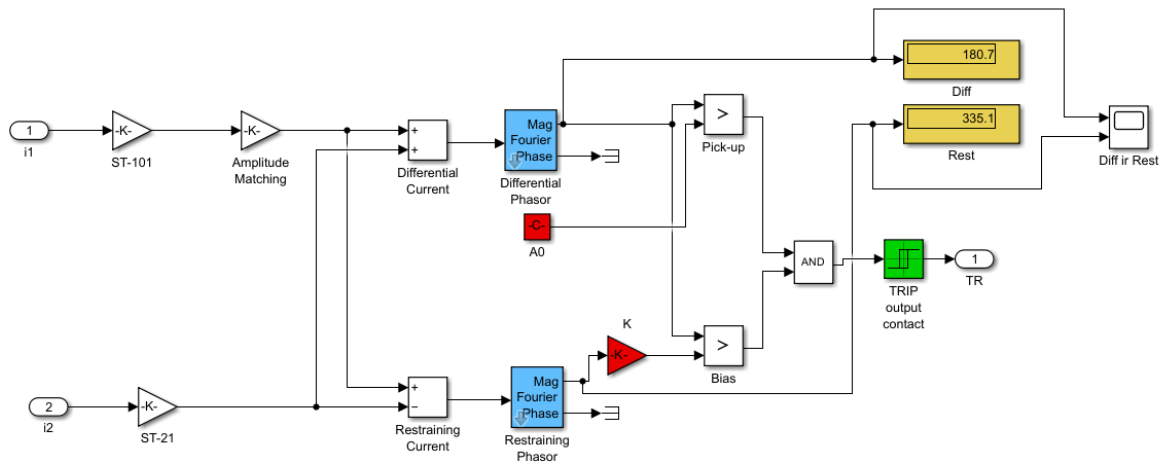


6. Universalus trumpojo jungimo imitavimo blokelis

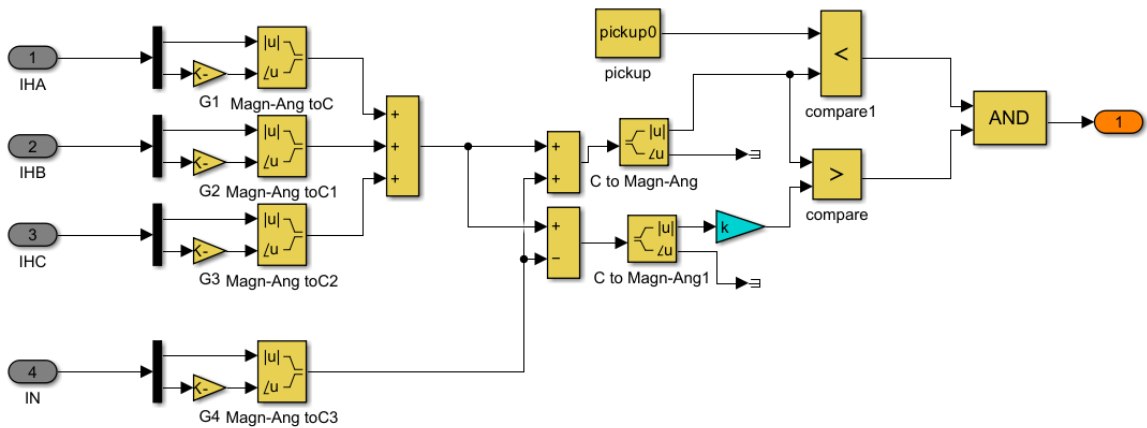


7. Apsaugų kompleksas





24 pav. Diferencinės apsaugos modelis



25 pav. Nulinės sekos srovės diferencinės apsaugos modelis

Diferencinės apsaugos modelyje sudaryta apsaugos veikimo logika, kuri pirmiausia perskaičiuoja gaunamus matavimus į pirminės vertės, bei to po yra išlyginamos srovių i_1 ir i_2 amplitudės pagal galios transformatoriaus transformacijos koeficientą. Po to yra išskaičiuojamos diferencinė ir stabdymo srovės, išskiriami jų dydžiai ir kampai, tuomet gauti rezultatai lyginami su suvestai apsaugos parametrais. Pagal tai yra formuojama išjungimo komanda

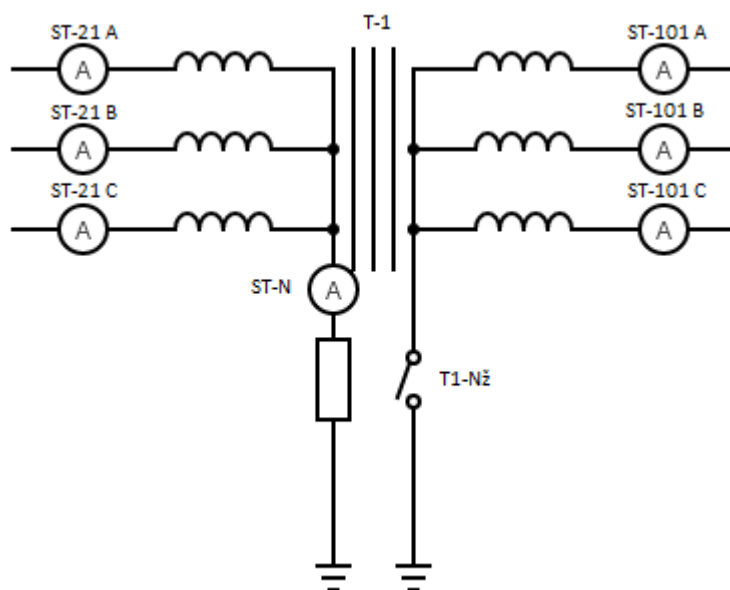
Nulinės sekos srovės apsaugos modelyje yra fiksuojama trijų fazių srovės, bei srovė tekanti per transformatoriaus neutrelę. Iš gaunamų trifazės srovės parametrų yra išskiriama nulinės sekos srovė ir ji susumuojama. Tuomet įvertinami srovės transformatorių koeficientai ir išskaičiuota nulinės sekos srovė, bei srovė tekanti per neutrelę yra lyginami su suvestai apsaugos parametrais ir formuojama išjungimo komanda.

Prieš paduodant matavimus apsaugų komplektams, yra sumodeliuotas matavimų blokelis, kuris įvertina srovės transformatorių koeficientus, galios transformatoriaus jungimo grupę, bei atskiria harmonines dedamąsias.

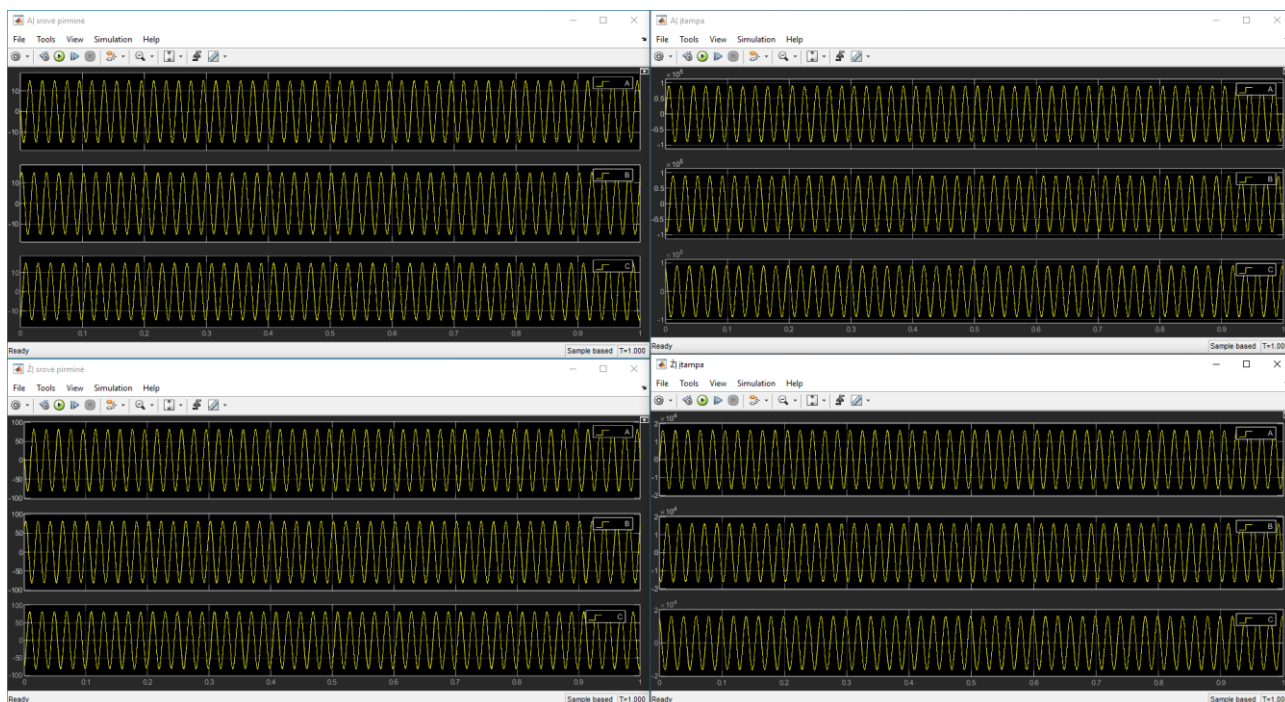
3. Tyrimo rezultatai

3.1. Normalaus darbo režimas

Prieš pradėdant gedimų simuliaciją, atliekamas normalaus darbo bandymas, patikrinti ar modelis atitinka teorinius skaičiavimus. AĮ tinkle fazinės srovės ir įtampos atitinka apskaičiuojamas, ŽĮ tinkle taip pat. Transformatorius apkrautas 2MVA galia. Taip pat buvo atlikti transformatoriaus įsisotinimo bandymai ir išorinių trumpųjų jungimų bandymai. Abiem atvejais apsauga veikė teisingai, nesureagavo į transformatoriaus įsisotinimą ar išorinių trumpąjį jungimą.



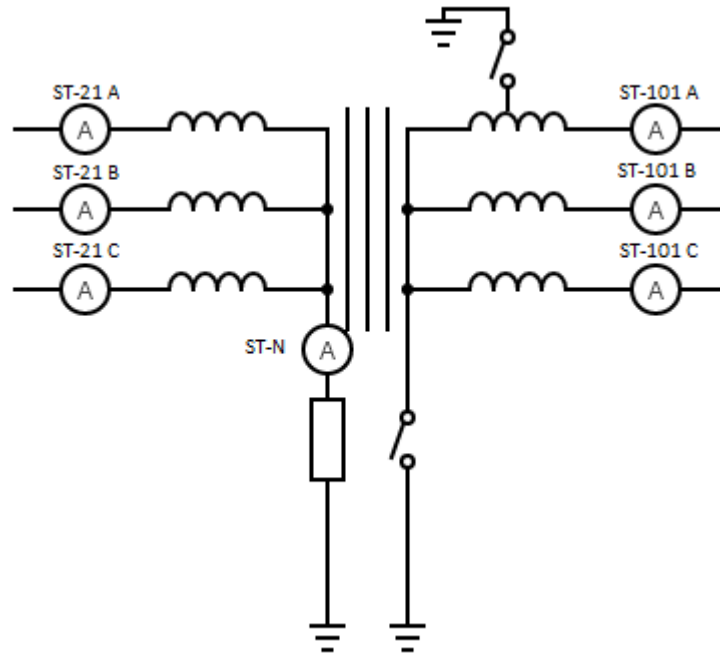
26 pav. Principinė modelio schema



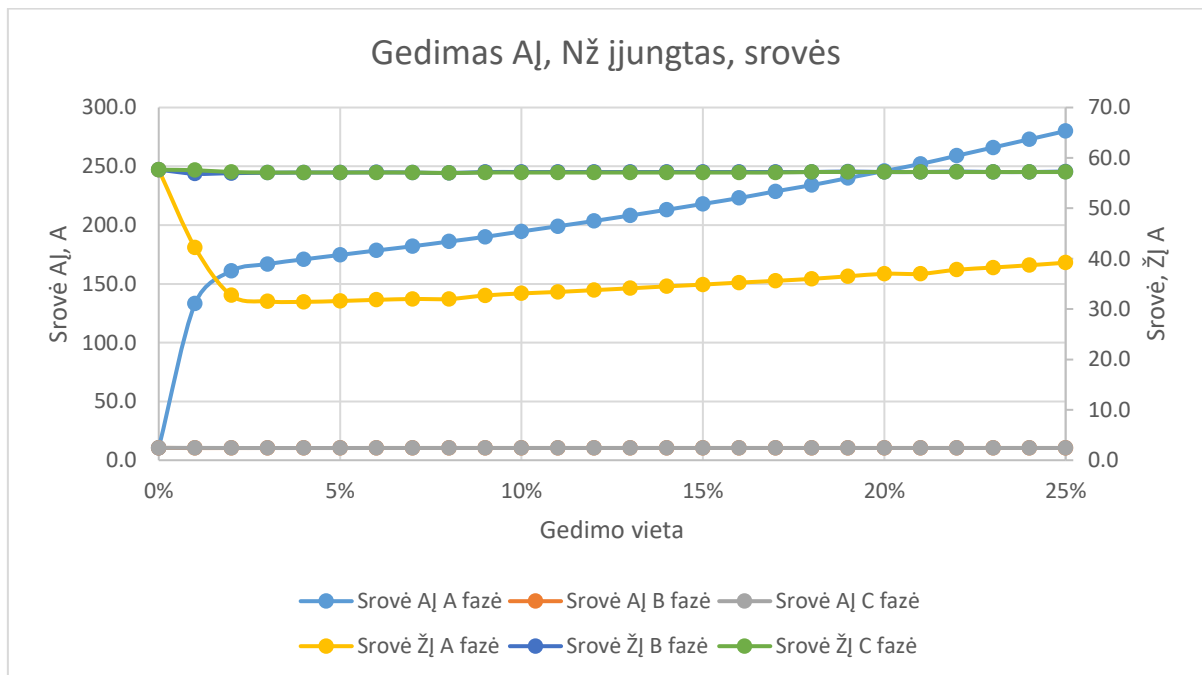
27 pav. Srovės ir įtampos esant normaliam sistemai darbu

3.2. Bandymas Nr. 1

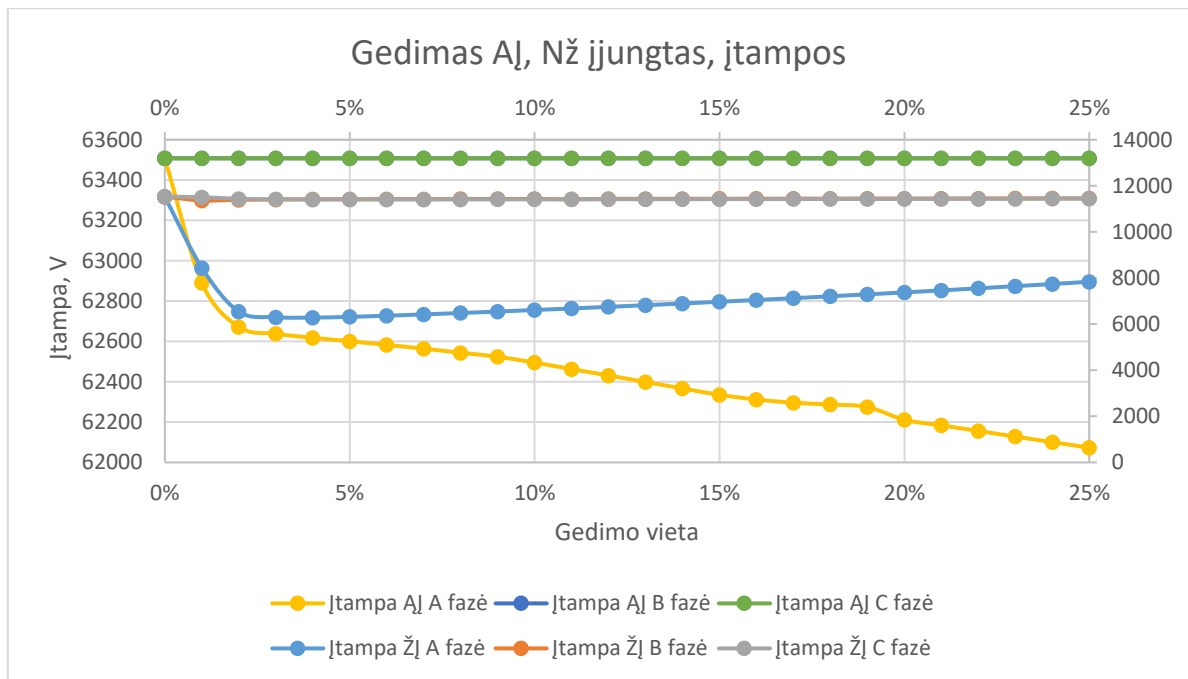
Šio bandymo metu, modeliujama sistema, kai galios transformatoriaus jungimo grupė yra YNYN, gedimas atsiranda aukštos įtampos pusėje. 110 kV neutralės įžemiklis įjungtas



28 pav. Bandyimo nr. 1 principinės gedimo schema



29 pav. Bandyimo nr. 1 srovės



30 pav. Bandyto nr.1 įtampos

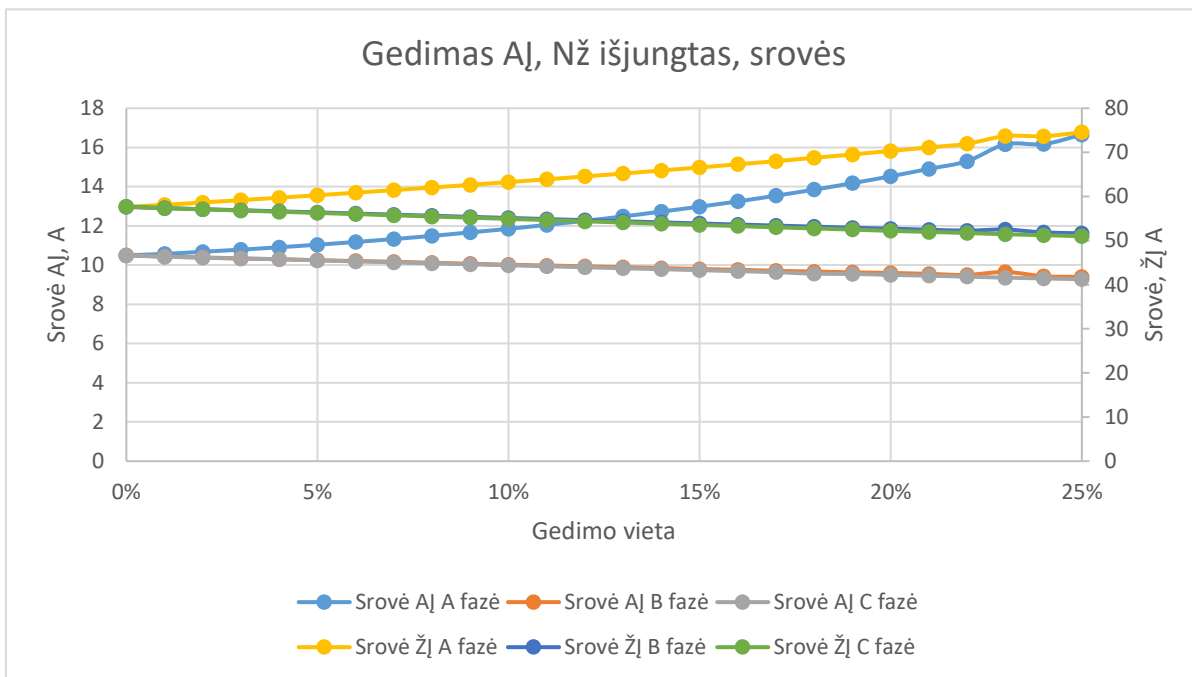
Atlikus simuliacijas iš gautų rezultatų matome, kad esant gedimui aukštos įtampos apvijoje, srovės padidėjimas yra itin didelis. Diferencinė apsauga tokį gedimą užfiksuoja iškart, kaip ir nulinės sekos srovės diferencinė apsauga. Tokia didelė gedimo srovė atsiranda, nes įjungus neutralės žemiklį (Nž), nulinės sekos varža labai sumažėja. Sudarant nulinės sekos ekvivalentinę schemą, įžemėjimo vietoje atsiranda nulinės sekos įtampos šaltinis. Esant mažai įžemėjimo varžai, nulinės sekos srovė gerokai padidėja. Kadangi simetrinės dedamosios sumuojasi ir taip gauname gedimo srovę, išaugus nulinės sekos srovei, padidėja ir gedimo srovė.

Gedimas AI, NŽ įjungtas																
Gedimas	Pirminiai dydžiai														Apsaugos poveikis	
Pažeista apvijos dalis	Srovė AI			Srovė ŽI			Įtampa AI			Įtampa ŽI			IN	3Io	DIFF	REF
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C				
0%	10.5	10.5	10.5	57.7	57.7	57.7	63508	63508	63508	11527	11527	11527	0.00	0.0	TAIP	TAIP
1%	133.2	10.3	10.5	42.2	56.9	57.6	62891	63508	63508	8440	11369	11508	19.84	126.5	TAIP	TAIP
2%	161.0	10.4	10.4	32.7	57.0	57.2	62672	63508	63508	6542	11392	11435	24.00	156.0	TAIP	TAIP
3%	166.9	10.4	10.4	31.5	57.1	57.1	62638	63508	63508	6302	11407	11417	24.30	164.0	TAIP	TAIP
4%	170.9	10.4	10.4	31.4	57.1	57.1	62618	63508	63508	6284	11415	11412	24.20	169.4	TAIP	TAIP
5%	174.6	10.4	10.4	31.6	57.1	57.1	62601	63508	63508	6316	11419	11410	24.00	173.4	TAIP	TAIP
6%	178.4	10.4	10.4	31.8	57.1	57.1	62583	63508	63508	6366	11423	11410	23.70	177.3	TAIP	TAIP
7%	182.0	10.4	10.4	32.0	57.1	57.1	62564	63508	63508	6422	11425	11410	23.40	181.3	TAIP	TAIP
8%	186.0	10.4	10.4	32.0	57.0	57.0	62544	63508	63508	6483	11428	11411	23.16	185.3	TAIP	TAIP
9%	190.0	10.4	10.4	32.7	57.2	57.1	62524	63508	63508	6546	11430	11413	22.80	289.5	TAIP	TAIP
10%	194.6	10.4	10.4	33.1	57.2	57.1	62495	63508	63508	6612	11432	11414	22.56	193.8	TAIP	TAIP
11%	199.0	10.4	10.4	33.4	57.2	57.1	62463	63508	63508	6680	11416	11416	22.24	198.0	TAIP	TAIP
12%	203.5	10.4	10.4	33.8	57.2	57.1	62431	63508	63508	6750	11435	11418	21.90	202.7	TAIP	TAIP
13%	208.2	10.4	10.4	34.1	57.2	57.1	62399	63508	63508	6822	11437	11419	21.59	207.4	TAIP	TAIP
14%	213.0	10.4	10.4	34.5	57.2	57.1	62367	63508	63508	6896	11439	11421	21.25	213.3	TAIP	TAIP
15%	218.0	10.4	10.4	34.9	57.2	57.1	62335	63508	63508	6971	11441	11424	20.90	217.0	TAIP	TAIP
16%	223.0	10.4	10.4	35.3	57.2	57.1	62312	63508	63508	7048	11442	11425	20.56	222.6	TAIP	TAIP
17%	228.7	10.4	10.4	35.6	57.2	57.1	62296	63508	63508	7127	11444	11427	20.19	228.0	TAIP	TAIP
18%	234.0	10.4	10.4	36.0	57.2	57.2	62287	63508	63508	7208	11446	11429	19.80	233.6	TAIP	TAIP
19%	240.0	10.4	10.4	36.5	57.3	57.2	62275	63508	63508	7292	11448	11432	19.44	239.4	TAIP	TAIP
20%	246.0	10.4	10.4	37.0	57.2	57.2	62211	63508	63508	7377	11449	11434	19.00	245.5	TAIP	TAIP
21%	252.0	10.4	10.4	37.0	57.2	57.2	62184	63508	63508	7464	11451	11436	18.65	251.7	TAIP	TAIP
22%	259.0	10.4	10.4	37.8	57.3	57.2	62156	63508	63508	7555	11453	11438	18.20	258.0	TAIP	TAIP
23%	266.0	10.4	10.4	38.2	57.2	57.2	62128	63508	63508	7647	11455	11440	17.80	264.0	TAIP	TAIP
24%	273.0	10.4	10.4	38.7	57.2	57.2	62100	63508	63508	7741	11457	11443	17.38	272.0	TAIP	TAIP
25%	280.0	10.4	10.4	39.2	57.3	57.2	62074	63508	63508	7838	11459	11445	16.94	279.0	TAIP	TAIP

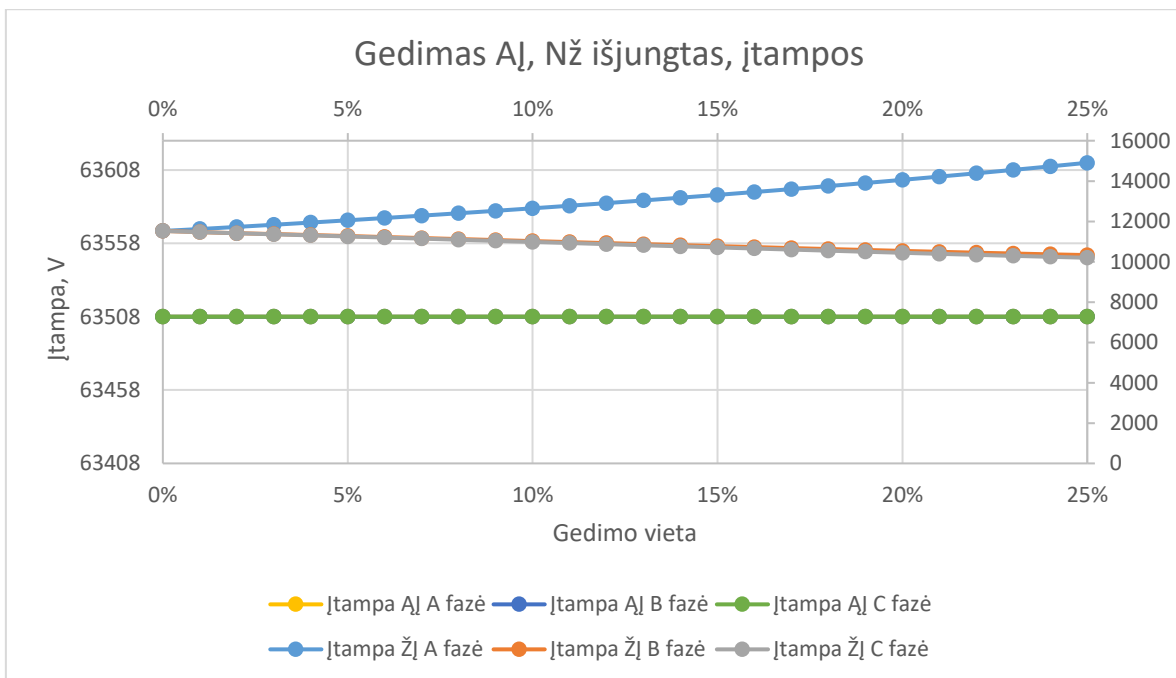
2 lentelė. Bandymo nr.1 rezultatai

3.3. Bandymas Nr. 2

Šio bandymo metu, modeliuojama sistema, kai galios transformatoriaus jungimo grupė yra YNYN, gedimas atsiranda aukštos įtampos pusėje. 110 kV neutralės įžemiklis išjungtas



31 pav. Bandymo nr. 2 srovės



32 pav. Bandymo nr. 2 įtampos

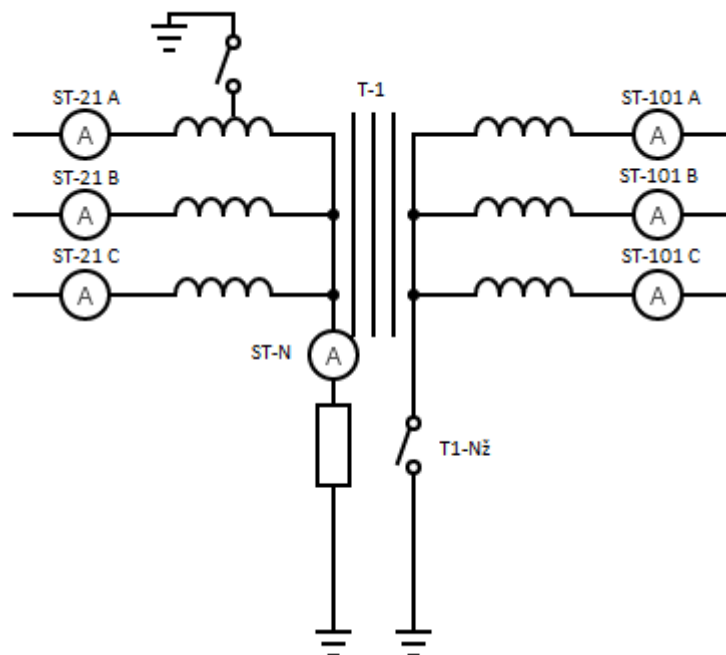
Gedimas AĮ, Nž išjungtas																	
Gedimas	Pirminiai dydžiai															Apsaugos poveikis	
Pažeista apvijios dalis	Srovė AĮ			Srovė ŽĮ			Įtampa AĮ			Įtampa ŽĮ			IN	3Io	DIFF	REF	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
0%	10.5	10.5	10.5	57.65	57.65	57.65	63508	63508	63508	11527	11527	11527	0	0	NE	NE	
1%	10.57	10.4	10.43	58.11	57.36	57.34	63508	63508	63508	11621	11470	11465	1.53	0.28	NE	NE	
2%	10.68	10.4	10.38	58.64	57.12	57.08	63508	63508	63508	11726	11414	11413	3.1	0.58	NE	NE	
3%	10.79	10.3	10.33	59.18	56.88	56.81	63508	63508	63508	11833	11372	11359	4.7	0.88	NE	TAIP	
4%	10.91	10.3	10.3	59.72	56.63	56.54	63508	63508	63508	11942	11323	11306	6.3	1.2	NE	TAIP	
5%	11.04	10.3	10.24	60.28	56.4	56.27	63508	63508	63508	12054	11274	11252	8	1.5	NE	TAIP	
6%	11.18	10.2	10.19	60.85	56.13	56.01	63508	63508	63508	12168	11224	11199	9.7	1.88	NE	TAIP	
7%	11.33	10.2	10.14	61.44	55.88	55.74	63508	63508	63508	12285	11174	11145	11.5	2.24	NE	TAIP	
8%	11.49	10.1	10.09	62.03	55.63	55.46	63508	63508	63508	12403	11124	11090	13.23	2.6	NE	TAIP	
9%	11.67	10.1	10.04	62.64	55.38	55.19	63508	63508	63508	12525	11074	11036	15	3	NE	TAIP	
10%	11.85	10	9.99	63.26	55.13	54.92	63508	63508	63508	12649	11023	10981	17	3.4	NE	TAIP	
11%	12.05	9.98	9.94	63.89	54.88	54.65	63508	63508	63508	12776	10973	10927	19	3.85	NE	TAIP	
12%	12.26	9.94	9.89	64.54	54.627	54.37	63508	63508	63508	12906	10923	10872	20.76	4.3	NE	TAIP	
13%	12.48	9.89	9.84	65.2	54.38	54.1	63508	63508	63508	13039	10873	10817	22.75	4.76	NE	TAIP	
14%	12.73	9.85	9.79	65.89	54.13	53.83	63508	63508	63508	13175	10823	10763	24.78	5.24	NE	TAIP	
15%	12.98	9.8	9.74	66.58	53.88	53.56	63508	63508	63508	13314	10774	10709	26.87	5.75	NE	TAIP	
16%	13.25	9.76	9.69	67.29	53.64	53.29	63508	63508	63508	13456	10726	10655	29	6.28	TAIP	TAIP	
17%	13.54	9.71	9.64	68	53.4	53	63508	63508	63508	13601	10677	10601	31.18	6.83	TAIP	TAIP	
18%	13.85	9.67	9.56	68.77	53.16	52.75	63508	63508	63508	13751	10629	10548	33.42	7.4	TAIP	TAIP	
19%	14.18	9.63	9.55	69.53	52.92	52.49	63508	63508	63508	13903	10583	10495	35.71	8	TAIP	TAIP	
20%	14.53	9.6	9.5	70.32	52.7	52.2	63508	63508	63508	14060	10537	10443	38	8.66	TAIP	TAIP	
21%	14.91	9.55	9.46	71.12	52.47	51.97	63508	63508	63508	14221	10492	10391	40.47	9.3	TAIP	TAIP	
22%	15.3	9.5	9.41	71.944	52.26	51.72	63508	63508	63508	14385	10449	10341	42.94	10	TAIP	TAIP	
23%	16.16	9.65	9.36	73.7	52.5	51.44	63508	63508	63508	14554	10407	10291	46.65	11.2	TAIP	TAIP	
24%	16.17	9.43	9.32	73.66	51.85	51.23	63508	63508	63508	14728	10367	10243	48.08	11.5	TAIP	TAIP	
25%	16.65	9.4	9.28	74.55	51.66	50.99	63508	63508	63508	14906	10329	10196	50.75	12.31	TAIP	TAIP	

3 lentelė. Bandyto nr. 2 rezultatai

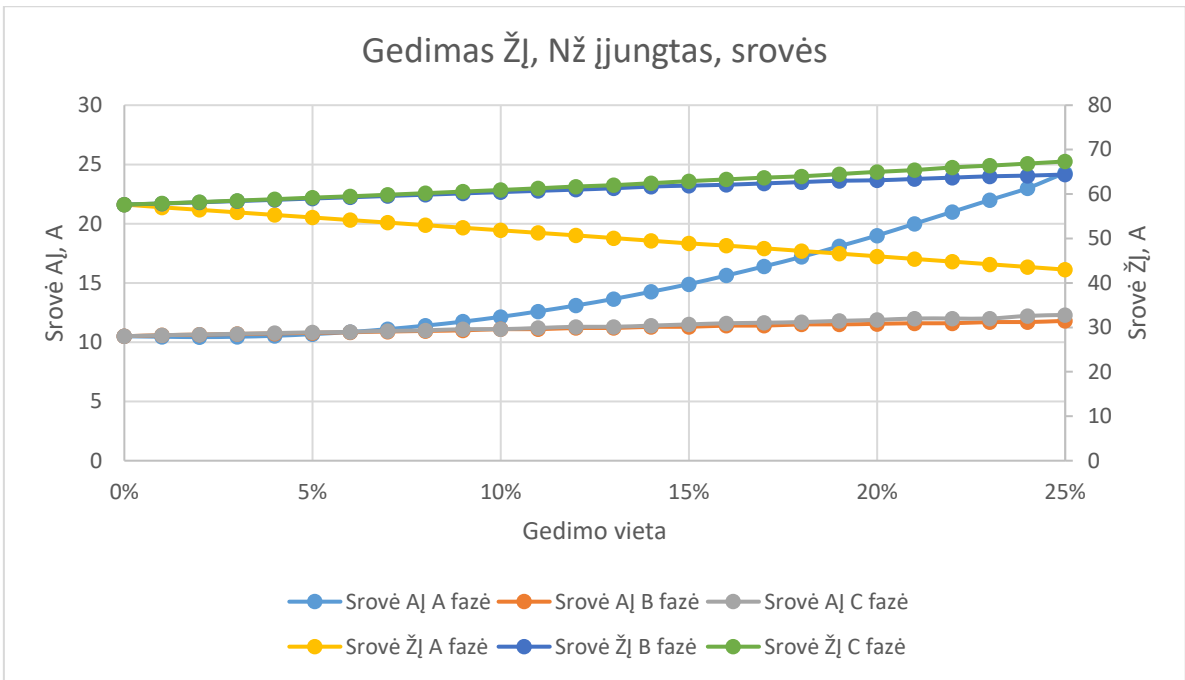
Atlikus simuliacijas, kuomet transformatoriaus neutralēs ģzemiklis yra išjungtas, gauti rezultatai gerokai skiriasi. Gedimo srovės dydis sumažėja kelis kartus, bei didėja daug lėčiau. Toks mažas srovės padidėjimas nepakankamas suveikti diferencinei apsaugai, ji neapsaugo net 15% transformatoriaus apvijos. Taip nutinka todėl, nes išjungus transformatoriaus neutralēs ģzemiklį, nulinēs sekos varža gerokai padidėja. T.y. artimiausias nulinēs sekos srovės kelias yra į sistemą, todėl dėl atstumo ir sistemos parametrų nulinēs sekos varža padidėja. Kaip ankščiau minėta, ekvivalentinėje nulinēs sekos schemoje, ģžemėjimo gedimas yra nulinēs sekos įtampos šaltinis, tad esant didelei nulinēs sekos varžai, nulinēs sekos srovė yra mažesnė.

3.4. Bandymas Nr. 3

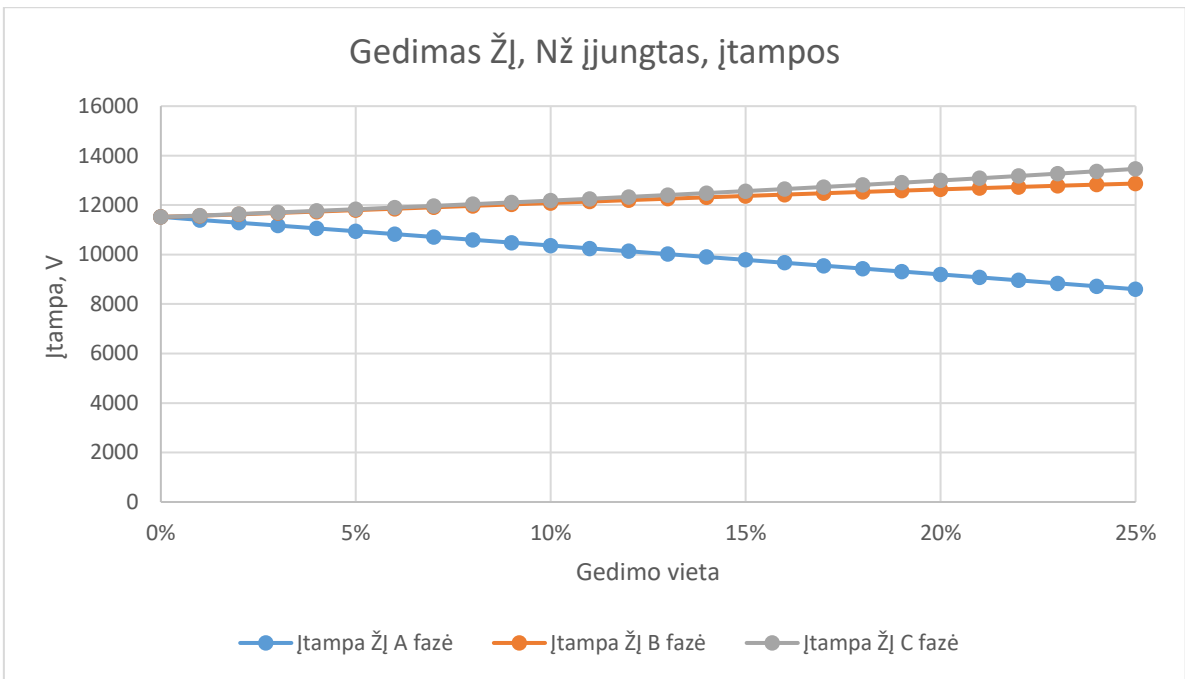
Šio bandymo metu, modeliuojama sistema, kai galios transformatoriaus jungimo grupė yra YNYN, gedimas atsiranda žemos įtampos pusėje. 110 kV neutralēs ģzemiklis įjungtas



33 pav. Bandyimo nr. 3 principinė schema



34 pav. Bandymo nr. 3 srovės



35 pav. Bandymo nr. 3 įtampos

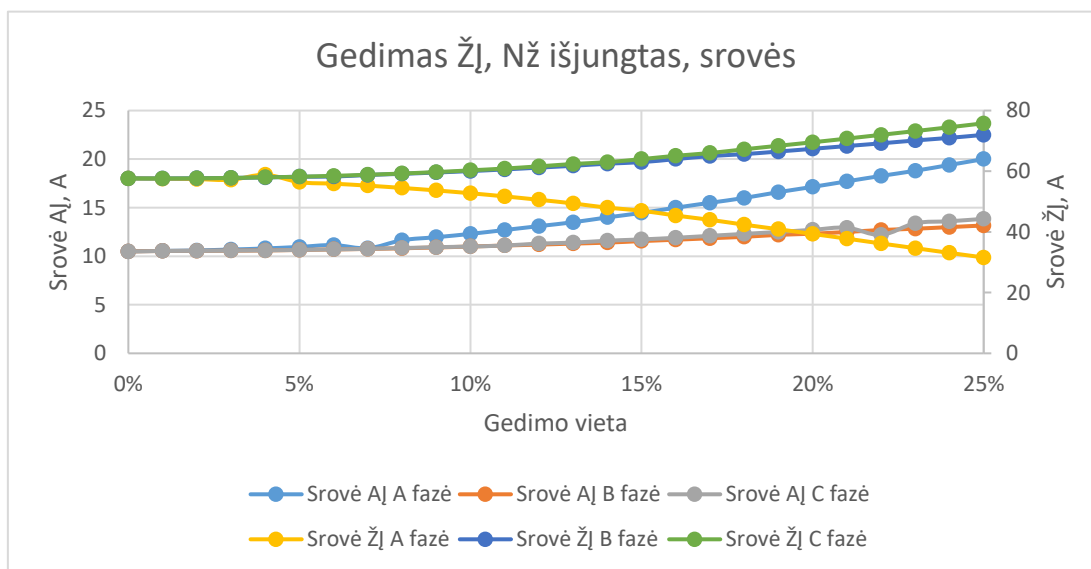
Gedimas ŽI, Nž įjungtas																
Gedimas	Pirminiai dydžiai														Apsaugos poveikis	
Pažeista apvijios dalis	Srovė AI			Srovė ŽI			Įtampa AI			Įtampa ŽI			IN	3Io	DIFF	REF
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C				
0%	10.5	10.5	10.5	57.65	57.65	57.65	63508	63508	63508	11527	11527	11527	0	0	NE	NE
1%	10.46	10.6	10.59	57.02	57.87	57.9	63508	63508	63508	11401	11570	11577	12.84	0.29	NE	TAIP
2%	10.43	10.6	10.65	56.45	58.14	58.21	63508	63508	63508	11287	11626	11640	25.7	0.52	NE	TAIP
3%	10.46	10.7	10.71	55.88	58.43	58.53	63508	63508	63508	11173	11683	11704	38.5	0.7	NE	TAIP
4%	10.54	10.7	10.77	55.3	58.7	58.85	63508	63508	63508	11058	11739	11768	51.37	0.83	NE	TAIP
5%	10.68	10.8	10.83	54.73	59	59.2	63508	63508	63508	10943	11797	11834	64.2	0.9	NE	TAIP
6%	10.86	10.8	10.87	54.15	59.28	59.5	63508	63508	63508	10828	11854	11901	77.04	0.93	TAIP	TAIP
7%	11.1	10.9	10.95	53.58	59.57	59.85	63508	63508	63508	10713	11912	11969	89.9	0.9	TAIP	TAIP
8%	11.4	11	11	53	59.86	60.2	63508	63508	63508	10598	11970	12038	102	0.81	TAIP	TAIP
9%	11.74	11	11.1	52.42	60.15	60.56	63508	63508	63508	10483	12028	12109	115	0.68	TAIP	TAIP
10%	12.14	11.1	11.1	51.85	60.44	60.92	63508	63508	63508	10367	12086	12182	128	0.49	TAIP	TAIP
11%	12.6	11.1	11.2	51.27	60.73	61.3	63508	63508	63508	10251	12143	12256	141	0.255	TAIP	TAIP
12%	13.1	11.2	11.3	50.7	61	61.7	63508	63508	63508	10135	12202	12332	153	0.087	TAIP	TAIP
13%	13.65	11.2	11.3	50.1	61.3	62	63508	63508	63508	10019	12258	12408	167	0.4	TAIP	TAIP
14%	14.26	11.3	11.4	49.5	61.69	62.45	63508	63508	63508	9903	12314	12487	179	0.8	TAIP	TAIP
15%	14.9	11.3	11.5	48.9	61.9	62.9	63508	63508	63508	9786	12370	12567	192	1.25	TAIP	TAIP
16%	15.63	11.4	11.6	48.4	62.1	63.3	63508	63508	63508	9669	12425	12649	205	1.75	TAIP	TAIP
17%	16.4	11.4	11.64	47.8	62.4	63.7	63508	63508	63508	9552	12479	12733	217	2.3	TAIP	TAIP
18%	17.2	11.5	11.7	47.2	62.7	64	63508	63508	63508	9434	12533	12818	230	2.9	TAIP	TAIP
19%	18.1	11.5	11.8	46.6	63	64.5	63508	63508	63508	9316	12585	12906	243	3.6	TAIP	TAIP
20%	19	11.6	11.88	46	63.1	65	63508	63508	63508	9198	12636	12995	255	4.3	TAIP	TAIP
21%	20	11.6	12	45.4	63.4	65.4	63508	63508	63508	9079	12686	13085	268	5	TAIP	TAIP
22%	21	11.6	12	44.8	63.7	66	63508	63508	63508	8959	12734	13178	281	5.8	TAIP	TAIP
23%	22	11.7	12	44.2	64	66.4	63508	63508	63508	8839	12782	13272	294	6.76	TAIP	TAIP
24%	23	11.7	12.22	43.6	64.15	66.86	63508	63508	63508	8719	12827	13368	306	7.67	TAIP	TAIP
25%	24.3	11.8	12.3	43	64.4	67.34	63508	63508	63508	8599	12871	13465	318	8.6	TAIP	TAIP

4 lentelė. Bandyto nr. 3 rezultatai

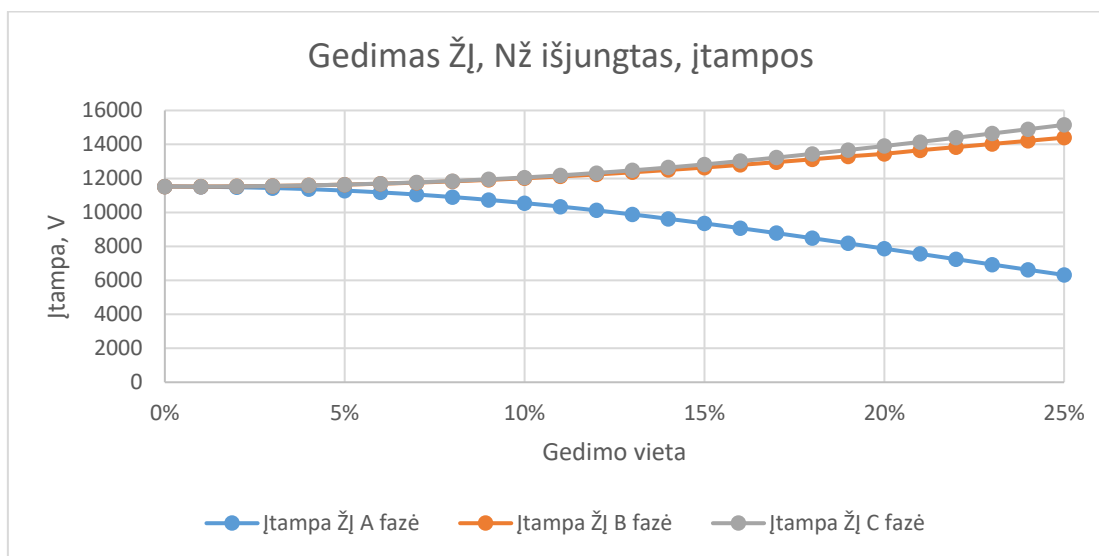
Sumodeliavus gedimą žemos įtampos pusėje, rezultatai parodo, kad srovės pokytis yra mažas, diferencinei apsaugai suveikti nepakankamas, ji neapsaugo 5% transformatoriaus apvijos. Transformatoriaus neutralės įžemikliui esant įjungtas, žemos įtampos pusėje, tekančios srovės pradeda mažėti, dėl trumpėjančios apvijos ir atsiradusio srovės nutekėjimo į aukštos įtampos pusės transformatoriaus neutralę. Taip nutinka, nes maitinimo kryptis yra iš AĮ pusės, todėl artimiausias šaltinio neutralės taškas yra AĮ neutralės įžemiklis. ŽĮ gedimas sudarydamas tokį gedimo taką, iškelia AĮ fazių sroves, ypač tos pačios AĮ fazės, kaip ir pažeistos ŽĮ fazės. Srovių padidėjimas, net ir esant neutralės įžemikliui įjungtas, nėra toks didelis, kaip bandyme nr. 1, dėl nes šiam gedimui pradedama vertinti ir ŽĮ transformatoriaus neutralė, kuri yra pajungta per varžą. Todėl nulinės sekos ekvivalentinės schemos varža dar labiau padidėja.

3.5. Bandymas Nr. 4

Šio bandymo metu, modeliuojama sistema, kai galios transformatoriaus jungimo grupė yra YNYN, gedimas atsiranda žemos įtampos pusėje. 110 kV neutralės įžemiklis įjungtas



36 pav. Bandymo nr. 4 srovės



37 pav. Bandymo nr. 4 įtampos

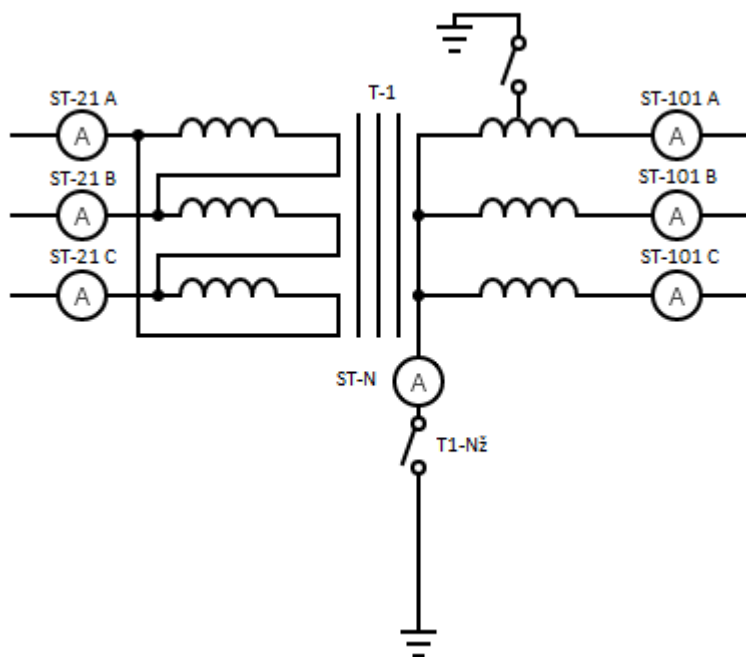
Gedimas ŽI, Nž išjungtas																	
Gedimas	Pirminiai dydžiai															Apsaugos poveikis	
	Srovė AI			Srovė ŽI			Įtampa AI			Įtampa ŽI			IN	3Io	DIFF	REF	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
0%	10.5	10.5	10.5	57.65	57.65	57.65	63508	63508	63508	11527	11527	11527	0	0	NE	NE	
1%	10.55	10.5	10.54	57.55	57.62	57.62	63508	63508	63508	11506	11521	11521	12.96	0	NE	TAIP	
2%	10.6	10.6	10.55	57.41	57.69	57.69	63508	63508	63508	11480	11535	11535	26.12	0	NE	TAIP	
3%	10.69	10.6	10.57	57.18	57.8	57.8	63508	63508	63508	11433	11558	11559	39.4	0	NE	TAIP	
4%	10.8	10.6	10.6	58.85	57.97	57.98	63508	63508	63508	11368	11592	11594	52.8	0	NE	TAIP	
5%	10.96	10.6	10.65	56.4	58.2	58.2	63508	63508	63508	11282	11635	11639	66.2	0	NE	TAIP	
6%	11.15	10.7	10.7	55.9	58.26	58.5	63508	63508	63508	11176	11689	11697	79.53	0	TAIP	TAIP	
7%	10.82	10.8	10.76	55.26	58.77	58.84	63508	63508	63508	11049	11753	11767	92.7	0	TAIP	TAIP	
8%	11.65	10.8	10.84	54.5	59.15	59.26	63508	63508	63508	10902	11827	11849	105	0	TAIP	TAIP	
9%	11.96	10.9	10.93	53.68	59.58	59.74	63508	63508	63508	10734	11912	11946	118	0	TAIP	TAIP	
10%	12.3	11	11	52.75	60.06	60.3	63508	63508	63508	10547	12009	12056	130	0	TAIP	TAIP	
11%	12.7	11.1	11.1	51.72	60.6	60.9	63508	63508	63508	10341	12115	12181	142	0	TAIP	TAIP	
12%	13.1	11.2	11.3	50.6	61.2	61.62	63508	63508	63508	10117	12233	12321	153	0	TAIP	TAIP	
13%	13.5	11.3	11.4	49.4	61.8	62.4	63508	63508	63508	9877	12360	12475	164	0	TAIP	TAIP	
14%	14	11.4	11.6	48	62.5	63	63508	63508	63508	9621	12497	12643	174	0	TAIP	TAIP	
15%	14.46	11.6	11.73	47	63	64	63508	63508	63508	9352	12642	12825	183	0	TAIP	TAIP	
16%	15	11.7	11.9	45.4	64	65.1	63508	63508	63508	9071	12796	13020	192	0	TAIP	TAIP	
17%	15.5	11.9	12.1	44	65	66	63508	63508	63508	8780	12958	13227	200	0	TAIP	TAIP	
18%	16	12	12.3	42.4	65.64	67.24	63508	63508	63508	8481	13125	13445	207.3	0	TAIP	TAIP	
19%	16.6	12.2	12.5	40.89	66.5	68.4	63508	63508	63508	8176	13299	13672	213	0	TAIP	TAIP	
20%	17.14	12.3	12.72	39.34	67.4	69.55	63508	63508	63508	7867	13447	13907	219	0	TAIP	TAIP	
21%	17.71	12.5	12.94	37.8	68.3	70.76	63508	63508	63508	7555	13658	14148	223	0	TAIP	TAIP	
22%	18.27	12.7	12.2	36.2	69.2	72	63508	63508	63508	7243	13842	14395	227	0	TAIP	TAIP	
23%	18.8	12.8	13.4	34.66	70.15	73.24	63508	63508	63508	6931	14028	14646	230	0	TAIP	TAIP	
24%	19.4	13	13.6	33.1	71	74.5	63508	63508	63508	6621	14213	14897	232	0	TAIP	TAIP	
25%	20	13.2	13.85	31.59	72	75.8	63508	63508	63508	6317	14398	15150	233	0	TAIP	TAIP	

5 lentelė. Bandymo nr. 4 rezultatai

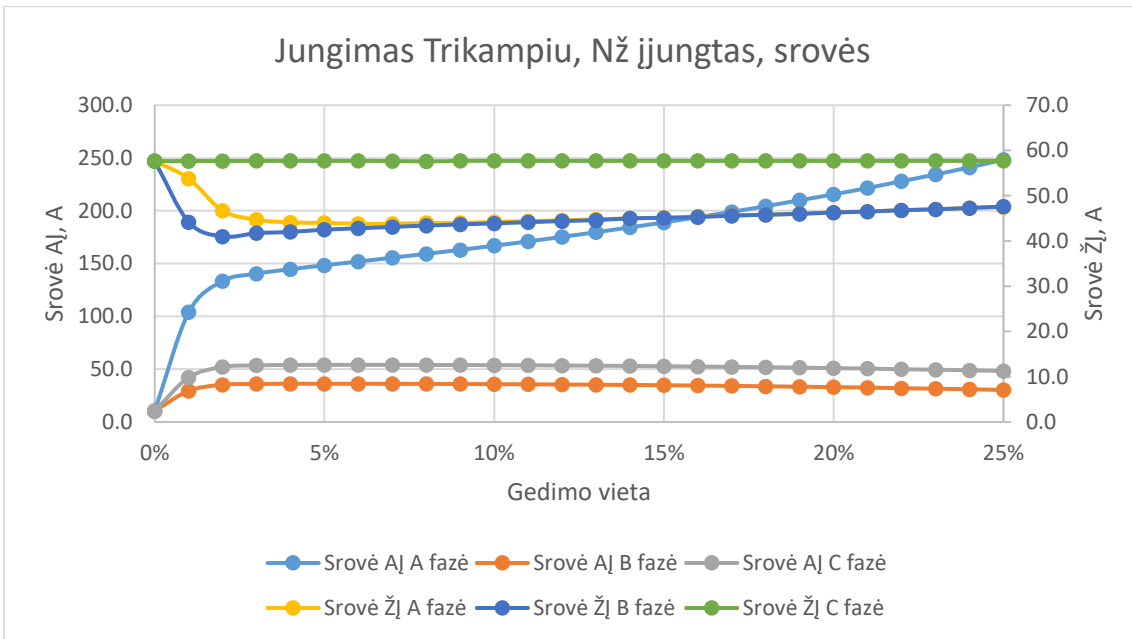
Bandyme nr. 4 rezultatai parodo, kad išjungus transformatoriaus neutralės įžemiklį, gedimo srovės dar labiau sumažėja. Pagal bandymą nr. 2, matome, kad išjungus AI neutralės įžemiklį, nulinės sekos ekvivalentinės schemas varža padidėja, pagal bandymą nr. 3, įvertinama ŽI neutralės varža, todėl galutinė nulinės sekos ekvivalentinės schemas varža esant tokiam režimui yra didžiausia, bei gedimo srovės mažiausios. Šiame atvejuje diferencinė apsauga taip pat neapsaugo 5% transformatoriaus apvijų.

3.6. Bandymas Nr. 5

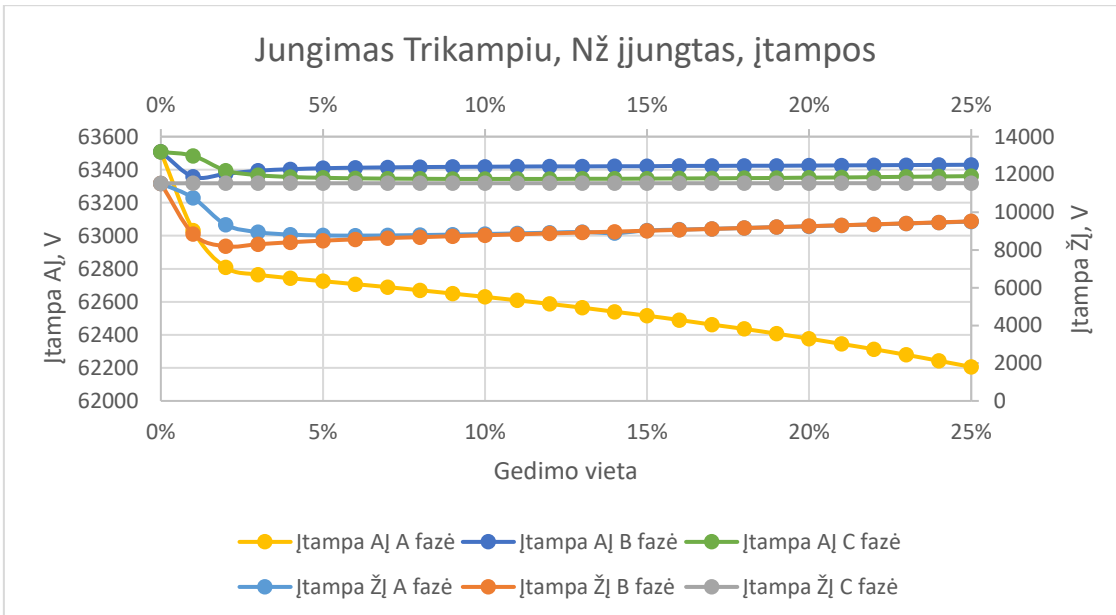
Šio bandymo metu, modeliuojama sistema, kai galios transformatoriaus jungimo grupė yra YND11, gedimas atsiranda aukštos įtampos pusėje. 110 kV neutralės įžemiklis įjungtas.



38 pav. Bandymo nr. 5 principinė schema



39 pav. Bandymo nr. 5 srovės



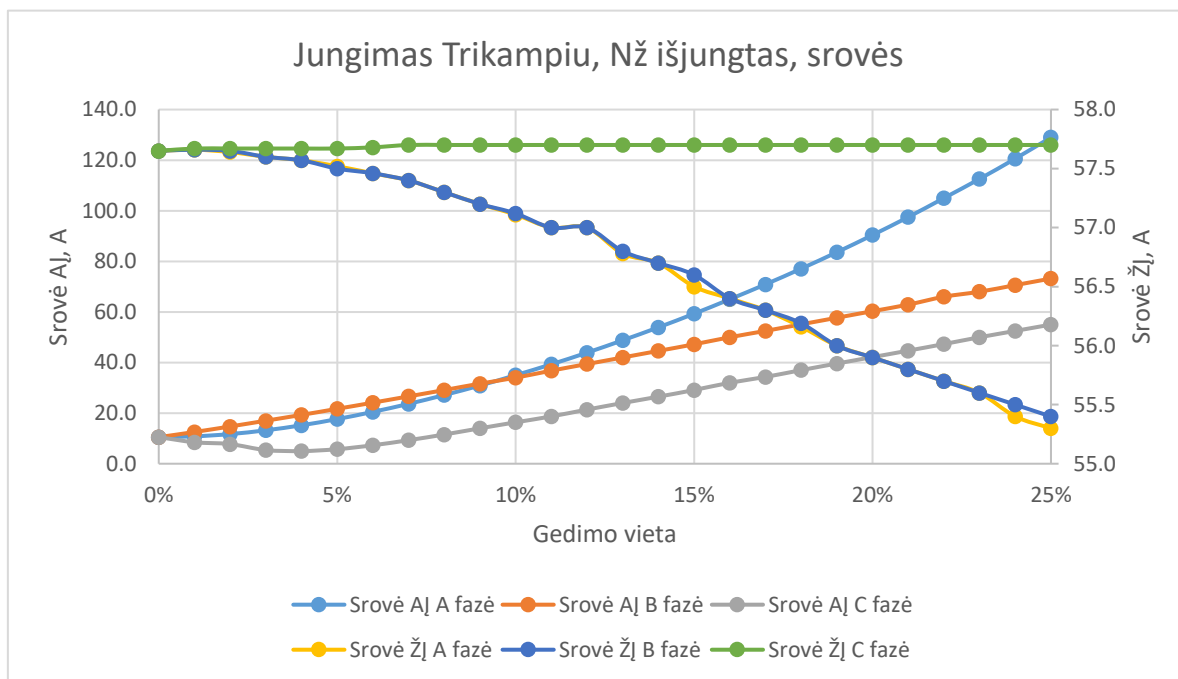
40 pav. Bandymo nr. 5 įtampos

Jungimas trikampiu, Nž įjungtas																
Gedimas	Pirminiai dydžiai														Apsaugos poveikis	
Pažeista apvijos dalis	Srovė AI			Srovė ŽI			Įtampa AI			Įtampa ŽI			IN	3Io	DIFF	REF
	A	B	C	A	B	C	A	B	C-A	A	B	C				
0%	10.5	10.5	10.5	57.7	57.7	57.7	63508	63508	63508	11527	11527	11527	0.0	0.0	NE	NE
1%	103.9	29.5	42.2	53.8	44.2	57.7	63032	63357	63484	10753	8834	11531	12887.0	33.6	TAIP	TAIP
2%	133.5	35.3	52.1	46.7	41.0	57.7	62808	63375	63395	9334.8	8192.6	11531	8576.8	46.5	TAIP	TAIP
3%	140.5	36.0	53.6	44.7	41.7	57.7	62765	63394	63367	8942	8301	11532	6028.6	51.2	TAIP	TAIP
4%	144.7	36.2	54.0	44.1	42.0	57.7	62743	63403	63356	8812	8407	11532	4636.0	54.8	TAIP	TAIP
5%	148.4	36.2	54.1	44.0	42.5	57.7	62725	63409	63351	8767.2	8491	11532	3778.0	58.3	TAIP	TAIP
6%	152.0	36.2	54.1	43.8	42.8	57.7	62707	63412	63348	8758	8560	11533	3199.0	61.9	TAIP	TAIP
7%	155.6	36.1	54.1	43.8	43.1	57.7	62689	63414	63346	8767	8629	11533	2783.0	65.6	TAIP	TAIP
8%	159.3	36.1	54.0	44.0	43.4	57.6	62670	63416	63345	8787	8676	11534	2470.0	69.4	TAIP	TAIP
9%	163.0	36.0	54.0	44.0	43.7	57.7	62650	63417	63344	8812	8727	11533	2226.0	73.4	TAIP	TAIP
10%	167.0	35.8	53.8	44.2	43.9	57.7	62630	63418	63344	8843	8778	11534	2030.0	77.6	TAIP	TAIP
11%	171.0	35.7	53.7	44.4	44.1	57.7	62609	63419	63344	8877	8826	11534	1871.0	82.0	TAIP	TAIP
12%	175.3	35.5	53.5	44.6	44.4	57.7	62587	63420	63344	8913	8875	11534	1738.0	86.5	TAIP	TAIP
13%	179.7	35.3	53.3	44.8	44.6	57.7	62565	63420	63345	8951	8922	11534	1625.0	91.3	TAIP	TAIP
14%	184.3	35.1	53.1	45.0	45.0	57.7	62540	63421	63345	8891	8969	11535	1528.0	96.3	TAIP	TAIP
15%	189.0	34.8	52.8	45.2	45.1	57.7	62516	63421	63346	9032	9017	11535	1444.8	101.6	TAIP	TAIP
16%	194.0	34.5	52.5	45.4	45.3	57.7	62490	63423	63347	9075	9064	11535	1371.0	107.0	TAIP	TAIP
17%	199.0	34.2	52.2	45.6	45.6	57.7	62462	63423	63348	9118	9112	11535	1307.0	112.9	TAIP	TAIP
18%	204.4	33.8	51.8	45.8	45.8	57.7	62436	63424	63349	9163	9160	11535	1249.0	119.0	TAIP	TAIP
19%	210.0	33.4	51.5	46.0	46.0	57.7	62407	63424	63350	9208	9209	11535	1198.0	125.0	TAIP	TAIP
20%	215.6	33.0	51.0	46.3	46.3	57.7	62377	63425	63352	9255	9258	11536	1152.0	132.0	TAIP	TAIP
21%	221.6	32.6	50.6	46.5	46.5	57.7	62345	63426	63353	9303	9307	11536	1111.0	139.0	TAIP	TAIP
22%	228.0	32.0	50.0	46.8	46.8	57.7	62313	63427	63355	9351	9358	11536	1072.0	146.0	TAIP	TAIP
23%	234.4	31.5	49.5	47.0	47.0	57.7	62279	63428	63357	9400	9408	11536	1037.0	157.0	TAIP	TAIP
24%	241.2	31.0	49.0	47.3	47.3	57.7	62243	63429	63359	9451	9460	11536	1006.0	162.0	TAIP	TAIP
25%	248.3	30.3	48.3	47.5	47.6	57.7	62206	63430	63361	9502	9512	11536	976.0	170.0	TAIP	TAIP

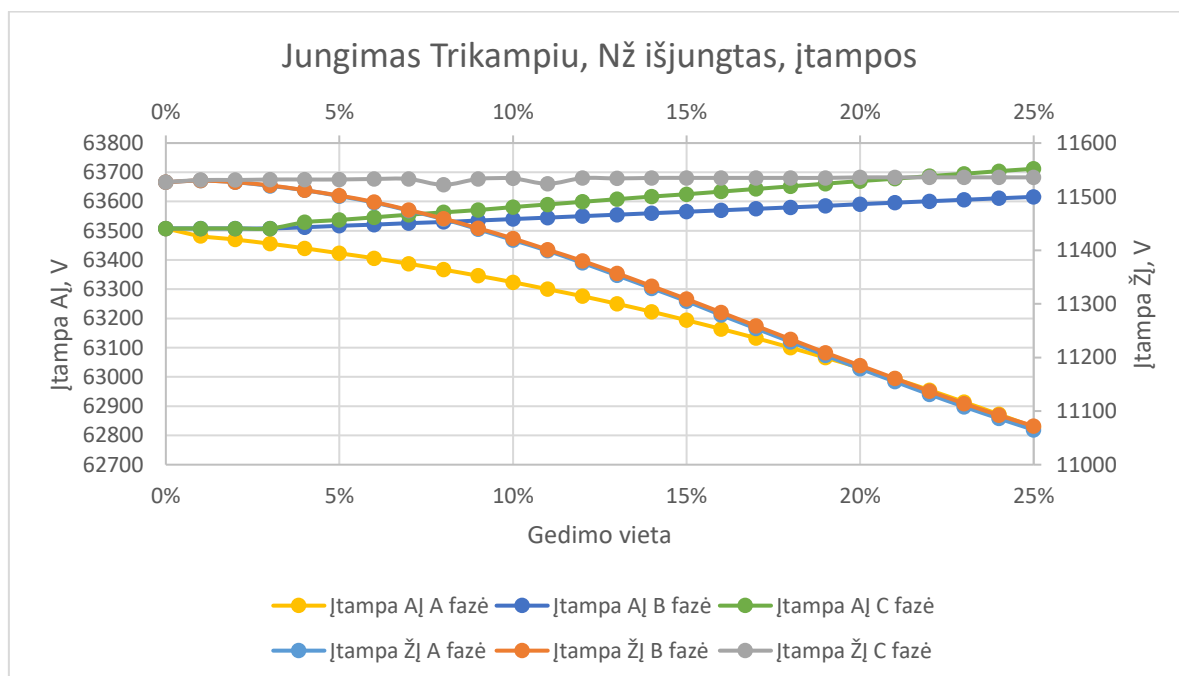
6 lentelė. Bandymo nr. 5 rezultatai

3.7. Bandydas Nr. 6

Šio bandymo metu, modeliujama sistema, kai galios transformatoriaus jungimo grupė yra YND11, gedimas atsiranda aukštos įtampos pusėje. 110 kV neutralės įžemiklis išjungtas



41 pav. Bandydas nr. 6 srovės



42 pav. Bandydas nr. 6 įtampos

Jungimas trikampiu, Nž išjungtas																	
Gedimas	Pirminiai dydžiai															Apsaugos poveikis	
Pažeista apvijos dalis	Srovė AĮ			Srovė ŽĮ			Įtampa AĮ			Įtampa ŽĮ			IN	3Io	DIFF	REF	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C					
0%	10.5	10.5	10.5	57.7	57.7	57.7	63508	63508	63508	11527	11527	11527	0	0.0	NE	NE	
1%	10.8	12.5	8.5	57.7	57.7	57.7	63482	63508	63508	11530	11530	11531	0	7.1	NE	NE	
2%	11.7	14.7	7.8	57.6	57.7	57.7	63470	63508	63508	11527	11527	11531	0	14.4	TAIP	NE	
3%	13.2	17.0	5.4	57.6	57.6	57.7	63456	63508	63508	11520	11521	11532	0	22.0	TAIP	NE	
4%	15.2	19.3	5.0	57.6	57.6	57.7	63440	63512	63529	11512	11512	11532	0	30.0	TAIP	NE	
5%	17.7	21.7	5.7	57.5	57.5	57.7	63423	63517	63537	11501	11502	11532	0	38.0	TAIP	NE	
6%	20.5	24.1	7.3	57.5	57.5	57.7	63406	63521	63546	11489	11490	11533	0	46.5	TAIP	NE	
7%	23.7	26.6	9.3	57.4	57.4	57.7	63387	63526	63555	11474	11475	11533	0	55.2	TAIP	NE	
8%	27.2	29.1	11.6	57.3	57.3	57.7	63367	63530	63563	11458	11459	11522	0	64.1	TAIP	NE	
9%	30.9	31.7	14.0	57.2	57.2	57.7	63346	63535	63571	11439	11441	11533	0	73.3	TAIP	NE	
10%	35.0	34.0	16.4	57.1	57.1	57.7	63324	63540	63581	11419	11422	11534	0	82.8	TAIP	NE	
11%	39.3	36.8	18.7	57.0	57.0	57.7	63300	63545	63590	11399	11401	11524	0	130.0	TAIP	NE	
12%	43.9	39.4	21.4	57.0	57.0	57.7	63276	63550	63599	11377	11380	11535	0	102.5	TAIP	NE	
13%	48.8	42.0	24.0	56.8	56.8	57.7	63250	63555	63608	11353	11357	11534	0	113.0	TAIP	NE	
14%	53.9	44.6	26.5	56.7	56.7	57.7	63223	63560	63617	11329	11333	11535	0	123.0	TAIP	NE	
15%	59.3	47.2	29.1	56.5	56.6	57.7	63194	63565	63625	11305	11309	11535	0	134.0	TAIP	NE	
16%	65.0	50.0	32.0	56.4	56.4	57.7	63164	63570	63634	11279	11284	11535	0	145.0	TAIP	NE	
17%	70.9	52.5	34.3	56.3	56.3	57.7	63133	63575	63643	11254	11259	11535	0	156.3	TAIP	NE	
18%	77.1	55.1	37.0	56.2	56.2	57.7	63100	63580	63652	11229	11234	11535	0	168.0	TAIP	NE	
19%	83.6	57.7	39.6	56.0	56.0	57.7	63066	63585	63661	11204	11209	11535	0	180.0	TAIP	NE	
20%	90.4	60.3	42.1	55.9	55.9	57.7	63031	63591	63670	11179	11185	11536	0	192.0	TAIP	NE	
21%	97.5	62.9	44.7	55.8	55.8	57.7	62994	63596	63678	11155	11161	11536	0	204.0	TAIP	NE	
22%	105.0	66.0	47.3	55.7	55.7	57.7	62955	63601	63687	11131	11137	11536	0	217.0	TAIP	NE	
23%	112.6	68.0	50.0	55.6	55.6	57.7	62914	63606	63695	11108	11114	11536	0	229.7	TAIP	NE	
24%	120.6	70.6	52.5	55.4	55.5	57.7	62872	63611	63704	11086	11092	11536	0	242.0	TAIP	NE	
25%	129.0	73.2	55.0	55.3	55.4	57.7	62829	63616	63712	11065	11072	11536	0	256.4	TAIP	NE	

7 lentelė. Bandymo nr. 6 rezultatai

Pakeitus transformatoriaus jungimo grupę į YND11, gaunami rezultatai panašūs į rezultatus bandymuose nr. 1 ir nr. 2. Esminis faktorius, kuris pasikeičia, esant tokiai jungimo grupei, antrinėse apvijose gedimo parametrai pasiskirsto tarp A-B ir C-A apvijų. Atsirandantis disbalansas tarp fazių, padeda diferencinei apsaugai nesunkiai užfiksuoti gedimus. Diferencinė apsauga bandymų nr. 5 ir nr. 6 transformatoriaus apvija dengia pilnai.

Išvados

1. Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinė apsauga veikia lyginant nulinės sekos srovės tekančias fazėse ir transformatoriaus neutralėje. Ši apsauga paremta išilginės diferencinės apsaugos veikimo principu. Transformatoriaus nulinės sekos srovės diferencinė apsauga skiriasi nuo diferencinės apsaugos didesniu jautrumu esant gedimui arti transformatoriaus neutralės, paprastesniu algoritmu ir reikalauja mažiau srovės transformatorių, tačiau yra mažiau stabili.
2. Keičiantis transformatoriaus jungimo grupei ir neutralės žemiklio padėčiai, modelyje atlikti bandymai imituojuant apvijos gedimą parodė:
 - 2.1. YnYn jungimo grupės transformatoriui, gedimui esant aukštos įtampos pusėje, bei esant išjungtas transformatoriaus neutralės žemikliui, diferencinė apsauga neapsaugo net 15% transformatoriaus apvijos. Įjungus neutralės žemiklį diferencinė apsauga pilnai apsaugo transformatoriaus apviją.
 - 2.2. YnD11 jungimo grupės transformatoriuose, diferencinė apsauga pilnai apsaugo apviją, nepriklausomai nuo neutralės žemiklio padėties, todėl nulinės sekos srovės diferencinė apsauga tokiems transformatoriams taikyti nėra būtina.
 - 2.3. YnYn jungimo grupės transformatoriuje pažeidus apviją žemos įtampos pusėje, nepriklausomai nuo neutralės žemiklio įjungtas ar ne, diferencinė apsauga neapsaugo 5% transformatoriaus apvijos.
3. Gedimo srovė priklauso nuo nulinės sekos varžos. Keičiant transformatoriaus neutralės padėtį, bei gedimui tostant nuo transformatoriaus apvijos galo, pasikeičia nulinės sekos varža. Režimų metu, kuomet nulinės sekos varža yra labai didelė, maža gedimo srovė ne visada užtikrina pakankamą diferencinių srovių dydį diferencinės apsaugos veikimui. Todėl reikia taikyti nulinės sekos srovės diferencinę apsaugą.

Literatūros sąrašas

1. FISCHER N., HAAS D., COSTELLO D. Analysis of an Autotransformer Restricted Earth Fault Application, Interaktyvus, 2008. Prieiga per: DOI: 10.1109/CPRE.2008.4515069 [žiūrėta 2022-07-20].
2. HARLOW, James H. Electric Power Transformer Engineering, 2004. ISBN 9781315217215.
3. TAN Jian-Cheng, THOLOMIER Damien, WEI Hua. A New Restricted Earth Fault Protection, Interkatyvus, 2007, ISSN 0840-7789. Prieiga per DOI: 10.1109/CCECE.2007.75 [žiūrėta 2022-08-11].
4. MACANGUS-GERRARD Geoff. Offshore Electrical Engineering Manual, 2017. ISBN 978-0-12-385498-8.
5. JALIL Kamarul Jalal Abdul, BAKAR Ab Halim Abu, MAHADI Wanr Norliza Wan , HANI Faridah. Performance of Restricted Earth Fault Protection in the Presence of Current Transformer Remanence, Interaktyvus, 2008. Prieiga per: DOI: 10.1109/PECON.2008.4762536 [žiūrėta 2022-07-20]
6. CT burden, knee point, voltage, core saturation – details of current transformer characteristics Interaktyvus. N.d. Prieiga per internetą: <https://www.hyee-current-transformer.com/info/ct-burden-knee-point-voltage-core-saturation-37475615.html> [žiūrėta 2022-06-15].
7. A. Nargėlas. Relinė apsauga ir automatika (mokymo priemonė), KTU, 2010.
8. RIGBY B., DIERKS A., TISHENIN G., HENSLER T. Testint Sensitivity of Restricted Earth Faul Protection by Simulation of Faults Inside Transformer. Interaktyvus, 2020. Prieiga per DOI:10.1049/cp.2020.0114 [žiūrėta 2022-08-11].
9. SUTHERLAND Peter E. Current Transformer Application With Digital Ground Differential protection Relays, Interaktyvus, 2000. Prieiga per: DOI: 10.1109/ICPS.2000.854360. [žiūrėta 2022-08-13].
10. GUANGFU Xu, JINXUE Guo, CHUNCHE Zhang, QUNBING Yu. The Influence of Low Resistance Grounding System in Delta Side of Transformer on Differential Protection and Its Solutions. Interaktyvus 2010. ISSN 2161-7481. Prieiga per IEEE. [žiūrėta 2022-08-13].
11. GAJIC Zoran, KOCKOTT Mike. Restricted Earth-Fault (REF) Protection Challenges due to Extensive Use of Cables: A Case Study. Interkatyvus, 2021. Prieiga per DOI: 10.1109/CPRE48231.2021.9429845 [žiūrėta 2022-08-13].
12. KASZTENNY B., SEVOY L., JAQUES A. New Algorithm for Low-Impedance Restricted Earth Fault Protection. Interkatyvus, 2004, ISSN 0537-9989. Prieiga per DOI: 10.1049/cp.20040140
13. NIMTAJ B., MAHMOUDI A., PALIZBAN O., KAHOURZADE S. A Comparison of Two Numerical Relay Low Impedance Restricted Earth Fault Algorithm In Power Transformer. Interkatyvus, 2011. Prieiga per DOI: 10.1109/ECTICON.2011.5947959 [žiūrėta 2022-08-16].
14. SVINKŪNAS Gytis, NAVICKAS Algimantas. Elektros energetikos pagrindai. Interaktyvus. Kaunas: KTU leidykla „Technologija“, 2014. Kauno technologijų universiteto e. publikacijų talpykla (KTU ebooks). ISBN 978-609-02-0235-7. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/einfo/164/elektros-energetikos-pagrindai/>. [žiūrėta 2022-08-16].
15. Transfomer insulation. Interaktyvus. N.d. Prieiga per internetą Prieiga per internetą: <https://megger.com/applications/transformers/transformer-insulation>. [žiūrėta 2022-06-15].

16. HORAK J., HRABLIUK J. Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs. Interaktyvus, 2016. Prieiga per DOI: 10.1109/TPRWRD.2016.2508585. [žiūrėta 2022-06-15].
17. AIBANGEE J. Power Transformer Inrush Current Detection & Harmonic Sharing In Differential Relay Protection. Interaktyvus, 2018. Prieiga per DOI: 10.14445/22315381/IJETT-V33P206 [žiūrėta 2023-01-15].
18. THOTE P. B., DAIGAVANE M. B., BAWANE N.G. Matlab Simulink Based Digital Protection of Transformer. Interaktyvus, 2014. ISSN 2319-1163. Prieiga per IJRET. [žiūrėta 2023-02-13].
19. HENSLER T., FINK F., MITTER H. Experience in commissioning and testing of differential protection for phase-shifting transformers. Interaktyvus. N.d. Prieiga per: <https://www.omicronenergy.com/en/news/details/testing-of-differential-protection-for-phase-shifting-transformers/>
20. AŽUBALIS V., KORYZNA J.. Trumpieji jungimai elektros sistemose, Vilnius: Lietuvos TSR aukštojo ir specialiojo vidurinio mokslo ministerijos leidybinė redakcinė taryba, 1986

Priedai

1 Priedas. Transformatoriaus gamyklinių bandymų duomenys



KONČAR
D&SI

TRANSFORMER TEST REPORT

Page : i

TRANSFORMER

Type: TRP 55000-123/B
Serial No. : ET1412 - 464908

ROUTINE TESTS:	TEST REPORT No.:	Page :	STANDARD
Measurement of voltage ratio and check of phase displacement	464908	2 / 7	IEC 60076-1 (11.3)
Measurement of winding resistance	464908	2,3 / 7	IEC 60076-1 (11.2)
Measurement of short-circuit impedance and load loss	464908	4 / 7	IEC 60076-1 (11.4)
Measurement of no-load losses and no-load current	464908	5 / 7	IEC 60076-1 (11.5)
Line terminal AC withstand test (LTAC)	464908	6 / 7	IEC 60076-3 (12)
Measurement of Insulation resistance of the windings and check of core and frame insulation	464908	6 / 7	IEC 60076-1 (11.1.2)
Applied voltage test (AV)	464908	6 / 7	IEC 60076-3 (10)
Measurement of capacitances and tgδ of the windings and bushings	K1831	---	IEC 60076-1 (11.1.2)
Test on on-load tap changer - Operation test	464908	6 / 7	IEC 60076-1 (11.7)
Check of auxiliary equipment according to drawing CS6526, check of insulation resistance of the wirings in marshalling cubicle and check of built-in current transformers	464908	6 / 7	
Chromatographic analysis of gases dissolved in oil (Oil DGA)	22/404, 22/405, 22/406	---	IEC 61181 (Tab.A.1)
Induced voltage test with PD measurement (IVPD)	464908	7 / 7	IEC 60076-3 (11.3)
Full wave lightning impulse test for the line terminals (LI)	U3560	---	IEC 60076-3 (13.2)
Testing of insulating oil	265/22, 50-K-0704-22	---	IEC 60156
Leakage testing with pressure	OL464908	---	IEC 60076-1 (11.8)
TYPE AND SPECIAL TESTS:			
Measurement of zero-sequence impedance	464908	4 / 7	IEC 60076-1 (11.6)
Measurement of the power taken by the fan motors	464908	5 / 7	IEC 60076-1 (11.1.3)
Temperature rise test	Z1545	---	IEC 60076-2
Sound level measurement	B2375	---	IEC 60076-10
Measurement of magnetizing current at 400V, 50Hz	464908	5 / 7	
Switching impulse test for the line terminals (SI)	S016	---	IEC 60076-3 (14)
Frequency response analysis (SFRA)	F855	---	IEC 60076-18
Chopped wave lightning impulse test (LIC)	U3560	---	IEC 60076-3 (13.3.)
Lightning impulse test on a neutral terminal (LIN)	U3560	---	IEC 60076-3 (13.4.)

**ALL SPECIFIED TESTS AND MEASUREMENTS WERE PERFORMED.
TRANSFORMER PASSED THE TESTS AND MEASUREMENTS MET SPECIFIED TOLERANCES.**

Tested by :

Approved by :

Date and stamp :

V. Gojević, dipl.ing.

D. Bistrički, dipl.ing.

04.07.2022.



TRANSFORMER
Serial No. : ET1412 - 464908

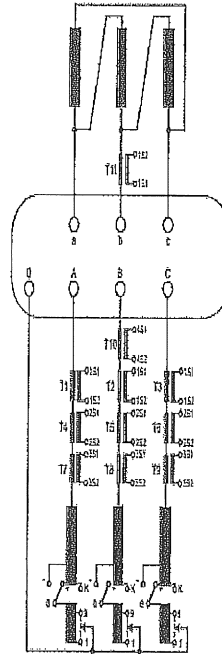
RATING PLATE



GALIOS TRANSFORMATORIUS
TRP55000-123/B

STANDARTAS
IEC 60076

GAIMYKINIS Nr.	ET1412- 464908	PAGAMINIMO METAI	2022.			
VARDINĖ GALIA	65 MVA	FAZIŲ SKAIČIUS	3			
JUNGIMO GRUPĖ	YNd11	VARDINIS DAŽNIS	60 Hz			
AUŠINIMO TIPAS	ONAN/ONAF (75/100%)					
ALYVOS TIPAS	NYNAS NYTRO 10XH ACC. TO IEC 60256					
P_0	25,98 kW	P_1	194,24 kW			
P_{gr}	0	P_{gr}	0			
PEI	0,99742 pu	ŠERDIES MEDŽIAGA / SVORIS	GOES / 23.1 t			
k_{sc}	0,36572 pu	LAIDININKO MEDŽIAGA / SVORIS	VARIS / 11.1 t			
ALYVOS SVORIS	18.7 t	AKTYVIOSIOS DALIES SVORIS	38.5 t			
AKT. D. IŠKĖLIMO SVORIS	40.4 t	BENDRĖSIS SVORIS	66.5 t			
TRANSE. SVORIS (SU ALYVA)	57.0 t	TRANSP. SVORIS (BE ALYVOS)	47.0 t			
APLIKOS ORO TEMP.	-40/+40°C	APVIJOS TEMP. PRIEAUGIS	65 K			
APVIJŲ KARSČIAUSIAME TAŠKE PRIEAUGIS	78 K	ALYVOS TEMP. PRIEAUGIS	60 K			
ATŠAKŲ PERJUNGIKLIO (OLTC) TIPAS	MR VM III 350Y-72.5/B-10 19 1G	OLTC GAM. Nr.	2449237			
BAKAS, KONSERVATORIUS IR RADIATORIAI NUMATYTI PILNAM VAKUUMUI						
PADĖTIS	VARD. (TAMPA (V))		VARD. SROVĖ (A)		TRUMPŲJO JUNGIMO (TAMPA (%))	
	A	Z	A	Z		
	1	133402	238.0	1587.7		13,76
	10	115900	276.1	1587.7		12,38
19	96598	328.7	1587.7	11,46		
APVIJA	U _m (kV)	IZOLIACIJOS LYGIS		TRUMPŲJO JUNGIMO ATSP. GALIA		
A	123	S1460 L1650 L1C605 AV230 - L1250 AV95		8000 MVA		
Z	24	L1145 L1C160 AV60		500 MVA		



APVIJA	CE. IČ PADĖTIS	(TAMPA (V))	SROVĖ (A)
	1	133402	238.0
	2	131350	241.7
	3	129133	245.6
	4	127289	249.5
	5	125224	253.8
	6	123179	257.8
	7	121134	262.1
	8	119089	266.6
	9	117045	271.3
	10	115000	276.1
	11	112955	281.1
	12	110911	286.3
	13	108866	291.7
	14	106821	297.3
	15	104777	303.1
	16	102732	309.1
	17	100687	315.4
	18	98642	321.9
	19	96598	328.7

Z		2000	1587.7

SROVĖS TRANSFORMATORIUS			
PADĖTIS	TR. KOEF.	GALIA	KLASĖ
T1, T2, T3	300/1 A	2.5 VA	0.2sFs5
T4, T5, T6	300/1 A	30 VA	5P20
T7, T8, T9	300/1 A	20 VA	5P20
T10	330/2 A	10 VA	3Fs5
T11	1590/2 A	10 VA	3Fs5



TRANSFORMER TEST REPORT

Serial No. :

464908

Page :

1 / 7

CUSTOMER :

1.0.		RATING VALUES			
Transformer type :	TRP 55000-123/B		Tap-changer type :	VMIII350Y-72,5/B-10191G	
Serial No. :	464908		Serial No. :	2449237	
Winding :	A	Ž			
Insulation level :	SI460 LIC605 LI550 AV230 - LI250 AV95	LI145 LIC159,5 AV50			Part No.: ET1412
Rated power (kVA)	55000	55000			Transport mass (t): 57,0
Rated voltage (V)	133402				Oil mass (t): 18,7
	115000	20000			Total mass (t): 66,5
	96598				Frequency (Hz): 50
Rated current (A)	238,0				Vector group: YNd11
	276,1	1587,7			Type of cooling: ONAN / ONAF
	328,7				Tested in acc.: IEC 60076
2.0.		TEST RESULTS			
2.1.1.		Impedance voltage at 55 MVA and 75°C			
Winding :	A / Ž				
Tap position	1	10	19		
Rated (%)	---	12,00	---		
Guaranteed (%)	---	11,1 - 12,9	---		
Measured (%)	13,76	12,38	11,46		
2.1.2.		Load losses at 55 MVA and 75°C			Cooling losses
Rated (kW)	---	195,00	---		---
Guaranteed (kW)	---	195,00	---		---
Measured (kW)	191,07	194,24	205,01		1,10
2.3.		No - load loss and current			
	No-load loss			No-load current at 55 MVA	
Voltage (%)	90,0	100,1	110,0	Voltage (%)	100,1
Rated (kW)	---	26,50	---	Rated (%)	---
Guaranteed (kW)	---	26,50	---	Guaranteed (%)	---
Measured (kW)	19,95	25,98	36,66	Measured (%)	0,052
2.4.		Total losses at 55 MVA and 75°C (Load losses + No-load losses)			
Tap position	1	10	19		
Rated (kW)	---	221,50	---		
Guaranteed (kW)	---	221,50	---		
Measured (kW)	217,05	220,22	230,99		
2.5.		Efficiency at 55 MVA			
	Winding A / Ž at position 10				
Load (%)	25	50	75	100	125
Measured PF=1.0 (%)	99,72	99,73	99,67	99,60	99,52
Guaranteed (%)	---	---	---	---	---
Measured PF=0.8 (%)	99,65	99,66	99,59	99,50	99,40
Guaranteed (%)	---	---	---	---	---
2.6.		Variation of the secondary voltage		Load (%)	100
Guaranteed PF=1.0 (%)	---	---	---	Measured (%)	1,12
Guaranteed PF=0.8 (%)	---	---	---	Measured (%)	8,18
					10,23



TRANSFORMER TEST REPORT

Serial No. :

464908

Page :

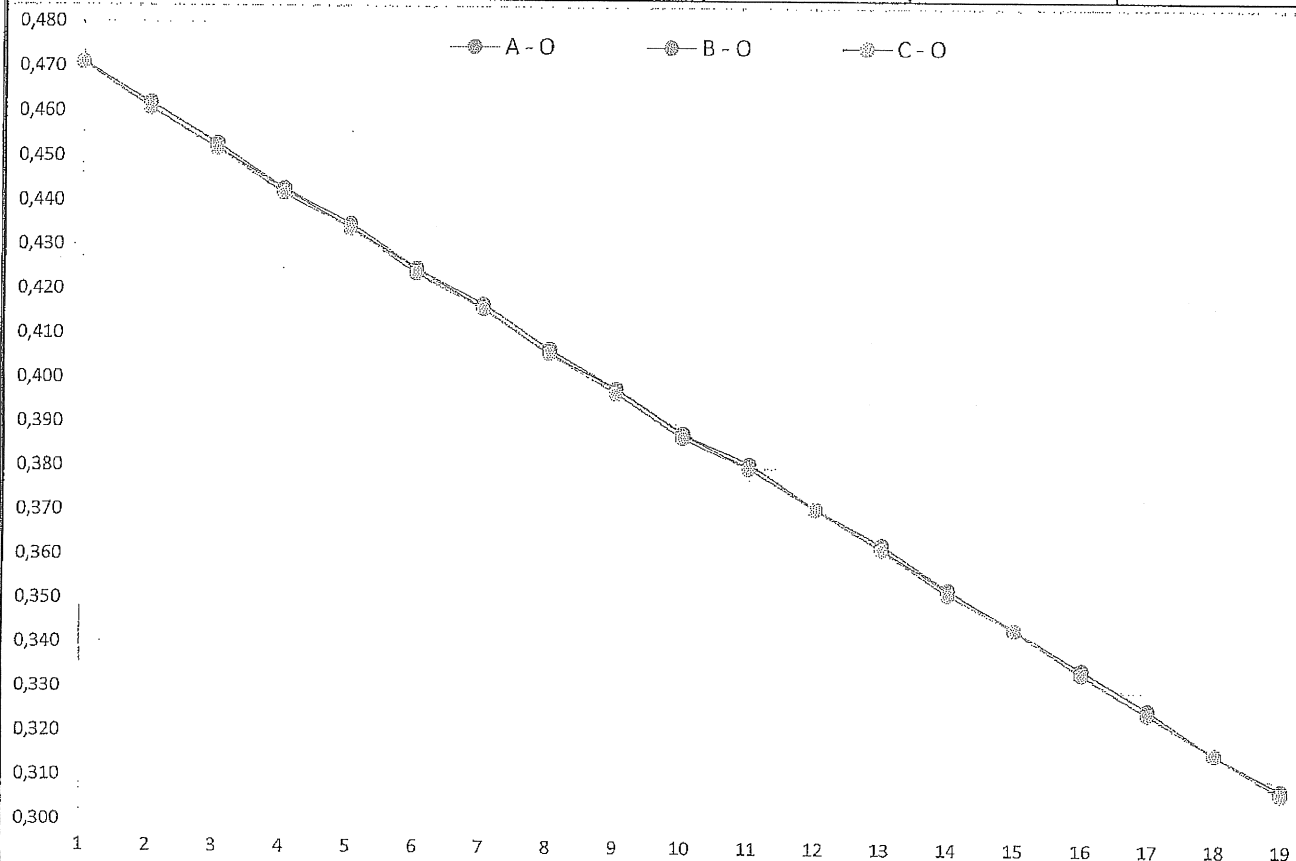
3 / 7

TRANSFORMER TYPE :

TRP 55000-123/B

Part No.: ET1412

3.1. Winding Aj	Measurement of winding resistance (Ω)			(measurement at temperature 24 °C)	
	A - O	B - O	C - O	Average at 24°C	Average at 20°C
1	0,471	0,471	0,471	0,471	0,464
2	0,461	0,462	0,461	0,461	0,454
3	0,452	0,453	0,452	0,452	0,445
4	0,443	0,443	0,442	0,443	0,436
5	0,434	0,435	0,434	0,434	0,428
6	0,425	0,425	0,424	0,425	0,418
7	0,416	0,417	0,416	0,416	0,410
8	0,406	0,407	0,406	0,406	0,400
9	0,398	0,398	0,397	0,398	0,392
10	0,388	0,388	0,387	0,388	0,382
11	0,380	0,381	0,380	0,380	0,374
12	0,371	0,371	0,371	0,371	0,365
13	0,362	0,363	0,362	0,362	0,357
14	0,353	0,353	0,352	0,353	0,347
15	0,344	0,344	0,344	0,344	0,339
16	0,334	0,335	0,334	0,334	0,329
17	0,325	0,326	0,325	0,325	0,320
18	0,316	0,316	0,316	0,316	0,311
19	0,307	0,308	0,307	0,307	0,303





TRANSFORMER TEST REPORT

Serial No. :

464908

Page :

4 / 7

TRANSFORMER TYPE :

TRP 55000-123/B

Part No.: ET1412

2.1.	Load losses and impedance voltage measurement		
Combination **	A / Ž	A / Ž	A / Ž
Tap position	1	10	19
Temperature (°C)	24	24	24
Frequency (Hz)	50	50	50
Measured voltage	(a-b)	18351	14195
	(a-c)	18381	14222
	(b-c)	18345	14191
Average	18359	14203	11011
Constant	1	1	1
VOLTAGE (V)	18359	14203	11011
Measured current	(a)	238,4	275,9
	(b)	236,8	274,5
	(c)	238,9	276,1
Average	238,0	275,5	327,0
Constant	1	1	1
CURRENT (A)	238,0	275,5	327,0
Measured power	(a)	45144	51134
	(b)	59598	57529
	(c)	62865	58291
Total	167607	166954	173973
Constant	1	1	1
LOAD LOSSES (W)	167607	166954	173973
Calculated to	(kVA)	55000	55000
	(A)	238,0	276,1
LOAD LOSSES (W)	167608	167711	175850
I ² R losses (W)	141204	149738	160726
Stray losses (W)	26404	17973	15124
Impedance voltage (V)		18359,1	14234,8
	(%)	13,762	12,378
Temperature (°C)	75	75	75
I ² R losses (W)	169009	179223	192375
Stray losses (W)	22061	15016	12636
LOAD LOSSES (W)	191069	194239	205011
Impedance voltage (V)		18360,4	14236,3
	(%)	13,763	12,379
NOTE : Measuring equipment : Yokogawa Power Analyser Type WT3000 ** : Connected / Short-circuit winding			
2.1.1.	Measurement of zero-sequence impedance		
Winding / Tap	Voltage (V)	Current (A)	Imped. (Ω/phase)
A / 1	1446,3	100,3	43,26
A / 10	1016,7	104,9	29,08
A / 19	754,1	117,9	19,19

u: 2.8.2
 2: 4
 T



TRANSFORMER TEST REPORT

Serial No. :

464908

Page :

5 / 7

 TRANSFORMER TYPE : TRP 55000-123/B Part No.: ET1412

2.3.	No - load losses and no - load current measurement			
Voltage (%)	90,0	100,1	110,0	
(a-b)	18009	20004	21931	
RMS measured vltg. (a-c)	18042	20047	21988	
(b-c)	18007	20006	21927	
Average	18019	20019	21949	
Constant	1	1	1	
RMS VOLTAGE (V)	18019	20019	21949	
(a-b)	17983	19981	21947	
Mean measured vltg. (a-c)	18027	20044	22037	
(b-c)	18002	20013	21995	
Average	18004	20013	21993	
Constant	1	1	1	
MEAN VOLTAGE (V)	18004	20013	21993	
Form factor	1,111	1,110	1,108	
(a)	0,537	0,699	1,459	
Measured current (b)	0,641	0,745	1,392	
(c)	0,819	1,015	1,848	
Average	0,666	0,820	1,566	
Constant	1	1	1	
CURRENT (A)	0,666	0,820	1,566	
(a)	5195	6783	8728	
Measured power (b)	6435	8168	12257	
(c)	8333	11035	15601	
Total	19963	25986	36586	
Constant	1	1	1	
LOSSES (W)	19963	25986	36586	
Correction (W)	-17	-8	74	
LOSSES (W)	19946	25978	36660	

NOTE :

Measuring equipment : Yokogawa Power Analyser Type WT3000

 MEASUREMENT AT FREQUENCY 50 (Hz) ON WINDING : Ž

The power was corrected to the sine - wave voltage basis .

2.3.1.	Measurement of magnetizing current at 400V, 50Hz			
Winding	Phase A (mA)	Phase B (mA)	Phase C (mA)	
A] - tap position 10	4,2	2,4	4,1	
2.7.	Measurement of the power taken by the fan motors (measured at 400 V, 50 Hz)			
Cooling group	1			
CURRENT (A)	3,57			
LOSSES (W)	1103,4			

Cooling group includes 8 fans.



TRANSFORMER TEST REPORT

Serial No. :

464908

Page :

6 / 7

TRANSFORMER TYPE :

TRP 55000-123/B

Part No.: ET1412

3.2.
Insulation resistance of the windings (MΩ)

(measured by 2500 V at temperature 24°C)

Between	R 15 "	R 60 "	R 60 " / R 15 "
A - (Ž + core + core clamp + earth)	9080	11000	1,21
Ž - (A + core + core clamp + earth)	5940	8830	1,49

Check of core and frame insulation (MΩ)

(measured by 2500 V at temperature 24°C)

Between	R 15 "	R 60 "	R 60 " / R 15 "
core - (A + Ž + core clamp + earth)	3150	6060	1,92
core clamp - (A + Ž + core + earth)	2950	5760	1,95

3.3.
Dielectric test of the transformer

Full wave lightning impulse test for the line terminals (LI)

Lightning impulse test on a neutral terminal (LIN)

Chopped wave lightning impulse test (LIC)

Test report No.:

U3560

Switching impulse test for the line terminals (SI)

Test report No.:

S016

Applied voltage (AV) test	Between	Test voltage (kV)	Frequency (Hz)	Duration (sec)
	A - (Ž + core + core clamp + earth)	95	50	60
	Ž - (A + core + core clamp + earth)	50	50	60
Line terminal AC withstand test (LTAC)	A - (B + C + earth)	230	200	30
	B - (A + C + earth)	230	200	30
	C - (A + B + earth)	230	200	30

NOTE :

Winding A| - tap position 1.

1. Tap changer was tested in accordance with: IEC 60076 - 1 (clause 11.7).
2. Functionally test of the auxiliary box has been done in accordance with drawing No.: CS6526.
3. Current transformers:

T1, T2, T3 - 300 / 1A; 2,5VA; 0,2sFs5

T4, T5, T6 - 300 / 1A; 30VA; 5P20

T7, T8, T9 - 300 / 1A; 20VA; 5P20

T10 - 330 / 2A; 10VA; 3Fs5

T11 - 1590 / 2A; 10VA; 3Fs5

Ratio and polarity of the current transformers has been checked.

4. Insulation of wiring in the marshalling cubicle has been tested with 1kV DC.

5. Paint thickness has been checked in accordance with drawing No. CP2007, CP4004.

