



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Jonas Ridikas

**GALIOS TRANSFORMATORIAUS ĮJUNGIMO MOMENTO
PEREINAMOJO PROCESO NUSTATYMO DIFERENCINEI
APSAUGAI TYRIMAS**

Baigiamojo magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Gytis SVINKŪNAS

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**GALIOS TRANSFORMATORIAUS ĮJUNGIMO MOMENTO
PEREINAMOJO PROCESO NUSTATYMO DIFERENCINEI
APSAUGAI TYRIMAS**

Baigiamojo magistro projektas

Elektros energetikos sistemos (kodas: 621H63005)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Gytis SVINKŪNAS

(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Almantas Bandza

(data)

Projekta atliko

(parašas) E MES-4 gr. stud., Jonas RIDIKAS

(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

JONAS RIDIKAS

(Studento vardas, pavardė)

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS (KODAS: 621H63005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Galios transformatoriaus įjungimo momento pereinamojo proceso nustatymo diferencinei apsaugai tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Jono Ridiko** baigiamasis projektas tema „Galios transformatoriaus įjungimo momento pereinamojo proceso nustatymo diferencinei apsaugai tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Ridikas, J. Galios Transformatoriaus Įjungimo Momento Pereinamojo Proceso Nustatymo Diferencinei Apsaugai Tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas;

Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, elektros ir energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 64 psl.

SANTRAUKA

Šio darbo tikslas – ištirti galios transformatoriaus įjungimo momentu, pereinamojo proceso metu vyraujančias sroves ir nustatyti jų galimą poveikį klaidingam diferencinės apsaugos suveikimui.

Aukštos įtampos galios transformatorių apsaugai yra taikoma diferencinės srovės apsauga. Ši apsauga lygina sroves transformatoriaus pradžioje ir gale. Jos veikimas pagristas saugomo įrenginio atjungimu, skirtuminei srovei pasiekus maksimalios nebalanso srovės vertę. Tačiau galios transformatorių prijungus prie įtampos, pereinamojo proceso metu stipriai išauga šerdį įsotinanti srovė, kurią sudaro visa eilė aukštesniųjų srovės harmonikų. Dėl to išauga nebalanso srovė ir galimas klaidingas įrenginio atjungimas. Tiksliam relinės apsaugos ir automatikos prietaisų darbo užtikrinimui, turi būti įvertintas pereinamasis procesas. Turi būti nustatyta galima maksimali nebalanso srovė ir tuo metu vyraujanti antros eilės aukštesnioji harmonika.

Atlikti tyrimo uždaviniai:

Atlikta informacijos šaltinių analizė, išaiškinta transformatoriaus veikimo principas, galimi gedimai ir naudojamos apsaugos.

Atliktas realus eksperimentinis tyrimas pasirinktiems trifaziams galios transformatoriams ir ištirtas pereinamasis procesas transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu.

Atliktas eksperimentinis tyrimas ir ištirtas pereinamasis procesas transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu, atliekant bandymą su MATLAB programa.

Sudaryta stabilizuota diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika ir patikrintas diferencinės apsaugos veikimas/neveikimas transformatoriaus įjungimo momentu.

Padarytos išvados, nurodomas naudotos literatūros sąrašas

Reikšminiai žodžiai: transformatoriaus skirtuminė srovė, diferencinė apsauga, suveikimo charakteristika.

Ridikas, J. Research On the Inrush Current Phenomena of Power Transformer Differential Protection. Qualification for master's degree supervisor doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of electric power systems.

Kaunas, 2026. 64 pages.

SUMMARY

The goal of this work is to explore the power transformers at the time of activation, currents prevailing on the moment of transition and to identify their potential effects on faulty activation of differential protection.

Protection of high-voltage power transformers is based on residual current. This protection levels out the currents of the transformer at the beginning and end. Its operation is based on the disconnection of the protected device, when differential current reaches the maximum value of the current imbalance. However, when the power transformer is connected to the mains, the current saturating the core greatly increases during the transition process. This current consists of a number of higher current harmonics. This increases the imbalance current and possible faulty disconnection of the device. To ensure the accurate operation of relay protection and automation devices, the transition process must be assessed. It is necessary to determine the maximum possible imbalance current and the upper harmonics of the second level prevailing at the time.

Tasks of research:

Analysis of information sources was performed, the transformer operating principle was clarified, possible failures and protections used were identified.

The real experimental study was performed for the chosen three-phase power transformers and the transition process of the transformer during its connection to the network was studied.

An experimental study was carried out and the transition process of the transformer during its connection to the network was studied by performing the test with the MATLAB program.

The stabilized differential protection tripping characteristic was drafted and operation/failure of the differential protection on the moment of activation of transformer was tested.

Conclusions were made, the list of references is indicated

Key words: differential current of transformer, differential protection, tripping characteristic.

TURINYS

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS.....	8
SIMBOLIŲ IR ŽENKLŲ ŽYMĖJIMO AIŠKINIMO ŽODYNAS.....	10
ĮVADAS.....	11
1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ.....	12
1.1. Galios transformatorius.....	12
1.2. Neapkrauto transformatoriaus prijungimas prie tinklo.....	18
1.3. Transformatoriaus šerdies magnetinė histerezė.....	19
1.4. Pagrindinės galios transformatorių apsaugos.....	21
1.5. Diferencinė galios transformatoriaus apsauga.....	23
1.6. Diferencinės apsaugos relės veikimo ypatumai.....	25
1.7. Pereinamojo proceso modeliavimas MATLAB programa.....	28
1.8. Informacijos šaltinių apibendrinimas.....	32
2. TIRIAMOJI DALIS.....	33
2.1. Tyrimų tikslas ir uždaviniai.....	33
2.2. Trifazio transformatoriaus eksperimentinis tyrimas.....	33
2.2.1. Eksperimentinio tyrimo metodika.....	35
2.2.2. Parametrų skaičiavimas.....	36
2.2.3. Diferencinės apsaugų relės konfigūravimas.....	39
2.2.4. TC-1,5 pereinamojo proceso eksperimentinis tyrimas.....	40
2.2.5. TC-1,5 eksperimentinis tyrimas MATLAB programa.....	42
2.2.6. TRN2500 ir TRP25000 eksperimentinis tyrimas.....	46
2.2.7. TRN2500 ir TRP25000 eksperimentinis tyrimas MATLAB programa.....	49
2.2.8. Poveikio diferencinei apsaugai tyrimas.....	52
2.3. Atliktų bandymų rezultatų aptarimas.....	56
3. IŠVADOS.....	57
4. LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	58
PRIEDAI.....	60
Priedas 1. Diferencinės apsaugos eksperimentinio tyrimo modelis.....	61

Priedas 2. Diferencinės apsaugos TA1 ir TA2 srovės transformatorių sujungimo schema ...	62
Priedas 3. Diferencinės suveikimo charakteristikos nustatymo schema	63
Priedas 4. Pirmos, antros ir penktos srovės harmonikų nustatymo schema	64

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1.1. pav.	Dviejų ir trijų apvijų transformatoriaus sujungimo schemas [2]	13
1.2. pav.	Transformatoriaus tuščiosios veikos ekvivalentinė schema.....	14
1.3. pav.	Transformatoriaus tuščiosios veikos supaprastinta ekvivalentinė schema [6].....	16
1.4. pav.	Transformatoriaus vienos fazės atstojamoji elektrinė schema.....	17
1.5. pav.	Įmagnetinimo charakteristika įjungimo momentu.	18
1.6. pav.	Feromagnetikų įmagnetėjimo (a) ir įmagnetinimo b) kreivė [9].....	19
1.7. pav.	Feromagnetiko įmagnetinimo kreivė	20
1.8. pav.	kieto plieno; b – minkšto plieno; c – permalojaus [9].....	21
1.9. pav.	Galimi trumpieji jungimai transformatoriuje ir jo gnybtuose	22
1.10. pav.	Diferencinės apsaugos relės pajungimas	23
1.11. pav.	Transformatoriaus atstojamoji schema su diferencine apsauga [8].....	24
1.12. pav.	Diferencinės relės srovės grandinių pajungimo schema.....	25
1.13. pav.	Įėjimo keitikliai. a) srovės transformatorius b) įtampos transformatorius	26
1.14. pav.	Stabilizuota diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika [2]	26
1.15. pav.	Diferencinės apsaugos relės veikimo loginė schema	27
1.16. pav.	Struktūrinė diferencinės apsaugos relės schema [2].....	28
1.17. pav.	Transformatoriaus pereinamojo proceso tyrimo blokų modelis.....	30
1.18. pav.	Transformatoriaus bloko parametrų įvedimo lentelės	30
1.19. pav.	Transformatoriaus bloko šerdies įsotinimo charakteristika	31
2.1. pav.	Tiriamasis trifazis galios transformatorius.....	34
2.2. pav.	ABB SPAD 346 C diferencinės apsaugos relė.....	35
2.3. pav.	ABB SPCD 3D53 relės pajungimo schema	36
2.4. pav.	TC-1,5 transformatoriaus diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika.....	39
2.5. pav.	TC-1,5 eksperimentinio bandymo pereinamasis procesas	40
2.6. pav.	TC-1,5 eksperimentinio bandymo pagrindinės srovės harmonikų dedamosios.....	41
2.7. pav.	TC-1,5 eksperimentinio bandymo srovių harmonikos	42
2.8. pav.	Jungimo grupės ir įsotinimo charakteristikos nustatymas.....	43
2.9. pav.	Apskaičiuotu parametru nustatymas	44
2.10. pav.	Šerdies iš minkšto plieno soties charakteristikos nustatymas	44
2.11. pav.	TC-1,5 bandymo MATLAB programa pereinamasis procesas.....	45
2.12. pav.	TC-1,5 bandymo MATLAB programa srovių harmonikos.....	46
2.13. pav.	TRN2500 eksperimentinio bandymo pereinamasis procesas.....	47
2.14. pav.	TRP25000 eksperimentinio bandymo pereinamasis procesas.....	47
2.15. pav.	TRN2500 eksperimentinio bandymo srovių harmonikos.....	48

2.16. pav.	TRP25000 eksperimentinio bandymo srovių harmonikos	48
2.17. pav.	TRN2500 transformatoriaus soties charakteristikos nustatymas.....	49
2.18. pav.	TRN2500 bandymo MATLAB programa pereinamasis procesas	50
2.19. pav.	TRP25000 bandymo MATLAB programa pereinamasis procesas	50
2.20. pav.	TRN2500 bandymo MATLAB programa srovių harmonikos	51
2.21. pav.	TRP25000 bandymo MATLAB programa srovių harmonikos.....	51
2.22. pav.	TC-1,5 diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika. (viršutinis – pirmas, apatinis antras atvejis).	53
2.23. pav.	TRN2500 diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika. (viršutinis – pirmas, apatinis antras atvejis).	54
2.24. pav.	TRP25000 diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika(viršutinis – pirmas, apatinis antras atvejis).	55

SIMBOLIŲ IR ŽENKLŲ ŽYMĖJIMO AIŠKINIMO ŽODYNAS

S_n – vardinė galia, VA;
 ε – elektrovara, V;
 ε – pirminės apvijos elektrovara, V;
 ε – antrinės apvijos elektrovara, V;
 f – tinklo dažnis, Hz;
 I_f – pirmos harmonikos srovė, A;
 $2f$ – antros harmonikos srovė, A;
 $5f$ – penktos harmonikos srovė, A;
 η – naudingumo koeficientas;
 k – transformacijos koeficientas;
 U_{1f} – transformatoriaus pirminė įtampa, V;
 I_0 – tuščios veikos srovė, A;
 I_{f1} – pirminė srovė, A;
 I_{f2} – antrinė srovė, A;
 Z_0 – pilnutinė varža, Ω ;
 R_0 – aktyvioji varža, Ω ;
 X_0 – induktyvioji varža, Ω ;
 R_m – magnetinė varža, Ω ;
 U_{kf} – trumpojo jungimo įtampa, V;
 Z_k – trumpojo jungimo pilnutinė varža, Ω ;
 R_k – trumpojo jungimo aktyvioji varža, Ω ;
 X_k – trumpojo jungimo induktyvioji varža, Ω ;
 L_{1m} – ritės įmagnetinimo induktyvumas, Ω ;
 R_2 – antros apvijos trumpojo jungimo aktyvioji varža, Ω ;
 X_2 – antros apvijos trumpojo jungimo induktyvioji varža, Ω ;
 L_{2m} – antros apvijos ritės įmagnetinimo induktyvumas Ω ;
 Φ – magnetinis srautas, Wb;
 K^1 – vienfazis trumpasis jungimas;
 K^2 – dvifazis trumpasis jungimas;
 K^3 – trifazis trumpasis jungimas;
 K^{FVT} – vienos fazės vijų trumpinimas;
 I_{sd} ir I_{st} – diferencinės apsaugos suveikimo srovės, A;
 I_{nebmax} – maksimali nebalanso srovė, A;
 I_{sd1*} – pirmosios charakteristikos dalies pabaigos taškas, A;
 I_{st2*} – antrosios charakteristikos dalies pabaigos taškas, A;
 I_{sd} – diferencinės apsaugos (y) suveikimo charakteristika;
 I_{st} – diferencinės apsaugos (x) suveikimo charakteristika;
 S – diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika procentais, %.

IVADAS

Viena iš sudedamųjų dalių elektros energetikos sistemose elektros energijai keisti iš aukštos įtampos į žemą ir atvirkščiai yra naudojami galingi aukštos įtampos transformatoriai. Kurie savo konstrukcija yra sudėtingi ir brangiai kainuojantys įrenginiai. Jų apsaugai nuo nenormalių elektros tinklo darbo režimų naudojamos dvi ir daugiau lygiagrečiai veikiančių relinės apsaugos ir automatikos RAA įrenginių. Viena iš pagrindinių ir labiausiai paplitusių aukštos įtampos galios transformatorių apsaugų yra transformatoriaus diferencinė apsauga. Ši apsauga reaguoja į dviejų ar daugiau srovių skirtumo padidėjimą transformatoriaus pradžioje ir gale. Į apsaugų relę, paduodančią atjungimo komandą, patenka skirtuminis pirmos ir antros apvijų srovių skirtumas.

Tačiau tiriant transformatoriaus pereinamąjį procesą, pastebime, kad prijungus transformatorių prie įtampos reikia tam tikro laiko, kad transformatoriaus darbo režimas pakistų iš vieno nusistovėjusio į kitą nusistovėjusį režimą. Pereinamojo proceso metu stipriai išauga transformatoriaus šerdį įsotinanti įvairių aukštesniųjų harmonikų srovės, dėl ko RAA įrenginys, nustatęs nebalanso srovę, ir gali klaidingai suveikti.

Praktikoje naudojama keletas būdų apsaugos jautrumui didinti. Senose apsaugose jautrumas buvo didinamas įjungiant dažnio filtrus apsaugos relės grandinėje arba įrenginio atjungimas nuo pereinamųjų nebalanso srovių pagal laiką. Šie būdai nėra geri, nes jie neleidžia pilnai panaudoti diferencinės apsaugos poveikio greitaveikos. Todėl praktikoje naudojama apsauga yra vykdant jungtuvo atjungimo blokavimą, esant skirtuminei srovei, ir tuo metu vyraujant antros ar penktos eilės aukštesniosioms harmonikoms.

Darbo tikslas: Ištirti galios transformatoriaus įjungimo momentu, pereinamojo proceso metu vyraujančias sroves ir nustatyti galimą poveikį klaidingam diferencinės apsaugos suveikimui.

Darbo uždaviniai:

Atlikti informacijos šaltinių analizę, išaiškinti transformatoriaus veikimo principą, galimus gedimus ir naudojamas apsaugas.

Atlikti realų eksperimentinį tyrimą pasirinktiems trifaziams galios transformatoriams ir ištirti pereinamąjį procesą transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu.

Atlikti eksperimentinį tyrimą ir ištirti pereinamąjį procesą transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu, atliekant bandymą su MATLAB programa.

Sudaryti stabilizuotą diferencinės apsaugos suveikimo charakteristiką ir patikrinti diferencinės apsaugos veikimą/neveikimą transformatoriaus įjungimo momentu.

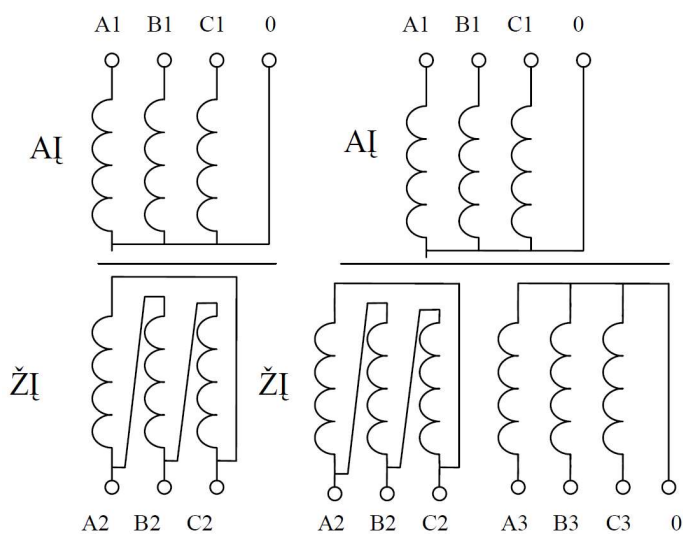
Pateikti išvadas.

1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ

1.1. Galios transformatorius

Galios transformatoriai statomi elektrinėse ir pastotėse. Galingi ir didelių gabaritų aukštos įtampos transformatoriai 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. [1] Transformatoriaus paskirtis - kintamosios įtampos keitimas arba izoliuotų grandinių elektromagnetinio ryšio sudarymas nekeičiant dažnio. Jį sudaro geležinė šerdis ir ant jos užmautos dvi varinės vielos ritės. Ritė, prie kurios jungiamas kintamos srovės šaltinis, vadinama pirmine, o ritė, kurioje indukuojama pakeista įtampa (elektrovara) vadinama antrine. Kai kurie transformatoriai turi dvi ar daugiau antrinių ričių. Energetikoje naudojami ir daugiausiai paplitę trifaziai transformatoriai, kadangi elektros energijos nuostoliai juose yra nedideli, lyginant su vienfaziais transformatoriais ir gali siekti 8 - 14%. Taip pat lyginant gaminių kaštus medžiagų sąnaudos 25% mažesnės negu vienfazių tokios pat suminės galios transformatorių. [2]

Trifaziai transformatoriai gali būti dviejų ir trijų apvijų. Aukštos, vidutinės ir žemos įtampos apvijos Lietuvoje žymimos sutartiniais AĮ, VĮ ir ŽĮ žymenimis. Dviejų įtampų transformatoriaus pagrindiniai parametrai yra: galios nustatymui jo vardinis galingumas S_N , įtampos nustatymui jo vardinė įtampa U_N , trumpo 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: galios nustatymui jo vardinis galingumas S_N , įtampos nustatymui jo vardinė įtampa U_N , trumpo 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 ΔP_{K12} , ΔP_{K13} , ΔP_{K23} . [2]



1.1. pav. Dviejų ir trijų apvijų transformatoriaus sujungimo schemas [2]

Galios transformatoriaus apvijų jungimo grupė nusako fazių skirtumą tarp transformatoriaus aukštos ir žemos įtampų apvijų ir žymima skaičiais nuo 0 iki 11. Šis skirtumas gaunamas įvairiais būdais jungiant transformatoriaus apvijas, galimi tokie apvijų jungimo variantai: žvaigždė -Y, žvaigždė su nuliniu laidu - Yo, trikampis - Δ. Zigzagas – Zo. Transformatoriaus jungimo grupė gali būti žymima pvz. Y/Δ - 11, Y/Y - 0. Praktikoje naudojamas jungimas žvaigžde, jis naudingas aukštesnės įtampos apvijoms, nes tokiai jungimo grupei pakanka silpnesnės izoliacijos. Jungimas trikampiu naudingesnis žemos įtampos apvijai, kadangi taip sumažėja fazės srovė ir slopinamos aukštesniosios harmonikos. [2]

Transformatoriaus veikimas pagrįstas elektromagnetinės indukcijos Faradėjaus dėsnium, kurio indukuota elektrovara E_i yra proporcinga magnetinio srauto per laidininko kontūro ribojamą plotą kitimo greičiui ($d\Phi/dt$), o dėl šios elektrovaros indukuotos elektros srovės kryptis tokia, kad jos magnetinis laukas mažintų pirminės apvijų magnetinio srauto kitimą. [3]

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}; \quad (1.1.1)$$

Dviejų įtampų transformatorių sudaro dvi apvijos - pirminė ir antrinė, trijų įtampų transformatorių sudaro viena pirminė ir dvi antrinės. Apvijos suvyniotos ant šerdies iš didelę magnetinę skvarbą turinčios medžiagos, kuri gaminama iš izoliuotų lakštinio plieno plokščių, kad magnetinis srautas koncentruotųsi pačioje šerdyje. [3] Transformatoriaus pirminę apviją prijungus prie kintamosios įtampos U_1 šaltinio, o prie antrinės apvijų nieko neprijungus (neapkrautas transformatorius), šerdyje atsiranda kintamasis magnetinis srautas Φ . Šis srautas kirs abi apvijas ir sukurs jose indukcijos elektrovaras. Todėl abi apvijas kerta tas pats magnetinis srautas ir kiekvienoje apvijų vijoje kuria vienodas elektrovaras, jis nusakomas (1.1.1) lygtimi. Jeigu pirminėje apvijoje yra N_1 vijų, o antrinėje yra N_2 vijų, tai pirminėje apvijoje indukuosis tokia elektrovara [3]

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}; \quad (1.1.2)$$

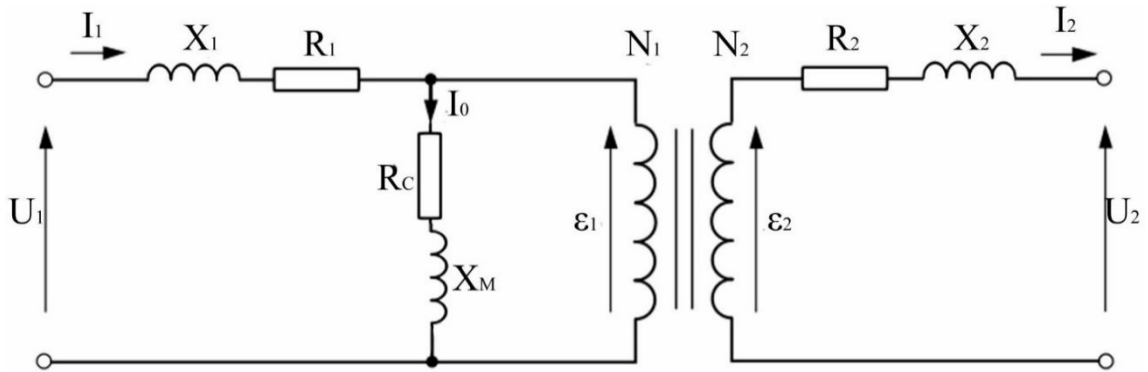
O antrinėje – elektrovara

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}; \quad (1.1.3)$$

Tačiau prieš tai pateiktos formulės atitinka ir aprašo tik idealų transformatorių, kuriame nėra energijos nuostolių. Nagrinėjant realią situaciją, kai antrinės apvijų grandinė atvira ($I_2=0$). Ją atitinka ekvivalentinė schema atvaizduota 1.2 paveiksle. Tam tikra magnetinio srauto dalis yra už vijų kontūrų ribų ir nesukuria indukcinės elektrovaros. Tai ekvivalentiška nuosekliai tam tikros indukcinės varžos X_1 prijungimui prie idealios pirminės apvijų X_2 . Dėl šerdies įmagnetėjimo histerezės (įsisotinimo) magnetinis srautas šiek tiek atsilieka nuo srovės stiprio I_1 . Tai ekvivalentiška

nuosekliam tam tikros indukcinės varžos R_C prijungimui. Taip pat pirminė apvija turi tam tikrą ominę varžą R_1 todėl pagal antrąją Kirchhofo taisyklę tekant I_1 stiprio srovei, įtampa joje galima apskaičiuoti pagal 1.14 formulę. [3]

$$U_1 + \varepsilon_1 = I_1 X_1 + I_1 R_1; \quad (1.1.4)$$



1.2. pav. Transformatoriaus tuščiosios veikos ekvivalentinė schema

Pirminės ir antrinės apvijų santykis vadinamas transformacijos koeficientu. Tuščios eigos atveju transformacijos koeficientas apskaičiuojamas pagal (1.1.5) formulę.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}; \quad (1.1.5)$$

Transformatoriaus naudingumo koeficientas vadinamas aktyvios galios P_2 , naudojamos antrinės apvijos grandinėje, ir aktyvios galios P_1 , kuria transformatorius ima iš srovės šaltinio, santykis.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad (1.1.6)$$

Nepriklausomai kokio tipo visuose transformatoriuose dėl energijos nuostolių šerdyje ir apvijų ominėse varžose galia P_2 visada mažesnė už P_1 . Įvertinę šių priežasčių sąlygojamas galias atitinkamai P_m ir P_p , užrašome,

$$P_m + P_p = I_1 U_1 \cos \varphi_1 - I_2 U_2 \cos \varphi_2; \quad (1.1.7)$$

Nuostoliai feromagnetinėje šerdyje silpnai priklauso nuo apkrovos, todėl P_m vertę gausime išmatavę tuščios eigos galią. [3]

$$P_m + P_{0p} = I_{01} U_{01} \cos \varphi_{01}; \quad (1.1.8)$$

Čia: $P_{0p} = I_0^2 R_1$;

Transformatoriaus nominaliojo režimo transformacijos koeficientas, įtampų, srovių linijinės ir fazinės vertės nustatomos tokia tvarka. Taip bus nustatyti pagrindiniai transformatoriaus tuščiosios veikos dydžiai reikalingi tolimesniems skaičiavimams. [4]

Kai apvijų sujungtos žvaigžde vienos fazė įtampa randama pagal (1.1.9) formulę:

$$U_{1f} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}; \quad (1.1.9)$$

Apskaičiuoja pirminės apvijų nominalioji fazinė srovė

$$I_{1f} = \frac{S}{3 \cdot U_{1f}}; \quad (1.1.10)$$

Transformatoriaus transformacijos koeficientas apskaičiuojamas pagal (1.1.11) formulę.

$$k = \frac{U_2}{U_1}; \quad (1.1.11)$$

Antrinės apvijų nominalioji fazinė srovė apskaičiuojama pagal (1.1.12) formulę.

$$I_{2f} = I_{1f} \cdot k; \quad (1.1.12)$$

Toliau žinant transformacijos koeficientą, linijinės ir fazinės įtampų, srovių vertes sekantys skaičiavimai buvo atliekami skaičiuojant pagal trumpojo jungimo parametrus. Šiuos parametrus galima rasti atlikus tuščiosios veikos ir trumpojo jungimo bandymus arba žinant šių bandymų duomenis. Šiuo atveju šiuos parametrus randame tiriamų galios transformatorių techniniuose pasuose ir juos nusirašome. [5]

Skaičiavimams yra reikalingi šie duomenys:

- Tuščiosios veikos galios nuostoliai P_0 , kW.
- Santykinė tuščiosios veikos srovė, procentais $i_0\%$, %.
- Trumpojo jungimo galios nuostoliai P_K , kW.
- Santykinė trumpo jungimo įtampa, procentais $u_K\%$, %.

Ekvivalentinės schemos įmagnetino šakos parametrai X_m ir R_m apskaičiuojami iš tuščios veikos bandymo duomenų (P_0 ir $i_0\%$, %), o nuoseklios grandinės – X_1 , R_1 ir R_2 , X_2 iš trumpojo jungimo bandymo duomenų (P_K ir $u_K\%$). [5]

Apskaičiuojama tuščiosios veikos srovė I_{0f} , A;

$$I_{0f} = \frac{I_{1f} \cdot i_0\%}{100}; \quad (1.1.13)$$

Apskaičiuojama atstojamosios schemos pilnutinė varža Z_0, Ω ;

$$Z_0 = \frac{U_{1f}}{I_{0f}}; \quad (1.1.14)$$

Apskaičiuojama atstojamosios schemos aktyvioji varža R_0, Ω

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{0f}^2}; \quad (1.1.15)$$

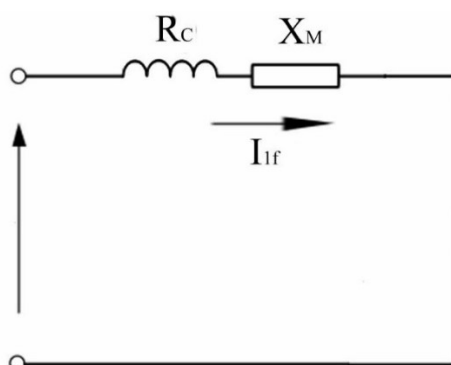
Atstojamosios schemos kuri atvaizduota 1.3 paveiksle, sklaidos induktyvioji varža X_0, Ω apskaičiuojama pagal (1.1.16) formulę;

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \quad X_0 \approx X_m; \quad R_0 \approx R_c; \quad (1.1.16)$$

Kai varžos sujungtos nuosekliai, visos grandinės elektrinė varža, R_m, Ω ;

$$R_m = X_m + R_c; \quad (1.1.17)$$

Sprendžiant, kad transformatoriaus tuščiosios veikos režime visa iš tinklo imama energija sunaudojama transformatoriaus magnetolaidžio įmagnetinimui ir aktyviems nuostoliams magnetolaidyje padegti ir, kad varžos X_0 ir R_0 yra daug kartų didesnės už X_1, R_1 , galimai laikyti, kad $X_0 \approx X_m$, o $R_0 \approx R_c$. Transformatoriaus tuščiosios veikos supaprastintoje ekvivalentinėje schemoje pavaizduotoje 1.3 paveiksle. [6]



1.3. pav. Transformatoriaus tuščiosios veikos supaprastinta ekvivalentinė schema [6]

Čia: X_m - įvertina transformatoriaus įmagnetinimo energiją;

R_c - įvertina aktyviuosius plieno nuostolius šildančius magnetolaidį.

Apskaičiuojama trumpojo jungimo įtampa U_{Kf}, V ;

$$U_{Kf} = \frac{U_{1f} \cdot u_k \%}{100}; \quad (1.1.18)$$

Apskaičiuojama fazės trumpojo jungimo pilnutinė varža Z_k, Ω ;

$$Z_k = \frac{U_{1f}}{I_{1f}}; \quad (1.1.19)$$

Apskaičiuojama fazės trumpojo jungimo aktyvioji varža R_K, Ω

$$R_K = \frac{P_K}{3 \cdot I_{1f}^2}; \quad (1.1.20)$$

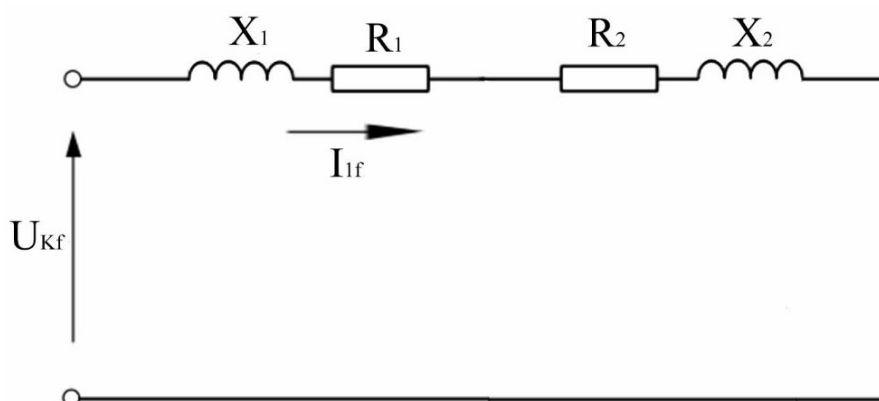
Apskaičiuojama fazės trumpojo jungimo sklaidos induktyvioji varža X_K, Ω ;

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \quad (1.1.21)$$

Transformatoriaus pirminės ritės įmagnetinimo induktyvumas L_{1m} , H apskaičiuojamas taip;

$$L_{1m} = \frac{X_K}{\omega}; \quad \omega = 2\pi f; \quad (1.1.22)$$

Įvertinant, kad trumpojo jungimo metu visa iš tinklo imama energija naudojama apvijų vario nuostoliams padengti ($I_{1f}^2 \cdot R_1$ ir $I_{1f}^2 \cdot R_2$) ir sklaidos srautams kurti $X_1 = \omega L_1$ ir $X_2 = \omega L_2$ galima teikti, kad ekvivalentinės schemas pateiktos 1.2 paveiksle įmagnetinimo šakos varžos X_m ir R_m yra daug didesnės už R_k ir X_k . Todėl atliekant sekančius skaičiavimus laikome, kad šia šaka elektros srovė neteka ir supaprastiname ekvivalentinę schemą. Taip pat tiriant ir skaičiuojant didelės galios transformatorius galima laikyti, kad $R_1 \approx R_2$ ir $X_1 \approx X_2$. [6]



1.4. pav. Transformatoriaus vienos fazės atstojamoji elektrinė schema.

Įvertinant jau apskaičiuotą transformatoriaus transformacijos koeficientą, sakancius skaičiavimus galima atlikti nustatant antrosios apvijos parametrus.

Apskaičiuojama trumpojo jungimo aktyvioji varža antrajai transformatoriaus apvijai R_2, Ω

$$R_2 = \frac{R_K}{k^2}; \quad (1.1.23)$$

Apskaičiuojama trumpojo jungimo pilnutinė varža antrajai transformatoriaus apvijai X_2, Ω

$$X_2 = \frac{X_K}{k^2}; \quad (1.1.24)$$

Transformatoriaus antrinės ritės įmagnetinimo induktyvumas L_{2m} , H apskaičiuojamas taip:

$$L_{2m} = \frac{X_2}{\omega}; \quad \omega = 2\pi f; \quad (1.1.25)$$

1.2. Neapkrauto transformatoriaus prijungimas prie tinklo

Neapkrauto transformatoriaus atstojamoji schema pateikta ankstesniame skyriuje 1.2 paveiksle. Transformatoriaus jungimas prie įtampos, kai jo antrinė grandinė neapkrauta. Laikome, kad transformatoriaus magnetolaidis neįsotintas, tai teigiama, kad magnetolaidžio magnetinė skvarba $\mu = const$ ir pirminės apvijos induktyvumas $L_1 = const$. Tuomet įtampų pusiausvyros lygtį galime užrašyti taip: [7]

$$U_1 \sin(\omega t + \alpha_0) = L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k; \quad (1.2.1)$$

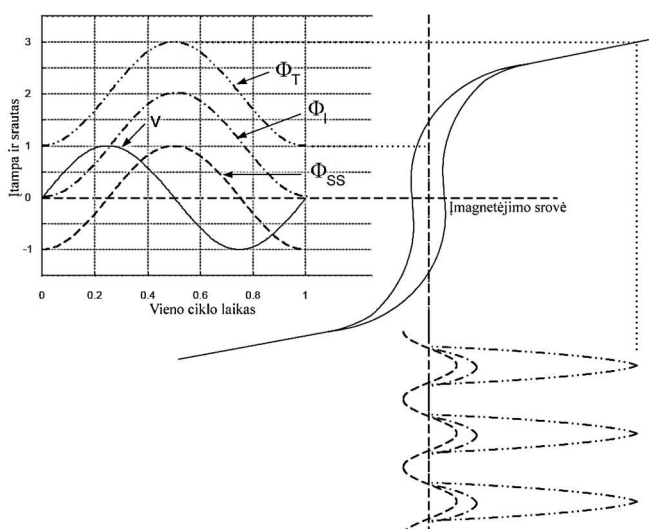
Čia: R_k – trumpojo jungimo transformatoriaus aktyvioji varža.

$L_k = X_k / \omega$ - trumpojo jungimo transformatoriaus savindukcijos koeficientas.

α_0 – tinklo įtampos pradinė fazė.

i_k – trumpojo jungimo momentinė srovė.

Eksperimentiškai yra nustatyta, kad prijungiant neapkrautą transformatorių prie tinklo, jo magnetolaidžio srautas kinta panašiai kaip trumpojo jungimo srovė.



1.5. pav. Įmagnetinimo charakteristika įjungimo momentu.

Srovės ir įtampos grafikai skiriasi fazių skirtumu dar vadinamu fazių skirtumu φ . Srovės stipriai lenkiant įtampą $\pi/2$ faze magnetolaidžio srautas šoktelti net iki $3\phi_{SS}$ (1.5 pav.). Šis srautas gali būti mažesnis, jeigu transformatorius prie tinklo jungiamas ne pirmą kartą ir jame gali būti liekamojo magnetizmo. Paprastai maksimali magnetinio srauto reikšmė išreiškiama formule.

$$\phi_{\max} \approx \phi_T \pm \phi_{liek}; \quad (1.2.2)$$

Kai ϕ_T ir ϕ_{liek} kryptys sutampa, prieš liekamojo magnetizmo srautą rašomas pliuso ženklas, kai kryptys nesutampa – minuso ženklas.

Transformatoriaus įmagnetinimo charakteristika pavaizduota 1.5 paveiksle rodo, kad padidėjus magnetiniam srautui apie du kartus, tuščios eigos srovė padidėja apie 100 kartų. [7] Jeigu

tuščiosios eigos srovė lygi $0,1I_N$, tai pereinamojo režimo metu maksimali tuščiosios eigos srovė bus lygi.

$$I_{0\max} \approx 100 \cdot I_{0N} = 100 \cdot 0,1 \cdot I_N = 10I_N; \quad (1.2.3)$$

Pereinamajam procesui nusistovėjus toliau transformatorius dirba tuščiąja eiga. Tuščiosios eigos režimas, kai transformatoriaus antrinė apvija neapkrauta $i_2=0$, tuščios eigos srovė nedidelė.

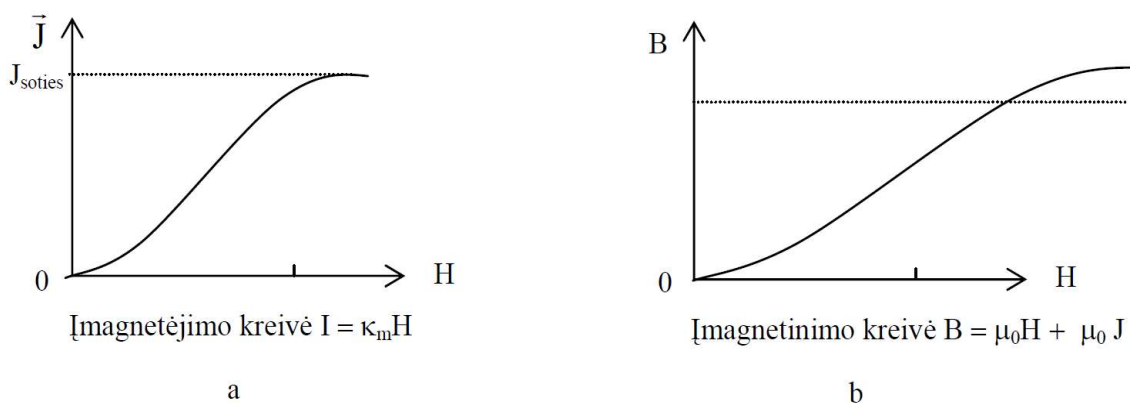
Aiškinantis transformatoriaus darbą tuščiąja eiga reikia žinoti, kad stačiakampės koordinatų sistemos viršutiniame dešiniajame kvadrante atvaizduota transformatoriaus feromagnetinės šerdies sotes kreivė. Ši kreivė atspindi transformatoriaus sotinimą, kurį rodo kreivės netiesiškumas, bet neįvertinta magnetinių galios nuostolių.

Kairiau antrajame kvadrante pavaizduota srauto kitimo kreivė Φ_m . Tai magnetinio srauto sinusinė laiko funkcija.

Žemiau dešinėje, ketvirtajame kvadrante atvaizduota grafiniu būdu gauta tuščios eigos srovės kitimo kreivė. Galima pastebėti, kad ši srovė nesinusinė, nors jos sukurtas srautas sinusinis. Dėl plieno sotinimo ir magnetinių galios nuostolių tuščios eigos srovė iškrapoma. [8]

1.3. Transformatoriaus šerdies magnetinė histerezė

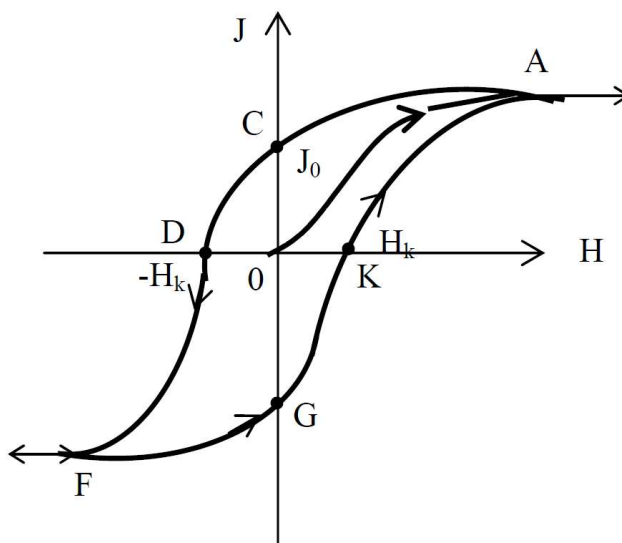
Medžiagos, kurių magnetinė skvarba yra didelė, vadinamos feromagnetikais. Prie jų priskiriamas plienas, geležis, nikelis, kobaltas, jų lydiniai. Jų vidinio lako indukcija šimtus ir tūkstančius kartų viršija išorinio magnetinio lauko indukciją. Dėl to net labai silpname ($B_0 \sim 10^{-3}$ T) magnetiniame lauke feromagnetikai stipriai įsimagnetina ir pasižymi liktiniu įmagnetėjimu. Jų įmagnetėjimas gali būti nelygus nuliui ir nesant išorinio magnetinio lauko. Magnetinė skvarba priklauso nuo magnetinio lauko stiprio ir prieš tai buvusio likutinio magnetinio būvio. Feromagnetikuose pasireiškia histerezė. Tai graikiškas žodis „hysteresis“ lietuviškai reiškia atsilikimą, vėlavimą. Šie ypatumai atsispindi įmagnetėjimo $J=f(H)$ (a) ir įmagnetinimo $B=f(H)$ (b) kreivėse atvaizduotose 1.6 paveiksle. [9]



1.6. pav. Feromagnetikų įmagnetėjimo (a) ir įmagnetinimo b) kreivė [9]

Stiprinant lauką įmagnetėjimas didėja netiesiškai, nes $K_m=F(H)$ ir pasiekia soties įmagnetėjimą. Stiprinant lauką, magnetinė indukcija irgi didėja netiesiškai, bet soties nepasiekia.

Veikiant feromagnetiką pakankamo stiprio periodiškai kintamu lauku, gaunama magnetinės histerezės kilpa (1.7 pav.).



1.7. pav. Feromagnetiko įmagnetinimo kreivė

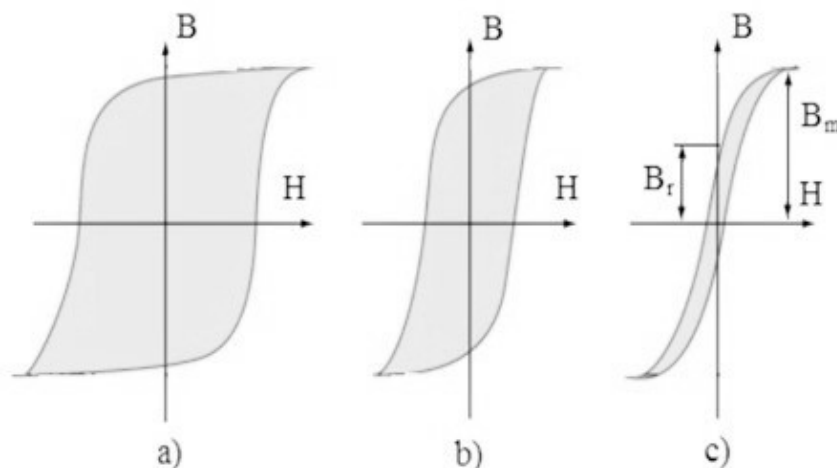
Didinant H (pradedant nuo 0) iš pradžių įmagnetėjimas sparčiai didėja. Toliau sparta mažėja iki pasiekiamą įmagnetėjimo soties vertė (kreivės dalis 0A). Mažinant lauko stiprį H , įmagnetėjimas grįžta pagal kreivę AC, einančią virš kreivės 0A. Kai $H=0$. $J=J_0 \neq 0$. Feromagnetikas lieka šiek tiek įmagnetintas.

Dydis J_0 vadinamas liktiniu įmagnetėjimu. Kad feromagnetikas visiškai išsimagnetintų, jį reikia paveikti priešingos krypties H_k stiprio magnetiniu lauku. Šį išmagnetinančio lauko stiprio vertė vadinama koerciniu lauko stipriu ir jis apibūdina liktinio įmagnetėjimo patvarumą. Stiprinant magnetinį srautą vėl pasiekiamą įmagnetėjimo soties vertė, tik šiai periodo daliai ji yra priešingo ženklo (kreivės dalis DF). Toliau kreivė FGKA feromagnetikas išmagnetinamas ir vėl iki soties įmagnetinimas. [9]

Feromagnetiko įmagnetinimas nėra vienareikšmė magnetinio lauko stiprio H funkcija, o priklauso nuo jo priešistorės. Liktinis įmagnetėjimas ir koercinio lauko stipris, kartu ir histerezės kilpos pavidalas bei jos ribojamas plotas priklauso nuo feromagnetiko prigimties. Stipriu koerciniu lauku pasižymi angliniai, volframiniai, chrominiai ir kai kurie kiti plienai. Jų magnetinė histerezės kilpa yra plati. Tokios medžiagos vadinamos kietamagnetinėmis medžiagomis. Iš jų gaminami nuolatiniai magnetai, mažų variklių bei garsiakalbių magnetai. Skaičiavimo technikoje iš jų gaminami operatyvinės atminties elementai, jais padengiama magnetofonų bei videomagnetofonų juostos ar diskai. [9]

Minkštamagnečių medžiagų liktinis įmagnetėjimas ir koercinis lauko stipris yra maži, o histerezės kilpa yra siaura. Tai plienas, geležis, geležies nikelio lydiniai, molibdeno permalojaus ir kt. Jie naudojami transformatoriams, elektros varikliams, generatoriams gaminti.

Pagrindinė įmagnetėjimo kreivė ir histerezės kilpa apibūdina medžiagų magnetines savybes. Trys kreivės: kieto plieno, minkšto plieno ir permalojaus atvaizduotos 1.8 paveiksle.



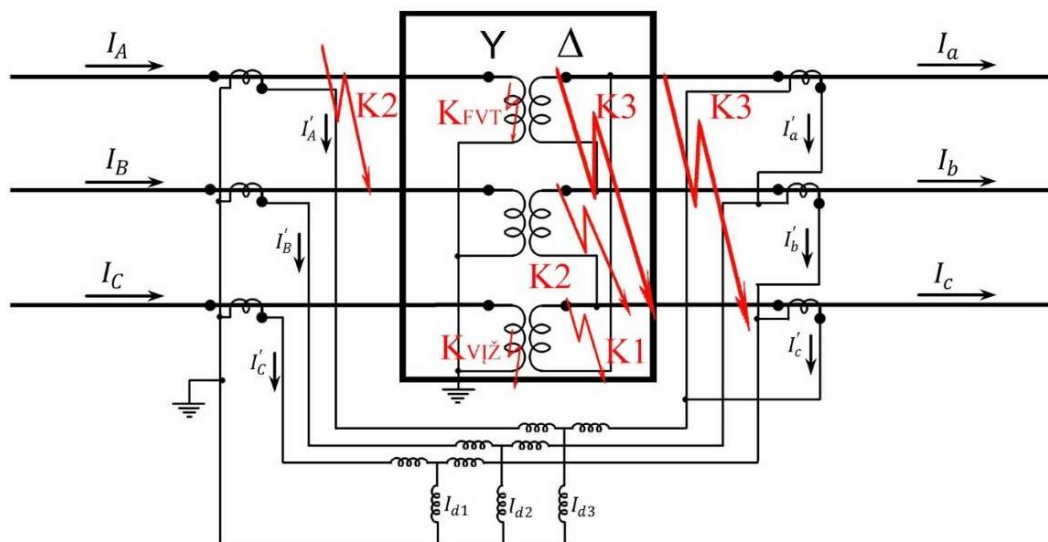
1.8. pav. kieto plieno; b – minkšto plieno; c – permalojaus [9]

Nanokristaliniai lydiniai - modernaus transformatoriaus magnetolaidžio pagrindas. Transformatoriai, kurių histerezės kilpos charakteristikos labai geros, gaminami iš nanokristalinės juostos, kurios storis 0,025-0,03 mm. Tokie lydiniai buvo taikomi pabaigoje 80 – jū. XX a. elektros pramonei JAV ir Japonijos, ir pradžioje 90 – jū. Jų gamyba buvo pradėta Rusijoje ir Ukrainoje. Kartais šiuos lydinius vadina amorfiniu lydiniu arba metaliniu stiklu. Nanokristalinių lydinių pagrindą sudaro geležis (73,5%), silicis (13,5%), boras (9%), niobis (3%) ir varis (1%). [10]

1.4. Pagrindinės galios transformatorių apsaugos

Transformatoriaus RAA apsaugos vykdo jo nepertraukiamą kontrolę. Atsiradus elektros tinkle nenormaliems darbo režimams RAA turi gebėti išskirti juos ir priklausomai nuo pažeidimo būsenos, vykdyti atjungimą arba automatines operacijas, reikalingas normalaus darbo režimo atstatymui, taip pat duoti signalą apie gedimą operatyvinio tinklo darbuotojui, kuris žmogiškai greitai, bet operatyviai turi vykdyti sprendimą, kaip pašalinti gedimą.

Dauguma gedimų elektros sistemose atsiranda dėl trumpųjų jungimų tarp fazių arba tarp fazių ir žemės. Esant didelėms trumpojo jungimo srovėms smarkiai išauga elektrodinaminės, kurios sukelia mechaninius pažeidimus. Būtent šie tinklo veiksniai smarkiai įtakoja ir galios transformatoriaus per kurį teka srovė, izoliacijos tarnavimo laiką. Dar izoliacijos pažeidimai atsiranda dėl jos senėjimo, tinklo viršįtampių ar šiaip mechaninių pažeidimų. [11]



1.9. pav. Galimi trumpieji jungimai transformatoriuje ir jo gnybtuose

Pagrindinės apsaugos saugant galios transformatorių nuo apvijų, šerdies ir aušinimo sistemos gedimų bei nenormalių režimų:

- a. Trifaziai ir dvifaziai trumpieji jungimai transformatoriaus korpuse esančiose apvijose ir ant gnybtų (1.9 pav. – K^3 ir K^2).

Naudojamos apsaugos: išilginė diferencinė apsauga, maksimaliosios srovės apsauga, dujinė apsauga.

- b. Vienfaziai trumpieji jungimai ir įžemėjimai (1.9 pav. – K^1 ir $K^{VIŽ}$) apvijose ir ant gnybtų.

Naudojamos apsaugos: nulinės sekos MSA, diferencinė apsauga, dujinė apsauga.

- c. Vienos fazės vijų trumpinimas (1.9 pav. – K^{FVT}).

Naudojamos apsaugos: diferencinė apsauga, dujinė apsauga.

- d. Nutolusių išorinių trumpojo jungimo apsaugų rezervavimas.

Naudojamos apsaugos: maksimaliosios srovės apsauga su uždelsimu.

- e. Simetrinė perkrova padidėjus apvijų srovei.

Naudojamos apsaugos: maksimaliosios srovės apsauga su specialia suveikimo trukmės charakteristika; temperatūros jutiklis, įjungiantis ventiliatorius.

- f. Magnetinės šerdies plieno perkaitimas dėl pablogėjusios izoliacijos tarp šerdies lakštų ar alyvos lygio pažemėjimas.

Naudojama apsauga: dujinė apsauga.

- g. Transformatoriaus šerdies magnetinio lauko neleistinas padidėjimas (įsisotinimas).

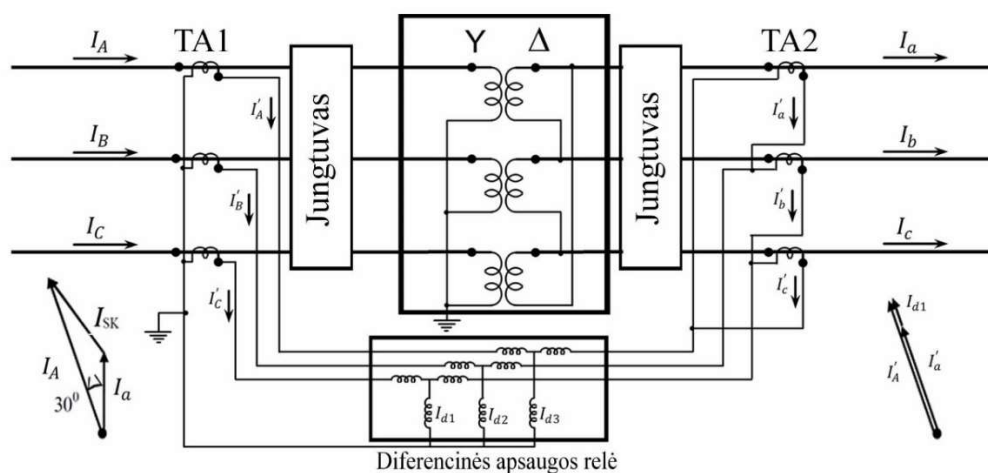
Naudojama apsauga: speciali per didelio šerdies įsisotinimo apsauga, reaguojanti į $\Delta U/\Delta f$ padidėjimą. [12]

Apžvelgus relinės apsaugos ir automatikos apsaugas, saugančias galios transformatorių nuo nenormalių darbo režimų, buvo nustatyta, kad transformatoriaus apsaugai dažniausiai naudojama

transformatoriaus diferencinė apsauga. Kadangi diferencinės apsaugos veikimo principas pagrįstas srovės skirtumine apsauga, atjungiant elektros srovės grandinę skirtuminei srovei pasiekus maksimalios skirtuminės srovės vertę. Ši apsauga saugo galios transformatorių nuo apvijos įžemėjimo taip pat vienfazio, dvifazio ir trifazio trumpojo jungimo transformatoriaus korpuse esančiose apvijose ar ant gnybtų. Diferencinės apsaugos pagal savo veikimo principą gali būti tik selektyvios, jos veikia su nuliniu laiku, be uždelimo, nesvarbu ar galios transformatorius maitinamas iš vienos, ar iš dviejų pusių.

1.5. Diferencinė galios transformatoriaus apsauga

Transformatoriaus diferencinė, skirtuminės srovės apsauga. Ši RAA apsauga yra skirta saugoti tik konkrečiai pasirinktą vieną įrenginį. Ji greitai ir jautriai apsaugo transformatorius nuo vienfazių, dvifazių ir trifazių trumpųjų jungimų, atsirandančių bako viduje ir ant transformatoriaus išvadų.

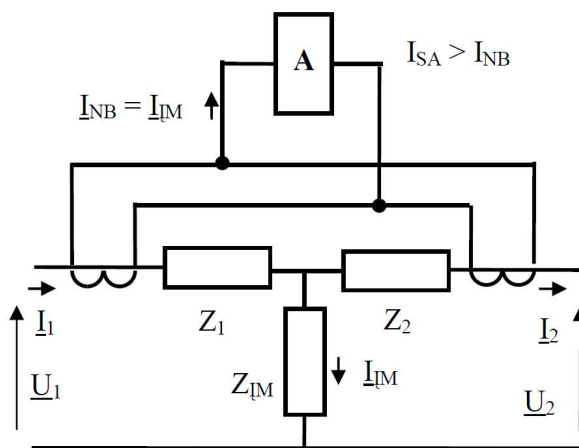


1.10. pav. Diferencinės apsaugos relės pajungimas

Dažniausiai pasitaikantis aukštos ar žemos įtampos galios transformatoriaus jungimo būdas parodytas 1.10 paveiksle. Atvaizduotas pirminę ir antrinę apvijas turintis transformatorius, kurio sujungimo grupė pagal įžemintos žvaigždės ir trikampio schemą. Dėl skirtingų jungimo grupių transformatoriaus normalaus darbo metu apvijų srovės (pvz., I_A ir I_a) skiriasi savo dydžiu ir faze. Fazinio kampo skirtumas yra 30° . Išorinio trumpojo jungimo metu, kai trumpas jungimas įvyksta linijoje, šis skirtumas (I_{SK}) didėja ir konfigūruojant apsaugų relę apsaugos jautrumą reiktų parinkti labai didelį ir tai neužtikrintų jos jautrumo, kadangi apsaugos suveikimo srovė turi būti didesnė už nebalanso srovę ($I_{SK} > I_{d1}$). Analogišką įtaką nebalanso srovės didėjimui turi transformatoriaus apvijos įtampos reguliavimas (atšakų perjungimas) darbo metu. Nebalanso srovę galima sumažinti pasukant žvaigžde sujungtos apvijos antrinės srovės (I_a) fazę. [12] Ankščiau kol nebuvo sukurtos skaitmeninės RAA apsaugų relės, nebalanso srovė buvo mažinama taip pat sujungiant srovės transformatorių TA2 antrines apvijas trikampiu. Tada belikdavo parinkti srovės transformatorių

koeficientus taip, kad antrinių srovių modulių (I_A ir I_a) skirtumas būtų minimalus. Dabartinėse naudojamose skaitmeninėse transformatoriaus diferencinės apsaugos relėse, konfigūravimo metu yra nurodomos galios ir srovės transformatoriaus jungimo grupės bei transformacijos koeficientai. Iš kurių apsaugų relė supranta ir pati persiskaičiuoja gaunamų srovės dydžių parametrus bei fazinių kampų skirtumus.

Dar viena nebalanso srovės atsiradimo priežastis – transformatoriaus įmagnetinimo srovės padidėjimas transformatoriaus įjungimo momentu ar staigiai pakitus įtampai linijoje, prijungus kita galios transformatorių esantį už saugomo. Įmagnetinimo srovės įtaka diferencinės apsaugos nebalanso srovės padidėjimui atvaizduota transformatoriaus atstojojamojoje schemoje su diferencine apsauga (1.11 pav.). Joje priimta, kad transformatoriaus koeficientas lygus vienetui. Srovės transformatorių koeficientai taip pat lygūs vienetui. Z_1 – pirminės apvijos varža, Z_2 – antrinės apvijos varža, Z_{IM} – šerdies įmagnetinimo varža. [12]



1.11. pav. Transformatoriaus atstojojamoji schema su diferencine apsauga [8]

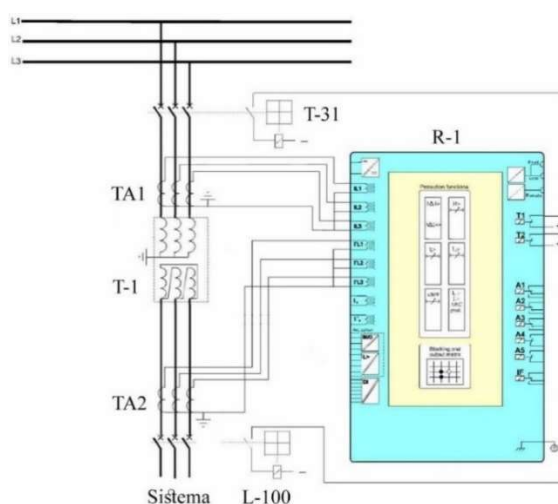
Schema rodo, kad įmagnetinimo srovė (I_{IM}) lygi nebalanso srovei (I_{NB}). Transformatoriaus normalaus darbo metu ši srovė sudaro kelis procentus nuo vardinės srovės ir nedaro didesnės įtakos apsaugos suveikimo srovės parinkimui. Įjungiant transformatorių tuo metu keletą kartų padidėja įmagnetinimo srovės. Todėl diferencinės apsaugos suveikimo srovė turėtų būti atitinkamai padidinta ir dėl to apsauga gali netenkinti jautrumo reikalavimo ($k_J = I_{Kmin}/I_{SA} > 2$). Senose RAA apsaugose jautrumas buvo didinamas įjungiant dažnio filtras apsaugos relės grandinėje. Nes įmagnetinimo srovė turi dideles aperiodinės nuolatinės srovės ir pagrindinės pirmos ir antrosios harmonikos dedamąsias. Užtveriant jų srovės kelią į relės apviją galima sumažinti relės A suveikimo srovę (I_{SA}). Atsiradus skaitmeninėms, loginiu uždaviniams suprantančioms relėms, srovės filtrais nebemažinamos. Panaudojus loginius elementus yra sudaroma apsaugos suveikimo charakteristika, kurios veikimo principas yra pagrįstas nebalanso srovės ignoravimu, blokuojant jungtuvo atjungimą, tinkle vyraujant 2-os ir 5-os eilės harmonikoms.

1.6. Diferencinės apsaugos relės veikimo ypatumai

Diferencinės apsaugos relės naudojamos saugoti transformatoriams, skirstyklų šynomams, aukštos įtampos elektros varikliams ir generatoriams. Lietuvoje naudojamų sertifikuotų ir praktiškai patikrintų skaitmeninių relių tipų, kurias į rinką pateikia tokie gamintojai, kaip „Siemens“, „ABB“, „Schneider Electric“ ir t.t. Šių įrenginių veikimo principas pagrįstas tokiu pat analogišku veikimu. Šiose skaitmeninėse relėse centrinis mazgas yra mikroprocesorius, kuris sprendžia uždavinius ir per savo įėjimo-išėjimo įrenginius keičiasi informacija su periferiniais mazgais. Šių mazgų pagalba vyksta mikroprocesoriaus sąveika su išorine aplinka, valdymo objektais, informacijos jutikliais ar dispečerinio pulto operatoriais. Viename įrenginyje gali būti keli mikroprocesoriai, kurie atlieka atskirus, bendros užduoties, fragmentų skaičiavimus. [12]

Diferencinę apsaugą atliekančios relės yra naudojamos greitam, tiksliam ir selektyviam įrenginio atjungimui nuo tinklo, atsiradus nenormaliems tinklo režimams. Skaitmeninės relės gaminamos universalios, kurias galima suparametrizuoti keliems skirtingiems, trijų ar dviejų apvijų transformatoriams. Srovės grandinių pajungimo schema galios transformatoriaus apsaugai pavaizduota 1.12 paveiksle.

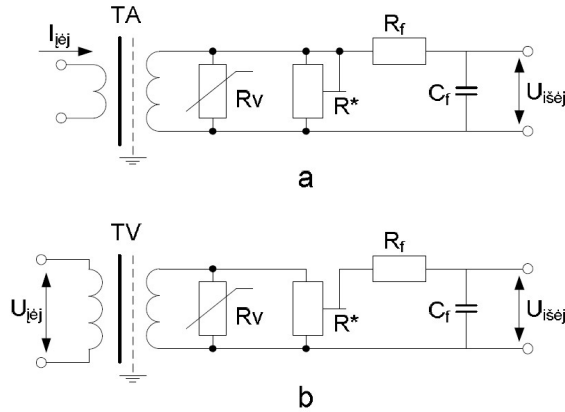
- Čia: L1, L2 ir L3 trifazis 50hz įtampos tinklas;
T-31 ir L-100 trifaziai jungtuvai, su pavarom.
TA1 ir TA2 srovės transformatoriai;
T-1 dviejų apvijų trifazis galios transformatorius;
R1 skaitmeninės diferencinės apsaugų relės blokas.



1.12. pav. Diferencinės relės srovės grandinių pajungimo schema

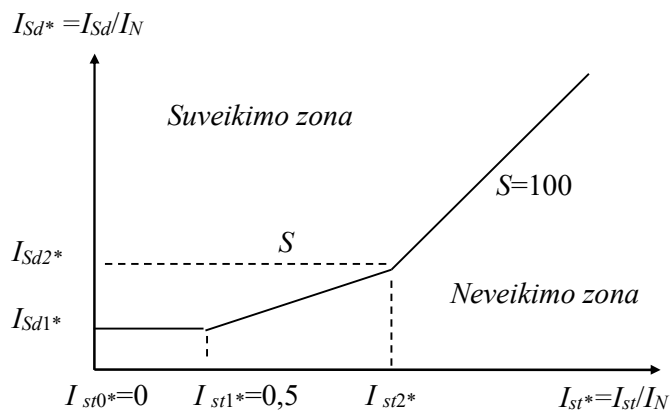
Skaitmeninių įrenginių įėjimo signalų keitiklį sudaro paprasti elektromagnetiniai transformatoriai su feromagnetine šerdimi. Jie plačiai paplitę ir naudojami apsaugų gamybai, nes atitinka 2-5 proc. tikslumo klasę. 1.13 paveiksle pavaizduotuose transformatoriniuose keitikliuose parodytas vienas iš būdų tarp vijinei talpai mažinti, kad į įrenginio vidų nepatektų impulsinis trukdis.

Paprasciausiai būdu panaudojus mažai energijos naudojančius varžinius šuntus srovės signalai keičiami į įtampas. Elektriniams mazgams apsaugoti nuo viršįtampių naudojami plačiai paplitę varistoriai R_v ir žemų dažnių filtrai. Žemų dažnių filtro efektyvumas pagrįstas tuo, kad impulsinių trikdžių energija sutelkta aukštadažnėje spektro dalyje. Praleidžiamo signalo pločio apribojimas aukštų dažnių srityje būtinas geram analoginio skaitmeninio keitiklio veikimui, nekreipiant dėmesio į tai, ar bus naudojamas skaitmeninis signalų filtravimas, ar ne. [14]



1.13. pav. Įėjimo keitikliai. a) srovės transformatorius b) įtampos transformatorius

Transformatoriaus diferencinės apsaugos relė turi suveikti tik tada, kai srovės nutekėjimas aptinkamas saugomame įrenginyje. Įvykus trumpam jungimui jos saugomos zonos taške srovė I_1 gerokai išauga, o srovė I_2 keičia kryptį ir diferencinės apsaugos relė išskaičiavus nebalanso srovę I_{NB} siunčia signalą jungtuvui į atjungimą. Kai trumpas jungimas įvyksta linijoje, už diferencinės apsaugos zonos, nepaisant padidėjusių srovių, diferencinė apsauga turėtų neveikti, nors ir trumpojo jungimo metu išaugančios nebalanso srovės I_{NB} , kurios atsiranda dėl transformatoriaus indukuotos srovės atsilikimo, relėse naudojamos 1.14 paveiksle pavaizduota apsaugos su stabilizuota suveikimo charakteristika.



1.14. pav. Stabilizuota diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika [2]

Čia: I_{Sd1}^* – diferencinės apsaugos suveikimo srovė pirmoje charakteristikos dalyje, A; I_{St2}^* – antrosios charakteristikos dalies pabaigos taškas, A;
 S – antrosios charakteristikos dalies statumas, % ($S = \Delta(I_{Sd}/I_N) / (\Delta I_{St}/I_N) \times 100$ %).

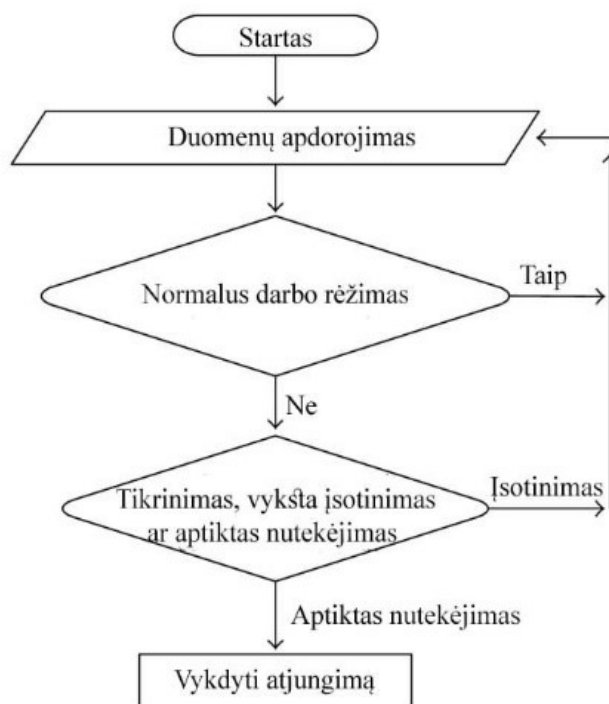
Praktika rodo, kad relės su stabilizuota suveikimo charakteristika veikia gana jautriai esant tiek mažoms, tiek didelėms srovėms I_1 ar I_2 . Jų suveikimo srovė priklauso nuo srovių I_1 ir I_2 skirtumo I_{sd} ir sumos I_{st} . [15]

$$I_{sd} = \frac{I_1 - I_2}{I_N}; \quad I_{st} = \frac{I_1 + I_2}{2}; \quad (1.6.1)$$

Čia: I_N – transformatoriaus apskaičiuota nominali fazinė srovė.

Kaip matome 1.14 paveiksle, stabilizuota diferencinės apsaugos charakteristika susideda iš trijų dalių. Pirmoje, kai $I_{st} < 0,5$, suveikimo srovė nekinta ir yra lygi I_{sd1*} . Antroje $0,5 < I_{st} < I_{st2*}$, suveikimo srovė didėja nuo I_{sd1*} iki I_{sd2*} statumu S , kuris yra parenkamas konfigūruojant relę. Trečioje dalyje, kai $I_{st} > I_{st2*}$, suveikimo srovė toliau didėja, atstumas gali būti fiksuotas ir lygus nuo 100 iki 200%.

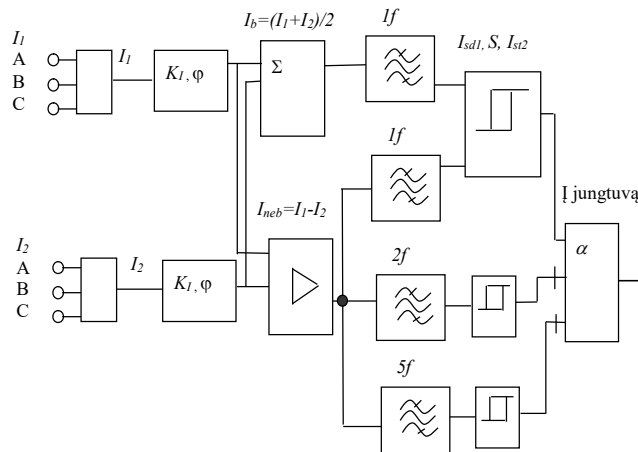
Šiuolaikinėse skaitmeninėse relėse diferencinės apsaugos veikimas pagristas loginiais elementais, kurių pagalba galima sukurti specialią, nestandartiškai veikiančią, apsaugą. Diferencinė apsaugos logikos sudarymo schema pavaizduota 1.15 paveiksle. Šis logikos algoritmas pagristas skirtuminės srovės stiprio ir harmonikų stebėjimu. [16]



1.15. pav. Diferencinės apsaugos relės veikimo loginė schema

Diferencinei transformatoriaus apsaugai skaitmeninėse relėse naudojami panašūs skaičiavimo algoritmai, kaip parodyta 1.16 paveiksle. Kadangi dirbant transformatoriui normaliu režimu jo pirminė ir antrinė srovės yra skirtingų dydžių, tačiau proporcingos viena kitai, naudojant transformatoriaus transformacijos koeficientus K_1 yra suvienodinamos. Taip pat jei transformatoriaus apvijos sujungtos skirtingu būdu mūsų atveju ($Y/\Delta=11$), tai reikalinga ir srovių fazių korekcija. Kuri

taip pat atliekama programiškai relėje naudojant transformatoriaus apvijų jungimo indeksą nuo 0 iki 11, kuri automatiškai srovės vektorių, šiuo atveju, nukrypusi 30^0 kampu suvienodina. Standartiškai tokiose relėse jau būna paruošti pagrindinės pirmos, antros ir penktos harmonikų filtrai. Kurie išskaičiuoja ir suformuoja diferencinės apsaugos blokvimo signalus, transformatoriaus įjungimo metu, kai tam tikrą laiką vyrauja aukšta įsisotinimo srovė, kuri sudaryta iš visos eilės srovės harmonikų dedamųjų. [2]



1.16. pav. Struktūrinė diferencinės apsaugos relės schema [2]

Čia: K_t, φ – perdavimo koeficiento ir fazės kampo koregavimo blokas,
 $1f, 2f, 5f$ – filtrai, išskiriantys pirmosios, antrosios ir penktosios harmonikų vertes

1.7. Pereinamojo proceso modeliavimas MATLAB programa.

Procesų modeliavimas yra fizinio proceso pakeitimas matematinių lygčių rinkiniu. Modeliavimas taikomas norint efektyviai išanalizuoti kuriamų ar veikiančių įrenginių darbą. Įdiegiant MATLAB programą į kompiuterį gauname visą programos branduolį, su ja kartu pateikiama visa grupė programų paketų, skirtų spręsti įvairioms užduotims. MATLAB aplinkai yra sukurta platus kiekis paketų, kurie skirti konkrečioms tikslams. Šioje programoje paskirstyto skaičiavimo paketas dirba su MATLAB paskirstytų skaičiavimų varikliu ir leidžia stambius MATLAB algoritmus, naudojant SIMULINK modelius, vykdyti kompiuterinėje programoje. Taip pat galima „simulink“ aplinkoje naudoti ir jau paruoštus pavydžius tiesiog keičiant jų vidinius parametrų nustatymus.

Programinio produkto MATLAB pagrindinės taikymo sritys: [18]

- Matematiniai skaičiavimai;
- Modeliavimo eksperimentai, imitacinis modeliavimas;
- Duomenų analizė, rezultatų tyrimas ir jų pateikimas;
- Mokslinė ir inžinierinė grafika;

Matematiniai sistemų ir procesų modeliai yra apytikriai realios tikrovės atvaizdai, skirti įvairiems taikomiesiems uždaviniams spręsti. Tačiau apytikriai sistemų modeliai dažnai gali būti naudingi projektuojant technologijas ar tiriant sistemų funkcionalumą ekstremaliomis sąlygomis. Kai tokius tyrimus pavojinga ar rizikinga atlikti realioje sistemoje. Modeliais galima tirti sistemų atsaką į įvairius trikdžius, tirti procesų ir sistemų dinamiką. Viena iš pagrindinių matematinio modelio sričių moksliniams tyrimams ir technologijoms kurti yra modeliuoti taikant laboratorinius eksperimentus. MATLAB programos „simulink“ aplinkoje galima atlikti bandymus tiriant elektros tinkus. Joje yra paruošti išdirbti pavyzdžiai, reikia žinoti ar apskaičiuoti tikslius įrenginių duomenis ir juos įvedus tam skirtose tiriamo elemento (bloko) vietose, galima atlikti jų imitacinį bandymą. Todėl išmokus naudotis MATLAB programa, modeliuojant galima atlikti visų norimų elektros tinklų bandymus. Iš pavyzdinių blokų galima surinkti norimo dydžio ir galingumo tinklus, kurie kaip ir tikrovėje bus sudaryti iš kintamos ar nuolatinės srovės sistemos šaltinio, linijų, šynų blokų, sroves, įtampos ar galios transformatorių ir vartotojų blokų. Galima tirti ir kiekvieną pasirinktą įrenginį individualiai, analizavimusi atliekant labai siaurame bandymo spektre. [18]

Pagrindinės „simulink“ sistemos savybės:

- Gausi blokų biblioteka: tiesinėms, netiesinėms, tolydžioms, diskrečiosioms, hibridinėms sistemoms konstruoti;
- Tiesioginis priėjimas prie MATLAB sistemos matematinų, grafinių ir kitų funkcijų. Iš „simulink“ sistemos galima tiesiogiai analizuoti duomenis, automatizuoti procedūras bei optimizuoti reikiamus parametrus;
- Interaktyvus modeliavimas su tarpiniais rezultatų atvaizdavimais;
- Neribota hierarchinė modelio struktūra;
- Įvairūs fiksuoto ir kintamojo žingsnio integravimo metodai dinaminėms sistemoms modeliuoti;
- Skaliariniai ir vektoriniai blokų sąryšiai;
- Vartotojui suteikta galimybė susikurti savo blokus ir blokų bibliotekas;
- Įvairių MATLAB įrankių iš užduočių juostos iškvietimas.

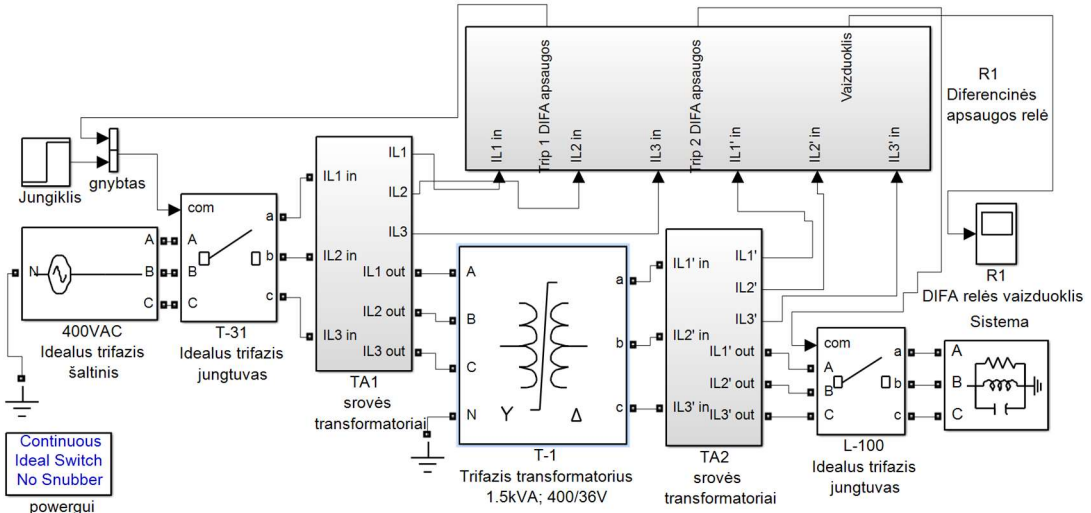
Kadangi „simulink“ sistemos architektūra pakankamai atvira, vartotojas gali pats lengvai pradėti modeliavimo aplinką. Naudojant MATLAB programą, „simulink“ aplinkoje 1.17 paveiksle sukurtas ir pavaizduotas principinės modelio schemas pavyzdys, blokų visuma reikalinga transformatoriaus pereinamojo proceso tyrimui.

Šio modelio sistemą transformatoriaus pereinamajam procesui tirti sudaro:

- Idealus trifazis 50hz 400VAC įtampos šaltinis;
- Idealus T31 trifazis jungtuvas, su pavara. Su galimybe jį valdyti ir gali būti įjungtas per

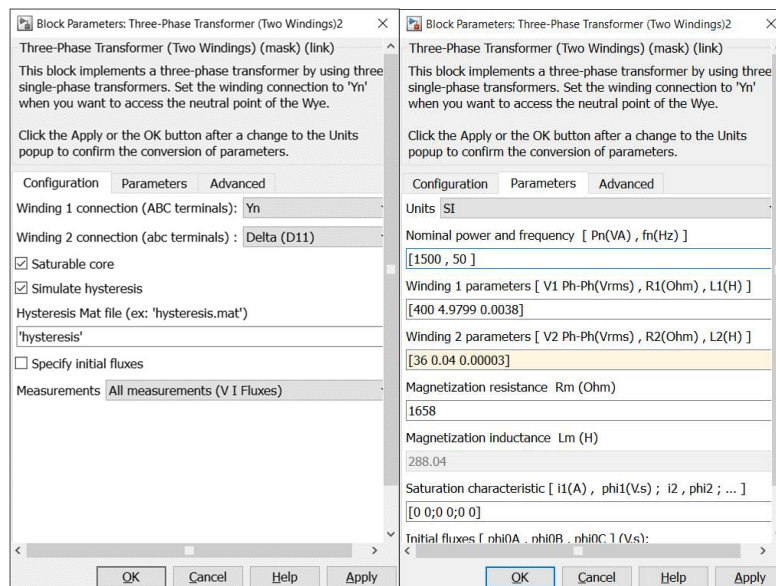
tašumą ar išjungtas nuo RAA apsaugų.

- TA1 ir TA2 srovės transformatoriai;
- T-1 tiriamasis trifazis galios transformatorius 1,5 kVA, 400/36V;
- R1 diferencinės apsaugų relės imitacinis blokas, su aprašomais algoritmais.
- Idealus T32 trifazis jungtuvas, su pavara.
- Sistema (sistemos imitatorius, tinklo apkrova ar elektros energijos vartotojai).



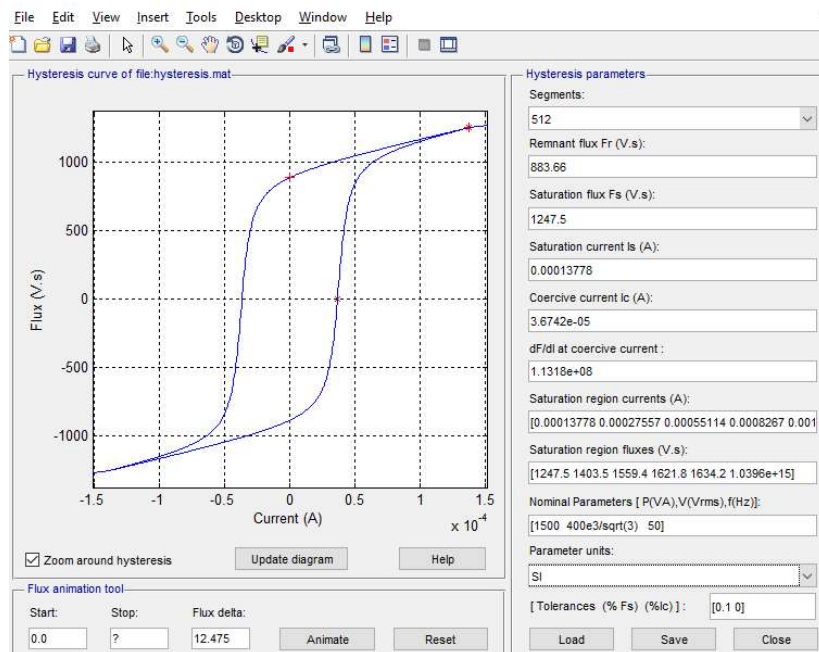
1.17. pav. Transformatoriaus pereinamojo proceso tyrimo blokų modelis

MATLAB matematinė funkcijų biblioteka yra skaičiavimo algoritmų rinkinys, apimantis nuo elementarių funkcijų, tokių kaip suma, daugyba, sinusas, kosinusas, iki sudėtingesnių funkcijų, tokių kaip matricų inversija, greitosios Furje transformacijos. Kaip buvo minėta anksčiau, „simulink“ galima naudoti ir jau paruoštus pavydžius tiesiog keičiant jų parametrų nustatymus, bei naudojantis pagalbos įrankiais sužinoti parametro reikšmes. Tai yra efektyvi platforma, leidžianti naudoti duomenis iš bylų, kitų programų, duomenų bazių, išorinių įrenginių.



1.18. pav. Transformatoriaus bloko parametrų įvedimo lentelės

Kaip pavaizduota 1.18 paveiksle, „simulink“ aplinkoje iš pavyzdžių pasirinkę trifazį galios transformatorių, galima keisti jo parametrus, juos pritaikant prie savo tiriamo transformatoriaus duomenų. Taip pat redaguojant nustatymus, galima keisti transformatoriaus galią ir tinklo dažnį, suvesti apskaičiuotas ir gautas transformatoriaus pirmos bei antros apvijios reikšmes, taip pat keisti įsimagnetinimo charakteristikas. [19; 20]



1.19. pav. Transformatoriaus bloko šerdies įsisotinimo charakteristika

MATLAB turi plačias galimybes grafiškai vaizduoti tiriamus duomenis. Ji turi aukšto lygio funkcijas dvimačiams ir trimačiams duomenų vaizdavimui, vaizdų apdorojimui ir animacijai. Šie įrankiai smarkiai gelbsti norint skaičius atvaizduoti grafiškai. Taip pat grafikus galima keisti pridėdant papildomų ašių, keisti linijų storį ir spalvą. [18] MATLAB taip pat grafiniam atvaizdavimui naudoja parametrus. Pasirinkę funkciją „simulate hysteresis“ ir „Hysteresis Desing Tool“ galima suvesti transformatoriaus feromagnetinės šerdies įsisotinimo charakteristiką ir ją matyti tuo pat metu grafiškai atvaizduotą ekrane. Transformatoriaus šerdies įsisotinimo charakteristika pavaizduota 1.19 paveiksle. [21] Pagrindinė įmagnetėjimo kreivė ir histerezės kilpa apibūdina medžiagų magnetines savybes. Lyginant kreivę su atvaizduotomis 1.8 paveiksle pastebime, kad MATLAB programuotojai ir tyrėjai transformatoriui numatė vidutinę, tarp kieto ir minkšto plieno parinktą, šerdį.

1.8. Informacijos šaltinių apibendrinimas

Prieš pradėdant tyrimą susipažinta su tiriamuoju objektu. Apžvelgta jo konstrukcija, panaudojimo sritys ir jo veikimo principus. Atliekant informacijos šaltinių analizę buvo išsiaiškintas ir pateiktas transformatoriaus parametrų skaičiavimo algoritmas. Taip pat buvo išaiškinta, kad transformatoriaus šerdis pagaminta iš feromagnetinio plieno, kuriame pasireiškia magnetinė histerezė. Tai transformatoriaus feromagnetinės šerdies soties kreivė. Ši kreivė atspindi transformatoriaus sotinimą, kurį parodo kreivės netiesiškumas. Prijungiant transformatorių prie sinusinės įtampos (prie elektros tinklo), jo magnetolaidžio srautas kinta panašiai kaip trumpojo jungimo srovė. Šią srovę sudaro trumpojo jungimo metu pasireiškianti nuolatinė aperiodinė srovės dedamoji ir visa kita eilė srovės harmonikų dedamųjų. O pereinamajam procesui nusistovėjus toliau transformatorius dirba tuščiąja eiga.

Apžvelgiant pagrindines apsaugas, naudojamas saugoti galios transformatorių nuo apvijų, šerdies ir aušinimo sistemos gedimų bei nenormalių režimų, buvo išaiškinta, kad transformatoriaus apsaugai dažniausiai naudojama diferencinė apsauga. Ši apsauga saugo galios transformatorių nuo apvijų išžemėjimo taip pat vienfazio, dvifazio ir trifazio trumpojo jungimo transformatoriaus korpuse esančiose apvijose ar ant gnybtų. Atsiradus elektros tinkle nenormaliems darbo režimams ji turi gebėti išskirti juos ir priklausomai nuo pažeidimo būsenos, vykdyti atjungimą arba automatines operacijas, reikalingas normalaus darbo režimo atstatymui. Todėl reikia konfigūruojant relinės apsaugos įrenginį ji tinkamai paruošti darbui, o tai galima padaryti tik žinant įrenginių darbo procesus. Yra sudaroma apsaugos suveikimo charakteristika. Šios charakteristikos principas veikia procentais įvertinant srovės dydį, nuo apskaičiuotos transformatoriaus vardinės srovės. Tačiau staigiai padidėjus skirtuminei srovei ir viršijant suveikimo charakteristikos nustatymus bet tuo metu vyraujant antros ar penktos eilės aukštesniosioms harmonikoms, relė blokuoja transformatoriaus atjungimą ir jo neatjungia. Praktikoje yra žinoma, kad šios eilės harmonikos srovės yra didžiausios tik transformatoriaus magnetolaidžio įsotinimo metu. O esant trumpam jungimui jos nepasireiškia. Tačiau išanalizavus literatūros šaltinius nustatyta, kad trūksta rekomendacijų, kokias reikšmes parinkti transformatoriaus diferencinės apsaugos antros ir penktos harmonikos nustatymams.

Taip pat buvo išaiškinta, kad šį pereinamąjį procesą galima atlikti MATLAB programa, naudojant „simulink“ aplinką. Šie sistemų modeliai dažnai gali būti naudingi projektuojant technologijas ar tiriant sistemų funkcionalumą ekstremaliomis sąlygomis. Žinant galios transformatoriaus tikslius duomenis, galima atlikti tiriamąjį pereinamąjį procesą įjungimo momentui iš blokų sudarant modelį „simulink“ aplinkoje.

2. TIRIAMOJI DALIS

2.1. Tyrimų tikslas ir uždaviniai

Tyrimų tikslas:

Ištirti trifazių galios transformatorių įjungimo momentu atsirandančias pereinamojo proceso sroves ir įvertinti jų galimą poveikį diferencinei apsaugai.

Tyrimų uždaviniai:

1. Atlikti transformatorių parametrų skaičiavimus, nustatyti nominaliojo režimo įtampų, srovių, ir visus kitus redukuotuosius parametrus, reikalingus transformatoriaus tyrimui atlikti.
2. Atlikti realų eksperimentinį tyrimą pasirinktiems trifaziams galios transformatoriams ir ištirti pereinamąjį procesą transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu.
3. MATLAB programoje „simulink“ aplinkoje pasirinktiems galios transformatoriams sukurti analogišką modelį. Atlikti eksperimentinį tyrimą ir ištirti pereinamąjį procesą transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu.
4. Sudaryti stabilizuotą diferencinės apsaugos suveikimo charakteristiką ir patikrinti diferencinės apsaugos veikimą/neveikimą transformatoriaus įjungimo momentu.
5. Pateikti išvadas.

2.2. Trifazio transformatoriaus eksperimentinis tyrimas

Šiame darbe yra tiriami trys skirtingų tipų trifaziai galios transformatoriai. Tyrimo metu buvo tiriamas fizinis transformatoriaus prijungimas prie elektros tinklo. Visi pasirinkti dviejų įtampų transformatoriai yra žeminantieji, vienas jų pavaizduotas 2.1 paveiksle, o pagrindiniai duomenys, reikalingi skaičiavimams atlikti, pateikti 2.1 lentelėje. Analizuojant literatūrą buvo nustatyta, kad prijungiant neapkrautą transformatorių prie tinklo, tam tikrą laiko momentą vykstant magnetolaidžio įsotinimui, magnetolaidžio srautas kinta panašiai kaip trumpojo jungimo srovė ir gali būti daugiau kaip du ar net keturis kartus didesnis už apskaičiuotą nominalią fazinę srovę. Šį srautą sudaro įvairių srovės harmonikų dedamosios. Pagrindinės įmagnetinimo srovės susideda iš aperiodinės nuolatinės srovės ir pagrindinės pirmos bei jos kartotinės antros harmonikos dedamosios. Senose relinės apsaugos įrenginiuose jautrumas buvo didinamas įjungiant dažnio filtrus relės srovės grandinėje. Užtveriant jų srovės kelią į relės apviją buvo galima smarkiai sumažinti nebalanso srovė suveikimo srovę. Šiuolaikinėse skaitmeninėse relės srovės grandinėse tokie filtrai nebėra naudojami. Yra sudaroma apsaugos suveikimo charakteristika pavaizduota 1.14 paveiksle. Šios charakteristikos principas veikia procentais įvertinant srovės dydį, nuo apskaičiuotos transformatoriaus vardinės srovės. Staigiai padidėjus skirtuminei srovei ir tuo metu vyraujant antros ar penktos eilės

aukštesniosioms harmonikoms, relė blokuoja transformatoriaus atjungimą ir jo neatjungia. Tyrimais įrodyta, kad šios eilės harmonikos srovės yra didžiausios tik transformatoriaus magnetolaidžio įsotinimo metu.



2.1. pav. Tiriamasis trifazis galios transformatorius

Darbo tiriamojoje dalyje atlikti transformatorių parametrų skaičiavimai, nustatyti nominaliojo režimo įtampų, srovių, ir visi kiti redukuotieji parametrai reikalingi transformatoriaus tyrimui atlikti. Atliktas realus eksperimentinis tyrimas pasirinktiems, skirtingų galių, trifaziams galios transformatoriams apimantiems diapazoną nuo 1,5kVA ir 25MVA. Tyrimo metu ištirtas pereinamasis procesas, transformatorių prijungimo prie tinklo metu. Naudojant MATLAB programą „simulink“ aplinkoje pasirinktiems trifaziams galios transformatoriams sukurtas analogiškas modelis atitinkantis realią situaciją. Atliktas eksperimentinis tyrimas ir ištirtas pereinamasis procesas transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu. Sudaryta stabilizuota diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika ir patikrintas diferencinės apsaugos veikimas/neveikimas transformatoriaus prijungimo prie tinklo momentu. Atlikus realų ir eksperimentinį tyrimą duomenys buvo pateikti grafiškai, o išanalizavus gautus rezultatus pateiktos išvados.

2.1 lentelė. Tiriamų transformatorių pagrindiniai duomenys

Tipas	Galia, kVA	Įtampa, kV	Jungimo, grupė.	Tuščios eigos nuostoliai P_0 , kW	Trumpojo jungimo nuostoliai, P_k , kW	Tuščios veikos srovė, $I_0\%$, %	Trumpojo jungimo įtampa, $U_k\%$, %
TC-1,5	1,5	0,4/0,036	$Y_n/d-11$	0,025	0,070	12	4,8
TRN2500	2500	115/10,5	$Y_n/d-11$	3,59	12,34	1,5	11,37
TRP25000	25000	115/27,5	$Y_n/d-11$	10,73	109,35	1	10,75

2.2.1. Eksperimentinio tyrimo metodika

Pirmojo TC-1,5 transformatoriaus eksperimentiniai diferencinės apsaugos tyrimai buvo atlikti KTU laboratorijoje. Kitų dviejų TRN2500 ir TRP25000 prijungimas prie tinklo įvyko akcinei bendrovei „Lietuvos geležinkeliai“ priklausančioje „Traukos“ 110/27/10kV transformatorių pastotėje. Pereinamojo proceso duomenų analizavimui visais atvejais tuoj pat po transformatoriaus įjungimo buvo nuskaityti relės atmintyje sukaupti transformatoriaus įjungimo metu fiksuoti duomenys.

Pirmojo transformatoriaus eksperimentiniai diferencinės apsaugos tyrimai buvo atlikti naudojant ABB šeimos SPAD346 C skaitmeninę relę. Jos bendra išorės išvaizda pavaizduota 2.2 paveiksle. [22]. Kitų dviejų atliktų eksperimentų metu duomenų nuskaitymui pereinamojo proceso metu buvo naudojama „Schneider Electric“ dažnai transformatorių, generatorių ir variklių apsaugoms naudojama VAMP V265 diferencinės apsaugos skaitmeninė relė. Analizuojant literatūrą buvo išsiaiškinta, kad skaitmeninių diferencinės apsaugos relių veikimo principas toks pat.



2.2. pav. ABB SPAD 346 C diferencinės apsaugos relė

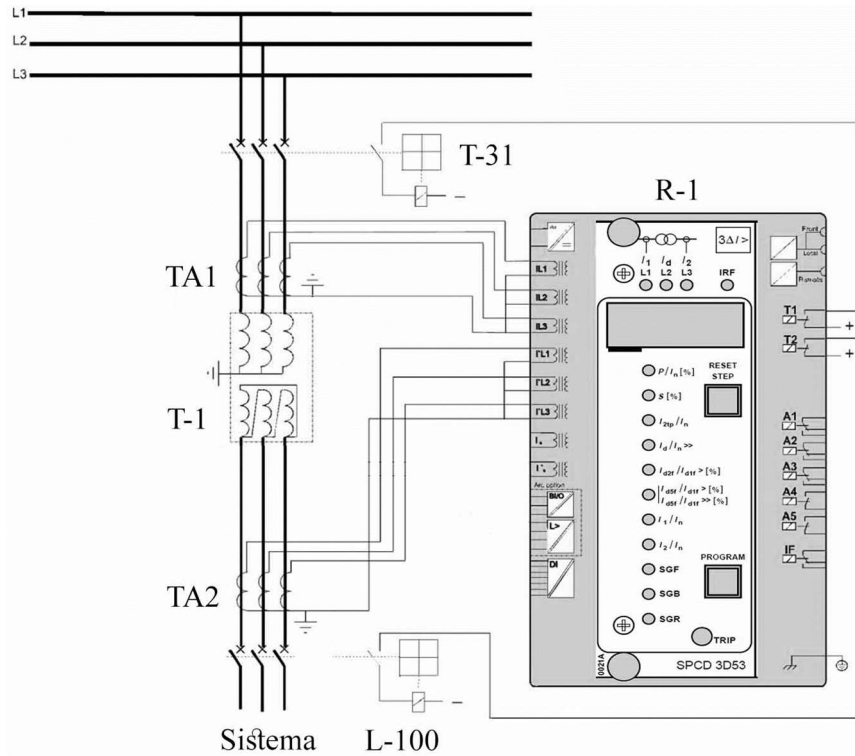
Šios skaitmeninės relės vienas iš blokų SPCD 3D53 panaudotas galios transformatoriaus prijungimo prie tinklo pereinamojo proceso tyrimui. Tyrimai atlikti relės bloką pajungianti prie tinklo kaip pavaizduota 2.3 paveiksle. Transformatoriaus apvijos sujungtos trikampis/žvaigždė ($Y_n/\Delta - 11$).

Šio bandymo sistemą transformatoriaus pereinamajam procesui tirti sudaro:

- Trifazis 50hz 400VAC įtampos tinklas;
- T-31 ir L-100 trifaziai jungtuvai, su galimybe juos valdyti ar išjungti nuo RAA apsaugų.
- TA1 ir TA2 srovės transformatoriai;
- T-1 tiriamasis dviejų apvijų trifazis galios transformatorius;
- R1 diferencinės apsaugų relės imitacinis blokas, su aprašomais algoritmais.
- Sistema.

Tyrimams pasirinktas turimas KTU laboratorijoje TC-1,5 rusiškas galios transformatorius, kuris pajungtas per trifazį jungtuvą prie 400 VAC elektros tinklo. Nuosekliai elektros grandinėje įmontuoti N3 tipo žemos įtampos srovės matavimo transformatoriai skirti komercinei elektros

energijos apskaitai, tinkluose esant 50 arba 60 Hz kintamai srovei. Transformatoriai jautrūs jų transformacijos koeficientas yra 5/1A ir 0,5s tikslumo klasės. Kad laidų nuostoliai neturėtų įtakos rezultatams, sujungimams naudojome kuo trumpesnius atstūmus ir keturių kvadratinį milimetrų NYCY firmos lanksčius varinėmis gyslomis laidus. Prieš pradėdant relės parametrizavimo darbus buvo atlikti transformatoriaus parametrų skaičiavimai, kurių skaičiavimų algoritmas pateiktas analizuojant literatūrą. Transformatoriaus duomenys reikalingi skaičiavimams atlikti imti iš 2.1 lentelės.



2.3. pav. ABB SPCD 3D53 relės pajungimo schema

2.2.2. Parametrų skaičiavimas

Apskaičiuota vienos fazės įtampa;

$$U_{1f} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{400V}{\sqrt{3}} = 230V; \quad (2.2.1)$$

Apskaičiuota pirminės apvijios nominali fazinė srovė;

$$I_{1f} = \frac{S}{3 \cdot U_{1f}} = \frac{1500VA}{3 \cdot 230V} = 2,165A; \quad (2.2.2)$$

Apskaičiuotas transformatoriaus transformacijos koeficientas;

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{400V}{36V} = 11,11; \quad (2.2.3)$$

Apskaičiuota antrinės apvijios nominali fazinė srovė;

$$I_{2f} = I_{1f} \cdot k = 2.165 A \cdot 11.11 = 24,056 A; \quad (2.2.4)$$

Toliau žinant transformacijos koeficientą, linijinės ir fazinės įtampų, srovių vertes, sekantys skaičiavimai atlikti skaičiuojant pagal trumpojo jungimo parametrus.

Apskaičiuota tuščiosios veikos srovė I_{0f} , A;

$$I_{0f} = \frac{I_{1f} \cdot i_0 \%}{100} = \frac{2.165A \cdot 12\%}{100} = 0.260A; \quad (2.2.5)$$

Apskaičiuota atstojamosios schemos pilnutinė varža Z_0, Ω ;

$$Z_0 = \frac{U_{1f}}{I_{0f}} = \frac{400V}{0.260A} = 1540\Omega; \quad (2.2.6)$$

Apskaičiuota atstojamosios schemos aktyvioji varža R_0, Ω

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{0f}^2} = \frac{25W}{3 \cdot 0.260^2 A} = 123\Omega; \quad (2.2.7)$$

Apskaičiuota atstojamosios schemos, atvaizduotos 1.3 paveiksle, sklaidos induktyvioji varža X_0, Ω ;

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{1540^2 \Omega - 123^2 \Omega} = 1535\Omega; \quad (2.2.8a)$$

$$X_m \approx X_0 \approx 1535\Omega; \quad R_c \approx R_0 \approx 123\Omega; \quad (2.2.8b)$$

Apskaičiuota visos grandinės elektrinė varža, R_m, Ω ;

$$R_m = X_m + R_c = 1535\Omega + 123\Omega = 1658\Omega; \quad (2.2.9)$$

Apskaičiuota trumpojo jungimo įtampa U_{kf}, V ;

$$U_{kf} = \frac{U_{1f} \cdot u_k \%}{100} = \frac{230V \cdot 4.8\%}{100} = 11.10V; \quad (2.2.10)$$

Apskaičiuota trumpojo jungimo pilnutinė varža Z_k, Ω ;

$$Z_k = \frac{U_{kf}}{I_{1f}} = \frac{11.10V}{2.165A} = 5,12\Omega; \quad (2.2.11)$$

Apskaičiuota trumpojo jungimo aktyvioji varža R_k, Ω

$$R_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_{1f}^2} = \frac{70W}{3 \cdot 2.165^2 A} = 4.98\Omega; \quad (2.2.12)$$

Apskaičiuota trumpojo jungimo sklaidos induktyviaja varža X_k, Ω ;

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{5.12^2 \Omega - 4.98^2 \Omega} = 1.20 \Omega; \quad (2.2.13)$$

Apskaičiuotas transformatoriaus pirminės ritės įmagnetinimo induktyvumas L_m, H ;

$$L_{1m} = \frac{X_K}{\omega} = \frac{1.20 \Omega}{314.16} = 0.0038 H; \quad \omega = 2\pi f = 2 \cdot 3.1416 \cdot 50 = 314.16; \quad (2.2.14)$$

Atlikus literatūros analizę išsiaiškinta, kad tiriant ir skaičiuojant galingesnius transformatorius (1.4 pav.) galima laikyti, kad $R_1 \approx R_2$ ir $X_1 \approx X_2$.

Apskaičiuota trumpojo jungimo aktyvioji varža antrajai transformatoriaus apvijai R_2, Ω ;

$$R_2 = \frac{R_K}{k^2} = \frac{4.98 \Omega}{11.11^2} = 0.040 \Omega; \quad (2.2.15)$$

Apskaičiuota trumpojo jungimo pilnutinė varža antrajai transformatoriaus apvijai X_2, Ω ;

$$X_2 = \frac{X_K}{k^2} = \frac{1.20 \Omega}{11.11^2} = 0.01 \Omega; \quad (2.2.16)$$

Apskaičiuotas transformatoriaus antrinės ritės įmagnetinimo induktyvumas L_{2m}, H ;

$$L_{2m} = \frac{X_2}{\omega} = \frac{0.01 \Omega}{314.16} = 0.00003 H; \quad (2.2.17)$$

Analogiškai skaičiavimai buvo atlikti ir sekantiems TRN2500 ir TRP25000 tiriamiems transformatoriams. Visi skaičiavimais gauti rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Tiriamų transformatorių apskaičiuoti duomenys

Tipas	Tuščios veikos srovė, I_{0f}, A	Transformacijos koeficientas	Aktyvioji varža R_K, Ω	Induktyvioji skaidos varža $X_K, \Omega / L_{1m}, H$	Aktyvioji varža R_2, Ω	Induktyvioji skaidos varža $X_2, \Omega / L_{2m}, H$	Grandinės skaidos varža $R_m, \Omega /$
TC-1,5	0,260	11,11	4,98	1,20/0,0038	0,040	0,01/0,00003	1658
TRN2500	0,188	10,952	26,11	600/1,91	0,218	5/016	643665
TRP25000	1,255	4,182	2,31	56/0,18	0,132	3,249/0,01	93868
Tipas	Nominali fazinė srovė, I_{1f}, A		Nominali fazinė srovė, I_{2f}, A				
TC-1,5	2,165		24,056				
TRN2500	12,551		137,464				
TRP25000	125,511		524,864				

2.2.3. Diferencinės apsaugų relės konfigūravimas

Pirmojo TC-1,5 transformatoriaus bandymams atlikti pasirinktos diferencinės ABB SPAD 346 C skaitmeninės apsaugų relės konfigūravimas atliktas naudodamas „Windows“ programinę įrangą palaikančiu kompiuteriu, atlikus ABB pateiktos programinės įrangos paleidimo darbus. Konfigūravimo metu buvo vadovaujama gamintojo pateiktu relės aprašymu „SPAD346C MANUAL“. [22] Parametrizuojant relės nustatymus buvo nurodomi transformatoriaus vardiniai parametrai ir pakeisti 2.4 paveiksle atvaizduoti apsaugos charakteristikos parametrai, kurių dydžio apskaičiavimo algoritmas, paaiškintas ir pateiktas žemiau.

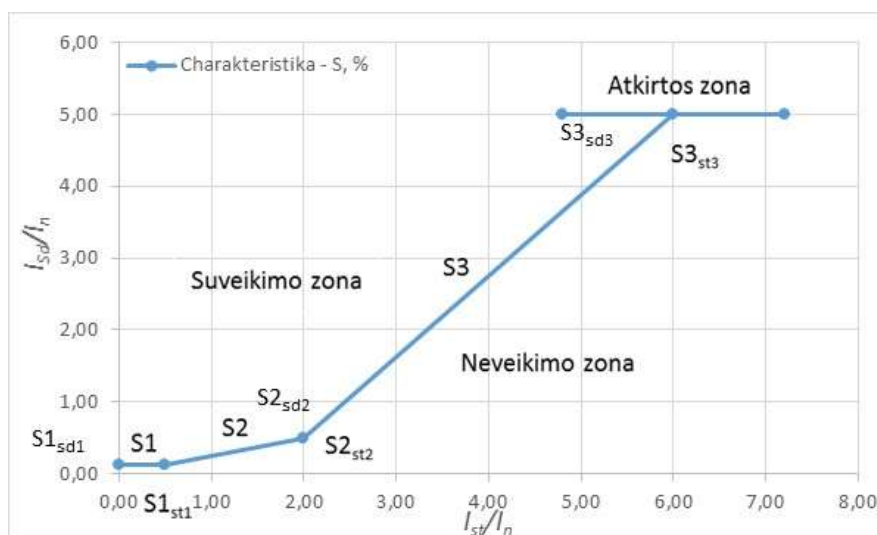
S1, % - parenkamas dydis procentais nuo 5% iki 50%, buvo atliktas nustatymas 15%, kurio charakteristikos reikšmės dydį relė išsiskaičiuoja pagal 2.2.18 formulę. O $I_{st1}=0.5$ pirmos dalies charakteristikos atstumo dydis yra fiksuotas ir nėra keičiamas.

$$S1_{sd1} = \left(\frac{I_{sd} \cdot S1}{100} \right) = \frac{1 \cdot 15\%}{100} = 0.15; . \quad (2.2.18)$$

S2, % - parenkamas dydis procentais nuo 5% iki 100%, buvo atliktas nustatymas 50%, kurio charakteristikos reikšmės dydį relė išsiskaičiuoja pagal 2.2.19 formulę. Antros dalies charakteristikos atstumo I_{st2} dydis parenkamas nustatymuose nuo 1 iki 3. buvo atliktas skaičiaus 2 nustatymas.

$$S2_{sd2} = \left(\frac{I_{sd} \cdot S2}{100} \right) = \frac{1 \cdot 50\%}{100} = 0.5; . \quad (2.2.19)$$

S3, % - parenkamas dydis procentais nuo 100% iki 600%, buvo atliktas nustatymas 500%, iš kurio charakteristikos reikšmės dydį relė taip pat automatiškai išsiskaičiuoja.



2.4. pav. TC-1,5 transformatoriaus diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika

Čia: I_{sd} – diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika, $I_{sd} = (I_{1f}I_{1f})$;

I_{st} – diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika, $I_{st} = (I_{1f}I_{1f} + I_{2f}I_{2f}/2)$;

S – suveikimo charakteristika procentais, %.

Skaitmeninėje ABB SPCD 3D53 relėje antros ir penktos harmonikos dydis yra nustatomas procentais, kurių relė vykdant nuolatinę įrenginio RAA kontrolę išsiskaičiuoja pagrindinės pirmos harmonikos atžvilgiu.

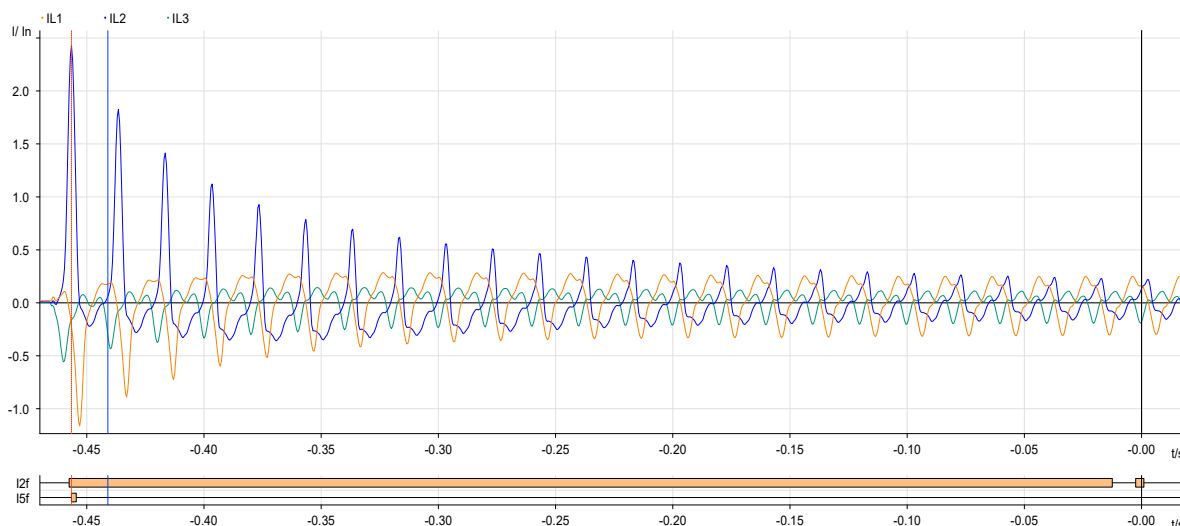
$$I_{100\text{ Hz},\%} = \frac{I_{100\text{ Hz}}}{I_{50\text{ Hz}}} \cdot 100,\%; \quad I_{250\text{ Hz},\%} = \frac{I_{250\text{ Hz}}}{I_{50\text{ Hz}}} \cdot 100,\%; \quad (2.2.20)$$

Atlikus konfigūravimo darbus, nustatyti parametrai buvo išsaugoti ir įrašyti į diferencinę apsaugų relę.

2.2.4. TC-1,5 pereinamojo proceso eksperimentinis tyrimas

Bandymams atlikti buvo sujungta schema pagal relės pajungimo schemą, atvaizduotą 2.3 paveiksle. Prieš pradėdant bandymą buvo patikrinta, ar nėra įjungtas jungtuvas L-100 ir įsitikinus, kad transformatorius prie tinklo bus prijungtas tuščiosios eigos režime, bandymas buvo pradėtas. Bandymo metu buvo įjungtas jungtuvas T-31, taip prijungiant galios transformatorių prie elektros tinklo. Pirmąją ½ sekundės dalį, pereinamojo proceso metu, buvo pastebėta, kad relės priekyje esantis indikatorius išsižiebė informuodamas, kad elektros tinklas dirba nenormaliame režime, tačiau jungtuvas nebuvo atjungtas. Po keleto sekundžių ranka išjungus jungtuvą bandymas buvo nutrauktas ir, prisijungus prie skaitmeninės relės RS-232 jungtimi, buvo nuskaityta joje išsaugoti duomenys.

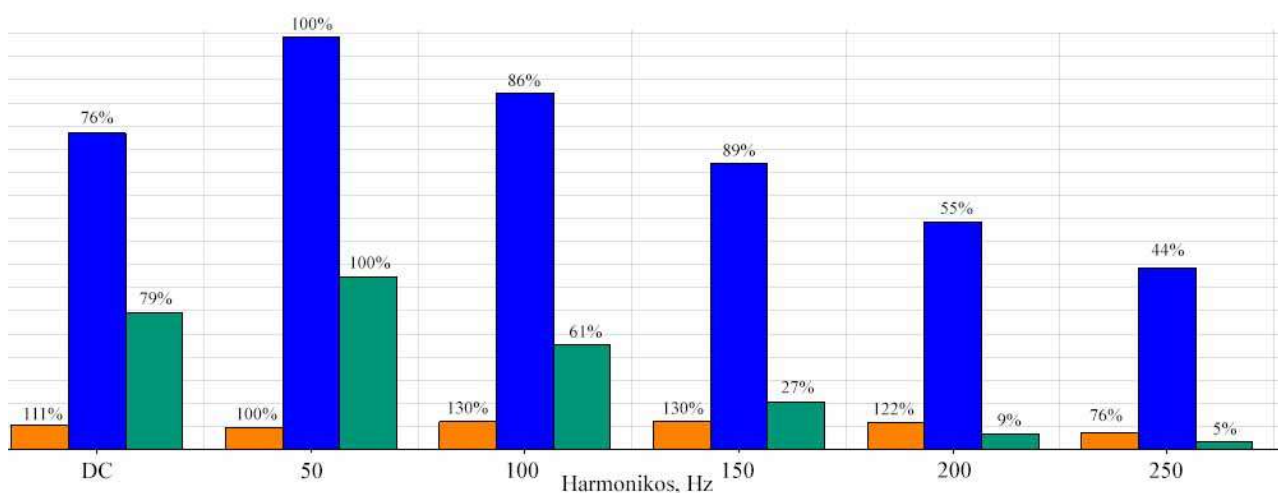
Naudojant universalią „SIGRA“ paketų analizavimo programėlę paveiksluose pateiktuose žemiau grafiškai atvaizduoti nuskaityti duomenys.



2.5. pav. TC-1,5 eksperimentinio bandymo pereinamasis procesas

Čia: Geltona – L1 fazės srovė, A; Mėlyna – L2 fazės srovė, A; Žalia – L3 fazės srovė, A; I2f ir I5f– išjungimo blokavimas esant antrosios ir penktosios eilės harmonikoms.

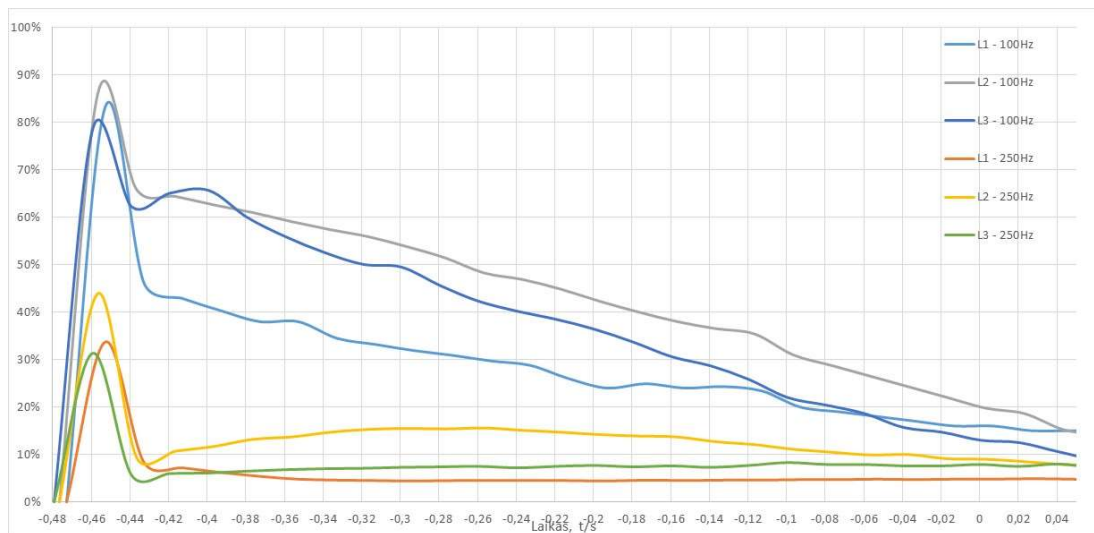
Iš pateikto grafiko 2.5 paveiksle matyti, kad transformatoriaus jungimas prie įtampos, kai jo antrinė grandinė neapkrauta, pirmuose perioduose srovės harmonikos amplitudės dydis smarkiai išaugęs, siekia 2,6 ampero. Ir toliau priklausomai laiko atžvilgiu mažėja. Kaip ir buvo išaiškinta atliekant literatūros analizę, prijungiant neapkrautą transformatorių prie tinklo, jo magnetolaidžio srautas ϕ kinta panašiai kaip trumpojo jungimo srovė. Šį srautą ϕ kuria, tuo pačiu ir transformatoriaus magnetolaidį įmagnetinančios eigos srovės. Dėl plieno sotinimo ir magnetinių galios nuostolių tuščios eigos srovė iškraipoma, todėl pereinamojo proceso metu srovės harmonikų spektre atsiranda visa eilė aukštesniųjų laiko harmonikų. Žinant, kad idealios formos sinusinis virpesys neturi harmonikų, galima teigti, kad kuo labiau iškraipyta sinusoidė tuo daugiau turi srovės harmonikų dedamųjų.



2.6. pav. TC-1,5 eksperimentinio bandymo pagrindinės srovės harmonikų dedamosios

Čia: L1 – mėlyna, %; L2 - oranžinė, %; L3 – žalia, %.

Norint išsiaiškinti pereinamojo proceso metu vyraujančias aukštesniąsias harmonikas, programoje „SIGRA“ nustatius žymeklį laike, kuriame buvo pasiekta didžiausią srovės reikšmę pereinamojo proceso metu, buvo išfiltruota ir 2.6 paveiksle atvaizduota transformatoriaus šerdies įmagnetinimo metu atsirandančios pagrindinės sinusinės srovės harmonikų dedamosios, procentais išskaičiuojant pagrindinės harmonikos atžvilgiu. Žvelgiant į grafiką pastebime, kad šios srovės didžiąją dalį sudaro smūgio ir pirmos bei antros harmonikos dedamosios. Dėl didelio srovės srauto įjungimo momentu susidaro smūgio srovė DC. Tai aperiodinė dedamoji, kuri elektros tinkuose atsiranda trumpojo jungimo metu. Kitos mus dominančios panašaus stiprio atsiradusios pagrindinio virpesių dažnio kartotinės tai 100Hz ir 250hZ dažnio srovės. Pirmuosius (2.5 pav.) kelis periodus 15f penktos eilės harmonika pasirodžiusi sumažėja iki nustatytos minimalios, tačiau 12f antros eilės vyrauja apie 0,5 sekundės. Taigi esant šios eilės harmonikoms, apsaugų relė supranta apie vykstantį magnetolaidžio įmagnetinimą ir nevykdo įrenginio atjungimo.



2.7. pav. TC-1,5 eksperimentinio bandymo srovių harmonikos

Čia: L1 mėlyna, L2 pilka, L3 violetinė – 100Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;

L1 oranžinė, L2 geltona, L3 žalia – 250Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;

2.7 paveiksle atvaizduota pereinamojo proceso metu vyraujančios ir laiko momentu gėstančios, transformatoriaus šerdies įmagnetinimo metu atsirandančios, antros ir penktos eilės harmonikos, procentais.

2.2.5. TC-1,5 eksperimentinis tyrimas MATLAB programa

Naudojant MATLAB programa, “simulink“ aplinkoje buvo sukurtas modelis iš realius įrenginius atitinkančių blokų, kuris yra analogiškas prieš tai tirtu transformatoriaus eksperimentiniam bandymui. Pilnas su visais naudotais blokais modelis yra atvaizduotas ir pateiktas (Priedas 1-4) prieduose.

Šio sudaryto modelio sistemą transformatoriaus pereinamajam procesui tirti sudaro:

- Trifazis 50hz 400VAC įtampos šaltinis;
- T31 trifazis jungtuvas, su pavara, turintis galimybę jį valdyti ir gali būti įjungtas per tąsumą ar išjungtas nuo RAA apsaugų;
- TA1 ir TA2 srovės transformatoriai;
- T-1 tiriamasis trifazis galios transformatorius 1,5 kVA, 400/36V;
- R1 diferencinės apsaugų relės imitacinis blokas su aprašomais algoritmais.
- T32 trifazis jungtuvas su pavara.
- Sistema (sistemos imitatorius, tinklo apkrova ar elektros energijos vartotojai).

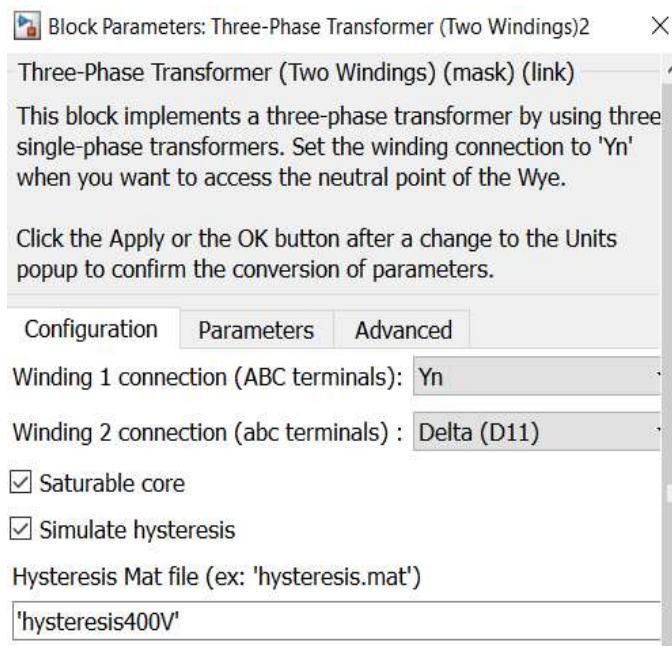
Visi blokų parametrai redaguojami ir keičiami. Kaip parodyta 2.8 paveiksle, redaguojant transformatoriaus parametrus buvo nustatyta eksperimentinio transformatoriaus jungimo grupė ir parinktas transformatorius soties charakteristiką apibūdinantis „mat“ failas.

Čia: Pirminė apvija (Winding 1) – pirminės transformatoriaus apvijos jungimo grupė (Y_n). Jungimas žvaigžde su išeminta neutrale.

Antrinė apvija (Winding 2) – antrinės transformatoriaus apvijos jungimo grupė (Delta (D11)). Jungimas trikampiui.

Įsotinimas (Saturable core) – aktyvuojamas, kad transformatoriaus įjungimo momentu būtų skaičiuojamas šerdies įsotinio pereinamasis procesas.

Histerzės charakteristika (Simulate hysteresis) – numatyti transformatoriaus šerdies histerzės kilpos parametrai.



2.8. pav. Jungimo grupės ir įsotinio charakteristikos nustatymas

Sekančioje bloko (2.9 pav.) parametrų lentelėje suvedami į atitinkamus laukelius, anksčiau apskaičiuoti ir 2.2 lentelėje pateikti tiriamo galios transformatoriaus duomenys:

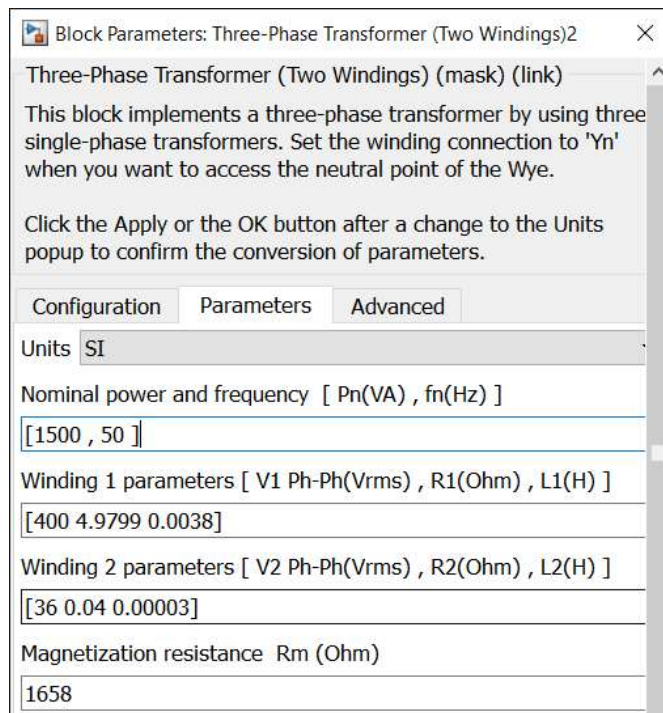
Čia: P_n (VA) – transformatoriaus vardinė galia, voltamperais.

F_n (Hz) – transformatoriaus darbinis dažnis.

Pirmos apvijos parametrai (Winding 1 parameters) – pirminės transformatoriaus apvijos parametrai. Apvijos vardinė įtampa voltais ir jų apskaičiuotos varžos.

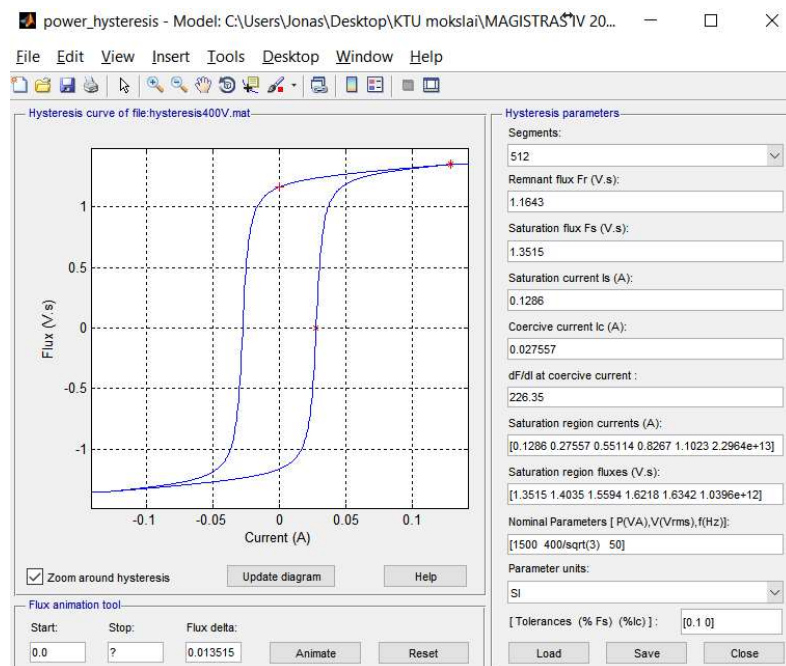
Antros apvijos parametrai (Winding 2 parameters) – antrinės transformatoriaus apvijos parametrai. Apvijos vardinė įtampa voltais ir jų apskaičiuotos varžos.

Įmagnetinimo varža (Magnetization resistance) – transformatoriaus apskaičiuota grandinės sklaidos varža, omais.



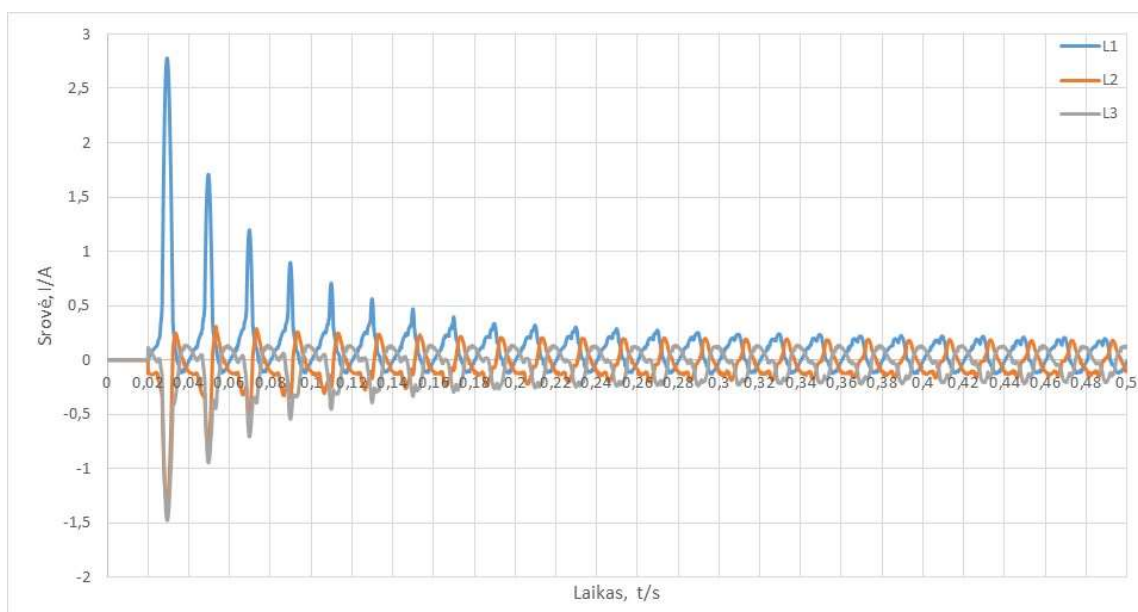
2.9. pav. Apskaičiuotu parametru nustatymas

Transformatoriaus šerdies histerezės kilpos parametrus nustatyti galima naudotis jau sukurtu MATLAB programos grafiku. Pasirinkus funkciją „simulate hysteresis“ ir „Hyteresis Desing Tool“, atsidarius histerezės kilpos duomenų lentelei, galima suvesti transformatoriaus vardinės galios, įtampos ir tinklo dažnio parametrus. Kadangi analizuojant literatūrą, buvo išaiškinta, kad pagrindinė įmagnetėjimo kreivė ir histerezės kilpa apibūdina medžiagų magnetines savybes, reikia suvienodinti histerezės kilpos įsisotinimo charakteristiką su minkšto plieno feromagnetinės šerdies įsisotinimo charakteristika. Nustatyta šerdies įsotinimo charakteristika pavaizduota 2.10 paveiksle.



2.10. pav. Šerdies iš minkšto plieno soties charakteristikos nustatymas

MATLAB programa sukūrus pilną eksperimentinį modelį, kuris atitinka TC-1,5 transformatoriaus parametrus ir duomenų rinkimo algoritmus buvo atliktas eksperimentinis bandymas. Bandymo metu prie tinklo buvo prijungiamas transformatorius per T-31 jungtuvą. Bandymas vyko 1/1000 sekundės tikslumu, smulkiai fiksuojant kiekvieną pereinamojo proceso kitimą, o pasibaigus bandymo laikui, duomenų analizavimui, taip pat nuskaityti išsaugoti duomenys. Naudojant Microsoft Office „Excel“ programą gautus ir nuskaitytus apibendrintus duomenys buvo grafiškai atvaizduoti ir pateikti 2.11-2.12 paveiksluose.



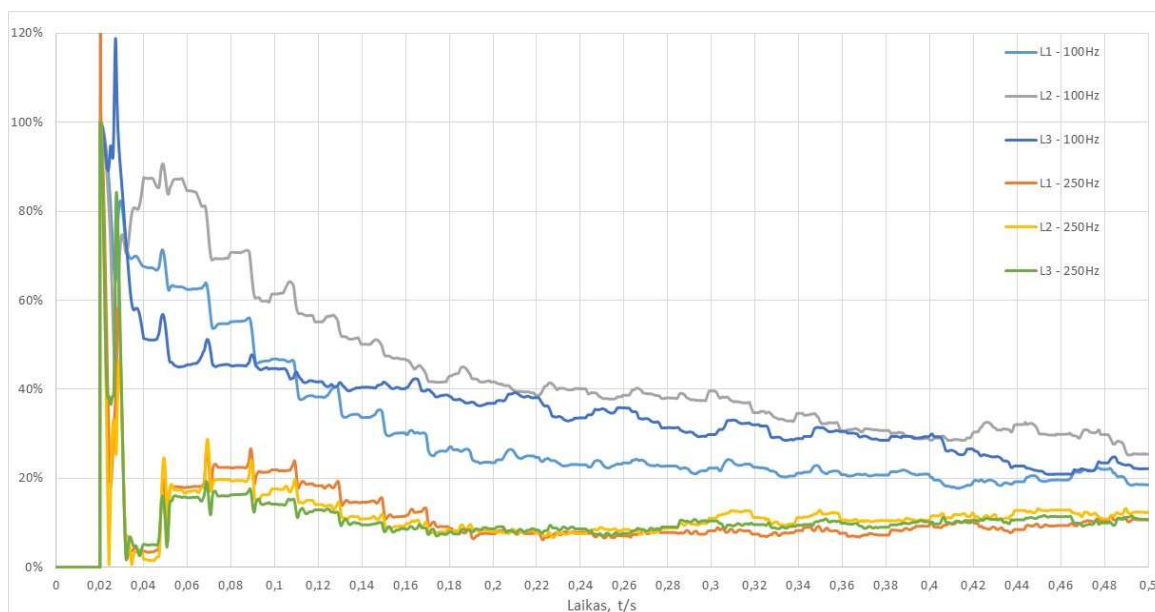
2.11. pav. TC-1,5 bandymo MATLAB programa pereinamasis procesas

Čia: Mėlyna – L1 fazės srovė, A; Oranžinė – L2 fazės srovė, A; Pilka – L3 fazės srovė, A.

Kaip ir eksperimentinio bandymo metu, iš pateikto grafiko 2.11 paveiksle matyti, kad transformatoriaus jungimas prie įtampos, kai jo antrinė grandinė neapkrauta pirmuose perioduose srovės amplitudės dydis smarkiai išauga, ir siekia 2,6 ampero, o toliau priklausomai laiko atžvilgiu mažėja. Taigi, atlikus eksperimentą, transformatorių prijungiant prie tinklo realiai ir simuliuojant bandymą su MATLAB programa, pastebėta, kad jo magnetolaidžio įsotinimo metu srovės srautas kinta panašiai ir laiko atžvilgiu gesta. Todėl galima drąsiai teikti, kad dėl plieno sotinimo ir magnetinių galios nuostolių pereinamojo proceso metu, srovė bus taip pat iškraipyta ir srovės harmonikų spektre bus rasta visa eilė aukštesniųjų harmonikų.

Naudojant MATLAB programoje Furje blokus, buvo išfiltruoti ir grafiškai atvaizduoti gauti duomenys, kurie parodo pereinamojo proceso metu atsiradusias antros ir penktos eilės aukštesniąsias harmonikas, bei jų gesimą laiko atžvilgiu.

Aptariant 2.12 paveikslo grafike matomus duomenis buvo pastebėta, kad labai panašiu laiko momentu pereinamojo proceso metu vyravo antros ir penktos eilės harmonikos, jas lyginant su realaus bandymo grafiku, pateiktu 2.7 paveiksle. Per 0,5 sekundės harmonikų lygis pakito nuo 120% iki 20 % procentų.



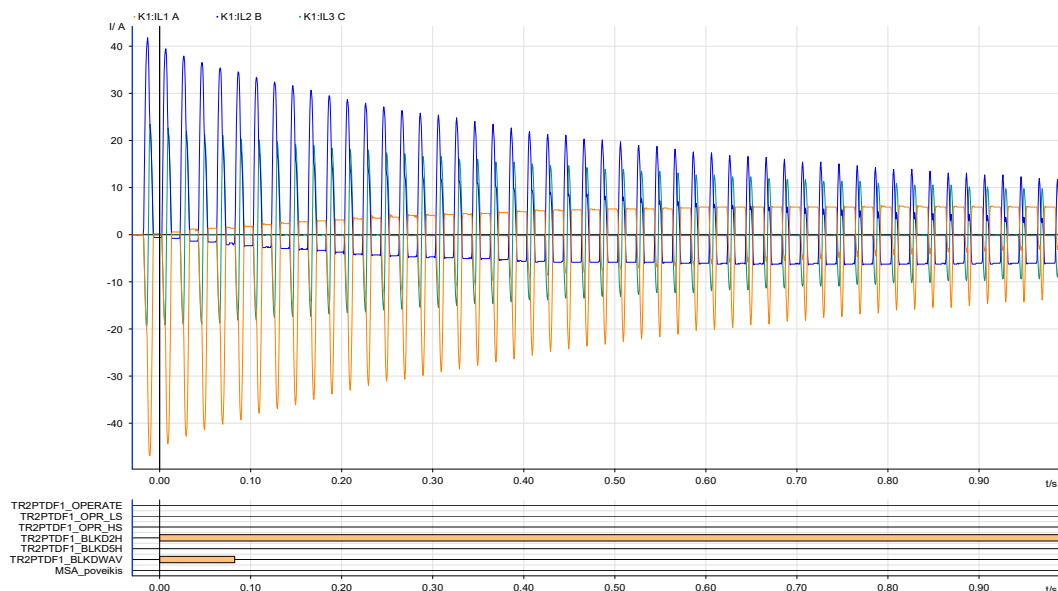
2.12. pav. TC-1,5 bandymo MATLAB programa srovių harmonikos

Čia: L1 mėlyna, L2 pilka, L3 violetinė – 100Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;
L1 oranžinė, L2 geltona, L3 žalia – 250Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;

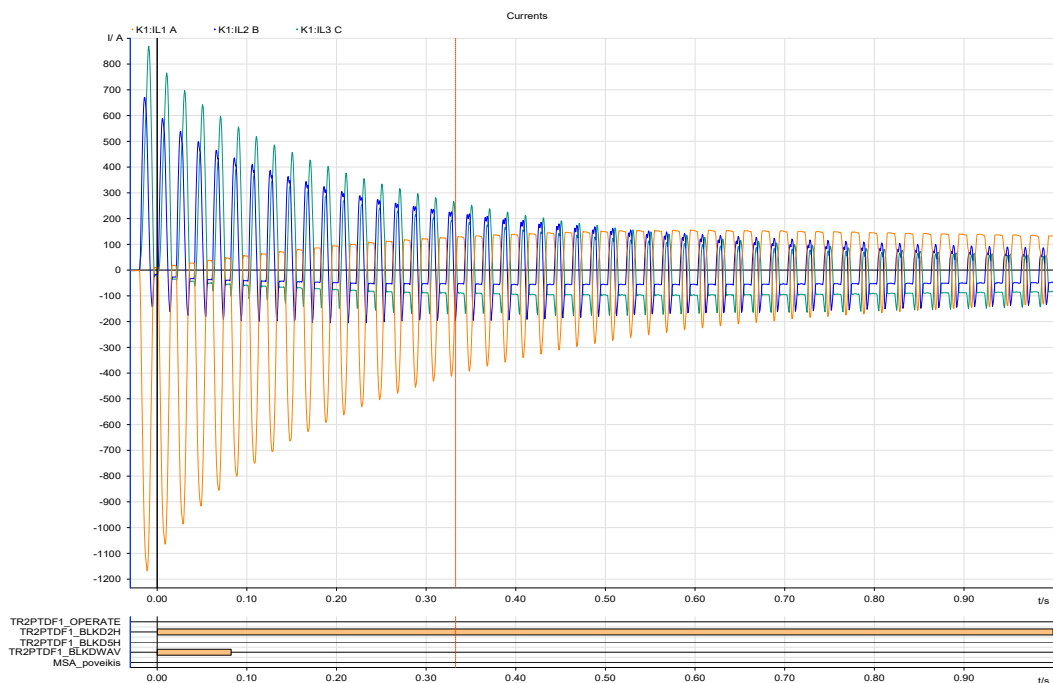
2.2.6. TRN2500 ir TRP25000 eksperimentinis tyrimas

Šių dviejų TRN2500 ir TRP25000 galios transformatorių prijungimas prie tinklo buvo atliktas akcinei bendrovei „Lietuvos geležinkeliai“ priklausančioje „Traukos“ 110/27/10kV transformatorių pastotėje. Šie transformatoriai prie tinklo buvo pajungti pirmą kartą, todėl pereinamojo proceso duomenų analizavimui tuoj pat po transformatoriaus įjungimo, buvo nuskaityti relės atmintyje sukaupti transformatoriaus įjungimo metu fiksuoti duomenys. Duomenys nuskaityti iš „Schneider Electric“ dažnai transformatorių, generatorių ir variklių apsaugoms naudojamos VAMP V265 diferencinės apsaugos skaitmeninių relių. Transformatorių prijungimo prie tinklo ir skaitmeninės relės pajungimo schema analogiška pavaizduotai 2.3 paveiksle. Bandymo metu abu transformatoriai buvo prijungti tuščiosios eigos režime. Transformatoriaus paleidimo metu buvo įjungti jungtuvai, taip prijungiant galios transformatorius prie elektros tinklo. Po įtampos įjungimo, gavus leidimą iš būdinčio dispečerio, patekti į „Lietuvos geležinkeliai“ priklausantį RAA pultą, prisijungus prie skaitmeninių relių USB jungtimi buvo nuskaityti įjungimo metu fiksuoti ir išsaugoti duomenys.

Naudojant universalią „SIGRA“ paketą analizavimo programėlę, 2.13 ir 2.14 paveiksluose pateiktuose žemiau, grafiškai atvaizduoti nuskaityti duomenys.



2.13. pav. TRN2500 eksperimentinio bandymo pereinamasis procesas

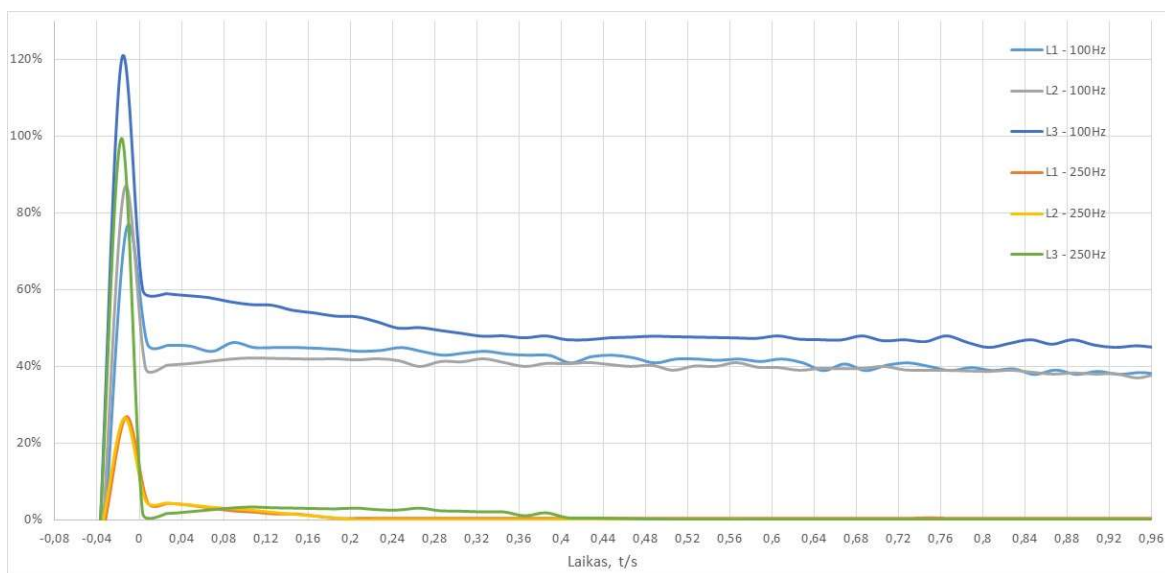


2.14. pav. TRP25000 eksperimentinio bandymo pereinamasis procesas

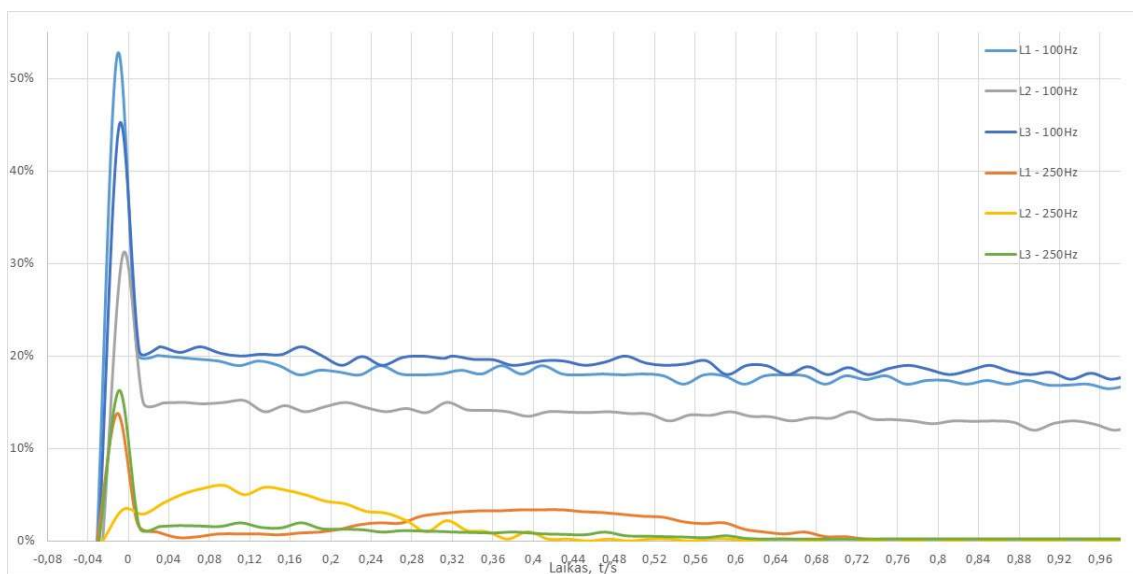
Čia: Geltona – L1 fazė srovė, A; Mėlyna – L2 fazė srovė, A; Žalia – L3 fazės srovė, A; BLKD2H ir BLKD5H – išjungimo blokavimas esant antrosios ir penktosios eilės harmonikoms.

Iš pateiktų grafikų 2.13 ir 2.14 paveiksluose matyti, kad transformatoriaus prijungimas prie įtampos, kai jų antrinės grandinės neapkrautos, pirmuose perioduose srovės amplitudės dydžiai smarkiai išauga ir pasidaro daugiau nei keturis kartus didesnės lyginant su apskaičiuotomis transformatoriaus vardinėmis srovėmis, TRN25000 transformatoriaus siekiai iki 50 amperų, o TRP25000 transformatoriui siekia net iki 1150 amperų. Toliau transformatoriaus šerdžiai sotinant, srovės dydis laiko atžvilgiu mažėja. Kaip ir prieš tai tiriant žymiai silpnesnį galios transformatorių,

buvo pastebėta, jog prijungiant neapkrautą transformatorių prie tinklo, jų magnetolaidžio srautas ϕ kinta panašiai kaip trumpojo jungimo srovė. Šį srautą ϕ kuria, tuo pačiu ir transformatoriaus magnetolaidį įmagnetinančios srovės, o išotinio srovės dydžiai priklauso nuo transformatoriaus vardinių parametrų. Lygiai kaip ir pirmu atveju dėl plieno sotinimo ir magnetinių galios nuostolių, tuščios eigos srovė iškraipoma, todėl pereinamojo proceso metu srovės harmonikų spektre atsiranda visa eilė aukštesniųjų laiko harmonikų.



2.15. pav. TRN2500 eksperimentinio bandymo srovių harmonikos



2.16. pav. TRP25000 eksperimentinio bandymo srovių harmonikos

Čia: L1 mėlyna, L2 pilka, L3 violetinė – 100Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;

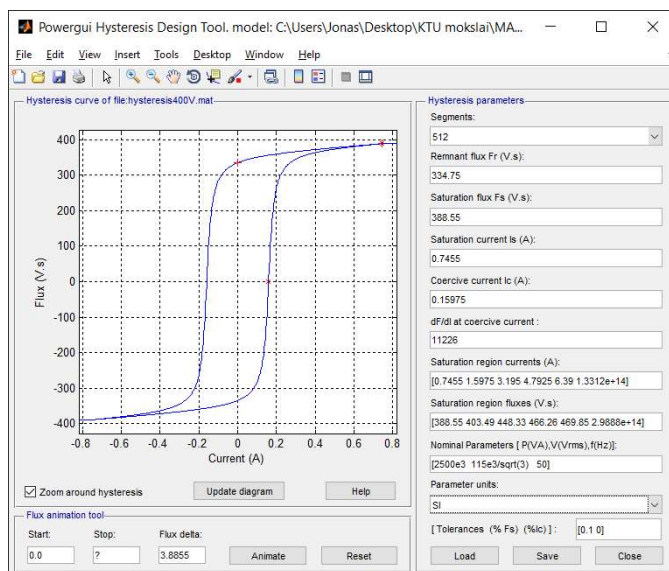
L1 oranžinė, L2 geltona, L3 žalia – 250Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;

Naudojant paketų analizavimo programėlę, buvo išfiltruoti antros ir penktos eilės harmonikų dydžiai procentais, jų dydį matuojant pirmos, pagrindinio srovės dažnio atžvilgiu. Nuskaityti duomenys grafiškai atvaizduoti 2.15 ir 2.16 paveiksluose. Šie grafikai atvaizduoja, pereinamojo proceso metu vyraujančias ir laiko momentu gėstančias pagrindinės sinusinės srovės harmonikų

dedamašias. Mus dominančios antros ir penktos eilės harmonikos. Analizuojant grafiškai pateiktus duomenis pastebėta, kad kaip ir pirmuoju atveju, po transformatoriaus paleidimo, kelis periodus penktos eilės harmonika (250Hz) pasirodžiusi sumažėja iki minimalios, jos kitimo spektras nuo 16% iki 2% procentų. O antros eilės harmonikos (100Hz) vyrauja visą duomenų įrašymo laiką. Jų pokytis per 1 sekundę, TRN2500 transformatoriui pakinta nuo 120% iki 40 % procentų. O galingesniam TRP25000 transformatoriui kitimo spektras nuo 60% iki 20% procentų. Taigi esant šioms eilės harmonikoms, jeigu apsaugų relėje užstatytas blokavimas nuo 15%, relė supranta apie vykstantį magnetolaidžio įmagnetinimą ir blokuoja įrenginio atjungimo signalą.

2.2.7. TRN2500 ir TRP25000 eksperimentinis tyrimas MATLAB programa

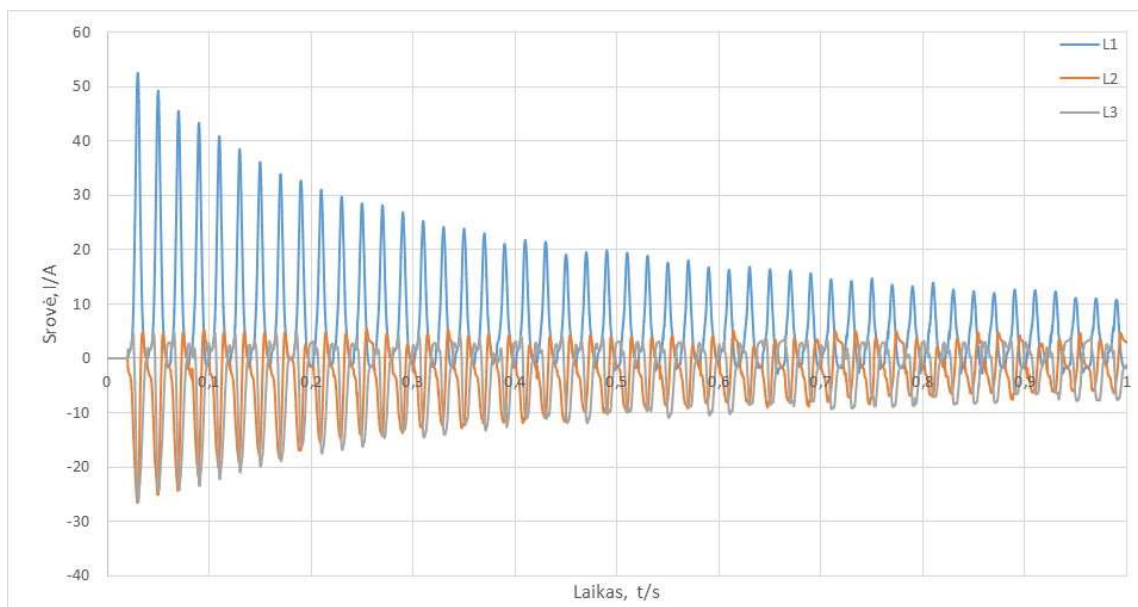
Tiriant galios transformatorius TRN2500 ir TRP25000 MATLAB programa, „simulink“ aplinkoje buvo naudojamas jau anksčiau sukurtas ir išbandytas veikiantis blokų modelis, kuris buvo panaudotas tiriant pirmąją galios transformatorių TC-1,5. Šis modelis pateiktas (Priedas 1-4) prieduose. Šio modelio relės ir transformatoriaus pajungimas atitinka dabar tiriamų transformatorių pajungimo schemą. Buvo redaguoti ir pakeisti MATLAB modelio blokų duomenys, kad modelių tinklo įtampa, transformatorių galia, apvijų varža ir visi kiti vardiniai ar apskaičiuoti parametrai atitiktų realiai išbandytų ir dabar bandomų transformatorių duomenis. Taip pat panaudota jau veikianti ir išbandyta transformatoriaus šerdies histerezės kilpa. Redagavus bloką, buvo pakeistos transformatoriaus vardinės galios, įtampos ir tinklo dažnio parametrai. Visus kitus parametrus programa persiskaičiavo automatiškai. Nustatyta šerdies įsotinimo charakteristika TRN2500 transformatoriui pavaizduota 2.17 paveiksle.



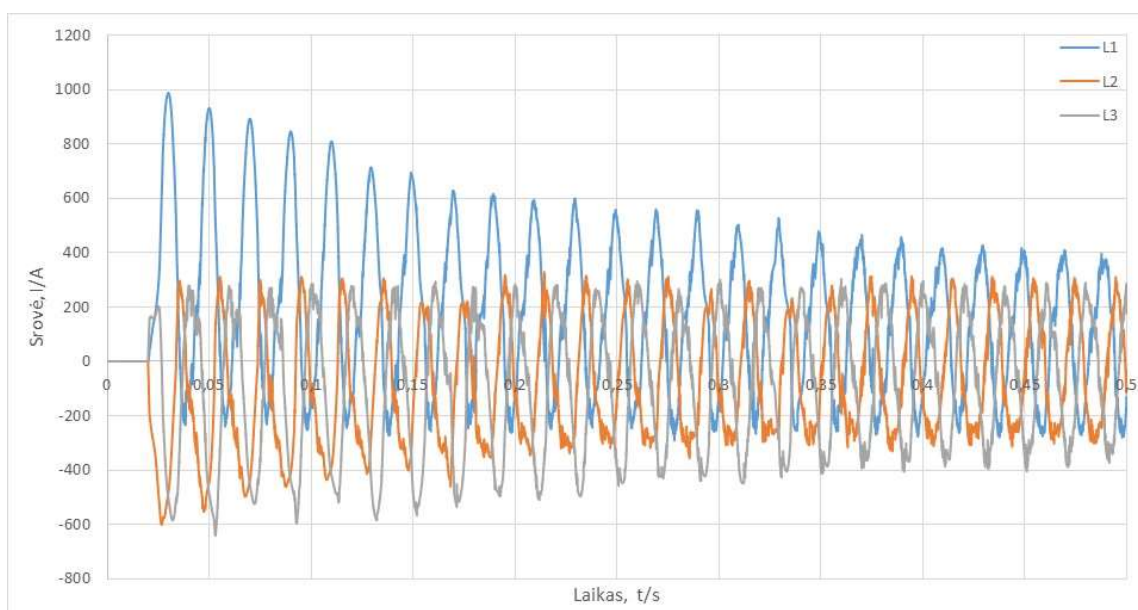
2.17. pav. TRN2500 transformatoriaus šerdies charakteristikos nustatymas

Suvedus eksperimentinių „simulink“ aplinkoje kurtų modelių, kurie atitinka TRN2500 ir TRP25000 transformatorių parametrus, buvo atlikti eksperimentiniai bandymai. Kaip ir pirmu atveju,

bandymo metu buvo prie tinklo prijungiamas transformatorius su T-31 jungtuvu. Bandymas vyko 1/10000 sekundės tikslumu, tai labai apsunkino kompiuterio darbą, tačiau buvo smulkiai užfiksuotas kiekvienas transformatoriaus šerdies įmagnetėjimo proceso kitimas. O pasibaigus bandymo laikui, duomenų analizavimui gauti ir nuskaityti duomenys buvo apibendrinti ir grafiškai atvaizduoti 2.18 ir 2.19 paveiksluose, naudojant Microsoft Office „Excel“ programą.



2.18. pav. TRN2500 bandymo MATLAB programa pereinamasis procesas



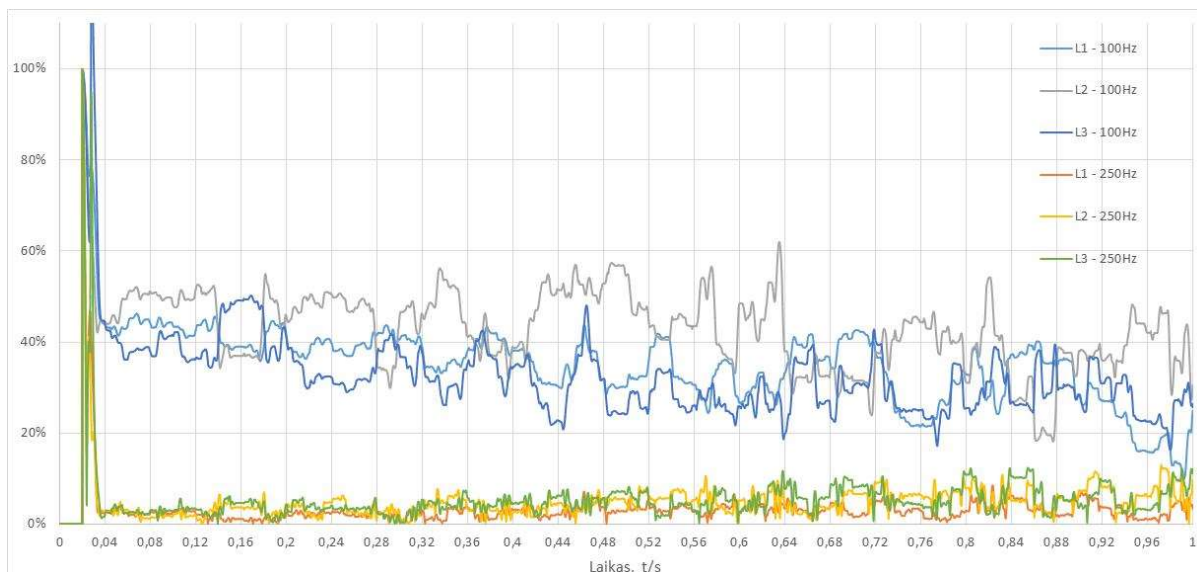
2.19. pav. TRP25000 bandymo MATLAB programa pereinamasis procesas

Čia: Mėlyna – L1 fazės srovė, A; Oranžinė – L2 fazės srovė, A; Pilka – L3 fazės srovė, A.

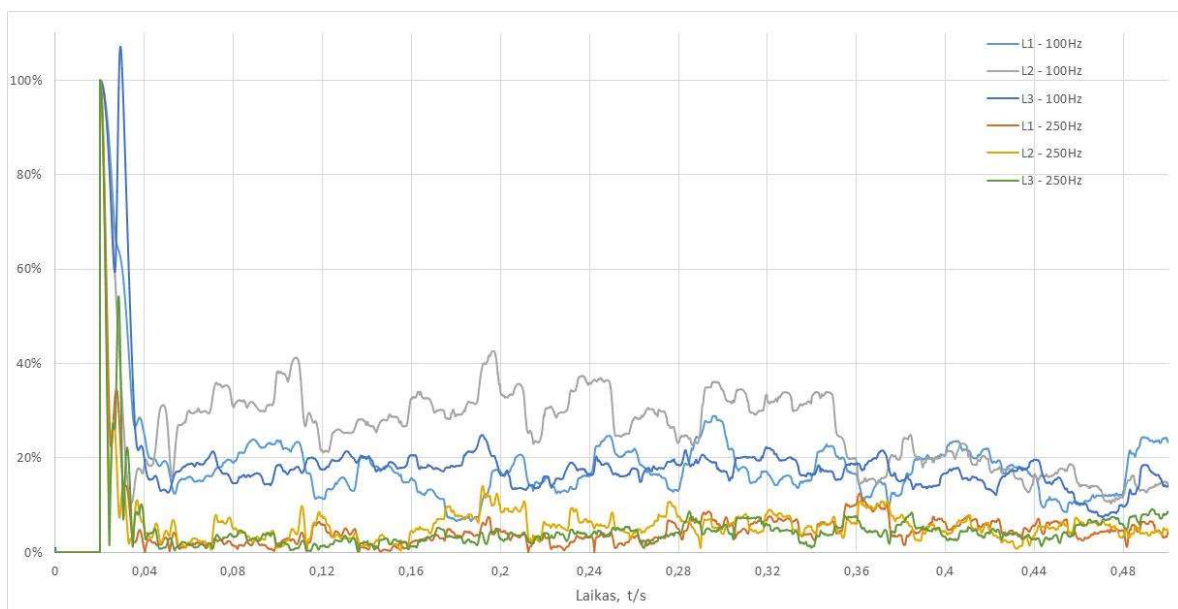
Kaip ir pirmo eksperimentinio bandymo metu iš pateiktų grafikų, atvaizduotų 2.18 ir 2.19 paveiksluose matome, kad transformatoriaus jungimas prie įtampos, kai jo antrinė grandinė neapkrauta. Pirmuose perioduose srovės amplitudės dydis išauga daugiau kaip keturis kartus lyginant su apskaičiuotais vardiniais parametrais TRN25000 transformatoriaus siekia iki 53 amperų, o

TRP25000 transformatoriui siekia net iki 1000 amperų. O toliau priklausomai laiko atžvilgiu srovės amplitudės dydis mažėja. Taigi, atlikus eksperimentą bandant realiai ir simuliuojant bandymą su MATLAB programa, pastebėta, kad visiems trimis transformatoriams dėl plieno sotinimo pereinamojo proceso metu smarkiai išauga srovės, kurios sudarytos iš visos eilės aukštesniųjų srovės harmonikų.

Naudojant MATLAB programoje sukurtus Furje blokus buvo išfiltruotos pirmos pagrindinės srovės dažnio atžvilgiu, antros ir penktos srovės harmonikos, procentais. Gauti duomenys grafiškai atvaizduoti 2.20-2.21 paveiksluose.



2.20. pav. TRN2500 bandymo MATLAB programa srovių harmonikos



2.21. pav. TRP25000 bandymo MATLAB programa srovių harmonikos

Čia: L1 mėlyna, L2 pilka, L3 violetinė – 100Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;
L1 oranžinė, L2 geltona, L3 žalia – 250Hz pagrindinio srovės dažnio kartotinė, %;

Šie grafikai atvaizduoja pereinamojo proceso metu vyraujančias ir laiko momentu gęstančias pagrindinės sinusinės srovės harmonikų dedamąsias. Analizuojant grafiškai pateiktus duomenis pastebėta, kad kaip ir realiu atveju, po transformatoriaus paleidimo, kelis periodus penktos eilės harmonika (250Hz) pasirodžiusi sumažėja iki minimalios, jos kitimo spektras nuo 55% iki 5% procentų. O antros eilės harmonikos (100Hz) vyrauja visą duomenų įrašymo laiką. TRN2500 transformatoriui pakinta nuo 120% iki 20 % procentų. O TRP25000 transformatoriui antros harmonikos kitimo spektras nuo 110% iki 12% procentų.

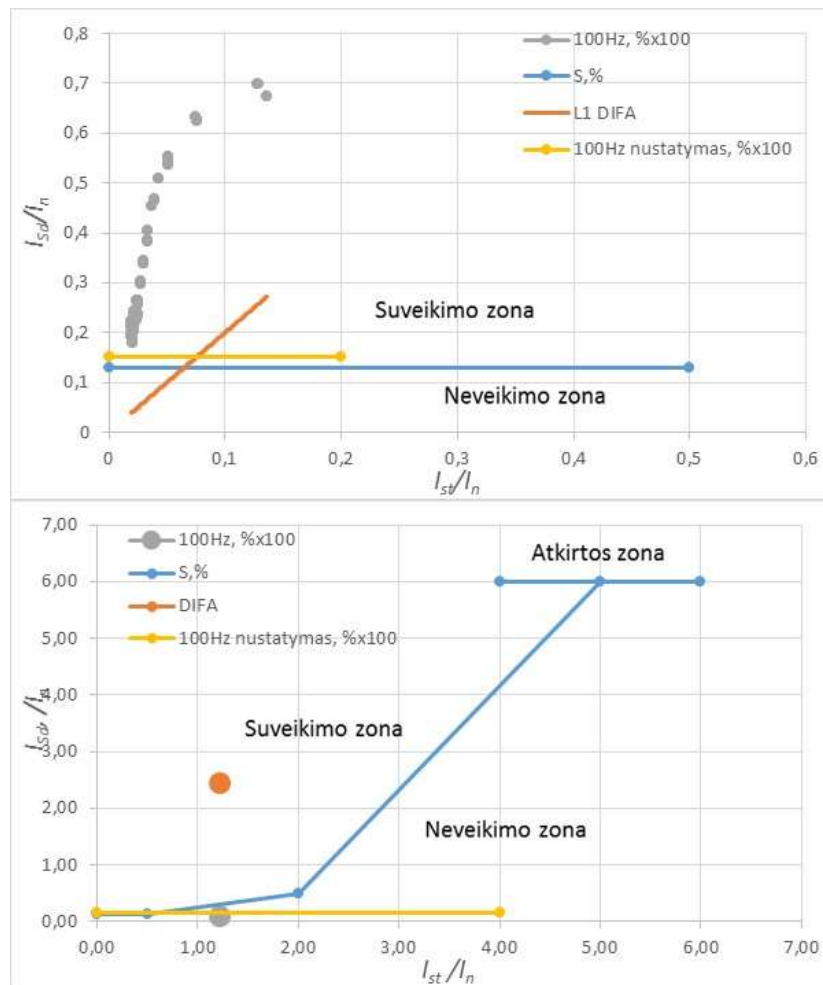
2.2.8. Poveikio diferencinei apsaugai tyrimas

Tyrimo metu atlikus transformatorių paleidimo realius ir imituojamus eksperimentinius bandymus, lyginant grafiškai atvaizduotus duomenis buvo nustatyta, kad visų tirtų transformatorių srovių amplitudės dydžiai, paleidimo metu išauga ir smarkiai viršija transformatorių apskaičiuotas vardines sroves. O išfiltravus pereinamojo proceso metu vyraujančias srovės harmonikų dedamąsias, buvo nustatyta, kad jų dydžiai ir gesimo periodiškumas yra labai panašūs. Taigi, galima teigti, kad MATLAB programa simuliuojamo eksperimentinio bandymo gauti rezultatai yra atitinkantys realaus bandymo rezultatus. Todėl sekančius bandymus, transformatoriaus pereinamojo proceso tyrimui galima atlikti naudojantis tik MATLAB programa. Pritaikant skaitmeninės relės diferencinės apsaugos charakteristiką, individualiai kiekvienam transformatoriui, pavaizduotą 2.4 paveiksle buvo atliekamas tyrimas.

MATLAB programa, „simulink“ aplinkoje, buvo iširti visi trys tiriami galios transformatoriai. Tyrimo metu gauti duomenys išanalizuoti ir grafiškai atvaizduoti 2.22-2.24 paveiksluose. Atliekant bandymus buvo nustatytas galios transformatoriaus įjungimo momentu esantis poveikis diferencinei apsaugai. Bandymai buvo atlikti dviem atvejais:

- **Pirmas atvejis:** kai transformatoriaus antrinė apvija neapkrauta ir transformatoriaus paleidimas įvyksta tuščioje eigoje.
- **Antras atvejis:** kai transformatoriaus antrinė apvija užtrumpinta ant transformatoriaus išvadų. Transformatoriaus paleidimo, pereinamojo proceso metu imituojant trumpąjį jungimą.

Sudaryta diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika TC-1,5 transformatoriui. Charakteristikos nustatymai $S_1=13\%$, $S_2=50\%$, $S_3=500\%$. Atlikti eksperimentiniai bandymai MATLAB programa, pagal pirmąjį ir antrąjį atvejį. Atjungimo blokavimas vykdomas 100Hz dažnio srovei viršijus 15%. Ši pagrindinės srovės kartotinė, labiausiai pasireiškia pereinamojo proceso metu. Apibendrinti duomenys atvaizduoti 2.22 paveiksle pateiktose diferencinės apsaugos suveikimo charakteristikose.



2.22. pav. TC-1,5 diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika. (viršutinis – pirmas, apatinis antras atvejis).

Čia: Pilka - antros harmonikos dydis procentais, %x100.

Mėlyna - diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika.

Oranžinė - apsaugų relės išskaičiuotas skirtuminės srovės dydis, A.

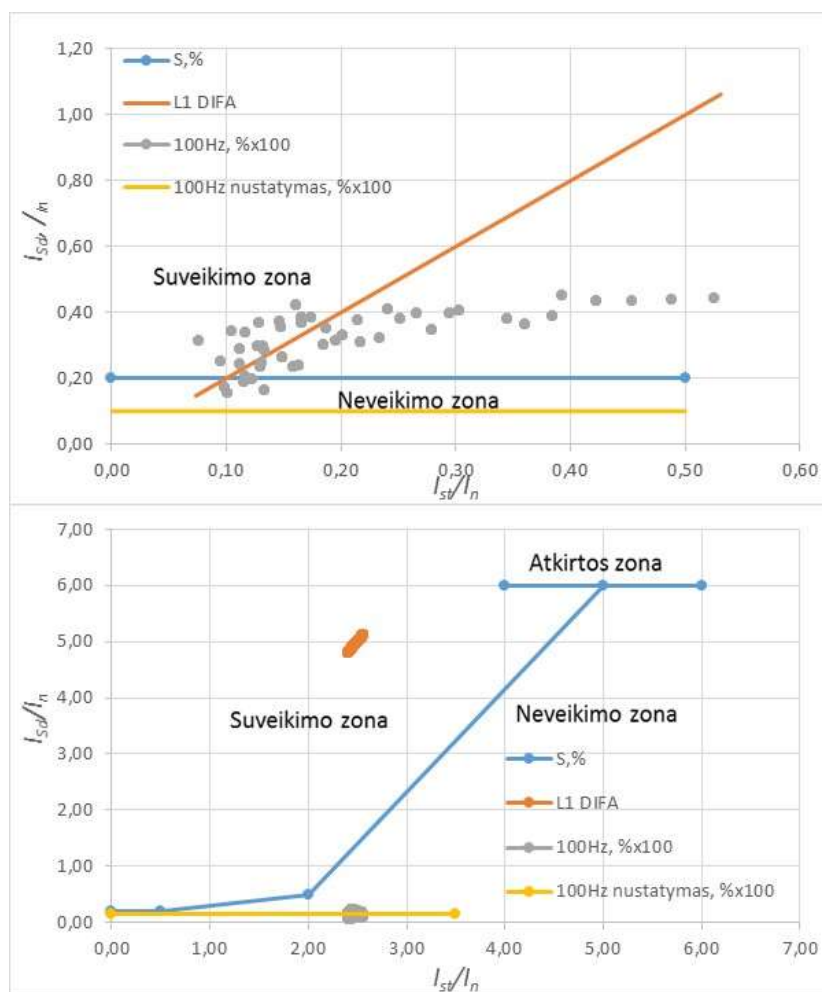
Geltona - antros harmonikos nustatymo dydis procentais, %x100.

Viršutinėje 2.22 paveiksle atvaizduotoje charakteristikoje pavaizduotas pirmo atvejo pereinamasis procesas, kai transformatoriaus antrinė apvija neapkrauta ir transformatoriaus paleidimas įvyksta tuščioje eigos režime. Iš atvaizduotų duomenų galima nustatyti, kad skirtuminei srovei viršijus charakteristikos kreivę S, tuo metu vyrauja ~70-20% antros 100Hz harmonikos srovė. Todėl 100Hz dažnio srovei viršijus nuostatą 15% (geltona), apsaugų relė vykdo jungtuvo atjungimo blokavimą ir jungtuvas klaidingai neišjungiamas.

Apatinėje dalyje 2.22 paveikslo atvaizduotoje charakteristikoje pavaizduotas antro atvejo pereinamasis procesas, kai transformatoriaus antrinė apvija L1 ir L2 užtrumpinti ant transformatoriaus išvadų. Taip imituojamas trumpas jungimas transformatoriaus saugomoje zonoje jo paleidimo momentu. Iš atvaizduotų duomenų galima nustatyti, kad skirtuminė srovė įjungimo

momentu iš karto viršija charakteristikos kreivę S, ir skirtuminės srovės taškas atsiduria suveikimo zonoje. O tuo metu vyrauja tik apie ~2% antros 100Hz harmonikos srovės. Todėl apsaugų relė nevykdo jungtuvo atjungimo blokavimo ir jungtuvas išjungiamas.

Sekanti diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika sudaryta TRN2500 transformatoriui. Charakteristikos nustatymai S1=20%, S2=50%, S3=500% Jungtuvo atjungimo blokavimas vykdomas 100Hz harmonikos srovei viršijus 10% (geltona). Apibendrinti ir grafiškai atvaizduoti duomenys, diferencinės apsaugos suveikimo charakteristikoje 2.23 paveiksle.



2.23. pav. TRN2500 diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika. (viršutinis – pirmas, apatinis antras atvejis).

Čia: Mėlyna - diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika.

Oranžinė - apsaugų relės išskaičiuotas skirtuminės srovės dydis, A.

Pilka - antros harmonikos dydis procentais, %x100.

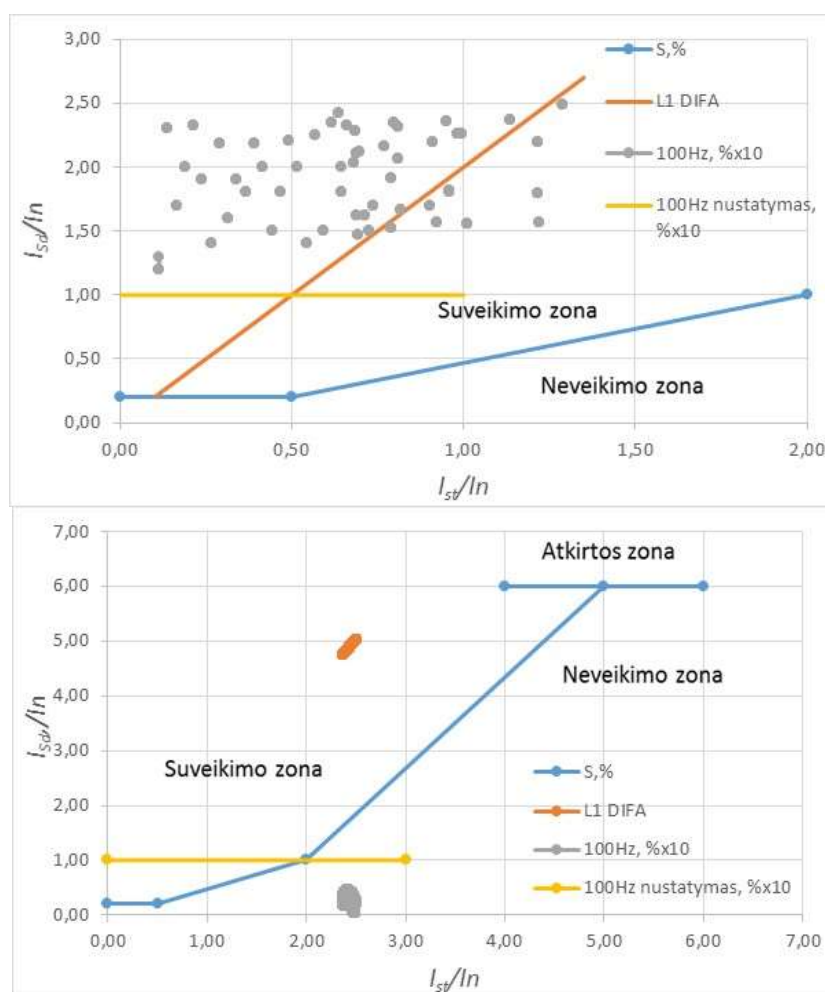
Geltona - antros harmonikos nustatymo dydis procentais, %x100.

Viršutinėje dalyje atvaizduotoje charakteristikoje pavaizduotas pereinamasis procesas, bandymus atliekant pirmu atveju. Iš atvaizduotų duomenų galima nustatyti, kol skirtuminė srovė viršija charakteristikos kreivę S, tuo metu vyrauja ~14-45% antros 100Hz harmonikos srovė. Todėl

100Hz dažnio srovei viršijus nuostatą 10% (geltona), apsaugų relė vykdo jungtuvo atjungimo blokavimą ir jungtuvas klaidingai neišjungiamas.

Apatinėje dalyje 2.24 paveiksle atvaizduotoje charakteristikoje atvaizduotas pereinamasis procesas, kuris atliekamas pagal antrąjį atvejį. Iš atvaizduotų duomenų galima nustatyti, kad skirtuminė srovė įjungimo momentu iš karto viršija charakteristikos kreivę S2, ir skirtuminės srovės taškas atsiduria suveikimo zonoje, o tuo metu vyrauja tik apie ~1-6% antros 100Hz harmonikos srovės. Todėl apsaugų relė jungtuvą nedelsiant atjungia.

Trečiojo tiriamo transformatoriaus TRP25000 diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika sudaryta ir pavaizduota 2.24 paveiksle. Charakteristikos nustatymai S1=20%, S2=100%, S3=500%. Transformatoriaus jungtuvo išjungimo blokavimas vykdomas 100Hz harmonikos srovei viršijus 10%.



2.24. pav. TRP25000 diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika(viršutinis – pirmas, apatinis antras atvejis).

Čia: Mėlyna - diferencinės apsaugos suveikimo charakteristika.

Oranžinė - apsaugų relės išskaičiuotas skirtuminės srovės dydis, A.

Pilka - antros harmonikos dydis procentais, %x10.

Geltona - antros harmonikos nustatymo dydis procentais, %x10.

Viršutinėje dalyje bandymai atlikti pagal pirmąjį atvejį, transformatorių paleidžiant tuščios eigos režime. Čia kol skirtuminė srovė viršija charakteristikos kreivę S tuo metu vyrauja ~12-28% antros 100Hz harmonikos srovės ir yra viršijama 10% nustatymas. Todėl apsaugų relė nevykdo jungtuvo atjungimo. O apatinėje pusėje bandymas atliktas pagal antrąjį atvejį. Skirtuminė srovė iš karto viršija charakteristikos kreivę S ir taškas atsiduria suveikimo zonoje esant 2-5% antros harmonikos dydžiui. Todėl apsaugų relė vykdo jungtuvo atjungimą.

2.3. Atliktų bandymų rezultatų aptarimas

Tyrimo metu atliktus transformatorių parametrų skaičiavimus, buvo nustatyti nominaliojo režimo įtampų, srovių, pilnutinės induktyviosios ir aktyviosios varžų parametrai, kurių dydžiai priklauso nuo transformatorių vardinių parametrų.

Atliekant realius ir MATLAB programa eksperimentinius tyrimus, pasirinktiems trifaziams galios transformatoriams, buvo ištirtas pereinamasis procesas transformatoriaus prijungimo prie tinklo metu. Nustatyta, kad įjungimo momentu TC1,5 transformatoriui susidarė 1,2 karto didesnė, o galingiems TRN2500 ir TRP25000 transformatoriams srovė įjungimo metu, vardinę transformatoriaus srovę viršijo daugiau kaip 4 ir 7 kartus. Nustatyta, kad šį srautą sudaro įvairių srovės harmonikų dedamosios. Pagrindinė įmagnetinimo srovė susideda iš aperiodinės nuolatinės srovės ir pagrindinės pirmos bei jos kartotinės antros harmonikos dedamosios.

Sudarius stabilizuotą diferencinės apsaugos suveikimo charakteristiką, buvo patikrintas ir grafiškai atvaizduotas, diferencinės apsaugos veikimas/neveikimas transformatorių įjungimo momentu, vykstant pereinamajam procesui. Naudojant transformatoriaus suveikimo charakteristiką ir joje grafiškai atvaizduojant bandymų rezultatus, buvo nustatyta, kad diferencinė apsaugų relė geba atskirti trumpojo jungimo srovę nuo įsotinio srovės ir prirėikus nedelsiant vykdyti saugomo įrenginio atjungimą.

3. IŠVADOS

Išanalizavus literatūros šaltinius nustatyta, kad trūksta rekomendacijų, kokias reikšmes parinkti transformatoriaus diferencinės apsaugos antros ir penktos harmonikos nustatymams. Todėl yra tikslinga ištirti transformatoriaus pereinamąjį procesą ir nustatyti rekomenduojamas skaitines reikšmes, reikalingas diferencinės apsaugų relės nuostatų nustatymams.

Atlikus eksperimentus, tiriant realių transformatorių pereinamąjį procesą nustatyta, kad 1,5kVA transformatoriui prijungimo metu srovė pakilo iki 2,6A ($1,2 \cdot I_N$), 2500kVA transformatoriui iki 60A ($4,8 \cdot I_N$), galingiausiam 25MVA transformatoriui prijungimo metu srovė pakilo net iki 1000A ($7,2 \cdot I_N$). O atliekant tuos pačius eksperimentus, modeliuojant MATLAB programa buvo gautos artimos reikšmės. Todėl atliekant diferencinės apsaugos charakteristikos tyrimus buvo laikoma, kad modeliavimo rezultatai artimi realybei.

Tiriant diferencinės apsaugos suveikimo charakteristiką, transformatorius jungiant prie tinklo tuščios eigos režime nustatyta, kad 1,5kVA transformatoriui 100Hz dažnio srovė kito 20%-70% diapazone, 2500kVA transformatoriui 14%-45% diapazone, o 25MVA transformatoriui 12%-28% diapazone. Kadangi apsaugų relės leistinas blokavimas nuo antros harmonikos nustatymo diapazonas yra 7%-20%, todėl 1,5kVA transformatoriui įvedus bet kokią reikšmę relė suveiks teisingai. O galingiems 2500kVA ir 25MVA transformatoriams rekomenduojamas nustatymas 10%.

Tiriant charakteristiką transformatoriaus paleidimo metu imituojant trumpąjį jungimą nustatyta, kad visais trimis atvejais antros harmonikos srovė kinta 1%-6% diapazone ir netrukdo diferencinės apsaugų relės darbui.

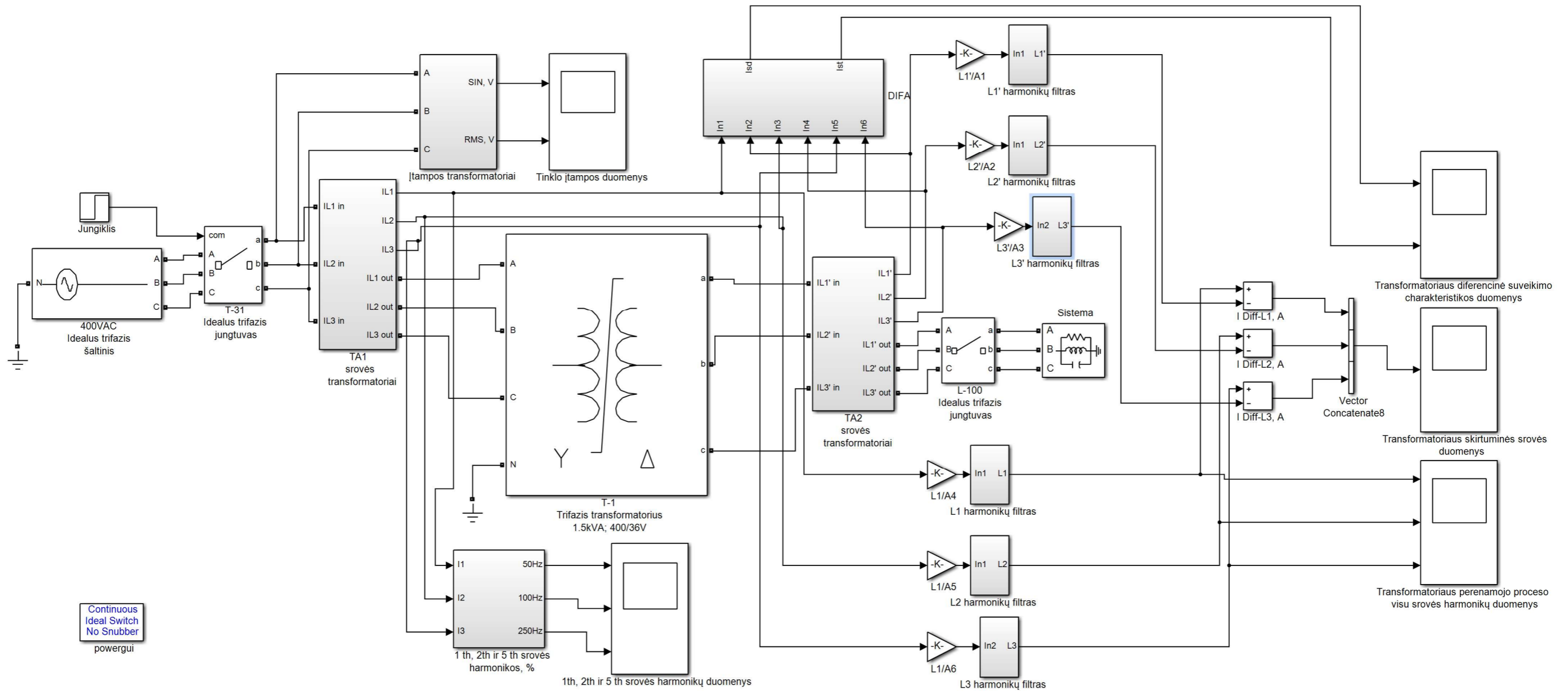
4. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Vikipedija „Laisvoji enciklopedija“ [Žiūrėta 2016.04.02] Prieiga per internetą:
<https://lt.wikipedia.org/wiki/Transformatorius> 2016-04-08
2. G. Svinkūnas A.Navickas. „ELEKTROS ENERGETIKOS PAGRINDAI. MOKOMOJI KNYGA“. Kaunas: Technologija 2013m. 228p.
3. Algirdas. Medeišis, „МЕХАНИКА, МОЛЕКУЛИНЁ ФИЗИКА, ЕЛЕКТРА ИР МАГНЕТИЗМАС. Fizikos praktikumas“, Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla, 2000m, 353 p.
4. Вольдек А. И. „ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ“. Ленинград: Энергия. 1978m, 297p.
5. Kasmanas S. „ELEKTROS MAŠINOS IR TRANSFORMATORIAI“. Vilnius, Mintis 1969m.
6. Gediminas Rinkevičius, Steponas Gečys, Artūras Kalvaitis, „ ELEKTROS MAŠINŲ PARAMETRAI IR SHARAKTERISTIKOS. Mokomoji knyga“, Kaunas, Technologija, 2010m, 98 p
7. P. Kostrauskas „ELEKTROS MAŠINOS. MOKYMO PRIEMONĖ“. Kaunas: KPI 1989m. 79p.
8. S. Marazas „ ELEKTROS MAŠINOS. MOKYMO LEIDINYS“. Vilnius: Mokslas. 304p.
9. Judita. Puišo „МАГНЕТИНЁС МЕДՂИАГОС ИР ЕЛЕМЕТАИ. MOKOMOJI KNYGA“. Kaunas : Vitae Litera, 2007. 167 p.
10. Гуртовцев А., Бордаев В., Чижонков В. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА НА 0,4 КВ: ИСПЫТАНИЯ, ВЫБОР, ПРИМЕНЕНИЕ. Журнал 2004. [Žiūrėta 2016.04.19]. Prieiga per internetą: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/26/12.php>
11. V. Draudvila ir A. Puodžiukynas. „RELINĖ APSAUGA MOKOMOJI KNYGA“, Kaunas : KPI, 1967. 239 p.
12. Albertas Nargėlas. ELEKTROS SISTEMŲ RELINĖ APSAUGA: MOKYMO PRIEMONĖ, Vilnius : Lietuvos TSR aukšt. ir spec. vid. mokslo m-ja, 1983. 100 p.
13. В. Я. Шмурьев. „ЦИФРОВЫЕ РЕЛЕ“. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2011. 60p.
14. А. М. Александров. „ОСНОВЫ НАЛАДКИ И ПРОВЕРОК УСТРОЙСТВ РЗА И ВТОРИЧНОЙ КОММУТАЦИИ“. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2004. 72 с.
15. SPAD 346C. „STABILIZED DIFFERENTIAL RELAY. USER'S MANUAL AND TECHNICAL DESCRIPTION“. ABB, VASSA, Filndland, 1997m
16. Schneider Electric, VAMP vartotojo vadovas „V265 MANUAL - 08/04/2016 1:40pm“ [Žiūrėta 2016.04.25] Prieiga per internetą: <https://m.vamp.fi/>

17. V. Kildišas, T. Tekorius. „PROCESŲ VALDYMO UŽDAVINIŲ SPRENDIMAS TAIKANT MATLAB SISTEMĄ : MOKOMOJI KNYGA“. Kaunas, Technologija, 2000.
18. Rimvydas Simutis, „SISTEMŲ MODELIAVIMAS IR IDENTIFIKAVIMAS“ :MOKOMOJI KNYGA, Kauno technologijos universitetas , Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008.
19. MATLAB pagalba „THREE-PHASE SATURABLE TRANSFORMER“ [Žiūrėta 2016.04.24] Prieiga per internetą:
http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/three-phase-saturable-transformer.html?s_tid=srchtitle
20. MATLAB pagalba „SATURABLE TRANSFORMER WITH HYSTERESIS“ [Žiūrėta 2016.04.24] Prieiga per internetą:
http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/saturable-transformer-with-hysteresis.html?s_tid=srchtitle
21. MATLAB pagalba „POWER_HYSTERESIS“ [Žiūrėta 2016.04.24] Prieiga per internetą:http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/power_hysteresis.html?s_tid=srchtitle
22. ABB Transformer Protection Relay, ABB vartotojo vadovas „SPAD346C MANUAL“ [Žiūrėta 2016.04.29] Prieiga per internetą:
https://library.e.abb.com/public/266d6776dc5cc45dc2256bf0004c4371/FM_SPAD346C_750096_EN_ffbea_2010.pdf

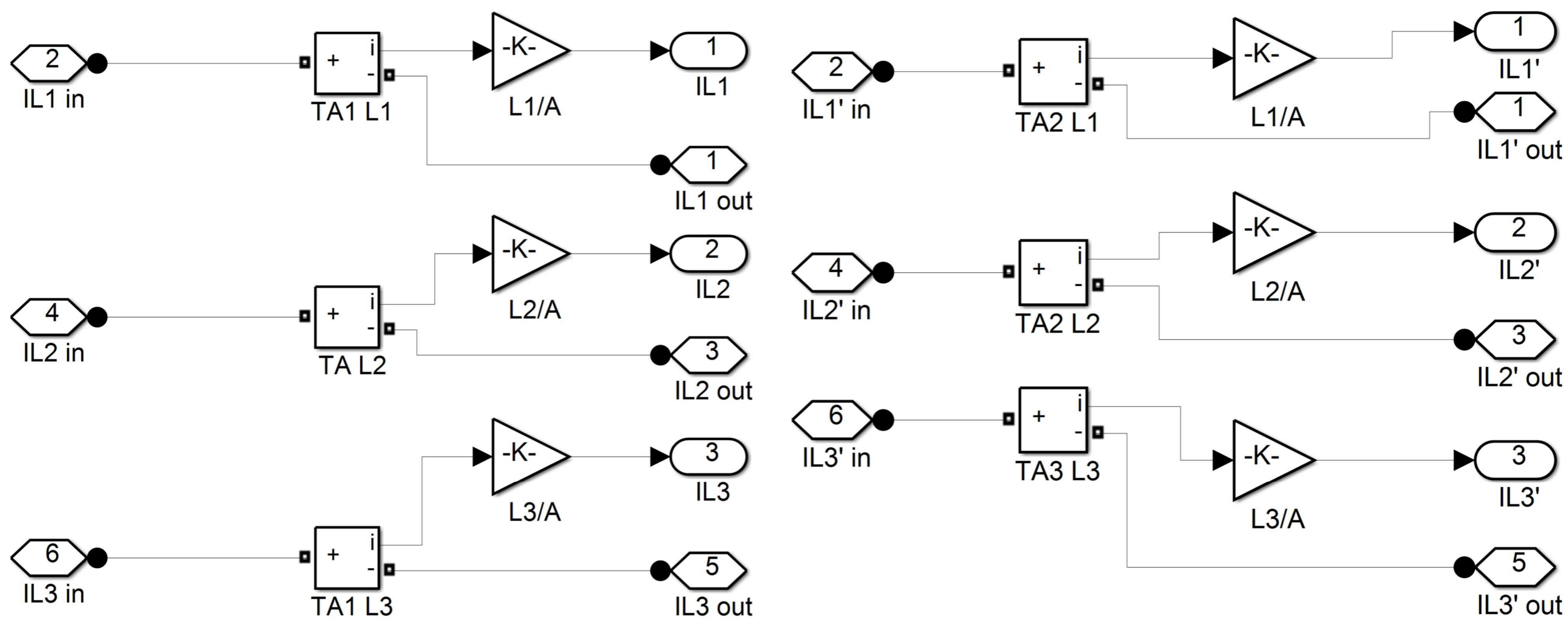
PRIEDAI

Diferencinės apsaugos eksperimentinio tyrimo modelis

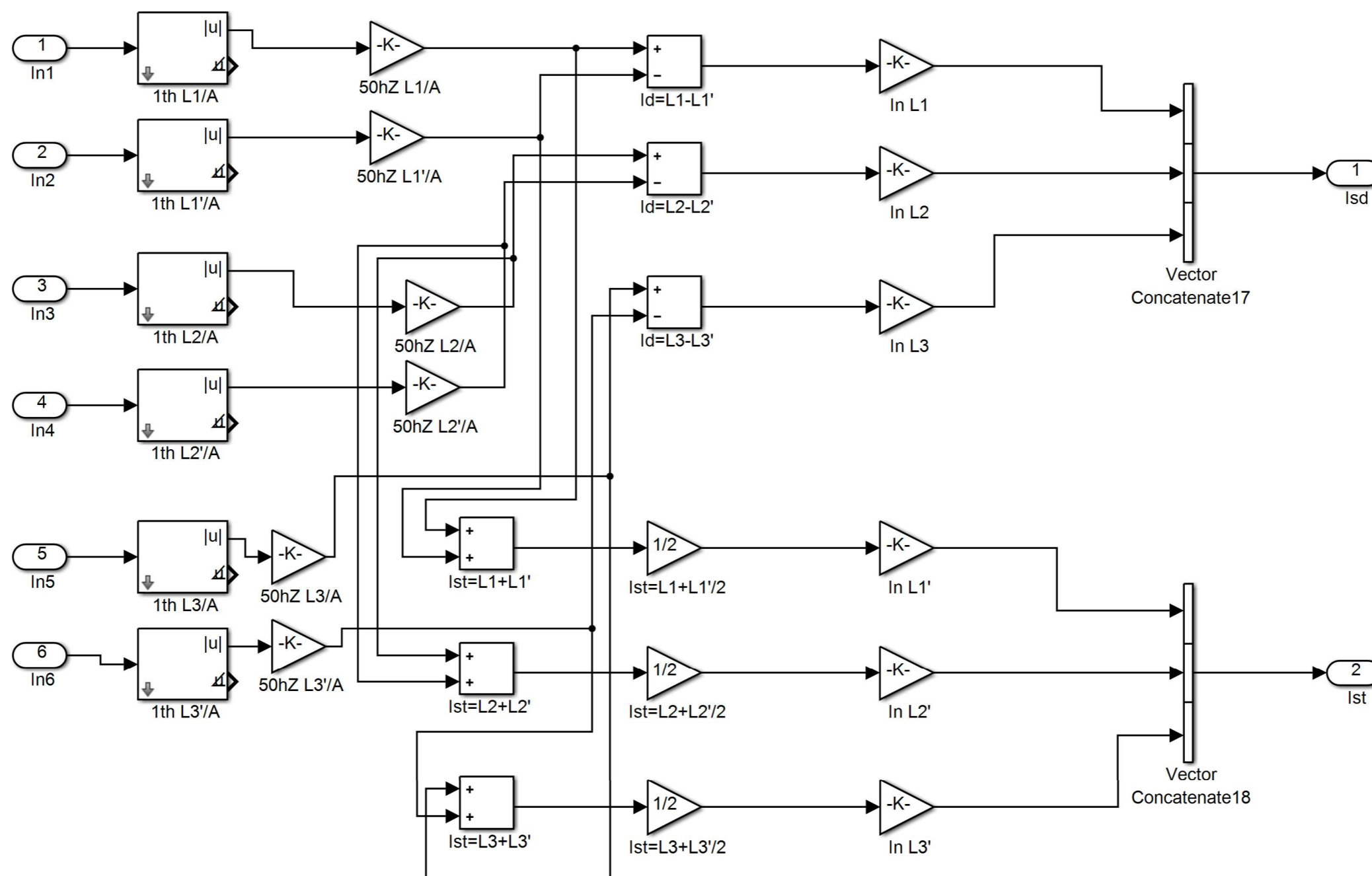


Continuous
Ideal Switch
No Snubber
powergui

Diferencinės apsaugos TA1 ir TA2 srovės transformatorių sujungimo schema



Diferencinės suveikimo charakteristikos nustatymo schema



Pirmos, antros ir penktos srovės harmonikų nustatymo schema

