



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Martynas Stasionis

TRANSFORMATORIAUS DIFERENCINĖS APSAUGOS
VEIKIMO ESANT PEREINAMIESIEMS PROCESAMS SROVĖS
TRANSFORMATORIUJE TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Almantas Bandza

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**TRANSFORMATORIAUS DIFERENCINĖS APSAUGOS
VEIKIMO ESANT PEREINAMIESIEMS PROCESAMS SROVĖS
TRANSFORMATORIUJE TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

Doc. dr. Almantas Bandza

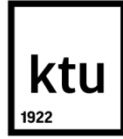
Recenzentas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

Projektą atliko

Martynas Stasionis

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Martynas Stasionis

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimo esant pereinamiesiems procesams srovės transformatoriuje tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. gegužės 27 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Martyno Stasionio**, baigiamasis projektas tema „Transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimo esant pereinamiesiems procesams srovės transformatoriuje tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Stasionis, Martynas. Transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimo esant pereinamiesiems procesams tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza ; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Reikšminiai žodžiai: *Diferencinė apsauga, srovės transformatorius, modelis, SIMULINK.*

Kaunas, 2018. 44 p.

SANTRAUKA

Magistro baigiamajame darbe nagrinėjamas transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimas esant pereinamiesiems procesams srovės transformatoriuje.

Apžvalginėje dalyje aprašomas srovės transformatoriaus veikimas, pateikiama įsotinio charakteristika, nagrinėjamas jo veikimas pereinamojo proceso metu. Taip pat pateikiama informacija apie diferencines apsaugas, jų veikimą. Aprašomi transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimo principai, analizuojami panašūs tyrimai.

Tiriamajoje dalyje aprašoma reali pastotė, pateikiama tinklo schema, sudaroma skaičiuojamoji schema. Pagal skaičiuojamąją schemą atliekami skaičiavimai ir jų rezultatai pateikiami lentelėse. Atsižvelgus į gautus skaičiavimų rezultatus bei naudojamus įrenginius sudaromas tiriamasis modelis „SIMULINK“ aplinkoje, detaliam aprašomi modelyje naudojami elementai.

Tyrimų rezultatų dalyje patikrinamas modelio veikimas parinkus kelis skirtingus įrenginius, pateikiami ir analizuojami skirtingų modeliavimų rezultatai.

Stasionis Martynas. Reaserch of Differential Protection of Transformer under Transient Processes in Current Transformer. Final Project of master / supervisor assoc. dr. Almantas Bandza; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Key words: *Differential protection, current transformer, model, SIMULINK*

Kaunas, 2018. 44 p.

SUMMARY

The master's thesis studies the operation of the transformer differential protection in case of transient processes in a current transformer.

In the overview section, the operation of the current transformer, its operation during transient processes and its saturation characteristic are analyzed. Information is provided on differential protection and its operation. The basic principles of transformer differential protection are described and similar studies are analyzed.

The network scheme and a scheme for calculations are presented in the research section. Based on the network scheme, the calculations are made and listed in the tables. The model in „SIMULINK“ has been developed based on the results of calculations and the equipment used.

Modeling results and their analysis are presented in the research results section.

Turinys

Įvadas	7
1 Apžvalginė dalis.....	8
1.1 Srovės transformatorius	8
1.2 Srovės transformatoriaus veikimas.....	8
1.3 Srovės transformatorių paklaidos	9
1.4 Srovės transformatoriaus įsotinimas.....	11
1.5 Diferencinė apsauga	15
1.6 Galios transformatoriaus diferencinė apsauga.....	17
1.7 Diferencinės apsaugos modelio sudarymas	20
2 Tiriamoji dalis	22
2.1 Tinklo schema.....	22
2.2 Trumpųjų jungimų skaičiavimas	25
2.3 Tiriamasis modelis.....	27
3 Tyrimo rezultatų dalis	31
3.1 Transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimo tyrimas	31
3.1.1 Bandymas Nr. 1	31
3.1.2 Bandymas Nr. 2	37
Išvados	43
Literatūra.....	44

ĮVADAS

Paprastai yra trys ypatybės skirtos transformatoriaus vidaus gedimams aptikti – fazių srovių padidėjimas, diferencinės srovės padidėjimas ir dujų susidarymas, kurį sukelia elektros lankas. Kai transformatoriaus viduje arba šalia jo įvyksta avarija, jis turi būti nedelsiant išjungtas tam, kad nebūtų didelių pažeidimų ir / arba nebūtų pakenkta sistemos stabilumui ir kokybei. Tokioms avarijoms nustatyti paprastai naudojamos šios apsaugos: maksimalios srovės apsauga, skirta saugoti nuo srovių padidėjimo, diferencinė apsauga, fazių srovių skirtumo padidėjimui nustatyti ir dujų srauto apsauga, apsaugoti nuo elektros lanko.

Šis darbas orientuotas į galios transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimo tyrimą kai trumpasis jungimas įvyksta:

diferencinės apsaugos saugomoje zonoje;

už diferencinės apsaugos saugomos zonos ribų.

Kadangi avarijos metu per matavimo transformatorius tekančios pirminės srovės padidėja labai greitai, t.y. įvyksta srovės šuolis, padidėja rizika juos įmagnetinti kas sukeltų antrinių srovių iškraipymus. To pasekoje apsauga gali veikti neteisingai:

kai trumpasis jungimas įvyksta už saugomos zonos ribų apsauga privalo ignoruoti avariją, tačiau permagnetinus matavimo transformatorius ji gali suveikti klaidingai ir taip išjungti abu transformatoriaus įvadus, kas sukeltų nemažai nuostolių ir pakenktų tinklo stabilumui;

kai trumpasis jungimas įvyksta ant galios transformatoriaus išvadų, apsauga privalo be laiko užlaikymo išjungti jį, bet esant iškraipytiems matavimams, diferencinė apsauga gali veikti vėluodama, todėl gali būti nepataisomai sugadintas transformatorius.

Baigiamojo magistrinio darbo tikslas – nustatyti kaip veiks transformatoriaus diferencinė apsauga esant pereinamiesiems procesams srovės transformatoriuje.

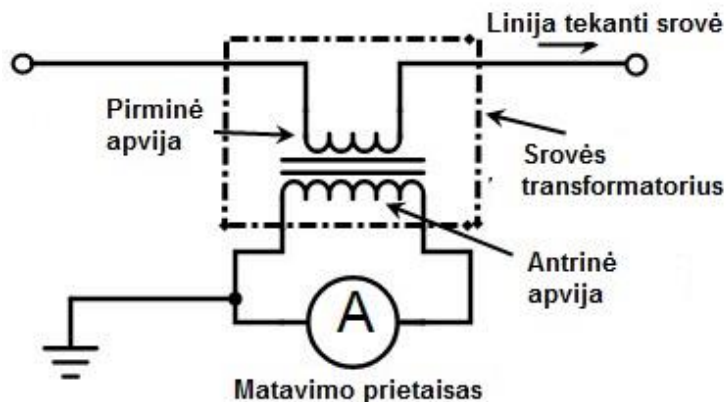
Tikslui pasiekti iškelti uždaviniai:

- 1) aptarti pereinamuosius procesus srovės transformatoriuje;
- 2) apžvelgti transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimą;
- 3) sudaryti bandymo schemą MatLab Simulink aplinkoje;
- 4) iširti diferencinės apsaugos veikimą esant skirtingiems srovės transformatorių parametrams.

1 APŽVALGINĖ DALIS

1.1 Srovės transformatorius

Srovės transformatorius - tai srovės keitiklis, kuris antrinėje grandinėje išduoda srovės dydį, proporcingą srovei, tekančiai pirminėje grandinėje. Jie naudojami didelėms srovėms iš elektros grandinės konvertuoti į srovę, kurią gali matuoti matavimo ir valdymo įrenginiai. Be to, jie užtikrina izoliaciją įrenginiams nuo aukštos įtampos grandinių.

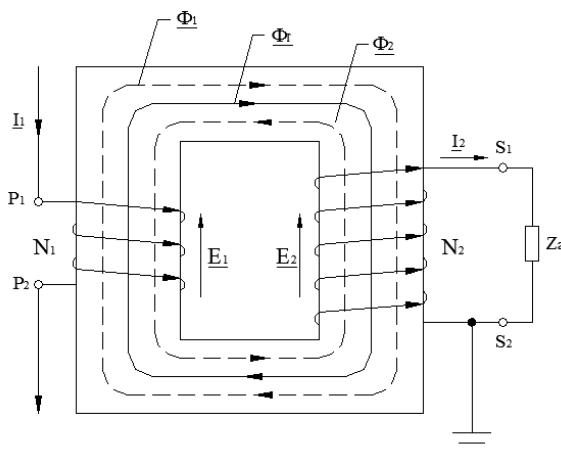


1.1 pav. Srovės transformatoriaus principinė schema.

Srovės transformatoriaus pirminė apvija susideda iš vienos ar kelių vijų, turinčių didelį skerspjūvio plotą ir sujungtų su grandine, kurioje turi būti nustatomas tekančios srovės dydis. Antrinė apvija sudaryta iš daug plonų vijų. Ji yra prijungta prie relės veikimo ritės arba matavimo prietaiso ritės, kaip parodyta paveiksle (žr. 1.1 pav.). Dažniausiai naudojami srovės transformatoriai yra kuriami taip, kad, esant nominaliai pirminei srovei, antrinėse grandinėse srovės dydis yra 1A arba 5A.

1.2 Srovės transformatoriaus veikimas

Srovės transformatoriaus veikimas yra panašus į įprasto galios transformatoriaus veikimą.



1.2 pav. Srovės transformatoriaus schema.

Srovės transformatorių sudaro pirminė apvija N_1 , antrinė apvija N_2 , kuri sujungta su apkrovos varža Z_a , ir plieninis magnetolaidis, ant kurio užvyniotos abi apvijos. Pirminė apvija tekanti srovė I_1 sukuria magnetovarą I_1N_1 , o antrinė apvija tekanti srovė I_2 sukuria magnetovarą I_2N_2 , kurios atitinkamai indukuoja magnetinius srautus Φ_1 ir Φ_2 . Magnetovaros ir jų kuriami magnetiniai srautai Φ_1 ir Φ_2 geometriškai sudedami sudaro liekamąją magnetovarą $I_\mu N_l$ ir liekamąjį magnetinį srovės transformatoriaus srautą Φ_T :

$$I_1N_1 - I_2N_2 = I_\mu N_l; \quad (1)$$

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_T. \quad (2)$$

Liekamasis magnetinis srautas Φ_T , kitaip vadinamas darbinium arba pagrindiniu, kerta abi apvijas ir indukuoja antrinėje apvijoje vidinę įtampą E_2 , kuri uždaroje grandinėje sukuria antrinės apvijos srovę I_2 . Magnetinį srautą Φ_T sukuria liekamosios magnetovaros $I_\mu N_l$ srovė I_μ . Pastaroji yra srovės I_1 dalis ir vadinama įmagnetinančia srove. Kadangi srovės matavimo prietaiso aktyvioji varža santykinai maža, tai galima laikyti, kad srovės transformatorius dirba trumpojo jungimo režimu. Kaip žinoma, trumpojo jungimo režimas lemia mažą magnetolaidžio išotinimą. Todėl srovės transformatorių plieno magnetinio srauto tankis yra mažas ($B \leq 0,1T$) [1].

Mažą magnetinio srauto tankį atitinka maža įmagnetinimo srovė I_μ . Nepaisant tuščiosios veikos srovės I_μ , tarp pirminės ir antrinės srovės galioja priklausomybė [2]:

$$I_1N_1 = I_2N_2; \quad (3)$$

arba

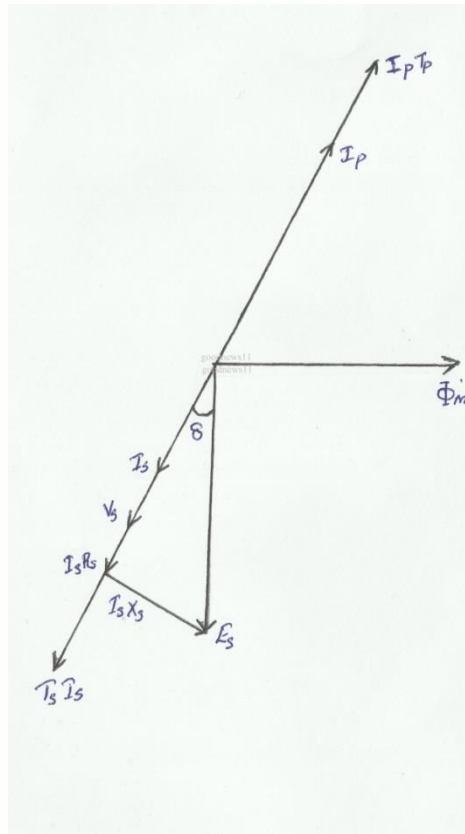
$$I_1 = \frac{I_2}{k}; \quad (4)$$

čia k – transformacijos koeficientas, vadinamas vijų koeficientu. Jis apskaičiuojamas pagal šią išraišką:

$$k = \frac{I_1}{I_2}. \quad (5)$$

1.3 Srovės transformatorių paklaidos

Idealus srovės transformatorius gali būti apibūdinamas kaip transformatorius, kuriame bet koks įvykis pirminėje grandinėje yra tiksliai atvaizduojamas be jokių koeficiento ir fazių nuokrypių antrinėje grandinėje.



1.3.1 pav. Idealaus srovės transformatoriaus fazorių diagrama.

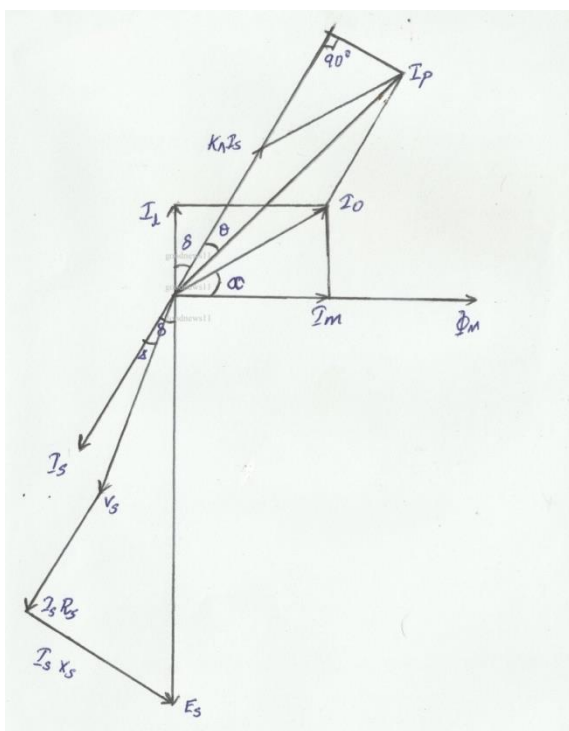
čia I_p – pirminės grandinės srovė, T_p – vijų skaičius pirminėje apvijoje, I_s – antrinės grandinės srovė, T_s – vijų skaičius antrinėje apvijoje, φ_m – darbinis magnetinis srautas, E_s – įtampa, indukuota antrinėje grandinėje, X_s – antrinės grandinės reaktyvioji varža, R_s – antrinės grandinės aktyvioji varža, σ – kampas tarp antrinėje grandinėje indukuotos įtampos ir srovės [3].

Idealiame transformatoriuje:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2; \quad (6)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (7)$$

Realiam srovės transformatoriui apvijos turi aktyviają ir reaktyviają varžas, o transformatorius turi įmagnetinimo ir srovės nuostolių komponentes, kurios palaiko srautą. Dėl šios priežasties realioje situacijoje srovių santykis nėra lygus vijų santykiui. Taip pat egzistuoja fazių kampų skirtumas tarp pirminės ir antrinės srovių, dėl to mes turime koeficiento ir fazių kampų paklaidas.



1.3.2 pav. Realaus srovės transformatoriaus fazorių diagrama.

čia R_s, x_s – antrinės apvijos aktyvioji ir reaktyvioji varžos, r_p, x_p – pirminės apvijos aktyvioji ir reaktyvioji varžos, E_p, E_s – pirminės ir antrinės grandinės indukuotos įtampos, T_p, T_s – pirminės ir antrinės apvijų vijų skaičius, I_p, I_s – pirminės ir antrinės grandinės srovės, θ - transformatoriaus fazės kampas, φ_m – darbinis magnetinis srautas, σ – kampas tarp antrinėje grandinėje indukuotos įtampos ir srovės, I_0 – įmagnetinimo srovė [3].

Srovės paklaida:

$$R = \frac{I_1}{I_2} = k + (I_1 \cos \sigma + I_m \sin \sigma) / k I_2. \quad (8)$$

Fazės paklaida:

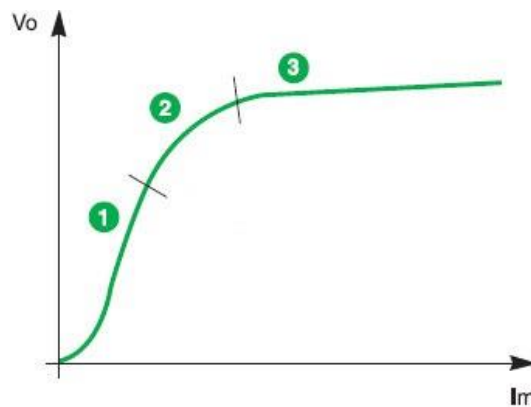
$$\theta = \frac{180}{\pi} (I_1 \cos \sigma + I_m \sin \sigma) / k I_2. \quad (9)$$

1.4 Srovės transformatoriaus įsotinimas

Srovės transformatoriai turi unikalią įmagnetinimo kreivę, kuri kartu su transformacijos koeficientu charakterizuoja jo veikimą. Įmagnetinimo kreivę galima padalinti į 3 atskiras zonas [4]:

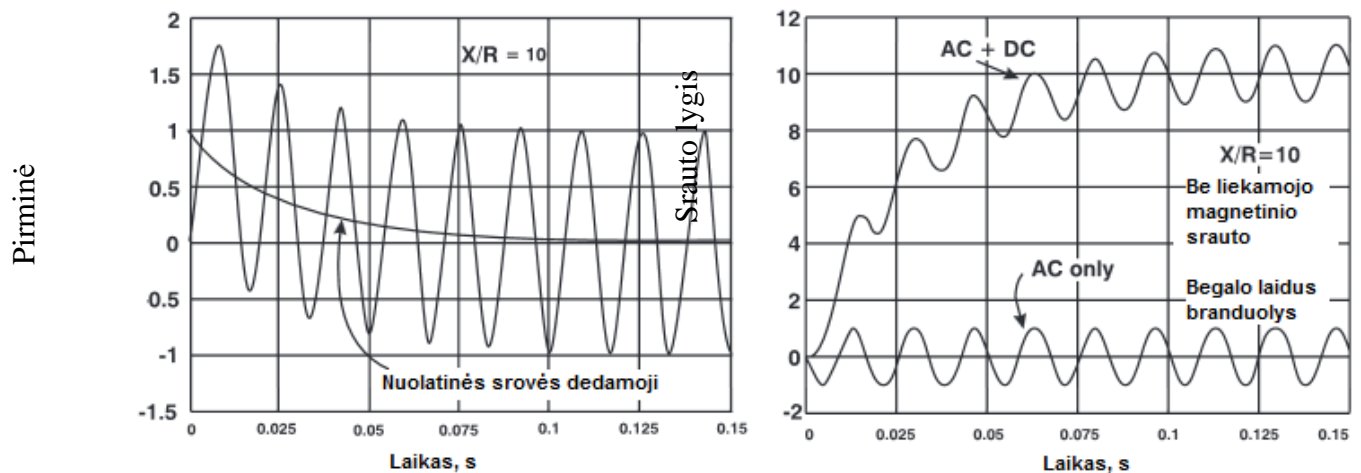
- **neįsotinta zona:** Įmagnetinimo srovės I_m dydis mažas, įtampa V_0 (taip pat ir I_s) didėja proporcingai pirminei srovei;
- **tarpinė zona:** Įmagnetinimo kreivė nėra pertraukiama, tačiau šioje srityje sunku nustatyti tikslų įsotinimo įtampos tašką;

- **įsotinta zona:** kreivė tampa praktiškai horizontali, transformacijos koeficiento paklaida yra didelė, antrinė srovė iškraipoma dėl transformatoriaus įsotinimo;



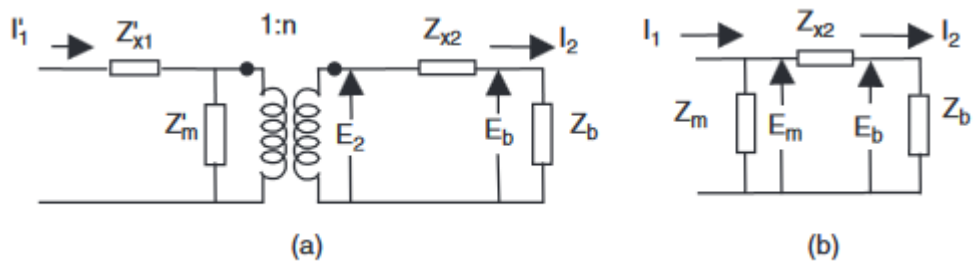
1.4.1 pav. Įmagnetinimo charakteristika. Išėjimo įtampa V_0 yra įmagnetinimo srovės funkcija $V_0=f(I_m)$.

Srovės transformatoriaus veikimas, kai jis dirba normaliu režimu ir neviršijama nominali srovė, (žr. 1.4.1 pav. (1)) nėra svarbus tol, kol tenkinami apsaugos įrenginių reikalavimai. Tačiau įvykus trumpajam jungimui saugomoje zonoje labai padidėja tekanti srovė ir ji gali turėti daug nuolatinės srovės dedamųjų (komponenčių), kurios įsotina transformatoriaus šerdį. Visi šie faktoriai gali privesti prie srovės transformatoriaus įsotinimo ir pastebimai iškraipyti antrinės srovės sinusoidę.



1.4.2 pav. Pirminė srovė su nuolatinės srovės komponente [6].

Nepaisydami fakto, kad transformatoriaus šerdies įsotinimas yra netiesinis reiškinys, pirmiausia nustatysime santykį tarp srovės transformatoriaus trumpojo jungimo srovės pirminėje grandinėje, jo apkrovos ir šerdį veriančio magnetinio srauto, kai šerdis turi tiesinę įmagnetinimo charakteristiką. Tai atlikę galėsime kokybiškai išnagrinėti netiesiškumo poveikį srovės transformatoriaus veikimui.

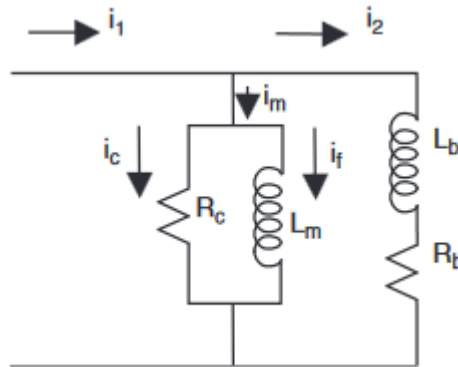


1.4.3 pav. Srovės transformatoriaus ekvivalentinė schema (a) ir supaprastinta schema (b).

Nagrinėjant srovės transformatoriaus ekvivalentinę schemą (žr. 1.4.3 pav.), kurioje suminė antrinės grandinė varža išreikšta:

$$Z_b = (R_b + j\omega L_b). \quad (10)$$

Toliau, priimdami, kad magnetinė varža Z_m tai lygiagrečiai sujungta šerdies nuostolių varža R_c ir magnetinis induktyvumas L_m , gauname srovės transformatoriaus ekvivalentinę schemą pereinamojo proceso analizei (žr. 1.4.4 pav.).



1.4.4 pav. Srovės transformatoriaus ekvivalentinė schema pereinamojo proceso analizei.

Joje pirminė srovė $i_1(t)$, kurioje yra eksponentiškai nykstanti nuolatinės srovės dedamoji, išreikšta:

$$i_1(t) = I_{max} \left[\cos(\omega t - \theta) - \varepsilon^{\frac{-t}{T}} \cos\theta \right], \text{ kai } t > 0; \quad (11)$$

$$= 0, \text{ kai } t < 0;$$

kur I_{max} – nusistovėjusio režimo trumpojo jungimo srovės piko vertė, T yra pirminės trumpojo jungimo srovės laiko pastovioji, o θ – įtampos kreivės kampas trumpojo jungimo metu. Taip pat buvo priimta, jog prieš trumpąjį jungimą nebuvo pirminės srovės.

Pritaikius Laplaso transformaciją pirminė srovė išreiškiama:

$$i_1(s) = I_{max} \cos\theta \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{T}{1 + sT} \right) + I_{max} \sin\theta \left(\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right); \quad (12)$$

taip pat,

$$v_2(s) = R_c I_c = s L_m i_f = i_2 (R_b + s L_b); \quad (13)$$

kur šerdies liekamasis magnetinis srautas λ aprašomas $L_m i_f$. Be to, antrinė srovė lygi:

$$i_2 = i_1 - (i_f - i_c); \quad (14)$$

Iš lygčių (12) ir (13) galime išreikšti λ ir v_2 pirminės srovės i_1 atžvilgiu. Priimame, kad apkrovos induktyvumas lygus nuliui, tokiu atveju:

$$\lambda = \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} i_1; \quad (15)$$

$$v_2 = \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} I_1; \quad (16)$$

kur

$$\tau = \frac{R_c L_m + R_b L_m}{R_b R_c}; \quad (17)$$

į lygtis (15) ir (16) įstatę pirminės srovės išraišką iš lygties (17) ir atlikę atvirkštinę Laplaso transformaciją, išreiškiame liekamojo magnetinio srauto λ ir antrinės srovės i_2 išraiškas:

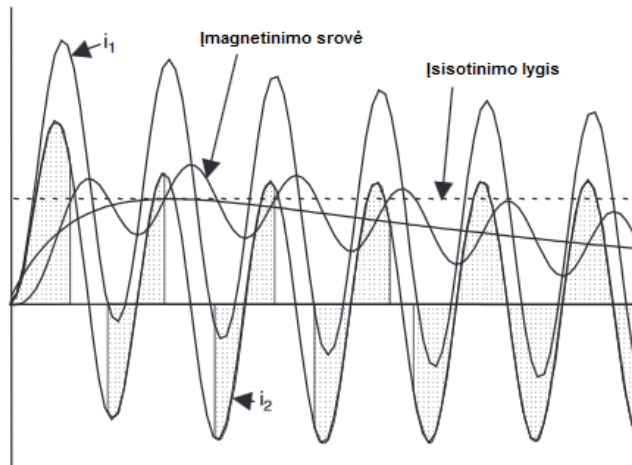
$$\lambda = I_{max} \cos\theta \frac{R_c R_b}{R_c + R_b} \left\{ \varepsilon^{\frac{-t}{\tau}} \left[-\frac{T}{\tau - T} + (\sin\varphi \cos\varphi \tan\theta - \cos^2\varphi) \right] - \varepsilon^{\frac{-t}{T}} \left(\frac{\tau}{\tau - T} \right) - \omega\tau \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \sin(\omega t - \theta - \varphi) \right\}; \quad (18)$$

$$i_2 = \frac{1}{B_b} \frac{d\lambda}{dt} = I_{max} \cos\theta \frac{R_c}{R_c + R_b} \left\{ \varepsilon^{\frac{-t}{\tau}} \left[-\frac{T}{\tau - T} + (\sin\varphi \cos\varphi \tan\theta - \cos^2\varphi) \right] - \varepsilon^{\frac{-t}{T}} \left(\frac{\tau}{\tau - T} \right) - \omega\tau \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} \sin(\omega t - \theta - \varphi) \right\}; \quad (19)$$

kur

$$\tan\varphi = \omega\tau. \quad (20)$$

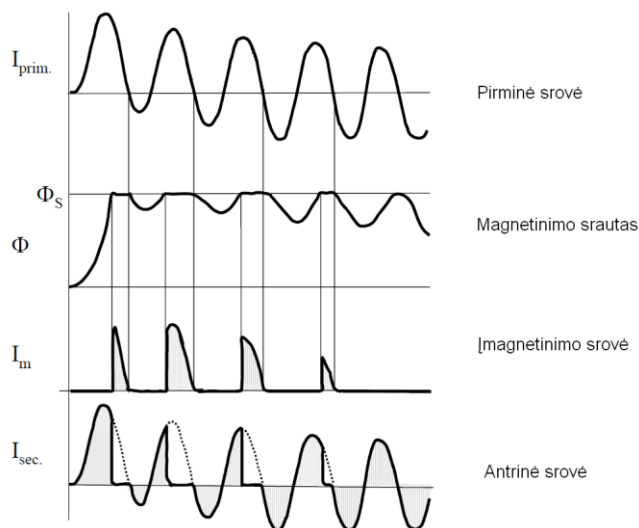
Šios pirminės, antrinės ir įmagnetinimo srovių išraiškos pavaizduotos charakteristikoje (žr. pav. 1.9):



1.4.5 pav. Srovės transformatoriaus pirminė ir antrinė srovės, liekamasis magnetinis srautas.

Kai apkrova induktyvioji, negalime nepaisyti jos induktyvumo L_b , tokiu atveju išraiškos (18) ir (19) tampa daug sudėtingesnės, kadangi jose atsiranda papildomos laiko konstantos [5].

Nuolatinės srovės dedamoji, atsiradusi trumpojo jungimo srovėje, iššaukia žymų įmagnetinimo srauto padidėjimą virš nusistovėjusio režimo piko vertės. Priimkime, kad pasiekusi įsisotinimo lygį (žr. 1.4.5 pav. pažymėta punktyrine linija) įmagnetinimo kreivė tampa horizontali. Tada laikas, kai λ yra virš įsotinimo lygmens, laikomas įsotinimo pastoviaja ir įmagnetinimo induktyvumas L_m (žr. 1.4.4 pav.) tampa lygus 0. Tuo periodu, kai įmagnetinamas transformatorius, antrine apvija tekanti srovė taip pat tampa lygi 0 (žr. 1.4.5 pav. netušuota sritis). Nuolatinės srovės dedamajai pradėjus mažėti, mažėja ir įmagnetinimo srautas. Sumažėjus įmagnetinimo srautui po kurio laiko srovės transformatorius išsimagnetins, tai priklauso ir nuo grandinės parametrų. Svarbu paminėti, jog permagnetintas srovės transformatorius antrą kartą įsimagnetins greičiau.



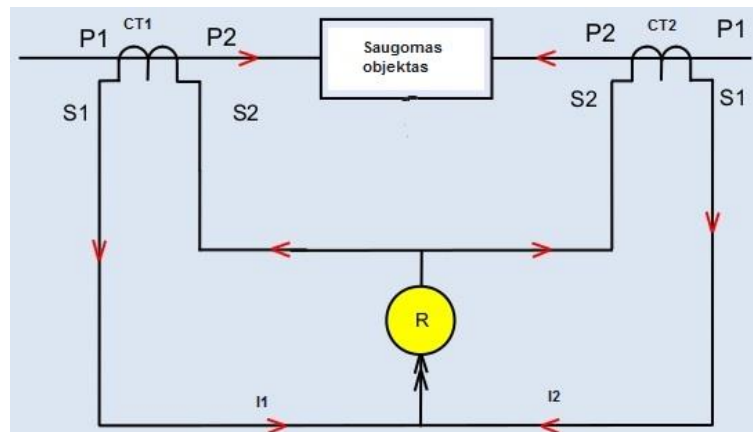
1.4.6 pav. Srovės transformatoriaus permagnetinimas.

1.5 Diferencinė apsauga

Elektrinėse įrenginiams saugoti plačiai naudojama srovių diferencinė apsauga. Ši apsauga gali būti dviejų tipų: išilginė ir skersinė. Pirmoji naudojama trumpų linų, transformatorių, variklių

apsaugai. Skersinė diferencinė apsauga taikoma bent dviejų lygiagrečių linijų apsaugai bei sinchroninio generatoriaus apsaugai nuo statoriaus tarpvijinių sujungimų [1].

Ši apsauga lygina saugomo įrengimo srovės pradžioje ir gale.



1.5 pav. Principinė diferencinės apsaugos veikimo schema.

Į relinės apsaugos terminalą patenka I_1 – srovė saugomo objekto pradžioje ir I_2 – srovė saugomo objekto pabaigoje, jame atliekamas vektorinis sumavimas. Šios srovės parenkamos taip, kad, kai nėra gedimo saugomame objekte, jų skirtumas būtų artimas nuliui, o įvykus avarijai – staiga padidėtų. Suveikimo srovė apskaičiuojama pagal išraišką:

$$I_s = k_a I_{nb,max}; \quad (21)$$

čia k_a – atsargos koeficientas (1,3-1,4), $I_{nb,max}$ – maksimali nebalanso srovė, t.y. maksimali srovė, kai linijoje nėra gedimo. Nebalanso srovė atsiranda dėl relės terminalo matavimo paklaidų, I_1 ir I_2 srovių nevienodumo. Apsaugos jautrumas apskaičiuojamas:

$$k_j = \frac{I_{k,min}}{I_s} > 2; \quad (22)$$

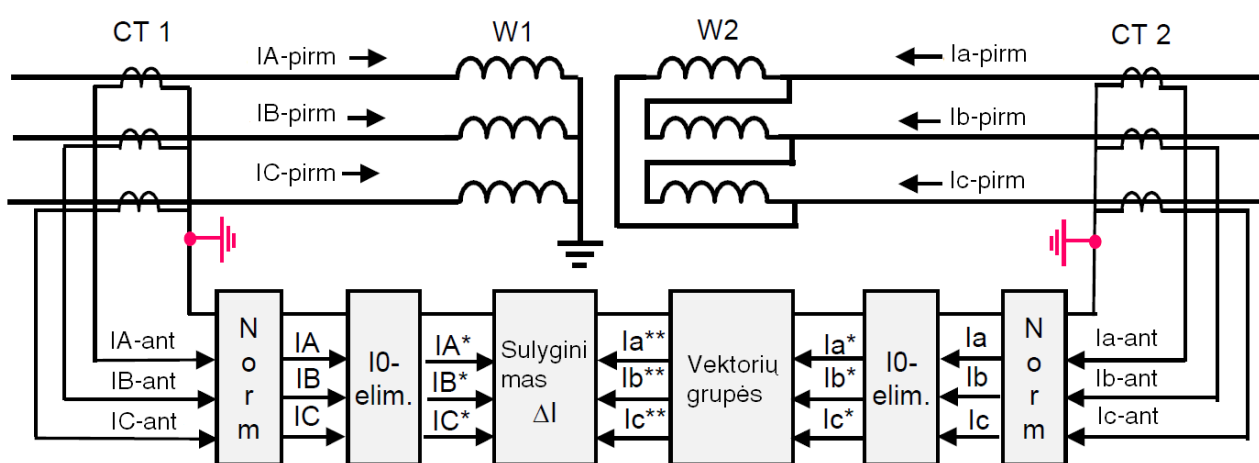
čia $I_{k,min}$ – minimali trumpojo jungimo srovė.

Išilginės srovių diferencinės apsaugos jautrumo koeficientas turi būti [7]:

- generatorių, transformatorių, linijų apsaugos – 2,0;
- šynų diferencinės apsaugos – 2,0;
- generatorių įtampos šynų supaprastintos diferencinės distancinės apsaugos srovinio paleidimo elemento – 2,0;
- generatoriaus įtampos šynų supaprastintos diferencinės srovės apsaugos pirmosios pakopos, veikiančios atkirtos principu, – 1,5.

1.6 Galios transformatoriaus diferencinė apsauga

Galios transformatoriaus diferencinė apsauga pagrįsta išilginės srovių diferencinės apsaugos veikimo principu, dėl šios priežasties prieš transformatorių ir už jo statomi srovės transformatoriai. Ši apsauga gali jautriai, greitai ir selektyviai apsaugoti transformatorių nuo trumpųjų jungimų atsirandančių įrenginio viduje arba ant transformatoriaus išvadų. Ji taikoma galios transformatoriams, kurių galia viršija 6,3 MVA, išimtiniais atvejais – 1,6 MVA jeigu srovės atkirta netenkina jautrumo reikalavimų. Taip pat diferencinė apsauga neturi reaguoti į transformatoriaus įmagnetinimo šuolių sroves bei išorinius trumpuosius jungimus. Svarbu paminėti, jog šiuolaikiniai mikroprocesoriniai apsaugų terminalai leidžia įvesti skirtingus transformacijos koeficientus, todėl statomi srovės transformatoriai gali būti skirtingų koeficientų.



1.6.1 pav. Srovių adaptacija palyginimui skaitmeninėje transformatoriaus diferencinėje apsaugoje.

Blokelyje „Norm“ visų antrinių srovių matavimai perskaičiuojami prie vardinės transformatoriaus galios S_N , įvertinami santykiniai srovės transformatorių koeficientai k_{CT1} ir k_{CT2} :

$$I_{N-TR-W1} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N1}}; \quad (23)$$

$$I_{N-TR-W2} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{N2}}; \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{I_{N-pirm-CT1}}{I_{N-TR-W1}} \cdot \begin{bmatrix} I_{A-ant} \\ I_{B-ant} \\ I_{C-ant} \end{bmatrix} = k_{CT1} \cdot \begin{bmatrix} I_{A-ant} \\ I_{B-ant} \\ I_{C-ant} \end{bmatrix}; \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{I_{N-pirm-CT2}}{I_{N-TR-W2}} \cdot \begin{bmatrix} I_{a-ant} \\ I_{b-ant} \\ I_{c-ant} \end{bmatrix} = k_{CT2} \cdot \begin{bmatrix} I_{a-ant} \\ I_{b-ant} \\ I_{c-ant} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Tada pašalinama nulinė dedamoji. Ją pašalinti būtina visose įžemintose apvijoje.

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_A + I_B + I_C). \quad (27)$$

Pašalinę nulinę dedamąją gauname:

$$\begin{bmatrix} I_A^* \\ I_B^* \\ I_C^* \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Transformatoriaus aukštos įtampos pusėje naudojamas apvijų jungimas įžeminta žvaigžde, o žemoje pusėje – trikampiui (žr. 1.6.1 pav.). Normalaus darbo metu srovės aukštos ir žemos įtampos pusėse skiriasi savo dydžiu ir faze (fazinio kampo skirtumas – 30^0). Dėl to reikia įvertinti apvijų jungimo grupę žemos įtampos pusėje:

$$\begin{bmatrix} I_a^{**} \\ I_b^{**} \\ I_c^{**} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a^* \\ I_b^* \\ I_c^* \end{bmatrix}; \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} I_a^{**} \\ I_b^{**} \\ I_c^{**} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a^* \\ I_b^* \\ I_c^* \end{bmatrix}; \quad (30)$$

Lygtyje (29) pavaizduota Y/d-11 jungimo grupė, o lygtyje (30) – Y/d-5.

Pabaigoje algoritmo apskaičiuojama diferencinė srovė [9]:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_A \\ \Delta I_B \\ \Delta I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A^* \\ I_B^* \\ I_C^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_a^{**} \\ I_b^{**} \\ I_c^{**} \end{bmatrix}; \quad (31)$$

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

$$I_{dif} = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2|; \quad (32)$$

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

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

$$I_{stab} = k|\vec{I}_1 - \vec{I}_2|; \quad (33)$$

$$I_{stab} = k(|\vec{I}_1| + |\vec{I}_2|); \quad (34)$$

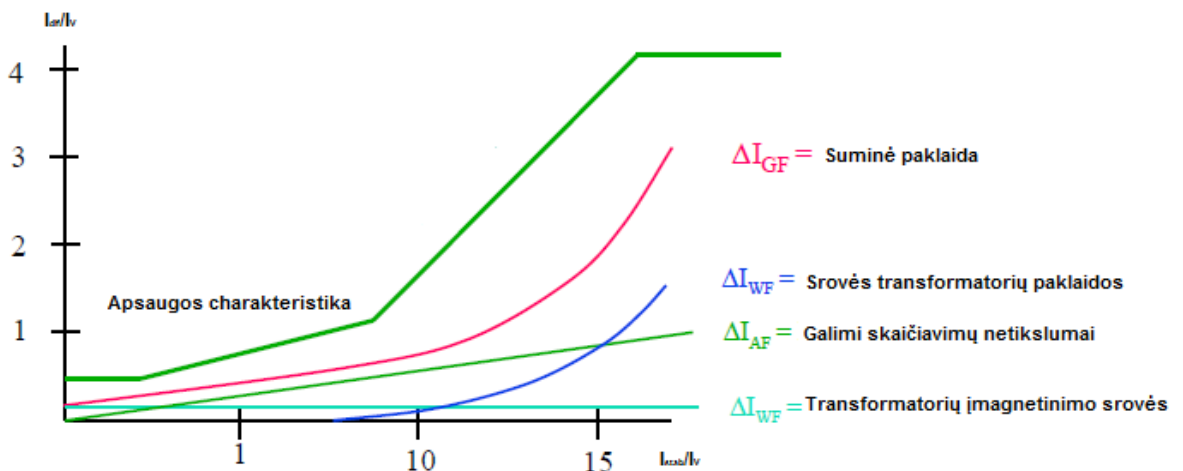
$$I_{stab} = \text{Max}(|\vec{I}_1|, |\vec{I}_2|); \quad (35)$$

kur k yra kompensacijos faktorius, dažniausiai priimamas 1 arba 0,5.

Diferencinė apsauga generuoja išjungimo signalą (angl. Trip), jeigu suveikimo srovė yra didesnė nei procentinė stabdymo srovė [8]:

$$I_{dif} > SLP \cdot I_{stab}; \quad (36)$$

čia SLP (angl. Slope) – nuolydis;



1.6.2 pav. Diferencinės apsaugos charakteristika.

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

Diferencinės apsaugos charakteristika turi tris pagrindinius laiptus būdingus skaitmeninėms relėms:

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

$$I_{D>} = \left(\frac{p_{STA} + p_{STž} + p_{RA} + p_{IR}}{100} \right) \cdot k_{at}; \quad (37)$$

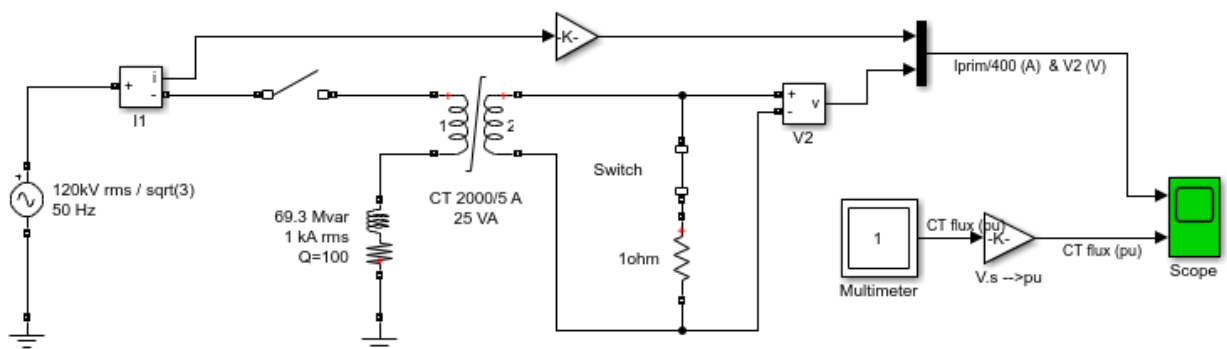
$$I_{D\gg} = \frac{k_{sm} \cdot I_{kmaxA}^{(3)}}{I_{VA}}; \quad (38)$$

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

1.7 Diferencinės apsaugos modelio sudarymas

Galios transformatorius yra vienas svarbiausių elektros sistemos įrenginių, o tai reiškia, kad jį apsaugoti taip pat labai svarbu. Kol kas geriausiai tam tinka diferencinė apsauga. Tačiau tam, kad diferencinė apsauga galėtų nepriekaištingai saugoti įrenginį, vienas svarbiausių kriterijų yra teisingas srovės transformatorių parinkimas. Būtent dėl to inžinieriai, parinkdami srovės matavimo transformatorius, turi atkreipti dėmesį ne tik į jų veikimą normalaus darbo režime, tačiau ir elgseną pereinamųjų procesų metu. Tokiems tyrimams atlikti puikiai tinka Matlab Simulink aplinka [11].

Pirmiausia sudarant tiriamąjį modelį reikia aprašyti srovės transformatorius. Daugelis, tirdami šių įrenginių įtaką apsaugoms, programoje juos atvaizduoja naudodami elementą „Gain“. Tačiau toks tyrimas nėra visai tikslus, kadangi neįmanoma tinkamai sumodeliuoti srovės transformatorių įsotinimo. Dėl šios priežasties tyrimui naudosime transformatoriaus įsotinimo modelį, aprašytą Matlab programoje (žr.1.7.1 pav.).

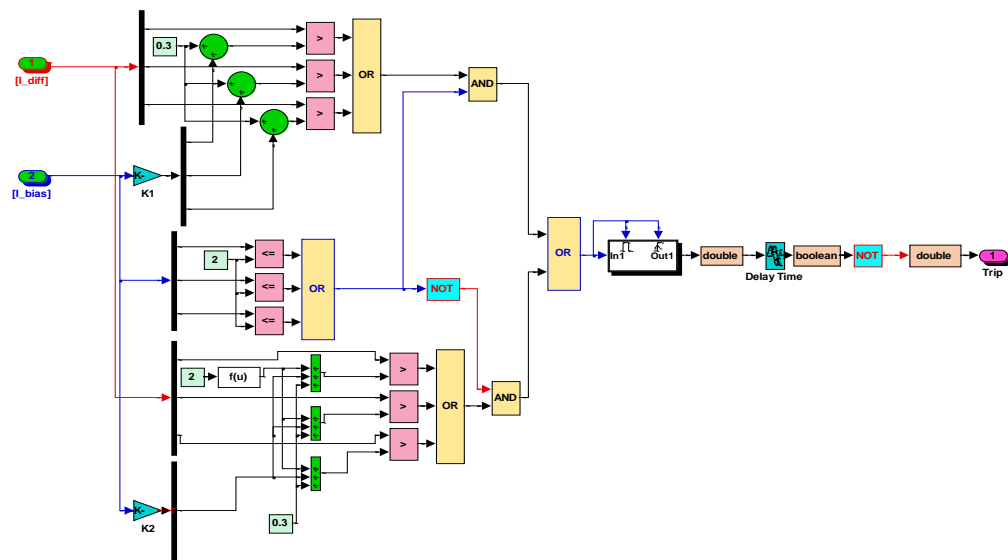


1.7.1 pav. Transformatoriaus įsotinimo modelis

Sekantis žingsnis – diferencinės apsaugos aprašymas. Sudarant diferencinės apsaugos modelį reikia įvertinti keletą kriterijų [12]:

- modelyje neturi būti jokių laiko vėlinimų, kadangi apsauga turi veikti pereinamojo proceso metu;
- apsaugos veikimas pagrįstas tekančių srovių principu. Todėl srovės, tekančios dviejų ar daugiau srovės transformatorių antrinėse grandinėse, yra įvertinamos;

- stabdymo charakteristikos nuostatai paskaičiuojami taip, kad apsauga neveiktų dėl srovės transformatorių paklaidų.



1.7.2 pav. Diferencinės apsaugos modelis

Matematiniam modelyje yra skaičiuojamos diferencinė ir stabdymo srovės, jų dydžiai lyginami su apibrėžtomis poveikio ir stabdymo srovėmis ir kai skaičiuojamos momentinės srovės viršija apibrėžtąsias, sugeneruojamas išjungimo signalas į jungtuvų rites. Išjungimo signalas sugeneruojamas ir tuo atveju, jeigu matuojamose srovėse atsiranda harmonikos, viršijančios numatytus parametrus [13].

2 TIRIAMOJI DALIS

Šiandienos sudėtingoje verslo aplinkoje elektros energetikos tinklo modeliavimas yra reikalingas tam, kad apsaugas kuriančios įmonės galėtų priimti tinkamus sprendimus tobulindamos esamą įrangą arba kurdamos naują. Kadangi kompanijos, atsakingos už elektros energijos gamybą, perdavimą ir paskirstymą, privalo saugiai ir patikimai tiekti ją vartotojams, pasitelkus modeliavimą galima patikrinti siūlomą sistemą dėl bet kokių problemų, tokių, kaip netinkamas veikimas ir nesuderinamumas, o taip pat patikrinti apsaugų veikimą pereinamųjų procesų metu, išvengiant tinklo pažeidimų. Todėl tiriamojoje dalyje nagrinėsime diferencinės apsaugos veikimą sukeltant trifazius trumpuosius jungimus saugomoje ir nesaugomoje zonose.

Tam, kad tyrimas būtų tikslus, sudarysime ir nagrinėsime realų Lietuvos tinklą: veikiančią Didžiųjų 110/20 kV aukštinančią transformatorių pastotę. Sudarę šiai pastotei skaičiuojamąją schemą ir atlikę pagrindinius skaičiavimus, sukursime bandomąjį modelį naudodami Matlab Simulink programinę įrangą. Pastotės modelyje prie srovės transformatorių antrinių grandinių prijungsime diferencinę apsaugą, kad patikrintumėme, kokią įtaką apsaugos veikimui daro įsotinti srovės transformatoriai. Atliksime keletą bandymų:

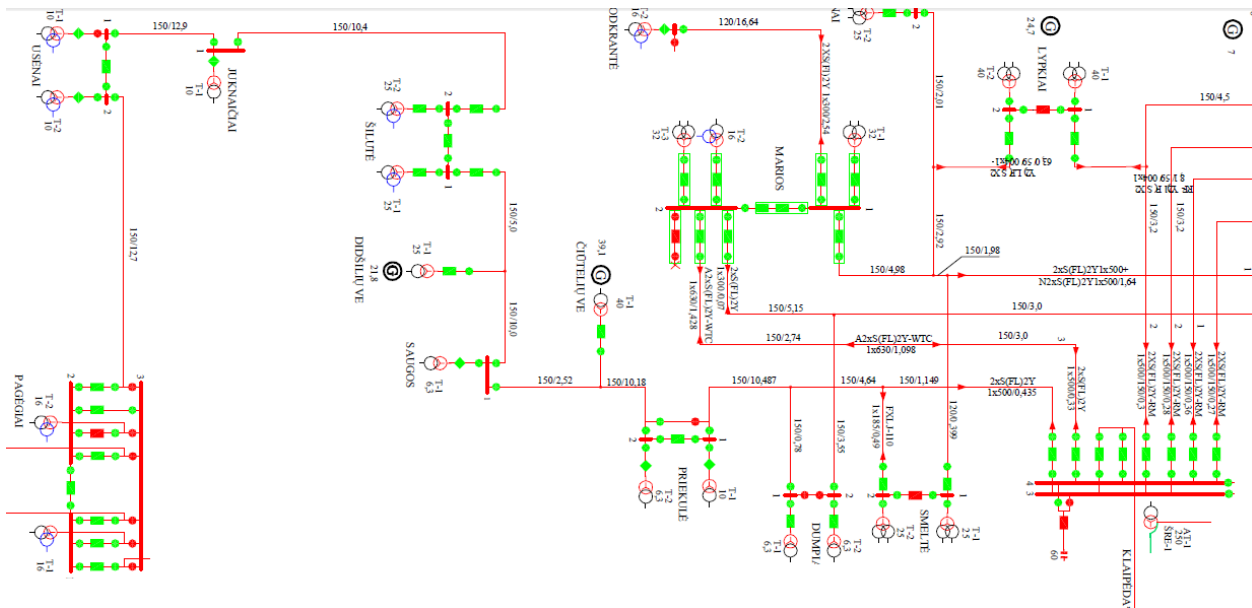
- pirmajame nagrinėsime esamus srovės transformatorius;
- antrajame nagrinėsime parinktus per mažus srovės transformatorius, įsotinsime juos.

Abiem atvejais pirmiausia patikrinsime, kaip veikia modelis normaliaame sistemos darbo režime, kai vėjo parkas generuos maksimalią galią, tada imituosime trifazį trumpąjį jungimą nesaugomoje zonoje ir galiausiai patikrinsime, kaip veiks galios transformatoriaus diferencinė apsauga, kai trifazį trumpąjį jungimą sukelsime saugomoje zonoje.

Atlikę bandymus, rezultatuose palyginsime, kaip diferencinė apsauga veikia skirtingais atvejais, ar išlieka pagrindiniai tikslai, keliami relinėms apsaugoms: greitaveika, patikimumas, jautrumas.

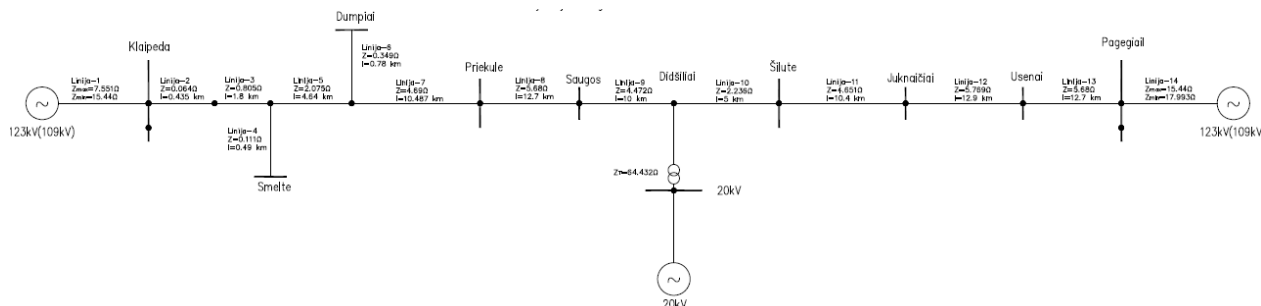
2.1 Tinklo schema

Diferencinės apsaugos veikimo tyrimui naudojama Didžiųjų transformatorių pastotės schema su esamais įrengimais. Vėjo parko pastotei prijungti prie perdavimo tinklo išskiriama atšaka nuo 110kV linijos Saugos – Pagėgiai (žr. 2.1.1 pav.).



2.1.1 110kV tinklo schema.

Todėl skaičiuojamoji schema sudaroma atkarpai Pagėgiai – Klaipėda (žr. 2.1.2 pav.)



2.1.2 Skaičiuojamoji schema.

Panaudojus Lietuvos energetikos sistemos 400-110 kV normalių sujungimų 2015 metų schemą (žr. 2.1.1 pav.) apskaičiuojamos linijų varžos, kurios pateikiamos 2.1 lentelėje:

2.1.1 lentelė Apskaičiuotos tiesioginės sekos varžos

Linija	Ilgis, km	$Z_1 = (R + jX), \Omega$	$Z_1 = \sqrt{R^2 + jX^2} \Omega$
1(max)	-	1,03+j7,48	7,551
1(min)	-	2,82+j15,18	15,44
2	0,435	0,03+j0,056	0,064
3	1,8	0,378+j0,749	0,805
4	0,49	0,083+j0,074	0,111
5	4,64	0,974+j1,93	2,075
6	0,78	0,164+j0,324	0,349
7	10,487	2,202+j4,363	4,69

8	12,7	2,667+j5,283	5,68
9	10	2,1+j4,16	4,472
10	5	1,05+j2,08	2,236
11	10,4	2,184+j4,326	4,651
12	12,9	2,709+j5,366	5,769
13	12,7	2,667+j5,283	5,68
14(max)	-	2,82+j15,18	15,44
14(min)	-	3,88+j17,57	17,993

Pastotėje įrengtas aukštinantysis transformatorius, kurio parametrai:

2.1.2 lentelė. Didšilių vėjo parko galios transformatoriaus duomenys

Gamintojas	U_T , kV	S_T , MVA	U_k , %	Apvijų jung.	ΔP_k , kW
Siemens	115/21	25	12,18	YN/yn0/+ d	98,27 7

Vardinė transformatoriaus srovė 110 kV ir 20 kV pusėje apskaičiuojama:

$$I_{20} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot 10^3} = 687,322 \text{ A}; \quad (39)$$

$$I_{110} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{25 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 10^3} = 125,511 \text{ A}; \quad (40)$$

Diferencinės apsaugos nuostatai modeliavimui:

2.1.3 lentelė. Diferencinės apsaugos nuostatai skirtingiems bandymams

Bandymas Nr.1	
Srovės transformatoriaus ST-101 transformacijos koeficientas	200/1A
Srovės transformatoriaus ST-21 transformacijos koeficientas	800/1A
I_{dif}	30% nominalios transformatoriaus srovės
I_{stab}	1,5 A
Bandymas Nr.2	

Srovės transformatoriaus ST-101 transformacijos koeficientas	200/1A
Srovės transformatoriaus ST-21 transformacijos koeficientas	50/1A
I_{dif}	30% nominalios transformatoriaus srovės
I_{stab}	14,4 A

2.2 Trumpųjų jungimų skaičiavimas

Didšilių vėjo parke veikia 10 vienetų ENERCON E-82 E2 vėjo jėgainių, kurios kiekviena maksimaliai gali generuoti 2 MW galią į perdavimo tinklą. Trumpojo jungimo metu maksimali srovė, tekanti iš vėjo jėgainių į galios transformatorių, yra $1,37I_V$.

Vardinė vėjo parko srovė tekanti 20kV tinkle:

$$I_{V20} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos\varphi} = \frac{21.8 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0.9} = 699,235 \text{ A}; \quad (41)$$

čia P – suminė elektrinės galia;

$\cos\varphi$ – galios koeficientas vėjo elektrinėms.

Maksimali trumpojo jungimo srovė, generuojama į avarijos vietą 20kV tinkle:

$$I_{k20} = 1,37 \cdot I_{V20} = 1,37 \cdot 699,235 = 957,952 \text{ A}. \quad (42)$$

Maksimali trumpojo jungimo srovė, generuojama į avarijos vietą 110kV tinkle:

$$I_{k110} = I_{k20} \cdot \frac{U_{20}}{U_{110}} = 957,952 \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} = 174,173 \text{ A}. \quad (43)$$

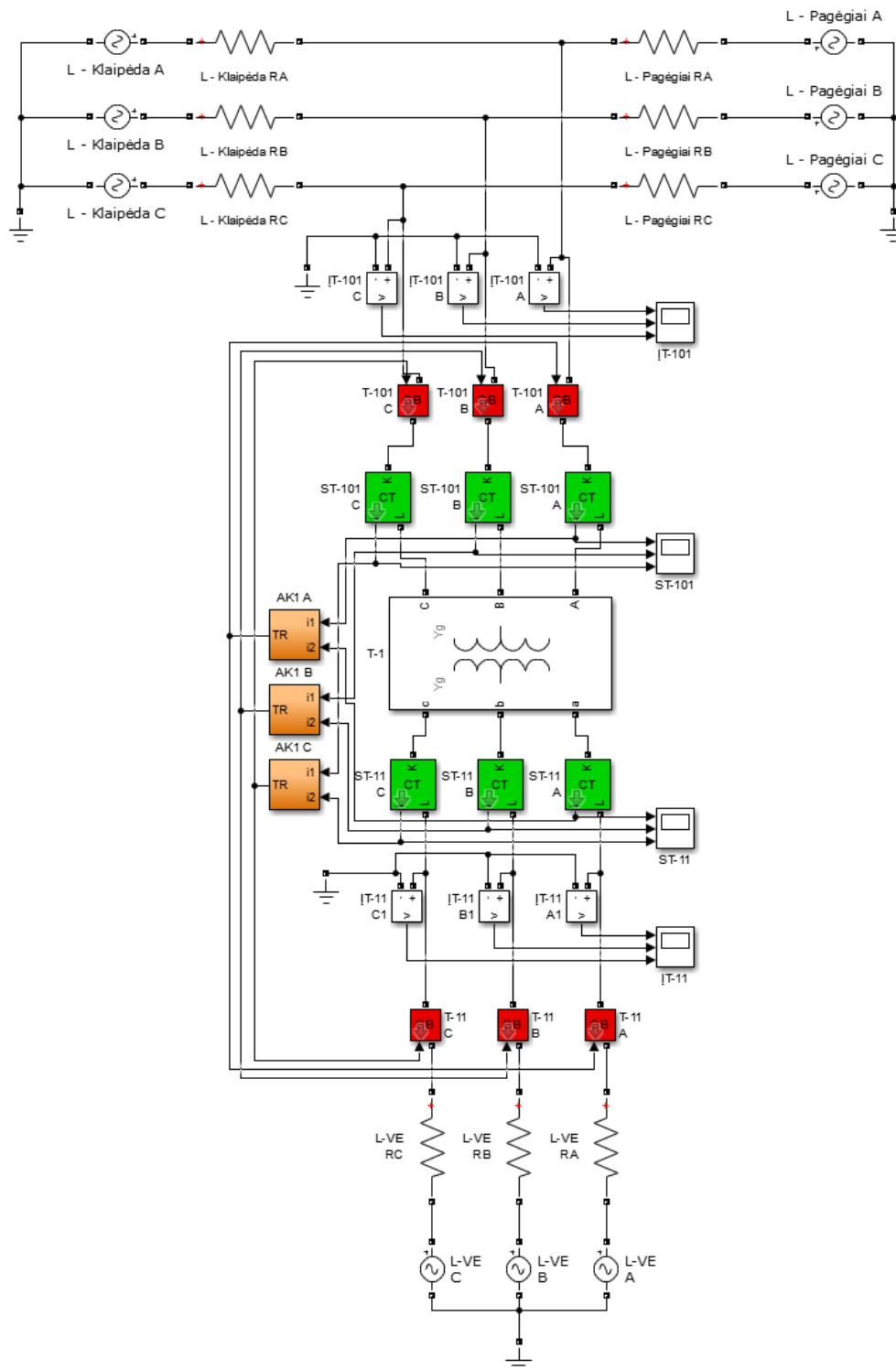
Skaičiuojamoji trumpojo jungimo srovė iš 110 kV tinklo yra kiloamperų eilės, dėl šios priežasties vėjo parko generuojama srovė į avarijos vietą nedaro didelės įtakos tyrimo rezultatams.

Naudojantis 2.1 lentele apskaičiuojamos trumpojo jungimo srovės perdavimo tinkle (žr. 2.2.1 lentelę):

2.2.1 lentelė. Trumpųjų jungimų srovės

Trumpojo jungimo vieta	Matavimo vieta	$I_k^{(3)}$, A	$I_k^{(1)}$, A	Tiesioginės sekos varža, Ω	
Maksimalus režimas					
Šilutė	Suminė	4843	3418		
	Juknaičiai	2259	1654	31,539	
	Saugos	2584	1719	27,572	
Priekulė	Suminė	6312	4658		
	Saugos	1622	1111	43,972	
	Klaipėda	4692	3497	15,184	
Didšiliai	Suminė	4921	3454		
	Saugos	2812	1893	25,336	
	Šilutė	2109	1520	33,775	
Minimalus režimas					
Šilutė	Suminė	3617	2739		
	Juknaičiai	1844	1393	34,093	
	Saugos	1773	1319	35,461	
Priekulė	Suminė	4078	3343		
	Saugos	1353	949	46,481	
	Klaipėda	2725	2363	23,073	
Didšiliai	Suminė	3682	2770		
	Saugos	1951	1433	32,225	
	Šilutė	1731	1285	36,329	

2.3 Tiriamasis modelis



2.3.1 pav. Matlab SIMULINK modelis.

Pastotės modelis Matlab SIMULINK aplinkoje (žr. 2.3.1 pav.) aprašomas prie galios transformatoriaus $T-1$ prijungiant srovės transformatorius $ST-101$, 110 kV pusėje, ir $ST-21$, 20 kV įtampos pusėje. Srovės transformatorių antrinių apvijų grandinės prijungiamos prie diferencinės apsaugos $AK1$ srovės įėjimų, o diferencinės apsaugos išėjimo signalas TR (angl. *Trip* – išjungimas)

išjungia jungtuvus $T-101$ ir $T-21$. Įtampos matavimai atliekami elementais $IT-101$ ir $IT-21$ atitinkamai 110 kV ir 20 kV pusėse.

Modelyje naudojami elementai:

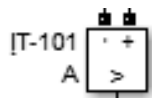
1) Įtampos šaltiniai:



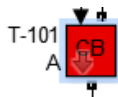
2) Linijų varžos:



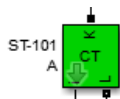
3) Įtampos matavimo elementai:



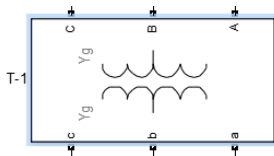
4) Jungtuvai:



5) Srovės transformatoriai:



6) Galios transformatorius:



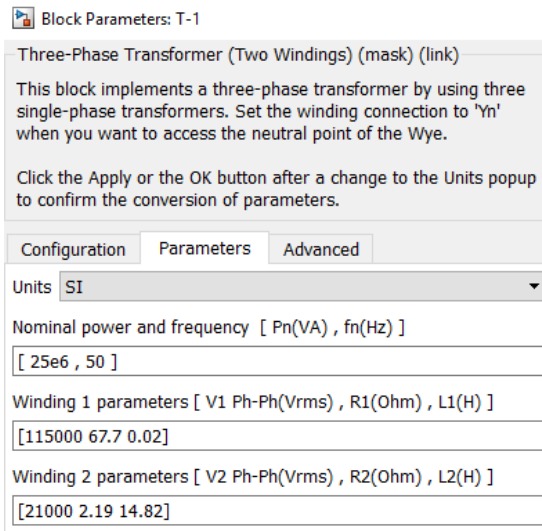
7) Diferencinės apsaugos įrenginiai:



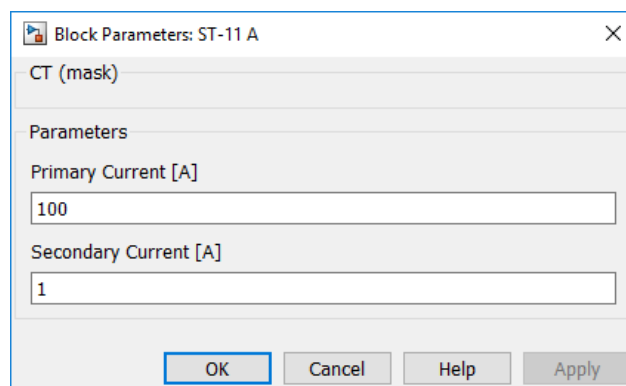
8) Modeliavimo rezultatams stebėti skirtas elementas:



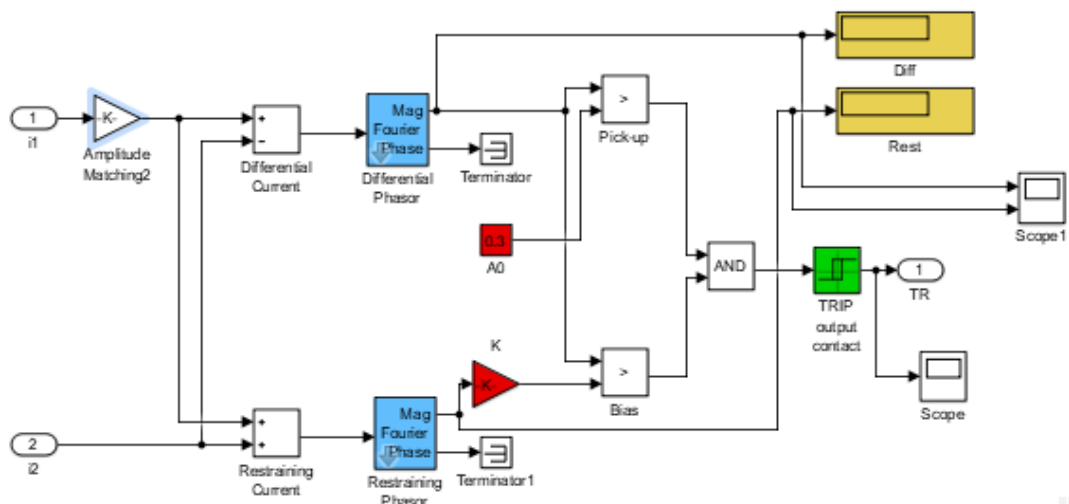
Kai kurių elementų parametrai pateikiami sekančiuose paveiksluose.



2.3.2 pav. Galios transformatoriaus parametrai.



2.3.3 pav. Srovės transformatorių parametrai.



2.3.4 pav. Diferencinės apsaugos modelis.

Diferencinė apsauga, modeliuojama tiriamajame darbe, skiriasi nuo aprašytosios (žr. 1.7 skyių). Sudarydami apsaugos veikimo logiką, pirmiausia vienos iš srovių įėjime įterpiame elementą, kuris išlygina I_1 ir I_2 srovių amplitudes. Toliau išskaičiuojame diferencinę ir stabdymo sroves, išskiriame jų dydžius ir kampus. Atlikę šiuos veiksmus, gautus rezultatus lyginame su apskaičiuotais apsaugos nuostatais, ir, jeigu faktiniai duomenys viršija aprašytuosius, generuojame išjungimo komandą į

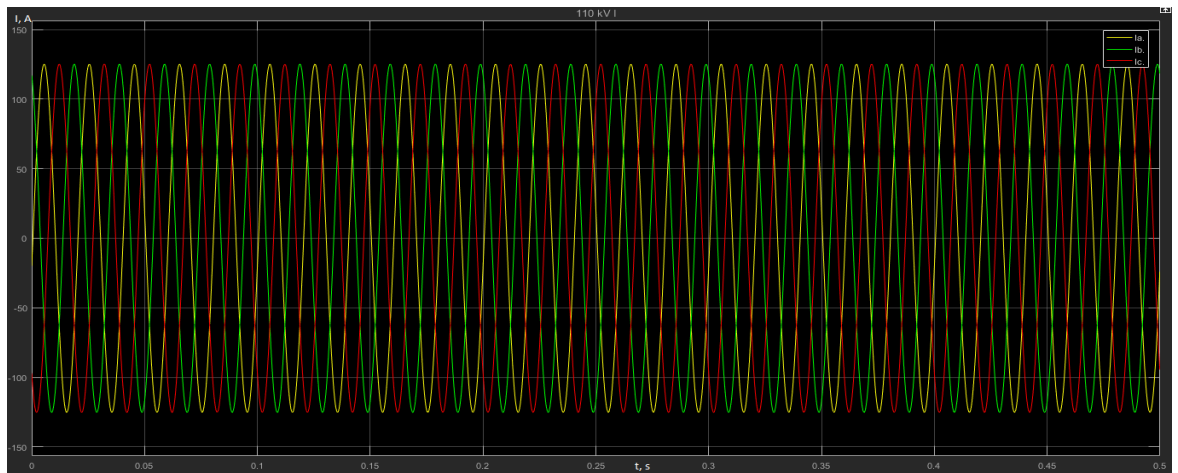
jungtuvų *T-101* ir *T-21* išjungimo rites. Mūsų aprašomas modelis yra pranašesnis tuo, jog jame vertiname momentinius srovių dydžius iš srovės transformatorių, kurie gali būti įsotinami. Tačiau modelyje nenaudojame išjungimo komandos generavimo dėl atsiradusių nepageidaujamų harmonikų ar paties galios transformatoriaus įsimagnetinimo srovių.

3 TYRIMO REZULTATŲ DALIS

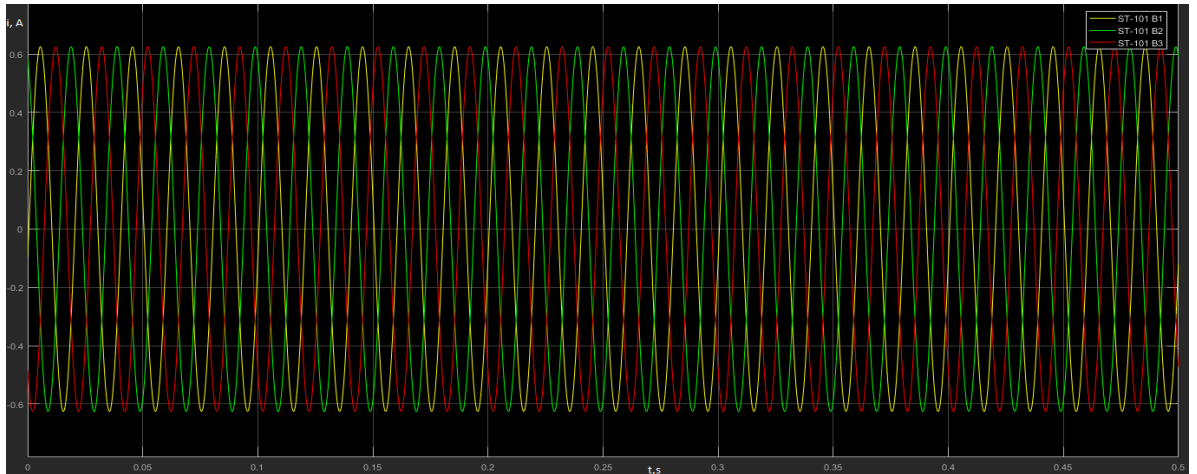
3.1 Transformatoriaus diferencinės apsaugos veikimo tyrimas

3.1.1 Bandymas Nr. 1

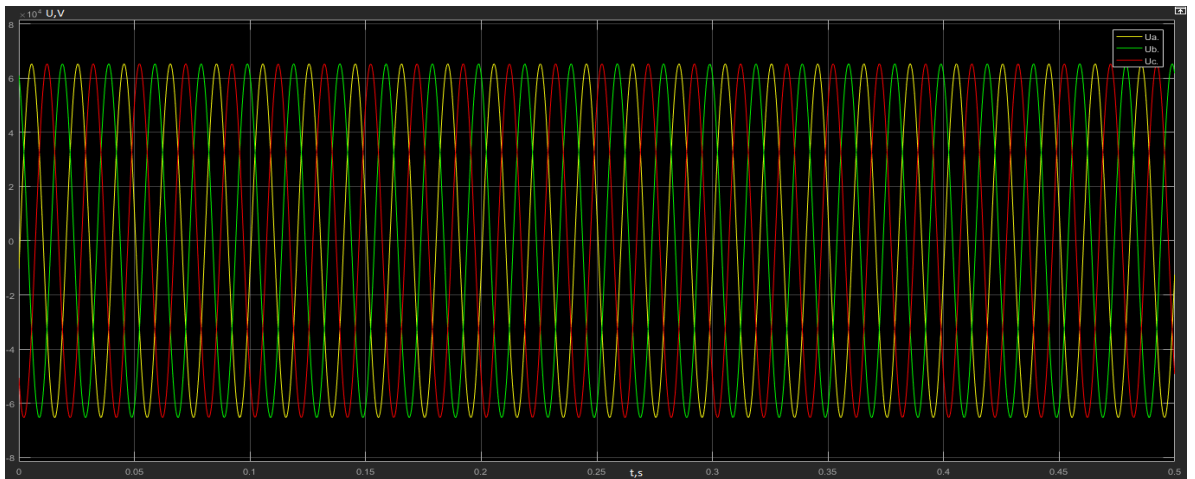
Prieš atlikdami modeliavimą trumpojo jungimo sąlygomis patikrinkime normalaus režimo rezultatus: 110 kV tinkle tekančias pirmines sroves I_{110} , antrines sroves i_{110} , fazines įtampas U_{110A} , U_{110B} , U_{110C} , o taip pat 20 kV tinkle tekančias pirmines sroves I_{20} , antrines sroves i_{20} , fazines įtampas U_{20A} , U_{20B} , U_{20C} (žr. 3.1.1.1 pav., 3.1.1.2 pav., 3.1.1.3 pav., 3.1.1.4 pav., 3.1.1.5 pav., 3.1.1.6 pav.).



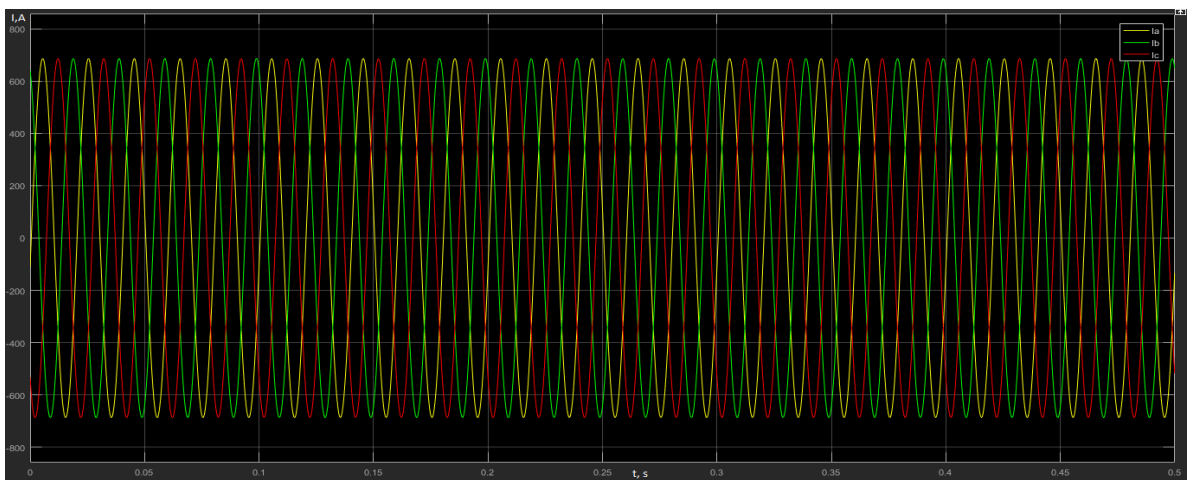
3.1.1.1 pav. Pirminėmis apvijomis tekančių srovių kreivės, esant normaliam darbo režimui 110 kV tinkle.



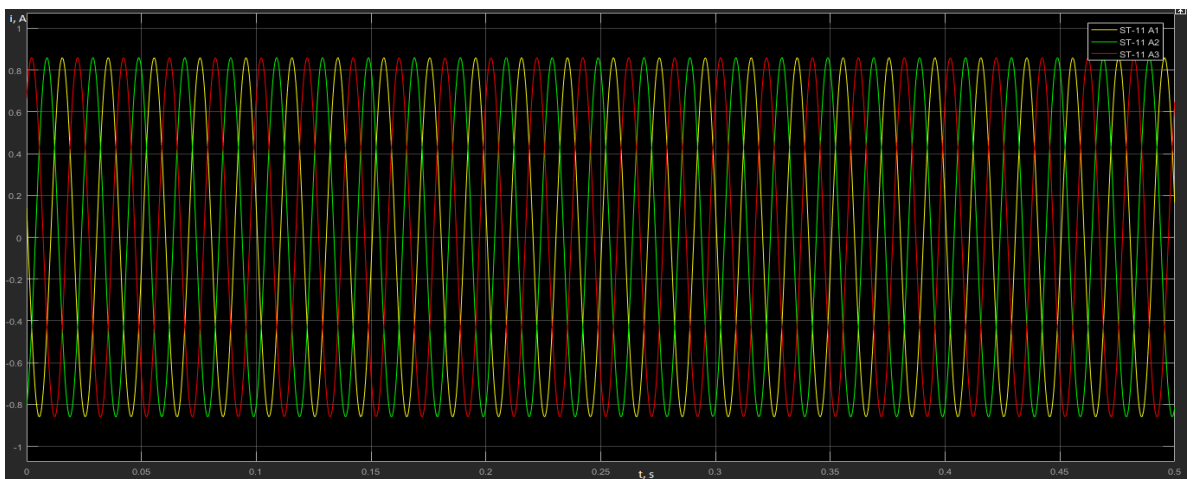
3.1.1.2 pav. Antrinėmis apvijomis tekančių srovių kreivės, esant normaliam darbo režimui 110 kV tinkle.



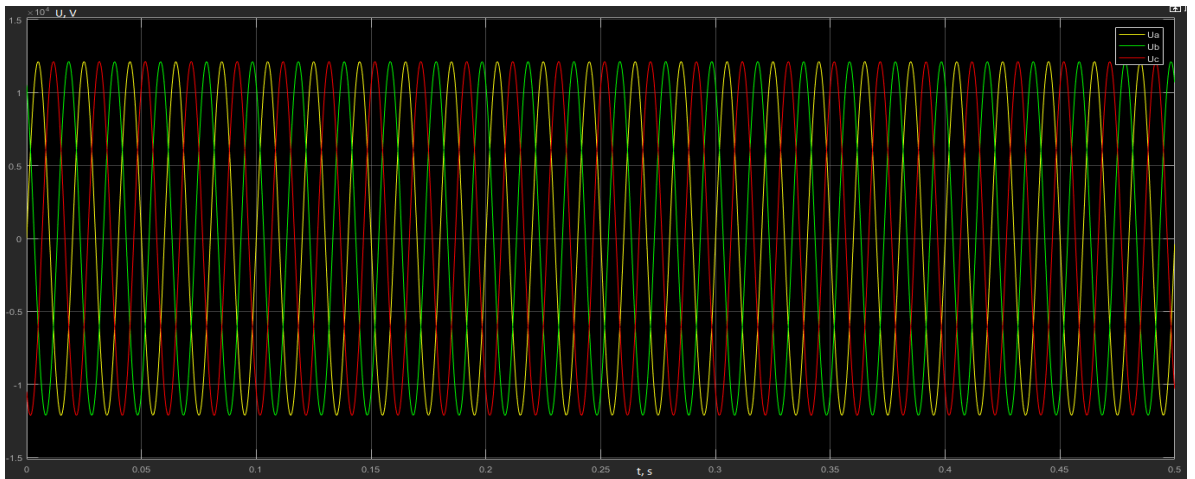
3.1.1.3 pav. Fazinių įtampų kreivės, esant normaliam darbo režimui 110 kV tinkle.



3.1.1.4 pav. Pirminėmis apvijomis tekančių srovių kreivės, esant normaliam darbo režimui 20 kV tinkle.



3.1.1.5 pav. Antrinėmis apvijomis tekančių srovių kreivės, esant normaliam darbo režimui 20 kV tinkle.

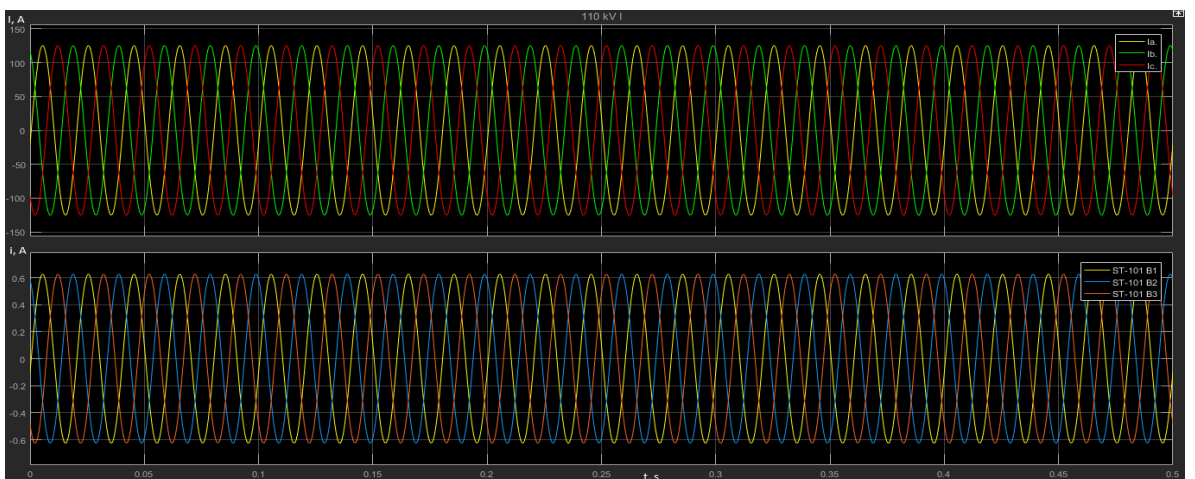


3.1.1.6 pav. Fazinių įtampų kreivės, esant normaliam darbo režimui 20 kV tinkle.

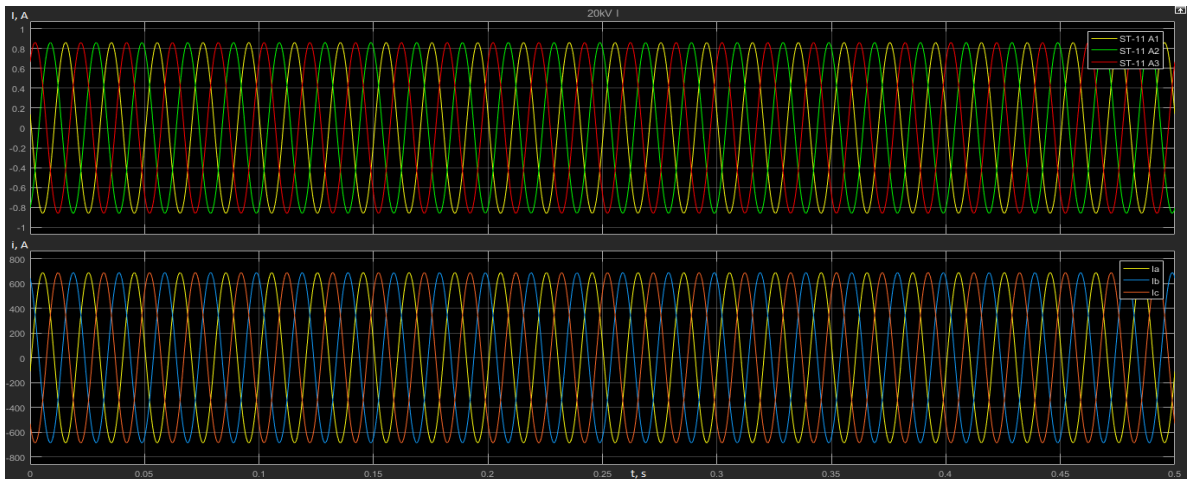
Iš kreivių matome, kad tiek pirmine, tiek antrine apvijomis 110 kV (žr. 3.1.1.1 pav., 3.1.1.2 pav.) ir 20 kV (žr. 3.1.1.4 pav., 3.1.1.5 pav.) pusėse srovės transformatoriuose tekančios srovės nėra iškraipytos ir atitinka apskaičiuotus dydžius (žr. 2.1 skyrių). Taip pat nepakito ir fazinės įtampos (žr. 3.1.1.3 pav., 3.1.1.6 pav.).

Atlikę normalaus darbo režimo modeliavimą, matome, kad modelis atitinka reikiamus parametrus, todėl galime imituoti trumpuosius jungimus. Pirmasis trumpasis jungimas bus imituojamas už saugomos zonos ribų 110 kV tinkle: sukelsime trifazį trumpąjį jungimą Saugos – Pagėgiai atramoje už mūsų srovės transformatorių po $t = 0,3s$ nuo modeliavimo pradžios.

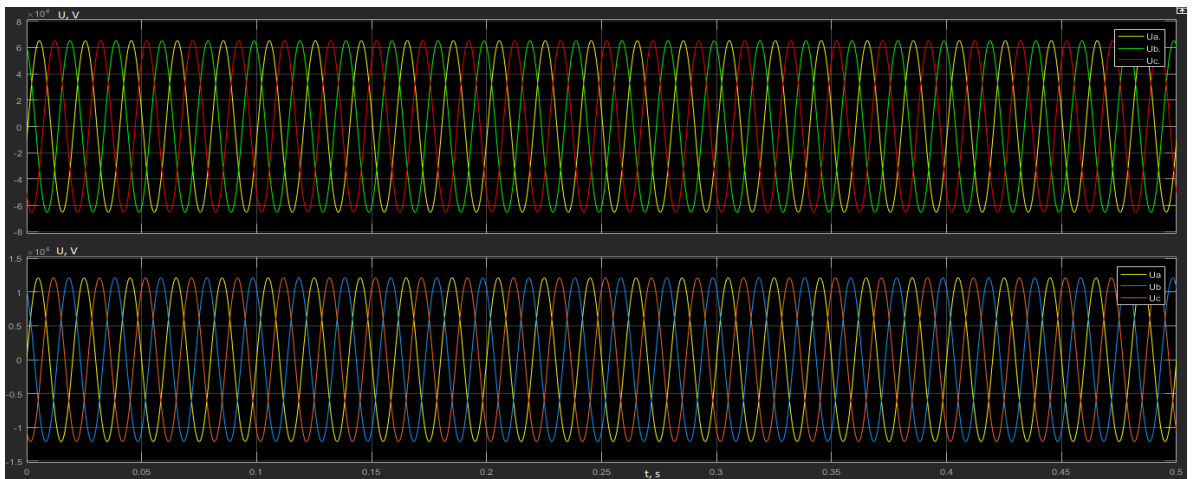
Tyrimo rezultatai, kai trifazis trumpasis jungimas įvyksta ne diferencinės apsaugos zonoje (žr. 3.1.1.7 pav., 3.1.1.8 pav., 3.1.1.9 pav.):



3.1.1.7 pav. Pirminėse ir antrinėse ST-101 srovės transformatorių apvijose tekančios srovės, kai trifazis trumpasis jungimas įvyksta už srovės transformatoriaus po 0,3s.



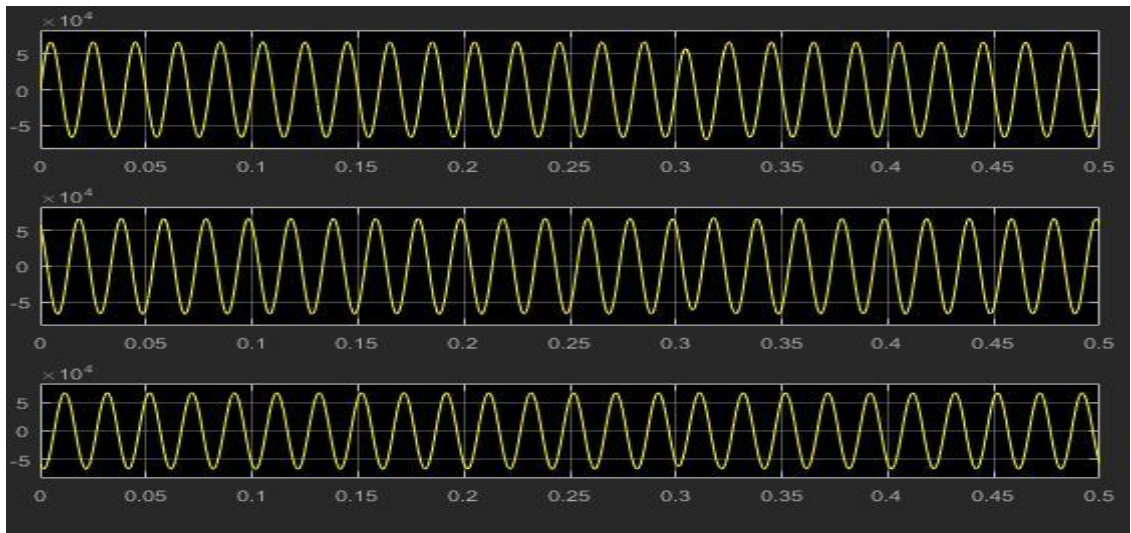
3.1.1.8 pav. Pirminėse ir antrinėse ST-21 srovės transformatorių apvijose tekančios srovės, kai trifazis trumpasis jungimas įvyksta už srovės transformatoriaus po 0,3s.



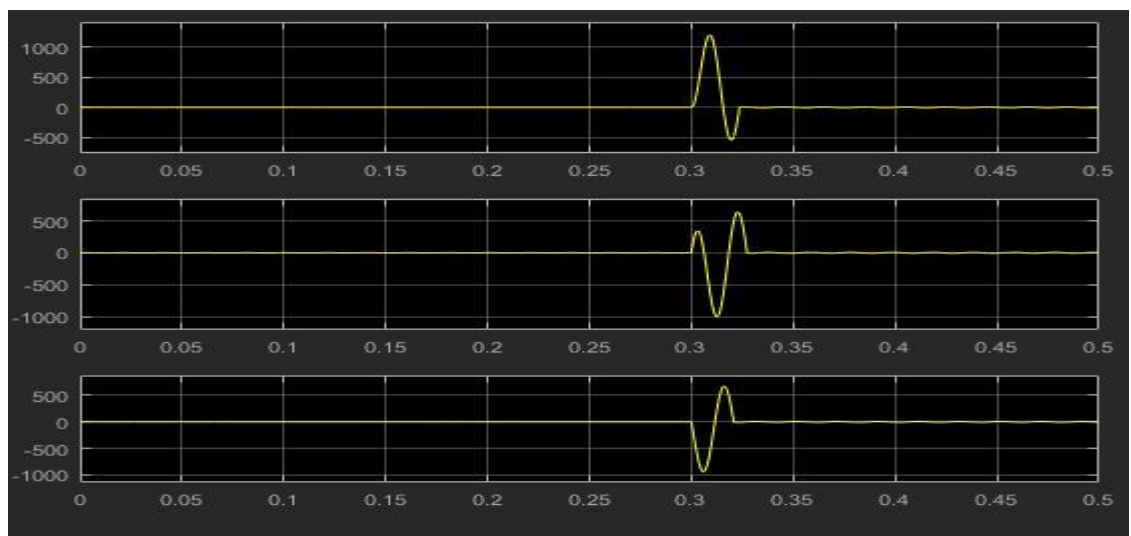
3.1.1.9 pav. Fazinių įtampų kreivės, esant trifaziam trumpajam jungimui Saugos – Pagėgiai atramoje.

Iš kreivių matome, jog trumpajam jungimui įvykus už saugomos zonos ribų nepasikeitė nei 20 kV (žr. 3.1.1.8 pav.), nei 110 kV (žr. 3.1.1.7 pav.) tinkluose tekančių srovių amplitudės. Taip pat nepradėjo svyruoti ir įtampos (žr. 3.1.1.9 pav.). Srovės transformatoriai neįsisotino, diferencinė apsauga veikia teisingai. Apsaugos fiksuota diferencinė srovė siekė $I_{dif} = 0,001$ A.

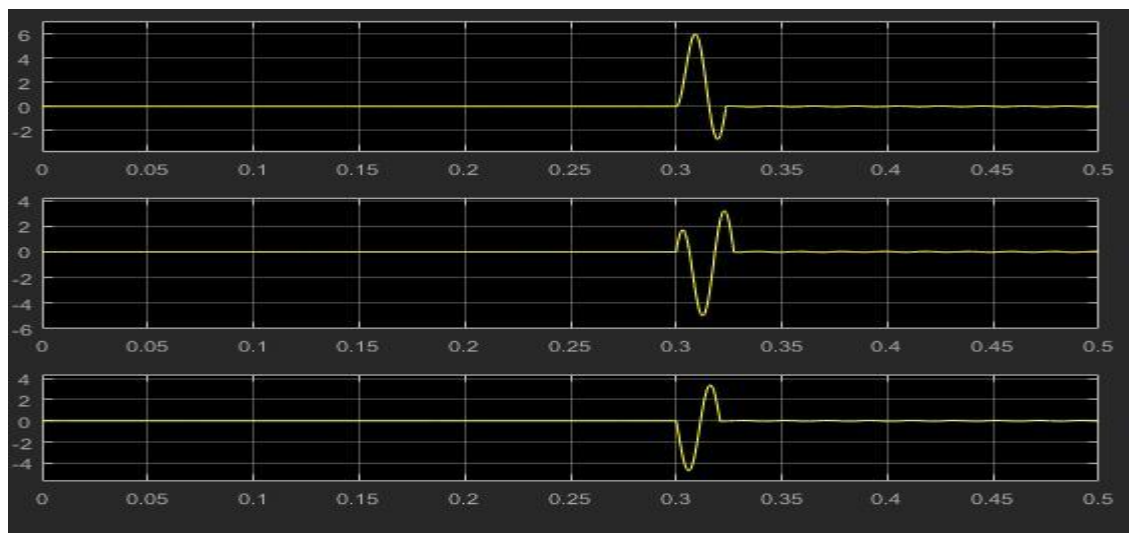
Sekančio bandymo metu sukelsime trifazį trumpąjį jungimą transformatoriaus *T-1* išvaduose 20 kV įtampos pusėje laiko momentu $t = 0,3$ s.



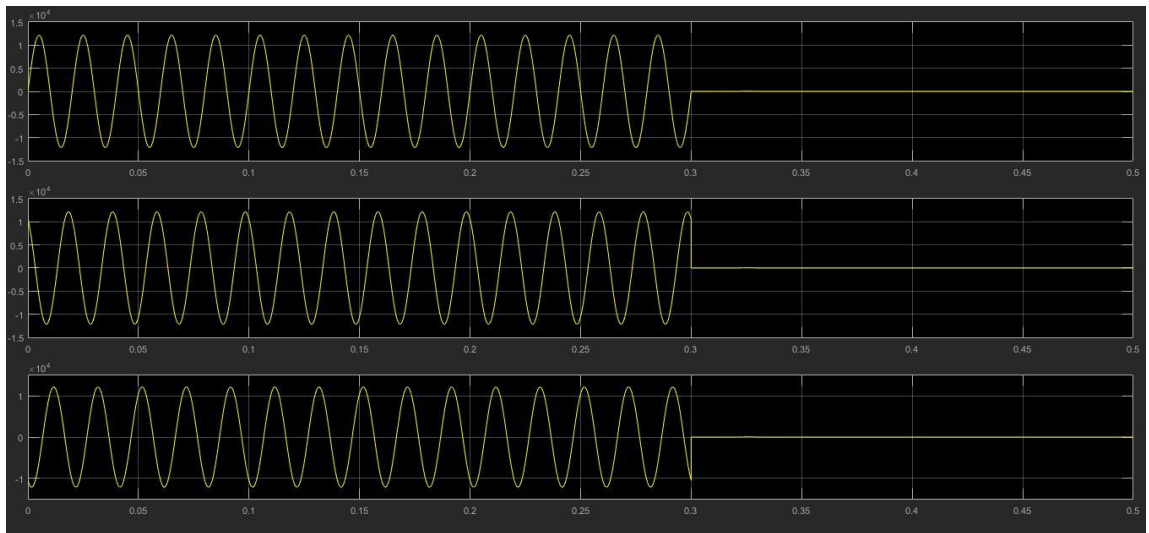
3.1.1.10 pav. ĮT-101 fazinės įtampos 110kV tinkle



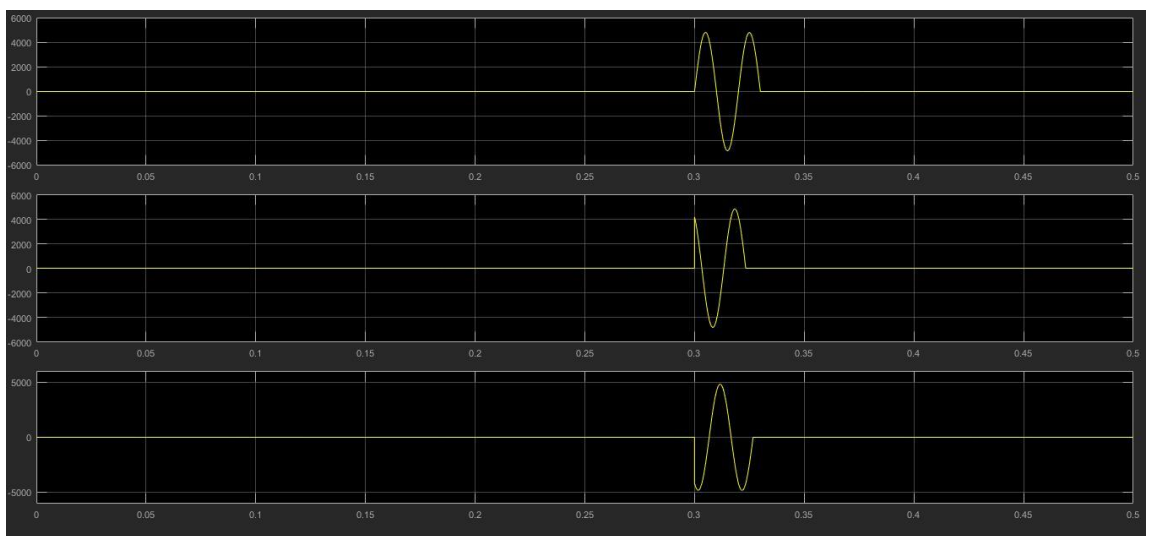
3.1.1.11 pav. ST-101 srovė 110 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu pirminėje srovės transformatoriaus apvijoje



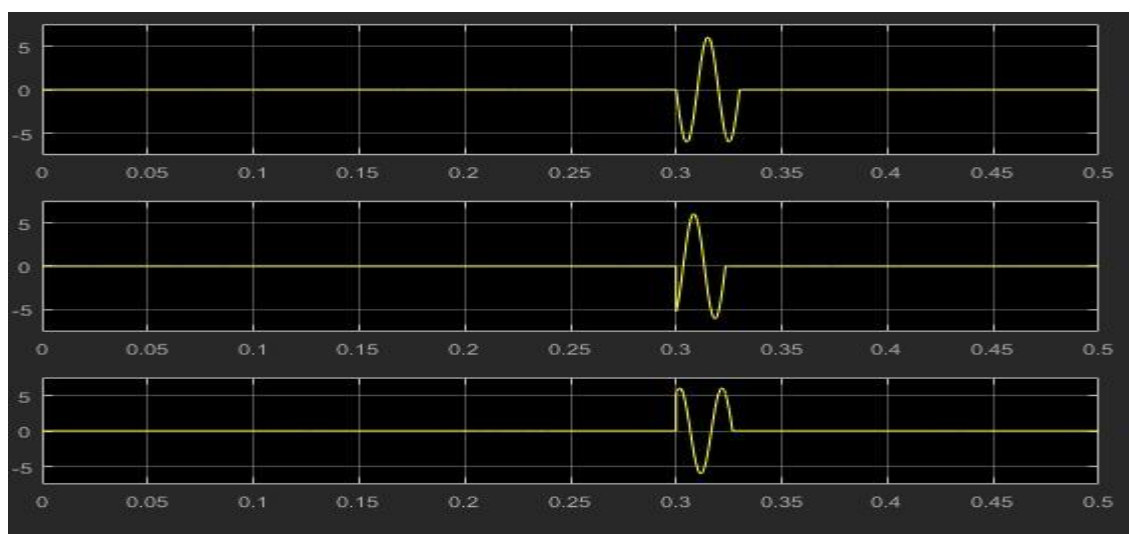
3.1.1.12 pav. ST-101 srovė 110 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu antrinėje srovės transformatoriaus apvijoje



3.1.1.13 pav. ĮT-21 fazinės įtampos 20 kV tinkle



3.1.1.14 pav. ST-21 srovė 20 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu pirminėje srovės transformatoriaus apvijoje

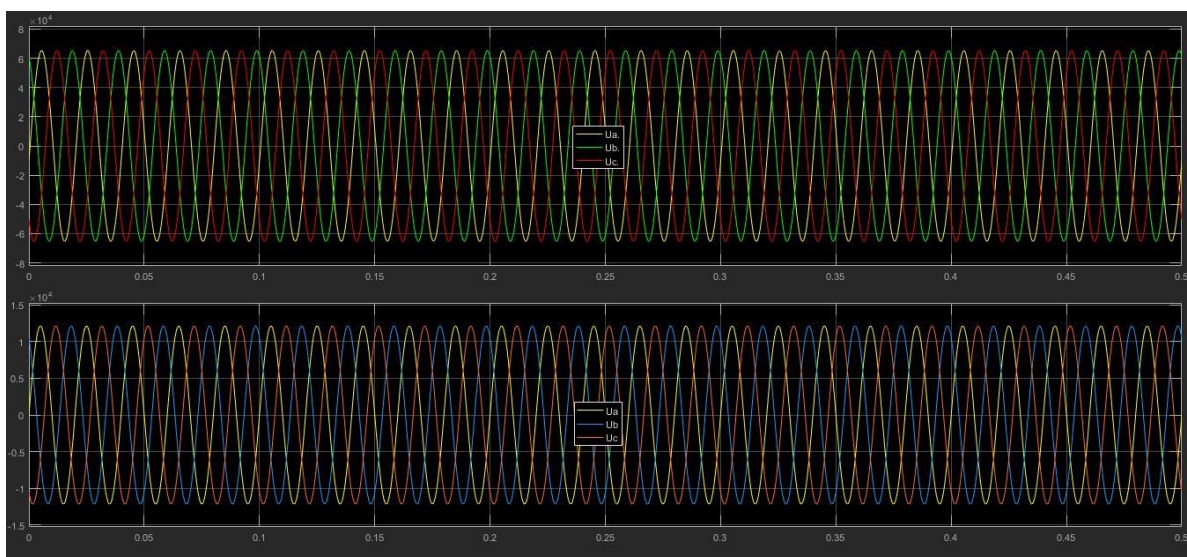


3.1.1.15 pav. ST-21 srovė 20 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu antrinėje srovės transformatoriaus apvijoje

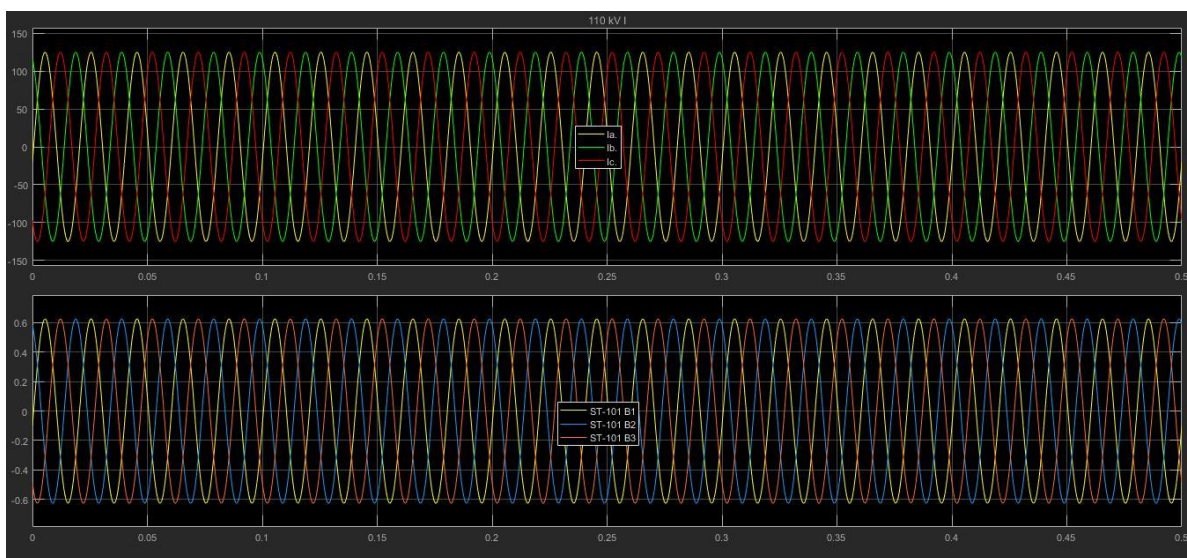
Iš kreivių matome, jog trumpajam jungimui įvykus saugomos zonos ribose, išaugo 110 kV (žr. 3.1.1.11 pav., 3.1.1.12 pav.) ir 20 kV (žr. 3.1.1.14 pav., 3.1.1.15 pav.) tinkluose tekančių srovių amplitudės, tačiau srovės, tekančios antrinėse srovės transformatorių apvijose, nebuvo iškraipytos. Kadangi pastotė buvo atjungta, įtampos 20 kV tinkle (žr. 3.1.1.13 pav.) nukrito iki 0, o 110 kV tinkle liko pastovios (žr. 3.1.1.10 pav.). Srovės transformatoriai neįsisotino, diferencinė apsauga suveikė teisingai ir jungtuvai buvo išjungti po 0,03s. Apsaugos fiksuota diferencinė srovė siekė $I_{dif} = 6,95$ A.

3.1.2 Bandymas Nr. 2

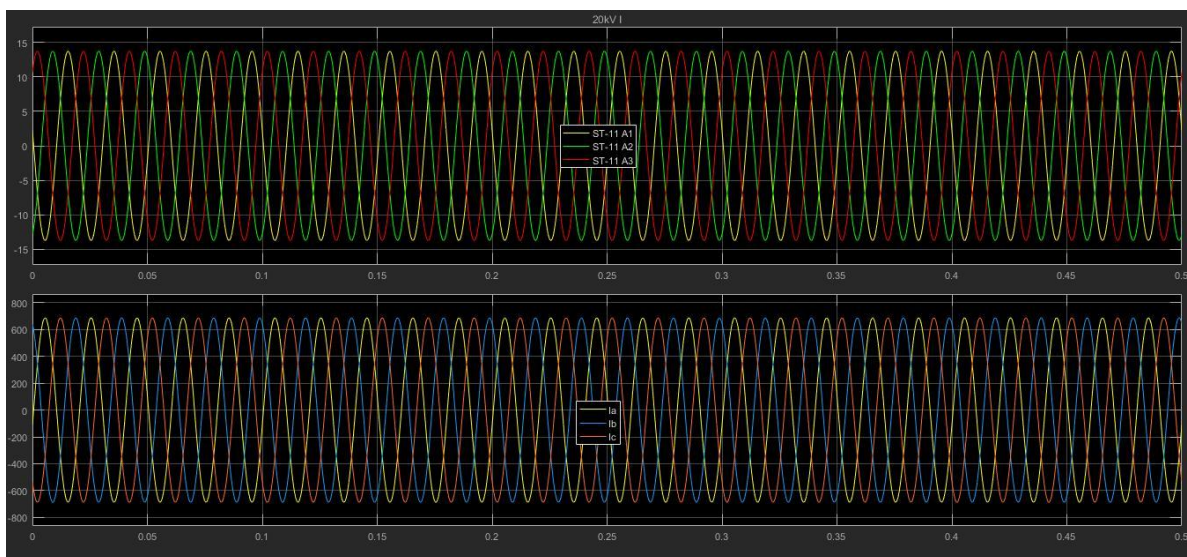
Prieš atliekant modeliavimą trumpojo jungimo sąlygomis patikrinkime normalaus režimo rezultatus: 110 kV ir 20 kV tinkle esančios fazinės įtampos U_{110A} , U_{110B} , U_{110C} , U_{20A} , U_{20B} , U_{20C} (žr. 3.1.2.1 pav.), 110 kV tinkle tekančios srovės I_{110} bei i_{110} (žr. 3.1.2.2 pav.) ir 20 kV tinkle tekančios srovės I_{20} bei i_{20} (žr. 3.1.2.3 pav.).



3.1.2.1 pav. 110kV ir 20kV tinkle esančios įtampos



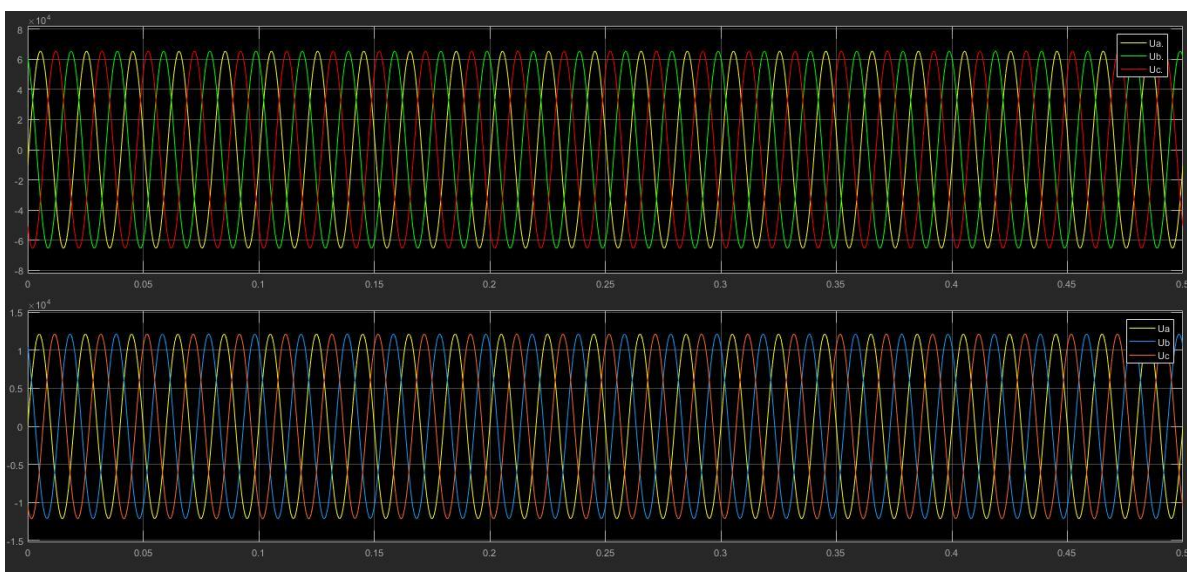
3.1.2.2 pav. Pirminėse ir antrinėse ST-101 srovės transformatorių apvijose tekančios srovės normaliaame režime.



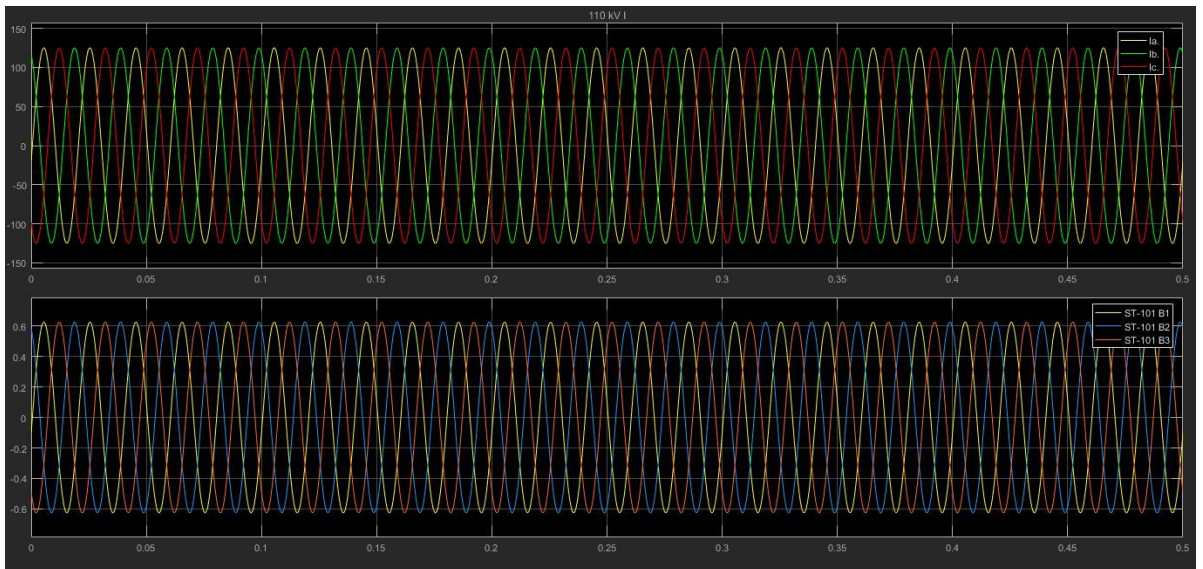
3.1.2.3 pav. Pirminėse ir antrinėse ST-21 srovės transformatorių apvijose tekančios srovės normaliam režime.

Kaip matome iš aukščiau pateiktų kreivių, sumažinus 20kV pusėje įvadinio narvelio srovės transformatoriaus koeficientą iki 50/1A, darbiniam tinkle režime srovės nėra iškraipomos ir diferencinė apsauga veikia teisingai. Diferencinės apsaugos srovė $I_{dif} = 0,001A$.

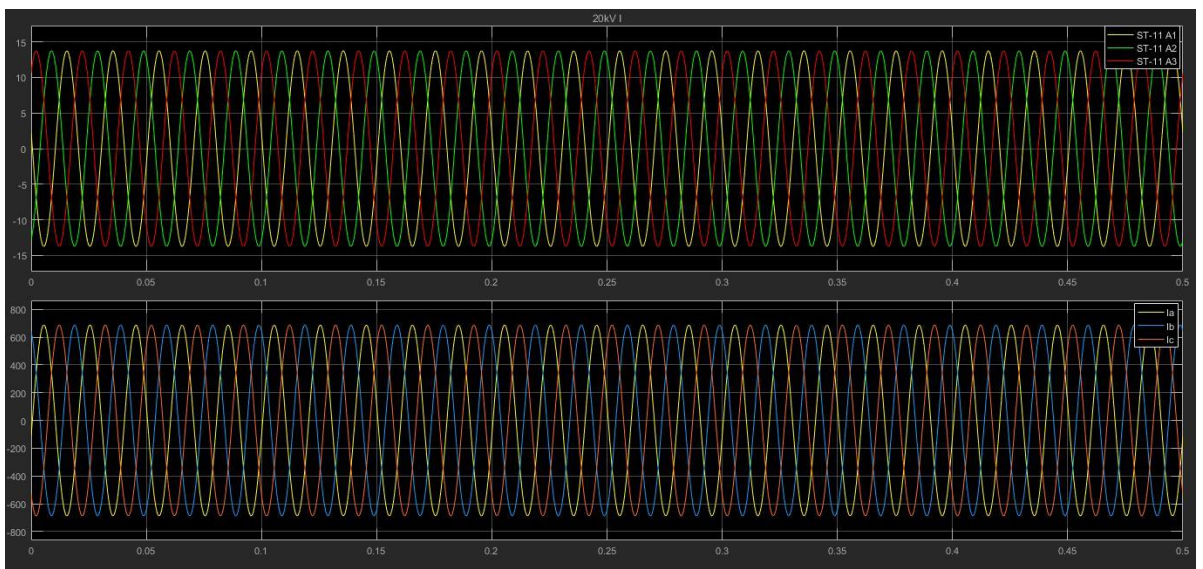
Toliau modeliuosime trifazį trumpąjį jungimą už saugomos zonos ribų laiko momentu $t = 0,3s$ ir atvaizduosime gautus rezultatus.



3.1.2.4 pav. 110kV ir 20kV tinkle esančios įtampos



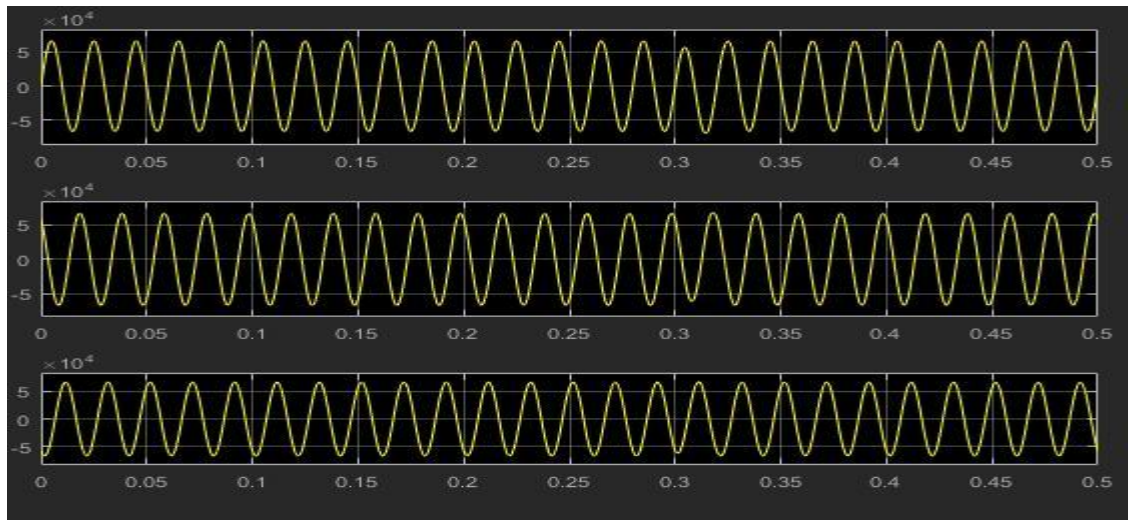
3.1.2.5 pav. Pirminėse ir antrinėse ST-101 srovės transformatorių apvijose tekančios srovės, kai trifazis trumpasis jungimas įvyksta už saugomos zonos ribų.



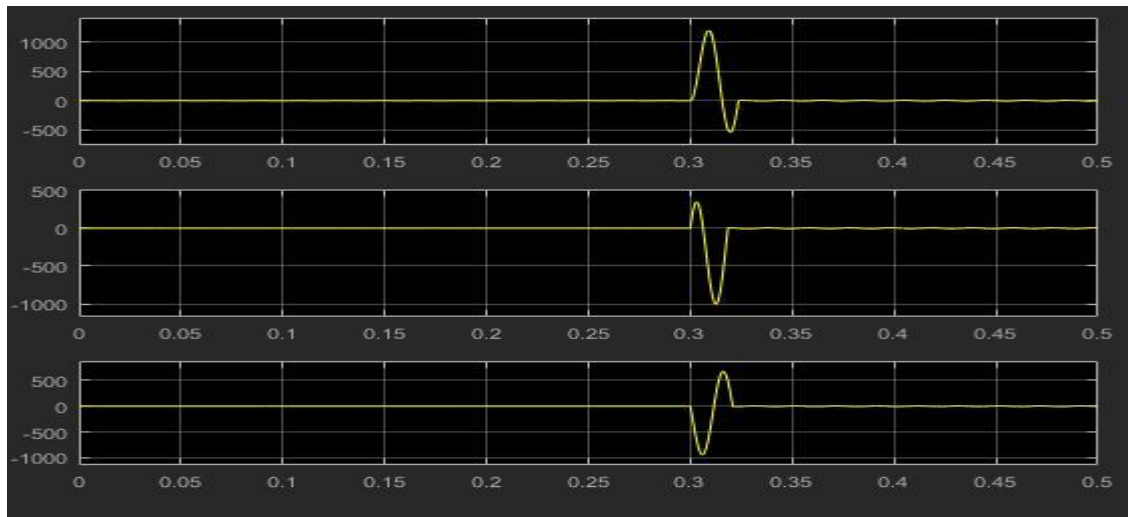
3.1.2.6 pav. Pirminėse ir antrinėse ST-21 srovės transformatorių apvijose tekančios srovės, kai trifazis trumpasis jungimas įvyksta už saugomos zonos ribų.

Atlikę modeliavimą pastebėjome, jog trumpajam jungimui įvykus už saugomos zonos ribų, Saugos – Pagėgiai atramoje, didesnių pokyčių neatsirado, srovės transformatoriai veikia gerai. Kadangi srovės transformatoriai neįsisotino, antrinėse apvijose tekančios srovės nebuvo iškraipomos (žr. 3.1.2.5 pav., 3.1.2.6 pav.) ir diferencinės pasaugos terminalas nefiksavo didesnių pokyčių, neatjungė linijos – veikė teisingai. Diferencinės apsaugos srovė $I_{dif} = 0,021A$.

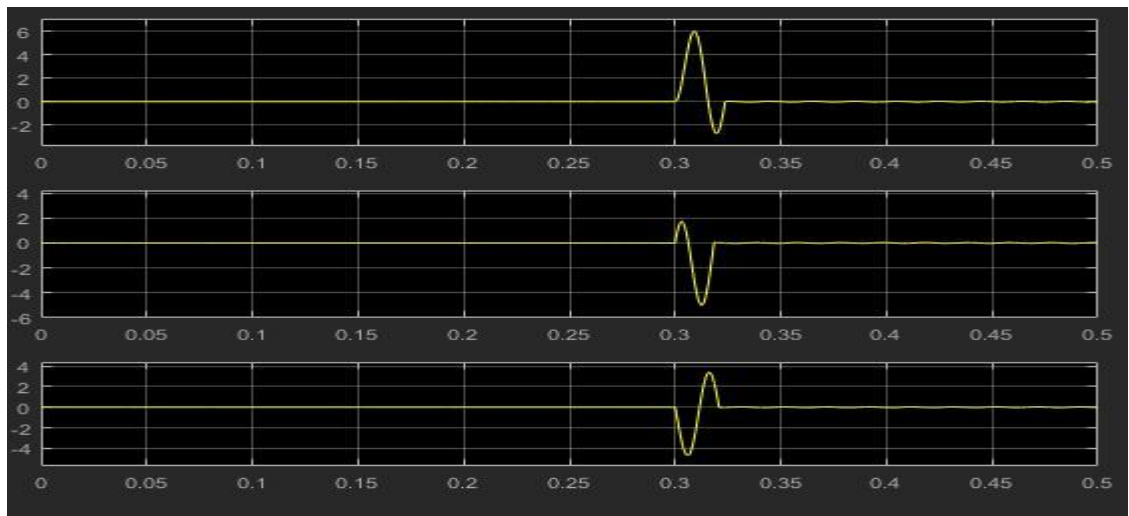
Sekančio modeliavimo metu sukelsime trifazį trumpąjį jungimą transformatoriaus *T-1* išvaduose 20 kV įtampos pusėje laiko momentu $t = 0,3s$.



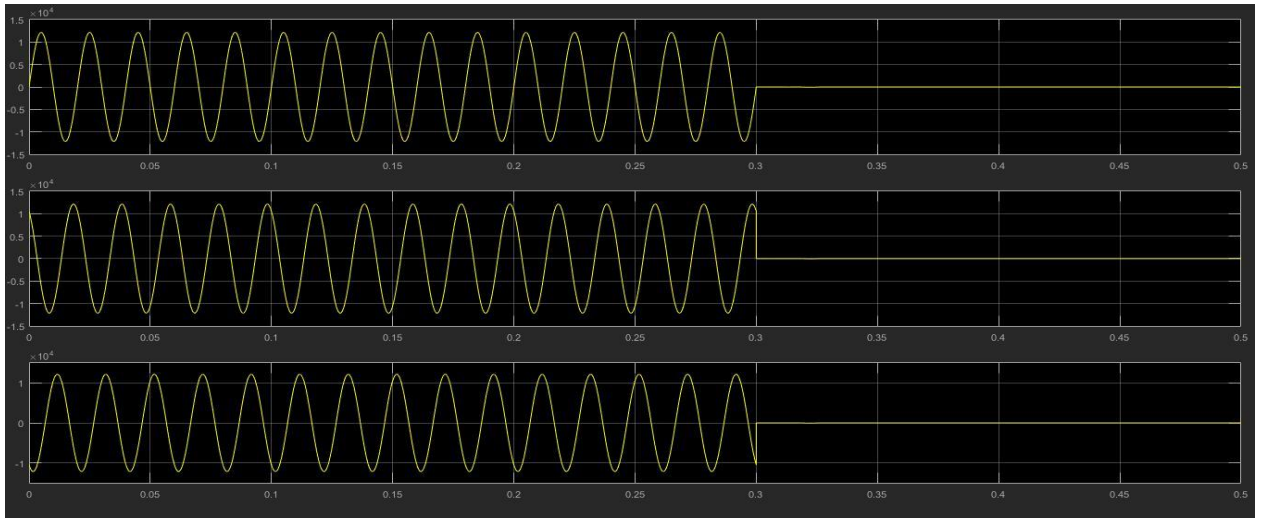
3.1.2.7 pav. ĮT-101 fazinės įtampos 110kV tinkle, kai trumpasis jungimas transformatoriaus T-1 išvaduose.



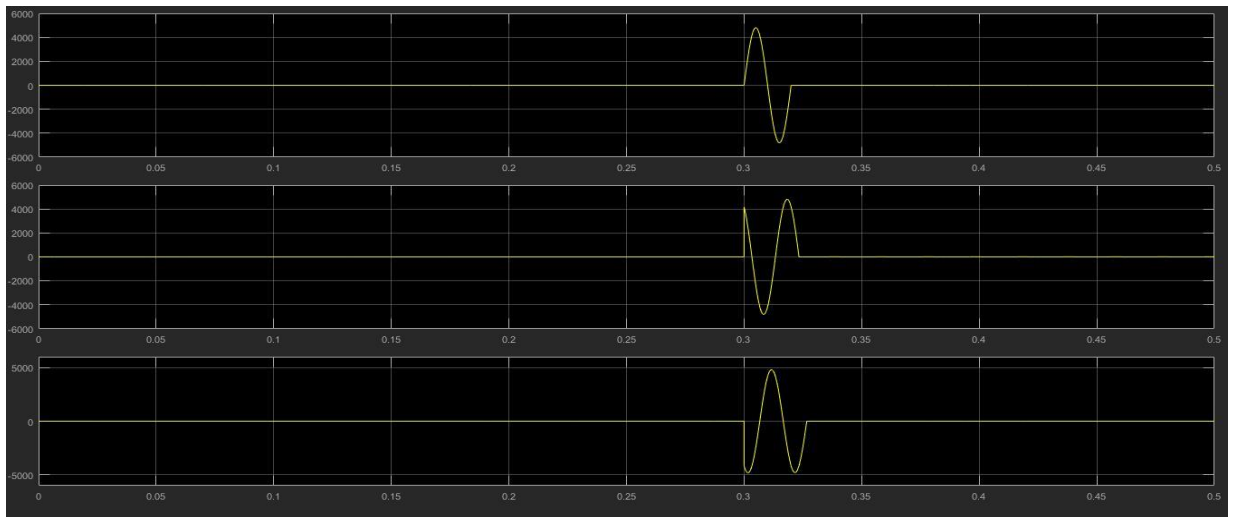
3.1.2.8 pav. ST-101 transformatoriaus srovė pirminėje apvijoje 110 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu, kai trumpasis jungimas transformatoriaus T-1 išvaduose.



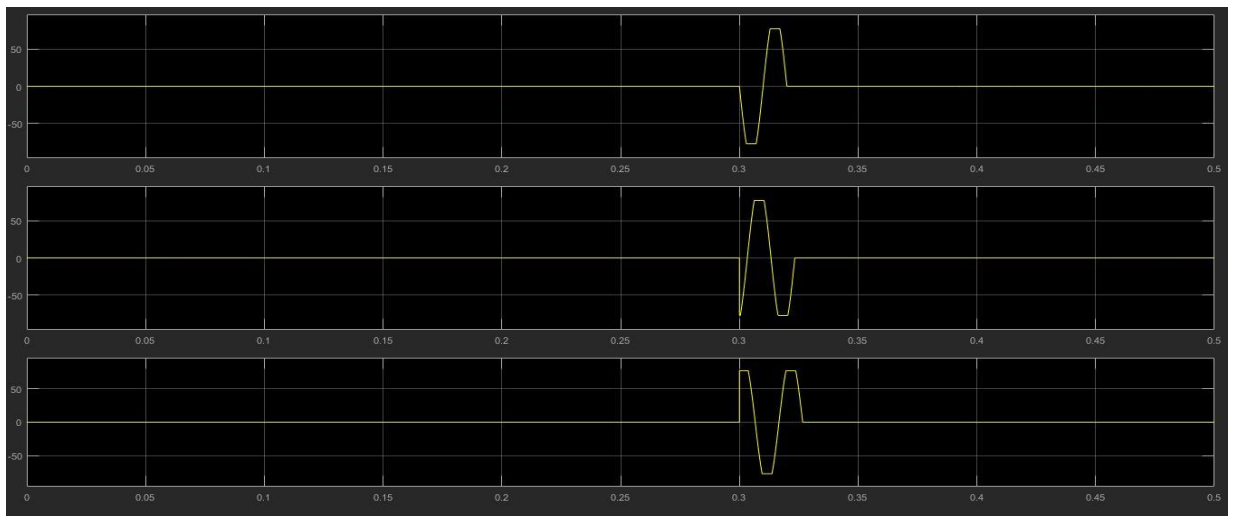
3.1.2.9 pav. ST-101 transformatoriaus srovė antrinėje apvijoje 110 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu, kai trumpasis jungimas transformatoriaus T-1 išvaduose.



3.1.2.10 pav. ĮT-21 fazinės įtampos 20kV tinkle, kai trumpasis jungimas transformatoriaus T-1 išvaduose.



3.1.2.11 pav. ST-21 transformatoriaus srovė pirminėje apvijoje 20 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu, kai trumpasis jungimas transformatoriaus T-1 išvaduose.



3.1.2.12 pav. ST-21 transformatoriaus srovė antrinėje apvijoje 20 kV tinkle trifazio trumpojo jungimo metu, kai trumpasis jungimas transformatoriaus T-1 išvaduose.

Atlikus modeliavimą pastebėjome, kad įvykus trifaziam trumpajam jungimui transformatoriaus *T-1* 20 kV pusės išvaduose srovė labai išaugo *ST-21* transformatoriaus antrinėje apvijoje (žr. pav. 3.1.2.12) ir jis buvo persotintas, todėl matoma iškraipyta srovės amplitudė. Nepaisant to, diferencinė apsauga suveikė ir po $t = 0,027\text{s}$ nuo trumpojo jungimo pradžios išjungė galios transformatorių *T-1*.

IŠVADOS

Šiame darbe atlikti bandymai su galios transformatoriaus diferencine apsauga, tirtas jos veikimas esant pereinamiesiems procesams srovės transformatoriuose. Bandymai Matlab Simulink aplinkoje atliekami skirtingomis sąlygomis: modeliuotas įprastas sistemos darbas, vidiniai ir išoriniai gedimai, apsaugos elgsena parinkus įvairius srovės transformatorius. Iš gautų rezultatų galime daryti išvadas, jog:

1. Parinkti srovės transformatoriai privalo būti patikrinami ne tik esant įprastam sistemos darbui, bet ir pereinamųjų procesų metu, nes, kaip pastebėjome, ne avariniame režime tiek didesnio nominalo, tiek mažesnio nominalo srovės transformatoriai veikė be priekaištų.
2. Skirtingų nominalų srovės transformatoriai puikiai veikia ir tuo atveju, kai trumpasis jungimas įvyksta už saugomos zonos ribų.
3. Bandyme Nr. 2 įsotinome srovės transformatorių ir pastebėjome aiškius iškraipymus antrinėje apvijoje. Nepaisant to, diferencinė apsauga veikė gerai, greitai išmatavo momentines srovės vertes ir laiku atjungė transformatorių $T-I$. Apsauga išlaikė jautrumą, greitaveiką ir patikimumą.
4. Matome, kad modelyje gauti rezultatai atitinka teorinius skaičiavimus, todėl galime teigti, jog modelis veikia teisingai.

LITERATŪRA

1. Z. Turauskas, Elektros tinklo relinė apsauga, Šiauliai 2008.
2. Current transformer [žiūrėta 2017.12.17]. Prieiga per internetą:
<https://www.electronicshub.org/current-transformer/>
3. Current transformer – definition, principle, equivalent circuit, errors and types [žiūrėta 2017.12.17]. Prieiga per internetą:
<https://owlcation.com/stem/What-is-a-Current-transformer-How-does-it-work>
4. CT burden, knee point, voltage, core saturation – details of current transformer characteristics [žiūrėta 2017.12.17]. Prieiga per internetą:
<http://eblogbd.com/ct-burden-knee-point-voltage-magnitization-curve-details-of-current-transformer/>
5. Current and voltage transformers [žiūrėta 2017.12.28]. Prieiga per internetą:
https://profs.basu.ac.ir/deihimi/free_space/chapter%203.pdf
6. J. Horak, J. Hrabliuk, Current Transformer Errors and Transformer Inrush as Measured by Magnetic, Optical and Other Unconventional CTs.
7. Elektros įrenginių relinės apsaugos ir automatikos įrengimo taisyklės [žiūrėta 2018.04.10]. Prieiga per internetą:
<https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalActPrint?documentId=TAR.5C97BB4F93B4>
8. Edited by James H. Harlow, Electric Power Transformer Engineering, 2004.
9. G. Ziegler, Digital Differential Protection, Belo Horizonte 2005.
10. A. Nargėlas, Relinė apsauga ir automatika, Kaunas 2010.
11. P. B. Thote, M. B. Daigavane, N. G. Bawane, Matlab Simulink Based Digital Protection of Transformer, International Journal of Research in Engineering and Technology 2014.
12. W. D. A. S. Wijayapala, J. Karunanayake, R. R. T. W. M. R. A. I. Madawala, Current Transformer Performance during Transient Conditions and the Development of a Current Transformer Selection Criterion for Protection Applications, Sri Lanka 2016.
13. Noha Abed-AL-Bary AL-Jawady, Simulation of a three phase differential relay for transformer protection, Mosul 2014.
14. D. Andrew Sen, A. Azwin Zainul Abidin, MatLab Simulation – Modeling of the Differential Protection Relay, University Tenaga Nasional.
15. P. B. Thote, Dr. M. B. Daigavane, Implementation of Differential Protection of Three Phase Transformer Using Matlab Simulink, CSPE.
16. S. E. Zocholl, D. W. Smaha, Current Transformer Concepts, Rutland 1993.
17. M. Kezunovic, J. Ren, S. Lotfifard, Design, Modeling and Evaluation of Protective Relays for Power Systems, Switzerland 2016.