

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Lukas Jacikas**

**ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ  
MODELIAVIMAS**

**Baigiamasis magistro projektas**

**Vadovas**

Doc. dr. M. Ažubalis

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ  
MODELIAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

**Vadovas**

Doc. dr. Mindaugas Ažubalis

---

**Recenzentas**

---

---

**Projektą atliko**

Lukas Jacikas  
(2016-05-20)

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

---

(Fakultetas)

Lukas Jacikas

---

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

---

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Elektros skirstomojo tinklo įžemėjimo apsaugų modeliavimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės 20 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Luko Jaciko**, baigiamasis projektas tema „Elektros skirstomojo tinklo įžemėjimo apsaugų modeliavimas“ 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)

Jacikas, L. Elektros skirstomojo tinklo įžemėjimo apsaugų modeliavimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 45 psl.

## SANTRAUKA

Šiame magistro baigiamajame projekte yra aprašytos ir sumodeliuotos 10 kV skirstomojo tinklo įžemėjimo apsaugos izoliuotos ir kompensuotos neutralės tinkluose. Teorinėje dalyje remiantis įvairiais literatūros šaltiniais yra aprašyta izoliuotos neutralės tinklo reakcija į vienfazius įžemėjimus ir aptarti pagrindiniai tokio tinklo trūkumai lyginant su kompensuotos neutralės tinklu. Taip pat aprašyti elektrotechnikos įrenginiai būtini norint sukompensuoti tinklo talpinę srovę įvykus įžemėjimui, jų darbo ypatumai ir tokio tinklo reakcija į įžemėjimus. Baigiamajame darbe yra apžvelgti įžemėjimo apsaugų veikimo principai tiek izoliuotos neutralės, tiek kompensuotos neutralės tinkluose. Tiriamojoje dalyje buvo sudaryti įžemėjimo apsaugų modeliai šiems tinklams. Buvo tiriama, koks yra pereinamasis vyksmas izoliuotos neutralės tinkle įvykus įžemėjimui, lyginama kuo jis skiriasi kompensuotos neutralės tinkle, jei yra išlaikomi tokie patys pagrindinių tinklo elementų parametrai. Buvo gauti modeliavimo rezultatai, parodantys kaip keičiasi nulinės sekos parametrai priklausomai nuo neutralės prijungimo būdo. Vadovaujantis šiais parametrais galima sukonguruoti tinklo apsaugas, kurios galėtų selektyviai nustatyti kurioje linijoje įvyko įžemėjimas.

*Reikšminiai žodžiai:*

Vienfazis įžemėjimas

Įžemėjimo apsaugos

Kompensuotos neutralės tinklas

Kompensacinė ritė

Jacikas, Lukas. Simulation of Electric Power Distribution Network Ground Fault Protection. Final project of *master degree* / supervisor doc. dr. Mindaugas Ažubalis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2016. 45 pp.

## SUMMARY

In this final master's degree research project is described and simulated ground fault protection for 10 kV distribution network with ungrounded neutral and resonance grounded neutral. In theoretical part is description of ungrounded neutral network's reaction to single line to ground fault and also main drawbacks of such network in comparison to network with resonance grounded neutral. It also describes electrotechnical equipment needed to compensate networks capacitive current that start flowing in the event of single line to ground fault, main aspects of such equipment and how such network reacts to ground faults. In this paper is also main principles of ground fault protection in both ungrounded neutral network and resonance grounded neutral network. In the research part of this paper is a model created for both such networks. It was researched what kind of transient process happens in ungrounded neutral network during a ground fault and how it changes in resonance grounded neutral network if parameters of main network elements remains the same. Research results show how zero sequence parameters changed depending on network neutral point grounding method. In accordance to the results it is possible to configure relay protection so it could always identify the line at fault.

*Keywords:*

Single line to ground fault

Ground fault protection

Resonance grounding network

Arc suppression coil

## TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
ĮVADAS.....	8
1. ĮŽEMĖJIMAS IZOLIUOTOS NEUTRALĖS TINKLE.....	10
2. ĮŽEMĖJIMAS KOMPENSUOTOS NEUTRALĖS TINKLE.....	15
2.1. KOMPENSACINĖS RITĖS PRITAIKYMAS.....	16
2.2. KOMPENSACINĖS RITĖS VEIKIMO PRINCIPAS.....	16
2.3. KOMPENSACINĖS RITĖS KONSTRUKCIJA.....	17
2.4. REZONANSINIO TAŠKO NUSTATYMAS.....	19
3. ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ VEIKIMO PRINCIPAI.....	21
4. MODELIO SUDARYMAS.....	23
4.1 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIS IZOLIUOTOS NEUTRALĖS TINKLE.....	24
4.2 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIS KOMPENSUOTOS NEUTRALĖS TINKLE.....	26
5. TIRIAMOJO MODELIO REZULTATAI.....	29
5.1 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIO IZOLIUOTOS NEUTRALĖS TINKLE REZULTATAI.....	29
5.2 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIO KOMPENSUOTOS NEUTRALĖS TINKLE REZULTATAI.....	35
5.3 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS.....	42
IŠVADOS.....	43
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	44

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Izoliuotos neutralės sistema .....	10
1.2 pav. Fazinė įtampa esant sveikai linijai (a) ir įžemėjus C fazei (b).....	11
1.3 pav. Tinklo gyvybingumas, priklausomai nuo įžemėjimo varžos, esant izoliuotai neutralėi.....	13
1.4 pav. Tinklo gyvybingumas, priklausomai nuo įžemėjimo varžos, esant kompensuotai neutralėi.....	13
1.5 pav. Elektros lanko savaiminis gesimas, priklausomai nuo įžemėjimo srovės, esant izoliuotai ir kompensuotai neutralėi.....	14
2.1 pav. Kompensuotos neutralės sistema .....	15
2.2 pav. Kompensacinės ritės vidinės dalies struktūra .....	18
3.1 pav. Srovės ir įtampos vektoriai izoliuotos neutralės tinke. $U_0$ – nulinės sekos įtampa; $I_0$ – sveikos linijos nulinės sekos srovė; $I_{0ž}$ – įžemėjusios linijos nulinės sekos srovė .....	21
3.2 pav. Srovės ir įtampos vektoriai kompensuotos neutralės tinke. $U_0$ – nulinės sekos įtampa; $I_0$ – sveikos linijos nulinės sekos srovė; $I_{0ž}$ – įžemėjusios linijos nulinės sekos srovė .....	22
4.1 pav. Įžemėjimo apsaugų modelis izoliuotos neutralės tinkle .....	25
4.2 pav. Įžemėjimo apsaugų modelis kompensuotos neutralės tinkle.....	28
5.1 pav. Fazinė įtampa 10 kV šynose, izoliuotos neutralės tinkle.....	29
5.2 pav. Nulinės sekos įtampa 10 kV šynose, izoliuotos neutralės tinkle .....	30
5.3 pav. Linijos L-300 nulinės sekos srovė izoliuotos neutralės tinkle.....	31
5.4 pav. Linijos L-400 nulinės sekos srovė izoliuotos neutralės tinkle.....	32
5.5 pav. Linijos L-200 nulinės sekos srovė izoliuotos neutralės tinkle.....	33
5.6 pav. Izoliuotos neutralės tinklo nulinės sekos srovių ir įtampos palyginimas .....	34
5.7 pav. Izoliuotos neutralės tinklo nulinės sekos parametrų vektorinė diagrama .....	35
5.8 pav. Fazinė įtampa 10 kV šynose, kompensuotos neutralės tinkle .....	36
5.9 pav. Nulinės sekos įtampa 10 kV šynose, kompensuotos neutralės tinkle.....	37
5.10 pav. Linijos L-300 nulinės sekos srovė kompensuotos neutralės tinkle.....	38
5.11 pav. Linijos L-400 nulinės sekos srovė kompensuotos neutralės tinkle.....	38
5.12 pav. Linijos L-200 nulinės sekos srovė kompensuotos neutralės tinkle.....	39
5.13 pav. Kompensuotos neutralės tinklo nulinės sekos srovių ir įtampos palyginimas .....	40
5.14 pav. Kompensuotos neutralės tinklo nulinės sekos parametrų vektorinė diagrama .....	41

## IVADAS

Eksplatuojant Lietuvos skirstomąjį tinklą nuolat yra susiduriama su įvairiomis avarijomis, kurios sukelia įžemėjimus. Įžemėjimas – tai sistemoje su izoliuota neutrале vienos ar kelių fazių sujungimas su žeme [1].

Lietuvos elektros energetikos sistema nuolat sensta, dėvėsi oro linijų laidai ir kabelinių linijų izoliacija. Nors ir vykdomas senų kabelių ir oro linijų keitimas naujais, tačiau skirstomasis tinklas yra per didelis, kad būtų galima pastoviai jį atnaujinti. Dėl pasenusios izoliacijos, mechaniškai susilpnėjusių oro linijų laidų, kurie gali nutrūkti, didėja laidininkų elektrinio susijungimo su žeme (įžemėjimo) rizika. Be kabelių ir laidų susidėvėjimo šią riziką didina ir nešvarūs izoliatoriai, korozija, atmosferiniai ir komutaciniai viršįtampiai, stiprus vėjas, griūvantys medžiai arba neprižiūrimos oro linijų trasos, dėl kurių aukštų medžių šakos susiliečia su laidais ir sudaro laidų kelią elektros srovei nutekėti į žemę.

Kadangi oro linijos reikalauja dažnesnės eksploatacijos ir yra labiau pažeidžiamos, vykdam skirstomojo tinklo plėtrą naujos elektros linijos dažniausiai yra tiesiamos kabeliais, senos oro linijos yra keičiamos į kabelines. Kadangi kabeliai yra klojami po žeme, išauga skirstomojo tinklo talpis, o taip pat ir talpinės srovės. Įvykus avarijai, įžemėjimo vietoje gali užsidegti elektros lankas, kuris yra maitinamas talpinio pobūdžio srove ir yra žalingas elektros įrenginiams.

Kompensuotos neutralės tinkle įžemėjimo srovės nėra didelės ir sistema gali dirbti esant vienfaziui įžemėjimui, tačiau įžemėjus vienai fazei, sveikose fazėse padidėja įtampa, dėl ko atsiranda pavojus įžemėti ir kitoms fazėms. Nelikvidavus vienfazio įžemėjimo jis gali pereiti į dvigubą įžemėjimą, kai dvi fazės susijungia su žeme.

Skirstomajame tinkle 35, 10 ir 6 kV antrinė galios transformatoriaus apvija yra jungiama trikampiū arba žvaigžde, kurios neutralės taškas izoliuotas, todėl neturi įžeminimo taško, gaunamas izoliuotos neutralės tinklas. Nors izoliuotos neutralės tinkle įžemėjimo srovės siekia tik nuo keletos iki keliolikos amperų, tačiau sveikų fazių įtampa išauga 1,73 karto, todėl labai išauga viršįtampių rizika. Taip pat esant izoliuotos neutralės tinklui, įžemėjimo metu užsidegęs elektros lankas nėra gesinamas. Mažame tinkle, kuriame didžioji elektros linijų dalis yra orinės, įžemėjimo srovės nėra didelės ir elektros lankas gali užgesti savaime, tačiau plečiant tinklą arba oro linijas keičiant į kabelines, sistemos talpis didėja, dėl ko didėja ir įžemėjimo srovė. Esant didesnei įžemėjimo srovei elektros lankas savaime nebeužgesta ir tam tikslui turi būti taikomi įrenginiai, kurie leistų elektros lanką užgesinti.



Lietuvoje vykdamas skirstomojo tinklo plėtrą skirstomiesiems tinklams priklausančiose transformatorių pastotėse yra statomos naujos kompensacinės ritės, arba esamos kompensacinės ritės keičiamos galingesnėmis. Kompensacinė ritė, dar kitaip vadinama Peterseno rite, kompensuoja įžemėjimo metu atsiradusią talpinę srovę sukurdama tokio paties dydžio induktyviojo pobūdžio srovę ir taip gesina užsidegusį elektros lanką.

Šiame darbe bus sudaromas matematinis modelis, kuris leistų palyginti tinklo darbą, kai neutralė yra izoliuota, ir kai neutralė kompensuota per įrengtą kompensacinę ritę.

**Darbo tikslas:** Sudaryti tinklo su izoliuota neutrале ir tinklo su kompensuota neutrале įžemėjimo modelį, kuris kaip galima tiksliau atkartotų tinklo procesus.

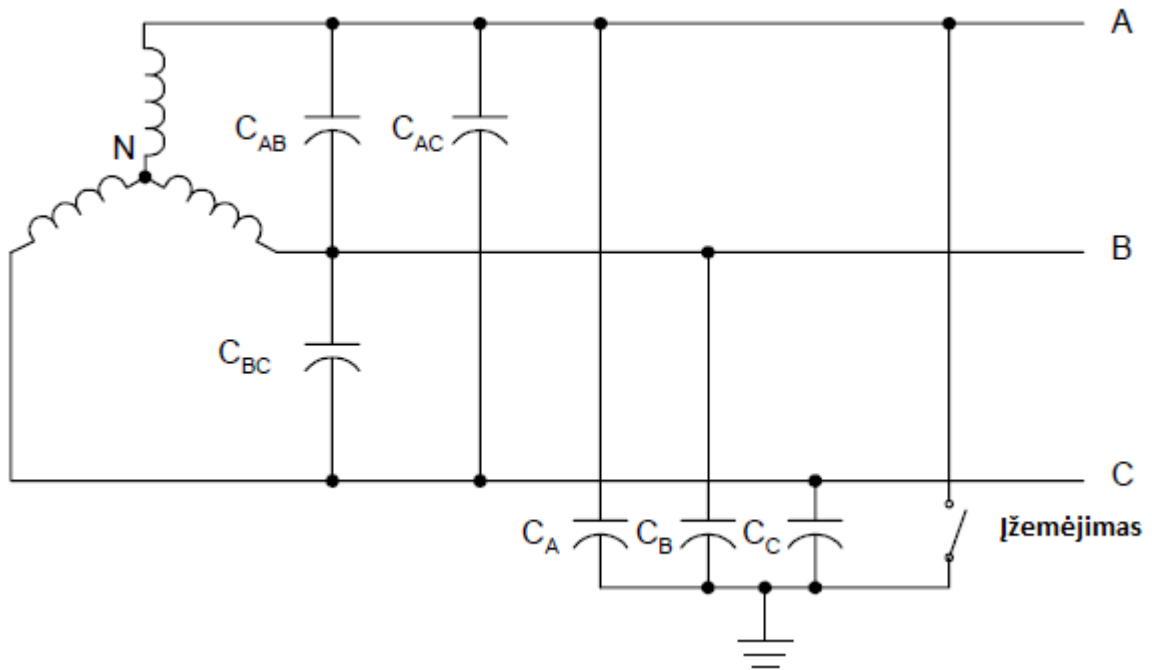
**Darbo uždaviniai:**

1. Sudaryti skirstomojo tinklo modelius su izoliuota neutrале ir su kompensuota neutrале.
2. Išnagrinėti skirstomojo tinklo veiksnis, įtakojančius kompensacinės ritės darbą.
3. Sumodeliuoti procesus, vykstančius įžemėjimo metu esant skirtingiems neutralės įžeminimo būdams.
4. Įvertinti ir palyginti abiejų tinklo modelių rezultatus.

# 1. IŽEMĖJIMAS IZOLIUOTOS NEUTRALĖS TINKLE

Ankstyvosiose elektros skirstomojo tinklo konfigūracijose tinklo neutralė paprastai būdavo izoliuota, kadangi tokiu būdu įvykus įžemėjimui tekėdavo nedidelės įžemėjimo srovės, kurios nereikalaudavo, kad pažeista linija būtų atjungta, t.y. įžemėjimas nebuvo vertinamas kaip avarinis tinklo režimas. Tinklo neutralės izoliavimas leido padidinti tinklo efektyvaus darbo laiką, kas buvo naudinga tiek tinklo operatoriui, tiek pramonės įmonėms, kurioms reikalingas nepertraukiamas energijos tiekimas.

Izoliuotos neutralės tinkle (1.1 pav.) trifazės sistemos neutralės taškas neturi jokio suformuoto fizinio ryšio su žeme ir su ja susijungia tik per talpą tarp žemės ir fazės [2].

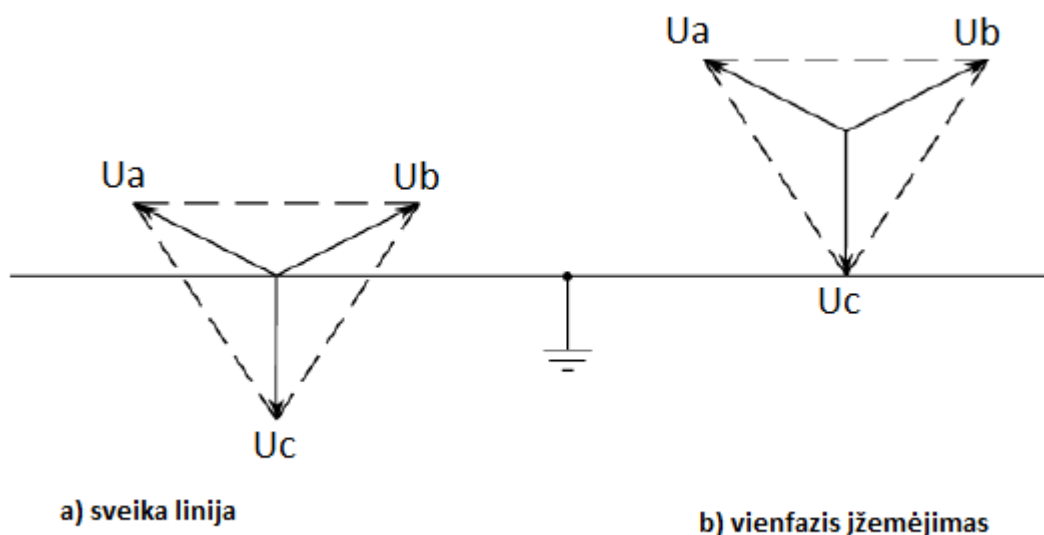


1.1 pav. Izoliuotos neutralės sistema

Tokioje sistemoje įžemėjimo srovė yra apribota nulinės sekos talpiu tarp žemės ir fazės, ir įžemėjimo varžos. Jei įžemėjimo srovė yra nedidelė, t.y. sąlyginai mažas tinklo talpis, įžemėjimo metu užsidegęs elektros lankas užgesta savaime ir tokia sistema gali dirbti įvykus įžemėjimui be pavojaus avarijai peraugti į dvifazį įžemėjimą.

Kadangi įvykus vienfaziui įžemėjimui izoliuotos neutralės tinkle įžemėjusia linija tekanti srovė neturi grįžimo kelio, todėl įžemėjusia linija teka vos kelių ar keliolikos amperų srovė. Taip pat

įtampa pažeistoje fazėje tampa artima nuliui (tikrasis jos dydis priklauso nuo avarijos varžos), kaip parodyta 1.2 pav. Tai lemia, kad kitose fazėse įtampa išauga 1,73 karto.



1.2 pav. Fazinė įtampa esant sveikai linijai (a) ir įžemėjus C fazei (b)

Išaugusi įtampa yra žalinga transformatorių izoliacijai ir kitiems susijusiems sistemos komponentams, kadangi įtampai išaugus, izoliacija patiria 73 proc. didesnę apkrovą ir greičiau dėvisi. Taip pat dėl įžemėjimų izoliuotos neutralės tinkle padidėja viršįtampių rizika, dėl to gali sudegti varikliai pramonės objektuose [3].

Jeigu laikytume, kad įžemėjimo varža yra lygi nuliui, tai įžemėjimo srovė būtų apskaičiuojama taip:

$$I_e = 3 \cdot \omega \cdot C_e \cdot E \quad (1)$$

čia  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – sistemos kampinis dažnis;

$E$  – tinklo įtampa;

$C_e$  - tinklo talpis, kuris priklauso nuo elektros linijų tipų ir ilgių.

Realybėje, įvykus įžemėjimui, egzistuoja įžemėjimo varža  $Z_f$ , kuri sumažina įžemėjimo srovę:

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_e}{E} \cdot Z_f\right)^2}} \quad (2)$$

čia  $I_e$  – įžemėjimo srovė, gauta iš (1) formulės.

Nulinės sekos įtampa yra sukuriama įžemėjimo srovės, tekančios per nulinės sekos talpį:

$$U_0 = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C_0} \cdot I_{ef} \quad (3)$$

čia  $I_{ef}$  – įžemėjimo srovė įvertinus avarijos varžą, gauta iš (2) formulės.

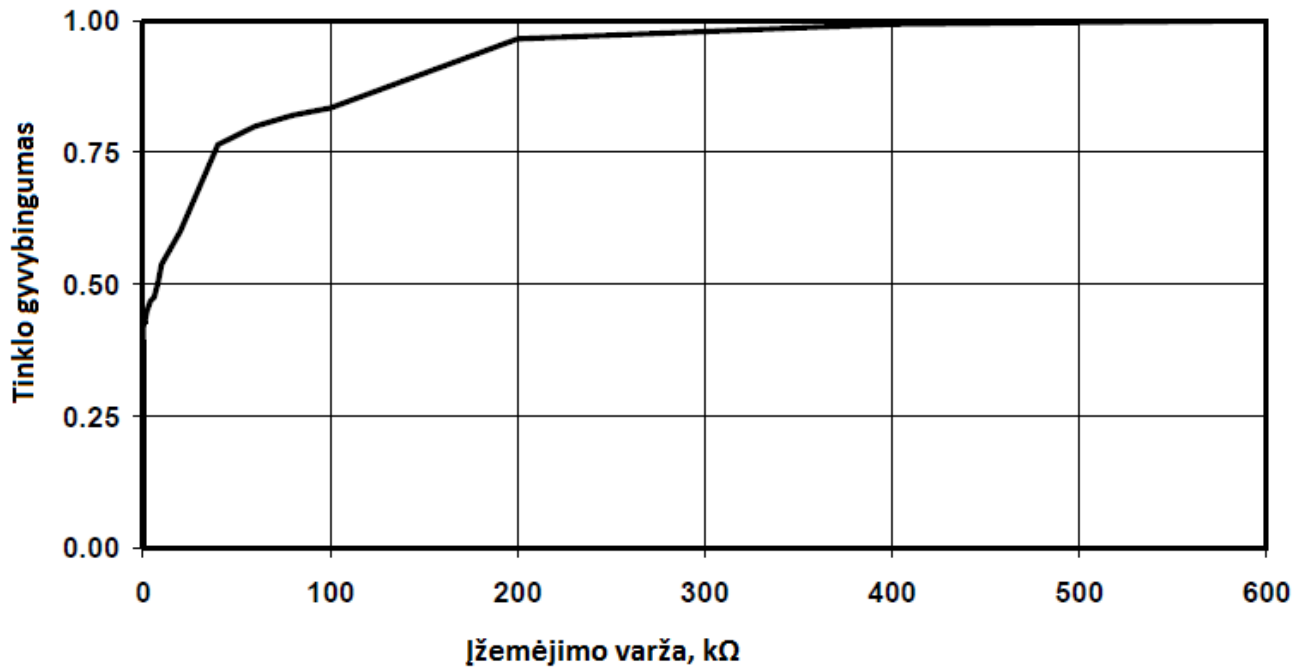
Šias formules galima perrašyti taip:

$$\frac{U_0}{E} = \frac{1}{\sqrt{1 + (3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot Z_f)^2}} \quad (4)$$

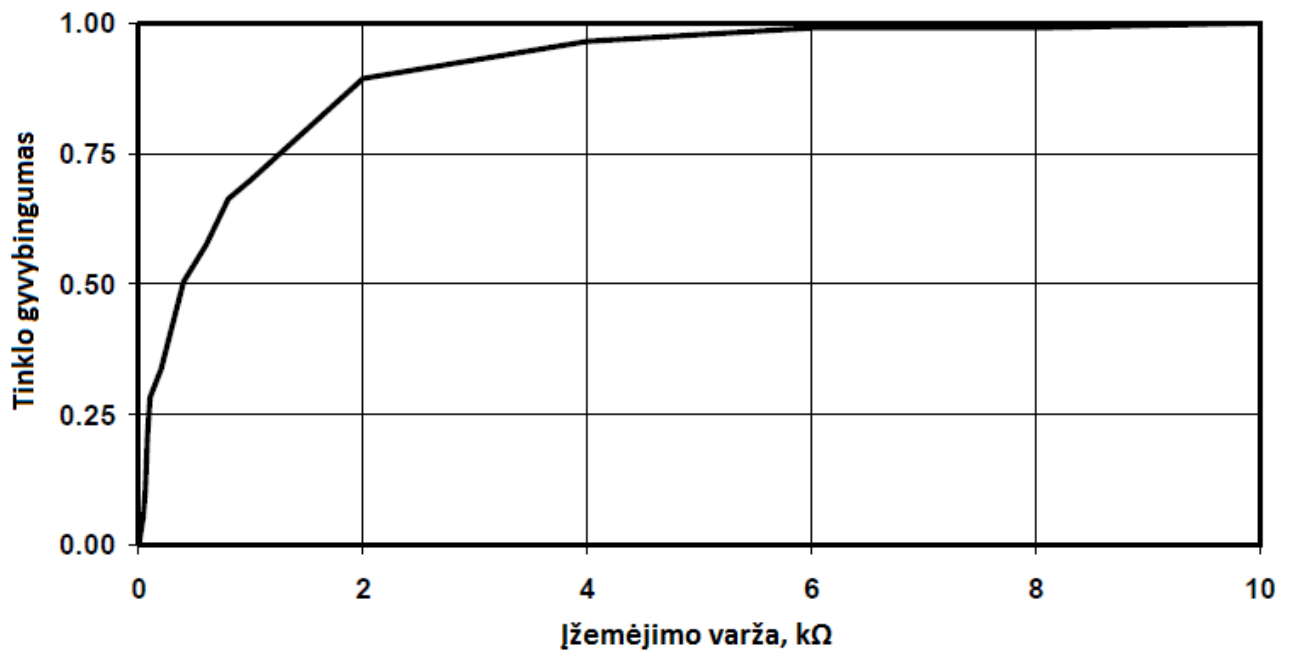
Iš (4) formulės matyti, kad didžiausia neutralės įtampa yra lygi fazinei įtampai ir ji gaunama tuo atveju, kai įžemėjimo varža lygi nuliui.

Vienas iš trūkumų eksploatuojant izoliuotos neutralės tinklą esant realioms sąlygoms (įžemėjimo varža nelygi nuliui) yra tinklo gebėjimas išlaikyti perduodamos elektros energijos parametrus esant įžemėjimui. Palyginimui yra pateikiami eksperimentiniai rezultatai, koku pajėgumu gali funkcionuoti tinklas esant izoliuotai neutralėi (1.3 pav.) ir esant kompensuotai neutralėi (1.4 pav.) kai įžemėjimo varžos skirtingos. Tokius rezultatus pateikia šaltinio autorius [4].

Tinklo gyvybingumas – tinklo tiekiamos elektros energijos gebėjimas perduoti kokybišką elektros energiją vartotojui. Mažas tinklo gyvybingumas 1.3 pav. ir 1.4 pav. reiškia, kad tinklas negali dirbti visu pajėgumu ir užtikrinti pakankamos elektros energijos kokybės. Kuo tinklo gyvybingumas didesnis, tuo jis geriau gali perduoti elektros energiją, jo darbas yra atsparesnis įžemėjimui. Iš 1.3 pav. ir 1.4 pav. pateikto palyginimo matoma, kad kompensuotos neutralės tinklas nėra toks jautrus įžemėjimams net esant mažai varžai avarijos vietoje.

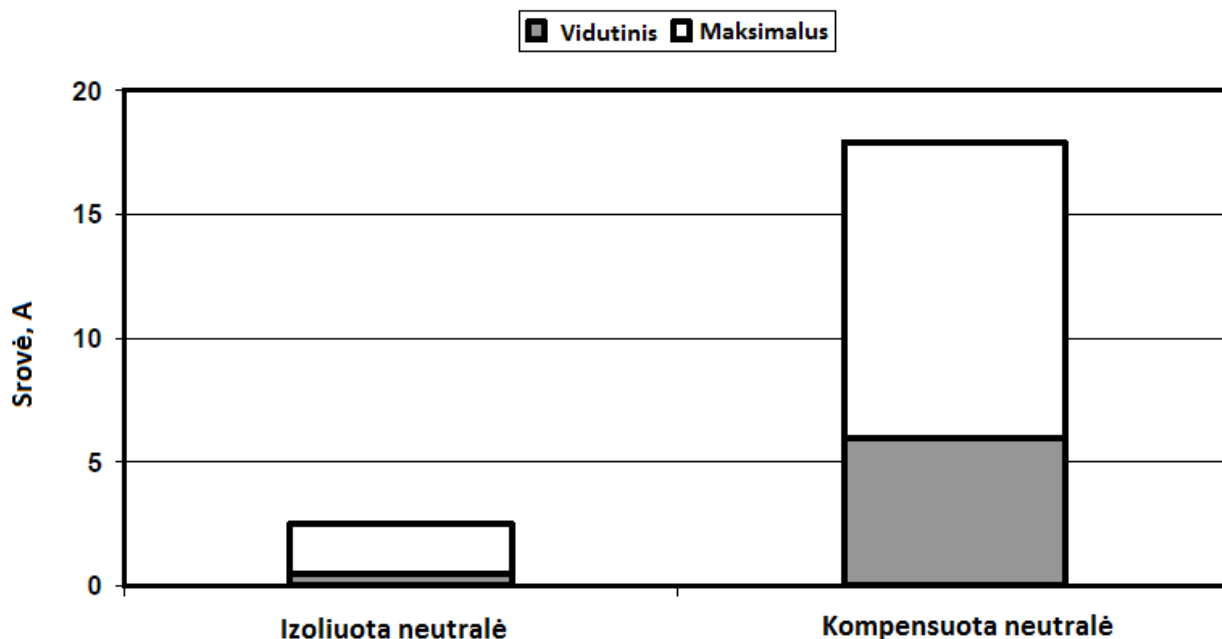


1.3 pav. Tinklo gyvybingumas, priklausomai nuo įžemėjimo varžos, esant izoliuotai neutraliai



1.4 pav. Tinklo gyvybingumas, priklausomai nuo įžemėjimo varžos, esant kompensuotai neutraliai

Kita priežastis, dėl ko tinklo neutralė yra kompensuojama, tai elektros lanko, užsidegusio įžemėjimo metu, gesinimas. 1.5 pav. pateiktas eksperimentiniu būdu gautas palyginimas, kokios yra elektros lanko gesimo galimybės esant izoliuotai neutralėi, ir kokios esant kompensuotai. Tokius rezultatus pateikia šaltinio autorius [4].



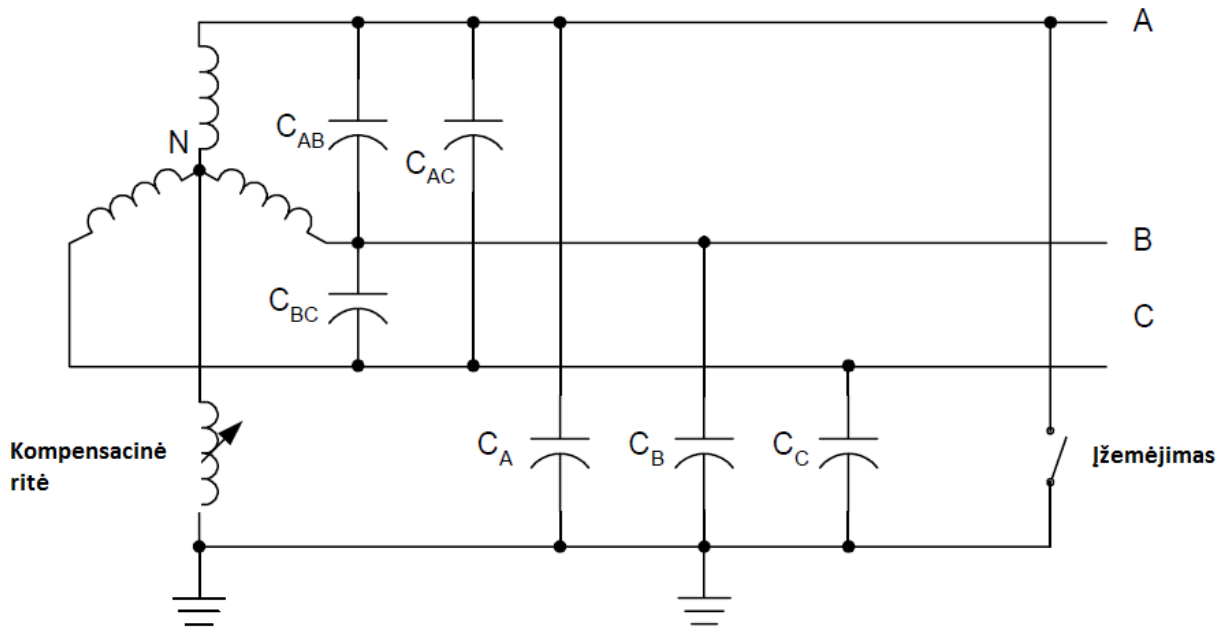
1.5 pav. Elektros lanko savaiminis gesimas, priklausomai nuo įžemėjimo srovės, esant izoliuotai ir kompensuotai neutralėi [4]

1.5 pav. pateiktas grafikas šaltinio autoriaus buvo gautas atlikus bandymus izoliuotos ir kompensuotos neutralės tinkluose. Bandymų metu nustatyta, kokiai įžemėjimo srovei tekant elektros lankas gali užgesti savaime. Bandymų rezultatuose pateikiama vidutinė įžemėjimo srovė, kuomet elektros lankas užgesdavo ir maksimali įžemėjimo srovė – didžiausia gauta srovės reikšmė visų bandymų metu, kuomet elektros lankas užgeso savaime.

Šie rezultatai rodo, kad įvykus įžemėjimui izoliuotos neutralės tinkle maksimali įžemėjimo srovė, kada savaime užgeso elektros lankas buvo ~2,5 A, tačiau vidutiniškai elektros lankas savaime užgesdavo tekant vos 1 A įžemėjimo srovei. Tokį pat bandymą atlikus kompensuotos neutralės tinkle buvo gauti daug geresni rezultatai – geriausiu atveju elektros lankas savaime užgeso tekant ~18 A įžemėjimo srovei, o vidutiniškai jis užgesdavo tekant ~6,5 A įžemėjimo srovei.

## 2. IŽEMĖJIMAS KOMPENSUOTOS NEUTRALĖS TINKLE

Tam, kad įžemėjimo metu būtų sumažinta nulinės sekos srovė, ji gali būti kompensuota, t.y. tinklo neutralė yra įžeminama per kompensacinę (Peterseno) ritę, kaip pavaizduota 2.1 pav.



2.1 pav. Kompensuotos neutralės sistema

Kompensuotos neutralės tinkle visas linijų talpis yra kompensuojamas sukuriant induktyviają varžą, kuri būtų lygi tinklo talpinei varžai. Esant tokiai tinklo konfigūracijai yra gaunamas srovės rezonansas, kuomet idealiu atveju (jei nevertinama aktyvioji varžos dedamoji) talpinė srovė yra lygi induktyviajai srovei, bet priešingų kryptų (kampas tarp jų vektorių lygus  $180^\circ$ ). Realiu atveju, kai egzistuoja ir aktyvioji varžos dedamoji, įvykus įžemėjimui teka nulinės sekos srovė, tačiau 10 kV tinkle ji siekia vos 5-8% nuo talpinės srovės.

Dėl įžemėjimo srovės kompensavimo tokia tinklo konfigūracija yra pranašesnė, nes gali geriau funkcionuoti mažos varžos įžemėjimo atveju, kaip parodyta 1.4 pav., taip pat gesinamas elektros lankas tekant didesnei įžemėjimo srovei, kaip parodyta 1.5 pav.

Lietuvoje rekonstruojant senas transformatorių pastotes yra įrengiamos kompensacinės ritės, taip kompensuojant talpinės įžemėjimo srovės skirstomajame tinkle. Kompensuotos (įžemintos per kompensacinę ritę) neutralės tinkle vienfazinių įžemėjimų metu, kai fazė susijungia su žeme, atsiradusios talpinio pobūdžio įžemėjimo srovės yra ženkliai sumažinamos taip neleidžiant degti elektros lankui.

Kai ritės induktyvioji varža yra suderinta srovės rezonansui su tinklo talpine varža, srovė įžemėjusioje linijoje siekia vos kelis procentus vardinės srovės  $I_n$ . Dėl tokios mažos srovės avarijos metu, norint nustatyti pažeistą liniją, paprastai būna numatomas šuntuojantis rezistorius, jungiamas lygiagrečiai ritei. Įžemėjimo metu (kai pastebimas įtampos sumažėjimas pažeistoje fazėje) rezistorius yra įjungiamas. Tuomet rezistoriaus aktyvioji varža sumažina rezonanso sukeltą varžą ir leidžia nustatyti įžemėjusią liniją. Po to rezistorius yra atjungiamas, taip padidinant rezonanso varžą iki artimos begalinei varžai, dėl to įžemėjimo srovė gaunama labai maža, o elektros lankas yra efektyviai gesinamas [5].

Tokia tinklo kompensavimo konfigūracija netrikdo apsaugų darbo, taip pat leidžia kompensuoti trumpojo jungimo srovę iki mažų verčių, todėl sistema gali dirbti ilgą laiką nekeldama pavojaus elektrotechnikos įrenginiams ir laidininkams.

Kompensacinė ritė turi būti prijungiamas prie transformatoriaus neutralės taško, tačiau skirstomajame tinkle transformatoriaus antrinė apvija dažniausiai būna sujungta trikampiū, todėl neutralės taško nėra. Tokiu atveju kompensacinė ritė yra jungiama prie atskiro, jai skirto transformatoriaus. Kompensacinei ritei prijungti dažniausiai yra naudojami savųjų reikmių/kompensacinės ritės transformatoriai (SRT/KRT) arba atskiri kompensacinės ritės transformatoriai (KRT).

## **2.1. KOMPENSACINĖS RITĖS PRITAIKYMAS**

Kompensacinė ritė (kitais vadinama Peterseno rite) buvo sukurta W. Petersen 1916 metais. Kompensacinę ritę sudaro geležies šerdies reaktorius, prijungtas prie trifazės sistemos neutralaus taško. Kompensacinės ritės yra skirtos apriboti trifazių sistemų srovę atsiradusią įžemėjimo metu. Kai vienfazio trumpojo jungimo metu įžemėjimo srovė ima tekėti per kondensatorių, grandinė papildoma tokio dydžio induktyvumu, kad būtų visiškai kompensuotas tinklo talpis, todėl įžemėjimo srovė yra stipriai sumažinama (iki 5-8% talpinės srovės). Taip sumažinus įžemėjimo srovę elektros lankas neužsidega ir neatsiranda viršįtampio 10 kV elektros energijos skirstomajame tinkle [6].

## **2.2. KOMPENSACINĖS RITĖS VEIKIMO PRINCIPAS**

Normaliu tinklo režimu, kai jis dirba be įžemėjimo, kompensacinės ritės valdiklis matuoja nulines sekas įtampos pokytį, kuris atsiranda pasikeitus tinklo talpiui ir pagal tai valdo kompensacinės ritės pavarą. Valdant jos pavarą yra keičiamas kompensacinės ritės induktyvumas, kuris yra nustatomas toks, kad būtų pasiektas rezonansinis taškas, tai yra, kad įvykus vienfaziui įžemėjimui būtų gaunamas srovių rezonansas.



Kompensacinė ritė ima veikti kai tinkle atsiranda vienfazis įžemėjimas. Padidėjus įtampai sveikose fazėse, o pažeistoje sumažėjus yra fiksuojamas įžemėjimas ir kompensacine rite iš 10 kV šynų ima tekėti induktyviojo pobūdžio srovė į avarijos vieta. Srovės dydis priklauso nuo kompensacinės ritės valdiklio nustatytos ritės pavaros padėties. Įžemėjimo srovė teka per kondensatorių (per talpą tarp pažeistos linijos ir žemės), o induktyvioji srovė iš kompensacinės ritės teka į avarijos vietą. Fazinis kampas tarp įžemėjimo srovės vektoriaus ir kompensacinės ritės induktyviosios srovės vektoriaus yra  $180^\circ$ , o jų dydis – vienodas. Tokiu būdu šios srovės kompensuoja viena kitą, todėl yra gaunamas srovių rezonansas [7].

Taip pat reikalinga užtikrinti, kad kompensacinė ritė nepradėtų veikti klaidingai, kai tinkle nėra įžemėjimo. Skirstomajame tinkle vykstantys pereinamieji vyksmai, tokie kaip jungtuvo įjungimas įjungiant liniją ar didelės galios variklio įjungimas ar kiti veiksmai, gali sukelti komutacinius viršįtampius tinkle. Atsiradus viršįtampiui kompensacinės ritės valdiklis tai gali vertinti kaip į įžemėjimą panašų vyksmą ir išduos komandą įjungti kompensacinę ritę. Tam, kad to išvengti, kompensacinės ritės valdymas turi būti blokuojamas dėl tokių įvykių.

### 2.3. KOMPENSACINĖS RITĖS KONSTRUKCIJA

Šiuolaikinės kompensacinės ritės gali būti dviejų konstrukcijų tipų [8]:

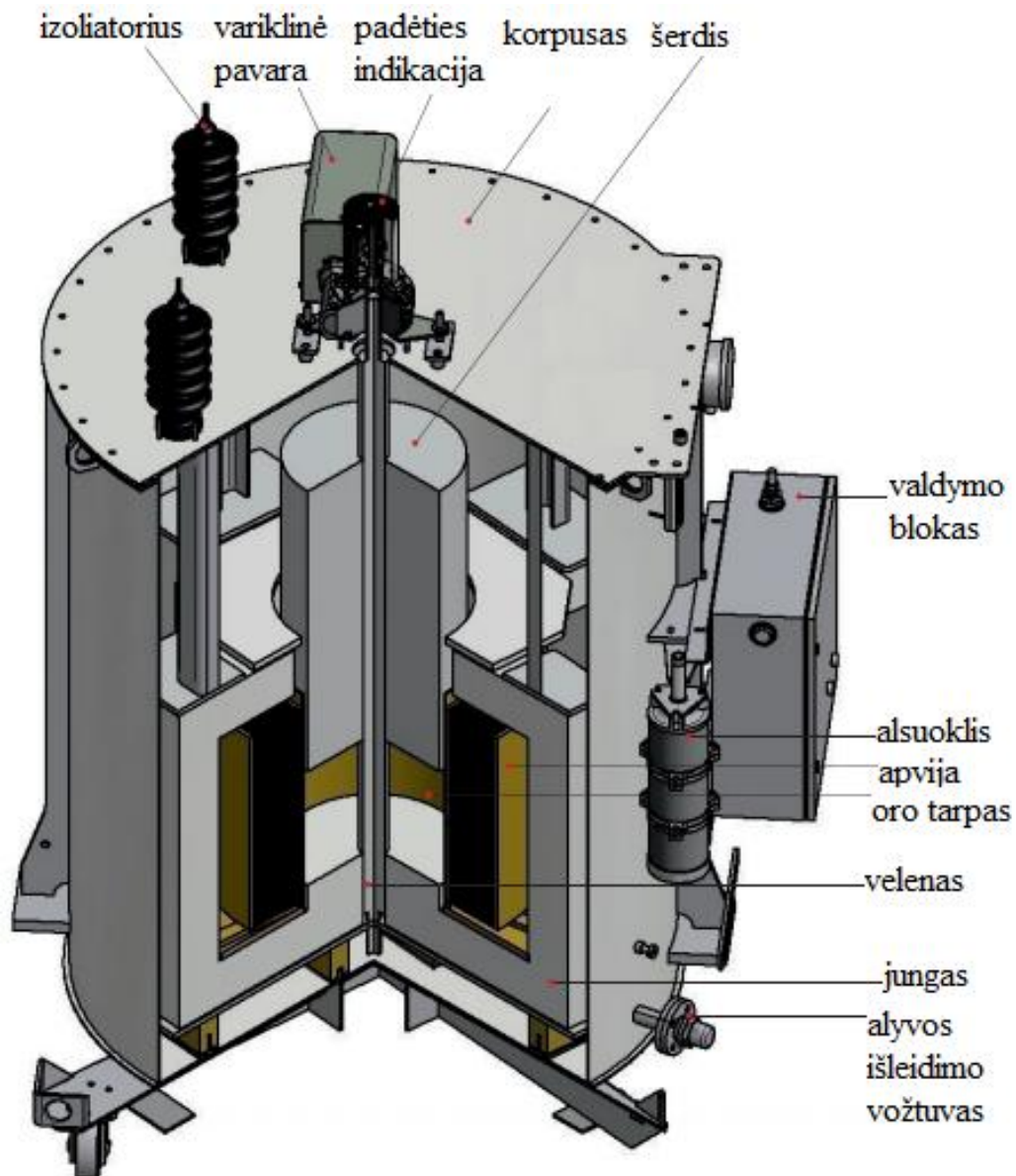
- pakopinės, kuriose ritės induktyvumas yra keičiamas sujungiant arba atjungiant atskiras ritės sekcijas;
- sklاندus valdymo, kuriose ritės induktyvumas yra keičiamas valdant pavarą, kuri reguliuoja ritės šerdies padėtį. Keičiant šerdies padėtį yra didinamas arba mažinamas magnetinės grandinės magnetinė varža.

Lietuvoje rekonstruojant transformatorių pastotes paprastai yra montuojamos sklاندus reguliavimo kompensacinės ritės, kadangi tokia ritės konstrukcija leidžia induktyvumą keisti tolygiai, be pastebimo žingsnio, kas galėtų sukelti svyravimus tinkle. Taip pat sklاندus reguliavimo ritės leidžia tiksliai nustatyti induktyviąją varžą, dėl to galima labai tiksliai kompensuoti įžemėjimo srovę, taip ją sumažinant iki minimalios reikšmės. Pagrindiniai sklاندus reguliavimo kompensacinės ritės privalumai yra šie:

- galimybė nuolat (netgi ir dirbant su apkrova) reguliuoti induktyvumą keičiant oro tarpą;
- galimybė valdyti ritę per variklinę pavarą. Pavarą galima valdyti tiek vietiniu būdu iš ritės valdymo bloko, tiek nuotoliniu būdu per ritės valdiklį;

- automatinio valdymo režimas, kai ritę galima nuolat reguliuoti valdiklio pagalba stebint tinkle vykstančius pokyčius;
- kompaktiška ritės konstrukcija nereikalauja daug erdvės, dėl ko nereikalinga didelė transformatorių pastotės teritorija.

Žemiau (2.2 pav.) pateikiamas tipinės sklendaus reguliavimo kompensacinės ritės konstrukcijos pjūvis.



2.2 pav. Kompensacinės ritės vidinės dalies struktūra [8]

## 2.4. REZONANSINIO TAŠKO NUSTATYMAS

Norint išgauti srovių rezonansą tarp įžemėjimo metu atsiradusios talpinio pobūdžio srovės ir kompensacine rite tekančios induktyviojo pobūdžio srovės, kompensacinė ritė turi būti suderinta parenkant jos induktyvumą taip, kad jos sukuriama induktyvioji varža būtų lygi tinklo talpinei varžai. Teisingai nustačius kompensacinės ritės induktyvumą yra gaunamas rezonansinis taškas, kuomet visą talpinę srovę yra kompensuojama induktyviaja srove. Realiose elektros sistemose šis taškas yra nustatomas automatiškai, kompensacinei ritei matuojant talpinę tinklo varžą ir kompensacinės ritės valdikliui atitinkamai reguliuojant kompensacinės ritės pavarą nustatant reikiamą induktyvumą. Kuriant tokios sistemos modelį buvo atlikti skaičiavimai remiantis tinklo parametrais (vertinant nulinės sekos talpius) ir apskaičiuojamas reikalingas ritės induktyvumas. Tinklo parametrai yra pateikiami 4 skyriuje.

Įtampos rezonansas gaunamas tuomet, kai įžemėjimo metu atsiradusi talpinė srovė yra kompensuojama į tinklą įvedant papildomą induktyvumą [9].

$$I = U \cdot \left( \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) = \frac{U}{j\omega L} \cdot (1 - \omega^2 LC); \quad (5)$$

Pasiekus sąlygą, kad

$$\omega^2 LC = 1 \quad (6)$$

arba

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (7)$$

čia –  $C$  - oro ar kabelinės linijos talpis, F;

$\omega$  - kampinis dažnis  $2\pi f$  ( $f = 50$  Hz);

$L$  - kompensacinės ritės induktyvumas, H.

Linijų suminis talpis:

$$C = C_{L-200} + C_{L-300} + C_{L-400} = C_{0,L-200} \cdot l_{L-200} + C_{0,L-300} \cdot l_{L-300} + C_{0,L-400} \cdot l_{L-400} \quad (8)$$

$$C = 4,79 \cdot 10^{-8} \cdot 18 + 4,79 \cdot 10^{-8} \cdot 22 + 4,79 \cdot 10^{-8} \cdot 15 = 2,63 \mu F$$

Toliau apskaičiuoju reikalingą kompensacinės ritės induktyvumą -  $L$ :

$$L = \frac{1}{314^2 \cdot 2,63 \cdot 10^{-6}} = 3,86 \text{ H}$$

Apskaičiuoju kompensacinės ritės reaktyviąją galią -  $Q_L$ :

$$Q = \sqrt{3} \cdot I \cdot U; \quad (9)$$

$$I = \frac{U}{\omega \cdot L}; \quad (10)$$

$$Q_L = \frac{\sqrt{3} \cdot U^2}{\omega \cdot L}; \quad (11)$$

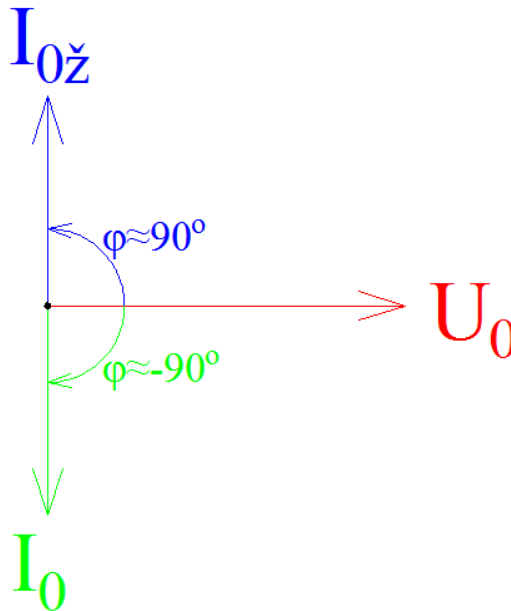
$$Q_L = \frac{\sqrt{3} \cdot 10000^2}{314 \cdot 3,86} = 142,73 \text{ kVar} \quad (12)$$

Gauti duomenis suvedami į įžemėjimo apsaugų modelį su kompensuota neutrale kaip kompensacinės ritės reaktyvioji galia.

### 3. IŽEMĖJIMO APSAUGŲ VEIKIMO PRINCIPAI

Ižemėjimo apsauga stebi nulinės sekos įtampą ir srovę, jų vertes ir fazinius kampus t.y. nulinės sekos įtampos ir srovės vektorius. Atsiradus ižemėjimui tinkle atsiranda įtampų nesimetrija. Taip matomas pats ižemėjimo faktas, tačiau negalima patikimai nustatyti ižemėjusios linijos. Tam, kad būtų galima nustatyti, kurioje linijoje įvyko ižemėjimas, turi būti stebimas kampas tarp nulinės sekos įtampos ir kiekvienos linijos nulinės sekos srovės.

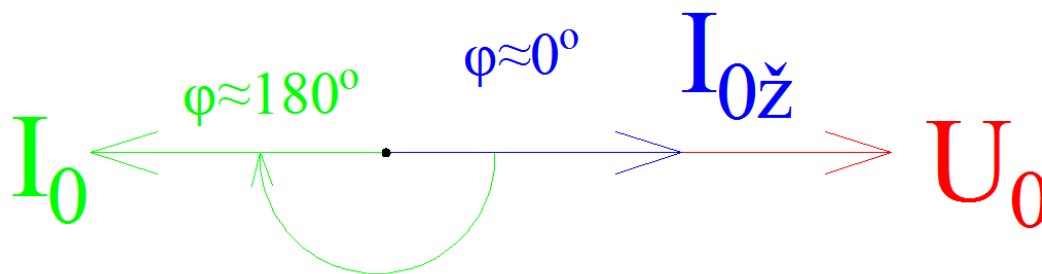
Kadangi ižemėjus linijai srovė neutralės link teka per talpą tarp žemės ir linijos, todėl ši srovė yra talpinio pobūdžio ir jos fazinis kampas lenkia įtampos fazinį kampą  $90^\circ$  (idealiu atveju), kaip parodyta 3.1 pav. Todėl nustačius liniją, kurios nulinės sekos srovės fazinis kampas (matuojamas kiekviename linijiniame narvelyje esančiu nulinės sekos transformatoriumi)  $\sim 90^\circ$  lenkia nulinės sekos įtampos fazinį kampą (matuojama šynose, per atviro trikampio apviją), galima nustatyti, kad būtent ši linija yra ižemėjusi [10].



3.1 pav. Srovės ir įtampos vektoriai izoliuotos neutralės tinke.  $U_0$  – nulinės sekos įtampa;  $I_0$  – sveikos linijos nulinės sekos srovė;  $I_{0z}$  – ižemėjusios linijos nulinės sekos srovė

Esant kompensuotai neutraliai ižemėjimo srovė yra per maža, kad ją galėtų užfiksuoti apsaugos, todėl ižemėjimo srovę reikia dirbtinai padidinti. Tai atliekama lygiagrečiai kompensacinei ritei sumontavus šuntuojantį rezistorių. Kadangi įvykus ižemėjimui pažeistos fazės įtampa krinta, o

sveikų fazių įtampa padidėja, todėl yra stebima tinklo fazinė įtampa ir pastebėjus jos pokytį yra įjungiamas šuntuojantis rezistorius. Jis sumažina rezonanso varžą padidindamas aktyviąją varžos dedamąją. Šitaip jis nepadidina nulinės sekos srovės kampo, tačiau padidina jos modulį (pailgėja vektorius). Tuomet yra stebimas fazinis kampas tarp nulinės sekos įtampos ir srovės kiekvienai linijai. Kadangi kompensacinės ritės induktyvumas kompensuoja tinklo talpą, tai įžemėjimo srovė teka tik per aktyviąją varžą (idealiu atveju), todėl įžemėjusioje linijoje kampas tarp nulinės sekos įtampos ir nulinės sekos srovės bus lygus  $0^\circ$ , kaip parodyta 3.2 pav. Sveikos linijos srovės vektorius visada bus priešingos krypties nei pažeistos linijos [11].



3.2 pav. Srovės ir įtampos vektoriai kompensuotos neutralės tinke.  $U_0$  – nulinės sekos įtampa;  $I_0$  – sveikos linijos nulinės sekos srovė;  $I_{0z}$  – įžemėjusios linijos nulinės sekos srovė

## 4. MODELIO SUDARYMAS

Kadangi Lietuvos skirstomajame tinkle yra taikomi du neutralės įžeminimo būdai – tinklo neutralė gali būti izoliuota arba kompensuota – todėl MATLAB SIMULINK aplinkoje buvo sukurti du modeliai: viename įžemėjimas stebimas izoliuotos neutralės tinkle, o atrame – įžemėjimas stebimas kompensuotos neutralės tinkle. Abiejuose modeliuose naudojami vienodi šaltinio (perdavimo sistemos), galios transformatoriaus, elektros linijų ir apkrovų parametrai.

1. Šaltinio (perdavimo sistemos) parametrai:
  - tinklo vardinė įtampa:  $U_N = 110 \text{ kV}$ ;
  - tinklo vardinis dažnis:  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ;
  - sistemos galia:  $S_N = 100 \text{ MVA}$ .
  
2. Galios transformatoriaus parametrai:
  - vardinė pirminės apvijos įtampa:  $U_{N1} = 110 \text{ kV}$ ;
  - vardinė antrinės apvijos įtampa:  $U_{N2} = 10 \text{ kV}$ ;
  - vardinė transformatoriaus galia:  $S_N = 16 \text{ MVA}$ ;
  - transformatoriaus jungimo grupė: Y/Δ-11.
  
3. Elektros linijų parametrai (pateikti vienam kilometrui linijos ilgio):
  - tiesioginės sekos aktyvioji varža:  $R_1 = 0,45 \Omega/\text{km}$ ;
  - nulinės sekos aktyvioji varža:  $R_0 = 0,74 \Omega/\text{km}$ ;
  - tiesioginės sekos induktyvumas:  $L_1 = 0,934 \text{ mH}/\text{km}$ ;
  - nulinės sekos induktyvumas:  $L_0 = 4,21 \text{ mH}/\text{km}$ ;
  - tiesioginės sekos talpis:  $C_1 = 71,7 \text{ nF}/\text{km}$ ;
  - nulinės sekos talpis:  $C_0 = 47,9 \text{ nF}/\text{km}$ ;
  - L-200 linijos ilgis = 18 km;
  - L-300 linijos ilgis = 22 km;
  - L-400 linijos ilgis = 15 km.
  
4. Apkrovų parametrai (visos apkrovos buvo modeliuojamos vienodų parametru):
  - vardinė įtampa:  $U_N = 10 \text{ kV}$ ;
  - vardinis dažnis:  $f_N = 50 \text{ Hz}$ ;

- aktyvioji apkrovos galia:  $P = 5 \text{ MW}$ ;

5. Avarija (įžemėjimas):

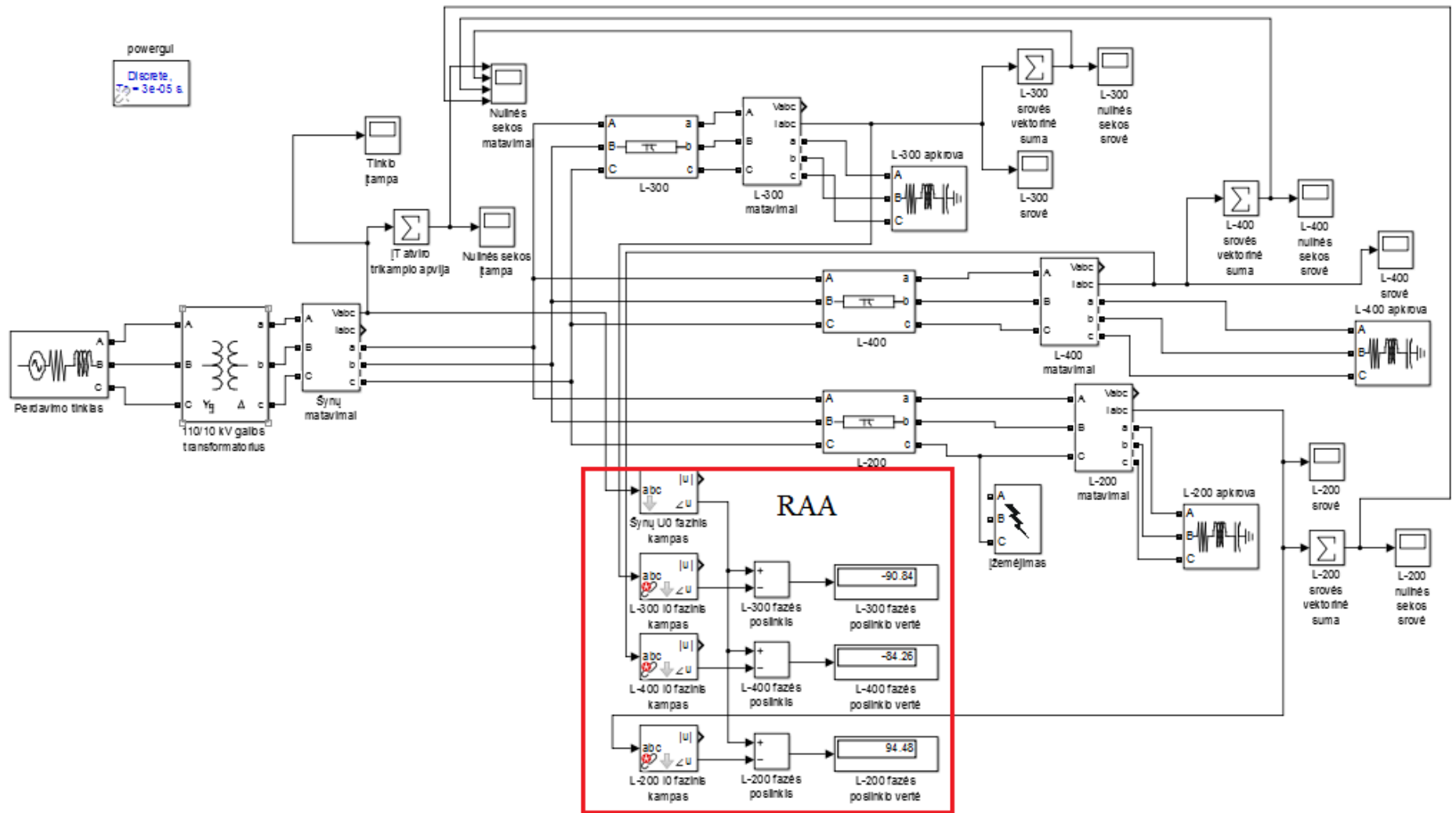
- vienfazis įžemėjimas įvyksta L-200 linijos C fazėje;
- įžemėjimas prasideda po 1/60 s nuo simuliacijos pradžios;
- modeliuojamas beveik „metalinis“ įžemėjimas (fazei susijungus su įžemintu laidininku), todėl įžemėjimo varža  $R_f = 1 \Omega$ .

Šiame modelyje tinklą sudaro 3 elektros linijos. Nors realiame tinkle paprastai linijų būna daugiau, tačiau 3 linijos yra pakankamas kiekis, norint matyti parametų skirtumus tarp sveikų ir įžemėjusių linijų. Taip pat buvo parinkti vienodi parametrai (išskyrus linijų ilgį) norint pašalinti atsitiktinumą galimybę, t.y. išvengti tikimybės, kad parinkus skirtingus parametrus bus gauti atsitiktinai teisingi arba atsitiktinai klaidingi rezultatai.

#### **4.1 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIS IZOLIUOTOS NEUTRALĖS TINKLE**

Izoliuotos neutralės modelyje galios transformatoriaus neutralė nėra elektriškai sujungta su žeme. Įvykus įžemėjimui, pažeistoje fazėje dalis srovės avarijos vietoje nuteka į žemę ir grandinę uždaro per elektros linijos talpą. Įžemėjimo apsaugų modelis, kuomet įžemėjimas vyksta izoliuotos neutralės tinkle yra pavaizduotas 4.1 pav.





4.1 pav. Įžemėjimo apsaugų modelis izoliuotos neutralės tinkle

4.1 pav. parodytą modelį sudaro:

- perdavimo tinklas (sistema), kuris tiekia elektros energiją į skirstomąjį tinklą;
- 110/10 kV galios transformatorius;
- šynų matavimai – tai įtampos transformatorius, kuris yra prijungtas prie 10 kV šynų;
- išeinančios 10 kV elektros linijos L-200, L-300 ir L-400, modeliuojamos kaip „pi“ tipo linijos;
- linijų matavimai, skirti kiekvienos linijos nulinės sekos nustatymui;
- apkrovos kiekvienos linijos gale;
- įžemėjimas, kuris įvyksta linijos L-200 C fazėje;
- relinės apsaugos ir automatikos (RAA) blokas, kuris stebi tinklo nulinės sekos įtampos fazinį kampą, kiekvienos linijos nulinės sekos srovės fazinį kampą ir nustato kampo dydį tarp jų.

RAA blokas stebi kiekvienos linijos nulinės sekos srovę ir lygina ją su nulinės sekos įtampa 10 kV šynose. Šiame modelyje nulinės sekos srovė ir nulinės sekos įtampa yra gaunama vektoriškai sumuojant A, B ir C fazės srovę ar įtampą. Kadangi įžemėjimas nėra avarinis režimas ir RAA išduoda tik indikaciją, tai eksploatuojančiam personalui tam, kad nustatytų įžemėjusią liniją, užtenka matyti, kad kampas tarp nulinės sekos srovės ir nulinės sekos įtampos yra artimas  $90^\circ$ , kai tuo tarpu sveikose linijose šis kampas artimas  $-90^\circ$  (kaip parodyta 3.1 pav.).

#### **4.2 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIS KOMPENSUOTOS NEUTRALĖS TINKLE**

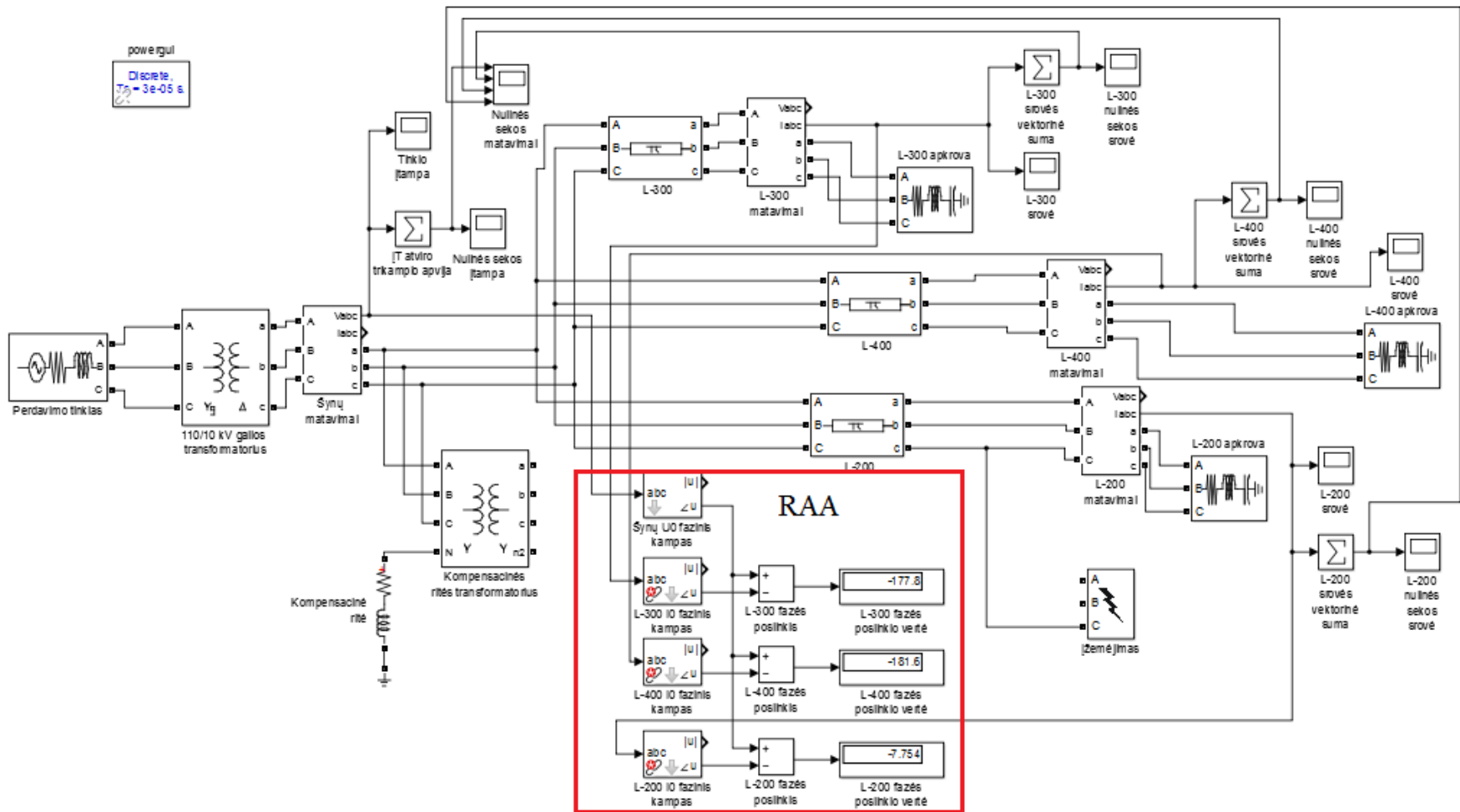
Norint tinklo neutralę įžeminti per kompensacinę ritę, kompensuotos neutralės modelyje buvo panaudotas papildomas kompensacinės ritės transformatorius, kurio pirminė apvija yra sujungta žvaigžde. Jis reikalingas dėl to, nes paprastai Lietuvoje 10 kV skirstomajame tinkle galios transformatorius būna naudojamas su trikampių sujungta antrine apvija, t.y. nėra neutralės taško. Kompensacinės ritės transformatorius būna jungiamas prie šynų, o jo neutralės taškas įžeminamas per kompensacinę ritę. Šio transformatoriaus antrinė apvija gali būti izoliuota arba panaudota transformatorių pastotės savosioms reikmėms maitinti (šiame modelyje savosios reikmės nevertinamos, todėl antrinė apvija nėra prijungta prie apkrovos).

Kompensuotos neutralės tinkle kompensacinė ritė yra skirta kompensuoti viso tinklo talpiui, t.y. visų linijų talpinė varža yra atstojama tokio paties dydžio induktyviają varžą kompensacinėje ritėje, taip gaunamas srovių rezonansas ir talpinės srovės kelias per žemę įgauną labai didelę (artimą

begalinei) varžą. Tam, kad būtų gaunamas rezonansas, kompensacinė ritė turi būti sureguliuojama rezonanso taškui keičiant jos induktyvumą. Modelyje kompensacinės ritės induktyvumas buvo parinktas remiantis 2.4 skyriuje pateikiamais skaičiavimais. Įžemėjimo apsaugų modelis, kuomet įžemėjimas vyksta kompensuotos neutralės tinkle yra pavaizduotas 4.2 pav.

4.2 pav. parodytą modelį sudaro tie patys elementai, kurie yra paminėti 4.1 skyriuje, tačiau papildomai prie 10 kV šynų prijungtas kompensacinės ritės transformatorius, kurio neutralė įžeminta per kompensacinę ritę.

Įvykus įžemėjimui tokios konfigūracijos tinkle, faziniai kampai tarp nulinės sekos srovių ir nulinės sekos įtampos, kuriuos atvaizduoja RAA blokas, rodys kampą artimą  $0^\circ$  įžemėjusiai linijai, ir kampą artimą  $-180^\circ$  esant sveikai linijai.



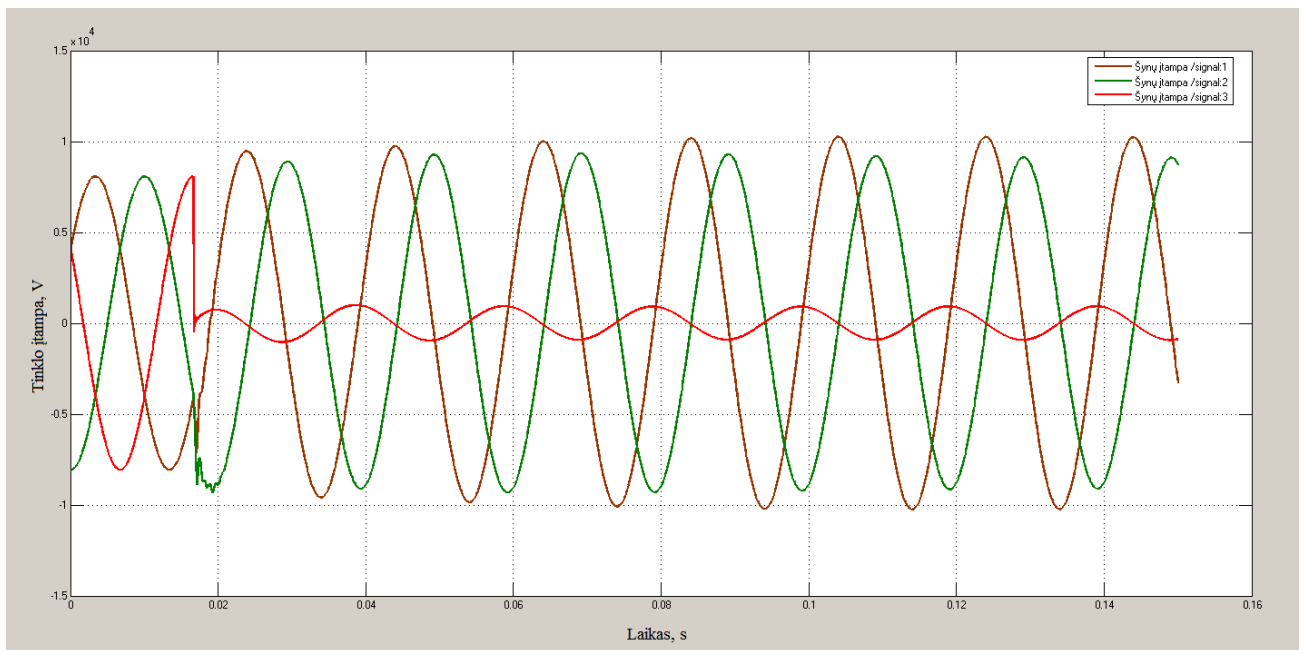
4.2 pav. Įžemėjimo apsaugų modelis kompensuotos neutralės tinkle

## 5. TIRIAMOJO MODELIO REZULTATAI

Atlikus įžemėjimo simuliaciją aukščiau aprašytuose modeliuose buvo matomi pereinamieji vyksmai sveikose ir pažeistose linijose. Buvo stebima kaip keičiasi įtampa tinkle įvykus įžemėjimui, stebima nulinės sekos įtampa ir nulinės sekos srovės sveikose linijose, lyginamos su šiais parametrais pažeistoje linijoje. Pagrindinis šio tyrimo tikslas buvo pamatyti, kaip keičiasi fazinis kampas tarp nulinės sekos įtampos ir nulinės sekos srovės kai įvyksta įžemėjimas, kadangi fazės poslinkis yra pagrindinis avarijos rodmuo, kurį fiksuoja įžemėjimo apsaugos.

### 5.1 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIO IZOLIUOTOS NEUTRALĖS TINKLE REZULTATAI

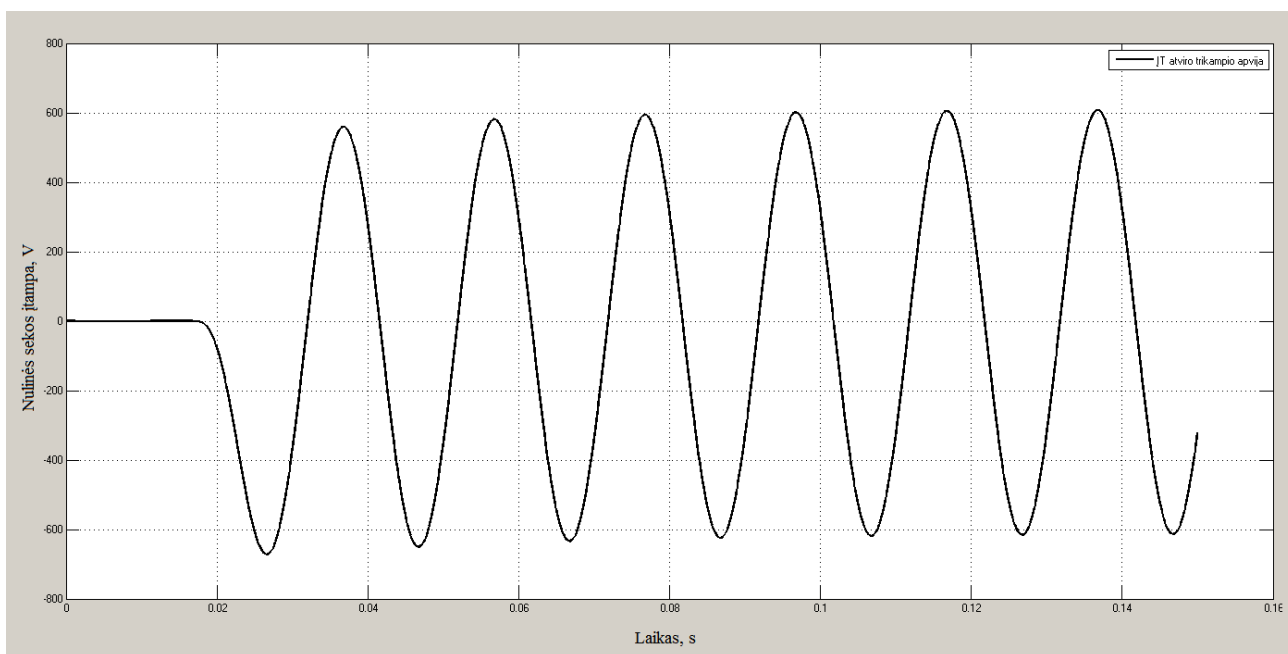
Atlikus modelio, pavaizduoto 4.1 pav., simuliaciją, buvo gautos tinklo parametrų (tiesioginės sekos įtampos, nulinės sekos įtampos, nulinės sekos srovės) charakteristikos bėgant laikui. Gautose charakteristikose matoma kaip tinklas reaguoja į atsiradusį įžemėjimą linijos L-200 C fazėje, t.y. stebimas pereinamasis vyksmas.



5.1 pav. Fazinė įtampa 10 kV šynose, izoliuotos neutralės tinkle

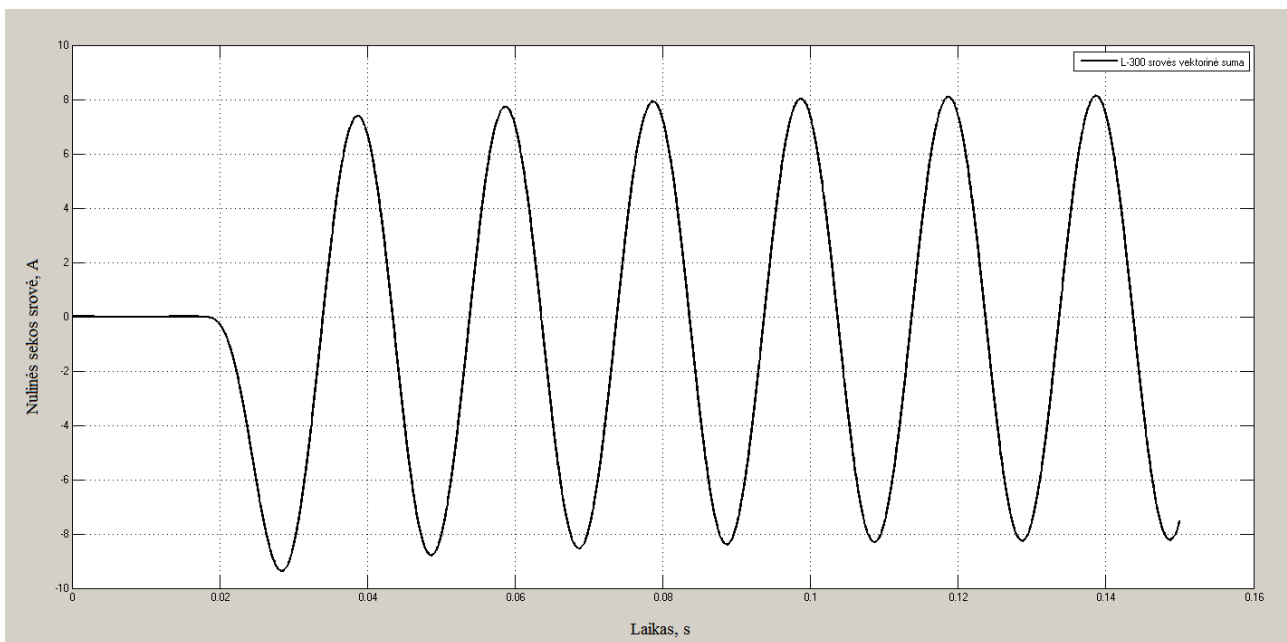
5.1 pav. yra pavaizduota tinklo fazinė įtampa ir kaip ji pasikeičia įvykus įžemėjimui 17 ms po simuliacijos pradžios. Vyksta pereinamasis vyksmas, kurio metu atsiranda aukštesnių eilių harmonikos, tačiau pereinamasis vyksmas per 3 ms užgesta. Tinklo įtampai nusistovėjus matoma,

kad įtampa sveikose fazėse padidėjo, o pažeistos fazės įtampa ženkliai krito. Kadangi įžemėjimo varža buvo nelygi 0, todėl įžemėjusioje fazėje įtampa taip pat nėra lygi 0.



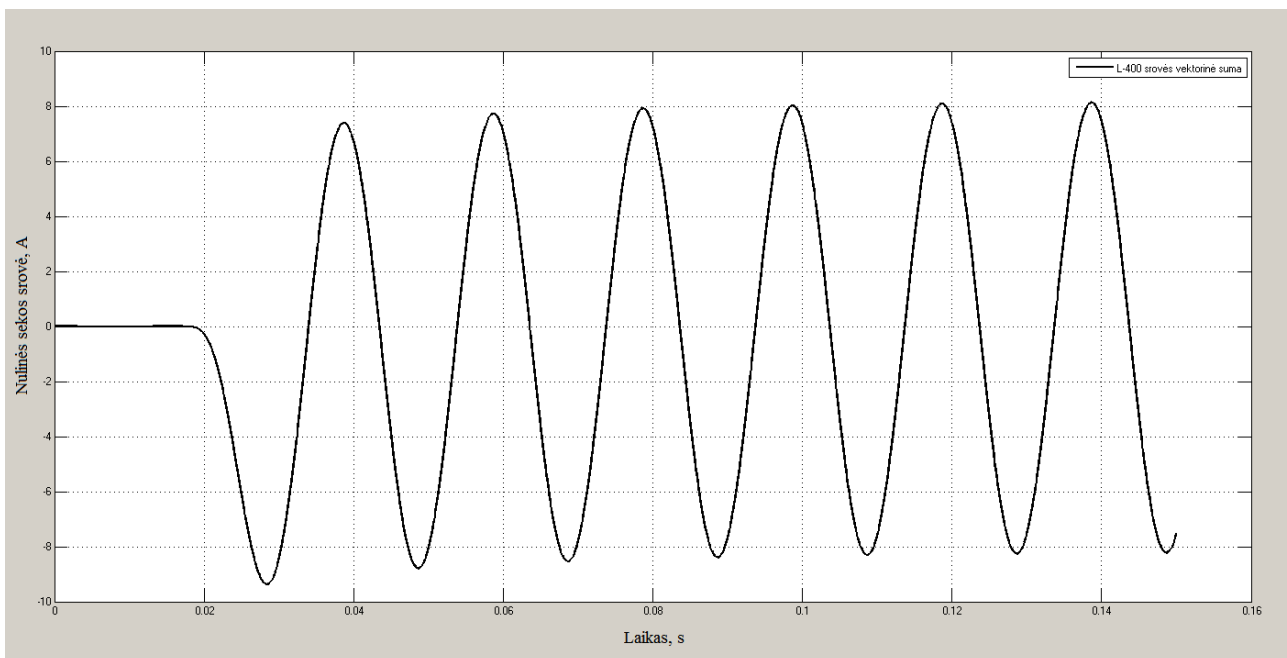
5.2 pav. Nulinės sekos įtampa 10 kV šynose, izoliuotos neutralės tinkle

5.2 pav. matoma nulinės sekos įtampa, kuri matuojama 10 kV šynose įtampos transformatoriaus atviro trikampio apvija. Prieš įvykstant įžemėjimui nulinės sekos įtampa yra lygi 0, kadangi visose fazėse įtampa yra vienoda, t.y. jų vektorinė suma yra lygi 0. Įvykus įžemėjimui tinkle atsiranda įtampų nesimetrija, kadangi C fazės įtampa krinta, o A ir B fazėse ji išauga. Dėl šios priežasties atsiranda nulinės sekos įtampa, kuri indikuoja apie atsiradusį įžemėjimą tinkle. Kaip matoma 5.2 pav. jos amplitudinė vertė yra 612 V, o efektinė vertė – 433 V.



5.3 pav. Linijos L-300 nulinės sekos srovė izoliuotos neutralės tinkle

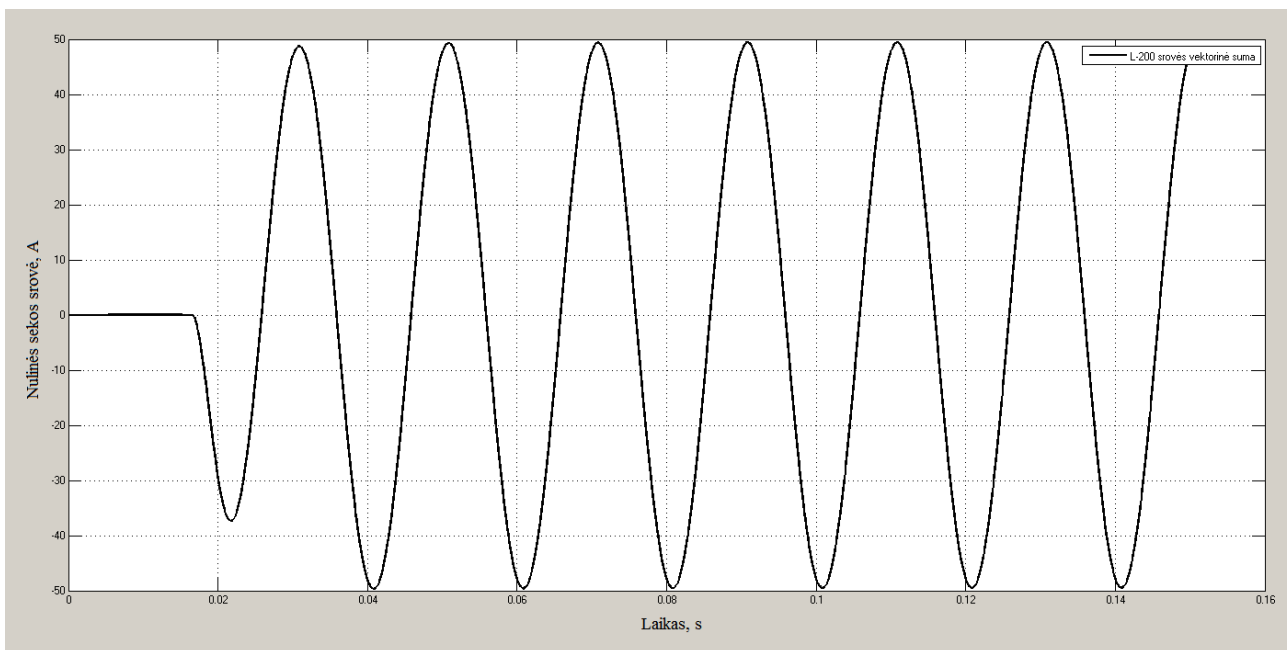
5.3 pav. matoma sveikos (neįžemėjusios) linijos L-300 nulinės sekos srovė, kurios amplitudinė vertė yra 8,1 A, o efektinė vertė – 5,7 A. Atsiradus įžemėjimui tinkle atsiranda įtampų nesimetrija, todėl nulinės sekos srovė ima tekėti visomis linijomis, pažeistomis ir sveikomis. Anksčiau, prieš atsirandant kryptinėms įžemėjimo apsaugoms, buvo stebimas nulinės sekos srovės modulis, lyginama kurioje linijoje teka didžiausia nulinės sekos srovė. Tačiau esant dideliame tinklui, kur kiekviena linija turi po keletą atšakų, taip pat dalis linijų yra kabelinės, o dalis orinės, toks avarijos įvertimas yra netinkamas, kadangi srovės modulis nėra pakankamas įvertinimas norint nustatyti įžemėjusią liniją.



5.4 pav. Linijos L-400 nulinės sekos srovė izoliuotos neutralės tinkle

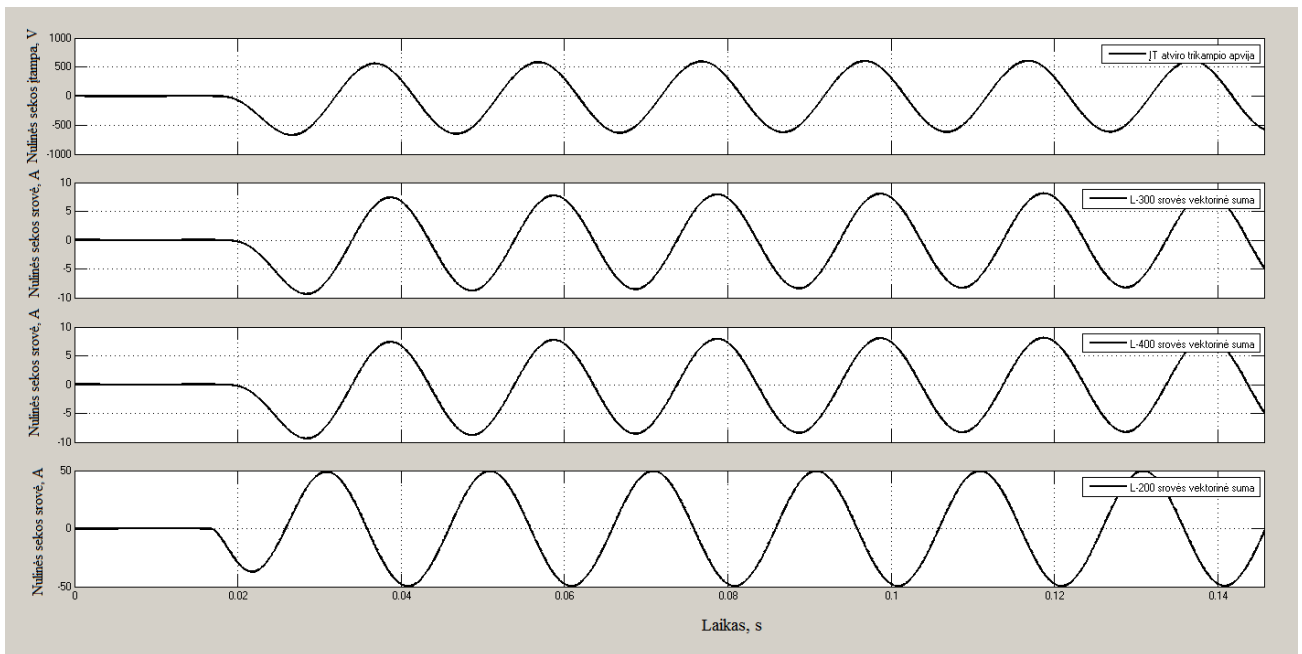
5.4 pav. matoma sveikos (neįžemėjusios) linijos L-400 nulinės sekos srovė įvykus įžemėjimui tinkle, kurios amplitudinė vertė yra 8,1 A, o efektinė vertė – 5,7 A. Kadangi apkrovos ir linijų parametrai yra vienodi (išskyrus linijos ilgį), nulinės sekos srovė yra tokia pati kaip ir linijos L-300 (5.3 pav.). Tiek L-300, tiek L-400 nulinės sekos srovės vektorius  $90^\circ$  atsilieka nuo nulinės sekos įtampos vektoriaus, kadangi elektros linijos induktyvioji varžos dedamoji yra didesnė už talpinę.





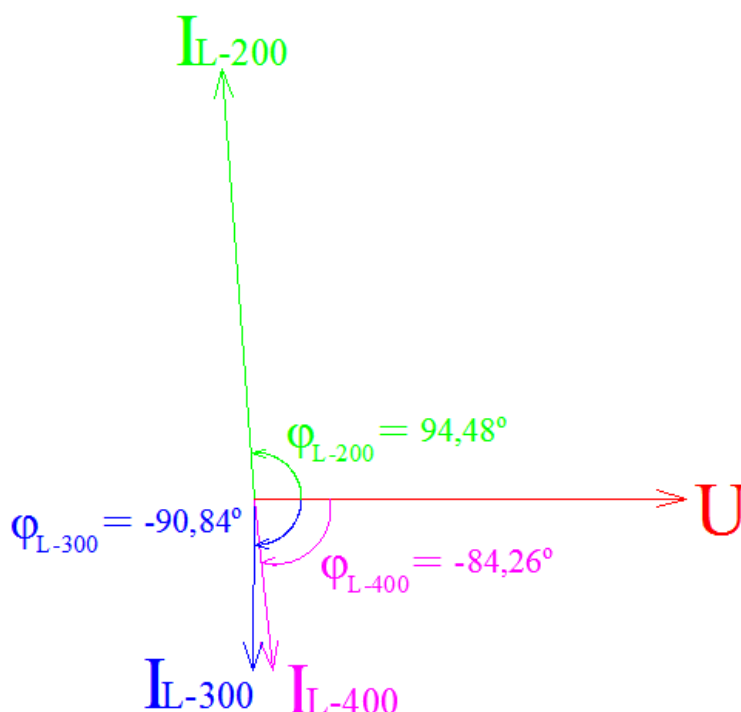
5.5 pav. Linijos L-200 nulinės sekos srovė izoliuotos neutralės tinkle

5.5 pav. matoma pažeistos (įžemėjusios) linijos L-200 nulinės sekos srovė, kurios amplitudinė vertė yra 50 A, o efektinė vertė – 35,4 A. Lyginant su sveikų linijų nulinės sekos srovėmis, pažeistos linijos srovė yra ~6 kartus didesnė, nors linijos apkrova buvo modeliuojama vienoda. Pažeistoje linijoje tekant tokiai didelei nulinės sekos (įžemėjimo) srovei gali užsidegti elektros lankas ir vienfazis įžemėjimas gali tapti dvifaziu įžemėjimu taip dar labiau pablogindamas perduodamos elektros energijos kokybę.



5.6 pav. Izoliuotos neutralės tinklo nulinės sekos srovių ir įtampos palyginimas

5.6 pav. pateikta tinklo nulinės sekos įtampa ir kiekvienos linijos nulinės sekos srovė. Iš šio paveikslo galima matyti, kad sveikose linijose (L-300 ir L-400) srovės vektorius nuo įtampos vektoriaus atsilieka  $\sim 90^\circ$ , kadangi linijoje dominuoja induktyvioji varža. Tuo tarpu įžemėjusioje linijoje (L-200) dominuoja talpinė varža, nes įžemėjimo srovė teka per talpą tarp linijos ir žemės, todėl jos nulinės sekos srovės vektorius įtampos vektorių lenkia  $\sim 90^\circ$ .



5.7 pav. Izoliuotos neutralės tinklo nulinės sekos parametrų vektorinė diagrama

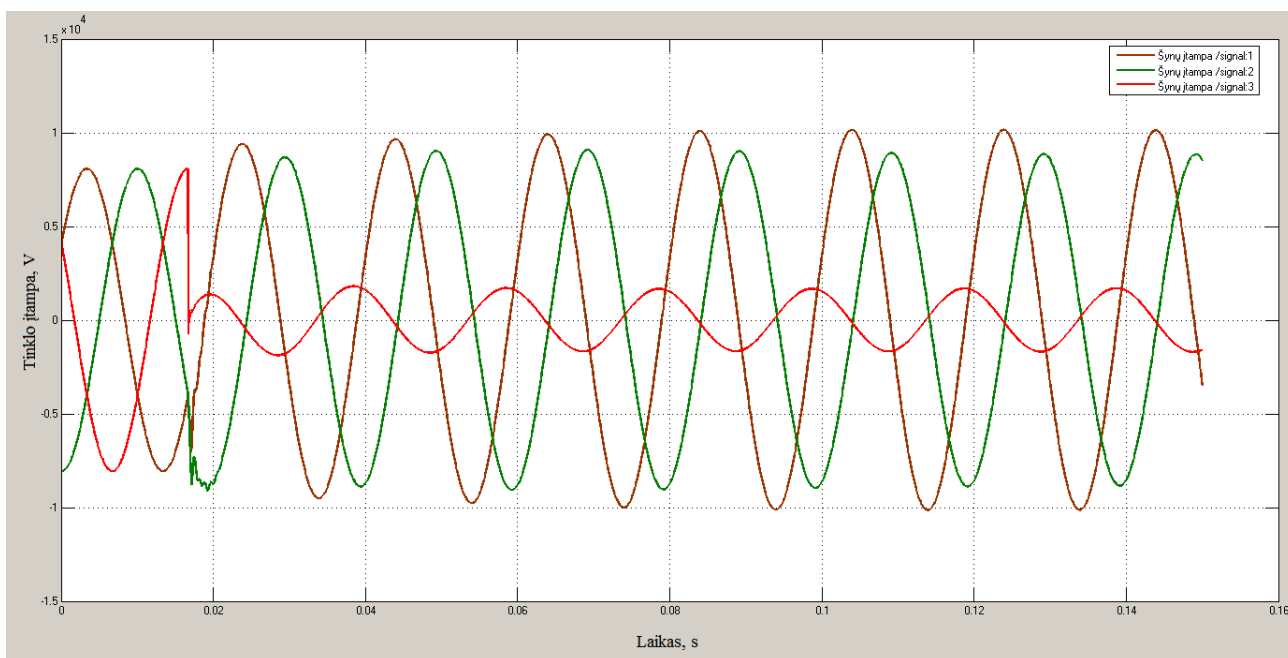
5.7 pav. yra pavaizduoti nulinės sekos parametrų vektoriai, kuriuos stebi RAA blokas.  $I_{L-200}$ ,  $I_{L-300}$ ,  $I_{L-400}$  yra atitinkamų linijų nulinės sekos srovių vektoriai,  $U$  yra tinklo nulinės sekos įtampos vektorius.  $\varphi_{L-200}$ ,  $\varphi_{L-300}$ ,  $\varphi_{L-400}$  yra kampai tarp nulinės sekos srovių vektorių ir nulinės sekos įtampos vektoriaus.

Matome, kad linijos L-300 srovės vektorius  $I_{L-300}$  nuo įtampos vektoriaus  $U$  atsilieka  $90,84^\circ$ . Tai atitinka teorinį kampą parodytą 3.1 pav. Tuo tarpu kampas tarp linijos L-400 srovės vektorius  $I_{L-400}$  nuo įtampos vektoriaus  $U$  atsilieka mažiau –  $84,26^\circ$ . Tokį nedidelį atsiradusį kampų skirtumą tarp dviejų sveikų linijų lemia jų ilgių skirtumas, todėl nors rezultatai yra artimi teoriniams, jie priklauso ir nuo linijų parametrų. Pažeistos linijos L-200 srovės vektorius  $I_{L-200}$  įtampos vektorių lenkia  $94,48^\circ$ . Šis rezultatas taip pat artimai atitinka teoriškai numatytus rezultatus (3.1 pav.).

## 5.2 IŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIO KOMPENSUOTOS NEUTRALĖS TINKLE REZULTATAI

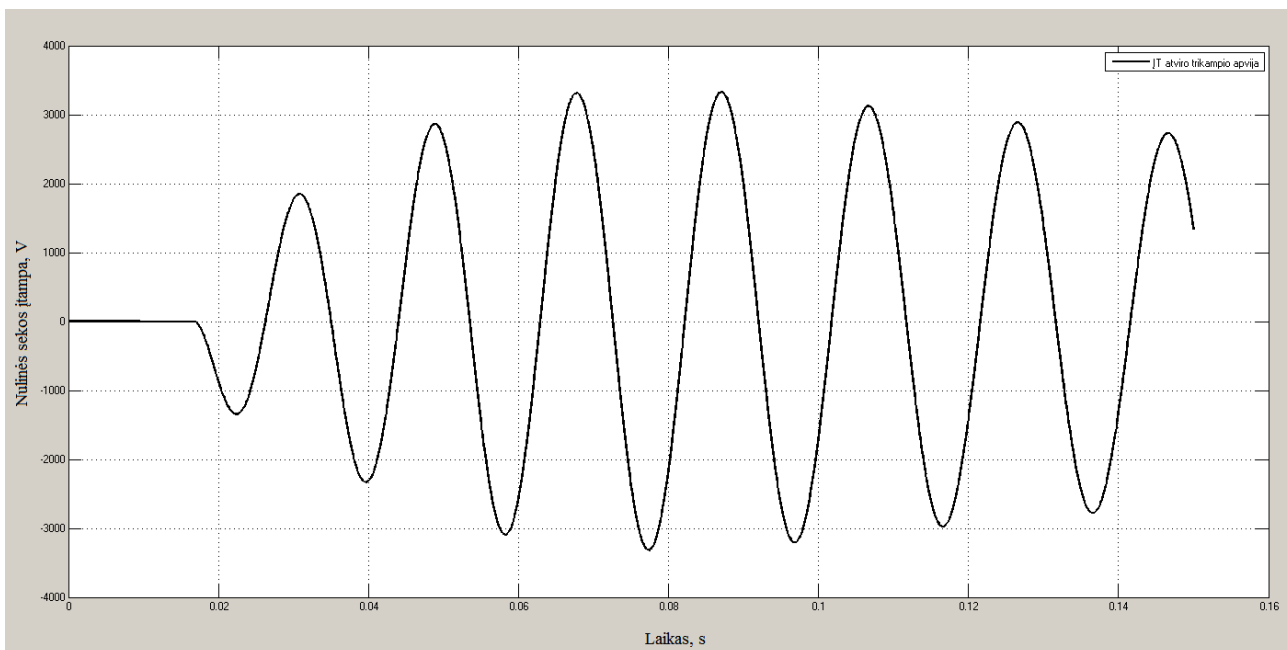
Atlikus modelio, pavaizduoto 4.2 pav., simuliaciją, buvo gautos tinklo parametrų (tiesioginės sekos įtampos, nulinės sekos įtampos, nulinės sekos srovės) charakteristikos kintant laikui. Gautose

charakteristikose matoma kaip tinklas reaguoja į atsiradusį įžemėjimą linijos L-200 C fazėje, t.y. stebimas pereinamasis vyksmas.



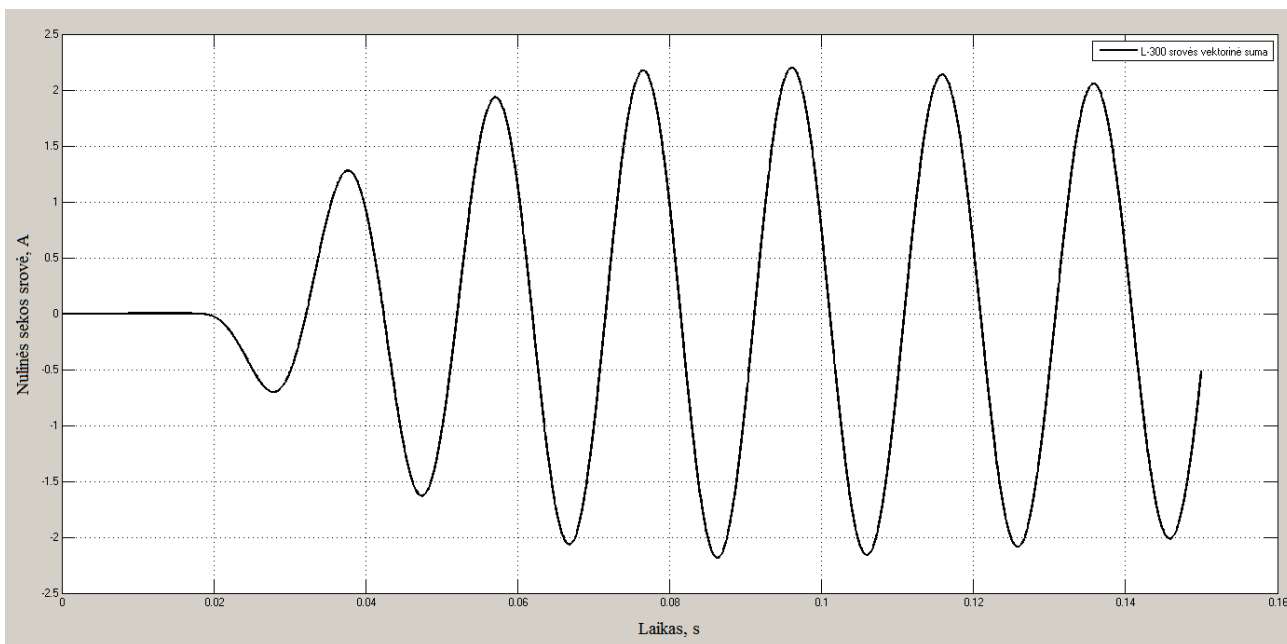
5.8 pav. Fazinė įtampa 10 kV šynose, kompensuotos neutralės tinkle

5.8 pav. yra pavaizduota tinklo fazinė įtampa. Kaip ir 5.1 pav., stebimas toks pats įžemėjimo sukeltas pereinamasis vyksmas. Matoma, kad nepriklausomai nuo to, ar neutralė yra izoliuota, ar įžeminta, pažeistos įtampos fazė krinta tiek pat, ir tai priklauso nuo avarijos varžos.

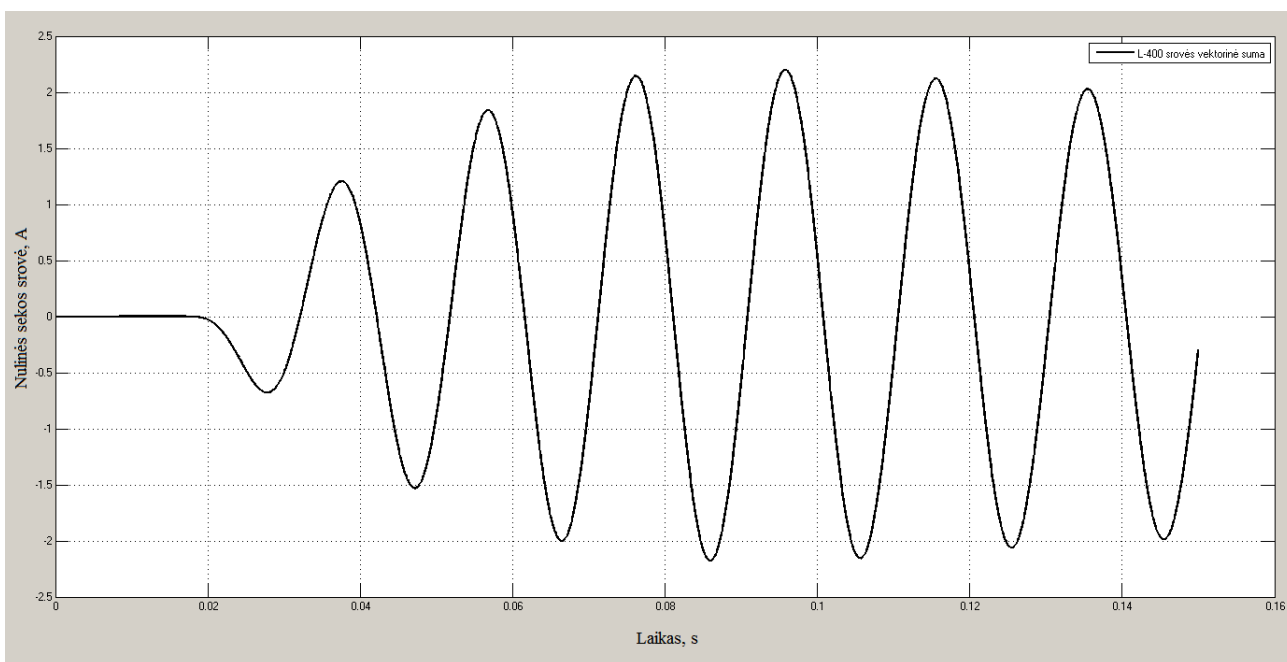


5.9 pav. Nulinės sekos įtampa 10 kV šynose, kompensuotos neutralės tinkle

5.9 pav. pavaizduota nulinės sekos įtampa po įžemėjimo kompensuotos neutralės tinkle. Jos amplitudinė vertė yra 3276 V, o efektinė vertė – 2323 V. Matoma, kad įtampa yra didesnė nei esant izoliuotai neutralėi. Taip yra dėl papildomos induktyviosios varžos. Taip matoma, kad nulinės sekos įtampa nėra pastovi dėl ilgiau trunkančio pereinamojo vyksmo, kurio priežastis yra įžemėjimo grandinėje atsiradusi papildoma induktyvioji varža (kompensacinė ritė).



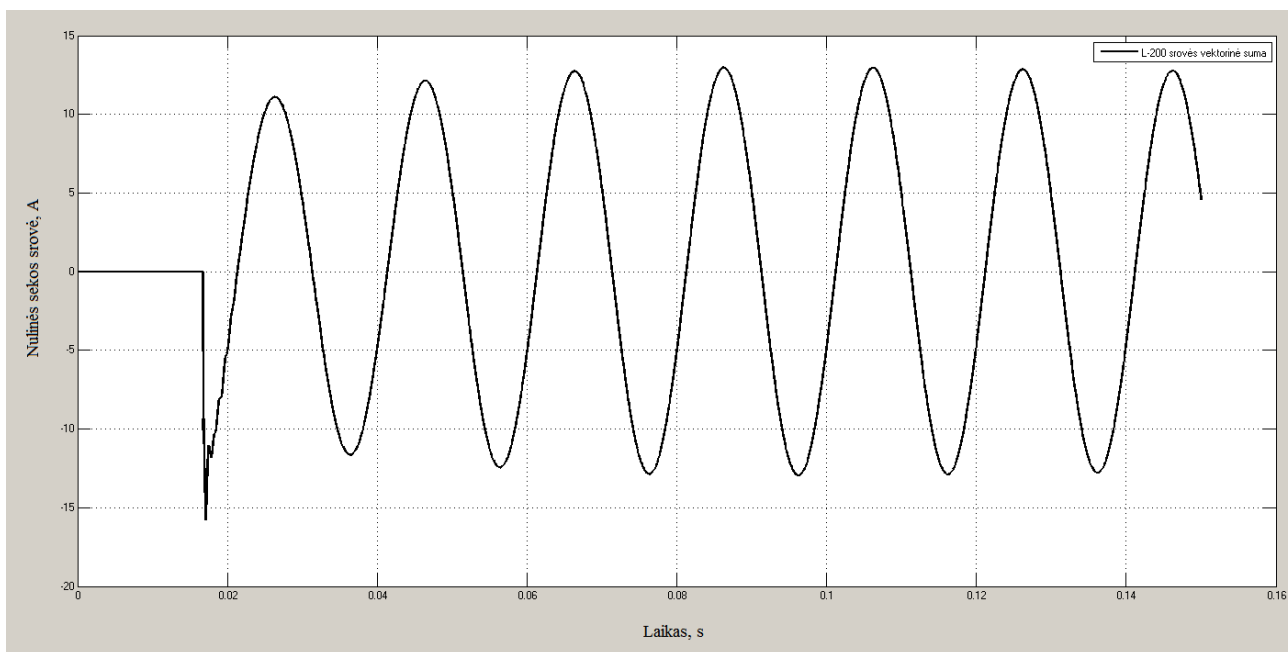
5.10 pav. Linijos L-300 nulinės sekos srovė kompensuotos neutralės tinkle



5.11 pav. Linijos L-400 nulinės sekos srovė kompensuotos neutralės tinkle

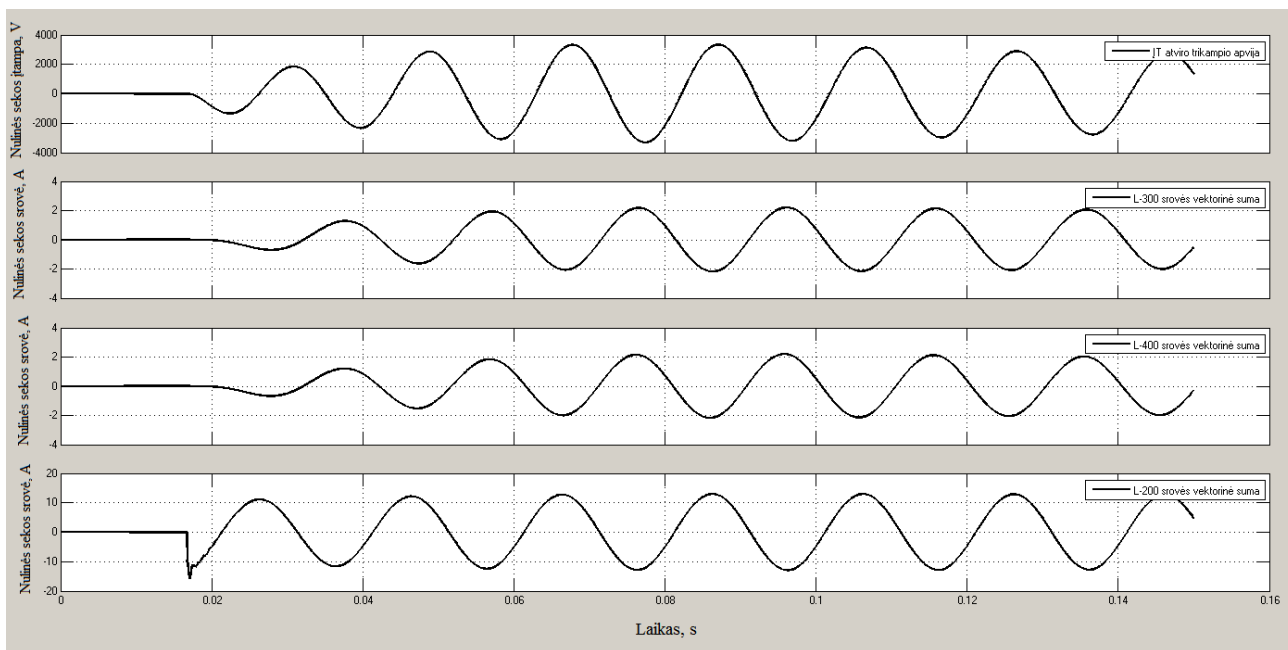
5.10 pav. ir 5.11 pav. matoma sveikų (neįžemėjusių) linijų L-300 ir L-400 nulinės sekos srovės. Jų dydžiai yra vienodi – jų amplitudinės vertės lygios 2,2 A, o efektinės – 1,56 A. Matoma, kad atsiradus įžemėjimui pirmiausia vyksta pereinamasis vyksmas, todėl pirmaisiais periodais srovė yra dar nenusistovėjusi. Lyginant su izoliuotos neutralės tinklu, sveikose linijose nulinės sekos

srovės yra kur kas mažesnės (izoliuotos neutralės tinkle jos amplitudinė reikšmė yra 8,1 A, o kompensuotos neutralės tinkle – 2,2 A). Taip pat lyginant su izoliuotos neutralės tinklu (žr. 5.3 pav.), kur nulinės sekos srovės fazinis kampas yra pasuktas  $-90^\circ$ , kompensuotos neutralės tinkle nulinės sekos srovės vektorius yra pasuktas  $-180^\circ$  nuo įtampos vektoriaus.



5.12 pav. Linijos L-200 nulinės sekos srovė kompensuotos neutralės tinkle

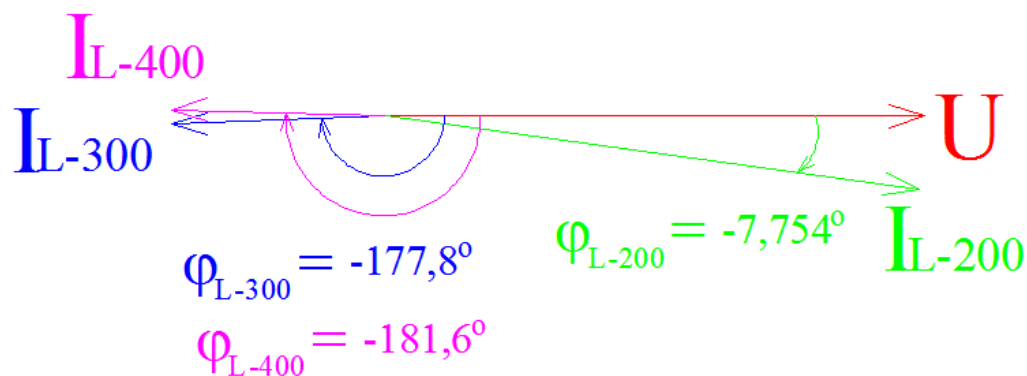
5.12 pav. matoma pažeistos (įžemėjusios) linijos L-200 nulinės sekos srovė, kurios amplitudinė vertė yra 13,6 A, o efektinė – 9,62 A. Matoma, kad kaip ir izoliuotos neutralės tinkle, esant vienodams linijų parametrams pažeistoje linijoje gaunama daug didesnė nulinės sekos srovė nei sveikose linijose. Taip pat lyginant su izoliuotos neutralės tinklu, kur pažeistos linijos nulinės sekos srovės vektorius įtampos vektorių lenkia  $90^\circ$ , kompensuotos neutralės tinkle vektorių kryptys sutampa, t.y. tinklo talpis yra kompensuojamas induktyvumu, todėl fazės kampas įvykus įžemėjimui nepasisuka.



5.13 pav. Kompensuotos neutralės tinklo nulinės sekos srovių ir įtampos palyginimas

5.13 pav. pateikta tinklo nulinės sekos įtampa ir kiekvienos linijos nulinės sekos srovės. Sveikų linijų (L-300 ir L-400) nulinės sekos srovių faziniai kampai nuo įtampos fazinio kampo atsilieka  $\sim 180^\circ$ , kadangi nepažeistose linijose varžos pobūdis yra induktyvinis. Nors įžemėjusioje linijoje (L-200) dominuoja talpinė varža, nes įžemėjimo srovė teka per talpą tarp linijos ir žemės, bet jis yra kompensuojamas kompensacinės ritės, todėl lieka tik aktyvioji įžemėjimo varžos dedamoji ir kampas tarp nulinės sekos įtampos ir nulinės sekos srovės vektorių yra artimas  $\sim 0^\circ$ , t.y. vektorių kampai sutampa.





5.14 pav. Kompensuotos neutralės tinklo nulinės sekos parametrų vektorinė diagrama

5.14 pav. yra pavaizduoti nulinės sekos parametrų vektoriai, kuriuos stebi RAA blokas modelyje, parodytame 4.2 pav. Vektoriai  $I_{L-200}$ ,  $I_{L-300}$ ,  $I_{L-400}$  yra atitinkamų linijų nulinės sekos srovių vektoriai,  $U$  yra tinklo nulinės sekos įtampos vektorius.  $\varphi_{L-200}$ ,  $\varphi_{L-300}$ ,  $\varphi_{L-400}$  yra kampai tarp nulinės sekos srovių vektorių ir nulinės sekos įtampos vektorių.

Matome, kad linijos L-300 srovės vektorius  $I_{L-300}$  nuo įtampos vektoriaus  $U$  atsilieka  $177,8^\circ$ . Tai atitinka anksčiau prognozuotus rezultatus, parodytus 3.2 pav. Kampas tarp linijos L-400 srovės vektoriaus  $I_{L-400}$  ir įtampos vektoriaus  $U$  buvo gautas lygus  $-181,6^\circ$ .

Pažeistoje linijoje, kurioje yra įžemėjusi C fazė, L-200 srovės vektorius  $I_{L-200}$  gaunamas šiek tiek atsilieikantis nuo nulinės sekos įtampos vektoriaus  $U$ , ir kampas tarp jų yra lygus  $-7,754^\circ$ . Nors teoriškai (remiantis 4.2 pav. pateiktais duomenimis) šis kampas turėtų būti lygus  $0^\circ$ , tačiau tinklas yra šiek tiek perkompensuotas, gaunamas didesnis induktyvumas nei reikalingas srovių rezonansui pasiekti. Toks kompensacinės ritės darbo režimas yra galimas ir eksploatuojant elektros sistemą netgi taikytinas, kadangi jis leidžia apsaugoms jautriau reaguoti į atsiradusį įžemėjimą.

### 5.3 ĮŽEMĖJIMO APSAUGŲ MODELIŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS

Rezultatų palyginimui visi gauti modeliavimo duomenys surašomi į 5.1 lentelę. Įtampos ir nulinės sekos srovių reikšmės pateikiamos efektinėmis vertėmis.

5.1 lentelė. Modelių rezultatų palyginimas

Parametras	Žymėjimas	Izoliuotos neutralės tinklas	Kompensuotos neutralės tinklas
Nulinės sekos įtampa	$U$	433 V	2323 V
Linijos L-200 nulinės sekos srovė	$I_{L-200}$	35,4 A	9,62 A
Linijos L-200 nulinės sekos srovės fazinis kampas	$\varphi_{L-200}$	94,48°	-7,754°
Linijos L-300 nulinės sekos srovė	$I_{L-300}$	5,7 A	1,56 A
Linijos L-300 nulinės sekos srovės fazinis kampas	$\varphi_{L-300}$	-90,84°	-177,8°
Linijos L-400 nulinės sekos srovė	$I_{L-400}$	5,7 A	1,56 A
Linijos L-400 nulinės sekos srovės fazinis kampas	$\varphi_{L-400}$	-84,26°	-181,6°

## IŠVADOS

1. Aprašytas skirstomojo tinklo su izoliuota neutrale funkcionavimas įvykus įžemėjimui linijoje. Išnagrinėjus informacijos šaltinius nustatyta, kad nors tokia tinklo konfigūracija leidžia tinklui dirbti įvykus įžemėjimui, tačiau jo funkcionavimas yra ribotas. Taip pat didesnio talpio tinkle yra pavojus degti elektros lankui, kuris gali sukelti didesnę avariją ir pažeisti elektrotechnikos įrenginius. Nustatyta, kad elektros lankas savaime gali užgesti tekant ne didesnei nei 2,5 A įžemėjimo srovei, kai tuo tarpu kompensuotos neutralės tinkle ši srovė gali siekti 18 A.
2. Aprašytas skirstomojo tinklo su kompensuota neutrale funkcionavimas įvykus įžemėjimui linijoje. Remiantis informaciniais šaltiniais, tokia tinklo konfigūracija leidžia tinklui saugiai funkcionuoti ir po įžemėjimo. Apžvelgtos priemonės, kurios reikalingos tinklo sukompensavimui: kompensacinės ritės transformatorius ir kompensacinė ritė. Apskaičiuota, kad tinklui, pavaizduotam 4.2 pav., rezonansinis taškas gaunamas, kai  $Q_L = 142,73 \text{ kVar}$ .
3. Aptarti įžemėjimo apsaugų veikimo principai ir parametrų reikšmės, signalizuojančios apie įžemėjimą linijoje. Nustatyta, kad izoliuotos neutralės tinkle kampas tarp nulinės sekos srovės ir įtampos vektoriaus sveikoms linijoms yra artimas  $-90^\circ$ , o pažeistoms linijoms  $90^\circ$ . Kompensuotos neutralės tinkle šie dydžiai atitinkamai yra  $-180^\circ$  sveikoms linijoms ir  $0^\circ$  pažeistoms linijoms (žr. 3.1 pav. ir 3.2 pav.).
4. Buvo sudaryti įžemėjimo apsaugų modeliai izoliuotos ir kompensuotos neutralės tinklams MATLAB SIMULINK aplinkoje. Abu modeliai turėjo vienodus maitinimo šaltinio, elektros linijų ir apkrovų parametrus, tačiau viename modelyje (žr. 4.1 pav.) tinklo neutralė yra izoliuota, o kitame (žr. 4.2 pav.) – kompensuota, t.y. įžeminta per kompensacinę ritę, kuri maitinama iš atskiro 10 kV kompensacinės ritės transformatoriaus.
5. Atlikus modelių simuliaciją buvo gauti pereinamojo vyksmo rezultatai. Nors tinklo elementų konfigūracija buvo vienoda, tačiau gauti skirtingi rezultatai, kurie priklauso nuo neutralės įžeminimo būdo. Izoliuotos neutralės tinkle buvo gautos didesnės nulinės sekos srovės (sveikos linijos srovė – 5,7 A, įžemėjusios – 35,4 A) lyginant su kompensuotos neutralės tinklu (sveikos linijos srovė – 1,56 A, įžemėjusios – 9,62 A). Taip pat gauti skirtingi nulinės sekos srovių faziniai kampai, pagal kuriuos suveikia apsaugos. Izoliuotos neutralės tinkle šis kampas sveikose linijose yra artimas  $-90^\circ$ , o įžemėjusioje apie  $90^\circ$ . Kompensuotos neutralės tinkle sveikoje linijoje apie  $-180^\circ$ , o pažeistoje  $\sim 0^\circ$ . Tikslūs duomenys pateikti 5.1 lentelėje.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Elektros įrenginių įrengimo bendrosios taisyklės [žiūrėta 2016-03-03]. Prieiga per internetą:  
<https://www.e-tar.lt/portal/legalAct.html?documentId=TAR.6AF8895BD875>
2. ROBERTS, Jeff. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems [žiūrėta 2016-03-18]. Prieiga per internetą:  
<https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6123.pdf?v=20151125-104914>
3. PILLAI, P. Grounding and ground fault protection of multiple generator installations on medium-voltage industrial and commercial power systems II. Grounding methods [žiūrėta 2016-03-12]. Prieiga per internetą:  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1216901&newsearch=true&queryText=Grounding%20and%20ground%20fault%20protection%20of%20multiple%20generator%20installations%20on%20medium-voltage%20industrial%20and%20commercial%20power%20systems>
4. Distribution Automation Handbook. Section 8.6 MV Feeder Earth-fault Protection [žiūrėta 2016-04-12]. Prieiga per internetą:  
[https://library.e.abb.com/public/948f3fb78a335cb6c125795f0042ef8b/DAHandbook\\_Section\\_08p06\\_Feeder\\_EF\\_Protection\\_757287\\_ENa.pdf](https://library.e.abb.com/public/948f3fb78a335cb6c125795f0042ef8b/DAHandbook_Section_08p06_Feeder_EF_Protection_757287_ENa.pdf)
5. Power system with resonance earthing (Petersen-coil) [interaktyvus], [žiūrėta 2016-04-06]. Prieiga per internetą:  
<http://www.globalspec.com/reference/26011/203279/5-5-power-system-with-resonance-earthing-petersen-coil>
6. Petersen Coils – Basic Principle and Application [žiūrėta 2016-05-01]. Prieiga per internetą:  
<http://www.hvpower.co.nz/TechnicalLibrary/RE+DS/Petersen%20Coils%20%20Basic%20Principle%20and%20Application.pdf>
7. Petersen Coils - Principle and Application [žiūrėta 2016-05-01]. Prieiga per internetą:  
<http://www.electrotechnik.net/2009/02/petersen-coils-principle-and.html>
8. Arc Suppression Coils [žiūrėta 2016-05-03]. Prieiga per internetą:  
[http://www.trenchgroup.com/content/download/1470/13364/file/E670\\_Arc%20Suppression%20Coils.pdf](http://www.trenchgroup.com/content/download/1470/13364/file/E670_Arc%20Suppression%20Coils.pdf)

9. Petersen coil [žiūrėta 2016-04-28]. Prieiga per internetą:  
[http://www.swewe.net/word\\_show.htm/?321940\\_1&Petersen\\_coil](http://www.swewe.net/word_show.htm/?321940_1&Petersen_coil)
10. HESKITT, Adam. Ground Fault Protection for an Ungrounded System [žiūrėta 2016-04-10].  
Prieiga per internetą:  
[http://www.ece.mtu.edu/faculty/bamork/EE5223/EE5223TermProj\\_Ex3.pdf](http://www.ece.mtu.edu/faculty/bamork/EE5223/EE5223TermProj_Ex3.pdf)
11. Power System Protection Ground faults in Ground faults in resonance resonance grounded systems [žiūrėta 2016-04-11]. Prieiga per internetą:  
<http://www.ece.mtu.edu/faculty/bamork/EE5223/Ground%20Fault%20Protection%20resonance%20neutral.pdf>