



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Karolis Misius

**VIRŠITAMPIŲ PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS
SKIRSTOMUOSIUOSE TINKLUOSE SU PER VARŽĄ
IŽEMINTA NEUTRALE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Saulius Gudžius

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

VIRŠITAMPIŲ PEREINAMŲJŲ VYKSMŲ TYRIMAS
SKIRSTOMUOSIUOSE TINKLUOSE SU PER VARŽĄ
ĮŽEMINTA NEUTRALE

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (621H63005)

Vadovas
Prof. dr. Saulius Gudžius

Recenzentas

Projektą atliko
Karolis Misius

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

KAROLIS MISIUS

(Studento vardas, pavardė)

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMOS 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas skirstomuosiuose tinkluose su
per varžą įžeminta neutrale”

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 26 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Karolio Misiaus** baigiamasis projektas tema „Viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas skirstomuosiuose tinkluose su per varžą įžeminta neutrale“ 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.

(vardas, pavardė)

(parašas)

Misius, Karolis. Viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas skirstomuosiuose tinkluose su per varžą įžeminta neutrале. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros energetikos sistemos, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *izoliuota, įžeminta per varžą, transformatoriaus neutralė, pažaida, viršįtampis.*

Kaunas, 2017. 50 psl.

SANTRAUKA

Projektas – baigiamasis magistro darbas. Projekto tikslas – sumodeliuoti Juodkrantės transformatorių pastotės darbą, 35 kV skirstomajame tinkle dviem režimais: su izoliuota neutrале ir įžeminus per varžą. Nustatyti kokią įtaką viršįtampių pereinamiesiems vyksmams turi neutralės įžeminimas per varžą. Teorinėje dalyje išanalizuoti skirtingų transformatoriaus neutralių įžeminimo būdai, jų įtaka pereinamiesiems procesams. Atlikta transformatoriaus neutralės režimų paplitimo pasaulyje analizė. Keičiant tinklo režimus buvo sumodeliuota vienfazė ir trifazė pažaida, kiekvienu atveju išmatuotos fazinės srovės ir įtampos. Nustatyta kokią įtaką pereinamiesiems procesams turi transformatoriaus neutralės varžos dydis. Pažaidų metu gauti pereinamieji procesai atvaizduoti grafiškai ir detaliam aprašyti. Atliktas modeliavimo duomenų apibendrinimas.

Misius, Karolis. Analysis of Surge Transient Processes in Medium Voltage Systems with Impedance Earthed Neutral. Final project of Master's degree / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Research area and field: Electrical Power Systems, Technological Sciences

Key words: *isolated, grounded through resistance, transformer neutral, fault, overvoltage.*

Kaunas, 2017. 50 p.

SUMMARY

Project - master thesis. Aim of the project is to simulate the work of Juodkrantes transformer substation in 35 kV network in two modes: with an isolated neutral and grounded through the resistance. Moreover, to determine the impact of transient surge processes influenced by neutral grounding resistance. The theoretical part analyzes the different transformer neutral grounding techniques and their impact on the transient process. There is also analysed transformer neutral grounding mode prevalence in the world. One phase and three phase faults were simulated in all modes, phase currents and voltages were measured in each case. The influence of transient processes that neutral impedance transformer size makes was determined. Transient processes during the faults are displayed graphically and described. Modeling data summarized.

TURINYS

IVADAS	9
1. TRANSFORMATORIŲ NEUTRALIŲ REŽIMAI	10
1.1. Izoliuotos neutralės tinklas	10
1.2. Kompensuotos neutralės tinklas	14
1.3. Per varžą įžemintos neutralės tinklas	16
TRANSFORMATORIŲ NEUTRALIŲ REŽIMŲ APŽVALGA	18
1.4. Transformatorių neutralių režimų apžvalga Lietuvoje	18
1.5. Transformatorių neutralių režimų apžvalga pasaulyje	19
2. TRANSFORMATORIŲ NEUTRALIŲ REŽIMŲ PRIVALUMAI IR TRŪKUMAI	19
2.1. Izoliuotos neutralės tinklas	19
2.2. Kompensuotos neutralės tinklas	20
2.3. Per varžą įžemintos neutralės tinklas	20
3. ELEKTROS ENERGIJOS PATIKIMUMO RODIKLIAI	20
4. PAŽAIDOS VIETOS VARŽOS SKAIČIAVIMAS	21
5. SAVAIMINIS ELEKTROS LANKO IŠNYKIMAS	22
6. PASIRINKTO MODELIO APRAŠYMAS	23
6.1. Galios transformatoriaus vardinės srovės skaičiavimas	24
6.2. Trumpojo jungimo srovių perskaičiavimas	25
6.3. Juodkrantės transformatorių pastotės 35kV tinklo modelis	26
7. MODELIAVIMO REZULTATŲ APTARIMAS	28
7.1. Vienos fazės pažaida linijos L-Nida gale esant skirtingoms apkrovoms	28
7.2. Vienos fazės pažaida linijos L-Nida gale esant skirtingoms transformatoriaus neutralės įžeminimo varžoms	34
7.3. Trifazė pažaida linijos L-Nida gale esant skirtingoms apkrovoms.....	38
8. MODELIAVIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	43
8.1. Vienos fazės pažaidos linijos L-Nida gale apibendrinimas	43
8.2. Trifazės pažaidos linijos L-Nida gale apibendrinimas	45
9. LITERATŪRA	48
1 PRIEDAS. 110/35/10 kV Juodkrantės TP projektavimo užduotis.	
2 PRIEDAS. Dėl Juodkrantės TP projektavimo užduoties pakeitimo	

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 pav. Izoliuotos neutralės tinklas	10
2 pav. Ekvivalentinė izoliuotos neutralės tinklo schema	10
3 pav. Tinklo įtampų vektorių diagrama normaliu darbo režimu	11
4 pav. Tinklo įtampų vektorių diagrama įžemėjimo metu	13
5 pav. Tinklo srovių vektorių diagrama normaliu darbo režimu ir įžemėjimo metu	13
6 pav. Kompensuotos neutralės tinklas	14
7 pav. Ekvivalentinė kompensuotos neutralės tinklo schema	14
8 pav. Įžemintos neutralės per varžą tinklas	16
9 pav. Ekvivalentinė įžemintos neutralės per varžą tinklo schema	17
10 pav. Transformatorių neutralės įžeminimo būdai pasaulio valstybėse	19
11 pav. Elektros lanko savaiminio išnykimo priklausomybė	22
12 pav. Juodkrantės TP 35 kV skirstyklos principinė schema.....	24
13 pav. Juodkrantės TP 35 kV tinklo modelis su izoliuota neutrале.....	27
14 pav. Juodkrantės TP 35 kV tinklo modelis su per varžą įžeminta neutrале	27
15 pav. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.....	29
16 pav. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.....	30
17 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.	32
18 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.	33
19 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Transformatoriaus neutralės varža 0Ω, linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.....	35
20 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Transformatoriaus neutralės varža 28 Ω, linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.....	35
21 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Transformatoriaus neutralės varža 0 Ω, linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.	37
22 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Transformatoriaus neutralės varža 28 Ω, linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.	37
23 pav. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.....	39
24 pav. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.	40
25 pav. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.	41
26 pav. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.....	43

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	28
2 lentelė. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	29
3 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	31
4 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	33
5 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant transformatoriaus neutralės varžai. Pažaida linijos L-Nida gale, linijos apkrova:16 MW.	34
6 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant transformatoriaus neutralės varžai. Pažaida linijos L-Nida gale, linijos apkrova:16 MW.	36
7 lentelė. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	38
8 lentelė. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	39
9 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	41
10 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	42
11 lentelė. Sumodeliuotų transformatorių neutralių režimų palyginimas vienfazės pažaidos metu, Juodkrantės TP, kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	44
12 lentelė. Sumodeliuotų transformatorių neutralių režimų palyginimas vienfazės pažaidos metu, Nidos TP, kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	45
13 lentelė. Sumodeliuotų transformatorių neutralių režimų palyginimas trifazės pažaidos metu, Juodkrantės TP, kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.	46

IVADAS

Modernizuojant vidutinės įtampos elektros energetikos sistemą vis didesnis dėmesys skiriamas oro linijoms. Vietoje oro linijų energijos skirstymo operatorius kloja požemines kabelių linijas.

Vidutinės įtampos tinklai Lietuvoje veikia pasitelkdami izoliuotą neutralę. Tokiame tinkle dažniausia pažaida (50-80 % visų avarių) yra įžemėjimas [1]. Įžemėjimas – izoliuotosios arba kompensuotosios neutralės tinklų elektros įrenginio aktyviųjų dalių atsitiktinis susijungimas su įžemintomis įrenginio dalimis arba su žeme [2].

Tinkle esant oro linijoms, įžemėjimo metu, atsiranda įžemėjimo srovės, kurios dėl laidų talpio žemės atžvilgiu yra nedidelės ($\leq 10A$). Pradėjus oro linijas keisti į kabelines talpumai tarp žemės ir kabelių linijų susidaro daug didesni, todėl įžemėjimo metu teka daug didesnės įžemėjimo srovės ($\geq 10A$).

Remiantis Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymu „Dėl elektros įrenginių įrengimo bendrųjų taisyklių patvirtinimo“, išleisto 2012 m. vasario 3d., didesnės kaip 10 A talpinės srovės turi būti kompensuotos [2].

Šiandien skirstomajame tinkle sparčiai keičiamos oro linijos kabelių linijomis, o talpinės srovės kompensuoti naujai statomos elektros lanko gesinimo ritės (kompensacinės ritės).

Šio darbo tikslas – sumodeliuoti skirstomojo tinklo Juodkrantės transformatorių pastotės 35 kV tinklą dviem režimais: su izoliuota neutrале ir įžeminta per varžą. Nustatyti kokią įtaką viršįtampių pereinamiesiems vyksmams turi neutralės įžeminimas per varžą.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

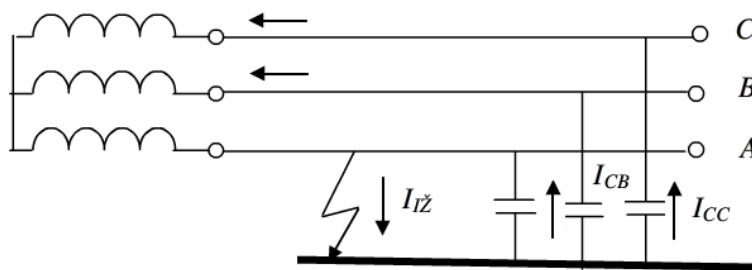
- išsiaiškinti skirtingų transformatorių neutralių tinklų pažaidos pereinamuosius procesus;
- palyginti izoliuotos neutralės tinklą ir įžemintos per varžą neutralės tinklą, nustatyti jų privalumus ir trūkumus;
- sumodeliuoti ir palyginti vienfazę Juodkrantės TP tinklo pažaidą, kai transformatoriaus neutralė yra izoliuota ir įžeminta per varžą;
- nustatyti kokią įtaką turi transformatoriaus neutralės varžos dydis, vienfazių pereinamųjų procesų vyksmams;
- sumodeliuoti ir palyginti trifazę Juodkrantės TP tinklo pažaidą, kai transformatoriaus neutralė yra izoliuota ir įžeminta per varžą.

1. TRANSFORMATORIŲ NEUTRALIŲ REŽIMAI

1.1. Izoliuotos neutralės tinklas

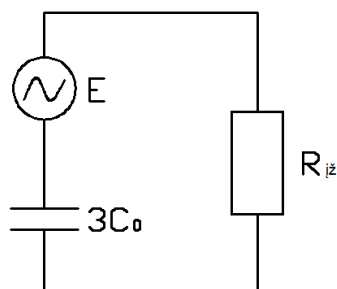
Izoliuotos neutralės tinkle transformatoriaus vidutinės įtampos apvija yra izoliuota (1 paveikslėlis). Tai reiškia, kad transformatoriaus vidutinės įtampos apvija neturi ryšio su žeme. Vienam faziniam laidininkui susilietus su žeme, vyksta įžemėjimas, kuris apibrėžiamas įžemėjimo srove. Įžemėjimas – izoliuotosios arba kompensuotosios neutralės tinklų elektros įrenginio aktyviųjų dalių atsitiktinis susijungimas su žemintomis įrenginio dalimis arba su žeme. [2]

Izoliuotos neutralės tinkle įžemėjimo metu fazinės įtampos padidėja $\sqrt{3}$ karto ir susilygina su linijinėmis įtampomis, kurios nepakinta. Dėl šio reiškinio įžemėjimas skirstomajame tinkle nėra traktuojamas kaip avarinis režimas, todėl kad trifaziai vartotojai nepajaučia tinklo pažaidos ir gali sėkmingai veikti. Įžemėjimo indikacijai pagal EĮIBT yra įrengiama ir naudojama bendroji įžemėjimo signalizacija, kuri įspėja dirbantį personalą apie tinklo pažaidą.



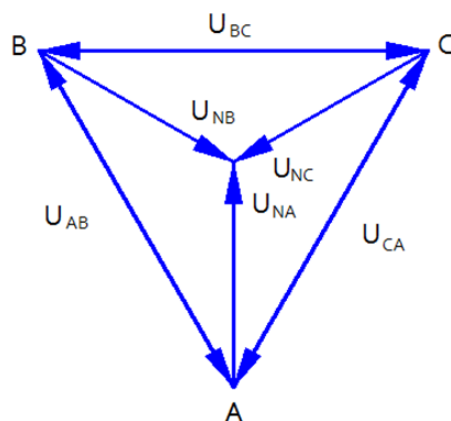
1 pav. Izoliuotos neutralės tinklas [6]

Ekvivalentinė izoliuotos neutralės tinklo schema įžemėjimo atveju pavaizduota 2 paveikslėlyje.



2 pav. Ekvivalentinė izoliuotos neutralės tinklo schema [1]

Normaliu darbo metu įtampos sistemoje pavaizduotos 3 paveikslėlyje.



3 pav. Tinklo įtampų vektorių diagrama normaliu darbo režimu [3]

Iš vektorių diagramos matyti, kad tinklas idealus, visų fazių linijinės ir fazinės įtamos vienodos. Nulinės sekos įtamos ir srovės, šiuo atveju, viena kitą kompensuoja ir yra lygios nuliui.

Įvykus įžemėjimui A fazėje, į žemę teka įžemėjimo srovė $I_{\text{ž}}$. Kai įžemėjimo varža $R_{\text{ž}}=0 \Omega$, ši srovė priklauso tik nuo tinklo įtamos, dažnio ir fazių talpumo žemės atžvilgiu ir gali būti apskaičiuojama remiantis 1 formule.

$$I_{\text{ž}}' = 3\omega C_0 E; \quad (1)$$

čia $I_{\text{ž}}'$ - įžemėjimo srovė, A; $\omega = 2\pi f$ - kampinis dažnis, rad/s; C_0 - fazės talpa, F; E - fazinė įtampa, kV; f - dažnis, Hz.

Kabelio talpą gamintojai pateikia kartu su kitais kabelį specifikuojančiais parametrais. Toliau pavaizduotas pavyzdys iš „Draka Keila Cables” produktų katalogo [9].

Produkto pavadinimas			AXCMK-PLUS 4x95Al/29Cu	AXCMK-PLUS 4x150Al/41Cu	AXCMK-PLUS 4x185Al/57Cu
Elektriniai parametrai					
Didžiausia fazės ir neutralės laidininko nuolatinės srovės varža	Laidininko temperatūra 20°C	Ω/km	0,320	0,206	0,164
Didžiausia Fazės ir neutralės laidininko kintamosios srovės varža	Laidininko temperatūra 70°C	Ω/km	0,39	0,25	0,2
Didžiausia PE laidininko nuolatinės srovės varža	Laidininko temperatūra 20°C	Ω/km	0,641	0,443	0,320
Induktyvumas	-	mH/km	0,27	0,26	0,26
Talpa	-	μF/km	0,42	0,46	0,49

Pažaidos metu visada atsiranda įžemėjimo vietos varža $R_{iž}$. Dėl šios varžos sumažėja į pažaidos vietą tekanti srovė $I_{iž}'$. Įvertindami pažaidos metu atsiradusią įžemėjimo varžą galime pagal 2 formulę apskaičiuoti patikslintą įžemėjimo srovę.

$$I_{iž} = \frac{I_{iž}'}{\sqrt{1 + \frac{I_{iž}'}{E} R_{iž}}}; \quad (2)$$

čia $I_{iž}$ - perskaičiuotoji įžemėjimo srovė, A; $I_{iž}'$ - įžemėjimo srovė, A; $R_{iž}$ - įžemėjimo varža, Ω ; E - fazinė įtampa, kV.

Idealiu atveju nulinės sekos srovės transformatoriumi, kuris yra pažeistoje linijoje, teka tik talpinės srovės, todėl relinės apsaugos negali tiksliai nustatyti įžemėjusios linijos. Nulinės sekos įtampą U_0 galima apskaičiuoti pagal 3 formulę.

$$U_0 = \frac{I_{iž}'}{3\omega C_0}; \quad (3)$$

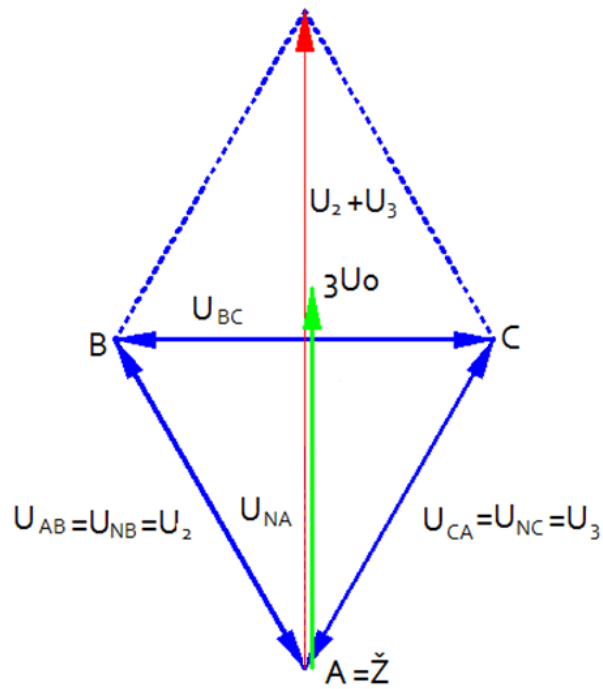
čia $I_{iž}'$ - įžemėjimo srovė, A; $\omega = 2\pi f$ - kampinis dažnis, rad/s; C_0 - nulinės sekos fazės talpa, F; U_0 - nulinės sekos įtampa, kV.

Pasinaudodami 1, 2 ir 3 formulėmis galime išreikšti didžiausią nulinės sekos įtampą (4 formulė).

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

Matome, kad nulinės sekos įtampa bus lygi fazinei įtampai tada, kai įžemėjimo vietos varža $R_{iž}=0 \Omega$. Jei įžemėjimo varža nebus lygi nuliui, nulinės sekos įtampa bus mažesnė nei fazinė įtampa.

Kaip jau minėjome, įžemėjimo metu nepažeistų fazių fazinė įtampa padidėja $\sqrt{3}$ karto. Įžemėjimo metu persiskirsto tinklo įtampų vektoriai, kurie pavaizduoti 4 paveikslėlyje.



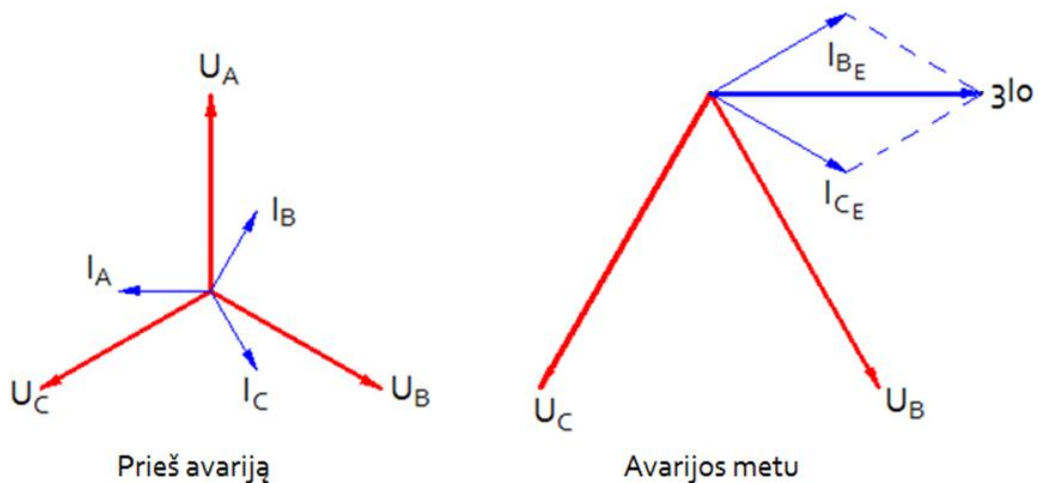
4 pav. Tinklo įtampų vektorių diagrama įžemėjimo metu [3]

4 paveiksle matyti, kad vykstant įžemėjimui A fazėje, žemės įtampa susilygina su A fazės įtampa. Faziniai įtampų vektoriai U_{NB} ir U_{NC} tampa lygūs linijiniams įtampų vektoriams U_{AB} ir U_{CA} . Tokiu atveju nulinės sekos įtampos vektorius gali būti apskaičiuojamas pagal 5 formulę.

$$3U_0 = \frac{U_{AB} + U_{CA}}{\sqrt{3}}; \quad (5)$$

čia U_{AB} - linijinė įtampa tarp A ir B fazės, kV; U_{CA} - linijinė įtampa tarp C ir A fazės, kV; U_0 - nulinės sekos įtampa, kV.

Analogiškai galime pavaizduoti ir srovių vektorius normalaus darbo ir įžemėjimo metu (5 paveikslėlis).



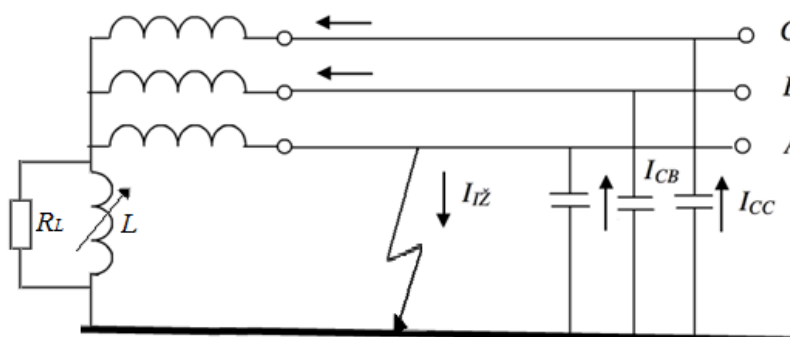
5 pav. Tinklo srovių vektorių diagrama normaliu darbo režimu ir įžemėjimo metu [3]

Iš 5 paveikslo matyti, kad normaliu darbo režimu nulinės sekos srovė lygi nuliui. Įvykus įžemėjimui A fazėje, nepažeistų fazių fazinės įtampos padidėja $\sqrt{3}$ karto perstumdamos ir srovės vektorius. Nulinės sekos srovė $3I_0$ lygi visų nepažeistų fazių talpinei srovei.

1.2. Kompensuotos neutralės tinklas

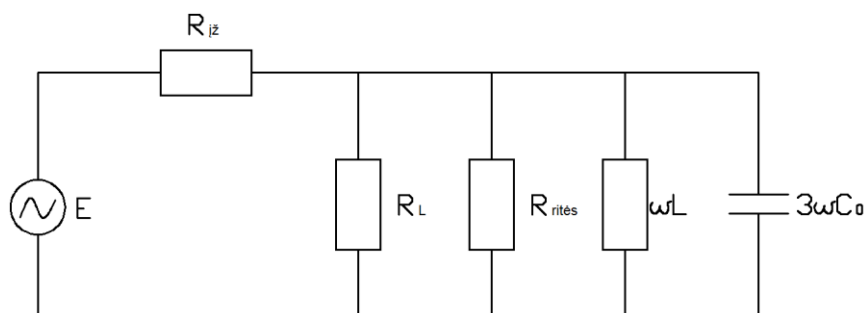
Kompensuotos neutralės tinkle transformatoriaus vidutinės įtampos apvija yra įžeminta per lanko gesinimo ritę (6 paveikslėlis). Ritės paskirtis – sumažinti įžemėjimo srovės iki leistinų (pagal EİİBT <10 A), prie kurių tinklas galėtų dirbti iki kol bus pašalinta pažaida.

Plečiant kabelinį tinklą, didėja įžemėjimo metu, dėl kabelinių linijų talpos atsirandanti įžemėjimo srovė. Kai ši srovė viršija tam tikrą ribą, atsiradęs elektros lankas savaime neužgessta. Stipresniam elektros lanko gesinimui yra naudojamos kompensacinės ritės.



6 pav. Kompensuotos neutralės tinklas [6]

Ekvivalentinė kompensuotos neutralės tinklo schema įžemėjimo atveju pavaizduota 7 paveikslėlyje.



7 pav. Ekvivalentinė kompensuotos neutralės tinklo schema [1]

Įvykus įžemėjimui, taip pat kaip ir izoliuotos neutralės tinkle, ima tekėti talpinės srovės nulemtos fazinių laidininkų talpos žemės atžvilgiu. Lanko gesinimo ritė sujungta su valdikliu, kuris stebi įžemėjimo srovę. Įžemėjimo srovei viršijus leistinas ribas, ritės valdiklis reguliuoja kompensacinės ritės padėtį ir valdo ritės generuojamą induktyvinę srovę. Talpinė ir induktyvinė srovės yra priešingų kryptių, todėl viena kitą kompensuoja sumažindamos arba visai panaikindamos įžemėjimo vietoje tekančią srovę.

Įžemėjimo srovę, kai tinklas ne iki galo kompensuotas arba perkompensuotas, galima apskaičiuoti pagal 6 formulę.

$$I_{iž}' = \frac{E \cdot \sqrt{1 + R_{rites} \cdot (3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}}{\sqrt{(R_{iž} + R_{rites})^2 + R_{iž}^2 R_{rites}^2 (3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})^2}}; \quad (6)$$

čia $I_{iž}'$ - įžemėjimo srovė, A; $\omega = 2\pi f$ - kampinis dažnis, rad/s; C_0 - fazės talpa, F; E - fazinė įtampa, kV; $R_{iž}$ - įžemėjimo varža, Ω ; R_{rites} - kompensacinės ritės varža, Ω ; L - ritės induktyvumas, H; f - dažnis, Hz.

Jei tinklas visiškai kompensuotas, tai vadinama rezonansiniu kompensavimu. Rezonansinio kompensavimo atveju įžemėjimo srovė gali būti apskaičiuojama pagal 7 formulę.

$$I_{iž}' = \frac{E}{R_{iž} + R_{rites}}; \quad (7)$$

čia $I_{iž}'$ - įžemėjimo srovė, A; E - fazinė įtampa, kV; $R_{iž}$ - įžemėjimo varža, Ω ; R_{rites} - kompensacinės ritės varža, Ω .

Nulinės sekos įtampą įžemėjimo metu galime apskaičiuoti pagal 8 formulę.

$$U_0 = \frac{I_{iž}'}{\sqrt{(\frac{1}{R_{rites}})^2 + (3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})^2}}; \quad (8)$$

čia $I_{iž}'$ - įžemėjimo srovė, A; U_0 - nulinės sekos įtampa, kV; $\omega = 2\pi f$ - kampinis dažnis, rad/s; R_{rites} - kompensacinės ritės varža, Ω ; C_0 - fazės talpa, F; L - ritės induktyvumas, H; f - dažnis, Hz.

Nulinės sekos įtampą esant rezonansiniam lanko gesinimo ritės taškui, galime apskaičiuoti naudodamiesi 9 formule.

$$\frac{U_0}{E} = \frac{R_{rites}}{R_{rites} + R_{iž}}; \quad (9)$$

čia U_0 - nulinės sekos įtampa, kV; R_{rites} - kompensacinės ritės varža, Ω ; E - fazinė įtampa, kV; $R_{iž}$ - įžemėjimo varža, Ω .

Kompensuotame tinkle, kaip ir izoliuotame didžiausia nulinės sekos įtampa gali būti lygi fazinei sistemos įtampai. Kompensuotame tinkle neutralės įtampa(,) įžemėjimo metu(,) yra didesnė nei izoliuotos neutralės tinkle.

Matome, kad lygtyse nėra panaudota kompensacinės ritės papildomo kontūro varža R_L . Ši varža skirta relinės apsaugos terminalams nustatyti įžemėjusią liniją. Atsiradus įžemėjimui, į žemę teka įžemėjimo srovė, tačiau lanko gesinimo ritė šią srovę sukompensuoja, todėl relinės apsaugos terminalas nesugeba atskirti įžemėjimo. Tokiu atveju rankiniu arba nuotoliniu būdu įjungžiama varža R_L , kuri padidina įžemėjimo srovę ir perstumia įžemėjimo srovės vektorių į relinės apsaugos terminalo veikimo zoną ir relė atjungia įžemėjusią liniją.

1.3. Per varžą įžemintos neutralės tinklas

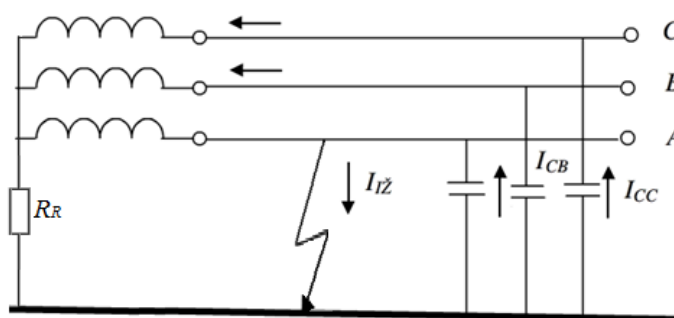
Jeigu tinklo neutralę prijungsiame per varžą ir įžeminsime, gausime įžemintos per varžą neutralės tinklą (8 paveikslėlis). Šie tinklai taip pat yra skirstomi pagal prijungiamos varžos dydį:

- didelės varžos;
- mažos varžos.

Pagrindinis skirtumas – tai, kad esant didelės varžos tinklui, įvykus vienos fazės pažaidai, teka labai mažos pažaidos srovės. Toks tinklas gali būti naudojamas pramonėje, kur vienos fazės pažaidos negali sustabdyti trifazių mechanizmų darbo.

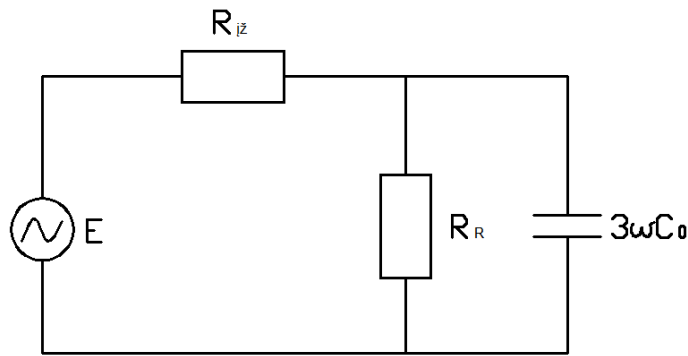
Esant mažos varžos tinklui, įvykus vienos fazės pažaidai, teka labai didelės pažaidos srovės. Tokio tipo tinklas negali funkcionuoti toliau ir turi būti atjungiamas.

Vienas iš pagrindinių šio tinklo privalumų yra tai, kad jei neutralės įžeminimo varža parenkama taip, kad pažaidos metu, ja tekanti srovė yra didesnė nei sistemos talpumų nulemta įžemėjimo srovė, tokiu atveju galimi viršitampiai sumažėja 2,5 karto lyginant su fazine įtampa normaliu darbo metu. [10], [11].



8 pav. Įžemintos neutralės per varžą tinklas [6]

Ekvivalentinė įžemintos neutralės per varžą tinklo schema įžemėjimo atveju pavaizduota 9 paveikslėlyje.



9 pav. Ekvivalentinė įžemintos neutralės per varžą tinklo schema [1]

Tokiame tinkle įžemėjimo srovę bendru atveju galima apskaičiuoti pagal 10 formulę.

$$I_{iž}' = \frac{E \cdot \sqrt{1 + (R_R 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_{iž} + R_R)^2 + (R_R \cdot R_{iž} \cdot 3\omega C_0)^2}}; \quad (10)$$

čia $I_{iž}'$ - įžemėjimo srovė, A; $\omega = 2\pi f$ - kampinis dažnis, rad/s; C_0 - fazės talpa, F; E - fazinė įtampa, kV; $R_{iž}$ - įžemėjimo varža, Ω ; R_R - neutralės įžeminimo varža, Ω ; f - dažnis, Hz.

Jei talpinės varžos yra mažos palyginti su neutralės įžeminimo varža, tuomet talpinių varžų galime nepaisyti ir lygtį perrašome taip:

$$I_{iž}' = \frac{E}{R_R + R_{iž}};$$

Kaip ir prieš tai, galime užrašyti 11 formulę, kuria galime apskaičiuoti nulinės sekos įtampą.

$$U_0 = \frac{I_{iž}'}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_R}\right)^2 + (3\omega C_0)^2}}; \quad (11)$$

čia $I_{iž}'$ - įžemėjimo srovė, A; $\omega = 2\pi f$ - kampinis dažnis, rad/s; C_0 - fazės talpa, F; U_0 - nulinės sekos įtampa, kV; R_R - neutralės įžeminimo varža, Ω .

Pasinaudodami 10, 11 formulėmis galime išreikšti didžiausią nulinės sekos įtampą nevertindami talpuminių varžų (12 formulė).

$$\frac{U_0}{E} = \frac{R_R}{R_R + R_{iž}}; \quad (12)$$

Didžiausia neutralės įtampa per varžą įžemintame tinkle lygi fazinei įtampai. Ši reikšmė gaunama, kai įžemėjimo varža lygi $R_{iž}=0 \Omega$.

Lietuvoje vidutinės įtampos tinklai nedirba tokiu režimu. Šiuo metu bandoma integruoti į sistemą tinklus, kuriuose neutralė įžeminta per varžą. Pirmasis regionas su tokiu tinklu bus Juodkrantė. Juodkrantės transformatorių pastotė bus rekonstruota ir transformatoriaus 35kV neutralė įžeminta per varžą.

Taip pat šis tinklo režimas paplitęs tarp vėjo elektrinių vidinio tinklo. Lietuvoje dažniausia vėjo elektrinių parko įtampa yra 20kV, o tinklo neutralė įžeminta per varžą.

Panaudodami tinklus su neutrале įžeminta per varžą, galime sumažinti trumpojo jungimo sroves iki tokių, kurios leistų tinklo apsaugoms tinkamai veikti išlaikant selektyvų veikimą su gretimomis pastotėmis. Žinodami esamus tinklo trumpuosius jungimus galime rasti sistemos varžą R_S . Norėdami sumažinti trumpuosius jungimus iki tam tikros vertės panaudojame 13 formulę ir apskaičiuojame reikiamą varžos vertę [4].

$$R_E = \frac{U_P}{\sqrt{3} + I_N}; \quad (13)$$

čia R_E - bendra varža, Ω ; U_P - tinklo įtampa, kV; I_N - reikiama trumpojo jungimo srovė, kA.

Gauta R_E varža yra bendra varža, norėdami gauti transformatoriaus neutralės varžą turime įvertinti sistemos varžą: $R_R = R_E - R_S$.

TRANSFORMATORIŲ NEUTRALIŲ REŽIMŲ APŽVALGA

1.4. Transformatorių neutralių režimų apžvalga Lietuvoje

Nuo seno Lietuvos energetikos sistemoje vidutinės įtampos tinklai buvo su izoliuota neutrале. Vystantis energetikai atsirado vis daugiau kabelinių linijų, kurios privertė transformatorių neutrales įžeminti per lanko gesinimo rites. Šiandien kompensacinių ričių pastatymas rekonstruojamoje pastotėje tapo kasdienybe. Kita vertus, pastaruoju metu „Energijos skirstymo operatorius“ surengė vieną iš nedaugelio projektavimo užduočių, kurioje Juodkrantės transformatorių pastotės rekonstrukcijos metu 35 kV transformatorių neutralės bus įžeminamos per nedidelę varžą, trumpiesiems jungimams apriboti. Tai reiškia, kad Juodkrantės TP 35 kV vienfazė pažaida bus atjungiamą relinės apsaugos terminalų, su tam tikru laiku uždelsimu.

1.5. Transformatorių neutralių režimų apžvalga pasaulyje

Nėra pasaulyje vieningo susitarimo, kuris transformatorių neutralės įžeminimo būdas geriausias. Visi būdai turi savo pliusų ir minusų, todėl skirtingose pasaulio šalyse naudojami įvairūs transformatorių įžeminimo neutralėmis būdai (10 paveikslėlis).

Valstybė	Naudojama įtampa [kV]	Elektros tinklo darbo režimai			
		Izoliuotosios neutralės tinklas	Kompensuotosios neutralės tinklas	Varža įžemintos neutralės tinklas	Tiesiogiai įžemintos neutralės tinklas
Lietuva	6–35	+	+		
Rusija	6–35	+	+		
Austrija	11–12			+	+
Kanada	4–25			+	+
JAV	4–25			+	+
Ispanija	10–30			+	+
Italija	10–20	+			
Portugalija	10–30			+	
Prancūzija	12–24			+	
Japonija	6,6	+		+	
Vokietija	10–20		+		
Austrija	10–30		+		
Belgija	6,3–17			+	
Didžioji Britanija	11			+	+
Šveicarija	10–20		+		
Suomija	20	+	+		

10 pav. Transformatorių neutralės įžeminimo būdai pasaulio valstybėse [5]

Iš 10 paveikslėlio matyti, kad šalys kaip Rusija, Vokietija, Austrija, Šveicarija, Suomija linkusios vidutinės įtampos tinklus įžeminti per kompensacinę ritę. Tame tarpe ir Lietuva, kuri neutralių režimus perimė iš kaimynės Rusijos. Kita vertus, Juodkrantės TP 35 kV tinklo įžeminimas per varžą rodo, kad Lietuva stengiasi lygiuotis į tokias vakarų valstybes kaip JAV, Kanada, Ispanija, Portugalija, Prancūzija ir t. t.

2. TRANSFORMATORIŲ NEUTRALIŲ REŽIMŲ PRIVALUMAI IR TRŪKUMAI

2.1. Izoliuotos neutralės tinklas

Pagrindinis privalumas – įvykus tinklo pažaidai, tinklas kurį laiką gali sėkmingai dirbti toliau, trifaziai vartotojai nepajaučia įvykusios avarijos [7].

Trūkumai:

- Esant įžemėjimui ir atliekant operatyvinius perjungimus susidaro pereinamieji viršįtampiai, kurie žaloja sistemos įrenginių izoliaciją.
- Dėl padidėjusios sveikų fazių įtampos gali atsirasti izoliacijos pramušimas, dėl šios priežasties atsirastų dvifazis trumpasis jungimas, lydymas didelių trumpojo jungimo srovių.
- Dirbant tinklams su įžemėjusia faze greičiau susidėvi įrenginiai.
- Sudėtingas įžemėjimo vietos paieškos procesas.

2.2. Kompensuotos neutralės tinklas

Pagrindinis privalumas – sukompensuoja didelę įžemėjimo srovę (neleidžia atsirasti elektros lankui) ir leidžia tinklui dirbti iki tol, kol bus pašalintas įžemėjimas [7].

Trūkūmai:

- Reikalingos papildomos investicijos susijusios su kompensacinių ričių prijungimu, kurios pakankamai brangios.

2.3. Per varžą įžemintos neutralės tinklas

Pagrindinis privalumas – sumažina trumpojo jungimo srovę kartu prailgindama įrenginių gyvavimo laikotarpį ir sumažina pereinamuosius viršįtampius [7].

Trūkūmai:

- Įvykus pažaidai būtina atjungti tokio tipo liniją.
- Taip pat reikalingos papildomos investicijos.

3. ELEKTROS ENERGIJOS PATIKIMUMO RODIKLIAI

Elektros energijos patikimumo rodiklių yra nemažai, tačiau aptarsiu du pagrindinius:

- SAIDI;
- SAIFI.

Pirmasis patikimumo rodiklis (SAIDI) nusako vidutinį metinį nepatiktos elektros energijos vienam vartotojui laiką. SAIDI rodiklis gali būti apskaičiuotas taip:

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{N_T};$$

čia U_i - gedimo pašalinimo vienam vartotojui laikas, min; N_i - vartotojų skaičius, kuriems nepatiekta elektros energija, vnt; N_T - visų vartotojų skaičius, kurie naudojami elektros energijos tiekimo paslauga, vnt.

SAIDI rodiklis nusako nepateiktos elektros energijos laiką, tačiau šiame rodiklyje nėra įvertinta kaip dažnai buvo sutrikęs elektros tiekimas. Pastarajam faktoriui įvertinti yra naudojamas patikimumo rodiklis (SAIFI), kuris nusako vidutinį metinį elektros energijos pertrūkių skaičių vienam vartotojui. SAIFI rodiklis gali būti apskaičiuotas taip:

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{N_T};$$

čia λ_i - metinis gedimų skaičius vienam vartotojui, vnt; N_i - vartotojų skaičius, kuriems nepateikta elektros energija, vnt; N_T - visų vartotojų skaičius, kurie naudojami elektros energijos tiekimo paslauga, vnt.

Kaip ir minėjome, norėdami įvertinti kaip dažnai buvo sutrikęs elektros tiekimas yra naudojamas patikimumo rodiklis (SAIFI), kuris nusako vidutinį metinį elektros energijos pertrūkių skaičių vienam vartotojui.

Norėdami, kad elektros energijos tiekimo kokybė būtų nepriekaištinga, šie patikimumo rodikliai turi būti kuo mažesni. Lietuvoje šie rodikliai yra reglamentuoti ir turi savo ribas, kurių negali viršyti [13]. Energijos skirstymo operatoriui šių rodiklių ribos yra: SAIDI = 52,12 min.; SAIFI = 0,72 kartai.

Vienas iš būdų padidinti elektros energijos tiekimo patikimumą yra naudoti kabelines elektros linijas. Šios savo ruožtu yra saugesnės ir patiria mažiau avarių lyginant su oro linijomis. Oro liniją pakeitus į kabelinę liniją galima dvigubai sumažinti elektros energijos nutrūkimus [14]. Tačiau taip pat reikia įvertinti, kad avarių likvidavimas kabelinėse linijose trunka ilgiau nei oro linijose.

4. PAŽAIDOS VIETOS VARŽOS SKAIČIAVIMAS

Pažaidas energetikos sistemoje nulemia daug skirtingų varžų. Įvykus įžemėjimui, toje vietoje, kur fazinis laidininkas susiliečia su žeme gali susidaryti įvairaus dydžio varža. Šios varžos dydis priklauso nuo kontakto, su tam tikra medžiaga. Pavyzdžiui sąlytis su medžių šakomis dažnai sukuria didelę varžą. Varžos dydį taip pat lemia oro sąlygos. Per daugelį metų buvo atlikta daug eksperimentų, kuriuose buvo naudojami skirtingos sudėties žemės paviršiai tokie kaip: šlapias dirvožemis, sausas dirvožemis, akmenys, asfaltas, betonas, ir t. t. Tokių eksperimentų rezultatai buvo labai nenuspėjami [8].

Pažaidos vietos varžą nulemia elektros lanko varža, kurią galima apskaičiuoti pagal 14 formulę.

$$R = \frac{8750 \cdot l}{0,305 \cdot I^{1,4}}; \quad (14)$$

čia R - elektros lanko varža, Ω ; l - elektros lanko ilgis, m; I - įžemėjimo srovė, A;

Dažnai pažaidos vietos varža yra nevertinama, todėl apskaičiuojama didžiausia įžemėjimo srovė.

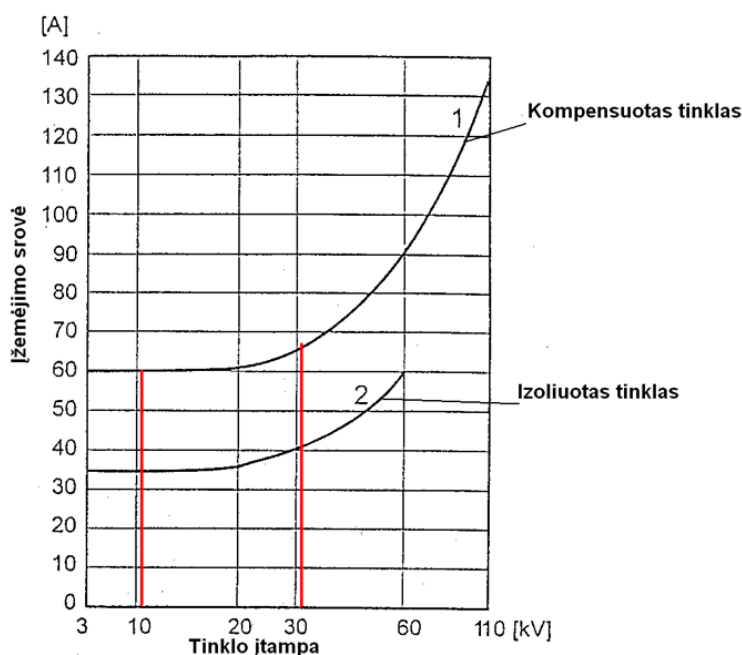
5. SAVAIMINIS ELEKTROS LANKO IŠNYKIMAS

Daugumą įžemėjimų lydi elektros lankas. Užsižiebus elektros lankui jis gali būti išjungiamas jungtuvo pagalba arba gali išnykti pats. Savaiminis elektros lanko išnykimas priklauso nuo kelių priežasčių:

- srovės dydžio;
- atsistatančios įtampos didėjimo greičio;
- kibirkščiavimo laiko;
- vėjo greičio.

Kaip teigia [1] srovės dydis ir atsistatančios įtampos didėjimo laikas yra svarbiausios elektros lanko išnykimo priežastys. Jei srovė maža, elektros lankas nepajėgia jonizuoti oro tarpo ir savaime išnyksta.

Elektros lanko savaiminį išnykimą galima aprašyti srovės ir tinklo įtampos priklausomybe (11 paveikslėlis). [1]



11 pav. Elektros lanko savaiminio išnykimo priklausomybė [1]

Kadangi kompensacinės ritės padėtis yra reguliuojama labai jautriai, tinkle su kompensuota neutrale atsistatanti įtampa didėja pamažu ir prie didesnių srovių elektros lankas savaime išnyksta. Lygiagrečiai lanko gesinimo ritei prijungiamas rezistorius tinkluose,

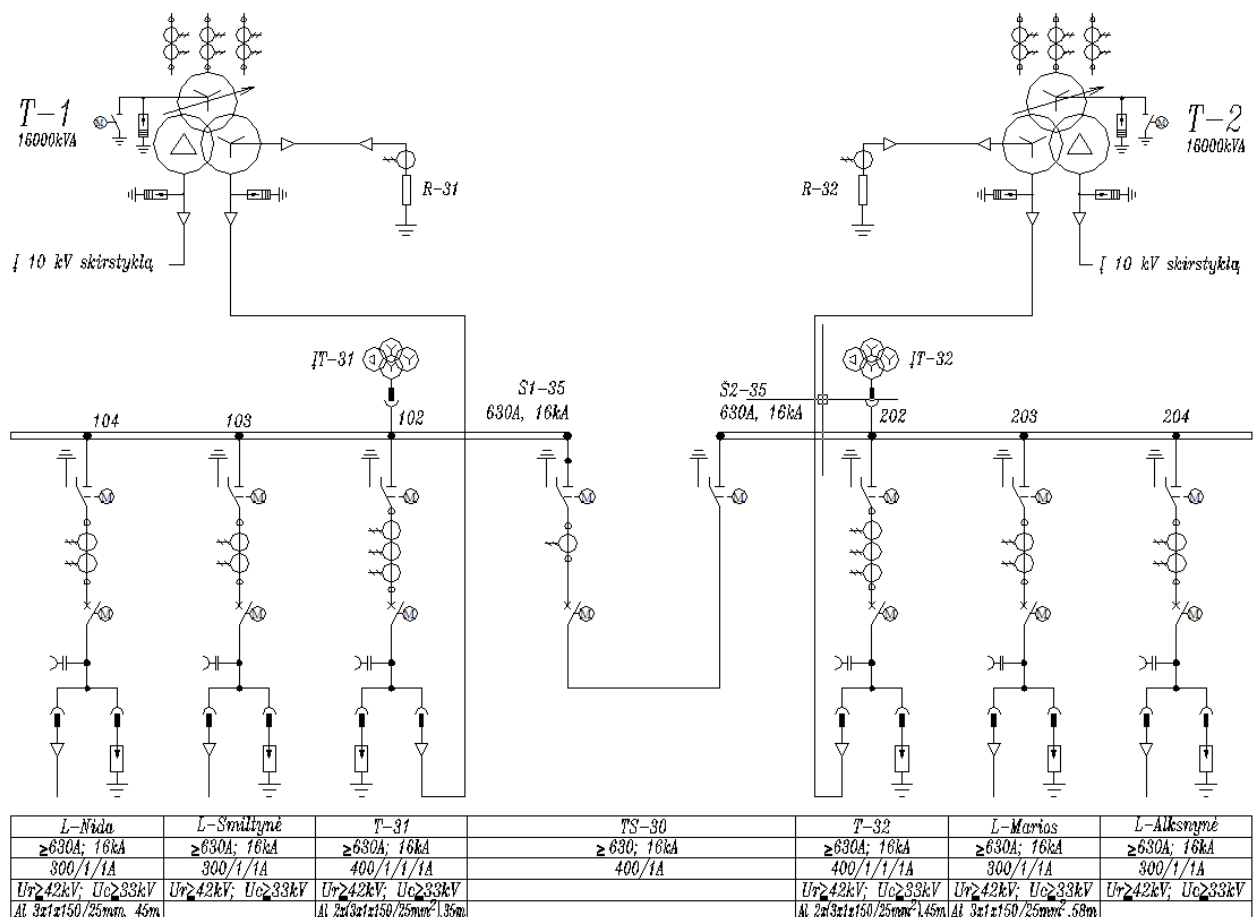
kuriuose nedidelis kompensavimo laipsnis, sumažina atsistatančios įtampos didėjimo žingsnį ir amplitudę ir taip prisideda prie lanko gesinimo.

11 paveikslėlyje matyti, kad prie 10,5 kV įtampos tinkle su izoliuota neutrале elektros lankas išnyksta savaime, kai įžemėjimo srovė neviršija 35 A. Palyginimui, prie 35 kV įtampos tinkle su kompensuota neutrале elektros lankas savaime išnyksta, kai įžemėjimo srovė neviršija 60 A.

6. PASIRINKTO MODELIO APRAŠYMAS

„Energijos skirstymo operatoriaus“ paskelbto konkurso Juodkrantės transformatorių pastotės rekonstrukcijai, projektavimo užduotyje ir jos pakeitime (1 ir 2 priedas) aiškiai nurodyta, kad 35 kV transformatorių neutralės turi būti įžemintos per varžą. Ši varža turi būti parinkta taip, kad ribotų vienfazio trumpojo jungimo srovę Juodkrantės TP iki 1000 A. Pasirinktą transformatorių pastotę sumodeliuojama dviem skirtingais neutralių režimais: pirmasis - kai transformatorių neutralė yra izoliuota, antrasis – kai transformatorių neutralė yra įžeminta per varžą. Anot teorijos tinklas su izoliuota neutrале yra ne toks stabilus palyginti su per varžą įžeminta neutrале. Stabilumas pasireiškia trumpalaikiais įtampos šuoliais pereinamųjų procesų metu [12]. Šie trumpalaikiai įtampos padidėjimai gadina įrenginius ir jų izoliaciją.

Juodkrantės transformatorių pastotėje (12 paveikslėlis) numatyti du 110/35/10 kV galios transformatoriai. Šių galios transformatorių pilnutinė galia siekia 16 MVA.



12 pav. Juodkrantės TP 35 kV skirstyklos principinė schema

Juodkrantės transformatorių pastotėje, 35 kV skirstykloje šiuo metu yra veikiančios dvi oro linijos: L-Nida ir L-Marios. Investuodami į elektros energijos patikimumo didinimą, AB ESO yra paruošę projektavimo užduotį, kurioje iš Juodkrantės transformatorių pastotės 35 kV tinklo yra numatytos dar dvi kabelinės linijos: L-Smiltynė ir L-Alksnynė. Šiame projekte pastarosios linijos nevertinamos ir lieka kaip rezervinės.

6.1. Galios transformatoriaus vardinės srovės skaičiavimas

Pastotėje projektuojami du nauji 16 MVA 110/35/10 kV galios transformatoriai. Apskaičiuojame transformatoriaus vardinės srovės 110 kV ir 35 kV pusėse.

Vardinė srovė 110 kV pusėje:

$$I_{V110} = S_T / (\sqrt{3} \times U_{110}) = 16000000 / (\sqrt{3} \times 115000) = 80,3 \text{ A.}$$

Vardinė srovė 35 kV pusėje:

$$I_{V35} = S_T / (\sqrt{3} \times U_{35}) = 16000000 / (\sqrt{3} \times 36000) = 256,6 \text{ A.}$$

6.2. Trumpojo jungimo srovių perskaičiavimas

Pagal AB ESO pateiktus duomenis Juodkrantės TP trumpojo jungimo srovės 110 kV šynose yra:

$$I_{K_{\max 110}}^3 = 3797 \text{ A};$$

$$I_{K_{\min 110}}^3 = 2664 \text{ A};$$

Sumontavus naujus 16 MVA galios transformatorius, perskaičiuojame trumpojo jungimo srovę 35 kV pusėje.

Apskaičiuojama minimali sistemos varža 110 kV šynose prie 35 kV įtampos:

$$Z_{S35kV \min} = \frac{U_{SK1}}{\sqrt{3} \cdot I_{k \max}^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_{SK2}}{U_{SK1}} \right)^2 = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 3797} \cdot \left(\frac{35000}{115000} \right)^2 = 1,61 \Omega.$$

Apskaičiuojama maksimali sistemos varža 110 kV šynose prie 35 kV įtampos:

$$Z_{S35kV \max} = \frac{U_{SK1}}{\sqrt{3} \cdot I_{k \min}^{(3)}} \cdot \left(\frac{U_{SK2}}{U_{SK1}} \right)^2 = \frac{115000}{\sqrt{3} \cdot 2664} \cdot \left(\frac{35000}{115000} \right)^2 = 2,3 \Omega.$$

Apskaičiuojama projektuojamų galios transformatorių 110/35 kV peties varža prie 110 kV įtampos:

$$Z_{TA-V110} = \frac{u_{KT-A-V}}{100} \cdot \frac{U_{NT-A}^2}{S_{NT-A-V}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115000^2}{16000000} = 86,8 \Omega.$$

Perskaičiuojama galios transformatoriaus 110/35 kV peties varža prie 35 kV įtampos:

$$Z_{TA-V35} = Z_{TA-V110} \cdot \left(\frac{U_{N35}}{U_{N110}} \right)^2 = 86,8 \cdot \left(\frac{36000}{115000} \right)^2 = 8,5 \Omega.$$

Apskaičiuojama maksimali trifazio trumpojo jungimo srovė 110/35/10 kV galios transformatoriaus 35 kV pusėje prie 35 kV įtampos:

$$I_{K35T1 \max}^{(3)} = \frac{U_{SK}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{S35kV \min} + Z_{T-AV35})} = \frac{36000}{\sqrt{3} \cdot (1,61 + 8,5)} = 2056 \text{ A}.$$

Apskaičiuojama minimali trifazio trumpojo jungimo srovė 110/35/10 kV galios transformatoriaus 35 kV pusėje prie 35 kV įtampos:

$$I_{K35T1 \min}^{(3)} = \frac{U_{SK}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{S35kV \max} + Z_{T-AV35})} = \frac{36000}{\sqrt{3} \cdot (2,3 + 8,5)} = 1925 \text{ A}.$$

Remiantis „Energijos skirtymo operatoriaus“ parengta projektavimo užduotimi ir pastabomis, Juodkrantės TP vienfazės trumpojo jungimo srovės reikia apriboti iki 1000 A. Tuo tikslu apskaičiuokime grandinės varžą:

$$Z_{\Sigma} = \frac{U_{SK}}{\sqrt{3} \cdot I_{riba}} = \frac{36000}{\sqrt{3} \cdot 1000} = 20,78 \Omega.$$

Norėdami apriboti vienfazę trumpojo jungimo srovę iki 1000 A, bendra grandinės varža turi būti 20,78 Ω . Taigi, transformatoriaus neutralės varžos vertė lygi:

$$Z_R = Z_{\Sigma} - Z_{TA-V35} - Z_{S35kV \min} = 20,78 - 8,5 - 1,61 = 10,67 \Omega.$$

Parenkama transformatoriaus neutralės varža 11 Ω , kuri vienfazę trumpojo jungimo srovę sumažins iki 1 kA.

Pakeitus galios transformatorius ir suprojektavus neutralės varžą reikia perskaičiuoti vienfazę trumpojo jungimo srovę 35 kV šynose. Apskaičiuojama maksimali perskaičiuota vienfazė trumpojo jungimo srovė 110/35/10 kV galios transformatoriaus 35 kV pusėje prie 35 kV įtampos:

$$I_{K35T1 \max P}^{(3)} = \frac{U_{SK}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{S35kV \min} + Z_{T-AV35} + Z_R)} = \frac{36000}{\sqrt{3} \cdot (1,61 + 8,5 + 11)} = 985 A.$$

Apskaičiuojama minimali perskaičiuota vienfazė trumpojo jungimo srovė 110/35/10 kV galios transformatoriaus 35 kV pusėje prie 35 kV įtampos:

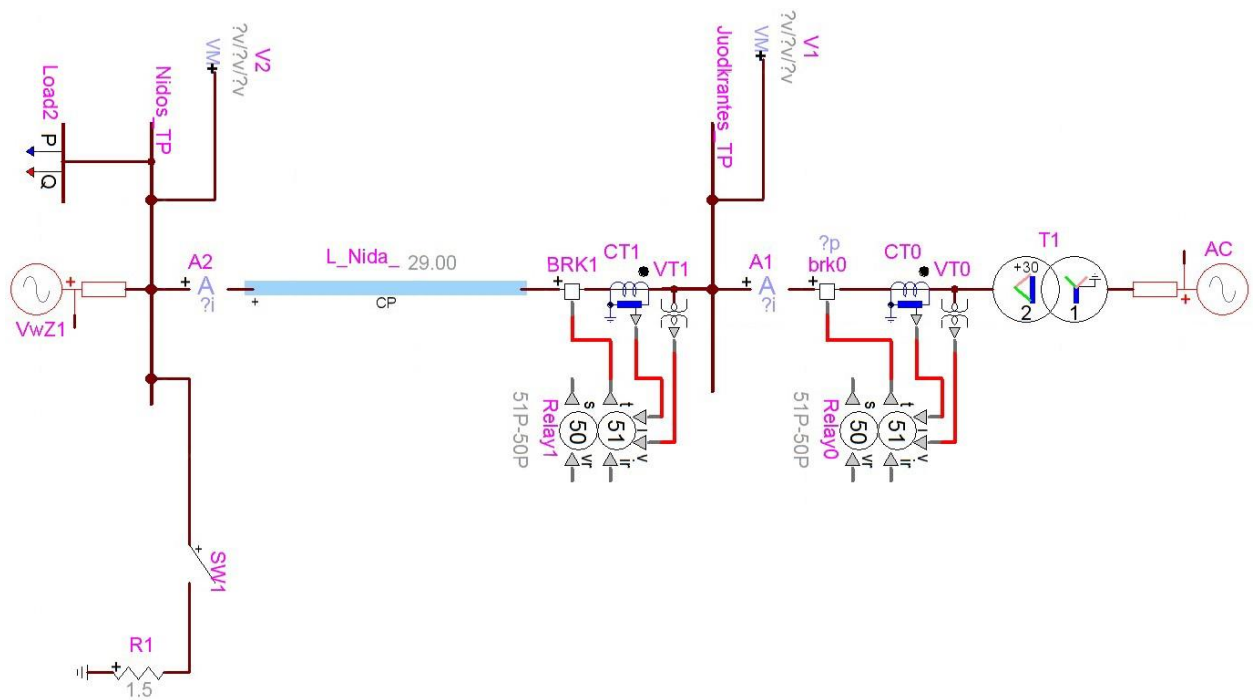
$$I_{K35T1 \min P}^{(3)} = \frac{U_{SK}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{S35kV \max} + Z_{T-AV35} + Z_R)} = \frac{36000}{\sqrt{3} \cdot (2,3 + 8,5 + 11)} = 953 A.$$

Taigi, suprojektavus naujus galios transformatorius ir įrengus neutralės varžas, trifazio trumpojo jungimo didžiausia ir mažiausia reikšmės yra atitinkamai lygios: 2056A ir 1925A, o vienfazio trumpojo jungimo didžiausia srovė gauta 985A, mažiausia 953A.

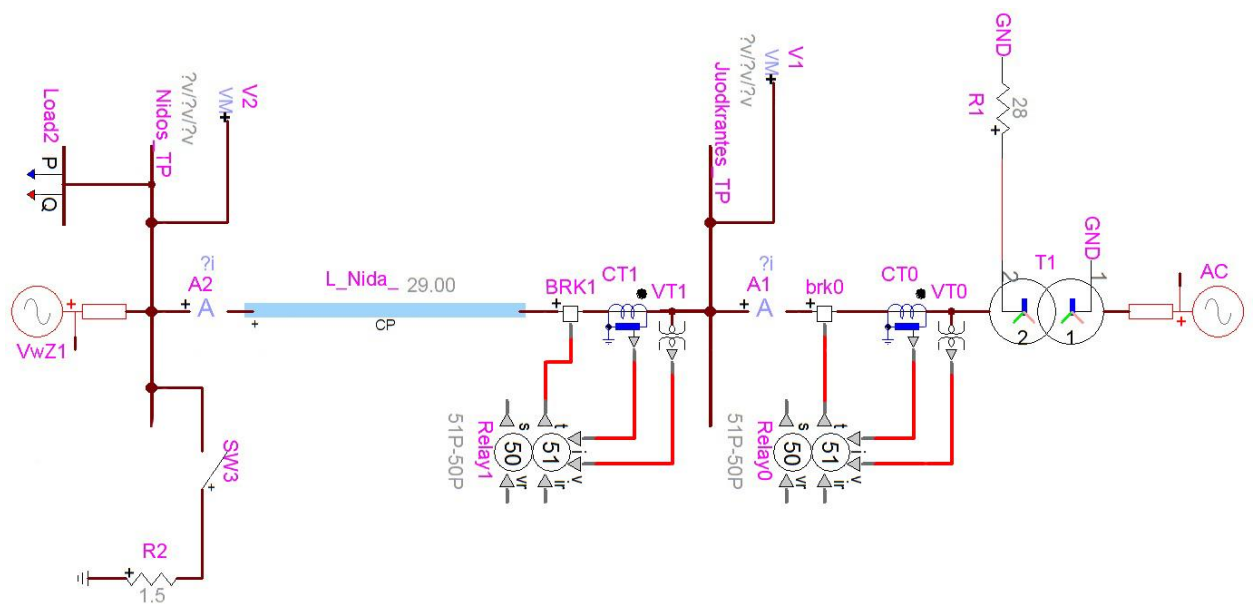
Trumpojo jungimo srovės Juodkrantės transformatorių pastotėje varijuoja nuo 2056A iki 953A. Parenkant įrenginius ir konfigūruojant relinės apsaugos terminalus būtina atkreipti dėmesį į trifazes ir vienfazes trumpųjų jungimų vertes. Remiantis didžiausiomis trumpųjų jungimų vertėmis yra parenkama visa pastotės įranga, o mažiausiomis – konfigūruojami RAA terminalai ir tikrinamas jų funkcijų jautrumas.

6.3. Juodkrantės transformatorių pastotės 35kV tinklo modelis

Remdamiesi gautais duomenimis iš AB ESO ir projektavimo užduotimi sudaryti Juodkrantės TP 35kV tinklo modeliai EMTP-RV programinio paketo pagalba. Izoliuotos neutralės tinklo modelis pateiktas 13 paveikslėlyje, per varžą įžemintos neutralės tinklo modelis pateiktas 14 paveikslėlyje.



13 pav. Juodkrantės TP 35 kV tinklo modelis su izoliuota neutrale



14 pav. Juodkrantės TP 35 kV tinklo modelis su per varžą įžeminta neutrale

Šių dviejų tinklų tinklo modelių pagalba, imituosime įvairius pereinamuosius procesus:

- 1 fazės pažaidą linijos L-Nida gale prie skirtingų apkrovų;
- 1 fazės pažaidą linijos L-Nida gale prie skirtingų transformatoriaus neutralės įžeminimo varžos dydžių;
- 3 fazių pažaidą linijos L-Nida gale.

Įtampas ir sroves Juodkrantės transformatorių pastotėje fiksuosime voltmetro V1 ir ampermetro A1 pagalba. Analogiškai įtampas ir sroves Nidos transformatorių pastotėje matuosime pasitelkdami voltmetrą V2 ir ampermetrą A1.

7. MODELIAVIMO REZULTATŲ APTARIMAS

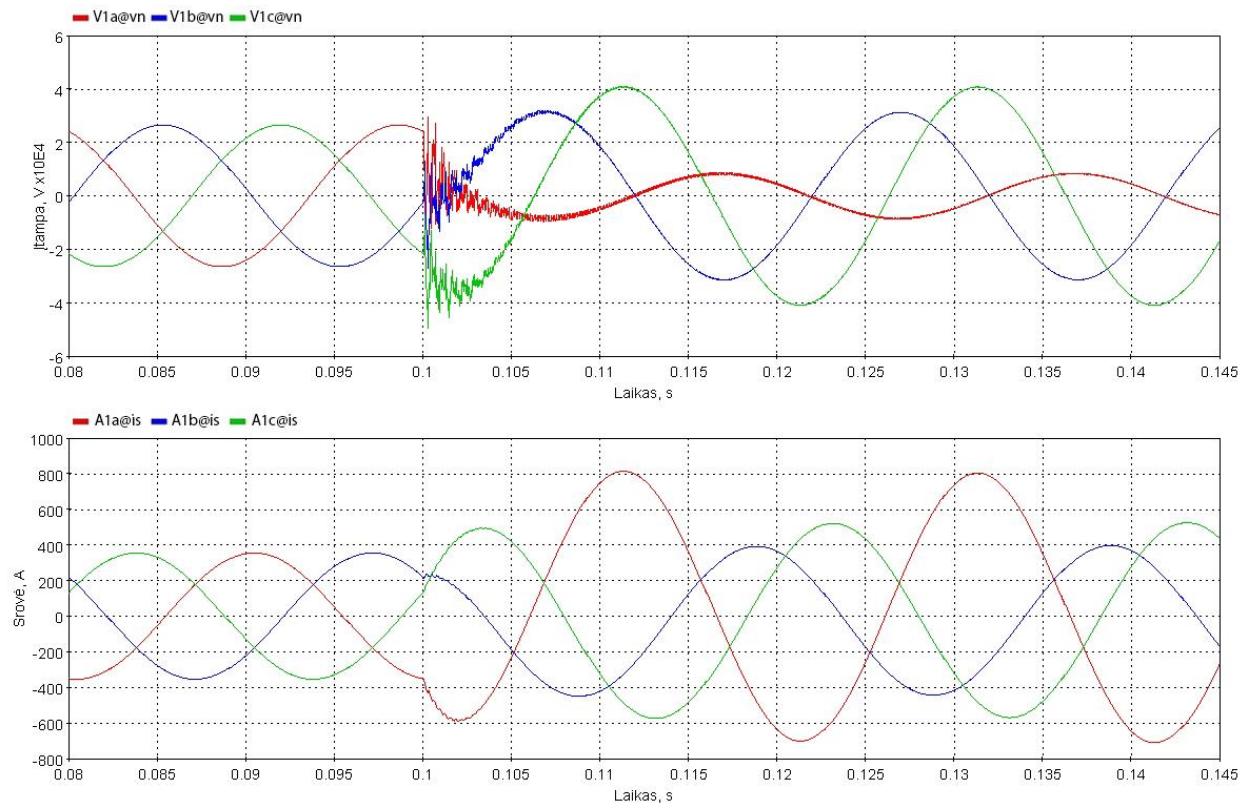
7.1. Vienos fazės pažaida linijos L-Nida gale esant skirtingoms apkrovoms

Vienfazė pažaida buvo modeliuojama, kai apkrova kito nuo 0 iki 16 MW. Galios faktorius apkrovai priimtas standartinis: $\cos\varphi = 0,9$.

1 lentelė. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	18,7	9,5	94	5275	35755	36068
2	103,9	58,5	61,9	1131	32827	34801
4	195,8	109,2	120,7	2150	30724	34069
6	275,0	152,3	175,1	3039	28824	33206
8	343,2	189,2	225,1	3806	27122	32319
10	401,9	221,2	270,8	4465	25617	31429
12	451,7	249,0	312,8	5043	24331	30482
14	498,2	274,5	351,0	5504	23083	29832
16	533,8	296,5	386,1	5957	22176	28847

Iš 1 lentelės duomenų matyti, kad Juodkrantės transformatorių pastotėje pažeistoje A fazėje teka apie 18,7 A talpinė srovė. Didėjant linijos apkrovai pažeistos fazės įtampa didėjo lyginant su žemės įtampa. Nepažeistose fazėse fazinė įtampa pasiekė linijinę įtampą prie nedidelės apkrovos (apie 0,5-1 MW). Didėjant apkrovai nepažeistų fazių fazinės įtampos mažėjo.



15 pav. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

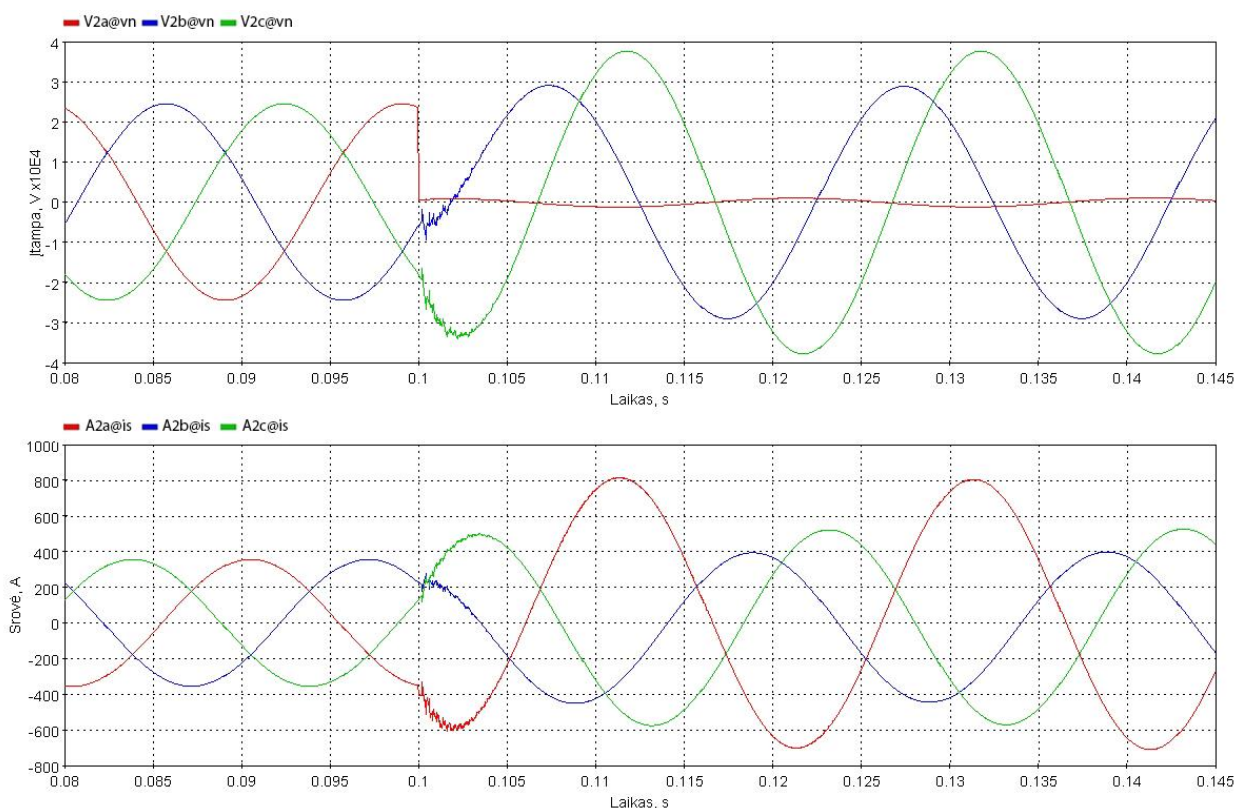
Paveiksle matyti, kad esant tokioms sąlygoms įžemėjimui įvykus L-Nida linijos gale, Juodkrantės transformatorių pastotėje padidėjo nepažeistų fazių įtampos amplitudė apie 1,4-1,6 karto. Pažeistos fazės amplitudinė įtampos vertė sumažėjo apie 2,5 karto. Srovės nepažeistose fazėse neženkliai išaugo, o fazėje, kurioje įvyko įžemėjimas srovės momentinė vertė padidėjo apie 2,2 karto.

Panašūs pereinamieji procesai vyko ir linijos L-Nida gale.

2 lentelė. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	21,9	0,1	0,3	32	35774	36086
2	104,0	59,8	63,1	158	32532	34481
4	195,9	110,5	121,9	296	30161	33437
6	275,2	153,5	176,3	414	28021	32277
8	343,4	190,4	226,3	514	26106	31107
10	402,1	222,2	272,1	600	24411	29949
12	452,0	250,0	314,0	672	22939	28760
14	498,5	275,5	352,2	738	21568	27837
16	534,1	297,5	387,3	788	20480	26657

Iš 2 lentelės duomenų matyti, kad didėjant linijos apkrovai pažeistos fazės įtampa neženkliai auga. Nepažeistose fazėse įtampa pasiekė linijinę įtampą esant nedidelei apkrovai (apie 0,5-1 MW). Didėjant apkrovai nepažeistų fazių fazinės įtampos mažėjo.



16 pav. Izoliuoto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

Paveiksle matyti, kad esant tokioms sąlygoms įvykus įžemėjimui L-Nida linijos gale, Nidos transformatorių pastotėje padidėjo nepažeistų fazių įtampos amplitudė apie 1,4-1,6 karto. Pažeistos fazės amplitudinė įtampa sumažėjo beveik iki nulio. Srovės nepažeistose fazėse neženkliai išaugo, o fazėje, kurioje įvyko įžemėjimas srovės momentinė vertė padidėjo apie 2,2 karto.

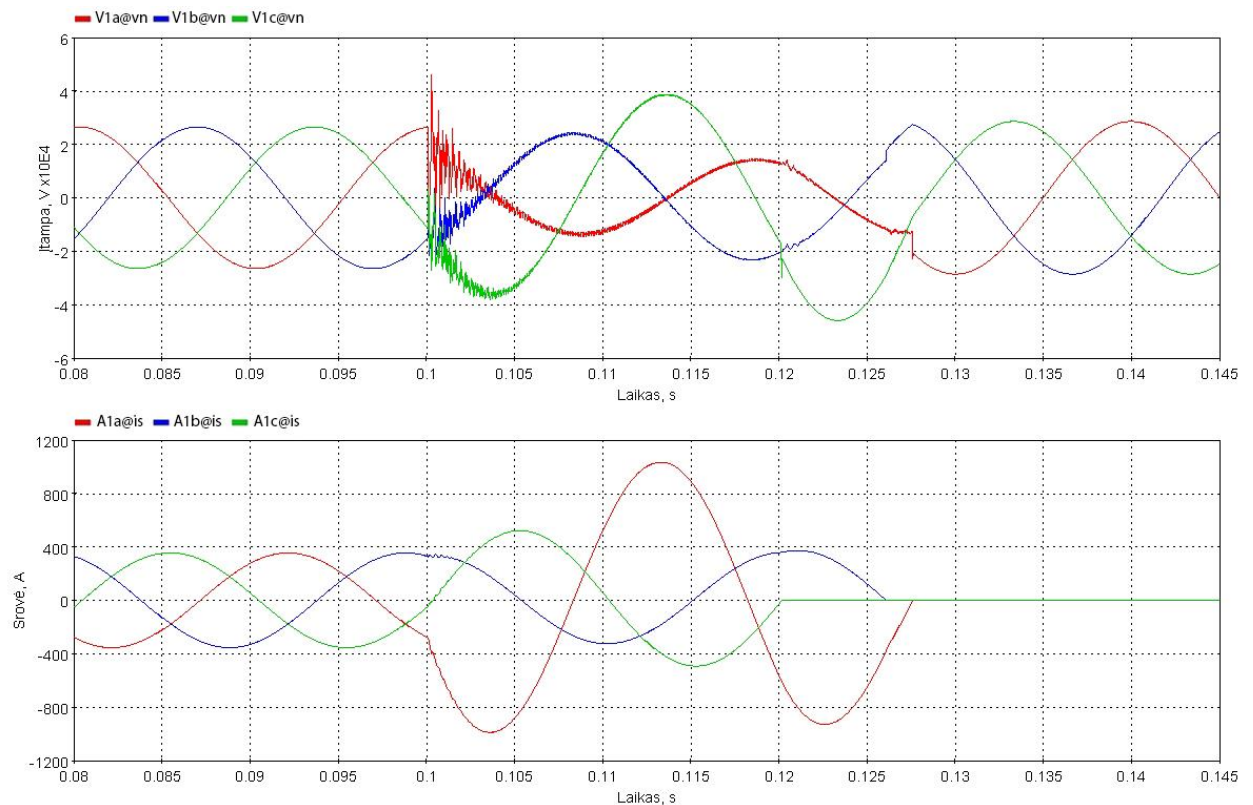
Tie patys matavimai buvo atlikti ir įžemintame per varžą tinkle. Tinklo varža modelyje padidinta iki 28Ω , kad vienfazis trumpasis jungimas Juodkrantės TP būtų ne didesnis nei 1000A.

3 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	512,8	1,9	2,8	8308	22545	34154
2	560,6	41,2	57,9	8633	21246	33149
4	600,9	78,6	112,1	8941	20207	32121
6	637,1	111,0	163,6	9149	19178	31311
8	665,7	142,2	208,5	9389	18531	30271
10	690,6	170,0	251,1	9572	17909	29376
12	713,3	195,7	290,5	9712	17363	28576
14	734,4	218,8	328,1	9803	16861	27891
16	751,2	240,7	362,5	9903	16480	27173

Iš 3 lentelės duomenų matyti, kad Juodkrantės transformatorių pastotėje pažeistoje A fazėje teka didelė trumpojo jungimo srovė. Didėjant linijos apkrovai pažeistos fazės įtampa didėjo lyginant su žemės įtampa. Nepažeistose fazėse įtampa pasiekė linijinę įtampą, kai nebuvo apkrovos (0 MW). Didėjant apkrovai nepažeistų fazių fazinės įtampos mažėjo.

Pastebima, kad per varžą įžemintame tinkle įtampos pasiskirsto tolygiau. Lyginant su izoliuotu tinklu, pažeistoje fazėje įtampa padidėjo vidutiniškai 3,5 karto. Tačiau ir padidėjusi įtampa neviršija normalaus darbo režimo įtampos, todėl šis vienos fazės įtampos padidėjimas nėra reikšmingas. Nepažeistose fazėse įtampa vidutiniškai sumažėjo apie 1,27 karto. Šis įtampos sumažėjimas turi didžiulę reikšmę įrenginiams ir jų izoliacijai.



17 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

Paveiksle matyti, kad esant tokioms sąlygoms įvykus trumpajam jungimui L-Nida linijos gale laiko momentu 0,1 s, Juodkrantės transformatorių pastotėje padidėjo C fazės įtampa apie 1,5 karto. Pažeistos fazės amplitudinė įtampa sumažėjo apie 1,5 karto. Srovės nepažeistose fazėse neženkliai išaugo arba nepakito, o A fazėje, kurioje įvyko trumpasis jungimas srovės momentinė vertė padidėjo apie 2,6 karto. Srovei A fazėje viršijus normalaus darbo ribas relinė apsauga su nedideliu laiko uždelsimu (apie 20 ms) atjungia linijinį jungtuvą ir likviduoja avariją. Kadangi Juodkrantės TP nėra vartotojų, srovė neteka, todėl atjungus linijinį jungtuvą įtampa pastotėje normalizuojasi, o srovė neteka.

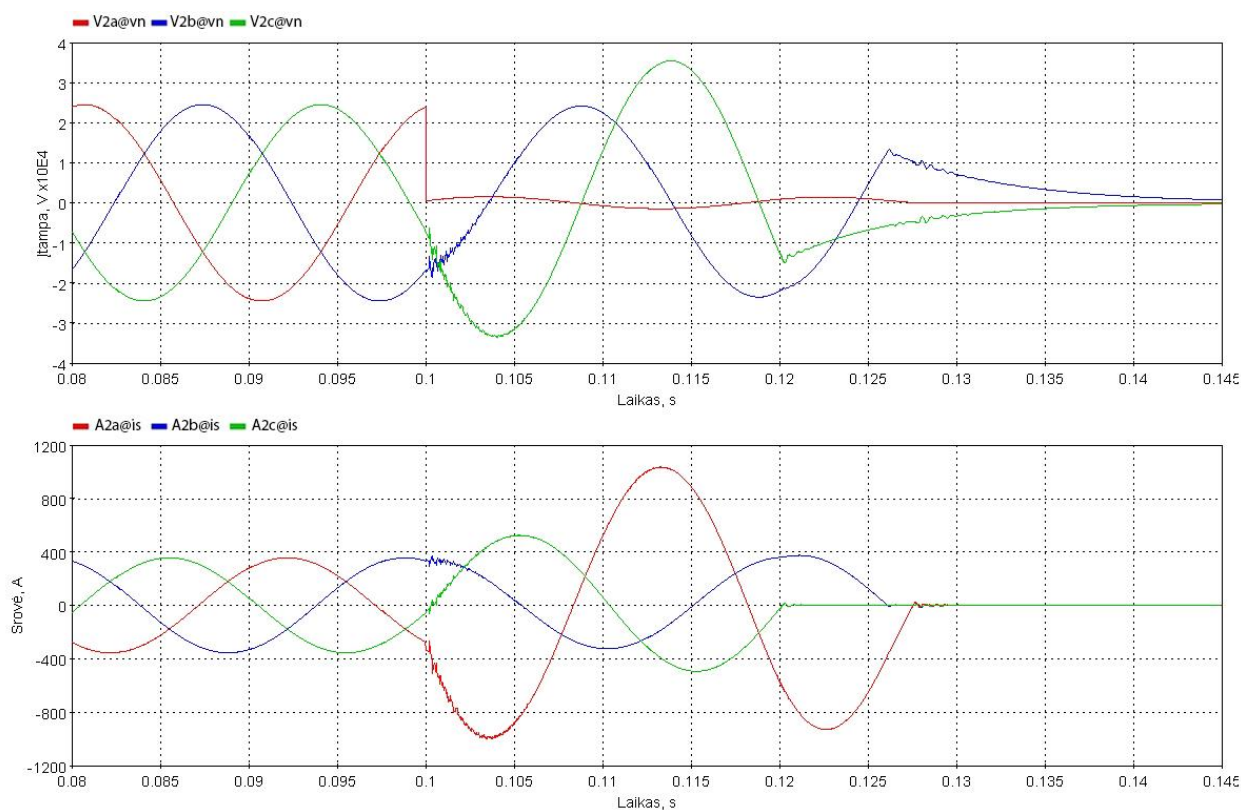
Panašūs pereinamieji procesai vyko ir linijos L-Nida gale.

4 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	513,2	0,1	0,1	770	24850	33758
2	561,0	42,0	59,0	839	23246	32498
4	601,4	79,4	113,2	898	21918	31227
6	637,6	111,9	164,7	949	20599	30164
8	666,1	143,0	209,6	990	19700	28901
10	691,0	170,7	252,2	1024	18823	27783
12	713,7	196,5	291,5	1056	18035	26765
14	734,8	219,5	329,1	1085	17287	25875
16	751,6	241,4	363,5	1107	16671	24965

Iš 4 lentelės duomenų matyti, kad didėjant linijos apkrovai pažeistos fazės įtampa yra labai nedidelė. Nepažeistose fazėse įtampa pasiekė linijinę įtampą, kai nebuvo apkrovos (0 MW). Didėjant apkrovai nepažeistų fazių įtampos mažėjo.

Kaip ir prieš tai, galime pastebėti, kad per varžą įžemintame tinkle įtampos pasiskirsto tolygiau. Lyginant su izoliuotos neutralės tinklu, nepažeistose fazėse įtampa vidutiniškai sumažėjo apie 1,2 karto. Kaip ir minėjau, šis įtampos sumažėjimas turi didžiulę reikšmę įrenginiams ir jų izoliacijai.



18 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

Paveiksle matyti, kad prie tokių sąlygų įvykus trumpajam jungimui L-Nida linijos gale, laiko momentu 0,1 s, Nidos transformatorių pastotėje padidėjo C fazės įtampos amplitudė apie 1,5 karto. Pažeistos fazės amplitudinė įtampa sumažėjo beveik iki nulio, nes žemės ir fazės potencialai tapo lygūs. Srovės nepažeistose fazėse neženkliai išaugo arba neišaugo, o fazėje, kurioje įvyko trumpasis jungimas srovės momentinė vertė padidėjo apie 2,6 karto.

Srovei A fazėje viršijus normalaus darbo ribas relinė apsauga su nedideliu laiko uždelsimu (apie 20 ms) atjungia linijinį jungtuvą ir likviduoja avariją. Kadangi tinklas nėra didelis, atjungus linijinį jungtuvą tinklas išsikrauna per 30 ms.

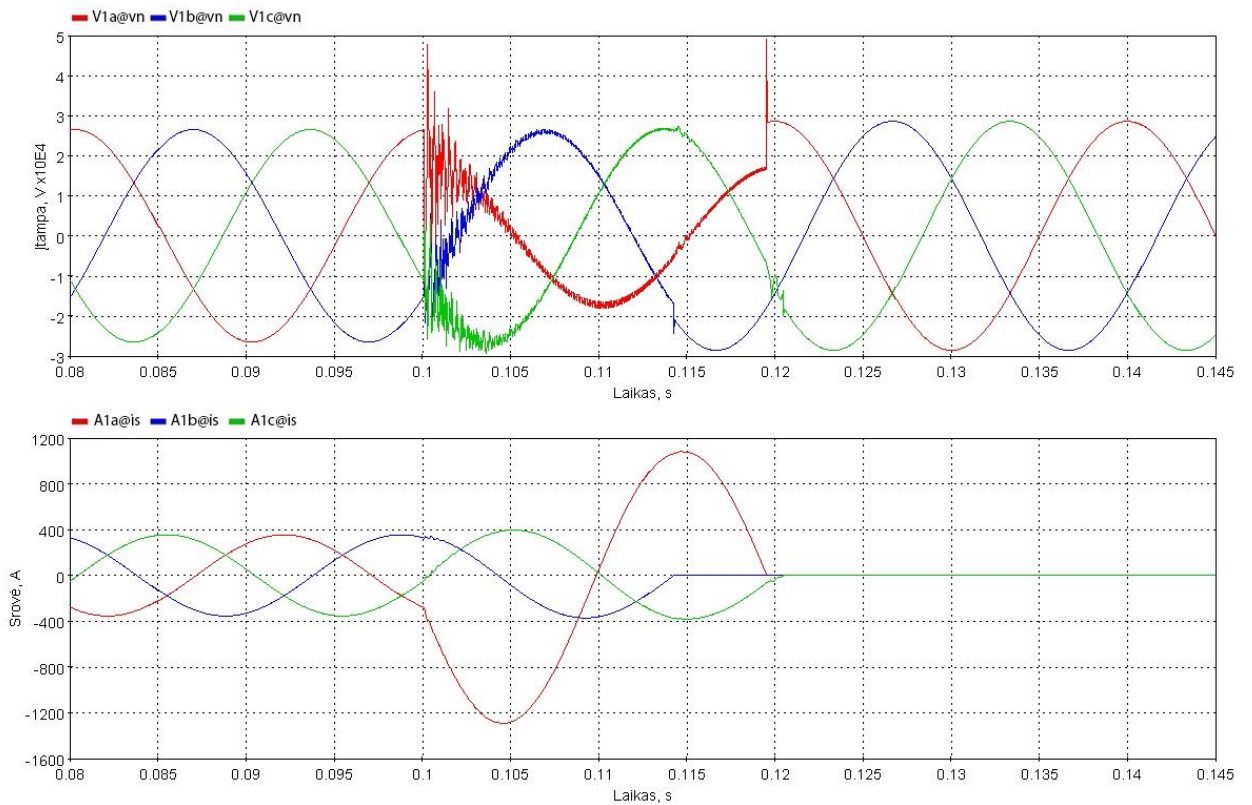
7.2. Vienos fazės pažaida linijos L-Nida gale esant skirtingoms transformatoriaus neutralės įžeminimo varžoms

Vienfazė pažaida buvo modeliuojama, kai apkrova buvo lygi 16 MW. Galios faktorius apkrovai priimtas standartinis: $\cos\varphi = 0,9$. Transformatoriaus neutralės įžeminimo varža buvo keičiama nuo 0 iki 30 Ω .

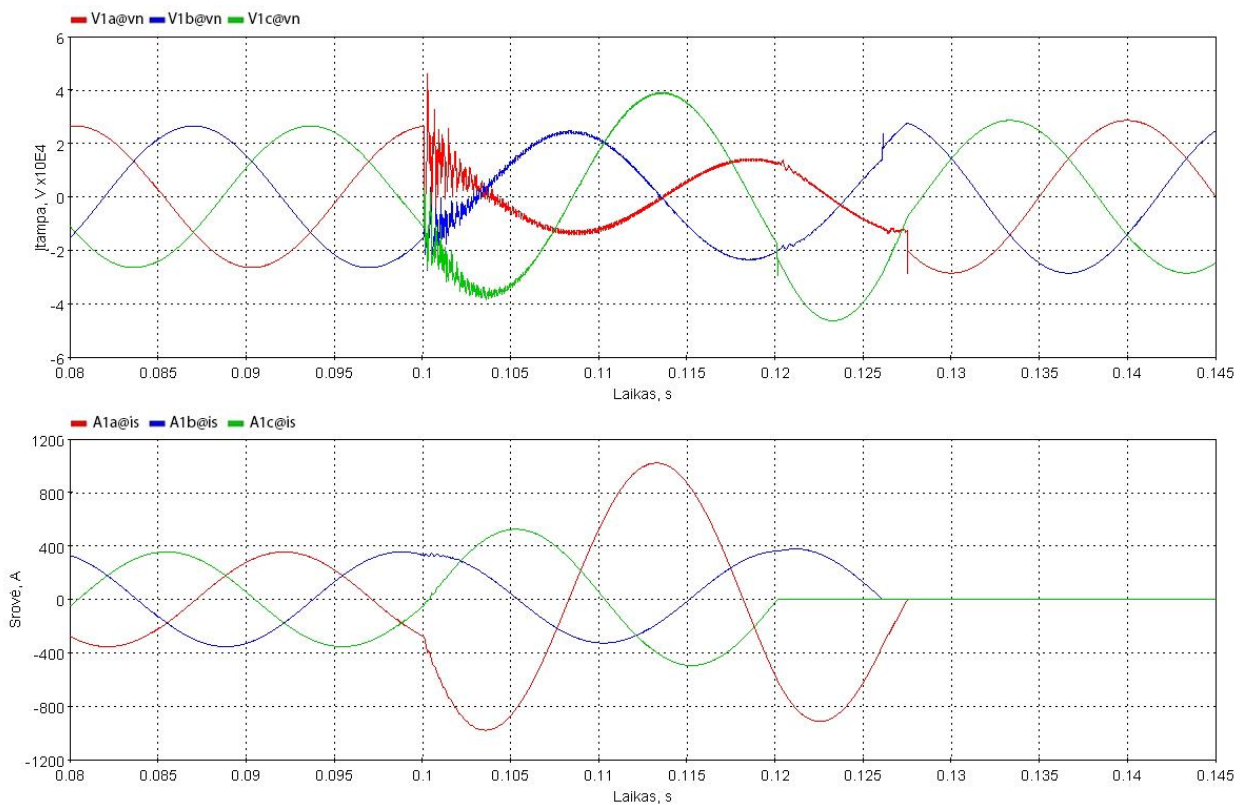
5 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant transformatoriaus neutralės varžai. Pažaida linijos L-Nida gale, linijos apkrova: 16 MW.

R, Ω	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	825,3	265,6	276,7	12331	18346	18780
3	839,1	251,2	289,4	12356	16941	20195
6	848,6	238,5	305,4	12105	15948	21782
9	841,8	233,1	317,4	11868	15355	23056
12	829,3	230,7	328,5	11562	15169	24114
15	816,9	230,8	337,4	11209	15172	25041
18	798,3	233,4	343,5	10923	15431	25632
21	783,2	235,7	349,8	10597	15728	26196
24	769,8	237,5	356,3	10269	16035	26705
27	769,3	237,5	356,3	10273	16043	26693
30	742,7	242,5	364,7	9738	16692	27359

Iš 5 lentelės duomenų matyti, kad naudojant 30 omų transformatoriaus neutralės įžeminimo varžą galime sumažinti fazių įtampą vidutiniškai iki 1,2 karto. Reikia paminėti, kad C fazės įtampa išaugo net 1,4 karto. Naudojant neutralės varžą galime sumažinti vienfazių trumpųjų jungimų vertes.



19 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Transformatoriaus neutralės varža 0Ω , linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.



20 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Transformatoriaus neutralės varža 28Ω , linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

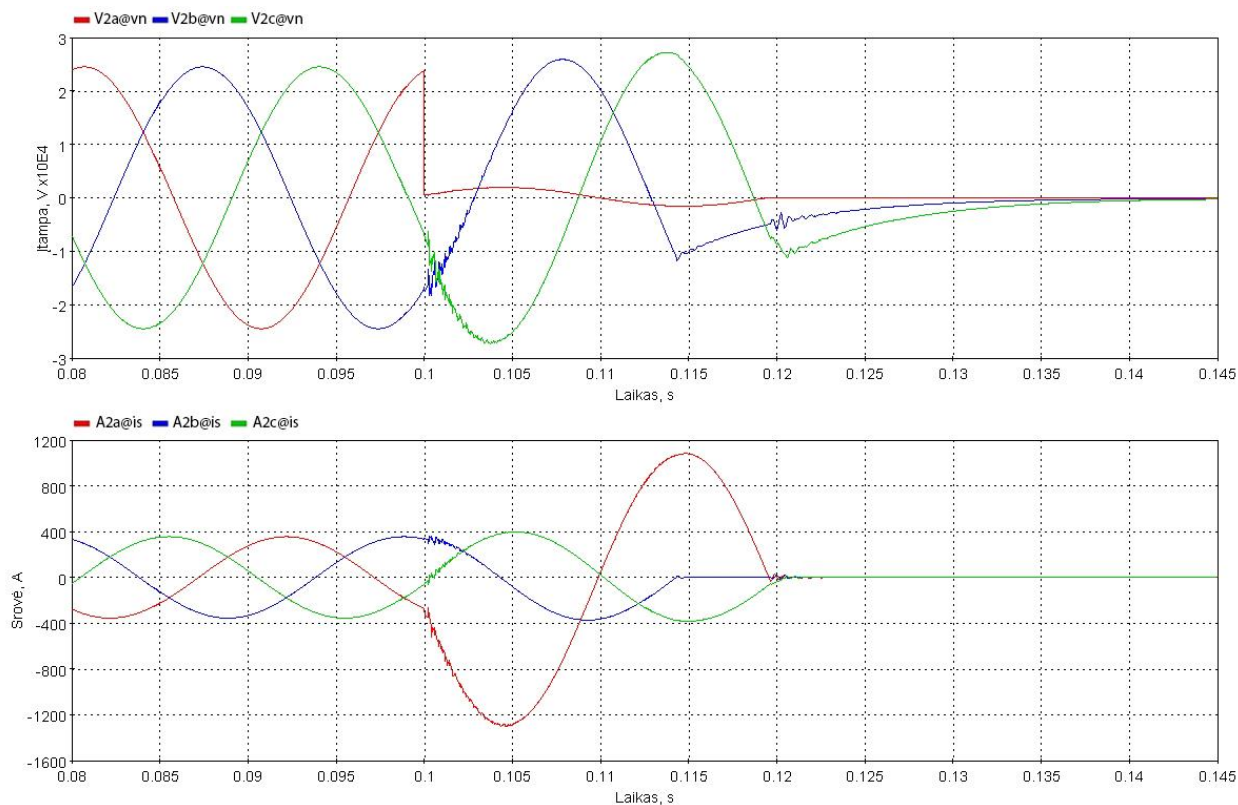
Lygindami 19 ir 20 paveikslėlius, galime pastebėti, kad neutralės varža turi įtaką pereinamiesiems vyksmams. Štai pažeistosios fazės viršįtampiai sumažėjo, tačiau C fazės padidėjo apie 1,4 karto.

Panašūs pereinamieji procesai vyko ir linijos L-Nida gale.

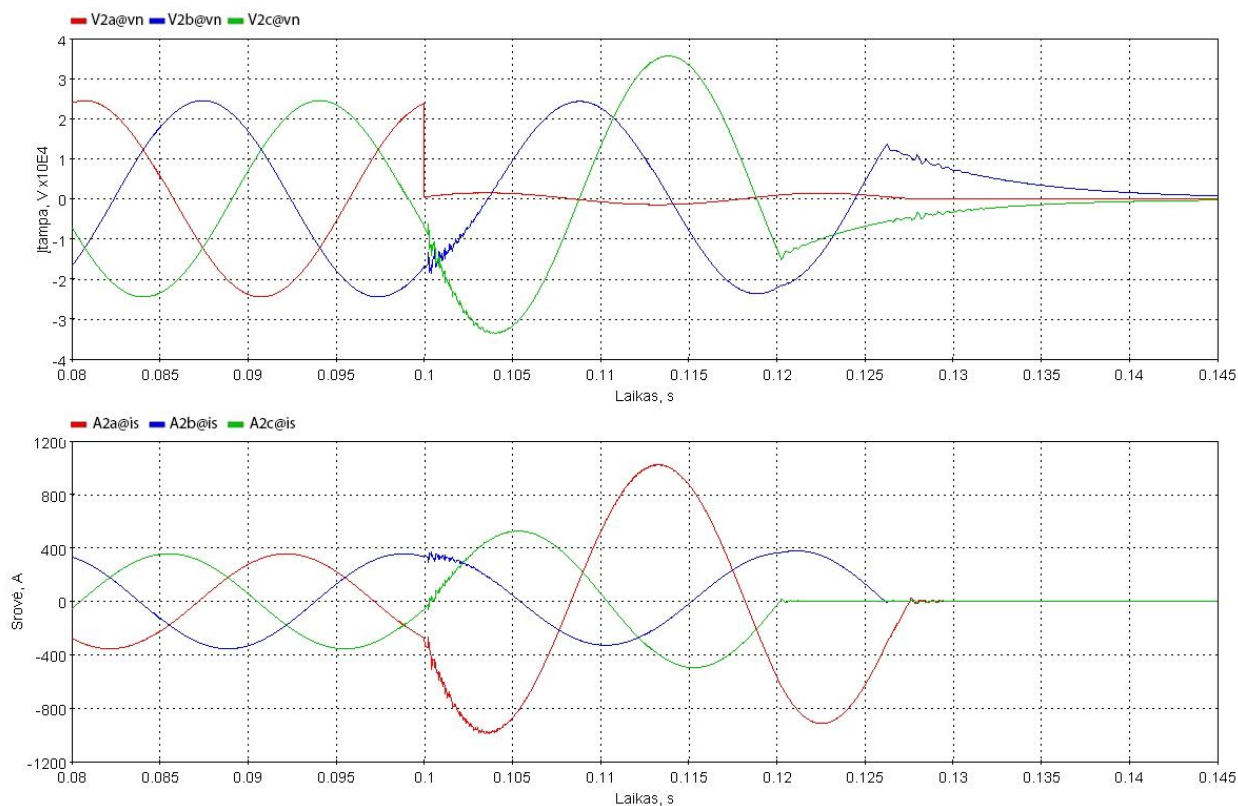
6 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant transformatoriaus neutralės varžai. Pažaida linijos L-Nida gale, linijos apkrova: 16 MW.

R, Ω	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	825,8	266,6	277,4	1216	18297	19157
3	839,7	252,1	290,2	1236	17328	19969
6	849,2	239,3	306,2	1250	16571	21027
9	842,4	233,8	318,3	1240	16152	21880
12	829,9	231,4	329,4	1222	15995	22622
15	817,4	231,6	338,3	1204	15943	23305
18	798,8	234,2	344,5	1177	16109	23724
21	783,6	236,5	350,8	1154	16268	24160
24	770,3	238,3	357,3	1135	16417	24578
27	769,8	238,2	357,3	1134	16424	24569
30	743,2	243,3	365,8	1095	16799	25120

Iš 6 lentelės duomenų matyti, kad naudojant 30 Ω transformatoriaus neutralės įžeminimo varžą galime sumažinti B fazės įtampą vidutiniškai iki 1,1 karto. Reikia paminėti, kad C fazės įtampos amplitudė išaugo net 1,3 karto. Naudojant neutralės varžą galime sumažinti vienfazių trumpųjų jungimų vertes. Panaudojus 30 Ω neutralės varžą vienfazį trumpąjį jungimą sumažinome 87 A.



21 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Transformatoriaus neutralės varža 0Ω , linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.



22 pav. Per varžą įžeminto tinklo vienfazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Transformatoriaus neutralės varža 28Ω , linijos L-Nida apkrova 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

Lygindami 21 ir 22 paveikslėlius, galime pastebėti, kad neutralės varža turi įtaką pereinamiesiems vyksmams. Matyti, kad panaudojus 30 omų varžą C fazės įtampos amplitudė padidėjo apie 1,3 karto.

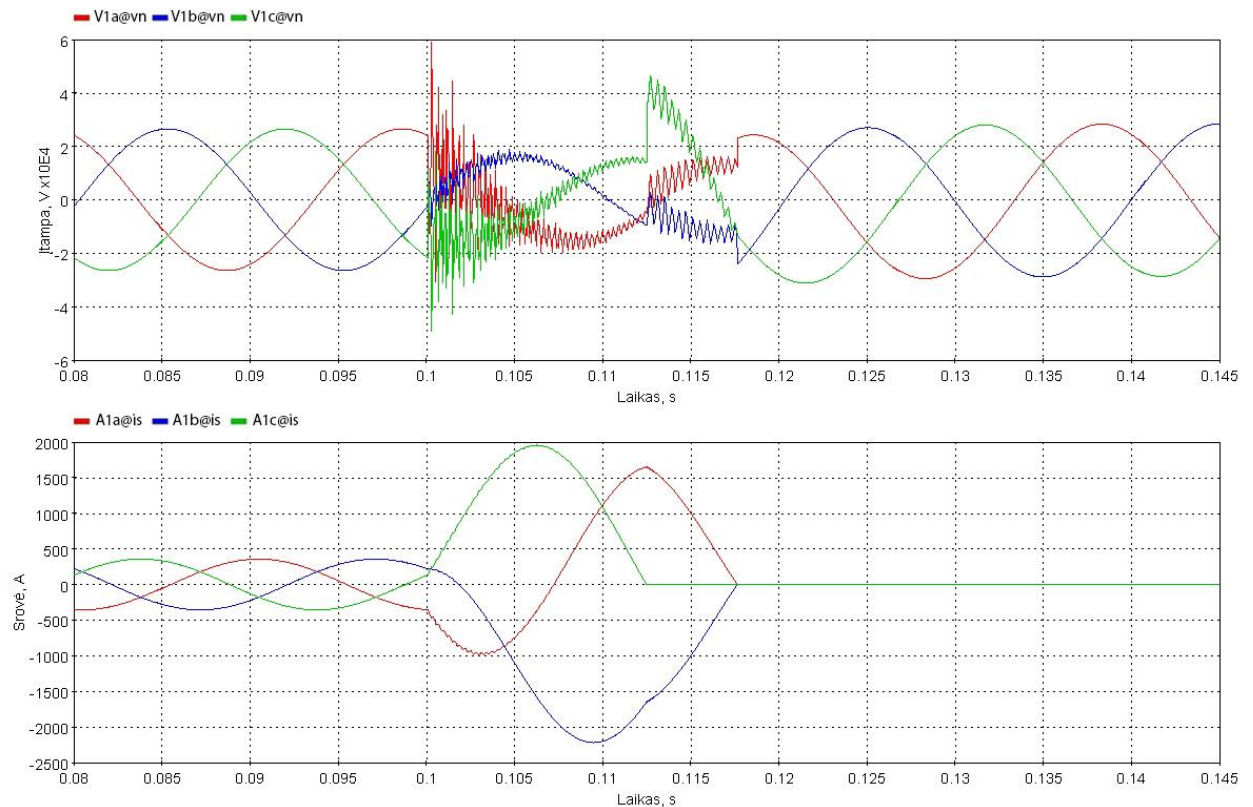
7.3. Trifazė pažaida linijos L-Nida gale esant skirtingoms apkrovoms

Trifazė pažaida buvo modeliuojama, kai apkrova kito nuo 0 iki 16 MW. Galios faktorius apkrovai priimtas standartinis: $\cos\varphi = 0,9$.

7 lentelė. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	971,5	1005,9	983,2	10988	10819	10993
2	970,6	1002,3	985,4	10982	10840	10970
4	969,9	1001,7	985,3	10982	10832	10961
6	967,6	997,1	984,7	10997	10823	10963
8	968,5	996,1	986,6	10979	10843	10940
10	968,4	988,9	985,7	10971	10855	10949
12	966,2	989,7	985,2	10994	10832	10936
14	968,9	988,0	988,2	10948	10877	10910
16	966,8	985,2	985,5	10975	10849	10920

Iš 7 lentelės duomenų matyti, kad Juodkrantės transformatorių pastotėje pažeistose fazėse teka apie 980 A trumpojo jungimo srovės. Didėjant linijos apkrovai pažeistų fazių įtampa ir srovė beveik nekito.



23 pav. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

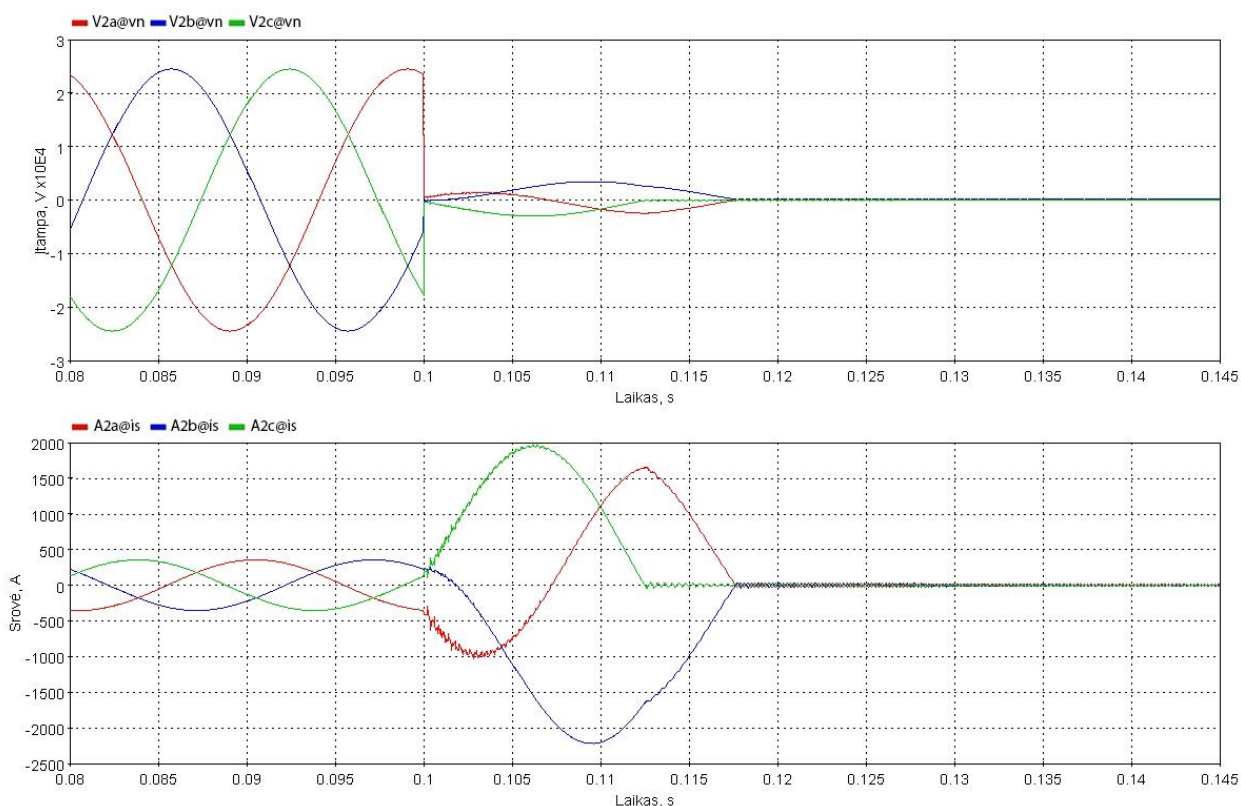
Paveiksle matyti, kad prie tokių sąlygų įvykus trifaziam trumpajam jungimui L-Nida linijos gale, Juodkrantės transformatorių pastotėje padidėjo pažeistų fazių įtampos momentinė vertė apie 2 kartus. Srovės pažeistose fazėse ženkliai išaugo (iki 5 kartų lyginant su normaliu darbo režimu).

Panašūs pereinamieji procesai vyko ir linijos L-Nida gale.

8 lentelė. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	972,0	1006,4	983,7	1458	1509	1475
2	971,1	1002,8	985,9	1453	1503	1476
4	970,4	1002,1	985,8	1449	1500	1473
6	968,1	997,5	985,1	1442	1491	1469
8	969,0	996,6	987,1	1440	1488	1469
10	968,9	989,4	986,2	1437	1475	1465
12	966,7	990,2	985,6	1430	1473	1461
14	969,4	988,4	988,7	1430	1469	1463
16	967,3	985,6	986,0	1423	1461	1457

Iš 8 lentelės duomenų matyti, kad Nidos transformatorių pastotėje pažeistose fazėse teka taip pat apie 980 A trumpojo jungimo srovės. Didėjant linijos apkrovai pažeistų fazių įtampa beveik nekito.



24 pav. Izoliuoto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

Paveiksle matyti, kad prie tokių sąlygų įvykus trifaziam trumpajam jungimui L-Nida linijos gale, Nidos transformatorių pastotėje sumažėjo pažeistų fazių įtampos momentinė vertė iki 1500V fazinės įtampos ir tai yra apie 7% likutinės įtampos trumpojo jungimo vietoje. Srovės pažeistose fazėse ženkliai išaugo (iki 5 kartų lyginant su normaliu darbo režimu).

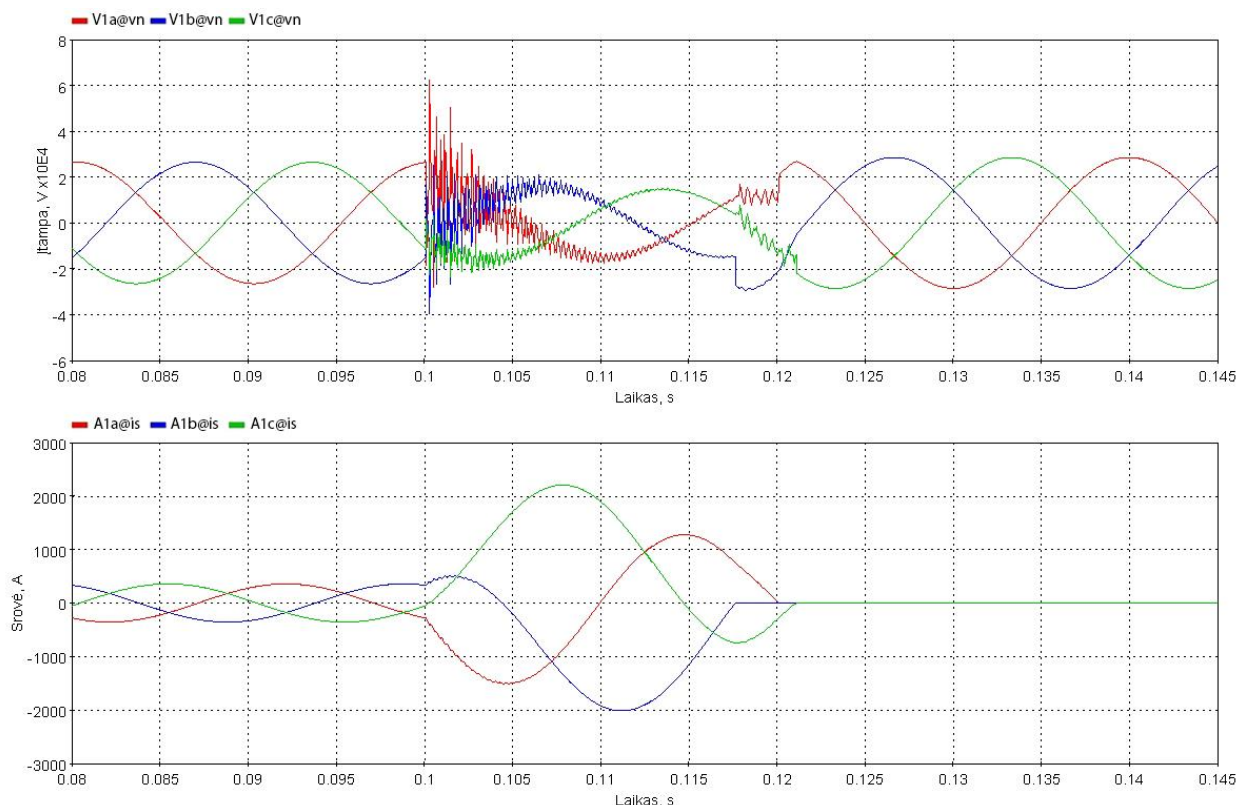
Tie patys matavimai buvo atlikti ir žemintame per varžą tinkle. Tinklo varža modelyje padidinta iki 28 Ω , kad vienfazis trumpasis jungimas Juodkrantės TP būtų nedidesnis nei 1000A.

9 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Juodkrantės TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	968,7	994,6	1011,2	11108	10910	10912
2	966,1	991,6	1009,5	11141	10902	10882
4	963,5	991,6	1008,3	11176	10891	10867
6	970,2	986,3	1008,3	11082	10922	10881
8	969,5	981,3	1004,7	11101	10929	10865
10	971,6	978,8	1002,7	11077	10934	10871
12	970,8	979,2	1003,4	11072	10929	10854
14	971,4	977,6	1002,0	11061	10931	10849
16	970,8	979,0	1001,7	11058	10915	10842

Iš 9 lentelės duomenų matyti, kad Juodkrantės transformatorių pastotėje pažeistose fazėse teka apie 980 A trumpojo jungimo srovė. Didėjant linijos apkrovai pažeistų fazių įtampa beveik nekito.

Galime pastebėti, kad trifazio trumpojo jungimo metu per varžą įžemintame tinkle įtampos pasiskirsto labai panašiai kaip ir izoliuotame tinkle. Iš to galime daryti prielaidą, kad transformatoriaus neutralės varža neįtakoja trifazių trumpųjų jungimų.



25 pav. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Juodkrantės TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

Paveiksle matyti, kad prie tokių sąlygų įvykus trifaziam trumpajam jungimui L-Nida linijos gale laiko momentu 0,1 s, Juodkrantės transformatorių pastotėje padidėjo momentinė

fazių įtampa apie 2,1 karto. Srovės pažeistose fazėse ženkliai išaugo (apie 5 kartus lyginant su normalaus darbo režimu). Srovei A, B ar C fazėje viršijus normalaus darbo ribas relinė apsauga su nedideliu laiko uždelsimu (apie 20 ms) atjungia linijinį jungtuvą ir likviduoja avariją. Kadangi Juodkrantės TP nėra vartotojų, srovė neteka, todėl atjungus linijinį jungtuvą įtampa pastotėje normalizuojasi, o srovė neteka.

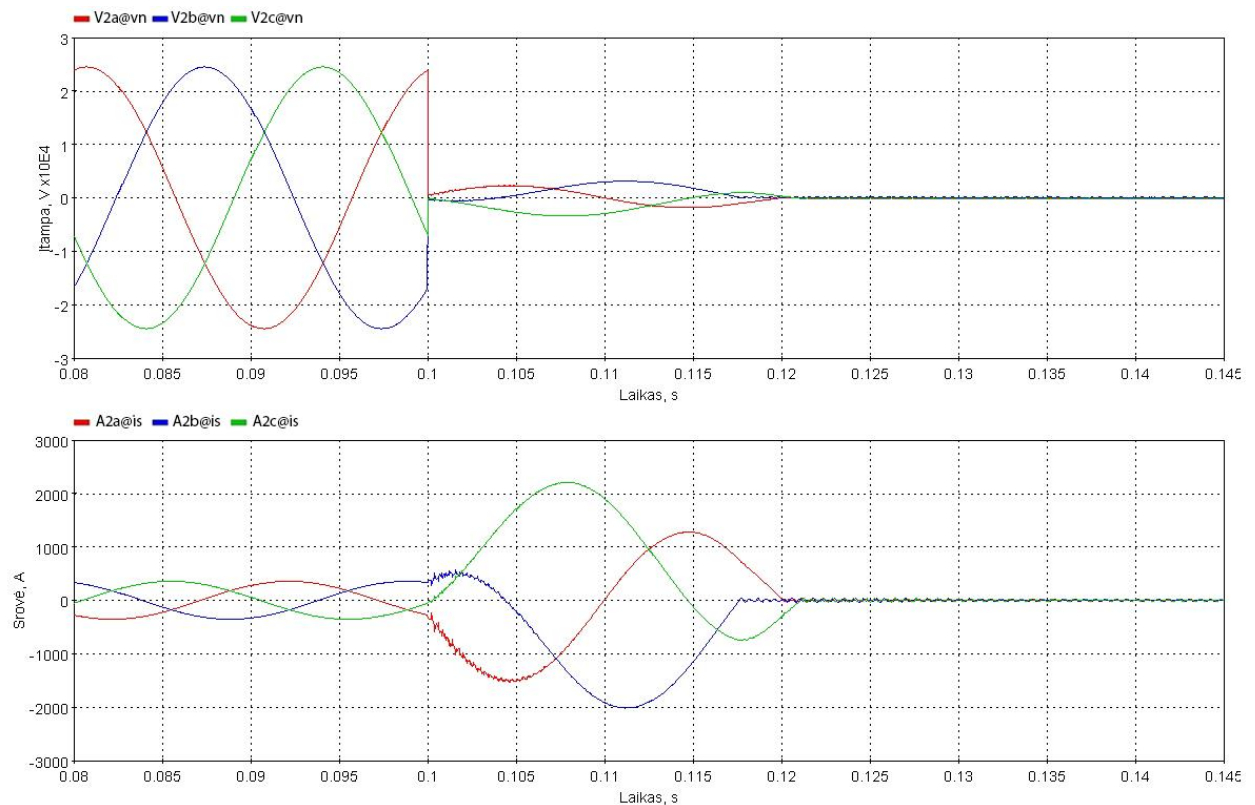
Panašūs pereinamieji procesai vyko ir linijos L-Nida gale.

10 lentelė. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos vidutiniai matavimai Nidos TP kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C
0	969,2	995,0	1011,7	1454	1492	1517
2	966,6	992,1	1009,9	1446	1487	1513
4	964,0	992,0	1008,8	1442	1486	1512
6	970,7	986,8	1008,8	1445	1475	1509
8	970,0	981,8	1005,1	1441	1465	1502
10	972,1	979,3	1003,1	1441	1458	1497
12	971,3	979,7	1003,9	1436	1456	1496
14	971,9	978,1	1002,5	1434	1450	1492
16	971,3	979,5	1002,2	1430	1449	1489

Iš 10 lentelės duomenų matyti, kad Nidos transformatorių pastotėje pažeistose fazėse teka taip pat apie 980 A trumpojo jungimo srovės. Didėjant linijos apkrovai pažeistų fazių įtampa beveik nekito arba pasikeitė labai nedaug.

Kaip ir prieš tai, galime pastebėti, kad trifazio trumpojo jungimo metu per varžą įžemintame tinkle įtampos pasiskirsto labai panašiai kaip ir izoliuotame tinkle. Iš to galime daryti prielaidą, kad transformatoriaus neutralės varža neįtakoja trifazių trumpųjų jungimų.



26 pav. Per varžą įžeminto tinklo trifazės pažaidos pereinamųjų vyksmų grafikas Nidos TP. Linijos L-Nida apkrova: 16 MW, pažaida linijos L-Nida gale.

Paveiksle matyti, kad prie tokių sąlygų įvykus trifaziam trumpajam jungimui L-Nida linijos gale, Nidos transformatorių pastotėje sumažėjo pažeistų fazių įtampos momentinė vertė iki 1500V fazinės įtampos ir tai yra apie 7% likutinės įtampos trumpojo jungimo vietoje. Srovės pažeistose fazėse ženkliai išaugo (iki 5 kartų lyginant su normaliu darbo režimu).

Srovei A fazėje viršijus normalaus darbo ribas relinė apsauga su nedideliu laiko uždelsimu (apie 20 ms) atjungia linijinį jungtuvą ir likviduoja avariją.

8. MODELIAVIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

8.1. Vienos fazės pažaidos linijos L-Nida gale apibendrinimas

Sumodeliavus vienfazę pažaidą skirtingais transformatorių neutralių režimais, galima palyginti gautus rezultatus. 11 lentelėje pateikiama Juodkrantės TP sumodeliuotų skirtingų transformatorių neutralių režimų lyginamoji informacija.

11 lentelė. Sumodeliuotų transformatorių neutralių režimų palyginimas vienfazės pažaidos metu, Juodkrantės TP, kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	IZOLIUOTA						PER VARŽĄ IŽEMINTA					
	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V			SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0	18,7	9,5	9,4	5275	35755	36068	512,8	1,9	2,8	8308	22545	34154
2	103,9	58,5	61,9	1131	32827	34801	560,6	41,2	57,9	8633	21246	33149
4	195,8	109,2	120,7	2150	30724	34069	600,9	78,6	112,1	8941	20207	32121
6	275,0	152,3	175,1	3039	28824	33206	637,1	111,0	163,6	9149	19178	31311
8	343,2	189,2	225,1	3806	27122	32319	665,7	142,2	208,5	9389	18531	30271
10	401,9	221,2	270,8	4465	25617	31429	690,6	170,0	251,1	9572	17909	29376
12	451,7	249,0	312,8	5043	24331	30482	713,3	195,7	290,5	9712	17363	28576
14	498,2	274,5	351,0	5504	23083	29832	734,4	218,8	328,1	9803	16861	27891
16	533,8	296,5	386,1	5957	22176	28847	751,2	240,7	362,5	9903	16480	27173

Iš 11 lentelės galima nustatyti, kad linijos L-Nida gale įvykus vienfazei pažaidai, tinkle su per varžą ižeminta transformatoriaus neutrals viršįtampiai pasiskirsto tolygiau.

Pažeistoje A fazėje įtampa padidėjo 60 % (9903 V). Tačiau ši įtampa yra gerokai mažesnė, nei normaliu darbo režimu, todėl žalos įrenginiams ar jų izoliacijai nepadaro.

B fazėje įtampa sumažėjo 30 % (16480 V). Ši įtampos vertė taip pat gerokai mažesnė, nei normaliu darbo režimu, todėl žalos įrenginiams nepadaro.

C fazėje įtampa sumažėjo 5 % (27173 V). Ši įtampos vertė yra didesnė, nei normaliu darbo režimu, todėl gali padaryti žalos įrenginiams.

Srovė pažeistoje fazėje priklauso nuo transformatoriaus neutralės dydžio. Šio atveju, per varžą ižemintoje neutralėje srovė pažeistoje fazėje yra 220 A didesnė lyginant su izoliuotos neutralės tinklu. Nepažeistose fazėse srovių vertės labai panašios.

Remiantis 15 ir 17 paveikslėliais, taip mat matome, kad pažeistos fazės momentinis įtampos šuolis laiko momentu $t(+0,1s)$ didesnis su per varžą ižemintame tinkle (~45000 V). Tuo tarpu izoliuotame tinkle šis įtampos šuolis siekia tik ~ 30000 V.

Nepažeistoje fazėje momentinis įtampos šuolis laiko momentu $t(+0,1s)$ mažesnis su per varžą ižemintame tinkle (~35000 V). Tuo tarpu izoliuotame tinkle šis įtampos šuolis siekia ~ 49000 V.

Analogiškai galima palyginti Nidoje vykusių procesus. 12 lentelėje pateikiama Nidos TP sumodeliuotų skirtingų transformatorių neutralių režimų lyginamoji informacija.

12 lentelė. Sumodeliuotų transformatorių neutralių režimų palyginimas vienfazės pažaidos metu, Nidos TP, kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	IZOLIUOTA						PER VARŽĄ IŽEMINTA					
	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V			SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0	21,9	0,1	0,3	32	35774	36086	513,2	0,1	0,1	770	24850	33758
2	104,0	59,8	63,1	158	32532	34481	561,0	42,0	59,0	839	23246	32498
4	195,9	110,5	121,9	296	30161	33437	601,4	79,4	113,2	898	21918	31227
6	275,2	153,5	176,3	414	28021	32277	637,6	111,9	164,7	949	20599	30164
8	343,4	190,4	226,3	514	26106	31107	666,1	143,0	209,6	990	19700	28901
10	402,1	222,2	272,1	600	24411	29949	691,0	170,7	252,2	1024	18823	27783
12	452,0	250,0	314,0	672	22939	28760	713,7	196,5	291,5	1056	18035	26765
14	498,5	275,5	352,2	738	21568	27837	734,8	219,5	329,1	1085	17287	25875
16	534,1	297,5	387,3	788	20480	26657	751,6	241,4	363,5	1107	16671	24965

Iš 12 lentelės galima nustatyti, kad linijos L-Nida gale įvykus vienfazei pažaidai, tinkle su per varžą ižeminta transformatoriaus neutrals viršįtampiai pasiskirsto tolygiau.

Pažeistoje A fazėje įtampa padidėjo 40% (1107 V). Tačiau ši įtampa yra gerokai mažesnė, nei normaliu darbo režimu, todėl žalos įrenginiams ar jų izoliacijai nepadaro.

B fazėje įtampa sumažėjo 24% (16671 V). Ši įtampos vertė taip pat gerokai mažesnė, nei normaliu darbo režimu, todėl žalos įrenginiams nepadaro.

C fazėje įtampa sumažėjo 6% (24965 V). Ši įtampos vertė yra didesnė, nei normaliu darbo režimu, todėl gali padaryti žalos įrenginiams.

Srovė pažeistoje fazėje priklauso nuo transformatoriaus neutralės dydžio. Šiuo atveju, per varžą ižemintoje neutralėje srovė pažeistoje fazėje yra 220 A didesnė lyginant su izoliuotos neutralės tinklu. Nepažeistose fazėse srovių vertės labai panašios.

Remiantis 16 ir 18 paveikslėliais, taip pat matome, kad pažeistos fazės momentinis įtampos šuolis laiko momentu $t(+0,1s)$ praktiškai lygus nuliui. Liekamoji įtampa trumpojo jungimo vietoje lygi apie 5% įtampos normaliu darbo metu.

Nepažeistose fazėse momentiniai įtampos šuoliai laiko momentu $t(+0,1s)$ labai panašūs tiek per varžą ižemintame tinkle, tiek izoliuotos neutralės tinkle.

8.2. Trifazės pažaidos linijos L-Nida gale apibendrinimas

Sumodeliavus trifazę pažaidą skirtingais transformatorių neutralių režimais, galime palyginti gautus rezultatus. 13 lentelėje pateikiama Juodkrantės TP sumodeliuotų skirtingų transformatorių neutralių režimų lyginamoji informacija.

13 lentelė. Sumodeliuotų transformatorių neutralių režimų palyginimas trifazės pažaidos metu, Juodkrantės TP, kintant linijos L-Nida apkrovai. Pažaida linijos L-Nida gale.

P, MW	IZOLIUOTA						PER VARŽĄ ĮŽEMINTA					
	SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V			SROVĖ, A			FAZINĖ ĮTAMPA, V		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0	971,5	1005,9	983,2	10988	10819	10993	968,7	994,6	1011,2	11108	10910	10912
2	970,6	1002	985,4	10982	10840	10970	966,1	991,6	1009,5	11141	10902	10882
4	969,9	1001	985,3	10982	10832	10961	963,5	991,6	1008,3	11176	10891	10867
6	967,6	997,1	984,7	10997	10823	10963	970,2	986,3	1008,3	11082	10922	10881
8	968,5	996,1	986,6	10979	10843	10940	969,5	981,3	1004,7	11101	10929	10865
10	968,4	988,9	985,7	10971	10855	10949	971,6	978,8	1002,7	11077	10934	10871
12	966,2	989,7	985,2	10994	10832	10936	970,8	979,2	1003,4	11072	10929	10854
14	968,9	988,0	988,2	10948	10877	10910	971,4	977,6	1002,0	11061	10931	10849
16	966,8	985,2	985,5	10975	10849	10920	970,8	979,0	1001,7	11058	10915	10842

Iš 13 lentelės galima nustatyti, kad linijos L-Nida gale įvykus trifazei pažaidai, tiek tinkle su izoliuota neutrale, tiek tinkle su per varžą įžeminta neutrale įtampos ir srovės pasiskirsto labai panašiai. Todėl galime daryti išvadą, kad transformatoriaus neutralės varža neįtakoja trifazių trumpųjų jungimų procesų.

IŠVADOS

1. Izoliuotos neutralės tinkle vienfazės pažaidos, nepažeistose fazėse, sukelia viršįtampius, po jų seka nesimetrinis darbo režimas, kuris gali tęstis net iki kelių valandų. Šis režimas yra pavojingas įrenginiams ir jų izoliacijai, ypač kabelinėms linijoms, nes linijinė įtampa padidėja 1,73 karto.
2. Norint ženkliai sumažinti atjungimų skaičių, daugelis autorių siūlo orines linijas keisti į kabelines. Šiuo atveju, būtina įžeminti transformatoriaus neutralę per atitinkamo dydžio varžą, tam, kad nebūtų pakenkta kabelio izoliacijai.
3. Vienfazės pažaidos metu, esant 16 MW linijos L-Nida apkrovai, per varžą įžemintame tinkle faziniai viršįtampiai lygūs: A – 9903 V; B – 16480 V; C – 27173 V. Izoliuotame tinkle faziniai viršįtampiai lygūs: A – 5957 V; B – 22176 V; C – 28847 V. A fazėje fazinė įtampa vidutiniškai padidėjo ~60%, B fazėje sumažėjo ~30%, C fazėje sumažėjo ~5%.
4. Transformatoriaus neutralės varža įtakoja vienfazio trumpojo jungimo vertę. Padidinus neutralės varžą iki 28 Ω Juodkrantės TP vienfazė trumpojo jungimo srovė sumažėjo iki 953 A. Padidinus neutralės varžos dydį nuo 0 Ω iki 30 Ω C fazės įtampa išaugo 1,4 karto.
5. Trifazės pažaidos metu, esant 16 MW linijos L-Nida apkrovai, per varžą įžemintame tinkle fazinės įtampos: A – 11058 V; B – 10915 V; C – 10842 V. Izoliuotame tinkle fazinės įtampos: A – 10975 V; B – 10849 V; C – 10920 V. Tiek izoliuotame, tiek per varžą įžemintame tinkle įtampos ir srovės labai panašios todėl, kad neutralės varža neįtakoja trifazių trumpųjų jungimų.

9. LITERATŪRA

1. HÄNNINEN, Seppo, et al. *Single phase earth faults in high impedance grounded networks: characteristics, indication and location* [interaktyvus]. VTT Technical Research Centre of Finland, 2001. [žiūrėta 2017 m. Balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą:
<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/2212/isbn9513859614.pdf?sequence=1>
2. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTRO ĮSAKYMAS. *DĖL ELEKTROS ĮRENGINIŲ ĮRENGIMO BENDRŲJŲ TAISYKLIŲ PATVIRTINIMO* [interaktyvus]. Vilnius, 2012 [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą:
<https://e-tar.lt/acc/legalAct.html?documentId=TAR.6AF8895BD875&lang=lt>
3. ROBERTS, Jeff; ALTUVE, Hector J.; HOU, Daqing. *Review of ground fault protection methods for grounded ungrounded and compensated distribution systems*. In: 28th Annual Western Protective Relay Conf. Spokane [interaktyvus], Washington, 2001. [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą:
<https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6123.pdf>
4. INGO, Kühnen. *Earth Fault Detection Basics in Theory* [interaktyvus]. Kempen, Germany 2010. [žiūrėta 2017 m. Balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą:
https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi3svXP2ZzTAhUGWYwKHTu8CdMQFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.woodward.com%2FuploadedFiles%2FEPS%2FProducts%2FImages%2FFPS%2FEarth_Fault_Detection_20100416.pdf&usq=AFQjCNG6vGFHsmVHISvi0kbux5hWmEpduA&sig2=EZZ-LhnoEjVSqLgaFJ34qQ&bvm=bv.152180690,d.bGg
5. SAKALAUŠKAS, Tomas. *RELINĖS APSAUGOS NUO ĮŽEMĖJIMO ATRANKUMO TYRIMAS* [interaktyvus]. Šiauliai, 2007. [žiūrėta 2017 m. Balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą:
https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwil5fPY3ZzTAhXsJJoKHWCDdzAQFggcMAE&url=http%3A%2F%2Fbiblioteca.universia.net%2Fhtml_bura%2Fficha%2Fparams%2Ftitle%2Frelin%25C4%2597s-apsaugos-nuo-%25C4%25AF%25C5%25BEem%25C4%2597jimo-atrankumo-tyrimas%2Fid%2F51017745.html&usq=AFQjCNFDhrKUrBAYy_ILVZPtpyIoQl2SGg&sig2=UrjbojSRmIBom4M3d9A8kQ

6. IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY. POWER SYSTEM TECHNOLOGIES COMMITTEE. *IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems*. IEEE, 1982.
7. Jignesh Parmar. Types of Neutral Earthing in Power Distribution [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://electricalnotes.wordpress.com/2012/01/21/types-of-neutral-earthing-in-power-distribution/#comments>
8. Sultan, A.F., Swift, G.W. & Fedirchuk, D.J. 1992. Detection of high impedance arcing faults using a multi-layer perceptron. *IEEE Transactions on Power Delivery*. USA: IEEE. Pp. 1871-1876. (Vol. 7, No. 4, October.) ISBN 0885-8677-92
9. Draka Keila Cables. *AXCMK-PLUS* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą: http://media.drakakeila.ee/2015/05/AXCMK-PLUS_EN.pdf
10. CERRETTI, A., et al. *Temporary overvoltages due to ground faults in MV networks* [interaktyvus]. In: *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. IEEE, 2009. p. 1-8. [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5282140>
11. KALYUZHNY, Aaron. *Analysis of temporary overvoltages during open-phase faults in distribution networks with resonant grounding*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30.1: 420-427. [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6839151>
12. CHENG, Lee. *Fault Reduction Strategy using Neutral Earth Resistor (NER) Installation* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą: https://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj72fy7_7DTAhWECJoKHQHJD1AQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iceweb.com.au%2FElectricalWeb%2FElectrical%2520Safety%2FNeutral%2520Earth%2520Resistor.pdf&usg=AFQjCNG8Zw-OP3Ob0iKwmVLrfdrnbf4dWg&sig2=KPd8RHPt8Uw1AJRDtWJltw
13. VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. *NUTARIMAS DĖL MINIMALIŲ ELEKTROS ENERGIJOS PERSIUNTIMO PATIKIMUMO LYGIŲ NUSTATYMO* [interaktyvus]. Vilnius, 2016 [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.etar.lt/portal/lt/legalAct/9d25a84002f611e6b9699b2946305ca6>
14. ELECTRICITY AND COGENERATION REGULATORY AUTHORITY. *Regulatory Approaches to Reliable Electricity Grids in the Kingdom of Saudi Arabia*

[interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą:
http://erranet.org/wp-content/uploads/2016/10/Al-Jabri_Paper_Award2016.pdf