



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Darius Pratusėvičius

AUTOMATINIO KARTOTINIO ĮJUNGIMO TYRIMAS
ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO MIŠRIOSE ORO IR
KABELIŲ LINIJOSE

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**AUTOMATINIO KARTOTINIO ĮJUNGIMO TYRIMAS
ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO MIŠRIOSE ORO IR
KABELIŲ LINIJOSE**

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (621E30004)

Vadovas

prof. dr. Alfonsas Morkvėnas
2017-06-01

Recenzentas

prof. dr. Saulius Gudžius

Projektą atliko

Darius Pratusėvičius
2017-06-01

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Darius Pratusėvičius

(Studento vardas, pavardė)

Energijos technologijos ir ekonomika (621E30004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Automatinio kartotinio įjungimo tyrimas elektros skirstomojo tinklo mišriose oro ir kabelių linijose“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. birželio 1 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Dariaus Pratusėvičiaus** baigiamasis projektas tema „Automatinio kartotinio įjungimo tyrimas elektros skirstomojo tinklo mišriose oro ir kabelių linijose“ 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)

Pratusevičius, Darius. Automatinio kartotinio įjungimo tyrimas elektros skirstomojo tink mišriose oro ir kabelių linijose. Energijos technologijų ir ekonomikos magistro baigiamas... projektas / vadovas prof. dr. Alfonsas Morkvėnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: Automatinis kartotinis įjungimas, liekamoji įtampa, fazės jungimo kampas, kabelio išsikrovimo laikas.

Kaunas, 2017. 49 p.

SANTRAUKA

Pagrindinis tikslas ruošiant baigiamąjį magistro projektą yra ištirti automatinio kartotinio įjungimo panaudojimo galimybes mišriame oro ir kabelių tinkle. Darbe apžvelgiami elektros kabelių parametrai, elektromagnetinės bangos sklidimas ir sukeltų viršįtampių pasiskirstymas. Apskaičiuota ribinė liekamoji įtampa ir pagal ją atlikta kabelių izoliacijos pramušimo tikimybių analizė įžemėjusioje linijoje. Taip pat išanalizuoti kabelių liekamojo krūvio išsikrovimai ir sudaryta kreivių šeima esant skirtingoms imituojamos linijos talpoms ir varžoms. Pasirinkta konkreti 10 kV elektros linija ir sudaryti liekamojo krūvio išsikrovimo kreivių šeima esant skirtingoms izoliacijos varžoms.

Automatinio kartotinio įjungimo panaudojimui mišriam oro ir kabelių tinkle buvo atliktas bandymas. Bandymui atlikti buvo panaudotas TPU 40.23 srovės transformatorius. Analizė buvo atliekama oscilografo pagalba analizuojant pirminės grandinės gnybte ir antrinės grandinės įtampos indikacijos gnybte atsiradusios įtampos išsikrovimą. Tai buvo atliekama paduodant užkrauto kondensatoriaus įtampą į pirminę grandinę. Gauti rezultatai tikslesnei analizei buvo perkelti į Matlab/simulink aplinką.

Tyrimo metu atskleistos svarbiausios problemos automatinio kartotinio įjungimo panaudojimui mišriam oro ir kabelių tinkle. Sudarytos kreivių šeimos, kurias galima naudoti norint įvesti automatinį kartotinį įjungimą į realų tinklą. Pasiūlytas ir išbandytas srovės transformatoriaus panaudojimo variantas.

Pratusevičius, Darius. Automatic reclosing research of the electricity distribution network in mixed air and cable lines: *Master's thesis in Energy technologies and economics* / supervisor prof. dr. Alfonsas Morkvėnas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of electric power systems

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: Automatic reclosing, the residual voltage, joining angle of the phase, the discharge time of the cable.

Kaunas, 2017. 49 p.

SUMMARY

The main purpose of the final master's project is to explore the usage capabilities of automatic reclosing in mixed air and cable network. The paper gives an overview of the electrical parameters of cables, electromagnetic wave propagation and distribution of induced surge. The calculated critical residual voltage performed cable insulation piercing probability analysis in the earth faulted line. Also, to analyse cable residual charge discharges and made family of the curves of different simulated line capacitance and resistance. Chosen a particular 10 kV power line and to made discharge of residual charge family of curves with different insulation resistance.

Automatic reclosing usage in mixed air and cable network was tested. For the test, it was used a current transformer 40.23 TPU. The analysis was performed by analyzing the oscilloscope's data from primary circuit terminals and the secondary circuit voltage indications during voltage discharge. This was done by feeding loaded capacitor's voltage into the primary circuit. To get more accurate results, analysis has been moved to the Matlab / Simulink environment.

The study revealed the main problems of automatic reclosing usage in mixed air and cable network. Was made the family of curves, which can be used in the actual network. The proposed and investigated the usage of current transformer.

TURINYS

SANTRUMPOS	9
ĮVADAS	10
1. AB ESO elektros tinklo analizė	11
2. Kabelinių ir oro linijų talpos skaičiavimo metodai	12
3. Elektros tinklo parametrai	14
4. Viršįtampiai ir jų charakteristika.....	18
4.1 Komutaciniai viršįtampiai.....	19
4.2 Viršįtampiai įjungiant liniją įžemėjusiame izoliuotos neutralės tinkle.....	20
4.3 Viršįtampių pasiskirstymas žemos įtampos elektros tinkle	22
5. Tikimybių analizė.....	24
5.1 Izoliacijos pramušimo tikimybių analizė.....	24
5.2 Izoliacijos pramušimo tikimybių grafinė analizė.....	27
6. Kabelių parametrų analizė.....	31
7. Tiriamoji ekvivalentinė schema	35
8. Srovės transformatoriaus panaudojimo bandymas.....	37
8.1 Srovės transformatoriaus bandymo aprašymas.....	38
8.2 Imituojamos izoliacijos varžų parinkimas bandymuose	40
8.3 Bandymo rezultatų analizė.....	42
IŠVADOS	46
Literatūros sąrašas	47
PRIEDAI	49

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

2.1 pav. Dviejų laidininkų krūviai.....	12
2.2 pav. Trijų fazių oro linijos fazinės ir tarpusavio talpos.....	12
4.2.1 pav. Ekvivalentinė tinklo schema.....	20
4.2.2 pav. Aukščiausios amplitudės viršįtampių funkcinė priklausomybė nuo jungiamos linijos ilgio.....	21
4.2.3 pav. Aukščiausios amplitudės viršįtampių funkcinė priklausomybė nuo jungiamosios linijos ilgio kai liekamasis krūvis jungiamos linijos nepažeistose fazėse $0,3U_f$	21
4.3.1 pav. Viršįtampių pereinamasis procesas nuo bandomojo impulso.....	22
4.3.2 pav. Viršįtampių pereinamieji procesai schemoje su viršįtampių ribotuvu linijos gale.....	23
5.2.1 pav. Atjungiamos linijos tikimybė pataikyti į 5,5-6 kV intervalą ir pramušimo tikimybė esant šiam intervalui.....	27
5.2.2 pav. Atjungiamos linijos tikimybė pataikyti į 10,5 – 11 kV intervalą ir pramušimo tikimybė esant šiam intervalui.....	27
5.2.3 pav. Atjungiamos linijos tikimybė pataikyti į 16,5 – 17 kV intervalą ir pramušimo tikimybė esant šiam intervalui.....	28
5.2.4 pav. Tikimybė, kad atjungiamos linijos įtampa bus atitinkame intervale.....	28
5.2.5 pav. Izoliacijos pramušimo tikimybė, esant tam tikrai liekamajai įtampai.....	29
5.2.6 pav. Tikimybė, kad atjungiamos linijos įtampa pateks į atitinkamą intervalą ir izoliacija bus pramušta.....	29
6.1 pav. Skirtingų kabelių talpos priklausomybė nuo kabelių ilgio.....	31
6.2 pav. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąjį krūvį liekamosios įtampos priklausomybės nuo laiko esant 0,5 M Ω varžai.....	33
6.3 pav. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąjį krūvį liekamosios įtampos priklausomybės nuo laiko esant 0,5 M Ω varžai.....	34
7.1 pav. Šilainių TP 10 kV tinklo 40 fiderio skaičiuojamoji schema.....	35
7.2 pav. AKĮ pauzės priklausomybė nuo nuotekio srovės.....	36
8.1 pav. Srovės transformatoriaus TPU 40.23 matmenys.....	37
8.2 pav. Srovės transformatoriasu TPU 40.23 parametrai.....	37
8.3 pav. Kondensatoriaus parametrai.....	38
8.1.1 pav. Principinė bandymo schema.....	38
8.1.2 pav. Srovės transformatorius bandymo metu.....	39
8.1.3 pav. Oscilografas ir kondensatoriai bandymo metu.....	39
8.2.1 pav. Bandymas su 172 k Ω imituojama izoliacijos varža (3x1M Ω ir 1x0.5M Ω varžos).....	40
8.2.2 pav. Bandymas su 4,58 k Ω imituojamos izoliacijos varža (11x200 Ω , 4x220 Ω ir 5x300 Ω varžos).....	41
8.3.1 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 300 Ω varžai.....	42
8.3.2 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 1500 Ω varžai.....	42
8.3.3 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 4580 Ω varžai.....	42
8.3.4 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 172 k Ω varžai.....	43
8.3.5 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 3M Ω varžai.....	43
8.3.6 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 10M Ω varžai.....	43
8.3.7 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant begalinei izoliacijos varžai (atjungta izoliacijos varža).....	44
8.3.8 pav. Laiko pastoviosios priklausomybė nuo imituojamo tinklo izoliacijos varžos.....	45
8.3.9 pav. Antro oscilografo kanalo matuojamos įtampos svyravimai esant 300 Ω varžai.....	45

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Aukštos įtampos oro linijos ir kabelių talpos ir talpinės srovės [3]	13
3.1 lentelė. Banginės varžos.	15
3.2 lentelė. AHXAMK-W 6/10 (12) kV kabelio duomenys	16
3.3 lentelė. AXLJ-TT 7/12 kV kabelio duomenys	16
3.4 lentelė. AXLJ-TT 7/12 kV (3 gyslos) kabelio parametrai.....	17
3.5 lentelė. Dažniausiai naudojamų kabelių bendrosių tų kabelių fazių talpos	17
5.1.1 lentelė. Skirtingų fazių kampų įtaka tikimybėms pramušti izoliaciją jungiant liniją įžemėjusiame tinkle.....	25
6.1 lentelė. Kabelio talpos priklausomybė nuo ilgio ir skerspjūvio	31
6.2 lentelė. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąjį krūvį liekamosios įtampos vertės praėjus tam tikram laiko tarpui esant 0,5 MΩ varžai.....	32
6.3 lentelė. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąjį krūvį liekamosios įtampos vertės praėjus tam tikram laiko tarpui esant 20 MΩ varžai.....	33
7.1 lentelė. Šilainių TP išsikrovimo laikai esant tam tikroms varžoms.....	35
8.2.1 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė.....	44

SANTRUMPOS

ESO – Energijos skirstymo operatorius

EE – Elektros energija

S.V. – Santykiniai vienetai

OL – Oro linija

KL – Kabelinė linija

ST – Srovės transformatorius

AKĮ – Automatinis kartotinis įjungimas

IVADAS

Elektros skirstomieji tinklai yra viena svarbiausių ir didžiausių dalių elektros energetikos sistemoje. Vien AB ESO elektros skirstymo linijų ilgis 2015 gruodžio 31 d. Buvo 120 994 km., o klientų skaičius – 1 645 313. Elektros skirstomasis tinklas dėl įvairių priežasčių yra nuolat naujinamas. Tai gali vykti dėl senėjimo, nusidėvėjimo, ekonomiškumo stokos, taip pat dėl tinklo plėtros strategijos. Diegiamos patikimesnės ir ekonomiškai naudingesnės priemonės. Vienas iš tokių naujinimo etapų yra oro linijų keitimas kabelinėmis. Tačiau ne visur oro linijas tikslinga keisti kabelinėmis, dėl to atsiranda mišrios oro - kabelių linijos.

Automatinis kartotinis įjungimas skirtas greitai atkurti elektros energijos tiekimą vartotojams greitai pakartotinai įjungiant atjungtą liniją. Automatinis kartotinis įjungimas puikiai veikia oro linijose, tačiau atsirandant kabelių tarpams panaudojimas tampa daug sudėtingesnis, kadangi kabelyje atsiranda liekamasis krūvis. Jam nutekėti reikalingas tam tikras laiko tarpas ir tai sukelia papildomas problemas bei mažina tinklo patikimumą, o kartais įvyksta ir didesni gedimai.

Tikslas:

- Nustatyti, kokia mažiausia automatinio kartotinio įjungimo užlaikymo trukmė reikalinga mišriame oro ir kabelių tinkle, priklausomai nuo skaičiuojamojo tinklo parametrų, ir numatyti būdus, kaip tikslingai įdiegti automatinio kartotinio įjungimo veikimą į realų mišraus oro ir kabelių elektros tinklą.

Uždaviniai:

- Išanalizuoti elektros kabelių parametrus ir jų skaičiavimo metodikas;
- Įvertinti liekamojo krūvio įtaką elektros skirstomajam tinklui, atsižvelgiant į jungimo fazės kampų skirtumus jungiant linijas;
- Įvertinti elektromagnetinės bangos sklidimo įtaką fazės įtampai ir išsikrovimo laikui;
- Ištirti kabelio išsikrovimo laikus ir jų priklausomybę nuo elektros tinklo parametrų;
- Išbandyti srovės transformatorių su įtampos indikacijos gnybtais ir numatyti jo panaudojimo galimybes diegiant automatinį kartotinį įjungimą mišriose oro ir kabelių linijose.

1. AB ESO elektros tinklo analizė

AB ESO tinkle 2011 – 2013 m. įvyko 154 tūkst. gedimų, dėl kurių verslo ir privatiems klientams nebuvo pateiktos 6.329 MWh elektros energijos, arba tiek, kiek Širvintų rajonas suvartoja per 2,5 mėn. Didžiausią neplanuotų nutraukimų dalį sudaro Force Majeure priskiriami įvykiai. Audrų metu dažniausiai lūžta medžiai ar jų šakos ir krisdamos jos nutraukia laidus. Tokių gedimų daugiausia būna miškingose vietovėse [1].

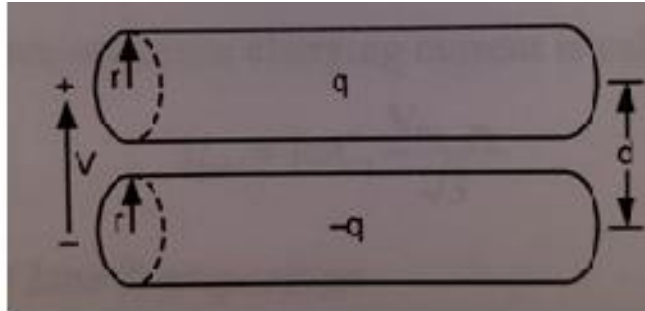
Apie 80% visų gedimų įvyksta 0,4 kV įtampos tinkle, likę 20% įvyksta 10 kV tinkle. 35 kV tinkle įvyksta mažiau nei 1% gedimų. Svarbu paminėti, kad nors 35 kV ir 10 kV tinkle gedimų skaičius santykinai nedidelis, tačiau įvykus gedimui ir atsijungus pvz. 10 kV transformatorių pastotei EE tiekimas nutraukimas ir tiems klientams, kurie prijungti prie 10 kV ir 0,4 kV tinko, nes žemesnės įtampos tinklas priklauso nuo aukštesnės [1].

Vienos vidutinės audros nuostoliai ESO tinklui siekia apie 1 mln. Eurų, elektros tiekimo atstatymas klientams gali užtrukti savaitę ir daugiau. Vakarų Europoje šiai problemai spręsti jau kurį laiką naudojamas kabelinis – požeminis tinklas, kuris yra gerokai atsparesnis klimato reiškiniams bei reikalauja mažiau priežiūros [1].

- Keičiant oro linijas požeminėmis mažėja atsijungimų tikimybė dėl virstančių ar į tinklus įaugusių medžių;
- Įrenginių saugumas. Naudojant kabelių linijas sumažėja pavojus nukentėti nuo elektros srovės;
- Elektros tinklo įtakos gamtai ir gyvūnijai mažinimas. Požeminės linijos, ypač miškingose teritorijose, turi mažesnę įtaką gyvūnų ir paukščių buveinėms;
- Vizualinės taršos mažinimas ir nepastebimas elektros tinklas. Pakeitus oro linijas požeminėmis, linijų apsaugos zonos sumažėja nuo 2-15 metrų iki 2 metrų, taip pat sumažėja ir poreikis genėti želdinius ir medžius. Požeminės kabelinės linijos, priešingai nei oro, yra nepastebimos ir nemažina kraštovaizdžio vertės;
- Veiklos efektyvumas ir skaidrumas. Keičiant oro linijas požeminėmis, linijas reikia rečiau remontuoti ir dėl to mažėja veiklos sąnaudos.

2. Kabelinių ir oro linijų talpos skaičiavimo metoda

Bet kokie du laidininkai vienas kito atžvilgiu turi talpą dėl potencialų skirtumo tarp jų. Tariaama, kad du lygiagretūs laidininkai su r spinduliu ir esantys atstumu d vienas nuo kito prijungti prie įtampos šaltinio, bus įkrauti q kulonų.



2.1 pav. Dviejų laidininkų krūviai [3].

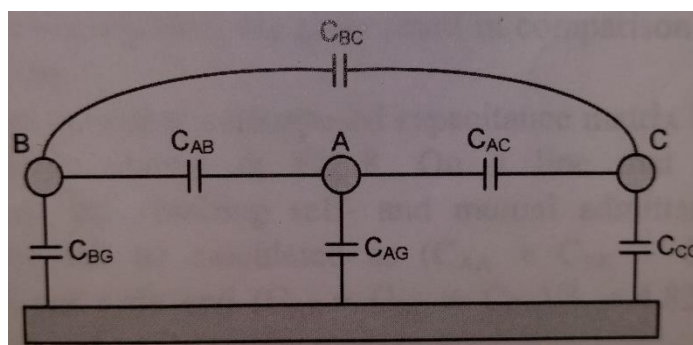
Remiantis Gauso dėsniumi, potencialų skirtumas tarp dviejų laidininkų yra apskaičiuojamas:

$$V = \frac{q}{\pi\epsilon} \ln \frac{d}{r} \quad (1)$$

ϵ – dielektrinė skvarba tarp laidininkų. Oro linijoms oro dielektrinė skvarba yra lygi vakuomo dielektrinei skvarbai - $\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m. Taigi talpa tarp dviejų laidininkų:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{r}} \quad (2)$$

Ši formulė yra skirta apskaičiuoti talpai. Priklausomai nuo struktūros ir kabelio arba oro linijos geometrinių parametrų, d ir r parametrai bus apibrėžti skirtingai. Iš esmės ši formulė parodo, jog oro linijų talpa priklauso nuo laidininko dydžio, atstumų tarp laidininkų bei tarp laidininko ir žemės, bendro elektros linijos ilgio. Kadangi kabelio dielektrinė skvarba yra 2-4 kartus didesnė nei ϵ_0 , o atstumas tarp laidininkų bei tarp laidininkų ir žemės daug mažesnis, tai remiantis 2 formule matyti, jog kabelinės linijos talpa bus daug didesnė lyginant su to pačio ilgio oro linijos talpa.



2.2 pav. Trijų fazių oro linijos fazinės ir tarpusavio talpos [3].

Tipiniame trijų fazių elektros tinkle, dėl potencialų skirtumo tarp laidininkų ir žemės, kiekvienos fazės laidininkas turės savo talpą tarp laidininko ir žemės ir abipusę talpą tarp kitų laidininkų taip, kaip parodyta 2 paveiksle. Remiantis skaičiavimų, atliktų aukštos įtampos elektros tinkle, rezultatais buvo gauti 2.1 lentelėje pateikti duomenys.

2.1 lentelė. Aukštos įtampos oro linijos ir kabelių talpos ir talpinės srovės [3]

Elektros linijos rūšis	Ilgis, km	Talpa, μF	Talpinė srovė, A
345 kV kabelis	7	2,9809	145,2
345 kV oro linija	140	3.1255	160,48

Remiantis atliktais skaičiavimais, galima teigi, jog kabelinės linijos talpa yra daug didesnė. Nors šie skaičiavimai atlikti aukštos įtampos tinklui, tačiau ir 10 kV elektros tinkle situacija yra panaši – kabelio talpa yra apie 20 kartų didesnė už oro linijos talpą.

3. Elektros tinklo parametrai

Modeliuojant pereinamuosius vyksmus elektros energetikos sistemos kabelių tinkle apskaičiuojamos linijų banginės varžos ir ekvivalentinės talpos.

Linijos ilgio vieneto parametrai R_l , L_l , C_l ir G_l priklauso nuo linijos konstrukcijos ir vadinami pirminiais. Linija, kurios pirminiai parametrai yra pastovūs visuose linijos pjūviuose, vadinama homogenine. Homogeninė linija energijos perdavimo sistemoje apibūdinama ir charakteringaisiais, kitaip antriniais, parametrais. Antriniai parametrai yra:

Linijos banginė varža

$$W_1 = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \quad (3)$$

Elektromagnetinės bangos sklidimo konstanta :

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (4)$$

α – bangos slopinimo konstanta;

β – fazės konstanta.

Fazės induktyvumas L_1 ir talpa C_1 priklauso nuo geometrinių parametų ir gali būti apskaičiuojami taip:

$$L_1 = (0.2 + 0.92 \lg \frac{D}{r}) * 10^3 \quad (5)$$

D – atstumas tarp fazių centrų;

r – fazės spindulys,

$$C_1 = C_k + 3C_{ks} \quad (6)$$

C_k – savitoji vienos fazės talpa

$$C_k = 0,0241 * \frac{\varepsilon}{\lg(\frac{R}{r_e})} \quad (7)$$

ε – dielektrinė skvarba;

R – kabelio izoliacijos išorinis spindulys;

r_e – ekvivalentinis fazės spindulys

Skaičiuojant viršįtampių pereinamuosius vyksmus, elektromagnetinės bangos gesimą linijoje apytikriai galima įvertinti gesimo koeficientu ξ_1 . Gesimo koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\xi_1 = e^{-\frac{R_1 * l}{2W_1}} \quad (8)$$

l – linijos ilgis

Nulinės sekos linijos pirminiai ir antriniai parametrai apskaičiuojami taip:

$$L_0 = L_{kk} + 2L_{ks} \quad (9)$$

$$C_0 = C_k + 2C_{ks} \quad (10)$$

$$W_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (11)$$

$$\xi_0 = e^{-\frac{(R_0 + R_z) * l}{2W_0}} \quad (12)$$

čia: r_z – žemės ilgio vieneto varža apytikriai gali būti apskaičiuota taip:

$$r_z = \pi^2 f 10^{-4} \Omega/\text{km} \quad (13)$$

f – dažnis.

Ižemėjusios linijos talpa $C_z = C_k$.

Generuojama kabelių linijos srovė I_z apskaičiuojama taip:

$$I_z = 0,942 U_f C_z \quad (14)$$

Pirminių ir antrinių kabelių linijos įvairių skerspjūvių banginės varžos pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Banginės varžos.

Eil. Nr.	Linijos parametrai		
	Skerspjūvis, [mm ²]	Banginė varža, [Ω]	
		$n \times F$	W_I
1	3×70	19	35
2	3×95	18	32
3	3×120	18	28
4	3×150	17	27
5	3×185	16	26
6	3×240	15	25
7	2(3×185)	8	15
8	2(3×240)	7	14

Lentelėse 3.2-3.4 pateikiami kataloguose duotų trijų skirtingų kabelių tipų parametrai (Daugiau informacijos prieduose nr. 1, 2, 3, 4)

3.2 lentelė. AHXAMK-W 6/10 (12) kV kabelio duomenys

Pagrindiniai duomenys						
Gyslų skaičius x laidininko skerspjūvio plotas	mm ²	3x95Al+35Cu	3x120Al+35Cu	3x150Al+35Cu	3x185Al+35Cu	3x240Al+35Cu
Izoliuotos gyslos skersmuo	mm	19,5	21	22,5	25	27,1
Vienos gyslos skersmuo (apytiksliai)	mm	28	29	31	33	35
Viso kabelio skersmuo (apytiksliai)	mm	60	62	66	71	88
Masė (apytiksliai)	kg/100 m	250	275	315	355	405
Standartinis pristatomas ilgis	m	500	500	500	500	500
Standartinis būgno dydis		K24	K26	K26	K26	K26
Elektriniai duomenys						
Laidininko varža	Ω/km	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125
Centrinio laidininko varža	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524
Induktyvumas	mH/km	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27
Reaktyvioji varža	Ω/km	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09
Talpis	μF/km	0,30	0,32	0,35	0,40	0,43

3.3 lentelė. AXLJ-TT 7/12 kV kabelio duomenys

Pagrindiniai duomenys					
Gyslų skaičius x laidininko skerspjūvio plotas	mm ²	1x50/16	1x95/16	1x150/25	1x240/25
Izoliuotos gyslos skersmuo	mm	16,0	19,3	22,2	26,1
Viso kabelio skersmuo (apytiksliai)	mm	23,3	26,6	29,7	33,8
Masė (apytiksliai)	kg/100 m	59,7	79,4	107,4	141,4
Standartinis pristatomas ilgis	m	500	500	500	500
Standartinis būgno dydis		K11	K12	K12	K14
Prekės numeris		0070410	0070420	0070440	0070460
Elektriniai duomenys prie +20°C					
Laidininko varža	Ω/km	0,641	0,320	0,206	0,125
Ekrano varža	Ω/km	1,2	1,2	0,8	0,8
Laidininkų induktyvumas trikampyje/plokštumoje *)	mH/km	0,40/0,73	0,36/0,66	0,34/0,63	0,31/0,58
Reaktyvioji varža	Ω/km	0,29	0,21	0,20	0,18
Talpis	μF/km	0,23	0,30	0,35	0,43
Talpinė srovė	A/km	1,5	2,0	2,3	2,8
Elektriniai duomenys					
Žemėje esančio 65 °C laidininko vardinė srovė *)	A	170	250	315	395
Ore esančio 65 °C laidininko vardinė srovė *)	A	165	255	325	420
Ore esančio 90 °C laidininko vardinė srovė *)	A	205	310	395	515
Maksimali laidininko 1 s trumpojo jungimo srovė, kai pradinė temperatūra 70 °C	kA	5,1	9,7	15,3	24,4
Maksimali laidininko 1 s trumpojo jungimo srovė, kai pradinė temperatūra 90 °C	kA	4,7	9,0	14,2	22,7

3.4 lentelė. AXLJ-TT 7/12 kV (3 gyslos) kabelio parametrai

Pagrindiniai duomenys						
Gyslų skaičius x laidininko skerspjūvio plotas	mm ²	3x25/16	3x50/16	3x95/16	3x150/25	3x240/25
Izoliuotos gyslos skersmuo	mm	13,9	16,0	19,3	22,2	26,1
Bendras vienos gyslos skersmuo (apytiksliai)	mm	14,9	17	20,3	23,2	27,1
Viso kabelio skersmuo (apytiksliai)	mm	37,6	42,3	49,8	56,7	65,5
Masė (apytiksliai)	kg/100 m	108,1	142,0	202,9	279,3	384,2
Standartinis pristatomas ilgis	m	500	500	500	500	500
Standartinis būgno dydis		K16	K18	K20	K22	K24
Prekės numeris		0071000	0071010	0071020	0071030	0071040
Elektriniai duomenys prie +20°C						
Laidininko varža	Ω/km	1,2	0,641	0,320	0,206	0,125
Ekranų varža	Ω/km	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8
Induktyvumas trikampyje/plokštumoje *)	mH/km	0,37	0,34	0,31	0,29	0,27
Reaktyvioji varža	Ω/km	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09
Talpis	μF/km	0,19	0,23	0,30	0,35	0,43
Talpinė srovė	A/km	1,3	1,5	2,0	2,3	2,8
Elektriniai duomenys						
Žemėje esančio 65 °C laidininko vardinė srovė *)	A	100	145	205	260	340
Ore esančio 65 °C laidininko vardinė srovė *)	A	90	130	190	250	330
Ore esančio 90 °C laidininko vardinė srovė *)	A	110	160	230	305	400
Maksimali laidininko 1 s trumpojo jungimo srovė, kai pradinė temperatūra 70 °C	kA	2,5	5,1	9,7	15,3	24,4
Maksimali laidininko 1 s trumpojo jungimo srovė, kai pradinė temperatūra 90 °C	kA	2,3	4,7	9,0	14,2	22,7
Maksimali impulsinė srovė	kA	-	55	65	70	70

Atsižvelgiant į duotus parametrus, galime sudaryti vieną lentelę, kurios duomenimis šiame darbe remsimės. Kadangi tiriant išsikrovimo laikus svarbiausia yra ne pačio kabelio talpa, o fazės talpa, todėl perskaičiuotos ir vidutinės dažniausiai naudojamų kabelių fazių talpos pateikiamos 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Dažniausiai naudojamų kabelių bendrosių tų kabelių fazių talpos

Eil. Nr.	Skerspjūvis nxF, [mm ²],	Talpa C, [μF/km]	Talpa C ₁ , [μF/km]
1	3x240	0,43	0,3831
2	3x185	0,4	0,347
3	3x150	0,35	0,3106
4	3x120	0,32	0,2781
5	3x95	0,3	0,2473

4. Viršįtampiai ir jų charakteristika

Viršįtampių lygis priklauso nuo elektros linijų ilgio, konfiguracijos, jų konstrukcijų, apkrautumo ir įtampos lygio elektros tinkle. Pereinamųjų procesų atsiradimas lemia įtampos padidėjimą virš U_{md} . Įtampos padidėjimas virš U_{md} vadinamas viršįtampiu. Viršįtampiai pagal poveikio vietą skirstomi į fazinius (veikiančius izoliaciją tarp fazės ir žemės), tarpfazinius (veikiančius tarpfazinę izoliaciją), tarpvijinius (veikiančius vijų izoliaciją) ir tarp kontaktų (veikiančius atjungtų ar atjungiančių aparatų izoliaciją tarp kontaktų) [4].

Viršįtampiai veikiantys įrenginių izoliaciją apibūdinami maksimalia amplitude U_m arba smūginio koeficientu $k_v=U_m/U_{md}$, poveikio izoliacijai trukme, pereinamojo proceso kreivės forma ir veikimo zona. Viršįtampiai susiformavę elektros tinkle gali iki kelių kartų viršyti aukščiausią leistinąją įtampą U_{md} ir elektros įrenginių izoliaciją veikti įvairų laiko tarpą. Viršįtampių poveikio trukmė elektros įrenginių izoliacijai priklauso nuo viršįtampius sukėlusių trikdžių pobūdžio. Vidiniai viršįtampiai gali trukti nuo kelių milisekundžių iki kelių sekundžių (rezonansiniai), o izoliuotos neutralės tinkle, esant įžemėjimui, linijinė įtampa fazinę izoliaciją gali veikti iki dviejų valandų [4].

Elektros įrenginių izoliaciją veikiančios įtampos ir viršįtampių klasifikavimas [4]:

- ilgalaikė leistinoji didžiausia pramoninio dažnio įtampa;
- laikinieji viršįtampiai (rezonansiniai);
- pereinamieji viršįtampiai (trumpos trukmės viršįtampiai, t_f – impulso fronto trukmė, t_2 – viršįtampių impulso trukmė):
 - nuožulnaus fronto viršįtampis, $20 \mu s \leq t_f \leq 5000 \mu s$, $t_2 \leq 2$ ms;
 - stataus fronto viršįtampis, $0,1 \mu s \leq t_f \leq 20 \mu s$, $t_2 < 300 \mu s$;
 - labai stataus fronto viršįtampis, pikinis laikas $\leq 0,1 \mu s$, suminis laikas < 3 ms, dažnis $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$.

Pagal susiformavimo priežastis viršįtampius galima suskirstyti į vidinius ir išorinius.

4.1 Komutaciniai viršįtampiai

Maksimalių viršįtampių lygis gali būti nustatomas eksperimentiškai (registruojant specialiais registratoriais) arba atlikus specialius skaičiavimus (modeliuojant pereinamuosius procesus įvairiems tinklo režimams). Komutacinių viršįtampių lygis įvairiems elektros tinklo režimams santykiniais vienetais gali būti toks [4]:

- 1,0–1,5 s.v. – linijos arba kabelio aktyviosios ir reaktyviosios apkrovos atjungimas, transformatoriaus tuščios veikos atjungimas greitaeigiu jungtuvu, kondensatorių baterijos atjungimas. Šių švytuojamųjų viršįtampių dažnis artimas tinklo dažniui;
- 1,5–2,0 s.v. – trumpojo jungimo atjungimas, transformatoriaus įjungimas, linijos arba kabelio prijungimas per induktyvumą. Analogiškos, bet sudėtingesnės formos bangos gaunamos, kai prijungiama linija arba kabelis kartu su transformatoriumi žemos įtampos pusėje;
- 2,0–2,5 s.v. – linijos jungimas. Viršįtampio dydis nutolusiam atviram gale priklauso nuo jungtuvų polių susijungimo vienalaikiškumo;
- 2,5–3,0 s.v. – reaktoriaus arba transformatoriaus tuščiosios veikos atjungimas. Viršįtampių dydis priklauso nuo jungtuvu nutrauktos srovės dydžio, kai lankas jungtuve gesinamas anksčiau, nei tuščiosios veikos srovė keičia ženklą. Viršįtampiai susidaro dėl liekamosios srovės induktyvinėse grandinėse. Kartotinis linijos arba kabelio jungimas prie induktyvumo. Didžiausi viršįtampiai susidaro tada, kai jungiamos fazės įtampa bus priešingo poringumo nei liekamasis krūvis atjungtoje schemos dalyje. Kartotinis lanko užsidegimas tarp jungtuvo kontaktų atjungiant liniją arba kabelį;
- 3,0 s.v. ir daugiau – kartotinis linijos arba kabelio prijungimas. Įtampa nutolusiam atvirame gale išauga dėka likusio krūvio, išlikusio po veikiančios linijos atjungimo.

Nuo ilgalaikių neleistinių įtampos padidėjimų elektros įrenginius saugo tinkamai suprojektuotas, įrengtas ir eksploatuojamas elektros tinklas. Jo izoliaciją nuo susiformavusių tinkle trumpalaikių viršįtampių apsaugo iškrovikliai ir viršįtampių ribotuvai. Kad įrenginių izoliacija būtų tinkama naudoti patikimai ir ilgai, turi būti iš anksto numatyti specifiniai reikalavimai izoliacijos gamybai, tinklo projektavimui ir eksploatavimui bei izoliacijos apsaugai nuo viršįtampių. Tokių reikalavimų įvertinimas vadinamas izoliacijos suderinimu.

Taigi matyti, kad didžiausias komutacinių viršįtampių lygis gali atsirasti pakartotinai prijungus liniją. Net ir tinkamai parinkus viršįtampių ribotuvus, elektros tinklo linijose su kabeliniais intarpais gali atsirasti viršįtampiai, kurie gadina izoliaciją silpniausioje vietoje. Kritiniai viršįtampiai nebūtinai atsiranda kiekvieno įjungimo metu. Šiam tikslui toliau skaičiuojama tikimybių analizė, atspindinti šio įvykio dažnumą.

4.2 Viršįtampiai įjungiant liniją įžemėjusiame izoliuotos neutralės tinkle

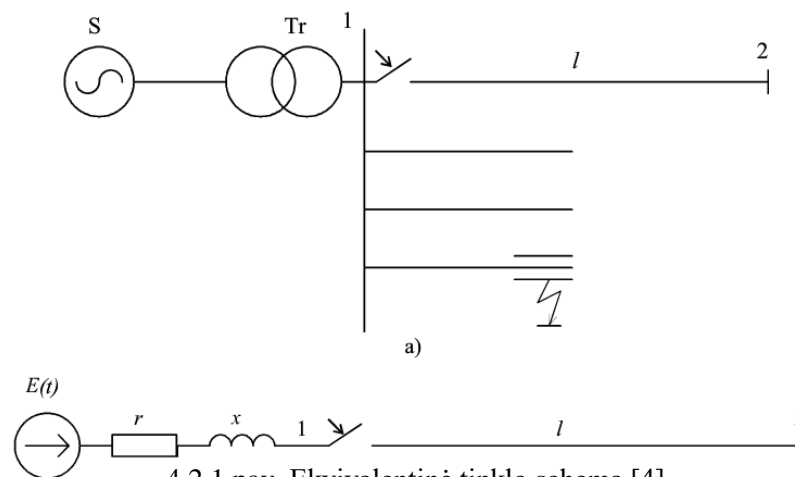
Kai kabelis atjungiamas nuo maitinimo šaltinio, energija likusi kabelyje turi būti išsklaidyta. Išsklaidymas gali užtrukti dėl didelės kabelio izoliacijos varžos ir talpos. Kabelio atjungimas nuo maitinimo šaltinio yra labai panašus į kondensatoriaus atjungimą. Srovė idealaus kondensatoriaus atveju lenkia įtampą 90 laipsnių. Kai kondensatorius atjungiamas, jis būna pilnai įkrautas ir turi ~ 1 s.v. įtampą [10].

Jungiant liniją, kuri yra įžemėjusiame elektros tinkle, elektros lankas gali užsidegti ne vieną kartą, kas sukelia pavojingus viršįtampius. Įžemėjusiame elektros tinkle registruojamas viršįtampių lygis yra didžiausias. Jam sumažinti naudojami ribotuvai. Esant vienfaziam įžemėjimui, jungiant linijas ribotuvų darbo sąlygos yra gana sudėtingos dėl aukštos viršįtampių amplitudės, o taip pat dėl laiko trukmės, kuri yra daug didesnė už žaibo impulsą.

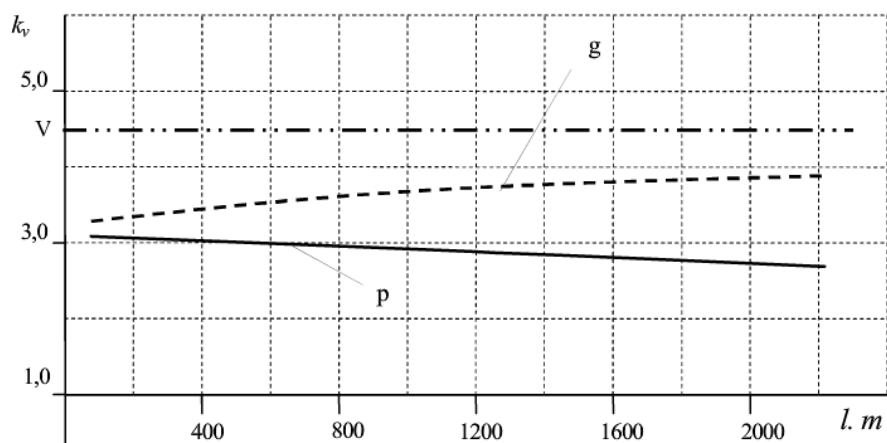
Viršįtampių lygis labai priklauso nuo elektros tinklo parametrų (linijų ilgio, konstrukcijų, apkrovos ir įtampos lygio). Labiausiai pavojingi izoliuotos neutralės tinklo viršįtampiai būna įžemėjus fazei, taip pat užsidegus elektros lankui ir jungiant linijas, kai tinkle yra įžemėjimas [4].

Didžiausias dėmesys izoliuotos neutralės tinkle skiriamas vienfaziam įžemėjimui, kadangi šis gali tęstis santykinai ilgą laiką (keletą valandų). Esant tokiam režimui elektros tinkle atliekama daug atjungimų ir prijungimų, bandant surasti įžemėjusią liniją.

Itin pavojingi viršįtampiai susidaro jungiant krūvį turinčią liniją, kai tinkle yra įžemėjimas. Krūvis lieka kai ieškant įžemėjusios linijos trumpam atjungiamos ir vėl prijungiamos sveikos linijos.



4.2.1 pav. Ekvivalentinė tinklo schema [4]



4.2.2 pav. Aukščiausios amplitudės viršįtampių funkcinė priklausomybė nuo jungiamos linijos ilgio [4]

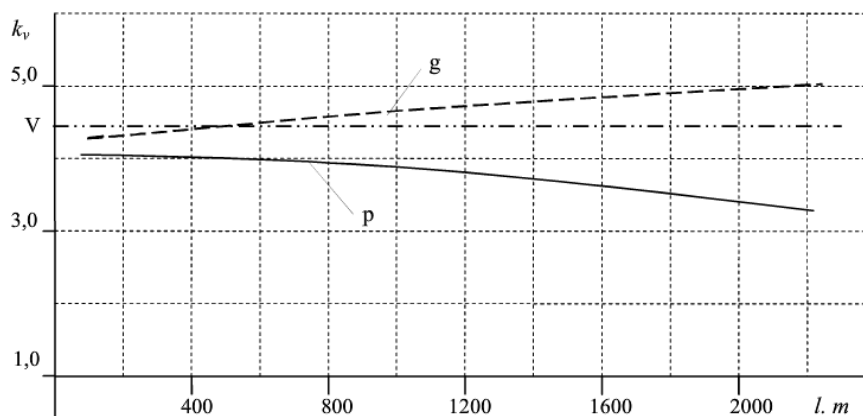
Paiškinimai:

P – linijos pradžioje

G – linijos gale

V – skaičiuojamasis viršįtampių lygis

Įžemėjusiame elektros tinkle, laiko momentu kai yra atjungiamą linija, dalis krūvio lieka. Per ilgesnį laiko tarpą krūvis per izoliacijos varžas nuteka. Jungiant linijas po standartinės AKI pauzės ar trumpam atjungus linijas, kai krūvis nespėja nutekėti, ir esant nepalankiam fazės jungimo kampui, viršįtarpiai bus daug didesni negu jungiant liniją be krūvio.



4.2.3 pav. Aukščiausios amplitudės viršįtampių funkcinė priklausomybė nuo jungiamosios linijos ilgio kai liekamasis krūvis jungiamos linijos nepažeistose fazėse $0,3U_f$. [4]

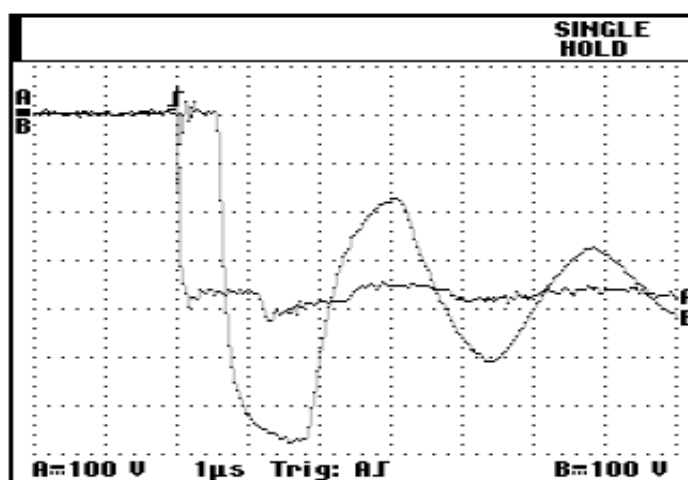
4.3 Viršįtampių pasiskirstymas žemos įtampos elektros tinkle

2004 metais atlikto tyrimo „Viršįtampių lygio žemosios įtampos tinkle pasiskirstymo tyrimas“ [9] metu buvo analizuojamas viršįtampių pasiskirstymas žemosios įtampos įvairių konfigūracijų elektros tinkle. Nors tyrime analizuojamas žemos įtampos tinklas, tačiau pereinamuosius viršįtampius aukštos įtampos tinkle galima nagrinėti pagal žemos įtampos tinklui parengtas metodikas ir atvirkščiai.

Ekspertiniam viršįtampių lygio tyrimui buvo sudarytas linijos modelis, kur linijos ilgis yra 100m. Aktualūs bandymo rezultatai gauti dviem atvejais:

- 1) Elektros linijoje be ribotuvų;
- 2) Elektros linijoje su ribotuvu linijos gale.

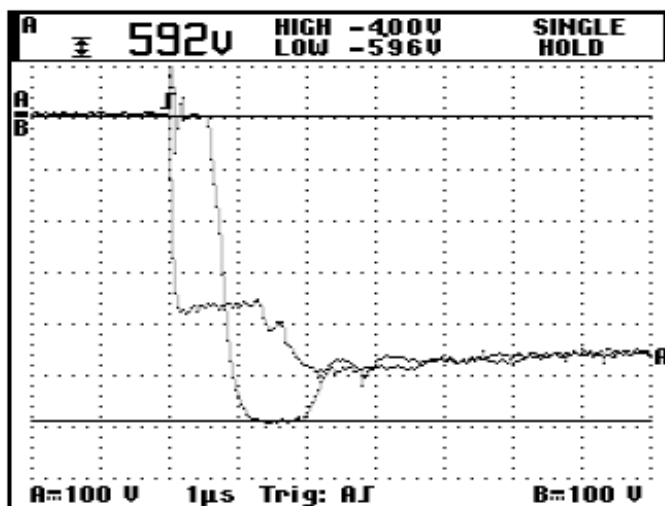
Prijungus į bandomąją elektros liniją impulsą buvo analizuojamas viršįtampių pereinamasis procesas 4.3.1 pav. linijos pradžioje (A kreivė) ir linijos gale (B kreivė).



4.3.1 pav. Viršįtampių pereinamasis procesas nuo bandomojo impulso linijos pradžioje (A kreivė) ir linijos gale (B kreivė), [9]

Užregistruotas viršįtampių lygis linijos gale – 680 V, tuo tarpu impulso linijos pradžioje amplitudė – 360 V. Taigi viršįtampių lygis linijos gale padvigubėjo, lyginant su linijos pradžioje esančiu viršįtampiu.

Panašus eksperimentas buvo atliktas prijungus linijos be apkrovos gale įprastą C klasės viršįtampių ribotuvą, kurio $U_c=275$ V. Gauti rezultatai pateikiami 4.3.2 paveiksle.



4.3.1 pav. Viršįtampių pereinamieji procesai schemoje su viršįtampių ribotuvu linijos gale: 1 – procesas linijos pradžioje; 2 – procesas linijos gale [9]

Eksperimento metu nustatyta, kad viršįtampių ribotuvui apribojus viršįtampių lygį linijos gale iki 592 V, linijos pradžioje viršįtampių lygis pakilo iki 520 V ir ženkliai išaugo, lyginant su rezultatais gautais linijoje be viršįtampių ribotuvo.

Iš eksperimentų matyti, kad elektros tinkle lemiamą įtaką turi elektromagnetiniai banginiai procesai. Viršįtampių lygio padidėjimas linijos pradžioje gali būti paaiškintas tuo, kad prijungus viršįtampių ribotuvą linijos gale pasikeičia atspindžio koeficientas, o atsispindėjusi nuo linijos galo bangos amplitudė žemesnė ir neslopina pereinamojo proceso, dėl ko įtampa linijos pradžioje pakyla.

5. Tikimybių analizė

5.1 Izoliacijos pramušimo tikimybių analizė

Eksploatuojant elektros linijas pastebėta, kad kai kurie gedimai, tokie kaip atmosferinių viršįtampių sukelti pramušimai, laidų suartėjimai, įvairių daiktų užmetimas ant linijų, judančių objektų prisilietimai, pasišalina savaime atjungus ir vėl prijungus liniją. Automatinis kartotinis jungimas (AKI) didina tinklo patikimumą ir mažina sąnaudas. Oro linijose tai veikia gerai, tačiau mišriame elektros tinkle apsaugai nuo trumpalaikių gedimų turi būti skiriamas didesnis dėmesys, nes kabelių izoliacija yra jautresnė viršįtampių poveikiui.

Šiuo metu automatinis kartotinis įjungimas mišriam tinkle yra apskritai nenaudojamas. Tačiau vis dėlto yra probleminių situacijų. Esant įžemėjimui tinkle, nėra žinoma, kuri linija yra įžemėjusi. Dėl to junginėjant linijas, yra ieškoma įžemėjusi linija. Neišlaikant laiko tarpo, kabelinių linijų tarpuose sukauptas krūvis nespėja nutekėti ir gali būti pramušama izoliacija. Norint nustatyti linijos leistino izoliacijos pramušimo tikimybę atliekami skaičiavimai:

Įžemėjus elektros linijos fazei, kitose jos fazėse atsiranda linijinė įtampa. Didžiausia įtampos amplitudė sveikoje fazėje tampa:

$$U_{f\check{z}} = \frac{10}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} * 1.2 = 17 \text{ kV} \quad (15)$$

Koeficientas 1.2 įvertina leistinus įtampos svyravimus tinkle.

Kabelio izoliacijos atsparumo efektinė vertė yra 32 kV (50Hz 1min) taigi amplitudinė išlyginta izoliacijos atsparumo vertė:

$$U_{ats} = 32 * \sqrt{2} = 45 \text{ kV} \quad (16)$$

Kadangi skaičiuojame izoliacijos pramušimo tikimybę, priimame, kad liekamojo krūvio ir jungiamos linijos fazės yra priešingų ženklų ir jų amplitudinės vertės susideda. Remiantis ankstesniame skyriuje atliktais bandymais, įtampos amplitudė linijos gale gali išaugti du kartus. Tuomet izoliacija pramušama kai:

$$45 \text{ kV} \leq (U_{jung.} + U_{atjung.}) * 2 \quad (17)$$

$U_{jung.}$ – Jungiamos linijos įtampos amplitudinė vertė

$U_{atjung.}$ – Atjungiamos linijos įtampos amplitudinė vertė (liekamoji įtampa)

Skaičiuojame mažiausią leistiną priešingo ženklo liekamąjį krūvį tinkle. Jis bus tada, kai jungiamos linijos vertė yra maksimali. Priimame, kad didžiausia amplitudinė jungiamos linijos įtampos vertė yra 17 kV ($U_m = 17 \text{ kV}$). Taigi panaudojus ankstesnę formulę gaunama, kad minimali atjungiamos linijos amplitudinė vertė yra

$$U_{atjung.min} = 5.5 \text{ kV} \quad (18)$$

Tai yra ribinė kabelio liekamoji įtampa, kadangi žemesnės įtampos jungimas nesukeltų tokių viršįtampių, kurie galimai pramuštų izoliaciją net esant pačiam nepalankiausiam fazės jungimo kampui. Tačiau izoliacija yra perdengiama tik tada, kai liekamojo kabelio krūvio ir jungiamos linijos įtampos fazių kampai yra priešingi. Be to kaip jau minėta, 17 kV yra didžiausia amplitudinė jungiamos linijos įtampos vertė. Tačiau jungiant liniją ir nuolat besikeičiant fazių kampams, ši jungiamos linijos įtampos vertė gali svyruoti nuo 0 iki 17 kV. Fazių kampų įtakos skaičiavimams imame įtampą nuo 5,5 kV iki 17 kV,

Skaičiavimo formulės:

$$\varphi_{jung.} = \arcsin\left(\frac{U_{jung.}}{U_m}\right) \quad (19)$$

φ – Jungiamos fazės kampas

$$P_{int.} = \frac{(\varphi_n - \varphi_{n-1}) * 2}{360} \quad (20)$$

$P_{int.}$ – Atjungiamos linijos tikimybė pataikyti į atitinkamą intervalą (intervalo žingsnis 0,5 kV)

φ_n – Fazės jungimo kampas

φ_{n-1} – Žemesnis fazės jungimo kampas

$$P_{pr.} = \frac{(90 - \varphi) * 2}{360} \quad (21)$$

$P_{pr.}$ – Izoliacijos pramušimo tikimybė, esant tam tikrai liekamajai įtampai

$$P_{\text{lt.pr.}} = P_{pr.} * P_{int.} * 2 \quad (22)$$

$P_{\text{lt.pr.}}$ – Tikimybė, jungiant liniją neišlaikius jokio laiko tarpo, fazės kampas pateks į atitinkamą intervalą ir izoliacija bus pramušta

5.1.1 lentelė. Skirtingų fazių kampų įtaka tikimybėms pramušti izoliaciją jungiant liniją įžemėjusiam tinkle.

U_m kV	$U_{atjung.}$ kV	$U_{jung.}$ kV	$\frac{U_{jung.}}{U_m}$	$\varphi_{jung.}$ rad	$\varphi_{jung.}^\circ$	$\frac{U_{atjung.}}{U_m}$	$\varphi_{atjung.}$ rad	$\varphi_{atjung.}^\circ$	$P_{int.}$	$P_{pr.}$	$P_{\text{lt.pr.}}$
17	5,5	17	1,000	1,571	90,000	0,324	0,329	18,877			
17	6	16,5	0,971	1,328	76,069	0,353	0,361	20,667	0,0099	0,0774	0,0015
17	6,5	16	0,941	1,226	70,250	0,382	0,392	22,480	0,0101	0,1097	0,0022
17	7	15,5	0,912	1,148	65,750	0,412	0,424	24,316	0,0102	0,1347	0,0027
17	7,5	15	0,882	1,081	61,928	0,441	0,457	26,179	0,0104	0,1560	0,0032
17	8	14,5	0,853	1,022	58,533	0,471	0,490	28,072	0,0105	0,1748	0,0037
17	8,5	14	0,824	0,968	55,440	0,500	0,524	30,000	0,0107	0,1920	0,0041
17	9	13,5	0,794	0,918	52,572	0,529	0,558	31,966	0,0109	0,2079	0,0045
17	9,5	13	0,765	0,871	49,881	0,559	0,593	33,974	0,0112	0,2229	0,0050
17	10	12,5	0,735	0,826	47,332	0,588	0,629	36,032	0,0114	0,2370	0,0054

U_m kV	$U_{atjung.}$ kV	$U_{jung.}$ kV	$\frac{U_{jung.}}{U_m}$	$\varphi_{jung.}$ rad	$\varphi_{jung.}^\circ$	$\frac{U_{atjung.}}{U_m}$	$\varphi_{atjung.}$ rad	$\varphi_{atjung.}^\circ$	$P_{int.}$	$P_{pr.}$	$P_{lt.pr.}$
17	10,5	12	0,706	0,784	44,901	0,618	0,666	38,145	0,0117	0,2506	0,0059
17	11	11,5	0,676	0,743	42,568	0,647	0,704	40,320	0,0121	0,2635	0,0064
17	11,5	11	0,647	0,704	40,320	0,676	0,743	42,568	0,0125	0,2760	0,0069
17	12	10,5	0,618	0,666	38,145	0,706	0,784	44,901	0,0130	0,2881	0,0075
17	12,5	10	0,588	0,629	36,032	0,735	0,826	47,332	0,0135	0,2998	0,0081
17	13	9,5	0,559	0,593	33,974	0,765	0,871	49,881	0,0142	0,3113	0,0088
17	13,5	9	0,529	0,558	31,966	0,794	0,918	52,572	0,0150	0,3224	0,0096
17	14	8,5	0,500	0,524	30,000	0,824	0,968	55,440	0,0159	0,3333	0,0106
17	14,5	8	0,471	0,490	28,072	0,853	1,022	58,533	0,0172	0,3440	0,0118
17	15	7,5	0,441	0,457	26,179	0,882	1,081	61,928	0,0189	0,3546	0,0134
17	15,5	7	0,412	0,424	24,316	0,912	1,148	65,750	0,0212	0,3649	0,0155
17	16	6,5	0,382	0,392	22,480	0,941	1,226	70,250	0,0250	0,3751	0,0188
17	16,5	6	0,353	0,361	20,667	0,971	1,328	76,069	0,0323	0,3852	0,0249
17	17	5,5	0,324	0,329	18,877	1,000	1,571	90,000	0,0774	0,3951	0,0612
											VISO
											0,2418

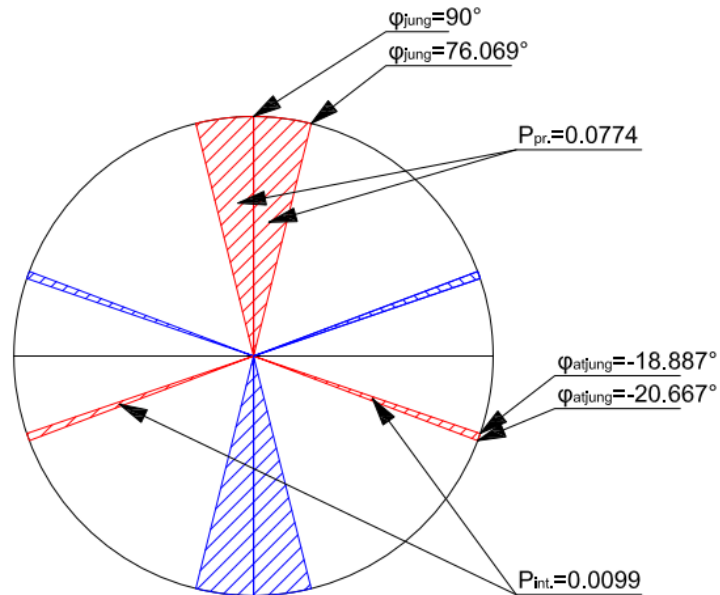
Antrame stulpelyje didėjimo tvarka (0,5 kV intervalu) surašytos galimos liekamosios įtampos atjungiant liniją. Trečiame stulpelyje, atitinkamai surašomos mažiausios jungiamos fazės įtampos, kurioms esant gali būti pramušama izoliacija. Skaičiavimuose priimame, kad jungiamos ir atjungiamos linijų fazių ženklai yra priešingi. Tuomet pagal pateiktas formules skaičiuojami jungiamos ir atjungiamos linijų fazių kampai.

$P_{int.}$ ir $P_{pr.}$ tikimybės skaičiuojamos pagal atitinkamus intervalus. Pirmoje eilutėje šių parametrų reikšmių nėra, nes $P_{int.}$ ir $P_{pr.}$ nesudaro jokio intervalo. Intervalai sudaromi pradedant antra eilute, kur $P_{int.}$ tikimybės intervalas yra 5,5 – 6 kV, o $P_{pr.}$ tikimybės intervalas yra 17 kV – 16,5 kV. Svarbu atkreipti dėmesį, jog tikimybės $P_{int.}$ intervalas sudaromas pagal pirmą formulę ir naujo intervalo pradžia yra senojo pabaiga. Intervalai suskirstyti taip: [5,5 – 6], [6 – 6,5], [6,5 – 7] ir taip toliau. Tuo tarpu izoliacijos pramušimo tikimybės, esant tam tikrai liekamajai įtampai $P_{pr.}$ intervalas skaičiuojamas pagal antrą formulę taip: [17-16,5], [17-16], [17-15,5] ir taip toliau. Taip yra todėl, nes $U_{jung.}$ nurodo mažiausią įtampos vertę, kuriai esant gali būti pramušama izoliacija. Taigi esant didesnei įtampai izoliacija taip pat gali būti pramušta.

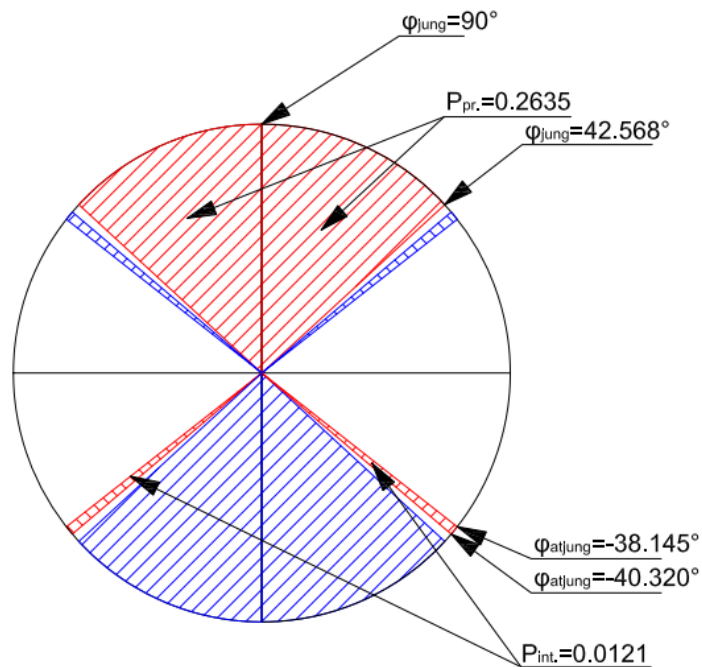
5.2 Izoliacijos pramušimo tikimybių grafinė analizė

Žemiau pateikiamos grafiškos atjungiamos linijos tikimybės pataikyti į atitinkamą intervalą ir izoliacijos pramušimo tikimybės, esant tam tikrai liekamajai įtampai skaičiavimo metodikos.

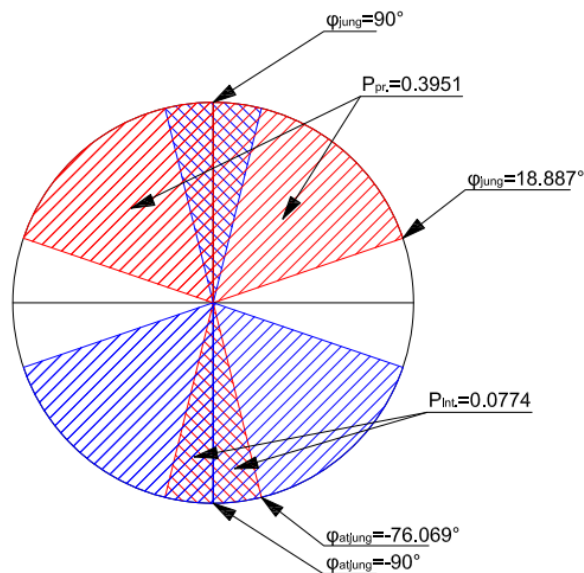
Kaip pavyzdžiai buvo paimti trys skirtingi intervalai:



5.2.1 pav. Atjungiamos linijos tikimybė pataikyti į 5,5-6 kV intervalą ir pramušimo tikimybė esant šiam intervalui



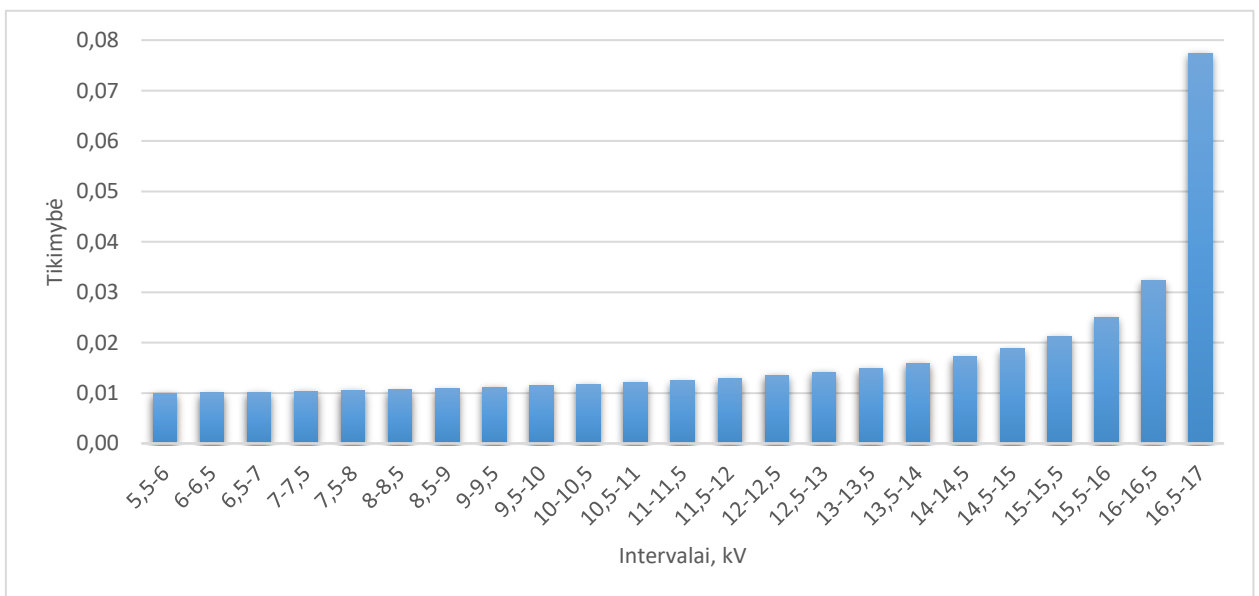
5.2.2 pav. Atjungiamos linijos tikimybė pataikyti į 10,5 – 11 kV intervalą ir pramušimo tikimybė esant šiam intervalui



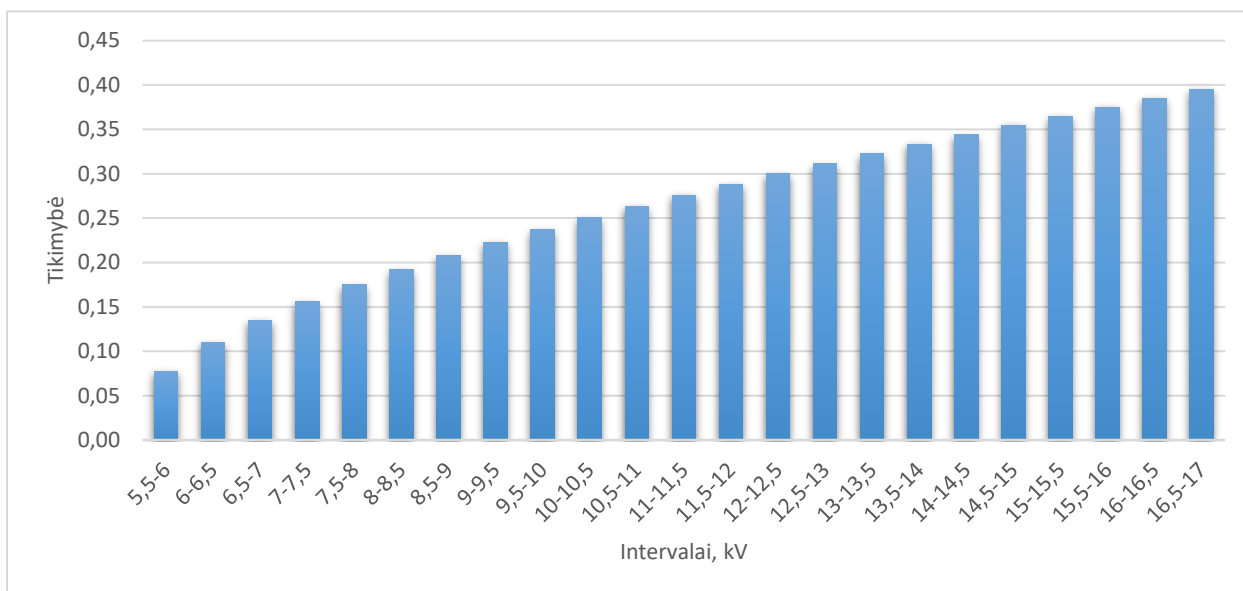
5.2.3 pav. Atjungiamos linijos tikimybė pataikyti į 16,5 – 17 kV intervalą ir pramušimo tikimybė esant šiam intervalui

Paveiksluose grafiškai parodomos tikimybės pataikyti į tam tikrą intervalą ir pramušimo tikimybė esant tam intervalui. Pramušimas galimas dvejais atvejais: kai atjungiamos linijos įtampa yra neigiama, o jungiamos linijos įtampa teigiama (užbrūkšniuota raudonai) ir kai atjungiamos linijos įtampa yra teigiama, o jungiamos linijos įtampa neigiama (užbrūkšniuota mėlynai). Dėl to skaičiuojant $P_{lt.pr.}$ formulėje (22) yra dauginama iš 2.

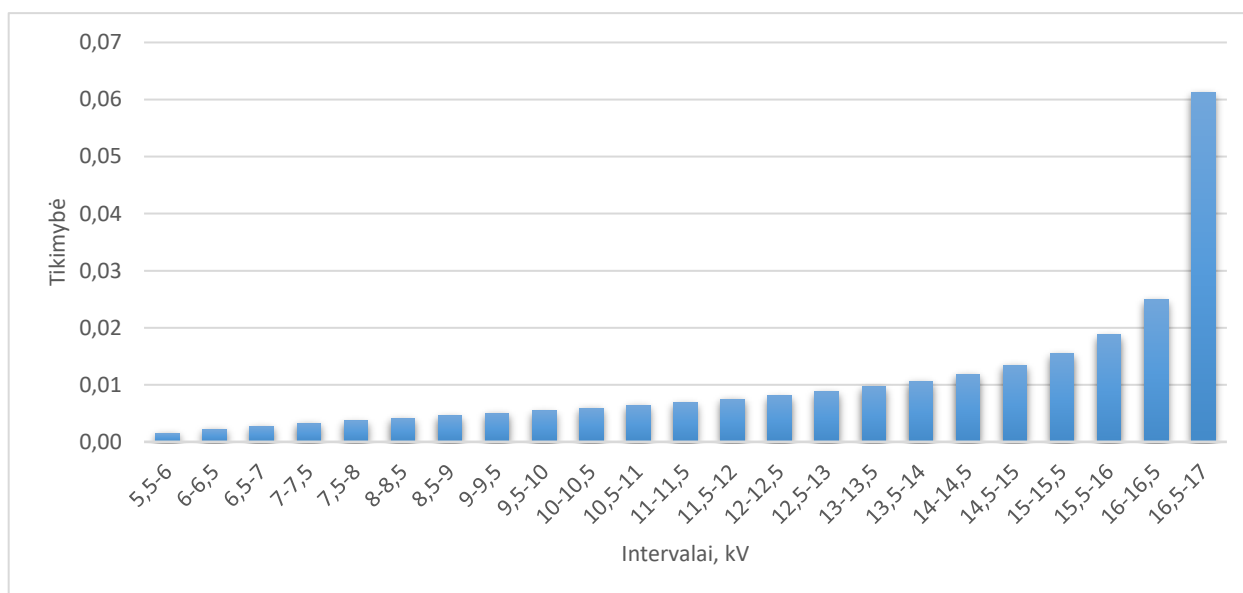
Žemiau pateikiami trys grafikai atitinkamai parodantys trijų paskutinių lentelės stulpelių tikimybių kitimus priklausomai nuo to, kuriame intervale yra atjungiamą linija.



5.2.4 pav. Tikimybė, kad atjungiamos linijos įtampa bus atitinkame intervale



5.2.5 pav. Izoliacijos pramušimo tikimybė, esant tam tikrai liekamajai įtampai



5.2.6 pav. Tikimybė, kad atjungiamos linijos įtampa pateks į atitinkamą intervalą ir izoliacija bus pramušta

Iš 5.2.4 pav. matyti, kad tikimybė atjungimo metu pataikyti į aukštos įtampos intervalą yra labai didelė. Tikimybė, kad atjungimo metu vieno iš dviejų pusperiodžio įtampa bus pati didžiausia (14 kV – 17 kV), yra beveik 21% ir didesnė, negu tikimybė, kad įtampa atjungimo metu bus 5,5 kV – 14 kV.

5.2.5 pav. matyti, kad izoliacijos pramušimo tikimybė didėjant liekamajai kabelio įtampai didėja, tačiau didžiausias pokytis yra pradžioje ir jis nuolat mažėja.

5.2.6 pav. parodo, kad tikimybė pataikyti į tam tikrą intervalą ir pramušti izoliaciją dar smarkiai didėja, didėjant liekamajai įtampai kabelyje. Atjungiant liniją yra virš 6% tikimybė, kad linija bus atjungta 16,5-17 kV intervale ir kad izoliacija bus pramušta.

Lentelės apačioje visų intervalų $P_{t.pr.}$ suminė tikimybė yra 0,2418, taigi teoriškai vienas iš keturių pakartotinių jungimų sukeltų avariją. Žinoma šie skaičiavimai atlikti neišlaikant jokio laiko tarpo. Praktikoje visada yra tam tikras užlaikymas, tačiau ne visada jo užtenka, kad kabelis išsikrautų. Tam, kad tiksliai galėtume nustatyti reikalingus laiko tarpus, reikalingi papildomi skaičiavimai ir išsikrovimo kreivės, kurios priklauso nuo tinklo parametrų.

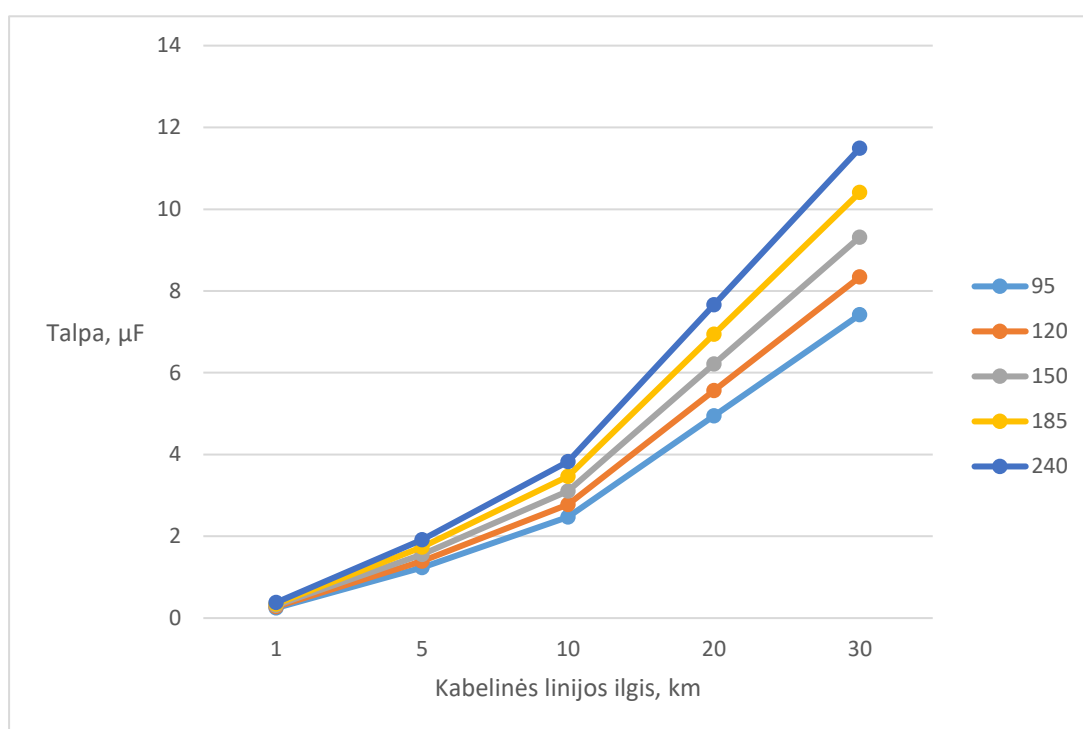
Izoliacijos pramušimo tikimybei sumažinti plačiai naudojami viršįtampių ribotuvai. Taip apribojamos pačios pavojingiausios tinklui įtampos, tačiau atlaidžiai žiūrint į liekamąją krūvį ir junginėjančias linijas, izoliacija yra gadinama ir laikui bėgant net ir nedidelis tinklo viršįtampis gali sukelti pramušimą.

6. Kabelių parametų analizė

Elektros kabelių parametrai skiriasi priklausomai nuo jų tipo, skerspjūvio ir ilgio. Šio tyrimo metu mums svarbiausi tinklo parametrai yra du: talpa ir izoliacijos varža. Izoliacijos varža įprastai yra matuojama specialiais prietaisais, tuo tarpu tinklo talpą galima apskaičiuoti. Tam, kad tiksliau įvertintume, kurie parametrai daro įtaką tinklo talpai, sudaroma skirtingų kabelių kreivių šeima.

6.1 lentelė. Kabelio talpos [μF] priklausomybė nuo ilgio ir skerspjūvio

Kabelio ilgis, km	Kabelio skerspjūvis mm ²				
	95	120	150	185	240
1	0,2473	0,2781	0,3106	0,347	0,3831
5	1,2365	1,3905	1,553	1,735	1,9155
10	2,473	2,781	3,106	3,47	3,831
20	4,946	5,562	6,212	6,94	7,662
30	7,419	8,343	9,318	10,41	11,493



6.1 pav. Skirtingų kabelių talpos priklausomybė nuo kabelių ilgio

Laiko intervalas, reikalingas tinklui su kabelinės linijos intarpais, visais atvejais bus skirtingas ir iš esmės priklauso nuo kelių parametų – tinklo talpos ir izoliacijos varžos, per kurią atjungta linija išsikrauna.

Tinklo išsikrovimo laikas su kitais parametrai siejasi:

$$R_{izol.} = \frac{U_f}{I_n} \quad (23)$$

$R_{izol.}$ – Tinklo izoliacijos varža

U_f – Jungiamos fazės įtampa

I_n – Nuotekio srovė

$$U(t) = U_f * e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (24)$$

$U(t)$ – tam tikru laiko momentu esanti fazės įtampa

t – laikas

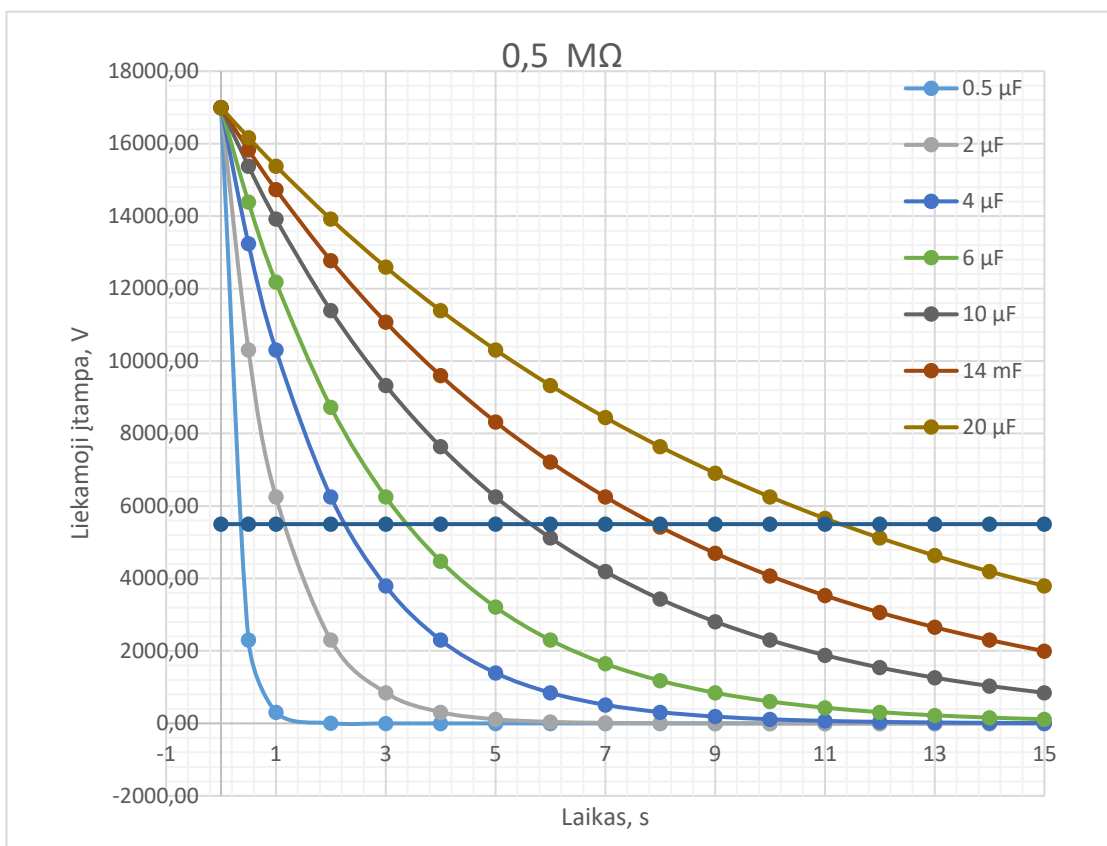
τ – laiko pastovioji

$$\tau = R_{izol.} * C \quad (25)$$

C – kabelio talpa

6.2 lentelė. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąją krūvį liekamosios įtampos vertės [V] praėjus tam tikram laiko tarpui esant 0,5 MΩ varžai

Varža 0,5		Talpa, μF						
		0,5	2	4	6	10	14	20
Laikas, s	0,5	2300,70	10311,02	13239,61	14390,19	15382,24	15828,07	16170,90
	1	311,37	6253,95	10311,02	12181,03	13918,42	14736,92	15382,24
	2	5,70	2300,70	6253,95	8728,09	11395,44	12775,11	13918,42
	3	0,10	846,38	3793,21	6253,95	9329,80	11074,46	12593,91
	4	0,00	311,37	2300,70	4481,15	7638,59	9600,21	11395,44
	5	0,00	114,55	1395,44	3210,89	6253,95	8322,21	10311,02
	6	0,00	42,14	846,38	2300,70	5120,30	7214,34	9329,80
	7	0,00	15,50	513,36	1648,52	4192,15	6253,95	8441,95
	8	0,00	5,70	311,37	1181,22	3432,24	5421,41	7638,59
	9	0,00	2,10	188,85	846,38	2810,08	4699,70	6911,68
	10	0,00	0,77	114,55	606,46	2300,70	4074,07	6253,95
	11	0,00	0,28	69,48	434,55	1883,65	3531,72	5658,81
	12	0,00	0,10	42,14	311,37	1542,21	3061,57	5120,30
	13	0,00	0,04	25,56	223,10	1262,65	2654,01	4633,04
	14	0,00	0,01	15,50	159,86	1033,77	2300,70	4192,15
15	0,00	0,01	9,40	114,55	846,38	1994,43	3793,21	

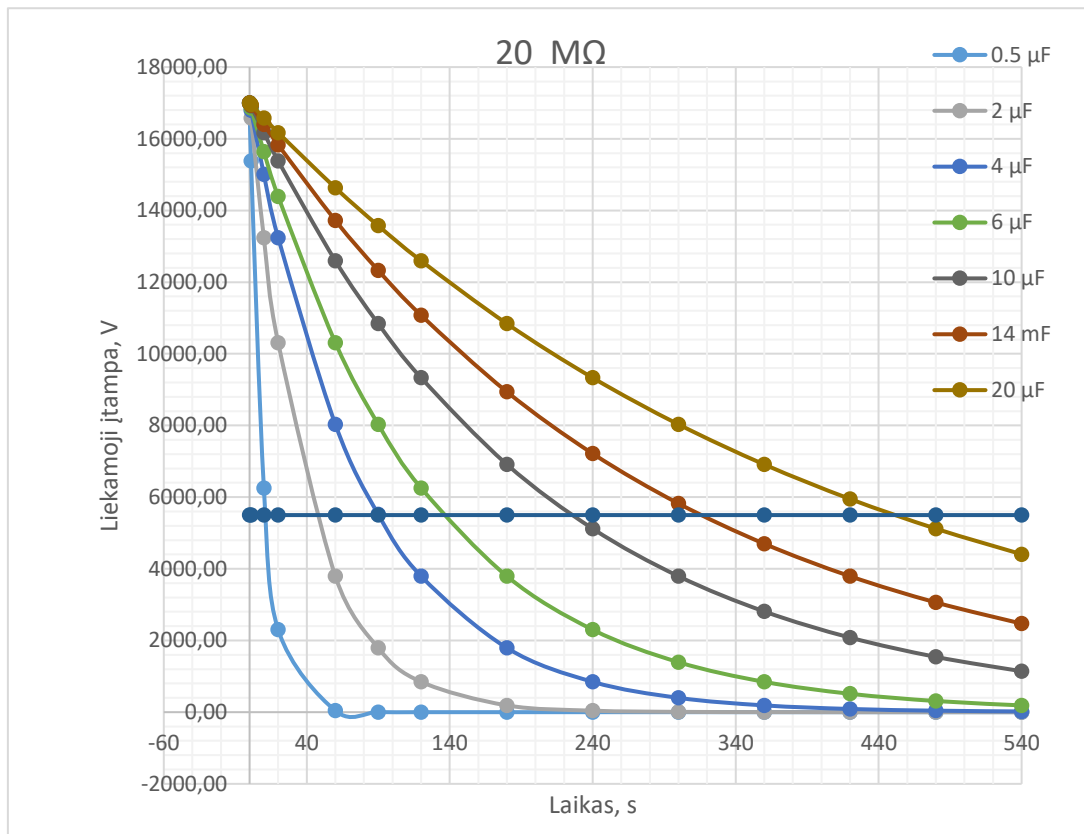


6.2 pav. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąjį krūvį liekamosios įtampos priklausomybės nuo laiko esant 0,5 MΩ varžai

Iš grafiko matome, kaip smarkiai didėja išsikrovimo laikas didėjant linijos talpai. Jeigu linijos talpa 2μF užtenka išlaukti 2 sekundes, tuo tarpu linijoje su 20 μF talpa reikia išlaukti 12 sekundžių.

6.3 lentelė. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąjį krūvį liekamosios įtampos vertės [V] praėjus tam tikram laiko tarpui esant 20 MΩ varžai

Varža 20 MΩ		Talpa, μF						
		0,5	2	4	6	10	14	20
Laikas, s	0	17000,00	17000,00	17000,00	17000,00	17000,00	17000,00	17000,00
	1	15382,24	16580,27	16788,82	16858,92	16915,21	16939,39	16957,55
	10	6253,95	13239,61	15002,45	15640,76	16170,90	16403,57	16580,27
	20	2300,70	10311,02	13239,61	14390,19	15382,24	15828,07	16170,90
	60	42,14	3793,21	8030,23	10311,02	12593,91	13721,00	14632,04
	90	2,10	1791,79	5519,09	8030,23	10839,68	12326,91	13574,78
	120	0,10	846,38	3793,21	6253,95	9329,80	11074,46	12593,91
	180	0,00	188,85	1791,79	3793,21	6911,68	8938,40	10839,68
	240	0,00	42,14	846,38	2300,70	5120,30	7214,34	9329,80
	300	0,00	9,40	399,80	1395,44	3793,21	5822,82	8030,23
	360	0,00	2,10	188,85	846,38	2810,08	4699,70	6911,68
	420	0,00	0,47	89,21	513,36	2081,76	3793,21	5948,94
	480	0,00	0,10	42,14	311,37	1542,21	3061,57	5120,30
	540	0,00	0,02	19,90	188,85	1142,49	2471,05	4407,08

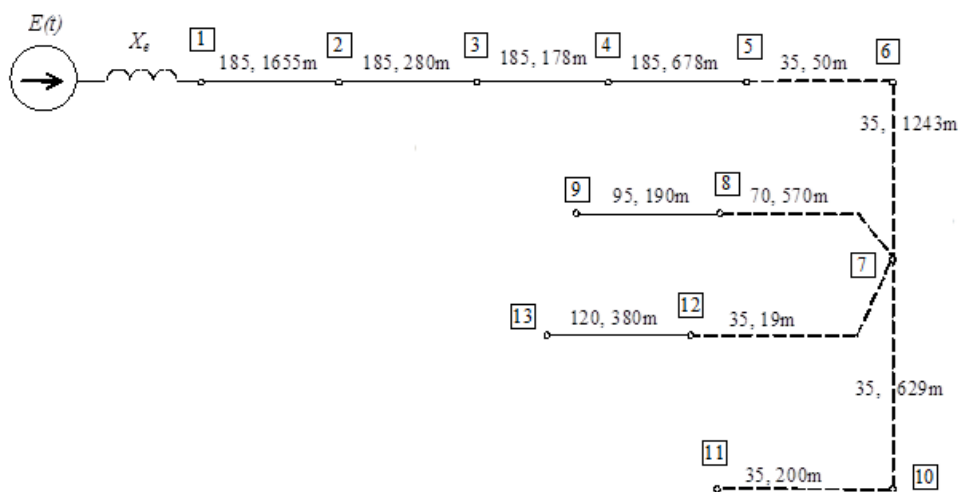


6.2 pav. Atjungtos linijos turinčios atitinkamą liekamąjį krūvį liekamosios įtampos priklausomybės nuo laiko esant $0,5 \text{ M}\Omega$ varžai

Šiuo atveju, kai linijos talpa $2 \mu\text{F}$, reikia išlaukti išlaukti 60 sekundžių, tuo tarpu linijoje su $20 \mu\text{F}$ talpa, reikia išlaukti 8 minutes. Žinoma, kuo didesnis tinklas, tuo didesnė jo talpa, tačiau taip mažėja izoliacijos varža, kadangi atsiranda papildomų vietų per kurias krūvis gali nutekėti. Todėl svarbu įvertinti abu šiuos veiksnius.

7. Tiriamoji ekvivalentinė schema

Vienas iš mišrių oro ir kabelių linijų pavyzdžių – Šilainių TP 10 kV tinklo 40 fideris:



7.1 pav. Šilainių TP 10 kV tinklo 40 fiderio skaičiuojamoji schema

□ – mazgo numeris;

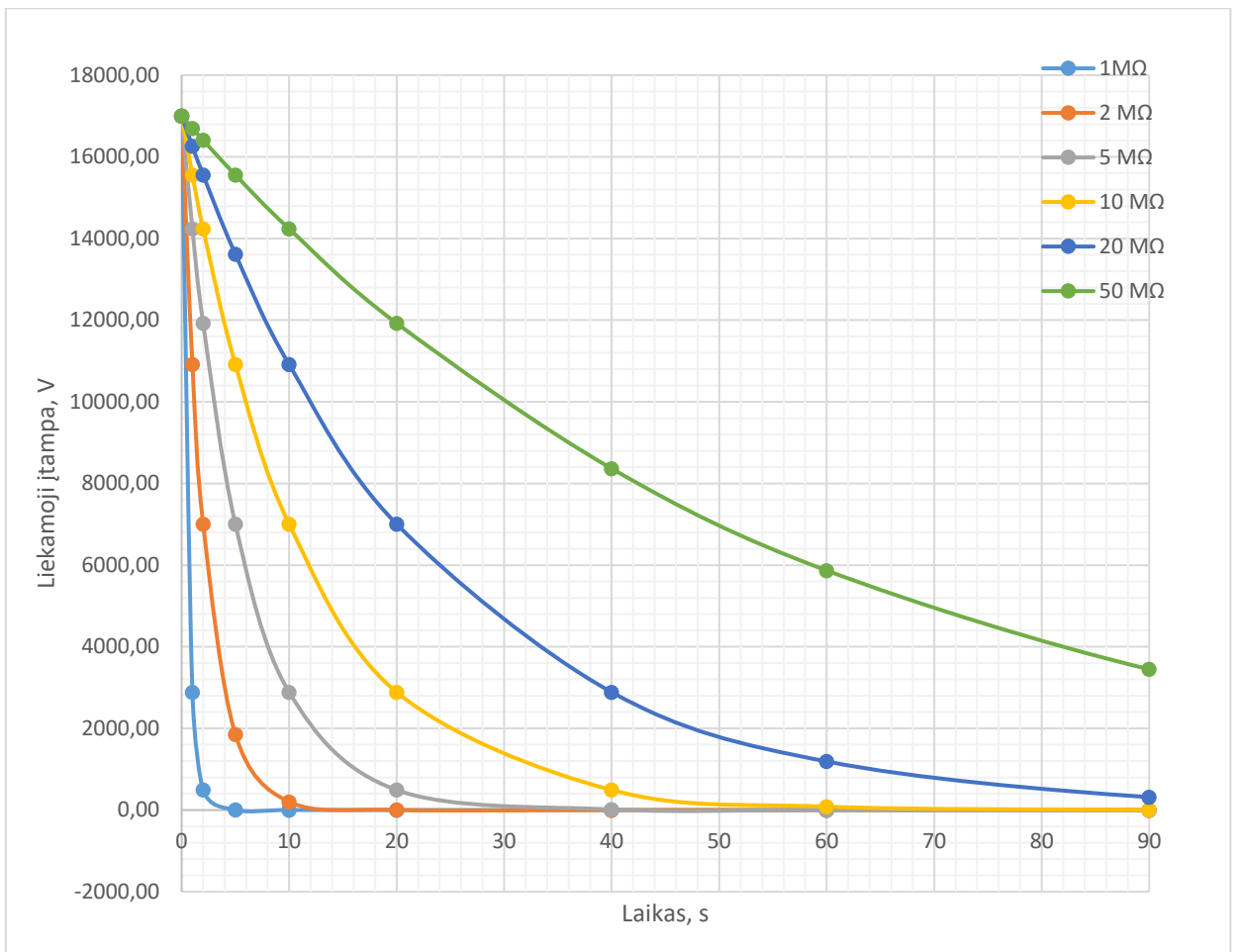
35, 50 m – kabelio (—) ar oro linijos (-----) skerspjūvis ir ilgis;

X_e – ekvivalentinė induktyvioji sistemos varža

Iš paveikslo matome, jog oro linijų atkarpos sudaro 45 % visos linijos ilgio. Linijos suminis ilgis 6,072 km. Nors oro linijos sudaro beveik pusę ilgio, tačiau OL talpos yra ženkliai mažesnės nei KL. Naudojantis 7.1 lentelės duomenimis apskaičiuota bendra kabelių talpa 1,121 μF . Bendra prijungtos linijos talpa 1,128 μF .

7.1 lentelė. Šilainių TP 10 kV 40 fiderio liekamosios įtampos vertės [V] praėjus tam tikram laiko tarpui esant skirtingoms varžoms

Talpa 1,128 μF		Varža, $\text{M}\Omega$					
		1	2	5	10	20	50
Laikas, s	0	17000,00	17000,00	17000,00	17000,00	17000,00	17000,00
	1	2886,84	10912,96	14237,91	15557,78	16262,91	16701,24
	2	490,23	7005,45	11924,60	14237,91	15557,78	16407,73
	5	2,40	1853,18	7005,45	10912,96	13620,58	15557,78
	10	0,00	202,02	2886,84	7005,45	10912,96	14237,91
	20	0,00	2,40	490,23	2886,84	7005,45	11924,60
	40	0,00	0,00	14,14	490,23	2886,84	8364,47
	60	0,00	0,00	0,41	83,25	1189,63	5867,24
	90	0,00	0,00	0,00	5,83	314,70	3446,88
	120	0,00	0,00	0,00	0,41	83,25	2024,97
	150	0,00	0,00	0,00	0,03	22,02	1189,63
	180	0,00	0,00	0,00	0,00	5,83	698,88

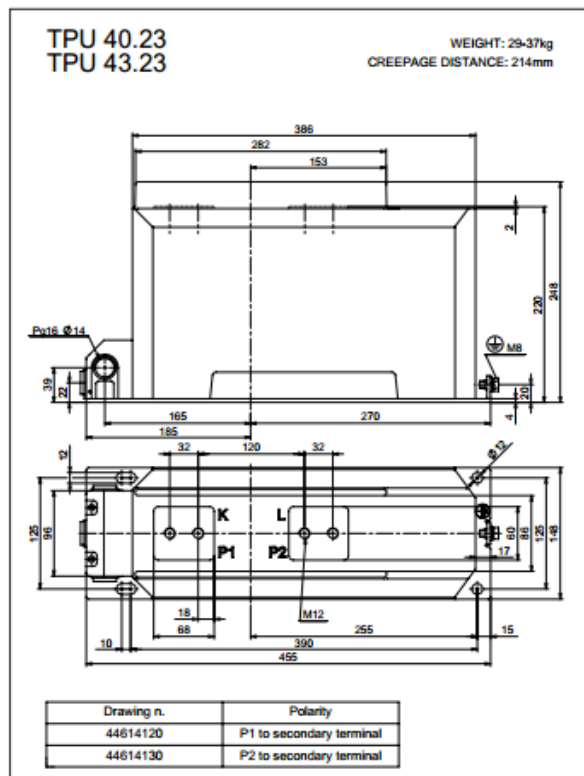


7.1 pav. AKĮ pauzės priklausomybė nuo nuotekio srovės

Iš grafiko matome, kaip kinta AKĮ pauzės priklausomybė nuo izoliacijos varžos, todėl svarbu kiekvienu atveju išmatuoti linijos izoliacijos varžą, kad būtų galima tinkamai parinkti kuo mažesnę laiko pauzę.

8. Srovės transformatoriaus panaudojimo bandymas

Šiuolaikiniai srovės transformatoriai gali turėti kelias skirtingos galios antrines srovines grandines, taip pat gali būti užsakomi su įtampos indikacijos sistema. Taigi iškeliami hipotezė, jog galima vykdyti linijos įtampos verčių monitoringą bet kuriuo laiko momentu, naudojant ST įtampos indikacijos gnybtus. Taip būtų galima realiu laiku įvertinti tinklo įtampą ir pasiekus leistiną reikšmę, daryti automatinį kartotinį įjungimą. Be to įžemėjimo atveju taip būtų galima tiksliai žinoti, kuri linija ir netgi fazė yra įžemėjusi ir taip atjungti reikiamą liniją.



8.1 pav. Srovės transformatoriaus TPU 40.23 matmenys [2]



8.2 pav. Srovės transformatoriasu TPU 40.23 parametrai

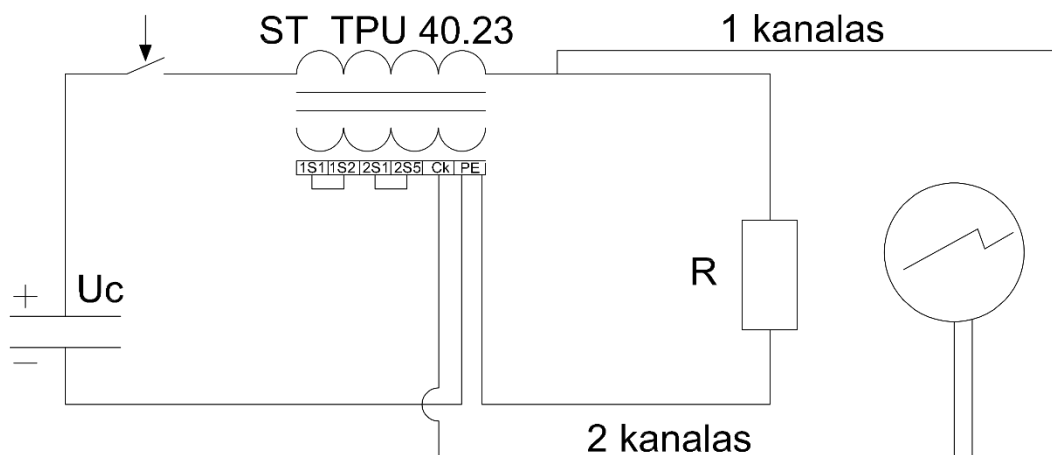
Atsijungus elektros linijai ir joje yra liekamoji įtampa. Šiai įtampai imituoti buvo panaudoti keturi kondensatoriai po 2 μF . Šie kondensatoriai pavaizduoti žemiau:



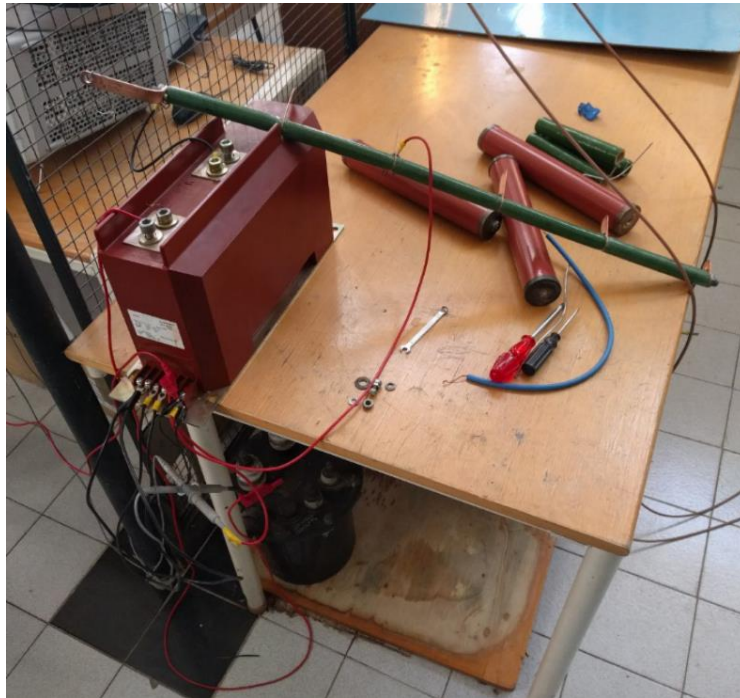
8.3 pav. Kondensatoriaus parametrai

8.1 Srovės transformatoriaus bandymo aprašymas

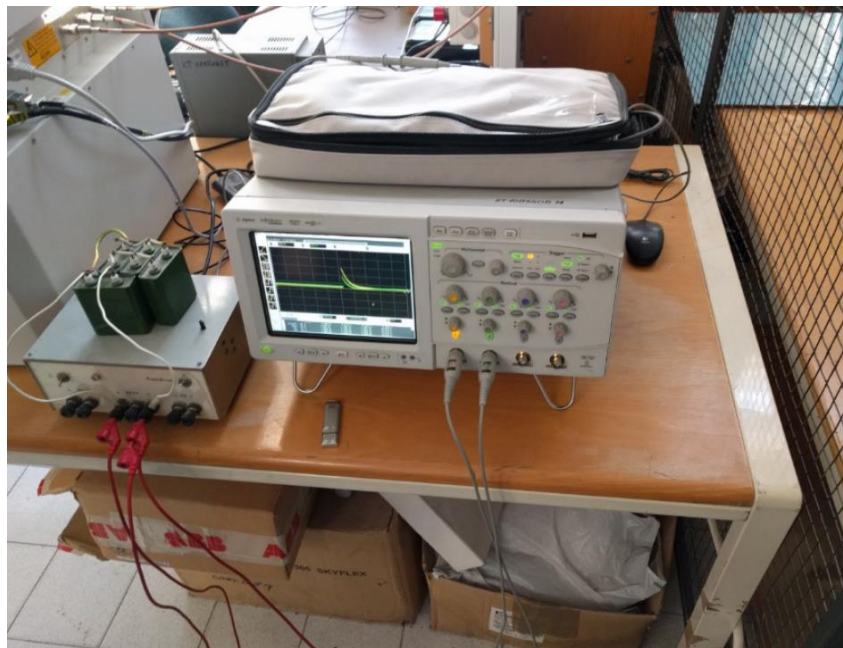
- 1) Naudojamame oscilografe reikalingi du kanalai. Vienas kanalas prijungiamas prie pirminės grandinės srovės transformatoriaus gnybto, antrasis kanalo išvadas prijungiamas prie antrinės grandinės įtampos indikacijos gnybto Ck. Abiejų kanalų išvadų įžeminimo gnybtai prijungiami prie PE gnybto.
- 2) Tinklo izoliacijos varža imituojama varža R. Ji prijungiama prie pirminės ST grandinės gnybto ir prie PE gnybto iš kitos pusės. Ši varža yra nuotekio varža ir per ją išsikrauna imituojamo tinklo įtampa.
- 3) Nenaudojami antrinės grandinės sroviniai gnybtai užtrumpinami.
- 4) Tinklo įtampa įkraunami keturi kondensatoriai iki 1200 V įtampos, atjungiami nuo įtampos ir prijungiami prie pirminės srovės transformatoriaus grandinės gnybto.
- 5) Bandymų metu keičiama varža ir registruojamos išsikrovimo kreivės.



8.1.1 pav. Principinė bandymo schema



8.1.2 pav.Srovės transformatorius bandymo metu



8.1.3 pav.Oscilografas ir kondensatoriai bandymo metu

Bandymo rezultatai eksportuojami .bin formatu ir apdorojami Matlab programa. Bandymai buvo atlikti su septyniomis skirtingomis varžomis, rezultatai pateikiami kitame skyrelyje.

8.2 Imituojamos izoliacijos varžų parinkimas bandymuose

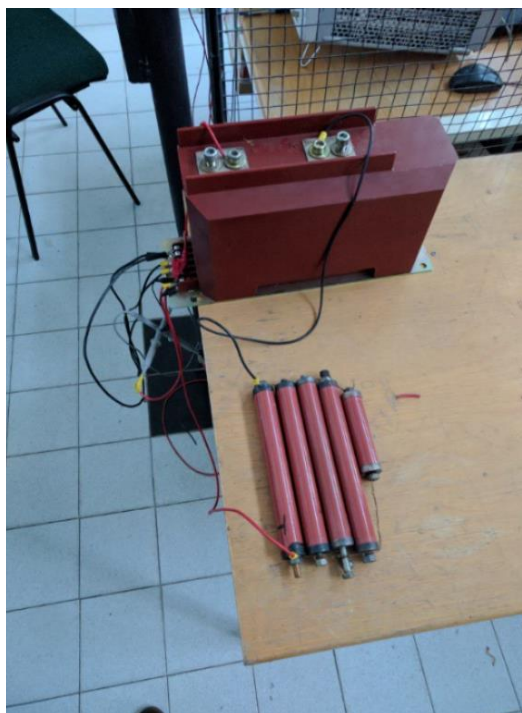
Bandymuose naudojamų tam tikrų parametrų varžos:

- 1) 11x200 Ω
- 2) 4x220 Ω
- 3) 5x300 Ω
- 4) 1x0,5 k Ω
- 5) 3x1 k Ω
- 6) 3 M Ω
- 7) 10 M Ω

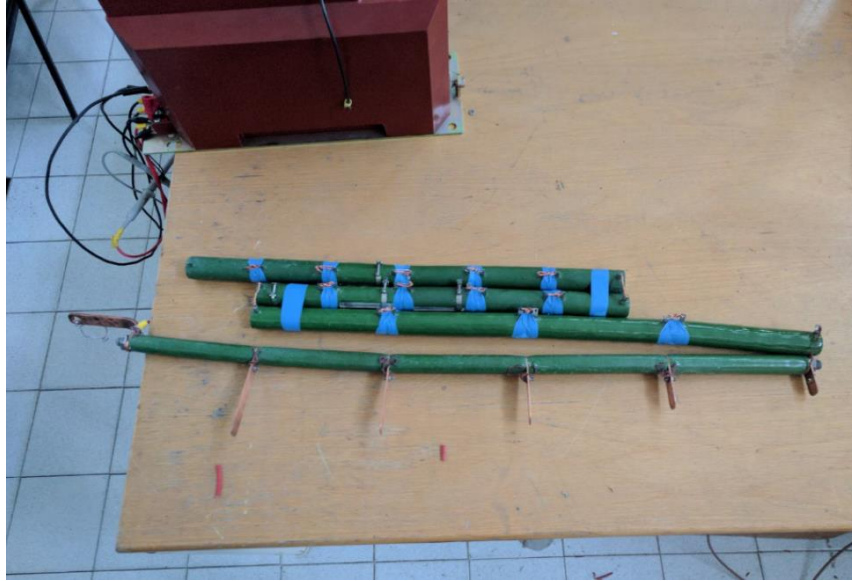
Dėl ribotų varžų nominalų atsirado didelis intervalas, kuriame negalima išmatuoti išsikrovimo kreivių (nuo 300 Ω iki 0,5 k Ω). Tam, kad būtų galima atlikti išsamesnę analizę, didelio nominalo varžos jungiamos lygiagrečiai, tam kad sumažintume bendrą varžą, o žemo nominalo varžos jungiamos nuosekliai kad padidintume bendrą varžą:

$$R = R1 + R2 + \dots + Rx \quad (26)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \dots + \frac{1}{Rx} \quad (27)$$

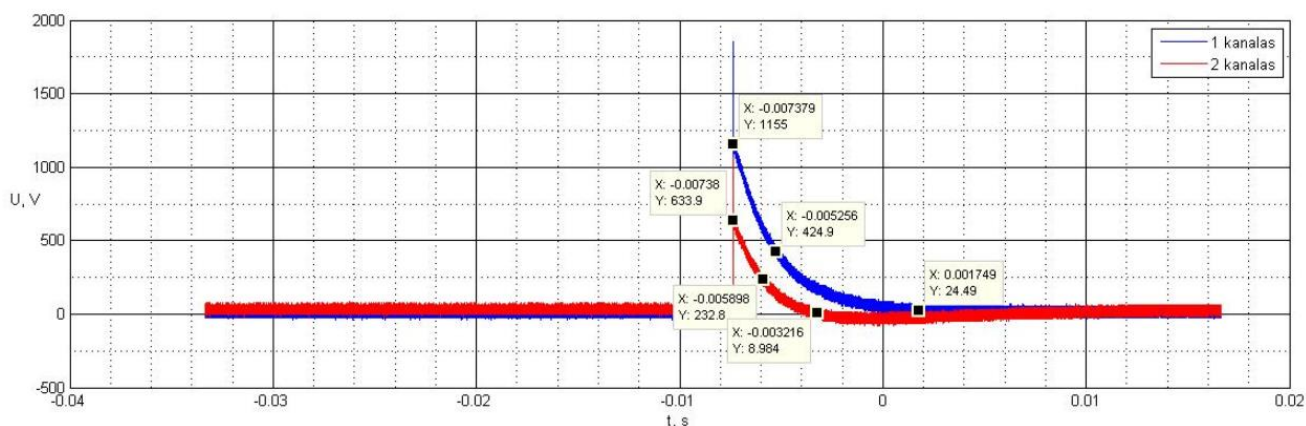


8.2.1 pav. Bandymas su 172 k Ω imituojama izoliacijos varža (3x1M Ω ir 1x0.5M Ω varžos)

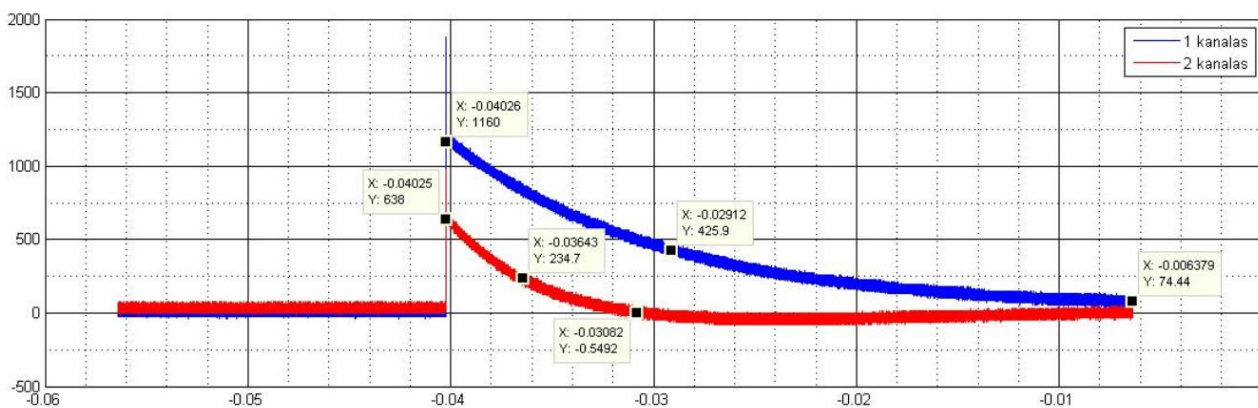


8.2.2 pav. Bandydas su 4,58 k Ω imituojamos izoliacijos varža (11x200 Ω , 4x220 Ω ir 5x300 Ω varžos)

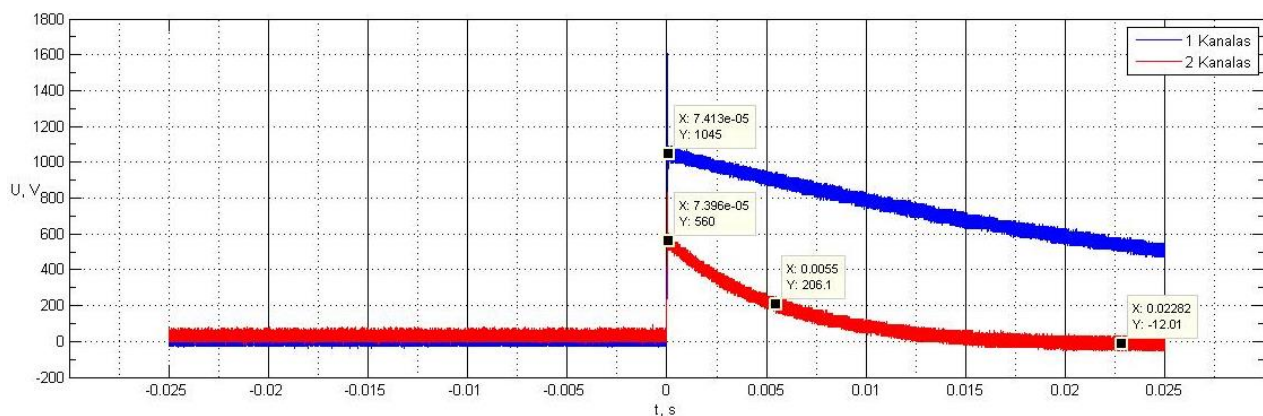
8.3 Bandymo rezultatų analizė



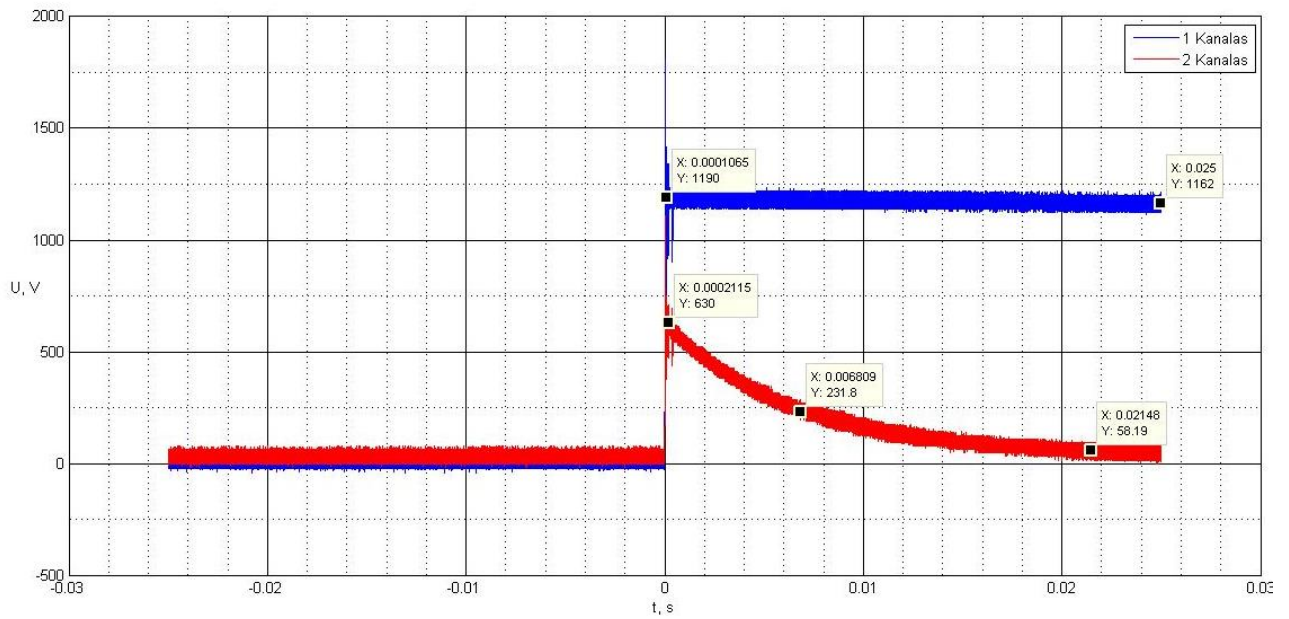
8.3.1 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 300Ω varžai



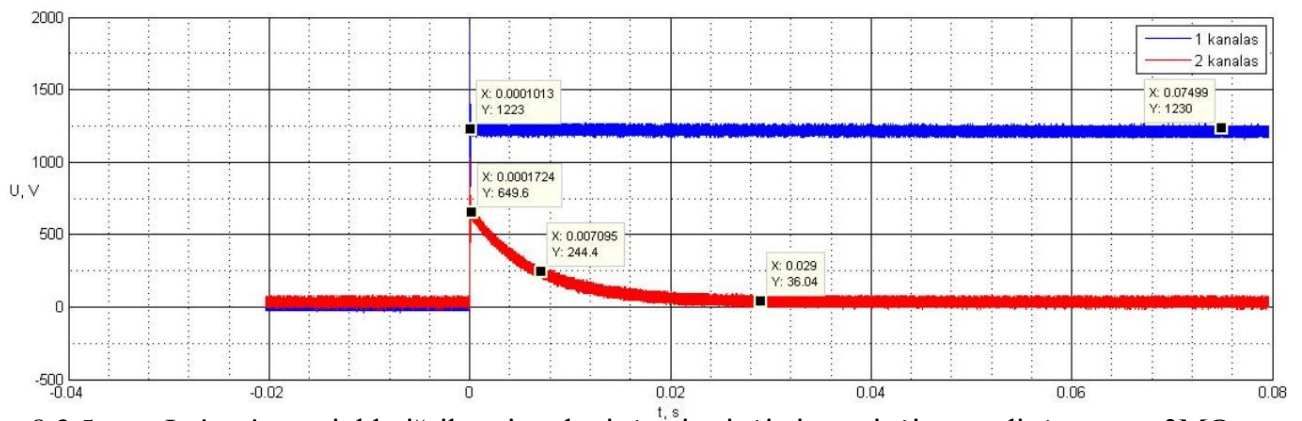
8.3.2 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 1500Ω varžai



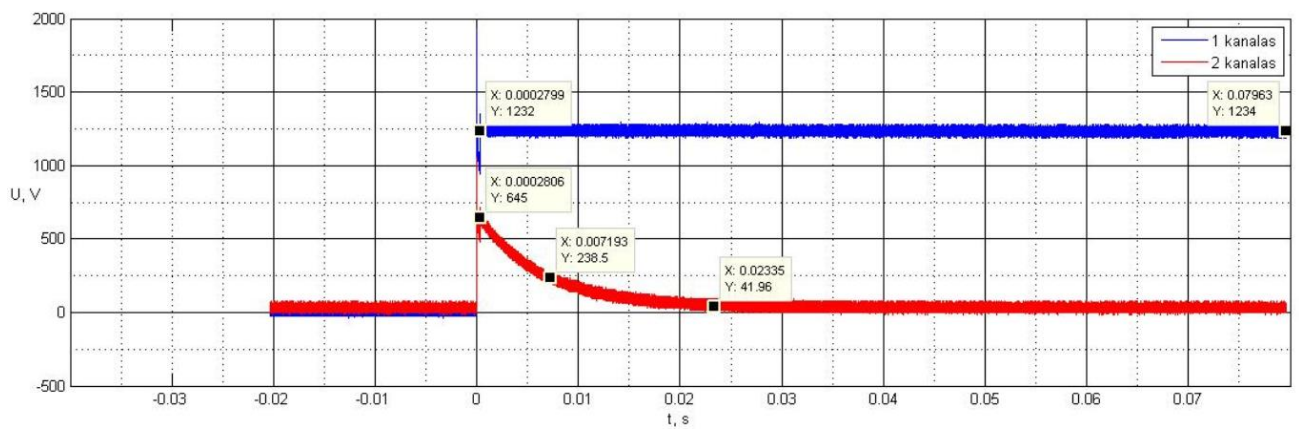
8.3.3 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 4580Ω varžai



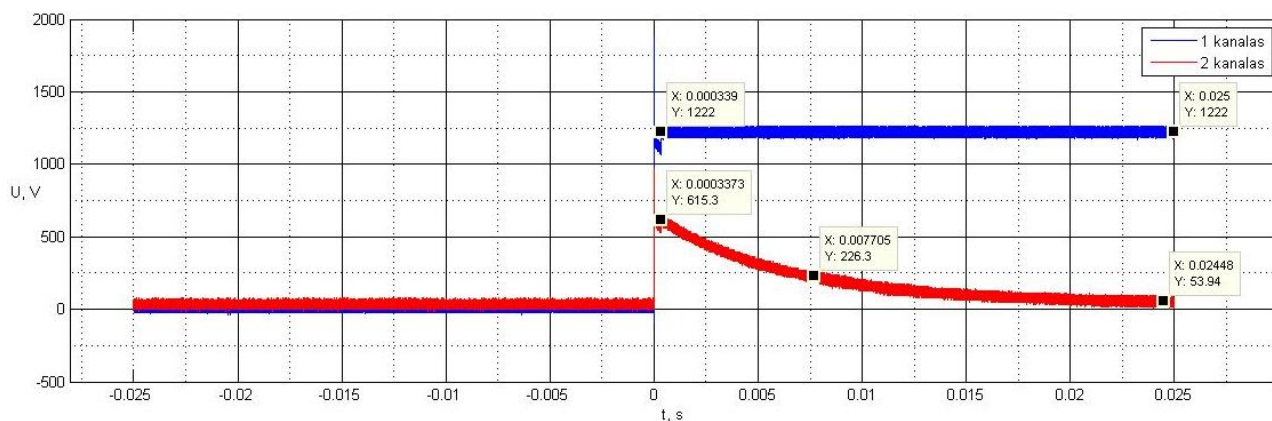
8.3.4 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 172 kΩ varžai



8.3.5 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 3MΩ varžai



8.3.6 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant 10MΩ varžai



8.3.7 pav. Imituojamo tinklo išsikrovimo kreivės pirminėje ir antrinėje grandinėse esant begalinei izoliacijos varžai (atjungta izoliacijos varža)

Kiekviena kreivė yra sudaryta apytiksliai iš 2-4 milijonų duomenų ir 1 μ s tenka po apytiksliai po 15 reikšmių, todėl analizei buvo pasirinktas grafinis metodas ir rezultatams įvertinti imamos vidutinės to momento reikšmės.

Upradinė – artimiausia pereinamojo proceso pradžia įtampa.

τ – laiko pastovioji t.y. tai laikas per kurį įtampa nukrinta $e \approx 2.718$ karto

$$\tau = t_1 - t_2 \quad (28)$$

U_τ – yra įtampos vertė, kuri yra e kartų mažesnė už Upradinė

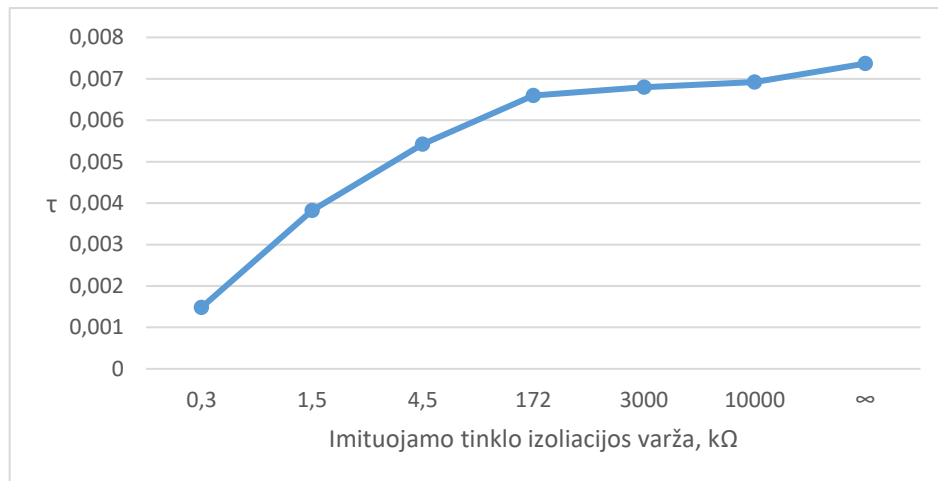
$$U_\tau = \frac{U_{pradinė}}{e} \quad (29)$$

t_1 – laiko momentas esant Upradinė įtampos reikšmei

t_2 – laiko momentas esant U_τ įtampos reikšmei

8.2.1 lentelė. Bandymo rezultatų suvestinė

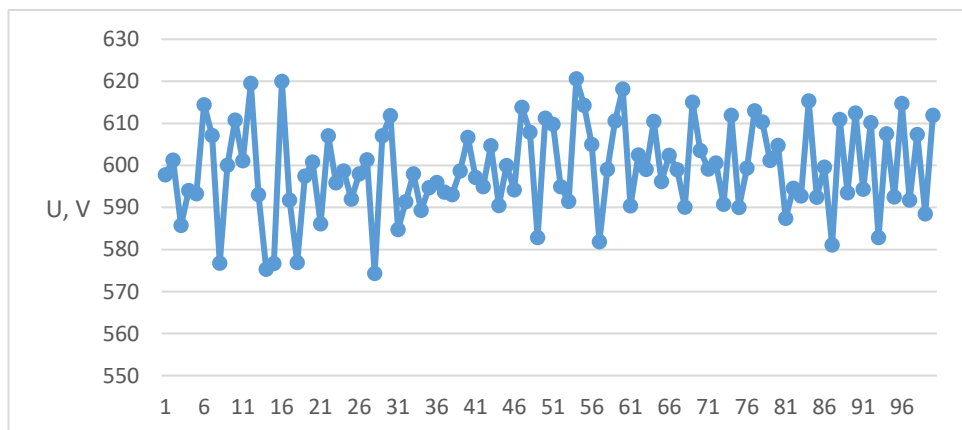
Varža k Ω	kanalas	Upradinė	U_τ	t_1	t_2	τ
0,3	1	1155	424,9008	0,007379	0,005256	-0,002123
	2	633,9	233,1988	-0,00738	-0,0059	0,001482
1,5	1	1160	426,7402	-0,04026	-0,02912	0,01114
	2	638	234,7071	-0,04025	-0,03643	0,00382
4,58	1	1045	384,434	-	-	-
	2	560	206,0125	0,00007396	0,0055	0,00542604
172	1	1190	437,7765	-	-	-
	2	630	231,764	0,0002115	0,006809	0,0065975
3000	1	1223	449,9166	-	-	-
	2	655	240,961	0,00009966	0,006899	0,00679934
10000	1	1232	453,2275	-	-	-
	2	645	237,2822	0,0002806	0,007202	0,0069214
∞	1	1222	449,5487	-	-	-
	2	615,3	226,3562	0,0003373	0,007705	0,0073677



8.3.8 pav. Laiko pastoviosios priklausomybė nuo imituojamo tinklo izoliacijos varžos

Laiko pastovioji pasirinkta dėl to, jog pačio išsikrovimo laiką eksperimentiškai išmatuoti yra gana sunku dėl didelio duomenų kiekio prie x ašies, todėl efektyvesnis ir aiškiau esmę atskleidžiantis parametras šiuo atveju yra laiko pastovioji.

Iš 8.3.8 paveikslo matome, kad ryšys tarp imituojamo tinklo izoliacijos varžos ir laiko pastoviosios egzistuoja – didėjant izoliacijos varžai didėja laiko pastovioji. Taigi prielaida, kad galima nustatyti tinklo įtampą naudojant ST įtampos indikacijos gnybtus pasitvirtino. Tokiu būdu kontroliuojant liekamąjį krūvį galima valdyti AKĮ pauzę izoliuotos neutralės tinkle su kabeliniais intarpais.



8.3.9 pav. Antro oscilografo kanalo matuojamos įtampos svyravimai esant 300 Ω varžai

8.3.9 pav. buvo pasirinkti 100 iš eilės gautų duomenų atliekant bandymą su 300 Ω izoliacijos varža: visa x ašis (100 duomenų) atspindi 0,5μs. Iš šio paveikslo matyti, kaip stipriai kinta įtampos reikšmės, todėl grafiškai analizuojant duomenis rezultatai gaunami su tam tikromis paklaidomis.

Dėl šios priežasties reikalingas tikslesnis komutacinis aparatas tikslesniems matavimams ir analizei atlikti. Tai ypač svarbu, kadangi imituojamos izoliacijos varžos skiriasi daug kartų, o laiko pastoviosios yra labai panašios. Todėl su tikslesnėmis reikšmėmis būtų galima atlikti kokybiškesnę analizę. Bitinio triukšmo sumažinimui galima būtų naudoti skaitmeninį filtrą.

IŠVADOS

- 1) Elektros kabelių parametrai skiriasi priklausomai nuo gamintojo ir naudojamų technologijų, tačiau to pačio skerspjūvio skirtingų kabelių parametrai yra labai panašūs.
- 2) Mišrios linijos atjungimo metu didžioji dalis liekamojo krūvio yra kabeliuose ir jis pavojingas elektros skirstomajam tinklui. Yra didelė tikimybė (~0,24), kad atjungus ir vėl prijungus elektros liniją su kabeliniu intarpu, dėl netinkamo fazės kampo, neišlaikant laiko tarpo izoliacija bus pramušta.
- 3) Elektromagnetinė banga sklisdama nuo linijos pradžios į linijos galą gali padidėti du kartus.
- 4) Krūvio nutekėjimo laikas yra tiesiogiai proporcingas elektros tinklo talpai ir izoliacijos varžai. Krūvis likęs 10 kV elektros linijoje turi būti mažesnis negu 5,5 kV, kad būtų saugu vėl įjungti liniją.
- 5) Srovės transformatoriaus antrinės grandinės įtampos indikacijos gnybtą galima naudoti pirminės grandinės įtampos matavimams, tačiau reikalinga tisklesnė jų tarpusavio ryšio analizė.

Literatūros sąrašas

Elektroninės duomenų bazės:

1. AB LESTO. „Technologinės tinklo plėtros strategija“ [žiūrėta 2016-05-20]. Prieiga per internetą: <http://www.eso.lt/stream/1594/strategija.%202015.pdf>
2. Vidaus tipo TPU 4x.xx srovės transformatorių katalogas [žiūrėta 2017-01-23]. Prieiga per internetą:
<https://library.e.abb.com/public/d3ac57c587a9aa73c1257c3700432b40/TPU%204x.xx%20en.pdf>

Vadovėliai:

3. Hiyan Xue, Dale Finney, Bin Le *Charging Current in Long Lines and High-Voltage Cables – Protection Application Considerations*
4. Juozas Baublys, Pranas Jankauskas, Linas Andronis Markevičius, Alfonsas Morkvėnas *Izoliacija ir viršįtampiai* Kaunas: Technologija, 2008.
5. Miškinis, V, Razma. A. *Aukštos įtampos įrenginiai*: kolektyvinė monografija. Vilnius: Energetika, 2003.
6. Masiokas, S. *Elektrotechnika*: monografija. Kaunas: Candela, 1994.
7. Stanislovas Bartkevičius, Vytautas Lazauskas, Povilas Pukys, Jonas Stonys, Arvydas Virbalis *Teorinė elektrotechnika II*
8. Wedepohl L. M., Wilcox DJ. Transient analysis of underground power transmission systems.-*Proceedings IEE*, 1973, v.20
9. Drabatiukas A., Gudžius S., Markevičius L., Morkvėnas A., Plioplys G., Valatka A. Investigation of the overvoltages level distribution in low voltage network // *Proceedings of XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances: EMD' 2004*, 22-24 September, Vilnius, 2004 Vilnius: Technika. ISBN: 9986-05-766-3. 2004. P. 61-64. [ISI Proceedings, <http://isi01.isiknowledge.com/>]
10. Public service commission of Wisconsin *Underground electric transmission lines* Madison 2011
11. Gudžius S., Markevičius L., Morkvėnas A. Viršįtampių ribotuvų darbo sąlygų tyrimas izoliuotos neutralės tinkle // *Energetika – Vilnius: Academia*. 2001 m.
12. Gudžius S., Markevičius L., Morkvėnas A. Recursive method to examine electromagnetic transient processes in cable network / *IV Sympozjum, Metody matematyczne w elektroenergetyce MMwEE'98*. Zakopane, 1998.

13. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas, Vitalijus Gvozdas. Experimental research of the atmospheric overvoltage on the isolated neutral power network // *Proceedings of the 4rd International conference on Electrical and control technologies ECT-2009*, Kaunas, 2009. ISSN 1822-5934. Kaunas: Technologija, 2010.
14. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. Pradinių įžemėjimo pereinamųjų procesų eksperimentinis tyrimas // *Elektros ir valdymo technologijos ECT 2010: 5-osios tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinys / Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas*. Kaunas: Technologija, 2010. ISBN 9789955258148.
15. Gudžius S., Markevičius L., Morkvėnas A. Viršįtampių ribotuvų darbo sąlygų tyrimas izoliuotos neutralės tinkle // *Energetika*. Vilnius: Academia. 2001.

PRIEDAI

1 priedas. Kabelių parametrai AHXAMK-W 6/10 (12) kV

2 priedas. Kabelių parametrai AXLJ-TT 7/12 kV

3 priedas. Kabelių parametrai AXLJ-TT 7/12 kV (3 gyslos)

4 priedas. Kabelių parametrai AXLJ-RMF 7/12 kV

Priedas 1. Kabelių parametrai AHXAMK-W 6/10 (12) kV



Taikymas: Klojami kabelių kanaluose pastatų viduje, lauke ir vandenyje.

Standartas: CENELEC HD 620 5 dalis F skyrius

Ugnies plitimo klasė PE apvalkalas nėra atsparus ugniai

Temperatūros diapazonas: Aukščiausia leistinoji ilgalaikio darbo laidininko temperatūra 90°C

Žemiausia temperatūra montuojant -20°C, tačiau žemiau 0°C reikėtų imtis atsargumo priemonių

Impulsinė įtampa 75 kV

Lenkimo spindulys: Klojant - 15D, Paklojus - 10D

Konstrukcija

Laidininkas: Daugiavielis, apvalus ir sutankintas aliumininis laidininkas pagal IEC 60228 2 klasę su išilgine apsauga nuo vandens

Laidininko ekranas: presuotas

Izoliacija: XLPE, vardinis storis = 3,4 mm

Izoliacijos ekranas: presuotas, suklijuotas

Pagrindas: pusiau laidus atsparus vandeniui juosta

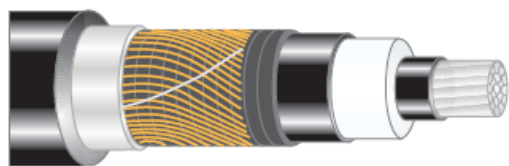
Ekranas: aliumininė folija glaudžiai surišta su apvalkalu

Apvalkalas: PE, juodas

Centrinis laidininkas: apvalus, daugiavielis ir sutankintas vario laidininkas, pagal IEC 60228 2 klasę

Išdėstymas: trys gyslos suvytos aplink centrinį laidininką

Priedas 2. Kabelių parametrai AXLJ-TT 7/12 kV



Taikymas: Viengyslis energijos skirstymo kabelis montuojamas lauke formuojant 3-jų fazių struktūrą. Klojamas vamzdžiuose ir žemėje/ vandenyje. Nuo vandens apsaugotas radialiai ir išilgai. Gali būti įterpiamas į žemę.

Alternatyvus ženklinimas: SE-N10XC7A5T5E-AR

Standartas: SS 4241416 CENELEC HD 620 5 dalis M skyrius

Ugnies plitimo klasė: F1 pagal SS 42414 75

Temperatūros diapazonas: Aukščiausia leistinoji ilgalaikio darbo laidininko temperatūra 90°C
Žemiausia temperatūra montuojant –20°C, tačiau žemiau 0°C reikėtų imtis atsargumo priemonių

Impulsinė įtampa: 75 kV

Lenkimo spindulys: Stacionariai montuojant - 10D

Traukiant - 15D

Įterpiant į žemę - 8D

Konstrukcija: Laidininkas: daugiavielis, apvalus ir sutankintas aliumininis laidininkas pagal IEC 60228 2 klasę, su išilgine apsauga nuo vandens

Laidininko ekranas: presuotas

Izoliacija: XLPE, minimalus storis = 2,96 mm

Izoliacijos ekranas: presuotas, suklijuotas

Išilginė apsauga nuo vandens: brinkstanti elektrai laidi juosta

Koncentrinis laidininkas: atkaitintos varinės vijos

Radialinė apsauga nuo vandens: aliuminio ir PE laminatas

Apvalkalas: LLD PE, juodas

Ženklinimas, pvz: AXLJ-TT 08DRAKA TSLE 12kV 1X240 AFR/25 "Data", ilgio žymuo.

Priedas 3. Kabelių parametrai AXLJ-TT 7/12 kV (3 gyslos)



Taikymas: Trigyslis kabelis skirtas pakeisti neizoliuotas oro linijas. Gali būti klojamas įterpimo į žemę būdu, tačiau dėl tvirtos konstrukcijos gali atlaikyti įtempimus atsirandančius kabelį klojant ramiuose riboto gylio vandens telkiniuose. Vandenyje išbrinkstanti gija ir prie apvalkalo priklijuota aliuminio folija suteikia kabeliui radialinę ir išilginę apsaugą nuo vandens.

Alternatyvus ženklimas: SE-N10XC7A5T5E-AR

Standartas: SS 424 14 16

CENELEC HD 620 6 dalis M skyrius

Ugnies plitimo klasė: F1 pagal SS 42414 75

Temperatūros diapazonas: Aukščiausia leistinoji ilgalaikio darbo laidininko temperatūra 90°C. Žemiausia temperatūra montuojant –20°C, tačiau žemiau 0°C reikėtų imtis atsargumo priemonių.

Impulsinė įtampa: 75 kV

Lenkimo spindulys: Stacionariai montuojant - 8D

Traukiant - 12D

Įterpiančiam į žemę - 8D

Konstrukcija: Laidininkas: daugiavielis, apvalus ir sutankintas aliumininis laidininkas pagal IEC 60228 2 klasę, su išilgine apsauga nuo vandens

Laidininko ekranas: presuotas

Izoliacija: XLPE, minimalus storis = 2,96 mm

Izoliacijos ekranas: presuotas, suklijuotas

Išilginė apsauga nuo vandens: brinkstanti elektrai laidži juosta ir vandenyje brinkstanti gija

Koncentrinis laidininkas: atkaitintos varinės vijos

Radialinė apsauga nuo vandens: prie apvalkalo priklijuota aliuminio folija

Apvalkalas: LLD PE, juodas

Ženklimas, pvz: AXLJ-TT 7/12kV 3X95/16 DRAKA SE "Data", ilgio žymuo

Priedas 4. Kabelių parametrai AXLJ-RMF 7/12 kV

Pagrindiniai duomenys						
Gyslų skaičius x laidininko skerspjūvio plotas	mm ²	3x25/16	3x50/16	3x95/16	3x150/25	3x240/25
Izoliuotos gyslos skersmuo	mm	14,0	16,2	19,5	22,4	26,3
Viso kabelio skersmuo (apytiksliai)	mm	39,1	44,0	51,6	58,4	67,2
Masė (apytiksliai)	kg/100 m	103,5	135,4	195,1	267,1	372,8
Standartinis pristatomas ilgis	m	500	500	500	500	500
Standartinis būgno dydis		K16	K18	K20	K22	K24
Prekės numeris		1040031502	1040031702	1040031902	1040032102	1040032302
Elektriniai duomenys prie +20°C						
Laidininko varža	Ω/km	1,2	0,641	0,320	0,206	0,125
Ekranu varža	Ω/km	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8
Induktyvumas trikampyje/plokštumoje	mH/km	0,38	0,34	0,31	0,29	0,27
Reaktyvioji varža	Ω/km	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09
Talpis	μF/km	0,19	0,23	0,30	0,35	0,42
Talpinė srovė	A/km	1,3	1,5	2,0	2,4	2,9
Elektriniai duomenys						
Žemėje esančio 65 °C laidininko vardinė srovė	A	100	145	205	260	340
Ore esančio 65 °C laidininko vardinė srovė	A	90	130	190	250	330
Ore esančio 90 °C laidininko vardinė srovė	A	110	160	230	305	400
Maksimali laidininko 1 s trumpojo jungimo srovė, kai pradinė temperatūra 70 °C	kA	2,5	5,1	9,7	15,3	24,4
Maksimali laidininko 1 s trumpojo jungimo srovė, kai pradinė temperatūra 90 °C	kA	2,3	4,7	9,0	14,2	22,7
Maksimali impulsinė srovė	kA	-	55	65	70	70



Taikymas: Trigyslis kabelis skirtas pakeisti neizoliuotas oro linijas. Gali būti klojamas įterpimo į žemę būdu, tačiau dėl tvirtos konstrukcijos gali atlaikyti įtempimus atsirandančius kabelį klojant vandens telkiniuose.

Alternatyvus ženklimas: SE-N10XC7V-AR

Standartas: S 424 14 16

CENELEC HD 620 6 dalis M skyrius

Ugnies plitimo klasė: F1 pagal SS 42414 75

Temperatūros diapazonas: Aukščiausia leistinoji ilgalaikio darbo laidininko temperatūra 90°C. Žemiausia temperatūra montuojant –20°C, tačiau žemiau 0°C reikėtų imtis atsargumo priemonių.

Impulsinė įtampa: 75 kV

Lenkimo spindulys: Stacionariai montuojant - 8D

Traukiant - 12D

Įterpiančiam į žemę - 8D

Konstrukcija

Laidininkas: daugiavielis, apvalus ir sutankintas aliumininis laidininkas pagal IEC 60228 2 klasę, su išilgine apsauga nuo vandens

Laidininko ekranas: presuotas

Izoliacija: XLPE, minimalus storis = 2,96 mm

Izoliacijos ekranas: presuotas, suklijuotas

Juosta: elektra laidanti juosta

Koncentrinis laidininkas: atkaitintos varinės vijos

Apvalkalas: LLD PE, juodas

Ženklinimas, pvz: AXLJ-RMF 7/12 KV 3X150/25 LT DRAKA SE "metai"