

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Jonas Drignius**

**SKIRSTOMOJO ELEKTROS TINKLO SU KOMPENSACINE RITE  
MODELIAVIMAS**

**Baigiamasis magistro projektas**

**Vadovas**

doc. dr. Almantas Bandza

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**SKIRSTOMOJO ELEKTROS TINKLO SU KOMPENSACINE RITE  
MODELIAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Elektros energetikos inžinerija (621H63003)**

**Vadovas**

doc. dr. Almantas Bandza

**Recenzentas**

**Projektą atliko**

Jonas Drignius

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir Elektronikos Fakultetas

(Fakultetas)

Jonas Drignius

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Skirstomojo elektros tinklo su kompensacine rite modeliavimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Jono Drigniaus** baigiamasis projektas tema „Skirstomojo elektros tinklo su kompensacine rite modeliavimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Drignius Jonas. Skirstomojo elektros tinklo su kompensacine rite modeliavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 55 psl.

### SANTRAUKA

Šiame magistro baigiamajame darbe yra aprašyta 10 kV skirstomajame tinkle naudojama kompensacinė ritė, dar kitaip vadinama lanko slopinimo rite. Teorinėje dalyje aprašytas veikimo principas, struktūra, reguliavimo ypatumai. Išnagrinėti skirstomojo tinklo veiksniai įtakojantys kompensacinės ritės darbą. Trečiame skyriuje, tiriamojoje dalyje, pateikiamas sukurtas skirstomojo tinklo matematinis modelis su kompensacine rite. Modeliuojamas elektros skirstomasis tinklas su skirtingais linijų tipais ir parametrais bei skirtingomis linijų apkrovomis. Modeliavimo eigoje tiriama apkrovos, linijos ilgio, skirtingų linijos parametrų įtaka kompensacinės ritės darbui. Modeliuojamas avarinis režimas su skirtingomis įžemėjimo varžomis. Baigiamojo darbo eigoje pateikiami grafikai ir modeliavimo rezultatai. Pagal atliktą magistro baigiamojo darbo tyrimą yra pateikiamos darbo išvados.

*Reikšminiai žodžiai: Skirstomasis tinklas, Kompensacinė ritė, Įžemėjimas skirstomajame tinkle, Rezonansinė kreivė, Įtampų rezonansas.*

Drignius Jonas. Simulation of Power Distribution Network with Arc Suppression Coil. Final project of master's degree / supervisor doc. dr. Almantas Bandza; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2015. 55 pages.

### SUMMARY

In this final master research report described 10 kV power distribution network used Arc suppression coil. The theoretical part describes principles of operation, structure and regulation features. Analyzed the factors influencing the power distribution network expansion for the coil work. In chapter 3, exploratory part of the report are created mathematical model of power distribution network with arc suppression coil. Simulated power distribution network with different types of lines and parameters in different lines and loads. The loads, power distribution network line length, lines of different parameters on arc suppression coil work investigated in the course of modeling. Simulated emergency mode with different ground fault resistance. Simulation results and graphics submitted during final work. Conclusions are presented at the end of the final master project.

*Keywords: Power Distribution Network, Arc suppression coil, Ground faults in distribution network, Resonance curve, Voltage resonance.*

# TURINYS

ĮVADAS .....	6
1. KOMPENSACINĖS RITĖS TAIKYMO GALIMYBĖS KINTANT TINKLO APKROVAI .....	10
1.1 Kompensacinės ritės struktūra.....	13
1.2 Konstrukcijos sudėtis .....	13
1.2.1 SCR kompensacinės ritės reguliavimas.....	15
2. TINKLO PROCESŲ ĮTAKA KOMPENSACINĖS RITĖS DARBUI .....	17
2.1 Kompensacinės ritės valdymas .....	18
2.2 Įžemėjimo nustatymas nulinės sekos srovės padidėjimo metodu .....	21
2.3 Rezonansinis įžeminimas .....	22
3. ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO SU KOMPENSACINE RITE MODELIAVIMAS .....	26
3.1 Išbalansuoto tinklo simuliacija ieškant rezonansinio taško oro linijoje .....	32
3.2 Išbalansuoto tinklo simuliacija ieškant rezonansinio taško kabelinėje linijoje .....	43
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI.....	53
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	54

## ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

Pav. 1 Kompensacinės ritės vidinės dalies struktūra .....	13
Pav. 2 Kompensacinė ritė Tipas SCR 1.6 .....	14
Pav. 3 Kompensacinės ritės ryšys su kontrolieriu.....	15
Pav. 4 Registravimo sistemos duomenų srautų schema .....	17
Pav. 5 Supaprastinta ekvivalentinė grandinė su rezonansiniu įžemėjimu .....	18
Pav. 6 Vektorinė diagrama - vienos linijos įžemėjimas (SLE - single line-to-earth-fault).....	19
Pav. 7 Supaprastinta ekvivalentinė schema .....	20
Pav. 8 Įžemėjimo linijos pasirinkimas nulinės sekos tinkle .....	21
Pav. 9 Įžemėjimo segmento pasirinkimas nulinės sekos srovės tinkle.....	21
Pav. 10 Į transformatoriaus neutralę įjungtos kompensacinės ritės simuliacinio modelis .....	27
Pav. 11 Supaprastinta kompensacinės ritės modelio schema .....	28
Pav. 12 Nulinės sekos srovių pokyčiai kompensacinėje ritėje prieš kompensavimą .....	28
Pav. 13 Nulinės sekos srovių pokyčiai po kompensavimo kompensacinėje ritėje .....	29
Pav. 14 Ritės induktyvumo kaita .....	31
Pav. 15 Išbalansuoto tinklo modelis Apkrova A3A6b.....	32
Pav. 16 Išbalansuoto tinklo fazinės įtampos sinusoidinė charakteristika .....	33
Pav. 17 10 kV tinklo su 6 kW aktyviaja galios apkrova, rezonansinė kreivė.....	34
Pav. 18 10 kV tinklo su 10kW aktyviaja galios apkrova rezonansinė kreivė.....	35
Pav. 19 10 kV tinklo su 20 kW aktyviosios galios apkrova rezonansinė kreivė .....	36
Pav. 20 Normalaus darbo režimų 10 kV tinklo sinusoidinė charakteristika.....	36
Pav. 21 Matematinis modelis su vienfaziu įžemėjimu.....	37
Pav. 22 5Ω vienfazis įžemėjimas 10 kV tinkle.....	37
Pav. 23 5Ω vienfazio įžemėjimo rezonansinė kreivė.....	38
Pav. 24 100Ω vienfazis įžemėjimas 10 kV tinkle.....	39
Pav. 25 100Ω vienfazio įžemėjimo rezonansinė kreivė.....	40
Pav. 26 1000Ω vienfazis įžemėjimas 10kV tinkle.....	40
Pav. 27 1000Ω vienfazio įžemėjimo rezonansinė kreivė.....	41
Pav. 28 Normalaus darbo režimo 32 km oro linijos rezonansinė kreivė .....	42
Pav. 29 Ilgesnės oro linijos rezonansinė kreivė - 50 km.....	43
Pav. 30 10 kV kabelinio tinklo su 6 kW aktyviaja galios apkrova, rezonansinė kreivė .....	45
Pav. 31 10 kV tinklo su 10 kW aktyviaja galios apkrova kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė .....	46
Pav. 32 10 kV tinklo su 20 kW aktyviaja galios apkrova kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė .....	47
Pav. 33 10 kV tinklo su 5Ω įžemėjimu kabelinėje linijoje, rezonansinė kreivė .....	48
Pav. 34 10 kV tinklo su 100Ω įžemėjimu kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė .....	48
Pav. 35 10 kV tinklo su 1000 Ω įžemėjimu kabelinėje linijoje, rezonansinė kreivė .....	49
Pav. 36 Normalaus darbo režimo 32 km kabelinės linijos rezonansinė kreivė .....	50
Pav. 37 Normalaus darbo režimo 50 km kabelinės linijos rezonansinė kreivė .....	51
Pav. 38 Rezonansinė kreivė valdiklyje EFC-20 .....	51
Pav. 39 Rezonansinė kreivė lyginant su užfiksuotais duomenimis .....	52

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Kabelinės ir oro linijos talpinės įžemėjimo srovės.....	23
2 lentelė. Nulinės sekos srovės amplitudžių vertės kiekvienam modeliavimo taškui .....	30
3 lentelė. Kompensacinės ritės induktyvumo kaita matavimo taškuose.....	31
4 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys - 6 kW .....	33
5 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys - 10 kW .....	34
6 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys - 20 kW .....	35
7 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys $5\Omega$ įžemėjimas .....	38
8 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su $100\ \Omega$ įžemėjimo varža.....	39
9 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su $1000\ \Omega$ įžemėjimo varža.....	41
10 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 32 km oro linijoje.....	42
11 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 50 km oro linijoje.....	42
12 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys kabelinėje linijoje - 6 kW .....	45
13 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys kabelinėje linijoje - 10 kW .....	46
14 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys kabelinėje linijoje - 10 kW .....	46
15 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys $5\Omega$ įžemėjimas .....	47
16 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su $100\ \Omega$ įžemėjimo varža.....	48
17 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su $1000\ \Omega$ įžemėjimo varža.....	49
18 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 32 km kabelinėje linijoje .....	50
19 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 50 km kabelinėje linijoje .....	50

## IVADAS

Aktyviai vystant pramonę ir kitas ūkio šakas, diegiant modernias naujausias technologijas, vis dažniau ir dažniau įžemėjimo priežastimi tampa nesimetrinis elektros tinklo darbas. Be to nesimetrinių elektros tinklo įžemėjimo priežastimis gali būti komutaciniai ir atmosferiniai viršįtampiai, kabelių bei izoliacijos senėjimas. Gamtosauginis veiksnys - taršos padidėjimas, izoliatorių užterštumas, korozija. Nepakankamai prižiūrimos oro linijų trasos. Gamtinės priežastys - stiprūs vėjai, griūvantys medžiai, besikeičiantis klimatas taip pat daro didelę įtaką įžemėjimo atsiradimui.

Plečiantis skirstomajam tinklui padidėjo talpuminės nuotėkio srovės. Jos įtakoja įžemėjimo vietoje užsidegusį elektros lanką. Degančio elektros lanko metu atsiranda įžemėjimas. Pramušama linija, izoliatoriai, gadinami elektros įrenginiai, trikdomas komunikacinių prietaisų darbas. Sutrinka ryšio aparatūra, skaitmeniniai elektroniniai prietaisai ir jų veikimas. Degantis lankas sukelia daug materialinių nuostolių, atsiranda neigiamos pasekmės.

Priežastys, kurios įtakoja įžemėjimo atsiradimą skirstomajame tinkle su įžeminta neutrале, tai klaidos eksploatacijoje, komutacinių aparatų perjungimai, išoriniai žmonių veiklos veiksniai, pvz.: intensyvi žemės ūkio veikla, kasimo darbai.

Pats įžemėjimas nelaikomas avarine situacija, nes izoliuotos neutralės tinkle įžemėjus vienai fazei, žemos įtampos elektros tinklas nesutrinka ir vartotojas įžemėjimo pasekmių nejaučia. Tačiau įžemėjimas turi vieną didelę neigiamą savybę - įtampos padidėjimas sveikose fazėse, kas gali sukelti avarines situacijas: dvifazius, trifazius trumpuosius jungimus.

Lietuvoje yra numatyti trys neutralės įžeminimo būdai: izoliuota neutralė (kai galios transformatoriaus neutralė nesujungta su žeme), kompensuota neutralė (neutralė įžeminta per lanko gesinimo ritę) ir įžeminimas per varžą (neutralė sujungta su žeme per srovę ribojančią varžą arba reaktorių). Mūsų šalyje 35-10-6 kV elektros tinklas dirba izoliuotos neutralės darbo režimu, tai toks režimas kai transformatoriaus neutralė yra izoliuota nuo žemės. Šis darbo režimas taikomas mažam tinklui, kuriame dominuoja oro linijos ir atsiradus įžemėjimui, pažeista linija nėra išjunginama, tuo metu yra perduodami duomenys signalizacijai. Trūkumas toks, kad yra didelė viršįtampių rizika. Mažame tinkle daugelyje įžemėjimo atvejų lankas užgęsta savaime arba turi nepastovų pertraukiamą degimą, kuris yra labai kenksmingas tinklo įrangai.

Tačiau, jeigu oro linijos yra keičiamos kabelinėmis linijomis arba tinklas yra plečiamas, atsiradus įžemėjimui yra didelė tikimybė, kad nebus užgesintas elektros lankas. Kad to išvengtume, transformatoriaus neutralė yra jungiama prie žemės per lanko slopinimo ritę, kitaip vadinamą lanko ribojimo reaktorių, kompensacine rite. Kompensacinė ritė palengvina lanko savaiminį gesimą, taip pat



tinkle su kompensacine rite atsiradus įžemėjimui pažeista linija yra neišjungiama, tik perduodamas signalas signalizacijai. Pažeistos linijos nustatymui yra taikomos kryptinės įžemėjimo apsaugos. Trūkumai - didelė viršįtampių rizika, mažos įžemėjimo srovės, apsunkinančios teisingą kryptinės įžemėjimo apsaugos veikimą.

Kabelinių linijų tinklams, miesto pramonės rajonams, vėjo, saulės elektrinėms taikomas neutralės įžeminimas per didelę srovę ribojančią varžą. Šios neutralės darbo režimo tikslas yra pažeistą liniją nedelsiant išjungti, atsiradus vienfaziam trumpam jungimui. Naudojant šitą režimą greičiau ir tiksliau aptinkama pažeista vieta. Trūkumai - išjungiamas vartotojas ir negesinamas elektros lankas (tačiau dėl greito vartotojo išjungimo elektros lanko negesinimas įtakos neturi).

Pasekmėm sumažinti yra tikslinga susidaryti matematinį modelį, kurio pagalba būtų galima tyrinėti įžemėjimo procesus. Šiuo metu vis dažniau ir dažniau naudojamos kompensacinės ritės su automatiniu valdymu. Šioms ritėms veikiant labai sumažėja srovės, pagal kurias būtų galima aptikti įžemėjimo pažeistos linijos pažeidimo vietą. Keičiasi patys procesai pagal kuriuos būtų galima aptikti avarijas izoliuotame tinkle.

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

**Darbo uždaviniai:**

1. Sudaryti skirstomojo tinklo matematinį modelį.
2. Išnagrinėti skirstomojo tinklo veiksnius, įtakojančius kompensacinės ritės darbą.
3. Sumodeliuoti procesus, vykstančius įžemėjimo metu.
4. Įvertinti matematinio modelio efektyvumą bei tikslumą lyginant su užfiksuotais procesais.

# 1. KOMPENSACINĖS RITĖS TAIKYMO GALIMYBĖS KINTANT TINKLO APKROVAI

Kompensacinė ritė pirmą kartą buvo sukurta W. Petersen 1916 metais. Kompensacinę ritę sudaro geležies šerdies reaktorius, prijungtas prie žvaigždės taško trifazės sistemos. Kompensacinės ritės yra naudojamos apriboti neįžemintų 3 fazių sistemų srovės kibirkščiavimą per įžemėjimą. Elektros energetikos sistemos perdavimo linijose lanko slopinimo ritė yra naudojama mažos srovės įžeminimo sistemose. Kai vienfazis trumpasis jungimas vyksta per kompensacinę ritę ir srovė teka per kondensatorių, per grandinę pridodant įžeminimo taško srovę ir induktoriaus srovę, per kondensatorių 180 laipsnių fazės skirtumą, ir abipusį kompensavimą. Tai kompensuoja pirmaujančią srovę, kuri yra lygi linijos talpai. Kai dviejų elektros lankų vertė yra mažesnė nei minimali srovė, lankas neužsidega ir neatsiranda rezonanso viršįtampio reiškinio 10 kV elektros energijos skirstomajame tinkle.[9]

## Vystymosi eiga

Pirminis fiksuoto kompensavimo kompensacinės ritės naudojimas buvo vadinamas fiksuota kompensavimo sistema. Šio tipo sistemos veikimas yra, kai kompensacinė ritė reguliuoja perkompensuoto tinklo būseną, jos dydis priklauso nuo perkrauto tinklo laipsnio. Normalus pastovus veikimas yra galimas be neutralaus taško poslinkio, kai įtampa neviršija 15% fazės įtampos.

Įvykus rezonansiniam viršįtampiui yra naudojamas perkompensuotas tinklas tam, kad išvengtume rezonansinio viršįtampio pavojaus. Kai reguliavimas yra nesukalibruotas iki normalios padėties, linijos atjungimas sukels lanko slopinimo ritėje kondensatoriaus srovės sumažėjimą ir tokiu būdu tinklas gali būti visiškai arba beveik sukompensuotas.

Tačiau ritė veikia ir perkompensuotu režimu, kai įvyksta gedimas tinklo parametruose kaip užlaikymas ar tinklo pokyčiai sutampa su laipsniškumu ir negali sustabdyti viršįtampio ar fazių įtampos simetriškumo griūties.

Fiksuotą kompensavimo sistemą sunku pritaikyti dažname tinkle, tačiau ši sistema yra ilgaamžiškesnė.

Tikslinga sekti talpines sroves automatinio reguliavimo įrenginiu. Šie įrenginiai yra skirstomi į du tipus, vienas vadinamas automatine kompensavimo sistema, kitas - dinamine kompensavimo sistema.

1) Automatinė kompensavimo sistema tai: automatinis talpinių srovių pokyčių sekimas, galimybė bet kuriuo metu reguliuoti lanko slopinimo ritę, išlaikyti ją rezonansiniame taške. Kompensacinė ritė naudojama su rezistoriumi, padidinant tinklo slopinimo rodiklius ir rezonanso viršįtampiui apribojant leistiną diapazoną.

Tinklo įžemėjimo atveju valdymo sistema atsijungia tam, kad būtų pasiektas geriausias kompensavimo efektas, sistema negali reguliuoti kompensacinės ritės slėgio.

2) Kitas būdas - dinaminė kompensavimo sistema. Dinaminės kompensavimo sistemos veikimas: normaliomis eksploataavimo sąlygomis elektros tinkle sureguliuojama kompensacinė ritė taip, kad būtų nutolusi nuo rezonanso taško ir būtų visiškai išvengta paprasto rezonansinio viršįtampio. Atsiradus viršįtampiams po vienfazio rezonansinio įžemėjimo, valdymo sistema iš karto sureguliuotų kompensacinės ritės parametrus į tinkamiausią būseną, kad neutralė automatiškai užgesintų užsidegusį lanką. Tokia sistema reikalauja, kad kompensacinė ritė greitai prisitaikytų prie aukštos įtampos ir nuo pat pradžių būtų išvengta elementaraus rezonanso, kurį gali sukurti paprastos operacijos tinkle. Kontrolės sistema turi atlikti tikslius perjungimus elektros tinkle po vienfazio įžemėjimo linijoje tam, kad būtų galima toliau naudotis skirstomuoju elektros tinklu.

Nėra bendrų visuotinių taisyklių pasirenkant tinklo kompensavimą. Išskiriami šie atvejai:

- Rezonansinis sukompensavimas ( $v=0$ ). Labai tinka elektros tinkluose, kur reikalingas įžemėjimo padarinių minimizavimas. Visai nepriimtinas tinkluose, kur didelė natūrali asimetrija (oro linijos);
- Perkompensuotas tinklas ( $v>0$ ). Naudojamas nedideliuose tinkluose, kurie turi netankų oro linijų tinklą, galvaniškai atskirtą nuo kito tinklo;
- Nesukompensuotas tinklas ( $v<0$ ). Tankiuose tinkluose su daugeliu mazgų, turinčių ryšių su kitais tinklais.

Tiksliai suregulius kompensacinę ritę ties rezonansiniu tašku gausime: minimalią įžemėjimo srovę, minimalias elektros lanko degimo pasekmes ir pagerėjusį savaiminį elektros lanko gesimą.

Neutralės kompensavimo tikslas:

- Apriboti tinklo viršįtampius
- Apriboti nuotėkio srovės iki saugaus lygio
- Palengvinti gedimų pasekmes
- Užtikrinti patikimą energijos tiekimą su minimaliais sutrikimais

### **Veikimo principas**

Kompensacinė ritė veikia kai tinkle atsiranda vienfazis įžemėjimas. Tuomet įžemėjimo srovė teka per kondensatorių, lanko gesinimo ritėje indukcinė srovė sukompensuojama. Numatyta, kad įžemėjimo srovė būtų 10A arba mažiau, taip pat turi būti užkirstas kelias aukštos amplitudės viršįtampio atsiradimui tam, kad ateityje būtų išvengta gedimų. Kai kompensacinė ritė sureguliuota teisingai, ne tik

gali veiksmingai sumažinti lanko įžeminimo viršįtampio tikimybę, bet gali veiksmingai slopinti rezonansinę viršįtampių vertę bei maksimaliai sumažinti galimybę atsirasti įtampos išlydžiui tinkle. [6]

Be to, skirstomajame tinkle vykstantys pereinamieji procesai, kaip didelės galios variklio įsijungimas, asinchroninio jungtuvo uždarymas ir kita, gali sukelti pavojingą viršįtampį. Elektros tinklui esant stabiliam arba atsiradus vienfaziui įžemėjimui, išskyrus nepakankamumo atvejus, ir esant mažam rezonanso laipsniui kompensacinė ritė į tinklą neatiduoda saugumo signalų, jie yra tiesiog slopinami.

Apibendrinant, kai tinkle yra ne vienfazis įžemėjimas, yra stengiamasi išvengti lanko slopinimo ritės suveikimo. Veikiant pilnu pajėgumu lanko slopinimo ritė paprastai sujungia slopinimo rezistorius slopinti rezonanso viršįtampiams. Faktiniai duomenys rodo, kad toks būdas yra veiksmingas.[7]

### **Struktūriniai ypatumai**

Elektroniniu būdu valdoma, laipsniškai reguliuojama lanko slopinimo ritė - visiškai statinis objektas be viduje judančių dalių, be kontakto, turintis reguliavimo ribas. Didelis patikimumas, reguliuojamas greitis. Ritės pagrindinis darbo principas yra DC - nuolatinės žadinimo srovės naudojimas, išvengiant parametrų keitimo, taip pakeičiant ritės reaktyvumą. Dėl to gali pakisti milisekundės greičiu reguliuojama induktyvumo vertė.

### **Valdymo būdas**

Fundamentalus sprendimo būdas kompensavimo sistemai ir geriausias įprasto viršįtampio rezonanso kompensavimas yra dinaminė kompensacija. Taigi, įprastos eksploatacijos metu tinkle sureguliuojama lanko slopinimo ritė taip, kad ji stebėtų talpinių srovių pokyčius, kas yra reglamentuojama elektros sektoriaus. Fiksuotos lanko slopinimo ritės neveikia pilnai arba beveik sukompensuotu režimu.

### **Ritės savybės**

Neutralaus taško lanko slopinimo ritė įžemintame trifaziame elektros tinkle turi šias charakteristikas:

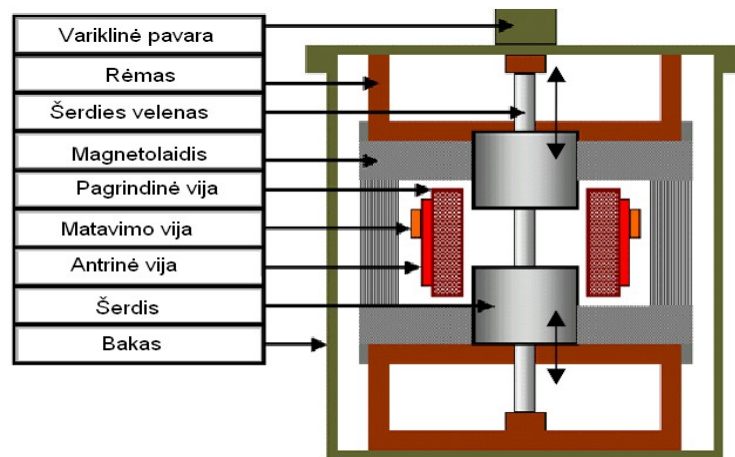
1. Įžemėjimo įtampa yra lygi nuliui. Neįžemėjusiose linijose įtampa padidėja, atsiranda nulinės sekos įtampos. Šios įtampos išauga lyginant su įtampomis normaliomis eksploatacijos sąlygomis. Taip pat padidėja nulinės sekos srovės.
2. Jei sistema naudoja pilną kompensaciją, sistemos įžemėjimo linija ir ne nulinės sekos srovė yra žemės talpos srovė. Talpos srovės kryptis yra nukreipta į tinklo liniją ir todėl negali pasinaudoti srovės kryptimi, siekiant nustatyti gedimo vietą.

- Kai sistema yra perkompensuota, per įžemėjimo liniją tekanti nulinės sekos srovė yra lygi linijos į žemę ir žemės talpinėms liekamosioms srovėms. Neįžemėjusioje linijoje nulinė sekos srovė palaipsniui suderinama ir todėl negali pasinaudoti įvairiomis kryptimis tam, kad nustatytume gedimo liniją ir neįžemėjusią liniją. Priklausomai nuo kompensavimo laipsnio, kol jis nepasiektas, yra sunku dėl neįžemintos sistemos naudoti skirtingų dydžių nulinės sekos srovės tam, kad būtų surasta įžemėjusi linija.

Ritė turi reguliuojama oro tarpą, kurio pagalba yra pašalinamas kompensacinės ritės triukšmas, bet kompensavimo efektas gali būti reguliuojamas pastoviai, tik turi būti naudojamas atskiras koregavimas. Tačiau tuomet kompensacijos poveikis yra silpnas ir taip pat priklauso nuo viršįtampio lygio.[11]

### 1.1 Kompensacinės ritės struktūra

Kompensacinės ritės naudojamos kompensuoti talpines sroves tuo atveju, kai įvyksta įžemėjimas elektros skirstomuosiuose tinkluose. Ritės būna prijungtos prie transformatoriaus neutralės. 1 pav. pateikta kompensacinės ritės vidinė dalis.



Pav. 1 Kompensacinės ritės vidinės dalies struktūra[8]

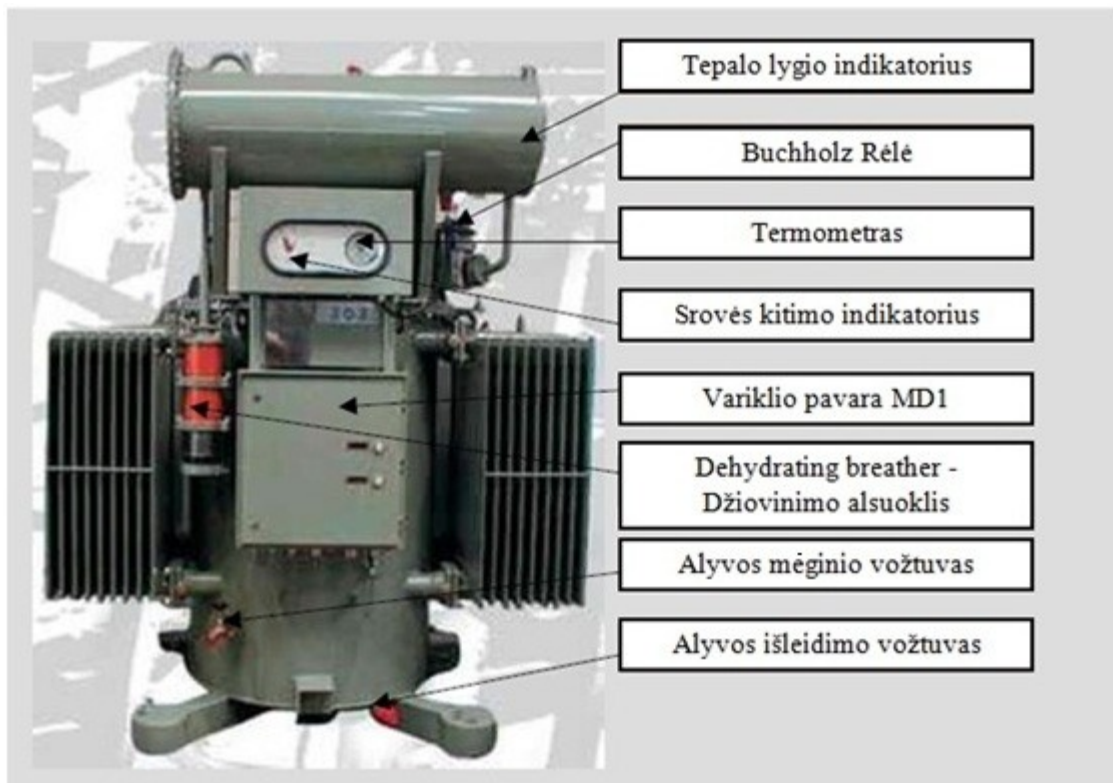
### 1.2 Konstrukcijos sudėtis

Kompensacinė ritė susideda iš kelių pagrindinių dalių:

- Cilindrinis bakas, pagamintas iš lygios plokštės, magnetinės grandinės, pagrindinės ir pagalbinės matavimo apvijos (jungiama prie įvorės ant bako dangčio) pritaisytos bako viduje.
- Važiuoklė - priklausomai nuo sriegio tipo gali būti pasirenkami keli važiuoklės variantai (šerdies velenas).
- Plėtimosi indas - priklausomai nuo tepalo kiekio ir lygio.

- Elektros variklis - užtikrina branduolių veikimą, įskaitant ir valdymo dėžę su reguliavimo, signalizacijos įrenginiais, jungtuvais ir t.t.
- Mechaninis indikatorius - esamos srovės koregavimui kompensacinei ritei.
- Gedimo tipo signalizavimo prietaisai - termometrai, Buchholz relė, alyvos lygio indikatorius.
- Alyvos mėginių vožtuvai - alyvos papildymui.

Kompensacinės ritės konstrukcinis pavyzdys pateiktas 2 pav.



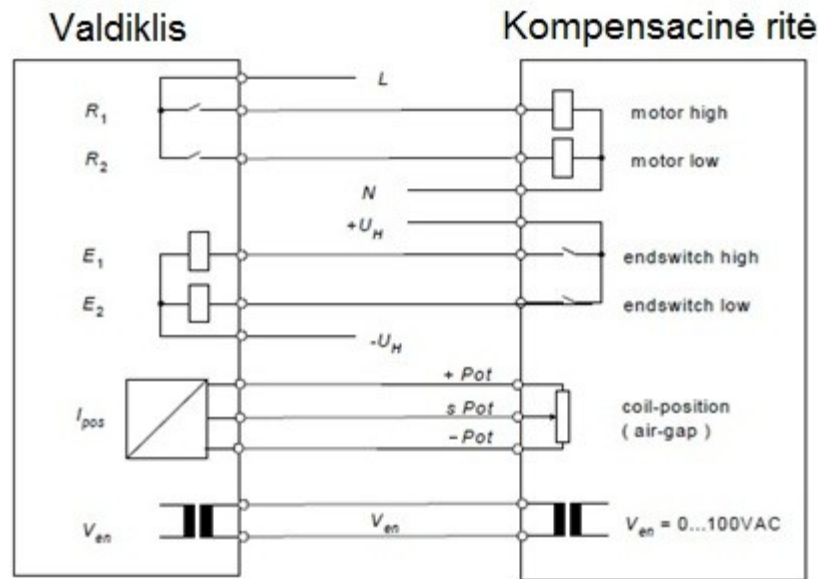
**Pav. 2** Kompensacinė ritė Tipas SCR 1.6[8]

Pakopinis reguliavimas - kompensacinėje ritėje gali būti koreguojamas reikiamai srovės vertei ir ritės laidumas gali būti keičiamas pastoviai per tikslinimo šerdis, kurios yra magnetinės grandinės dalis.

Tuo atveju, kai ritės skirtos eksploatuoti ilgą laiką, jos turi būti įrengtos su aušinimo radiatoriais. Ypatingai didelis dėmesys skiriamas apsaugai nuo korozijos.[8]

## Kompensacinės ritės kontrolė

Kontrolieris išmatuoja tikrąją ritės padėtį ir neutralės į žemę įtampą  $U_{ne}$ , 3 pav. vaizduoja valdiklio sąsają su kompensacine rite.



Pav. 3 Kompensacinės ritės ryšys su kontrolieriu[2]

Valdiklio užduotis yra aptikti tinklo konfigūracijos pokyčius ir reguliuoti kompensacinę ritę, nustatyti naują rezonanso tašką arba iš karto per didelę arba per mažą jos vertę. Paprasčiausias būdas pokyčio absoliučiai vertei nustatyti - neutralės į žemę įtampos  $U_{ne}$  naudojimas kaip jungiklio veikimo indikacija į tinklą. Naudojant šį metodą galima nustatyti ne visus tinklo konfigūracijos pakeitimus. Patobulinimas gali būti atliktas, tiriant neutralės į žemę įtampos  $U_{ne}$  pokyčius komplekso plokštumoje. Norėdami apskaičiuoti rezonanso kreives, reikia pakeisti kompensacinės ritės parametrų vertę ir įvertinti neutralės į žemę įtampą  $U_{ne}$ . [2] Apibendrinant tikslus valdiklis turi:

- Atskirti rezonansinį tašką tarp realaus ir fiktyvaus taško ir neutralės į žemę įtampą;
- Atpažinti jungiamas operacijas per parametrų kitimo momentą kompensacinėje ritėje.

### 1.2.1 SCR kompensacinės ritės reguliavimas

Reguliuojama SCR lanko slopinimo ritė yra aukštos trumpojo jungimo varžos transformatorius, kurio pirminės apvijos prijungtos prie skirstomojo tinklo kaip dirbanti neutralaus taško grandis. Antrinė apvija kaip kontrolė: susideda iš dviejų atvirkščiai prijungtų trumpojo jungimo tiristorių. Regulavimas galimas silicio kontroliuojamu laidumo kampu, kuris kinta tarp 0 ~ 180 laipsnių. Kompensacijos srovė gali būti gaunama tarp nulio ir iki nominalaus nepertraukiamo tolygaus koregavimo. SCR veikia

nuosekliai su induktoriumi be kondensatoriaus grandinės, kurioje net ir nedidelis įtampos svyravimas yra negalimas, todėl patikimumas garantuotas.[3]

Charakteristikos yra tokios:

(1) SCR kompensacinėje ritėje kompensuojama srovė nuo 0 iki 100% vardinės srovės. Srovės diapazonas nuolat tolygiai reguliuojamas tam, kad būtų pasiekta tiksli kompensacija bei prisitaikytų prie skirtingų skirstomojo tinklo vystymosi tendencijų.

(2) Reguliuojama pagal trumpojo jungimo varžą, svarbu išlaikyti užduotą tinklo įtampą, tokiu būdu pasiekiami tiksli kompensacija.

(3) Tiksli kompensacija priklauso nuo lanko slopinimo ritės suderinimo. Be įdiegto slopinimo rezistoriaus nebus aktyvaus rezonanso. Rezistorius naudojamas pagerinti patikimumą ir supaprastinti įrenginį.

(4) Įžemėjimo atveju, kompensacinė ritė turi sureaguoti per 5 ms stebint išėjimo sroves, dėl to slopinamas lankas. Tokiu būdu išvengiama kibirkščiavimo, kurį sukelia oro jonizacija ir trumpasis jungimas tarp fazių. Tačiau jį gali veiksmingai pašalinti labai trumpu intervalu kartojamas vienfazis trumpas jungimas su žeme.

(5) Įranga praktiška be transmisijos, besisukančių mechanizmų, didelis patikimumas, mažai triukšmo, lengva priežiūra.

### **Kompensacinės ritės kontrolės srovė**

Kompensacinės ritės reguliavimas jau yra prevencinė priemonė tam, kad tinklas išliktų stabilus. Tačiau su esamais metodais neįmanoma nustatyti tinklo parametrų, kai yra kieto tipo įžemėjimas. Įžemėjimo vietos pasipriešinimas yra nežinomas ir nėra prieinamų matavimų. Tuo atveju, kai yra kieto tipo įžemėjimas, nulinės sekos įtampa daro įtaką nulinės sekos matavimams ir srovė gedimo vietoje yra sunkiai užfiksuojama. Nulinės sekos srovės gali būti matuojamos tik pastotėse arba, kai yra tam tikros perjungimo stotys.[4]

Anksčiau buvo sukurti skirtingi kontrolės algoritmai, dauguma jų buvo pagrįsti kompensacinės ritės reguliavimu. Šiandienos paskirstymo tinklų plėtra turi simetriškų kabelių padidėjimą, kurį lemia mažesnis nulinės sekos srovių naudojimas. Taip pat, į teigiamą sekos srovę kryžminiu padidėjimu yra įjungiamas nulinė seka. Mažėjant nulinės sekos srovėms, reguliatorius turi būti nustatytas daug jautresniu režimu. Dėl apkrovos srovės nulinės sekos srovės kinta, šios kaitos metu yra išleidžiami koregavimo operacijų signalai, kurie yra daugiausiai faktiniai algoritmai kartu su fiziniu kompensacinės ritės judėjimu. Dėl tinkle atsirandančių procesų parametrų, tinklo įvertinimas yra daug sunkesnis, todėl



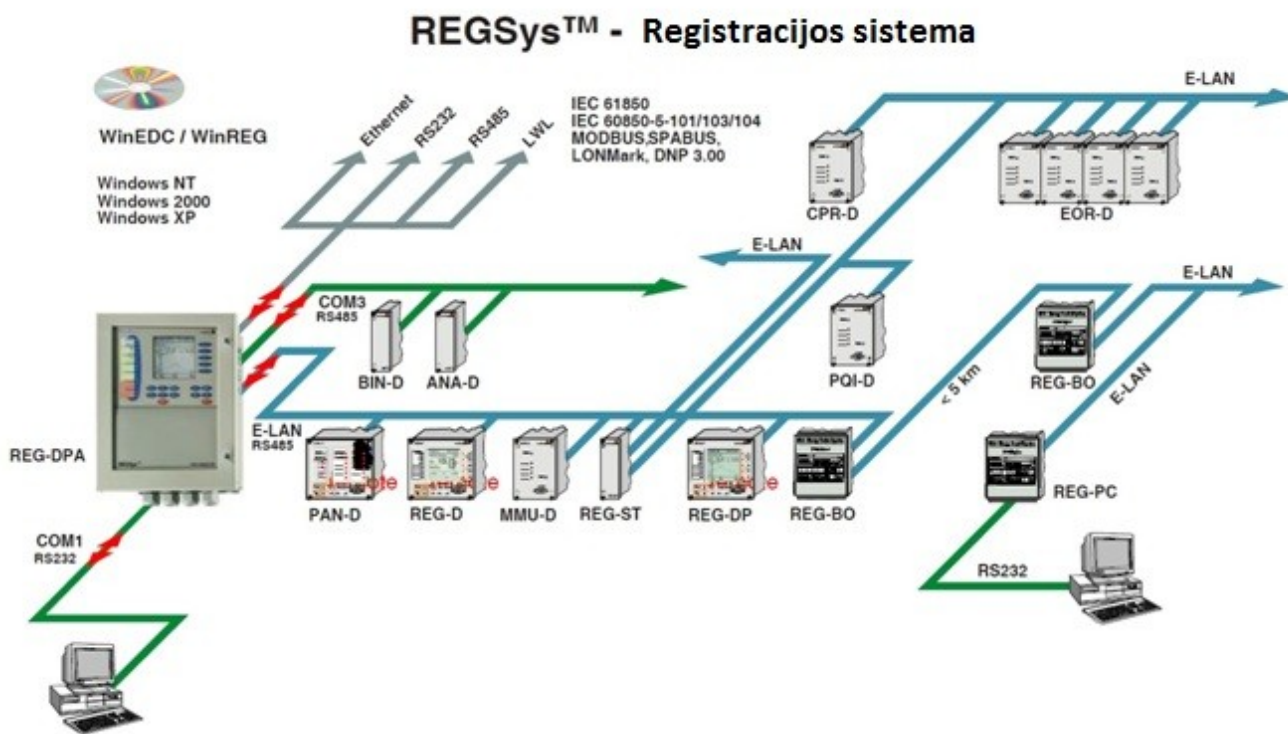
būtinai kompensacinės ritės koregavimas per ilgesnę distanciją. Nepaisant šių savybių, kartais teisingas reguliavimas yra neįmanomas.

Viena iš problemų kyla dėl to, kad motorinė pavara kompensacinėje ritėje gali atlikti tik keletą operacijų per parą.

Kita problema kyla dėl to, kad ilgas atsistatymo laikas sukelia reguliavimo operacijų kiekio padidėjimą ir atitinkamai blogas reguliavimo pozicijas.[5]

## 2. TINKLO PROCESŲ ĮTAKA KOMPENSACINĖS RITĖS DARBUI

Peterseno ritės reguliatorius REG-DPA (Valdiklis) yra matavimo, kontroliavimo, reguliavimo ir registravimo sistemos dalis. Registravimo sistemos schema pateikta 4 pav.



Pav. 4 Registravimo sistemos duomenų srautų schema[2]

Programuojami REG-DPA valdikliai gali būti naudojami su nuolatinio reguliavimo kompensacinėmis ritėmis ir su kompensacinėmis ritėmis, kurios veikia pagal apkrovas vidutiniame ir aukštos įtampos tinkle. Taip pat, visos kitos kontrolės, matavimo ir apskaitos užduotys gali būti atliktos, kurios susijusios su kompensacine rite.

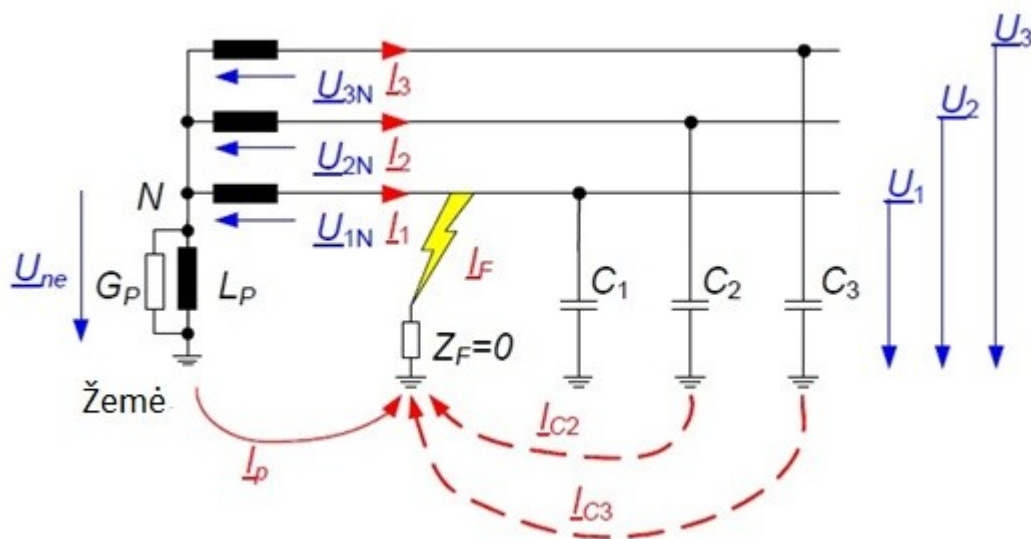
REG-DPA reguliatorius yra dalis REGSys reguliavimo sistemos, todėl gali būti prijungtas prie REG-D/PAN-D įtampos reguliatoriaus arba PQI-D galios kokybės sąsajos be jokių papildomų kliūčių. Svarbus bruožas REGSys yra tai, kad visi komponentai, kurie yra sujungti vienas su kitu per E-Lan

sistemos ryšį, gali būti parametrizuojami arba sujungti su valdymo sistema per vieną sąsają. Tai reiškia, kad matavimo vertės ir parametrai visų prijungtų įrenginių gali būti skaitomi ir koreguojami.

Jei keli įrenginiai yra prijungti per E-LAN sistemos ryšį, tai sistemos duomenys gali būti parametrizuojami arba skaitomi prijungus kompiuterį per sąsajas, arba prie bet kurios kitos kompiuteriui pritaikytos sąsajos. Be to, keli kompiuteriai gali vienu metu prieiti prie skirtingų stočių duomenų.[2]

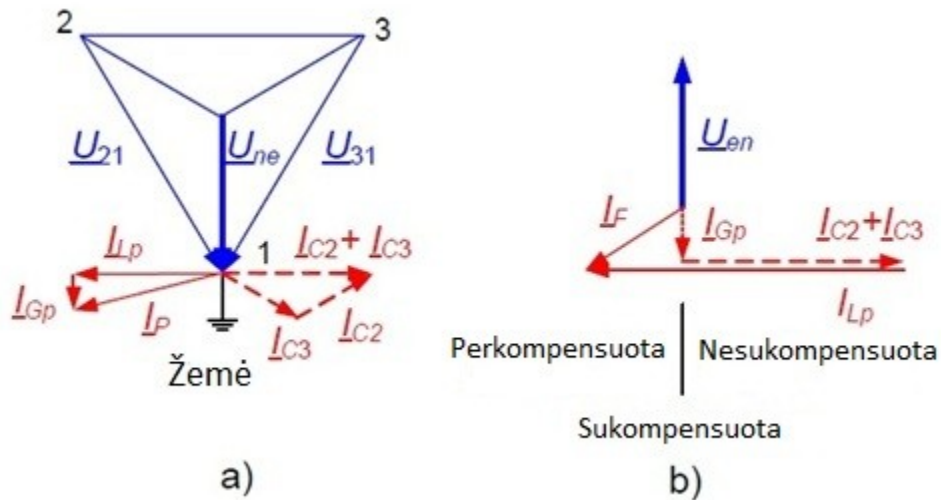
## 2.1 Kompensacinės ritės valdymas

Vidutinės įtampos ir aukštos įtampos tinkle su rezonansiniu įžemėjimu, srovė per įžemėjimo vietą iš vienos linijos į žemę įžemėjimo atveju yra sumažinama kompensacinės ritės pagalba. Ši ritė koreguojama esant stabiliam elektros tinklui ir sureguliuojama taip, kad kompensuotų talpinę srovę pagal atsiradusio įžemėjimo vietos indukuotąją srovę. 5 pav. pavaizduota supaprastinta lygiavertė grandinė, kai siekiama nustatyti įžemėjimą skirstomajame tinkle. Pavaizduoti idealūs trijų fazių įtampos šaltiniai. Linijos varža ir induktyvumai yra nereikšmingi.[2]



Pav. 5 Supaprastinta ekvivalentinė grandinė su rezonansiniu įžemėjimu[2]

Vektorių diagrama (6.pav.) SLE su  $Z_F = 0 \Omega$  pavaizduota paveiksle 6a. Skirtingo tipo pozicijos situacija kompensacinėje ritėje ir srovės rezultatas  $I_F$  įžemėjimo vietoje yra pateiktas pav. 6b.



**Pav. 6** a) Vektorinė diagrama - vienos linijos įžemėjimas (SLE - single line-to-earth-fault)

b) Sumažinta vektorinė diagrama[2]

$L_P, G_P$  - kompensacinė ritė (induktyvumas, laidumas)

$C_1, C_2, C_3$  - linijų su žeme talpos

$Z_F$  - varža gedimo vietoje

$N$  - žvaigždės taškas transformatoriuje (neutralės taškas)

$U_1, U_2, U_3$  - Fazinės įtampos

$U_{ne}$  - neutralės į žemę įtampos

$I_{C2}, I_{C3}$  - dviejų linijų talpinės srovės

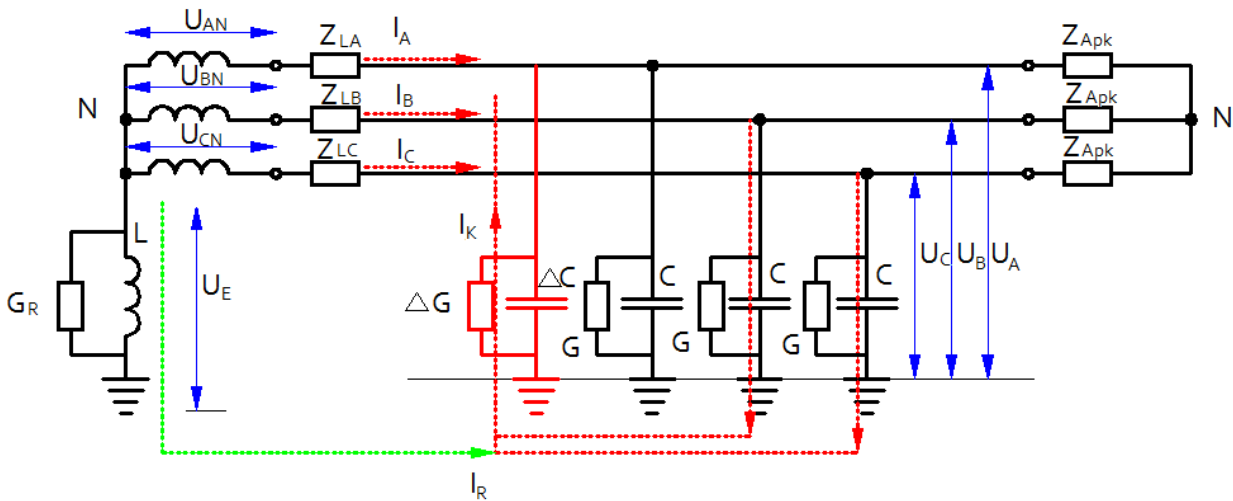
$I_P$  - kompensacinės ritės srovė

$I_{GP}$  - galios  $IP$  dalis

$I_{LP}$  - indukcinė  $IP$  dalis

$I_F$  - srovės perėjimas į įžemėjimo vietą

Linijos įžemėjimo talpos ir laidumas yra simetriniai. Linijos asimetrija (talpinė ir ominė) yra mažinama palaipsniui 1 fazei. Supaprastinta ekvivalentinė grandinė pateikta 7 pav.



Pav. 7 Supaprastinta ekvivalentinė schema[2]

### Esami valdymo algoritmai

Kompensacinės ritės pozicijai ir atitinkamiems parametrams nustatyti tinkle yra naudojami algoritmai. Nulinės sekos įtampos santykinis pokytis paprastai naudojamas kaip būdas nustatyti perjungimo operacijas tinkle.

Dirbtinis įžemėjimas. Matuojant dirbtinę įžemėjimo vietos srovę yra ieškoma minimali esamoji srovė ir lyginama su kompensacinės ritės poslinkiu. Poslinkio taškas gali būti nustatytas lygiagrečiai tinklo parametrams.

Maksimumo paieška  $|\underline{U}_{NE}|$ . Šis algoritmas ieško likutinės didžiausios įtampos. Patobulintos versijos šio algoritmo gali nustatyti papildomus tinklo parametrus. Alternatyvus algoritmas, naudojant mažiausių kvadratų metodą, skirtas įvertinti tinklo parametrus jau nuo rezonanso kreivės pradžios.

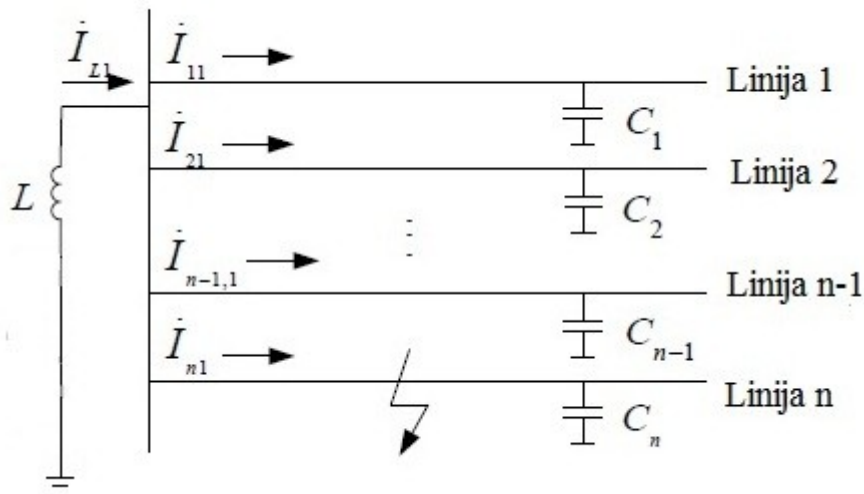
Mažiausių kvadratų metodas  $|1/\underline{U}_{NE}|$ . Mažesnis jautrumas nuo trikdymų gali būti pasiektas naudojant šį algoritmą, pagrįstas atvirkštine rezonanso kreive.

Locus Schema  $\underline{U}_0$ . Šis metodas pagrįstas tuo, kad grandinė gali būti sukonstruota tik trimis taškais. Šis metodas nurodo, kad trečias taškas grandinėje yra kompleksinė plokštuma. Trumpas išderinimas - jo pasėkoje galima pasiekti tokius pat rezultatus kaip kompensacinės ritės. Matavimo įtampą su amplitude ir kampu galima sudaryti panaudojus Locus Schema.

50 Hz srovės. Šis algoritmas yra grindžiamas idėja įterpti dirbtinę srovę į neutralaus taško sistemas, jei ten nėra nesimetrinių srovių iš natūralios asimetrijos. Fizinio disbalanso įtaka gali būti iš dalies kompensuota, naudojant diferencinius matavimus. Kartu su kompensacinės ritės pozicija tai leidžia nustatyti tinklo parametrus.[2]

## 2.2 Įžemėjimo nustatymas nulinės sekos srovės padidėjimo metodu

Nulinės sekos ekvivalentinė grandinė yra parodyta 8 pav., kuri yra naudojama analizuoti nulinės sekos srovę ir įtampą po vienfazio įžemėjimo trumpojo jungimo metu sistemose su kompensacine rite. Ji apima  $n$  eilučių ir įžemėjimo vietą linijoje  $n$ .  $C_1 \sim C_n$  parodo žemės talpą atsižvelgiant į  $n$  eilutes. Nulinės sekos srovės kiekvienoje eilutėje yra  $\dot{I}_{11}, \dot{I}_{21} \dots \dot{I}_{n-1,1}, \dot{I}_{n1}$ , nulinės sekos įtampa  $\dot{U}_{01}$ , ir induktyvumo vertė  $L_1$ .

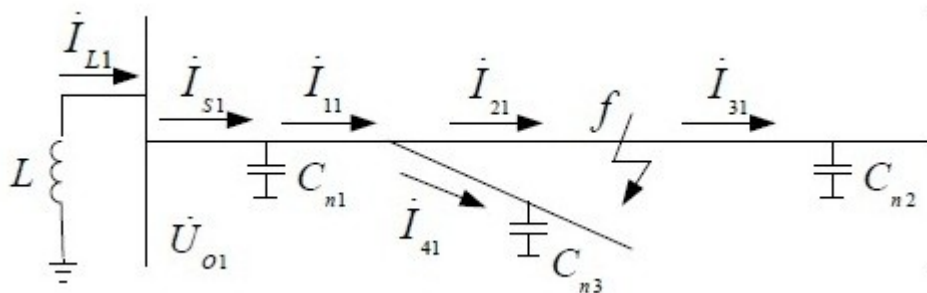


Pav. 8 Įžemėjimo linijos pasirinkimas nulinės sekos tinkle

Nulinės sekos srovė ant sveikųjų linijų neturi jokios kaitos, tačiau nulinės sekos srovės padidėjimas įžemėjimo linijoje yra lygus kintamai kompensuotai srovei. Taigi charakteristikos skirtumai gali būti panaudoti, siekiant surasti įžemėjusią liniją rezonansinio įžemėjimo tinkluose.

### Įžemėjusio segmento pasirinkimas

Įžemėjusio segmento grandinė pavaizduota 9 pav. ir  $f$  punktas parodo įvykusį vienfazį įžemėjimą. Kompensacinėje ritėje nulinė sekos srovė priekyje  $f$  punkto ir už jo analizuoja prieš ir po esančias reaktyviasias vertes.



Pav. 9 Įžemėjimo segmento pasirinkimas nulinės sekos srovės tinkle.

Nulinės sekos padidėjimas prieš įžemėjimo tašką neturi jokių pakitimų, tuo tarpu, už įžemėjimo taško yra lygus kompensuotos srovės poslinkiui. Šie skirtumai gali būti naudojami norint surasti įžemėjimo segmentą.

Nulinės sekos įtampos svyravimai keičia nulinės sekos srovę sveikose linijose ir įžemėjusią dalį keičia neįžemėjusios linijos dalimi.

Iš gedimų savybių nulinės sekos įtampos modulio vertė visame tinkle yra beveik lygi reaktyvios varžos kitimui kompensacinėje ritėje. Tai yra taip pat, kaip ir po reaktyviosios varžos vertės pakitimo. Fazinio kampo atitikimo paklaida yra labai maža.

Reikia tik išmatuoti nulinės sekos srovės ir įtampos modulių vertes kiekvienai linijai tam, kad pasinaudotume metodu, siekiant nustatyti įžemėjimo vietą.[2]

### **2.3 Rezonansinis įžeminimas**

Siekiant gauti optimalią elektros tiekimo kokybę elektros tinklo konstrukcijoje yra būtinas rezonansinis įžeminimas. Pagrindinis neutralės taško privalumas yra tas, kad yra galimybė tęsti tinklo eksploatavimą, net jei tuo metu buvo patirtas įžemėjimas. Todėl tai sumažina elektros nutraukimų skaičių vartotojui.

Kompensacinės ritės darbo ribos turi būti gerai sureguliuotos skirtingiems izoliacijos lygiams. Kabelinės linijos padidėjimas skirstomuosiuose tinkluose: neutralės į žemę įtampos lygis mažėja, rezonanso kreivės tampa ryškesnės. Priežastis, kodėl neutralės į žemę įtampa mažėja, yra daugiausia dėl sumažėjusių talpų verčių ant naujų linijų. Be to, kabeliai turi mažesnę nuostolį, lyginant su oro linijomis, todėl tinklo slopinimas sumažėja ir rezonanso kreivės tampa ryškesnės.[14]

Rezonansinis įžeminimas tai:

- ✓ Į elektros sistemą įvedamas papildomas induktyvumas.
- ✓ Papildomas induktyvumas artimas tinklo talpumui sumažina nuotėkio srovės ir nepalaiko elektros lanko degimo.
- ✓ Keičiantis tinklui, keičiasi ir jo talpumas, todėl ir induktyvumas turi kisti automatiškai.
- ✓ Ritės padėtis yra išreiškiama jos srove.

Įtampos rezonansas - talpumų sukurta srovė, kompensuojama dirbtinai sukuriant indukciją.

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

Pasiekus sąlygą, kad

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

arba

$$C - \frac{1}{\omega^2 L} = 0; \quad (3)$$

čia:  $C$  - oro ar kabelinės linijos talpa, F/km.

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

$L$  - kompensacinės ritės induktyvumas, kVAr.

Apytiksliai oro linijos nuotėkio srovę galima apskaičiuoti:

$$I_{talp} = \frac{U_{V,L} \cdot l}{\sqrt{3} \cdot 350}; \quad (4)$$

čia:  $l$  - linijos arba kabelinės linijos ilgis

350 - nuotėkio srovės koeficientas

Apytiksliai kabelinės linijos nuotėkio srovę galima apskaičiuoti:

$$I_{talp} = \frac{U_{V,L} \cdot l}{\sqrt{3} \cdot 10}; \quad (5)$$

čia: 10 - nuotėkio srovės koeficientas kabelinėje linijoje

Pateikiu įvairių linijų talpinės įžemėjimo srovės kurios yra pateikiamos (Draka) produktų kataloge [16].  
1 lentelė.

1 lentelė. Kabelinės ir oro linijos talpinės įžemėjimo srovės

Linijos tipas	Įtampos lygis	Talpinė įžemėjimo srovė
Oro linija	110 kV	0,36 A/km
	20 kV	0,06 A/km
	10 kV	0,03 A/km

<b>Kabelinė linija</b>		
Alyvinis kabelis	110 kV	13,3 ... 36,1 A/km
XLPE kabelis	110 kV	7,5 ... 11,4 A/km
Kabelis su švino apvalkalu	20 kV	2,2 ... 5,3 A/km
XLPE kabelis	20 kV	1,6 ... 4,4 A/km
Kabelis su švino apvalkalu	10 kV	1,2 ... 2,7 A/km
XLPE kabelis	10 kV	1,2 ... 3,3 A/km

Norint pasinaudoti modeliu apskaičiuoju linijos talpumus, linijos induktyvumą ir kompensacinės ritės induktyvumo reaktyviąją galią.

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot z}; \quad (6)$$

Išsireiškiu - z;

$$z = \frac{1}{j\omega C}; \quad (7)$$

Tuomet - I;

$$I = \frac{U\omega C}{\sqrt{3}}; \quad (8)$$

Ir - C;

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot I}{U \cdot \omega}; \quad (9)$$

$$I_{talp} = \frac{U_{V,L} \cdot l}{\sqrt{3} \cdot 350}; \quad (10)$$

$$I_{talp} = \frac{10,5 \cdot l}{\sqrt{3} \cdot 350} \approx 0,03 \text{ A/km}; \quad (11)$$



Linijos talpumas:

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,03}{10^4 \cdot 2\pi f} = \frac{0,05196}{3140000} = 1,576 \cdot 10^{-5} \text{ F/km}; \quad (12)$$

Toliau apskaičiuoju linijos induktyvumą -  $L$ :

$$C - \frac{1}{\omega^2 \cdot L} = 0; \quad (13)$$

iš čia:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}; \quad (14)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot C} = \frac{1}{98596 \cdot 1,576 \cdot 10^{-5}} = 0,644 \text{ H/km}; \quad (15)$$

Apskaičiuoju kompensacinės ritės induktyvumo reaktyviają galią -  $Q_L$  reikalinga linijai.

$$Q = \sqrt{3} \cdot I \cdot U; \quad (16)$$

$$I = \frac{U}{\omega \cdot L}; \quad (17)$$

$$Q = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{x}; \quad x = \omega \cdot L; \quad (18)$$

$$Q_L = \frac{\sqrt{3} \cdot U^2}{\omega \cdot L}; \quad (19)$$

$$Q_L = \frac{\sqrt{3} \cdot 10,5^2}{314 \cdot 0,644} = \frac{190,953}{202,216} = 0,944 \text{ VAr}; \quad (20)$$

Gautus linijos duomenis suvedu į modelio linijų bei į kompensacinės ritės parametrus. Tolimesni darbo modeliavimo ir skaičiavimų rezultatai pateikiami projektinėje dalyje 3 skyriuje.

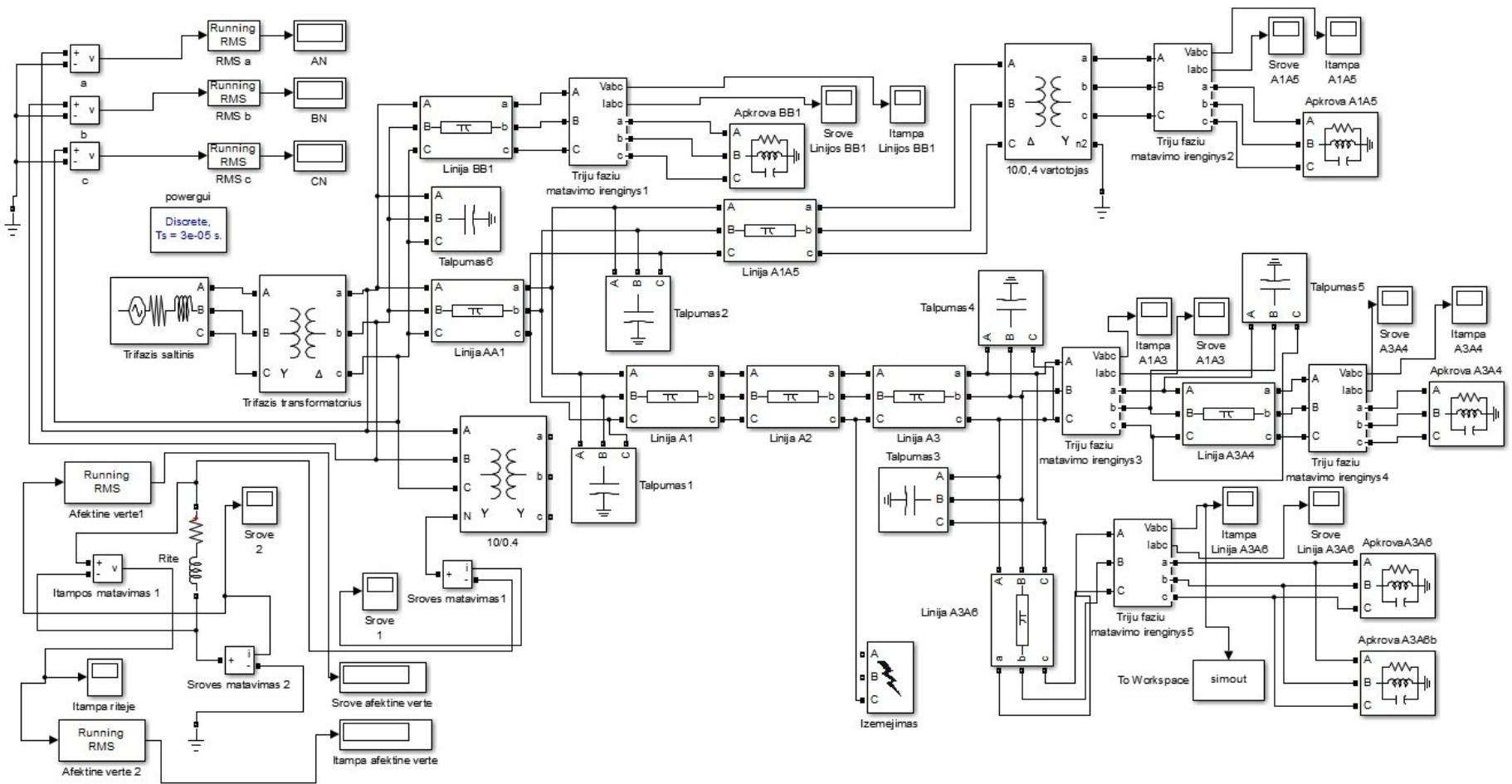
### 3. ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO SU KOMPENSACINE RITE MODELIAVIMAS

Į transformatoriaus neutralę įjungtos kompensacinės ritės imitacinis modelis sumodeliuotas pasinaudojus "Mathlab" simulink paketu. Simuliacijos modelis susideda iš dviejų perdavimo linijų, kurios yra "trifazių PI schemų pagrindu" modelis. Trifaziai įtampų ir srovių matavimai atliekami kiekvienoje linijoje ir matavimo prietaisas gali transformuoti matavimo sroves ir įtampas į "Mathlab" paketo simulink signalus, kad programinė įranga suprastų, tai yra, duomenys būtų transformuojami iš vienos dimensijos į kitą. Imituojantį skirstomojo tinklo modelį su kompensacine rite, darbą ir procesus, kurie vyksta tinkle įžemėjimo metu sudaro:

Sistema - perdavimo tinklo dalis trifazis šaltinis, galios transformatorius, dvi linijos - sveika ir pažeista linija. Sveika linija BB1 simetrinė homogeninė normali linija, turinti linijos parametrus, matavimo įrangą ir apkrovą. Antra AA1 linija nehomogeninė su 4 atšakomis A1A5 ir A3A4 - linijos, kuriose matavau kaip įžemėjimas, nebalansas bei atstumas turi įtakos šioms linijom. A1, A2, A3 - šioje linijoje modeliuojama avarija ir įžemėjimai, tam buvo naudotos 3 II schemos; A3A6 linija yra pati ilgiausia linija ir joje modeliauvau linijų disbalansą.

Modeliuoju trikampį su žvaigžde ir nuliu, tai yra (D11) - vienuoliktos valandos transformatorius. Tam, kad prijungčiau neutralę, o jos sujungti su trikampiu negaliu, todėl panaudoju atskirą transformatorių (kompensacinės ritės transformatorių), prie kurio pirmos žvaigždės tipo vijos neutralės prijungiu kompensacinę ritę.

Modeliavimo rezultatai pateikiami grafiškai. Sukurtas simuliacijos modelis pateiktas 10 pav.



Pav. 10 Į transformatoriaus neutralę įjungtos kompensacinės ritės simuliacinio modelis

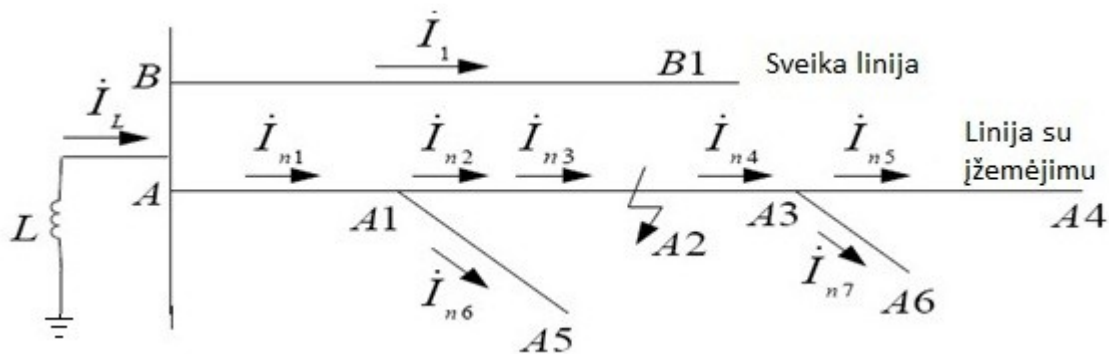
Atliekant tyrimą pasirinkti linijų ilgiai:

BB1 - 10 km, AA1 - 4 km, A1A3 - 7 km, A3A4 – 5 km, A1A5 – 4 km, A3A6 - 2 km. Iš viso 32 km.

Vienfazis įžemėjimas įvyksta tarp linijų A1A2.

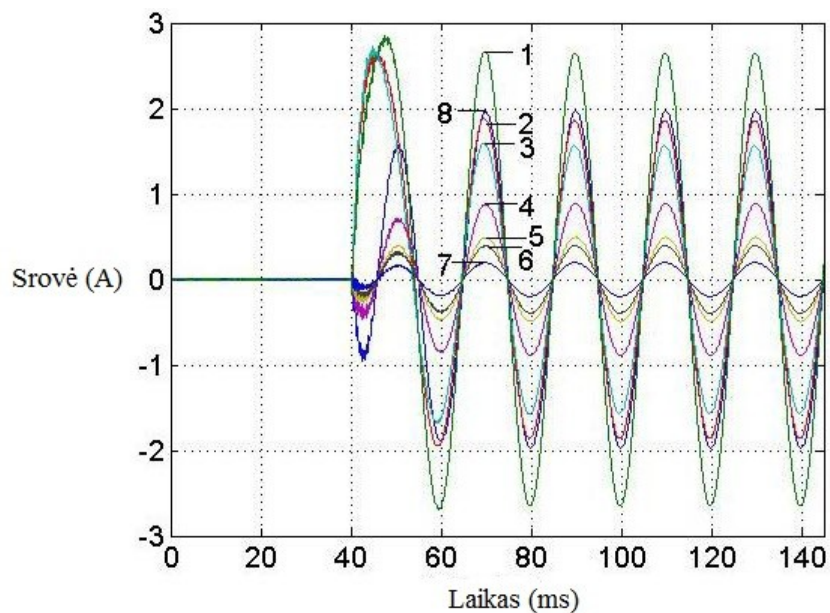
1 - nulinės sekos srovės  $\dot{I}_{n1}$ ; 2 -  $\dot{I}_{n2}$ ; 3 -  $\dot{I}_{n3}$ ; 4 -  $\dot{I}_{n4}$ ; 5 -  $\dot{I}_{n5}$ ; 6 -  $\dot{I}_{n6}$ ; 7 -  $\dot{I}_{n7}$ ; 8 -  $\dot{I}_1$ .

Pateikiu linijinę vienfazio įžemėjimo trumpojo jungimo metu sistemose su kompensacine rite schemą, kuri leidžia apsibrėžti įžemėjimo segmentą. 11 pav.



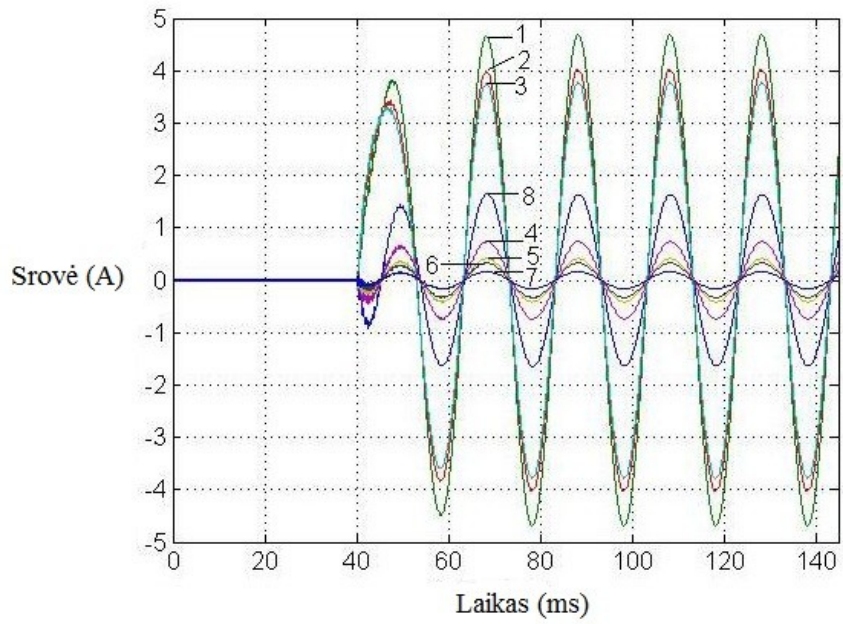
Pav. 11 Supaprastinta kompensacinės ritės modelio schema

Atliekant tyrimą nustatytas nulinės sekos srovės pokytis kompensacinėje ritėje prieš kompensavimą 12 pav.



Pav. 12 Nulinės sekos srovių pokyčiai kompensacinėje ritėje prieš kompensavimą

Nustatytas nulinės sekos srovės pokytis kompensacinėje ritėje po kompensavimo. 13 pav.



**Pav. 13** Nulinės sekos srovių pokyčiai po kompensavimo kompensacinėje ritėje

Modulių vertės, nulinės sekos srovių, prieš ir po kompensavimo kompensacinėje ritėje yra pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Nulinės sekos srovės amplitudžių vertės kiekvienam modeliavimo taškui

Srovės kaita		Nulinės sekos srovių modulio vertės															
		$\dot{I}_{n1,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>	$\dot{I}_{n2,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>	$\dot{I}_{n3,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>	$\dot{I}_{n4,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>	$\dot{I}_{n5,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>	$\dot{I}_{n6,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>	$\dot{I}_{n7,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>	$\dot{I}_{1,A}$	<i>Pokytis (proc.)</i>
		1		2		3		4		5		6		7		8	
Prieš srovės pakeitimą	Prieš L induktyvumo pakeitimą	2,651		1,860		1,562		0,881		0,490		0,391		0,191		1,962	
	Po L induktyvumo pakeitimo	4,625		4,031		3,780		0,741		0,412		0,331		0,160		1,642	
Po srovės pakeitimo	Prieš L induktyvumo pakeitimą	2,651	21,7	1,860	20,9	1,562	20,9	0,881	21,05	0,490	20,8	0,391	21,1	0,191	20,6	1,962	20,9
	Po L induktyvumo pakeitimo	5,629		4,877		4,573		0,897		0,498		0,401		0,193		1,986	

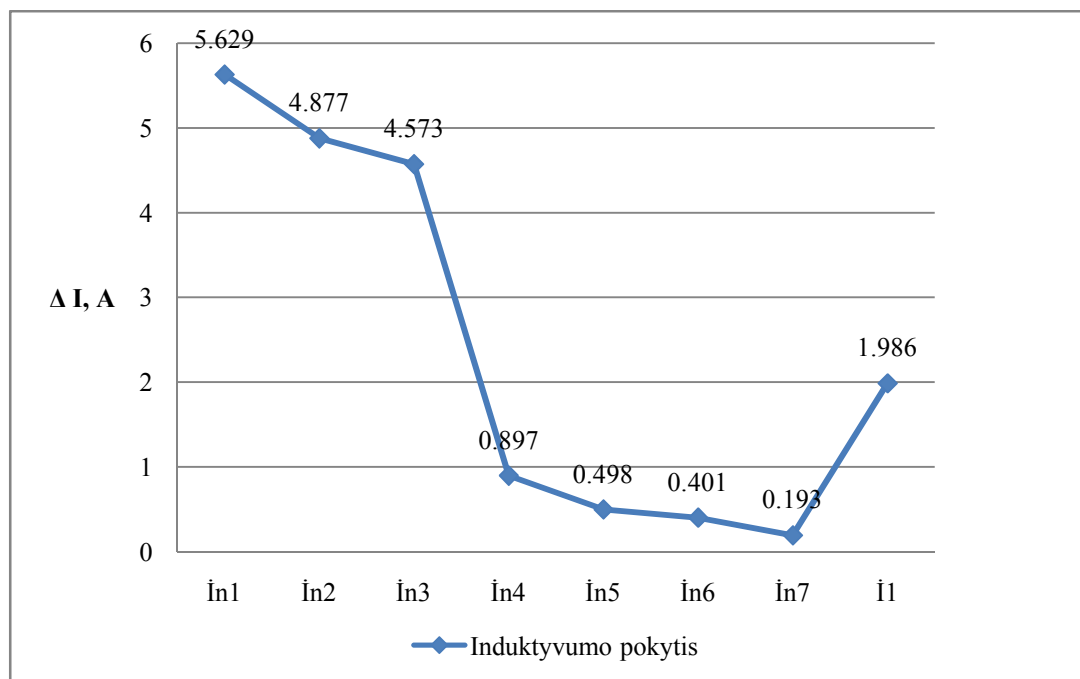
Iš 2 lentelės matyti, jog kompensacinės ritės naudojimas tinkle turi didelę naudą sistemai. Lentelėje analizuota linija BB1 ir AA4, nulinės sekos srovės padidėjimas šakoje AA1 ir AA4 yra 2,978 A, tuo tarpu, linijoje BB1 reikšmė artima nuliui (0,24 mA), taigi įžemėjimo taškas yra linijoje AA1 arba už jos. Tada analizuojama linija A1A5 ir A1A3. Sprendžiant pagal tą pačią priežastį, įžemėjimo taškas yra linijoje A1A3 arba už jos. Nulinės sekos srovė prieš tašką A2 kinta daugiau (3,011 A), tačiau už taško A2 nebekinta. Iš čia sprendžiama, jog 11 paveikslėlyje taškas A2 yra įžemėjimo vieta.

Kompensacinės ritės induktyvumo pokyčius pateikiu 3 lentelėje.

3 lentelė. Kompensacinės ritės induktyvumo kaita matavimo taškuose

Matavimo vieta	$I_{n1}$	$I_{n2}$	$I_{n3}$	$I_{n4}$	$I_{n5}$	$I_{n6}$	$I_{n7}$	$I_{1.}$
Induktyvumo pokytis, A	5,629	4,877	4,573	0,897	0,498	0,401	0,193	1,986

Pateikiu kompensacinės ritės induktyvumo pokyčio grafiką 14 pav.



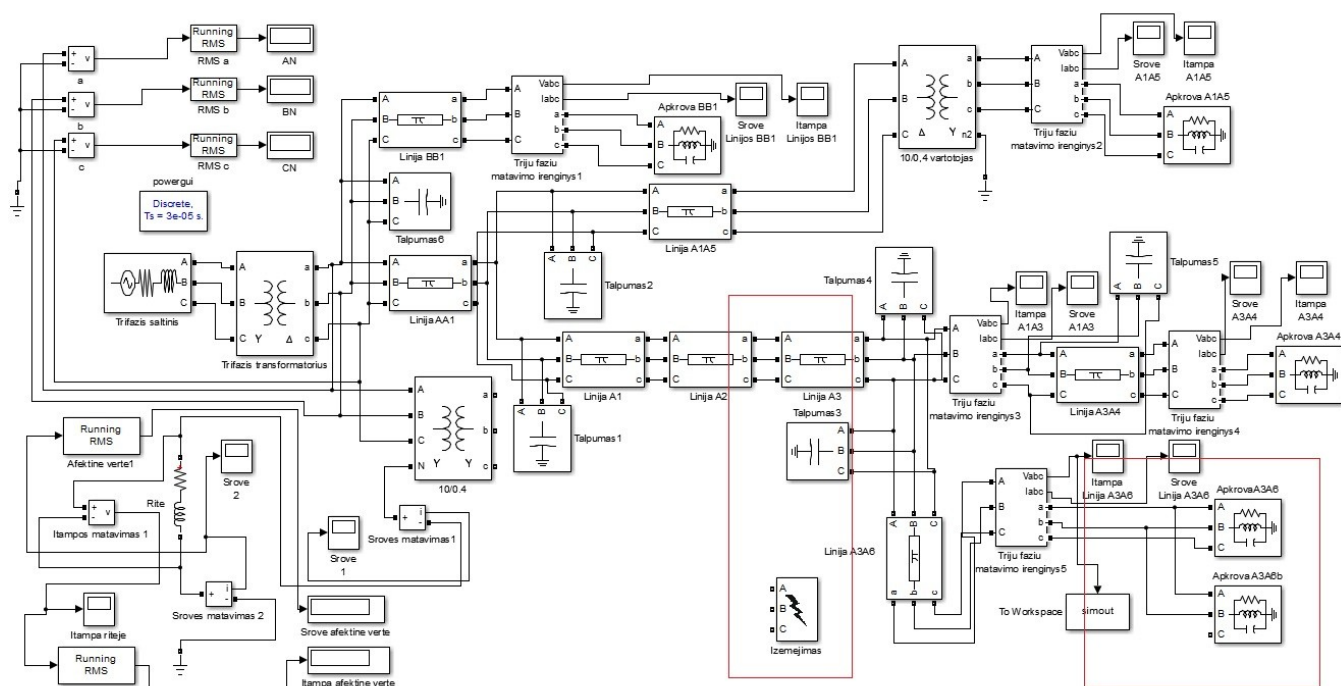
Pav. 14 Ritės induktyvumo kaita

Induktyvumo pokyčio grafikas rodo jog nulinės sekos srovės padidėjimo metodas yra tikslingas naudoti, kadangi įžemėjus linijai srovė yra padidėjusi prieš įžemėjimo vietą. O po įžemėjimo srovė nukrinta ir yra artima nuliui. Tokiu būdu galima surasti avarijos vietą ir pašalinti gedimą.

### 3.1 Išbalansuoto tinklo simuliacija ieškant rezonansinio taško oro linijoje

Su sukurtu modeliu tiriu tinklo elementus ir ieškau galimybės surasti į transformatoriaus neutralę įjungtos kompensacinės ritės rezonansinį tašką. Modelio pagalba susidariau papildomus elementus dėl parametrų ištyrimo ir rezonansinio taško suradimui. Modeliuojant išryškėja pereinamasis procesas, nes visų pirma, tinklą išbalansuoju tam, kad matyčiau kaip veikia kompensacinė ritė.

Taigi apkrovoje A3A6 tolimiausioje oro linijos dalyje atjungiu vieną iš fazių A3A6b. Taip pat atjungiu vienfazį įžemėjimą 15 pav.



Pav. 15 Išbalansuoto tinklo modelis Apkrova A3A6b

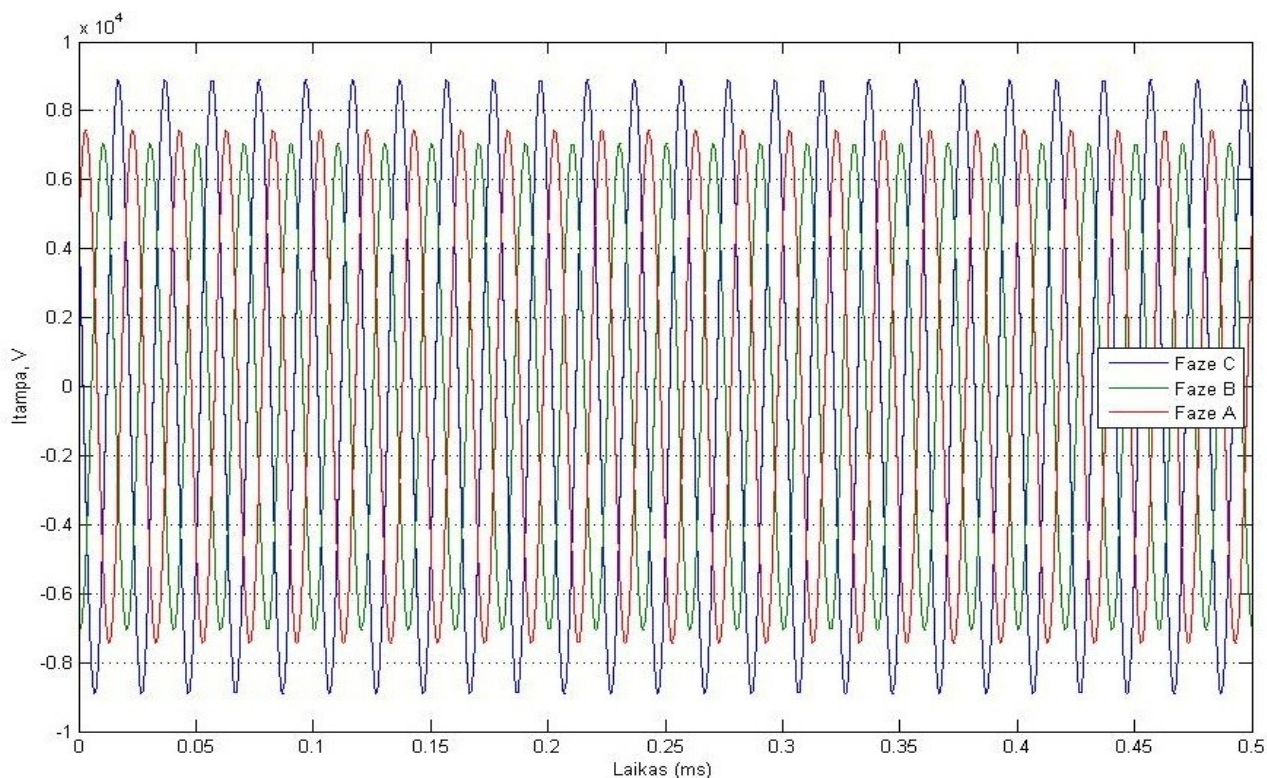
Reikalingas elektros tinklo išbalansavimas, kadangi tinklui veikiant normaliu režimu, kompensacinė ritė neatlieka jokių veiksmų. Nusistovėjęs režimas, ritė sureguliuota, ritės induktyvumas, srovė bei įtampa nekinta.

Tačiau išbalansavus tinklą ir atjungus vieną iš apkrovos fazių, tinklą galiu išbalansuoti. Pikinės įtampų vertės priklauso nuo apkrovos dydžio.

Apkrovą parenku taip, kad oro linijoje nebalansas būtų nedidelis. Ir būtų galima stebėti kompensacinės ritės darbą kintant ritės induktyvumui.



Pateikiu pereinamojo proceso fazinės įtampos sinusoidinę charakteristiką su apkrova oro linijoje A3A6b, 16 pav. Visuose įtampų grafikuose matavimai atliekami fazė į žemę.



**Pav. 16** Išbalansuoto tinklo fazinės įtampos sinusoidinė charakteristika

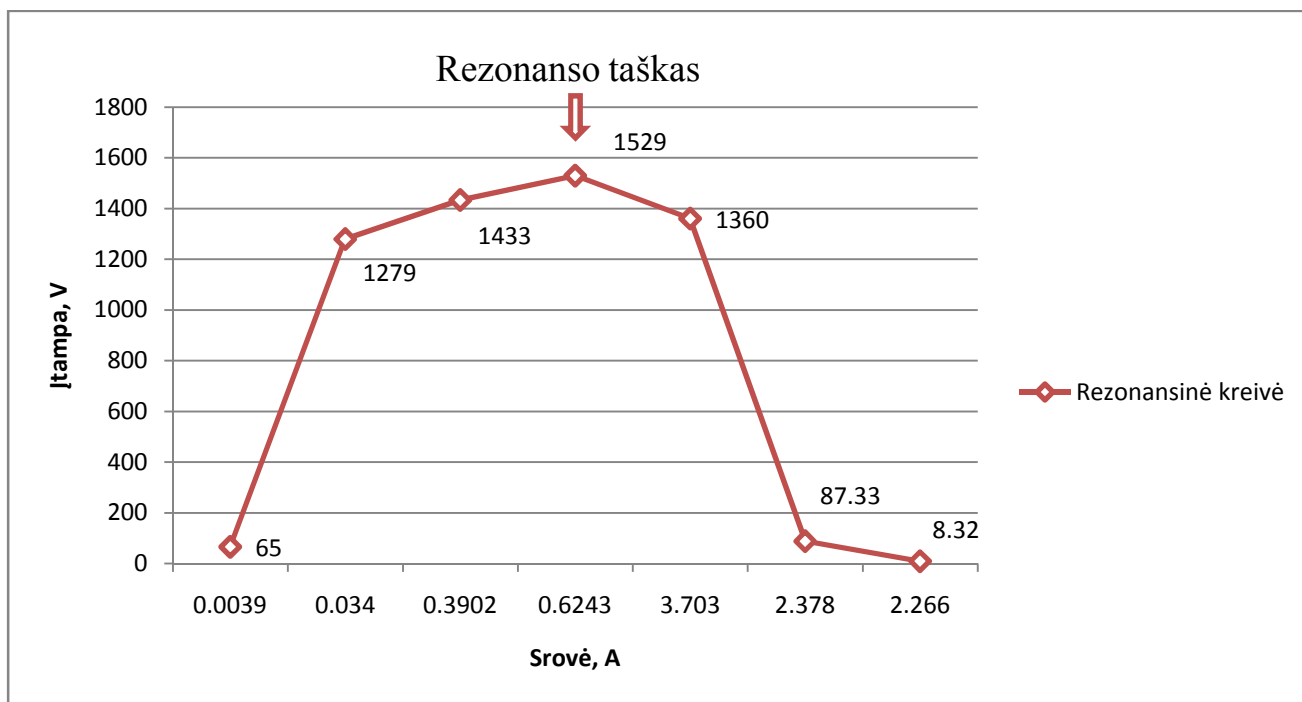
Priklausomai nuo apkrovos dydžio išryškėja pikinės grafiko reikšmės. Apkrovą padidinau tiek, kad grafike matytūsi fazių įtampų iškraipymas ir smulkus tinklo išbalansavimas. Apkrovos aktyvioji galia 6 kW. Kadangi mažiausiai apkrauta fazė C, jos pikinė vertė didžiausia, kitų dviejų fazių A ir B vertės mažesnės. Rezonanso kreivės duomenys pateikiami 4 duomenų lentelėje.

4 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys - 6 kW

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	65,02	0,08
$1e^3$	1279	0,03482
$1e^4$	1433	0,39
$1,5e^4$	1529	0,6243
$1e^5$	1360	3,703
$1e^6$	87,33	2,378
$1e^7$	8,32	2,266

Taip pat pateikiu 17 paveiksle pavaizduotą rezonansinę kreivę, kuri parodo ritės induktyvumo jautrumą tinklo atžvilgiu. Kadangi 10 kV tinkle didinant apkrovas ir išbalansuojant tinklą, tinklo

talpumas yra labai mažas, todėl įtampa ritėje išauga ir po to mažėja. Tokiu būdu modelio pagalba surandamas rezonansinis taškas.



Pav. 17 10 kV tinklo su 6 kW aktyviaja galios apkrova, rezonansinė kreivė

Simuliuojant tinklą ir keičiant kompensacinės ritės induktyvumą 10 kV tinkle rezonanso kreivės duomenys gaunami tikslūs ir neiškraipyti.

Simuliacijos modelyje didinu apkrovos (angl. Active power P) aktyviąją galią oro linijos A3A6b gale nuo 6kW iki 10kW. Linijų apkrovos turi įtakos visam tinklui ir linijos gale esančiai linijos įtampai ir linijos srovei. Pateikiu 5 lentelę su rezonanso kreivei nubrėžti reikalingais duomenimis ir 18 paveikslą, kuriame pavaizduota rezonansinė kreivė su 10 kW aktyviosios galios apkrova.

5 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys - 10 kW

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	45,15	0,0029
$1e^3$	1106	0,03482
$1e^4$	1234	0,39
$1,5e^4$	1310	0,6243
$1e^5$	1043	3,703
$1e^6$	72,58	1,976

Didėjant oro linijos apkrovai mažėja įtampa kompensacinėje ritėje. Tai parodo rezonansinė kreivė 18 pav.



Pav. 18 10 kV tinklo su 10 kW aktyviaja galios apkrova rezonansinė kreivė

Didinu apkrovos aktyviają galią iki 20 kW tam, kad būtų galima išsiaiškinti kaip tinklo apkrova veikia kompensacinę ritę.

Pateikiu 6 lentelę su rezonanso kreivės duomenimis 20 kW apkrovos aktyviają galia.

6 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys - 20 kW

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	25,15	0,0029
$1e^3$	706,4	0,03482
$1e^4$	773,7	0,39
$1,5e^4$	809,4	0,6243
$1e^5$	529,1	1,441
$1e^6$	42,79	1,976

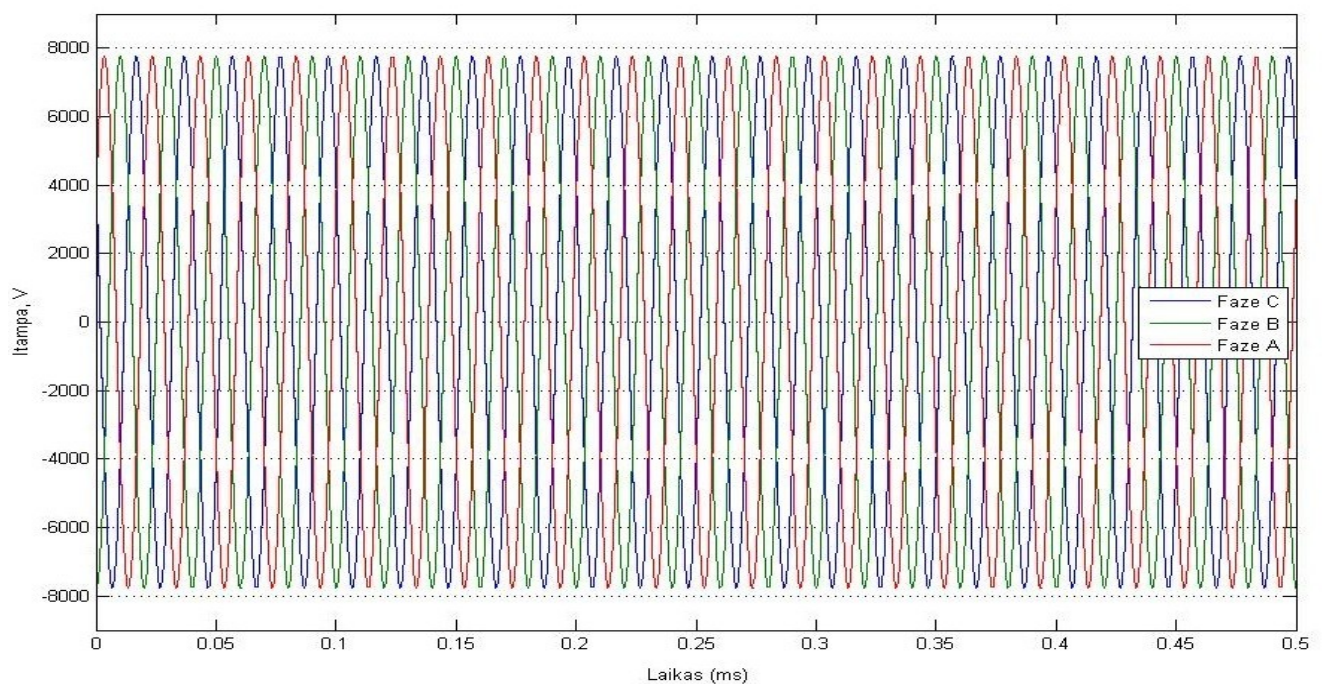
Pateikiu 19 paveikslą kuriame pavaizduota rezonanso kreivė su 20 kW apkrovos aktyviają galia.



Pav. 19 10 kV tinklo su 20 kW aktyviosios galios apkrova rezonansinė kreivė

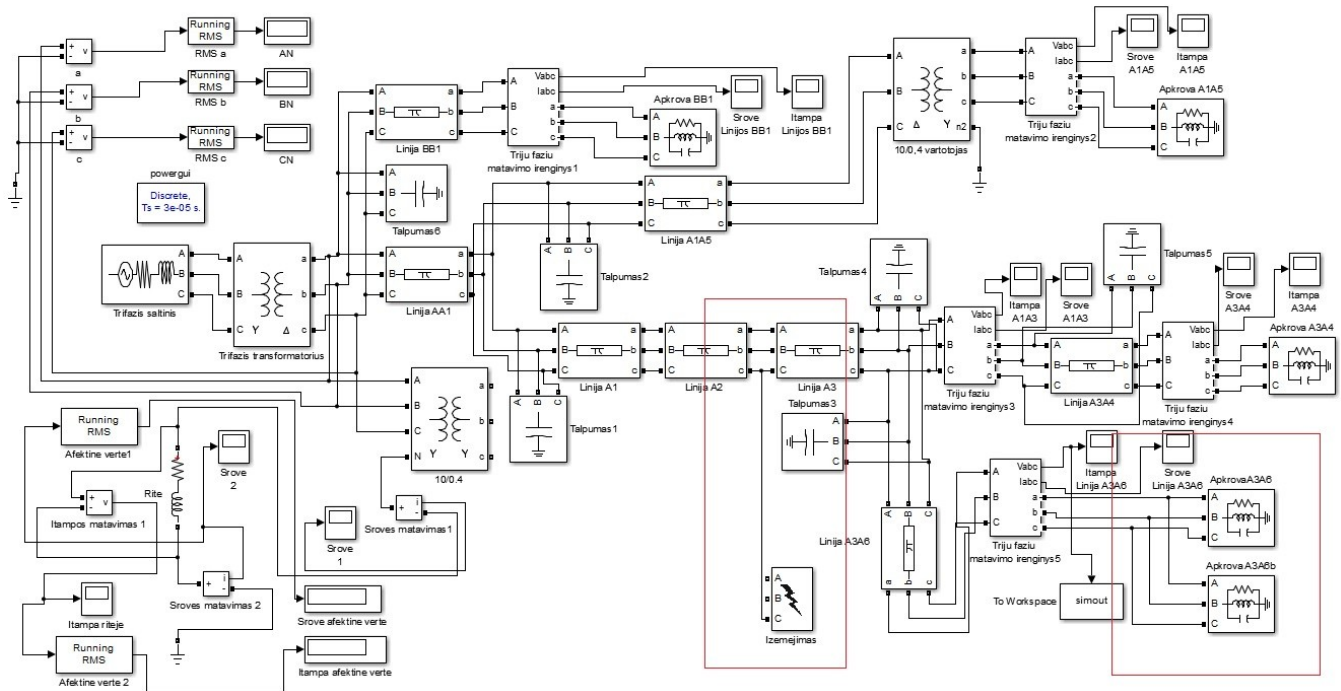
Iš gautų duomenų galima teigti, jog didinant oro linijos apkrovą kompensacinėje ritėje įtampa mažėja.

Toliau darbe tyrinėjami kaip veikia įžemėjimas, patį tinklą ir kompensacinę ritę. Subalansuoju tinklą ir apkrovas atstatau į normalų režimą. Pateikiu 20 pav. 10 kV normalaus darbo režimo tinklo sinusoidinę įtampų charakteristiką.



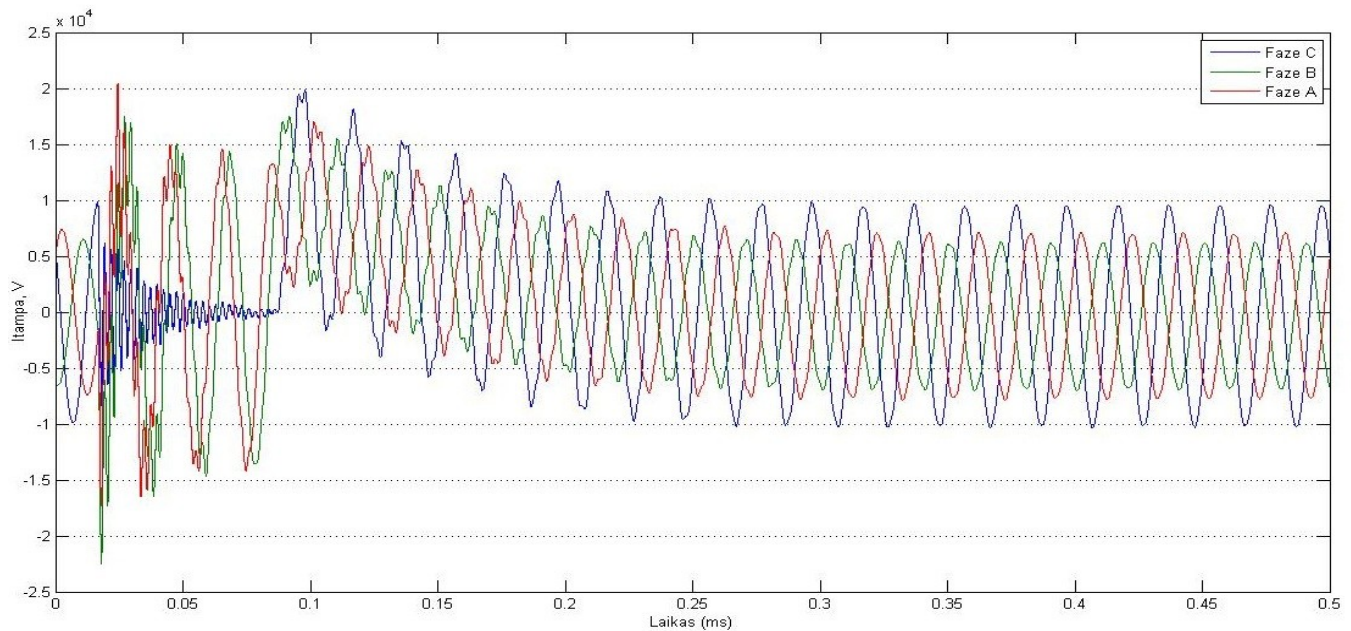
Pav. 20 Normalaus darbo režimo 10 kV tinklo sinusoidinė charakteristika

Pateikiu matematinį modelį su vienfaziu įžemėjimu 21 pav. Vienfazis įžemėjimas vyksta per reguliuojamą varžą.



Pav. 21 Matematinis modelis su vienfaziu įžemėjimu

Taip pat įtampų sinusoidinė charakteristika su  $5\Omega$  vienfaziu įžemėjimu pateikiama 22 paveiksle.



Pav. 22  $5\Omega$  vienfazis įžemėjimas 10 kV tinkle

Svarbiausia tokio įžemėjimo atveju surasti kaip kinta rezonansinė kreivė ir ar galima aptikti rezonansinį tašką. Matematinį modelį simuliuoju su skirtingais kompensacinės ritės induktyvumais.

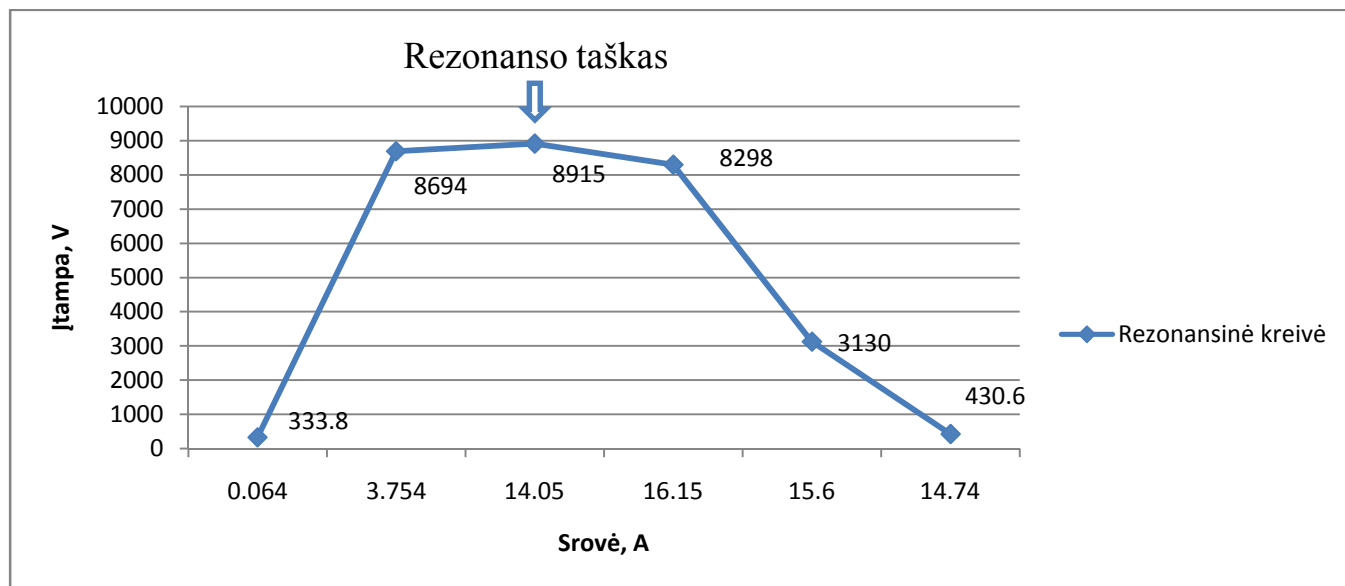
Pateikiu 7 lentelę su rezonanso kreivės duomenimis su bandomąja  $5\Omega$  vienfazio įžemėjimo varža.

7 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys  $5\Omega$  įžemėjimas

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	333,8	0,064
$1e^3$	8694	3,754
$1e^4$	8915	14,05
$1,5e^4$	8298	16,15
$1e^5$	3130	15,6
$1e^6$	430,6	14,74

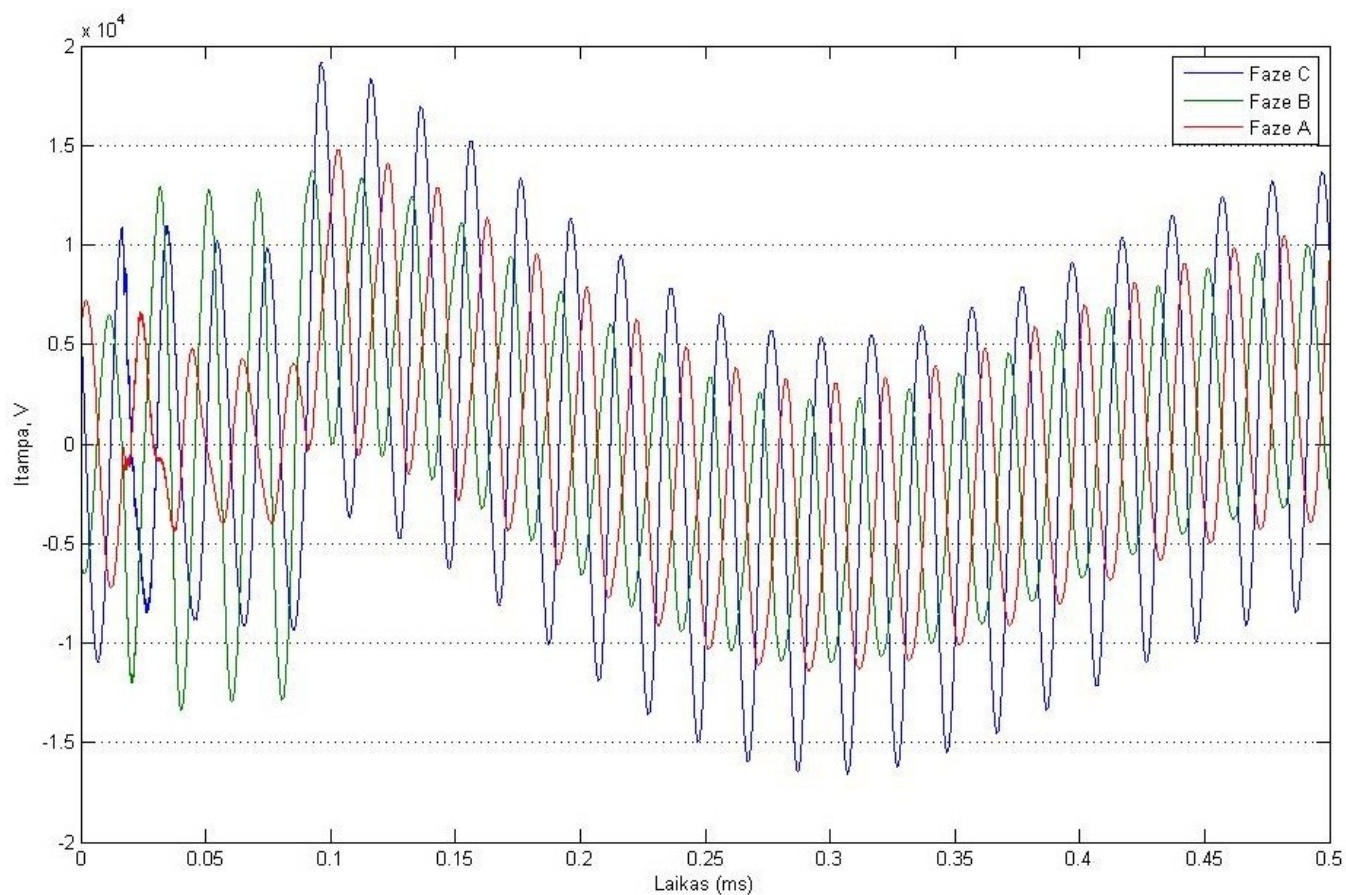
Vienfazis įžemėjimas turi didžiausią įtaką tinklo išbalansavimui.

Pateikiu 23 paveiksle pavaizduotą rezonansinę kreivę su vienfaziu  $5\Omega$  įžemėjimu. Įtampa kompensacinėje ritėje išauga labai daug, todėl kompensacinė ritė tokiu atveju yra blokuojama, kad nebūtų sugadinta ritė ir kiti mechanizmai.



Pav. 23  $5\Omega$  vienfazio įžemėjimo rezonansinė kreivė

Tačiau norėdamas sužinoti kaip keičiasi rezonansinė kreivė nuo įžemėjimo varžos, didinu įžemėjimą iki  $100\Omega$ . Įtampų sinusoidinė charakteristika su  $100\Omega$  vienfaziu įžemėjimu oro linijoje pateikiama 24 paveiksle.



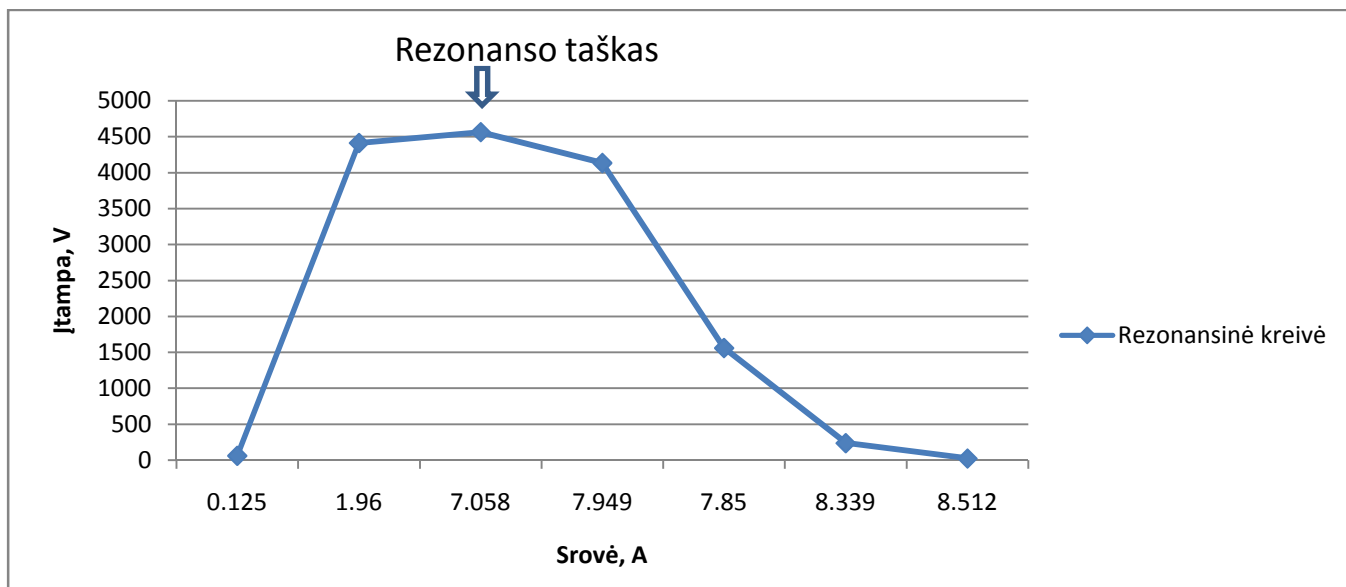
**Pav. 24** 100Ω vienfazis įžemėjimas 10 kV tinkle

Pateikiu 8 lentelę su rezonansinės kreivės duomenimis.

8 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su 100 Ω įžemėjimo varža

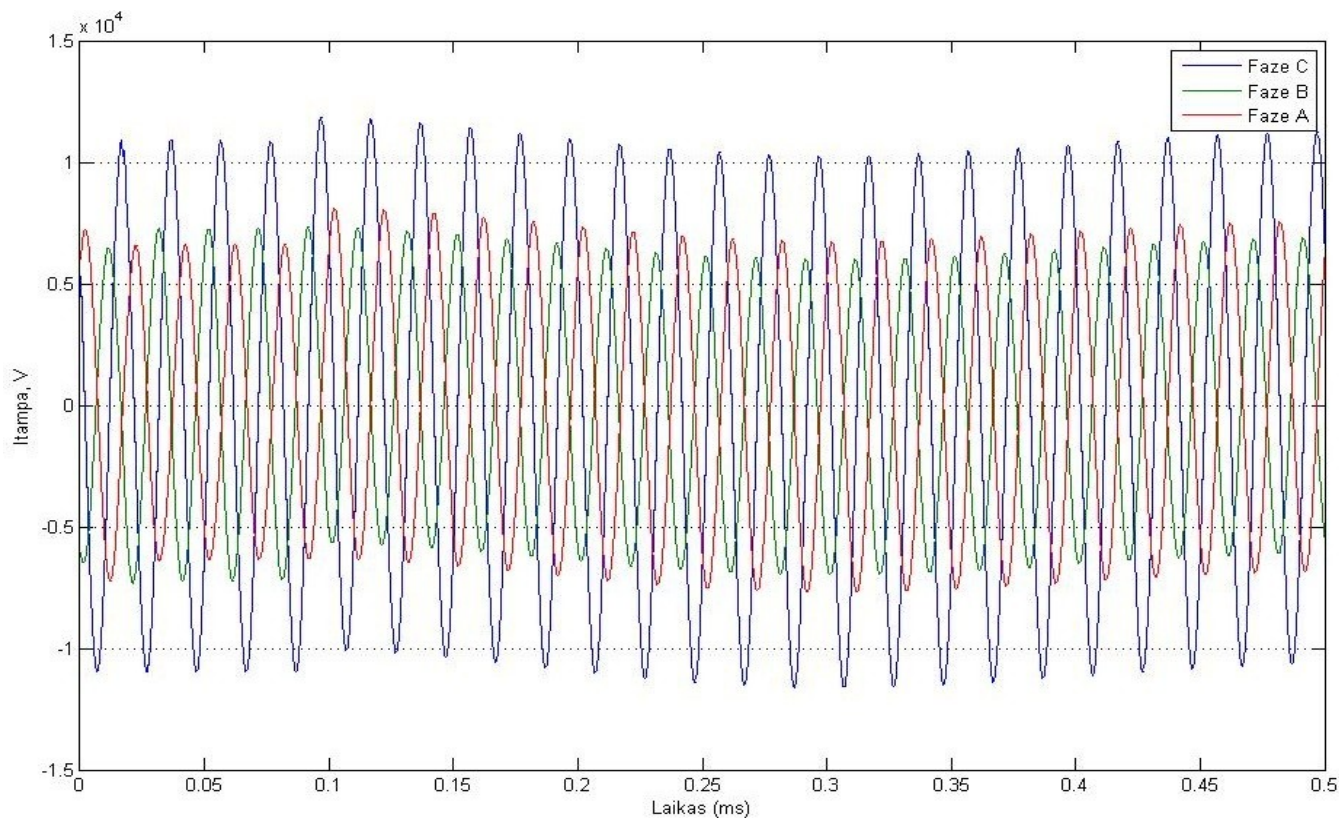
Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	62,14	0,125
$1e^3$	4410	1,96
$1e^4$	4561	7,058
$1,5e^4$	4133	7,949
$1e^5$	1560	7,85
$1e^6$	238,7	8,339
$1e^7$	25,17	8,512

Ir 25 paveiksle pavaizduoju rezonansinę kreivę su 100 Ω įžemėjimo varža modelyje.



Pav. 25 100Ω vienfazio įžemėjimo rezonansinė kreivė

Modelio rezonansinė kreivė rodo, jog didėjant įžemėjimo varžai rezonanso taškas mažėja. Didinu įžemėjimo varžą iki 1000 Ω. Pateikiu rezonansinės kreivės duomenis 8 lentelėje ir 26 paveiksle pavaizduoju įtampų sinusoidinę charakteristiką su 1000Ω vienfaziu įžemėjimu oro linijoje.



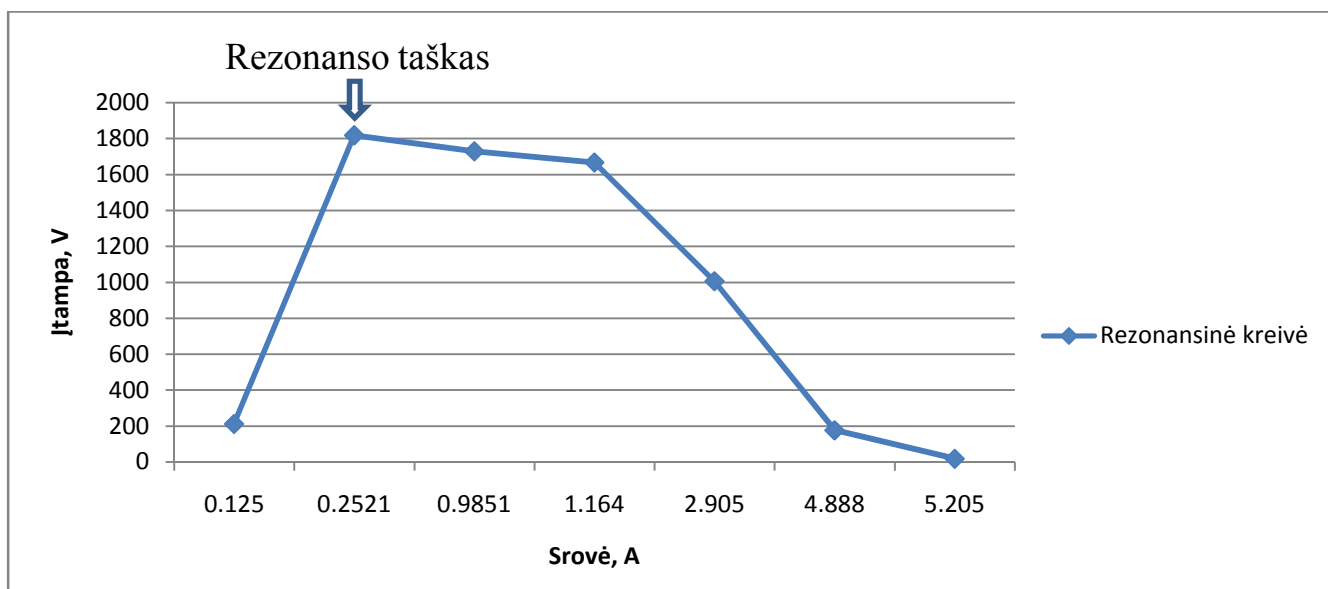
Pav. 26 1000Ω vienfazis įžemėjimas 10 kV tinkle



9 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su 1000 Ω įžemėjimo varža

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	212,4	0,125
$1e^3$	1817	0,2521
$1e^4$	1728	0,9851
$1,5e^4$	1666	1,164
$1e^5$	1006	2,905
$1e^6$	176,9	4,888
$1e^7$	18,89	5,205

Tokiu būdu 27 paveiksle pavaizduoju rezonansinę kreivę su 1000 Ω įžemėjimo varža.



Pav. 27 1000Ω vienfazio įžemėjimo rezonansinė kreivė

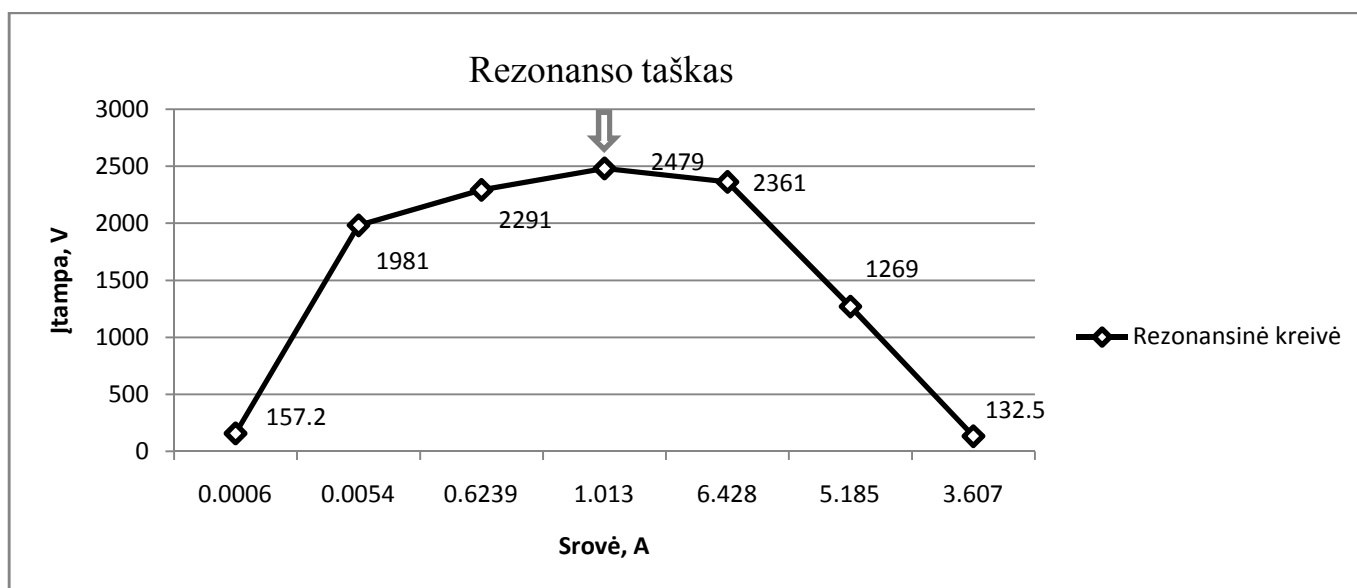
Įžemėjimo metu, kai neutralės įtampa pasiekia nustatytą ritės valdiklyje reikšmę, blokuojamas automatinis ritės reguliavimas ir skyriklio, kuriuo ritė prijungta prie kompensacinės ritės transformatoriaus valdymas. Tuo metu įžemėjusios šynų sekcijos išeinančių linijų RAA terminalai matuoja savo nulinės sekos srovę ir kampą tarp nulinės sekos srovės ir neutralės įtampos, siekiant selektyviai nustatyti įžemėjusią liniją. Nustatytą įžemėjusią liniją operatyvinis personalas atjunginėja atskirais ruožais ieškodamas konkrečios įžemėjimo vietos.

Toliau darbe atstatau modelį į normalųjį režimą kaip parodyta 20 pav. Modeliuodamas gaunu 32 km normalaus režimo oro linijos tinklo rezonansinę kreivę.

10 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 32 km oro linijoje

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	157,2	0,0006
$1e^3$	1981	0,0054
$1e^4$	2291	0,6239
$1,5e^4$	2479	1,013
$1e^5$	2361	6,428
$1,5e^5$	1269	5,185
$1e^6$	132,5	3,607

Pateikiu 28 paveiksle rezonansinės kreivės grafiką 32 km oro linijoje.



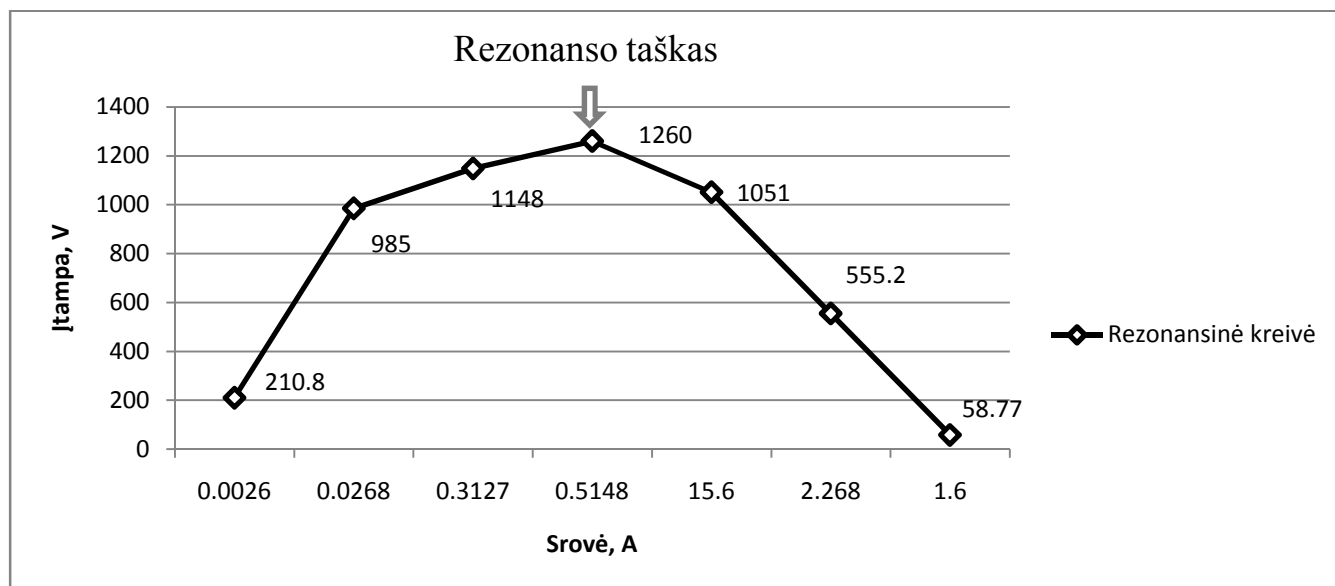
Pav. 28 Normalaus darbo režimo 32 km oro linijos rezonansinė kreivė

Keičiu tinklo ilgį iš 32 km į 50 km atstumą. Stebiu, kaip oro linijos ilgis keičia tinklo parametrus bei kaip tai veikia kompensacinę ritę.

11 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 50 km oro linijoje

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	210,8	0,0026
$1e^3$	985	0,0268
$1e^4$	1148	0,3127
$1,5e^4$	1260	0,5148
$1e^5$	1051	15,6
$1,5e^5$	555,2	2,268
$1e^6$	58,77	1,6

Atstatytame modelyje pailginus liniją A3A6 dvidešimčia kilometrų daugiau iš viso linijų ilgis pakito iki 50 kilometrų. Kreivės duomenys rodo, jog pailgėjus tinklui, padidėjo ir jo talpumas, tokiu būdu sumažėjo įtampa kompensacinėje ritėje. 29 paveiksle pateikiu rezonansinę kreivę su pailginta linija iki 50 km.



Pav. 29 Ilgesnės oro linijos rezonansinė kreivė - 50 km.

Rezonanso kreivė rodo, jog keičiantis linijos ilgiui kinta ir linijos talpumas, dėl to kompensacinėje ritėje įtampa mažėja. Kompensacinė ritė stipriau kompensuoja tokio ilgio tinklą, nes automatiškai tinklas ilgesnis, didėja srovių rezonansas ir talpumas.

Norėdamas palyginti modelio efektyvumą ir tikslumą, matematinį modelį perverčiu kabeliniu tinklu ir modeliudamas ieškau rezonansinės kreivės atsižvelgdamas į skirtingus tinklo parametrus.

### 3.2 Išbalansuoto tinklo simuliacija ieškant rezonansinio taško kabelinėje linijoje

Parenku kabelinės linijos kabelį: 1x95/16. Apskaičiuoju kabelinės linijos nuotėkio srovę, kuri pagal 21 formulę, 1 lentelę bei katalogą yra apytiksliai lygi:

$$I_{talp} = \frac{U_{V,L} \cdot l}{\sqrt{3} \cdot 10} \approx 2 \text{ A/km.} \quad (21)$$

čia: 10 - nuotėkio srovės koeficientas kabelinėje linijoje

Taip pat, kaip ir oro linijoje, apskaičiuoju linijos talpumus, linijos induktyvumą ir kompensacinės ritės induktyvumo reaktyviąją galią.

Kabelinės linijos talpumas:

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot 2}{10^4 \cdot 2\pi f} = \frac{0,05196}{3140000} = 1,051 \cdot 10^{-3} \text{ F/km}; \quad (22)$$

Toliau apskaičiuoju kabelinės linijos induktyvumą -  $L$ :

$$C - \frac{1}{\omega^2 \cdot L} = 0; \quad (23)$$

iš čia:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}; \quad (24)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot C} = \frac{1}{98596 \cdot 1,051 \cdot 10^{-3}} = 0,00965 \text{ H/km}; \quad (25)$$

Apskaičiuoju induktyvumo reaktyviąją galią -  $Q_L$  reikalinga linijai.

$$Q = \sqrt{3} \cdot I \cdot U; \quad (26)$$

$$I = \frac{U}{\omega \cdot L}; \quad (27)$$

$$Q = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{x}; \quad x = \omega \cdot L; \quad (28)$$

$$Q_L = \frac{\sqrt{3} \cdot U^2}{\omega \cdot L}; \quad (29)$$

$$Q_L = \frac{\sqrt{3} \cdot 10,5^2}{314 \cdot 0,00965} = 661.73 \text{ VAr}; \quad (30)$$

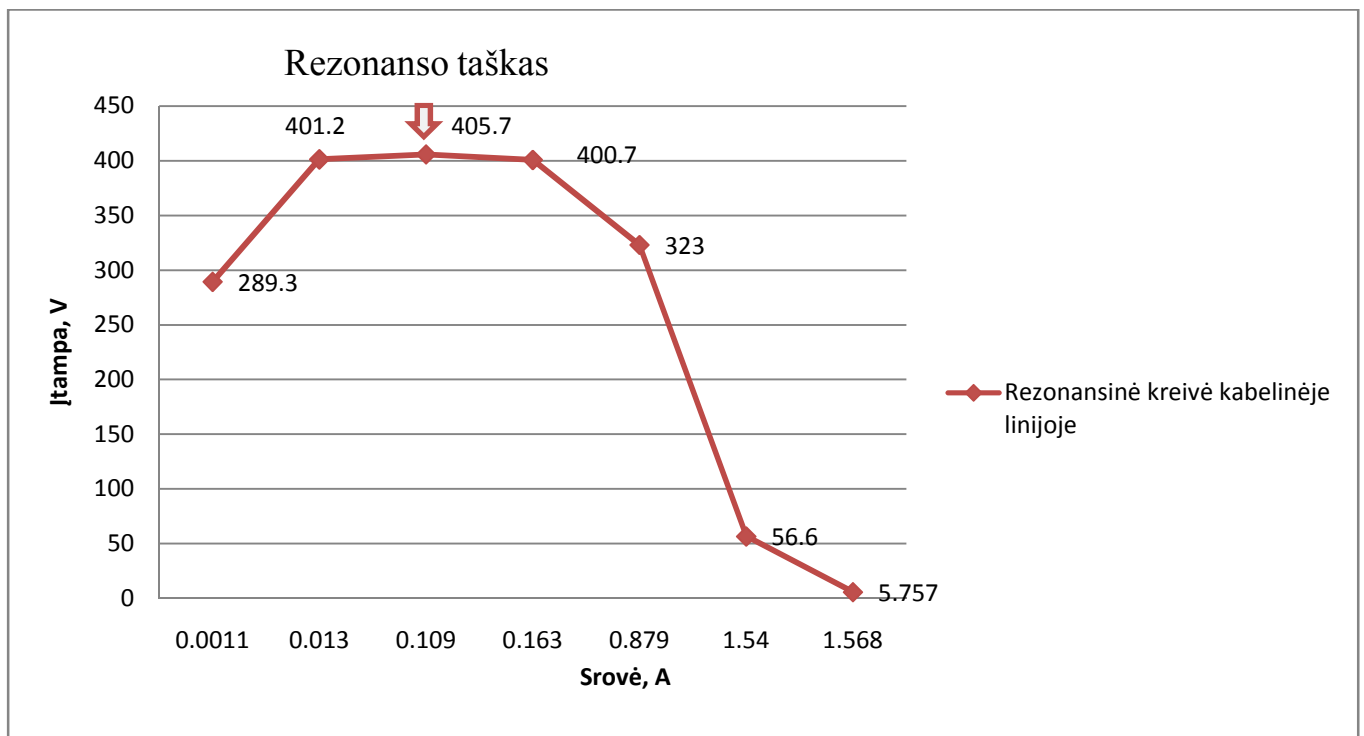
Gautus kabelinės linijos duomenis suvedu į matematinio modelio linijų bei į kompensacinės ritės parametrus.

Pateikiu rezonansinės kreivės duomenis su kabelinės linijos gale esančia 6 kW aktyviaja apkrova A3A6b, 12 lentelė.

12 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys kabelinėje linijoje - 6 kW

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	289,3	0,0011
$1e^3$	401,2	0,013
$1e^4$	405,7	0,109
$1,5e^4$	400,7	0,163
$1e^5$	323	0,879
$1e^6$	56,6	1,54
$1e^7$	5,757	1,568

Pateikiu 30 paveikslėlyje 6 kW aktyviosios galios apkrovos rezonansinę kreivę kabelinėje linijoje.



Pav. 30 10 kV kabelinio tinklo su 6 kW aktyviąja galios apkrova rezonansinė kreivė

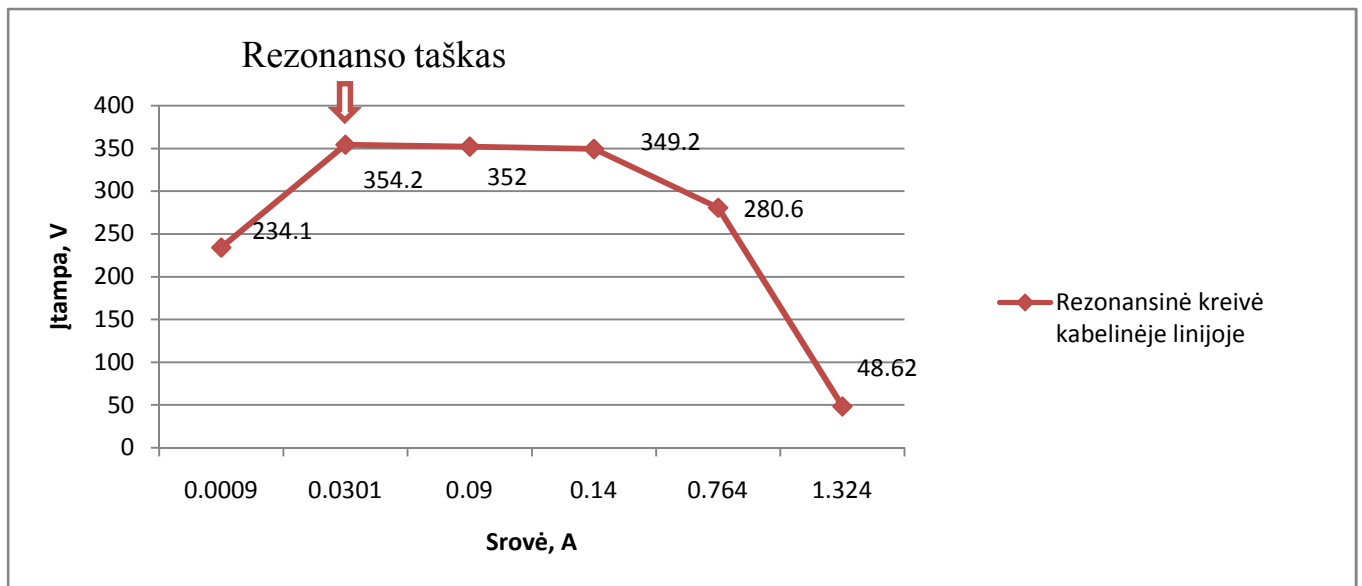
Didinu apkrovos aktyviąją galią iki 10 kW tam, kad būtų galima išsiaiškinti kaip kabelinio tinklo apkrova veikia kompensacinę ritę.

Pateikiu 13 lentelę su rezonanso kreivės duomenimis 10 kW apkrovos aktyviąja galia.

13 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys kabelinėje linijoje - 10 kW

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	25,15	0,0029
$1e^3$	706,4	0,03482
$1e^4$	773,7	0,39
$1,5e^4$	809,4	0,6243
$1e^5$	529,1	1,441
$1e^6$	42,79	1,976

Pateikiu 31 paveikslą, kuriame pavaizduota rezonanso kreivė su 10 kW apkrovos aktyviąja galia.



Pav. 31 10 kV tinklo su 10 kW aktyviąja galios apkrova kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė

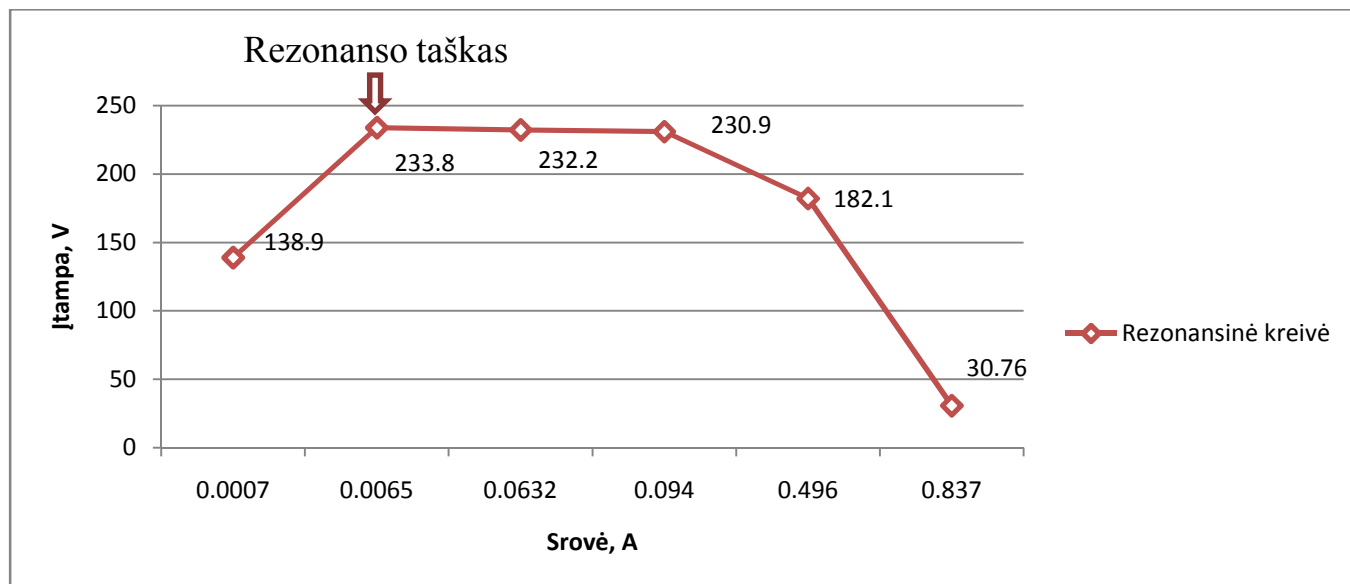
Iš grafiko matyti, jog keičiantis kabelinės linijos apkrovos dydžiui kinta ir rezonansinės kreivės dydis, įtampa ritėje ir kreivė artėja prie x ašies. Slopinimas didėja, mažesnė tikimybė atsirasti įžemėjimui.

Kaip ir ankstesniuose skaičiavimuose didinu apkrovą iki 20 kW aktyviosios galios. Pateikiu rezonansinės kreivės duomenų 14 lentelę.

14 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys kabelinėje linijoje - 10 kW

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	138,9	0,0007
$1e^3$	233,8	0,0065
$1e^4$	232,2	0,0632
$1,5e^4$	230,9	0,094
$1e^5$	182,1	0,496
$1e^6$	30,76	0,837

Pateikiu 32 paveikslą, kuriame pavaizduota rezonanso kreivė kabelinėje linijoje su 20 kW apkrovos aktyviają galia.



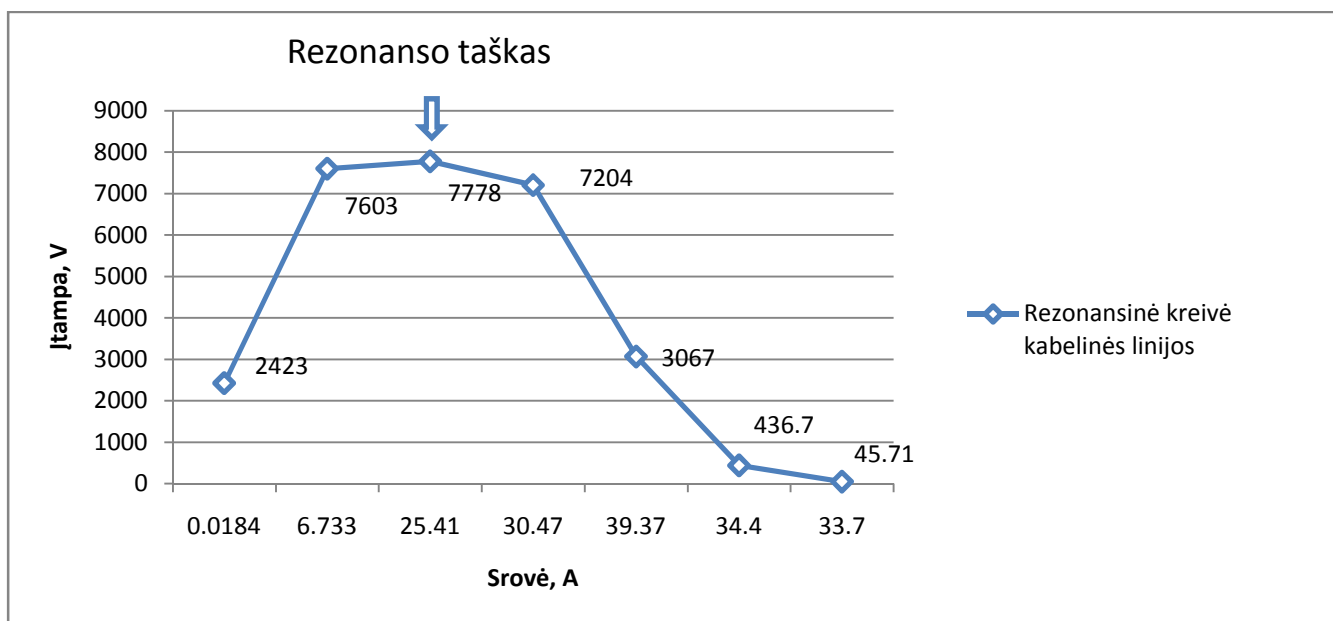
**Pav. 32** 10 kV tinklo su 20 kW aktyviaja galios apkrova kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė

Toliau darbe tyrinėjami kaip veikia įžemėjimas kabelinės linijos tinklą ir kompensacinę ritę. Pateikiu rezonansinės kreivės duomenų lentelę su bandomąja 5Ω vienfazio įžemėjimo varža.

15 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 5Ω įžemėjimas

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	2423	0,0184
$1e^3$	7603	6,733
$1e^4$	7778	25,41
$1,5e^4$	7204	30,47
$1e^5$	3067	39,37
$1e^6$	436,7	34,4
$1e^7$	45,71	33,7

Rezonansinės kreivės grafikas pateikiamas 33 paveikslėlyje.



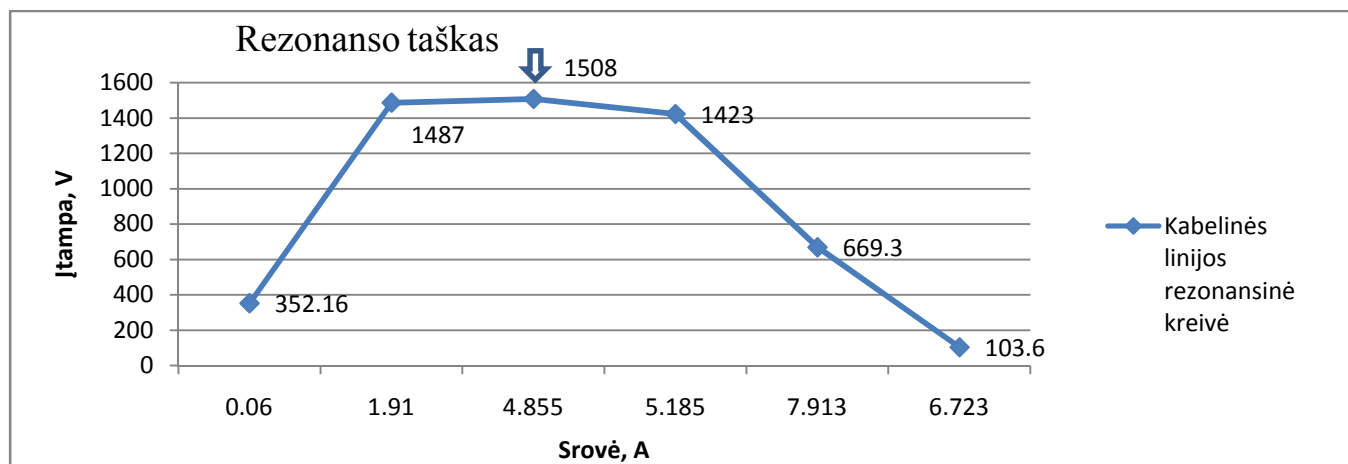
Pav. 33 10 kV tinklo su 5Ω įžemėjimu kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė

Didinu įžemėjimą iki 100 Ω. Pateikiu 16 lentelę su rezonansinės kreivės duomenimis 100 Ω įžemėjimo varža.

16 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su 100 Ω įžemėjimo varža

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	352,16	0,06
$1e^3$	1487	1,91
$1e^4$	1508	4,855
$1,5e^4$	1423	5,185
$1e^5$	669,3	7,913
$1e^6$	103,6	6,723

Ir 34 paveiksle pavaizduoju rezonansinę kreivę su 100 Ω įžemėjimo varža.



Pav. 34 10 kV tinklo su 100 Ω įžemėjimu kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė

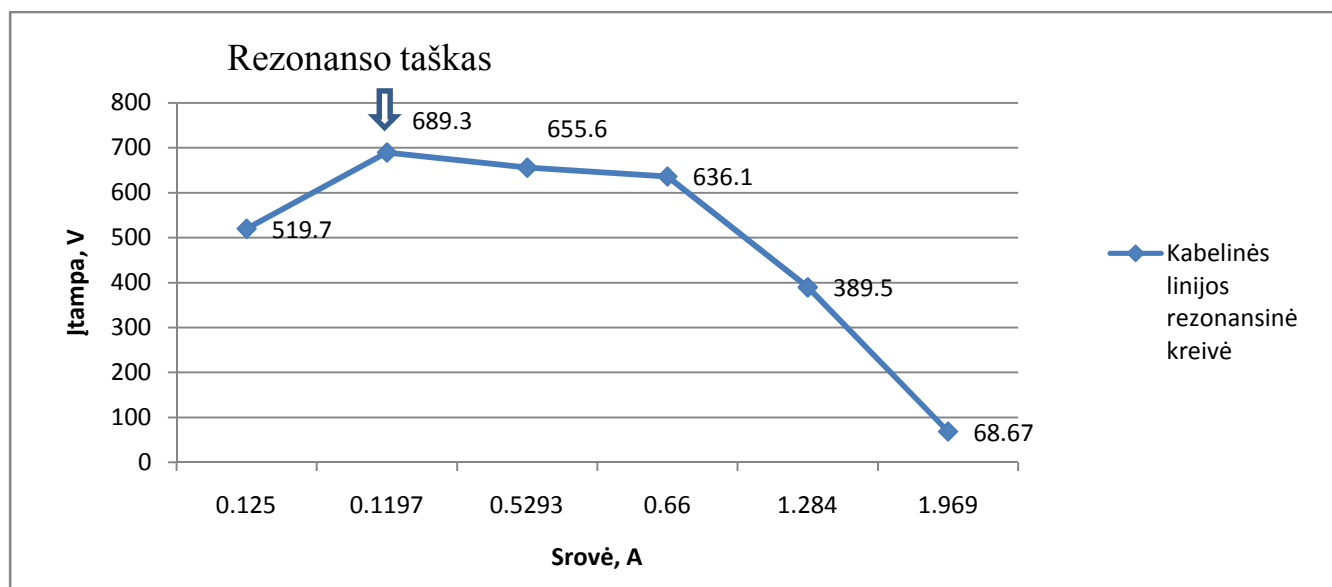


Kaip ir oro linijoje, taip ir kabelinėje linijoje padidinu įžemėjimo varžą iki 1000  $\Omega$ . 17 lentelėje pateikiu rezonansinės kreivės duomenis.

17 lentelė. Rezonansinės kreivės duomenys su 1000  $\Omega$  įžemėjimo varža

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	519,7	0,125
$1e^3$	689,3	0,1197
$1e^4$	655,6	0,5293
$1,5e^4$	636,1	0,66
$1e^5$	389,5	1,284
$1e^6$	68,67	1,969

Bei 35 paveiksle pateikiu rezonansinę kreivę 10 kV kabelinėje linijoje su vienfaziu įžemėjimu ir 1000  $\Omega$  varža.



Pav. 35 10 kV tinklo su 1000  $\Omega$  įžemėjimu kabelinėje linijoje rezonansinė kreivė

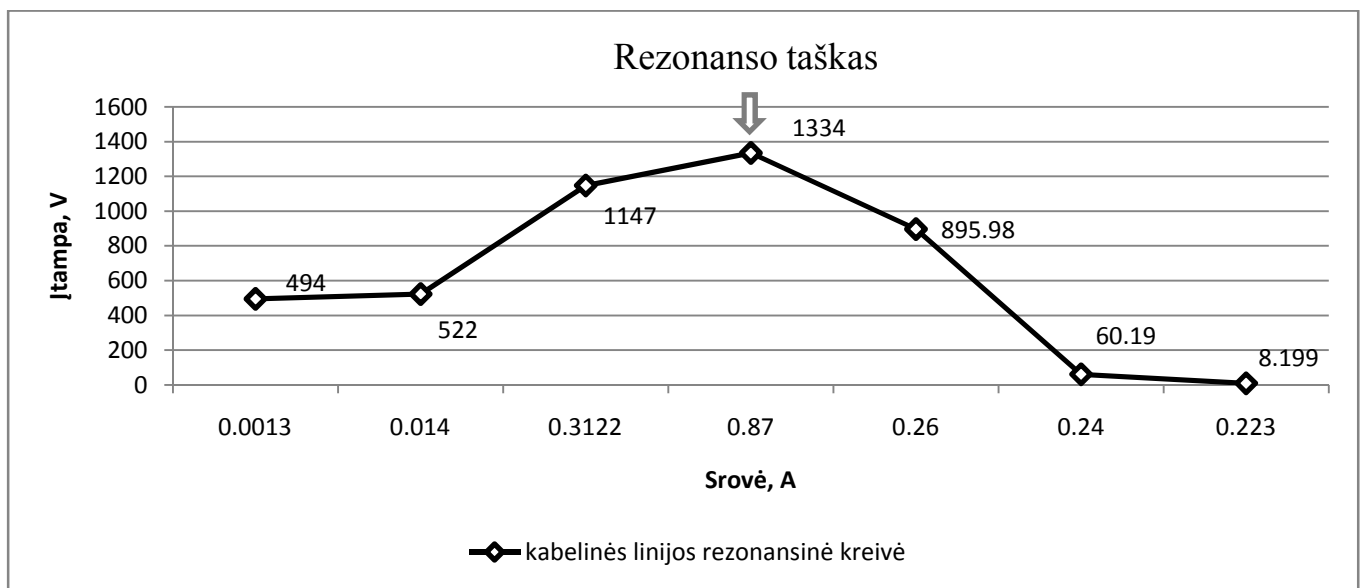
Kabelinėje linijoje su vienfaziu įžemėjimu įtampa ir srovės taip pat išauga, tačiau ne tiek daug kaip oro linijoje. Didėjant įžemėjimo varžai įtampa kompensacinėje ritėje krenta. Srovė kinta proporcingai.

Toliau darbe atstatau modelį į normalųjį režimą ir modeliuoju 32 km kabelinę liniją su normalaus režimo tinklo rezonansine kreive.

18 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 32 km kabelinėje linijoje

Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	494	0,0013
$1e^3$	522	0,014
$1e^4$	1147	0,3122
$1,5e^4$	1334	0,87
$1e^5$	895,98	0,26
$1,5e^5$	60,13	0,24
$1e^6$	8,199	0,223

Pateikiu 36 paveiksle rezonansinės kreivės grafiką 32 km kabelinėje linijoje.



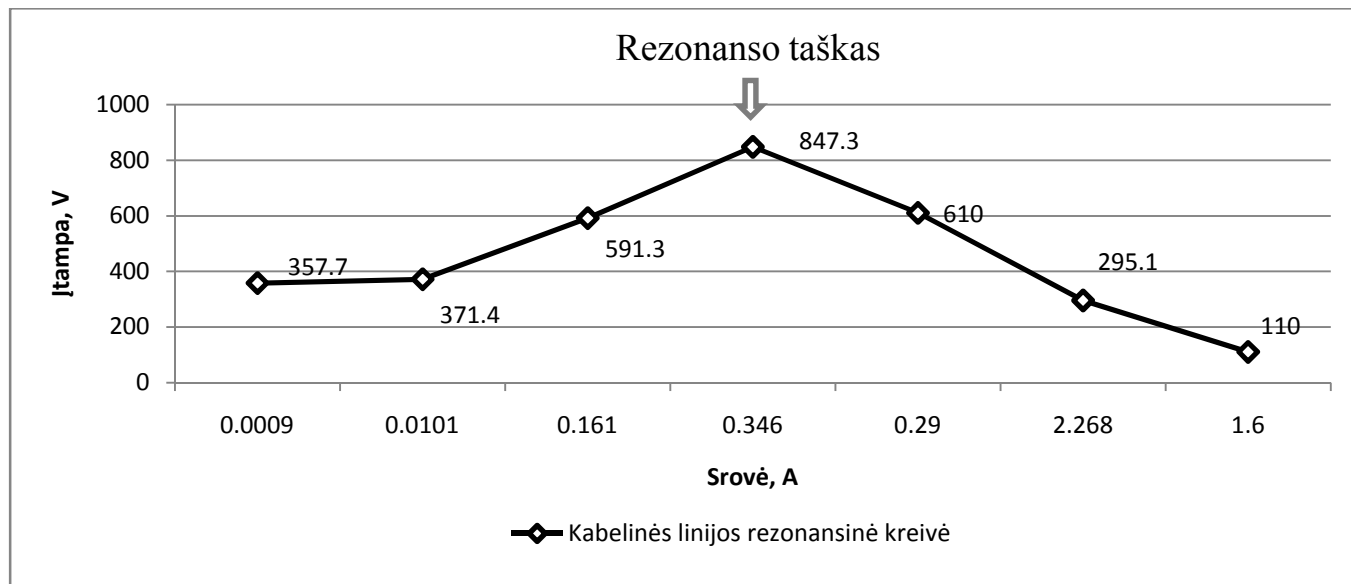
Pav. 36 Normalaus darbo režimo 32 km kabelinės linijos rezonansinė kreivė

Taip pat pateikiu 50 km kabelinės linijos rezonansinės kreivės duomenų 19 lentelę ir 37 paveikslėlyje pavaizduotą rezonansinę kreivę.

19 lentelė. Rezonanso kreivės duomenys 50 km kabelinėje linijoje

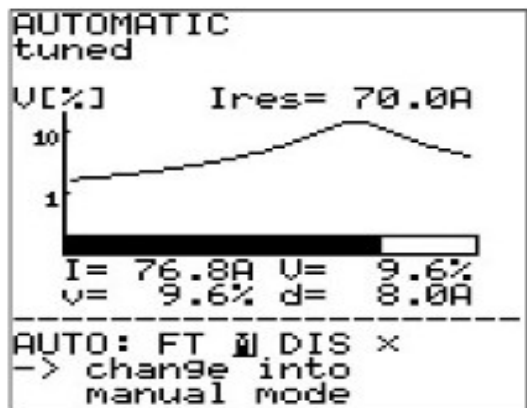
Induktyvumas ritėje QL (VAr)	Įtampa (V)	Srovė (A)
$1e^2$	357,7	0,0009
$1e^3$	731,4	0,0101
$1e^4$	591,3	0,161
$1,5e^4$	847,3	0,346
$1e^5$	610	0,29
$1,5e^5$	295,1	2,268
$1e^6$	110	1,6

Pateikiu 50 km normalaus režimo kabelinės linijos rezonansinę kreivę, kuri pavaizduota 37 paveiksle.



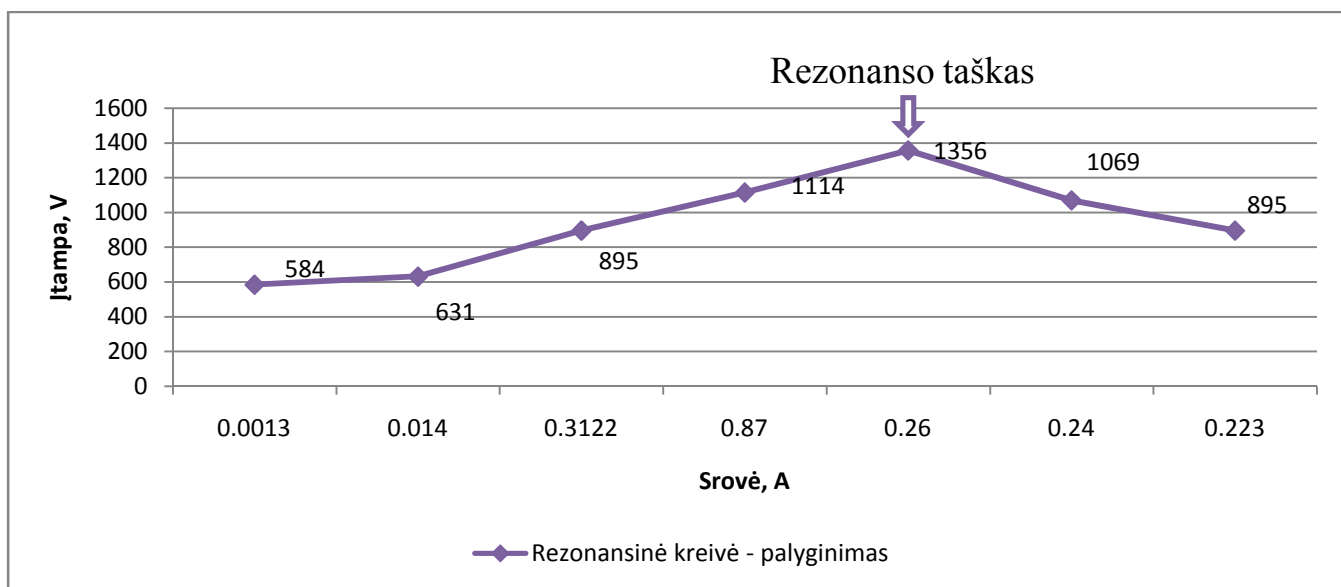
Pav. 37 Normalaus darbo režimo 50 km kabelinės linijos rezonansinė kreivė

Modeliavau su realiai egzistuojančiu Tauragės 10 kV skirstomuoju tinklu ir gautus rezultatus sulyginau su kompensacinės ritės Tauragės pastotės Valdiklio EFC-20 rezonansine kreive. Pateikiu rezonansinės kreivės duomenis iš valdiklio, 38 paveikslėlis.



Pav. 38 Rezonansinė kreivė valdiklyje EFC-20

Gauti rezultatai parodė, kad mano modeliavimo kreivės slopinimas  $d = 8,6$  A, o valdiklis Trenc-20 parodė slopinimą  $d = 8,0$  A. Rezonansinės kreivės duomenys lyginant su užfiksuotais duomenis skiriasi 7,5 procentais. Pateikiu rezonansinę kreivę iš modelio, 39 paveikslas.



**Pav. 39** Rezonansinė kreivė lyginant su užfiksuotais duomenimis

Rezultatas skiriasi, nes skaičiavimus atlikau apytiksliais skaičiavimais, remiantis katalogais bei orientaciniais linijų ilgiais.

## IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Sudarytas skirstomojo tinklo matematinis modelis su kompensacine rite. Modelio pagalba galima modeliuoti izoliuotos neutralės tinklo darbą esant skirtingoms apkrovoms, įžemėjimams bei esant įtampų nebalansui. Taip pat galima sudaryti elektros tinklo rezonansinę kreivę. Nustatyti rezonansinį tašką kompensacinėje ritėje įvedant tinklo parametrus. Modelis veikia, modeliuojant galima prijungti ir daugiau linijų bei įvesti kitus tinklo elementus.
2. Išnagrinėtas skirstomasis oro linijų elektros tinklas su skirtinga apkrova. Esant didesnei tinklo apkrovai rezonansiniame kompensavimo režime yra mažesnės įžemėjimo atsiradimo galimybės. Modeliuojant avarinį režimą prie skirtingų įžemėjimo varžų, 5-10-1000  $\Omega$ , išaiškėjo, kad kuo didesnė varža įžemėjimo vietoje, tuo rezonansiniame taške įtampa mažesnė. Tuo pačiu mažesnė galimybė atsirasti viršįtampiui bei elektros lanko užsidegimui įžemėjimo vietoje. Didinant oro linijų ilgį skirstomajame tinkle, pastebėta, jog rezonansinė kreivė yra smailesnė, rezonansinis taškas įtampos ir srovės atžvilgiu yra aukščiau, todėl oro linijų tinklams su kompensacine rite yra netikslinga dirbti rezonansiniame režime, rekomenduotina laikyti nesukompensuotą arba perkompensuotą režimą.
3. Nagrinėjant kabelinį linijų tinklą su skirtinga apkrova, pastebėta, jog rezonansiniame taške įtampa yra ženkliai mažesnė negu oro linijoje, todėl kabelinėje linijoje atsirasti viršįtampiui ar užsidegti lankui įžemėjimo vietoje yra dar sunkesnės galimybės. Modeliuojant avarinį režimą kabelinėje linijoje prie tokių pat įžemėjimo varžų, paaiškėjo, jog rezonansinis taškas yra žemesnėje padėtyje lyginant su oro linijomis. Todėl atsirasti viršįtampui ar užsidegti lankui įžemėjimo vietoje yra dar mažesnės galimybės. Tačiau šias sąlygas gali palengvinti izoliacijos senėjimas arba išoriniai veiksniai. Toks pat reiškinys, kreivė nedidelė, pastebėtas ir su kabelinės linijos ilgiu. Lyginant su oro linija, kabelinės linijos rezonansiniame taške gali sėkmingai dirbti.
4. Palyginus modelį su realiai egzistuojančiu elektros tinklu, gauti rezultatai parodė, jog modeliuojamo modelio rezonansinės kreivės slopinimas  $d= 8,6$  A, o realaus tinklo valdiklis parodė rezonansinės kreivės slopinimą  $d= 8,0$  A. Rezonansinės kreivės duomenys lyginant su užfiksuotais duomenimis skiriasi 7,5 procentais. Rezultatų netikslumą lėmė skaičiavimų atlikimas apytiksliais duomenimis, remiantis katalogais ir parinktais orientaciniais linijų ilgiais.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. J.Baublys, P.Jankauskas, L.A.Markevičius, A.Morkvėnas. Izoliacija ir viršįtampiai, Vadovėlis, 2008. KTU. 337p.
2. Lanko gesinimo ritės kontroleris REG-DPA, Operating Manual, REGSys, A-eberle, 2007.p. 10-36.
3. Galios sistemos su rezonansiniu įžemėjimu[interaktyvus],[žiūrėta 2014-06-06]  
Prieiga per internetą: <http://www.globalspec.com/reference/26011/203279/5-5-power-system-with-resonance-earthing-petersen-coil>
4. Rezonansinis įžemėjimas ir įžemėjimo nustatymas [žiūrėta 2014-06-06]  
Prieiga per internetą: <http://www.hvpower.co.nz/Products/ResonantEarthing.html>
5. Peterseno ričių reguliavimas [žiūrėta 2014-06-18]  
Prieiga per internetą: <http://www.a-eberle.de/en/resonanzregler-erdschlussortung-530/komponenten/reg-dpa.html>
6. Kompensacinės ritės - Darbo principas ir aprašymas [žiūrėta 2014-06-11]  
Prieiga per internetą:  
<http://www.hvpower.co.nz/TechnicalLibrary/RE+DS/Petersen%20Coils%20%20Basic%20Principle%20and%20Application.pdf>
7. Kompensacinės ritės aprašymas [žiūrėta 2014-06-10] Prieiga per internetą:  
<http://www.electrotechnik.net/2009/02/petersen-coils-principle-and.html>
8. Lanko slopinimo ritės [žiūrėta 2014-06-10]  
Prieiga per internetą: [http://www.maviko.fi/files/kuristimen\\_esite.pdf](http://www.maviko.fi/files/kuristimen_esite.pdf)
9. Lanko gesinimo ritės [žiūrėta 2014-06-15] Prieiga per internetą:  
[http://www.destin.se/site/upload/Destin\\_EGE\\_Arc\\_suppression\\_coil\\_Aj.pdf](http://www.destin.se/site/upload/Destin_EGE_Arc_suppression_coil_Aj.pdf)
10. International Journal of Computer and Electrical Engineering. Vol.5, No.3, June 2013
11. Kompensacinė ritė [žiūrėta 2015-02-12] Prieiga per internetą:  
[http://www.swewe.net/word\\_show.htm/?321940\\_1&Petersen\\_coil](http://www.swewe.net/word_show.htm/?321940_1&Petersen_coil)
12. Elektros įrenginių rėlinės apsaugos ir automatikos įrengimo taisyklės [žiūrėta 2015-02-20]  
Prieiga per internetą: [www.elektrosauga.lt/Elektrosaugos-laboratorija/Publikacijos-ir-norminiai-aktai/Elektros-irenginiu-relines-apsaugos-ir-automatikos-irengimo-taisykles](http://www.elektrosauga.lt/Elektrosaugos-laboratorija/Publikacijos-ir-norminiai-aktai/Elektros-irenginiu-relines-apsaugos-ir-automatikos-irengimo-taisykles)
13. Kompensacinių ričių kontrolės ypatumai [žiūrėta 2015-02-28]  
Prieiga per internetą: [www.linknovate.com/search/?q=peterperson%20coil](http://www.linknovate.com/search/?q=peterperson%20coil)

14. Rezonanso reiškiny's elektros tinkle [žiūrėta 2015-03-20] Prieiga per internetą:  
<http://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/series-resonance.html>
15. Įžemėjimo apsaugos sistemos [žiūrėta 2015-04-06] Prieiga per internetą:  
<http://www.trenchgroup.com/en/Products-Solutions/Coil-Products/Earth-Fault-Protection-System/Arc-Suppression-Coils>
16. Oro ir kabelinių linijų katalogas "AS Draka" Prieiga per internetą:  
[http://www.drakakeila.ee/toot/Draka\\_Catalogue\\_LIT.pdf](http://www.drakakeila.ee/toot/Draka_Catalogue_LIT.pdf)