



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

110 kV kabelių izoliacijos vertinimas taikant kompleksinius diagnostikos metodus, atliekant jų lyginamąją analizę

Baigiamasis magistro projektas

Laimonas Ignas Vaičiūnas

Projekto autorius

Vyresn. lekt. Kęstutis Jasiūnas

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

110 kV kabelių izoliacijos vertinimas taikant kompleksinius diagnostikos metodus, atliekant jų lyginamąją analizę

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Laimonas Ignas Vaičiūnas

Projekto autorius

Vyresn. lekt. Kęstutis Jasiūnas

Vadovas

Asist. Konstantinas Otas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Laimonas Ignas Vaičiūnas

110 kV kabelių izoliacijos vertinimas taikant kompleksinius diagnostikos metodus, atliekant jų lyginamąją analizę

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Laimonas Ignas Vaičiūnas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Vaičiūnas, Laimonas, Ignas. 110 kV kabelių izoliacijos vertinimas taikant kompleksinius diagnostikos metodus, atliekant jų lyginamąją analizę. Magistro baigiamasis projektas / vadovas vyresn. lekt. dr. Kęstutis Jasiūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: 110 kV kabeliai, XLPE izoliacija, dažninė dielektrinė spektroskopija, dielektrinių nuostolių koeficientas, dielektrinis atsakas, izoliacijos degradacija.

Kaunas, 2026. 64 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe nagrinėjamas 110 kV XLPE kabelių izoliacijos būklės vertinimas, taikant kompleksinius diagnostikos metodus. Aukštos įtampos kabelių linijos yra svarbi elektros energijos perdavimo infrastruktūros dalis. Jų izoliacijos defektai gali sukelti ilgalaikius tiekimo sutrikimus ir didelius eksploatacinius nuostolius. Dažniausiai taikomi tradiciniai bandymo metodai leidžia nustatyti akivaizdžius arba jau išsivysčiusius pažeidimus, tačiau ankstyvieji izoliacijos degradacijos požymiai ne visada būna aiškiai matomi. Dėl šios priežasties darbe daugiausia dėmesio skiriama dažninės dielektrinės spektroskopijos (FDS) metodo taikymo galimybėms, kai siekiama įvertinti XLPE izoliacijos dielektrinių savybių pokyčius dar iki aiškaus dalinių iškrovų pasireiškimo.

Darbo objektas – 110 kV XLPE kabelių izoliacijos dielektrinio atsako parametrų kitimas ir jų taikymas ankstyvajai izoliacijos būklės diagnostikai. Darbo tikslas – įvertinti FDS metodo taikymo galimybes 110 kV XLPE kabelių izoliacijos ankstyvosios degradacijos požymiams nustatyti. Tikslui pasiekti atlikta mokslinės literatūros ir normatyvinių dokumentų analizė, apibūdinti ir palyginti pagrindiniai kabelių izoliacijos diagnostikos metodai, išnagrinėtas dielektrinio atsako metodų teorinis pagrindas. Taip pat, parinkta laboratoriniams bandymams tinkama diagnostinė įranga ir atlikti eksperimentiniai XLPE kabelio izoliacijos tyrimai.

Eksperimentinėje darbo dalyje tirti XLPE izoliacijos kabelių mėginiai. Jiems taikyti trys poveikio scenarijai: drėgmės poveikis, aukštos įtampos ir apkrovos srovės sukeltas elektrinis stresas bei terminis ciklavimas. Prieš bandymą ir po jo atlikti dielektrinio atsako matavimai OMICRON DIRANA įranga. Tyrimo metu analizuotos dielektrinių nuostolių koeficiento $\tan \delta$, galios koeficiento, aktyviosios talpos dedamosios C' ir nuostolinės talpos dedamosios C'' dažninės priklausomybės. Papildomai naudotas OMICRON FRANEKO kontrolinis matavimas. Jis skirtas įvertinti, ar po taikytų poveikių neatsirado konstrukcinių arba prijungimo grandinės pokyčių, galinčių iškraipyti FDS/PDC rezultatų interpretaciją.

Gauti rezultatai parodė, kad skirtingi poveikiai XLPE izoliacijai pasireiškia nevienodai. Drėgmės poveikio bandyme nustatytas ryškus $\tan \delta$, galios koeficiento ir C'' padidėjimas žemų dažnių srityje. Elektrinio streso bandymo metu, po 100 kV kintamosios įtampos poveikio taip pat nustatytas dielektrinių nuostolių padidėjimas žemų dažnių srityje. Po apkrovos srovės poveikio dalis parametrų sumažėjo arba tapo labiau išsklaidyti. Terminio streso bandymas parodė, kad pakartotiniai temperatūros ciklai daugiausia veikia žemų ir vidutinių dažnių dielektrinių nuostolių parametrus.

Visais atvejais aktyvioji talpos dedamoji C' išliko beveik stabili. Todėl pagrindiniai pokyčiai siejami ne su kabelio geometrijos ar konstrukcijos pasikeitimu, o su izoliacijos dielektrinių savybių kaita.

Tyrimo rezultatai patvirtino, kad FDS metodas, papildytas PDC ir FRANEO kontroliniais matavimais, gali būti taikomas kaip kompleksinis 110 kV XLPE kabelių izoliacijos ankstyvosios būklės vertinimo metodas. Šis metodų derinys leidžia nustatyti izoliacijos dielektrinių savybių pokyčius, palyginti skirtingų poveikių sukeltus atsako požymius. Taip pat, pagrįsti profilaktinės diagnostikos sprendimus dar iki aiškaus konstrukcinio gedimo arba dalinių iškrovų pasireiškimo.

Vaičiūnas, Laimonas, Ignas. Insulation Assessment of 110 kV Cables Using Integrated Diagnostic Methods and Comparative Analysis. Master's Final Degree Project / supervisor sr. lect. dr. Kęstutis Jasiūnas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electrical Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: 110 kV cables, XLPE insulation, frequency domain spectroscopy, dielectric loss factor, dielectric response, insulation degradation.

Kaunas, 2026. 64 p.

Summary

This Master's Final Degree Project analyses the condition assessment of 110 kV XLPE cable insulation using complex diagnostic methods. The relevance of the project is determined by the fact that high-voltage cable lines are an important part of the electricity transmission infrastructure, while insulation defects may lead to long-term supply interruptions and significant operational losses. In practice, conventional testing methods are often suitable for detecting evident or already developed defects; however, early signs of insulation degradation are not always clearly identified. For this reason, the project mainly focuses on the applicability of the frequency domain spectroscopy (FDS) method for evaluating changes in the dielectric properties of XLPE insulation before clear partial discharge activity appears.

The object of the project is the variation of dielectric response parameters of 110 kV XLPE cable insulation and their application in early insulation condition diagnostics. The aim of the project is to evaluate the applicability of the FDS method for detecting early degradation signs in 110 kV XLPE cable insulation. To achieve this aim, scientific literature and normative documents were analyzed, the main cable insulation diagnostic methods were described and compared, the theoretical basis of dielectric response methods was examined, suitable diagnostic equipment for laboratory testing was selected, and experimental investigations of XLPE cable insulation were carried out.

In the experimental part of the project, XLPE-insulated cable samples were investigated. Three exposure scenarios were applied: moisture exposure, electrical stress caused by high voltage and load current, and thermal cycling. Dielectric response measurements were performed before and after each exposure using OMICRON DIRANA equipment. During the study, the frequency dependencies of the dielectric loss factor $\text{tg } \delta$, power factor, active capacitance component C' and loss capacitance component C'' were analyzed. In addition, an OMICRON FRANEO control measurement was used to assess whether the applied stresses caused structural or connection circuit changes that could affect the interpretation of FDS/PDC results.

The results obtained showed that different types of stress affect XLPE insulation in different ways. In the moisture exposure test, a significant increase in $\text{tg } \delta$, power factor and C'' was identified in the low-frequency range. During the electrical stress test, after the application of 100 kV AC voltage, an increase in dielectric losses was also observed in the low-frequency range, while after the load current exposure some parameters decreased or became more scattered. The thermal stress test showed that repeated temperature cycles mainly affect dielectric loss parameters in the low- and medium-frequency ranges. In all cases, the active capacitance component C' remained relatively stable;

therefore, the main changes were associated not with changes in cable geometry or structure, but with variations in the dielectric properties of the insulation.

The results of the study confirmed that the FDS method, supplemented by PDC and FRNEO control measurements, can be applied as a complex method for early condition assessment of 110 kV XLPE cable insulation. This combination of methods enables changes in the dielectric properties of insulation to be detected, allows the response characteristics caused by different types of stress to be compared, and supports preventive diagnostic decisions before clear structural failure or partial discharge activity occurs.

Terminų ir santrumpų sąrašas

Santrumpos

1. ANN (*angl. Artificial Neural Networks*) – dirbtiniai neuroniniai tinklai, naudojami DI sprendimuose.
2. BAUR Protrac – universalus kabelių pažeidimo vietos nustatymo prietaisas, taikantis akustinį, magnetinį ir žingsnio įtampos metodus.
3. C – elektrinė talpa, matuojama faradais (F). Plačiai naudojama elektros sistemų analizėje, įskaitant kabelių, transformatorių ir kitų komponentų izoliacijos diagnostiką dielektrinių bandymų metu.
4. CMMS (*angl. Computerized Maintenance Management System*) – kompiuterizuota priežiūros valdymo sistema.
5. CNN (*angl. Convolutional Neural Networks*) – konvoliuciniai neuroniniai tinklai, naudojami DI sprendimuose.
6. DC (*angl. Direct Current*) – nuolatinė srovė; DC bandymas – izoliacijos testas nuolatinė įtampa.
7. DI – dirbtinis intelektas arba kompiuterinių sistemų gebėjimas atlikti veiksmus, kuriems įprastai reikalingas žmogaus intelektas. Tai gali būti mokymasis, sprendimų priėmimas ar defektų atpažinimas diagnostikoje.
8. DIRANA Analyzer – DIRANA matavimų analizės programinė įranga.
9. EPR (*angl. Ethylene Propylene Rubber*) – etileno-propileno kaučiukas arba sintetinė izoliacinė medžiaga. Naudojama elektros kabeliuose dėl savo elastingumo, šiluminio atsparumo ir dielektrinių savybių. Naudojama kaip alternatyva XLPE, ypač judriose ar termiškai apkrautose aplinkose.
10. FDS (*angl. Frequency Domain Spectroscopy*) – dažnio atsako spektroskopija, vienas iš dielektrinio atsako metodų.
11. FFT (*angl. Fast Fourier Transform*) – greita Furjė transformacija.
12. Fluke ii915 – akustinis atvaizdavimo prietaisas, skirtas aptikti ir vizualizuoti viršgarsinius triukšmus. Gali aptikti dalinius išlydžius ar slėgio nuotėkius, pateikiant garsinį šilumos žemėlapių realiu laiku.
13. HFCT (*angl. High Frequency Current Transformer*) – aukšto dažnio srovės transformatorius.
14. IEC 60270 – tarptautinis standartas PD matavimui.
15. IEC 60502-2 – tarptautinis standartas kabelių konstrukcijai.
16. IEEE Std 400-2012 – IEEE standartas ekraninių kabelių diagnostiniams bandymams.

17. KNN (*angl. k-Nearest Neighbors*) – K artimiausių kaimynų metodas, naudojamas DI sprendimuose.
18. LST EN 60270 – Lietuvos standartas PD matavimui.
19. Machine learning (ML) – mašininis mokymasis.
20. Megger Digiphone2 – kabelių gedimų akustinė lokalizavimo sistema.
21. MPD 600 – OMICRON dalinių išlydžių/išlydžių matavimo sistema.
22. Offline PD – dalinių išlydžių/išlydžių matavimas, atjungus kabelį nuo tinklo.
23. Online PD – dalinių išlydžių/išlydžių matavimas, kabeliui esant prijungtam prie tinklo.
24. OPGW (*angl. Optical Ground Wire*) – optinis žaibosaugos trosas/kabelis.
25. OTDR (*angl. Optical Time Domain Reflectometry*) – optinis reflektometrijos metodas.
26. OWTS (*angl. Oscillating Wave Test System*) – svyruojančių bangų bandymo sistema, naudojama PD sistemose.
27. PDC (*angl. Polarization and Depolarization Current*) – poliarizacijos ir depoliarizacijos srovės metodas, vienas iš dielektrinio atsako metodų.
28. PD (*angl. Partial Discharge*) – dalinis išlydis.
29. PI (*angl. Polarization Index*) – poliarizacijos indeksas. Tai diagnostinis rodiklis, apskaičiuojamas kaip santykis tarp izoliacijos varžos matavimų, 10 min trukmės ir 1 min trukmės. Naudojamas įvertinti izoliacijos būklę transformatoriuose ir kabeliuose. Kuo didesnė reikšmė, tuo geresnė izoliacijos būklė.
30. PILC (*angl. Paper Insulated Lead Covered*) – kabelių izoliacijos tipas. Tokia izoliacija sudaryta iš impregnuoto popieriaus, o išorinis apvalkalas – iš švino. Naudojama aukštos įtampos tinkluose, tačiau jautri drėgmei, terminei deformacijai ir mechaniniams pažeidimams.
31. PRPD (*angl. Phase Resolved Partial Discharge*) – fazinė dalinių išlydžių analizė, kai PD impulsai registruojami priklausomai nuo tinklo įtampos fazės (0–360°). Ši analizė leidžia atskirti skirtingų tipų defektus pagal impulsų pasiskirstymo modelius.
32. Random Forest – atsitiktinių miškų algoritmas, naudojamas DI sprendimuose.
33. RVM (*angl. Return Voltage Method*) – grąžinamosios įtampos metodas, vienas iš dielektrinio atsako metodų.
34. SCADA (*angl. Supervisory Control And Data Acquisition*) – valdymo ir duomenų surinkimo sistema.
35. SebaKMT Compact – mobili kabelių diagnostikos laboratorija.
36. Surge metodas – vienas iš impulsinių metodų kabelio pažeidimo vietai nustatyti.

37. TDR (*angl. Time Domain Reflectometry*) – impulsinis metodas kabelio pažeidimo vietai nustatyti.
38. $\tan \delta$ – dielektrinių nuostolių tangentas.
39. VLF (*angl. Very Low Frequency*) – labai žemas dažnis.
40. WT (*angl. Wavelet Transform*) – bangelių transformacija.
41. XLPE (*angl. Cross-Linked Polyethylene*) – kryžminio polietileno izoliacija. Vienas iš izoliacijos tipų, naudojamas elektros kabeliams.

Terminai

1. Big Data Analytics – didžiųjų duomenų analizė, naudojama automatizuotai PD ir kitų duomenų interpretacijai.
2. Vandens medžiai (*angl. Water Trees*) – mikrokanalai, susidarę XLPE izoliacijoje dėl drėgmės ir elektrinio lauko poveikio.
3. Dielektrinis atsakas – kabelių izoliacijos savybių pokytis, veikiant elektriniam laukui. Vertinamas per FDS, PDC, RVM.
4. Reflektograma – TDR arba OTDR metodo fiksuota signalo atspindžių diagrama.
5. $\tan \delta$ – santykis tarp reaktyviosios ir aktyviosios srovės komponentės izoliacijoje.
6. Bangelių transformacija (WT) – signalų analizės metodas, leidžiantis atskirti PD impulsus nuo triukšmo.
7. Furjė filtrai (FF) – dažnio srities pagrindu veikiantys filtrai, naudojami triukšmo šalinimui iš PD signalų.
8. DIRANA – OMICRON įranga, vykdanči PDC, FDS matavimus.
9. DIRANA Analyzer – specializuota OMICRON DIRANA analizės programinė įranga.
10. PD impulsas – staigus srovės šuolis, atsirandantis dėl lokalios izoliacijos degradacijos.

Turinys

Lentelių sąrašas	13
Paveikslų sąrašas	14
Įvadas.....	15
1. Elektros sistemų sudedamųjų dalių ir aparatinės bei programinės įrangos diagnostikos analizė	17
1.1. 110 kV XLPE kabelių sandaros ypatumai.....	17
1.2. Aparatinė įranga diagnostikai.....	18
1.3. Programinė įranga ir duomenų analizė.....	20
1.4. Normatyvinė bazė ir standartai.....	21
1.4.1. Tarptautiniai standartai.....	21
1.4.2. Lietuvos nacionaliniai standartai.....	21
1.5. Signalų apdorojimas – transformacijų palyginimas	22
1.5.1. Furjė transformacija (FFT).....	22
1.5.2. Bangelių transformacija (WT).....	22
1.5.3 Transformacijų metodų palyginimas.....	23
2. Pagrindinės 110 kV kabelių izoliacijos grupės ir dažniausi pažeidimo tipai.....	24
2.1. XLPE izoliacija ir jos privalumai	24
2.2. Kiti izoliacijos tipai	24
2.3. Dažniausi pažeidimų šaltiniai.....	25
3. Taikomi kompleksiniai diagnostikos metodai.....	26
3.1. Dalinių išlydžių (PD) matavimai.....	26
3.2. Reflektometrija (TDR, OTDR)	27
3.3. Izoliacijos dielektrinių parametrų matavimai.....	27
3.3.1. Dielektrinio atsako metodo teorinis pagrindas	28
3.3.2. Dažninė dielektrinė spektroskopija	30
3.3.3. Poliarizacijos ir depoliarizacijos srovių metodas	30
3.3.4. Grįžtamosios įtampos metodas.....	31
3.4. Akustiniai ir ultragarsiniai metodai	31
3.5. Termoviziniai tyrimai.....	32
4. Integruotos monitoringo sistemos ir didžiųjų duomenų (angl. <i>Big Data</i>) analizė.....	33
4.1. Mašininio mokymosi integracija	33
4.2. Neuroninių tinklų taikymo galimybės kabelių diagnostikoje.....	33
4.3. Konvoliucinių neuroninių tinklų (CNN) taikymas dalinių išlydžių (PD) diagnostikoje.....	33
4.4. Mašininio mokymosi (ML) metodai kompleksinėje kabelių diagnostikoje.....	34
4.5. PD ir DIRANA duomenų perdavimas dirbtinio intelekto analizei – praktinis integracijos pasiūlymas	34
5. Lyginamoji kompleksinių metodų analizė	36
5.1. Dalinių išlydžių metodų privalumai ir trūkumai	36
5.2. Reflektometrijos metodų privalumai ir trūkumai	36
5.3. FDS, C ir tgδ matavimų diagnostinė reikšmė.....	36
5.4. Akustiniai ir termoviziniai metodai.....	37
5.5. Ekonominė ir eksploatacinė nauda	38
6. Ekspermentinė dalis	39
6.1. Tyrimo metodika ir eksperimentinis planas	39
6.1.1. Eksperimentinio tyrimo logika ir pasirinkti senėjimo veiksniai.....	39

6.1.2.	Pasirinkti diagnostikos metodai ir jų derinimo principas	40
6.1.3.	Eksperimentinis planas ir matavimų seka	40
6.1.4.	Metodikos ribojimai ir patikimumo užtikrinimas.....	41
6.2.	Tiriamieji objektai, mėginių paruošimas ir žymėjimas	41
6.2.1.	Tiriamieji objektai ir parinkimo motyvai	41
6.2.2.	Mėginių grupavimas ir žymėjimo logika	42
6.2.3.	Mėginių paruošimas prieš bandymus	43
6.3.	Naudota įranga, matavimo konfigūracija ir duomenų registravimas	43
6.3.1.	Naudota įranga ir jos paskirtis	43
6.3.2.	Matavimo grandinė, prijungimas ir ekranavimo principai	45
6.3.3.	Dielektrinio atsako (FDS/PDC) matavimo procedūra.....	46
6.3.4.	Dažninės reakcijos analizė (FRANEO) kaip kontrolinis metodas	47
6.4.	Drėgmės poveikio XLPE izoliacijai tyrimas	48
6.4.1.	Bandymo tikslas ir hipotezė	48
6.4.2.	Bandymo objektas ir poveikio scenarijus.....	48
6.4.3.	Matavimų seka ir palyginimo principas	48
6.4.4.	Bandymo rezultatų pateikimas ir analizė	48
6.4.5.	FRANEO kontrolinis matavimas	50
6.4.6.	Drėgmės poveikio rezultatų apibendrinimas	50
6.5.	Aukštos įtampos ir srovės (elektrinio streso) poveikio XLPE izoliacijai tyrimas.....	52
6.5.1.	Bandymo tikslas	52
6.5.2.	Bandymo objektas ir poveikio scenarijus.....	52
6.5.3.	Matavimų seka ir palyginimo principas	53
6.5.4.	Bandymo rezultatų pateikimas ir analizė	54
6.5.5.	FRANEO kontrolinis matavimas	55
6.5.6.	Elektrinio streso bandymo rezultatų apibendrinimas	56
6.6.	Terminio streso poveikio XLPE izoliacijai tyrimas	58
6.6.1.	Bandymo tikslas	58
6.6.2.	Bandymo objektas ir poveikio scenarijus.....	58
6.6.3.	Matavimų seka ir palyginimo principas	59
6.6.4.	Bandymo rezultatų pateikimas ir analizė	59
6.6.5.	FRANEO kontrolinis matavimas	61
6.6.6.	Terminio streso bandymo rezultatų apibendrinimas	62
	Išvados	63
	Literatūros sąrašas	64

Lentelių sąrašas

1 lentelė. FFT ir WT metodų palyginimas.....	23
2 lentelė. Akustinių įrenginių palyginimas	38

Paveikslų sąrašas

1 pav. XLPE kabelio schematinis skerspjūvis.	17
2 pav. SEBA KMT "Compact" laboratorijos prijungimo schema	18
3 pav. Termovizoriai: a) FLIR T560 ir b) FLIR XT2	19
4 pav. Elektrinio medžio ir vandens medžio modelis: a) bendras elektrinio medžio ir vandens medžio modelis; b) elektrinio medžio ir vandens medžio mikrostruktūros modelis.[22].....	24
5 pav. PD bandymų platformos, pagrįstos HFCT, grandinės schema. [37].....	26
6 pav. Pavyzdinė izoliacijos būklės patikrinimo kombinuotoji laiko ir dažnio sričių spektroskopijos kreivė išmatuota prietaisu DIRANA, naudojant dielektrinio atsako metodą	29
7 pav. Pavyzdinė izoliacijos būklės patikrinimo kombinuotoji laiko ir dažnio sričių spektroskopijos kreivė išmatuota prietaisu DIRANA, naudojant dielektrinio atsako metodą.....	31
8 pav. Pavyzdinė DI modulio schema.....	35
9 pav. Dielektrinio atsako metodo vieta 110 kV XLPE kabelių diagnostikos struktūroje	37
10 pav. Tiriamųjų kabelių segmentų bendras vaizdas	42
11 pav. Omicron FRANEO 800 darbo režime.....	44
12 pav. Bendroji matavimo prijungimo schema dielektriniam atsakui (DIRANA) – laidininkas, ekranas, žemė, matavimo laidai, ekranuoti laidai.....	45
13 pav. FRANEO 800 prijungimo schema (FRA/SFRA principas) – matavimo taškai, referencinė schema, įžeminimas.....	46
14 pav. DIRANA matavimo nustatymai pagal režimą	46
15 pav. tipinė FRANEO dažninės charakteristikos kreivė.....	47
16 pav. Dielektrinių nuostolių koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz	49
17 pav. Galios koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz	49
18 pav. Kabelio talpos grafikas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz.....	49
19 pav. Perdavimo charakteristikos amplitudė, dB.....	50
20 pav. Fazės kampas, ° dažnio diapazone	50
21 pav. Aukštos įtampos senėjimo bandymas su prijungtu mėginiu 3A (bendras vaizdas).	52
22 pav. Srovės streso bandymas.	53
23 pav. Dielektrinių nuostolių koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz	54
24 pav. Galios koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz	54
25 pav. Kabelio talpos grafikas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz.....	55
26 pav. Perdavimo charakteristikos amplitudė, dB.....	55
27 pav. Fazės kampas, ° dažnio diapazone	56
28 pav. Terminio streso bandymo ataskaita.....	58
29 pav. Dielektrinių nuostolių koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz	60
30 pav. Galios koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz	60
31 pav. Kabelio talpos grafikas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz.....	61
32 pav. Perdavimo charakteristikos amplitudė, dB.....	61
33 pav. Fazės kampas, ° dažnio diapazone	62

Ivadas

Elektros energijos perdavimo ir skirstymo infrastruktūroje 110 kV įtampos lygio kabeliai turi didelę reikšmę. Jie aprūpina elektros energija miestus, pramonės bei infrastruktūrinius objektus. Pastaraisiais metais pastebima tendencija vis daugiau tiesti požeminius kabelius. Kabelių linijos apsaugomos nuo atmosferinių reiškinių, tiekimas elektra tampa patikimesnis. Vis dažniau naudojami XLPE izoliaciją turintys kabeliai, kurie pakeičia senesnius PILC tipo sprendinius.[1].

Nepaisant technologinės pažangos, šių kabelių eksploatacijos metu atsiranda izoliacijos senėjimo požymių. Atsiranda mikroįtrūkimų, vandens medžių (*angl. water trees*), pasireiškia dalinės išlydžiai (*angl. partial discharges, PD*) ir kiti reiškiniai. Tam, kad būtų išvengta netikėtų gedimų, būtina taikyti kompleksinius diagnostikos metodus, leidžiančius įvertinti izoliacijos būklę dar iki gedimo pasireiškimo [1,2,15,19,32].

Šiuo metu Lietuvoje galiojantys norminiai dokumentai, tokie kaip „Elektros įrenginių bandymų normos“ ir LITGRID „Perdavimo tinklo įrenginių bandymų reglamentas“ (2025 m.), nereguliuoja pažangių diagnostikos metodų taikymo 110 kV XLPE kabeliams. Šių teisės aktų ir reglamentų reikalavimai apsiriboja trumpalaikiu bandymu VLF, paauskštinta įtampa arba izoliacijos varžos matavimu megometru. Dielektrinio atsako matavimai, dalinių išlydžių analizė nėra privalomi. Kai kuriais atvejais – net nenumatyti kaip galimi. Tai sudaro prielaidą metodinei spragai, kuri stabdo pažangių sprendimų taikymą Lietuvos praktikoje. Tyrimas aktualus ir todėl, kad tarptautinėse normose (IEC 60270, IEEE 400.3) pažangūs metodai yra aktyviai naudojami kaip standartiniai būklės vertinimo sprendimai izoliacijos būklei tikrinti. Diagnostikos metu naudojama pažangi įranga, tokia kaip OMICRON DIRANA. Tokia įranga leidžia iš vieno matavimo ciklo gauti kelis dielektrinio atsako parametrus (FDS, PDC). Tai leidžia objektyviai vertinti izoliacijos būklę. [31,53,54].

Darbo tikslas

Įvertinti dažninės dielektrinės spektroskopijos (FDS) metodo taikymo galimybes 110 kV XLPE kabelių izoliacijos ankstyvosios degradacijos požymiams nustatyti, kai dalinių išlydžių požymiai dar nėra aiškiai pasireiškę.

Darbo objektas:

110 kV XLPE kabelių izoliacijos dielektrinio atsako parametrų kitimas ir jų taikymas ankstyvajai izoliacijos būklės diagnostikai.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinę literatūrą ir normatyvinę bazę, taikomą 110 kV XLPE kabelių izoliacijos diagnostikai;
2. apibūdinti ir palyginti pagrindinius 110 kV kabelių izoliacijos diagnostikos metodus: paauskštintos įtampos, VLF, PD, FDS, PDC, izoliacijos varžos ir termovizinius tyrimus;
3. papildyti dielektrinio atsako metodų teorinį pagrindimą, akcentuojant FDS metodo taikymą ankstyviesiems XLPE izoliacijos būklės pokyčiams nustatyti;

4. aprašyti tiriamo kabelio pradinės, arba bazinės izoliacijos būklės nustatymo principą, remiantis gamintojo techniniais duomenimis ir pradiniais matavimo rezultatais;
5. parinkti tyrimui tinkamą diagnostinę įrangą ir atlikti eksperimentinius laboratorinius XLPE kabelio izoliacijos bandymus;
6. atlikti gautų diagnostinių duomenų kiekybinę ir lyginamąją analizę, įvertinant FDS kreivių, talpos ir dielektrinių nuostolių pokyčius;

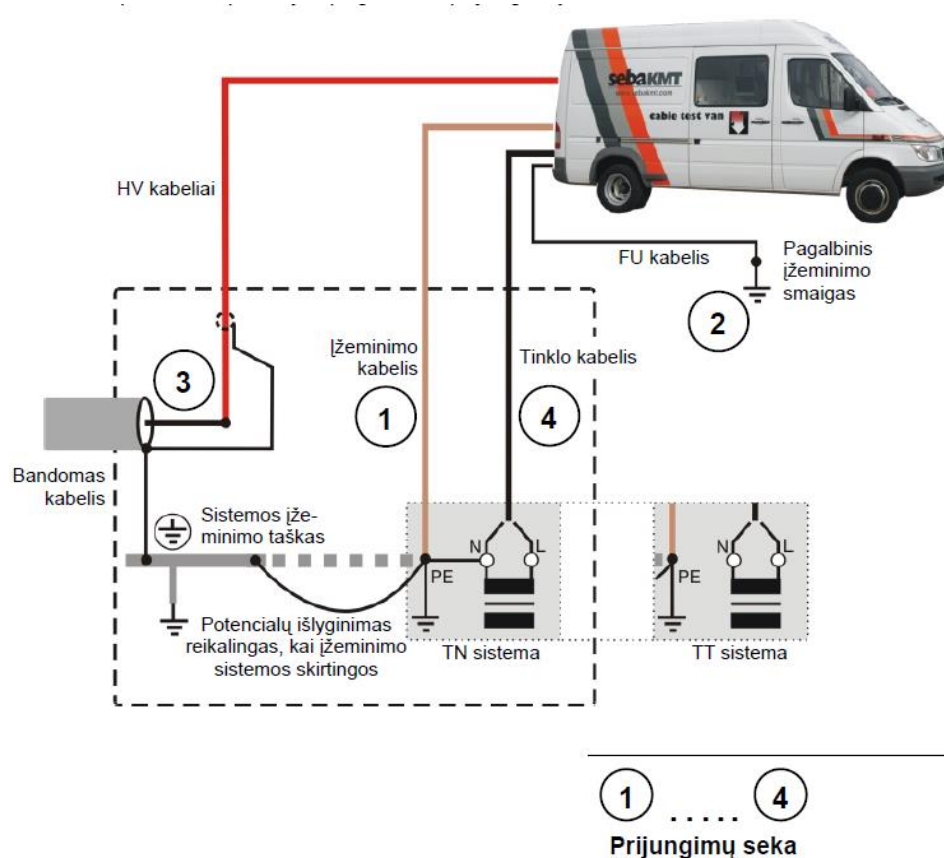
Tyrimo metodai

- mokslinės literatūros ir normatyvinių dokumentų analizė;
- gamintojo techninių duomenų analizė;
- eksperimentiniai dielektrinio atsako matavimai Omicron DIRANA įranga;
- FDS kreivių lyginamoji analizė;
- bazinių ir pakartotinių matavimo parametrų santykinio pokyčio vertinimas;
- diagnostikos metodų taikymo ribų ir informatyvumo palyginimas.

1.2. Aparatinė įranga diagnostikai

Kabelių diagnostikai ir pažeidimo vietai nustatyti naudojamos įvairios, didelės skiriamosios gebos matavimo sistemos.

- Dalinių išlydžių matavimų stendai su generuojamu kintamosios įtampos šaltiniu ir jautriais jutikliais. Pavyzdžiui, aukšto dažnio srovės transformatoriais (angl. HFCT – *High Frequency Current Transformer*).
- Reflektometrai – prietaisai, siunčiantys trumpus impulsus į kabelį. Šie prietaisai pagal atspindžius iš pažeidimų nustato jų vietą. TDR veikia elektriniu impulsu, OTDR – optiniu. Priklausomai nuo to, ar kabelis galios, ar optinis, parenkamas vienas iš šių metodų.



2 pav. SEBA KMT "Compact" laboratorijos prijungimo schema

- Megometrai dar kitaip vadinami izoliacijos varžos matuokliais. Jie tiekia nuolatinę bandymo įtampą, paprastai nuo kelių šimtų voltų iki 5 ar 10 kV. Taip matuoja laidininko bei izoliacijos kombinacijos varžą megaomais, gigaomais, teraomais. Jais tikrinama, ar nėra stambių pramušimo kanalų, koks bendras izoliacijos atsparumas drėgmei ar kitiems veiksniais. Gauti rezultatai leidžia spręsti apie kabelio būklę ir tinkamumą tolesnei eksploatacijai.
- VLF generatoriai generuoja labai žemo dažnio 0,1 Hz, įtampą. Tokia įtampa padeda patikrinti kabelių izoliaciją. Elektrinės talpos nuostoliai trukdo aukšto dažnio testus, o štai bandymai žema įtampa tuos nuostolius mažina. VLF dažnis suteikia galimybę saugiai ir tiksliai nustatyti

izoliacijos defektus ilguose, aukštos įtampos kabeliuose. Šis metodas yra ne toks žalingas izoliacijai ir plačiai taikomas elektros tinklų priežiūroje [7,14,22].

- Ultragarsiniai/akustiniai jutikliai – aptinka vibroakustinius signalus. Juos sukelia izoliuotoje erdvėje vykstantys daliniai išlydžiai.
- Termovizoriai – infraraudonųjų spindulių kameros. Jos skirtos nustatyti netolygius kabelio temperatūros pokyčius. Paprastai temperatūra pakinta dėl padidėjusio nuotėkio arba kontaktinių problemų [8].



(a)



(b)

3 pav. Termovizoriai: a) FLIR T560 ir b) FLIR XT2

1.3. Programinė įranga ir duomenų analizė

Šiuolaikinės dalinių išlydžių matavimo sistemos veikia naudojamos modernią programinę įrangą. Ji renka duomenis, juos analizuoja bei rezultatus vizualiai atvaizduoja. Dažniausiai šios sistemos būna aprūpintos didelės galios procesoriais arba prijungtos galingais nešiojamaisiais kompiuteriais. Šie kompiuteriai filtruoja signalus bei šalina elektromagnetinį triukšmą. Plačiai taikomi tiek klasikiniai Fourier filtrai, tiek ir bangelių transformacijos (angl. *wavelet transform*) ar adaptaciniai algoritmai. Tokia signalų apdorojimo technologija leidžia PD sistemos vartotojams matyti tikslesnę defekto vietą ir įvertinti išlydžio intensyvumą. Vienas iš esminių analizės įrankių yra įvairiapusė *Phase Resolved Partial Discharge* (PRPD) diagrama. Joje matyti, kaip išlydžio impulsai kinta per vieną sinusoidės periodą (0–360°). Tai suteikia svarbios informacijos apie defekto pobūdį. Pavyzdžiui, tam tikri PD impulsų pasiskirstymo ypatumai parodo, kokia yra problemos priežastis. Ar tai vidiniai oro tarpai (angl. *internal discharge*), ar paviršiniai išlydžiai (angl. *surface discharge*), ar išorinė korona. Pažangūs duomenų interpretavimo modeliai, remdamiesi PRPD diagrama, taip pat leidžia greičiau atskirti triukšmą nuo tikrojo PD signalo [25,26,28].

Pastaraisiais metais PD analizei vis dažniau naudojamas dirbtinis intelektas ir mašininio mokymosi algoritmai. Šie algoritmai gali klasifikuoti defektus ir tiksliau nustatyti galimą defekto progresavimo greitį. Tokios technologijos gali automatiškai atpažinti ir parinkti PD tipą, identifikuoti iš anksto degraduojančią izoliaciją. Taip pat gali įvertinti remonto arba keitimo poreikį. Visa tai padeda sumažinti žmogaus klaidų riziką ir leidžia gerokai tiksliau prognozuoti galimas gedimų išlaidas [27].

Čia naudojami labai dideli duomenų kiekiai dar vadinami *Big Data*. Tinkama jų analitika itin svarbi. Stambios energijos paskirstymo kompanijos kaupia vis daugiau PD matavimo duomenų. Efektyvus jų kaupimas, laikymas ir analizė reikalauja lengvai plečiamų duomenų bazių bei nepertraukiamos sistemos integracijos su debesų kompiuterija. Dalis PD sistemų siūlo nuotolinę prieigą. Operatoriai, prisijungę prie centralizuotų serverių, gali stebėti transformatorių ar kabelių būklę iš bet kurios vietos pasaulyje. Tai ypač aktualu didelėse elektros tinklų infrastruktūrose, kuriose laiku pastebėjus galimus defektus ir greitai reaguojant galima gerokai sumažinti prastovų ar avarių skaičių. Programinė įranga dažnai automatizuotai parengia ir ataskaitas bei statistinius rodiklius. Jie atitinka tarptautinius standartus, tokius kaip IEEE, IEC ir įmonės vidines gaires. Šios ataskaitos paprastai gali būti generuojamos PDF ar kitais universaliais formatais, jas galima integruoti į SCADA ar kitas valdymo ir stebėsenos sistemas. Taip visa svarbi informacija, nuo konkrečių matavimų iki ilgalaikių statistinių duomenų, yra vienoje vietoje. Tai itin palengvina visą eksploatacijos planavimą [25,26,28].

Dar viena gera savybė – tai programinės įrangos galimybė savarankiškai kalibruoti ar adaptuoti prie naujų sensorių bei matavimo sąlygų. Kai kuriais atvejais sistema pati atpažįsta naujus jutiklius, pritaiko optimalias filtrų konfigūracijas ir stebi signalo tan-delta reikšmes. Taigi, prireikia minimalaus rankinio darbo. Taip pat, egzistuoja technologijos, leidžiančios matavimams jungtis prie mobiliųjų programėlių ar internetinių portalų. Taip operatorius gali bet kuriuo metu patikrinti einamąją ar istorinę išlydžių būklę, priimti sprendimą dėl neatidėliotino patikrinimo ar taisymo [27,28].

Taigi, pažangi, gerai struktūruota ir patikima programinė įranga yra itin svarbi visame PD diagnostikos procese. Ji ne tik renka ir apdoroja duomenis, bet ir suteikia galimybę ilguoju laikotarpiu kaupti informaciją. Po to galima integruoti ją su kitais elektros tinklo analizės moduliais. Na ir

galiausiai, patikimiau įvertinama izoliacijos būklė bei parenkami tinkamiausi eksploatacijos veiksmi.

1.4. Normatyvinė bazė ir standartai

Norint užtikrinti patikimą elektros perdavimą ir paskirstymą, labai svarbu laikytis aiškiai apibrėžtų techninių reikalavimų ir standartų. Kabelių diagnostika ir bandymai yra reglamentuojami ir tarptautinių, ir nacionalinių standartų. Jie užtikrina matavimų tikslumą, rezultatų palyginamumą ir bendrą metodologijos vientisumą.

1.4.1. Tarptautiniai standartai

IEC 60270:2000

Tarptautinis standartas IEC 60270 reglamentuoja aukštos įtampos dalinių išlydžių (PD) matavimo procedūras. Šis standartas apibrėžia matavimo įrangos charakteristikas. Pavyzdžiui, matavimo jautrumą, triukšmo slopinimo priemones. Taip pat, apibrėžia dalinių išlydžių matavimo grandinių schemas ir kalibravimo metodus. Standarte aprašyti PD signalo parametrai, tokie kaip amplitudė (pC), dažnis (Hz), impulsų pasikartojimas ir fazinė koreliacija su įtampos kreive. Šio standarto taikymas leidžia vienodai vertinti kabelių izoliacijos būklę ir tiksliai nustatyti defektus, susijusius su daliniais išlydžiais [6,12,30].

IEEE Std 400-2012

IEEE standartas 400-2012 yra skirtas ekraninių kabelių sistemų, kurių vardinė įtampa viršija 5 kV, lauko diagnostiniams bandymams. Šis standartas apima dalinių išlydžių (PD) bandymus, žemo dažnio (VLF) testus, *Tan Delta* ($C/tg\delta$) diagnostiką, laiko srities reflektometrijos (TDR) bandymus ir termovizinius matavimus. Standartas detalizuoja kiekvieno metodo paskirtį, praktinio taikymo rekomendacijas, rezultatų vertinimo kriterijus ir potencialius apribojimus. Taip užtikrina diagnostinių bandymų patikimumą ir jų rezultatų palyginamumą [26].

IEC 60502-2:2005 / AMD1:2024

Šis standartas nustato techninius reikalavimus vidutinės įtampos kabelių konstrukcijai (6–30 kV). Svarbiausi aspektai apima ekstruzinės izoliacijos medžiagas (XLPE, EPR), izoliacijos ir ekrano sluoksnių matmenis bei fizines savybes. Taip pat aprašo dielektrinius parametrus ir testavimo procedūras gamybos etape bei eksploatacijos metu. Tai užtikrina, kad kabelių eksploatacinės charakteristikos atitiktų ilgalaikio ir patikimo veikimo reikalavimus [7].

1.4.2. Lietuvos nacionaliniai standartai

LST EN 60270:2002

Šis Lietuvos standartas yra oficialus IEC 60270:2000 atitikmuo. Jis patvirtina ir apibrėžia aukštos įtampos DI matavimo procedūras ir reikalavimus Lietuvoje. Standartas reglamentuoja matavimo grandinių ir įrangos reikalavimus. Taip pat, aprašo kalibravimo procedūras ir matavimo rezultatų interpretavimo taisykles [8].

1.5. Signalų apdorojimas – transformacijų palyginimas

Signalų apdorojimas yra vienas svarbiausių etapų dalinių išlydžių diagnostikoje. Juk būtent šiame etape iš neapdoroto signalo išskiriama informacija, leidžianti nustatyti tiek impulsų kilmę, tiek jų struktūrą. Kadangi PD signalai dažniausiai yra neperiodiniai, didelio dažnio ir trumpos trukmės impulsai, jų analizė reikalauja specifinių transformavimo metodų. Dažniausiai taikomos dvi metodikos – klasikinė Furjė transformacija (FFT) ir bangelių transformacija (WT). Abi jos turi tiek privalumų, tiek trūkumų, todėl metodų parinkimas turi būti pagrįstas analizės tikslu, signalo struktūra bei siekiamu rezultatu.

1.5.1. Furjė transformacija (FFT)

Klasikinė Furjė transformacija leidžia signalo duomenis iš laiko srities perkelti į dažnių sritį. Tokiu būdu atskleidžiama, kokie dažnio komponentai dominuoja. Tai ypač naudinga tais atvejais, kai dominuoja pastovios, kartojamos spektrinės struktūros.

Svarbiausi Furjė metodo bruožai:

- pilna dažnio rezoliucija – visa signalo energija išskaidoma pagal dažnius, todėl galima tiksliai identifikuoti dažnines sudedamąsias;
- laiko informacijos praradimas – neįmanoma nustatyti, kuriuo laiko momentu konkretus dažnis pasireiškė;
- vidutinis triukšmo slopinimas – tinkamai parinkus filtravimo strategijas, galima efektyviai atskirti žemo dažnio trikdžius (pvz.: 50 Hz tinklo interferencijas);
- maži skaičiavimo kaštai – FFT algoritmas plačiai palaikomas tiek aparatinėje, tiek programinėje įrangoje, todėl yra skaičiavimo požiūriu optimalus [25].

Tačiau svarbu paminėti, kad nors FFT spektras leidžia nustatyti dominuojančius dažnius, jis nepateikia jokios informacijos apie jų pasireiškimo laiką. Pavyzdžiui, jei PD signale yra 50 Hz triukšmo ir keli atsitiktiniai impulsai, spektre aiškiai išsiskirs 50 Hz ir jo harmonikos, tačiau impulsų laiko lokalizacija liks neapibrėžta.

1.5.2. Bangelių transformacija (WT)

Skirtingai nei Furjė analizė, bangelių transformacija leidžia signalą nagrinėti tuo pačiu metu tiek laiko, tiek dažnio srityse. Tai ypač aktualu netiesiniams, nestacionariems signalams, kur impulsai pasireiškia trumpam ir netolygiai. Bangelių analizė išskaido signalą į kelis mastelius, leidžiančius nustatyti ir identifikuoti net menkiausius struktūrinius pokyčius [34].

- Laiko ir dažnio informacijos išsaugojimas – galima ne tik nustatyti, koks dažnis yra signale, bet ir kada jis pasireiškė.
- Didelė skiriamoji geba impulsams – leidžia identifikuoti trumpos trukmės, didelio dažnio impulsus fone, kuris gali būti labai netolygus.
- Bangelės parinkimo svarba – analizei naudojamos, pavyzdžiui, Morlė, Daubechies bangelės turi būti parinktos atsižvelgiant į signalo struktūrą, nes nuo jų priklauso dekonstrukcijos kokybė.

- Santykinai didesni skaičiavimo kaštai – daugialygio išskaidymo metodas reikalauja daugiau resursų, ypač realaus laiko analizės atveju [18].

Pavyzdžiui, naudojant WT su Daubechies-4 bangele, galima atskirti trumpalaikius aukšta dažnius PD impulsus nuo ilgesnių foninio triukšmo svyravimų, lokalizuojant juos tiksliame laiko intervale.

1.5.3 Transformacijų metodų palyginimas

Apibendrinant galima teigti, kad FFT transformacija tinkama stabilioms, periodinėms struktūroms analizuoti, kai dominuoja dažninė informacija. Tačiau ji visiškai neatskleidžia impulsų dinamikos laiko atžvilgiu. Tuo tarpu WT transformacija, nors ir skaičiavimo požiūriu sudėtingesnė, suteikia reikšmingai išsamesnę įžvalgą apie signalą. Ypač kai reikalinga impulsų laiko ir dažnio lokalizacija.

1 lentelė. FFT ir WT metodų palyginimas.

Metodas	Laiko informacija	Dažnio informacija	Triukšmo slopinimas	Impulsų lokalizacija	Skaičiavimo kaštai
FFT	Nesaugoma	Pilna	Vidutinis	Ne	Žemi
WT	Išsaugoma	Vietinė	Aukštas	Taip	Aukšti

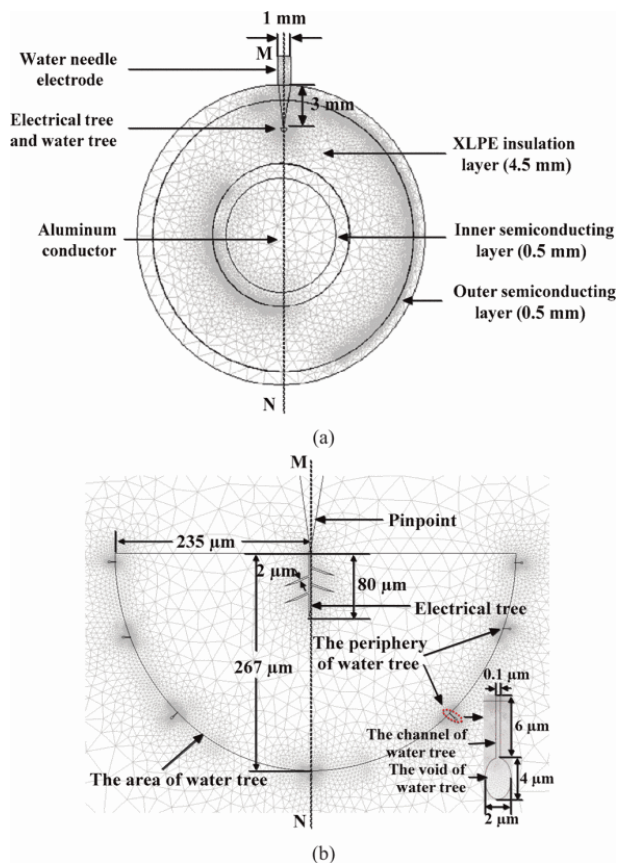
Tinkamai pasirinkus signalų apdorojimo metodiką, galima reikšmingai pagerinti DI analizės tikslumą ir patikimumą. Svarbu įvertinti ne tik teorinius metodų skirtumus, bet ir konkretaus signalo savybes bei praktinius analizės tikslus.

2. Pagrindinės 110 kV kabelių izoliacijos grupės ir dažniausi pažeidimo tipai

Kabėliai gali bũti gaminami su skirtinga izoliacija, kiekviena turi savo privalumũ ir trũkumũ. Šiame skyriuje aprašomos skirtingos kabeliũ izoliacijos bei pagrindinės jũ savybės. Taip pat, dažniausi galimi pažeidimai.

2.1. XLPE izoliacija ir jos privalumai

Dauguma naujũ 10-110 kV kabeliũ gaminami naudojant XLPE izoliacinę medžiagã dël gerũ elektriniũ savybiũ. Ji pasižymi didele izoliacine varža ir žemu dielektriniũ nuostoliũ koeficientu. Be to, ši izoliacinė medžiaga sukuria atsparumã nuo terminės deformacijos. Šia izoliacija padengtus kabelius paprasta montuoti, nes nenaudojamas skystis. Priešingai, nei alyvinius kabelius. Tačiau net ir tokia medžiaga nėra visiškai atspari ilgalaikiams poveikiams. Esant drėgmei gali susidaryti "vandens medžiai" (angl. Water trees). Taip pat, nėra pilnai atspari cheminiams teršalams ir mechaniniam poveikiui. Ilgalaikė eksploatacija ar netinkamas montavimas dažnai tampa defektũ priežastimi [2,11].



4 pav. Elektrinio medžio ir vandens medžio modelis: a) bendras elektrinio medžio ir vandens medžio modelis; b) elektrinio medžio ir vandens medžio mikrostruktūros modelis.[22]

2.2. Kiti izoliacijos tipai

Kai kuriuose senesniuose tinkluose dar galima rasti impregnuotus popierinius kabelius (PILC - *Paper Insulated Lead Covered*). Jie anksčiau buvo itin populiarūs aukštoje įtampoje. Jie jautrūs drėgmės

poveikiui. Švinu dengtas apvalkalas gali skilti dėl cheminių reakcijų ar mechaninių pažeidimų. Taip pat, gaminami ir EPR (angl. *Ethylene Propylene Rubber*) kabeliai, kurie irgi naudojami tam tikrose specialiose srityse. EPR kabelių galima rasti laivybos sektoriuje ar mobiliuosiuose įrenginiuose. Nepaisant izoliacijos tipo, dalinės išlydžiai išlieka vienu pagrindinių indikatorių, kad izoliacijos vientisumas pradėjo prastėti [12].

2.3. Dažniausi pažeidimų šaltiniai

Kabeliai gali būti pažeisti dėl įvairiausių priežasčių.

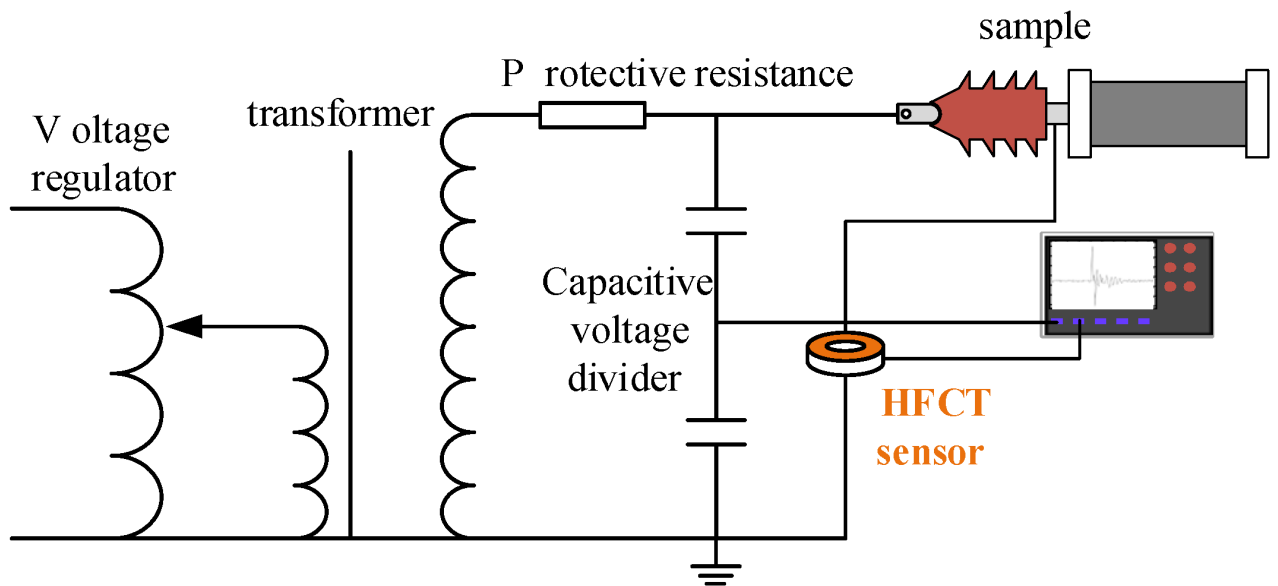
- mechaniniai pažeidimai kasimo, grunto judesių arba netinkamo kabelio lenkimo montavimo metu;
- neteisingai sumontuotos movos ir antgaliai, būdingas netolygus elektrinio lauko pasiskirstymas. Dėl jo formuojasi lokalūs perkrovimai, įskaitant mikroįtrūkius;
- vandens medžiai – atsiranda kai drėgmė prasiskverbia per mikroplyšius į izoliacijos sluoksnį. Taip susidaro šakotų kanalų struktūra ir silpnina izoliaciją [2,32];
- terminės perkrovos – ilgalaikis darbas virš nominalios apkrovos gali sukelti izoliacijos perkaitimą, greitesnį senėjimą ar net lydimąsi (angl. *thermal runaway*);
- dalinių išlydžių intensyvėjimas gali būti vidinis – tuštumose. Taip pat, gali būti ir paviršinis – izoliacijos paviršiuje ar išlydžiai antgaliuose/ekranuose [1,13].

3. Taikomi kompleksiniai diagnostikos metodai

Idealus kabelių diagnostikos įrankis turėtų leisti anksti rasti defektus ir detaliai įvertinti jų pobūdį. Taip pat, nustatyti tikslią vietą bei pateikti patikimas prognozes. Kadangi vieno universalaus metodo nėra, kartais praktikoje derinami keli metodai vienu metu [5].

3.1. Dalinių išlydžių (PD) matavimai

- Offline PD matavimai atliekami, kai kabelis atjungiamas nuo tinklo. Tuomet jame sukeliama bandomoji įtampa. Ji paprastai būna sinusinė 50 Hz arba keičiamo dažnio. Matavimai atliekami pagal standartą IEC 60270. Prie kabelio ekrano arba specialios movos prijungiami HFCT jutikliai ir užfiksuojami PD impulsai. Įvertinama PD atsiradimo įtampa – PDIV. Taip pat įvertinamas PD pasiskirstymas fazėje, kuris dar kitaip vadinamas *Phase Resolved PD – PRPD*. Dar įvertinamas išlydžių pasikartojimo dažnis (angl. *pulse repetition rate*) ir didžiausia amplitudė [1,2,9].
- Online PD matavimai atliekami kabelio neatjungiant iš eksploatacijos. Ant jo ar ekrano tvirtinami didelio dažnio srovės transformatoriai, talpiniai jutikliai ar akustiniai jutikliai. Kadangi aplinkoje gali būti dideli elektromagnetiniai trukdžiai, tai paprastai naudojami pažangūs triukšmo slopinimo algoritmai. Privalumas – defektas aptinkamas realiomis sąlygomis, nereikia planuoti ilgų atjungimų [1,2,33].
- PRPD dar vadinama angl. *Phase Resolved Partial Discharge* analize. Gauti duomenys dažnai vaizduojami dvimatėje skalėje, kur x ašis – fazė (0–360°), y ašis – PD amplitudė arba užtaisas (q). Pagal išlydžių pasiskirstymą galima nustatyti, ar vyrauja vidinės, paviršinės ar vainikinės išlydžiai. Taip pat nustatomas defekto tipas. Gali būti tiek ertmė (angl. *void*), vandens medžio pradžia arba paviršinis pažeidimas ir kiti [1,2,4,16].



5 pav. PD bandymų platformos, pagrįstos HFCT, grandinės schema. [37]

3.2. Reflektometrija (TDR, OTDR)

1. TDR yra vadinamas angl. *Time Domain Reflectometry*. Paprastai siunčiamas trumpas impulsas ir matuojama, po kiek laiko jis atsispindi nuo nelygumų. Tai padeda tiksliai nustatyti atstumą iki pažeidimo. Šis metodas naudojamas, kai reikia greitai surasti fizinę žalą, pavyzdžiui, kabelio nutrūkimą ar movos defektus [3,10].
2. OTDR – angl. *Optical Time Domain Reflectometry*. Naudojama, kai kabelis turi integruotą optinį pluoštą. Dažniau aktualu aukštų įtampų linijoms su OPGW (angl. *Optical Ground Wire*). Principas panašus į TDR, tačiau impulsai yra šviesos lygmenyje. Šis metodas gali padėti aptikti mikrolūžius optinėse gyslose. Taip pat, kartais gali netiesiogiai suteikti informacijos ir apie mechaninį kabelio pažeidimą [17,18,28].
3. Alternatyvus PD matavimo būdas dar vadinamas angl. *Oscillating Wave Test System* arba OWTS. Jis yra jautrus aptikti PD impulsus, naudojant svyruojančią bangą su mažesniais izoliacijos apkrovimais [51].

3.3. Izoliacijos dielektrinių parametrų matavimai

Talpos (C) ir dielektrinių nuostolių faktoriaus (tgδ) matavimai leidžia įvertinti bendrą izoliacijos būklę. Didėjant defektų kiekiui ar izoliacijai senstant, didėja nuostolių koeficientas. Izoliacijos varža matuojama megometrais aukštesnėje įtampoje, pavyzdžiui 5 kV ar 10 kV. Šie matavimai parodo, ar nėra bendrų pramušimo kanalų. Žemesnė varža rodo galimus defektus [10,52].

Vienas pažangiausių šiuo metu prieinamų įrenginių yra OMICRON DIRANA. Šis prietaisas leidžia atlikti analizę FDS, PDC metodais. Skirtingai nuo tradicinio, VLF režimu vykdomo tanδ matavimo, DIRANA analizuoja dielektrinius procesus išplėstame dažnių intervale. Taip galima tiksliai įvertinti ne tik izoliacijos senėjimą, bet ir drėgmės kiekį bei poliarizacijos procesų eigą. OMICRON DIRANA įranga leidžia atlikti dielektrinio atsako analizę FDS ir PDC metodais. Transformatorių alyvospopieriaus izoliacijai ši įranga gali būti naudojama drėgmės kiekiui celiuliozėje ir alyvos laidumui vertinti. XLPE kabelių izoliacijos diagnostikoje, šiame darbe pagrindinis dėmesys skiriamas talpos, tgδ ir dažninės kreivės formos pokyčiams. Todėl DIRANA rezultatai naudojami santykiniam XLPE izoliacijos būklės pokyčiui įvertinti, o ne tiesioginiam drėgmės kiekiui procentais nustatyti. Taip pat, šis prietaisas dirba net esant labai silpniems defektams, kol jie dar nesukėlė kritinio tanδ šuolio. Prietaisas labai patogus, nes derina skirtingus metodus viename matavimo cikle. Taigi, gaunami duomenys yra patikimesni. Itin patogiu, kad prietaisas automatiškai generuoja IEC/IEEE ataskaitas. Jas galima integruoti į SCADA ar CMMS aplinkas [13,21,23,29,46].

Paprastai kabelis atjungiamas nuo įtampos šaltinio ir prijungiamas prie DIRANA įrenginio. Dielektrinio atsako matavimai atliekami pagal žemos įtampos metodiką. Trukmė gali svyruoti nuo 15 iki 60 minučių, priklausomai nuo pasirinkto dažnių spektro bei kabelio ilgio. Surinkti duomenys

apdorojami programinėje aplinkoje „OMICRON Primary Test Manager“. Rezultatai pateikiami grafiškai – pagal drėgmės kiekį, poliarizaciją bei dažnio priklausomybę [21,23,52].

3.3.1. Dielektrinio atsako metodo teorinis pagrindas

Dielektrinio atsako metodai taikomi izoliacinių sistemų būklei vertinti, analizuojant jų talpą ir dielektrinius nuostolius. Reali izoliacija elektriniame lauke neveikia kaip idealus kondensatorius. Be talpinės dedamosios, izoliacijoje pasireiškia laidumo, poliarizacijos, relaksacijos ir kiti procesai, Dėl jų dalis elektros energijos išsklaidoma nuostolių forma. Literatūroje nurodoma, kad dielektriniai matavimai yra neinvaziniai, o jų pagrindinis tikslas – nustatyti izoliacijos talpą ir nuostolius. Skirtingi dielektrinio atsako metodai tarpusavyje skiriasi tiriamu dažnių ruožu, taikoma bandomąja įtampa ir rezultatų interpretavimo metodika [55].

Vienas pagrindinių izoliacijos nuostolius apibūdinančių parametrų yra dielektrinių nuostolių tangentas $tg\delta$. Jis nusako aktyviosios ir talpinės srovės dedamųjų santykį. Kuo didesnė aktyvioji srovės dedamoji, tuo didesni energijos nuostoliai izoliacijoje. Supaprastintai šis ryšys gali būti išreiškiamas taip:

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C}; \quad (1)$$

čia I_R – aktyvioji, nuostolius lemianti srovės dedamoji; I_C – talpinė srovės dedamoji.

Dielektrinių nuostolių susidarymas siejamas su tuo, kad prijungus įtampą dielektrike teka ne viena, o kelios srovės dedamosios: slinkties, absorbcijos ir laidumo srovės. Kintamosios įtampos atveju šios dedamosios lemia bendrą srovės fazinį poslinkį įtampos atžvilgiu, o dielektrinių nuostolių kampas apibūdina nuostolių dalį izoliacijoje. Tokia interpretacija taikoma vertinant ir skystuosius, ir kietuosius dielektrikus, tačiau konkreti rezultatų reikšmė priklauso nuo tiriamos izoliacinės sistemos sandaros ir medžiagų savybių [57].

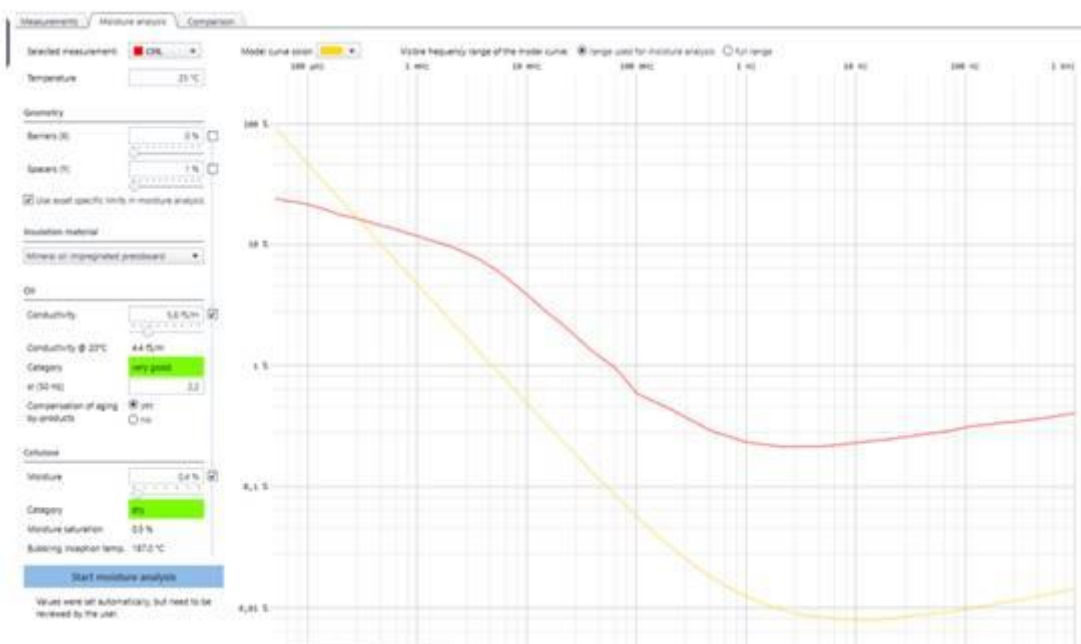
Dažninės dielektrinės spektroskopijos, arba FDS, metodas pagrįstas izoliacijos parametrų matavimu kintamo dažnio srityje. Atliekant tokį matavimą, vertinama talpa ir dielektrinių nuostolių tangentas ne viename dažnio taške, o platesniame dažnių intervale. DFR / FDS metodo aprašymuose nurodoma, kad dažniniai matavimai gali būti atliekami nuo mHz iki kHz srities. Dėl to jie suteikia daugiau informacijos negu tradicinis vieno dažnio, pavyzdžiui, 50 Hz arba 60 Hz, galios koeficiento ar $tg\delta$ matavimas [56].

Vieno dažnio $tg\delta$ matavimas leidžia įvertinti izoliacijos būklę konkrečiame dažnio taške, tačiau ne visada leidžia nustatyti, dėl kokios priežasties padidėjo dielektriniai nuostoliai. Plačiaujustis dielektrinio atsako matavimas leidžia analizuoti visos kreivės formą, todėl galima vertinti, kaip izoliacijos savybės keičiasi skirtingose dažnio srityse. Literatūroje pabrėžiama, kad dielektrinio atsako kreivės forma priklauso nuo temperatūros, laidumo, izoliacinės sistemos sandaros ir drėgmės poveikio. Dėl šios priežasties atliekant FDS matavimus būtina fiksuoti matavimo temperatūrą ir lyginti ne tik pavienes reikšmes, bet ir visą dažninę charakteristiką [55,56].

Šiame darbe FDS metodas vertinamas kaip ankstyvosios 110 kV XLPE kabelių izoliacijos būklės diagnostikos priemonė. Jo paskirtis – nustatyti dielektrinių savybių pokyčius dar iki aiškiai pasireiškiant daliniams išlydžiams. Dalinių išlydžių metodas dažniausiai fiksuoja jau elektriškai aktyvų lokalų defektą, o FDS metodas leidžia įvertinti bendrą izoliacijos dielektrinių savybių kitimą. Todėl šiame darbe FDS rezultatai analizuojami kaip pradinės ir po poveikio gautos dielektrinio atsako kreivės pokytis.

Vertinant XLPE kabelių izoliaciją svarbu atskirti šią sistemą nuo transformatorių alyvos-popieriaus izoliacijos. Transformatorių atveju dielektrinio atsako metodai gali būti taikomi drėgmės kiekiui celiuliozėje ir alyvos laidumui vertinti, nes tam naudojami konkretūs alyvos-popieriaus izoliacijos modeliai ir duomenų bazės. XLPE kabelių atveju tokia interpretacija negali būti tiesiogiai perkeliama, nes kabelio izoliacijos sandara, medžiaga ir degradacijos procesai yra kitokie. Todėl šiame darbe DIRANA rezultatai naudojami ne tiesioginiam drėgmės kiekiui procentais XLPE izoliacijoje nustatyti, o santykiniams izoliacijos būklės pokyčiams vertinti. [55,57]

Aukštos įtampos įrenginių diagnostikoje dažninio atsako metodai taip pat gali būti siejami su supaprastintais elektriniais modeliais, kuriuose izoliacinė sistema aprašoma talpinėmis, varžinėmis ir laidumo dedamosiomis. Tokie modeliai leidžia paaiškinti, kodėl izoliacijos geometrijos, laidumo ar talpos pokyčiai atsispindi matuojamose dažninėse charakteristikose. Šiame darbe toks principas taikomas supaprastintai: XLPE kabelio izoliacija vertinama kaip dielektrinė sistema, kurios būklės pokytis gali būti nustatomas pagal talpos, $\tan\delta$ ir FDS kreivės formos kitimą [48,52,58].



6 pav. Pavyzdinė izoliacijos būklės patikrinimo kombinuotoji laiko ir dažnio sričių spektroskopijos kreivė išmatuota prietaisu DIRANA, naudojant dielektrinio atsako metodą

3.3.2. Dažninė dielektrinė spektroskopija

Dažninė dielektrinė spektroskopija (angl. *Frequency Domain Spectroscopy*, FDS) šiame darbe taikoma kaip pagrindinis dielektrinio atsako vertinimo metodas. Jo metu analizuojama, kaip kabelio izoliacijos talpa ir dielektrinių nuostolių tangentas $\tan\delta$ kinta priklausomai nuo dažnio. Skirtingai nuo vieno dažnio $\tan\delta$ matavimo, FDS leidžia įvertinti visos dažninės charakteristikos formą. Dėl šios priežasties metodas yra tinkamas ankstyviesiems izoliacijos dielektrinių savybių pokyčiams nustatyti [55,56].

XLPE kabelių izoliacijos diagnostikoje FDS rezultatai šiame darbe vertinami lyginamuoju principu. Pirmiausia fiksuojama pradinė kabelio dielektrinio atsako charakteristika, o vėliau ji lyginama su po drėgmės arba elektrinio streso poveikio gautais rezultatais. Vertinami ne tik pavieniai $\tan\delta$ ar talpos dydžiai, bet ir bendras kreivės pokytis pasirinktame dažnių intervale. FDS metodas šiame tyrime siejamas su izoliacijos būklės pokyčių nustatymu iki aiškiai pasireiškiančių dalinių išlydžių. Dalinių išlydžių matavimas dažniausiai fiksuoja jau elektriškai aktyvų lokalų defektą, o FDS leidžia įvertinti bendrą izoliacijos dielektrinių savybių kitimą. Dėl to FDS šiame darbe laikomas ankstyvosios diagnostikos metodu, o ne pažeidimo vietos nustatymo priemone.

Vertinant FDS rezultatus atsižvelgiama į tai, kad matavimo duomenims įtakos gali turėti temperatūra, kabelio ilgis, prijungimo schema, ekrano įžeminimas ir pasirinktas dažnių intervalas. Tyrime svarbu užtikrinti vienodas matavimo sąlygas ir lyginti pradinę bei pakartotinę charakteristikas tomis pačiomis sąlygomis.

3.3.3. Poliarizacijos ir depoliarizacijos srovių metodas

Poliarizacijos ir depoliarizacijos srovių metodas (angl. *Polarization and Depolarization Current*, PDC) yra dielektrinio atsako analizės metodas, taikomas laiko srityje. Atliekant PDC matavimą, izoliacijai pirmiausia prijungiama nuolatinė bandomoji įtampa ir registruojama poliarizacijos srovė. Pasibaigus poliarizacijos laikui, bandomoji įtampa atjunginama, bandinio gnybtai trumpam sujungiami, o po to registruojama depoliarizacijos srovė. Šių srovių kitimo pobūdis leidžia vertinti izoliacijos laidumo, absorbcijos ir poliarizacijos procesus [57].

PDC metodo diagnostinė reikšmė susijusi su tuo, kad realioje izoliacinėje sistemoje srovė po įtampos prijungimo nekinta momentiška. Pradinėje matavimo stadijoje srovė būna didesnė dėl greitų poliarizacijos procesų, o vėliau mažėja, kol labiau išryškėja laidumo dedamoji. Depoliarizacijos srovės kreivė parodo, kaip izoliacijoje sukaupti krūviai išsisklaido pašalinus išorinį elektrinį lauką. PDC metodas gali būti naudojamas kaip papildomas izoliacijos būklės vertinimo įrankis kartu su FDS matavimu.

Šiame darbe PDC metodas vertinamas kaip pagalbinis dielektrinio atsako analizės metodas. Pagrindinis dėmesys skiriamas FDS kreivių pokyčiams. PDC matavimo rezultatai gali padėti paaiškinti, ar po poveikio pasikeitė izoliacijos poliarizacijos ir laidumo procesai. Tai ypač svarbu tada, kai FDS kreivė rodo nuostolių padidėjimą žemų dažnių srityje. Tokie pokyčiai gali būti susiję su lėtaisiais poliarizacijos arba laidumo procesais. Vertinant XLPE kabelių izoliaciją, PDC rezultatai šiame darbe naudojami santykiniam pokyčiui nustatyti. Pradinė poliarizacijos arba depoliarizacijos srovės kreivė laikoma bazine charakteristika, o po drėgmės arba elektrinio streso poveikio gauti

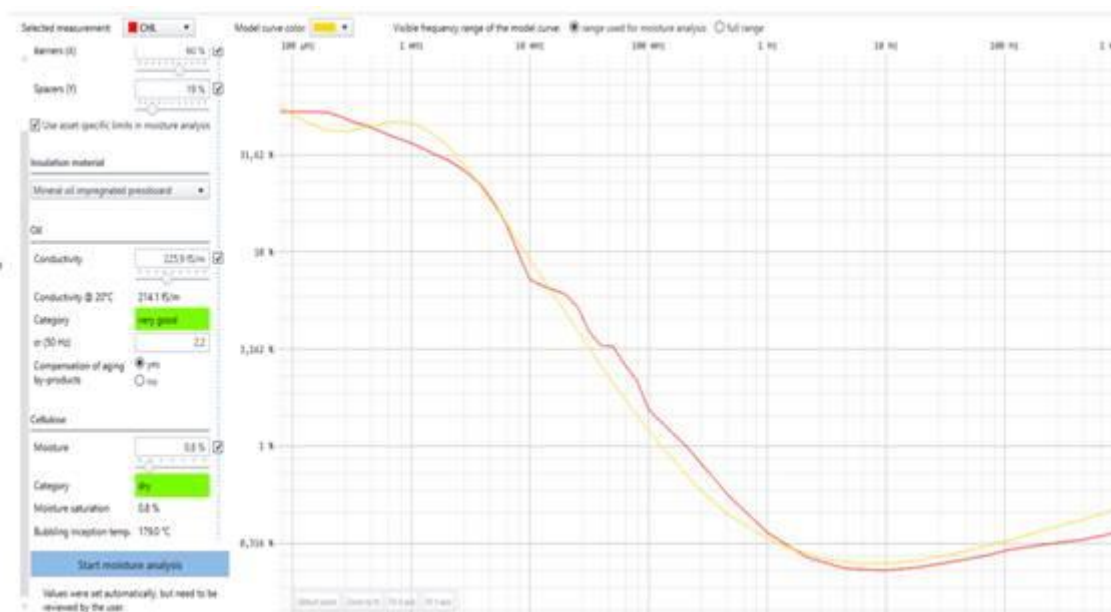
rezultatai lyginami su pradine būseną. Tokiu būdu PDC metodas nėra naudojamas kaip savarankiškas absoliučios izoliacijos būklės įvertinimas, bet kaip papildomas indikatorius, padedantis interpretuoti bendrą dielektrinio atsako kitimą [29,52].

3.3.4. Grįžtamosios įtampos metodas

Grįžtamosios įtampos metodas (angl. *Return Voltage Method*, RVM) yra dielektrinio atsako analizės metodas, taikomas laiko srityje. Jo metu izoliacinė sistema tam tikrą laiką įkraunama nuolatine įtampa, vėliau trumpai iškraunama. Po to matuojama grįžtamoji įtampa, susidaranti dėl izoliacijoje vykusių poliarizacijos ir relaksacijos procesų. Šios įtampos kitimo kreivė gali suteikti informacijos apie izoliacijos gebėjimą kaupti ir grąžinti elektrinį krūvį [57].

RVM metodo diagnostinė reikšmė susijusi su lėtaisiais poliarizacijos procesais. Jeigu izoliacijoje yra padidėjusių nuostolių, laidumo pokyčių ar nevienalytiškumų, grįžtamosios įtampos kreivės forma gali keistis. Dėl to RVM gali būti naudojamas kaip papildomas metodas izoliacijos dielektriniam atsakui vertinti. Vis dėlto literatūroje ir praktikoje šis metodas dažnai vertinamas atsargiau nei FDS ar PDC, nes jo rezultatų interpretacija gali būti mažiau vienareikšmė ir labiau priklausyti nuo matavimo sąlygų bei pasirinkto poliarizacijos ciklo.

Metodas gali parodyti bendrą poliarizacijos procesų pobūdį, tačiau jis nėra skirtas pažeidimo vietai aptikti. Šis metodas negali pakeisti FDS, PDC ar dalinių išlydžių matavimų. Dėl šios priežasties šiame darbe RVM netaikomas. Eksperimentinėje dalyje pagrindinis dėmesys skiriamas FDS charakteristikų analizei. Nors RVM gali papildyti bendrą dielektrinio atsako analizę, tačiau nėra pagrindinis ankstyvosios degradacijos vertinimo pagrindas. Šis metodas svarbus paminėti kaip vienas iš dielektrinio atsako metodų, leidžiančių vertinti izoliacijos poliarizacinius procesus. [21,30,45,49]



7 pav. Pavyzdinė izoliacijos būklės patikrinimo kombinuotoji laiko ir dažnio sričių spektroskopijos kreivė išmatuota prietaisu DIRANA, naudojant dielektrinio atsako metodą.

3.4. Akustiniai ir ultragarsiniai metodai

Akustinė emisija – tai reiškinys, kai dalinių išlydžių metu izoliacinėje medžiagoje susidaro aukšto dažnio akustiniai virpesiai. Jie sklinda per kabelio konstrukciją ir gali būti užfiksuoti specialiais

jutikliais. Jei jutikliai išdėstyti tinkamai, galima nustatyti signalo keliavimo laikų skirtumus. Tokiu būdu aptinkama defekto vieta. Šiam tikslui dažnai naudojami įrenginiai, tokie kaip *Megger Digiphone* ar *Baur Protac*. Ultragarsiniai jutikliai labiausiai tinka paviršiniams išlydžiams aptikti. Jie dažniausiai naudojami atvirose kabelių movose, transformatorinėse spintose ar kitose prieinamose vietose. Tačiau šis metodas turi vieną esminį trūkumą – signalas linkęs slopti. Kuo storesnė izoliacija ar masyvesnė konstrukcija, tuo labiau slopinami garsiniai virpesiai. Dėl to signalas gali būti iškraipytas arba visai neužfiksuotas. Ilgi, sudėtingos sandaros kabeliai dar labiau apsunkina situaciją. Tokiais atvejais reikia jautresnės įrangos, tikslaus jutiklių išdėstymo ir veiksmingo triukšmo filtravimo. Be to, lauko sąlygomis dažnai kyla papildomų kliūčių, pavyzdžiui elektromagnetinių trikdžių arba riboto fizinio priėjimo.

3.5. Termoviziniai tyrimai

Termoviziniai tyrimai atliekami naudojant infraraudonųjų spindulių kamerą, pavyzdžiui, *Flir T560*. Su ja inžinieriai fiksuoja kabelio, movos ar jungties paviršiaus temperatūrą. Jei yra koks nors defektas, tam tikrose vietose dažniausiai užfiksuojamas temperatūros padidėjimas. Termoviziniai tyrimai leidžia identifikuoti perkaitimo taškus ar net galimus kontaktų pažeidimus. Šis metodas ypač efektyvus, kai tikrinami atviroje aplinkoje esantys komponentai. Pavyzdžiui, movos, oro linijų sujungimai ar transformatorinės jungtys. Tuo tarpu, požeminiuose kabeliuose termovizija taikoma ribotai. Šiluminiai pokyčiai dažnai būna slopinami grunto, todėl defektų vietos gali likti nepastebėtos. Išimtis – jei perkaitimas yra pakankamas ir šiluma persiduoda į paviršių [8,24].

4. Integruotos monitoringo sistemos ir didžiųjų duomenų (angl. *Big Data*) analizė

Perdavimo ir skirstymo tinklo operatoriai nuolat tikrina kabelius ir gauna vis didesnius kiekius įvairiausių duomenų. Šie diagnostiniai duomenys dažniausiai gaunami taikant dalinių išlydžių analizę, srovės poliarizacijos ir depoliarizacijos metodus, RVM – grįžtamosios įtampos matavimus, dielektrinę spektroskopiją bei TDR impulsinį bandymą. Einant laikui susidaro itin didelis jų kiekis, dar vadinamas terminu *Big Data*. Diagnostikos srityje vis aktyviau taikomi Big Data analizės principai. Tai duomenų rinkimo, išankstinio apdorojimo, modelių kūrimo ir prognozavimo rinkiniai, leidžiantys automatizuoti kabelių būklės vertinimą [35,36,37,38,39,49].

Didžiųjų duomenų analizė kabelių diagnostikoje ypač vertinga, kai duomenys pateikiami nuosekliai. Iš tokių prietaisų kaip Omicron DIRANA, FDS, PDC rezultatus galima analizuoti kartu su PD ar net aplinkos parametrais. Sujungus tokius duomenis, galima kurti išsamius požymių vektorius. Jie tampa mokymo duomenimis dirbtinio intelekto modeliams. Toks būdas leidžia ne tik nustatyti esamą kabelio būklę, bet ir prognozuoti defekto plitimo riziką [35,40,42,43].

4.1. Mašininio mokymosi integracija

Dirbtinis intelektas remiasi mokymusi iš anksčiau surinktų duomenų. Jis gali atlikti duomenų analizę ir priimti sprendimus.

Šioje srityje dažniausiai taikomi keli pagrindiniai dirbtinio intelekto metodų tipai:

1. Dirbtiniai neuroniniai tinklai – angl. Artificial Neural Networks, ANN yra universalūs modeliai. Jie tinkami PD signalų įvertinimui bei kabelių būklės klasifikacijai [35,40].
2. Konvoliuciniai neuroniniai tinklai – angl. Convolutional Neural Networks, CNN ypač tinkami dirbti su struktūrizuotais signaliniais duomenimis. Jie labai patogūs su PD laiko srities impulsais ar TDR atspindžio bangomis. Šie neuroniniai tinklai geba automatiškai išgauti reikšmingus požymius tiesiai iš neapdorotų duomenų. Taigi, nebereikia rankinio požymių parinkimo [37,38,41].

Skirtingi analizės modeliai gali būti jungiami tarpusavyje. Tai leidžia efektyviau išnaudoti skirtingų algoritimų stipriąsias savybes ir pasiekti geresnę diagnostikos tikslumą [41,44].

4.2. Neuroninių tinklų taikymo galimybės kabelių diagnostikoje

Neuroniniai tinklai yra vienas iš pagrindinių dirbtinio intelekto metodų. Kabelių diagnostikoje neuroniniai tinklai ypač naudingi tada, kai turima struktūruota, skaitinė informacija. Taigi, jei turite PD matavimus, PDC bei $\tan \delta$ ir kitus įvairius išvestinius indikatorius – neuroniniai tinklai gali būti puikiai panaudojami [37].

4.3. Konvoliucinių neuroninių tinklų (CNN) taikymas dalinių išlydžių (PD) diagnostikoje

Konvoliuciniai neuroniniai tinklai arba CNN iš pradžių buvo sukurti vaizdų apdorojimui. Visgi, pastaruoju metu juos vis plačiau naudoja ir vienmačių signalų analizėje. Tokie duomenys būdingi dalinių išlydžių signalams. Jie yra sudaryti iš impulsų, dažnai pasikartojančių, turinčių specifinę amplitudžių, fazių ir dažnio struktūrą [34]. CNN tinklai gali patys išmokti svarbiausius požymius iš įvesties duomenų. Tai reiškia, kad nereikia iš anksto rankiniu būdu paruošti tokių rodiklių kaip

impulsų skaičius ar piko amplitudė. Tinklas pats nustato, kurie signalų požymiai yra svarbūs diagnostikai [37,38].

4.4. Mašininio mokymosi (ML) metodai kompleksinėje kabelių diagnostikoje

Kabelių diagnostikoje taiko ir daugiau mašininio mokymosi metodų. Geriausia juos naudoti tada, kai gauti diagnostinių matavimų skaičiai yra gerai apibrėžti. ML metodai dažnai paprasčiau įgyvendinami. Šie modeliai greičiau mokosi, yra kur kas tikslesni. Visgi, geriau veikia su aiškiais ir mažai triukšmingais duomenimis.

Tarp plačiausiai taikomų algoritmų kabelių analizėje išsiskiria:

1. Random Forest – sprendimų medžių rinkinys, tinkamas klasifikacijai ar regresijai. Jis atsparus triukšmui ir veiksmingas dirbant su mišriais požymiais [39,43].
2. Support Vector Machines arba SVM – tinka dirbti su nedideliais duomenų rinkiniais. Geba klasifikuoti duomenis net tada, kai tarp skirtingų klasių nėra aiškios atskirties.
3. k-Nearest Neighbors (kNN) – paprastas algoritmas, paremtas artimiausių taškų panašumu.
4. XGBoost ir Gradient Boosting – galingi metodai, tinkantys analizuoti realių sąlygų duomenis, net jei jie pasiskirstę netolygiai.

Mašininio mokymosi metodai pasižymi ne tik skirtumais, bet ir bendromis savybėmis. Jie ypač naudingi, kai duomenų kiekis yra ribotas, tačiau reikalingas interpretavimas. Kuo modelis paprastesnis, tuo lengviau suprasti ir paaiškinti jo priimtus klasifikacijos sprendimus. ML taip pat leidžia efektyviai apjungti požymius iš skirtingų šaltinių. Vienas pagrindinių jų pranašumų – spartus mokymasis ir pritaikomumas įvairiose dirbtinio intelekto sistemose [39,44].

4.5. PD ir DIRANA duomenų perdavimas dirbtinio intelekto analizei – praktinis integracijos pasiūlymas

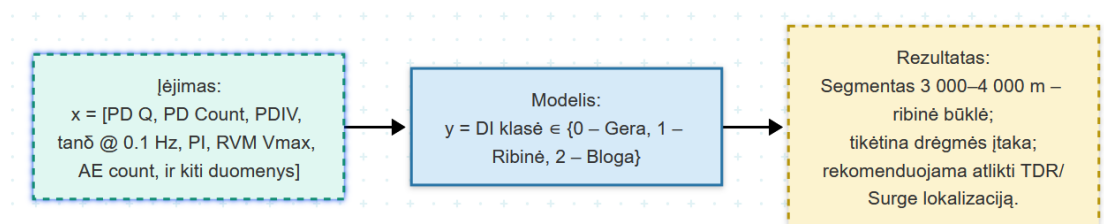
Kad kabelių diagnostika būtų išties efektyvi, neužtenka vien tik kaupti PD ir DIRANA duomenis. Svarbu, kad jie būtų iškart analizuojami, pasitelkus dirbtinį intelektą. Tam reikalingas nuoseklus procesas – nuo duomenų surinkimo iki jų perdavimo ir apdorojimo.

Duomenų sistemizavimas:

- OMICRON MPD 600 – pateikia PD impulsų amplitudes, dažnį, PRPD matricas, PDIV/PDV parametrus ir impulsų fazinį pasiskirstymą;
- OMICRON DIRANA – generuoja PDC srovės kreives laiko srityje ir $\tan \delta$ priklausomybes nuo dažnio;
- Šie duomenys yra eksportuojami CSV arba binariniu formatu ir gali būti transformuojami į požymių vektorius;
- AI platformos integracija.

Integracijos schema

- PD ir DIRANA matavimų duomenys eksportuojami iš prietaisų per USB, LAN arba serijinį protokolą;
- naudojant Python, duomenys normalizuojami, atliekama triukšmo filtracija, interpoliuojami laiko taškai;
- iš dalinių išlydžių matavimų išrenkamas impulso krūvis (Q), IEC standarte apibrėžti PD parametrai, dalinių išlydžių pradžios įtampa (PDIV), impulsų tankis;
- iš poliarizacijos–depolarizacijos srovės (PDC) matavimų nustatoma poliarizacijos srovė ties 1000 s bei poliarizacijos indeksas (PI);
- iš dažninės dielektrinės spektroskopijos (FDS) matavimų — dielektrinių nuostolių tangentas ($\tan \delta$) įvairiuose dažniuose;
- klasifikacija atliekama CNN ar Random Forest algoritmu, įvertinant kabelio būklę (gera / ribinė / bloga) [37,38,40];
- Klasifikacija perduodama į operatoriaus sistemą, pavyzdžiui, SCADA.



8 pav. Pavyzdinė DI modulio schema

Viskas atliekama automatiškai, tad nelieka monotoniško darbo. Be to, sprendimai tampa objektyvesni – vertinimą atlieka išmokytas modelis, o ne subjektyviai mąstantis asmuo. Dirbtinio intelekto sistema gali veikti ne tik pasibaigus matavimams. Esant bet kokiam reikšmingam parametru pokyčiui, sistema gali įspėti dar prieš atsirandant realiam gedimui.

5. Lyginamoji kompleksinių metodų analizė

Kabelių izoliacijos diagnostikoje skirtingi metodai vertina nevienodus izoliacijos būklės aspektus. Dėl šios priežasties vienas metodas negali būti laikomas universaliu visų defektų nustatymo sprendimu. Vieni metodai yra tinkami bendram izoliacijos dielektrinių savybių pokyčiui nustatyti, kiti – lokaliems elektriškai aktyviems defektams rasti, dar kiti – fizinei pažeidimo vietai nustatyti.

Šiame darbe diagnostikos metodai lyginami pagal jų informatyvumą skirtingose izoliacijos degradacijos stadijose. Ankstyvoje stadijoje, kai izoliacijoje dar nėra stabilaus dalinių išlydžių aktyvumo, svarbiausi tampa metodai, galintys parodyti bendrą dielektrinių savybių kitimą. Tam taikomi FDS ir PDC metodai. Kai defektas tampa elektriškai aktyvus, didesnę diagnostinę reikšmę įgyja dalinių išlydžių matavimai. Gedimo arba ryškaus lokalaus pažeidimo atveju svarbūs tampa reflektometrijos ir akustiniai metodai, leidžiantys nustatyti pažeidimo vietą.

Todėl FDS šiame darbe vertinamas ne kaip pažeidimo vietos lokalizavimo metodas, o kaip ankstyvosios izoliacijos būklės vertinimo priemonė. Jo diagnostinė vertė siejama su galimybe nustatyti talpos, tgδ ir dažninės charakteristikos pokyčius dar iki aiškiai pasireiškiant daliniams išlydžiams [47].

5.1. Dalinių išlydžių metodų privalumai ir trūkumai

Vienas iš didžiausių PD diagnostikos privalumų – galimybė labai anksti nustatyti izoliacijos pažeidimus. Be to, ši technologija leidžia tiksliai atskirti skirtingus išlydžių tipus. PRPD diagrama aiškiai parodo, ar pažeidimas paviršinis, ar vidinis. Kai kurios sistemos leidžia stebėti kabelio būklę realiuoju laiku, net jo neišjungiant. Vis dėlto, metodas turi ir trūkumų. Pramoninėje aplinkoje dažnai fiksuojami stiprūs elektriniai trikdžiai, kurie apsunkina matavimus. Tuomet prireikia sudėtingų filtravimo sprendimų bei ypač tikslaus jutiklių išdėstymo. Norint nustatyti tikslią PD vietą, prireikia pažangių vietos nustatymo technikų ir koreliacinių analizų. Galiausiai, jei atliekami Offline tipo matavimai, kabelį vis tiek tenka išjungti. Tai kartais riboja taikymo galimybes.

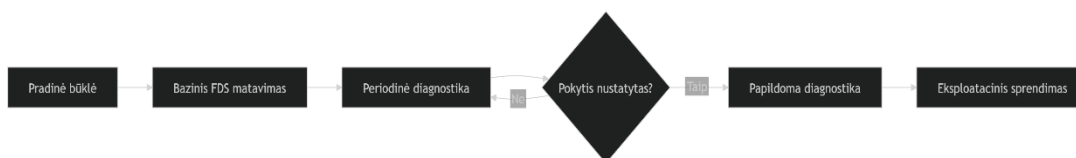
5.2. Reflektometrijos metodų privalumai ir trūkumai

TDR metodas pasižymi dideliu tikslumu nustatant pažeidimo vietą. Juk dažniausiai paklaida siekia vos kelis metrus. Pasitaiko atvejų, kai paklaida sumažėja iki dešimčių centimetrų. Matavimas dažnai trunka mažiau nei minutę. Šis metodas taip pat leidžia aptikti tokius defektus kaip nutrūkę laidininkai, blogi sujungimai ar didelio impedanso pažeidimai. Vis dėlto TDR turi ir trūkumų. Jis nesuteikia išsamios informacijos apie defekto pobūdį. Šis metodas neparodo, ar pažeidimą sukėlė mechaninis įbrėžimas, vandens medis ar izoliacijos erozija. Be to, siekiant tikslių rezultatų, būtina turėti sveiko kabelio reflektogramą arba žinoti pagrindinius kabelio parametrus, tokius kaip bangos sklaidimo greitis bei charakterinė varža.

5.3. FDS, C ir tgδ matavimų diagnostinė reikšmė

C ir tgδ matavimai leidžia įvertinti bendrą kabelio izoliacijos dielektrinę būklę. Talpa daugiausia siejama su kabelio konstrukcija, izoliacijos geometrija ir dielektrine skvarba. Tgδ rodo aktyviųjų dielektrinių nuostolių dalį izoliacijoje. Vieno dažnio tgδ matavimas gali parodyti padidėjusius nuostolius, tačiau jo informatyvumas ribotas, nes matuojama tik viena konkretaus dažnio reikšmė.

FDS metodas išplečia šią analizę, nes leidžia vertinti talpos ir tgđ kitimą platesniame dažnių intervale. Dėl to galima analizuoti ne tik atskirą reikšmę, bet ir visą dielektrinio atsako kreivės formą. Šiame darbe būtent FDS laikomas svarbiausiu ankstyvosios izoliacijos būklės vertinimo metodu. Jis gali parodyti dielektrinių savybių pokyčius dar iki aiškiai pasireiškiant daliniams išlydžiams. Visgi, FDS metodas paprastai neparodo tikslios pažeidimo vietos. Nustačius reikšmingą dielektrinio atsako pokytį, papildomai gali būti taikomi PD, TDR arba kiti lokalizavimo metodai. Tokia metodų seka leidžia pirmiausia įvertinti bendrą izoliacijos būklę, o vėliau, jei reikia, tikslinti defekto pobūdį ir vietą.



9 pav. Dielektrinio atsako metodo vieta 110 kV XLPE kabelių diagnostikos struktūroje

9 paveiksle parodyta dielektrinio atsako metodo vieta 110 kV XLPE kabelių diagnostikos struktūroje. Pradinio matavimo metu FDS kreivė naudojama kaip bazinė charakteristika, su kuria vėliau lyginami pakartotiniai matavimai. Periodinės diagnostikos metu vertinami talpos, dielektrinių nuostolių tangento tgđ ir dažninės charakteristikos formos pokyčiai. Jeigu reikšmingas pokytis nenustatomas, kabelio būklė toliau stebima pagal priežiūros planą. Nustačius ryškesnį dielektrinio atsako pokytį, taikoma papildoma diagnostika. Gali būti taikomi dalinių išlydžių, VLF, TDR arba akustiniai metodai. Tokia seka leidžia pirmiausia nustatyti bendrą izoliacijos dielektrinių savybių kitimą, o vėliau, esant poreikiui, tikslinti defekto pobūdį ir vietą.

5.4. Akustiniai ir termoviziniai metodai

Jei PD atsirado netoli movų ar transformatorių spintų, galima naudoti akustinius metodus. Juk šiose vietose signalo neslopina storas izoliacijos sluoksnis. Vis tik, giliau požemyje akustinė banga užgęsta. O štai termovizijos metodą galima panaudoti, kai yra prieinama kabelio dalis arba mova. Tačiau pažeidimui atsiradus po žeme, termovizija jo jau gali neparodyti, nes gruntas slopina duomenis.

2 lentelė. Akustinių įrenginių palyginimas

Parametras	Fluke ii915	Megger Digiphone2	Baur Protrac
Veikimo principas	Akustinis vaizdinimas	Akustinis, magnetinis	Akustinis, magnetinis, žingsnio įtampos
Taikymas	PD, korona	Kabelių gedimų lokalizavimas	Kabelių ir ekrano gedimai
Triukšmo slopinimas	Integruotas algoritmas	BNR	2-lygio ANS
Atstumo nustatymas	Garso intensyvumas žemėlapyje	Laiko skirtumas tarp impulsų	3D kryptinė navigacija
Mobilumas	Rankinis	Rankinis	Universalus
Režimai	Viršgarsinis triukšmas	Surge impulsai, fazinė analizė	Žingsnio įtampos, surge, audio
Tipinė paskirtis	PD, koronos išlydžiai	Surge lokalizacija	Universali diagnostika

5.5. Ekonominė ir eksploatacinė nauda

Vienu metu taikyti kelis metodus yra naudinga. Juk kompleksiniai metodai leidžia išsamiau įvertinti kabelio būklę. Be to, pasitelkus kelis metodus, daugiau šansų padaryti teisingas išvadas iš gautų duomenų. Vis gi, kompleksiniai metodai reikalauja daugiau investicijų į specializuotą įrangą, personalo mokymus. Nuolatinis ar dažnas stebėjimas paprastai brangesnis, tačiau gali iš esmės sumažinti neplanuotų gedimų riziką. Gedimai kainuoja daugiau, juk ne tik nutraukiamas tiekimas, dar yra skiriamos baudos už elektros energijos tiekimo nutraukimą, sugadintą įrangą ar sustabdytus gamybos procesus [3,15].

6. Eksperimentinė dalis

Šiame skyriuje aprašoma 110 kV XLPE kabelio izoliacijos dielektrinio atsako eksperimentinio tyrimo metodika. Taip pat, naudojama įranga, tiriamųjų mėginių paruošimas bei taikyti laboratoriniai poveikiai. Eksperimentinės dalies rezultatai vertinami lyginant pradinę kabelio izoliacijos būklę su būkle po drėgmės, elektrinio streso ir terminio ciklavimo poveikio. Pagrindinis dėmesys skiriamas FDS charakteristikų, dielektrinių nuostolių tangento $\text{tg}\delta$, galios koeficiento ir ir talpos dedamųjų pokyčiams.

6.1. Tyrimo metodika ir eksperimentinis planas

Šio darbo eksperimentinės dalies tikslas – atliekant laboratorinius bandymus, įvertinti 110 kV XLPE izoliaciją turinčių kabelių būklės diagnostikos metodų informatyvumą ir suderinamumą. Buvo orientuotasi į hibridinį vertinimą, pagrįstą dielektriniu atsaku (FDS/PDC). Eksperimentinė metodika suformuota taip, kad būtų galima atskirti skirtingų senėjimo mechanizmų sukeltus izoliacijos pokyčius. Taip pat, kad būtų galima patikrinti, ar taikant kelių metodų derinį, galima patikimiau identifikuoti ankstyvuosius degradacijos požymius.

6.1.1. Eksperimentinio tyrimo logika ir pasirinkti senėjimo veiksniai

Izoliacijos būklei vienu metu įtaką daro drėgmė, elektrinis laukas, temperatūriniai ciklai, mechaniniai įtempiai, taip pat montavimo ir jungčių kokybė. Praktikoje defektai dažniausiai vystosi palaipsniui ir ilgą laiką lieka nematomi tradiciniams bandymams. Dėl šios priežasties eksperimente orientuotasi į parametrus, kurie rodo ankstyvuosius degradacijos etapus. Tokius, kaip dielektrinių nuostolių pokyčiai, poliarizacijos proceso dinamika ir lokalinių išlydžių atsiradimas. Eksperimentinis senėjimo modeliavimas pagrįstas trimis tarpusavyje vienas kitą papildančiais veiksniais:

1. Drėgmės poveikis siejamas su vandens medžių (angl. *water trees*) formavimusi ir bendru izoliacijos laidumo didėjimu mikrolygiu. Drėgmė XLPE izoliacijoje daro įtaką ne vienam parametru. Ji veikia poliarizacijos procesus, dielektrinių nuostolių spektrą žemuose dažniuose bei gali sudaryti sąlygas išlydžiams esant pakankamam elektriniam stresui.
2. Aukšta kintamoji įtampa sukelia elektrinį stresą izoliacijoje. Tai gali lemti erdvinių krūvių kaupimąsi ir ankstyvus degradacijos procesus. Atsižvelgiant į tai, eksperimento metu vertinama dielektrinio atsako parametru tarpusavio koreliacija ir jų taikymo galimybės izoliacijos būklės vertinimui [5,20].
3. Terminis ciklinis poveikis atspindi eksploatacines sąlygas, kai kabelio izoliacija periodiškai patiria temperatūrinius svyravimus. Svyravimai atsiranda dėl apkrovos pokyčių (dienos/nakties režimai, sezoninės apkrovos, trumpalaikės perkrovos). Terminiai ciklai gali lemti mikroįtrūkių ir struktūrinių pokyčių atsiradimą izoliacijoje, sudarant sąlygas dalinių išlydžių susidarymui. Šio veiksnio įtraukimas leidžia įvertinti, ar vien drėgmės ir elektrinio streso modeliavimas yra pakankamas ir ar būtina papildomai tirti termostreso įtaką.

Aprašyti veiksniai tiriama atskirai, o ne vienu kombinuotu bandymu. Kombinuotas poveikis yra artimesnis realiai eksploatacijai, tačiau reikšmingai apsunkina rezultatų interpretaciją. Tampa sudėtinga atriboti, kuris mechanizmas lėmė konkretų parametru pokytį. Pavyzdžiui, ar dielektrinių nuostolių padidėjimas žemuose dažniuose yra drėgmės indikatorius, ar jis susijęs su elektrinio streso

sukeltais laidumo kanalais. Atskiri tyrimai leidžia rasti aiškesnes priežasties ir pasekmės sąsajas ir kurti pagrįstas interpretavimo taisykles.

6.1.2. Pasirinkti diagnostikos metodai ir jų derinimo principas

Eksperimente taikyti diagnostikos metodai buvo parinkti atsižvelgiant į jų jautrumą skirtingiems kabelių izoliacijos būklės pokyčiams. Ypatingas dėmesys skirtas ankstyviems degradacijos požymiams, dar nepasireiškiantiems elektriniu pramušimu ar kitomis avarinėmis formomis. Metodų derinimas padeda atskirti tikrus izoliacijos defektus nuo konstrukcinių ypatumų. Problemos gali būti pastebėtos dar prieš joms tampant kritinėmis.

- Dielektrinio atsako metodai (FDS/PDC) – skirti izoliacijos poliarizacinių procesų, dielektrinių nuostolių ir laidumo komponentų analizei plačiame dažnių ir laiko diapazone. Šie metodai leidžia identifikuoti drėgmės poveikį ir ankstyvus izoliacijos senėjimo požymius. Šiame darbe jie laikyti pagrindiniais izoliacijos būklės vertinimo metodais.
- Dažninės atsako analizės metodai (FRA/SFRA) taikyti kaip konstrukcinės būklės kontrolės priemonė. Ji skirta patikrinti, ar bandymų metu neįvyko mechaninio ar geometrinio pobūdžio pakitimų. Jie gali iškraipyti dielektrinio atsako matavimų interpretaciją. Šie metodai naudoti, kad užtikrintų bandymų rezultatų patikimumą ir pakartojamumą.

6.1.3. Eksperimentinis planas ir matavimų seka

Eksperimentinis planas sudarytas iš etapų, kad būtų galima palyginti pradinę būklę su būkle po taikyto poveikio:

1. Pirmiausia paruošiami kabelių mėginiai ir nustatoma jų pradinė būklė. Pradiniai matavimai yra kritiški, nes jie apibrėžia pradinį tašką nuo kurio vėliau vertinami senėjimo pokyčiai. Šiame etape atliekami dielektrinio atsako matavimai ir dažninės reakcijos analizė.
2. Mėginiai skirstomi į grupes pagal pasirinktą poveikio tipą (drėgmė / elektrinis stresas / terminiai ciklai). Kiekvienai grupei taikomos iš anksto apibrėžtos sąlygos (trukmė, aplinka, įtampos lygis, ciklų skaičius). Šio etapo tikslas – sukelti izoliacijos būklės pokyčius, kuriuos būtų galima užfiksuoti diagnostikos metodais, nepažeidžiant izoliacijos vientisumo.
3. Po poveikio atliekami pakartotiniai dielektrinio atsako matavimai ir dažninės reakcijos analizė. Vertinant pokyčius, svarbu užtikrinti matavimo sąlygų identiškumą.
4. Paskutiniame etape rezultatai lyginami tarp skirtingų scenarijų ir mėginių grupių. Vertinama, kurie parametrai yra jautriausi konkrečiam senėjimo mechanizmui. Taip pat, vertinama, ar galima nustatyti požymių kombinacijas, kurios padidina diagnostinio sprendimo patikimumą. Šiame etape taip pat numatoma duomenų struktūrizacija tolimesnei analizei, įskaitant galimą dirbtinio intelekto priemonių taikymą. Pavyzdžiui, požymių atranką ir klasifikavimo modelių rengimo prielaidas.

6.1.4. Metodikos ribojimai ir patikimumo užtikrinimas

Prieš tiriant pagrindinius eksperimentinius poveikius buvo nustatyta tiriamo kabelio pradinė izoliacijos būklė. Ši būseną laikoma bazine tiriamojo bandinio būseną, su kuria lyginami vėliau, po drėgmės arba elektrinio streso poveikio, gauti matavimo rezultatai. Bazinė būseną šiame darbe nėra tapatinama su idealia naujo kabelio izoliacijos būseną. Ji apibrėžiama kaip konkretaus tiriamojo kabelio pradinė faktinė būklė, nustatyta prieš papildomą poveikį.

Pradinės būklės nustatymas grindžiamas dviem informacijos šaltiniais: gamintojo techniniais duomenimis ir pradiniu DIRANA / FDS matavimu. Gamintojo techniniai duomenys naudojami kaip nominali kabelio konstrukcinių ir elektrinių parametrų atskaita. Pradinis DIRANA / FDS matavimas – kaip faktinė konkretaus bandinio dielektrinio atsako charakteristika. Pagrindiniai bazinės būklės vertinimo parametrai yra kabelio talpa, dielektrinių nuostolių tangentas $\tan\delta$, FDS kreivės forma ir matavimo temperatūra.

Eksperimentinė metodika laboratorinėmis sąlygomis turi ribojimų. Tiriami kabelių mėginiai yra trumpesni nei realios eksploatuojamos 110 kV kabelių linijos, todėl dalis reiškinių gali skirtis nuo lauko sąlygų. Be to, eksperimentuose sąmoningai atskiriami skirtingi poveikio veiksniai. Dėl to rezultatai apibūdina konkretaus poveikio sukeltus izoliacijos dielektrinių savybių pokyčius, nors praktikoje keli veiksniai dažnai veikia kartu. Toks tyrimo principas pasirinktas siekiant sudaryti interpretavimo pagrindą. Atskirai įvertinus drėgmės ir elektrinio streso poveikio požymius, vėliau galima pagrįsčiau analizuoti kombinuotas izoliacijos degradacijos situacijas. Pagrindinis dėmesys skiriamas pradinės ir po poveikio gautos FDS charakteristikos palyginimui.

Tyrimo patikimumui užtikrinti metodikoje numatyta:

- pradinės kabelio izoliacijos būklės fiksacija prieš poveikį;
- gamintojo techninių duomenų ir pradinio DIRANA / FDS matavimo rezultatų palyginimas;
- vienodos matavimo procedūros ir įrangos konfigūracijos naudojimas;
- matavimo temperatūros ir kitų sąlygų fiksavimas;
- rezultatų lyginimas pagal absoliučias reikšmes ir pokyčių tendencijas;
- pradinės ir po poveikio gautos FDS charakteristikos palyginimas.

6.2. Tiriamieji objektai, mėginių paruošimas ir žymėjimas

Šiame skyriuje aprašyti eksperimentų metu naudoti objektai, jų parinkimo priežastys. Aprašytas jų grupavimas ir žymėjimo principai. Taip pat, objektų paruošimas bei duomenų identifikavimo ir dokumentavimo principai.

6.2.1. Tiriamieji objektai ir parinkimo motyvai

Tyrimai atlikti su vieno tipo XLPE izoliacijos kabelio segmentais, siekiant eliminuoti laidininko įtaką ir vertinti tik izoliacijos būklę. Pasirinktas tyrimo objektas – 2XS(FL)2Y-SC-AR-WTC 1×300

RM/185 tipo kabelis su variniu laidininku. Šio kabelio pasirinkimas leidžia vertinti, ar dielektrinio atsako pokyčiai pirmiausia atspindi XLPE izoliacijos būklę, o ne kabelio konstrukcines ypatybes, tokias kaip laidininko skerspjūvis ar ekrano konstrukcija.



10 pav. Tiriamųjų kabelių segmentų bendras vaizdas

6.2.2. Mėginių grupavimas ir žymėjimo logika

Mėginiai sugrupuoti po tris vienetus kiekvienai senėjimo scenarijų grupei. Tokia struktūra pasirinkta siekiant turėti vienodus mėginius skirtingiems senėjimo scenarijams. Taip pat su tikslu sudaryti galimybę dalį bandymų atlikti su analogiškais mėginiais, skirtais patikros matavimams arba rezultatų pakartojamumo įvertinimui. Siekta užtikrinti, kad skirtingų senėjimo veiksmių poveikis nebūtų taikomas tam pačiam kabelio segmentui ir jų įtaka būtų vertinama atskirai. Mėginių žymėjimas parinktas paprastas ir nuoseklus. Skaitmeninis indeksas (1, 2 arba 3) nurodo priskirtą senėjimo scenarijų arba bandymo tipą:

- 1 mėginys skirtas drėgmės poveikio scenarijui;
- 2 mėginys – aukštos įtampos (elektrinio streso) scenarijui;
- 3 mėginys – terminio ciklinio streso scenarijui.

6.2.3. Mėginių paruošimas prieš bandymus

Prieš taikant senėjimo scenarijus, kabelio segmentai paruošiami iš anksto. Pagrindinis tikslas – kad visi matavimai būtų atliekami tomis pačiomis elektrinėmis sąlygomis ir būtų tarpusavyje palyginami. Dėl to kabelio segmentai parenkami vienodo ilgio ir panašios geometrijos. Taip sumažinama talpinių parametrų įtaka ir suvienodinamos matavimo sąlygos.

Prieš dielektrinio atsako ir dalinių išlydžių matavimus paruošiami kabelio galai. Turi būti užtikrintas stabilus kontaktas su laidininku, ekranu ir, jei taikoma, įžeminimu. Tam nuimamas išorinis apvalkalas, ekranas suformuojamas vienodu perimetru, o kontaktiniai paviršiai nuvalomi. Siekiant sumažinti paklaidą, visiems mėginiams taikoma ta pati prijungimo schema. Naudojama ta pati matavimo konfigūracija, kad skirtingų bandymų rezultatai būtų palyginami. Po paruošimo kiekvienam mėginiui atliekamas pradinis matavimas, kuris vėliau naudojamas kaip atskaitos taškas. Remiantis šiuo tašku vertinti pokyčiai po drėgmės, elektrinio ar terminio poveikio. Pagrindiniai grafikai įterpiami atitinkamuose poskyriuose pagal bandymo scenarijus.

6.3. Naudota įranga, matavimo konfigūracija ir duomenų registravimas

Šiame skyriuje aprašoma eksperimente naudota įranga, prijungimo ir ekranavimo principai. Taip pat aprašoma FDS/PDC matavimo eiga. Aprašoma dažninės reakcijos analizė. Aprašoma tyrimo aplinka ir saugos priemonės.

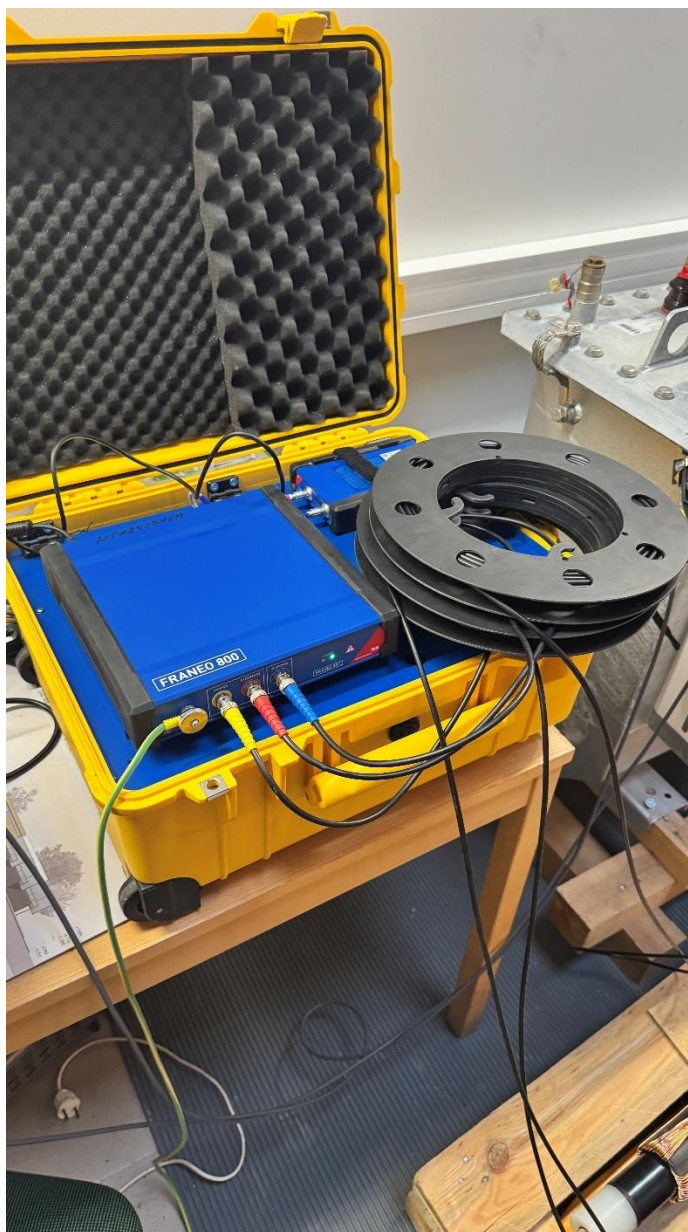
6.3.1. Naudota įranga ir jos paskirtis

Eksperimentiniams matavimams parinkta įranga orientuota į du pagrindinius tikslus. Pirmiausia siekiama gauti izoliacijos giluminius dielektrinio atsako parametrus (FDS/PDC). Tada papildomai patikrinti, ar po taikyto streso neatsirado konstrukcinių ar geometrinių pokyčių, kurie galėtų klaidinti interpretaciją (FRA/SFRA principu). Įrangos parinkimas derintas prie laboratorinių galimybių atlikti padidintos įtampos senėjimo bandymą.

Eksperimente naudota:

- OMICRON DIRANA – dielektrinio atsako matavimo sistema, taikyta FDS, PDC režimams. Ši įranga pasirinkta kaip pagrindinis diagnostikos šaltinis, nes leidžia vienoje platformoje surinkti tarpusavyje palyginamus duomenis.
- OMICRON FRANEO 800 – dažninės reakcijos analizės (FRA/SFRA) sistema. Ji taikyta kaip kontrolinis metodas. Siekta patikrinti, ar po eksperimento neatsirado konstrukcinių pokyčių, galinčių pasireikšti laidininko–ekrano sąveikos ar bendros elektrinės struktūros pakitimais.
- Doble DFA300 – universalus dalinių išlydžių detektorius ir analizatorius. Jis skirtas PD požymių paieškai ir analizei, neatjungiant įrenginio nuo tinklo. Įrenginys turi akustinės emisijos (AE) ir ultra aukšto dažnio (UHF) duomenų paėmimo kanalus.
- Doble DA100 kryptinė antena (angl. *Directional Antenna*) skirta tikslinti radio dažnių trukdžių (RFI) ir dalinių išlydžių (PD) šaltinių vietą. Antena gali būti naudojama laikant rankoje arba montuojama ant trikojo.

- Aukštos kintamosios įtampos šaltinis taikytas elektrinio streso bandymui. Jo metu kabelio mėginys buvo veikiamas 100 kV AC įtampa.
- Zwick/Roell BT1-FR050TH.A1K – universali medžiagų bandymo mašina skirta tempti arba gniuždyti. Ji naudota mėginių tempimo bandymams, mechaninių savybių įvertinimui. Šiame darbe ji laikoma pagrindine įranga mechaninių charakteristikų nustatymui pagal pasirinktą bandymų metodiką.
- Memmert CTC256 – klimatinė aplinkos bandymų kamera, naudota terminio streso scenarijui.

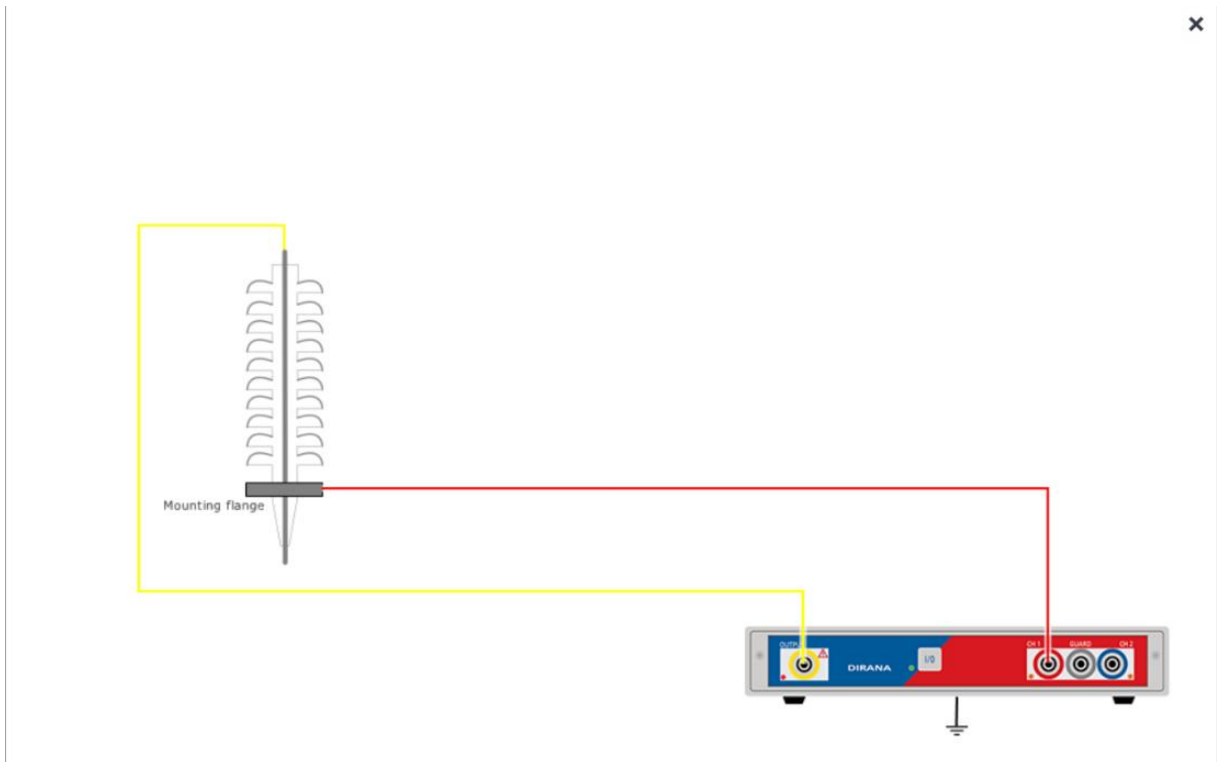


11 pav. Omicron FRANEO 800 darbo režime

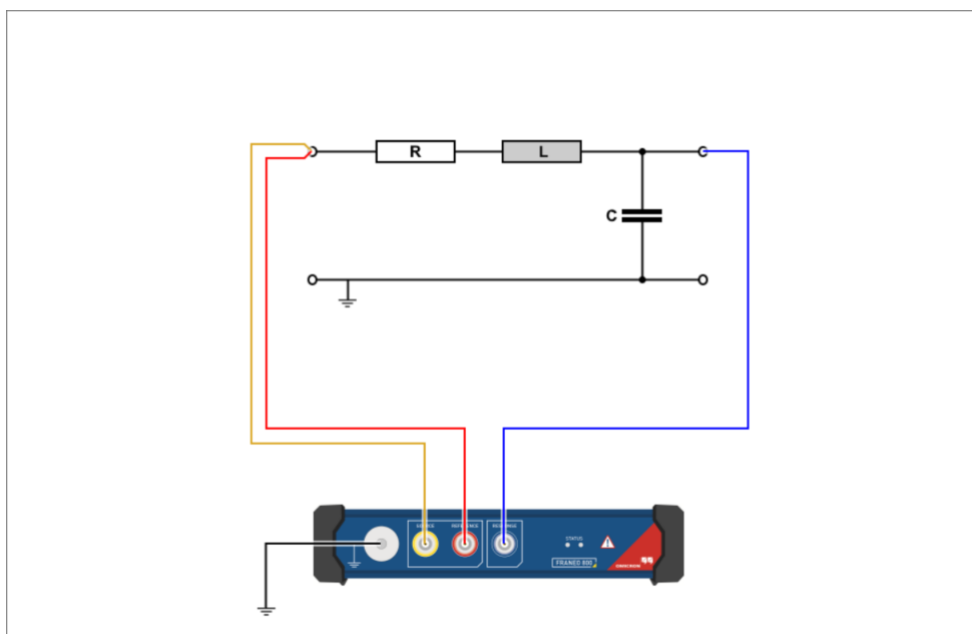
6.3.2. Matavimo grandinė, prijungimas ir ekranavimo principai

Kad dielektrinio atsako ir dalinių išlydžių matavimai būtų patikimi, būtina sumažinti pašalinių veiksnių ir elektromagnetinių trikdžių įtaką. Dėl to visiems kabelio mėginiams taikyti tie patys matavimo principai:

- Kiekvienas mėginys prijungiamas identišškai, išlaikant tą pačią matavimo schemą. Laidininkas visada jungiamas prie matavimo įėjimo, o kabelio ekranas – prie grįžtamosios šakos ir įžeminimo. Matavimo įrangos korpusas taip pat įžeminamas.
- Kabelio ekranas sujungiamas tvarkingai, vengiant papildomų kilpų ir atsitiktinių kontaktų su aplinkinėmis metalinėmis konstrukcijomis. Taip sumažinama nepageidaujamų srovių ir triukšmo tikimybė.
- Matavimai atliekami kuo panašesnėmis aplinkos sąlygomis. Fiksuojama aplinkos temperatūra, nes jos pokyčiai gali turėti įtakos dielektrinių nuostolių reikšmėms.
- Po kiekvieno bandymo kabelis saugiai iškraunamas ir sulyginami potencialai. Tai ypač svarbu po PDC matavimų ir po aukštos įtampos senėjimo bandymo.



12 pav. Bendroji matavimo prijungimo schema dielektriniam atsakui (DIRANA) – laidininkas, ekranas, žemė, matavimo laidai, ekranuoti laidai.



13 pav. FRANEО 800 prijungimo schema (FRA/SFRA principas) – matavimo taškai, referencinė schema, įžeminimas.

6.3.3. Dielektrinio atsako (FDS/PDC) matavimo procedūra

Dielektrinio atsako matavimai atlikti OMICRON DIRANA sistema, taikant du režimus:

- FDS (dažninė dielektrinė spektroskopija) – registruojama talpos ir dielektrinių nuostolių priklausomybė nuo dažnio.
- PDC (poliarizacijos ir depoliarizacijos srovės) – registruojama srovės dinamika laike, prijungus ir atjungus įtampą. Metodus padeda identifikuoti poliarizacinių procesų pokyčius ir netiesiogiai atspindi izoliacijos būklę.

Kad vėlesnė analizė būtų palyginama, kiekvienam mėginiui naudota ta pati matavimo eiga.

DIRANA Test			
Measurement profile	Spare bushing	Measurement sequence	FDS and PDC with depolarization measurement
Execution date	2025-11-08	Asset with screen electrode	no
Start frequency	1 kHz	Oil temperature	18,5 °C
Stop frequency	10 μHz	Ambient temperature	24 °C
FDS voltage	50 V	Weather	Clear
PDC voltage	200 V	Humidity	56 %
Test set			
Serial no.	HA726X	Firmware	112
Hardware	DRA 2		

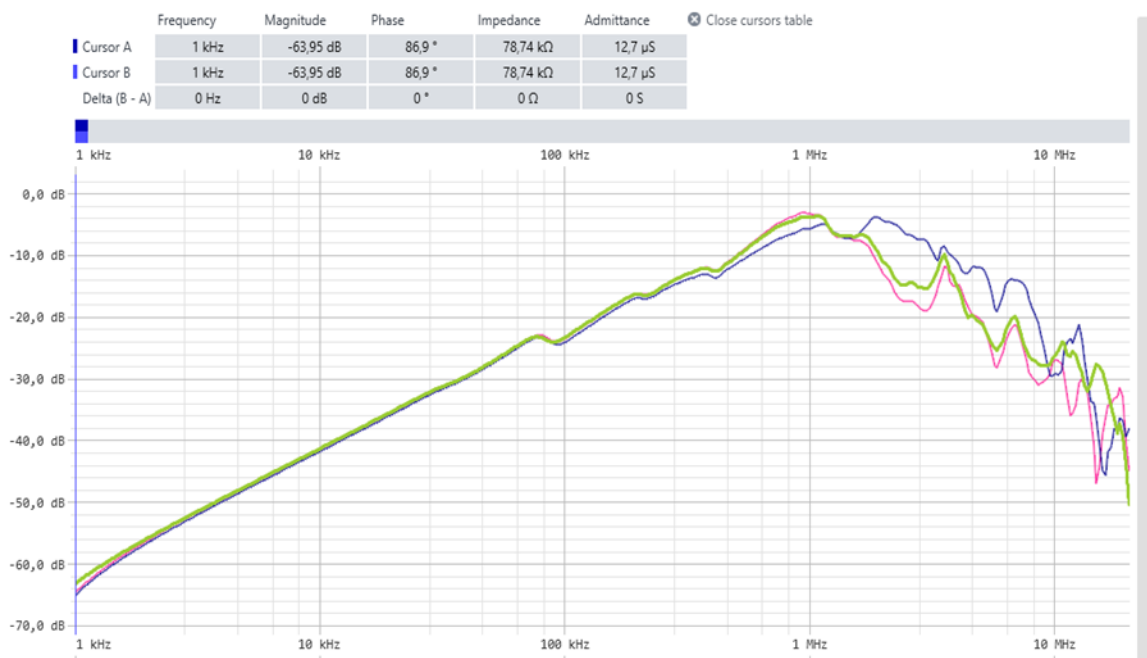
14 pav. DIRANA matavimo nustatymai pagal režimą

6.3.4. Dažninės reakcijos analizė (FRANEO) kaip kontrolinis metodas

FRANEO sistema taikyta papildomam kontroliniam matavimui. Taip siekta patikrinti, ar po eksperimentų neatsirado konstrukcinių pokyčių, kurie galėtų keisti bendrą struktūrą. Pavyzdžiui, kontaktų pasikeitimai, mechaniniai pažeidimai. FRANEO rezultatų paskirtis padėti atskirti, ar stebimi FDS/PDC pokyčiai yra medžiaginės XLPE degradacijos, ar galimų konstrukcinių pakitimų pasekmė. FRANEO matavimai atliekami prieš senėjimo poveikį ir po poveikio.

Gaunami rezultatai:

- Perdavimo charakteristikos amplitudė [dB] - Parodo kaip stipriai objektas perduoda signalą skirtinguose dažniuose. Amplitudės pokyčiai leidžia pastebėti konstrukcinius ar izoliacinius pakitimus.
- Fazės kampas [°] parodo srovės ir įtampos fazinį santykį matavimo metu. Jo kitimas atspindi, ar izoliacijos elektrinis atsakas yra labiau talpinio, ar nuostolingo pobūdžio.



15 pav. tipinė FRANEO dažninės charakteristikos kreivė

6.4. Drėgmės poveikio XLPE izoliacijai tyrimas

Šiame skyriuje aprašomas drėgmės poveikio bandymas, jo objektas ir scenarijus. Taip pat aprašoma matavimų seka ir palyginimas, bei patekiami FDC ir PDC matavimų rezultatai.

6.4.1. Bandymo tikslas ir hipotezė

Drėgmės poveikio bandymo tikslas – įvertinti, kaip kontroliuojamas drėgmės poveikis keičia XLPE izoliacijos dielektrinio atsako rodiklius (FDS/PDC). Taip pat, ar po drėgmės poveikio atsiranda požymių, kurie būtų siejami su vandens medžių formavimosi pradžia ar bendru laidumo komponento didėjimu. Po drėgmės poveikio tikėtinas dielektrinių nuostolių padidėjimas žemų dažnių ruože.

6.4.2. Bandymo objektas ir poveikio scenarijus

Drėgmės poveikis taikytas **1A** kabelio segmentui. Mėginys buvo veikiamas drėgmės pagal pasirinktą scenarijų:

- terpė: vandentiekio vanduo;
- poveikio tipas: pilnas panardinimas;
- trukmė: 30 k.d.;
- temperatūra bandymo metu: kambario temperatūra 18-23 laipsniai celsijaus.

6.4.3. Matavimų seka ir palyginimo principas

Siekiant palyginamumo, kiekvienam drėgmės bandymo mėginiui(-iams) atlikta tokia matavimo seka:

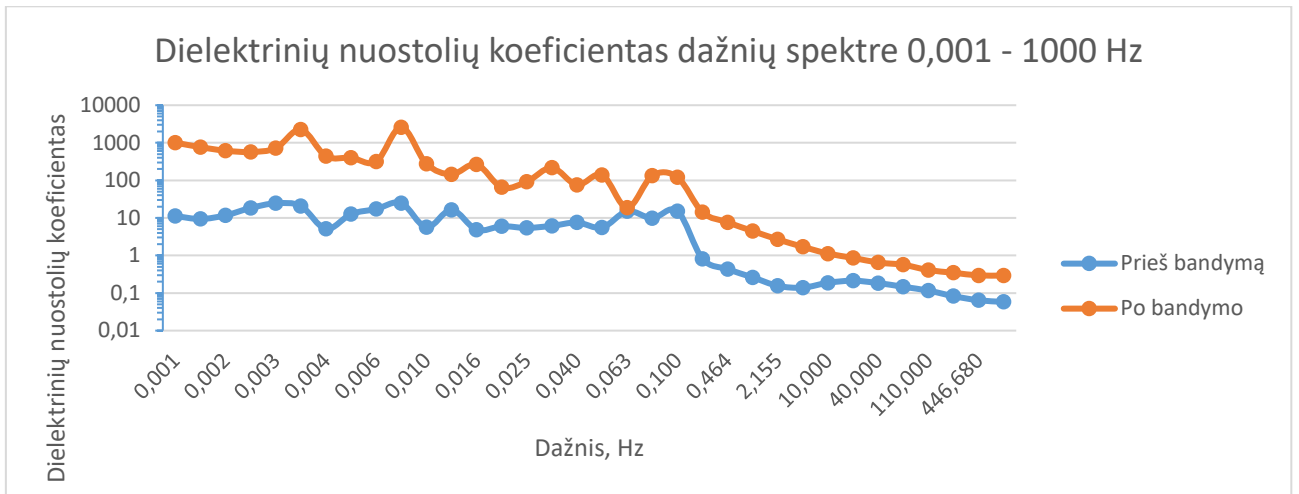
1. bazinė būklė (prieš poveikį)
2. drėgmės poveikis pagal 6.4.2;
3. būklė po poveikio;
4. kontrolinis FRANEO matavimas, siekiant patikrinti, ar nėra konstrukcinių pakitimų.

6.4.4. Bandymo rezultatų pateikimas ir analizė

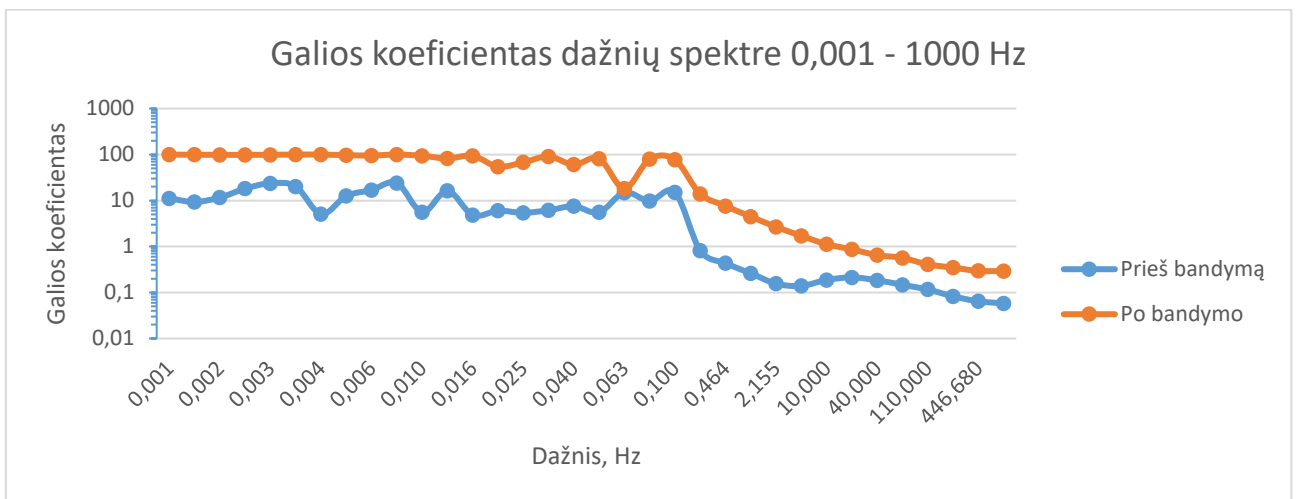
Atliekant bandymą gauti šie rezultatai:

- Dielektrinių nuostolių koeficientas ($\text{tg } \delta$) – parodo kiek energijos izoliacijoje prarandama šilumos pavidalu. Kuo $\text{tg } \delta$ didesnis, tuo izoliacija blogesnės būklės. Dažniausiai dėl drėgmės, senėjimo ar vidinių defektų.
- Galios koeficientas (angl. *Power factor*) – parodo, kokia dalis energijos tampa nuostoliais, o ne kaupiama elektriniame lauke.
- Aktyvioji talpos dedamoji (C') – apibūdina energijos kaupimą izoliacijoje ir yra daugiausia nulemta kabelio konstrukcijos bei dielektrinių savybių. Defektų atveju kinta nežymiai.

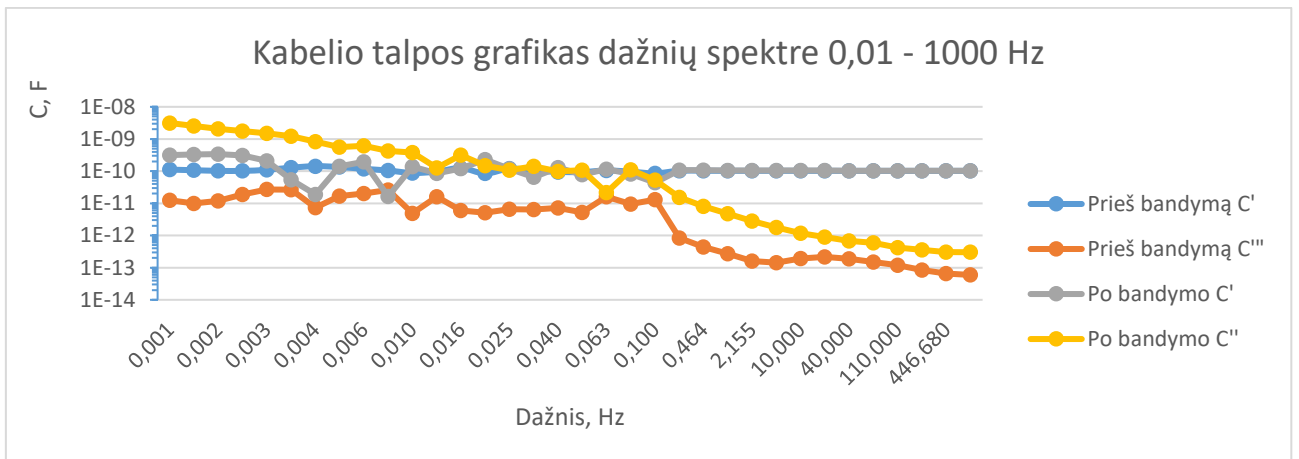
- Nuostolinė talpos dedamoji (C'') – tai talpos dalis, susijusi su energijos nuostoliais izoliacijoje. C'' didėjimas dažnai rodo drėgmę, izoliacijos senėjimą arba mikrodefektus.



16 pav. Dielektrinių nuostolių koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz



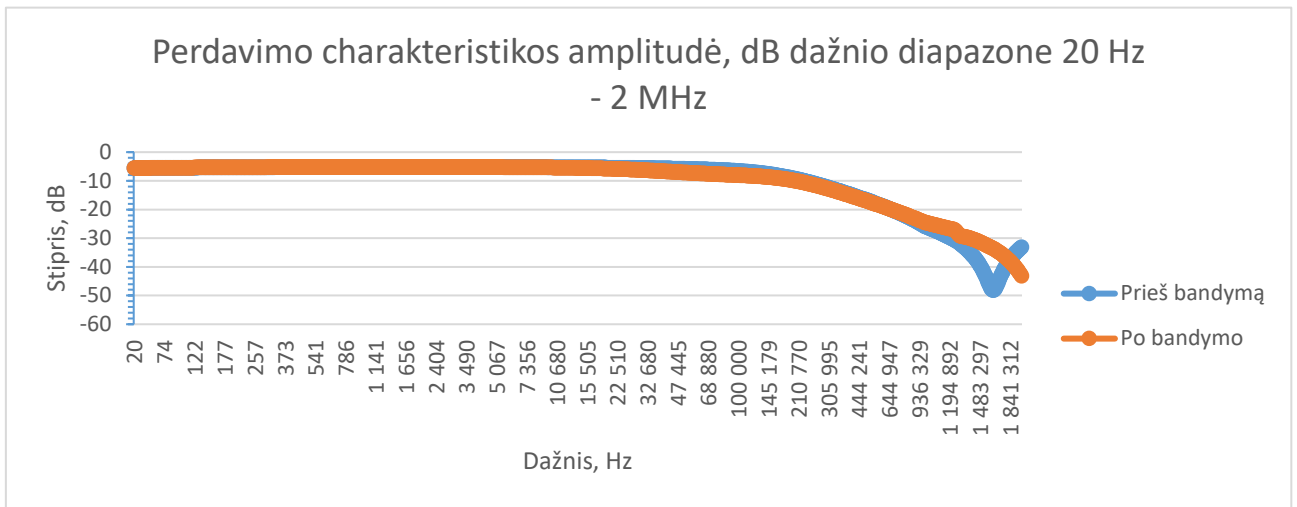
17 pav. Galios koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz



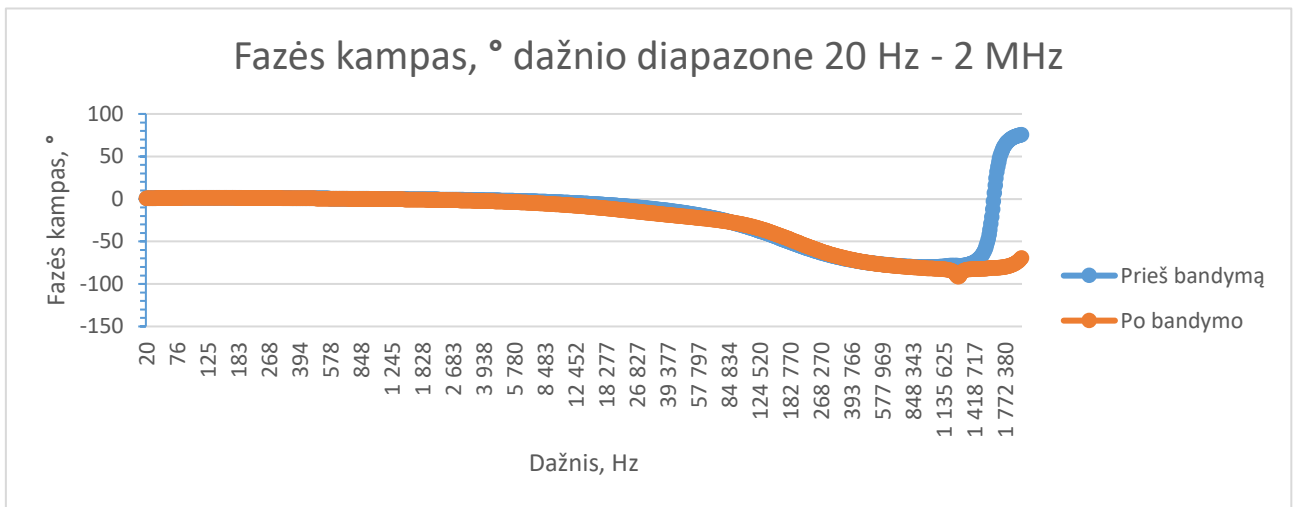
18 pav. Kabelio talpos grafikas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz

6.4.5. FRANEO kontrolinis matavimas

Šiame poskyryje pateikiamas prieš ir po palyginimas. FRANEO taikymo tikslas – įsitikinti, kad stebimi dielektrinio atsako pokyčiai nėra nulemti konstrukcinio pobūdžio pakitimų.



19 pav. Perdavimo charakteristikos amplitudė, dB



20 pav. Fazės kampas, ° dažnio diapazone

6.4.6. Drėgmės poveikio rezultatų apibendrinimas

Dažninės dielektrinių parametru analizės metu buvo įvertinti kabelio izoliacijos pokyčiai prieš bandymą ir po bandymo 0,001–1000 Hz dažnių diapazone. Analizuotas dielektrinių nuostolių koeficientas $\text{tg } \delta$, galios koeficientas, aktyvioji talpos dedamoji C' ir nuostolinė talpos dedamoji C'' .

16 paveiksle pateiktos $\text{tg } \delta$ priklausomybės nuo dažnio. Prieš bandymą $\text{tg } \delta$ reikšmės žemų dažnių srityje (iki $\sim 0,1$ Hz) yra nedidelės ir kinta tolygiai. Tai būdinga geros būklės XLPE izoliacijai. Po bandymo stebimas ryškus $\text{tg } \delta$ padidėjimas visame žemų dažnių diapazone, ypač iki 1 Hz. Tokie pokyčiai rodo padidėjusius laidumo ir lėtosios poliarizacijos procesus izoliacijoje. Dažniausiai jie

siejami su drėgmės poveikiu arba izoliacijos senėjimu. Aukštesniuose dažniuose $\text{tg } \delta$ reikšmės mažėja, tačiau išlieka didesnės nei prieš bandymą [23, 30].

17 paveiksle pateiktas galios koeficiento dažninis pasiskirstymas. Prieš bandymą galios koeficientas išlieka stabilus ir mažas, ypač aukštesniuose dažniuose. Tai rodo nedidelius aktyviuosius nuostolius. Po bandymo galios koeficientas reikšmingai padidėja žemų dažnių srityje, patvirtindamas, kad padidėjo energijos nuostoliai izoliacijoje. Ši tendencija siejasi su $\text{tg } \delta$ rezultatų pokyčiais ir patvirtina izoliacijos dielektrinių savybių pablogėjimą. Mažos ir tolygiai kintančios galios koeficiento reikšmės visame dažnių diapazone rodo, kad izoliacijoje vyrauja nedideli aktyvieji nuostoliai. Jos dielektrinis elgesys atitinka normalią būklę, kaip aprašoma literatūroje [30].

18 paveiksle pateiktos aktyviosios (C') ir nuostolinės (C'') talpos dedamųjų priklausomybės nuo dažnio. Aktyvioji talpa dedamoji C' prieš bandymą ir po bandymo kinta nežymiai ir išlieka beveik pastovi visame dažnių diapazone. Tai rodo, kad kabelio konstrukciniai parametrai nepakito. Tuo tarpu nuostolinė talpa dedamoji C'' po bandymo žemų dažnių srityje padidėja kelis kartus. Tai aiškiai indikuoja papildomų dielektrinių nuostolių atsiradimą izoliacijoje, susijusį su defektų ar drėgmės suaktyvėjimu.

Gauti dažninės dielektrinio atsako analizės rezultatai rodo, kad izoliacijos drėgmės padidėjimas labiausiai pasireiškia žemų dažnių srityje. Būtent čia pastebėtas didelis dielektrinių nuostolių koeficiento $\text{tg } \delta$, galios koeficiento ir nuostolinės talpos dedamosios C'' augimas. Aktyviosios talpos dedamosios C' stabilumas patvirtina, kad drėgmės poveikis pirmiausia keičia izoliacijos laidumo ir poliarizacijos procesus, nepažeidžiant jos geometrinių parametrų. Tai patvirtina dažninės dielektrinio atsako analizės tinkamumą ankstyviems, drėgmės sukeltiems izoliacijos degradacijos požymiams [32].

FRANEO kontrolinis matavimas parodė nedidelius perdavimo charakteristikos amplitudės ir fazės kampo pokyčius aukštų dažnių srityje. Ryškiausi skirtumai matomi virš kelių šimtų kHz, ypač artėjant prie 1–2 MHz diapazono. Tai rodo, kad bandymas galėjo turėti įtakos aukšto dažnio atsakui, kuris labiau priklauso nuo parazitinių talpų, induktyvumų, ekranavimo ir kontaktinių jungčių būklės.

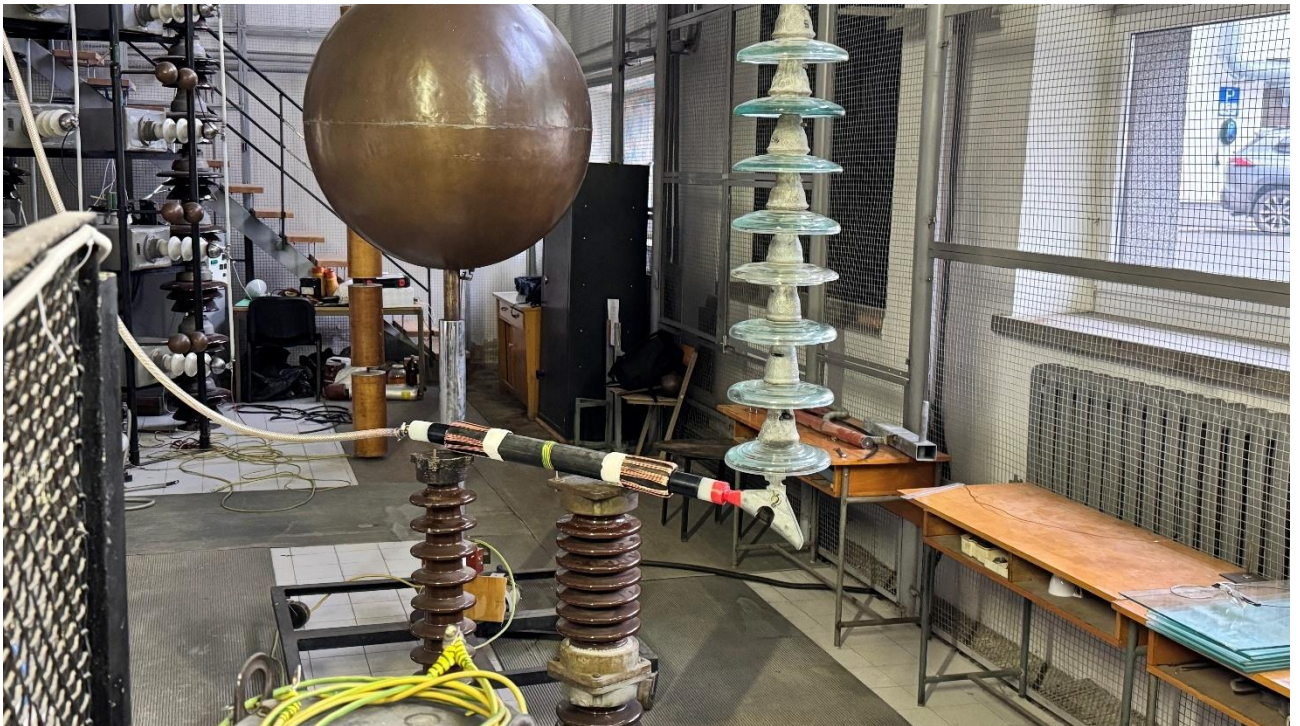
Visgi žemų ir vidutinių dažnių srityje kreivės prieš bandymą ir po bandymo išlieka artimos. Todėl ryškaus kabelio izoliacijos struktūros ar pagrindinių geometrinių parametrų pokyčio nenustatyta. FRANEO rezultatai šiuo atveju vertinami kaip papildomas kontrolinis matavimas, patvirtinantis, kad pagrindiniai izoliacijos būklės pokyčiai labiau atsispindi FDS/PDC analizėje, o ne aukšto dažnio perdavimo charakteristikose.

6.5. Aukštos įtampos ir srovės (elektrinio streso) poveikio XLPE izoliacijai tyrimas

Šiame skyriuje aprašomas elektrinio streso bandymo tikslas, objektas ir poveikio scenarijus. Taip pat aprašomos FDS ir PDC matavimo sekos bei rezultatai. Aprašomas FRANEO matavimas.

6.5.1. Bandymo tikslas

Elektrinio streso bandymo tikslas – įvertinti, kaip padidintos kintamosios įtampos poveikis keičia XLPE izoliacijos būklės rodiklius, vertinamus dielektrinio atsako metodais. Padidintas elektrinis laukas gali sukelti dielektrinių nuostolių pokyčius ir pakeisti izoliacijos laiko srities atsaką. Priklausomai nuo pradinės būklės, tai gali didinti dalinių išklydžių pasireiškimo tikimybę.



21 pav. Aukštos įtampos senėjimo bandymas su prijungtu mėginiu 3A (bendras vaizdas).

6.5.2. Bandymo objektas ir poveikio scenarijus

Elektrinis stresas taikytas mėginiui 3A Bandymo scenarijus:

- įtampos tipas: kintamoji įtampa (AC);
- įtampos lygis: 100 kV ir 5A;
- srovės lygis: 10 V ir 800A;
- dažnis: 50 Hz;

- poveikio trukmė: 4 val. 30 min. įtampai ir 1 val. 30 min srovei;
- papildomos sąlygos: įtampa palaipsniui keliama iki 100 kV kas 45 min.

6.5.3. Matavimų seka ir palyginimo principas

Siekiant palyginimo, elektrinio streso bandymo mėginiui atlikta tokia seka:

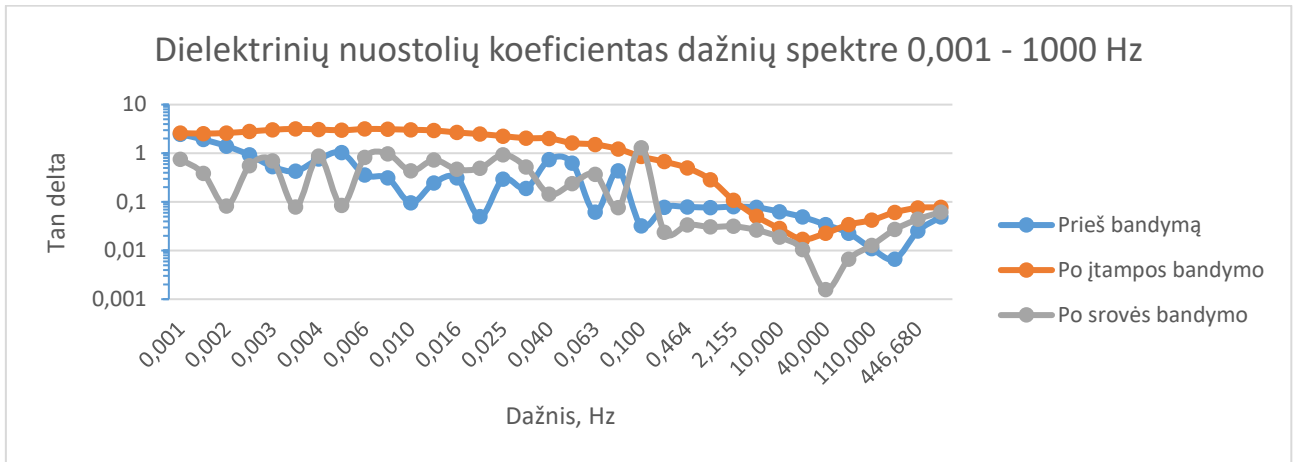
- Bazinis dielektrinis įvertinimas prieš poveikį;
- Elektrinio lauko poveikis;
- Dielektrinis įvertinimas po įtampos poveikio;
- Apkrovos srovės poveikis;
- Dielektrinis įvertinimas po srovės poveikio;
- FRNEO kontrolė.



22 pav. Srovės streso bandymas.

6.5.4. Bandymo rezultatų pateikimas ir analizė

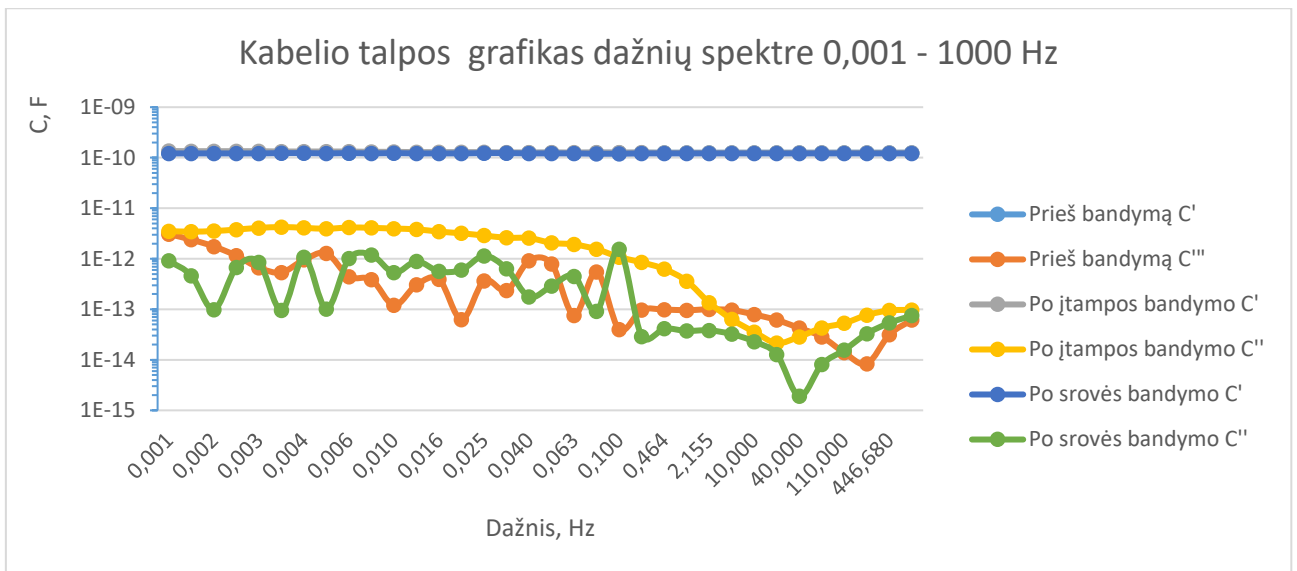
Atliekant bandymą matavimai gauti kaip ir 6.4.4 poskyryje



23 pav. Dielektrinių nuostolių koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz



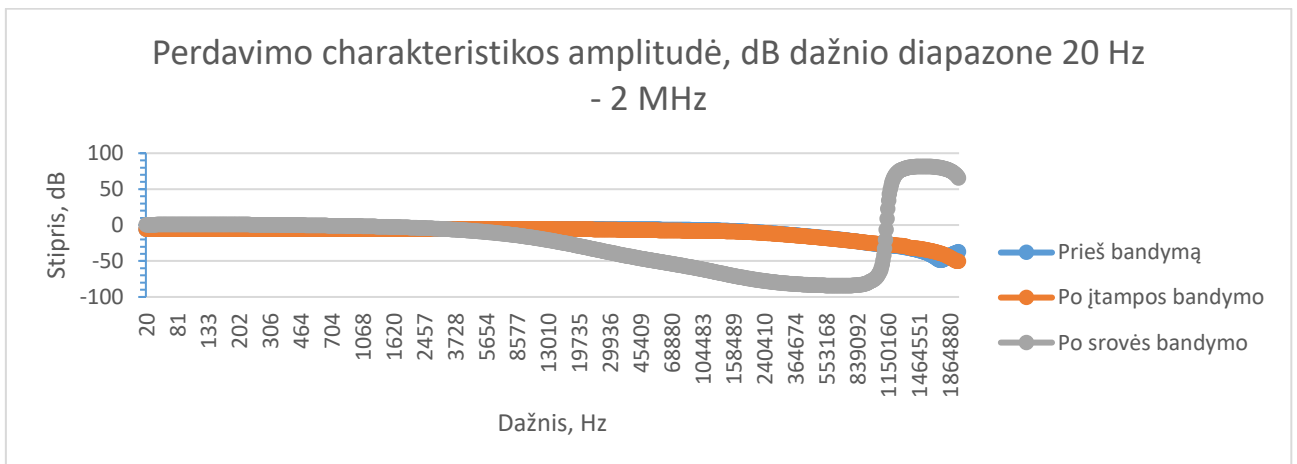
24 pav. Galios koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz



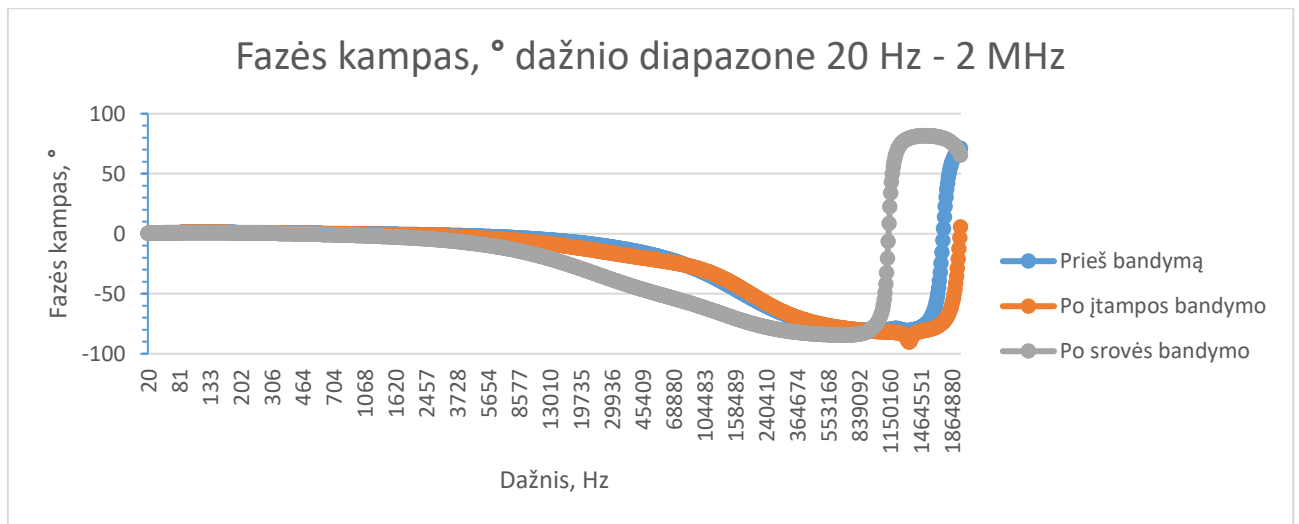
25 pav. Kabelio talpos grafikas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz

6.5.5. FRANEO kontrolinis matavimas

Šiame poskyryje pateikiamas prieš ir po palyginimas. FRANEO taikymo tikslas – įsitikinti, kad stebimi dielektrinio atsako pokyčiai nėra nulemti konstrukcinio pobūdžio pakitimų.



26 pav. Perdavimo charakteristikos amplitudė, dB



27 pav. Fazės kampas, ° dažnio diapazone

6.5.6. Elektrinio streso bandymo rezultatų apibendrinimas

Elektrinio streso bandymų metu dielektrinio atsako parametrai buvo vertinti trijose būsenose. Prieš poveikį, po aukštos įtampos bandymo (100 kV, 4 val. 30 min.) ir po apkrovos srovės bandymo (800 A, 1 val. 30 min.). Analizuotos tg δ , galios koeficiento bei aktyviosios (C') ir nuostolinės (C'') talpos dedamųjų dažninės priklausomybės 0,01–1000 Hz diapazone.

Dielektrinių nuostolių koeficiento tg δ dažninėse charakteristikose po 100 kV bandymo pastebėtas didelis reikšmių padidėjimas žemų dažnių srityje. Jis rodo sustiprėjusius poliarizacijos ir laidumo procesus izoliacijoje. Po 800 A srovės bandymo tg δ reikšmės kai kuriuose dažniuose sumažėja arba tampa labiau išsklaidytos. Tai siejama su terminio poveikio sukeltu dielektrinių nuostolių persiskirstymu. Galios koeficiento rezultatai rodo panašias tendencijas. Po įtampos bandymo didėja aktyvieji nuostoliai žemų dažnių srityje. Po srovės bandymo jie dalinai sumažėja, bet negrįžta į pradinį lygį.[23]

Aktyvioji talpos dedamoji C' visose būsenose išlieka beveik pastovi. Tai patvirtina, kad kabelio geometriniai ir konstrukciniai parametrai bandymų metu nepakito. Tuo tarpu nuostolinė talpos dedamoji C'' po aukštos įtampos bandymo padidėja žemų dažnių srityje. Po srovės bandymo stebimi papildomi jos pokyčiai: žemų dažnių srityje C'' reikšmės iš dalies sumažėja, tačiau išlieka didesnės ir labiau netolygios nei prieš bandymą. Jie siejami su terminio streso įtaka izoliacijos nuostolių mechanizmams. Jie siejami su terminio streso įtaka izoliacijos nuostolių mechanizmams.

Dažninė dielektrinio atsako analizė leidžia atskirti elektrinio lauko ir apkrovos srovės sukeltus izoliacijos pokyčius, pagal jų pasireiškimo pobūdį ir dažninę priklausomybę. Dėl to šis metodas tinkamas lokalizuotam izoliacijos būklės vertinimui po skirtingo tipo elektrinio ir terminio streso.

FRANEO kontrolinis matavimas parodė perdavimo charakteristikos amplitudės ir fazės kampo pokyčius aukštų dažnių srityje. Po 100 kV įtampos bandymo amplitudės kreivė išlieka artima pradinei iki kelių dešimčių kilohercų, tačiau aukštesniame dažnių diapazone atsiranda nedidelių skirtumų. Po 800 A srovės bandymo pokyčiai tampa ryškesni – amplitudė nuo kelių kilohercų palaipsniui mažėja, o apie 0,1–0,2 MHz dažnių srityje matomas staigus rezonansinis pokytis.

Fazės kampo charakteristikos patvirtina tą pačią tendenciją. Prieš bandymą ir po įtampos bandymo fazės kreivės išlieka panašios, o po srovės bandymo fazės kampas aukštų dažnių srityje pasikeičia ryškiausiai. Tai rodo, kad apkrovos srovės sukeltas terminis poveikis turėjo didesnę įtaką aukšto dažnio atsakui nei vien aukštos įtampos poveikis. Šie pokyčiai labiau siejami su parazitinių talpų, induktyvumų, ekranavimo arba kontaktinių jungčių įtaka, o ne su bendru kabelio izoliacijos geometriniu pažeidimu.

6.6. Terminio streso poveikio XLPE izoliacijai tyrimas

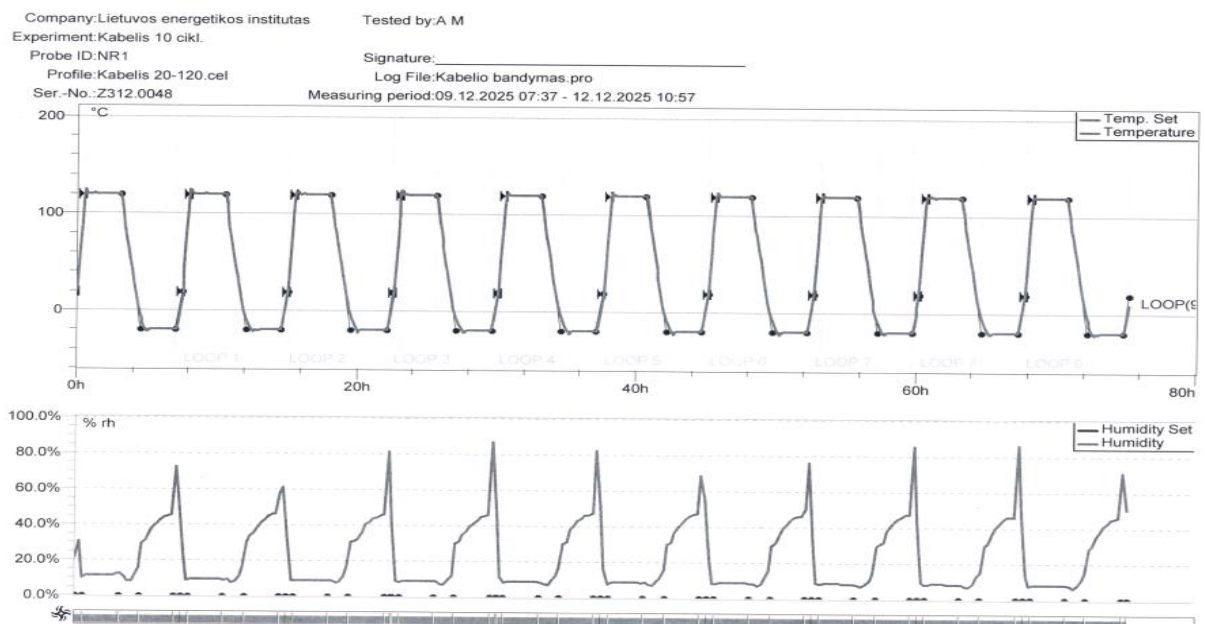
Terminio streso bandymo metu kabelio izoliacija buvo veikiamą pakartotiniais temperatūros ciklais, keičiant temperatūrą nuo aplinkos iki padidintos vertės. Taip siekta įvertinti šiluminio ciklavimo įtaką izoliacijos savybėms.

6.6.1. Bandymo tikslas

Terminio streso bandymo tikslas – įvertinti, kaip pakartotiniai temperatūros ciklai veikia XLPE kabelio izoliacijos dielektrines savybes. Bandymo metu siekiama nustatyti, ar šiluminis ciklavimas sukelia išmatuojamus dielektrinio atsako parametrų pokyčius. Šis bandymas leidžia įvertinti kaip izoliacija reaguoja į temperatūros pokyčius. Eksploatacijos metu kabeliai nuolat veikiami šilumos. Temperatūros kaita yra susijusi su apkrovos kitimu, aplinka ir laidininko įšilimu. Dėl to terminis poveikis yra vienas iš veiksnių, galinčių keisti izoliacijos elektrines savybes.

6.6.2. Bandymo objektas ir poveikio scenarijus

Bandymui naudotas XLPE izoliacijos kabelio mėginys. Terminis poveikis sukurtas taikant pakartotinius šildymo ir aušinimo ciklus. Temperatūra buvo keliami iki padidintos vertės ir vėliau mažinama. Taip imituotas ciklinis šiluminis poveikis izoliacijai. Pagal bandymo registravimo duomenis, buvo atlikta 10 temperatūrinių ciklų. Temperatūros grafike matyti periodišką temperatūros kitimą nuo aplinkos temperatūros iki padidintos temperatūros lygio. Kartu buvo registruojama drėgmė, kuri bandymo metu kito priklausomai nuo temperatūros režimo. Tokio bandymo paskirtis – sudaryti sąlygas, kuriomis gali pasireikšti šiluminio poveikio sukelti izoliacijos parametrų pokyčiai. Čia vertinami ne mechaniniai pažeidimai, o jų galimas poveikis dielektriniam atsakui.



28 pav. Terminio streso bandymo ataskaita

6.6.3. Matavimų seka ir palyginimo principas

Siekiant įvertinti terminio streso poveikį, dielektrinio atsako matavimai atliekami prieš temperatūrinį ciklavimą ir po jo. Tokia seka leidžia palyginti pradinę izoliacijos būklę su būsena po terminio poveikio. Palyginimui naudojami tie patys diagnostiniai parametrai kaip ir ankstesniuose bandymuose: dielektrinių nuostolių koeficientas $\text{tg } \delta$, galios koeficientas, aktyvioji talpos dedamoji C' ir nuostolinė talpos dedamoji C'' . Taip išlaikomas vienodas rezultatų vertinimo principas ir galimybė lyginti terminio streso poveikį su drėgmės bei elektrinio streso bandymų rezultatais.

Matavimų seka:

1. pradinė būklė prieš terminį poveikį;
2. temperatūrinis ciklavimas;
3. matavimas po terminio poveikio;
4. FRANEO kontrolinis matavimas, jei vertinami galimi konstrukciniai pokyčiai.

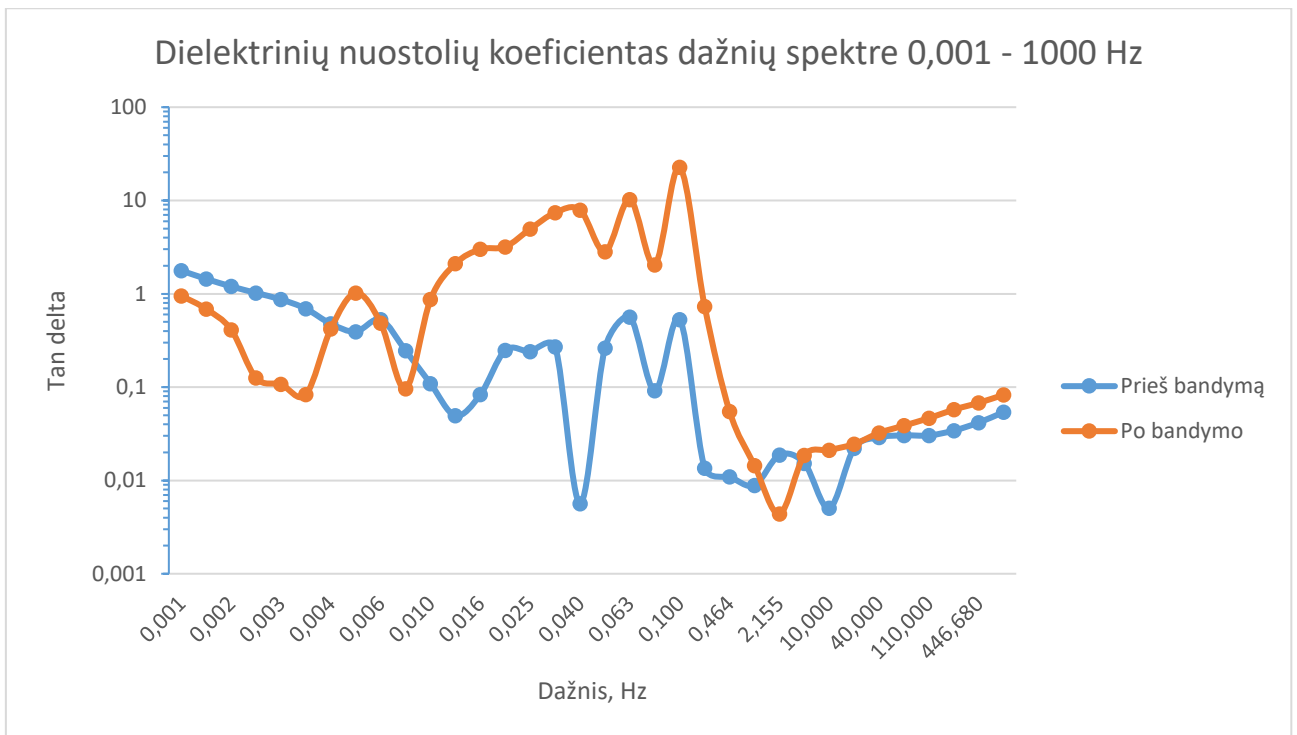
6.6.4. Bandymo rezultatų pateikimas ir analizė

Šiame poskyryje pateikiami dielektrinio atsako matavimo rezultatai prieš terminį stresą ir po jo. Rezultatai analizuojami dažnių diapazone 0,001–1000 Hz, vertinant pokyčius žemų, vidutinių ir aukštesnių dažnių srityse.

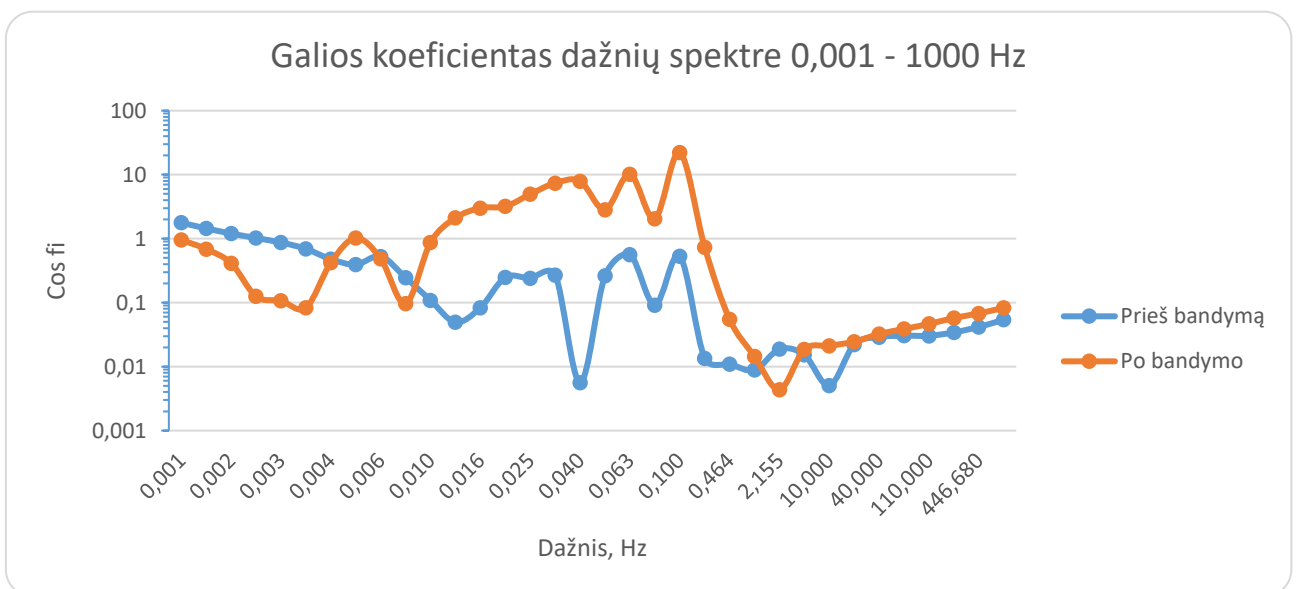
Pagrindinis dėmesys skiriamas $\text{tg } \delta$ ir galios koeficiento pokyčiams. Šie parametrai keičiasi dėl izoliacijos nuostolių kitimo. Aktyvioji talpos dedamoji C' naudojama kaip kontrolinis parametras. Taip galima įvertinti, ar bandymo metu nepasireiškė reikšmingų kabelio geometrijos ar konstrukcijos pokyčių. Nuostolinė talpos dedamoji C'' vertinama kaip papildomas dielektrinių nuostolių indikatorius.

Rezultatų analizėje bus vertinama, ar po temperatūrinio ciklavimo:

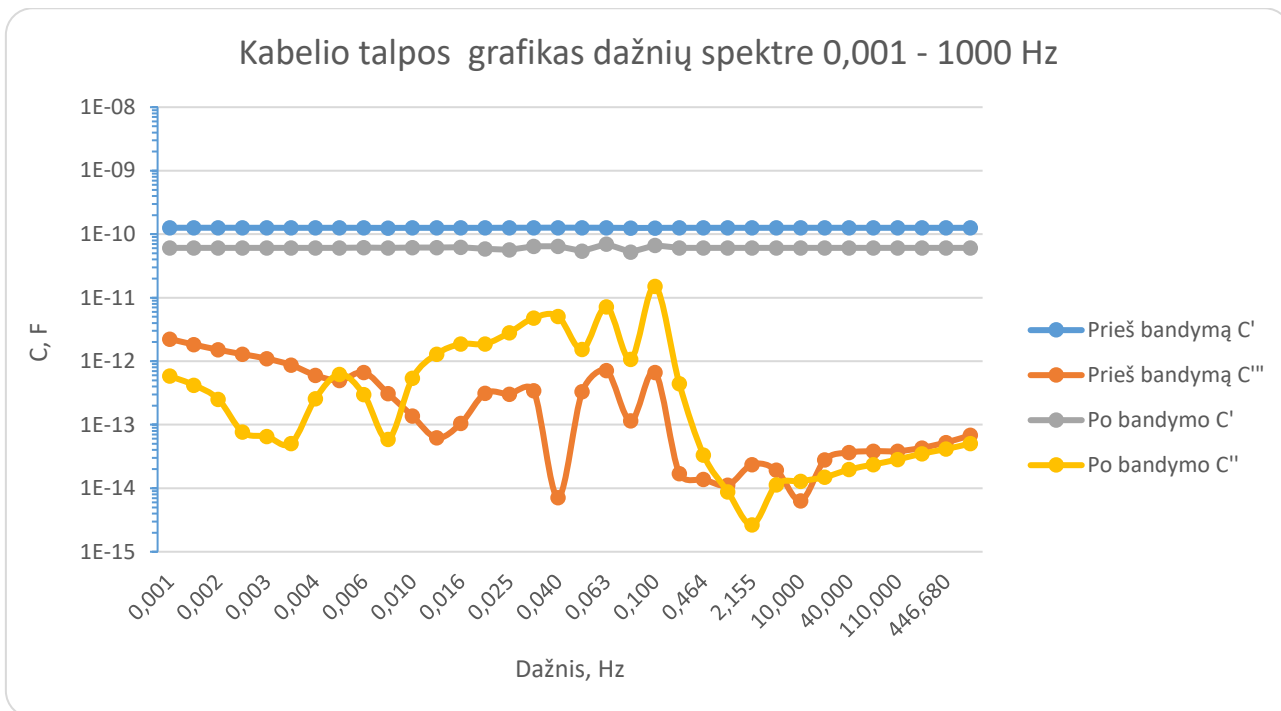
- padidėjo dielektrinių nuostolių koeficientas $\text{tg } \delta$;
- pasikeitė galios koeficiento dažninė priklausomybė;
- išliko stabili aktyvioji talpos dedamoji C' ;
- pasikeitė nuostolinė talpos dedamoji C'' .



29 pav. Dielektrinių nuostolių koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz



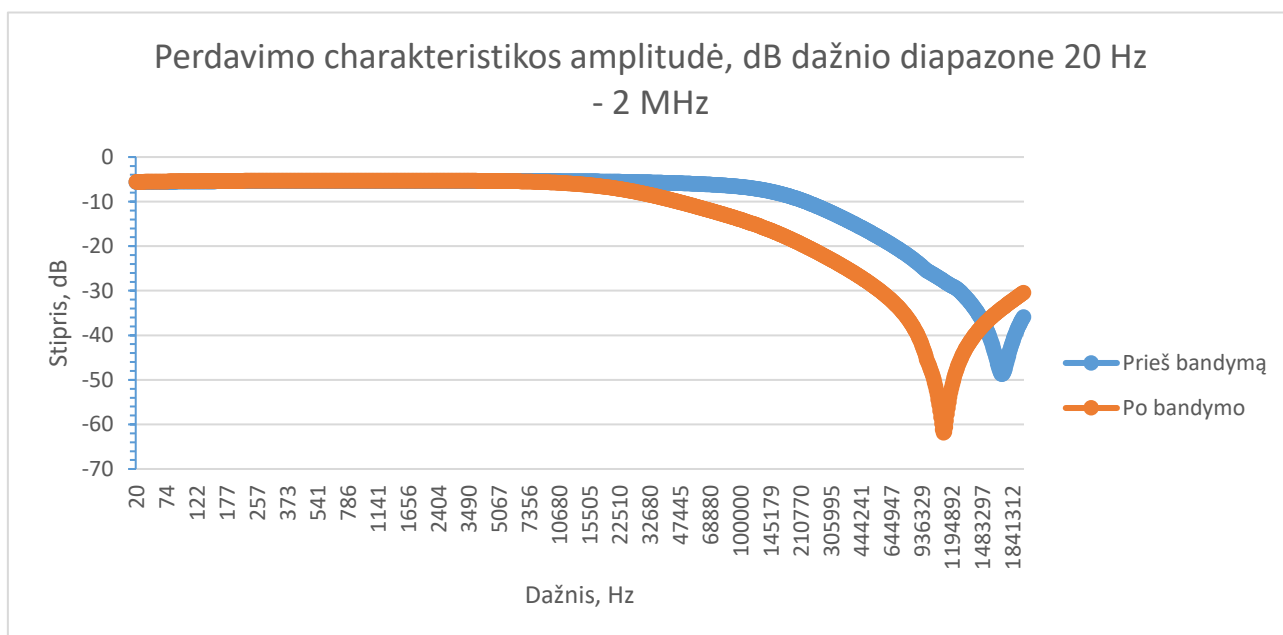
30 pav. Galios koeficientas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz



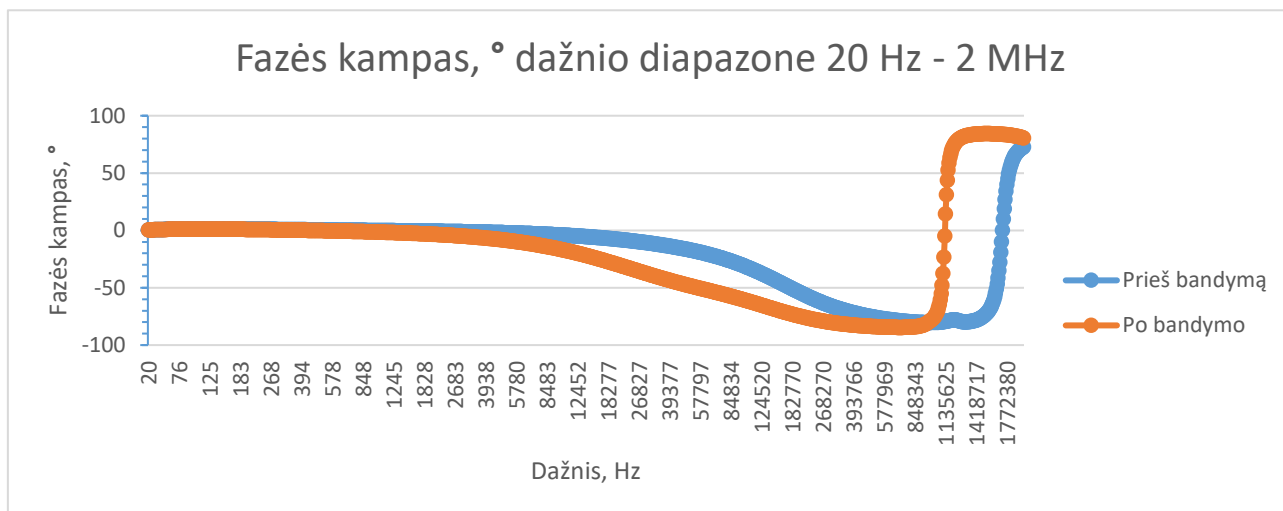
31 pav. Kabelio talpos grafikas dažnių spektre 0,001 - 1000 Hz

6.6.5. FRANEO kontrolinis matavimas

FRANEO kontrolinis matavimas atliktas siekiant patikrinti, ar terminis ciklavimas nesukėlė reikšmingų kabelio konstrukcinių ar prijungimo grandinės pokyčių. Šis matavimas yra pagalbinis. Jis leidžia įvertinti, ar FDS/PDC rezultatų pokyčiai gali būti siejami su izoliacijos dielektrinėmis savybėmis, o ne su matavimo grandinės arba konstrukcijos pasikeitimu.



32 pav. Perdavimo charakteristikos amplitudė, dB



33 pav. Fazės kampas, ° dažnio diapazone

6.6.6. Terminio streso bandymo rezultatų apibendrinimas

Terminio streso bandymo metu dielektrinio atsako parametrai buvo vertinti prieš poveikį ir po temperatūrinio ciklavimo. Analizuotos $\text{tg } \delta$, galios koeficiento bei aktyviosios (C') ir nuostolinės (C'') talpos dedamųjų dažninės priklausomybės 0,001–1000 Hz diapazone. Papildomai atliktas FRANEO kontrolinis matavimas 20 Hz–2 MHz dažnių srityje.

Dielektrinių nuostolių koeficiento $\text{tg } \delta$ dažninėse charakteristikose po terminio streso pastebėtas reikšmių padidėjimas žemų ir vidutinių dažnių srityje. Tai rodo padidėjusius dielektrinius nuostolius izoliacijoje po temperatūrinio ciklavimo. Aukštesnių dažnių srityje skirtumai tarp būsenų sumažėja. Galios koeficiento rezultatai rodo panašias tendencijas: šio koeficiento vertės taip pat išauga žemų bei vidutinių dažnių ruože, kas indikuoja išaugusią aktyviosios galios sklaidą pažeistoje izoliacijoje. Po terminio streso žemų ir vidutinių dažnių srityje didėja aktyvieji nuostoliai. Aukštesnių dažnių diapazone reikšmės artėja prie pradinės būklės. Aktyvioji talpos dedamoji C' abiejose būsenose išlieka beveik pastovi. Tai patvirtina, kad kabelio geometriniai ir konstrukciniai parametrai bandymo metu reikšmingai nepakito. Tuo tarpu nuostolinė talpos dedamoji C'' po terminio streso padidėja žemų ir vidutinių dažnių srityje. Šis pokytis siejamas su terminio ciklavimo įtaka izoliacijos nuostolių mechanizmams.

FRANEO kontrolinis matavimas parodė perdavimo charakteristikos amplitudės ir fazės kampo pokyčius aukštesnių dažnių srityje. Šie pokyčiai rodo, kad terminis ciklavimas galėjo paveikti aukštesnių dažnių atsaką. Visgi, pagrindiniai FDS/PDC pokyčiai labiausiai pasireiškė žemų ir vidutinių dažnių diapazone. Dažninė dielektrinio atsako analizė leidžia įvertinti temperatūrinio ciklavimo poveikį XLPE izoliacijos dielektriniams nuostoliams. Dėl to šis metodas tinkamas terminio streso sukeltų izoliacijos būklės pokyčių vertinimui.

Išvados

1. Remiantis mokslinės literatūros ir normatyvinių bazių analize galima teigti, kad 110 kV XLPE kabelių izoliacijos diagnostikai taikomi tiek tradiciniai, tiek pažangūs diagnostikos metodai. Normatyviniuose dokumentuose daugiausia dėmesio skiriama izoliacijos varžos, paaukštintos įtampos, VLF ir dalinių iškrovų bandymams. Vis tik, pažangūs dielektrinio atsako metodai nėra reglamentuoti. Dėl to FDS ir PDC metodų taikymas gali papildyti esamą diagnostikos praktiką, ypač vertinant ankstyvuosius izoliacijos būklės pokyčius.
2. Palyginus pagrindinius 110 kV kabelių izoliacijos diagnostikos metodus nustatyta, kad kiekvienas metodas identifikuoja skirtingus izoliacijos būklės požymius. Paaukštintos įtampos ir VLF bandymai leidžia patikrinti izoliacijos atsparumą elektriniam poveikiui. PD metodas yra tinkamas lokaliems elektriškai aktyviems defektams aptikti. Reflektometrija tinkama pažeidimo vietai nustatyti. Termoviziniai tyrimai padeda rasti šiluminius pakitimus prieinamose vietose. FDS ir PDC metodai išsiskiria tuo, kad leidžia vertinti bendrą izoliacijos dielektrinių savybių kitimą, todėl yra tinkami ankstyvajai profilaktinei diagnostikai.
3. FDS metodas leidžia analizuoti ne vieną tg δ ar talpos reikšmę, o visos dažninės charakteristikos pokytį. Tai suteikia galimybę vertinti laidumo, poliarizacijos ir dielektrinių nuostolių pokyčius skirtingose dažnių srityse. Dėl šios priežasties FDS metodas gali būti taikomas XLPE izoliacijos būklės pokyčiams nustatyti dar iki aiškaus dalinių iškrovų pasireiškimu.
4. Tiriama kabelio pradinė, arba bazinė, izoliacijos būklė buvo nustatyta remiantis gamintojo techniniais duomenimis ir pradiniais FDS matavimo rezultatais. Bazinė būseną darbe naudota kaip atskaitos taškas, su kuriuo lyginti pakartotiniai matavimai po drėgmės, elektrinio ir terminio streso poveikio. Toks vertinimo principas leido analizuoti ne absoliučią kabelio izoliacijos būklę, o dielektrinių parametrų pokyčius.
5. Eksperimentiniams laboratoriniams bandymams parinkta diagnostinė įranga leido įvertinti XLPE kabelio izoliacijos būklę, taikant kompleksinį matavimo principą. OMICRON DIRANA naudota FDS matavimams atlikti, o OMICRON FRANEO – kontroliniam dažninės reakcijos įvertinimui. Laboratorijoje atlikti trys poveikio scenarijai: drėgmės poveikis, aukštos įtampos ir apkrovos srovės sukeltas elektrinis stresas bei terminis ciklavimas. Tokia bandymų schema leido atskirai įvertinti skirtingų poveikių įtaką XLPE izoliacijos dielektriniam atsakui.
6. Skirtingi poveikiai XLPE izoliacijai pasireiškia nevienodais FDS kreivių, talpos ir dielektrinių nuostolių pokyčiais. Drėgmės poveikis sukėlė ryškų tg δ , galios koeficiento ir nuostolinės talpos dedamosios C'' padidėjimą žemų dažnių srityje. Po 100 kV kintamosios įtampos poveikio taip pat nustatytas dielektrinių nuostolių padidėjimas žemų dažnių srityje. Po 800 A apkrovos srovės poveikio dalis reikšmių sumažėjo arba tapo labiau išsklaidytos. Terminio ciklavimo atveju didžiausi pokyčiai pasireiškė žemų ir vidutinių dažnių srityje. Visais atvejais aktyvioji talpos dedamoji C' išliko beveik stabili. Pagrindiniai pokyčiai siejami su izoliacijos dielektrinių savybių, o ne su kabelio geometrinės struktūros pokyčiais. FDS metodas, papildytas PDC ir FRANEO kontroliniais matavimais, gali būti taikomas 110 kV XLPE kabelių izoliacijos ankstyvosios būklės vertinimui.

Literatūros sąrašas

1. BARTNIKAS, R. Partial discharges, their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, 9(5), 763–808. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038663>
2. BOGGS, S.; DENSLEY, J. Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2000, 16(5), 13–18. <https://doi.org/10.1109/57.871416>
3. HU, C.; GUO, A.; DENG, Y.; LUO, M. Application of Spread Spectrum Time Domain Method in New Energy Cable Fault Detection. Iš: *2024 Int. Conf. on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS)*, Marseille, France, 2024, p. 7–13. <https://doi.org/10.1109/ICEDCS64328.2024.00007>
4. CHANDRASEKAR, S.; et al. Investigations on leakage current and phase angle characteristics of porcelain and polymeric insulators under contaminated conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(2), 256–263. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4815193>
5. CHOUDHARY, M.; SHAFIQ, M.; KIITAM, I.; PALU, I.; et al. A review of aging models for electrical insulation in power cables. *Energies*, 2022, 15(9), 3408. <https://doi.org/10.3390/en15093408>
6. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*. Geneva: IEC, 2000.
7. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60502-2: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*. Geneva: IEC, 2005.
8. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *LST EN 60270: Aukštosios įtampos bandymų technika. Dalinių išlydžių matavimai*. Vilnius: LSD, 2002.
9. GOUDA, O. E.; EL FARSKOURY, A. A.; ELSINNARY, A. R.; FARAG, A. A. Investigating the effect of cavity size within medium-voltage power cable on partial discharge behaviour. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(5), 1190–1197. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1012>
10. LI, Y.; PENG, Z.; XU, D.; HUANG, S.; GAO, Y.; LI, Y. Research on the Thermal Aging Characteristics of Crosslinked Polyethylene Cables Based on Polarization and Depolarization Current Measurement. *Energies*, 2024, 17, 2274. <https://doi.org/10.3390/en17102274>
11. SHIN, Y.-J.; et al. Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, 54(6), 2493–2500. <https://doi.org/10.1109/TIM.2005.858115>
12. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*. Geneva: IEC, 2015.
13. RAFATI, A.; MIRSHEKALI, H.; SHAKER, H. R.; BAYATI, N. Power Grid Renovation: A Comprehensive Review of Technical Challenges and Innovations for Medium Voltage Cable Replacement. *Smart Cities*, 2024, 7, 3727–3763. <https://doi.org/10.3390/smartsities7060144>

14. IEEE. *IEEE Std 400.2: Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)*. New York: IEEE, 2013.
15. ZHOU, K.; HUANG, M.; TAO, W.; HE, M.; YANG, M. A possible water tree initiation mechanism for service-aged XLPE cables: Conversion of electrical tree to water tree. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(3), 1854–1861. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005405>
16. ZHANG, X.; PANG, B.; LIU, Y.; LIU, S.; XU, P.; LI, Y.; LIU, Y.; QI, L.; XIE, Q. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies*, 2021, 14, 7692. <https://doi.org/10.3390/en14227692>
17. KARABAY, S.; GÜVEN, E. A.; ERTÜRK, A. T. Performance testing of an optical ground wire composite. *Materials and Technology*, 2013, 47, 1–5. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/267269044_Performance_testing_of_an_optical_ground_wire_composite
18. MA, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. J. Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, 9(3), 446–457. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1007709>
19. MAGGIOLI, E.; LEITE, H.; MORAIS, C. A survey of the Portuguese MV underground cable failure. Iš: *Int. Conf. on the European Energy Market (EEM)*, 2016. <https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521217>
20. MANINDER, C.; SHAFIQ, M.; KIITAM, I.; PALU, I.; HASSAN, W. Investigation of partial discharge characteristics in XLPE cable insulation under increasing electrical stress. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 158, 108006. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108006>
21. ZHOU, K.; YUAN, H.; LI, Y.; LI, M.; LI, Z.; LIN, S. Assessing Aging Status and Type of XLPE Cable Insulation With a Graphic Approach Based on PDC Measurement. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(6), 5114–5123. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3170947>
22. NGUYEN, H. V. P.; PHUNG, B. T. Void discharge behaviours as a function of cavity size and voltage waveform under very low-frequency excitation. *High Voltage*, 2018. <https://doi.org/10.1049/hve.2017.0174>
23. XIANG, C.; YE, G.; SUN, H.; LI, T.; SUN, C. Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model. *AIP Advances*, 2021, 11(8), 085103. <https://doi.org/10.1063/5.0060939>
24. LEE, S.; KIM, D.; PARK, I.; KIM, G.; KIM, S. Perceptible Lightweight Zero-Mean Normalized Cross-Correlation for Infrared Template Matching. *IEEE Access*, 2024, 12, 164777–164791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3492206>
25. SAHOO, N. C.; SALAMA, M. M. A.; BARTNIKAS, R. Trends in partial discharge pattern classification: A survey. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, 12(2), 248–264. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1430395>
26. IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. *IEEE Std 400: Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above*. New York: IEEE, 2012. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6213052>

27. TANG, J.; ZHOU, S.; PAN, C. A denoising algorithm for partial discharge measurement based on the combination of wavelet threshold and total variation theory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(6), 3428–3441. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2938905>
28. CHO, J.; KIM, J.-H.; LEE, H.-J.; KIM, J.-Y.; SONG, I.-K.; CHOI, J.-H. Development and Improvement of an Intelligent Cable Monitoring System for Underground Distribution Networks Using Distributed Temperature Sensing. *Energies*, 2014, 7, 1076–1094. <https://doi.org/10.3390/en7021076>
29. GUAN, H.; et al. Application of Return Voltage Method for diagnosing water treeing deterioration in XLPE cable insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(5), 1791–1799. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2000.885299>
30. HERNÁNDEZ-MEJÍA, J. C.; HARLEY, R. G.; HAMPTON, N.; HARTLEIN, R. Characterization of ageing for MV power cables using low-frequency $\tan \delta$ diagnostic measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(3), 862–870. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.5128527>
31. IEEE. *IEEE Std 400.3: Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment*. New York: IEEE, 2006. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.305045>
32. WANG, H.; SUN, M.; ZHAO, K.; WANG, X.; XU, Q.; WANG, W.; LI, C. High-voltage FDS of thermally aged XLPE cable and its correlation with physicochemical properties. *Polymers*, 2022, 14(17), 3519. <https://doi.org/10.3390/polym14173519>
33. ZHANG, Y.; GU, G.; LIU, J.; JIANG, F.; FAN, Y.; ZHA, J. Evaluation of non-uniform thermal aging of XLPE cable based on modified Debye model. *Frontiers in Materials*, 2022, 9, 838792. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.838792>
34. KUMAR, H.; SHAFIQ, M.; KAUHANIEMI, K.; ELMUSRATI, M. Artificial Intelligence-Based Condition Monitoring and Predictive Maintenance of Medium Voltage Cables: An Integrated System Development Approach. Iš: *2024 10th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Gangneung, Korea, Republic of, 2024, p. 191–195. <https://doi.org/10.23919/CMD62064.2024.10766104>
35. CHI, P.; LIANG, R.; HAO, C.; LI, G. Cable fault diagnosis with generalization capability using incremental learning and deep convolutional neural network. *Electric Power Systems Research*, 2024, 214, 111304. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111304>
36. HUO, Y.; WANG, K.; LAMPE, L.; LEUNG, V. C. M. Validation of machine learning-aided and power line communication-based cable monitoring using measurement data. *Sensors*, 2024, 24(2), 335. <https://doi.org/10.3390/s24020335>
37. WEI, W.; ZHANG, X.-M.; LI, J.; ZHAO, H.-Q. Convolutional Neural Network-Based Pattern Recognition of Partial Discharge Signals. *Sensors*, 2024, 24(8), 2660. <https://doi.org/10.3390/s24082660>
38. SHAFEI, A. P.; SILVA, J. F. A.; MONTEIRO, J. Convolutional neural network approach for fault detection and characterization in medium voltage distribution networks. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024, 10, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100820>

39. EVANGELINE, S. I.; DARWIN, S.; BASKARAN, K.; IRUDAYA RAJ, E. F. A machine learning–based assessment model for defect diagnosis in XLPE power cables. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024, 8(2), 100530. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100530>
40. SRIVASTAVA, R.; AVASTHI, V.; KRISHNA PRIYA, R. Deep convolutional neural network for partial discharge monitoring system. *Advances in Engineering Software*, 2023, 180, 103407. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103407>
41. SIAN, H.-W.; KUO, C.-C.; LU, S.-D.; WANG, M.-H. A novel fault diagnosis method of power cable based on convolutional probabilistic neural network with discrete wavelet transform and symmetrized dot pattern. *IET Science, Measurement & Technology*, 2023, 17(2), 58–70. <https://doi.org/10.1049/smt2.12130>
42. SIAN, H.-W.; KUO, C.-C.; LU, S.-D.; WANG, M.-H. A novel fault diagnosis method of power cable based on convolutional probabilistic neural network with discrete wavelet transform and symmetrized dot pattern. *IET Science, Measurement & Technology*, 2023, 17(2), 58–70. <https://doi.org/10.1049/smt2.12130>
43. SCARPETTA, M.; SPADAVECCHIA, M.; ADAMO, F.; RAGOLIA, M. A.; GIAQUINTO, N. Detection and Characterization of Multiple Discontinuities in Cables with Time-Domain Reflectometry and Convolutional Neural Networks. *Sensors*, 2021, 21(23), 8032. <https://doi.org/10.3390/s21238032>
44. LEE, C.-K.; CHANG, S. J. Fault Detection in Multi-Core C&I Cable via Machine Learning Based Time-Frequency Domain Reflectometry. *Applied Sciences*, 2020, 10(1), 158. <https://doi.org/10.3390/app10010158>
45. PABARČIUS, A. *Grižtamosios įtampos metodo tyrimas kabelių diagnostikoje*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2017. Prieiga per internetą: <https://talpykla.elaba.lt/elaba-fedora/objects/elaba:22773413/datastreams/MAIN/content>
46. HVIDSTEN, S.; JOHANSEN, A.; LIEN, H.; RENGGLI, C. Condition assessment of service aged XLPE distribution cable. Iš: *2001 6th International Conference on Electrical Equipment in Connections (EEIC)*. IEEE, 2001. <https://doi.org/10.1109/EEIC.2001.965673>
47. COLLOCA, V.; et al. Comparison among different diagnostic systems for MV cable lines. Iš: *CIREN*, Paris, 2001. <https://doi.org/10.1049/cp:20010725>
48. MD. YASMIN HANUM; VISVANATHAN, A.; THJAHR, P. Analysis and characterization of water tree condition in XLPE cables from dielectric spectroscopy measurement in frequency domain. Iš: *2015 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICSIPA.2015.7412247>
49. HOFF, G.; KRANZ, H. G. Correlation Between Return Voltage and Relaxation Current Measurements. Iš: *ISH*, London, 1999. <https://doi.org/10.1049/cp:19990896>
50. CHEN, J.; LI, H.; ZHOU, L.; HU, L.; LI, C.; CAO, J. Diagnosis of Water Tree Aging in XLPE Cable by the Loss Current Harmonic Component Under Variable Frequency Power. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2016, 3(6), 208–214. <https://doi.org/10.11648/j.jeee.20150306.16>

51. GULSKI, E.; SMIT, J. J.; SEITZ, P. N.; SMIT, J. C. PD measurements on-site using oscillating wave test system. Iš: *IEEE Conference Proceedings*, 1998, 2 t., p. 420–423. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.1998.694823>
52. HAN, T.; LI, W.; ZHENG, Z.; LI, Y.; CHU, J.; HAO, C. Insulation Aging Evaluation Method of High Voltage Cable Based on Dielectric Loss Characteristics. *Energies*, 2025, 18, 1267. <https://doi.org/10.3390/en18051267>
53. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA. *Elektros energijos perdavimo tinklų įrenginių bandymų ir matavimų tvarkos aprašas*. 2016. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/rs/legalact/TAP/be9ea730384b11e6a222b0cd86c2adfc/>
54. LITGRID AB. *Perdavimo tinklo įrenginių bandymų reglamentas*. Vilnius: Litgrid, 2025.
55. ANGLHUBER, M.; KRÜGER, M. *Dielectric Analysis of High Voltage Power Transformers*. OMICRON electronics, Klaus, Austria. Prieiga per internetą: <https://www.omicronenergy.com>
56. WERELIUS, P.; CHU, D.; KIM, D.; SWEETSER, C.; PERKINS, M.; PATEL, P. Dielectric Frequency Response Test. *IEEE Tutorial Presentation*, 2009.
57. KATAUSKIS, L. *Research of Dielectric Losses Using FDS and PDC Methods*. Magistro baigiamasis darbas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2017.
58. IBRAHIM, K. H.; KORANY, N. R.; SALEH, S. M. Effects of power transformer high-frequency equivalent circuit parameters non-uniformity on fault diagnosis using SFRA test. *Ain Shams Engineering Journal*, 2022, 13, 101674. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101674>