



Maasulkusuojauksen kehittäminen Alva Sähköverkko Oy:ssä

Kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen toiminnan varmistaminen kenttäkokein

Marko Leppämäki, YTK21S1

Opinnäytetyö, ylempi AMK

27.5.2024

Kestävä energia YAMK

Leppämäki, Marko

Maasulkusuojauksen kehittäminen Alva Sähköverkko Oy:ssä. Kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen toiminnan varmistaminen kenttäkokein.

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 124 sivua.

Tekniikan ala. Kestävä energia tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö, ylempi AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Sähkömarkkinalakiin kirjattujen sähkönjakeluverkkojen toiminnan laatuvaatimusten vuoksi Suomessa on kaapeloitu keskijänniteverkkoa runsaasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Kaapelointiasteen lisääntyessä on kasvanut myös sähköverkon tuottama maasulkuvirta, joka tulee huomioida sähkönjakeluverkon suojausten suunnittelussa. Merkittävänä turvallisuustekijänä on keskijännitejakeluverkon maasulkusuojauksen toiminnan varmistaminen kaikissa verkon käyttötilanteissa. Perinteisellä suojauksella varustettu suoja-rele ei osaa tulkita riittävän hyvin jakeluverkossa tapahtuvia muutostilanteita, jotka vaikuttavat vikatapah-tumasta johtuvien kosketusjännitteiden muodostumiseen.

Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia maasulkuilmiöitä ja niiden aikana ilmeneviä vaarajännitteitä todelli-sissa verkon käyttö- ja vikatilanteissa sekä verrata saatuja tuloksia teoreettiseen viitekehykseen. Kenttäko-keiden mittausedatan avulla varmennettiin myös uuden kosketusjännitteeseen perustuvan maasulkusuo-jauksen toiminta. Tutkimuksen tavoitteena oli saada selville ne tekijät, joiden avulla sähköverkkojen maasulkuvirtasuojaus on mahdollista toteuttaa sähköturvallisuuslain edellyttämien vaateiden mukaisesti huomioiden myös sähköverkkojen poikkeavat vika- ja käyttötilanteet. Tutkimus toteutettiin määrällistä tut-kimusotetta ja kokeellista tutkimusasetelmaa hyödyntäen. Tutkimusaineisto, joka muodostui testiympäris-tön mittausedatasta ja sähköaseman häiriötallenteista, kerättiin maasulkukokeilla. Tutkimusaineistoa analy-soitiin tilastollisen päättelyn ja teoreettisen selittämisen avulla.

Tulosten mukaan maasulkuvian aikaiset kosketusjännitteet olivat riippuvaisia vikavirrasta ja sähkönjakelu-verkon maadoitusolosuhteista. Kosketusjänniteriski kasvoi suurilla vikavirroilla ja huonoilla maadoitusolo-suhteilla. Vikavirran suuruuteen vaikuttivat esimerkiksi verkon rakennustapa, valittu tähtipisteen maadoi-tusratkaisu sekä verkon käyttö-, kuormitus- ja vikatilanne.

Johtopäätökseksi saatiin, että sähkönjakeluverkot voidaan rakentaa SFS 6001-standardin vaateiden mukai-sesti, mutta sähköverkkojen suojauksessa tulee minimoida henkilövahinkojen riskit. Uuden kosketusjänni-teperustaisen maasulkusuojauksen avulla sähköverkkoyhtiöt voivat määritellä riittävän turvallisuustason oman jakeluverkkonsa rakenteen sekä käyttö- ja maadoitusolosuhteiden mukaisesti. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa sekä kansallisesti että kansainvälisesti sähkönjakeluverkkojen suojaus-ten suunnittelussa.

Avainsanat (asiasanat)

Sähkövoimatekniikka, maasulku, maasulkuvirta, maadoitusjännite, kosketusjännite

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Tämä opinnäytetyö ei sisällä salassa pidettäviä osuuksia.

Leppämäki, Marko

Development of earth fault protection at Alva Sähköverkko Oy. Verifying the operation of touch voltage-based earth fault current protection with field tests.

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 124 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Sustainable Energy Technology. Master's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Due to the quality requirements for the operation of electricity distribution networks recorded in the Electricity Market Act, many medium voltage networks have been cabled in Finland over the past ten years. As the degree of cabling has increased, the ground fault current produced by the electrical network has also increased, which must be considered, when designing the protection of the electrical distribution network. An important safety factor is ensuring the operation of the earth fault protection of the medium voltage distribution network in all situations of network use. A protection relay equipped with traditional protection cannot interpret sufficiently well the changes occurring in the distribution network, which affect the formation of touch voltages resulting from the fault event.

The purpose of the study was to investigate earth fault phenomena and the dangerous voltages that appeared during them in real-life network use and fault situations and to compare the obtained results with the theoretical reference framework. The operation of the new touch voltage-based earth fault protection was also verified with the help of measurement data from the field tests. The goal of the research was to find out the factors that make it possible to implement the earth fault current protection of electrical networks in accordance with the requirements of the Electrical Safety Act, also considering abnormal fault and operating situations of electrical networks. The research was carried out using a quantitative research extract and an experimental research setup. The research material, which consisted of the measurement data of the test environment and the disturbance recordings of the substation, was collected with the help of earth fault tests. The research material was analyzed using statistical reasoning and theoretical explanation.

According to the results, the touch voltages during ground faults were dependent on the fault current and the grounding conditions of the power distribution network. The touch voltage risk increased with large fault currents and poor grounding conditions. The magnitude of the fault current was influenced, for example, by the construction method of the network, the selected star point grounding solution, and the use, load and fault situation of the network.

It was concluded that power distribution networks can be built in accordance with the requirements of the SFS 6001-standard, but the risks of personal injury should be minimized in the protection of power networks. With the help of the touch voltage-based ground fault protection, electricity network companies can define a sufficient safety level according to the structure of their own distribution network and the operating and grounding conditions. The results of the research can be used in the future both nationally and internationally in the planning of protections for electricity distribution networks.

Keywords/tags (subjects)

Power current engineering, earth fault, earth fault current, earth potential rise, touch voltage

Miscellaneous (Confidential information)

This thesis does not contain confidential parts.

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Sähkönjakelujärjestelmät	7
2.1	Sähkönsiirtoverkot	7
2.2	Keskijänniteverkon viat	8
2.2.1	Oiko- ja maasulkuviat	8
2.2.2	Maasulkuvikojen erityispiirteitä	9
2.3	Sähkönjakeluverkkojen vaarajännitteet ja niiden riskit.....	15
2.3.1	Maadoitus-, kosketus- ja askeljännitteet sekä siirtyvät potentiaalit.....	15
2.3.2	Sallitut kosketusjännitteet ja niiden fysiologiset vaikutukset	17
2.4	Sähköverkkojen sähköturvallisuus ja maadoitustavat.....	22
2.4.1	Sähköverkkojen maadoitusjärjestelmien vaateet	23
2.4.2	Maadoitusjärjestelmät ja niiden maadoitusimpedanssit	25
2.4.3	Maadoitusjärjestelmän mitoittaminen kosketusjännitteiden mukaan.....	27
2.4.4	Reduktion vaikutus vaarajännitteisiin	31
3	Kosketusjänniteperustainen maasulkuvirtasuojaus	33
3.1	IFPTOC-suojausfunktion toimintaperiaate.....	35
3.1.1	Maasulun tunnistus ja suunnan määrittäminen	36
3.1.2	Vikavirran ja kosketusjännitteen estimointi.....	37
3.2	IFPTOC-suojausfunktion integroidut muut ominaisuudet.....	40
4	Tutkimuksen toteuttaminen	42
4.1	Määrällinen tutkimusote ja kokeellinen tutkimusasetelma	42
4.2	Tutkimuksen tarkoitus, tavoitteet ja työhypoteesit	43
4.3	Maasulkukokeet kenttäkokeina	43
4.3.1	Maasulkukokeiden taustaa Alva Sähköverkko Oy:ssä.....	43
4.3.2	Maasulkukokeiden koe- ja kytkentäjärjestelyt.....	44
4.3.3	Vikapaikan koe- ja mittausjärjestelyt	51
4.4	Tutkimusaineiston eli mittausdatan analysointi	55
5	Tutkimustulokset.....	57
5.1	Vikavirran mukaan säätyvän maasulkusuojauksen toiminta.....	57
5.2	Vikavirran vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen	62
5.3	Maadoitusolosuhteiden vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen.....	73
6	Pohdinta.....	75
6.1	Tutkimustulosten tarkastelu	75
6.1.1	Jakeluverkon rakenteen vaikutus vaarajännitteisiin	75

6.1.2	Jakeluverkon maadoitusjärjestelmän vaikutus vaarajännitteisiin	77
6.1.3	Jakeluverkon vika- ja käyttötilanteiden vaikutus vaarajännitteisiin	80
6.2	Tulosten ydinkohdat.....	84
7	Johtopäätökset.....	90
7.1	Yhteenvedo ja työhypoteeseihin vastaaminen	90
7.2	Jatkotoimenpiteet ja -tutkimusaiheet.....	93
7.3	Tutkimuksen luotettavuus ja pätevyys	94
Lähteet	97
Liitteet	103
Liite 1.	Maasulkukokeiden testiohjelma ja testien aikaiset havainnot.....	103
Liite 2.	Maasulkuvikapaikan testiympäristön toteutuskuvat.....	113
Liite 3.	Esimerkkejä mittaustuloksista.....	117
Liite 4.	Tehollisarvoisen ja perustaajuuden vikavirran erotus eri testeissä.....	121
 Kuviot		
Kuvio 1.	Maasta erotetun verkon maasulku ja maasulkupiirin sijaiskytkentä	10
Kuvio 2.	Sammutetun verkon maasulku ja maasulkupiirin sijaiskytkentä.....	12
Kuvio 3.	Maadoituksissa kulkevan vikavirran aiheuttamat maan jännitepotentiaalit maadoitetuissa kohteissa.....	15
Kuvio 4.	Sallittu kosketusjännite ajan funktiona.....	17
Kuvio 5.	Ihmiskehon kokonaisimpedanssi suhteutettuna kosketuspinta-alaan ja 50 Hz:n kosketusjännitteeseen kuivissa olosuhteissa	19
Kuvio 6.	Ihmiskehon fysiologisten vaikutusten raja-arvot vikavirran ja vian kestoajan mukaisesti	20
Kuvio 7.	Laajan maadoitusverkon muodostuminen	27
Kuvio 8.	Laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnitteluperiaatteet.....	30
Kuvio 9.	IFPTOC-suojausfunktion toimintojen lohko-kaavio	36
Kuvio 10.	IFPTOC-suojausfunktion käänteisaikaiset toimintakäyrät	40
Kuvio 11.	Maasulkuvikapaikan sijainti Alva Sähköverkko Oy:n jakelualueella	46
Kuvio 12.	Maasulkutestien perustilanne, Alva Sähköverkko Oy:n sähkö- ja kytkinasemat sekä niiden väliset varasyöttöyhteydet	47
Kuvio 13.	Laaja taustaverkko vikapaikan takana	48
Kuvio 14.	Kukkumäen sähköaseman sammutuskelan korvaaminen Savelan sähköaseman sammutuskelalla	49
Kuvio 15.	Asiakasmuuntamon vian simulointi Hämeenlahden sähköaseman avulla.....	50

Kuvio 16. Vikapaikan testijärjestelyt.....	51
Kuvio 17. Vikapaikan jännite- ja virtamittaukset.....	54
Kuvio 18. Muuttujat ja niitä yhdistävät mekanismit.....	56
Kuvio 19. Vika- ja nollavirran sekä vikavirtaestimaatin suuruus eri maasulkutestien aikana	58
Kuvio 20. Vikavirtaestimaatin ja nollavirran erotus vikavirtaan (logaritminen).....	59
Kuvio 21. Testin 38 aikainen IFPTOC-suojan vikavirtaestimaatti.....	60
Kuvio 22. IFPTOC-suojan kosketusjännite-estimaatin mukainen toiminta testissä 38	61
Kuvio 23. Maadoitus- ja kosketusjännitteiden suhde vikavirtaan, muuntamalla 11,5 Ω:n erillismaadoitus (logaritminen).....	63
Kuvio 24. Maadoitus- ja kosketusjännitteiden suhde vikavirtaan, muuntamalla 11,5 Ω:n erillismaadoitus (lineaarinen)	63
Kuvio 25. Kosketusjännitteen aiheuttama kehon lävitse menevä virta, muuntamalla 11,5 Ω:n erillismaadoitus	66
Kuvio 26. Siirtyvän potentiaalin aiheuttama kehon lävitse menevä virta, muuntamalla 11,5 Ω:n erillismaadoitus	66
Kuvio 27. Eri kosketusjännitepiirien lävitse menevät virrat vikavirran I_F suhteessa, muuntamalla 11,5 Ω:n erillismaadoitus	68
Kuvio 28. Vikavastuksettomien maasulun virtatransientin vaikutus vaarajännitteisiin ja kehon läpi menevään vikavirtaan	70
Kuvio 29. Katkeilevan maasulun vaikutus kosketusjännitteisiin ja kehon lävitse menevään virtaan	71
Kuvio 30. ABB Oy:n mittaustulokset testin 42 kosketusjännite- ja virtamittausten osalta.....	72
Kuvio 31. Kosketusjännitteiden aiheuttamat kehon kautta kulkevat vikavirrat ja niiden poiskytkentäajat johdettuna IEC 60479-1- ja SFS 6001-standardeista.....	86
Kuvio 32. Kosketusjännitesuojauksen vertailu IEC 60479-1-standardin C-käyrien ja SFS 6001-standardin U_{Tp} -käyrien välillä	88

Taulukot

Taulukko 1. Kuvion 6 mukaisten raja-arvojen fysiologisten vaikutusten kuvaukset	20
Taulukko 2. Esimerkkejä vikavirtaestimaatin ja nollavirran suhteesta todelliseen vikavirtaan.....	60
Taulukko 3. Maadoitus- ja kosketusjännitteiden regressiofunktioiden kulmakertoimet ja niiden väliset suhteet sekä regressiofunktioiden selitysaste	64
Taulukko 4. Eri maadoitustapojen vaikutus maadoitus- ja kosketusjännitteiden sekä kehon lävitse menevän vikavirran muodostumiseen	74

Lyhenteiden luettelo

a	vaiheenkääntöoperaattori
C	vaihejohtimien maakapasitanssi
E	Theveninin jännitelähde
F	SFS 6001-standardin mukainen U_{Tp} -kerroin
I_0	nollavirta
$\bar{I}_0^{viallinen}$	vikalähdön nollavirta
I_2^n	n -harmonisen yliaallon vastakomponentin suuruus
I_{asym}	verkon epäsymmetria
I_B	kehon kautta kulkeva virta
I_{Bff}	mitattu kehon kautta kulkeva perustaajuinen virta
I_{Bp}	sallittu kehon kautta kulkeva virta
I_{Brms}	mitattu kehon kautta kulkeva tehollisarvoinen virta
I_C	kapasitiivinen maasulkuvirta
I_d	verkon kokonaisvaimennus
I_{dFd}	lähdön tuottama resistiivinen maasulkuvirta, osuus kokonaisvaimennuksesta
I_E	maavirta
\bar{I}_{EF}	maasulkuvirta
I_{EFFd}	lähdön tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta
I_{EW}	ukkosjohtimen tai maakaapelin metallivaipan virta
I_F	vikavirta
I_{Fest}	maasulkuvirran vaihekohtainen vikavirtaestimaatti
I_L	rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa
I_N	muuntajan tähtipistevirta
I_{RES}	maasulun jäännösvirta
I_v	verkon vinoviritys
I''_{k1}	yksivaiheisen symmetrisen maasulkuvirran alkuarvo
L	sammutuskelan induktanssi
r	reduktiokerroin
R	sammutuskelan ja lisävastuksen resistanssi
R^2	regressiofunktion selityssaste
R_{Emax}	suojattavan johtolähdön suurin maadoitusresistanssi

R_f	vikavastus
R_S	shunttivastus
U_0	nollajännite
$U_0^{vikatila}$	vian aikainen nollajännite
U_A	vaiheen A jännite
U_B	vaiheen B jännite
U_C	vaiheen C jännite
U_E	maadoitusjännite
U_{PE}	vaihejännite
U_T	efektiivinen kosketusjännite
U_{TF}	estimoitu kosketusjännite
U_{Tff}	mitattu perustaajuinen kosketusjännite
U_{Tp}	sallittu kosketusjännite
U_{Trms}	mitattu tehollisarvoinen kosketusjännite
U_{vT}	prospektiivinen kosketusjännite
U_{vTff}	mitattu perustaajuinen prospektiivinen kosketusjännite
U_{vTrms}	mitattu tehollisarvoinen prospektiivinen kosketusjännite
U_v	vikaa edeltävä vaihejännite
x	regressiomallin selittävä muuttuja
y	regressiomallin selitettävä muuttuja
Y_0	nollapiirin admittanssi
Z_B	kehon impedanssi
Z_E	maadoitusimpedanssi
Z_T	kehon kokonaisimpedanssi
ΔI_A	vaiheen A virran muutos vian aikana
ΔI_B	vaiheen B virran muutos vian aikana
ΔI_C	vaiheen C virran muutos vian aikana
ΔI_2	vastakomponentin muutos vian aikana
β_0	regressiokäyrän y-akselin leikkauspiste
β_1	regressiomallin muuttujien x ja y lineaarista yhteyttä kuvaava tekijä
ε_y	regressiomallin muuttujan y virhetermi
ω	kulmataajuus

1 Johdanto

Poikkeukselliset säätilan ääri-ilmiöt ovat aiheuttaneet suomalaisille sähköverkkoyhtiöille jo vuodesta 2010 lähtien useita laajamittaisia ja pitkäkestoisia jakeluhäiriöitä sähkönjakeluverkkoon. Erityisesti vuoden 2011 joulukuussa esiintyneet Tapani- ja Hannu-myrskyt aiheuttivat merkittäviä sähkönjakelun keskeytyksiä yli puolelle miljoonalle suomalaiselle sähkönkäyttäjälle. Näiden myrskyjen jälkeen Suomen työ- ja elinkeinoministeriö aloitti jakeluverkkojen toimitusvarmuutta koskevan uuden sähkömarkkinalain valmistelun. (Ihonen, Kupila & Keränen 2016, 1; vrt. Mitä sähköverkkoyhtiöiltä vaaditaan toimitusvarmuuden parantamiseksi? 2023; vrt. Nikander & Mäkinen 2017, 1; Reikko, Keskinen & Ristimäki 2019, 1.) Sähkömarkkinalakiin (L 588/2013, 51 §) kirjattujen jakeluverkkojen toiminnan laatuvaatimusten vuoksi Suomessa on kaapeloitu keskijänniteverkkoa runsaasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Sähköverkon kaapelointiasteen lisääntyessä on kasvanut myös sähköverkon tuottama maasulkuvirta, joka on huomioitava sähkönjakeluverkon suojausten suunnittelussa (Hartmann, Vokony, Taczi & Kiss 2019, 4–5; Nikander & Mäkinen 2017, 1, 7, 38–39; Reikko ym. 2019, 5). Yhtenä merkittävänä turvallisuustekijänä on erityisesti keskijännitejakeluverkon maasulkusuojauksen toiminnan varmistaminen kaikissa verkon käyttötilanteissa (Wahlroos, Altonen, Pitkänen & Kauppinen 2019, 5).

Suomessa on yleisesti käytössä nollavirtaan ja -jännitteeseen perustuva perinteinen maasulkusuojaus (Lakervi & Partanen 2008, 190–193). Perinteisen suojauksen avulla toteutetun vikasuojauksen heikkoutena on se, että suojaus ei osaa tulkita riittävän hyvin jakeluverkossa tapahtuvia muutostilanteita, jotka vaikuttavat vikatapahtumasta johtuvien kosketusjännitteiden muodostumiseen (Wahlroos ym. 2019, 1; vrt. Wahlroos, Altonen, Uggla & Wall 2013, 1). SFS 6001-standardi (2018, 7–9, 91–93) asettaa Suomessa suurjänniteverkoissa esiintyville kosketusjännitteille raja-arvot, jotka on otettava huomioon sähkönjakeluverkkoa suunniteltaessa, rakennettaessa ja käytettäessä. Sähköturvallisuuslaki (L 1135/2016, 6 §) myös edellyttää, että sähkölaitteet ja sähkönjakeluverkot eivät saa aiheuttaa sähkönkäyttäjille hengen, terveyden tai omaisuuden vaaraa. Pitkäsen ja Kauppinen kehittämän sekä ABB Oy:n käyttöön ottaman maasulkuvirran ja kosketusjännitteen estimaattiin perustuvan uuden suojaustekniikan avulla sähkönjakeluverkkojen maasulkusuojaus voidaan toteuttaa sähköturvallisuusvaateiden mukaisesti riippumatta sähkönjakeluverkon käyttötilanteesta.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään kompensoidun keskijänniteverkon maasulkuvian aikaisiin maadoitus- ja kosketusjänniteilmiöihin sekä niiden pohjalta toimivaan uuteen maasulkusuojaukseen. Työn tilaajana toimii Jyväskylän kantakaupungin alueen sähköjakelusta vastaava Alva Sähköverkko Oy, jonka jakeluverkossa suoritettiin syyskuussa 2023 yhteistyössä sähköistämisen ja automaation teknologiaosaajan ABB Oy:n kanssa maasulkukokeet. Tutkimusaineistona on maasulkukokeiden aikaisen testiympäristön mittausdata ja sähköaseman häiriötallenteet. Tutkimus on toteutettu määrällistä tutkimusotetta ja kokeellista tutkimusasetelmaa hyödyntäen.

Tutkimuksen tarkoituksena on tutkia maasulkuilmiöitä ja niiden aikana ilmeneviä vaarajännitteitä todellisissa verkon käyttö- ja vikatilanteissa sekä verrata saatuja tuloksia teoreettiseen viitekehykseen. Kenttäkokeiden mittausdatan avulla varmennetaan lisäksi uudenlaisen kosketusjännitteeseen perustuvan maasulkusuojauksen oikeaoppinen toiminta. Tutkimuksen tavoitteena on saada selville ne tekijät, joiden avulla sähköverkkojen maasulkuvirtasuojaus on mahdollista toteuttaa sähköturvallisuuslain edellyttämien vaateiden mukaisesti huomioiden myös sähköverkkojen poikkeavat vika- ja käyttötilanteet. Lopputuloksena saadaan aikaiseksi toimintasuunnitelma, jonka mukaisesti Alva Sähköverkko Oy:n sähköjakeluverkon maasulkusuojaukseen voidaan tulevaisuudessa parantaa.

2 Sähköjakelujärjestelmät

2.1 Sähkösiirtoverkot

Suomessa sähkön kuluttajat ja tuottajat kytkeytyvät pääsääntöisesti yhteiseen kolmivaiheiseen sähkösiirtoverkkoon. Sähköenergian siirtoon käytetään pitkillä siirtoetäisyyksillä Fingrid Oyj:n hallinnoimia kantaverkon silmukoituja suurjännitteisiä 110 kV:n, 220 kV:n tai 400 kV:n runkojohtoja. Silmukoinnin ja korkean käyttöjännitteen avulla vähennetään siirtoverkon jakeluhäviöitä. Lisäksi kantaverkon silmukointi parantaa verkoston käyttövarmuutta. (Elovaara & Haarla 2011a, 54–57.) Suurjännitejakelu on pääsääntöisesti toteutettu teknisistä ja taloudellisista syistä johtuen ilmajohtoverkkona, mutta kaupungeissa voidaan käyttää tilan puutteen vuoksi myös suurjännitemaakaapeleita (Elovaara & Haarla 2011b, 304–306).

Kantaverkkoon kytkeytyy muunto- eli sähköasemien kautta alueellisia jakeluverkkoyhtiöitä, joiden jakelujännitteet ovat yleisesti 10 kV, 20 kV, 45 kV tai 110 kV. Alle 110 kV:n jakeluverkkoja käytetään pääsääntöisesti säteittäisesti, vaikka verkosto olisi rakennettu käyttövarmuuden parantamisen vuoksi silmukoiduksi. Sähköasemilla suurjännitteinen jakelujännite muunnetaan keskijänniteverkon jännitetasoon yleisesti 110/20 kV:n päämuuntajilla. Keskijänniteverkon jännite puolestaan muunnetaan pienjänniteverkkoon soveltuvaksi 20/0,4 kV:n jakelumuuntajilla. Kuluttajille pienjänniteverkon kautta jaettava pääjännite on yleisesti 400 V. Kaupungeissa ja taajamissa pien- ja keskijänniteverkot ovat pääsääntöisesti kaapeloituja, mutta muutoin suurin osa jakeluverkosta on ilmajohtoverkkoa. (Lakervi & Partanen 2009, 11–13.)

Keskijännitteistä ilmajohtoverkkoa on kaapeloitu voimakkaasti viimeisen kymmenen vuoden aikana, joten maakaapeloinnin osuus lisääntyy jatkuvasti (Nikander & Mäkinen 2017, 1; Reikko ym. 2019, 1). Maakaapeloinnin yleistyessä kasvaa myös maakaapeleiden tuottama maasulkuvirta, sillä kaapeleiden tuottama maasulkuvirta on noin 40–60-kertainen ilmajohtojen tuottamaan maasulkuvirtaan verrattuna (Lakervi & Partanen 2009, 186). Maakaapeloinnin lisääntymisestä johtuvat ilmiöt on kuitenkin otettava huomioon sähkönjakeluverkkojen suojausten suunnittelussa (Hartmann ym. 2019, 4–5; Nikander & Mäkinen 2017, 1, 7, 38–39; Reikko ym. 2019, 5).

2.2 Keskijänniteverkon viat

2.2.1 Oiko- ja maasulkuviat

Sähkönjakeluverkkojen yleisimmät vikatyypit ovat oiko- ja maasulku (Elovaara & Haarla 2011a, 166; Elovaara & Haarla 2011b, 339–341; Lakervi & Partanen 2008, 176; Mörsky 1993, 295). *Oikosulku* syntyy, kun virtapiirin eri johtimet joutuvat keskenään yhteyteen valokaaren, ulkoisen tekijän tai vaurion seurauksena. Oikosululle on ominaista, että vikavirta on suuri, mutta vikakohtan jännite on vastaavasti pieni. *Maasulussa* puolestaan virtapiirin yksittäinen johdin muodostaa johtavan yhteyden maan potentiaaliin, joten maasulkuviassa vikavirta voi muodostaa vikapaikkaan ja sen ympäristöön hengenvaarallisia vaarajännitteitä. (Elovaara & Haarla 2011b, 340; Lakervi & Partanen 2008, 28, 31, 72.) Yksivaiheinen maasulkuviaka voi myös kehittyä kaksi- tai kolmivaiheiseksi oikosuluksi (Louro & Ferreira 2021, 4). Tässä opinnäytetyössä keskitytään vain maasulkuihin ja niiden aiheuttamiin vaarajännitteisiin, koska maasulkujen osuus kaikista vikatyypeistä on suurin (Heine &

Lehtonen 2003, 1369; Louro & Ferreira 2021, 3) sekä oikosulut eivät pääsääntöisesti aiheuta hengenvaarallisten jännitteiden leviämistä maaperään ja johtaviin rakenteisiin.

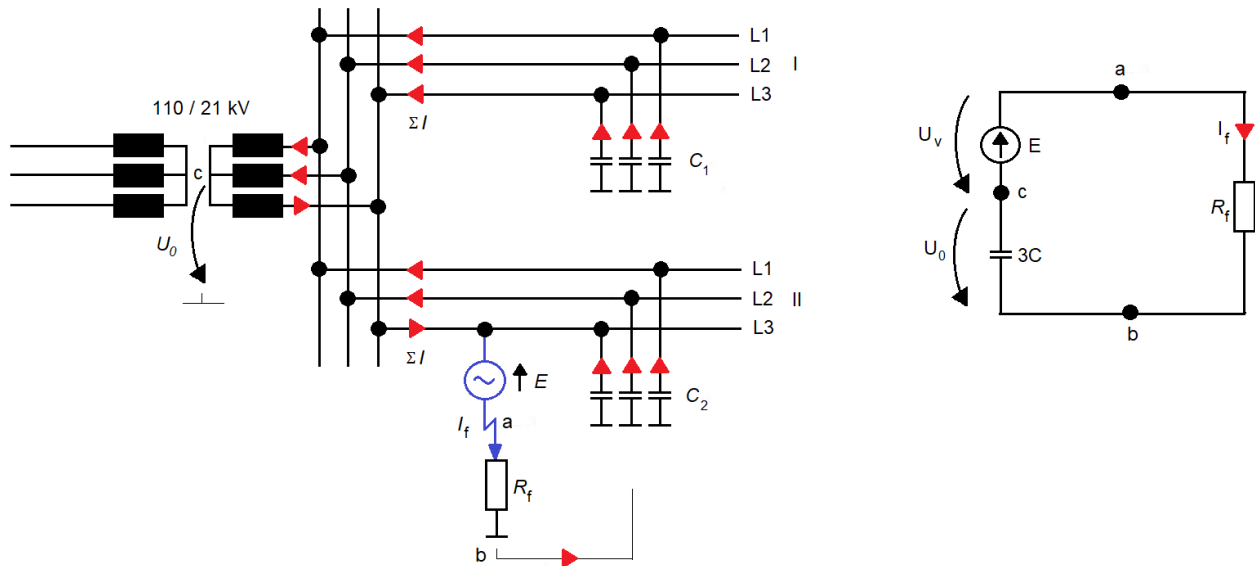
Valtakunnallisesti yleisesti käytössä oleva perinteinen maasulkusuojaus perustuu pääsääntöisesti vaihevirtojen epäsymmetrian ja tähtipistejännitteen mittaamiseen. Sähköasematasolla mitataan vikaantuneen johtolähdön nollavirta vaihevirtamuuntajien summakytkennällä tai kaapelivirtamuuntajalla. Tähtipistejännite eli nollajännite puolestaan saadaan mitattua sähköaseman jännitemuuntajien avokolmiokäämin avulla. (Lakervi & Partanen 2008, 190–193.) Perinteisen maasulkusuojauksen avulla toteutetun vikasuojauksen heikkoutena on kuitenkin se, että suojarole ei osaa tulkita riittävän hyvin jakeluverkossa tapahtuneita muutostilanteita, jotka vaikuttavat vikatapahtumasta johtuvien vaarajännitteiden muodostumiseen (Wahlroos ym. 2019, 1; vrt. Wahlroos ym. 2013, 1).

Yhtäältä Nikander ja Mäkinen (2017, 5, 38–39) toteavat, että perinteisen vaarajännitetarkastelun pohjalta suojattu sähköjakeluverkko ei myöskään huomioi kaikkia turvallisuustekijöitä, sillä kokonaisjännösvikavirran suuruus on riippuvainen myös harmonisista yliaaltovirroista ja maasulun aikaisesta resistiivisestä vikavirtakomponentista. Lisäksi perinteisen maasulkusuojauksen avulla toteutettu maasulkusuojaus ei välttämättä toimi selektiivisesti kaikissa tilanteissa (Wahlroos & Altonen 2014, 1–2; Wahlroos ym. 2013, 1), joten SFS 6001-standardin edellyttämä vaade automaattisen maasulun havaitsemisesta ja poiskytkemisestä ei välttämättä toteudu (SFS 6001:2018, 140). Edellä esitettyjen syiden vuoksi tässä opinnäytetyössä ei käsitellä perinteisen maasulkusuojauksen teoriaa, vaan luvussa kolme keskitytään uuden kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen toimintaan.

2.2.2 Maasulkuvikojen erityispiirteitä

Suomessa keskijänniteverkkojen tähtipisteet ovat yleensä maasta erotettuja tai sammutuskuristimen kautta maadoitettuja. Maasulkutilanteissa näiden verkkojen tähtipiste- ja vaihejännitteet sekä vikavirrat muuttuvat vikaresistanssin mukaisesti. Mitä suurempi on vikaresistanssi, niin sitä pienempi on jännitteissä esiintyvä muutos ja vikavirta. Maasta erotetun verkon kaikkien johtojen tuottaman maasulkuvirran reitti vikakohteesta maahan kulkee johtojen maakapasitanssien kautta syöttävän päämuuntajan tähtipisteeseen, josta se kulkee edelleen vikaantunutta vaihetta pitkin vikapaikkaan. Vikavirta kohtaa reitillään myös muuntajan käämien ja vaihejohtimen impedanssit.

Muuntajan ja vaihejohtimen impedanssit ovat huomattavasti johtimien maakapasitanssien edustamia impedansseja pienempiä, joten ne jätetään yleisesti huomioimatta. (Lakervi & Partanen 2008, 182–183, 186–187.) Maasta erotetun verkon maasulkutilannetta ja siitä johdettua Theveninin menetelmän mukaista sijaiskytkentäpiiriä on havainnollistettu kuviossa 1.



Kuvio 1. Maasta erotetun verkon maasulku ja maasulkupiirin sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen 2008, 183–184, muokattu)

Maasta erotetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkennässä kuvataan maakapasitansseja kondensaattorilla ja maasulkupaikassa ennen vikaa esiintyvää vaihejännitettä Theveninin lähteellä. Maakapasitanssit kytkeytyvät rinnan tähtipisteen ja maan potentiaalilin välille, joten kapasitanssien ylitse vaikuttaa tähtipiste- eli nollajännite. (Mts. 183–184.) Sijaiskytkennän perusteella voidaan muodostaa vikavirralle kaavan 1 ja nollajännitteen kaavan 2 mukaiset yhtälöt.

$$\underline{I}_F = \frac{\underline{E}}{R_f + \frac{1}{j3\omega C}} = \frac{j3\omega C}{1 + j3\omega C R_f} \cdot \underline{U}_v \quad (1)$$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{j3\omega C} \cdot (-\underline{I}_F) = \frac{-1}{1 + j3\omega C R_f} \cdot \underline{U}_v \quad (2)$$

, missä \underline{E} = Theveninin jännitelähde
 C = vaihejohtimien maakapasitanssi
 \underline{I}_F = vikavirta

R_f = vikavastus

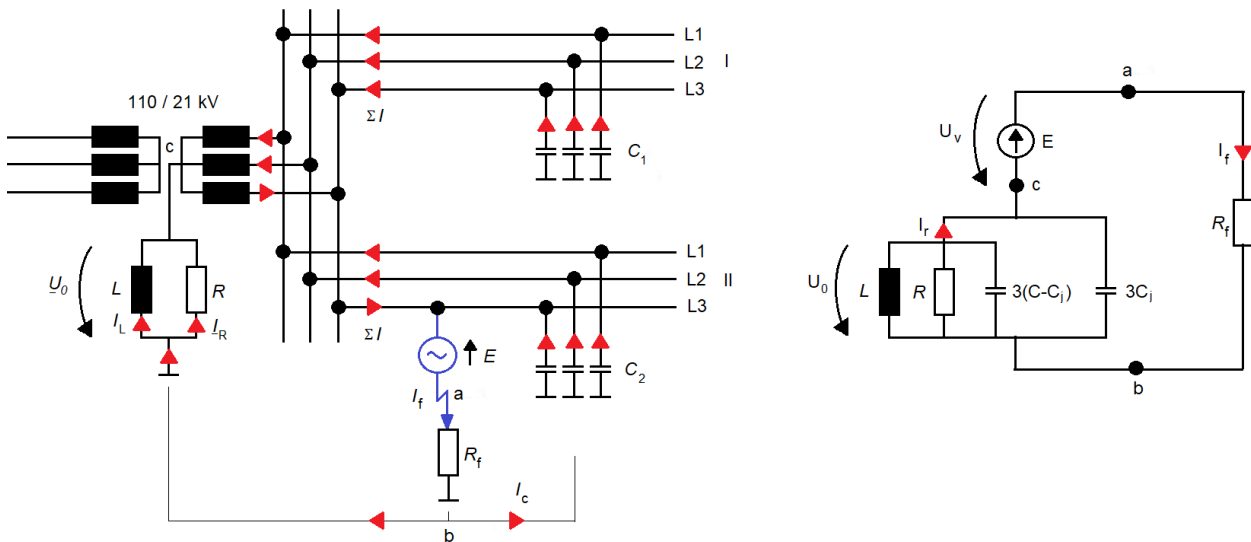
\underline{U}_y = vikaa edeltävä vaihejännite

\underline{U}_0 = nolajännite

$\omega = 2\pi f$ = kulmataajuus

Tähtipisteeseen kytketyn kuristimen avulla maadoitettua verkkoa kutsutaan sammutetuksi verkoksi. Tähtipisteeseen kytketyn kelan induktiivinen reaktanssi vastaa sähkönjakeluverkkoon kytkettyjen johtojen maakapasitanssien kapasitiivista reaktanssia, ja näin ollen vikavirta jää pieneksi. (Elovaara & Haarla 2011a, 210; Lakervi & Partanen 2008, 182, 184.) Pieni vikavirta mahdollistaa vikakohteeseen syntyvän valokaaren sammumisen itsestään, joten tästä syystä tähtipisteeseen kytketyn kuristimen avulla maadoitettua verkkoa sanotaan sammutetuksi verkoksi (Elovaara & Haarla 2011a, 210). Sammutuskelan avulla toisin sanottuna kompensoidaan sähköverkon johtojen tuottamaa maasulkuvirtaa, sillä sammutuskelan tuottama induktiivinen virta on vastakkaisuuntainen johtojen tuottamaan kapasitiiviseen virtaan verrattuna (Lakervi & Partanen 2008, 184–185).

Kompensointi voi olla keskitetty, hajautettu tai niiden yhdistelmä. *Keskitetyssä kompensoinnissa* yksi kompensointikela eli Petersenin kela on kytketty sähköaseman päämuuntajan alajännitepuolen tähtipisteeseen, tai tähtipiste on muodostettu erillisen tähtipistemuuntajan avulla. *Hajautetussa kompensoinnissa* kompensointikeloja on kytketty jakeluverkon varrelle sopiviin muuntopii-reihin. Pitkillä johtolähdöillä hajautetun kompensoinnin etuna on pienempi vikavirta kuin keskitetyn kompensoinnin tapauksessa. Tällöin kompensointikela olisi kustannustehokasta asentaa 10–20 kilometrin välein. (Jaakkola & Kauhaniemi 2013, 1–2, 4.) *Sammutetun eli kompensoidun verkon* maasulkutilannetta ja siitä johdettua Theveninin menetelmän mukaista sijaiskytkentäpiiriä on havainnollistettu kuviossa 2.



Kuvio 2. Sammutetun verkon maasulku ja maasulkupiirin sijaiskytkentä (Lakervi & Partanen 2008, 185, muokattu)

Sammutetun verkon sijaiskytkentä poikkeaa maasta erotetun verkon sijaiskytkennästä siten, että tähtipisteen ja maan välille on lisätty sammutuskuristimen induktanssi sekä mahdollista kuristimen lisävastusta kuvaava resistiivinen osa. Sammutuskuristin säädetään siten, että sen lävitse menevä virta vastaa suunnilleen verkoston maakapasitanssien kautta kulkevaa virtaa, joten maasulkutilanteessa esiintyvä vikavirta koostuu lähinnä sammutuskuristimen häviöiden ja lisävastuksen tuottamasta resistiivisestä virrasta. Resonanssitilanteessa kelan tuottama induktiivinen virta ja verkoston tuottama kapasitiivinen virta ovat yhtä suuria eli kumoavat toisensa, joten viallisessa vaiheessa ja vikakohdassa kulkee vain resistiivistä virtaa. (Lakervi & Partanen 2008, 184–185.) Käytännössä sammutettua keskijänniteverkkoa ei kuitenkaan käytetä resonanssitilanteessa, vaan verkosto on joko hieman yli- tai alikompensoitu. Tällöin sammutetun verkon maasulkupiirissä esiintyy jäännösmaasulkuvirtaa, jossa resistiivisen virran lisänä on myös kapasitiivista tai induktiivista virtaa. (Nikander & Mäkinen 2017, 16.) Sammutetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkennän perusteella voidaan muodostaa vikavirralle kaavan 3 ja nollajännitteelle kaavan 4 mukaiset yhtälöt.

$$\underline{I}_F = \frac{\underline{U}_y}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C - \frac{1}{\omega L})}} \quad (3)$$

$$\underline{U}_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f(3\omega C - \frac{1}{\omega L})} \cdot \underline{U}_y \quad (4)$$

, missä I_F = vikavirta
 U_y = vikaa edeltävä vaihejännite
 U_0 = nollajännite
 R_f = vikavastus
 C = vaihejohtimien maakapasitanssi
 R = sammutuskelan ja lisävastuksen resistanssi
 L = sammutuskelan induktanssi
 $\omega = 2\pi f$ = kulmataajuus

Kuvion 2 mukaisessa sijaiskytkennässä ja siitä johdetuissa kaavoissa ei ole kuitenkaan huomioitu verkoston häviöistä johtuvaa resistiivistä osuutta, joka muodostuu merkittäväksi etenkin pitkillä maakaapeliyhteyksillä. Pitkien maakaapeleiden suuret varausvirrat aiheuttavat nollajännitteen jännitehäviöitä johtojen sarjaimpedansseissa, jonka seurauksena vikavirtaan muodostuu kapasitiivisen varausvirran lisäksi myös pätövirtaa. (Nikander & Mäkinen 2017, 8.) Vikavirran resistiivisen osan eli pätökomponentin suurus on riippuvainen sähkönjakeluverkon resistiivisistä vuotovirroista, johtimien ja sammutuskuristimen resistansseista sekä sammutuskuristimen lisävastuksesta (Lakervi & Partanen 2008, 185).

Nikander ja Mäkinen (2017, 9–10) myös tuovat esille, että Gulbrandin (2009) lisensiaatin työssä sekä Blacburnin (1993) kirjassa esitettyjä Carsonin matriisiyhtälöitä soveltamalla voidaan määrittellä kaapelin nollapiirin impedanssit, jotka muodostuvat vaihejohtimien ja kosketussuojan, vaihejohtimien ja maadoitusjohtimen sekä vaihejohtimien ja maan välisistä virtapiireistä. Näiden virtapiirien impedanssien laskenta on haasteellista, sillä sähköverkon nollapiirin impedanssi on riippuvainen kaapelin sähköisistä ominaisuuksista, asennustavasta sekä asennus- ja maadoitusolosuhteista. Erityisesti pitkät kaapeliyhteydet aiheuttavat maasulkuvirran pätökomponentin osuuden kasvun, sillä vikavirran aiheuttamat häviöt kasvavat nollapiirin resistiivisyyden kasvaessa. Vikavirran pätökomponenttia ei voida kompensoida, joten se kasvattaa myös jäännösvikavirran suuruutta. Pätökomponentin suuruutta voidaan pienentää hajautetun kompensoinnin, kaapelin valinnan, verkkotopologian ja maadoitusten avulla. (Nikander & Mäkinen 2017, 2, 9–10, 29.)

Maasulkujen yhteydessä syntyy yleensä myös virran ja jännitteen yliaaltoja. Maasulkujen aikana vikavirrassa esiintyy yleisesti viidettä yliaaltoa, sekä lisäksi suuritaajuisia muutosvirtoja eli vir-

tatransientteja esiintyy maasulun alkuhetkinä, kun terveiden vaiheiden maakapasitanssit varautuvat ja viallisen vaiheen maakapasitanssit purkautuvat. (Lakervi & Partanen 2008, 190.) Myös jakeluverkon erilaiset yliaaltolähteet synnyttävät vikakohtaan yliaaltovirtoja, joiden suhteellinen osuus jäännösvikavirrasta kasvaa, kun perustaaajuinen maasulkuvirta kompensoidaan pieneksi. Jännitesäroä jakeluverkkoihin tuottavat verkkoon liitetyt epälineaariset kuormitukset, resonanssipiirit ja rautasydämisten verkkokomponenttien epälineaarisuudet. Myös syöttävän jännitetaso jännitteen yliaallot aiheuttavat yliaaltoja alemmalle jännitetasolle. Yleisimpiä epälineaarisia kuormituksia ovat tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, teholähteet, taajuusmuuttajat, elektroniikkalaitteet, aurinkosähköjärjestelmät, loistelamput, tuulipuistot sekä hitsauslaitteet ja valokaariuunit. (Nikander & Mäkinen 2017, 2; Nikander & Pakonen 2022, 5.)

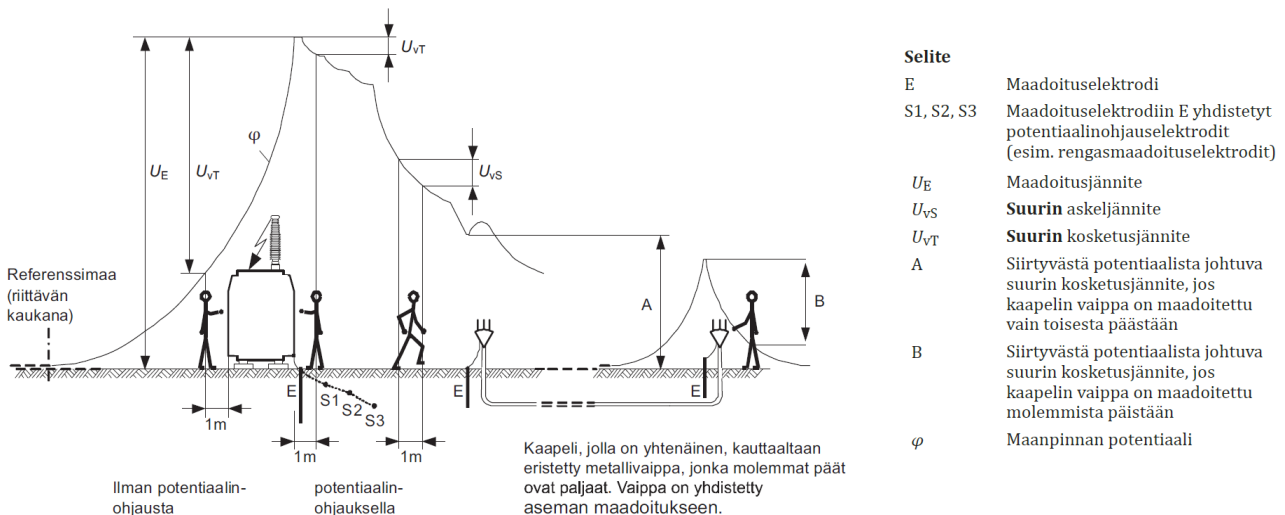
Suurjänniteverkon tähtipiste voidaan maadoittaa myös pienen impedanssin kautta (SFS 6001:2018, 90), jolloin maasulkuvirrat voivat olla jopa kolmivaiheisia oikosulkuvirtoja suurempia (IEC 60909-0:2016, 49). Myös kaksoismaasuluissa, joissa virtapiiri eri vaihejohtimien välille muodostuu maan kautta, vikavirrat voivat olla lähes oikosulkuvirtojen suuruisia (Gatta, Geri, Lauria & Maccioni 2018, 2; SFS 6001:2018, 26, 90). Kaksoismaasulun aikaiset suuret vikavirrat aiheuttavat kaapelivaippojen vaurioitumisen riskin ja maan potentiaalinen nousu vian piirissä olevissa maadoitusjärjestelmissä. Kaksoismaasulku voi esiintyä joko saman lähdön eri vaiheiden välillä tai kokonaan eri lähtöjen välillä. Kaksoismaasulun aikaiset vikavirrat ovat riippuvaisia virtatien vastuksesta, joten yleensä avojohtojen välillä esiintyvien kaksoismaasulkujen vikavirrat ovat huomattavasti pienempiä kuin kaapeliverkossa tapahtuvien kaksoismaasulkujen vikavirrat. (Gatta ym. 2018, 2.) Yhteenvetona voidaan todeta, että maasulun aikainen vikavirta on riippuvainen maadoitusjärjestelmän tähtipisteen maadoitustavasta, jakeluverkon tuottamasta kapasitiivisesta ja resistiivisestä maasulkuvirrasta (SFS 6001:2018, 90), vikaresistanssista ja vikatyypistä (Lakervi & Partanen 2008, 197–198) sekä verkoston harmonisesta jännitesäröistä (Mörsky 1993, 323–324; Nikander & Mäkinen 2017, 15).

2.3 Sähkönjakeluverkkojen vaarajännitteet ja niiden riskit

2.3.1 Maadoitus-, kosketus- ja askeljännitteet sekä siirtyvät potentiaalit

Elovaaran ja Haarlan (2011b, 428) mukaan maadoitusjännitteen suuruus määräytyy vikakohteen maadoitusresistanssin ja sen kautta kulkevan vikavirran vaikutuksesta. Maadoitusjännitteen suuruuden mukaan määräytyvät myös sähkönjakeluverkon vaarajännitteet, joita ovat kosketus- ja askeljännite, siirtyvä kosketusjännite sekä takaperoinen kosketusjännite. Kosketusjännite muodostuu johtavaan kappaleeseen kosketettaessa ihmiskehon kosketuskohdan ja maan potentiaalinvälille. (Mts. 428.)

Hietalahti (2013, 30) puolestaan tuo esille, että kosketusjännitteellä tarkoitetaan ihmiskehon kahden eri pisteen välille syntyvän virtatien välistä jännite-eroa. Askeljännitteellä tarkoitetaan ihmiskehon jalkojen välille syntyvää kosketusjännitettä (Elovaara & Haarla 2011b, 428; Hietalahti 2013, 30). Sähkönjakelujärjestelmien maasulun aikaisia vaarajännitteitä voi siirtyä johtavia rakenteita pitkin myös varsinaisen vikakohteen ulkopuolelle (ks. kuvio 3), joten kosketusjännitetarkastelussa on otettava huomioon myös siirtyvästä potentiaalista johtuva kosketusjänniteriski (SFS 6001:2018, 19).



Kuvio 3. Maadoituksissa kulkevan vikavirran aiheuttamat maan jännitepotentiaalit maadoitetuissa kohteissa (SFS 6001:2018, 23, muokattu)

Di Silvestre, Dusonchet, Mangione ja Zizzo (2016, 1) tuovat tutkimuksessaan esille, että suurjännitepuolella tapahtuvissa maasuluissa vikavirrat ovat erittäin suuria, joten ne aiheuttavat merkittäviä maan potentiaalın nousuja vikakohteissa. Osa vikavirrasta palaa syöttävälle suurjännitesähköasemalle ukkosköysiä pitkin, mutta osa vikavirrasta palaa maahan keskijännitepuolen kaapeli-vaippoja pitkin kaapeleihin kytkettyjen muuntamoiden kautta. Vikavirta jakautuu sähköaseman lähtöihin kytkettyjen muuntamoiden suhteessa, joten ensimmäisillä muuntopiireillä maan potentiaalın nousu on suurin. Potentiaalın nousun suuruuteen vaikuttaa vikavirran suuruuden lisäksi myös muuntopiirin maadoitusimpedanssi. Täten kaikki sähköasemalta lähtevät maadoitusjohtimet pitää ottaa huomioon vaarajänniteselvityksessä. (Mts. 1–4.)

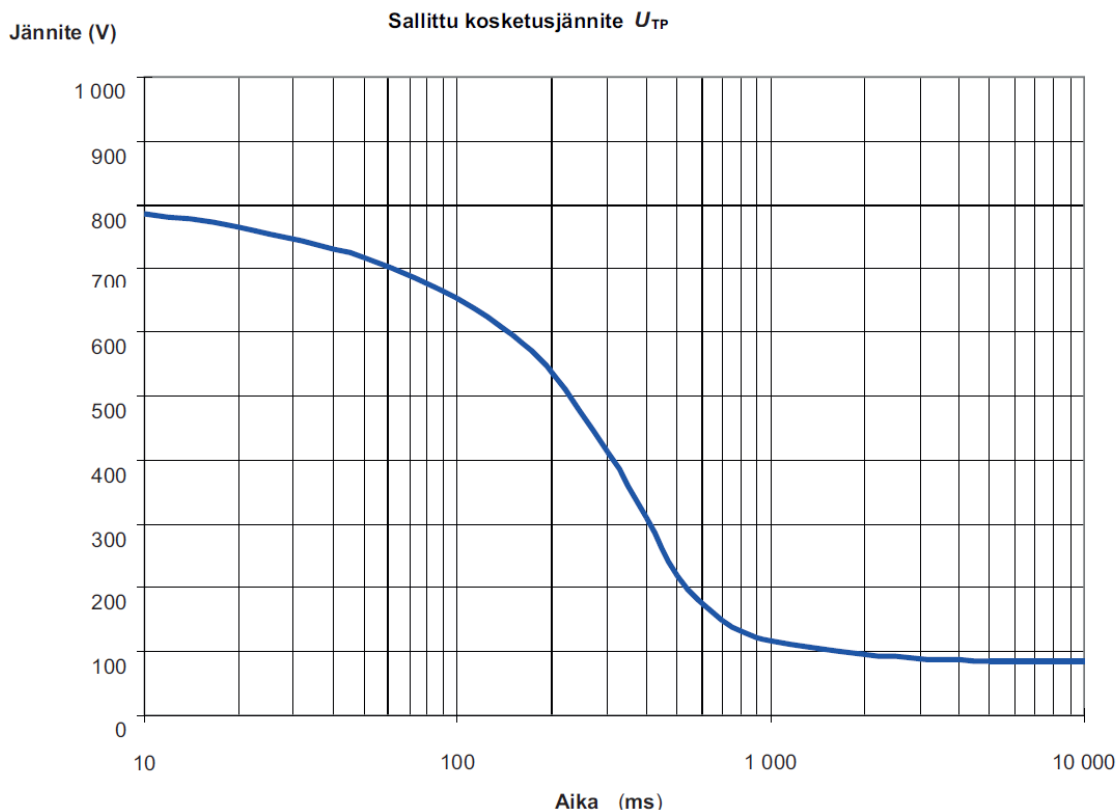
Suurjännitejärjestelmistä pienjännitepuolelle siirtyvää kosketusjänniteriskiä voidaan pienentää eristämällä suurjännitejärjestelmän maadoitukset pienjännitejärjestelmien maadoituksista. Käytännössä Suomen olosuhteissa suur- ja pienjännitejärjestelmien maadoitukset pyritään kuitenkin yhdistämään, sillä kosketusjännitteet pyrkivät leviämään eristettyihin maadoitusverkkoihin suurjänniteverkon maasulkutilanteissa. (SFS 6001:2018, 142.) Yhtäältä tutkimuksissa on tullut esille, että maanalaisia johtavia rakenteita pitkin siirtyvät kosketusjännitteet on otettava riskitarkastelussa huomioon erityisesti kaupunkien sähköjakelujärjestelmissä. Kaupunkiympäristöissä on paljon maanalaisia johtavia rakenteita, joita ei ole yhdistetty sähköjakeluverkon maadoituspotentiaaliin. Täten vaarallisia potentiaalieroja voi muodostua sähköjakeluverkon maasulkutilanteissa aktiivisten maadoitusten kautta esimerkiksi johtaviin aitarakenteisiin, putkistoihin tai ratakiskoihin. (Parise, Parise & Martirano 2015, 5021; Pons, Colella, Tommasini, Napoli, Montegiglio, Cafaro & Torelli 2015, 5243–5244; Sa'ed, Di Silvestre, Sanseverino, Zizzo, Colella & Pons 2017, 1–4.)

Tutkimusten mukaan kosketusjänniteriskiä voidaan pienentää huomattavasti yhdistämällä eri maadoitusjärjestelmät toisiinsa, koska tällöin vikapaikan jännitepotentiaali leviää tasaisesti eri maadoitusjärjestelmien välille (Li, Cao, Du, Ding, Zhang, Jia, Qiu, Du & Chen 2023, 1, 4, 6; Mallits, Schmutzer, Fickert, Hohn & Hufnagl 2016, 5). Suomessa maadoitusjärjestelmien suunnittelussa tulee ottaa huomioon, että vaarajännitteet pysyvät sallituissa rajoissa suojalaitteiden normaalien toiminta-aikojen puitteissa (SFS 6001:2018, 88). Elovaaran ja Haarlán (2011b, 430–431) mukaan kosketusjänniteriskiä voidaan pienentää käyttämällä potentiaalinhjauselektrodeja, eristämällä kosketeltavia metalliosia, käyttämällä eristävää alustaa, lisäämällä vikavirran virtateitä tai lyhentä-

mällä suojauksen toiminta-aikaa. Teoriatiedon (Elovaara & Haarla 2011a, 210–2012; Lakervi & Partanen 2008, 182–190) ja tutkimuksien (Hartmann ym. 2019, 5–6; Tarko, Kmak, Nowak & Szpyra 2022, 15) kautta on myös osoitettu, että jakeluverkon tähtipisteen maadoitustavalla on suuri vaikutus vikatilanteessa syntyvien vaarajännitteiden muodostumiseen.

2.3.2 Sallitut kosketusjännitteet ja niiden fysiologiset vaikutukset

Sähkönjakeluverkkojen vika- ja häiriötilanteiden seurauksena saattaa esiintyä hengen-, terveyden tai omaisuuden vaaraa aiheuttavia vaarajännitteitä. SFS 6001-standardissa on asetettu suurjänniteverkoissa esiintyville vaarajännitteille raja-arvot, jotka on otettava Suomessa huomioon sähkönjakeluverkkoa suunniteltaessa, rakennettaessa ja käytettäessä (SFS 6001:2018, 7–9, 91–93). Toisaalta on esitetty, että ihmiskeholla vaaralliset jännitteet ovat riippuvaisia monesta eri tekijästä. Vaarallisen jännitteen raja-arvo on riippuvainen vikavirran reitistä ihmiskehossa, ihon ja jännitteisen kohteen välisestä kosketuspinta-alasta, kosteusolosuhteista, lämpötilasta sekä jännitteelle altistumisajasta. (esim. Hietalahti 2013, 30–33; IEC 60479-1:2018, 13; IEC 60479-5:2007, 7, 14–15.) SFS 6001-standardin mukaiset vian kestoajasta riippuvat sallitut kosketusjännitteet ovat esitetty kuviossa 4.

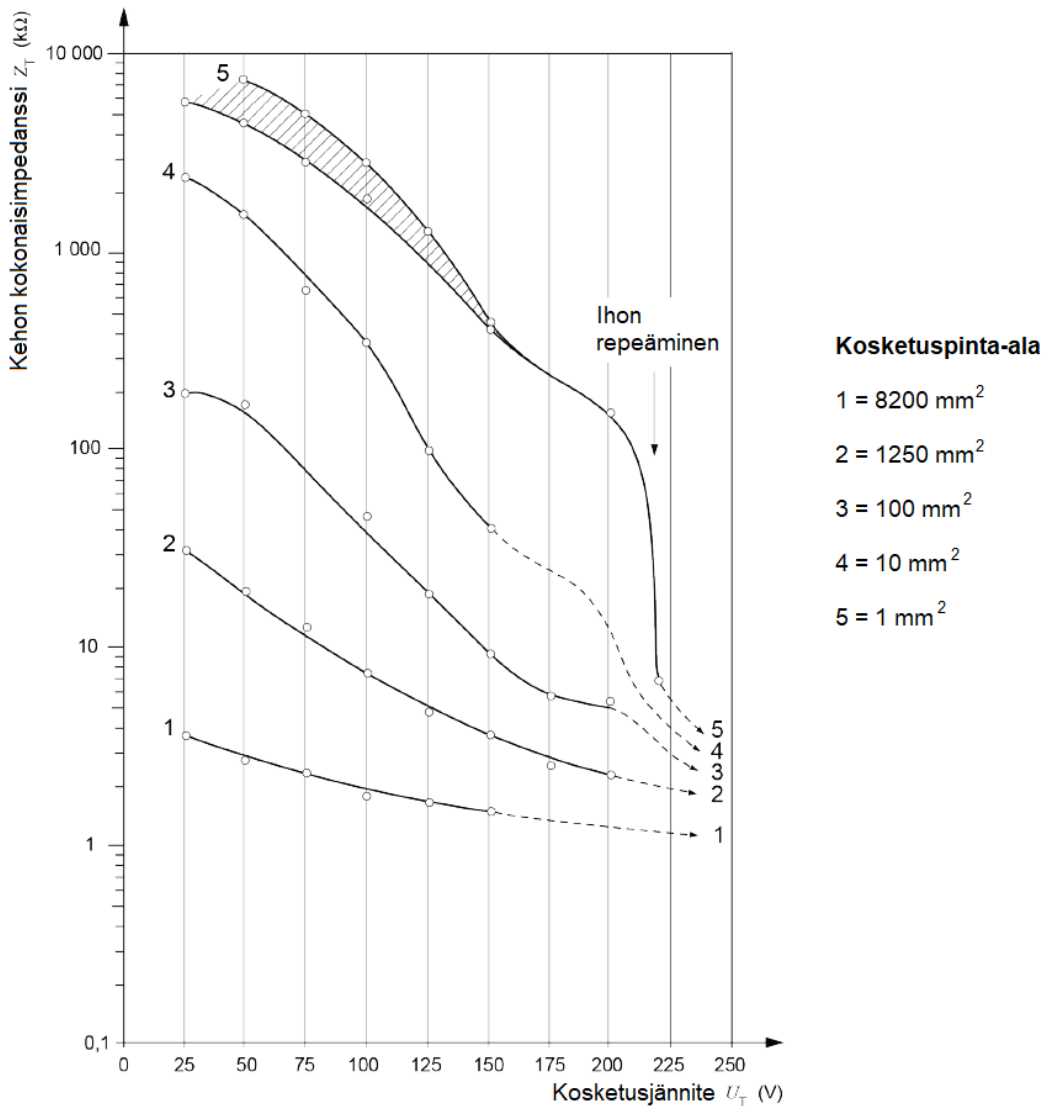


Kuvio 4. Sallittu kosketusjännite ajan funktiona (SFS 6001:2018, 93)

Hietalahden (2013, 30–33) mukaan kosketusjännitteen vaarallisuuteen vaikuttavat kosketusjännitteen ja vikavirran suuruus, vikavirran reitti ihmiskehossa, vikavirran taajuus sekä vikavirran kesto-aika. Ihmiskehon impedanssi ei ole vakio, vaan se muuttuu kosketusjännitteen suhteessa. Pienillä alle 300 V:n kosketusjännitteillä ihmiskehon impedanssi on suurimmillaan, sillä ihmiskehon kokonaisimpedanssiin vaikuttaa merkittävästi ihon eristävä vaikutus. Kun kosketusjännite kasvaa yli 300 V:n, niin ihon eristävä vaikutus vähenee ihossa tapahtuvien läpilyöntien vaikutuksesta. Tällöin ihmiskehon vikaimpedanssi määräytyy lähinnä ihmiskehon sisäisen impedanssin mukaisesti. (Mts. 30–33.)

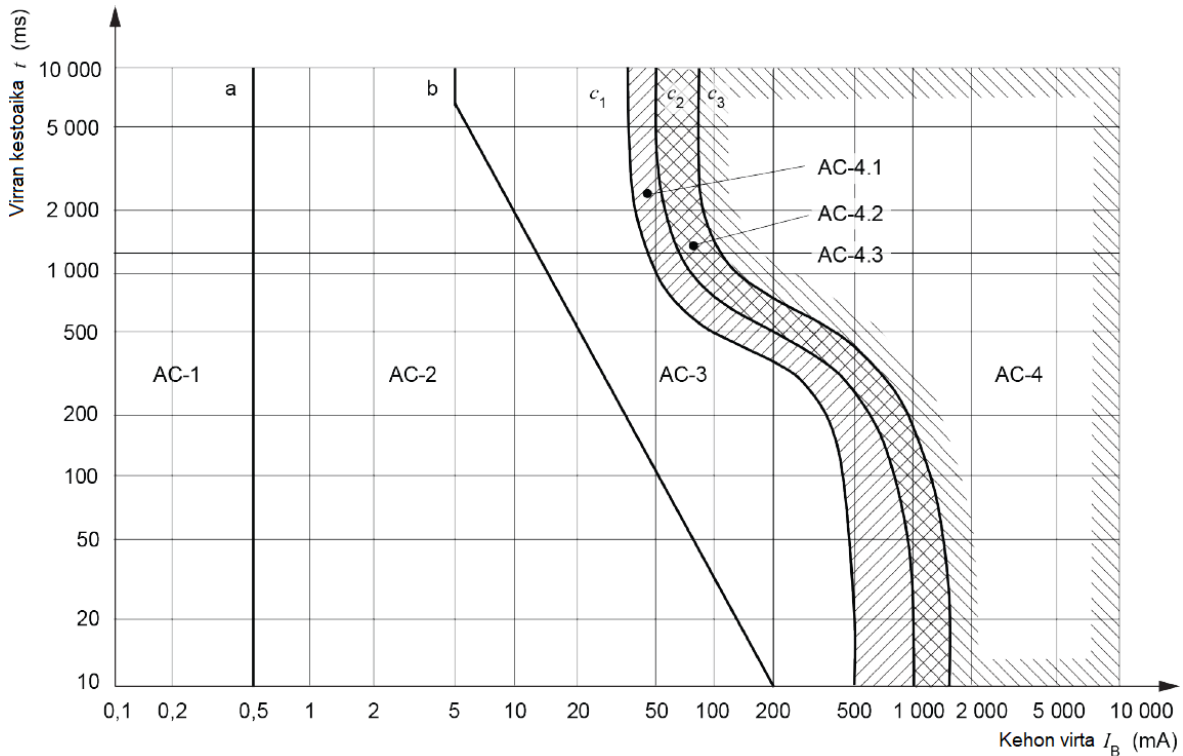
Ihmiskehon impedanssi on riippuvainen vikavirran taajuudesta ja sen reitistä ihmiskehossa, vikavirralla altistumisajasta, kosketusjännitteen suuruudesta sekä ihon paksuudesta, kosteudesta ja lämpötilasta. Lisäksi kehon impedanssin suuruus on riippuvainen siitä, miten suuri on jännitteisen kohteen kosketuspinta-ala, ja miten suurella paineella jännitteistä osaa kosketellaan. Myös yksilön henkilökohtaiset fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat ihmiskehon sisäisen impedanssin suuruuteen. Ihmiskehon sisäisen impedanssin suuruus vaihtelee 95 %:lla ihmisistä 400–1050 Ω :n välillä. (IEC 60479-1:2018, 13–15.)

Yhtäältä Griffiths, Woodhouse ja Palmer (2013, 2) esittävät, että sähköiskun vaarallisuus on riippuvainen henkilön yksilöllisistä ominaisuuksista. Vaikka henkilön kehon impedanssi olisi normaalia suurempi, niin silti kyseinen henkilö voi olla normaalia herkempi kehon läpi menevän virran vaikutuksille. (Mts. 2.) Esimerkiksi naiset ja lapset voivat olla miehiä herkempiä sähkövirran fysiologisille vaikutuksille (IEC 60479-2:2019, 19). IEC 60479-1-standardissa (2018, 32) puolestaan tuodaan esille, että ihon eristävä vaikutus voidaan ottaa huomioon alle 200 V:n kosketusjännitteillä, sillä ihon on todettu repeävän noin 220 V:n jännitteellä (ks. kuvio 5).



Kuvio 5. Ihmiskehon kokonaisimpedanssi suhteutettuna kosketuspinta-alaan ja 50 Hz:n kosketusjännitteeseen kuivissa olosuhteissa (IEC 60479-1:2018, 32, muokattu)

Sähköiskut voivat aiheuttaa hengenvaarallisia fysiologisia vaikutuksia jo hyvin alhaisilla jännitteillä. Kuolemaan johtaneita sähkötapaturmia on tapahtunut jopa alle 50 V:n jännitteellä. (Peng & Shikui 1995, 3–4; Roberts 2010, 107.) Standardeissa pyritään yleistämään asioita, joten kaikkia mahdollisia riskitekijöitä ei todennäköisesti ole mahdollista ottaa huomioon sallittuja kosketusjännitteitä ja vikavirtarajoja määriteltäessä. Kuviossa 6 esitetään IEC 60479-1-standardissa esitetyt kehon lävitse menevien virtojen ja vian kestoajan mukaiset raja-arvot, joiden mukaan ihmiskehossa alkaa tapahtumaan fysiologisia vaikutuksia. Taulukossa 1 selitetään kuvion 6 mukaisten raja-arvojen fysiologisia vaikutuksia.



Kuvio 6. Ihmiskehon fysiologisten vaikutusten raja-arvot vikavirran ja vian kestoajan mukaisesti (IEC 60479-1:2018, 44, muokattu)

Taulukko 1. Kuvion 6 mukaisten raja-arvojen fysiologisten vaikutusten kuvaukset (IEC 60479-1:2018, 25, muokattu)

Alueet	Raja-arvot	Fysiologiset vaikutukset
AC-1	Alle 0,5 mA käyrä a	Havaitseminen mahdollista, mutta yleensä ei aiheuta refleksinomaisia reaktioita.
AC-2	Yli 0,5 mA käyrään b	Havaitsemiskynnys. Tahdonvastaiset lihassupistukset ovat todennäköisiä, mutta yleensä ei esiinny haitallisia sähköfysiologisia vaikutuksia.
AC-3	Käyrän b yläpuolella	Vahvoja tahdonvastaisia lihassupistuksia. Hengitysvaikeuksia. Sydämen toiminnan häiriöitä, jotka ovat hoidettavissa. Immobilisaatiota voi tapahtua. Vaikutukset lisääntyvät virran kasvaessa. Yleensä ei ole odotettavissa orgaanisia vaurioita.
AC-4 ^a	Käyrän C ₁ yläpuolella	Patofysiologisia vaikutuksia voi esiintyä, kuten sydämen pysähdys, hengitysvaikeuksia sekä palovammoja tai muita soluvaurioita. Kammiovärinän todennäköisyys kasvaa virran voimakkuuden ja ajan suhteessa.
	C ₁ -C ₂	AC-4.1 Sydänkammiovärinän todennäköisyys kasvaa ja on 5 % C ₂ -käyrän kohdalla.
	C ₂ -C ₃	AC-4.2 Sydänkammiovärinän todennäköisyys alle 50 %.
	Käyrän C ₃ yläpuolella	AC-4.3 Sydänkammiovärinän todennäköisyys yli 50 %.
^a Jos vikavirralla altistutaan alle 200 ms ajaksi ja asiaan liittyvät kynnyksarvot ylittyvät, niin kammiovärinä alkaa vain haavoittuvan ajanjakson aikana. Kammiovärinän todennäköisyyksien määrittelyssä on käytetty virran reittiä vasemmasta kädestä jalkoihin. Muilla virran kulkuteillä on otettava huomioon sydämen virtakertoimen vaikutus.		

Kuvion 6 ja taulukon 1 tietojen perusteella voidaan todeta, että kehon lävitse menevän virran vaarallisuus on riippuvainen virran suuruudesta ja sille altistumisajasta. Mikäli kehon lävitse menevä vikavirta ja sille altistumisaika on pienempi kuin C_1 -käyrän mukaiset raja-arvot, niin sähköisku ei todennäköisesti aiheuta henkeä tai terveyttä uhkaavia fysiologisia vaikutuksia. Käyrän C_1 yläpuolisella alueella sähköiskun vaarallisuus lisääntyy nopeasti kehon läpi menevän virran ja sille altistumisajan kasvaessa. Yli 500 mA:n virta kehon lävitse voi aiheuttaa hengenvaarallisia vaikutuksia jo muutaman kymmenen millisekunnin aikana. Kammiovärinän riski lisääntyy huomattavasti, mikäli vikavirralla altistutaan yli 200 ms:n ajaksi. Useiden sekuntien altistuminen yli 100 mA:n kehon läpi menevälle virralle aiheuttaa hyvin suurella todennäköisyydellä sähköiskun saaneelle henkilölle vakavia henkeä ja terveyttä uhkaavia vaurioita. (IEC 60479-1:2018, 25, 44.)

Yhtäältä Alakare, Lindahl ja Suojanen (2023, 1384) tuovat esille, että muutaman milliampeerin kehon lävitse menevä virta on tunnistettavissa, mutta virran kasvaessa yli 16 mA:n ei sähköiskun saanut henkilö pysty enää irtautumaan omin voimin jännitteisestä kohteesta. Raajojen ja hengityselinten kouristelua tapahtuu vikavirran ollessa 20–50 mA, ja yli 50 mA:n vikavirroilla kammiovärinä on mahdollinen. (Mts. 2023, 1384.) Myös Kono, Takahashi, Nakamura, Miyaki ja Rekimoto (2018, 22) esittävät, että sähköiskujen turvallisuutta voidaan parantaa rajoittamalla kehon lävitse menevää virtaa. Sähköiskun vaarallisuus on riippuvainen myös jännitteestä, taajuudesta, sähköiskulle altistumisajasta sekä vikavirran reitistä kehossa. Erityisesti sydämen lävitse menevät vikavirrat ovat vaarallisia. Vaihtosähkölle altistuminen on vaarallisempaa kuin tasasähkölle altistuminen. Korkeammilla taajuuksilla ja jännitteillä kehossa tapahtuu myös palo- ja lämpötapahtumia. Sähköiskujen vaarallisuutta arvioitaessa on huomioitava, että eri ihmisten kehot eroavat toisistaan. (Mts. 19–23.) Lisäksi on otettava huomioon, että vaarajännitteen aiheuttaman virran suuruus on riippuvainen vikapiiriin kokonaisimpedanssista, joka muodostuu ihmiskehon impedanssista, mahdollisesta jalkineiden lisäresistanssista ja seisomapaikalla vaikuttavasta maaperän resistanssista (SFS 6001:2018, 101–107).

Mielenkiintoista on huomata, että erään tutkimuksen (Kroll, Panescu, Perkins, Hirtler, Koch & Andrews 2021, 1260–1261) mukaan IEC 60479-1-standardissa esitetyt vikavirran raja-arvot olisivat liian tiukkoja, joten tutkijoiden mukaan fysiologisia vaikutuksia aiheuttavien vikavirtojen osalta standardin mukaista käyrästä tulisi hieman muuttaa. Toisaalta Schneeweiss, Panescu, Stunder,

Kroll, Andrews ja Theiler (2021, 107, 116) tuovat tutkimuksessaan esille, että ihmiskehon läpi menevän vikavirran taajuuden ja poikittaisten reittien vaikutusta ei ole kaikilta osin riittävästi huomioitu IEC 60479-1-standardissa. Kroll ja muut (2021, 1261) puolestaan kertovat, että IEC 60479-1-standardissa esitettyjen käyrien käännepiste osuu ihmisen sykealueelle 60–120. Täten standardin mukaisissa käyrissä ei ole otettu huomioon eri sykealueiden vaikutusta sähköiskun vaarallisuuteen. (Mts. 2021, 1261.) Yhtäältä tutkimukset (Griffiths ym. 2013, 4; Kroll ym. 2021, 1262; Roberts 2010, 102; vrt. Schneeweiss ym. 2021, 116) osoittavat, että mitä suurempi on kosketusjännite ja mitä pidempi on vian poiskytkentäaika, niin sitä suurempi riski on saada hengenvaarallisia sähköiskuja. Sähköiskuista johtuvat kuolemat ovat kuitenkin erittäin harvinaisia Suomessa (Linja-aho 2020, 44), mutta yksistään Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiirin alueella kirjataan vuosittain noin 200 tapausta, joissa potilas on altistunut sähkövirran vaikutukselle (Alakare ym. 2023, 1383). Sähkönjakeluverkkojen vaarajännitteistä johtuvista sähkötapaturmista ei ole tilastotietoa löydettävissä. Myöskään kaikista sähköalan ammattilaisille tapahtuvista sähkötapaturmista ei ole tietoa saatavilla, sillä pienet tapaturmat jätetään yleisesti raportoimatta (Tulonen 2010, 103).

2.4 Sähköverkkojen sähköturvallisuus ja maadoitustavat

Sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähköturvallisuutta ohjataan Suomessa sähköturvallisuuslailla, joka velvoittaa suunnittelemaan, rakentamaan, käyttämään ja korjaamaan sähkönjakeluverkot siten, ettei niistä aiheudu hengen-, terveyden- tai omaisuuden vaaraa. Lisäksi sähköverkot eivät saa aiheuttaa liiallisia sähkömagneettisia häiriöitä tai häiriintyä herkästi sähkömagneettisista häiriöistä. (L 1135/2016, 4 §, 6 §.) Sähkönjakeluverkkojen tulee olla myös turvallisia käyttää, rakennuskustannusten ja siirtohäviöiden suhteen optimoituja sekä käyttövarmuudeltaan luotettavia (Elovaara & Haarla 2011a, 73).

Kantaverkon 400 kV:n ja 220 kV:n siirtoverkot ovat maadoitettu sähköasemien muuntajien tähtipisteiden kautta joko suoraan tai virranrajoituskuristimen kautta maahan. Suurjännitteinen 110 kV:n verkko on maadoitettu vain tiettyjen muuntajien tähtipisteiden kautta hyödyntäen virranrajoituskuristimia. Keskijännitteiset 20 kV:n jakeluverkot voivat taasen olla maasta erotettuja tai tähtipisteeseen kytketyn sammutuskuristimen kautta maadoitettuja (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 255–256; Elovaara & Haarla 2011b, 337–339), mutta pienjänniteverkkojen tähtipisteet ovat pääsääntöisesti suoraan maadoitettuja (Aro ym. 2015, 255; Elovaara & Haarla

2011a, 211). Eri maadoitustapojen avulla voidaan rajoittaa maasulkuvikavirtaa ja näin ollen vaikuttaa vaarallisten kosketus- ja askeljännitteiden sekä siirtyvien kosketusjännitteiden muodostumiseen (Elovaara & Haarla 2011b, 337–339). Sähköjakeluverkon maadoitustavalla voidaan vaikuttaa myös maasulkuylijännitteiden muodostumiseen (Aro ym. 2015, 255–259; Elovaara & Haarla 2011a, 209).

Suurjännitelaitteistot eli yli 1000 V:n käyttöjännitteiset laitteistot on rakennettava Suomessa SFS 6001-standardin vaateiden mukaisesti. Standardi edellyttää maadoittamista kaikille sähköjärjestelmän osille, jotka voivat tulla jännitteelle alttiiksi. (Elovaara & Haarla 2011b, 430.) Maadoituksilla yhdistetään laite, laitteisto tai virtapiiri maan potentiaaliin, sekä maadoitukset voidaan yleisesti jakaa käyttö- ja suojamaadoituksiin. *Käyttömaadoituksen* avulla pidetään jännite-epäsymmetria ja maavirta pienenä sekä virtapiirin ja maan välinen potentiaali sillä tasolla, ettei se aiheuta vaurioita tai vaaratilanteita. *Suojamaadoituksien* avulla puolestaan varmistetaan metallirunkoisten laitteiden käyttäjäturvallisuus estämällä vaarallisen kosketusjännitteen tuleminen laitteen runkoon. (Elovaara & Haarla 2011b, 427; vrt. Hietalahti 2013, 30.)

2.4.1 Sähköverkkojen maadoitusjärjestelmien vaateet

Sähköjakeluverkkojen maadoitusjärjestelmät on rakennettava Suomessa pienjännitestandardin SFS 6000 ja suurjännitestandardin SFS 6001 vaateiden mukaisesti. Pien- ja suurjänniteverkkojen maadoitukset on yleensä yhdistetty, joten maadoitusten osalta tulee ottaa huomioon molempien standardien vaatimukset. Suurjänniteverkon maasulkujen aiheuttamia maadoitusjännitteitä pyritään pienentämään maadoittamalla pienjännitejärjestelmät mahdollisimman useasta kohdasta. Suomessa jokaisella sähköliittymällä tulee olla oma maadoituselektrodi, joka kestää sähkövirran vaikutukset, mekaanisen rasituksen ja korroosion. Suositeltavin maadoituselektrodi sähköliittymillä on perustusmaadoituselektrodi, joka toteutetaan rakennuksen perustusten alle asennetun rengas- tai verkkomaisen johtavan rakenteen avulla. (SFS 6000-5-54:2022, 8–9, 25; Ylinen, Koivisto & Kauppila 2019, 31, 34–36, 49, 54.) SFS 6001-standardi myös edellyttää, että maasulun aikana ei saa muodostua minkään maadoitetun laitteen tai kotelon runkoon rasisusjännitettä, jolla voisi olla vaikutusta laitteen turvalliseen käyttöön. Rasisusjännite saa olla maksimissaan 1200 V, mikäli maasulkuvian kestoaika on 5 sekuntia tai sitä lyhyempi. Mikäli maasulkuvika kestää yli 5 sekuntia, niin suurin sallittu rasisusjännite on 250 V. (SFS 6001:2018, 20, 96.)

Suur- ja pienjänniteverkkojen maadoitukset on suositeltavaa aina yhdistää, sillä suurjänniteverkon puolella tapahtuvien maasulkujen aiheuttamat maadoitusjännitteet pyrkivät leviämään erotettuihin pienjänniteverkkojen maadoituksiin. Vaikka maadoitusjärjestelmät olisivat osa laajaa maadoitusjärjestelmää, niin vaarallisia potentiaalieroja voivat aiheuttaa kaukana eri potentiaalissa olevat eristettyjen putkistojen, kaapeleiden tai maadoitettujen suurjänniteasennusten kosketeltavissa olevat johtavat osat. Vähintään 110 kV:n suurjännitesähköaseman maadoitukset voidaan erityistapauksessa erottaa muista maadoituksista, jotta vältetään 110 kV:n puolen maasulkujen aiheuttamien kosketusjännitteiden leviäminen muihin maadoitusjärjestelmiin. (SFS 6001:2018, 97, 142–143.) Suur- ja pienjännitemaadoitusten yhdistäminen myös estää pienjänniteverkon käyttötäjuisten rasisusjännitteiden muodostumisen. Lisäksi maadoitusten yhdistämisellä estetään laiteviakojen syntyminen, kun suurjännitepuolen suojamaadoitettujen osien ja pienjännitepuolen välille ei nouse ylijännitteitä salamaniskun seurauksena. (Ylinen ym. 2019, 54.)

Suurjännitestandardissa SFS 6001 (2018, 87–88) edellytetään, että maadoitusjärjestelmien suunnittelussa on otettava huomioon sähköverkon turvallisuuskriteerit ja maadoitusjärjestelmän toiminnalliset vaatimukset, jotka yhdessä muodostavat suunnitteluparametrien perusvaatimukset. Turvallisuuskriteerejä määriteltäessä on otettava huomioon vikatilanteissa esiintyvät suurimmat sallitut kosketus- ja askeljännitteet sekä siirtyvät potentiaalit. Erityisesti tulee ottaa huomioon vikavirran suuruus ja kestoaika sekä maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet. Vikavirran suuruus ja kestoaika ovat riippuvaisia suurjännitejärjestelmän tähtipisteen maadoitustavasta. (Mts. 87–88.) Toiminnallisia vaatimuksia määriteltäessä on puolestaan huomioitava, että maadoitusjärjestelmän kaikkien komponenttien tulee kestää vika- ja hajavirtojen termiset ja mekaaniset kuormitukset varasuojauksen toiminta-aikaan suhteutettuna. Maadoitusjärjestelmän tulee myös kestää korroosion ja mekaanisten rasitusten vaikutukset koko asennuksen eliniän. Lisäksi maadoitusjärjestelmän tulee kyetä estämään maadoitusjännitteestä, potentiaalieroista ja hajavirroista johtuvat laiteviat. Maadoitusjärjestelmien tulee varmistaa henkilöturvallisuus sekä toimia kaikissa tilanteissa ja paikoissa, joissa henkilöitä voi oleskella. (Mts. 87–88.)

2.4.2 Maadoitusjärjestelmät ja niiden maadoitusimpedanssit

Sähkönjakeluverkon maadoitusjärjestelmä voi olla laaja, erillinen tai muodostua yhteen liitetyistä maadoitusjärjestelmistä. *Erillisen maadoitusjärjestelmän* muodostaa esimerkiksi keskijänniteilmajohtoverkkoon kytkeytynyt jakelumuuntamo, jonka maadoitukset ja siihen liitetyn pienjänniteverkon maadoitukset eivät ole galvaanisesti kytkeytyneet muihin suurjännitejakelujärjestelmiin. Erillisen maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi on mitattava, ja sen suuruus on oltava sellainen, että se täyttää syöttävän sähkönjakeluverkon kosketusjännitevaatimukset. (Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 8, 15–17, 27.)

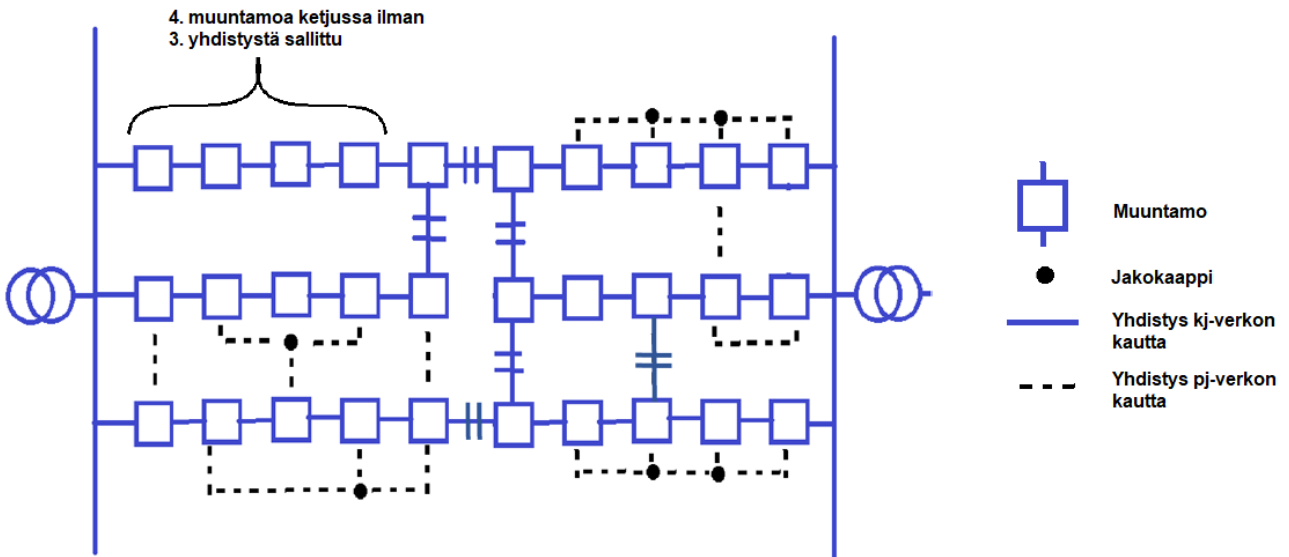
Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän muodostavat maakaapeloidut kaupunkien, taajamien tai maaseudun sähkönjakeluverkot, jotka ovat galvaanisesti yhteydessä toisiinsa ketju- tai silmukkamaisesti (Mäkinen 2016, 11; Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 17; Ylinen ym. 2019, 71). Galvaaninen yhteys pitää muodostua vähintään kolmen ketjussa tai silmukassa olevan jakelumuuntamon kesken. Pienjänniteverkon maadoitukset voidaan ottaa huomioon koko maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssin laskennassa, mutta pienjänniteverkon kautta tapahtuvia yhdistyksiä ei saa huomioida määriteltäessä muuntamoiden välisiä maadoitusyhteyksiä. Keskijänniteverkon maakaapeleiden kosketussuojat toimivat muuntamoiden välisenä galvaanisena yhdistyksenä, mutta kaapelin rinnalla kulkevilla lisämaadoituksilla tai keskusköydellä varmennetaan yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän toimivuutta. (Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 17, 21.)

Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien maadoitusimpedanssit määritellään komponenttikoh-
taisten resuloivien maadoitusimpedanssien avulla. Maadoituslaskenta suoritetaan hyödyntämällä maaperän ominaisresistiivisyyttä sekä maadoitusverkon rakenne- ja geometriatietoja. Myös aikaisemmin mitattuja maadoitusimpedanssitietoja voidaan hyödyntää resuloivan maadoitusimpedanssin laskennassa. (Mts. 17–18.) Yhteen liitettyt maadoitusjärjestelmät poikkeavat laajasta maadoitusverkosta, sillä ne ovat yleensä yhteydessä toisiinsa vain yksittäisten yhteyksien kautta, sekä muuntopiirien väliset etäisyydet voivat olla pitkiä. Useamman muuntopiirin muodostavan resuloivan maadoitusimpedanssin on todettu olevan huomattavasti pienempi kuin yksittäisen muuntopiirin maadoitusimpedanssi, mutta resuloivan maadoitusimpedanssin muodostumiseen vaikuttavat maaperän resistiivisyys, yksittäisten muuntamoiden maadoitusresistanssit ja niiden etäisyydet toisistaan sekä kaapeliverkon nollapiirin resistanssi. Ketju- ja verkostomaisissa maadoitusverkoissa

resultoivan maadoitusimpedanssin suuruus on riippuvainen tarkastelupisteen sijainnista maadoitusverkossa, joten myös maadoitus- ja kosketusjännitteet ovat erilaisia ketjutetun maadoitusverkon eri kohdissa. Ketjutetut maadoitusjärjestelmät voivat mahdollistaa myös 110/20 kV:n maadoitusten yhdistämisen. Nämä tapaukset on kuitenkin tarkasteltava aina yksittäin. (Mäkinen 2016, 11, 21, 28–30, 32; Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 17–21.)

Laaja maadoitusjärjestelmä muodostuu useiden yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien verkko-
maisesta kokonaisuudesta, jonka alueelle ei muodostu turvallisuutta vaarantavia potentiaalieroja. Laajan maadoitusjärjestelmän mukaisia maadoitusverkkoja voi muodostua kaupunkikeskustoihin tai teollisuusalueille, joissa on useita galvaanisia yhteyksiä eri maadoitusjärjestelmien välillä. (Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 27–28; vrt. Ylinen ym. 2019, 70–71.) Suurjännitestandardissa SFS 6001 ei ole määritelty tarkasti laajan maadoitusjärjestelmän vaateita, joten Verkostosuositus RJ 22:22:ssa on esitetty yksityiskohtaisemmin määritelmät laajalle maadoitusjärjestelmälle. Laajan maadoitusverkon alueella muuntopiirin maadoituskosten tulee olla galvaanisesti yhteydessä keskijänniteverkon kaapelin keskusköyden, kosketus-
suojan, erillisen maadoitusjohtimen tai ilmajohtoverkon pylväisiin asennetun maadoitusjohtimen välityksellä vähintään kahteen eri muuntopiiriin. (Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 27–28.)

Lisäksi vähintään 20 %:lla laajan maadoitusverkon alueen muuntopiireistä tulee olla vähintään kolme erillistä ja riittävän lyhyttä yhteyttä muiden muuntopiirien maadoitusverkkoihin. Näiden edellä mainittujen vaateiden lisäksi laajan maadoitusverkon alueella tulee olla riittävä määrä yhdistyksiä toisiin muuntopiireihin pienjänniteverkon maadoitusten kautta. Pienjänniteverkon galvaaniset yhteydet voivat muodostua pienjännitekaapeleiden tai -ilmajohtojen PEN-johtimista tai erillisistä rinnalla kulkevista maadoitusjohtimista. Kaiken kaikkiaan vähintään 70 %:lla jakelumun-
tamoista tulee olla vähintään kolme yhdistystä joko pienjännite- tai suurjänniteverkon kautta. (Mts. 28–30.) Laajan maadoitusverkon muodostumista kuvataan kuviossa 7.



Kuvio 7. Laajan maadoitusverkon muodostuminen (Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 29, muokattu)

Laajalle maadoitusjärjestelmälle ei ole asetettu maadoitusimpedanssivaatimuksia, sillä sen alueella kosketus- ja askeljännitteiden sekä siirtyvien kosketusjännitteiden oletetaan olevan niin pieniä, etteivät ne aiheuta turvallisuusriskiä. Uuden muuntamon maadoitusimpedanssia ei tarvitse mitata tai määritellä, jos se kytkeytyy vähintään kahteen muuhun laajassa maadoitusverkossa olevaan muuntopiiriin. Laajaan maadoitusverkkoon yhdistyminen tulee kuitenkin varmentaa jatkuvuusmitauksilla. Sähköaseman katsotaan kuuluvan laajaan maadoitusjärjestelmään, mikäli se on galvaanisesti yhteydessä laajaan maadoitusjärjestelmään vähintään kuudella erillisellä ja luotettavalla yhteydellä. Sähköaseman käyttöönoton yhteydessä on suositeltavaa tehdä maadoitusimpedanssimittaus, vaikka sähköaseman katsottaisiin kuuluvan laajaan maadoitusjärjestelmään. (Mts. 30, 32–34.)

2.4.3 Maadoitusjärjestelmän mitoittaminen kosketusjännitteiden mukaan

Suurjännitstandardissa SFS 6001 asetetaan vaatimukset suurimmille sallituille kosketusjännitteille, joiden avulla voidaan määritellä kunkin sähköverkon olosuhteiden mukainen maadoitusjännite. Maadoitusjännite voidaan laskea maadoitusimpedanssin ja maavirran avulla kaavan 5 mukaisesti. (SFS 6001:2018, 94.)

$$U_E = I_E \cdot Z_E \quad (5)$$

, missä U_E = maadoitusjännite

I_E = maavirta

Z_E = maadoitusimpedanssi

Suomessa pienjännitesähkönjakeluverkot rakennetaan pääsääntöisesti TN-järjestelmän mukaisesti, jossa on vähintään yksi maadoitus teholähteellä ja vähintään yksi maadoitus liittymispisteellä tai jakeluverkossa (SFS 6000-1:2022, 62–63). Kun TN-järjestelmällä rakennetun pienjänniteverkon maadoitukset ovat yhdistetty syöttävän suurjänniteverkon maadoitusten kanssa, niin maadoitusjännite riippuu kuvion 4 mukaisesta sallitusta kosketusjännitteestä kaavan 6 mukaisesti (SFS 6001:2018, 143).

$$U_E \leq F \cdot U_{Tp} \quad (6)$$

, missä F = SFS 6001-standardin mukainen kerroin

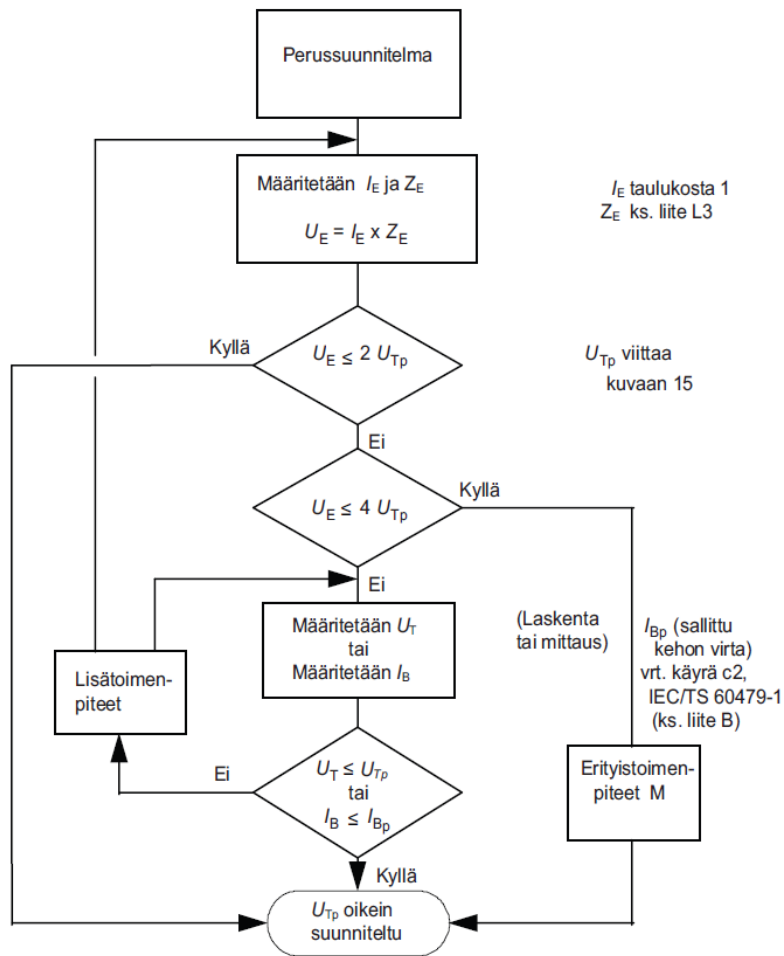
U_{Tp} = sallittu kosketusjännite

Suurimman sallitun maadoitusjännitteen arvo on riippuvainen kertoimesta F , jonka arvo voi olla 1, 2, 4 tai 5. SFS 6001-standardissa oletusarvona kertoimelle on 2. Mikäli pienjännitejärjestelmä on maadoitettu vain suurjännitejärjestelmän maadoituksen yhteydessä, niin kertoimen arvona käytetään 1. Kertoimia 4 ja 5 voidaan käyttää tietyin ehdoin ja erityistoimenpitein vain erikoistapauksissa, mikäli huonojen maadoitusolosuhteiden tai muiden syiden vuoksi ei päästä kertoimen 2 avulla määriteltyihin maadoitusjännitteisiin. (Mts. 96, 143–144.)

Maadoitusjännite voidaan määrittellä mitatun tai laskennallisesti määritellyn maadoitusimpedanssin avulla. Erillisten maadoitusjärjestelmien maadoitusimpedanssit tulee kuitenkin aina mitata. (SFS 6001:2018, 94, 143, 145.) Vaikka SFS 6001-standardissa maadoitusjärjestelmän mitoitusperustana on suurimmat sallitut kosketusjännitteet, niin silti käytännön mitoittaminen perustuu maadoitusjännitteiden ja -resistanssien määrittelyyn. Tarkan kosketusjännitteen määrittäminen on kuitenkin haastavaa, sillä kosketusjännitteen suuruuteen vaikuttaa myös virtapiirin osaksi joutuneen henkilön impedanssi. Lisäksi yleensä kosketusjännite on vain osa maadoitusjännitteen suuruudesta. (Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 8.)

Myös tarkan maavirran määrittäminen on haastavaa, sillä asennetuille kaapeleille ei voida laskennallisesti määrittellä yleispätevää nollaimpedanssia (Nikander & Mäkinen 2017, 9). Toisaalta Vycital, Ptacek, Topolanek & Toman (2019, 1) tuovat tutkimuksessaan esille, että syvälle maaperään upotetut maadoituselektrodit parantavat koko maadoitusjärjestelmän toimintaa saavuttamalla paremmin globaalin neutraalin potentiaalin. Sen sijaan syvällä olevat maadoituselektrodit eivät välttämättä paranna tilannetta kosketusjännitteiden osalta, sillä maaperän potentiaalisuppilo laskee jyrkästi etäisyyden kasvaessa. Mitoittamalla maadoitusjärjestelmät maan potentiaalin nousun mukaisesti saatetaan maadoituselektrodit upottaa liian syvälle. Optimoimalla maadoitusjärjestelmä kosketusjänniteperusteisesti voidaan maadoituselektrodien upotussyvyyttä puolestaan mataltaa. (Mts. 7, 14.)

Li ym. (2023, 3–7) myös esittävät, että yksittäinen pysty- tai vaakamaadoitus ei tasaa potentiaalia laajalta alueelta vaan tarvitaan verkkomainen maadoitus, jonka solujen koko on maksimissaan 10 x 10 m. Lisäksi kiinteistöjen perustusmaadoitus olisi hyvä yhdistää erilliseen pysty- tai vaakamaadoitukseen, jotta vältytään potentiaalierojen syntymiseltä. (Mts. 3–7.) SFS 6001-standardin mukaiseen laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnitteluperiaatteet ovat esitetty kuviossa 8.



Kuvio 8. Laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnitteluperiaatteet (SFS 6001:2018, 94)

Maadoitusjärjestelmän perussuunnitelma tehdään suunnitteluparametrien perusvaatimusten pohjalta. Perusvaatimusten mukaan suunnitellun maadoitusverkon tulee täyttää riittävät turvallisuuskriteerit ja toiminnalliset vaatimukset. Turvallisuuskriteereiden määrittelyssä on otettava huomioon sähkön aiheuttamat henkilöriskit vikavirtojen suuruuden ja vian kestoajan suhteessa. Toiminnallisten vaatimusten kautta tarkastellaan maadoitusjärjestelmän termistä, mekaanista ja toiminnallista kestävyttä. Perusvaatimusten pohjalta määritellään maadoituslaskennassa käytettävien maadoitusimpedanssien ja maasulkuvirtojen suuruus. Maasulkuvirran ja maadoitusimpedanssin avulla voidaan määrittellä maadoitusjännitteen suuruus, jota verrataan suurimpaan sallittuun kosketusjännitteeseen. Suurimman sallitun kosketusjännitteen arvo on riippuvainen vian poiskytkentäajasta ja valitusta kertoimesta. Perusoletuksena on, että turvallisuusvaatimet täyttyvät, mikäli maadoitusjännite on yhtä suuri tai pienempi kuin suurimman sallitun kosketusjännitteen arvo kaksinkertaisena. Jos maadoitusjännite on tätä suurempi, niin sähkönkäyttöpaikoille on toteutettava SFS 6001-standardin mukaisia erityistoimenpiteitä. (SFS 6001:2018, 87, 91–94.)

Laukkasen (2023, 77, 100–103) mukaan suomalaisilla jakeluverkkoyhtiöillä ei ole yhtenevää käytäntöä maasulkuvirran kompensoinnin toteutusperiaatteissa, eikä lakien ja standardien edellyttämässä kosketusjännitetarkastelussa. Osa jakeluverkkoyhtiöistä ei huomioi lainkaan kosketusjännitetarkastelussa poikkeuksellisia kytkentätilanteita, sekä suurella osalla jakeluverkkoyhtiöistä yksittäinen vika voi johtaa tilanteeseen, että kosketusjännitevaatimukset eivät kaikkialla verkossa toteudu. Lisäksi resistiivisen virran osuus saatetaan jättää huomioimatta. Osa verkkoyhtiöistä myös olettaa vaarajännitetarkastelun olevan tarpeeton, mikäli jakeluverkon maadoitusverkko tulkitaan laajaksi maadoitusverkoksi. (Mts. 64, 66, 77.)

2.4.4 Reduktion vaikutus vaarajännitteisiin

Sähkönjakeluverkoissa reduktiolla kuvataan kolmivaiheisen sähköverkon vian aiheuttamaa maavirran suhdetta päävirtapiirin vaihejohtimien nollavirtojen summaan pisteessä, joka on riittävän etäällä vikakohteesta ja siihen liittyvästä maadoitusjärjestelmästä. Vikakohtetta syöttävien kaapeleiden metallivaipat tai ilmajohtojen ukkosjohtimet toimivat vikavirran paluuvirtateinä, joten vikaantuneen kohteen suurjännitejärjestelmän maadoituksen kautta menee maahan vain osa vikavirrasta. Maadoitukseen menevän maavirran osuutta kuvataan reduktiokerroimen avulla. (SFS 6001:2018, 22, 119.) Reduktiokerroin voidaan määrittellä kaavan 7 mukaisesti.

$$r = \frac{I_E}{3I_0} = \frac{3I_0 - I_{EW}}{3I_0} \quad (7)$$

, missä r = reduktiokerroin

I_E = maahan palaava virta

I_{EW} = ukkosjohtimen tai maakaapelin metallivaipan virta

$3I_0$ = eri vaihejohtimien nollavuoroistenvirtojen summa

Eri nollapisteen maadoitustavan omaavien sähkönjakelujärjestelmien maavirtojen osuudet voidaan määrittellä reduktiokerroimen avulla kaavojen 8–12 mukaisesti (SFS 6001:2018, 90).

$$I_E = r \cdot I_C \quad (8)$$

$$I_E = r \cdot I_{RES} \quad (9)$$

$$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2} \quad (10)$$

$$I_E = r \cdot I''_{k1} \quad (11)$$

$$I_E = r \cdot (I''_{k1} - I_N) \quad (12)$$

, missä

I_E = maavirta

I_C = kapasitiivinen maasulkuvirta

I_{RES} = maasulun jäännösvirta

I_L = rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa

I''_{k1} = SFS-EN 60909-standardin mukaan laskettu yksivaiheisen symmetrisen maasulkuvirran alkuarvo

I_N = muuntajan tähtipistevirta

Kaavan 8 avulla voidaan määrittellä maasta erotetun järjestelmän maavirran osuus. Kaavojen 9 ja 10 avulla voidaan puolestaan määrittellä sammutetun verkon maavirtojen osuus. Kaavaa 9 käytetään, jos verkossa ei ole sammutuskeloja, ja kaavan 10 avulla lasketaan maavirta järjestelmissä, joissa on sammutuskeloja. Kaavojen 11 ja 12 avulla puolestaan määritellään pienen impedanssin kautta maadoitettujen verkkojen maavirtojen osuus. Kaavan 11 mukaisesti määritellään maavirran osuus järjestelmissä, joiden tähtipiste ei ole maadoitettu. Kaavan 12 avulla taas määritellään maavirta järjestelmistä, joiden tähtipiste on maadoitettu. (Mts. 90.)

Yhteen liitetyissä ja laajoissa maadoitusjärjestelmissä vain pieni osa vikavirrasta menee muuntamon maadoitusten kautta maaperään, koska suurin osa vikavirrasta palaa takaisin syöttävälle sähköasemalle kaapelivaippojen kosketussuojien, rinnakkaisten maadoitusjohtimien tai ilmajohtojen ukkosjohtimien kautta. Täten vain pieni maavirran osuus vikavirrasta aiheuttaa vikakohteen maadoitusjärjestelmän alueelle vaarajännitteitä. On kuitenkin otettava huomioon, että maadoitusten kautta yhteen liitetyissä muuntopiireissä suurin osa vikavirrasta ei välttämättä mene maahan viikaantuneen muuntopiirin kohdalla, vaan viereiset muuntopiirit imevät osan vikavirrasta. Lisäksi viereisien muuntopiirien maan potentiaalinen nousu ei välttämättä ole riippuvainen niiden kautta maahan menevien vikavirtojen suuruudesta, sillä vaarajännitteiden suuruus on riippuvainen kyseisen muuntamon resuloivasta maadoitusimpedanssista. (Colella, Napoli, Pons, Tommasini, Barresi,

Cafaro, De Simone, Di Silvestre, Martirano, Montegiglio, Morozova, Parise, Parise, Sanseverino, Torelli, Tummolillo, Valtorta & Zizzo 2016, 4590; Di Silvestre ym. 2016, 2, 4–5.)

Keskijännitekaapeleiden reduktiokertoimet ovat yleensä luokkaa 0,2–0,6. Kaapeliyhteyksien reduktiokertoimia voidaan pienentää rinnakkaisilla maadoitusyhteyksillä. (Colella ym. 2016, 4590; SFS 6001:2018, 119–120.) Lisäksi Kuchler, Schmidt ja Hänsch (2021, 12, 15) esittävät, että harmo- nisten vikavirtojen osuus voidaan jättää huomioimatta vaarajänniteselvityksessä, mikäli sähkönja- keluverkossa on rinnakkaisia maadoitusyhteyksiä. On kuitenkin huomioitava, että reduktiokerroin ei välttämättä ole vakio, vaan se on riippuvainen sähkönjakeluverkon kytkentätilanteesta ja maa- sulkuvirran kompensoinnin vinovirityksestä (Reikko ym. 2019, 5). Täten myös vikakohteen maadoi- tuksiin menevän vikavirran osuus voi muuttua verkon tilan muuttuessa, ja samalla se voi aiheuttaa vaarajännitteiden kasvun. Voidaan todeta, että reduktiolla on suuri vaikutus vikavirtojen aiheutta- miin vaarajännitteisiin. Mikäli reduktiokerroin on hyvin pieni, niin myös vaarajännitteet ovat to- dennäköisesti pieniä. Mikäli reduktiokertoimen arvo on puolestaan yksi, niin vaarajännitteiden suuruus on suoraan riippuvainen vikavirran suuruudesta ja vikakohteen maadoitusolosuhteista.

3 Kosketusjänniteperustainen maasulkuvirtasuojaus

Kompensoidussa jakeluverkossa perinteiseen nollajännitteeseen ja nollavirtaan perustuvan vakio- aikaisen maasulkusuojauksen haasteena on, että suojaus ei ota huomioon jakeluverkossa tapahtu- via muutostilanteita. Normaalien sähköverkon kytkentä- ja jakorajamuutosten sekä vikakytkentö- jen aikana kompensointikela ei välttämättä mukaudu riittävän nopeasti verkon muutostilanteisiin, joten maasulkutilanteissa vikavirrat voivat poiketa huomattavasti verkon normaalitilan vikavir- roista. Myös kompensointilaitteiston häiriötilanteet voivat muuttaa sähkönjakeluverkon kompen- sointiastetta ja näin ollen vaikuttaa maasulkuvirran suuruuteen. Suuremmat vikavirrat aiheuttavat vikakohteeseen suuremman maadoitusjännitteen, joka voi aiheuttaa sähkönjakeluverkkoon turval- lisuusriskin. (REX640 Technical Manual 2023, 352.)

Kaapelivirtamuuntajilla sähköaseman johtolähdöltä mitattu nollavirta ei vastaa vikakohtaan mene- vää vikavirtaa, vaan se on riippuvainen myös vikaantuneen johtolähdön tuottamasta kapasitiivi- sestä ja resistiivisestä nollavirrasta. Mitä suurempi on vikaantuneen johtolähdön tuottama maasul- kuvirta, niin sitä suurempi on sähköasemalla mitatun nollavirran ja todellisen vikakohteeseen menevän vikavirran ero. Täten sähköasemalla kaapelivirtamuuntajalla mitattua nollavirtaa ei voida

käyttää hyödyksi maadoitusjännitelaskennassa. Pitkien kaapeliyhteyksien kohdalla nollavirran ja -jännitteen kulmaero voi myös aiheuttaa ongelmia perinteisen suojauksen toimintaan. Lisäksi kompensoidun jakeluverkon pieni vaimennus voi aiheuttaa vian jälkeisen jälkivärähtelyn, joka voi johdattaa perinteisen suojauksen toimintavirheeseen. (Mts. 344, 352.) Maasulkuvirran ja johtolähdön nollavirran sekä vian aikaisen nollajännitteen muodostuminen on kuvattu kaavojen 13–15 avulla (Kompensoitu verkko ja maasulkusuojaus 2023, 46).

$$\bar{I}_{EF}^1 = (I_d - j \cdot I_v) \cdot U_o^{vikatila} [pu] \quad (13)$$

$$\bar{I}_o^{viallinen} = [(I_d - I_{dFd}) - j \cdot (I_v + I_{EFFd})] \cdot U_o^{vikatila} [pu] \quad (14)$$

$$U_o^{vikatila} [pu] = \left| \frac{U_{PE}}{R_F \cdot (I_d - j \cdot I_v) + U_{PE}} \right| \quad (15)$$

, missä

\bar{I}_{EF} = maasulkuvirta

$\bar{I}_o^{viallinen}$ = vikalähdön nollavirta

$U_o^{vikatila}$ = vian aikainen nollajännite

U_{PE} = vaihejännite

I_d = verkon kokonaisvaimennus

I_v = verkon vinoviritys

- positiivinen = ylikompensoitu
- negatiivinen = alikompensoitu
- nolla = resonanssi

I_{asym} = verkon epäsymmetria

I_{EFFd} = lähdön tuottama kapasitiivinen maasulkuvirta

I_{dFd} = lähdön tuottama resistiivinen maasulkuvirta, osuus kokonaisvaimennuksesta

R_F = vikavastus

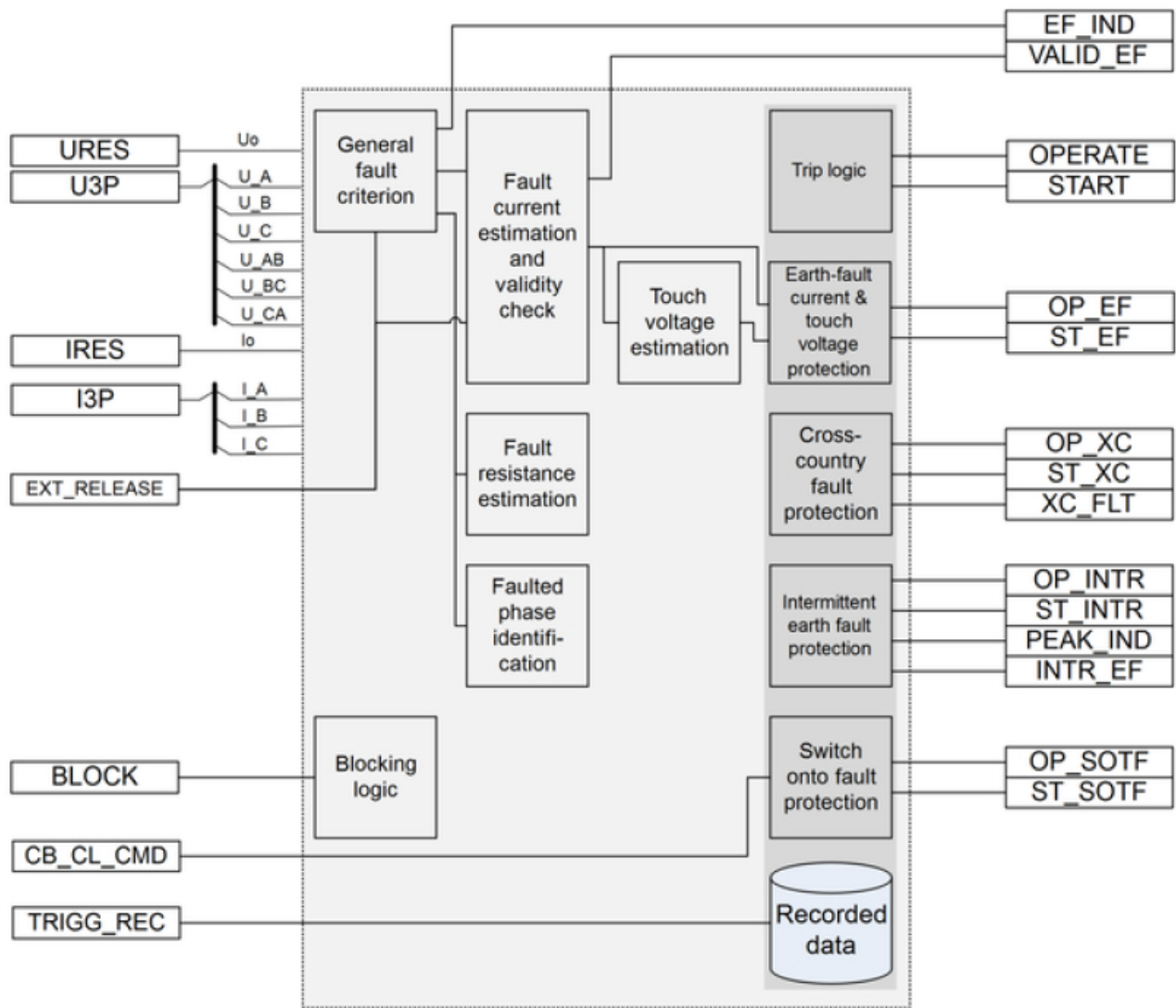
Vikavirran ja viallisen lähdön nollavirran ero eli suojattavan johtolähdön edustama maasulkuvirta saadaan täten kaavan 16 avulla.

$$\bar{I}_o^{viallinen} = [I_{dFd} + j \cdot I_{EFFd}] \cdot U_o^{vikatila} [pu] \quad (16)$$

Yllä esitettyjen syiden vuoksi perinteisen maasulkusuojauksen tilalle on ollut tarve kehittää uudenlainen maasulkusuojaus, jonka toiminta perustuu tarkkaan vikapaikkaan menevän vikavirran määrittelyyn, ja jonka toiminta-aika on verrannollinen vikavirran tai siitä johdetun vaarajännitteen suuruuteen. Uudenlaisen maasulkusuojauksen tulisi toimia luotettavasti kaikissa sähköverkon eri vika- ja käyttötilanteissa sekä erilaisilla verkon nollapisteen maadoitustavoilla riippumatta siitä, onko verkko ilmajohto- vai maakaapeliverkkoa. Uudenlaisen kosketusjännitteeseen perustuvan maasulkusuojauksen avulla, jonka IEC 61850-standardin mukainen tunnus on IFPTOC, voidaan vastata kaikkiin edellä mainittuihin haasteisiin. (REX640 Technical Manual 2023, 351–352.) Tämän uuden suojan toiminta pohjautuu Kauppisen ja Pitkäsen keksintöön, jonka Jyväskylän Energia Oy (nykyinen Alva-yhtiöt Oy) patentoi kansainvälisesti vuonna 2016 (WO 193529 A1:2016, 1).

3.1 IFPTOC-suojausfunktion toimintaperiaate

ABB REX640-suojareleen IFPTOC-suojausfunktion toiminta perustuu sähköjakeluverkosta perinteisesti mitattujen suureiden, kuten nollavirran ja -jännitteen lisäksi vaihe- ja pääjännitteiden sekä vaihevirtojen mittaamiseen. IFPTOC-suojausfunktio sisältää useita eri toimintamoduuleita, joiden avulla suojarele tunnistaa vian ja määrittelee eri vikatyyppejä sekä vikaantuneen vaiheen. Moduulien avulla estimoidaan myös vikavirtaa, kosketusjännitettä ja vikavastusta sekä määritellään kunkin vian poiskytkentälogiikka. IFPTOC-suojausfunktion moduulien toimintoja on havainnollistettu kuviossa 9. (REX640 Technical Manual 2023, 353.)



Kuvio 9. IFPTOC-suojausfunktion toimintojen lohkokkaavio (REX640 Technical Manual 2023, 353)

IFPTOC-suojausfunktion *General fault criterion* (GFC)-moduulin avulla tunnistetaan maasulku ja sen suunta. Tämän jälkeen tunnistetaan vioittunut vaihe ja estimoidaan vikavirta, -resistanssi sekä kosketusjännite omissa moduuleissaan. Maasulkuvirta- ja kosketusjännitesuojaus, kaksoismaasulku- ja katkeilevan maasulun suojaus ja vikaa vasten kytkentä ovat kukin omassa suojausmoduulissaan. (Mts. 353.)

3.1.1 Maasulun tunnistus ja suunnan määrittäminen

Sähkönjakeluverkossa tapahtuvan maasulun tunnistus tehdään perustaajuisen nolajännitteen avulla, joka voi olla jännitemuuntajien avokolmiokäähin avulla mitattu tai johdettu laskennallisesti

vaihejännitteistä. Nollajännitteen avulla voidaan määrittellä IFPTOC-suojausfunktion herkkyys vikaresistanssin, kompensoinnin tai verkkotopologian mukaisesti. Laskennallinen nollajännite määräytyy vaihejännitteiden osoitinsummasta kaavan 17 mukaisesti. (REX640 Technical Manual 2023, 353.)

$$\underline{U}_0 = \left(\frac{\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C}{3} \right) \quad (17)$$

, missä \underline{U}_0 = nollajännite
 \underline{U}_A = vaiheen A jännite
 \underline{U}_B = vaiheen B jännite
 \underline{U}_C = vaiheen C jännite

Maasulun suunnan tarkistus puolestaan perustuu nollapiirin admittanssin ($Y_0 = I_0/U_0$) polariteetin määrittelemiseen vian alkutransientin aikana tehdyllä kumulatiivisella summavektorilaskennalla. Nollapiirin admittanssin määrittelemisessä on tärkeää, että nollavirta on mitattu tarkasti esimerkiksi riittävän tarkkuuden omaavan kaapelivirtamuuntajan avulla. Maasulun tunnistus ja suunnan tarkistus voidaan tehdä myös suojarahleiden muiden suunnattujen maasulkuvirtasuojausfunktioiden avulla, jolloin tieto maasulusta tuodaan IFPTOC-suojausfunktioille kuvion 9 mukaisen EXT_RELEASE-tulon kautta. (Mts. 353, 358.)

3.1.2 Vikavirran ja kosketusjännitteen estimointi

ABB REX640-suojareleiden kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen tärkein toiminnallisuus perustuu vikakohteeseen menevän vikavirran tarkkaan estimaattiin. Vikavirran estimaatti määritellään kolmivaiheisen sähköjakeluverkon yksivaiheisen maasulkuvian aikana vaihevirroissa tapahtuvien muutoksien avulla. Vikavirtaestimaatti I_F määritellään maasulun aikana vaihevirroista mitatun vastakomponentin muutoksen ΔI_2 avulla. Vikavirtaestimaatin avulla voidaan suojarahleiden toiminta-aika määrittellä siten, että suojattavan kohteen maan potentiaalinen nousu pysyy standardien vaateiden mukaisella tasolla kaikissa vikatilanteissa. Vikavirtaestimaatti saadaan laskettua kaavojen 18–25 avulla. (REX640 Technical Manual 2023, 352.)

$$\underline{I}_F = 3 \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_A + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_B + \underline{a} \cdot \underline{I}_C \quad (18)$$

$$\underline{I}_F = 3 \cdot \Delta \underline{I}_2 = \Delta \underline{I}_A + \underline{a}^2 \cdot \Delta \underline{I}_B + \underline{a} \cdot \Delta \underline{I}_C \quad (19)$$

$$\Delta \underline{I}_A = \underline{I}_A(t_{vika}) - \underline{I}_A(t_{ennen\ vika}) \quad (20)$$

$$\Delta \underline{I}_B = \underline{I}_B(t_{vika}) - \underline{I}_B(t_{ennen\ vika}) \quad (21)$$

$$\Delta \underline{I}_C = \underline{I}_C(t_{vika}) - \underline{I}_C(t_{ennen\ vika}) \quad (22)$$

$$\Delta \underline{I}_2 = \underline{I}_2(t_{vika}) - \underline{I}_2(t_{ennen\ vika}) \quad (23)$$

$$\underline{a} = \cos(120^\circ) + j \cdot \sin(120^\circ) \quad (24)$$

$$I_F = abs(\underline{I}_F) \quad (25)$$

, missä \underline{I}_F = maasulkuvirran vaihekohtainen vikavirtaestimaatti

$\Delta \underline{I}_A$ = vaiheen A virran muutos vian aikana

$\Delta \underline{I}_B$ = vaiheen B virran muutos vian aikana

$\Delta \underline{I}_C$ = vaiheen C virran muutos vian aikana

$\Delta \underline{I}_2$ = vastakomponentin muutos vian aikana

\underline{a} = vaiheenkääntöoperaattori

Vikavirtaestimaatin laskentaan voidaan tarvittaessa ottaa mukaan myös vikavirran 2., 3., 5., 7. ja 9. harmonisten osuus kaavan 26 mukaisesti (mts. 355–356).

$$I_F = \sqrt{(\Delta 3I_2^1)^2 + (\Delta 3I_2^2)^2 + (\Delta 3I_2^3)^2 + (\Delta 3I_2^5)^2 + (\Delta 3I_2^7)^2 + (\Delta 3I_2^9)^2} \quad (26)$$

, missä I_2^n = n -harmonisen yliaallon vastakomponentin suuruus

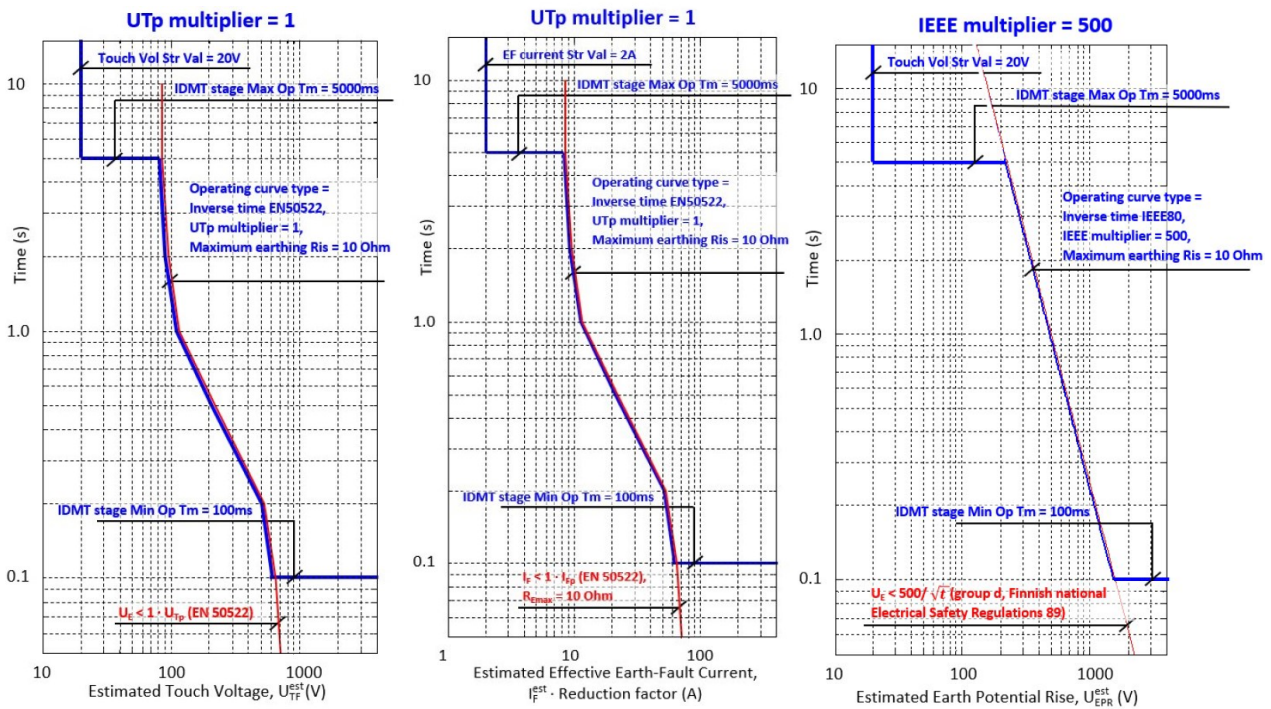
IFPTOC-suojausfunktioille on mahdollista määrittää reduktiokerroin, jonka avulla määritellään vika-kohteessa maadoitusten kautta maahan menevän vikavirran osuus sekä kaapelin vaippojen tai keskusköysien kautta palaava osuus. Mikäli reduktiokerroin on yksi, niin kaiken vikavirran oletetaan menevän vikakohteessa maahan ja näin ollen se vaikuttaa kokonaisuudessaan vikakohteen maan potentiaaliin sekä kosketusjännitteen suuruuteen. Estimoitu kosketusjännite voidaan laskea reduktiokertoimen, sähkönjakeluverkon suurimman maadoitusresistanssin ja vikavirtaestimaatin tulona kaavan 27 mukaisesti. (Mts. 357–359.)

$$U_{TF} = r \cdot R_{Emax} \cdot I_F \quad (27)$$

, missä U_{TF} = estimoitu kosketusjännite

R_{Emax} = suojattavan johtolähdön suurin maadoitusresistanssi

IFPTOC-suojausfunktio voidaan määrittellä toimimaan maasulussa joko estimoidun kosketusjännitteen tai maadoitukseen menevän estimoidun vikavirran mukaisesti. Molemmilla toimintatavoilla vian poiskytkentäaika voidaan määrittellä vakioaikaiseksi tai suurjännitestandardien EN50522 tai IEEE 80 vaateiden mukaisesti muuttuva-aikaiseksi. Kuviossa 10 on esitetty IFPTOC-suojausfunktion käännteisaikaiset toimintakäyrät estimoidun kosketusjännitteen, vikavirran ja maan potentiaalinnousun mukaisesti. (Mts. 359–373.)



Kuvio 10. IFPTOC-suojausfunktion käännteisaikaiset toimintakäyrät (REX640 Technical Manual 2023, 362, 369, 373, muokattu)

IFPTOC-suojausfunktion käännteisaikaisissa toimintakäyrissä voidaan käyttää myös suurjännitestandardien mukaisia U_{TP} - tai IEEE-kertoimia, jolloin toimintakäyrät skaalautuvat kertoimen mukaisesti. Maasulkuvian poiskytkentäaikaan vaikuttaa käyttäjän määrittelemät pienimmät ja suurimmat toiminta-ajat, valitut käännteisaikakäyrän kertoimet, suojattavan sähköverkon maksimi maadoitusresistanssi sekä valittu reduktiokerroin. Lisäksi käyttäjä voi määritellä pienimmän kynnyсарvon kosketusjännitteelle tai vikavirrälle, jonka mukaisesti suojausfunktio aloittaa toimintansa. (Mts. 359–373.)

3.2 IFPTOC-suojausfunktion integroidut muut ominaisuudet

Kaksoismaasukusuojaus

Kaksoismaasulku syntyy yleensä yhden vaiheen maasulun yhteydessä, kun terveiden vaiheiden jännitteet nousevat pääjännitteen suuruiseksi. Tämän ylijännitteen seurauksena voi muodostua toinen maasulku joko samaan johtolähtöön tai rinnakkaiseen johtolähtöön. Kaksoismaasulussa vikavirta on suuri, ja sen reitti on tuntematon, joten se tulee tunnistaa ja kytkeä nopeasti pois materiaali- ja turvallisuusriskien minimoimiseksi. IFPTOC-suojausfunktiossa kaksoismaasulku

tunnistetaan vaihevirtamuuntajien mittauksien perusteella lasketun nollavirran tai vaiheiden välisen alijännitteen avulla. Laskennallista nollavirtaa käytetään tunnistuksessa siksi, että kaapelivirtamuuntaja voi satureitua suuren vikavirran seurauksena. Estimoituun kosketusjännitteeseen tai maadoituksiin menevään estimoituun vikavirtaan pohjautuvat suojausominaisuudet ovat lukittuna kaksoismaasulun aikana. (REX640 Technical Manual 2023, 352–376.)

Katkeilevan maasulun tunnistus

Standardien mukaiset maasulkuvikojen poiskytkentäajat on määritelty jatkuvalla vikavirralla. Katkeilevissa maasuluissa vikavirta ei ole jatkuvaa, vaan se muodostuu erittäin lyhyistä tietyn aikavälein toistuvista transienttivirtapiikeistä. Katkeilevan maasulun tunnistus on toteutettu IFPTOC-suojausfunktioon maasulun aikaisten transienttipiikkien laskennan avulla. Suoja laskee transienttipiikkien lukumäärän ja vertaa sitä aseteltuun. Laukaisusignaali annetaan, kun aseteltu toiminta-aika ja piikkilukumäärä täyttyvät. Suojan palautumisaika tulee olla piikkien väliaikaa suurempi, jottei suoja palaudu, jolloin transienttien laskenta alkaa alusta. IFPTOC-suojausfunktion katkeileva maasulkusuojaus toimii rinnakkain kosketusjännitteeseen perustuvan suojauksen kanssa, joten vian poiskytkentäaika määräytyy nopeamman suojaustavan mukaisesti. (Mts. 376–377.)

Vikaa vasten kytkentä sekä viallisen vaiheen ja vikaresistanssin tunnistus

Sähköverkkoon kytkeytyvät muuntajat aiheuttavat kytkentävirtasysäyksen, joka häiritsee IFPTOC-suojausfunktion vikavirtaestimaatin laskentaa. Tämän vuoksi suojaan on integroitu erillinen vikaa vasten kytkentä -moduuli, joka tunnistaa maasulkuvian heti kun sähköaseman lähdön katkaisija suljetaan vikaa vasten. Vikaa vasten kytkentä -moduuli aktivoituu katkaisijan sulkemiskomennosta, ja IFPTOC-suojausfunktion havaittua maasulun. Vian poiskytkentäaika voidaan määrittellä vakioaikaisesti. Vikaa vasten kytkentä lukitsee IFPTOC-suojan kaikki muut toiminnallisuudet. (Mts. 377–378.)

IFPTOC-suojausfunktioon on myös sisäänrakennettu viallisen vaiheen ja vikaresistanssin tunnistus. Viallisen vaiheen tunnistus on toteutettu vaihekohtaisten virtojen muutoksen laskennan avulla. Viallisessa vaiheessa muutos on suurin. Vikaresistanssin suuruus määritellään puolestaan viallisen vaiheen perustaajuisen jännitteen ja estimoidun vikavirran avulla. (Mts. 378–379.)

4 Tutkimuksen toteuttaminen

4.1 Määrällinen tutkimusote ja kokeellinen tutkimusasetelma

Tämä opinnäytetyö toteutettiin kvantitatiivisen eli määrällisen tutkimusotteen ja kokeellisen tutkimusasetelman periaatteita soveltaen. Määrällisessä tutkimuksessa on keskeistä, että tutkittava ilmiö sijoitetaan johonkin teoriasuuntaukseen, jonka kautta muodostuu tutkimuksen viitekehys (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2009, 140; Kananen 2015, 73). Tässä tutkimuksessa keskeiset käsitteet on määritelty selkeästi, mikä on määrällisessä tutkimuksessa tärkeää (Hirsjärvi ym. 2009, 152). Käsitteet ovat teorioiden rakenneosia (Kananen 2015, 221). Määrällisessä tutkimuksessa voidaan hyödyntää hypoteeseja, mikäli tutkimuksen tarkoitus on selittävä eli syy-seuraussuhteita etsivä (Hirsjärvi ym. 2009, 158).

Hirsjärven ja muiden (2009, 140) mukaan määrällisessä tutkimuksessa on oleellista, että havaintoaineisto soveltuu numeeriseen mittaamiseen. Tällöin tutkimusaineiston muuttujista voidaan muodostaa taulukko, jonka sisältöä voidaan käsitellä tilastollisesti. Määrällisessä tutkimuksessa päätelmien teko pohjautuu aineiston tilastolliseen analysointiin esimerkiksi prosenttitaulukoiden avulla. (Mts. 140.) Tässä tutkimuksessa taulukkojen numeerista tietoa on tulkittu sanallisesti, eli niin kuin Kananen (2015, 298) tuo esille, taulukon lukuja on selitetty lukijalle tutkimusongelman kannalta. Havaintoaineiston pohjalta on laadittu myös kuvioita, joiden tietoja on selitetty sanallisesti.

Kokeellisessa tutkimuksessa mitataan systemaattisesti käsiteltävän muuttujan vaikutusta toiseen muuttujaan kontrolloiduissa olosuhteissa. Koejärjestelyn olosuhteita hallitusti muuttaen voidaan saada muutos aikaan yhdessä tai useammassa muuttujassa. Tällöin muut muuttujat ovat kontrolloitu. (Heikkilä 2014, 19; Hirsjärvi ym. 2009, 134.) Kokeellinen tutkimusasetelma sisältää yleensä myös ennalta määriteltyjen hypoteesien toteutumisen testaamisen (Hirsjärvi ym. 2009, 159), joten tässä opinnäytetyössä esitetään tutkijan odotuksia vastaavia työhypoteeseja, jotka pohjautuvat aikaisempaan tutkimus- ja teorian tietoon.

4.2 Tutkimuksen tarkoitus, tavoitteet ja työhypoteesit

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tutkia maasulkuilmiöitä ja niiden aikana ilmeneviä vaarajännitteitä todellisissa verkon käyttö- ja vikatilanteissa sekä verrata saatuja tuloksia teoreettiseen viitekehukseen. Kenttäkokeiden mittausdatan avulla varmennetaan lisäksi uudenlaisen kosketusjännitteeseen perustuvan maasulkusuojauksen oikeaoppinen toiminta. Tämän tutkimuksen tavoitteena on saada selville ne tekijät, joiden avulla sähköverkkojen maasulkuvirtasuojaus on mahdollista toteuttaa sähköturvallisuuslain edellyttämien vaateiden mukaisesti huomioiden myös sähköverkkojen poikkeavat vika- ja käyttötilanteet. Lopputuloksena saadaan aikaiseksi toimintasuunnitelma, jonka mukaisesti Alva Sähköverkko Oy:n sähköjakeluverkon maasulkusuojausta voidaan tulevaisuudessa parantaa. Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa niin kansallisesti kuin kansainvälisestikin sähköjakeluverkkojen suojausten suunnittelussa.

Työhypoteesit:

1. Keskijännitteisen sähköjakeluverkon maasulkuvikojen aiheuttamaa vaarajänniteriskiä voidaan pienentää käyttämällä adaptiivista maasulkusuojausta.
2. Keskijänniteverkon maasulkuvian aiheuttaman vaarajännitteen suuruus on riippuvainen sähköjakeluverkon rakenteesta ja maadoitusolosuhteista.
3. Sähköjakeluverkon erilaiset vika- ja käyttötilanteet vaikuttavat vaarajänniteriskin muodostumiseen.

4.3 Maasulkukokeet kenttäkokeina

4.3.1 Maasulkukokeiden taustaa Alva Sähköverkko Oy:ssä

Uuden sähköaseman käyttöönoton yhteydessä on suositeltavaa tehdä maasulkukokeet, joiden avulla varmennetaan maasulkuvirran kompensointilaitteiston ja sähköaseman suojauslaitteiden oikeaoppinen toiminta maastossa tehtyjen todellisten maasulkujen avulla. Alva Sähköverkko Oy (ent. JE-Siirto Oy) on ollut pitkäjänteisesti mukana maasulkusuojauksen kehittämisessä jo vuodesta 2010 lähtien, kun Eteläportin sähköasemalla tehtiin ensimmäiset varsinaiset maasulkukokeet sähköaseman käyttöönoton yhteydessä. Eteläportin sähköasemalle tuli käyttöön Suomen ensimmäinen keskitetty maasulkuvirran kompensointilaitteisto Trench EFD20, johon on integroitu myös maasulkujen tunnistus- ja suojausominaisuuksia. Sähköasemien suojausten kehitystyössä siirryttiin seuraava

askel eteenpäin vuonna 2012, kun sähköjakeluverkkojen käyttö- ja suojausasiantuntijoiden välistä yhteistyötä syvennettiin alan eri toimijoiden välillä.

Vuonna 2013 Alva Sähköverkko Oy:n Hämeenlahden sähköasemalla tehtiin ensimmäisen kerran yhteistyössä ABB Oy:n kanssa laajat maasulkukokeet, joiden tuloksia hyödynnettiin muun muassa ABB Oy:n myöhemmin julkaiseman monitaajuusadmittanssisuojan kehitystyössä. Tulomäki (2017, 1, 61) käsitteli omassa diplomityössään sähköasemien häiriötallenteiden hyödyntämistä maasulkuvikojen analysoinnissa Eteläportin sähköaseman verkossa vuonna 2016 tehtyjen maasulkukokeiden avulla. Eteläportin maasulkukokeiden tulosten perusteella Alva Sähköverkko Oy:ssä määriteltiin myöhemmin verkon käyttötapoja, joiden avulla sähköjakeluverkon vikojen kokeilukytkentöjä voidaan toteuttaa ilman, että aiheutetaan vianselvitystyön yhteydessä kohonneita vaarajännitteitä.

Sekä Hämeenlahden että Eteläportin sähköasemien maasulkukokeiden yhteydessä tehtiin alustavia vaarajännitemittauksia, joiden tuloksia Kauppinen (2023) on osittain hyödyntänyt maasulkuilmiön hallintaa käsittelevässä opinnäytetyössään. Tässä opinnäytetyössä puolestaan analysoidaan Kukkumäen sähköasemalla vuonna 2023 suoritettujen maasulkukokeiden tuloksia ja varmenneetaan uuden, kansainväliseen levitykseen menevän kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen toiminta. Täten voidaan sanoa, että Alva Sähköverkko Oy:n panostus on ollut merkittävä keskijänniteverkkojen maasulkuilmiöiden aikaisten vaarajännitteiden selvittämisessä ja niihin liittyvien riskien minimoimisessa.

4.3.2 Maasulkukokeiden koe- ja kytkentäjärjestelyt

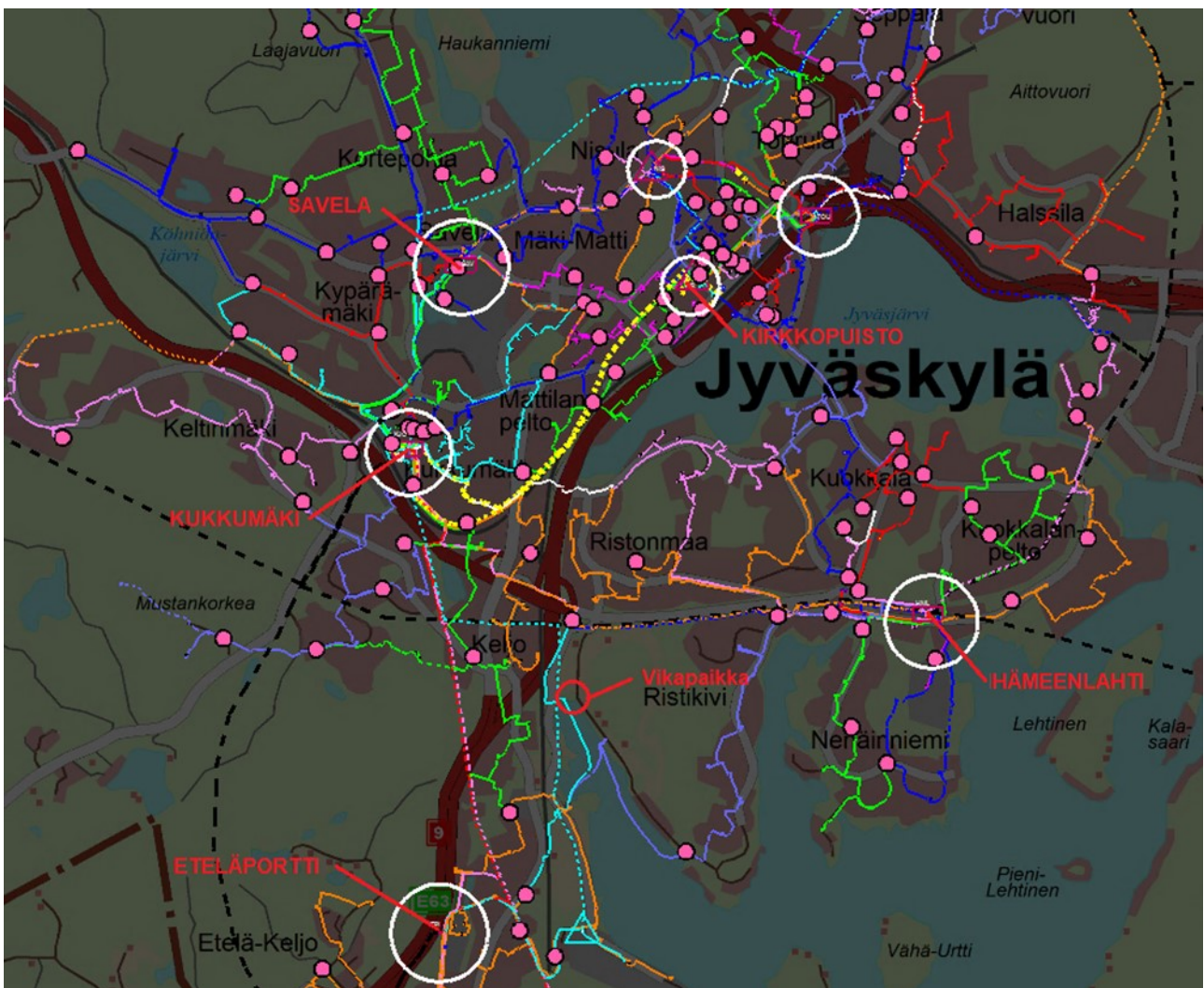
Alva Sähköverkko Oy:n ja ABB Oy:n yhdessä suunnitteleminen maasulkutestien primäärinä sähköasemana toimi kesäkuussa 2023 käyttöön otettu Kukkumäen uusi 110/20 kV:n sähköasema. Kukkumäen sähköasemalla käytössä olevat uudet ABB REX640-suojareleet mahdollistivat kosketusjänniteperustaisen IFPTOC-suojan käyttöönoton. Kukkumäen sähköasemalla 11.-14.9.2023 suoritettujen maasulkukokeiden yhteydessä oli myös tarkoituksena varmentaa uuden kosketusjänniteperustaisen suojan toiminta todellisissa vikatilanteissa kenttäkokeiden avulla. Maasulkukokeiden aikana tehtiin yhteensä 76 testiä (ks. liite 1), joissa varioitiin erilaisia maasulkuvikoja muuttamalla hallitusti maasulkuilmiöön oleellisesti liittyviä parametreja, kuten sammutetun jakeluverkon

kompensointiasetta, verkoston konfiguraatiota eli kytkentätilannetta, kuormitusta sekä vikavastusta ja vikatyyppejä. Lisäksi selvitettiin testimuuntamon maadoitusolosuhteiden vaikutus vaarajänniteriskin muodostumisessa.

Uuden IFPTOC-suojan toiminnan verifiointia varten Kukkumäen sähköaseman kennojen J01, J11, J16 ja J24 suoja-areleiden rinnalle kytkettiin testien ajaksi myös ABB Oy:n relekehitystiimin omia testausvaiheessa olevia REX640- ja REX615-suoja-areleitä. Näiden releiden avulla ABB Oy pystyy tulevaisuudessa kehittämään ja optimoimaan suoja-areleiden toimintaa. Kyseisten releiden rinnalle kytkettiin myös Kukkumäen sähköaseman REX640-releiden kloonit, joiden avulla ABB Oy pystyi toteamaan välittömästi vikatapahtumien aikaiset reletapahtumat ilman Kukkumäen prosessiverkoon kytkeytymistä. Kloonireleet olivat suojausominaisuuksiltaan identtiset Kukkumäen sähköaseman varsinaisten suoja-areleiden kanssa. Kloonireleille ja kehitysvaiheessa oleville releille tuotiin samat virta- ja jännitetiedot kuin varsinaisille Kukkumäen suoja-areleille, joten ne pystyivät itsenäisesti ja reaaliaikaisesti monitoroimaan vikojen aikana verkostossa tapahtuvia ilmiöitä ja tapahtumia.

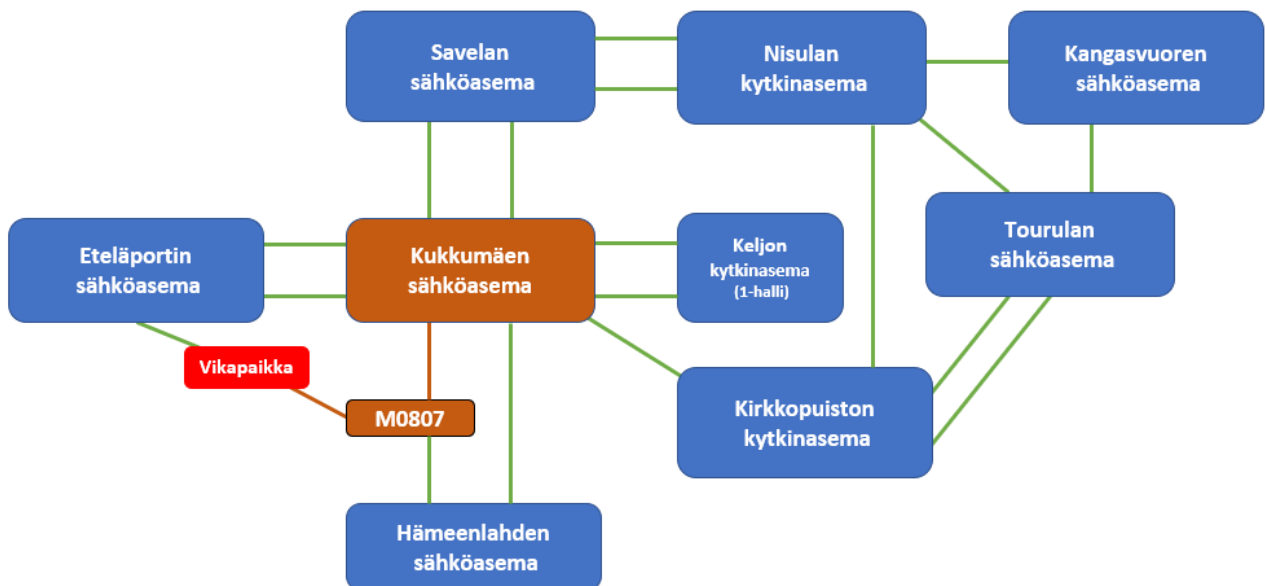
Kukkumäen kenno J01 on toisen 110/20 kV:n päämuuntajan syöttökenno, joten tämän kennon suoja-areleiden tapahtumat vaikuttavat päämuuntajalähdön suojausten kehittämiseen ja optimointiin. Kenno J11 on puolestaan Kukkumäen ja Savelan sähköasemien välisen yhdysjohdon lähtö- ja syöttökenno, joten tämän kennon tapahtumien perusteella voitiin varmentaa suojausten toiminta korvauskytkennöissä ja hajautetun kompensoinnin tilanteissa. Kenno J16 puolestaan syöttää Keljon kytkinasemaa, joten sen avulla voitiin simuloida suurta yli 40 A:a maasulkuvirtaa tuottavaa johtolähtöä. Kenno J24 toimi maasulkukokeiden aikana primäärinä vikalähtönä. Kyseistä kennoa käytetään normaalitilassa Kukkumäen, Hämeenlahden ja Eteläportin sähköasemien välisenä varasyöttöyhteytenä. Varasyöttöyhteyksien suojauksessa käytetään normaalisti erillistä varasyöttöyhteyksiä varten laadittua asetteluryhmää, jossa oiko- ja maasulkuvikojen asettelut ovat selektiivisiä normaalien johtolähtöasettelujen kanssa. Maasulkutestien ajaksi Kukkumäen J24-lähdölle laitettiin kuitenkin aktiiviseksi normaalin johtolähdön asetteluryhmä, jotta IFPTOC-suojan oikeaoppinen toiminta voitiin varmentaa. Alva Sähköverkko Oy:n verkonkäytön periaatteena on pitää tyhjäksi varasyöttöyhteydet johtolähtöasetteluilla, jotta mahdollisissa vikatilanteissa vian poiskytkentäajat ovat lyhyitä. Varasyöttö- ja johtolähtöasettelut voidaan muuttaa nopeasti tarpeen mukaiseksi sähköaseman kaukokäyttäjärjestelmän kautta.

Alva sähköverkko Oy:n keskijännitteinen 20 kV:n jakeluverkko on todella hyvin silmukoitu, sekä eri sähkö- ja kytkinasemat ovat yhdistetty toisiinsa suorilla varasyöttöyhteyksillä. Sähkö- ja kytkinasemien väliset suorat varasyöttöyhteydet mahdollistivat sen, että maasulkutestien aikana voitiin vartioida erilaisia taustaverkon kombinaatioita sekä vikatilanteita. Kukkumäen sähköaseman maasulkutestien aikana hyödynnettiin Alva Sähköverkko Oy:n Savelan, Hämeenlahden ja Eteläportin sähköasemia siten, että niitä voitiin käyttää vikaa edeltävän ja vian jälkeisen taustaverkon suuruuden säätelyyn, vikalähdön kuormituksen säätämiseen sekä korvauskytkentätilanteiden tai asiakasmuuntamon takaisen vian simuloimiseen. Maasulkutestien vikapaikan sijainti oli valittu siten, että siellä voitiin edellä mainitut asiat toteuttaa. Lisäksi kyseisessä sijainnissa oli otolliset maadoitusolosuhteet maasulkutestien toteuttamiseksi, sillä lähialueella ei ole muuta sähköjakelua tai johtavia maanalaisia rakenteita. Maasulkutestien vikapaikan sijainti Alva Sähköverkko Oy:n jakelualueella on esitetty kuviossa 11.



Kuvio 11. Maasulkuvikapaikan sijainti Alva Sähköverkko Oy:n jakelualueella

Kuviossa 12 on puolestaan esitetty maasulkutestien perustilanne, jossa Kukkumäen sähköaseman J24 johtolähtö toimi vikalähtönä. Vikalähdöllä on vain yksi normaali jakelumuuntamo M0807, jonka pj-verkon kuormat korvattiin varavoimakoneella katkollisten testien ajaksi. Sähköaseman muista johtolähdöistä muodostettiin noin 4 MVA:n kuormitustehoinen ja maasulkuvirralltaan noin 150 A:n suuruinen taustaverkko. Kukkumäen sähköasemalla on käytössä keskitetty maasulkuvirran kompensointilaitteisto, jossa kaksi 330 A:n kompensointikapasiteetin omaavaa sammutuskuristinta on kytketty tähtipisteeseen J04 ja J05 lähtöjen kautta syötettyjen tähtipistemuuntajien avulla. Kukkumäen maasulkukokeet toteutettiin siten, että vain toisen sähköaseman päämuuntajan perään oli kytketty maasulkukokeiden aikainen taustaverkko, ja toinen sammutuskuristin sekä vikakohdetta syöttävä johtolähtö. Loput johtolähdöt käännettiin Kukkumäen sähköaseman toisen päämuuntajan perään. Se ei ollut osallisena maasulkukokeissa.

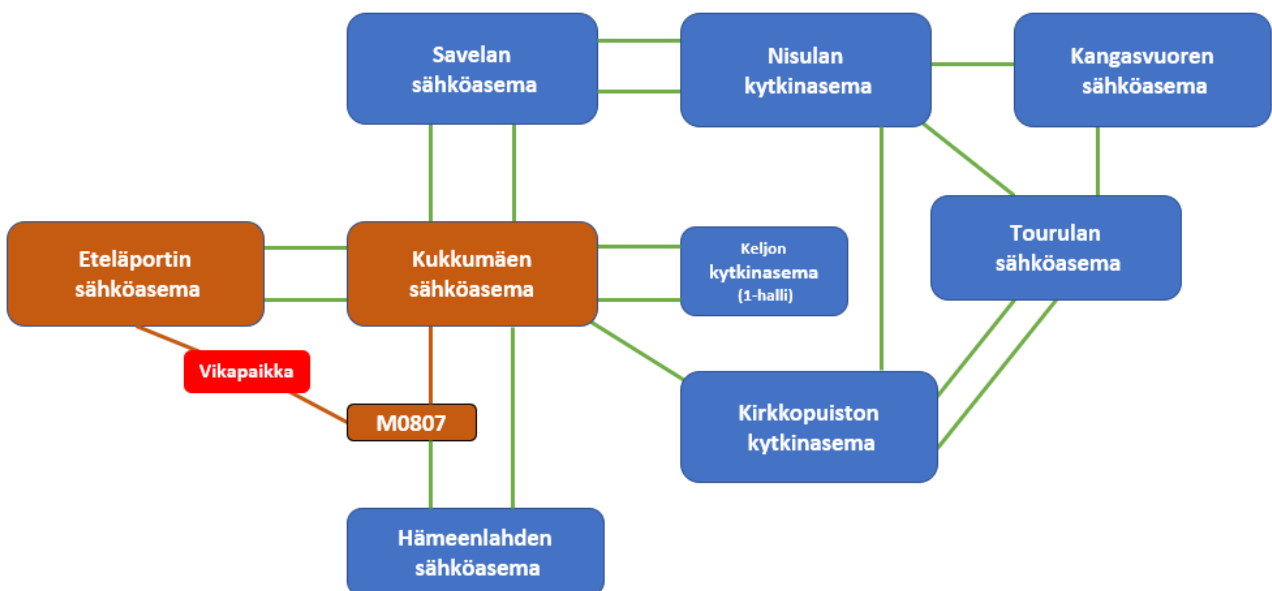


Kuvio 12. Maasulkutestien perustilanne, Alva Sähköverkko Oy:n sähkö- ja kytkinasemat sekä niiden väliset varasyöttöyhteydet

Erilaisia taustaverkon kombinaatioita sekä yli- ja alikompensointitilanteita voitiin varioida Kukkumäen, Savelan ja Eteläportin sähköasemien avulla. Alva Sähköverkko Oy:n jakeluverkko on normaalitilanteessa kompensoitu siten, että kompensoinnin sivuun viritys on muutaman ampeerin kapasitiivisella puolella. Tällöin kapasitiivisen jäännösvirran osuus vikavirrasta on 2–3 A. Jäännösvirran suuruuteen vaikuttaa kuitenkin myös verkoston häviöiden ja sammutuskelojen lisävastusten tuottama resistiivisen virran osuus, joka voi vaihdella kytkentä-, kompensointi- tai vikatilanteen mukaan lähes nolasta useisiin kymmeneen ampeereihin.

Kukkumäen sammutuskelojen rinnakkaisvastus tuottaa jäykässä maasulussa 20 kV:n verkkoon resistiivistä virtaa 4,3 A. Lisävastusta ohjataan logiikalla, joka perustuu säätäjän laskennalliseen verkon vaimennusarvoon eli verkon tuottamaan resistiiviseen virtaan I_d . Lisävastus on lähtökohtaisesti aina verkossa, mutta kytkeytyy irti, jos säätäjän laskema resistiivinen maasulkuvirta ylittää 12 A:n rajan. Toisaalta, jos resistiivinen virta laskee alle 6 A:n, kytketään lisävastus takaisin verkkoon. Kun sammutuskelan säätäjä on toisen säätäjän ohjaamana, eli toinen säätäjä toimii isäntänä ja toinen säätäjä toimii orjana, niin lisävastus kytkeytyy orjana olevasta kelasta irti. Kaukokäytön avulla voidaan myös pakottaa lisävastus päälle tai pois päältä. Jos lisävastus on verkossa ennen maasulkua, niin se pysyy verkossa. Jos lisävastus on puolestaan irti ennen maasulkua, se kytkeytyy 450 ms:n viiveellä 6000 ms:n ajaksi verkkoon.

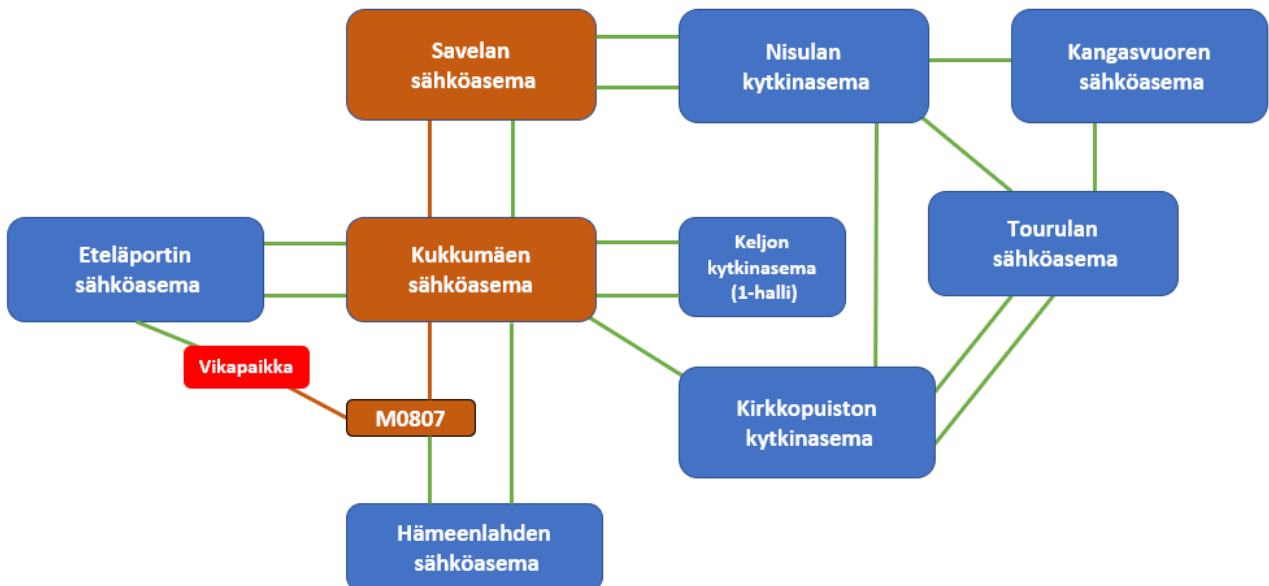
Eteläportin sähköaseman toisen kiskon taakse kytkettiin johtolähtöjä siten, että Kukkumäen sähköaseman vikalähdölle saatiin noin 1 MVA:n kuorma (ks. kuvio 13). Samalla saatiin testattua vika-kohteen takaisen laajemman taustaverkon ja vikaantuvan johtolähdön kuormitusvirran vaikutukset IFPTOC-suojan toimintaan. Savelan sähköaseman avulla voitiin lisäksi simuloida hajautettua kompensointia (ks. kuvio 14).



Kuvio 13. Laaja taustaverkko vikapaikan takana

Kukkumäen sähköasema on kahden päämuuntajan sähköasema, joten myös sammutuslaitteisto on kahdennettu. Sammutuslaitteiston hajoaminen on kuitenkin mahdollista, joten tarvittava maasulkuvirran kompensointikapasiteetti on korvattava muiden sähköasemien sammutuskuristimien

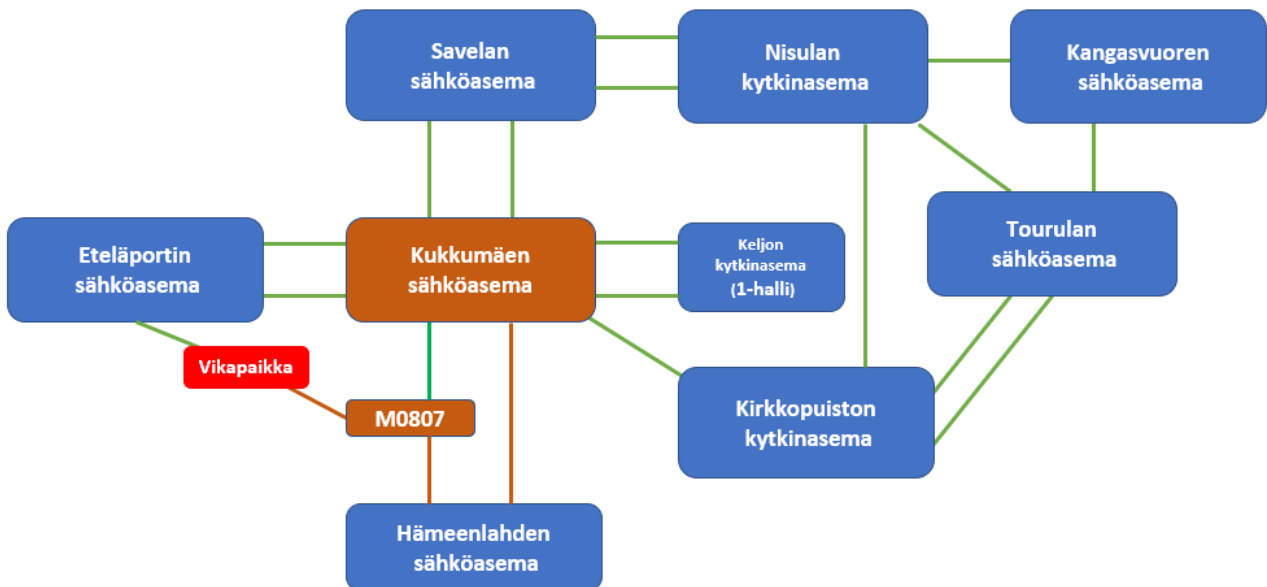
avulla. Tätä tapausta simuloitiin korvaamalla Kukkumäen maasulkutesteissä oleva sammutuskuristin Savelan sähköaseman sammutuskuristimella testien 69–75 aikana. Savelan sähköasemalla on kaksi tähtipistemuuntajien kautta verkkoon kytkettyä 160 A:n sammutuskuristinta, joista vain toista hyödynnettiin maasulkukokeissa. Savelan sammutuskelan kanssa samalle kiskolle oli kytkettyä myös normaalia jakeluverkon kuormaa noin 1 MVA:n verran, joten samalla voitiin todeta IFPTOC-suojan selektiivisyys hajautetun kompensoinnin tapauksessa. Vikatapausta, jossa hajautettua kompensointia olisi ollut vikaantuneella johtolähdöllä, ei pystytty toteuttamaan, sillä Eteläportin ja Hämeenlahden sähköasemilla on sammutuskuristimet kytketty suoraan päämuuntajan tähtipisteeseen. Savelan sähköaseman avulla oli tarkoitus tehdä myös kaksoismaasulkutesti, mutta suunnitelmasta luovuttiin mahdollisten henkilö- ja materiaaliriskien vuoksi, sillä vikavirran reittiä ei pystytty ennustamaan.



Kuvio 14. Kukkumäen sähköaseman sammutuskelan korvaaminen Savelan sähköaseman sammutuskelalla

Hämeenlahden sähköaseman avulla simuloitiin lisäksi kuvion 15 mukaisesti asiakasmuuntamon vikaa. Tällöin Kukkumäen sähköaseman syöttäväksi lähdeksi vaihdettiin J23-lähtö. Hämeenlahden sähköaseman toista kiskoa hyödynnettiin vikavirran reitiksi, sekä yhdelle yhdysjohtolähdölle aseteltiin asiakasmuuntamoita vastaavat nollavirtaan ja -jännitteeseen pohjautuvat maasulkuasettelut. Hämeenlahden sähköaseman normaalit kuormat käännettiin toiselle kiskolle tämän testin ajaksi.

Asiaksmuuntamon takaista vikaa simuloitiin testeissä 56–61, joissa varioitiin erilaisten vikavastusten vaikutusta IFPTOC-suojan ja normaalin asiaksmuuntamon suojauksen väliseen selektiivisyyteen.

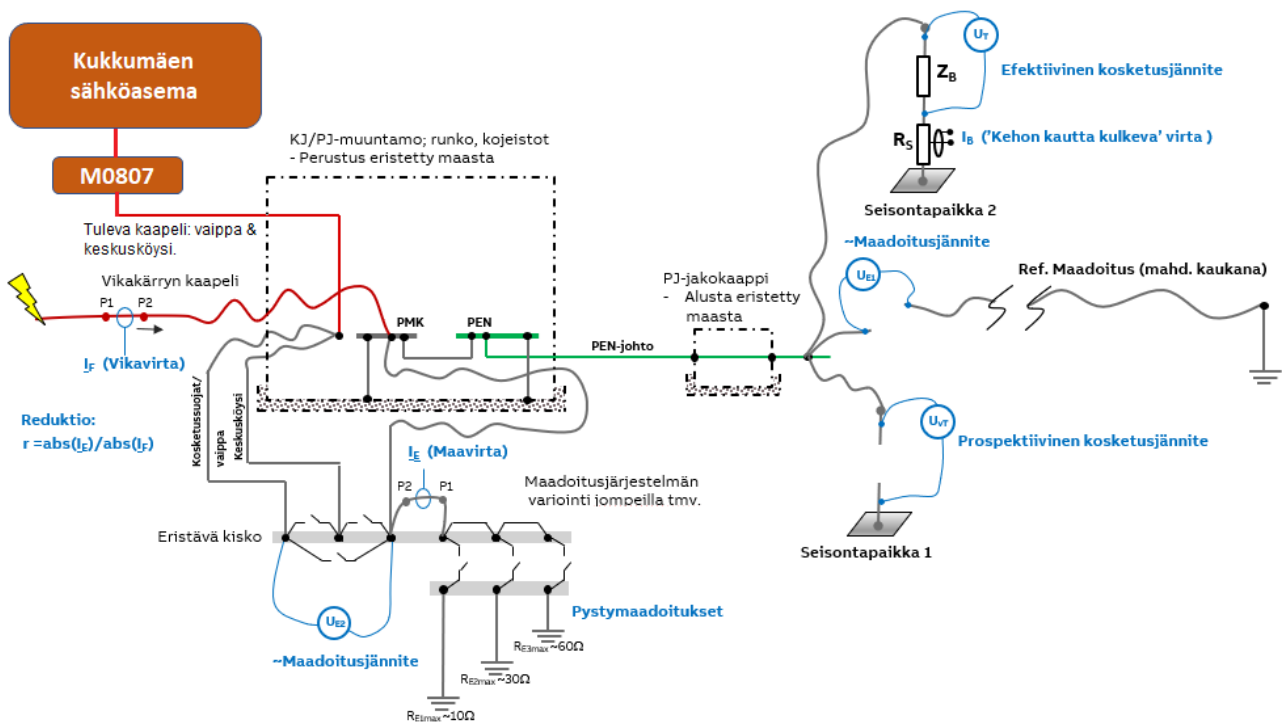


Kuvio 15. Asiaksmuuntamon vian simulointi Hämeenlahden sähköaseman avulla

Kukkumäen sähköaseman maasulkutesteihin liittyvät koe- ja mittausjärjestelyt olivat poikkeukselliset Suomen ja todennäköisesti koko maailman tasolla tarkasteltuna. Esimerkiksi Yhdysvalloista tuli Kaliforniasta paikallisen 5,5 miljoonan asiakkaan sähköverkkoyhtiön edustaja seuraamaan maasulkukokeita. Kyseinen henkilö on myös IEEE-järjestön jäsen. Taustaverkon erilaiset kombinaatiot, yli- ja alikompensointitilanteet, hajautetun kompensoinnin simulointi sekä eri sähköasemien korvauskytöntäjärjestelyt vaativat runsaasti suunnittelua, valmisteluja ja resursseja sekä maasulkutestien aikana, ennen testejä ja testien jälkeen. Maasulkukokeiden tarkoituksena oli myös varmentaa kokonaisuudessaan ABB Oy:n REX640-suojareleen eri maasulkusuojalohkojen toiminta. Tässä opinäytetyössä keskitytään kuitenkin pääasiassa kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen toiminnan varmistamiseen maastossa tehtyjen maadoitus- ja kosketusjännitemittausten sekä vikavirtamittausten avulla.

4.3.3 Vikapaikan koe- ja mittausjärjestelyt

Maasulkukokeita varten rakennettiin kesällä 2023 kuvion 16 mukainen testiympäristö, jossa voitiin turvallisesti simuloida ja mitata todellisen verkon tapahtumia keskijänniteverkon maasulkutilanteissa. Maasulkuvikojen turvallista toteuttamista varten rakennettiin kokonaan oma muuntopiiri, jossa muuntamon ja siihen kytkeytyvien mittauskohteiden maadoitusratkaisut olivat normaalista poikkeavat. Muuntamon ja siihen kytkeytyvien jakokaappien perustukset rakennettiin siten, että ne olivat täysin eristetty maasta sorapatjan, Finnfoam-eristelevyjen ja puusokkelien avulla. Rakenteiden eristäminen tehtiin, jotta testikohteen maadoitusolosuhteita voitiin tarkasti säädellä halutunlaisiksi. Lisäksi eristyksen avulla taattiin testikohteessa operoivan henkilöstön turvallisuus, jotta testien aikaiset vaarajännitteet eivät pääse leviämään testiympäristöä ympäröivään maaperään. Vikakohteen muuntopiiriin kytkettiin osassa testeistä myös 0,5 MW:n keinokuorma, jonka avulla voitiin turvallisesti simuloida sähkönkäyttäjien kuormituksen vaikutusta vikavirtojen muodostumiseen. Testimuuntamon 20 kV:n verkko oli rakennettu renkaaseen, joten Kukkumäen sähköaseman testilähdölle saatiin kytkettyä tarvittaessa myös normaalia jakeluverkon kuormaa. Varioimalla viikalähdön kuormitusta voitiin tutkia harmonisten yliaaltojen vaikutusta vikavirran muodostumiseen.



Kuvio 16. Vikapaikan testijärjestelyt (Altonen 2023, muokattu)

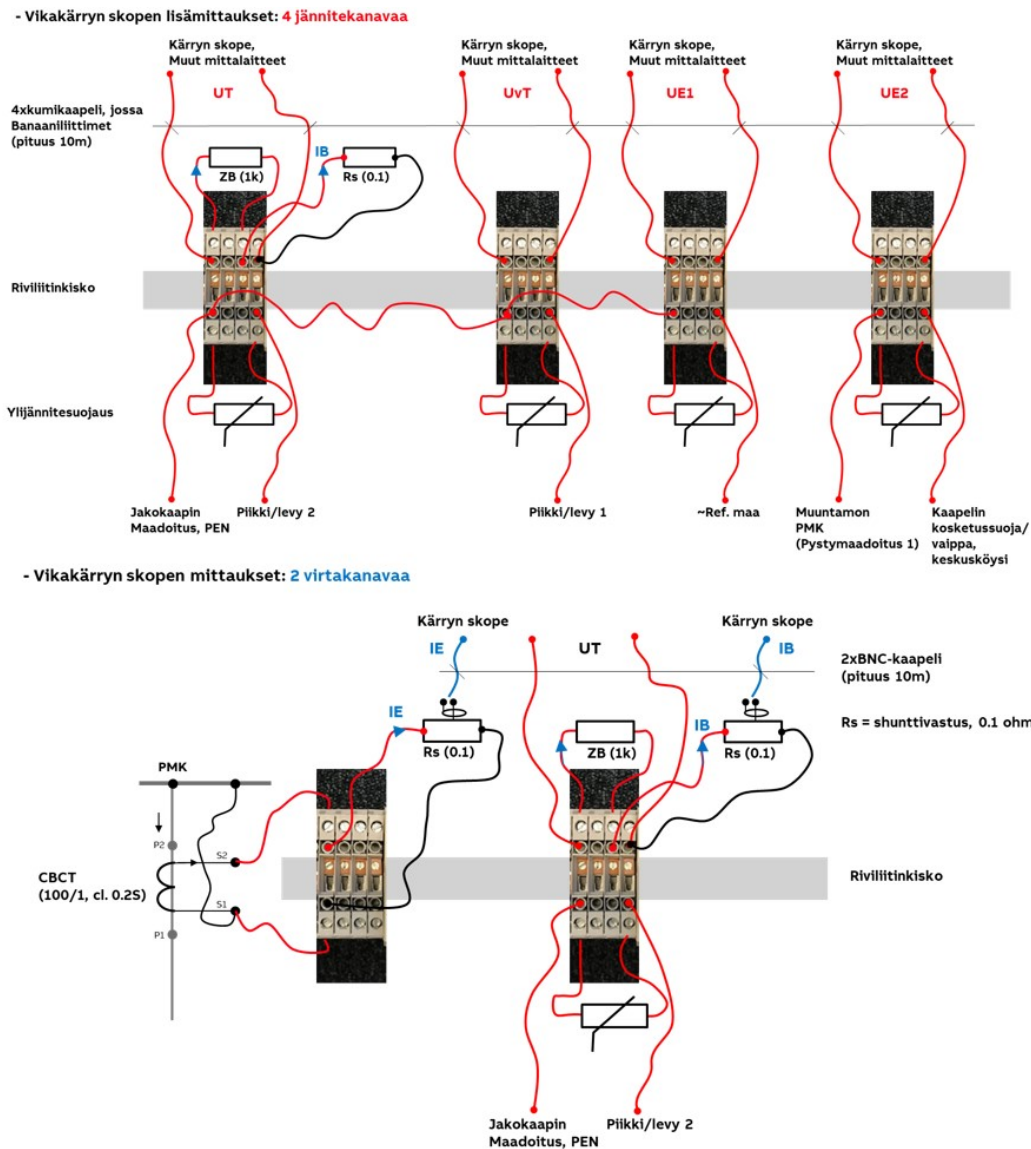
Testikohteen maaperän resistiivisyys todettiin Wenner-menetelmällä mitattuna olevan 170 Ω m, joten testimuuntamon pystymaadoitukset suunniteltiin tämän tiedon pohjalta. Tavoitteena oli saada testimuuntamon erillismaadoitusten arvoiksi 10 Ω , 30 Ω ja 60 Ω . Erillismaadoitusten maadoitusresistanssit mitattiin käännepistemenetelmällä ennen testien aloitusta. Tuloksiksi saatiin 11,5 Ω , 31 Ω ja 60 Ω . Testikohteen muuntopiirin maadoitusolosuhteita voitiin täten varioida eri maadoitusresistansseja omaavien pystymaadoitusten avulla. Reduktion vaikutus testimuuntamon maadoituksiin meneviin vikavirtoihin voitiin puolestaan todeta kaapelivaippojen ja keskusköysien kytkentöjä muuttamalla. Maadoitusolosuhteiden variointi toteutettiin hyödyntämällä eristettyä maadoituskiskoa, johon kytkettiin kaikki muuntamoon liittyvät maadoitukset. Pystymaadoituksista ja kaapelivaipoista tuotiin maadoitukset testimuuntamon maadoituskiskoon eristävillä MKEM 1x25 mm² KEVI-johtimilla. Keskijännitekaapeleiden paljaat kupariset keskusköydet eristettiin muovisilla suojaputkilla noin 20 metrin etäisyydelle testimuuntamosta. Testimuuntamo ja siihen liittyvien mittausjärjestelyjen toteutus on havainnollistettu liitteessä 2 esitettyjen kuvien 1–7 avulla.

Testimuuntamon maadoituksen kytkeytymistä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään varioitiin kolmella eri tavalla. *Ensimmäinen tapa* oli erottaa testimuuntamo muusta maadoitusverkosta. Suurin osa maasulkutesteistä tehtiin siten, että testimuuntamo oli kytkettynä 11,5 Ω :n maadoitusresistanssin omaavaan erillismaadoitukseen. Tällöin testimuuntamon verkko ei ollut lainkaan galvaanisesti yhteydessä muuhun maadoitusverkkoon. Yksittäiset maasulkukokeet tehtiin myös kytkemällä testimuuntamo 31 Ω :n ja 60 Ω :n erillismaadoituksiin, jotta voitiin todentaa muuntamon maadoitusresistanssin vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen. Erillismaadoitukset oli sijoitettu riittävän etäälle toisistaan, testimuuntamosta, kosketusjännitemittauselektrodeista ja muista maadoituksista, jotta maasulkukokeiden aikana saadut mittaustulokset olisivat luotettavia.

Toinen tapa oli kytkeä testimuuntamon maadoitus galvaanisesti yhteen laajempaan maadoitusverkkoon keskijännitekaapelin vaipan kosketussuojien avulla. Käytännössä tällöin muodostui suora galvaaninen yhteys syöttävään Kukkumäen sähköasemaan, jonka maadoitusimpedanssi on vuonna 2019 tehdyn Fingrid Oyj:n Jyväskylän aseman maadoitusmittauksen mukaan 0,03 Ω . *Kolmannessa tavassa* testimuuntamo oli galvaanisesti yhteydessä laajempaan maadoitusverkkoon kaapelin kosketussuojien ja keskusköyden kautta. Keskusköyden ja kaapelivaipan kosketussuojien kytkemisestä

johtuvan reduktion vaikutusta tutkittiin testeissä 5–8 kytkemällä testimuuntamon 11,5 Ω :n erillismaadoitus galvaanisesti yhteen laajemman maadoitusverkon kanssa. Testimuuntamo syöttävän keskijännitekaapelin vaipan kosketussuojat kytkettiin kiinni testimuuntamon maadoituksiin testeissä 5–7. Testissä 8 kosketussuojien kautta tulevan maadoitusyhteyden rinnalle lisättiin vielä keskijännitekaapelin keskusköysi.

Maasulkukokeet ja IFPTOC-suojan toiminnan varmistaminen toteutettiin yhteistyössä ABB Oy:n kanssa, joten ABB Oy toimitti vikakohteeseen vikakärryn, jonka avulla tehtiin todellisia maasulkuvikoja testimuuntamalla. Vikakärryssä oli katkaisijalla ja suojarieleellä varustettu keskijännitekojeisto, joten vian poiskytkentäaika voitiin säätää vikakärryn avulla siten, että suurin osa maasulkutesteistä voitiin tehdä ilman jakeluverkon keskeytystä. Vikakärryn avulla voitiin varioida myös maasulunaikaista vikavastusta 0–50 k Ω :n välillä. Vikakärryyn oli lisäksi integroitu Yokogawa DL850-oskilloskooppi, jolle tuotiin vikapaikan jännite- ja virtamittaukset. Alva sähköverkko Oy järjesti testikohteeseen omia jännite- ja virtamittauksia, joissa hyödynnettiin Fluke 1777-sähkönlaatuanalysointia. Testikohteen jännite- ja virranmittausjärjestelyt toteutettiin kuvion 17 mukaisesti.



Kuvio 17. Vikapaikan jännite- ja virtamittaukset (Altonen 2023, muokattu)

Vikapaikan mittausjärjestelyjen avulla mitattiin vikakohteen muuntopiirissä tehtyjen maasulkujen aikaisia vaarajännitteitä ja vikavirtoja. Vaarajännitteistä mitattiin efektiivinen kosketusjännite U_T ja prospektiivinen kosketusjännite U_{VT} . Lisäksi mitattiin maadoitusjännite U_E kahdella eri referenssillä. Maasulkukokeita varten järjestettiin testikohteeseen riittävän kaukana oleva referenssimaa. Alva Sähköverkko Oy:n jakelualueen ulkopuolella Kinkomaalla sijaitsevan referenssimaan mittauspisteen etäisyys vikakohteeseen oli 5,7 km. Kinkomaan referenssimaan maadoitusjännite U_{E1} mitattiin Alva-yhtiöiden viestiyhteyksupareiden ja erillisten mittausjohtimien avulla.

Toiseksi referenssimaaksi valittiin Kukkumäen sähköasemalle galvaanisesti yhteydessä oleva laajempi maadoitusjärjestelmä. Tämän referenssimaan maadoitusjännite U_{E2} mitattiin testimuuntamon erillismaadoituksen ja testimuuntamoan syöttävän kaapelin keskusköyden väliltä. Maasulkuvirta eli vikavirta I_F mitattiin vikakärryn kaapelivirtamuuntajalla. Maadoitukseen menevä virta eli maavirta I_E mitattiin erillisellä kaapelivirtamuuntajalla ja sähkönlaatuanalysoijan virtapihdillä. ABB:n oskilloskooppia varten maavirta muunnettiin jännitteeksi erillisen $0,1 \Omega$:n shunttivastuksen R_S avulla. Kehon impedanssia kuvaavan 939Ω :n vastuksen Z_B läpi menevä virta I_B mitattiin toisen $0,1 \Omega$:n shunttivastuksen ja sähkönlaatuanalysoijan virtapihdin avulla.

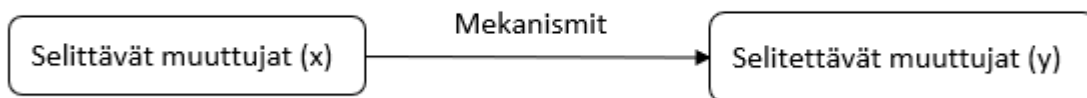
Kosketusjännitemittauksia varten pystytettyjen jakokaappien sähkönsyöttö toteutettiin maan päälle putkeen asennetulla AXMK $4 \times 25 \text{ mm}^2$ -kaapelilla. Jakokaapin rungon ja maahan 20 cm :n syvyyteen painetun mittauselektrodin väliset kosketusjännitemittaukset puolestaan tuotiin testimuuntamon riviliittimille H07RN-F $5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ -kumikaapelilla. Jakokaappien syöttökaapelin ja kosketusjännitemittauksissa käytetyn kumikaapelin pituudet olivat 50 metriä . Efektiivisen kosketusjännitteen mittausspiiriin kytkettiin kehon impedanssia simuloiva 939Ω :n vastus. Kukkumäen sähköaseman maasulkutestien kosketusjännitemittauksissa noudatettiin SFS 6001-standardin (2018, 118) vaatetta, jonka mukaan efektiivisen kosketusjännitteen määrittämisessä on huomioitava ihmiskehon impedanssia vastaava $1 \text{ k}\Omega$:n vastus. Lisäksi kosketusjännitemittauksissa voidaan hyödyntää maapiikkejä, mikäli lisäresistansseja ei haluta ottaa huomioon. (Mts. 118.)

4.4 Tutkimusaineiston eli mittausdatan analysointi

Tämän opinnäytetyön määrällinen tutkimusaineisto kerättiin tutkimusta varten rakennetun testiympäristön avulla. Testiympäristössä varioitiin erilaisia maasulkuvikoja muuttamalla maasulkuilmiöön liittyviä parametreja, joita olivat muun muassa maasulkuvirran suuruus ja tyyppi sekä testikohteen maadoitusresistanssi ja maadoitustapa. Tutkimusaineisto muodostui sähköasemien suojarleiden häiriötallenteista sekä testiympäristön mitta- ja suojalaitteiden mittaustuloksista. Suojareleiden häiriötallenteet tallentuivat COMTRADE-tiedostomuotoon, jota käytetään yleisesti sähköjärjestelmien vika-, testaus- ja simulointitietojen tiedonsiirrossa (Institute of Electrical and Electronics Engineers 1999, 1). Kyseisiin tiedostomuotoihin tallennetaan digitaaliseen muotoon esimerkiksi analogisia jännite- ja virtamittauksia sekä digitaalisten kanavien tilatietoja (mts. 1). Häiriötallenteiden analysointiin käytettiin WaveWin ABB H.Q- ja Siemens SIGRA-ohjelmistoja, joiden

avulla pystyttiin vertailemaan ja analysoimaan suoja-alueiden mittaustuloksia. Testiympäristön mittalaitteiden mittaustuloksia analysoitiin puolestaan Fluke Energy Analyze Plus-sovelluksella, joka on kehitetty Fluken sähkönlaatuanalysointilaitteiden mittausten analysointiin ja raportointiin.

Häiriötallenteiden ja sähkönlaatuanalysointilaitteen tallenteiden (ks. liite 3) mittausdatasta poimittiin käsin tarvittavat mittaustulokset Excel-tilaukoihin, joiden avulla voitiin tilastollisin menetelmin tarkastella saatua mittausdataa. Mittausdataa analysoitiin tilastollisen päättelyn ja teoreettisen selittämisen avulla. Mittausdatasta voitiin havaita eri muuttujien välillä tilastollinen yhteys ja näitä muuttujia yhdistävä mekanismi. Jatkuvien muuttujien, kuten virta tai jännite, välille muodostuu niitä yhdistävä mekanismi, jonka avulla voidaan kuvata muuttujien välistä assosiaatiota (ks. kuvio 18). (Ketokivi 2015, 31–32.) Tässä tutkimuksessa tutkimusaineiston jatkuvia muuttujia on esitetty myös viivakuvioiden avulla (Heikkilä 2014, 156). Aineiston havainnollistamisessa on lisäksi käytetty pylväskaaviota, jonka avulla voidaan korostaa muuttujien välisiä eroja (Kananen 2015, 334).



Kuvio 18. Muuttujat ja niitä yhdistävät mekanismit (Ketokivi 2015, 32)

Mittausdataa analysoitiin matemaattisen selitysmekanismin avulla, jossa y -muuttujan arvoa ennustetaan x -muuttujan arvon avulla. Matemaattinen mekanismi ei pelkästään kuvaa kahden muuttujan välistä yhteyttä, vaan on mekanismi. Tällöin eri muuttujien välistä keskinäistä yhteyttä kuvataan matemaattisella funktiolla $y = f(x)$. Kahden muuttujan välistä tilastollista suhdetta täytyy kuitenkin mitata tarkoituksenmukaisella tavalla, joten mallin selittävä regressioanalyysi on valittava muuttujien mukaisesti. Kahden jatkuvan muuttujan välisessä regressioanalyysissä käytetään klassista lineaarista regressiomallia (ks. kaava 28), mikäli muuttujien välisen yhteyden oletetaan olevan lineaarinen. (Ketokivi 2015, 32–33, 38, 134–136.)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon_y \quad (28)$$

, missä y = selitettävä muuttuja
 x = selittävä muuttuja

β_0 = regressiokäyrän y -akselin leikkauspiste

β_1 = muuttujien x ja y lineaarista yhteyttä kuvaava tekijä

ε_y = muuttujan y virhetermi

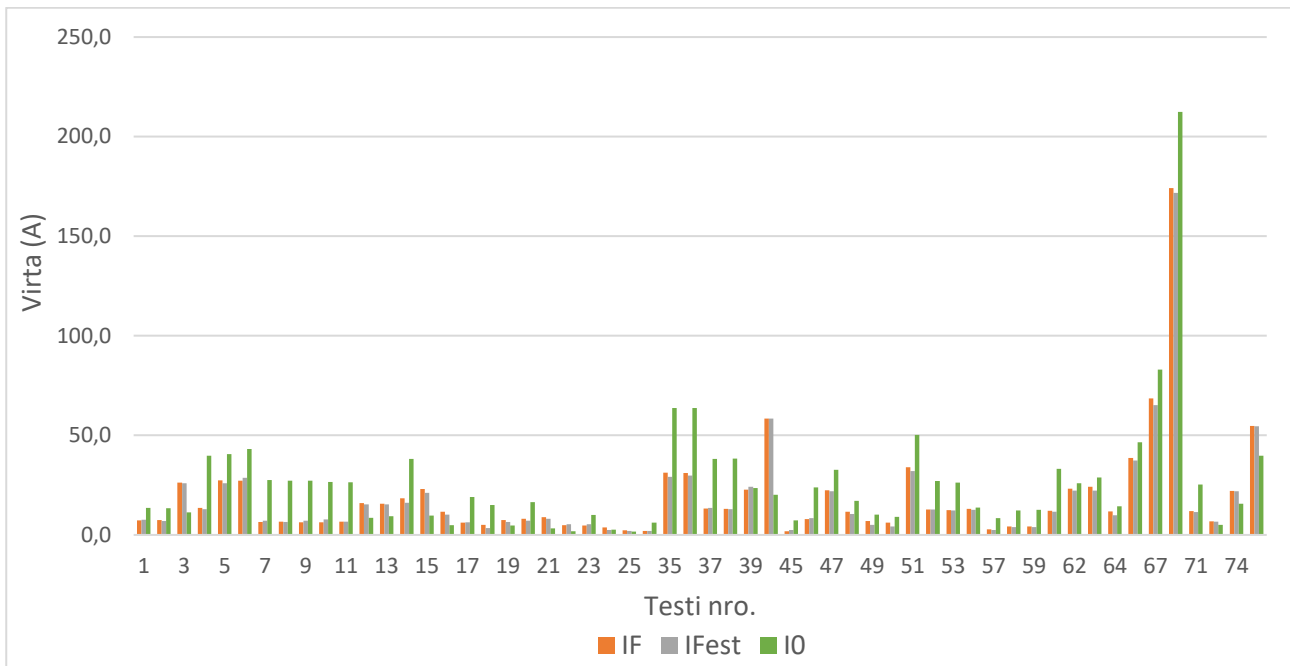
Maasulkutestien aikaisten mittalaitteiden mittausvirheet ovat hyvin pieniä, joten mittausvirheiden vaikutusta ei ole huomioitu regressioanalyysissä. Lisäksi regressiokäyrän y -akselin leikkauspisteen voidaan olettaa olevan nolla, joten regressiomallin yhtälö yksinkertaistuu muotoon $y = \beta_1 x$. Tällöin regressiomallin tekijä β_1 toimii mallin avulla muodostetun lineaarisen suoran kulmakertoimena. (Mts. 138.)

5 Tutkimustulokset

5.1 Vikavirran mukaan säätävän maasulkusuojauksen toiminta

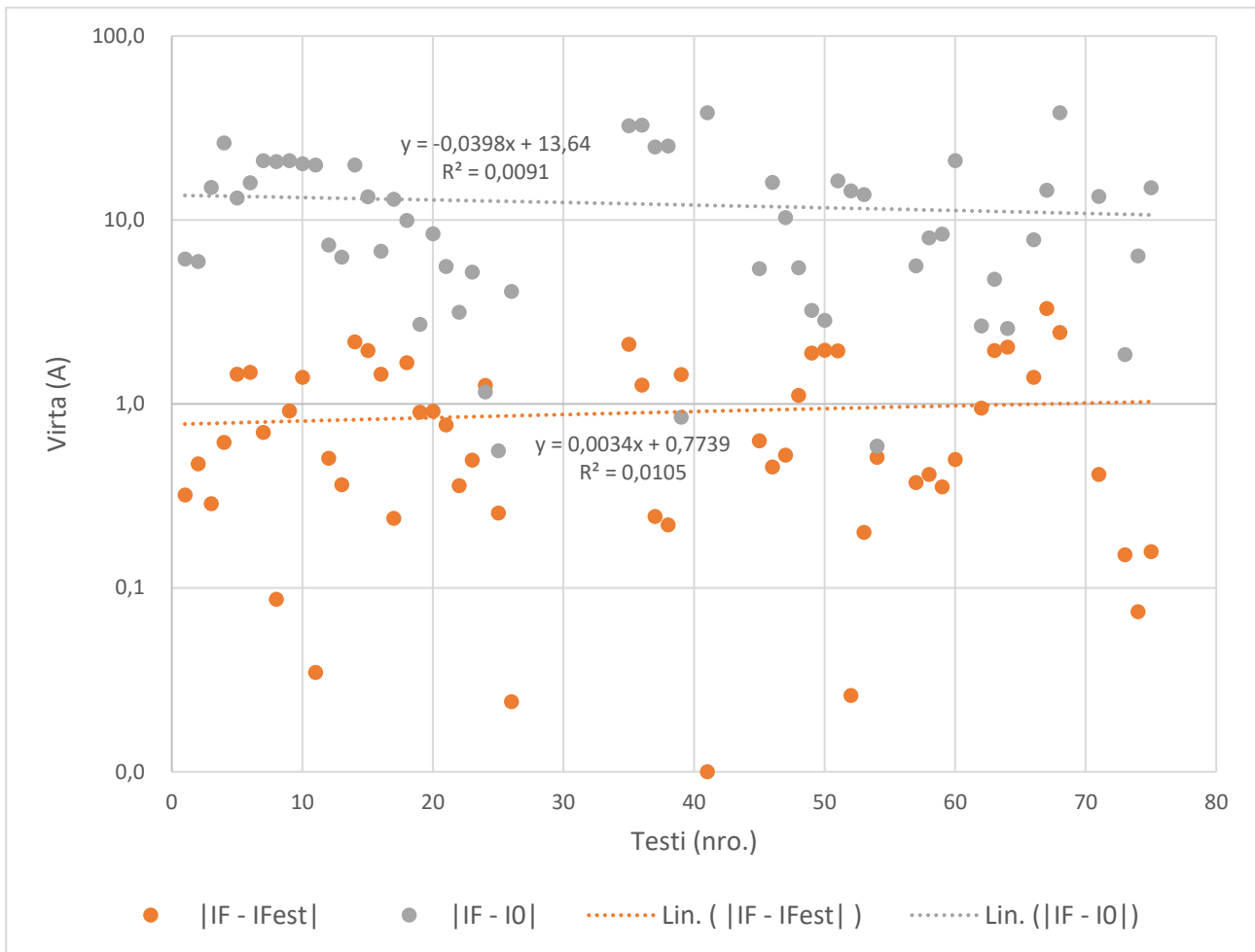
Kukkumäen maasulkutestien yhteydessä tehtiin kaiken kaikkiaan 76 koetta, joissa simuloitiin keskijänniteverkon erilaisia maasulkuvikatilanteita. Testissä 76 simuloitiin keskijänniteverkon vaihekatkotilannetta, mutta muutoin kaikki muut vikatilanteet simuloivat yksivaiheista maasulkua jakeluverkon eri vika-, kytkentä- ja käyttötilanteissa. Maasulkuvikoja tehtiin erilaisilla verkon konfiguraatioilla, kuormitustilanteilla, kompensointiasteilla, vikavastuksilla, vikatyypeillä ja maadoitusolosuhteilla. Verkon konfiguraatiota muutettiin jakeluverkon kytkentätilannetta muuttamalla siten, että vikapaikkaa edeltävää tai sen jälkeistä verkon osuutta voitiin lisätä tai vähentää.

Jakeluverkon maasulkuvirran kompensointiastetta muutettiin eri vikatilanteissa säätämällä sammutuskuristimen asentoa manuaalisesti siten, että kompensointiaste oli ali- tai ylikompensoitu 90–200 A:n välillä. Vikatyyppejä puolestaan simuloitiin vikavastusta muuttamalla ja aikaansaamalla katkeileva maasulku kuoritun sekä päättämättömän keskijännitekaapelin avulla. Vikavastuksen avulla voitiin pienentää vikavirtaa ja hallita suoran vikavastuksettoman maasulun aiheuttamia transientteja. Eri testien yhteydessä mitattuja nolla- ja vikavirtoja sekä IFPTOC-suojan vikavirtaestimaatteja on esitetty kuviossa 19. Nollavirrat ja vikavirtaestimaatit saatiin testilähdön sähköaseman pään mittauksista ja vikavirrat vikapaikasta vikakärryn mittauksista.



Kuvio 19. Vika- ja nollavirran sekä vikavirtaestimaatin suuruus eri maasulkutestien aikana

Kuvion 19 tulosten perusteella voidaan todeta, että sähköaseman kaapelivirtamuuntajalla tai vaihevirtamuuntajien summavirtakytkennällä mitattu maasulun aikainen nollavirta poikkeaa todellisesta vikakohteesta esiintyvistä vikavirrasta. Todellisen vikavirran suuruus voi olla nollavirtaa suurempi tai pienempi. Vikavirta ja nollavirta voivat olla myös samansuuruisia. Vikakohteesta esiintyvän vikavirran suuruus on täten riippuvainen verkoston vika-, kytkentä- tai käyttötilanteesta. Kukkumäen maasulkutestien aikaisten vika- ja nollavirtojen suuruudet olivat 2–212 A:n välillä. Nollavirran ja vikavirtaestimaatin välinen erotus todelliseen vikavirtaan on esitetty kuviossa 20.



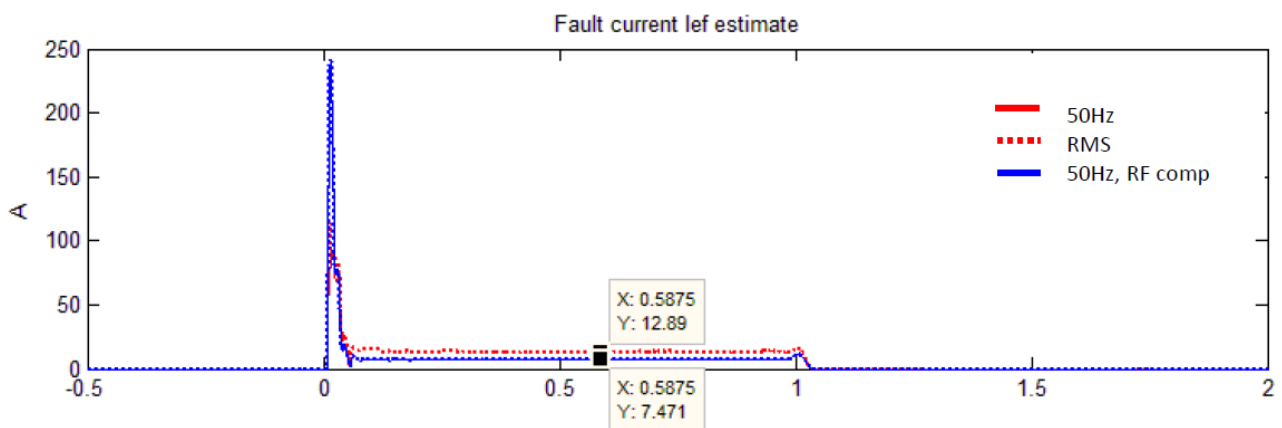
Kuvio 20. Vikavirtaestimaatin ja nollavirran erotus vikavirtaan (logaritminen)

Yhtäältä kuvioista 19 ja 20 nähdään, että maasulun aikainen vikavirta poikkeaa huomattavasti sähköasemalla mitatusta nollavirrasta. Kuvion 20 mukaisten mittaustulosten perusteella laaditut lineaariset regressiokäyrät eivät kuvaa muuttujien välisiä mekanismeja, sillä eri testeissä oli useita erilaisia muuttujia, jotka vaikuttivat vikavirran muodostumiseen. Tämä käy hyvin ilmi myös regressiokäyrien selityksasteista, jotka ovat lähempänä nollaa kuin ykköstä. Kukkumäen maasulkukokeissa eri testien aikana mitatut nolla- ja vikavirrat poikkesivat toisistaan 0,6–38,3 A, keskimääräisen eroavaisuuden ollessa 12,2 A. Toisaalta Kukkumäen sähköaseman REX640-suojareleiden IFPTOC-suojan vikavirtaestimaatti poikkesi vikavirrasta keskimäärin vain 0,9 A. Yksittäisten testien aikaiset vikavirrat poikkesivat vikavirtaestimaatista 0–3,3 A. Vikavirtaestimaatin tarkkuuteen vaikuttaa vaihevirtamuuntajien muuntosuhde ja tarkkuusluokka, joten pienillä vikavirroilla mittaustarkkuus voi kärsiä. Pienillä virroilla mittausepä-tarkkuudet voivat aiheuttaa suuriakin prosentuaalisia eroja vikavirran ja vikavirtaestimaatin välille. Tämä on selvästi todettavissa myös mittaustulosten perusteella. Taulukossa 2 esitetään kymmenen testiä, joissa vikavirran ja vikavirtaestimaatin välinen prosentuaalinen eroavaisuus on suurinta.

Taulukko 2. Esimerkkejä vikavirtaestimaatin ja nollavirran suhteesta todelliseen vikavirtaan

Testi nro.	I_F (A)	I_{Fest} (A)	$I_F - I_{Fest}$ (A)	$(I_F - I_{Fest})/I_F$	I_0 (A)	$I_F - I_0$ (A)	$(I_F - I_0)/I_F$
45	1,9	2,5	-0,6	34 %	7,3	-5,4	290 %
24	3,8	2,5	1,3	34 %	2,6	1,2	31 %
18	5,1	3,4	1,7	33 %	15	-9,9	196 %
50	6,2	4,2	2,0	32 %	9	-2,8	46 %
49	7,0	5,1	1,9	27 %	10,2	-3,2	46 %
10	6,4	7,8	-1,4	22 %	26,6	-20,2	315 %
64	11,8	9,8	2,0	17 %	14,4	-2,6	22 %
9	6,3	7,2	-0,9	15 %	27,3	-21,0	334 %
57	2,9	2,5	0,4	13 %	8,5	-5,6	196 %
16	11,7	10,2	1,5	12 %	4,9	6,8	58 %

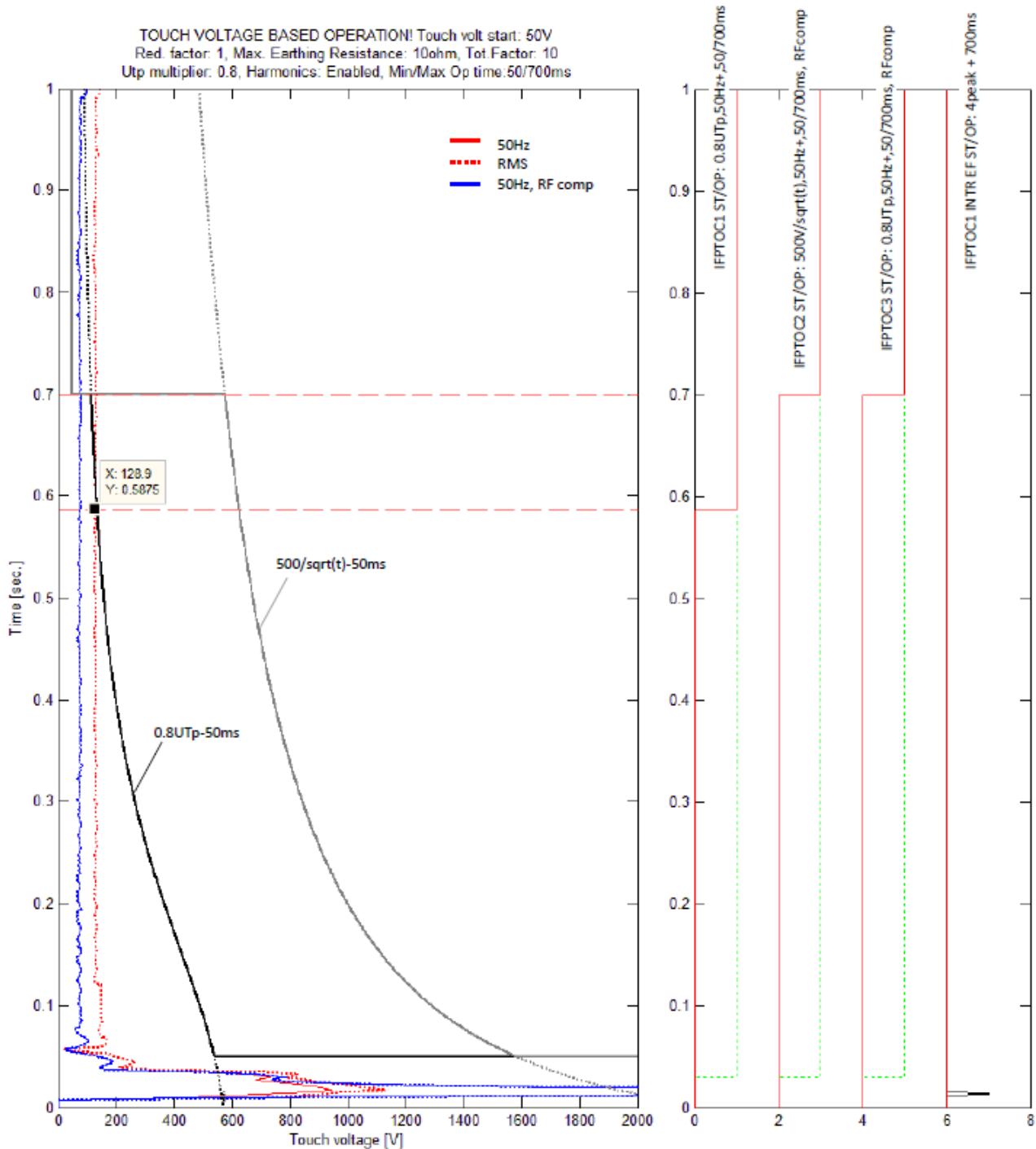
Vikavirtaestimaatin tulee olla mahdollisimman tarkka, jotta IFPTOC-suoja osaa estimoida vikakohteeseen muodostuvan kosketusjännitteen suuruuden riittävän tarkasti ja näin ollen säätää vian poiskytkentäajan kosketusjännitteen suuruuden mukaisesti. Kukkumäen maasulkutestien tulosten perusteella (ks. kuvio 20 ja taulukko 2) voidaan todeta, että vikavirtaestimaatti vastaa todellista vikakohteessa esiintyvää vikavirtaa. Täten vikavirtaestimaatin mukaan säätävän IFPTOC-suojauksen voidaan olettaa olevan riittävän tarkka, jotta maasulkuvikakohteisiin muodostuvia vaarajännitteitä voidaan hallita perinteistä maasulkusuojauksta paremmin. Kuviossa 21 on esitetty IFPTOC-suojan vikavirtaestimaatti ja kuviossa 22 vikavirtaestimaatin perusteella estimoidun kosketusjänniteperustaisen suojan toimintaperiaate.



Kuvio 21. Testin 38 aikainen IFPTOC-suojan vikavirtaestimaatti (Wahlroos 2023, muokattu)

Kuvioon 21 on merkitty vikavirtaestimaatin perustajuinen vikavirtaestimaatti punaisella yhtenäisellä viivalla, tehollisarvoinen virtaestimaatti punaisella katkoviivalla ja vikavastus kompensoitu virtaestimaatti sinisellä yhtenäisellä viivalla. Edellä mainitusta kuviosta nähdään

myös, että vian alussa esiintyy noin 350 A:n virtatransienttipiikki, joka vaimenee nopeasti, ja vikavirta vakioituu. Molemmat perustaajiset virtaestimaatit ovat samansuuruisia, sillä kyseinen vika oli suora vikavastukseton maasulku. Tehollisarvoinen vikavirtaestimaatti puolestaan on hieman perustaajista virtaestimaattia suurempi, joten vikavirrassa esiintyi yliaaltoja.

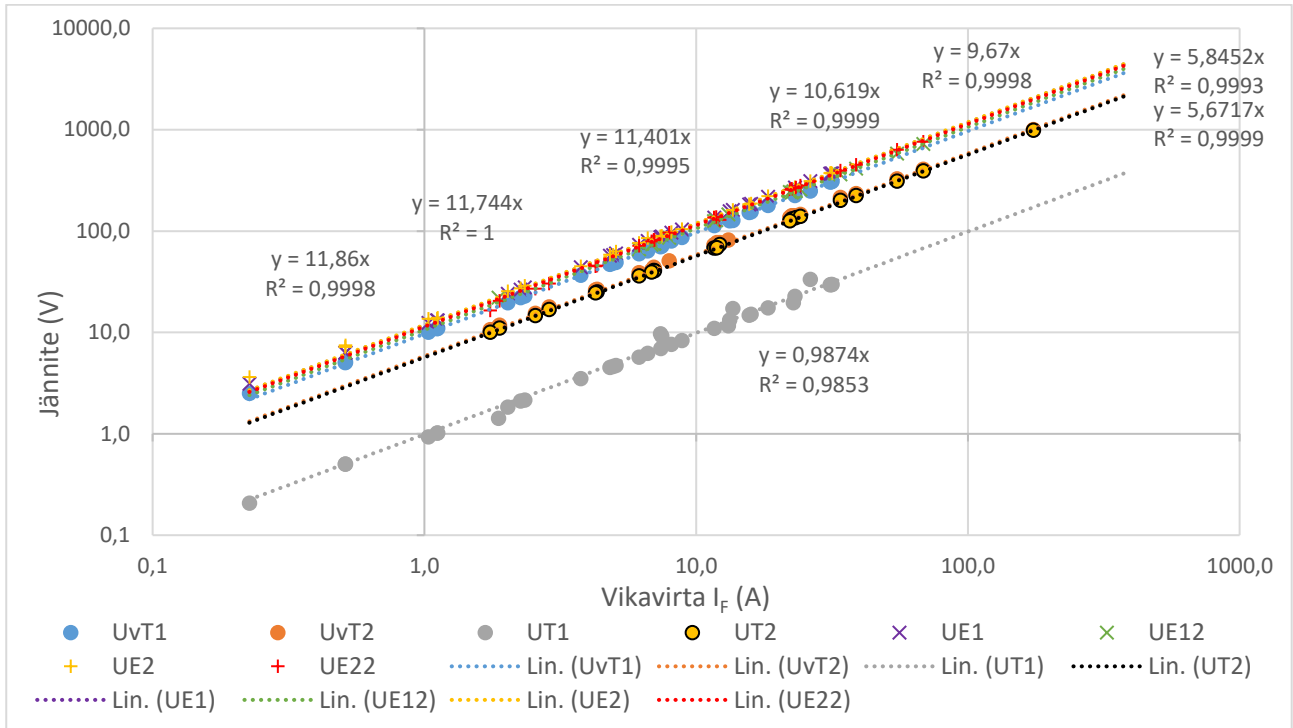


Kuvio 22. IFPTOC-suojan kosketusjännite-estimaatin mukainen toiminta testissä 38 (Wahlroos 2023, muokattu)

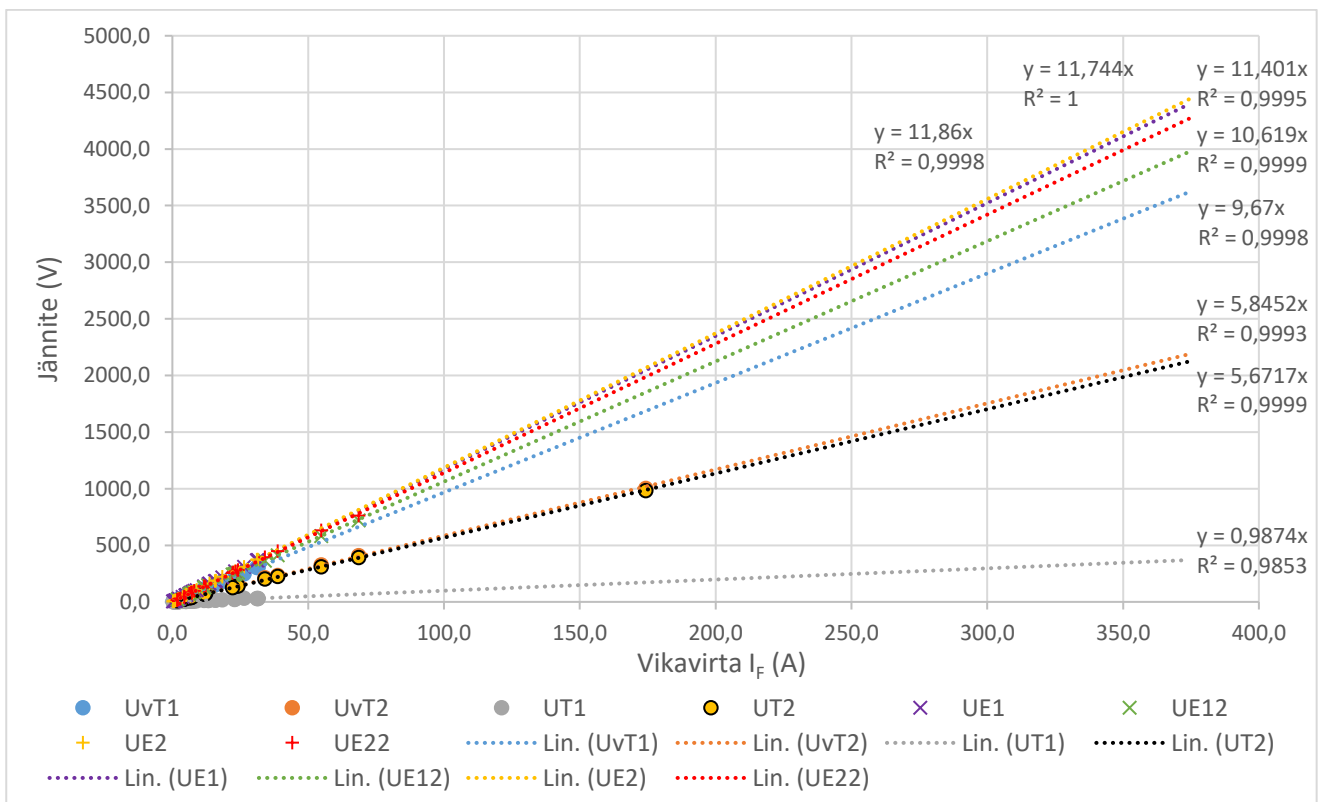
Kuviossa 22 on esitetty vikavirtaestimaatin perusteella estimoidut kosketusjännitekäyrät ja IFPTOC-suojan toimintarajat. Kukkumäen sähköaseman IFPTOC-suojien kosketusjänniteperustainen suojaus on aseteltu $0,8U_{Tp}$ -käyrän mukaisesti, joten vikavirtaestimaatin perusteella estimoidun kosketusjännitteen suuruus vaikuttaa maasulkuvian poiskytkentäaikaan. Suojauksen pienimmäksi toiminta-ajaksi on aseteltu 50 millisekuntia, jotta maasulun alkutransientti ehtii vaimentua aiheuttamatta välitöntä laukaisua. IFPTOC-suojalle on myös aseteltu 0,7 sekunnin maksimitoiminta-aika, jonka perusteella maasulkuvika kytketään viimeistään pois, vaikkei kosketusjännite-estimaatti nousisikaan $0,8U_{Tp}$ -käyrän laukaisurajan ylitse. Kuvion 22 mukainen esimerkki on kloonireleestä, jossa IFPTOC-suojan laukaisusignaali ei aiheuta vikalähdön katkaisijan avautumista. Tästä kuvioista nähdään, että testin 38 mukainen maasulkuvika olisi kytketty normaalisti eroon noin 0,6 sekunnin kohdalla. Maasulkukokeiden ajaksi tuotantokäytössä olevien suojareleiden toiminta-aikoja oli kuitenkin muutettu, jotta testikohteessa sijaitseva vikakärri ehtii kytkemään vian eroon ennen sähköaseman suojareleen toimintaa. Sähköaseman releen toiminta-ajaksi säädettiin 1,4 sekuntia ja vikakärryn toiminta-ajaksi 1 sekunti. Kuvioista 22 nähdään myös, että mikäli IFPTOC-suojassa ei olisi harmonisten yliaaltojen laskentaa käytössä, niin perustaajuisen (50 Hz) kosketusjännite-estimaatin suuruus ei olisi ylittänyt $0,8U_{Tp}$ -käyrän raja-arvoa. Tällöin maasulkuvian poiskytkentäaika olisi ollut maksimitoiminta-ajan mukainen. Kukkumäen sähköaseman REX640-releiden IFPTOC-suojien toiminta todettiin maasulkutestien perusteella olevan hyvällä tasolla.

5.2 Vikavirran vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen

Edellisessä kappaleessa todettiin, että vikavirran mukaan säätyvä, kosketusjännite-estimaattiin perustuva IFPTOC-suojaus toimii luotettavasti erilaisilla vikavirroilla. Vikavirran suuruudella on kuitenkin merkitys vaarajännitteiden syntymiselle. Kukkumäen maasulkukokeiden aikana suoritettiin 63 testiä, joissa testimuuntamo oli kytketty $11,5 \Omega$:n erillismaadoitukseen. Näistä kuudessa testissä oli vikatyypinä katkeileva maasulku, mutta loput testit olivat pysyviä maasulkuja, joissa vikavirta vaihteli $0,2$ – 174 A :n välillä. Erillismaadoituksilla kaikki vikavirta menee muuntamon maadoitusten kautta maahan ja näin ollen aiheuttaa muuntopiiriin kytkettyjen maadoitusten ympäristössä maan potentiaalın nousun. Tämän potentiaalın nousu todettiin Kukkumäen maasulkukokeiden aikana testimuuntamon maadoitus- ja kosketusjännitemittausten avulla. Mittaustulokset olivat valideja 58 testissä, joten vain näiden testien tuloksia on käsitelty tässä opinnäytetyössä. Maasulkukokeiden aikaisten pysyvien vikavirtojen aiheuttamat kosketus- ja maadoitusjännitteet on esitetty kuviossa 23 ja kuviossa 24.



Kuvio 23. Maadoitus- ja kosketusjännitteiden suhde vikavirtaan, muuntamolla 11,5 Ω :n erillismaadoitus (logaritminen)



Kuvio 24. Maadoitus- ja kosketusjännitteiden suhde vikavirtaan, muuntamolla 11,5 Ω :n erillismaadoitus (lineaarinen)

Kuvioissa 23 ja 24 on esitetty maadoitus- ja kosketusjännitteille useammat erilaiset käyrät, sillä jännitemittauspiirejä kuormitettiin 13,8 k Ω :n vastuksella jännitejakopiirin vuoksi testistä 38 lähtien. Myös kuormitetulle kosketusjännitteelle on esitetty kaksi eri käyrää, sillä testistä 46 lähtien kehoa simuloiva vastus oli kytketty laajempaan maadoitusverkkoon yhteydessä olevaan referenssipisteeseen, eli referenssijännitteenä oli maadoitusjännite U_{E2} . Tällöin kosketusjännitepiirissä ei ole kehoa simuloivaa noin 1 k Ω :n vastusta mukana, vaan pelkästään jännitejakopiirin vastukset toimivat kehoa ja mahdollisia lisäresistansseja simuloivana resistanssina. Täten myös kosketusjännite U_{T2} vastaa prospektiivista U_{VT2} -jännitettä. Tämä on havaittavissa myös mittaustulosten perusteella, sillä U_{VT2} - ja U_{T2} -jännitteet ovat lähes yhtenevät.

Mikäli kuormitettu kosketusjännitepiiri puolestaan muodostuu laajempaan maadoitusverkkoon yhdistyvän maadoituksen ja testikohteen maadoitusten välille, niin kosketusjännite on maadoitusjännitteen U_{E2} suuruinen. Tällöin maaperän eristävä vaikutus häviää, ja koko maadoitusjännitteen arvo vaikuttaa kehoa simuloivan vastuksen yli. Myös tämä tapaus on huomioitava vaarajännitteitä arvioitaessa, sillä jännite-eroja voi muodostua muiden johtavien järjestelmien kautta eri maadoitusjärjestelmien välille. Kukkumäen maasulkutestien aikaisten maadoitus- ja kosketusjännitemittausten perusteella muodostettujen regressiofunktioiden kuvaajien selitysasteita sekä niiden kulmakertoimia ja kulmakertoimien välisiä suhteita on kuvattu taulukossa 3.

Taulukko 3. Maadoitus- ja kosketusjännitteiden regressiofunktioiden kulmakertoimet ja niiden väliset suhteet sekä regressiofunktioiden selitysaste

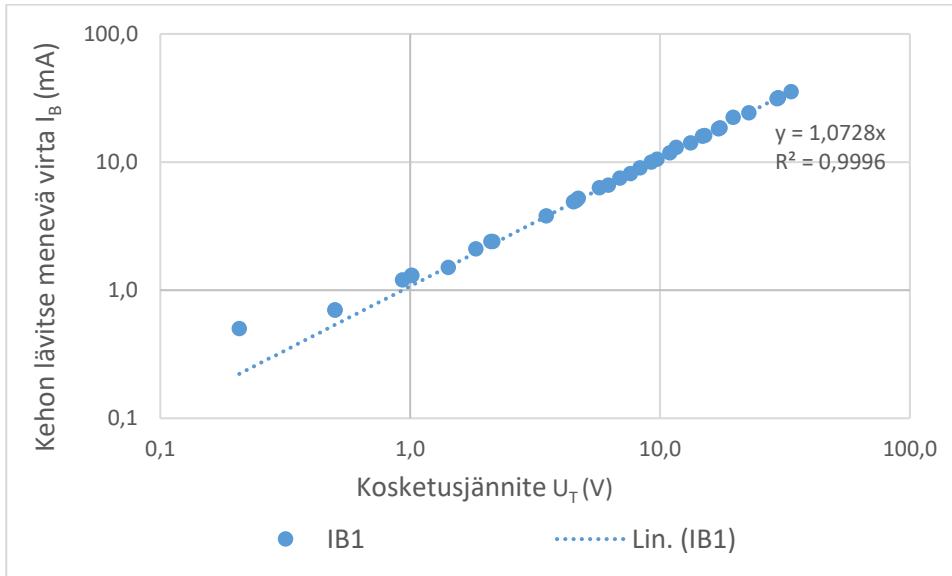
Jännite	β_1	β_2	$\beta_1 - \beta_2$	$(\beta_1 - \beta_2) / \beta_1$	β_2 / β_1	$(\beta_1 - \beta_2) / \beta_2$	R^2
$U_{E2} (\beta_1), U_{E22} (\beta_2)$	11,86	11,40	0,46	4 %	96 %	4 %	≈ 1
$U_{E1} (\beta_1), U_{E12} (\beta_2)$	11,74	10,62	1,12	10 %	90 %	11 %	≈ 1
$U_{E2} (\beta_1), U_{E1} (\beta_2)$	11,86	11,74	0,12	1 %	99 %	1 %	≈ 1
$U_{E22} (\beta_1), U_{E12} (\beta_2)$	11,40	10,60	0,80	7 %	93 %	8 %	≈ 1
$U_{VT1} (\beta_1), U_{VT2} (\beta_2)$	9,67	5,85	3,82	40 %	60 %	65 %	≈ 1
$U_{T2} (\beta_1), U_{T1} (\beta_2)$	5,67	0,99	4,68	83 %	17 %	473 %	≈ 1
$U_{E2} (\beta_1), U_{VT1} (\beta_2)$	11,86	9,67	2,19	18 %	82 %	23 %	≈ 1
$U_{E2} (\beta_1), U_{T1} (\beta_2)$	11,86	0,99	10,87	92 %	8 %	1098 %	≈ 1
$U_{E2} (\beta_1), U_{T2} (\beta_2)$	11,86	5,67	6,19	52 %	48 %	109 %	≈ 1
$U_{VT2} (\beta_1), U_{T2} (\beta_2)$	5,85	5,67	0,18	3 %	97 %	3 %	≈ 1

Kuvioiden 23 ja 24 sekä taulukon 3 tietojen perusteella voidaan todeta, että jännitejakopiirien kuormituksen vaikutus mittaustuloksiin on havaittavissa Kinkomaan referenssimaan maadoitusjännitteen U_{E1} ja U_{E12} sekä laajemman maadoitusjärjestelmän referenssijännitteen U_{E2} ja U_{E22} mittaustuloksista. Maadoitusjännitteen U_{E2} mittaustulokset olivat noin 4 %:a pienempiä jännitejakopiirin käyttöönoton jälkeen. Kinkomaan referenssimaan maadoitusjännitteen U_{E1} mittaustuloksia jännitejakopiiri puolestaan pienensi 10 %:a. Ilman jännitejakopiiriä mitatut eri referenssimaiden tulokset poikkesivat toisistaan vain noin 1 %:n, mutta jännitejakopiirin käyttöönoton jälkeen eri referenssimaiden väliset mittaustulokset poikkesivat toisistaan 7–8 %:a. Kosketusjännitemittauksissa oli myös havaittavissa jännitejakovastusten vaikutus, sillä U_{VT2} -jännitteen mittaustulokset olivat 40 %:a pienemmät kuin U_{VT1} -jännitteen mittaustulokset. Vastaavasti prospektiivinen kosketusjännite U_{VT2} poikkesi kosketusjännitteestä U_{T2} vain 3 %:a. Edellä mainittujen seikkojen vuoksi prospektiivisen kosketusjännitteen U_{VT1} ja U_{VT2} sekä kuormitetun kosketusjännitteen U_{T1} ja U_{T2} mittaustulosten perusteella laadittujen regressiofunktioiden kulmakertoimet poikkeavat toisistaan huomattavasti.

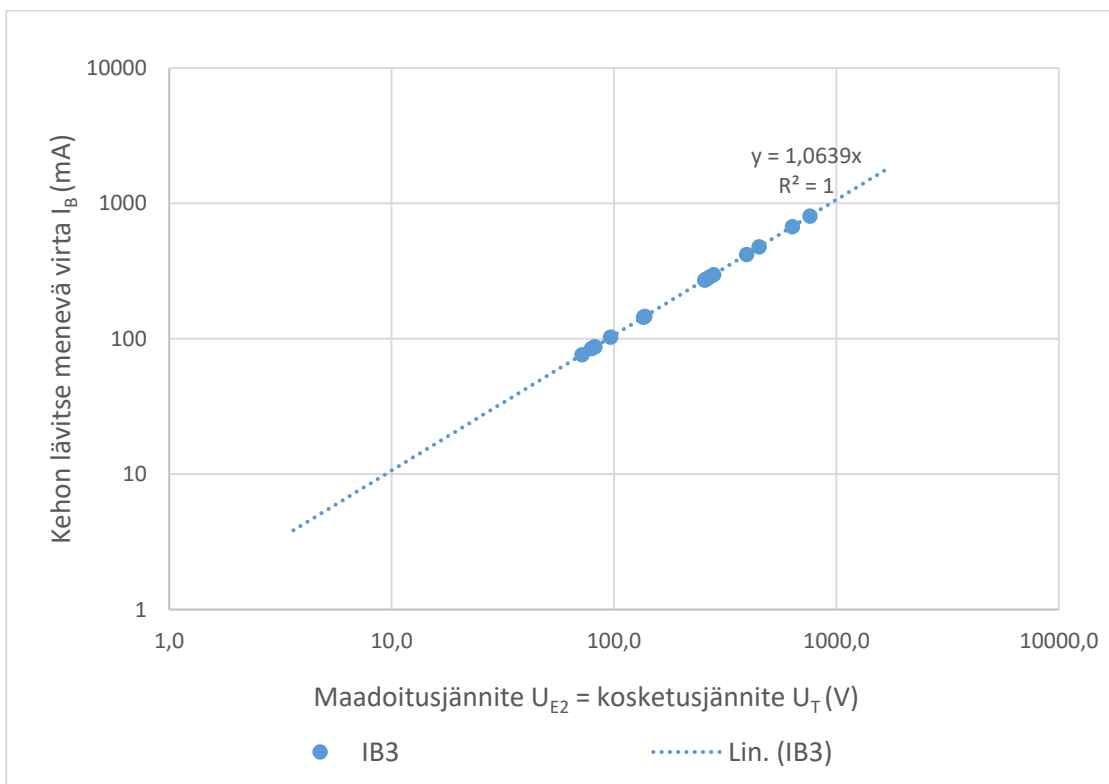
Mittaustulosten perusteella voidaan myös todeta, että maadoitusjännitteet ovat lähes samansuuruisia, mutta U_{E2} on hieman maadoitusjännitettä U_{E1} suurempi. Tämä oli kuitenkin odotettua, sillä laajempaan maadoitusjärjestelmään yhteydessä oleva referenssipiste saavuttaa neutraalimaan potentiaalin yksittäistä maadoitusjännitemittauselektrodia paremmin. Prospektiivinen kosketusjännite U_{VT1} puolestaan on noin 18 %:a maadoitusjännitettä U_{E2} pienempi. Kuormitetun eli efektiivisen kosketusjännitteen suuruus on riippuvainen virtapiiriin kytkeytyvistä impedansseista, joten Kukkumäen maasulkutesteissä saatiin mitattua kolmen erilaisen efektiivisen kosketusjännitepiirin tulokset. Kosketusjännite U_{T2} oli noin puolet maadoitusjännitteestä U_{E2} , ja kosketusjännite U_{T1} oli vain kymmenesosan maadoitusjännitteestä U_{E2} , mutta yhtäältä kosketusjännite oli tietyissä mittauksissa myös maadoitusjännitteen U_{E2} suuruinen. Mittaustulokset myös osoittivat, että vikavirran aiheuttama kosketusjänniteriski on riippuvainen referenssipisteen sijainnista.

Maadoitus- ja kosketusjännitemittausten perusteella voidaan todeta, että vaarajännitteiden suuruus on riippuvainen maasulun aikaisen vikavirran suuruudesta. Mikäli henkilö altistuu maasulkuvian aikana vaarajännitteille, niin sähköiskun vaarallisuus on riippuvainen vaarajännitteen suuruudesta. Vaarajännitteen noustessa kasvaa myös virtapiiriin joutuneen henkilön kehon lävitse

menevän virran osuus. Mitä suurempi on kehon lävitse menevä virta, niin sitä suurempi on henkilövahinkojen riski. Kukkumäen maasulkutestien yhteydessä vikakohteessa mitatut kosketusjännitepiirien vastusten lävitse menevät virrat on esitetty kuvioissa 25 ja 26.



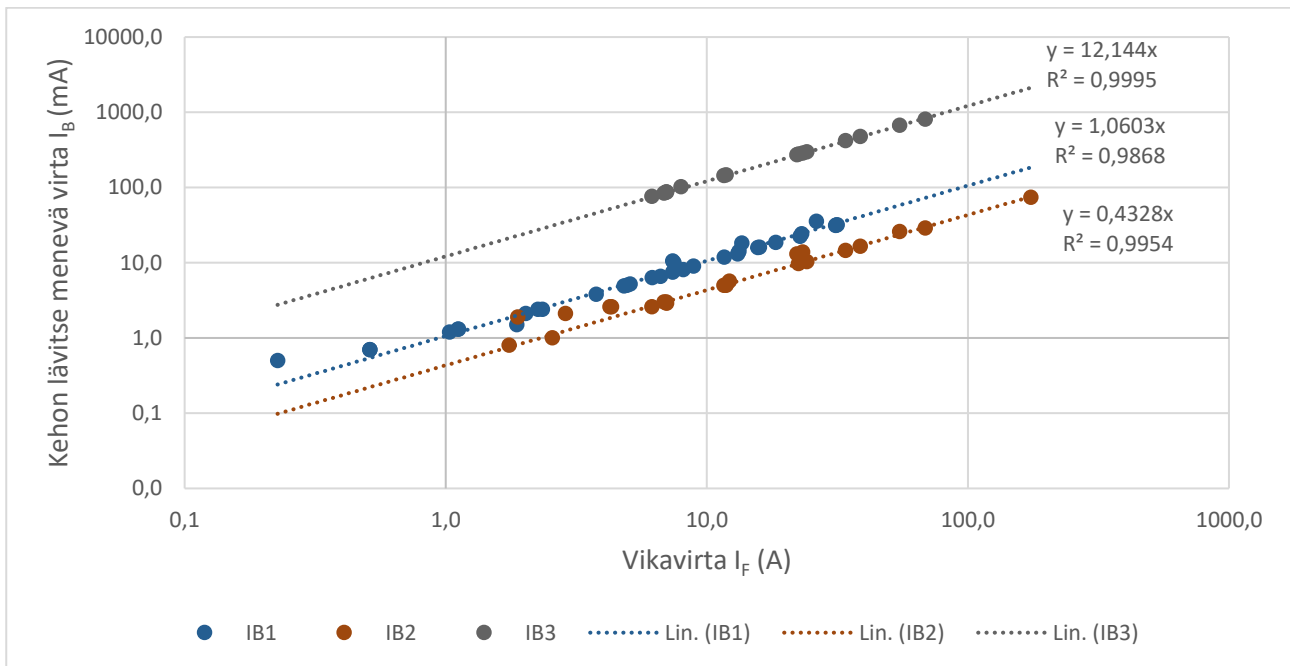
Kuvio 25. Kosketusjännitteen aiheuttama kehon lävitse menevä virta, muuntamalla 11,5 Ω :n erillismaadoitus



Kuvio 26. Siirtyvän potentiaalin aiheuttama kehon lävitse menevä virta, muuntamalla 11,5 Ω :n erillismaadoitus

Kuviossa 25 on esitetty SFS 6001-standardin mukaisten kosketusjännitemittausjärjestelyiden avulla mitatut kuormitetun kosketusjännitepiirin lävitse menevät virrat. Kyseisten mittausten virtoja on kuvattu selitteellä I_{B1} . Kuviossa 26 puolestaan on esitetty kosketusjännitepiirin lävitse menevät virrat I_{B3} , kun vastuksen ylitse vaikuttaa siirtyvän potentiaalin kautta tuleva maadoitusjännite. Tulosten perusteella voidaan todeta, että ihmisen kehon lävitse menevän vikavirran I_B suuruus kasvaa lineaarisesti kosketusjännitteen suhteessa noin 1,1 kulmakertoimella. Eli 10 V:n kosketusjännite aiheuttaa noin 11 mA:n virran kehoa simuloivan vastuksen lävitse. Vastaavasti 1000 V:n kosketusjännite aikaansaa saman vastuksen lävitse noin 1,1 A:n virran.

Kukkumäen maasulkutestien vikapaikalla ihmiskehoa simuloivan vastuksen arvo oli 938 Ω , joten kuormitetun kosketusjännitepiirin lävitse menevä virta muuttuu kosketusjännitteen ja vastuksen suhteen Ohmin lain mukaisesti. Suuret yli ihmisen sietorajan ylittävät kosketusjännitteet aiheuttavat täten henkeä ja terveyttä uhkaavan riskin, mikäli henkilö joutuu maasulkutilanteessa kosketusjännitevirtapiirin osaksi. Vikapaikan mittaustuloksista oli havaittavassa myös kuvion 27 mukainen I_{B2} , jonka arvot poikkesivat normaalin I_B -mittauksen tuloksista. Tämän kyseisen I_{B2} -mittauksen mittausjärjestelyt jäivät aluksi epäselviksi, mutta laskemalla virtapiirin resistanssi Ohmin lain perusteella virran ja jännitteen avulla, niin tulokseksi saatiin 13,6 k Ω . Täten voidaan todeta, että I_{B2} -virtamittauksen mittausjärjestelyt vastasivat tilannetta, jossa kosketusjännite U_{T2} vaikuttaa jännitejakopiirin vastusten ylitse. Näin ollen saatiin mitattua myös suuriohmisen virtapiirin lävitse meneviä virtoja. Tällainen suuriohmisen virtapiiri voi muodostua, kun ihminen joutuu kosketusjännitteelle alttiiksi, ja kehon resistanssin lisäksi virtapiiriin tulevat mukaan myös maaperän ja jalkineiden lisäresistanssit.



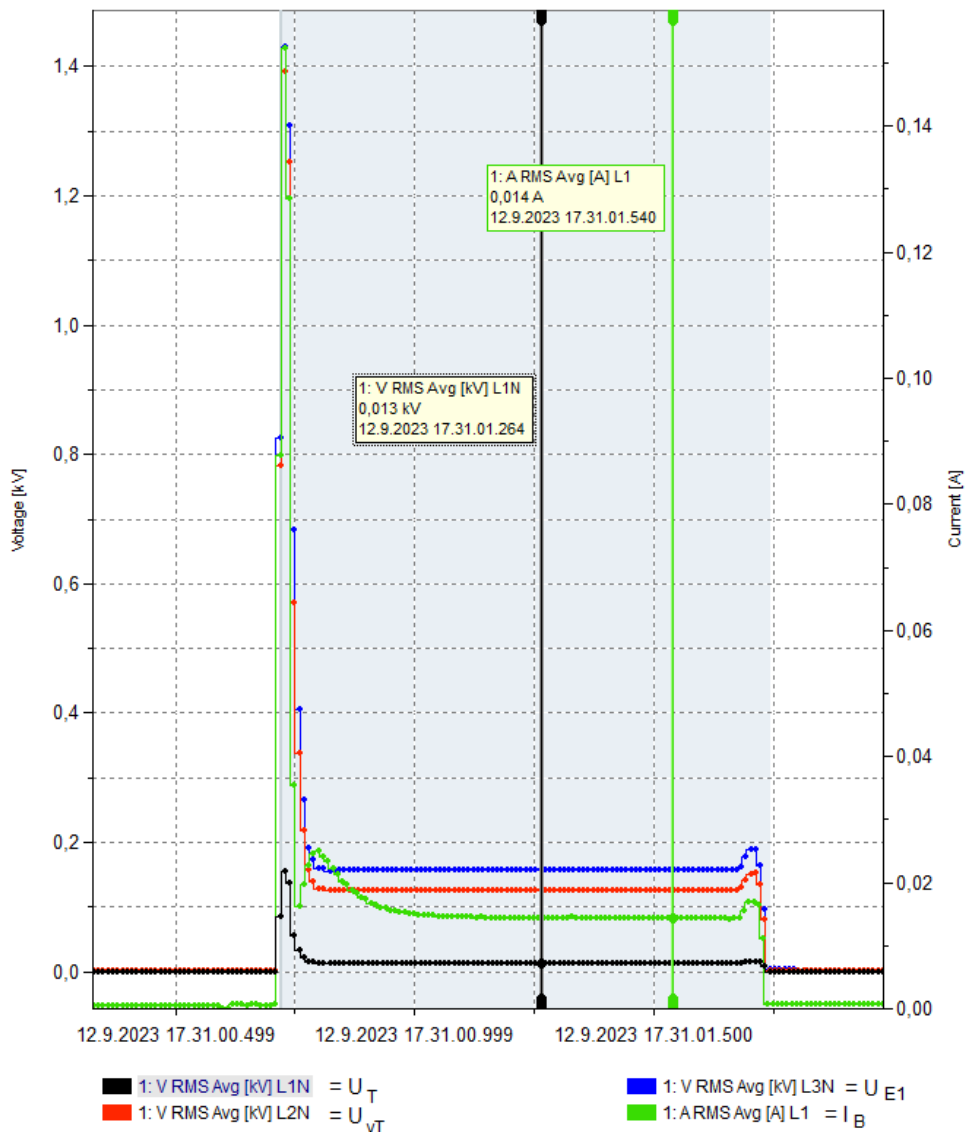
Kuvio 27. Eri kosketusjännitepiirien lävitse menevät virrat vikavirran I_F suhteessa, muuntamalla 11,5 Ω :n erillismaadoitus

Kuvion 27 mukaisista tuloksista voidaan päätellä, että mikäli henkilö joutuu virtapiirin osaksi, niin virtapiirin kokonaisimpedanssilla on vaikutusta virtapiiriin lävitse menevän virran suuruuteen. Virtakäyrän I_{B1} mukaiset mittaustulokset kuvaavat tilannetta, jossa henkilö altistuu vaarajännitteelle, mutta maaperän eristävä vaikutus tuo virtapiiriin lisäresistanssin. Tämän vuoksi kehoa simuloivan vastuksen yli vaikuttava kosketusjännite pienenee, ja näin ollen vastuksen lävitse menevä virta myös pienenee. Kukkumäen maasulkutestien tulosten perusteella voidaan todeta, että 11,5 Ω :n erillismaadoitetun muuntopiirin maasulkutilanteessa vikavirran ja kehoa simuloivan vastuksen lävitse menevän virran välinen suhde on 1/0,001 A, eli yhden ampeerin vikavirta aiheuttaa kosketusjännitepiiriin 1 mA:n virran.

Mikäli kosketusjännitepiiriin lisätään myös jalkineiden tai alustan eristävä vaikutus, niin saadaan virtakäyrän I_{B3} mukaisia mittaustuloksia. Tällöin kosketusjännitepiiriin lävitse menevät virrat ovat pieniä. Vikavirran ja virran I_{B2} suhteeksi saatiin 1/0,0004 A eli yhden ampeerin vikavirta aiheuttaa 0,4 mA:n virran kosketusjännitepiirissä. Toisaalta, jos lisäresistansseja ja maaperän eristävää vaikutusta ei voida huomioida, niin saadaan virtakäyrän I_{B3} mukaisia tuloksia. Tällöin vikavirran ja virran I_{B3} suhde on puolestaan 1/0,012 A, eli yhden ampeerin vikavirta aiheuttaa kosketusjännitepiiriin 12 mA:n virran. Tässä tapauksessa pienikin lisäys maasulun aikaisessa vikavirrassa lisää kosketusjännitepiiriin joutuneen henkilön riskiä saada henkeä ja terveyttä uhkaavia vaurioita. Esimerkiksi

muuntamossa kytkentää odottavassa maadoituksessa tai kaapelivaipan kosketussuojassa voi esiintyä maasulkutilanteissa hengenvaarallisia jännitteitä siirtyvien potentiaalien vuoksi. Nämä tilanteet on huomioitava verkonrakennustöiden yhteydessä.

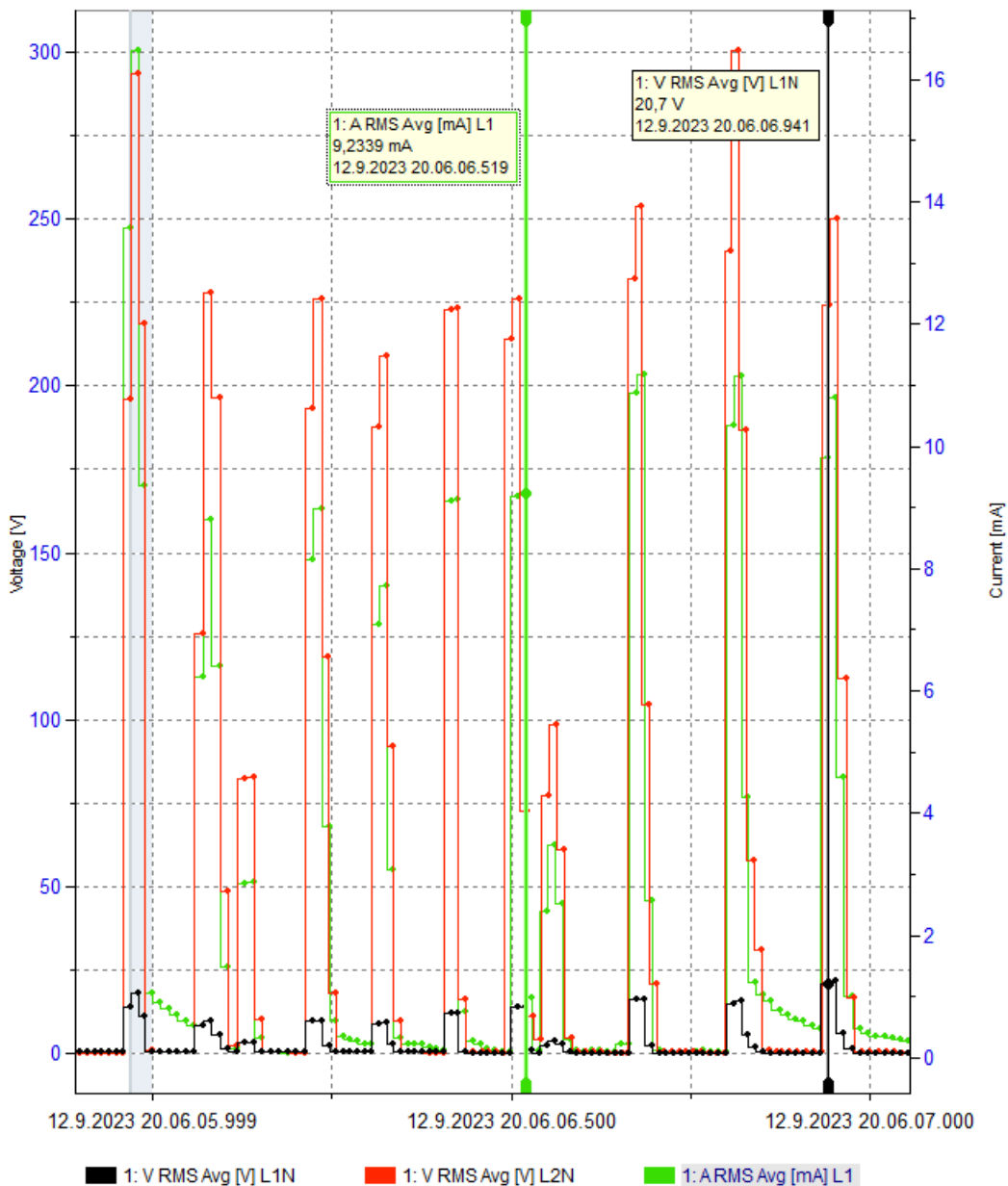
Kokeessa 37 tehtiin vikavastukseton eli jäykkä maasulku jakeluverkon ollessa normaalisti kompensoituna. Jäykät maasulut aiheuttavat vikavirtaan suuren alkutransientin, joka näkyy myös testikohteen vaarajännitemittauksissa. Alkutransientin aiheuttamat kosketus- ja maadoitusjännitteet saattavat nousta hetkellisesti jopa kilovolttien suuruiseksi, vaikka vian aikaiset jännitteet olisivatkin maltillisia. Alkutransienttien aiheuttamat suuret jännitteet rikkoivat testikohteen mittalaitteita ja ylijännitesuojia, joten jännitemittauspiireihin asennettiin jännitteenjakovastukset kokeesta 38 lähtien. Kaikkien jännitemittauspiirien jännitteenjako tehtiin kahden 6,9 k Ω :n tehovastuksen avulla, joten vastusten aiheuttama kuormitus on huomioitava kokeen 37 jälkeisissä mittaustuloksissa. Kuviossa 28 on esitetty kokeen 37 aikaisen maasulun aiheuttamat vaarajännitteet ja kehon läpi menevä vikavirta.



Kuvio 28. Vikavastuksettoman maasulun virtatransientin vaikutus vaarajännitteisiin ja kehon läpi menevään vikavirtaan

Kokeen 37 mittaustuloksista selviää, että jäykän maasulun aiheuttama vikavirraltaan 175 A:n alkutransientti saa aikaan hyvin suuria hetkellisiä vaarajännitteitä mittauskohteessa. Transientin aikaisen maadoitusjännitteen ja prospektiivisen kosketusjännitteen suuruus on 1,4 kV sekä kuormitetun kosketusjännitteen suuruus on 154 V ja ihmiskehon lävitse menevä vikavirta on 145 mA. Noin 50 ms:n kestävä alkutransientin jälkeen vaarajännitteet ja vikavirrat putoavat vakiotasolle. Tällöin maadoitusjännite on 157 V, prospektiivinen kosketusjännite 126 V, kuormitettu kosketusjännite 13 V ja kehon lävitse menevä vikavirta 14 mA. Mittaustuloksista on myös havaittavissa sammutuskelan lisävastuksen kytkeytymisestä johtuva kokonaisvikavirran lisääntyminen, joka aiheuttaa vian loppuvaiheessa havaittavan maadoitus- ja kosketusjännitteiden sekä kehon lävitse menevän virran kasvun.

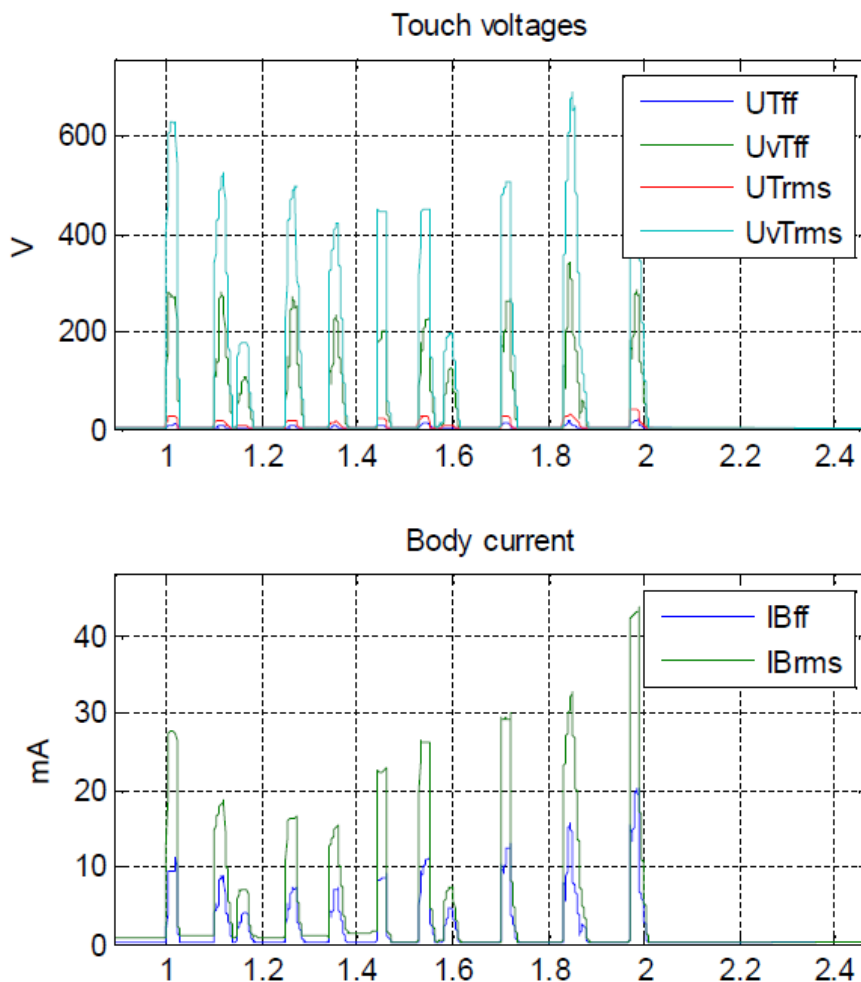
Myös katkeilevien maasulkujen aiheuttamat vaarajänniteriskit tulee ottaa huomioon. Kukkumäen maasulkukokeiden yhteydessä suoritettiin kuusi katkeilevan maasulun testiä, joiden maadoitus- ja kosketusjännitemittausten rekisteröinnissä oli ongelmia suurien virta- ja jännitetransienttien vuoksi. Testin 42 aikaisen katkeilevan maasulun aiheuttamat kosketusjännitteet ja kehon lävitse menevä virta on esitetty kuviossa 29.



Kuvio 29. Katkeilevan maasulun vaikutus kosketusjännitteisiin ja kehon lävitse menevään virtaan

Kuviossa 29 on esitetty sähkölaatuanalysoijan avulla mitatut kosketusjännitteet ja kehon lävitse menevä virta. Mustalla värillä on esitetty kuormitettu kosketusjännite U_T , punaisella prospek-

tiivinen kosketusjännite U_{VT} ja vihreällä 1 k Ω :n vastuksen lävitse menevä virta I_B . Kuvion 29 mukaiset kosketusjännitteet on kerrottava kahdella jännitejakopiirin vuoksi. Kuvio 29 nähdään, että prospektiivinen kosketusjännite nousee jopa 600 V:n suuruisiksi, mutta kuormitetun kosketusjännitepiirin jännite pysyy alle 50 V. Kehon lävitse menevä virta on puolestaan riippuvainen kosketusjännitteen suuruudesta, kehon kokonaisimpedanssista ja mahdollisista lisäresistansseista. Esimerkin mukaisen kosketusjännitepiirin kokonaisvastus oli 938 Ω , mutta kosketusjännitepiirin lävitse menevät I_B -virtapiikit olivat suuruudeltaan vain 3–16 mA. Laskennallisesti virtapiikkien olisi pitänyt olla 20–45 mA. ABB Oy:n mittaustulokset (ks. kuvio 30) olivat yhteneviä testin 42 aikaisten kosketusjännitemittauksen osalta, ja myös I_B -mittaukset olivat teorian mukaiset. Alvan mittalaite ei todennäköisesti kyennyt rekisteröimään katkeilevan maasulun aikaisia hyvin lyhyitä virtapulseja oikein, sillä pysyvien vikojen aikaiset I_B -virtamittaukset olivat yhtenevät ABB Oy:n mittaustulosten kanssa.



Kuvio 30. ABB Oy:n mittaustulokset testin 42 kosketusjännite- ja virtamittausten osalta (Altonen 2024, muokattu)

Kuvion 30 mukaisissa ABB Oy:n mittaustuloksissa on esitetty sekä perustaajuiset että tehollisarvoiset jännite- ja virtamittaukset. Perustaajuinen kosketusjännite U_{Tff} on merkitty sinisellä käyrällä ja perustaajuinen prospektiivinen kosketusjännite U_{vTff} on merkitty vihreällä käyrällä. Tehollisarvoinen kosketusjännite U_{Trms} on merkitty punaisella käyrällä ja tehollisarvoinen prospektiivinen kosketusjännite U_{vTrms} on kuvattu turkoosilla käyrällä. Lisäksi kehon lävitse menevä perustaajuinen virta I_{Bff} on merkitty sinisellä käyrällä ja tehollisarvoinen virta I_{Brms} vihreällä käyrällä.

Kukkumäen maasulkutestien perusteella verkon kuormitustilanteella ei havaittu olevan vaikutusta kosketusjänniteriskin muodostumiseen, sillä tehollisarvoisen ja perustaajuisen vikavirran erotus oli lähes sama niin kuormitetuissa kuin kuormattomissakin testeissä (ks. liite 4). Tulosten perusteella voidaan todeta, että vikatyypillä on merkittävä vaikutus vikavirran sisältämien yliaaltojen muodostumisessa. Kukkumäen maasulkutestien yhteydessä yliaaltoja esiintyi vain suorien vikavastuksettomien maasulkujen yhteydessä. Jopa pieni 150 Ω :n vikavastus estää yliaaltojen muodostumisen vikavirtaan.

5.3 Maadoitusolosuhteiden vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen

Jakeluverkkojen maadoitusolosuhteilla on suuri vaikutus maasulkuvikojen aikaisten vaarajännitteiden muodostumiseen, joten Kukkumäen maasulkutestien aikana simuloitiin myös eri maadoitusolosuhteiden vaikutusta vaarajännitteiden muodostumisessa. Suurin osa maasulkutesteistä ja vaarajännitemittauksista suoritettiin testimuuntamon ollessa kytkettynä 11,5 Ω :n erillismaadoitukseen, mutta testeissä 5–10 simuloitiin eri maadoitusolosuhteiden vaikutusta vaarajännitteiden muodostumiseen. Osa testien aikaisista mittauksista rekisteröityi virheellisesti transienttiylijännitteiden vuoksi, joten virheelliset tulokset on poistettu mittaustuloksista. Taulukossa 4 on esitetty vikatilanteita, jotka havainnollistavat vikavirran ja maadoitusolosuhteiden vaikutusta maadoitus- ja kosketusjännitteisiin sekä ihmiskehon lävitse menevän virran muodostumiseen.

Taulukko 4. Eri maadoitustapojen vaikutus maadoitus- ja kosketusjännitteiden sekä kehon lävitse menevän vikavirran muodostumiseen

Testi nro.	I_F (A)	U_{VT} (V)	U_T (V)	U_{E1} (V)	U_{E2} (V)	I_B (mA)	Maadoitus
5	27,4	15,3	2,0	12,5	6,9	2,1	11,5 Ω + vaipat
7	6,5	8,6	1,1	5,7	1,8	1,1	11,5 Ω + vaipat
8	6,6	9,0	1,1	6,0	0,0	1,2	11,5 Ω + keskusköysi + vaipat
9	6,3	166,9	21,0	188,8	194,1	22,3	31 Ω
10	6,4	334,3	42,4	368,9	374,2	45,4	60 Ω
11	6,6	63,8	6,2	79,6	84,9	6,6	11,5 Ω
34	31,6	307,2	29,7	368,3	369,6	31,8	11,5 Ω
68	174,2	1002,4	982,4	-	1669,4	74,0	11,5 Ω

Taulukossa 4 esitettyjen testien 5–7 aikana testimuuntamo oli kytkettynä 11,5 Ω :n erillismaadoituksen lisäksi galvaanisesti Kukkumäen sähköasemalle yhteydessä olevaan laajempaan maadoitusverkkoon keskijännitekaapelin vaippojen maadoitusten kautta. Testissä 8 kaapelivaippojen maadoitusten rinnalle oli kytkettynä myös keskijännitekaapelin keskusköysi. Testien tulosten perusteella voidaan todeta, että mikäli vikaantunut muuntopiiri on yhdistynyt laajempaan maadoitusverkkoon kaapelivaippojen tai keskusköyden kautta, niin maadoitus- ja kosketusjännitteet pysyvät maltillisella tasolla. Maadoitusjännitteet ja prospektiiviset kosketusjännitteet nousivat testien 5–8 aikana vain 6–15 V:n suuruisiksi vikavirran ollessa 6–27 A. Kuormitetun kosketusjännitepiirin jännite puolestaan nousi vain 1–2 V:n suuruiseksi, joten myös ihmiskehoa simuloivan vastuksen lävitse menevä vikavirta oli vain 1–2 mA.

Mikäli vikaantunut muuntopiiri on puolestaan erillisen maadoituselektrodin kautta maadoitettu, niin maadoitus- ja kosketusjännitteet kasvavat vikavirran ja muuntopiirin maadoitusresistanssin kasvaessa. Huonoilla maadoitusolosuhteilla, eli muuntopiirin maadoitusimpedanssin ollessa 60 Ω , vaarajänniteriski kasvaa huomattavasti, vaikka vikavirta pysyy pienenä. Maadoitusolosuhteen vaikutusta vaarajännitteiden muodostumiseen kuvaa hyvin testin 10 mittaustulokset, joiden mukaan maadoitusjännitteet olivat noin 370 V, ja prospektiivinen kosketusjännite oli 334 V. Kuormitettu kosketusjännite oli 42 V, ja kosketusjännitepiirin lävitse menevä virta oli 45 mA.

Myös paremman maadoitusimpedanssin omaavassa erillisessä maadoitusjärjestelmässä voi esiintyä suuria vaarajännitteitä, jos vikavirta on riittävän suuri. Tämä on havainnollistettu testissä 68, jossa 11,5 Ω :n erillismaadoituksen omaavan muuntopiirin maadoitus- ja kosketusjännitteet nouse-

vat maasulkutilanteessa 1–1,7 kV:n suuruisiksi vikavirran ollessa 174 A. Todellisuudessa maadoitusjännite U_{E2} nousi testin 68 aikana jopa 2 kV:n suuruisiksi, sillä mittaustuloksissa näkyy jännitteen leikkaantuminen ylijännitesuojien toiminnan seurauksena. Testissä 68 simuloitiin keskitetyn kompensoinnin vikatilannetta, jossa sammutuskelan ohjain on ajanut kelan ääriasentoon, eli sähkönjakeluverkon maasulkuvirran kompensointi oli 200 A:n ylikompensointitilanteessa.

6 Pohdinta

6.1 Tutkimustulosten tarkastelu

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan tutkimustuloksia useasta eri näkökulmasta. Maasulkuvikojen aiheuttamia vaarajänniteriskejä tarkastellaan jakeluverkon rakenteen, maadoitusolosuhteiden sekä erilaisten vika- ja käyttötilanteiden pohjalta. Saatuja tutkimustuloksia peilataan alaan liittyvään teoria- ja tutkimustietoon. Lopuksi esitetään suosituksia, joiden mukaisesti sähkönjakeluverkkojen suojaus on mahdollista toteuttaa siten, että maasulkuvikojen aikaiset vaarajänniteriskit ovat minimoitu.

6.1.1 Jakeluverkon rakenteen vaikutus vaarajännitteisiin

Kukkumäen maasulkutestien aikana varioitiin erilaisia jakeluverkon konfiguraatioita ja testimuuntamon maadoitustapaa. Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että jakeluverkon rakenteella ja maadoitusolosuhteilla on suuri vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen. Erityisesti maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa jakeluverkon rakennustapa. Ilmajohtoverkon tuottama maasulkuvirta on samanpituisen kaapeliverkkoon suhteutettuna huomattavasti pienempi (Lakervi & Partanen 2009, 186), joten maasulkuvirran suuruus on riippuvainen sähköaseman päämuuntajan perään kytkettyjen kaapeli- ja ilmajohtoverkkojen määrästä. Kaapeliverkon maasulkuvirran suuruuteen vaikuttaa verkoston pituuden lisäksi myös maakaapelin tyyppi ja poikkipinta (Lakervi & Partanen 2009, 186; vrt. Nikander & Mäkinen 2017, 9). Kukkumäen maasulkutestien aikana ei tutkittu ilmajohto- ja maakaapeliverkon tuottamaa maasulkuvirtaa, mutta erilaisten verkkokonfiguraatioiden vaikutus vikavirtaan oli havaittavissa mittaustuloksista (ks. kuvio 19).

Yhtäältä maasulkuvirtojen suuruuteen vaikuttaa myös sähkönjakeluverkon tähtipisteen maadoitustapa (Elovaara & Haarla 2011a, 210; Lakervi & Partanen 2008, 182, 184). Kukkumäen maasulku-

testit suoritettiin sammutetussa verkossa, joten mittaustuloksista ei ole havaittavissa eri tähtipisteen maadoitustapojen vaikutusta vaarajännitteiden syntymiseen. Vikakohteen maadoitusimpedanssilla on kuitenkin merkitystä vaarajännitteiden syntymiseen. Mitä suurempi on kohteen maadoitusimpedanssi, niin sitä suurempia ovat myös vikavirran aiheuttamat vaarajännitteet. (SFS 6001:2018, 94.) Reduktion vaikutus on myös otettava huomioon, sillä vain osa vikavirrasta on vaarajännitteitä aiheuttavaa maavirtaa, mikäli vikavirralla on useampia kulkuteitä esimerkiksi maakaapelien metallivaippojen kautta (SFS 6001:2018, 90, 119). Maadoitusolosuhteiden ja reduktion vaikutus on havaittavissa taulukon 4 mittaustulosten perusteella.

Sammutuskuristimen rinnalle on yleensä lisätty automaattisesti kytkeytyvä vastus, jonka tehtävänä on kasvattaa maasulkuvirran pätökomponenttia, jotta perinteiset suojareleet voivat tunnistaa vian paremmin (Mörsky 1993, 337). Myös Kukkumäen maasulkutestien yhteydessä todettiin sammutuskuristimen lisävastuksen kytkeytymisestä johtuva resistiivisen vikavirran lisääntyminen (ks. liite 3). Lisävastuksen avulla varmennetaan suojauksen toiminta, mikäli sähkönjakeluverkon vaimennus ei ole riittävä, eli verkoston tuottama vikavirran pätökomponentti on pieni. Lisävastuksella ei kuitenkaan ole tarvetta kasvattaa vikavirtaa, mikäli verkoston vaimennus on riittävällä tasolla. Tämä tulee varmistaa käytetyn suojan ominaisuuksien ja asettelujen perusteella. Yleisenä suosituksena on varmistaa, että kompensoidun verkon suojauksen tarvitsema pätökomponentti on olemassa riippumatta verkon kytkentätilanteesta. Alva Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkon sammutuskuristimien ohjauslogiikkaan on tehty muutoksia, joiden avulla turhia lisävastusten kytkeytymisiä pyritään välttämään.

Nikander ja Mäkinen (2017, 9) yhtäältä esittävät, että verkoston tuottaman resistiivisen virran osuutta voidaan pienentää käyttämällä hajautettua kompensointia kaapelilähdön varrella. Jakeluverkon verkkotopologialla on myös vaikutusta resistiivisen virran muodostumiseen, sillä runkojohdolla olevat haarat ja niiden pituudet sekä sijainnit vaikuttavat runkojohdolla kulkevaan varausvirtaan. Runkojohtojen varausvirrat puolestaan aiheuttavat kaapeleiden sarjaimpedanssien kautta häviöitä suhteessa nollajännitteeseen, joten nämä häviöt näkyvät verkoston tuottamana resistiivisenä virtana. (Mts. 8–9.) Kaupunkiympäristössä ei ole järkevää käyttää hajautettua kompensointia, sillä keskitetyn kompensoinnin avulla saadaan hajautettua kompensointia tarkempi säätö aikaiseksi. Lisäksi kaupunkialueiden sähköverkkojen johtolähdöt ovat yleensä lyhyitä, haarautuvia, silmukoituja ja tiheästi maadoitettuja, joten johtojen tuottama resistiivisen virran osuus on

yleensä maltillinen. Myös jokaisen verkkoon kytketyn sammutuskuristimen häviöistä muodostuu vikavirtaan pätkökomponenttia (Lakervi & Partanen 2008, 185), joten hajautettua kompensointia tulisi käyttää vain todellisen tarpeen mukaan pitkillä johtolähdöillä. Tällöinkin syöttävällä sähköasemalla tulisi olla lisäksi keskitetty kompensointilaitteisto, jotta verkostossa tapahtuviin muutoksiin on mahdollista reagoida nopeasti.

Maasulun aiheuttamat vaarajännitteet ovat riippuvaisia jakeluverkon nolapisteen maadoitustavasta (Elovaara & Haarla 2011a, 210–2012; Hartmann ym. 2019, 5–6; Lakervi & Partanen 2008, 182–190; Tarko ym. 2022, 15), vikakohteen maadoitusolosuhteista (Colella ym. 2016, 4590; Di Silvestre ym. 2016, 2, 4–5.) sekä jakeluverkkoon kytketyn verkoston tyypistä, määrästä ja verkkotopologiasta (Nikander & Mäkinen 2017, 2, 9–10, 29). Henkeä ja terveyttä uhkaavien vaarajännitteiden riski täten kasvaa suurilla vikavirroilla ja huonoilla maadoitusolosuhteilla. Kukkumäen maasulkutestien tutkimustulokset ovat yhtenevät edellä mainitun tutkimus- ja teorian kanssa. Kappaleessa 5.1 todettiin maasulun aikaisen vikavirran suuruuden olevan riippuvainen jakeluverkon vika-, kytkentä- tai käyttötilanteesta. Kappaleessa 5.2 puolestaan todettiin, että vikavirran suuruudella on vaikutusta maasulun aikaisten vaarajännitteiden syntymiseen ja sitä kautta kosketusjänniteriskin muodostumiseen. Mitä suurempi on kosketusjännite, niin sitä suurempi on kosketusjännitepiiriin joutuneen henkilön kehon lävitse menevä virta, ja näin ollen sitä suurempi on todennäköisyys saada henkeä ja terveyttä uhkaavia vaurioita. Täten on tärkeää, että keskijänniteverkkojen maasulut voidaan kytkeä eroon vikavirran mukaan säätyvän suojauksen avulla.

6.1.2 Jakeluverkon maadoitusjärjestelmän vaikutus vaarajännitteisiin

Vaikka suur- ja pienjännitteelle on omat standardinsa, niin silti myös pienjännitestandardin vaatimukset tulee ottaa huomioon, mikäli suur- ja pienjännitemaadoitukset on yhdistetty (Ylinen ym. 2019, 49). Jyväskylässä 110 kV:n sähköaseman suurjännitepuolen maasulkujen aikaiset vikavirrat ovat 3–4 kA:n luokkaa, joten myös suurjännitepuolen maasulkujen aiheuttamat vaarajännitteet tulee ottaa huomioon sähköasemien läheisyydessä olevien johtavien rakenteiden osalta. Riskinä on sähköasemaa ympäröivän maan potentiaalinen noususta johtuvat siirtyvät kosketusjännitteet, kuten Sa'ed ja muut (2017, 1) tuovat esille omassa tutkimuksessaan. Parise ja muut (2015, 5019) yhtäältä esittävät, että erillään olevat maadoitusjärjestelmät aiheuttavat maasulkuvikatilanteissa potentiaalieroja aktiivisten ja passiivisten maadoitusjärjestelmien välille. Kaikkien eri

maadoitusjärjestelmien yhdistäminen maanalaisilla maadoitusjohtimilla on tärkeää etenkin kaupunkiympäristössä, sillä erilliset maadoitusjärjestelmät aiheuttavat maasulkuvian aikana jyrkkiä potentiaalieroja maaperän potentiaalientään (Parise ym. 2015, 5019; Pons ym. 2015, 5244). Di Silvestre ja muut (2016, 1) puolestaan toteavat, että mitä pienempi on muuntamon maadoitusimpedanssi, tai mitä kauempana se on syöttävästä sähköasemasta, niin sitä pienempi on maan potentiaalinen nousu suurjännitepuolen vikatilanteessa. Suurjännitepuolen vikatilanteen aiheuttama vaarajänniteriski pienjännitepuolen verkoissa tulee kuitenkin ottaa huomioon.

Keskijännitekaapeleiden vaippojen kautta saadaan kytkettyä yhteen erillisiä maadoitusjärjestelmiä, mutta tällöin maaperän potentiaalierot eivät tasaannu. Lisäksi kaapelivaippojen kosketussuojien pitkittäisimpedanssit kasvavat kaapelipituuden lisääntyessä. Edellä mainittujen syiden takia on muuntamoiden välisille keskijännitekaapelireiteille suositeltavaa asentaa erillinen maadoituselektrodi, joka on yhteydessä johtavaan maaperään. Keskijännitekaapelin keskusköysi ei välttämättä tasaa maaperän potentiaalia riittävästi, sillä se sijaitsee AHXAM-W-tyyppisen kaapelin keskellä. Lisäksi kaapelit ovat yleensä peitetty suojahiekalla, jonka johtavuus voi olla muuta maaperää heikompi. Tällöin kaapelin keskusköysi ei tasaa maan potentiaalia yhtä hyvin kuin erillinen maadoitusjohdin. Toisaalta keskijännitekaapelin keskusköysi on paremmin turvassa ulkopuolisilta vaurio-aiheuttajilta kuin erillinen maadoitusjohdin. Lisäksi keskusköysi on yleensä mitoitettu kestämään suuria kaksoismaasulun aikaisia vikavirtoja. Täten on suositeltavaa yhdistää kaikki kaapeliverkon muuntamot toisiinsa kaapelivaippojen kosketussuojien, kaapelin keskusköyden ja erillisen maadoitusjohtimen välityksellä. Näin toimimalla saadaan myös pienennettyä reduktiokerrointa (Colella ym. 2016, 4590) ja saadaan tasattua potentiaalieroja eri maadoitusjärjestelmien välillä. Yksittäisten erillisten maadoitusjärjestelmien maadoitusimpedansseja voidaan parantaa myös pystymaadoitusten avulla. Pystymaadoitukset eivät kuitenkaan välttämättä paranna tilannetta kosketusjännitteiden osalta, sillä pystymaadoitukset eivät tasaa potentiaalia maanpinnan tasossa (Li ym. 2023, 3–7; Vycital ym. 2019, 1, 7, 14).

Tasapotentiaalia ei täten muodostu, kun käytetään yksittäisiä ja pitkittäisiä maadoituselektrodeja. Tasapotentiaalinen voi muodostaa vain verkkomaisen maadoituselektrodin avulla, jossa verkon silmäkoko on riittävän pieni (Li ym. 2023, 3–7). Verkkoyhtiöt ovat yleisesti ottaneet sellaisen kannan, että kun muuntopiiriin on kytkeytynyt riittävä määrä maadoituselektrodeja tai yhteyksiä muihin maadoitusjärjestelmiin, niin ne ovat automaattisesti laajan maadoitusjärjestelmän piirissä. SFS

6001-standardin (2018, 134, 149) mukainen laaja maadoitusjärjestelmä ei kuitenkaan takaa, että tasapotentiaali toteutuu kaikkialla, sillä kaikissa sähkönkäyttöpaikoissa ei välttämättä ole potentiaalintausrengasta. Myös laajan maadoitusverkon alueelle voi muodostua suuria paikallisia potentiaalieroja, mikäli eri maadoitusjärjestelmät eivät ole yhteydessä toisiinsa (Mallits ym. 2016, 5). Tämä todettiin myös Kukkumäen maasulkutestien tulosten perusteella, kun kosketusjännite todettiin olevan osassa testeistä maadoitusjännitteen suuruinen (ks. kuvio 26).

Edellä esitettyjen syiden vuoksi SFS 6001-standardin tulkinta laajasta maadoitusverkosta ja yhteen liitetyistä maadoitusjärjestelmistä tulisi ottaa yleisesti tarkasteluun. Nykyisen tulkinnan mukaan maadoitusyhteyksien eheyden toteamiseen riittää kunnossapitotarkastus, jossa todetaan silmämääräisesti maadoitusyhteyden eheys (SFS 6001:2018, 145–146). Suljetuissa keskijännitekojeistoissa kaapelivaipan maadoitus on yleensä päätetilan sisällä, ja päätetilan oven saa auki vain tekemällä kyseinen lähtö jännitteettömäksi ja maadoittamalla kaapelipääte. Täten maadoitusyhteyden eheyden varmentaminen silmämääräisesti on haastavaa, jos kaapelipääte ei ole tarkastushetkellä nähtävillä, eikä käytetä erillistä keskusköyttä tai kaapelin rinnalla kulkevaa maadoituselektrodia. Lisäksi Verkostosuosituksessa RJ 22:22 suositellaan muuntamoille, jotka ovat kytkeytyneet laajaan tai yhteen liitettyyn maadoitusverkkoon, 12 vuoden välein suoritettavaa pistokoeluontoista mittausta, joka toteutetaan riittävän suuren mittausvirran omaavalla mittauslaitteella (Sähköjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen 2022, 24, 32–33). Eri maadoitusjärjestelmien välisien yhteyksien varmentaminen kunnossapitomittausten avulla on tärkeää, jotta sähköjakeluverkon alueelle ei pääse muodostumaan maasulkujen aikana suuria paikallisia potentiaalieroja. Esimerkiksi pienjänniteverkossa on käytettävä lisäpotentiaalintausausta, mikäli samanaikaisesti kosketeltavissa olevien jännitteelle alttiiden osien välille voi vikatapauksessa muodostua tilan mukaan yli 25 V:n tai 50 V:n jännite-ero (Ylinen ym. 2019, 40). Vastaavaa periaatetta tulisi noudattaa myös suurjänniteverkkojen potentiaalintausauksessa.

Vaarajännitteiden kannalta yksittäiset erilliset maadoitusjärjestelmät ovat kaikkein haastavimpia, sillä niiden alueella tapahtuvien maasulkujen maasulkuvirrat menevät kaikki kyseisen muuntopiirin maadoituselektrodien kautta maaperään ja näin ollen aiheuttaa maan potentiaalinnousun koko maadoitusjärjestelmän alueella. Tämän työn tulosten perusteella voidaan todeta, että vaarajänniteriskiä voidaan pienentää parantamalla maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssia, rajoitta-

malla vikavirtaa ja lyhentämällä vian poiskytkentäaika. Kukkumäen maasulkutestien tutkimustuloksista käy myös ilmi, että vikaantuneen muuntopiirin maadoitusolosuhteilla on merkittävä vaikutus vaarajänniteriskin muodostumisessa (ks. taulukko 4). Maadoitusolosuhteiden vaikutus vaarajännitteiden syntymiselle on todettu myös teorialiedon (Elovaara & Haarla 2011a, 210–2012; Lakervi & Partanen 2008, 182–190) ja tutkimustiedon (Hartmann ym. 2019, 5–6; Tarko ym. 2022, 15) valossa. Erillisen maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssia voi pienentää joko lisäämällä maadoituselektrodeja tai yhdistämällä kyseinen maadoitusjärjestelmä galvaanisesti toisiin maadoitusjärjestelmiin. Yhdistämällä erillisiä maadoitusjärjestelmiä yhteen saadaan yhteen liitetyjä maadoitusjärjestelmiä, joiden maadoitusolosuhteet ovat erillisiä maadoitusjärjestelmiä parempia (Mäkinen 2016, 21). Tällöin myös vaarajänniteriski pienenee.

Riittävän laajat yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät muodostavat laajan maadoitusverkon, jonka alueella vaarajänniteriskin oletetaan olevan pieni. Tutkimustiedon (Li ym. 2023, 3–7; Mallits ym. 2016, 5; Parise ym. 2015, 5021; Pons ym. 2015, 5243–5244; Sa'ed ym. 2017, 1–4.) mukaan tasapotentiaalia ei kuitenkaan muodostu minkään edellä esitetyn maadoitusjärjestelmän alueelle. Vikavirran mukaan säätyvän maasulkuvirtasuojauksen avulla voidaan kuitenkin koko sähköjakeluverkon vaarajänniteriskiä pienentää huomattavasti, sillä suojauksen toiminta voidaan mitoittaa huonoimpien maadoitusolosuhteiden mukaisesti. Sähköjakeluverkon suojauksen toiminta voidaan räätälöidä myös eri verkon osissa vallitsevien maadoitusolosuhteiden mukaisesti. Esimerkiksi taajamia tai kaupunkialueita syöttäville johtolähdöille voidaan määritellä maasulkuvirtasuojaus yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien olosuhteiden mukaisesti ja maaseutuverkkoa syöttäville johtolähdöille erillisten maadoitusjärjestelmien olosuhteiden mukaisesti. Tällöin vikavirran- ja kosketusjännite-estimaatin laskentaan perustuva maasulkusuojaus osaa huomioida verkon eri osissa vallitsevat olosuhteet ja pitää vaarajänniteriskin käyttäjän määrittelemällä tasolla.

6.1.3 Jakeluverkon vika- ja käyttötilanteiden vaikutus vaarajännitteisiin

Sähköjakeluverkon tila ei ole jatkuvasti stabiili, vaan se vaihtelee kytkentä- ja vikatilanteiden sekä toimilaitteiden häiriötilanteiden mukaisesti. Erityisesti sammutetussa verkossa maasulkuvirran kompensointiaste voi muuttua hetkellisesti hyvinkin paljon kytkentämuutosten, jakeluhäiriöiden tai sammutuskuristimen virheellisen toiminnan vuoksi. Kaupunkiympäristössä jakeluverkot ovat usein silmukoituja, joten jakorajamuutosten yhteydessä voidaan hetkessä siirtää laajoja verkosto-

osuuksia toisen keskitetyn kompensointilaitteiston perään. Kompensointilaitteistot pystyvät mukautumaan uuteen tilanteeseen yleensä muutamien minuuttien aikana, mutta tämän kompensointikelan säätötapahtuman ajan verkoston kompensointiaste on normaalista poikkeava. Tällöin toisen keskitetyn sammutuskuristimen perässä oleva verkko on hetken aikaa alikompensoitu, ja toisen sammutuskuristimen perässä oleva verkko on ylikompensoitu. Saman suuntaisia ongelmia esiintyy myös jakeluhäiriöiden yhteydessä, kun sammutuskela ei pysty mukautumaan häiriönhoiton aikaisiin muutostilanteisiin.

Yksittäiset laajat maakaapelilähdöt voivat tuottaa maasulkuvirtaa useita kymmeniä ampeereja. Kukkumäen sähköaseman suurimmat yksittäiset johtolähdöt tuottavat noin 40 A:a maasulkuvirtaa. Tällöin verkoston kompensointiaste voi olla useita kymmeniä ampeereja alikompensoitu, mikäli sammutuskela on kerennyt säätyä uuteen asentoon ennen vian kokeilukytkentää. Korvauskytkentätilanteissa voi tulla myös vastaan tilanne, että jakeluverkon sammutuskuristimien kapasiteetti ei ole riittävä. Tällöin maakaapeleiden tuottamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa voi jäädä kompensoimatta huomattavia määriä. Myös sammutuslaitteistojen häiriötilanteet voivat aiheuttaa yli- tai alikompensointitilanteita. Sammutettu verkko voi myös muuttua hetkessä maasta erotetuksi verkoksi, mikäli sammutuskuristin irtoaa verkosta kuristimen, tähtipistemuuntajan tai niitä syöttävän kaapelin vikaantumisen vuoksi. Normaalitilannetta suurempi vinoviritys aiheuttaa maasulkuvikata-pauksessa vikakohteeseen suuremman vikavirran, ja näin ollen vaarajännitteiden aiheuttamat riskit kasvavat. Perinteinen maasulkusuojaus ei osaa ottaa näitä edellä mainittuja tilanteita huomioon, sillä vian poiskytkentäaika ei säädy vikakohteeseen menevän vikavirran mukaisesti (REX640 Technical Manual 2023, 352; Wahlroos ym. 2019, 1). Lisäksi perinteisen suojauksen heikkoutena on se, että poikkeukselliset kompensointitilanteet saattavat aiheuttaa suojauksen toimintaan selektiivisyysongelmia (Wahlroos & Altonen 2014, 1–2; Wahlroos ym. 2013, 1). Kukkumäen maasulkutestien perusteella voidaan kuitenkin todeta, että uusi IFPTOC-suojaja puolestaan estimoit todellisen vikavirran verkon tilasta riippumatta ja säätää vian poiskytkentäajan vikavirran suuruuden mukaisesti. Täten verkon poikkeustilanteet eivät aiheuta kohonnutta vaarajänniteriskiä.

Vaarajännitteiden muodostumiseen vaikuttaa myös verkoston erilaiset kuormitustilanteet, sillä kuormituksen aiheuttamat yliaallot voivat kasvattaa vikavirran tehollisarvoa (Nikander & Mäkinen 2017, 38–39). Sähkökäyttäjien epälineaarisen kuorman kasvu voi täten aiheuttaa maasulkuvirran harmonisien komponenttien lisääntymisen. Vikavirran harmonisten osuus on myös riippuvainen

verkon rakenteesta ja verkkotyypistä, sillä kaapelointi lisää maasulkuvirran harmonisia taajuuksia, joiden suuruus puolestaan on riippuvainen vikakohdan sijainnista (Nikander & Mäkinen, 2022, 74–76.) Keskijänniteverkon yliaaltopitoisuuden voimakas kasvu lähivuosien aikana on havaittu myös Alva Sähköverkko Oy:n sähköasemien mittauksien perusteella, sillä joidenkin lähtöjen häiriötallenteiden virta- ja jännitesiniaaltokäyrät poikkeavat huomattavasti normaalista 50 Hz:n siniaaltokäyrästä. Epälineaarisen kuorman kasvuun tulee varautua tulevaisuudessa, sillä liikenne ja energiahuolto sähköistyvät kiihtyvällä tahdilla. Esimerkiksi sähköautojen latauslaitteet, tuuli- ja aurinkovoimalat sekä erilaiset lämpöpumppuratkaisut tulevat todennäköisesti aiheuttamaan sähköverkkoihin kasvavia yliaaltopitoisuuksia. Jopa yksittäinen tehdas, tuotantolaitos tai muu isotehoinen sähköliittymä voi aiheuttaa yksittäiselle johtolähdölle suuria yliaaltopitoisuuksia.

Yliaaltojen aiheuttaman kokonaisvikavirran kasvun lisäksi normaalista 50 Hz:n taajuudesta poikkeavat vikavirrat lisäävät myös sähköiskun vaarallisuutta. Esimerkiksi Schneeweiss ja muut (2021, 114–116) tuovat tutkimuksessaan esille, että ihmiskehon sydämen lävitse menevät poikittaiset vikavirrat kasvavat taajuuden kasvaessa. Toisaalta ihmiskehon lävitse kulkevilla pitkittäisillä vikavirroilla ei ole havaittu olevan taajuusriippuvuutta. (Mts. 114–116.) Kuten Nikander ja Mäkinen (2017, 13–14) sekä Nikander ja Pakonen (2022, 74–76) toteavat, niin vikavirtojen yliaaltojen osuus on otettava huomioon vaarajännitteitä tarkasteltaessa. Yhtäältä Wahlroos ja muut (2019, 1) tuovat esille, että uusi maasulkusuojaus parantaa sähkönjakeluverkon kokonaisturvallisuutta ja suojauksen luotettavuutta, sillä uusi kosketusjännitteeseen perustuva suojausalgoritmi osaa ottaa huomioon myös vikavirran harmoniset komponentit. Toisaalta tutkimukset ovat osoittaneet, että yhteen liitetyissä maadoitusjärjestelmissä vikavirran harmonisista menee vain pieni osa maahan, joten niillä ei ole merkittävää vaikutusta kosketusjännitteen muodostumiseen (Küchler ym. 2021, 1–2, 14–15).

Erillisten maadoitusjärjestelmien kohdalla vikavirtojen harmonisten vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen tulee kuitenkin selvittää. Erillisten galvaanisesti muihin maadoitusverkkoihin yhdistymättömien maadoitusverkkojen kohdalla on täten otettava huomioon myös yliaaltojen vaikutus kosketusjännitteiden muodostumiseen. Tämän opinnäytetyön tutkimustuloksista (ks. liite 4) käy ilmi, että kuormitustilanteella ei ole merkittävää vaikutusta maasulkuvian aikaisten vaarajännitteiden muodostumisessa. Sen sijaan vikatyypillä on vaikutusta vikavirran harmonisten muodostumisessa. Suorissa vikavastuksettomissa maasuluissa vikavirran harmonisten osuuden todettiin

kasvaneen riippumatta verkoston kuormitustilanteesta. Tämä havainto on teoretiedon (Lakervi & Partanen 2008, 190) mukainen, sillä yliaaltoja esiintyy maasulun alkuhetkinä, kun terveiden vaiheiden maakapasitanssit varautuvat, ja viallisen vaiheen maakapasitanssit purkautuvat. Kukkumäen sähköaseman syöttämän sähköverkon jännitesärö oli maasulkutestien aikana todennäköisesti niin pieni, että kuormitusvirta ei muodostanut vikavirtaan yliaaltoja. ABB Oy:n uuden IFPTOC-suojan vikavirtaestimaattilaskennassa huomioidaan myös harmonisten yliaaltojen vaikutus (REX640 Technical Manual 2024, 355–356), joten paljon harmonista jännitesäröä sisältävien verkkojen maasulkusuojaus voidaan toteuttaa turvallisuuskriteereiden mukaisesti.

Yksi sammutetun verkon erityispiirteistä on katkeilevat maasulkuviat, jotka johtuvat pienivikavirtaisen valokaaren peräkkäisistä syttymisistä ja sammumisista vikakohteessa. IEC 60479-2-standardissa (2019, 29–30) esitetään, että mikäli vikavirta sisältää peräkkäisiä alle 300 ms:n välillä tulevia virtapulsseja, niin kammiovärinän riski kasvaa joka virtapulssin jälkeen huomattavasti. Suuremmat virtapulssit voivat aiheuttaa kammiovärinän, vaikka peräkkäiset virtapulssit tulisivat harvemmin kuin 300 ms:n välillä. Vikavirtojen osalta on otettava huomioon, että lapset ovat huomattavasti herkempiä sähköiskujen fysiologisille vaikutuksille. (IEC 60479-2:2019, 19, 29–30, 52.) Mikäli siis alle 300 ms:n sisällä tulee useampi virtapiikki, kasvaa riski sydämen kammiovärinälle. Näin ollen katkeilevan suojan oikean toiminnan varmistamiseksi palautumisajan tulisi olla vähintään 300 ms.

Katkeilevien maasulkujen aiheuttamat vaarajännitepiikit tulee ottaa yleisesti huomioon, sillä sähköiskun vaarallisuus on riippuvainen myös siitä, että millä hetkellä sydänjaksoa sähköisku tapahtuu. Mikäli sähköisku osuu sydämen supistusvaiheen jälkeen tulevalle levovaiheelle, niin riski kammiovärinälle on suurin. Myös ihmiskehon lävitse menevät lyhyet yli 500 mA:n vikavirtapiikit voivat aiheuttaa kammiovärinää. (IEC 60479-1:2018, 23, 42.) Katkeilevaan suojaan tulisi täten ottaa mukaan myös harvemmin kuin 300 ms:n välein tapahtuvien yli 500 mA:n I_B :n, eli ihmiskehon lävitse menevän vikavirran virtapiikkiestimaattien laskenta, sillä suuren transientin omaavissa katkeilevissa vioissa kasvaa kosketusjännitevirtapiirin osaksi joutuneen henkilön sydämen kammiovärinän riski. Toisaalta Kukkumäen maasulkutestien yhteydessä tehtyjen katkeilevien maasulkutestien aikana ei esiintynyt näin suuria ihmiskehon lävitse meneviä virtapiikkejä (ks. kuvio 30). Katkeilevat maasulut ovat ominaisia sammutetuille verkoille, joissa vikavirrat ovat pieniä, joten katkeilevien maasulkuvikojen esiintyminen on epätodennäköisempää suurivirtaisten maasulkujen yhteydessä.

6.2 Tulosten ydinkohdat

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia maasulkukokeiden avulla todellisissa maasulkutilanteissa ilmeneviä vaarajännitteitä ja varmentaa kosketusjännite-estimaattiin perustuvan maasulkuvirtasuojauksen toimintaa. Maasulkukokeita varten rakennettiin erityinen testiympäristö, jossa voitiin varioida todellisia verkon käyttö- ja vikatilanteita. Testiympäristön mittausrakenteiden avulla mitattiin maadoitus- ja kosketusjännitteitä sekä vikavirtoja erilaisilla maasulkuvikakonfiguraatioilla. Saatuja mittaustuloksia analysoitiin teoria- ja tutkimustiedon pohjalta.

Kukkumäen sähköaseman häiriötallenteiden ja maastossa vikakohteessa tehtyjen maadoitus- ja kosketusjännitemittausten sekä vika- ja maavirtamittausten perusteella voidaan todeta, että uusi IFPTOC-suoja toimii luotettavasti kaikissa verkon käyttötilanteissa (ks. kuvio 20). Mittaustulosten perusteella voidaan myös todeta, että sähköaseman nollavirtamittaus ei vastaa vikakohteen vikavirtaa, vaan on riippuvainen verkon rakenteesta, käyttö- ja kytkentätilanteesta sekä vikapaikan sijainnista (ks. kuvio 19).

Tutkimustulosten perusteella voidaan sanoa, että IFPTOC-suojan vikavirtaestimaatin tarkkuus paranee vikavirran kasvaessa. Pienillä vikavirroilla vikavirtaestimaatin tarkkuutta heikentävät sähköaseman vaihevirtamuuntajien suuri muuntosuhde ja releen mittaustarkkuus. Pienin vikavirta, jonka IFPTOC-suoja pystyy estimoimaan vielä kohtuullisella tarkkuudella, on 0,5 %:a vaihevirtamuuntajan nimellisvirrasta (REX640 Technical Manual 2024, 359). Kukkumäen sähköaseman johtolähtökentissä on 600/1 A:n muuntosuhteella olevat vaihevirtamuuntajat, joten maasulkutestien aikana esiintyviin alle 3 A:n vikavirtaestimaatteihin tulee suhtautua varauksella. Tämä oli nähtävissä myös tutkimustulosten pohjalta (ks. taulukko 2).

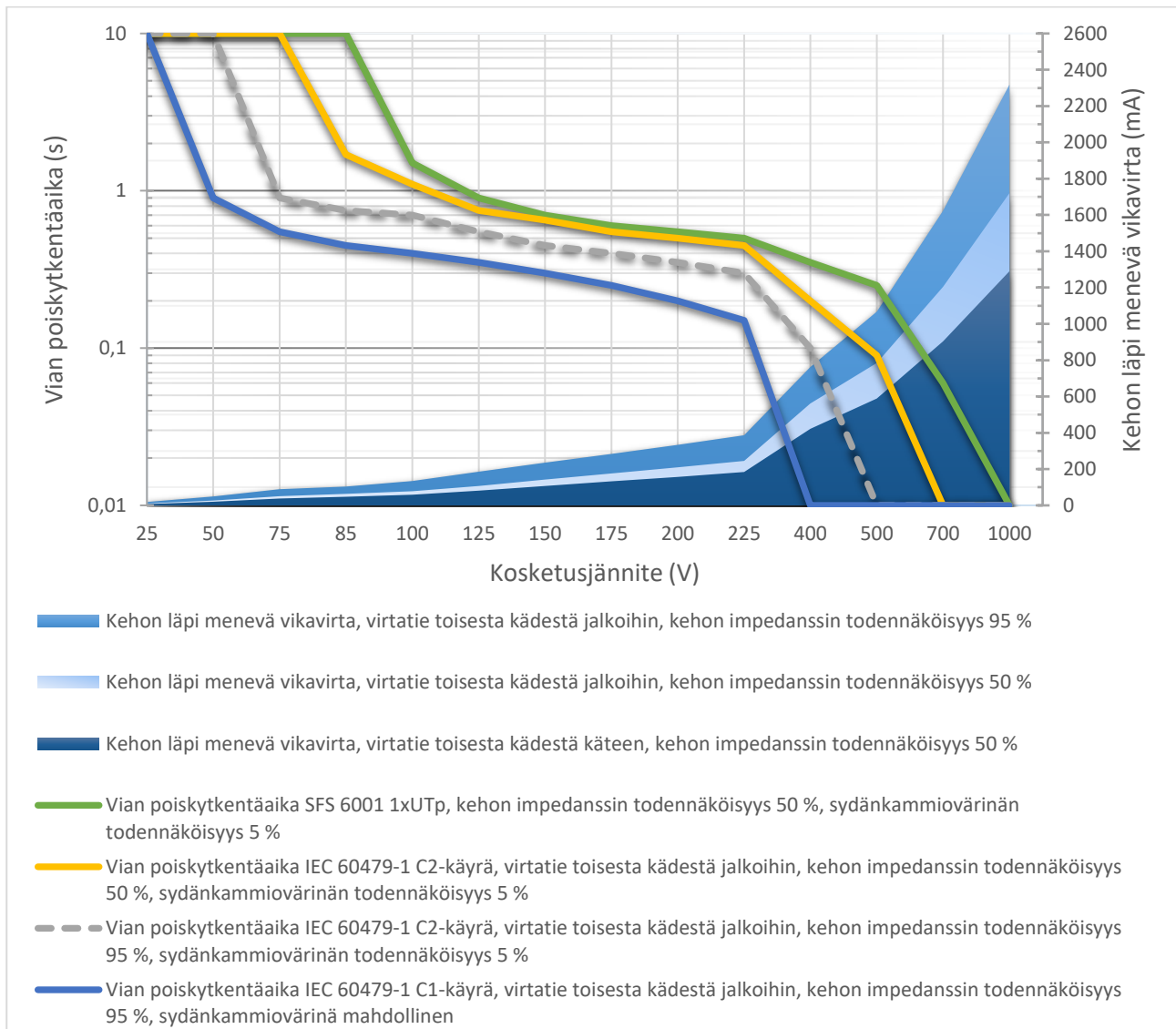
Kosketusjännitteiden tulisi pysyä alle 220 V:n tasossa, sillä tätä suuremmilla jännitteillä ihmisen ihon eristävää vaikutusta ei voi enää ottaa huomioon (IEC 60479-1:2018, 32). Jatkuvassa maasulussa kosketusjännitteet eivät saisi olla yli 25 V, sillä sydänkammiovärinä on mahdollinen tätä suuremmilla jännitteillä (ks. kuvio 31). Kuvioista 31 nähdään myös, että ihmiskehon lävitse menevä vikavirta kasvaa nopeasti yli 220 V:a suuremmilla kosketusjännitteillä. SFS 6001-standardin U_{Tp} -käyrän mukaan kosketusjännite saa olla 700 V:a ennen pikalaukaisua (SFS 6001:2018, 93). Tällöin ihmiskehon lävitse menevä vikavirta on jo 900–1600 mA:a. Näin suuret virrat aiheuttavat ihmiske-

hossa sydänkammiovärinän lisäksi myös vakavia kudosaivourioita tai jopa välittömän sydänpysähdysten (Alakare ym. 2023, 1384; vrt. IEC 60479-1:2018, 25). On myös huomioitava, että sähköjalkeluverkot käyttävät yleisesti kosketusjännitetarkastelussa U_{Tp} -käyrän kaksinkertaisia arvoja, joten myös ihmiskehon lävitse menevien vikavirtojen suuruus kaksinkertaistuu. SFS 6001-standardissa edellytetään, että maadoitusjärjestelmien tulee varmistaa henkilöturvallisuus ja toimia kaikissa tilanteissa ja paikoissa, joissa henkilöitä voi oleskella (SFS 6001:2018, 87–88).

Kiinteistöjen maadoitusolosuhteita parantavan ja potentiaalia tasaavan perustusmaadoituselektrodin asennussuositus tuli uusiin rakennuksiin vasta vuonna 2007 tehdyn SFS 6000-standardin päivityksen myötä. SFS 6000-standardin mukaan perustusmaadoituselektrodi ei ole nykyään pakollinen, vaan sitä suositellaan ensisijaisena maadoituselektrodiratkaisuna (SFS 6000-5-54:2022, 25), joten uusissakin rakennuksissa voi olla vain yksittäisiä ja säteittäisiä maadoituselektrodeja. Erittäin vanhoissa rakennuksissa on saatettu käyttää maadoituselektrodina metallisia vesijohtoja, jotka ovat myöhemmin saneerattu kiinteistön ulkopuolella muovisiksi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että SFS 6001-standardin mukaisille U_{Tp} -käyrän kertoimille ei ole käyttöedellytyksiä, sillä vaarajännitteitä saattaa levitä maadoitusverkkoon yhteydessä olevia muita verkkoja pitkin alueille, joissa ei ole otettu siirtyviä kosketusjännitteitä tai potentiaalintasausta riittävästi huomioon.

Mahdollisia riskialttiita verkkoja ovat esimerkiksi kaukolämpöverkot sekä katujen, puistojen ja urheilukenttien metallipylväiset valaistusverkot, joiden lähetyvillä oleskelee ihmisiä ja eläimiä. Viestikaapelit on myös huomioitava vaarajännitetarkastelussa (Mallits ym. 2016, 5; Ylinen ym. 2019, 117), sillä valokaapelin kytkentäpäässä kaapelin metalliosat maadoitetaan kytkemällä ne kiinteistön sähköliittymän maadoitukseen, potentiaalintasauskiskoihin tai lisäämällä oma erillinen maadoitusjohdin kaapeliojaan (Ylinen ym. 2019, 120–124). Maahan asennettujen valokaapeleiden kautta voi potentiaalieroja syntyä eri maadoitusjärjestelmien välille erittäin pitkillä etäisyyksillä. Mikäli valokuitukaapelin toinen pää on laajan maadoitusverkon puolella, ja toinen pää on huonomman maadoitusimpedanssin omaavan muuntopiirin puolella, niin maasulkujen aikaiset potentiaalierot voivat olla huomattavat. Tämä todettiin myös Kukkumäen sähköaseman maasulkutestien yhteydessä, kun erillismaadoituksen toisena referenssijännitteenä oli laajempi maadoitusverkko (ks. kuvio 26).

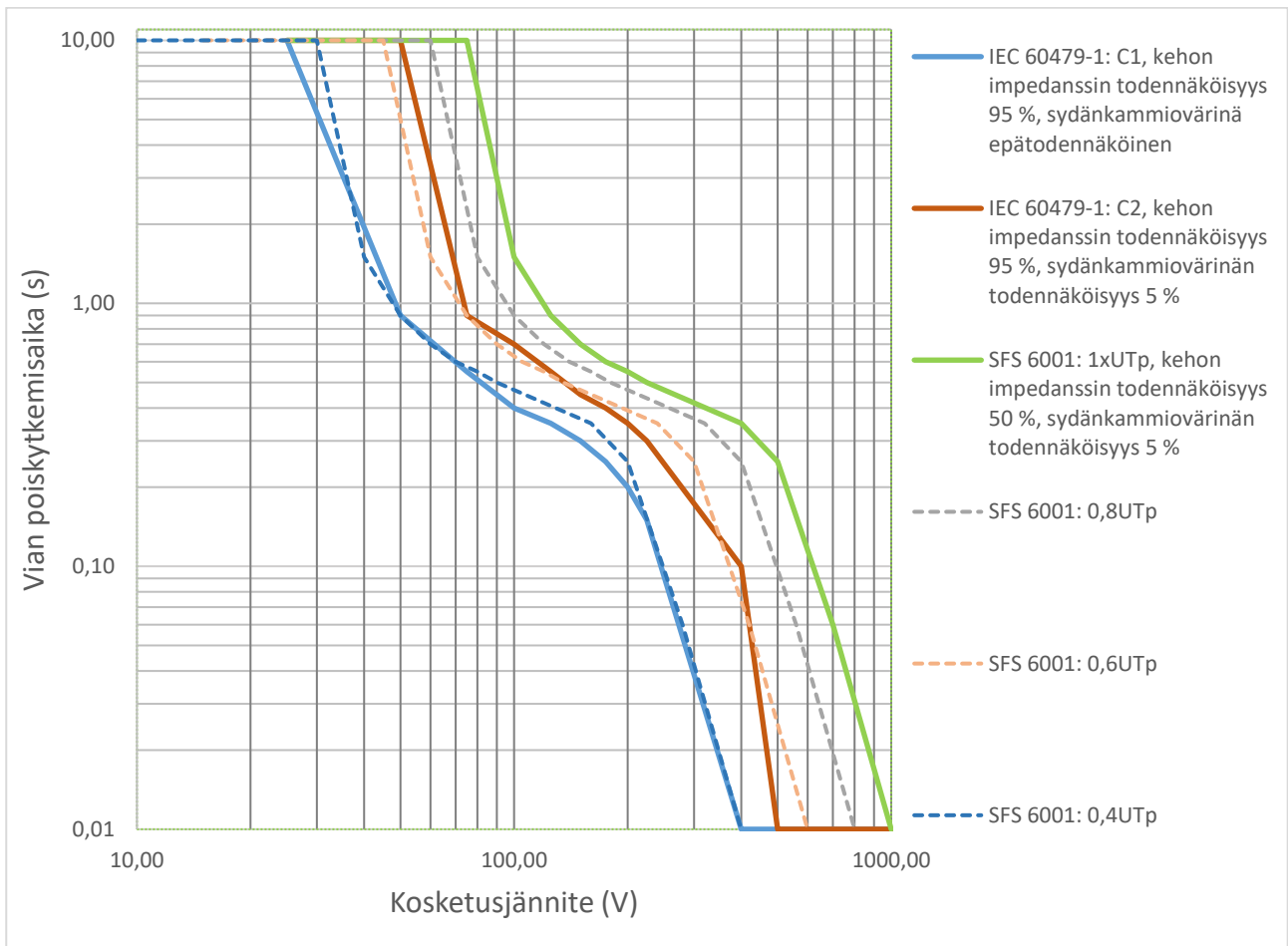
Kuvion 31 mukaiset IEC 60479-1-standardin poiskytkentäkäyrät on muodostettu siten, että kehon lävitse menevä virta vastaa kyseisen standardin C-käyriä (IEC 60479-1:2018, 44). Kehon lävitse menevä virta on laskettu kosketusjännitteen ja kyseistä kosketusjännitettä vastaavan kehon impedanssin avulla (IEC 60479-1:2018, 15). Lisäksi impedanssien määrittelyssä on huomioitu 0,75-kerroin, kun virtatie on kädestä molempiin jalkoihin (IEC 60479-1:2018, 30). U_{Tp} -käyrä noudattaa SFS 6001-standardin mukaista suurinta sallittua kosketusjännitettä (SFS 6001:2018, 93).



Kuvio 31. Kosketusjännitteiden aiheuttamat kehon kautta kulkevat vikavirrat ja niiden poiskytkentäajat johdettuna IEC 60479-1- ja SFS 6001-standardeista

Kuviossa 31 on havainnollistettu kosketusjännitteen aiheuttaman virran suuruutta ihmiskehon lävitse ja samalla standardien suosittelemia vian poiskytkentäaikoja. Tästä kuvioista voidaan todeta, että SFS 6001-standardin poiskytkentäajat eivät vastaa kaikilta osin IEC 60479-1 standardin C₂-käyrän mukaisia poiskytkentäaikoja. Tämä johtuu siitä, että SFS 6001-standardin U_{TP}-käyrä on laadittu neljän erilaisen IEC 60479-1-standardin mukaisen kosketusjännitetapauksen painotetun keskiarvon avulla (SFS 6001:2018, 101). Lisäksi kyseinen käyrä on laadittu siten, että kehon sisäisen impedanssin osalta se kattaa 50 %:a ihmisistä, ja sähköiskun aiheuttama sydänkammiovärinän riski on 5 %:a. Täten tulisi harkita käytettäväksi sähkönjakeluverkkojen suojauksessa IEC 60479-1-standardin mukaista C₁-käyrää, jonka alapuolella olevat kosketusjännitteet aiheuttavat sydänkammiovärinää vain erittäin harvoissa tapauksissa.

Tällöin jatkuvassa maasulussa voisi käyttää sähköverkkoja, joiden kosketusjännite pysyy todistettusti alle 25 V:a. Mikäli kosketusjännite nousee yli 50 V:n, niin vian poiskytkentäaika lyhenee nopeasti jännitteen kasvaessa. Vastaava SFS 6001-standardin mukainen kynnyksijännite on puolestaan 75 V:a. IEC 60479-1-standardin C₁-käyrän mukainen seuraava kynnyksijännite on 220 V:n kohdilla, jossa ihmisen ihon on todettu repeävän (IEC 60479-1:2018, 32). Mikäli kosketusjännite kasvaa yli 220 V:n, niin laukaisuaikaa kiihdytetään entisestään. Pikalaukaisun, eli vian poiskytkennän 0,05 sekunnin aikana, tulisi tapahtua kosketusjännitteen noustessa arvoon 300 V:a. SFS 6001-standardin mukaan pikalaukaisun tulee tapahtua kosketusjännitteen noustessa yli 700 V:n. Kuviossa 31 on myös esitetty IEC 60479-1-standardin mukainen C₂-käyrä, jonka poiskytkentäajat kattavat kehon impedanssin osalta 95 %:a ihmisistä, ja sydänkammiovärinän riski on 5 %:a. Tämän käyrän mukaisia poiskytkentäaikoja voisi soveltaa, mikäli IEC 60479-1-standardin C₁-käyrän poiskytkentäajat koetaan liian tiukoiksi. Kuviossa 32 on havainnollistettu IEC 60479-1-standardin C-käyrien ja SFS 6001-standardin U_{TP}-käyrien mukaisia vian poiskytkentäaikoja eri kosketusjännitteen arvoilla.



Kuvio 32. Kosketusjännitesuojauksen vertailu IEC 60479-1-standardin C-käyrien ja SFS 6001-standardin U_{TP}-käyrien välillä

Alva sähköverkko Oy:n Kukkumäen sähköasemalla on IFPTOC-suojan kosketusjännite-estimaatin laukaisukäyränä 0,8U_{TP}, joka on SFS 6001-standardin vaadetta tiukempi. Kuviosta 32 voidaan huomata, että IEC 60479-1-standardin C₁-käyrän mukaiset laukaisuajat toteutuisivat, mikäli IFPTOC-suojalla olisi käytössä 0,4U_{TP}-käyrän mukaiset laukaisuajat. Jakeluverkkojen maasulkusuojauksen toteuttaminen IEC 60479-1-standardin C₁-käyrän mukaisesti on perusteltua, sillä teoria- ja tutkimustiedon pohjalta voidaan todeta, että sähköiskun vaarallisuus kasvaa merkittävästi kosketusjännitteen ylittäessä 200–300 V:a. Yhtäältä Griffiths ja muut (2013, 4) esittävät, että 0,3 sekunnin poiskytkentäajalla 300 V:n kosketusjännite aiheuttaa kammiovärinää 1 %:n todennäköisyydellä. Vastaavasti 400 V:n jännitteellä kammiovärinän todennäköisyys on 10 %:a ja 700 V:n jännitteellä kammiovärinän todennäköisyys kasvaa 90 %:iin. Toisaalta kosketusjännitteen ollessa alle 50 V:a on kammiovärinän todennäköisyys erittäin pieni. (Mts. 4.)

Vaikka SFS 6001-standardissa sähkönjakeluverkkojen turvallisuutta käsitellään pääasiassa sallittujen kosketusjännitteiden kautta, niin todellisuudessa sähköiskun vaarallisuus on riippuvainen ihmiskehon lävitse menevästä vikavirrasta ja sen reitistä. On kuitenkin otettava huomioon, että vaarajännitteen aiheuttaman vikavirran suuruus on riippuvainen vikapiiriin kokonaisimpedanssista, joka muodostuu ihmiskehon impedanssista, mahdollisesta jalkineiden lisäresistanssista ja seisomapaikalla vaikuttavasta maaperän resistanssista (SFS 6001:2018, 101–107). Ihmiskehon impedanssi on puolestaan riippuvainen vikavirran taajuudesta ja sen reitistä ihmiskehossa, vikavirralla altistumisajasta, kosketusjännitteen suuruudesta sekä ihon paksuudesta, kosteudesta ja lämpötilasta. Lisäksi kehon impedanssin suuruus on riippuvainen siitä, että miten suuri on jännitteisen kohteen kosketuspinta-ala ja miten suurella paineella jännitteistä osaa kosketellaan. Myös yksilön henkilökohtaiset fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat ihmiskehon sisäisen impedanssin suuruuteen. Ihmiskehon sisäisen impedanssin suuruus vaihtelee 95 %:lla ihmisistä 400–1050 Ω :n välillä. (IEC 60479-1:2018, 13–15.) Täten ei voida tarkasti määrittellä tiettyä jännite- tai virtarajaa, jonka alittavat arvot ovat turvallisia kosketusjännitepiiriin joutuneen henkilön kannalta.

Lisäksi on huomioitava, että todennäköisyys altistua maasulkujen aikaisille hengenvaarallisille kosketusjännitteille on pieni, sillä maasulkuvikojen esiintymistiheys on matala, ja viat poistuvat pääsääntöisesti lyhyessä ajassa. Toisaalta SFS 6001-standardin mukaisessa kosketusjännitetarkastelussa tehdään paljon yleistyksiä ja olettamuksia. SFS 6001-standardin mukainen U_{Tp} -käyrä on laadittu siten, että ihmiskehon impedanssin todennäköisyys on 50 %:a ja käyrän mukaisen kosketusjännitteen aiheuttaman sydänkammiovärinän todennäköisyys on alle 5 %:a. Lisäksi kyseinen käyrä pohjautuu neljän erilaisen kosketusjännitetapauksen painotettuun keskiarvoon (SFS 6001:2018, 101). Kosketusjännitemittauksissa ja -laskennoissa voidaan käyttää myös ihmiskehon impedanssia simuloivaa vakiokokoista 1 k Ω :n vastusta, vaikka puolella ihmisistä kehon sisäinen vastus on tätä pienempi, ja ihmiskehon impedanssin on todettu muuttuvan kosketusjännitteen suhteessa. Käytännössä SFS 6001-standardin mukaisella kosketusjännitteellä aiheutetaan suurentunut henkilövahingon riski suurimmalle osalle ihmisistä. Mikäli noudatettaisiin IEC-60479-1-standardin C_1 -käyrän mukaisia poiskytkentäaikoja ja huomioitaisiin ihmiskehon sisäinen impedanssi siten, että 95 %:lla ihmisistä kehon sisäinen impedanssi olisi tätä suurempi, niin sähköiskujen aiheuttamat riskit olisi minimoitu 95 %:lla henkilöistä.

Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu, rakennuttaminen ja käyttö tulisi toteuttaa siten, että jakeluverkkojen aiheuttamat henkeä ja terveyttä uhkaavat riskit olisivat mahdollisimman pienet. Mikäli sähkönjakeluverkon suunnittelussa, rakennuttamisessa ja käytössä huomioidaan todennäköisyyskertoimia useammassa eri vaiheessa, niin todellisuudessa maasulkuvikojen aikaiset riskitekijät voivat olla oletettua suurempia. Muuttuva-aikaisen kosketusjänniteperustaisen maasulkusuojauksen avulla verkkoyhtiöt voivat tulevaisuudessa määritellä oman verkkonsa turvallisuustason halutunlaiseksi riippumatta siitä, mitä ratkaisuja on aikaisemmin tehty. Laukkasen (2023, 64, 66, 77, 100–103) esille tuomat jakeluverkko-yhtiöiden eriävät ja vaihtelevat tulkinnat kosketusjännitetarkastelussa, maadoitusjärjestelmissä sekä maasulkuvirran kompensointiperiaatteissa saattavat ajaa verkkoyhtiöitä eriarvoiseen asemaan, sillä käytännössä paremman turvallisuustason saavuttaminen on edellyttänyt suurempia investointeja jakeluverkkoon. Suomessa sähkönjakeluverkkojen investointien kannattavuutta säätelee Energiaviraston valvontamalli, jossa ei riittävästi huomioida turvallisuuden takaamiseksi tehtyjä lisäinvestointeja.

7 Johtopäätökset

7.1 Yhteenveto ja työhypoteeseihin vastaaminen

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia maasulkuilmiöitä ja niiden aikana ilmeneviä vaarajännitteitä todellisissa verkon käyttö- ja vikatilanteissa sekä verrata saatuja tuloksia teoreettiseen viitekehukseen. Todellisia sähkönjakeluverkon vikatilanteita simuloitiin kenttäkokeita varten rakennetun testiympäristön avulla, jossa voitiin turvallisesti varioida maasulkujen aikaisia erilaisia jakeluverkon maadoitus-, vika-, käyttö- ja kuormitustilanteita. Kenttä- eli maasulkukokeiden aikana mitattiin sähkönlaatuanalysointilaitteilla ja oskilloskoopilla maasulkujen aikaisia maadoitus- ja kosketusjännitteitä sekä vikavirtoja. Lisäksi sähköasemasalla mitattiin johtolähdön vikatilanteissa näkemiä suureita suojareleiden avulla. Kenttäkokeiden mittausdatan ja sähköaseman häiriötallenteiden avulla varmennettiin myös uudenlaisen kosketusjännitteeseen perustuvan maasulkusuojauksen oikeaoppinen toiminta.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli saada selville ne tekijät, joiden avulla sähköverkkojen maasulkuvirtasuojaus on mahdollista toteuttaa sähköturvallisuuslain (L 1135/2016) edellyttämien vaatimusten mukaisesti huomioiden myös sähköverkkojen poikkeavat vika- ja käyttötilanteet. Lopputuloksena saatiin aikaiseksi toimintasuunnitelma, jonka mukaisesti Alva Sähköverkko Oy:n sähkönja-

keluverkon maasulkusuojausta voidaan tulevaisuudessa parantaa. Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa sekä kansallisesti että kansainvälisesti sähköjakeluverkkojen suojausten suunnittelussa.

Maasulkujen aikaisten vaarajännitteiden suuruudet ovat riippuvaisia useista eri tekijöistä. Ensimmäinen merkittävä tekijä on maasulun aikaisen vikavirran suuruus. Mitä suurempi on vikavirta, niin sitä suurempi on vikakohtan maadoitusjärjestelmän alueella ilmenevä maan potentiaalinen nousu. Vikavirran suuruuteen vaikuttaa muun muassa verkon rakennustapa, valittu tähtipisteen maadoitusratkaisu sekä verkon käyttö-, kuormitus- ja vikatilanne. Toinen merkittävä tekijä on vikakohtan maadoitusjärjestelmän maadoitusolosuhteet. Mitä pienempi on vikakohteen maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi, niin sitä pienempiä ovat maasulkujen aikaiset vaarajännitteet. Nämä molemmat päätekijät ovat merkittävässä roolissa vaarajänniteriskin muodostumisessa, sillä maan potentiaalinen nousu on riippuvainen vikavirran ja vikakohteen maadoitusolosuhteiden mukaisesta tulosta. Vaarajännitteiden muodostumista voidaan siis täten pienentää rajoittamalla vikavirtaa ja parantamalla sähköjakeluverkon maadoitusolosuhteita. Myös reduktion avulla voidaan parantaa vikakohteen maadoitusolosuhteita tai muuttaa vikavirran reittiä siten, että vain pieni osa vikavirrasta menee maadoituksiin, ja näin ollen vaarajänniteriski pienenee.

Vaarajännitteiden vaarallisuus on riippuvainen vaarajännitteen suuruudesta ja sille altistumisajasta. Täten suuret vaarajännitteet tulee pyrkiä poistamaan mahdollisimman nopeasti. Jakeluverkko-yhtiöiden tulee olla tietoisia heidän jakeluverkkonsa alueen maadoitusolosuhteista, joten sähköjakeluverkon suojaus voidaan määrittellä vallitsevien maadoitusolosuhteiden mukaisesti. Perinteisen suojauksen ongelmana on, että se toimii vain yhdessä ennalta määrättyssä pisteessä, eli asetellussa vakioajassa riippumatta vikavirran suuruudesta, mikäli nollavirtaan ja -jännitteeseen perustuvat asetellut ylittyvät. Käytännössä vikavirran suuruus ei ole vakio, vaan voi vaihdella hyvinkin suuresti, mutta vikasuojauksen toiminta-aika ei kuitenkaan säädy vikavirran mukaisesti. Tästä seuraa, että normaalia suurempi vikavirta aiheuttaa perinteisen maasulkuanalyysin perusteella suojatun sähköjakeluverkon alueelle normaalitilannetta suurempia vaarajännitteitä, joiden kestoajat voivat ylittää määräysten mukaiset laukaisuajat. Täten SFS 6001-standardin mukaisesti mitoitettu sähköjakeluverkko ei enää täytä sähköturvallisuuslain (L 1135/2016, 6 §) mukaista vaatetta siitä, että sähkölaitteistosta ei saa aiheutua hengen-, terveyden- tai omaisuuden vaaraa.

Tämän työn johtopäätöksenä voidaan todeta, että sähköjakeluverkot voidaan edelleen rakentaa SFS 6001-standardin vaateiden mukaisesti, mutta sähköverkkojen suojauksessa tulisi minimoida henkilövahinkojen riskit. Uuden IFPTOC-suojan avulla sähköverkkoyhtiöt voivat helposti toteuttaa niin SFS 6001-standardin U_{Tp} -käyrien kuin IEC-60479-1-standardin C-käyrien mukaisia maasulkuvian poiskytkentäaikoja. Maasulkuvikojen aiheuttamien vaarajännitteiden riskejä voidaan täten pienentää käyttämällä adaptiivista maasulkusuojausta, joka toimii luotettavasti erilaisissa sähköverkon vika-, häiriö- ja käyttötilanteissa. Lisäksi adaptiivisen suojausavulla jokainen sähköverkkoyhtiö voi helposti määrittellä riittävän turvallisuustason oman jakeluverkkonsa rakenteen ja maadoitusolosuhteiden mukaisesti.

Kosketusjännitteeseen perustuvan maasulkusuojauksen avulla vältetään myös etukäteen tehtävien kosketusjännitetarkastelujen haasteet vikavirran määrittelyssä. Verkstolaskennan avulla ei ole välttämätöntä määrittellä maasulkuvirran tai kosketusjännitteiden suuruutta tarkasti, sillä vikavirtaestimaatin mukaan säätyvän kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen avulla voidaan reaaliaikaisesti hallita kosketusjänniteriskiä. Mitä suurempi on vikavirtaestimaatin ja verkoston maadoitusolosuhteiden mukaan määritelty vaarajännite-estimaatti, niin sitä nopeammin suojaus kytkee vian pois verkosta. Tällöin verkkoyhtiön tulee kuitenkin huolehtia, että jakeluverkon maadoitusolosuhteet pysyvät suojausavun edellyttämällä tasolla.

Voidaan todeta, että tämän tutkimuksen tavoitteet saavutettiin, sillä ennalta asetettuihin työhypoteeseihin löydettiin selkeät ratkaisut. Tämän tutkimuksen tulosten pohjalta voidaan todeta, että keskijänniteverkon maasulkuvikojen aiheuttamaa vaarajänniteriskiä voi pienentää käyttämällä adaptiivista maasulkusuojausta. Lisäksi voidaan todeta, että keskijänniteverkon maasulkuvian aiheuttaman vaarajännitteen suuruus on riippuvainen sähköjakeluverkon rakenteesta ja maadoitusolosuhteista. Myös sähköjakeluverkon erilaiset vika- ja käyttötilanteet vaikuttavat vaarajänniteriskin muodostumiseen. Vaarajännitteitä voidaan pienentää rajoittamalla vikavirtaa ja parantamalla sähköjakeluverkon maadoitusolosuhteita. Tässä tutkimuksessa tuotiin myös esille, että vaarajännitteiden vaarallisuus on riippuvainen vaarajännitteen suuruudesta ja sille altistumisajasta. Täten sähköjakeluverkkojen maasulkusuojauksen tulee toimia käänteisaikaisesti, eli suojausavun toiminta-aika lyhenee maasulkuvirran kasvaessa. Tämän tutkimuksen tulokset varmentavat myös uudenlaisen kosketusjänniteperustaisen maasulkuvirtasuojauksen toiminnan. Uuden suojausavun avulla sähköjakeluverkkojen maasulkusuojaus voidaan toteuttaa luotettavasti kaikissa

sähköverkon eri vika- ja käyttötilanteissa sekä erilaisilla verkon nollapisteen maadoitustavoilla riippumatta siitä, onko verkko ilmajohto- vai maakaapeliverkkoa.

7.2 Jatkotoimenpiteet ja -tutkimusaiheet

Alva Sähköverkko Oy:n tavoitteena on saada tulevaisuudessa suojattua koko keskijännitejakeluverkko muuttuva-aikaisen maasulkuvirtasuojauksen avulla, jotta Kukkumäen sähköaseman syöttämän jakeluverkon tasoinen turvallisuus saavutetaan myös muiden sähköasemien syöttämillä alueilla. Käytännössä tämä ei tapahdu nopealla aikataululla, sillä uuden IFPTOC-suojausominaisuuden käyttöönotto vaatii vanhemman sähköaseman toisiojärjestelmän uusinnan eli relevaihdon. Sähköasemien releuusintoja tehdään kuitenkin yleensä vain noin 20–30 vuoden välein, joten uudenlaisen maasulkuvirtasuojauksen laajempi käyttöönotto on riippuvainen Alva Sähköverkko Oy:n sähköasemien korvausinvestointiohjelman toteutusaikataulusta. ABB Oy:n uutta IFPTOC-suojasta ei ole toistaiseksi saatavilla takautuvasti vanhempiin suojaroleisiin. Alva Sähköverkko Oy:llä on käynnistynyt talvella 2024 sähkönjakeluverkon maadoitusverkkoihin liittyvä selvitys, jossa tarkastellaan yhteen liitettyjen maadoitusverkkojen muodostumista Alva Sähköverkko Oy:n jakelualueella. Tämän selvityksen jälkeen voidaan määritellä IFPTOC-suojan asetelut uudelleen vallitsevien maadoitusolosuhteiden ja halutun turvallisuustason mukaisesti.

Jatkotutkimusaiheena voisi olla laajan maadoitusverkon sekä yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien alueilla tehdyt maadoitus- ja kosketusjännitemittaukset, joiden avulla saadaan määriteltyä todelliset reduktiokertoimet erilaisille verkkorakenteille ja verkostotopologioille. Tutkimuksen avulla voitaisiin selvittää kaapelivaippojen, keskusköyden ja erillisten maadoitusjohtimien reduktion vaikutus vaarajännitteiden syntymiseen. Lisäksi voitaisiin tutkia kaapelivaippojen kosketussuojien pitkittäisimpedanssin vaikutus vaarajännitteiden muodostumiseen. Mittausten avulla voitaisiin määritellä turvalliset kosketusjänniterajat erilaisille verkkorakenteille ja -topologioille. Tutkimustulosten perusteella voitaisiin myös laatia verkkoyhtiöille yleiset suositukset, joiden mukaan erilaisten maadoitusjärjestelmien alueella olevien sähkönjakelujärjestelmien maasulkusuojaus sekä maasulkuvirran kompensointi tulisi toteuttaa huomioiden verkoston erilaiset vika- ja käyttötilanteet.

Yhtenä jatkotutkimusaiheena voisi olla myös IFPTOC-suojaan mahdollisesti tulevaisuudessa implementoitavien IEC-60479-1-standardin C-käyrien mukaisten laukaisuaikojen käyttöönoton edellytykset. Eri verkkoyhtiöiltä saatujen häiriötallenteiden avulla voisi tutkia verkoston käyttövarmuuden ja eri laukaisukäyrien välistä suhdetta. Tutkimustulosten perusteella voisi laatia IFPTOC-suojaan uudet laukaisukäyrät, joissa olisi nykyisiä SFS 6001-standardin vaateita tiukemmat maasulkuvikojen poiskytkentäajat, ja jotka olisivat optimoituja henkilöturvallisuuden sekä sähköjakeluverkon käyttövarmuuden kannalta.

IFPTOC-suojaan tulisi harkita myös sammutuskelan kyllästymisen tunnistavan suojausmoduulin lisäys. Sammutetussa verkossa erityisesti sähköaseman lähialueen maasuluissa saattaa esiintyä suuri hitaasti vaimeneva tasavirtakomponentti, joka aiheuttaa ongelmia sähköaseman katkaisijoille. Katkaisijat eivät kykene kytkemään paljon tasavirtaa sisältävää vikavirtaa poikki lyhyillä poiskytkentäajoilla, vaan valokaari saattaa jäädä palamaan auki olevan katkaisijan koskettimien välille. Tällöin vikavirta katkeaa vasta sitten, kun tasavirtakomponentti on vaimentunut riittävästi.

Olisi lisäksi mielenkiintoista selvittää, minkä verran Suomessa tai maailmalla on tapahtunut selittämättömiä kuolemaan johtaneita sähkötapaturmia, joissa henkilön on todettu olleen sähkölaitteen tai johtavan rakenteen läheisyydessä, mutta itse laitteessa tai rakenteessa ei ole havaittu vikaa tai poikkeavuutta. Sähkölaitteen runkoon tai muuhun johtavaan osaan voi muodostua kosketeltavissa oleva henkeä ja terveyttä uhkaava jännite maasulkujen seurauksena, joten kaikkien sähkötapaturmien rekisteröintiin ja käsittelyyn tulisi kiinnittää tulevaisuudessa nykyistä enemmän huomiota. Sähköjakeluverkkojen maasulkujen aiheuttamaa vaarajänniteriskiä tulisi myös tutkia enemmän poikkitieteellisesti.

7.3 Tutkimuksen luotettavuus ja pätevyys

Määrällisessä tutkimuksessa tutkimuksen luotettavuus muodostuu tulosten toistettavuuden ja pätevyys tutkimusmenetelmän soveltuvuuden kautta. Tutkimuksessa luotettavuutta voidaan arvioida tutkijan tarkalla kuvauksella tutkimuksen toteuttamisesta. Tutkimuksen luotettavuutta voidaan tarkentaa käyttämällä tutkimuksessa useita eri menetelmiä. (Hirsjärvi ym. 2009, 231–233.) Ketokivi (2015, 96–97) kuvaakin luotettavuutta reliabiliteetin ja pätevyyttä validiteetin avulla. Toistomittausreliabiliteetin avulla voidaan kuvata samasta kohtaa samalla mittarilla eri ajankohtina

tehtyjen mittaustulosten yhtenevyyttä. Vaihtoehtoisilla mittareilla samasta kohdasta samanaikaisesti tehdyt mittaukset puolestaan kuvaavat sisäistä yhdenmukaisuutta. Mittauksen validiteettia tukee se, että mitataan teorian mukaista asiaa, jonka sisältö on yhdenmukainen käsitteen määrittelyn kanssa. (Mts. 96–97.)

Tutkimusaineisto muodostui eri sähkö- ja kytkinasemilta saaduista 1779:stä häiriötallenteesta ja 1,55 Gt:n verran dataa sisältävistä sähkönlaatuanalysointitallenteista sekä ABB Oy:n mittaustuloksista. Tässä työssä hyödynnettiin kuitenkin vain pientä osaa häiriötallenteista, sillä taustaverkon tallenteiden analysointi ei ollut tämän työn osalta tarpeellista. Sähkönlaatuanalysointitallenteet ja ABB Oy:n mittaustulokset puolestaan hyödynnettiin analysoinnissa lähes täysimääräisesti, sillä niiden avulla voitiin varmentaa vikavirtojen sekä kosketus- ja maadoitusjännitteiden suuruudet. Tutkimuksen luotettavuutta lisää myös ABB Oy:n yhtenevät rinnakkaiset mittaustulokset. Tutkimuksen pätevyyttä tukevat tutkimustulosten yhteneväisyydet teoria- ja tutkimustiedon kanssa. Tutkimustulosten luotettavuutta tukee myös lineaarisen regressiomallin avulla esitetyt mittaustulokset, joiden regressiomallin selitysaste on hyvin lähellä arvoa yksi, eli mallin x -muuttujien avulla ennustetut y -muuttujien arvot vastaavat hyvin tarkasti mitattuja arvoja (Ketokivi 2015, 134–136, 149–150).

Tässä tutkimuksessa on noudatettu Tutkimuseettisen neuvottelukunnan ohjeistuksia hyvästä tieteellisestä käytännöstä (Keiski, Hämäläinen, Karhunen, Löfström, Näreaho, Varantola, Spoof, Tarkiainen, Kaila & Aittasalo 2023; Sarajärvi & Tuomi 2018, 165–166). Tutkimusongelma ja tavoitteet on esitetty täsmällisesti. Tutkimuksen toteutus ja tutkimusmenetelmät sekä aineistonkeruu on kuvattu järjestelmällisesti. Tutkijana olen analysoinut tutkimusaineiston parhaani mukaan sekä raportoinut tulokset tarkasti ja selkeästi. Opinnäytetyössä käytetyt ratkaisut ja saadut johtopäätökset on perusteltu tutkimuksen kontekstiin soveltuvan lähdekirjallisuuden avulla. (Vilka 2015, 39.) Tämä opinnäytetyö on laadittu JAMK:n raportointiohjeistuksen mukaisesti, ja raportin kieliasu on kirjoitettu oikeaoppisesti. Myös lähdeviitteiden merkinnät on laadittu huolellisesti.

Ketokivi (2015, 248) tuo esille, että Abelsonin (1995) mukaan argumentin voi hyväksyä tieteelliseksi tiedoksi, kun se täyttää viisi käyttökelpoista kriteeriä. Tulosten tulee olla *tilastollisesti merkittäviä* käytännön ja teorian näkökulmasta katsottuna. Tutkimustulosten *esitystavasta* on käytävä

ilmi tarpeellinen tieto, ja se on tulkittava teorian kielellä. Tulosten tulee olla *yleistettävissä* ja hyödynnettävissä muissa tutkimuskonteksteissa. Lisäksi tulosten tulee olla *mielenkiintoisia* ja *uskottavia*. (Mts. 248–253.) Mielestäni tämän tutkimuksen argumentointi täyttää kaikki edellä mainitut kriteerit, joten tutkimustuloksia voidaan pitää tieteellisesti merkittävinä. Tutkimuksen argumentoinnin mielenkiintoisuutta kuitenkin vähentää se seikka, että osa tuloksista pohjautuu yleisesti tunnettuun Ohmin lakiin.

Tässä tutkimustyössä ei tarvittu tutkimuslupaa, sillä tutkimuksessa ei käsitellä henkilötietoja tai muita eettistä harkintaa vaativia tietoja. Opinnäytetyön suorittamisesta on kuitenkin tehty opinnäytetyösopimus työn toimeksiantajan eli Alva Sähköverkko Oy:n, työn laatijan ja Jyväskylän ammattikorkeakoulun kanssa. Opinnäytetyö ei sisällä salassa pidettäviä osuuksia.

Lähteet

Alakare, J., Lindahl, L. & Suojanen, K. 2023. Sähkötapaturmat. Kustannus Oy Duodecim. 139, 1383–1390. Viitattu 25.3.2024. <https://www.duodecimlehti.fi/xmedia/duo/duo17828.pdf>.

Altonen, J. 2023. Syksyn kenttäkokeet - vikapaikan järjestelyt. Sähköpostiviesti 15.6.2023. Vastaanottaja M. Leppämäki. Kukkumäen sähköaseman maasulkutestien järjestelyihin liittyvä sähköpostikeskustelu.

Altonen, J. 2024. Kukkumäen loppupalaverin materiaalia. Sähköpostiviesti 11.4.2024. Vastaanottaja M. Leppämäki. Kukkumäen sähköaseman maasulkutestien tuloksia käsittelevä sähköpostikeskustelu.

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. 4. korjattu ja täydennetty p. Helsinki: Otatieto.

Colella, P., Napoli, R., Pons, E., Tommasini, R., Barresi, A., Cafaro, G., De Simone, A., Di Silvestre, M. L., Martirano, L., Montegiglio, P., Morozova, E. R., Parise, G., Parise, L., Sanseverino, E. R., Torelli, F., Tummolillo, F., Valtorta, G. & Zizzo, G. 2016. Currents Distribution During a Fault in an MV Network: Methods and Measurements. IEEE transactions on industry applications, 52, 6, 4585–4593. Viitattu 8.2.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Di Silvestre, M. L., Dusonchet, L., Mangione, S. & Zizzo, G. 2016. On the effects of HV/MV stations on global grounding systems. Konferenssijulkaisu. Viitattu 8.2.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot 1: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.

Gatta, F., Geri, A., Lauria, S. & Maccioni, M. 2018. An Equivalent Circuit for the Evaluation of Cross-Country Fault Currents in Medium Voltage (MV) Distribution Networks. Energies (Basel), 11, 8, 1929. Viitattu 7.2.2024. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Griffiths, I., Woodhouse, D. & Palmer, S. 2013. Use of finite probabilistic modelling to establish earthing hazard limits. Viitattu 7.2.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Hartmann, B., Vokony, I., Taczi, I. & Kiss, J. 2019. Effect of Extensive Cabling on Efficiency of Resonant Earthing Applied in Medium-Voltage Distribution Networks: A Hungarian Case Study. Viitattu 18.5.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Heikkilä, T. 2014. Tilastollinen tutkimus. 9. uud. p. Helsinki: Edita.

Heine, P. & Lehtonen, M. 2003. Voltage sag distributions caused by power system faults. IEEE transactions on power systems, 18, 4, 1367–1373. Viitattu 16.3.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tammertekniikka.

Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2009. Tutki ja kirjoita. 15. p. Hämeenlinna: Tammi.

IEC 60479-1:2018. Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects. Geneva: The International Electrotechnical Commission.

IEC 60479-2:2019. Effects of current on human beings and livestock – Part 2: Special aspects. Geneva: The International Electrotechnical Commission.

IEC 60479-5:2007. Effects of current on human beings and livestock – Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects. Geneva: The International Electrotechnical Commission.

IEC 60909-0:2016. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents. Geneva: The International Electrotechnical Commission.

Ihonen, T., Kupila, T. & Keränen, T. 2016. Development of major power disruption management. Viitattu 18.5.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1999. IEEE Std C37.111-1999: IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems. Julkaistu 1999. Viimeisin muutos 2.2.2005. Viitattu 24.5.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Jaakkola, J. & Kauhaniemi, K. 2013. Factors affecting the earth fault current in large-scale rural medium voltage cable network. Konferenssijulkaisu. Viitattu 9.2.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas: Näin kirjoitan opinnäytetyön tai pro gradun alusta loppuun. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kauppinen, S. 2023. Maasulkuilmiön hallinta sähkönjakeluverkossa. Opinnäytetyö, YAMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, tekniikan ala, kestävä energia tutkinto-ohjelma. Viitattu 22.3.2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2023060722624>.

Ketokivi, M. 2015. Tilastollinen päättely ja tieteellinen argumentointi. 2. laaj. laitos. Helsinki: Gaudemus.

Kompensoitu verkko ja maasulkusuojaus. 2023. Koulutusmateriaali. Relesuojauksen jatkokurssi sähkölaitoksille 17.-18.1.2023 – Keski-jänniteverkkojen relesuojaus. Helsinki: Kiwa Impact Oy.

Kono, M., Takahashi, T., Nakamura, H., Miyaki, T. & Rekimoto, J. 2018. Design Guideline for Developing Safe Systems that Apply Electricity to the Human Body. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*. 25, 1–36. Viitattu 6.2.2024. https://www.researchgate.net/publication/325707438_Design_Guideline_for_Developing_Safe_Systems_that_Apply_Electricity_to_the_Human_Body.

Kroll, M. W., Panescu, D., Perkins, P. E., Hirtler, R., Koch, M. & Andrews, C. J. 2021. Ventricular Fibrillation Threshold vs Alternating Current Shock Duration. Konferenssijulkaisu. Viitattu 18.5.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Küchler, B., Schmidt, U. & Hänsch, J. 2021. Harmonic Current Distribution in Grounding Systems of Cabled Medium Voltage Grids during Single-Pole Ground Fault. *Energies (Basel)*, 14, 4, 1110. Viitattu 5.2.2024. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

L 588/2013. Sähkömarkkinalaki. Annettu 9.8.2013. Viimeisin muutos 1.6.2023. Viitattu 21.5.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Pidm45843170894144>.

L 1135/2016. Sähköturvallisuuslaki. Annettu 16.12.2016. Voimaan 1.1.2017. Viitattu 28.5.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>.

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. p. Helsinki: Otatieto Helsinki University Press.

Laukkanen, T. 2023. Maasulkuvirtojen ja kosketusjännitteiden hallinta maasulkuvirran kompensoinnilla. Diplomityö. Lappeenrantaan–Lahden teknillinen yliopisto LUT, LUT Energiajärjestelmät, sähkötekniikka. Viitattu 22.3.2024. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2023052548030>.

Li, Z., Cao, J., Du, Y., Ding, Y., Zhang, Y., Jia, C., Qiu, F., Du, Z. & Chen, M. 2023. Ground Potential Distribution and Human-body Touch Voltage in Old Residential Communities. *IEEE transactions on industry applications*, 1–10. Viitattu 11.6.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Linja-aho, V. 2020. Fatal electrical accidents in Finland 1980–2019 – trends and reducing measures. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*. 4, 2, 37–47. Viitattu 19.3.2024. https://doi.org/10.24840/2184-0954_004.002_0004.

Louro, M. & Ferreira, L. 2021. Underground MV Network Failures' Waveform Characteristics—An Investigation. *Energies (Basel)*, 14, 5, 1216. Viitattu 16.3.2024. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Mallits, T., Schmutzer, E., Fickert, L., Hohn, T. & Hufnagl, E. 2016. The role of global earthing systems to ensure the reliability of electrical networks. Konferenssijulkaisu. Viitattu 16.3.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Mitä sähköverkkoyhtiöiltä vaaditaan toimitusvarmuuden parantamiseksi? 2023. Energiaviraston verkkosivusto. Viitattu 21.5.2023. <https://energiavirasto.fi/kuluttajainfo>.

Mäkinen, A. 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä. Raportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Viitattu 12.2.2024. https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Maadoitusjarjestelmat_loppuraportti_TTY.pdf.

Mörsky, J. 1993. Relesuojaustekniikka. 2. korjattu p. Espoo: Otatieto.

Nikander, A. & Mäkinen, A. 2017. Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset – suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet. Raportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Viitattu 9.2.2024. https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Laajan_kaapeloidun_keskijanniteverkon_maasulkuilmioiden_vaikutukset_TTY_2017.pdf.

Nikander, A. & Pakonen, P. 2022. Yliaaltojen arviointi, vaikutukset ja merkitys kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkutilanteissa. Raportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Viitattu 22.3.2024. https://energia.fi/wp-content/uploads/2022/06/Yliaaltoarvio_Loppuraportti_TAU_2022.pdf.

Parise, G., Parise, L. & Martirano, L. 2015. Needs of Management of the Grounding Systems. IEEE transactions on industry applications, 51, 6, 5017–5022. Viitattu 11.6.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Peng, Z. & Shikui, C. 1995. Study on electrocution death by low-voltage, Forensic Science International, 76, 2, 115–119. Viitattu 11.6.2023. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(95\)01804-2](https://doi.org/10.1016/0379-0738(95)01804-2).

Pons, E., Colella, P., Tommasini, R., Napoli, R., Montegiglio, P., Cafaro, G. & Torelli, F. 2015. Global Earthing System: Can Buried Metallic Structures Significantly Modify the Ground Potential Profile? IEEE transactions on industry applications, 51, 6, 5237–5246. Viitattu 7.2.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Reikko, J., Keskinen, A. & Ristimäki, R. 2019. Touch voltages and earth fault currents in a rural large-scale underground cable network with connected earthing systems. Konferenssijulkaisu. Viitattu 9.2.2024. <https://cired-repository.org/handle/20.500.12455/392>.

REX640 Technical Manual. 2023. Vaasa: ABB Distribution Solutions, Digital Substation Products. REX640 suojausjärjestelmän tekninen ohjekirja. Viitattu 12.2.2024. <https://techdoc.relays.protection-control.abb/r/REX640-Technical-Manual/PCL4/en-US/REX640-Technical-Manual>.

Roberts, D. 2010. 50-V Shock Hazard Threshold. IEEE transactions on industry applications, 46, 1, 102–107. Viitattu 18.5.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Sa'ed, J. A., Di Silvestre, M. L., Sanseverino, E. R., Zizzo, G., Colella, P. & Pons, E. 2017. On the hazardous situations due to the presence of HV/MV substations in urban areas. Viitattu 24.5.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Sarajärvi, A. & Tuomi, J. 2018. Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi. Uudistettu laitos. Helsinki: Tammi.

Schneeweiss, P., Panescu, D., Stunder, D., Kroll, M. W., Andrews, C. J. & Theiler, T. 2021. Computational models for contact current dosimetry at frequencies below 1 MHz. Medical & biological engineering & computing, 59, 1, 107–119. Viitattu 11.6.2023. <https://janet.finna.fi>, ProQuest Central.

SFS 6000-1:2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. 5. p. Helsinki: SESKO ry.

SFS 6000-5-54:2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–54: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojajohtimet. 5. p. Helsinki: SESKO ry.

SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset. 5. p. Helsinki: SESKO ry.

Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen. 2022. Energiategollisuus ry:n verkostosuositus RJ 22:22. Helsinki: Adato Energia Oy.

Tarko, R., Kmak, J., Nowak, W. & Szpyra, W. 2022. Statistical Assessment of Electric Shock Hazard in MV Electrical Power Substations Supplied from Networks with Non-Effectively Earthed Neutral Point, Energies, 15, 4, 1560. Viitattu 7.2.2024. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Tulomäki, H. 2017. Maasulkujen analysointi häiriötallennuksilla JE-Siirto Oy:ssä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta. Viitattu 22.3.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201704201312>.

Tulonen, T. 2010. Electrical accident risks in electrical work. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 25.4.2024. <https://tukes.fi/documents/5470659/6424402/Electrical+accident+risks+in+electrical+work.pdf/5e9a37cc-a3cf-4b30-ad4a-1981fab82c35/Electrical+accident+risks+in+electrical+work.pdf?version=1.1&t=1526765746000&download=true>.

Keiski, R., Hämäläinen, K., Karhunen, M., Löfström, E., Näreaho, S., Varantola, K., Spoofo, S. K., Tarkiainen, T., Kaila, E. & Aittasalo, M. 2023. Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa: Tutkimuseettisen neuvottelukunnan HTK-ohje 2023. 1. p. Helsinki: Tutkimuseettinen neuvottelukunta.

Vilkka, H. 2015. Tutki ja kehitä. 4. uud. p. Jyväskylä: PS-kustannus.

Vycital, V., Ptacek, M., Topolánek, D. & Toman, P. 2019. On Minimisation of Earthing System Touch Voltages. *Energies (Basel)*, 12, 20, 3838. Viitattu 7.2.2024. <https://janet.finna.fi>, ProQuest.

Wahlroos, A. 2023. Kukkumäen releanalyysi/viimeisen kokeen juurisyy/käyttöpäivät. Sähköpostiviesti 4.10.2023. Vastaanottaja M. Leppämäki. Kukkumäen sähköaseman maasulkutestien tuloksiin liittyvä sähköpostikeskustelu.

Wahlroos, A. & Altonen, J. 2014. Application of Novel Multi-frequency Neutral Admittance Method into Earth-Fault Protection in Compensated MV-networks. Viitattu 5.2.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

Wahlroos, A., Altonen, J., Pitkänen, R. & Kauppinen, S. 2019. Improving personal safety in MV-networks through novel earth-fault current based feeder protection. *CIREC*, 25th International Conference on Electricity Distribution. Viitattu 30.5.2023. <https://www.cired-repository.org/bitstream/handle/20.500.12455/120/CIREC%202019%20-%2020695.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Wahlroos, A., Altonen, J., Uggla, U. & Wall, D. 2013. Application of novel cumulative phasor sum measurement for earth-fault protection in compensated MV-networks. Viitattu 18.5.2023. <https://janet.finna.fi>, IEEE Electronic Library (IEL).

WO 193529 A1. 2016. Method in the earth fault protection of a three-phase electrical network. Jyväskylän Energia Oy, Jyväskylä, Suomi. (Kauppinen, S. & Pitkänen, R.) PCT/FI2016/050158, 14.03.2016. Julk. 8.12.2016. Viitattu 12.2.2024. <https://patentimages.storage.googleapis.com/f0/02/44/13b1aef9be8d25/WO2016193529A1.pdf>.

Ylinen, T., Koivisto, P. & Kauppila, J. 2019. Maadoituskirja. 7. uusittu p. Espoo: Sähköinfo.

Liitteet

Liite 1. Maasulkukokeiden testiohjelma ja testien aikaiset havainnot

	Pvm.	Koe nro	Aika	Lähtö	Kuvaus	Tarkistukset/huomiot ennen testiä	Vika-aika	Vika-tyyppi /RF	Vaihe vika-paikka/ (asema)	Asettelut	Katkollinen vika	Iv (A)	Id (A)	Kommentit
	11.9.2023		7:30			1. päivän aloitus								1. päivä: Tutkitaan miten vikapaikan maadoitusjärjestely vaikuttaa syntyviin vaarajännitteisiin varioimalla vikapaikan maadotusta (RE) sekä sen yhteyttä ympäröivään maadoitusjärjestelmään - Ajatuksena, että kaikki viat tehtäisiin ei-katkollisina (sg2 käytössä). Huom. klooni-purkki on aina 'laukaiseva' (sg1 käytössä, tallenteseen OPERATE).
	11.9.2023					-Tarkistetaan/valitaan testilähdön J24 kuormitus sen mukaan, onko vika ei-katkollinen vai katkollinen -Varmistetaan yhdellä kokeella, että kaikki toimii -Varmistetaan häiriötallenteista, että kaikki on kunnossa ja että testejä voidaan jatkaa -Uo-trig. (ROVPTOV1) kaikissa purkeissa oltava sopivasti suurempi kuin terveen tilan Uo-tarkistus!								Testilähdön kuormitus, vika ei-katkollinen (ks. sarake M): keinokuorma + oikea kuorma >1MVA TAI vain oikea kuorma >1MVA Testilähdön kuormitus, vika katkollinen (ks. sarake M): vain keinokuorma ~0.5MVA (tai tyhjääkävyä johto) Valitaan kuormitus sen mukaan onko vika ei-katkollinen vai katkollinen Mitä vikoja tehdään katkollisina? Esim. suurempivirtaiset viat (vinovirtitys suuri)
ABB	11.9.2023	1	11:26	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Tutkitaan miten vikapaikan maadoitusjärjestely vaikuttaa syntyviin vaarajännitteisiin Pystymaadoitus 1 = RE~10ohm	0.5s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Vikapaikassa pystymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Huom. J24=vikalähtö, Jxx=kaikki taustaläh-döt, tuotanto=KUÄ käytössä olevat releet, R&D=ABB:n 'proto', klooni=KUÄ:n releen ko-pio Lähdöllä ~ei kuormaa -> varmistetaan selektiivisyys vika-aika vs. sg1 Vikapaikan skopessa skaaloissa korjattavaa! Huom. Lähdöllä J11 kela (vastus ei ole päällä) -> ylikompensoitu johtolähtö (kuormitettu)
ALVA	11.9.2023	1	11:26	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Tutkitaan miten vikapaikan maadoitusjärjestely vaikuttaa syntyviin vaarajännitteisiin Pystymaadoitus 1 = RE~10ohm	0.5s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Vikapaikassa pystymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Huom. J24=vikalähtö, Jxx=kaikki taustaläh-döt, tuotanto=KUÄ käytössä olevat releet, R&D=ABB:n 'proto', klooni=KUÄ:n releen ko-pio Lähdöllä ~ei kuormaa -> varmistetaan selektiivisyys vika-aika vs. sg1
ABB	11.9.2023	2	13:56	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	kyllä	-3	10	Vikapaikassa pystymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Lähdöllä ~ei kuormaa
ALVA	11.9.2023	2	13:56	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	kyllä	-3	10	Vikapaikassa pystymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Lähdöllä ~ei kuormaa
ABB	11.9.2023	3	15:01	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.2s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Vikapaikassa pystymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Lähdöllä ~ei kuormaa -> varmistetaan selektiivisyys vika-aika vs. sg2. Vikavirta luokkaa 25A!!! Vikapaikan UE-kanavat korruptoituneita!!! Mittapiirin sulakkeet paloiivat!!! Vikavirta luokkaa 25A
ALVA	11.9.2023	3	15:02	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Kela ei kerennyt säätämään. Vioon viritys n. 25 A. Jännitekanavien sulakesuojaus toimi ja mittaukset eivät onnistuneet.	1.2s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	25	10	Vikapaikassa pystymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Lähdöllä ~ei kuormaa -> varmistetaan selektiivisyys vika-aika vs. sg2
ABB	11.9.2023	4	15:33	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.2s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa pystymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Lähdöllä normaali kuorma. Vikapaikan UE-kanavat korruptoituneita!!! Mittapiirin sulakkeet paloiivat!!! Vikapaikan UE-kanavat korruptoituneita!!! Mittapiirin sulakkeet paloiivat!!! Vikavirta luokkaa 8-12A

ALVA	11.9.2023	4	15:33	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Jännitekanavia rikki? Eteläpor-tista kuormaa lähdöllä.	1.2s	solid ef / 0 ohm			ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään Lähdöllä normaali kuorma
ABB	11.9.2023	5	16:23	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.2s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa kiinni maadoituksessa. Nyt skope OK, mutta IE-virran mittaus oli väärästä paikasta!
ALVA	11.9.2023	5	16:23	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Maadoituksiin menevä virta mitattu väärästä kohtaa. Vaih-detaan seuraavaan testiin mit-taamaan vain 10 ohmin maadoitukseen menevää virtaa.	1.2s	solid ef / 0 ohm			ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa kiinni maadoituksessa
ABB	11.9.2023	6	16:57	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.2s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa kiinni maadoituksessa. IE-mittauksen paikka vaihdettu. Kaikki vikapai-kan riviliittimiltä saadut signaalit korruptoitu-neet!
ALVA	11.9.2023	6	16:57	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Korjattu virtamuuntajan si-jainti mittaamaan 10 ohm maadoituksiin menevää virtaa.	1.2s	solid ef / 0 ohm			ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa kiinni maadoituksessa
ABB	11.9.2023	7	17:47	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.2s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa kiinni maadoituksessa.
ALVA	11.9.2023	7	17:47	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Testi onnistui. Fluke ei tripan-nut.	1.2s	resistive / 500 ohm			ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa kiinni maadoituksessa.
ABB	11.9.2023	8	18:05	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.2s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa & köysi kiinni maadoituksessa.
ALVA	11.9.2023	8	18:05	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.2s	resistive / 500 ohm			ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 1, tulevan kaapelin vaippa & köysi kiinni maadoituksessa.
ABB	11.9.2023	9	18:15	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Pystyymaadoitus 2 = RE~30ohm	1.2s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 2, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään
ALVA	11.9.2023	9	18:15	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	30 ohm maadoitus.	1.2s	resistive / 500 ohm			ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 2, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään
ABB	11.9.2023	10	18:42	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Pystyymaadoitus 2 = RE~60ohm	1.2s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 3, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään
ALVA	11.9.2023	10	18:42	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	60 ohm maadoitus. Fluke trippausasetus muutettu.	1.2s	resistive / 500 ohm			ei	-3	10	Vikapaikassa pystyymaadoitus 3, maadoituk-sella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään
	12.9.2023		7:30			2. päivän aloitus								2. päivä: Testataan ja verifioidaan suojaus-kokonaisratkaisun performanssi normaalisissa syöttötilanteissa varioimalla parametrejä IV, RF ja IF - Ajatuksena, että mahdollisimman moni koe tehtäisiin ei-katkoisina (sg2 käytössä). Huom. Klooinpurkki on aina 'laukaiseva' (sg1 käytössä, tallenteseen OPERATE). - Huom. Mikä tahansa vika voidaan myös tehdä katkoisena (sg1 käytössä), myös yksittäisen kokeen tai kokelden toisto katkoisena on mahdollista (J24 kuorma = keino-kuorma)
	12.9.2023					Tarkistetaan/valitaan testiläh-dön J24 kuormitus sen mu-kaan, onko vika ei-katkoisinen vai katkoisinen								Testilähdön kuormitus, vika ei-katkoisinen (ks. sarake M): keino-kuorma + oikea kuorma >1MVA TAI vain oikea kuorma >1MVA Testilähdön kuormitus, vika katkoisinen (ks. sarake M): vain keino-kuorma ~0.5MVA (tai tyhjäkäyvä johto) Valitaan kuormitus sen mukaan onko vika ei-katkoisinen vai katkoisinen Mitä vikoja tehdään katkoisina? Esim. suu-rempi virittiset viat (vinovirtitys suuri)
ABB	12.9.2023	11	8:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Suojaus-kokonaisratkaisun performanssi f(IV,RF,IF) IF~7A	1.2s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuo-tanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuo-tanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Huom. J24=vikalähtö, Jxx=kaikki taustaläh-döt, tuotanto=KUÄ käytössä olevat releet, R&D=ABB:n 'proto', klooni=KUÄ:n releen ko-pio Vikapaikassa 10ohm pystyymaadoitus, maa-doituksella ei yhteyttä ympäröivään laajem-paan maadoitusjärjestelmään Huom. Lähdöllä J11 kela (vastus ei ole päällä) -> ylikompensoitu johtolähtö (kuormitettu)

ALVA	12.9.2023	11	8:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Vikapaikan maadoitusjärjestely 10 ohm Suojauksen performanssi f(lv,RF,IF) IF~7A. Kuormitusvirta 27 A. Virhelaukaisu.	1.2s	resistive / 500 ohm		J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Normaali kompensointi, normaali syöttötilanne Huom. J24=vikalähtö, Jxx=kaikki taustalähdöt, tuotanto=KUÄ käytössä olevat releet, R&D=ABB:n 'proto', klooni=KUÄ:n releen kopio
ABB	12.9.2023	12	9:03	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~13A	1.2s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-20	10	J24 laukesi -> lyhennetään vika-aikaa, ja nostetaan MFA:n Min operate-virtaa 4A:iin
ALVA	12.9.2023	12	9:03	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Virhelaukaisu. Asetteluaikaa lyhennettävä.	1.2s	resistive / 500 ohm			ei	-20	10	Toistoja tarpeen mukaan
ABB	12.9.2023	13	9:57	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~13A	1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-20	10	Uusinta, J24 katkaisija pysyi kiinni -> ok
ALVA	12.9.2023	13	9:57	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~7A. MFA1 asettelu 3A ->4 A.	1.0s	resistive / 500 ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	14	10:06	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~20A	1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	40	10	
ALVA	12.9.2023	14	10:06	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 500 ohm			ei	40	10	
ABB	12.9.2023	15	10:14	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~20A	1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-60	10	
ALVA	12.9.2023	15	10:14	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 500 ohm			ei	-60	10	
ABB	12.9.2023	16	10:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1k ohm	L1E/(L1E)		ei	-60	10	
ALVA	12.9.2023	16	10:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1k ohm			ei	-60	10	
ABB	12.9.2023	17	10:35	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	
ALVA	12.9.2023	17	10:35	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1k ohm			ei	-4	10	
ABB	12.9.2023	18	10:58	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	
ALVA	12.9.2023	18	10:58	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm			ei	-4	10	
ABB	12.9.2023	19	11:10	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm	L1E/(L1E)		ei	-20	10	
ALVA	12.9.2023	19	11:11	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	20	11:24	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm	L1E/(L1E)		ei	40	10	
ALVA	12.9.2023	20	11:24	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm			ei	40	10	
ABB	12.9.2023	21	11:35	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm	L1E/(L1E)		ei	-60	10	

ALVA	12.9.2023	21	11:34	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1.5k ohm			ei	-60	10	
ABB	12.9.2023	22	11:53	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 2.5k ohm	L1E/(L1E)		ei	-60	10	
ALVA	12.9.2023	22	11:53	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 2.5k ohm			ei	-60	10	
ABB	12.9.2023	23	12:06	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~4A	1.0s	resistive / 2.5k ohm	L1E/(L1E)		ei	40	10	
ALVA	12.9.2023	23	12:06	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 2.5k ohm			ei	40	10	
ABB	12.9.2023	24	13:37	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 3k ohm	L1E/(L1E)		ei	-20	10	
ALVA	12.9.2023	24	13:37	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 3k ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	25	13:53	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm	L1E/(L1E)		ei	-20	10	
ALVA	12.9.2023	25	13:53	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	26	14:01	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	
ALVA	12.9.2023	26	14:01	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm			ei	-3	10	
ABB	12.9.2023	27	14:11	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm	L1E/(L1E)		ei	40	10	EFPADM1, aika-asettelu muutettu 800ms (R&D)
ALVA	12.9.2023	27	14:11	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm			ei	40	10	
ABB	12.9.2023	28	14:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 10k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	
ALVA	12.9.2023	28	14:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 10k ohm			ei	-3	10	
ABB	12.9.2023	29	14:37	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 10k ohm	L1E/(L1E)		ei	-20	10	Kärryn skope, IE ja IB kanavat sotkussa? -> uusinta
ALVA	12.9.2023	29	14:36	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Scopen mittauksissa jotain häikkää. Uusitaan testi.	1.0s	resistive / 10k ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	30	14:51	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 10k ohm	L1E/(L1E)		ei	-20	10	Uusinta
ALVA	12.9.2023	30	14:51	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 10k ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	31	15:08	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~0.5A	1.0s	resistive / 20k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	
ALVA	12.9.2023	31	15:08	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Suojat eivät havaitse näin suurta vikavastusta.	1.0s	resistive / 20k ohm			ei	-3	10	

ABB	12.9.2023	32	15:33	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~0.5A	25.0s	resistive / 20k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Kokeillaan EFD:n toiminta -> toimi oikein
ALVA	12.9.2023	32	15:33	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Suojat eivät havaitse näin suurta vikavastusta. EFD havaitsi J24 suurirohminen maasulku.	25s	resistive / 20k ohm			ei	-3	10	
ABB	12.9.2023	33	16:00	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		25.0s	resistive / 50k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Kokeillaan EFD:n toiminta -> ei toimintaa
ALVA	12.9.2023	33	16:00	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Suojat eivät havaitse näin suurta vikavastusta. EFD havahtui verkon tilan muutokseen, mutta ei kerennyt hälyttämään.	25s	resistive / 50k ohm			ei	-3	10	
ABB	12.9.2023	34	16:30	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~30A	1.0s	resistive / 300 ohm	L1E/(L1E)		ei	-60	10	
ALVA	12.9.2023	34	16:30	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 300 ohm			ei	-60	10	
ABB	12.9.2023	35	16:56	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~33A	1.0s	resistive / 150 ohm	L1E/(L1E)		ei	40	10	Korruptio, IE ja IB (skope)
ALVA	12.9.2023	35	16:56	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 150 ohm			ei	40	10	
ABB	12.9.2023	36	17:13	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~33A	1.0s	resistive / 150 ohm	L1E/(L1E)		ei	40	10	Uusinta, nyt onnistu
ALVA	12.9.2023	36	17:13	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 150 ohm			ei	40	10	
ABB	12.9.2023	37	17:31	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~10A	1.0s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Skopen tallenne korruptoitu -> yritetään vastusjako U-kanaviin
ALVA	12.9.2023	37	17:30	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	solid ef / 0 ohm			ei	-3	10	
ABB	12.9.2023	38	18:23	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~10A	1.0s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Uusinta, vastusjako U-kanavissa, skopen skaalat muuttamatta?
ALVA	12.9.2023	38	18:23	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Jännitteenjako Ue kanavilla. 2x6,8kohm. Sulake paloi Ue kanavasta.	1.0s	solid ef / 0 ohm			ei	-3	10	
ABB	12.9.2023	39	18:49	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~20A	1.0s	solid ef / 0 ohm	L2E/(L2E)		ei	-20	10	Skopen skaalat ok (vastusjako huomioitu)
ALVA	12.9.2023	39	18:49	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Jännitteenjako Ue kanavilla. 2x6,8kohm. Sulake paloi Ue kanavasta.	1.0s	solid ef / 0 ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	40	19:16	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~40A	1.0s	solid ef / 0 ohm	L3E/(L3E)		ei	40	10	UE2-piiri vaurioitui -> onko tallenne validi?
ALVA	12.9.2023	40	19:16	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Jännitteenjako Ue kanavilla. 2x6,8kohm. Sulake poistettu Ue kanavasta. Pelkkä varistori suojana.	1.0s	solid ef / 0 ohm			ei	40	10	
ABB	12.9.2023	41	19:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~60A	0.8s	solid ef / 0 ohm	L3E/(L3E)		ei	-60	10	sg2 R&D-purkeissa, ei validia skopetallennetta!
ALVA	12.9.2023	41	19:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Poistettu Ue2 kanavan mitaus. Paloi sulake Ue1 mittauksesta.	0,8	solid ef / 0 ohm			ei	-60	10	

ABB	12.9.2023	42	20:06	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	intermittent ef / 0 ohm	L3E/(L3E)		ei	-3	10	UE1 sulake paloi, IB ja IE puuttuivat tallenteesta? (kortti rikki?)
ALVA	12.9.2023	42	20:05	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Scopen virtamittaukset näyttää nolaa. Kortti hajosi.	1.0s	intermittent ef / 0 ohm			ei	-3	10	
ABB	12.9.2023	43	20:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	intermittent ef / 0 ohm	L3E/(L3E)		ei	-20	10	IB ja IE puuttuivat tallenteesta?
ALVA	12.9.2023	43	20:24	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Ei tullut kuin pari piikkä.	1.0s	intermittent ef / 0 ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	44	20:32	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	intermittent ef / 0 ohm	L3E/(L3E)		ei	-20	10	Uusinta
ALVA	12.9.2023	44	20:32	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	intermittent ef / 0 ohm			ei	-20	10	
ABB	12.9.2023	45	20:47	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm	L3E/(L3E)		ei	-3	10	IB ja IE puuttuivat tallenteesta?
ALVA	12.9.2023	45	20:47	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	EPD havaitsi vian.	1.0s	resistive / 5k ohm			ei	-3	10	
	13.9.2023		7:30			3. päivän aloitus								3. päivä: Testataan ja verifioidaan suojauksen kokonaisratkaisun performanssi normaalissa syöttötilanteessa varioimalla parametrejä Iv, RF ja IF sekä SOTF-toiminnallisuus; Testataan myös aikaselektiivisyyden toteutuminen 'asiakasmuuntamon' suojauksen kanssa - Ajatuksena, että mahdollisimman moni koe tehtäisiin ei-katkollisina pl. SOTF- ja selektiivisyydestien viat, jotka tehdään katkollisina (sg1 käytössä). Huom. klooniipurkki on aina 'laukaseva' (sg1 käytössä, tallenteeseen OPERATE). - Huom. Mikä tahansa vika voidaan myös tehdä katkollisena (sg1 käytössä), myös yksittäisen kokeen tai kokeiden toisto katkollisena on mahdollista (J24 kuorma = keino-kuorma)
	13.9.2023					Tarkistetaan/valitaan testilähdön J24 kuormitus sen mukaan, onko vika ei-katkollinen vai katkollinen								Testilähdön kuormitus, vika ei-katkollinen (ks. sarake M); keino-kuorma + oikea kuorma >1MVA TAI vain oikea kuorma >1MVA Testilähdön kuormitus, vika katkollinen (ks. sarake M); vain keino-kuorma ~0.5MVA (tai tyhjääkyvä johto) Valitaan kuormitus sen mukaan onko vika ei-katkollinen vai katkollinen Mitä vikoja tehdään katkollisina? Esim. suurempivirtaiset viat (vinoviritys suuri)
ABB	13.9.2023	46	10:30	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Suojauksen performanssi f(Iv, RF,IF) IF~7A	1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Vikapaikassa 10ohm pystyymaadoitus, maadoituksella ei yhteyttä ympäröivään laajempaan maadoitusjärjestelmään, tarkistetaan vikapaikan mittausjärjestely. Nyt ZB/IB siirretty UE2-piiriin. Lähdöllä J11 kela kiinni (vastus pois) -> ylikompensoitu johtolähtö (kuormitettu)
ALVA	13.9.2023	46	10:30	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Testataan Ue ja IB mittauksen toiminta. IB-mittaus muutettu keskusköyteen maapiikin sijasta.	1.0s	resistive / 500 ohm			ei	-3	10	
ABB	13.9.2023	47	10:57	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	IF~20A	1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	90	10	
ALVA	13.9.2023	47	10:57	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A	Vikapaikan maadoitusjärjestely 10 ohm Suojauksen performanssi f(Iv,RF,IF)	1.0s	resistive / 500 ohm		J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	90	10	Suuri ylikompensointi, normaali syöttötilanne Huom. J24=vikalähtö, Jxx=kaikki taustalähdöt, tuotanto=KUÄ käytössä olevat releet, R&D=ABB:n 'proto', klooni=KUA:n releen kopio
ABB	13.9.2023	48	11:10	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1k ohm	L1E/(L1E)		ei	90	10	
ALVA	13.9.2023	48	11:10	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, I _c =150A		1.0s	resistive / 1k ohm			ei	90	10	

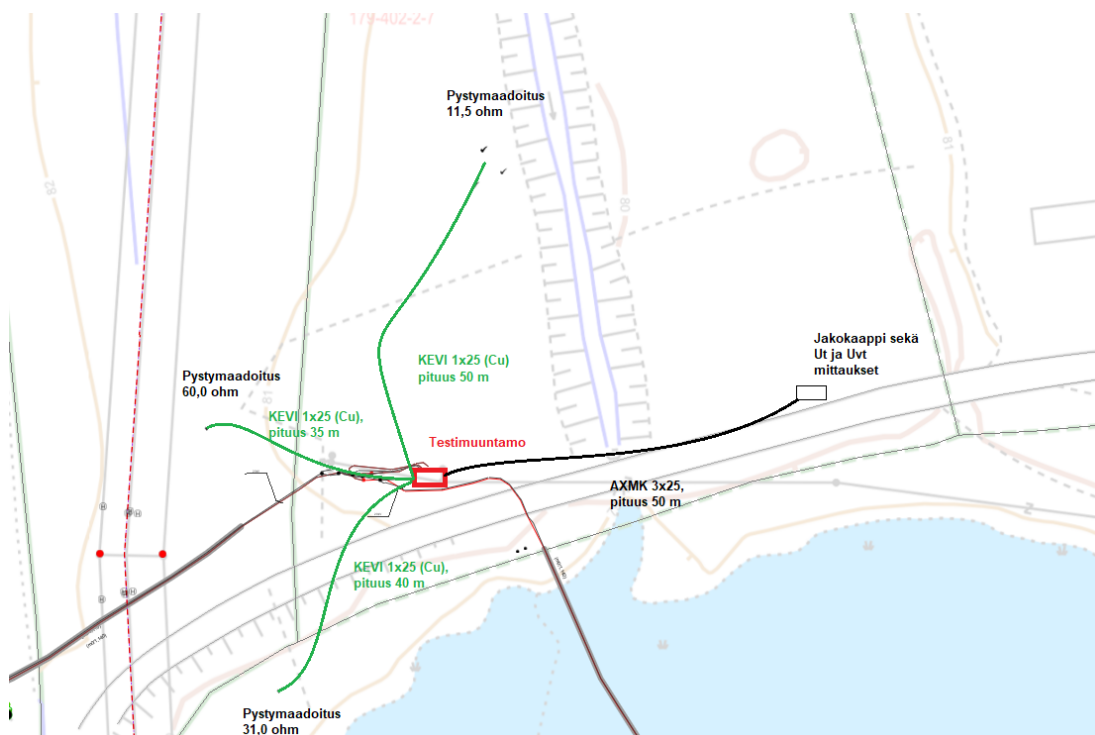
ABB	13.9.2023	49	11:29	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 2k ohm	L1E/(L1E)		ei	90	10	
ALVA	13.9.2023	49	11:29	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 2k ohm			ei	90	10	
ABB	13.9.2023	50	11:41	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~5A	1.0s	resistive / 2.5k ohm	L1E/(L1E)		ei	90	10	
ALVA	13.9.2023	50	11:41	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 2.5k ohm			ei	90	10	
ABB	13.9.2023	51	11:58	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~36A	0.8s	resistive / 300 ohm	L1E/(L1E)		ei	90	10	
ALVA	13.9.2023	51	11:58	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		0.8s	resistive / 300 ohm			ei	90	10	
ABB	13.9.2023	52	14:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Suojauksen performanssi vikaa vasten kytkettäessä IF~10A	60s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	kyllä	-3	10	Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla - 'nopea' kytkentä (säätäjä ei ehdi säätämään kelaa ennen vikaa vasten kytkentää) Vikapaikassa jännitemittaukset irti, skopetallenteessa IE ja IB korruptoituneet, SOTF ei toiminut, koska kiinniohjaus tehtiin kojeiston napilla
ALVA	13.9.2023	52	14:26	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Vikapaikan maadoitusjärjestely 10 ohm. Eteläportin kuorma pois perästä. KUÄ J17 kytketty lisäksi (Ic=13 A). Kosketusjännitemittaukset pois päältä. Syöttöasettelut johtolähdöllä. Kojelaston painonappi ei aktivoi vikaa vasten kytkentää.	pysyvä	solid ef / 0 ohm		J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	kyllä	-3	10	Normaali kompensointi, normaali syöttötilanne Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla Kytketään vika päälle aseman pään ilmoituksesta. Asemalla kytketään uudestaan vikaa vasten n. 5s sisällä.
ABB	13.9.2023	53	15:21	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		60s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-3	10	Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla - 'nopea' kytkentä (säätäjä ei ehdi säätämään kelaa ennen vikaa vasten kytkentää) - uusinta Vikapaikassa jännitemittaukset irti, samoin virtamittaukset (IB, IE), skope-tallenne korruptoitunut...nyt SOTF toimi oikein, ohjaus tehtiin scadasta
ALVA	13.9.2023	53	15:21	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		pysyvä	solid ef / 0 ohm		J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	kyllä	-3	10	Normaali kompensointi, normaali syöttötilanne Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla Kytketään vika päälle aseman pään ilmoituksesta. Asemalla kytketään uudestaan vikaa vasten n. 5s sisällä.
ABB	13.9.2023	54	15:51	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		60s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-3	10	Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla - 'hidas' kytkentä (säätäjä ehti säätämään vinovirityksen takaisin kohdalleen ennen vikaa vasten kytkentää) SOTF toimi oikein. Skope tallenne ok, mutta jäi lyhyeksi (buutattiin, ja irrotettiin sen maadoitus)
ALVA	13.9.2023	54	15:52	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Alikompensoitu verkko. Säätäjä kerkeää säätämään kokeilukytkentää ennen. J24 johtolähtö Ic=24 A.	pysyvä	solid ef / 0 ohm		J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	kyllä	-20	10	Normaali kompensointi, normaali syöttötilanne Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla Kytketään vika päälle aseman pään ilmoituksesta. Asemalla kytketään uudestaan vikaa vasten n. 30s sisällä.
ABB	13.9.2023	55	16:16	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Kytketään testi/vikakaapelia vasten	60s	intermittent ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-3	10	Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla - 'nopea' kytkentä (säätäjä ei ehdi säätämään kelaa ennen vikaa vasten kytkentää) SOTF toimi oikein, skope-tallenne muuten ok, mutta lyhyt
ALVA	13.9.2023	55	16:16	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Sama testi kuin testi 53, mutta vikatyypin katkeileva.	Pysyvä	intermittent ef / 0 ohm		J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	kyllä	-3	10	Normaali kompensointi, normaali syöttötilanne Vikaa vasten kytkentä aseman J24 katkaisijalla Kytketään vika päälle aseman pään ilmoituksesta. Asemalla kytketään uudestaan vikaa vasten n. 5s sisällä.

ABB	13.9.2023	56	17:16	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	Suojauksen selektiivisyys IF~2A	1.0s	resistive / 5k ohm	L1E/(L1E)	J24, J23: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Selektiivisyys asiaskasmuuntamon kanssa. Muuntamo simuloi Hämeenlahti SA:n yksi lähtö, jonka suojaus ajetaan laukaisuun Laukesi KUÄ:n päästä-> sel. ei toiminut! Asia-kasmuuntamon suojan herkkyyden ei riittänyt, kun vikaresistanssi oli 5k (asettelu oli 3A, locos; Uo=10%) -> muutettiin 2.3A, mutta RF=5k:lla locos on vain luokkaa ~1.5A, eli KUÄ:n pään suojaus on herkempi kuin asiaskasmuuntamon... (asiaskasmuuntamo=Hämeenlahti J21)
ALVA	13.9.2023	56	17:16	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	Hämeenlahden asetelut liian kireällä. Icos 3 A. Asemalla 150/1A kaapelivirtaumat. Silti ei olisi ollut selektiivinen, sillä 1,5 A oli resistiivisen virran osuus tässä viassa.	0.7s	resistive / 5k ohm		J24, J23: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-3	10	Normaali kompensointi, normaali syöttötilanne Selektiivisyys asiaskasmuuntamon kanssa. Muuntamo simuloi Hämeenlahti SA:n yksi lähtö, jonka suojaus ajetaan laukaisuun
ABB	13.9.2023	57	17:56	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~3A	1.0s	resistive / 3k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Selektiivisyys ei toiminut, asiaskasmuuntamon suojausten herkkyyden ei riittänyt
ALVA	13.9.2023	57	17:56	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	Ei ollut selektiivinen, vaikka Icos vaihdettiin 2,25A.	0.7s	resistive / 3k ohm			ei	-3	10	
ABB	13.9.2023	58	18:15	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 2k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Selektiivisyys ei toiminut vieläkö? J21 HML: syötön asetus päällä? (=DEF lukit-tuna)?
ALVA	13.9.2023	58	18:15	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	Hämeenlahdessa jokin lukitus päällä.	0.7s	resistive / 2k ohm			ei	-3	10	
ABB	13.9.2023	59	18:28	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 2k ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Yritetään uudestaan, ei toiminut vieläkö!? Lukitus päällä?
ALVA	13.9.2023	59	18:28	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	Edelleen lukitus päällä.	0.7s	resistive / 2k ohm			ei	-3	10	
ABB	13.9.2023	60	18:42	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~10A	1.0s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Nyt toimi selektiivisyys, konfirmuutoksen jälkeen.
ALVA	13.9.2023	60	18:42	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	HML J21 oli tehonsuunnan tunnistus päällä. Tämä blok-kasi laukaisuun.	0.7s	solid ef / 0 ohm			ei	-3	10	
ABB	13.9.2023	61	18:52	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	intermittent ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		ei	-3	10	Selektiivisyys ok
ALVA	13.9.2023	61	18:52	Hämeenlahti J23	Taustaverkko #1, Ic=150A	Testi onnistui.	0.7s	intermittent ef / 0 ohm			ei	-3	10	
	14.9.2023		7:30			4. päivän aloitus								4. päivä: Testataan ja verifioidaan suojausten kokonaisratkaisun performanssi ja selektiivisyys korvaustilanteissa varioimalla parametrejä Iv, RF ja IF; Testataan toiminta myös kaksoismaasulkutilanteissa - Ajatuksena, että korvaustilanteen aikaiset maasulkuviat tehdään katkollisina (sg1 käytössä), jotta nähdään selektiivisyyden toteutuminen, vikälähtö (sg1) vs. lähtävä yhdysjohto (sg2). Tällöin J24 kuorma = keinokuorma. - Kaksoismaasulkukokeessa SVL:n vikälähdön katkaisija ajetaan laukaisuun, KUÄ:n vikälähdön katkaisija pysyy kiinni (vika poistuu kärryn katkaisijan pakkolaukaisulla), tavoitteena on saada hyvä tallenne kaksoismaasulusta, jossa näkyy vian muuttuminen maasulusta kaksoismaasuluksi ja sen poistuminen (muuttuminen takaisin maasuluksi)
	14.9.2023					Tarkistetaan/valitaan testilähdön J24 kuormitus sen mukaan, onko vika ei-katkollinen vai katkollinen								Testilähdön kuormitus, vika ei-katkollinen (ks. sarakke M): keinokuorma + oikea kuorma >1MVA TAI vain oikea kuorma >1MVA Testilähdön kuormitus, vika katkollinen (ks. sarakke M): vain keinokuorma ~0.5MVA (tai tyhjääkyvä johto) Valitaan kuormitus sen mukaan onko vika ei-katkollinen vai katkollinen

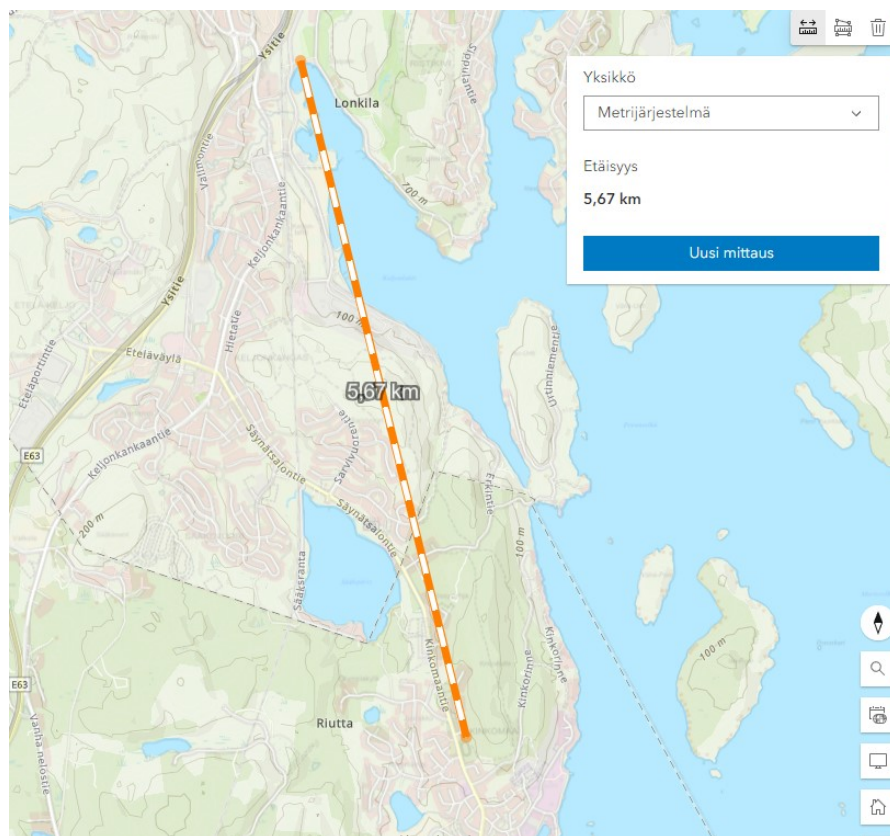
ABB	14.9.2023	62	9:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Suojauksen performanssi f(Iv, RF,IF) IF~20A	1.0 s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)	J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	200	10	J24:lla keinokuorma. Vikapaikassa 10ohm pystymaadoitus, tarkistetaan vikapaikan mitausjärjestely. ZB/IB edelleen UE2-piirissä. Lähdöllä J11 kela kiinni (vastus pois) -> yli-kompensoitu johtolähtö (kuormitettu)
ALVA	14.9.2023	62	9:25	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~20A, Keinokuorma 500 kW	1.0 s	resistive / 500 ohm			ei	200	10	
ABB	14.9.2023	63	9:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~20A	1.0 s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		ei	200	10	J24:lla oikea kuorma
ALVA	14.9.2023	63	9:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Normikuorma 1 MVA	1.0 s	resistive / 500 ohm			ei	200	10	
ABB	14.9.2023	64	9:57	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 1k ohm	L1E/(L1E)		ei	200	10	
ALVA	14.9.2023	64	9:58	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~10A	1.0s	resistive / 1k ohm			ei	200	10	
ABB	14.9.2023	65	10:11	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~5A	1.0s	resistive / 2k ohm	L1E/(L1E)		ei	200	10	
ALVA	14.9.2023	65	10:11	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~5A. Vain yksi admittanssi-porras havahtui tähän vikaan. Toiminta suunnitelman mukainen. UO vain 440V.	1.0s	resistive / 2k ohm			ei	200	10	
ABB	14.9.2023	66	10:28	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~40A	1.0s	resistive / 300 ohm	L1E/(L1E)		ei	200	10	
ALVA	14.9.2023	66	10:28	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~40A	1.0s	resistive / 300 ohm			ei	200	10	
ABB	14.9.2023	67	10:41	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~60A	1.0s	resistive / 150 ohm	L1E/(L1E)		ei	200	10	
ALVA	14.9.2023	67	10:41	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~60A	0.8s	resistive / 150 ohm			ei	200	10	
ABB	14.9.2023	68	11:00	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~200A	0.2s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		ei	200	10	sg3 jäi vaihtamatta -> R&D purkit ei laukaisuun
ALVA	14.9.2023	68	11:00	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	IF~200A	0.2s (kärry) 0.7s (SVL)	solid ef / 0 ohm		J24: tuotanto sg2, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	200	10	Kela ylärajalla, normaali syöttötilanne. Jäykkä maasulku.
ABB	14.9.2023	69	11:58	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #2, Ic=xxxxA		1.0s	resistive / 5k ohm	L1E/(L1E)	lähtevät johdot: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 lähtevä yhdysjohto: tuotanto sg2, klooni sg2, R&D sg2	kyllä	-3	10	SVL korvattu, KUÄ kela korvattu, ks. välilehti "Korvaustilanteet" Huom. yhdysjohdon SVL päin asettelu sg2, Savela ilman kuormaa J24:lla keinokuorma
ALVA	14.9.2023	69	11:58	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 5k ohm			ei	-3	10	Kukkumäki kompensoitu Savelan kelalla.
ABB	14.9.2023	70	13:12	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #2, Ic=xxxxA		1.0s	resistive / 3k ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-3	10	

ALVA	14.9.2023	70	13:12	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Keinokuormaa ei ollut tässä testissä mukana.	1.0s	resistive / 3k ohm			ei	-3	10	
ABB	14.9.2023	71	13:21	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #2, Ic=xxxA		1.0s	solid ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-3	10	
ALVA	14.9.2023	71	13:21	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	solid ef / 0 ohm			ei	-3	10	
ABB	14.9.2023	72	13:49	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #2, Ic=xxxA		1.0s	intermittent ef / 0 ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-3	10	
ALVA	14.9.2023	72	13:49	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Katkeileva. Keinokuorma mukana.	1.0s	intermittent ef / 0 ohm			ei	-3	10	
ABB	14.9.2023	73	14:22	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=xxxA	IF~5A	1.0s	resistive / 2k ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-90	10	SVL korvattu, KUÄ kela korvattu -> koko verkon lv luokkaa -90A, SVL:n kelalla vastus päällä, J24:lla keinokuorma
ALVA	14.9.2023	73	14:22	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Savelan kelalla kompensoidaan verkko. Ajettu -90 A.	1.0s	resistive / 2k ohm			ei	-90	10	
ABB	14.9.2023	74	14:35	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=xxxA	IF~20A	1.0s	resistive / 500 ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-90	10	
ALVA	14.9.2023	74	14:35	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 500 ohm			ei	-90	10	
ABB	14.9.2023	75	14:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=xxxA	IF~70A	1.0s	resistive / 150 ohm	L1E/(L1E)		kyllä	-90	10	
ALVA	14.9.2023	75	14:50	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A		1.0s	resistive / 150 ohm			ei	-90	10	
ABB	14.9.2023	76	15:40	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=120A		N/A	N/A	L1E/(L1E)		kyllä	0	7	Vaihekatkos ja maasuiku kuorman puolella, J24:lla keinokuorma -> vikavirta pieni, saadanko triggas? -> Muuntajan kytkeminen jännitteiseksi kahdella vaiheella aiheutti maasulun, J24:n katkaisija laukesil -> saatiin tallenne, oikea vika? -> Ferreresonanssi?
ALVA	14.9.2023	76	15:39	Hämeenlahti J24	Taustaverkko #1, Ic=150A	Muuntaja 2": Outo vika. Tyhjäkävän muuntajan ja verkon kanssa muodostui kippiväripiiri, jonka seurauksena jakelumuuntaja hajosi.	0.5s	solid ef / 0 ohm		J24: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1 Jxx: tuotanto sg1, klooni sg1, R&D sg1	ei	-90	10	Kela irti. Normaali syöttötilanne.

Liite 2. Maasulkuvikapaikan testiympäristön toteutuskuvat



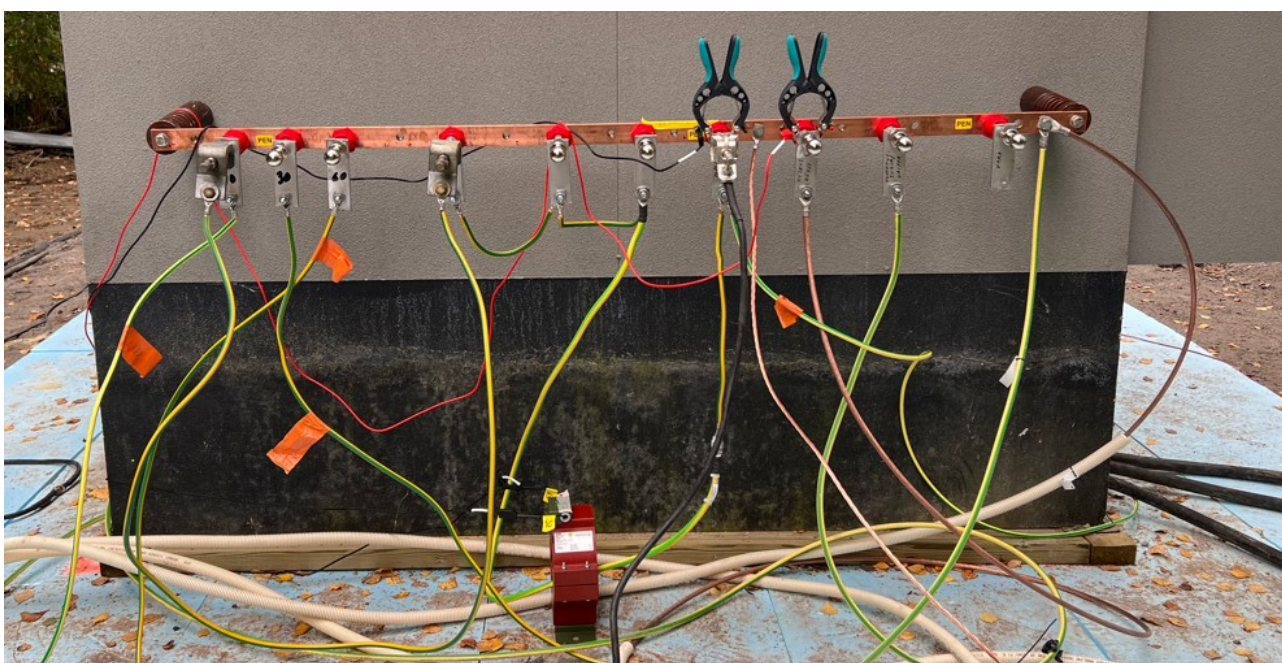
Kuva 1. Vikakohteen testiympäristön sijoituskuva



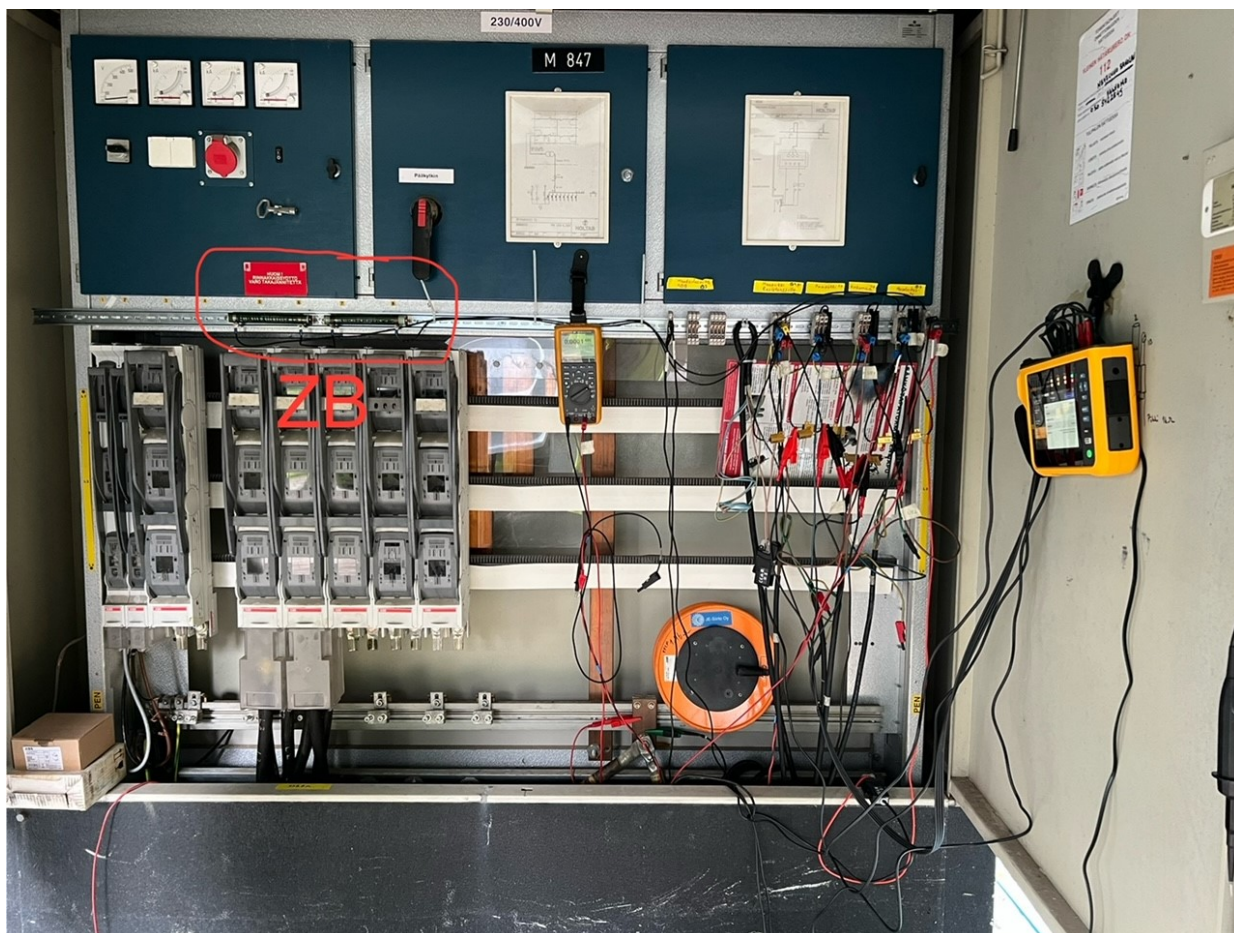
Kuva 2. Kinkomaan referenssimaan sijainti ja etäisyys vikapaikasta



Kuva 3. Testimuuntamo eristetyllä alustalla. Muuntamoon tulevat maadoitukset on kerätty eristettyyn maadoituskiskoon. Kuva on otettu rakennusvaiheessa, jolloin kaikki maadoitukset eivät vielä olleet kytkettyinä.



Kuva 4. Eristetty maadoituskisko sekä U_{E2} - ja I_E -mittausjärjestelyt



Kuva 5. U_{E1} , U_T , U_{VT} ja I_B -mittausjärjestelyt testimuuntamon pj-keskuksessa



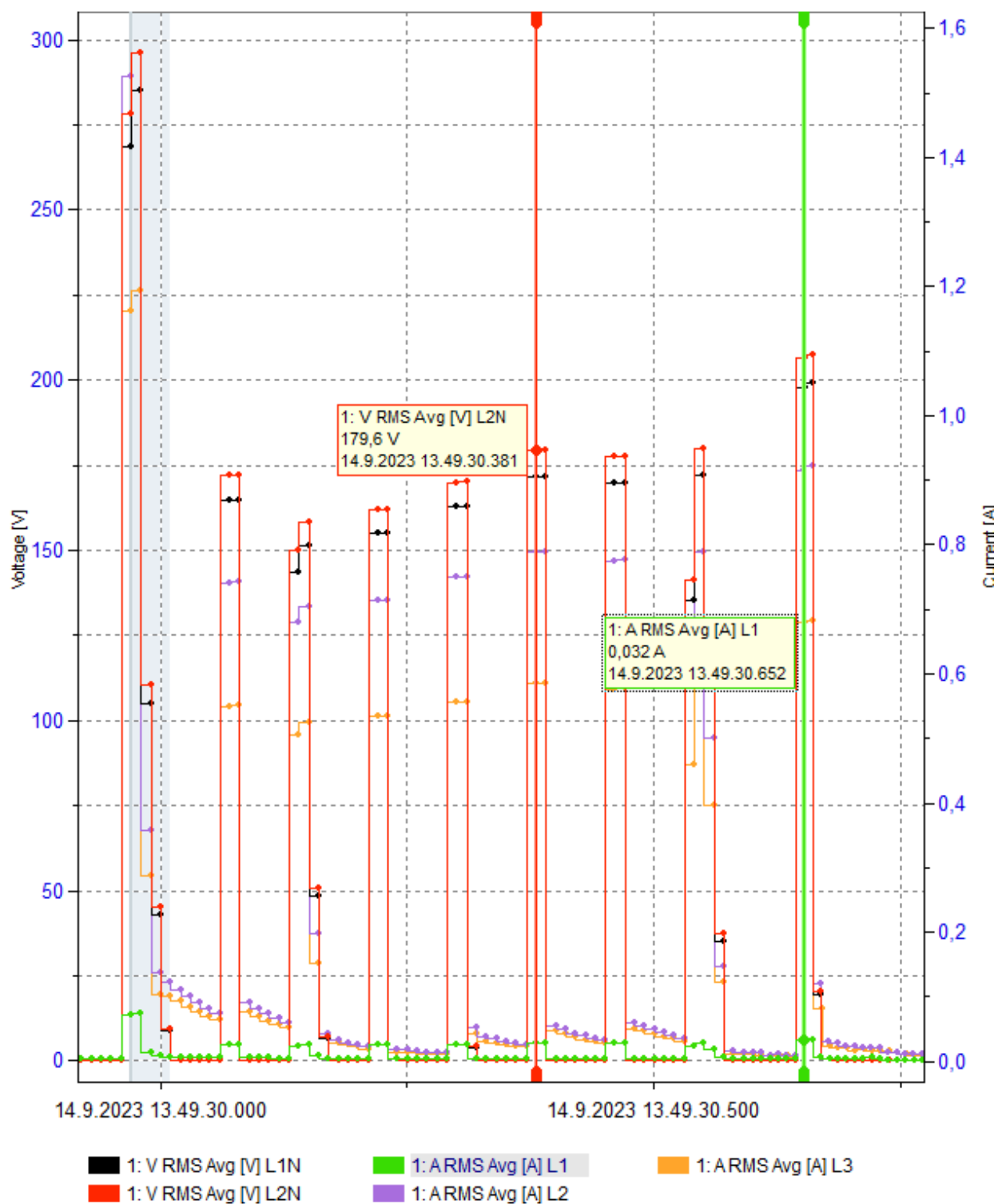
Kuva 6. Kosketusjännitemittauksissa hyödynnetyt jakokaapit, joissa U_T ja U_{VT} -mittauselektrodit on toteutettu maapiikin avulla jakokaapin taakse



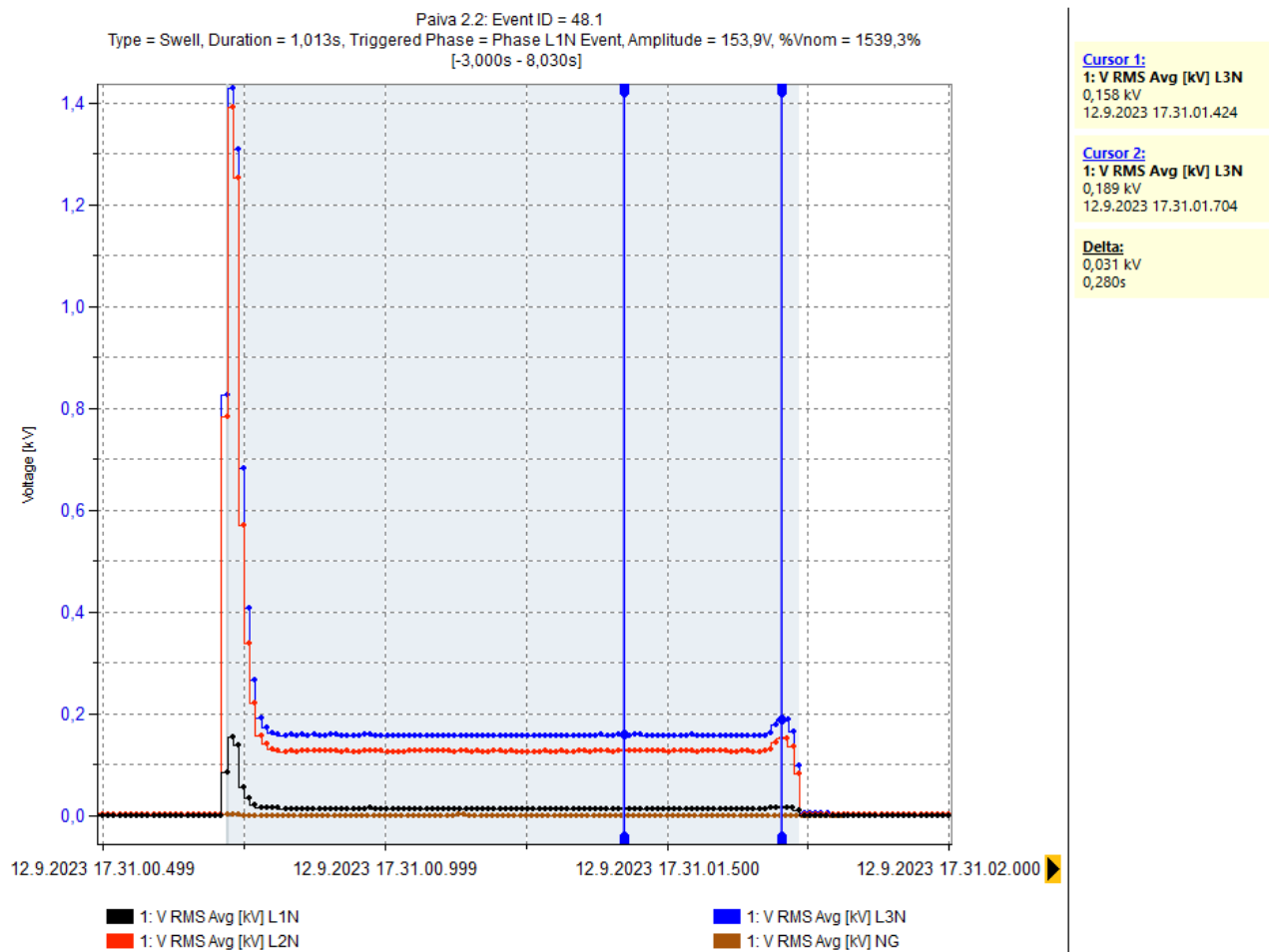
Kuva 7. ABB Oy:n vikakärri, vikavastukset ja I_F -mittaus

Liite 3. Esimerkkejä mittaustuloksista

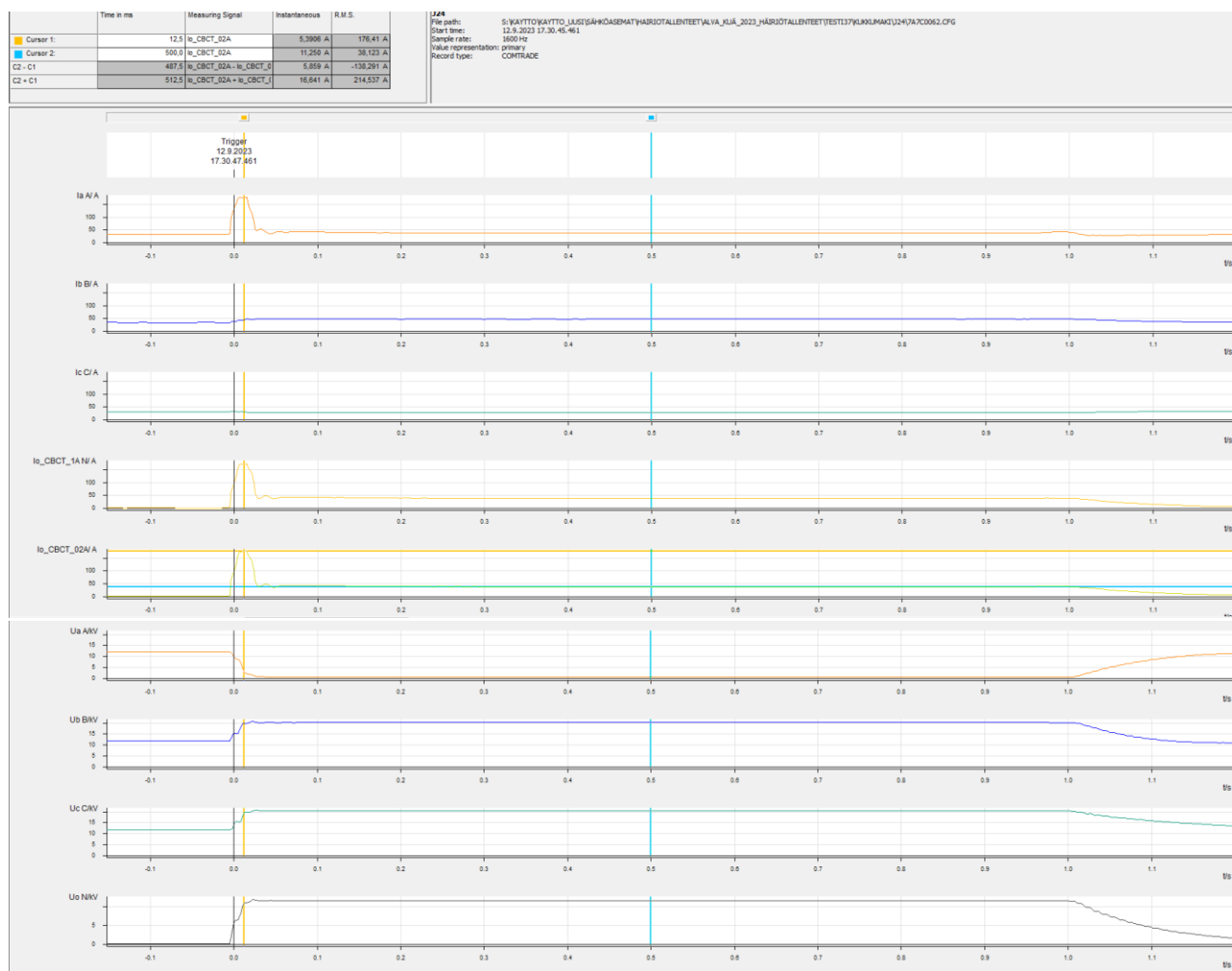
Paiva 4.0: Event ID = 118
 Type = Swell, Duration = 0,040s, Triggered Phase = Phase L1N, L2N Event, Amplitude = 296,2V, %Vnom = 2962,16%
 [-3,000s - 7,961s]



Kuva 1. Katkeileva maasulku, testi 72. Jännitemittausten tulokset on kerrottava kahdella jännitejakoopiirin vuoksi. I_B tulos ei ole validi, sillä tässä tapauksessa on mitattu jännitejakopiiriin vastusten lävitse menevää virtaa.



Kuva 2. Jäykkä maasulku, testi 37. Lisävastuksen kytkeytyminen aiheuttaa maadoitusjännitteessä U_{E1} 31 V:n nousun vian loppuvaiheessa.



Kuva 4. Siemens Siga V4.61-ohjelmistolla avattu Kukkumäen J24-lähdön releen häiriötalenne testistä 37

