



jamk

Maasulkuilmion hallinta sähköjakeluverkossa

Sakari Kauppinen

Opinnäytetyö, ylempi AMK

Kesäkuu 2023

Kestävä energia, YAMK

Kauppinen, Sakari

Maasulkuilmiön hallinta sähköjakeluverkossa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Kesäkuu 2023, 59 sivua

Tekniikan ala. Kestävä energia tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö YAMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Maasulkuilmiön hallinta sähköjakeluverkossa oli toinen osa Alvan kehittämisohjelmaa, jossa on tavoitteena parantaa sähköjakeluverkon käyttöturvallisuutta. Maasulkuhäiriöt lisääntyivät, kun verkkoyhtiöt alkoivat maakaapeloimaan sähköjakeluverkojaan sähkömarkkinalain muutoksen seurauksena, joka antoi määräyksen verkkojen säävarmuudesta.

Opinnäytetyön tehtävänä oli kuvata maasulusta aiheutuvia turvallisuusuhkia omaisuudelle ja ihmisille. Tavoitteena oli löytää maasulkuilanteissa Alvan sähköjakeluverkon turvallinen käyttötapa, jota voitaisiin soveltaa myös muiden yhtiöiden sähköjakeluverkoissa.

Opinnäytetyössä turvallisuusriskeistä kerättiin näyttöä erilaisista mittatuloksista ja tallenteista sekä niiden analyyseistä (Verkostolaskenta, Trench, Wavewin, Matlab, Topas1000). Toteutus tehtiin mittaamalla ja analysoimalla todellisia ja keinotekoisia vikoja sähköjakeluverkossa. Mittausten ja analyysien avulla löydettiin tarkemmat mitoitusperusteet sähköjakeluverkon käytölle vianrajauskytkennöissä, jotta omaisuudelle eikä ihmisen hengelle eikä terveydelle aiheudu vaaraa.

Sähköjakeluverkon käyttöä ohjaavat standardit (SFS 6000 ja SFS 6001) ovat osin ristiriitaisia ja ne eivät takaa sähköjakeluverkon turvallista käyttöä kaikissa tilanteissa. Verkostolaskennat eivät kykene laskemaan todellisia maasulkuvirtoja, vaan todelliset virrat pitää todeta muilla tavoin. Maadoitusten kuntoon, rakentamiseen ja dokumentointiin tulee kiinnittää erityistä huomiota, jotta saadaan paremmin hallintaan maasulkuilmiön haitat.

Avainsanat (asiasanat)

Maasulku, maadoitusjännite, kosketusjännite, maasulkuvirta

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Kauppinen Sakari

Controlling of earth fault in the distribution network

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, June 2023, 59 pages

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

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Controlling the earth fault phenomenon in the electricity distribution network was another part of Alva's development program, which aims to improve the operational safety of the electricity distribution network. Earth fault failures increased, when the network companies started grounding their electricity distribution networks, because of the change in the Electricity Market Law, which issued a regulation on the weather-proofing of the networks.

The task of the thesis was to describe the security threats to property and people caused by the earth fault. The aim was to find a safe way to use Alva's electricity distribution network in earth fault situations, which could also be applied to the electricity distribution networks of other companies.

In the thesis, evidence of safety risks was gathered from various measurement results and recordings and them analyzes (Network calculation, Trench, Wavewin, Matlab, Topas1000). The implementation was done by measuring and analyzing real and artificial faults in the electricity distribution network. With the help of measurements and analyses, more precise dimensioning criteria were found for the use of the electricity distribution network in fault-limiting connections, so that there is no danger to property, human life or health.

The standards governing the use of the electricity distribution network (SFS 6000 and SFS 6001) are partly contradictory and do not guarantee the safe use of the electricity distribution network in all situations. Network calculations are not capable of calculating actual earth fault currents, so the actual currents must be determined in other ways. Special attention should be paid to the constructions, conditions and documentation of earthing's in order to better manage the disadvantages of the earth fault phenomenon.

Keywords/tags (subjects)

Earth fault, earth voltage, contact voltage, earth fault current

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	7
2	Kehittämistyön kuvaus	8
3	Sähköverkko.....	10
3.1	Sähköverkon rakenne.....	10
3.2	Sähköverkon maadoitukset.....	12
3.3	Sähkönjakeluverkon häiriöt	14
4	Alvan nykyinen mitoitus sähköverkon käyttöön ja sen kehittämistarpeet.....	17
4.1	Nykyinen mitoitus perustuen ihmisen sietokykyyn	17
4.2	Tarkempia huomioita sähkönjakeluverkon käyttöön huomioiden ihmisen sietokyky... 18	
4.3	Mitoitusperusteiden kehittämistarpeet	21
5	Verkkoyhtiön sähkönjakelutoimintaa ohjaavat määräykset	22
5.1	Sähköturvallisuuslaki.....	22
5.2	Standardit.....	23
5.3	Käytönjohtajan vastuu	25
6	Lakimuutos ja sen vaikutukset	26
7	Käytetyt järjestelmät, ohjelmat ja analysaattorit.....	27
8	Sähkönjakeluverkon tapahtumat maasulkuilmiön aikana lähtötilanteessa	28
8.1	Kompensoitamaton verkko	28
8.2	Kompensoitu verkko	29
9	Testimittaukset.....	36
9.1	Testijärjestelyt.....	36
9.2	Mittaus 1	38
9.3	Mittaus 2	42
10	Mittauksilanteiden analysointia	44
11	Toimenpiteet sähkönjakeluverkon turvalliseen käyttöön	48
11.1	Työnaikana tehdyt havainnot turvallisuudesta.....	48
11.2	Toimenpiteet turvallisuuden lisäämiseksi.....	51
12	Pohdinta.....	53
	Lähteet	57

Kuviot

Kuvio 1. Suurimmat sallitut maasulussa aiheutuvat kosketusjännitteet.....	13
Kuvio 2. Keskimääräiset kehon impedanssit jännitteen suhteen.....	19
Kuvio 3. Kosketusjännitteet / kehon impedanssi / kehon läpi vaikuttavat virrat.....	20
Kuvio 4. Maadoitusjännitteen leviäminen.....	21
Kuvio 5. Laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnittelu.....	24
Kuvio 6. Ote sähkölaista ja varmuusmääräyksistä.....	26
Kuvio 7. Kompensoimattoman verkon maasulkuilmiö kaaviona.....	29
Kuvio 8. Powergrid-verkostolaskenta perustilanteessa.....	31
Kuvio 9. Kompensoidun verkon maasulkuilmiö kaaviona.....	32
Kuvio 10. Trench:n sammutuskelan ohjaimelta virityskuva.....	33
Kuvio 11. Mittaustiedot Trench:n sammutuskelan ohjaimelta johtolähdöittäin.....	34
Kuvio 12. Kompensoitu verkko vikatilanteessa Wavewin-tallenteella.....	35
Kuvio 13. Katkeileva maasulku Wavewin-tallenteella.....	36
Kuvio 14. Vikapaikan koe- ja mittausjärjestelyt.....	37
Kuvio 15. Powergrid-verkostolaskennan tulokset testiviassa.....	38
Kuvio 16. Vian aikainen Wavewin-tallenne sähköasemalta.....	39
Kuvio 17. Matlab-laskenta testi 1 vikavirroista.....	40
kuvio 18. Harmonisten I_0 -virtojen Wavewin-laskenta.....	40
Kuvio 19. Mittauspaikan ja työmaakeskuksen välinen maadoitusjännitteen mittauksesta 1.....	41
Kuvio 20. Wavewin-tallenne vian kokeilukytkennästä.....	42
Kuvio 21. Matlab-laskenta testi 2 vikavirroista.....	43
Kuvio 22. Harmonisten I_0 -virtojen Wavewin-laskenta.....	43
Kuvio 23. Mittauspaikan ja työmaakeskuksen välinen maadoitusjännitteen mittauksesta 2.....	44
Kuvio 24. Wavewin-tallenne kokeilukytkentäviasta.....	46
Kuvio 25. Matlab-laskenta kokeilukytkentäviasta.....	46
Kuvio 26. Trench:n sammutuskelan ohjauksen säätötapaukset.....	47
Kuvio 27. Pylväsmuuntamo vuodelta 1964.....	49
Kuvio 28. Standardien 6001 ja 6000 vaatimusten vertailu.....	50
Kuvio 29. Mitattu Johtolähtöjen maasulkuvirran tuotto ja resistiivisen osan virta.....	51

Lyhenteiden luettelo

I_c	kapasitiivinen virta
I_d	kelan ohjaimen merkitsemä resistiivinen virta
I_f	maasulkuvirta
I_o	nollavirta
I_r	resistiivinen virta
U_e	maadoitusjännite
U_o	nollajännite
U_t	kosketusjännite
U_{tp}	sallittu kosketusjännite (ihmisen keskimäärinen sietoraja)
Z_E	maadoitusimpedanssi

1 Johdanto

Vuonna 2011 eteläistä Suomea ravisteli Tapani- ja Hannu-myrskyt, joiden aikana sähkökatkon koki yli 570 000 käyttöpaikkaa. Kansalaispalautteen paineessa verkkoyhtiöille määrättiin sähkömarkkinalakiin pykälä, jossa veloitettiin kehittämään sähköjakeluverkkoja siten, ettei taajamissa koeta yli 6 tunnin katkoja eikä haja-asutuksenkaan puolella yli 36 tunnin katkoja. Verkkojen tulee olla 50% säävarmoja 2019 mennessä ja kokonaan 2028 mennessä. (L 9.8.2013/588, 51§ & 119§). Sähköjakeluverkkoa kutsutaan säävarmaksi, kun häiriöiden ja vikojen aiheuttamat katkot pysyvät sähkömarkkina-alaissa esitetyissä rajoissa.

Lakimuutosta seurasi maakaapeloinnin voimakas lisääntyminen rahoituksen puitteissa ja tämän myötä maasulkuilmiö muuttui entistä ajankohtaisemmaksi, koska maakaapeloinnin seurauksena maasulkuvirrat kasvoivat ja maasulkuilmiöiden hallinnat tulivat haastavimmiksi. Maasulkuvika on sähköjakeluverkon keskeisin vikatyyppeiksi oikosulun rinnalla. Maasulkuilmiö on ollut vähemmän esillä ja osin vailla ymmärrystä. Viat aiheuttavat verkkoyhtiölle kustannuksia, koska sähkömarkkinain mukaan verkkoyhtiö on korvausvelvollinen, jos sähkönlaatu ei ole standardin mukaista.

Sähköturvallisuuslain mukaan verkkoyhtiöiden tulee vastata, että sähköjakeluverkko on turvallinen. Käytönjohtaja vastaa henkilökohtaisesti sähköjakeluverkon sähköturvallisuudesta, että se ei aiheuta hengelle ja terveydelle vaaraa. Jakeluverkkoa on kunnossapidettävä ja käytettävä siten, ettei siitä aiheudu hengen tai omaisuuden vaaraa. (L 16.2.2016 /1135, §6). Valitsin opinnäytetyön aiheeksi maasulkuilmiön hallinnan sähköjakeluverkossa, koska toimin käytönjohtajana jakeluverkkoyhtiössä ja olen vastuussa verkon turvallisuudesta henkilökohtaisesti. Haluan minimoida turvallisuusriskit mahdollisimman pieneen.

Alva-yhtiöllä on käynnissä jakeluverkon turvallisuuden kehittämisprojekti. Tämä kehittämistyö on osa laajempaa projektia. Heikki Tulomäen diplomityö (2017): Maasulkujen analysointi häiriötalennuksilla JE-Siirto Oy:ssä, jossa toimin tilaajana yhtiön edustajana, oli lähtökohta projektille. Tämä työ on jatkumo Tulomäen työlle. Projektille on suunniteltu jatkoja ja osa kehityshankkeista on jo työn alla. Organisaatio hyötyy tästä projektista, koska se lisää verkon turvallisempaa käyttöä. Tämän työn pohjalta päivitetään käytönjohtajan pysyvää määrärahoja. Tästä saadaan myös suunnittelun perusteet maadoitusten mitoitukselle ja rakentamiselle sekä oppimateriaali verkon suunnitteluun ja rakentamiseen sekä käyttöön ja kunnossapitoon.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kuvata maasulusta aiheutuvia turvallisuusuhkia sähköjake-
luverkossa. Kun löydetään verkon turvallinen käyttötapa maasulun aikana, se lisää sähkö-
jake-
lussa turvallisuutta sekä verkkoyhtiöiden ja kuluttajien kannalta. Tavoitteena on jakaa tietoa ja
osaamista myös muille verkkoyhtiöille, sillä työssä kuvatut ilmiöt ovat yhtenevät kaikilla sähkö-
jake-
keluverkoilla. Työstä hyötyvät myös standardin laatijat ja turvallisuusviranomaiset sekä sähköase-
malaitetoimittajat.

Opinnäytetyössäni tarkastelu keskittyy maasulkuilmiön hallintaan sähköjakeluverkon käytön ai-
kana ja häiriötilanteissa. Lisäksi tavoitteena on löytää sähköjakeluverkon turvallinen käyttötapa
maasulkutilanteiden osalta. Verkoston suunnittelu ja rakentaminen rajataan pois tarkastelusta,
sillä ne tulevat käsitellyksi myöhemmin Alvan projektikokonaisuudessa. Uudempaa Trimble-ver-
kostolaskentaa ei saatu kunnolla toimimaan maasulkulaskennan osalta, joten tässä käytetään Po-
wergrid-verkostolaskennan tietoja.

Alva-konserni on Jyväskylän kaupungin omistama energiakonserni, mihin kuuluu sähköjakelun
lisäksi vedentuotanto ja -jakelu, lämpö- ja sähkövoimaloita sekä kaukolämmön jakelu. Konserni
työllistää yli 200 henkeä ja liikevaihto oli vuonna 2023 lähes 300 miljoonaa. Tämä työ on tehty
Alva-konsernin sähköjakeluverkkoon. Alvan sähköjakeluverkkoa kaukokäytetään Microscadan
avulla.

2 Kehittämistyön kuvaus

Tässä opinnäytetyössä on tiedontuotannollinen näkökulma. Toikko ja Rantasen (2009) mukaan
tutkimustiedon ja kehittämiseen liittyvien ilmiöiden käsitteellistäminen auttavat kehittämistoimin-
nan toteutusta. Kehittämisen kohteena on toimintarakenteen kehittäminen. (Toikko & Rantanen
2009, 11-15). Tarkoituksena on lisätä tietoisuutta maasulkuilmiöstä ja tuoda esiin maasulkuilmiön
synnyttämien ongelmien ratkaisuehdotuksia.

Aluksi kehittämistyön pohjaksi kuvataan sähköjakeluverkon rakennetta, maadoituksia ja häiriöitä,
jotta saadaan käsitys toimintaympäristöstä. Tulosten tarkasteluun on otettava myös ihmisen fysio-
logiset vaikutukset sähköiskuissa, jotta ymmärretään toimintakenttä paremmin. Nykyiset Alvan
mitoituspäätökset, jossa on otettu huomioon ihmisen sietokyky, on kuvattu tähän projektikokonai-

suuteen kuuluvassa Tulomäen (2017) työssä. Tässä kehittämistyössä otetaan tarkemmin huomioon maadoitusjännitteen leviäminen sähköjakeluverkossa ja sen vaikutukset ihmisen sietokykyyn.

Seuraavaksi tässä kehittämistyössä perehdytään keskeisiin viranomaismääräyksiin, jotka ohjaavat sähköjakeluverkon käyttöä. Niitä ovat standardit ja lait, kuten sähköturvallisuuslaki. Sähkömarkkinain muutokset johtivat maasulkuilmiön esille tuloon, siksi kuvataan lakimuutoksen vaikutukset maasulkuilmiön. Tässä yhteydessä tuodaan esille käytönjohtajan vastuut lain mukaan.

Tämän jälkeen esitellään käytetyt järjestelmät, ohjelmistot ja analysaattorit. Sähköjakeluverkon tapahtumia maasulun aikana selvitetään verkostolaskenta Powergrid- ja Trimble-ohjelmalla sekä Trench:n sammutuskelan ohjaimen ohjainkuvien avulla. Työssä tutkitaan verkon todellisista vi-oista saatuja suojareleiden häiriötallenteita. Ymmärryksen syventämiseksi tehdään myös keinote-koisia vikoja verkkoon. Tallenteita tutkitaan Wavewin-ohjelmalla, Matlab:iin perustuvalla DRtool-ohjelmalla ja sähkönlaatuanalysointilaitteella Topas1000. Matlab-laskennat eivät olleet käytössä vielä ensimmäisten testien aikana.

Kehittämistyössä selvitetään, mitä tapahtuu, kun jakeluverkkoa käytetään vian rajauskytkentöjen aikana. Tämä tehdään analysoimalla verkon maasulkuvioista saatuja dokumentteja ja mittauksen avulla. Maasulun aiheuttamien vikojen turvallisuusongelmat tulevat esille tässä vaiheessa. Taustateorian mukaisia mittauksia ja verkostolaskentoja tehdään ongelman tarkemmaksi selvittämiseksi ja toteennäyttämiseksi.

Sen jälkeen esitellään suoritettavat mittaukset. Niihin ja mallinnettuihin tuloksiin perustuen on analysoitu vikatapahtumia ja häiriön hoidon aikaisia tapahtumia. Analyysiin perustuen määritetään verkon käyttötapa, jossa maasulun aikana ei jännitteet nouse ihmiselle hengen vaaralliselle tasolle missään käyttötoiminnan tilanteessa.

Turvallisuusriskeistä kerätään näyttöä erilaisista mittaustuloksista ja tallenteista sekä niiden analysoinnista (Powergrid, Trimble, Trench, Wavewin, Matlab, Topas1000). Kehittämistehtävässä on intressinä tiedon tuottaminen. Mittauksien ja analyysien kautta pyritään saavuttamaan objektiivista tietoa. Näin saadaan tietoa siitä, miten sähköjakeluverkon turvallisuutta pystytään parantamaan.

Toikko ja Rantasen (2009, 44-45) mukaan kehittämistoiminnan yksi intressi on tiedon tuottaminen, jossa pyritään saavuttamaan objektiivista tietoa.

Kun turvallisuusongelmat on todettu ja toteennäytetty, selvitetään miten verkkoa tulisi käyttää, jotta se olisi turvallista. Tämä tehdään määrittämällä kaikkien muuntopiirin maadoitusolosuhteet, tarkistamalla vian poiskytkentäaika sekä suurimmat sallitut maasulkuvirrat kaikissa verkon käytön tilanteissa, myös asemien korvauskytkennöissä. Sähkönjakeluverkon turvalliset käyttörajat tunnistamalla saadaan tietoon verkon käytönaikaiset muutokset ja pystytään tuottamaan ajantasainen mittaustieto käyttöhenkilöstölle. Ilman reaaliaikaista mittaustietoa ei verkon muutosten hallinta ole sähköturvallisuuslain vaatimalla tasolla.

Kehittämistyöhön liittyviä mittauksia ja analyyssejä on tehty yhteistyössä varmennustarkastaja VTS 10 Jouko Sikasen kanssa ja konsultoitu kehitysasiantuntija Risto Pitkästä. ABB:lle on jo pidetty luentoa näistä sähkönjakeluverkon turvallisuusriskeistä. Tästä on lähtenyt muitakin kehityshankkeita, joita on jalostettu ja esitelty Cired-konfrensseissa. Lopputuotoksen tarkoituksena on jakaa arvokasta tietoa ja osaamista turvallisuustason nostosta maasulun aikana myös muille sähköverkkoyhtiöille. Toikko ja Rantasen (2009, 125) mukaan saatu tieto on tosi, silloin kun se on hyödynnettävissä käytäntöön.

3 Sähköverkko

3.1 Sähköverkon rakenne

Sähkö tuotetaan voimalaitoksilla, josta sähkövoimansiirron kautta sähkö siirretään suurjännitejakeluverkkoon (alueverkkoon tai kantaverkkoon). Suurjännitejakeluverkosta sähkö siirretään sähköasemilta keskijännitejakeluverkon kautta pienjakeluverkon avulla kuluttajille. Muunto suurjänniteverkosta keskijänniteverkkoon tapahtuu sähköasemilla ja keskijännitejakeluverkosta pienjännitejakeluverkkoon jakelumuuntamoilla. (Elovaara & Haarla 2011a, 54-55; Lakervi & Partanen 2008, 11.) Yleisten Standardien mukainen suurjännitteen raja on yli 1000 V vaihtojännitettä, mutta SFS 6001 (2018, 13) käsittelee suurjännitteenä yli 110 kV jännitettä ja keskijännitteenä yli 1000 V:sta alle 110 kV:iin jännitteitä

Suurjännitejakeluverkon jännite on 100 - 400 kV. Johdot rakennetaan yleensä joko silmukkaverkoiksi tai johtorenkaiksi. Silmukoidussa verkossa sähkölle on vian sattuessa aina olemassa rinnakkainen siirtymisreitti. Rakenteeltaan käytettävät johdot ovat joko ilmajohtoja tai kaapeleita. Nämä rakenteet koskevat sekä siirto- että jakeluverkkoja. Johtorengaat pidetään suurimmilla jännitteillä yleensä suljettuina käyttövarmuuden parantamiseksi sekä jännitteen aleneman ja tehohäviöiden estämiseksi. (Elovaara & Haarla 2011a, 54-58, 279; Elovaara & Haarla 2011b, 250.)

Suomessa keskijänniteverkon jännitetaso on 20 (- 10) kV. Keskijänniteverkko rakennetaan useimmiten silmukoiduksi ja sitä käytetään säteittäisenä. Säteittäisissä verkkojen käytössä yhden kohdan vikaantuminen aiheuttaa toimintakeskeytyksen kyseiselle johtolähdölle tai joillekin kuormille, toisin kuin silmukoidussa verkossa. Verkkoon syötetään sähkö sähköasemalta, jossa jännite muunnetaan useimmiten 110 kV:sta 20 kV:iin. Koko sähkönkäyttövarmuuden kannalta keskijänniteverkko on keskeisessä asemassa. Keskijänniteverkossa tapahtuvat viat muodostavat yli 90 % kuluttajan havaitsemista sähkövioista. Keskijänniteverkot ovat näihin päiviin saakka koostuneet pääasiassa avojohdoista varsinkin maaseudulla. (Lakervi & Partanen 2008, 119-125; Elovaara & Haarla 2011a, 271.)

Keskijänniteverkkoa hallinnoivat alueelliset verkkoyhtiöt. Tällaisia verkkoyhtiöitä on Suomessa noin 100. Verkkoyhtiöiden toimintaa valvoo Energiamarkkinavirasto. Jos keskeytyskustannukset pienenevät, silloin verkkoyhtiöt voivat kasvattaa voittoaan tai lisätä investointeja. Valvontajaksolla 2008 - 2011 sähkön laatua valvottiin ensimmäisen kerran taloudellisen valvonnan osana. Suomessa taloudellisen valvonnan muotona on esimerkiksi vakiokorvausmenettely, joka kohdistuu verkkojen käyttövarmuuteen. (Lakervi & Partanen 2008, 19-21.) Sähkömarkkinalaki antaa jakeluverkon toiminnalle laatuvaatimuksia esimerkiksi keskeytysten pituuksista (L 9.8.2013/588, 51§).

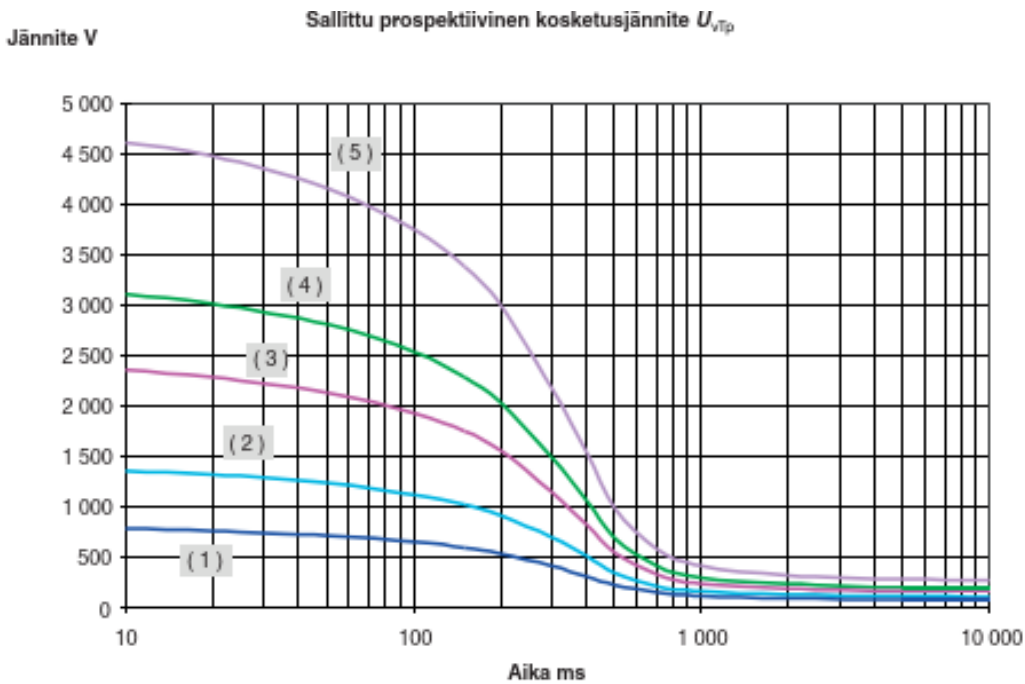
Pienjänniteverkon jännite on 0,4 kV, niitä käytetään yleensä säteittäin. Niissä on keskijänniteverkon tapaan yksi syöttöpiste (20/0,4 kV muuntamo). Maadoitettu järjestelmä on yleisesti käytössä pienjänniteverkossa. Ihmiselle vaaralliset kosketusjännitteet syntyvät pienjänniteverkoissa, ainakin tapaturmatilastojen valossa. (Lakervi & Partanen 2008, 158-159.)

3.2 Sähköverkon maadoitukset

Elovaara ja Haarla (2011b,427) kirjoittavat teoksessaan, että maadoitukset jaetaan käyttö- ja suojamaadoituksiin. Käyttömaadoituksen tehtävänä on estää vaaratilanteet ja vauriot pitämällä maahan kohdistuva jännite alhaisena. Suojamaadoituksessa estetään jännitteen syntyminen vikatilanteissa kosketeltaviin osiin. Kansallisissa määräyksissä (esimerkiksi standardit) on kirjattu enimmäisarvot sallituille kosketusjännitteille. (Elovaara & Haarla 2011b, 427.)

Standardi SFS 6001 määrittää, että suurjänniteverkoston maadoitukset tulee rakentaa siten, että kosketusjännite ei nouse maasuluissa suuremmaksi kuin $2x$ tai $4x U_{tp}$ (U_{tp} = ihmisen keskimääräinen sietoraja) mukaisesti tai laajan maadoituksen mukaisesti. Laaja maadoitus velvoittaa, ettei synny merkittäviä potentiaalieroja. (SFS 6001 2018, 92-94.) Laaja maadoitus tarkoittaa järjestelmää, missä kaikki maadoitukset on kytketty yhteen eikä vaarallisia kosketusjännitteitä pääse syntymään vaikutusalueella.

Keskijänniteverkon maadoituksissa maadoituselektrodin impedanssin maksimiarvo määräytyy maasulkuvirran ja sen kestoajan mukaan. Maadoitusjärjestelmä rakentuu yleensä useista vaakaan, pystyyn tai vinoon maahan laitetuista elektrodeista, jotka suositellaan kaivettavan routarajan alapuolelle. Jos maaperän ominaisresistanssi pienenee syvyyden kasvaessa, käytetään pystyelektrodeja. Maadoitusten mitoituksessa on otettava huomioon muun muassa suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien kosketus- ja askeljännitteiden vaikutus lähellä olevien henkilöiden turvallisuuteen. Kosketusjännite muodostuu, kun ihminen muodostaa virtapiirin vikatilanteessa maadoitusjännitettyn kohteeseen. Askeljännite syntyy, kun maaperän potentiaali nousee ja jalkojen välille syntyy potentiaaliero. Vikavirran arvot, vian kesto aika sekä maaperän ominaisuudet vaikuttavat mitoitukseseen. (Maadoituskirja 2001, 33-36.) Standardissa SFS 6001 määritellään sallitut kosketusjännitteet (SFS 6001 2018 ,93). Maasulussa suurimmat sallitut kosketusjännitteet esitellään kuviossa 1.



Kuvio 1. Suurimmat sallitut maasulussa aiheutuvat kosketusjännitteet (SFS 6001 2018, 107).

Maadoituskirjassa 2001 (34) kuvataan tarkemmin maadoitusjännitteen mitoitus. Maasulun aikana syntyy maadoituselektrodissa maadoitusjännitettä. Koska maasulun aikana osa maadoitusjännitteestä vaikuttaa virtapiirissä olevien lisäresistanssien yli, maadoitusjännite ei kokonaisuudessa siirry kosketusjännitteeksi. Maadoitusjännitteen arvo ei saa olla yli kaksinkertainen sallitun kosketusjännitteen arvoon suhteutettuna. Jos kuitenkin tehdään toimenpiteitä, joilla lisäresistanssin osuus kasvaa, voidaan edellisestä poiketa. Tarvittaessa voidaan käyttää myös niin sanottua laajaa maadoitusjärjestelmää. (Maadoituskirja 2001, 34.)

Suur- ja pienjänniteverkolla voidaan käyttää yhteistä maadoitusjärjestelmää sillä ehdolla, että pienjännitejakeluverkossa tai siihen liitetyissä sähkön käyttäjän asennuksissa ei esiinny vaarallisia kosketusjännitteitä. Tällöin pienjännitejärjestelmän tähtipiste tai PEN-johdin maadoitetaan verkon syöttöpisteeseen. Yhteisen maadoituksen käyttö on ensisijainen vaihtoehto. Jos ei voida käyttää yhteistä maadoitusta, pitää suur- ja pienjänniteverkon maadoituselektrodit erottaa toisistaan niin, että maasulku ei aiheuta laitevaurioita tai vaaraa ihmisille. Maadoitusjännite voi olla kaksinkertainen sallittuun kosketusjännitteeseen verrattuna, jos pienjänniteverkko on maadoitettu jännitteen rajoittamiseksi useassa paikassa tähtipisteessä. Vieläkin suuremmat erot maadoitus- ja

kosketusjännitteen voidaan toteuttaa turvallisuuden kärsimättä esimerkiksi rakennuksen potentiaalilla tasauksella. (Maadoituskirja 2001, 36; SFS 6001 2018, 92-94.)

Kantaverkon ylimpien jänniteportaiden verkot on maadoitettu virtaa rajoittavien kuristimien avulla. Maasulun aikana ne suurentavat terveisiin vaiheisiin syntyviä ylijännitteitä. Kuristimet pitää mitoittaa niin, että maasulkuvirrat pysyvät riittävän alhaisina ja tällöin ylijännitteiden suuruus ei pääse liian isoksi. (Elovaara & Haarla 2011a, 212.) Suomessa siirtoverkot ovat tehollisesti maadoitettuja, sähköaseman muuntajan tähtipiste on maadoitettu joko suoraan tai virranrajoituskuristimen kautta. Tällä tavalla saadaan pienennettyä maasulkuaikeisen vaiheiden jännitteen nousua ja pitää maasulkuvirta sopivan suuruisena. Relesuojaus on helppo toteuttaa, jos maasulkuvirta on suuri. Suuri maasulkuvirta voi aiheuttaa ihmisille vaarallisia kosketus- tai askeljännitteitä. (Elovaara & Haarla 2011b, 337.)

3.3 Sähkönjakeluverkon häiriöt

Sähköverkon käytössä pitää ottaa huomioon kolme pääasiaa: käyttövarmuus, turvallisuus ja taloudellisuus. Päätoimintoja verkonkäytössä on käyttötoimintojen suunnittelu, verkon tilan jatkuva seuranta ja ohjaus, häiriötilanteiden hallinta sekä verkkokomponenttien kunnossapidon käytännön toteutus. (Lakervi & Partanen 2008, 231.) Sähköverkon valvontajärjestelmä on hierarkkinen. Suorien valvonta- ja ohjaustoimenpiteiden avulla vastataan energian siirtoprosessin hallinnasta, tämä on verkon käytön tehtävä. Tiedonkeruujärjestelmänä käytetään yleensä kansainvälisesti nimitystä SCADA. (Elovaara 2011b, 385-386). Lakervin & Partasen (2008, 232) mukaan häiriötilanteiden hallinta sisältää verkossa esiintyvien vikojen tunnistamisen, paikantamisen ja erottamisen, varayhteyksien hyödyntämisen, vikojen korjaamisen, häiriötilanteen aikaisen asiakaspalvelun sekä sähkönjakelun normaalitilan palauttamisen.

Sähkönjakeluverkon viat voidaan jakaa pääpiirteissään kahteen tyyppiin: oikosulut ja maasulut. Oikosulku on kahden tai kolmen vaiheen pieni ohminen kontakti. Oikosulkuvikavirran tuottaa muuntajan tekniset arvot. Ilmiötä pienentävät tekijät ovat verkoston pitkittäisimpedanssit. Maasulku syntyy, kun esimerkiksi eritysvian takia johdin joutuu yhteyteen maahan, tai maadoitettuun osaan. Maasulusta aiheutuu maadoitetussa verkossa vikapaikkaan ja sen ympäristöön hengenvaara. (Elovaara & Haarla 2011b, 340-341.) Maasulkuvika poikkeaa oikosulusta siten, että maasulkuvirran

tuottaa taustaverkko eli päämuuntajan alajännitepuolelle kytketyt kaapelit ja muuntajat. Maasulkuilmiössä on galvaaninen erotus yläjännitepuolelle ja tämän takia ei näy yläjännitepuolella, kuten oikosulku. (Lakervi & Partanen 2008, 182-184)

Sähköasemilla viat syntyvät usein erottimen mekaanisesta rikkoutumisesta tai virtamuuntajan räjähtämisestä. Aseman rakenne vaikuttaa vikojen seurauksiin. Kaksoiskisko-asetalla vian hoito on helpompaa. (Elovaara 2011a, 276). Sähkönjakeluverkoissa viat syntyvät usein salamaniskuista. Avojohtoverkoilla vikoja aiheuttavat myös muut luonnonilmiöt kuten eläimet, lumikuorma ja puiden kaatumiset. Syinä voivat olla johdinkatkokset ja ylikuormitus. (Elovaara & Haarla 2011b, 339-342.)

Maasulkuvika tulee kytkeä pois, niin nopeasti kuin se on teknisesti mahdollista, vikatyypin ilmiöiden vaarallisuuden vuoksi. Taustaverkon tuottama maasulkuvirta purkautuu vikapaikan maadoitukseen. Ilmiöstä syntyy maadoituksesta jännite vika-alueelle, mikä leviää kaikkiin galvaanisesti kytkettyihin maadoitettuihin metalliosiin. Maadoitusjännitteen muodostaa vikavirran ja kyseisen kohteen maadoitusimpedanssin tulo.

Taustaverkko tuottaa kapasitiivisen maasulkuvirran I_c , mikä ilmajohtoilla on keskimäärin 0,07 A/km. Maakaapeille kapasitiivinen maasulkuvirta on kaapelityypistä riippuen 2,7-4 A/km. (Lakervi & Partanen 2008, 186). Vikavirrat muodostuvat kapasitiivisesta virrasta I_c , mitä ei ole kompensoitu ja resistiivisestä virrasta I_r , mikä muodostuu verkon luonnollisista häviöistä. Resisttiivinen ja kapasitiivinen osuus lasketaan vektoreina yhteen, jolloin saadaan teoreettinen kokonaismaasulkuvirta I_f . Kokonaismaasulkuvirta lasketaan yhtälöllä 1.

$$I_f = \sqrt{I_c^2 + I_r^2} \quad (1)$$

missä I_f = maasulkuvirta
 I_c = kapasitiivinen virta
 I_r = resisttiivinen virta

Maasulkuilmiö eroaa sen mukaan, onko kyse kompensoimattomasta vai kompensoidusta sähköjakeluverkosta. Kompensoidussa verkossa päämuuntajan tähtipiste on eristetty, eli maasta erotettu. Kaikki päämuuntajaan perään galvaanisesti kytketyt komponentit tuottavat maasulkuvirtaa. Vian tullessa taustaverkon tuottama maasulkuvirta kulkee vikapaikkaan. Kompensoidussa verkossa osa maasulkuvirrasta kompensoidaan erillisellä kompensointikelalla, eli tähtipiste on kytketty induktanssin kautta maahan. Kompensointilaitteisto tunnetaan usealla eri nimellä: Peterseinin kela (Petersen Coil), sammutuskuristin, kompensointikela. (Elovaara & Haarla 2011a, 210). Verkko voi olla yli- tai alikompensoitu, silloin sammutuskela ei ole nollapisteessä.

Keskijännitejakeluverkot ovat maasta erotettuja. Tällöin yksivaiheinen maasulku ei saa aikaan suurta virtaa, koska maasulkuvirtapiiri sulkeutuu vain vaiheiden maakapasitanssien kautta. Maasulun aiheuttamat nollavirta ja nollajännite eivät tulisi siirtyä muuntajien kautta eri periaatteilla maadoitetuista verkosta toiseen, tämä pyritään ottamaan huomioon verkon rakenteessa. (Elovaara & Haarla 2011b, 338.)

Maasta erotetuissa tai osittain maadoitetuissa verkoissa yksivaiheinen maasulku johtaa helposti toisen maasulun syntymiseen jossain muualla verkossa. Vaarallinen tilanne on, jos syntyy kaksoismaasulku. Silloin samassa muuntopiirissä syntyy samanaikaisesti kaksi eri vaiheissa olevaa maasulkua. Tällainen vika aiheuttaa suuria maassa kulkevia virtoja. (Elovaara & Haarla 2001b, 339-342). Kaksoisvikojen kulkureittiä maassa on vaikea ennustaa. Jakeluverkkoyhtiöiden fuusioiden takia jakeluverkot ovat kasvaneet suuriksi. Kaapelointiasteen kasvaessa se aiheuttaa maasulkuvirtojen kasvamisen johtaen myös kosketusjännitteiden kasvamiseen. (Elovaara & Haarla 2011a, 185, 201.)

Huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuva kosketusjänniteongelma on keskeisin syy maasta erotetun keskijänniteverkon käyttöön. Sähköiskutilanteessa pyritään estämään hengenvaarallisen sydänkammiovärinän syntyminen kosketusjännitearvoa säättämällä. (Lakervi & Partanen 2008, 182.) Maasulkuvirtoja mitoituksessa pitää ottaa huomioon harmoniset virrat. Harmonisia virtoja aiheuttaa verkon kytketyt epälineaariset komponentit. Harmonisten virtojen osuutta on käsitelty Tanskalaisessa tutkimuksessa: Risks in incident to harmonics in compensated mv networks 2003, jonka tekijänä oli Hans Jorgen Jorgensen. Tämä tutkimus on julkaistu Cired-konferenssissa. Tutkimuksessa havaittiin maasulkuvirtojen kasvavan harmonisten virtojen vuoksi. (Jorgensen 2003.)

4 Alvan nykyinen mitoitus sähköverkon käyttöön ja sen kehittämistarpeet

4.1 Nykyinen mitoitus perustuen ihmisen sietokykyyn

Tähän projektikokonaisuuteen liittyvässä Tulomäen (2017) työssä määriteltiin vian yhteydessä tehtävien rajauskytkentöjen ehtoja. Mitoituksessa tulee ottaa huomioon ihmisen sähkön sietokyky. Alvan maasulkusuojauksen mitoitusperusteena käytetään $1x U_{tp:n}$ taulukkoa (Kuvio 1). Ihmisen kehon impedanssi (kehon sisäinen vastus) pitää ottaa huomioon mitoitusperusteita määrittäessä.

Pienten lasten sydämen lyöntitiheys on 100-125/ min, jolloin lyöntien väliseksi ajaksi tulee 0,48 s - 0,6 s (Jalanko 2017). Sähkövirta ei aiheuta hengenvaarallista kammiovärinää, jos jännite ei ole yli 220 V ja virran kestoaika on lyhempi kuin sydänjakso. Kammiovärinän riski on suurempi, jos sähkövirran kulkeminen sydämen läpi kestää useamman sydänjakson ajan. Jännitteen noustessa yli 220V kehon impedanssi pienenee, koska iholla ei ole eristävää vaikutusta kyseisen jännitteen yläpuolella. Tästä syystä ihmisen lävitse menevä vikavirta kasvaa nopeasti muuttuen hengenvaaralliseksi. Kun vikavirta on suurempi kuin 200 mA, ei virran kestoajalla voida pelastaa sydäntä kammiovärinältä. (IEC 60479-1 2018, 32-42.)

Tulomäen (2017) työssä on määritelty maasulkusuojauksen perusteet Alvan (siltoin Jyväskylän energia) sähköverkon käyttöön. Maasulkusuojauksen on toimittava suorissa maasuluissa 0,4 sekunnissa. Tämä poiskytkentäaika on valittu, koska maasulut poistuvat kyseisen ajan kuluessa tai jäävät pysyviksi. Pidemmälle ajalla ei ole perusteita maasulun sammumiselle. (Tulomäki 2017, 42).

Maadoitusjännite lasketaan yhtälöllä 2.

$$U_e = I_f \times Z_E \quad (2)$$

missä U_e = maadoitusjännite
 I_f = maasulkuvirta
 Z_E = maadoitusimpedanssi

Maasulkuvirta lasketaan yhtälöllä 3.

$$I_f = U_e : Z_E \quad (3)$$

missä I_f = maasulkuvirta
 U_e = maadoitusjännite
 Z_E = maadoitusimpedanssi

Perustilanteessa, kun verkossa ei ole muutoksia jakorajoissa ja kela on vireessä, maasulkuvirtaa I_f on 12 A. Tällöin kapasitiivista maasulkuvirtaa I_c on alle 4 A ja resistiivisen maasulkuvirran I_r osuus on korkeintaan 11 A. Jakeluverkoissa olevien muuntopiirien resuloiva maadoitusimpedanssi Z_E tulee olla alle. Yhtälöllä 2 lasketaan maadoitusjännite. Tästä laskettu maadoitusjännite U_e on 120 V (12 A x 10 Ω). Maasulkutilanteessa maadoitusjännite on 120 V, joka on U_{tp} käyrän sisäpuolella käytetyllä 0,4 s laukaisuajalla. Muuntajien resuloiva maadoitusimpedanssi määritetään yhtälöllä 3. Silloin maasulkuvirta saa olla enintään 23 A (230 V : 10 Ω). (Tulomäki 2017, 42-43).

Laskettu 23 A maasulkuvirtaa vastaa 20 A kapasitiivista virtaa ja 11 A resistiivistä virtaa. Sivuunviritys (resonanssipisteen alapuoleinen viritysarvo) voi olla enintään 20 A, tämä pitää ottaa huomioon maasulkujen aikaisia rajauskytkentöjä tehdessä. Sähkönjakeluverkko on normaalisti 4 A alikompensoitu, joten kerralla rajauskytkennöissä lisättävän verkon koko saa olla enintään 16 A, joka tarkoittaa noin 4 km maakaapelia. (Tulomäki 2017, 43).

Jotta pysytään sähkönjakeluverkon käytölle asetettujen turvallisten käyttöarvojen rajoissa myös poikkeavien kytkentätilanteiden aikana, yhdellä rajauskytkennällä lisättävän maakaapelin määrä voi olla enintään 2 km. Näiden kytkentöjen välillä on kompensointikelan annettava säätää aseteltuun 4 A viritystaseseen. (Tulomäki 2017, 43). Korvauskytkentätilanteet aiheuttavat edelleen haasteita, sillä resistiivisen virran osuus kasvaa niissä huomattavan suureksi.

4.2 Tarkempia huomioita sähkönjakeluverkon käyttöön huomioiden ihmisen sietokyky

Yleisesti on otettu huomioon virran tai jännitteen vaikutus ihmisen sietorajan määrittelyssä, mutta virtaa ja jännitettä ei ole johdettu samaan taulukkoon. Tässä työssä tarkasteltiin IEC 60479-1 (2018) mukaisia ihmisen sietorajoja ja laskettiin ihmisen läpikulkevaa virtaa vikatilanteessa. SFS

6000 mukaan, että vikavirtakytkimen tulee toimia 50 V:ssa ja alle 30 mA:ssa, mikä vastaa 5% ihmisten sietorajasta 36mA (Kuvio 2).

Table 1 – Total body impedances Z_T for a current path hand to hand AC 50/60 Hz, for large surface areas of contact in dry conditions

Touch voltage V	Values for the total body impedances Z_T (Ω) that are not exceeded for		
	5 % of the population	50 % of the population	95 % of the population
25	1 750	3 250	6 100
50	1 375	2 500	4 600
75	1 125	2 000	3 600
100	990	1 725	3 125
125	900	1 550	2 675
150	850	1 400	2 350
175	825	1 325	2 175
200	800	1 275	2 050
225	775	1 225	1 900
400	700	950	1 275
500	625	850	1 150
700	575	775	1 050
1 000	575	775	1 050
Asymptotic value = internal impedance	575	775	1 050

NOTE 1 Some measurements indicate that the total body impedance for the current path hand to foot is somewhat lower than for a current path hand to hand (10 % to 30 %).

NOTE 2 For living persons the values of Z_T correspond to a duration of current flow of about 0,1 s. For longer durations Z_T values can decrease (about 10 % to 20 %) and after complete rupture of the skin Z_T approaches the internal body impedance Z_i .

NOTE 3 For the standard value of the voltage 230 V (network-system 3N ~ 230/400 V) it can be assumed that the values of the total body impedance are the same as for a touch voltage of 225 V.

NOTE 4 Values of Z_T are rounded to 25 Ω .

Kuvio 2. Keskimääräiset kehon impedanssit jännitteen suhteen. (IEC 60479-1 2018)

Kun samaan taulukkoon lisätään sekä jännitteet että virrat suhteessa ihmisen sietorajaan, saadaan parempi käsitys turvallisista verkon käyttörajoista (Kuvio 3). Jotta toiminta on kaikille turvallista, tulisi jännitteen pysyä alle 150 V:n ja vian tulee poistua lyhyemmässä kuin sydänjaksossa. Lieventäviä tekijöitä voi olla, vikapaikan pitkittäisimpedanssi ja maaperän jännitteen nousu vikatilanteissa, eristävä maaperä yms. Mikäli kuvatuilla periaatteilla lähdetään verkon käyttöä mitoittamaan, ei ole pelivaraa odottamattomille ilmiöille, kuten kompensointikelan ohjaimen häiriölle, mittausvirheille tai huonontuneille maadoitusolosuhteille. Mitoituksissa pitäisi olla aina varmuusmarginaali.

Kosketusjännite	Imbedanssi /mA 5 % väestöstä		Ihmisen kokonaisimbedanssi / mA	
	Lapset/ vanhukset		keskimääräisesti	SFS 6001 / Utp1
25 V	1750 Ω	14 mA	3250 Ω	8 mA
50 V	1375 Ω	36 mA	2500 Ω	20 mA
75 V	1125 Ω	67 mA	2000 Ω	38 mA
100 V	950 Ω	105 mA	1725 Ω	58 mA
125 V	900 Ω	139 mA	1550 Ω	81 mA
150 V	850 Ω	176 mA	1400 Ω	107 mA
175 V	825 Ω	212 mA	1325 Ω	132 mA
200 V	800 Ω	250 mA	1275 Ω	157 mA
225 V	775 Ω	290 mA	1225 Ω	184 mA
400 V	700 Ω	571 mA	950 Ω	421 mA
500 V	625 Ω	800 mA	850 Ω	588 mA
700 V	575 Ω	1217 mA	775 Ω	903 mA
1000 V	575 Ω	1739 mA	775 Ω	1290 mA

Kuvio 3. Kosketusjännitteet / kehon impedanssi / kehon läpi vaikuttavat virrat. (Kauppinen 2023)

Verkostoa suunnitellessa ja jakeluhäiriöitä hoidettaessa pitää huomioida ihmisen jännitteen sietokyky. Jännite ei tapa, mutta virta tappaa. Seuraavaan Terveyskirjaston (2022) luetteloon on tässä opinnäytetyössä lisätty jännitteen mukaiset virtojen ja kestoajojen vaikutukset. Virran ollessa:

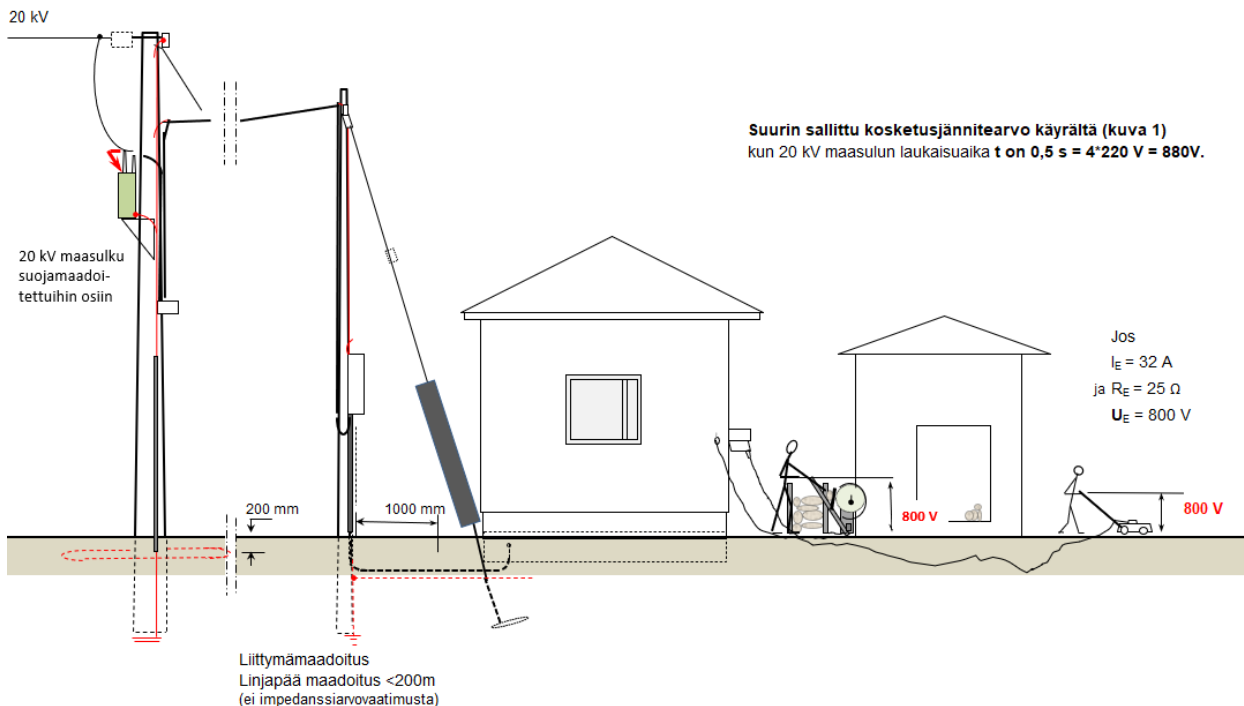
- 0-1 mA, virran vaikutus ei ole huomattava.
- 1-15 mA, virran vaikutusalue ulottuu kouristuskyynnyksen yli. Kouristusrajan yläpuolella irrottautuminen itse käsissä olevista elektrodeista ei ole mahdollista. Voimakkaita kipuja lihaksissa, sormissa ja käsivarsissa.
- 15-30 mA (noin 45-70 V), jos kesto aika on minuutteja. Voimakkaita supistuksia käsivarsilihaksissa. Hengitysvaikeuksia. Kohonnut verenpaine. Sietoraja.
- 30-50 mA (noin 70-90 V), jos kesto aika on sekunneista minuutteihin. Seuraa epäsäännöllinen sydäntoiminta. Kohonnut verenpaine. Voimakkaita kouristuksia. Tajuttomuus. Sydämen kammiovärinä mahdollinen.
- 50-200 mA (noin 90-230 V), jos kesto on lyhyempi kuin sydänjakso, ei tule kammiovärinää, mutta tulee voimakas shokkivaikutus. Jos kesto on pidempi kuin sydänjakso tulee sydämen kammiovärinää. Jännitteen kytkeytymisajankohta sydäntoiminnan vaiheeseen ratkaiseva. Siitä voi seurata tajuttomuus ja iholla virran aiheuttamia jälkiä.
- >200 mA (>230 V), jos kesto on lyhyempi kuin sydänjakso siitä seuraa sydämen kammiovärinää. Jännitteen kytkeytymisajankohta sydäntoiminnan vaiheeseen ratkaiseva. Siitä voi seurata tajuttomuus ja iholla virran aiheuttamia jälkiä. Jos kesto on pidempi kuin sydänjakso, siitä seuraa reversiibeli sydämen pysähdys. Alue, jossa kammiovärinän poistaminen sähkövirran avulla tapahtuu. Tajuttomuus. Iholla virran aiheuttamia jälkiä. (Sähkön aiheuttamat vammat (sähköisku) 2022.)

4.3 Mitoitusperusteiden kehittämistarpeet

Maadoitusjännitteen leviämisen takia on aiheellista tarkastella, miten maadoitusjännite ja -virta aiheuttaa ihmisen terveydelle vaaraa. Maadoitusjännite leviää kaikkiin galvaanisesti kytkettyihin metalliosiin. Standardi SFS 6001 ei ota huomioon maadoitusjännitteen laaja-alaista leviämistä. Sähköalan asiantuntija Seppo Riikonen (2022) on piirtänyt Alvan projektikonaisuuteen standardeita selventäviä kuvia ja laskentaesimerkkejä.

Kuviossa 4 on esitetty maadoitusjännitteen leviäminen. Vian tullessa kohteeseen, missä käyttö- ja suojamaat ovat yhdistetty, kulkeutuu maasulkuvirta muuntopiirin kaikkiin rinnan kytkettyjen maadoitusten kautta maahan muodostaen näiden tulojen mukaisen maadoitusjännitteen. Kuvion 4 esimerkki laskennassa muuntamon maadoituksen ollessa 25Ω ja maasulkuvirran 32A muodostuu maadoitusjännitteeksi koko muuntopiiriin 800 voltia (Riikonen 2022). Esimerkitapauksessa oli standardin SFS 6001 mukainen mitoitus. Kun tarkastellaan kuvion 3 mukaisia rajoja, on havaittavissa huomattava ristiriita turvallisuuden tarkastelussa. Vaaralliset jännitteet leviävät myös kulu-
tuspaikeille.

Kuinka maadoitusten $\leq 4xU_{TP}$ vaatimusten mukaan mitoitettussa muuntopiirissä.



Kuvio 4. Maadoitusjännitteen leviäminen (Riikonen 2022).

5 Verkko-yhtiön sähkönjakelutoimintaa ohjaavat määräykset

Tässä luvussa tuodaan esille keskeisimpiä verkko-yhtiön sähkönjakelutoimintaa ohjaavia lakeja ja standardeja maasulkuilmion kannalta. Standardien pohjana on sähköturvallisuuslaki (2016/1135) ja Valtioneuvoston asetus sähkölaitteistoista (2016/1434) sekä valtioneuvoston asetus sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (2016/1436) (SFS 6000-1 2017, 12). Kauppa- ja teollisuusministeriö on antanut viranomaismääräykset sähkölaitteistojen turvallisuudesta. Lisäksi Turvatekniikan keskukselta (Tukes) on julkaissut luettelon olennaisista standardeista. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan lähinnä sähköturvallisuuslakiin liittyviä näkökohtia.

Tärkeimpiä ohjaavia asiakirjoja ovat standardit SFS 6001 ja SFS 6000 sekä IEC-standardi ja CENELEC-standardi. Sähköenergian siirron parissa toimii lukuisia eri järjestöjä, jotka vaikuttavat sähköalan lakeihin ja standardeihin. Näitä ovat muunmuassa CIREN (Congres International des Re-seaux Electriques de Distributions), Energiateollisuus ry (ET), IEC (International Electrotechnical Commission), SESKO ry (Suomen standardoimisliitto SFS). Viimeisenä tässä luvussa pureudutaan käytönjohtajan vastuuseen verkko-yhtiön toiminnassa, joka on ollut liikkeelle paneva voima tähän opinnäytetyöhön.

5.1 Sähköturvallisuuslaki

Sähköturvallisuuslaki määrittelee sähkölaitteita ja -laitteistoja koskevat yleiset vaatimukset 6:nessa pykälässä. Lain mukaan:

Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että:

1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;

2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;

3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.

Jos sähkölaitte tai -laitteisto ei täytä 1 momentissa säädettyjä edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille, luovuttaa toiselle eikä ottaa käyttöön. (L 16.12.2016/1135, 6§.)

5.2 Standardit

Standardit eivät ole aina yksiselitteisiä ja niiden tulkinta voi olla haastavaa. Niissä on paljon viittauksia eri standardeihin eri paikoista löytyviin täsmentäviin ohjeisiin. Viittaukset voivat olla myös toiseen standardiin ja määräykseen. Tässä luvussa pyritään selkeyttämään maasulkusuojaukseen liittyviä määräyksiä sekä standardeja ja nostamaan esille niiden tulkinnan haasteellisuuden.

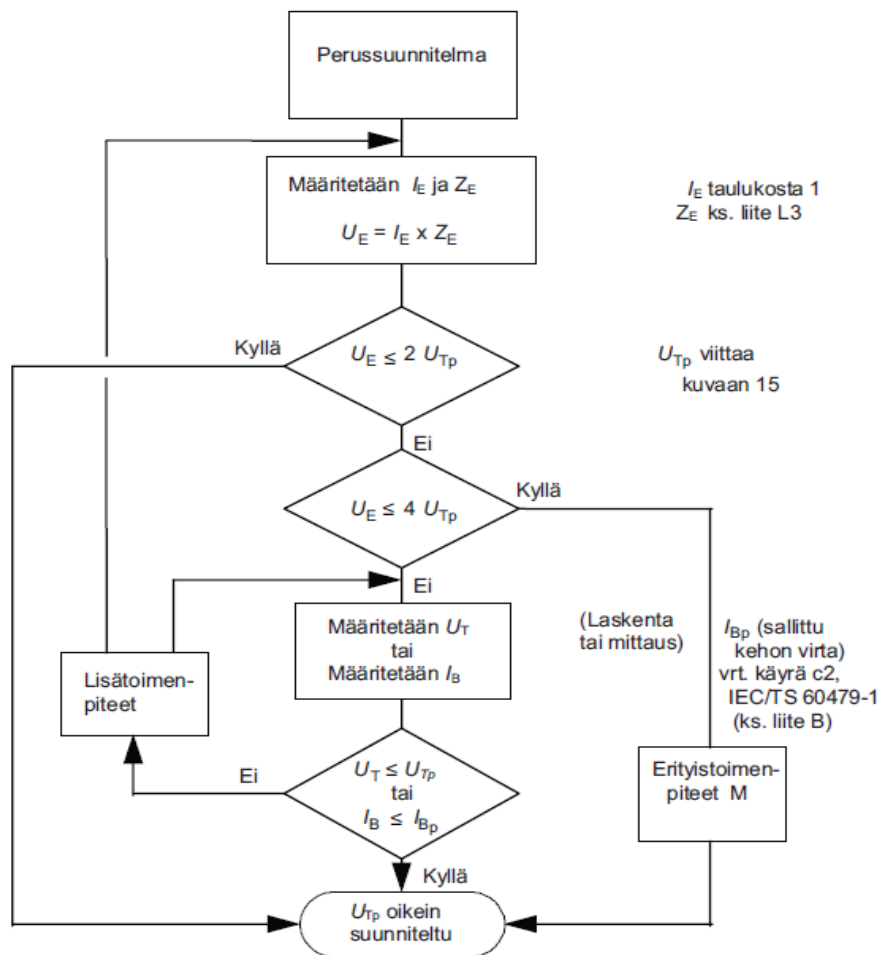
Pienjännitestandardissa SFS 6000 ei käsitellä maasulunaikaisia maadoitusjännitteitä lainkaan. Ainoastaan on maininta sivulla 561: ”Jakeluverkon haltijan on tarvittaessa annettava suunnittelijalle ja laitteiston rakentajalle liittymän mitoitus- ja suojausta varten tarpeelliset tiedot.” (SFS 6000-1 2017)

Suurjännitestandardissa SFS 6001 otetaan esille seuraavia asioita maadoitusjärjestelmän suunnitteluun, asennukseen, testaamiseen ja kunnossapitoon liittyen. Standardi antaa kriteerit, jolla voidaan varmistaa henkilöiden turvallisuus kaikissa paikoissa, joihin henkilöillä on pääsy. Lisäksi standardi antaa kriteerit, että maadoitusjärjestelmään liitettyjen ja läheisyydessä olevien laitteiden eheys säilyy. Maadoitusjärjestelmän mitoituksessa olennaisia asioita ovat: vikavirran suuruus, vian kestoaika sekä maaperän ja maadoituselektrodien ominaisuudet. Asennuksilla, jossa suurjännitelaitteet eivät sijaitse sähkötiloissa kuten esimerkiksi teollisuusympäristössä, kannattaa käyttää laajaa maadoitusjärjestelmää. Näin voidaan tehokkaasti estää tilanne, että suurjänniteviiroissa aiheutuvat kosketusjännitteet ylittävät SFS 6000-4-42 esitetyt kosketusjännitteen arvot (esimerkiksi 50V). (SFS 6001 2018, 87-88.)

Standardin SFS 6001 turvallisuuskriteerien mukaan, jos sydämen alueen kautta kulkee niin suuri virta, että se voi aiheuttaa sydänkammiovärinän, henkilölle voi aiheutua sähköstä vaaraa. Henkilöille aiheutuvaa vaaraa ja turvallisuusriskiä arvioidessa otetaan huomioon ensinnäkin se osa virrasta, joka kulkee sydämen kautta. Toiseksi kehon impedanssi virran kulkureitillä. Kolmanneksi kehon kosketuspisteiden välinen resistanssi. Viimeisenä pitää ottaa huomioon vian kestoaika. Käyttäjän ja toimittajan välillä sovitaan perusvaatimukset kuten vikavirta ja vian kestoaika. Kuten jo edellisessä luvussa esitettiin, standardissa määritellään sallittu kosketusjännite (Kuvio 1). Askeljännitteelle annetut vaatimukset täyttyvät, jos täytetään kosketusjännitteelle annetut vaatimukset, koska askeljännitteen raja-arvot ovat suurempia kuin kosketusjännitteiden raja-arvot. Laajaa

maadoitusjärjestelmää suositellaan käytettäväksi tiloissa, joissa suurjännitelaitteet eivät sijaitse sähkötiloissa. (SFS 6001 2018, 87-88.)

Maadoitusjärjestelmän perussuunnitelma muodostuu perusvaatimusten soveltamisesta. Mallisuunnitelma voidaan luoda, kun suunnitelma on tarkistettu kosketusjännitteiden suhteen. Standardissa SFS 6001 on esitetty suunnitteluprosessin lohkokaavio, jossa on esitetty laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnittelu vertaamalla maadoitusjännitettä U_E tai kosketusjännitettä U_T sallittuun kosketusjännitteeseen. Tämä lohko-kaavio on esitetty kuviossa 5 (SFS 6001 2018, 94).



Kuva 16 Laajaan maadoitusjärjestelmään (10.5.2 C1) kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnittelu vertaamalla maadoitusjännitettä U_E tai kosketusjännitettä U_T sallittuun kosketusjännitteeseen U_{Tp} (SFS-EN 50522 kuva 5)

Kuvio 5. Laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman maadoitusjärjestelmän suunnittelu. (SFS 6001 2018, 94)

Erikseen on aina tarkistettava siirtyvät potentiaalit. Erityisen tärkeää on tarkistaa kyseiseen maadoitusjärjestelmään kaapelivaippojen, kaapelien kosketussuojien, PEN-johtimien välityksellä tai muulla tavoin johtavasti kytketyt maadoitusjärjestelmät, ukkosenjohtimet, maahan kaivettuja johtimet ja maadoituselektrodina toimivat kaapelit tai kaapelivaipat. (SFS 6001 2018, 91-94.) Standardissa SFS 6001 käsitellään erityistoimenpiteiden käyttäminen sallittujen kosketusjännitteiden takaamiseksi. Näitä ovat muun muassa aidat, johtamattomien materiaalien käyttö ulkoseinillä, vaakamaadoituselektrodien käyttö ja käyttöpaikan eristäminen. Käyttöpaikoksi on määritetty kohdet, missä verkkoyhtiön henkilöstö työskentelee. (SFS 6001 2018, 113-114.)

Mikäli päädytään kuvion 5 mukaisesti käyttämään $U_E \leq 4U_{TP}$, tulee käyttöpaikoilla toteuttaa standardin 6001 liitteen E kohdan erityistoimenpiteet. Liitteen E M-kohdat ovat velvoittavia. Liitteessä E esitetyissä M-kohdissa 1-4 määritetään erityistoimenpiteiden käyttö käyttöpaikoilla sallittujen kosketusjännitteiden takaamiseksi. Erityistoimenpiteitä ovat esimerkiksi aitojen käyttö, eristävien materiaalien tai potentiaalirenkaiden käyttö. (SFS 6001 2018, 113-114)

5.3 Käytönjohtajan vastuu

Toiminnanharjoittajan on nimettävä yli 1000 voltin laitteistolle käytönjohtaja, tästä on määräys Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä sähköalan töissä (L 5.7.1996/516, 2§). Sähköjakeluverkkoyhtiöllä pitää olla nimettynä käytönjohtaja, joka on tosiasiallisesti verkkoyhtiön palveluksessa. Käytönjohtaja vastaa sähköverkon turvallisesta käytöstä ja kunnossa pidosta. Käytönjohtajalla pitää olla sähkövoimatekniikan teknikon, insinöörin tai diplomi-insinöörin tutkinto.

Saadakseen S1-pätevyyden pitää olla suoritettuna S1-tutkinto. Sen lisäksi pitää olla laaja-alaista alan työkokemusta, jonka määrä vaihtelee koulutustaustan mukaan. S1-pätevyyden myöntää henkilö- ja yritysarviointi järjestö SETI Oy.

Käytönjohtajan velvollisuudet on esitetty sähköturvallisuuslaissa (L 1135/2016, 62§). Käytönjohtaja on laitteiston haltijan asiantuntija sähköturvallisuuden ylläpidossa. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) on tehnyt selventävän liitetiedoston käytönjohtajan vastuuta koskevasta lain kohdasta (Käytönjohtajan perustehtävät 5/2020). Sen mukaan käytönjohtaja vastaa siitä, että:

- *sähkölaitteiston käytössä ja huollossa noudatetaan sähköturvallisuuslakia*
- *sähkölaitteisto on sähköturvallisuuslain edellyttämässä kunnossa käytön aikana*

• käyttötöitä tekevät henkilöt ovat ammattitaitoisia ja riittävästi tehtäviinsä opastettuja. Vastuut ovat suoraan käytönjohtajalle osoitettuja velvoitteita eikä niitä voi sopimuksella siirtää. Vastuisiin liittyviä tehtäviä tai töitä voidaan kuitenkin siirtää toisen henkilön suorittavaksi.

Lain edellyttämän turvallisuustason ylläpitämiseksi käytönjohtajan tulee vastata ja huolehtia siitä, että sähkölaitteiston käyttö sekä suur- että pienjännitteisten osien osalta on turvallista. (Käytönjohtajan perustehtävät 5/2020.)

Sähköturvallisuuslaissa ainoastaan sivulauseessa tulee ilmi, että käytönjohtaja on henkilökohtaisessa vastuussa sähkönjakeluverkon turvallisuudesta. Verkkoyhtiön tulisi ottaa vastuuvakuutus nimeämälleen käytönjohtajalle. On myös huomattavaa, että rikosoikeudellista sanktioita vastaan ei ole vakuutusta.

6 Lakimuutos ja sen vaikutukset

Suomen sähköistyksen alkuajoissa ei ollut maasulkuilmiön kanssa ongelmaa, koska käyttö- ja suojamaa pidettiin erillään 70-luvulle saakka. Maadoitusjännitteen suuruus vikatilanteessa ei saa ylittää 125 V (Sähkölaki ja varmuusmääräykset 1966, 142-143). Tämän aikakauden määräyksissä käsitellään käyttö- ja suojamaadoitus erillisenä. Tässä on määritelty turvallinen verkon ajotapa, ennen kuin suoja- ja käyttömaadoituksia aloitettiin yhdistämään. Kuviossa 6 on kuvakaappaus sähkölaista 1966, jossa käsitellään vaarallista maadoitusjännitettä.

2. Jollei 1-vaiheinen maasulku kytkeydy itsetoimivasti ja nopeasti pois, ei suojamaadoitetuissa osissa saa esiintyä vaarallista maadoitusjännitettä.

Jos muuntajassa tapahtuu läpilyönti suurjännitepuolelta pienjännitepuolelle, tai jos suurjännitejohdin koskettaa pienjännitejohdinta, se synnyttää suurjännitepuolella 1-vaiheisen maasulun, jonka virta kulkee lähinnä pienjännitepiirin käyttömaadoituksen kautta maahan, ja aiheuttaa silloin vastaavan jännitteen nousun nollajohtimessa ja sen välityksellä suojamaadoitetuissa (nollatuissa) pienjännitelaitteiden kosketeltavissa osissa. Tämä jännitteen nousu ei siis saa olla 125 V suurempi.

3. Sellaisilla paikoilla, missä ihmisiä säännöllisesti oleskelee tai liikkuu, ei suojamaadoitetuissa osissa saa esiintyä hengenvaarallista kosketusjännitettä maasulun aikana silloinkaan kun maasulku kytkeytyy itsetoimivasti ja nopeasti pois.

Kuvio 6. Ote sähkölaista ja varmuusmääräyksistä (Sähkölaki ja varmuusmääräykset 1966, 142-143).

Sähkömarkkinalakiin määrättiin sähkönjakeluverkkoyhtiöille 2014 voimaan tuleva lakivelvoite, jossa veloitettiin kehittämään verkkoa säävarmaksi. Tämän velvoitteen mukaan sähkönjakeluverkossa taajamissa ei saa olla yli 6 tunnin sähkökatkoja eikä haja-asutuksenkaan puolella yli 36 tunnin sähkökatkoja. Lakimuutoksen myötä verkkojen tulee olla 50 % säävarmoja 2019 mennessä ja kokonaan 2028 mennessä. (L 9.8.2013/588, 51§.)

Sähkönjakeluverkkoyhtiöt alkoivat kaapeloimaan ennätystahdilla jakeluverkkojaan rahoituksensa puitteissa, tämän takia maasulkuilmiön vaikutukset tulivat ajankohtaisemmaksi. Lakimuutoksen myötä alettiin maasulkuilmiöön ja verkon käyttöön kiinnittää enemmän huomiota. Tämä tehtiin tarkastelemalla tarkemmin muuntamoiden maadoitusvaatimuksia ja laajan maadoituksen käsitystä. (Saarijärvi, Tammi & Lehtonen 2014, 31.)

Haasteena on laajan maadoituksen käsite. Laajan maadoituksen käsitteeseen on jäänyt ristiriitaisuuksia. Standardi SFS 6001 mukaan laajan maadoitusjärjestelmän määritelmä perustuu siihen, että alueella ei ole lainkaan tai on vain vähäisiä potentiaalieroja (SFS 6001 2018, liite O). Mutta tutkimuksissa on tullut erilaista tietoa esille. Esimerkiksi Eero Saarijärvi kirjoitti Aalto yliopiston tutkimuksessa ”Low voltage network touch voltages caused by mediumvoltage network earth faults” totesi: ”Maadoitusta tarkasteltaessa, saattaa olosuhteista riippuen taajamissakin maadoitusten väliin syntyä merkittäviä potentiaalikuoppia” (Saarijärvi ym. 2014, 37).

7 Käytetyt järjestelmät, ohjelmat ja analysoijat

Alvan sähkönjakeluverkkoa ohjataan Microscadan avulla. Microscada on Hitachin tekemä Scada-järjestelmä, jolla käytetään jakeluverkon kaukokäytettäviä laitteita. Microscadaan tuodaan myös aktiiviset mittaustiedot. DMS on käytöntuki- ja verkostolaskentaohjelmisto. Kaikki Scadan ohjattavat toimilaitteiden tilatiedot on linkitetty käytöntukijärjestelmään. DMS pitää yllä myös käsikäyttöisten toimilaitteiden kytkentätilat.

Alvan verkko on mallinnettu Powergrid-verkostolaskentaohjelmalla. Nykyisen Trimble-verkostolaskennan tulokset ovat yhtenevät Powergrid-laskentatuloksien kanssa. Verkostolaskentaohjelmiin dokumentoidaan kaikki verkostoon kytketty komponentit, kaapelit pituuksineen, toimilaitteet, muuntajat ja niiden kaikkien sähkötekniiset arvot. Myös asiakastiedot dokumentoidaan lämmitys-

järjestelmiseen ja näiden perusteella määritetään kulutuskäyrät. Edellä mainittujen dokumentointien perusteella voidaan laskea oikosulkuvirrat, sulakkeiden toiminta-ajat, ja nolausehtojen toteutuminen sekä standardin mukaisen sähkön laadun toteutuminen. Verkostolaskennalla voidaan laskea myös kompensoimattoman keskijänniteverkon kaapeleiden tuottama maasulkuvirta.

Kompensoidussa verkossa jäännösvirrat I_c ja I_r pitää tietää, sillä tätä osuutta verkostolaskenta ei kykene määrittämään.

Trench:n sammutuskelan ohjaimelta saadaan mittaustietoja tähän työhön. Trench on maasulkulaitteistojen toimittaja. Automaattinen järjestelmä kompensoi osan maasulkuvirrasta. Sammutuskelanohjain välittää joitain tietoja Scada-kaukokäyttöjärjestelmään.

Tässä työssä tutkitaan häiriötallenteita todellisista ja keinotekoisista vikatilanteista suoja-areiden toiminnasta Wavewin-vektoriohjelmalla. Wavevin-ohjelmistolla voidaan tarkastella tapahtumien luonnetta oskillografina sekä suoja-areiden binääri -tietojen tilaa. Ilmiöiden tarkempi tarkastelu tehdään DRtoolilla, jonka on kehittänyt Veikko Lehesvuo (ABB). Kaavalaskuri DRtool on kehitetty suoja-areiden tekemien häiriötallenteiden tulkitsemiseen Matlabin laskentaohjelman päälle.

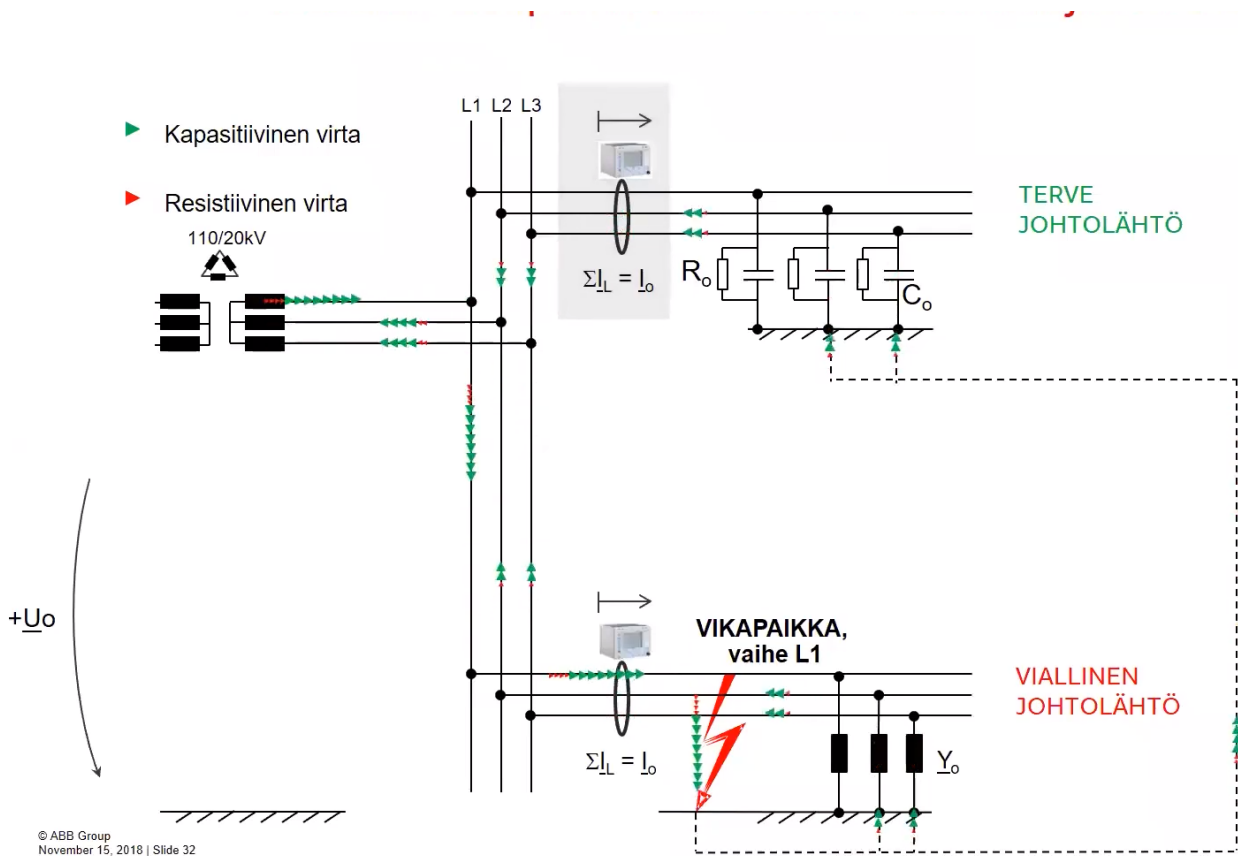
Topas 1000:n avulla mitataan vikakohteissa sähköisiä suureita suurella näytteenotto taajuudella. Topas 1000 on sähkönlaatuanalysointilaitteisto. Tätä analysointilaitteistoa käytetään, jotta voidaan varmistaa vikapaikalla, että kenttämittaukset todistavat teoreettisen tarkastelun oikeaksi.

8 Sähkönjakeluverkon tapahtumat maasulkuilmiön aikana lähtötilanteessa

8.1 Kompensoitamaton verkko

Kuviossa 7 on havainnollistettu, mitä kompensoimattomassa (eli maasta erotettussa) verkossa tapahtuu maasulkuilmiön aikana. Kuvio on syntynyt ABB:n yleisten mittauksien tuloksena. (Wahlroos & Aaltonen 2020.) Maasulkuvirta muodostuu päämuuntajalle kytketyn verkon kapasitiivisista ja verkon häviöiden muodostamasta resistiivisestä osasta. Vian aikana taustaverkon kaikki kaapelit syöttävät kapasitiivista virtaa vikapaikkaan. Mikäli 20 kV verkossa päämuuntajan perässä on 100 km ilmajohtoa on kapasitiivinen maasulkuvirta noin 7 A. Mikäli vastaava mitta on maakaapelina, silloin on kapasitiivinen maasulku virta noin 400 A. Verkon vuotovirrat muodostavat resistiivisen

komponentin, mikä on noin 5% koko taustaverkon arvosta. Tämä karkea laskentaa voi noudattaa suppeilla verkoilla. Laajat pitkät verkkoalueet aiheuttavat suhteessa enemmän resistiivistä virtaa. Kokonaismaasulkuvirta lasketaan kaavan 1 mukaan. Maadoitusjännite muodostuu vikapaikan maadoitusarvosta ja maasulkuvirran tulosta.



Kuvio 7. Kompensoimattoman verkon maasulkuilmiö kaaviona. (Wahlroos & Aaltonen 2020)

Kompensoimattoman verkon ilmiöt ja viat on suoraviivaisemmat, joten verkostolaskentakin selviää tästä helpommin. Sen takia kompensoimattoman verkon tarkastelu jätetään tässä työssä sivurooliin. Tämä tehdään myös siitä syystä, että kompensointi yleistyy kaapeloinnin myötä ja kompensoinnin kautta oikein käytettynä saavutetaan parempi turvallisuustaso.

8.2 Kompensoitu verkko

Kompensoidussa verkossa katkaisijan ei aina tarvitse tehdä verkkoa jännitteettömäksi, sillä osa valokaarimaasuluista sammuu itsestään. Tämän takia avojohtoverkon jälleenkytkentöjen määrä vä-

henee ja sähkön laatu paranee. Suomessa käytetään myös niin sanottua hajautettua kompensointia, tällöin maasulkuvirran pienentäminen tapahtuu maadoitusjännitteen kautta, mutta se ei useinkaan riitä valokaaren sammuttamiseen. (Lakervi & Partanen 2008, 72.)

Kompensointikelat kompensoivat induktanssillaan sähköaseman päämuuntajan syöttämän maakapasitanssin. Maasulkuvirta on siis aina päämuuntajakohtainen. Oikosulusta tämä eroaa siten, ettei vikavirta näy pää- ja jakelumuuntajien galvaanisen erotuksen ylitse kuten oikosulku. Keloja voi olla keskitetty automaattisäätöinen tai pienempiä kiinteitä keloja hajautettuna esimerkiksi muuntamoihin. Tässä työssä tarkastellaan keskitettyä ratkaisua, mikä onkin Alva sähköverkon verkon valitsema ratkaisu. Hajautuksessa on havaittu erillisiä ongelmia, mitkä ovat niin merkittäviä, ettei hajautetun kompensoinnin käyttöön pidä ryhtyä ilman perusteellista selvitystä ja riskitarkastelua. Näitä ongelmia ei tässä työssä ole tarkoitus avata, sillä hajautettu kompensointia ei otata Alvan jakeluverkossa käyttöön sen riskien vuoksi.

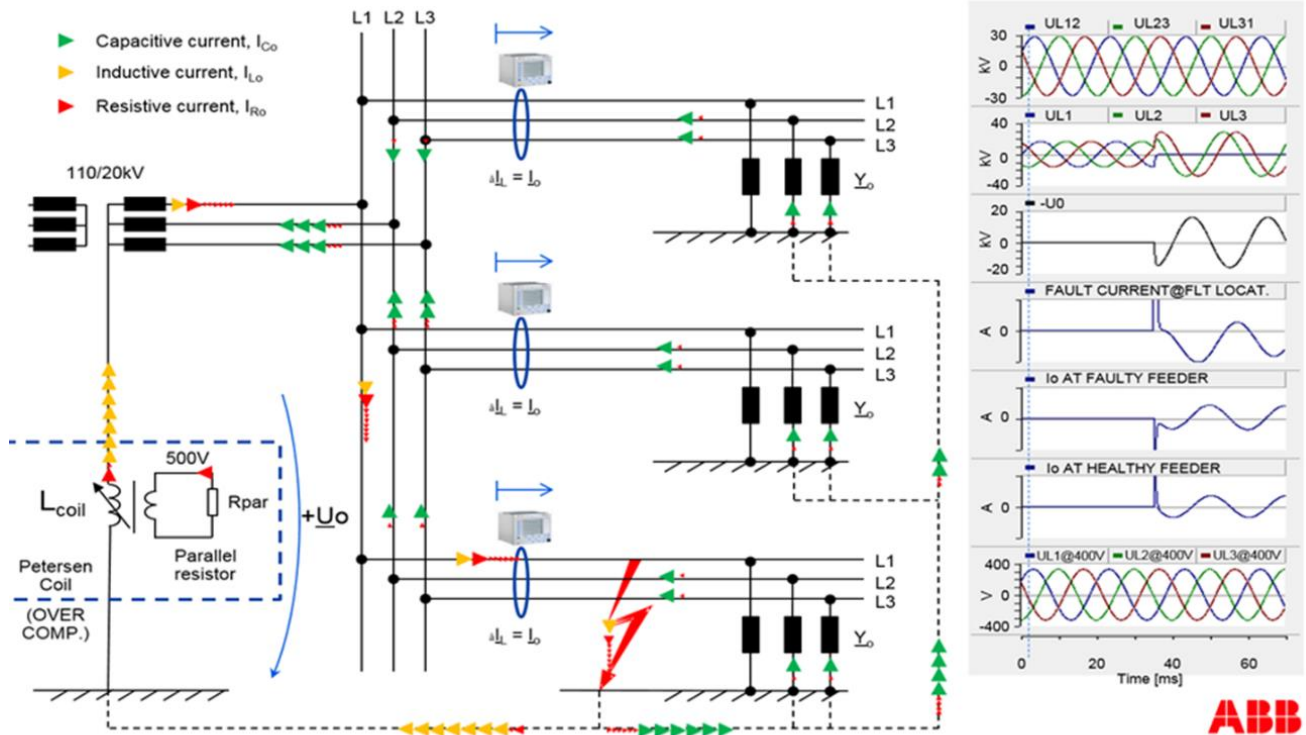
Kuviossa 8 on havainnollistettu, mitä kompensoidussa verkossa tapahtuu maasulkuilmiön aikana. Kuviossa 8 esitetään verkostolaskennan tulokset (Powergrid-verkostolaskentaohjelmalla) perustilanteesta yhdeltä päämuuntajalta, verkostolaskentatulokset ovat yhtenevät koko Alva:n jakeluverkostossa. Sivuvirityksen ollessa 4 A kapasitiivistä ja resistiisen virran 8 A, verkostolaskenta antaa maasulkuvirralla arvon 3.1 A.

Tulos	Seuranta	Suunnitelma	Muutos
Häviöenergia (kWh)	931 kWh	1964 kWh	1033.2 kWh (111.0 %)
Häviökustannukset (eur)	EUR 3463.44	EUR 3504.77	41.3 EUR (1.2 %)
Päteteho (kW)	1501.0 kW	1535.3 kW	34.3 kW (2.3 %)
Loisteho (kVAr)	498.6 kVAr	509.9 kVAr	11.3 kVAr (2.3 %)
Häviöteho (kW)	0.4 kW	0.9 kW	0.5 kW (114.0 %)
Laskettu huippukäyttöaika, varaus (h)	2050 h 57 min	2033 h 55 min	-17.0 h (-0.8 %)
Nollavirta / havahtumisvirta (%)	0.0 %	0.0 %	0.0 % (NaN %)
Nollajännite / havahtumisjännite (%)	37.1 %	37.1 %	0.0 % (0.0 %)
Teho / releen havahtumisarvo (%)	0.0 %	0.0 %	0.0 % (NaN %)
Mitattava nollavirta 0 ohm resistanssilla (A)	3.1 A	3.1 A	0.0 A (0.0 %)
Mitattava nollavirta annetulla resistanssilla (A)	0.7 A	0.7 A	0.0 A (0.0 %)
Lähdölle tuleva maasulkuteho (kVA)	3 kVA	3 kVA	0.0 kVA (0.0 %)
Maasulkuvirta 0 ohm vikaresistanssilla (A)	0.7 A	0.7 A	0.0 A (0.0 %)
Maasulkuvirta annetulla vikaresistanssilla (A)	0.2 A	0.2 A	0.0 A (0.0 %)
Maasulkuvirran ja nollajännitteen kulma	17.15	17.15	
Muokkaaja	jahe	jahe	
Muokattu pvm	16.12.2015	25.01.2016	
Virta (A)	43.9 A	45.0 A	1.0 A (2.3 %)
Suurin jännitealenema (%)	0.1 %	0.1 %	0.0 % (43.3 %)
Pienin 2-vaiheinen oikosulkuvirta (A)	3946.8 A	3946.8 A	0.0 A (0.0 %)
Lähdön tuottama maasulkuvirta (A)	17.9 A	17.9 A	0.0 A (0.0 %)
+ Kisko			
+ Solmuväli			

Verkostolaskennan antama maasulkuvirta

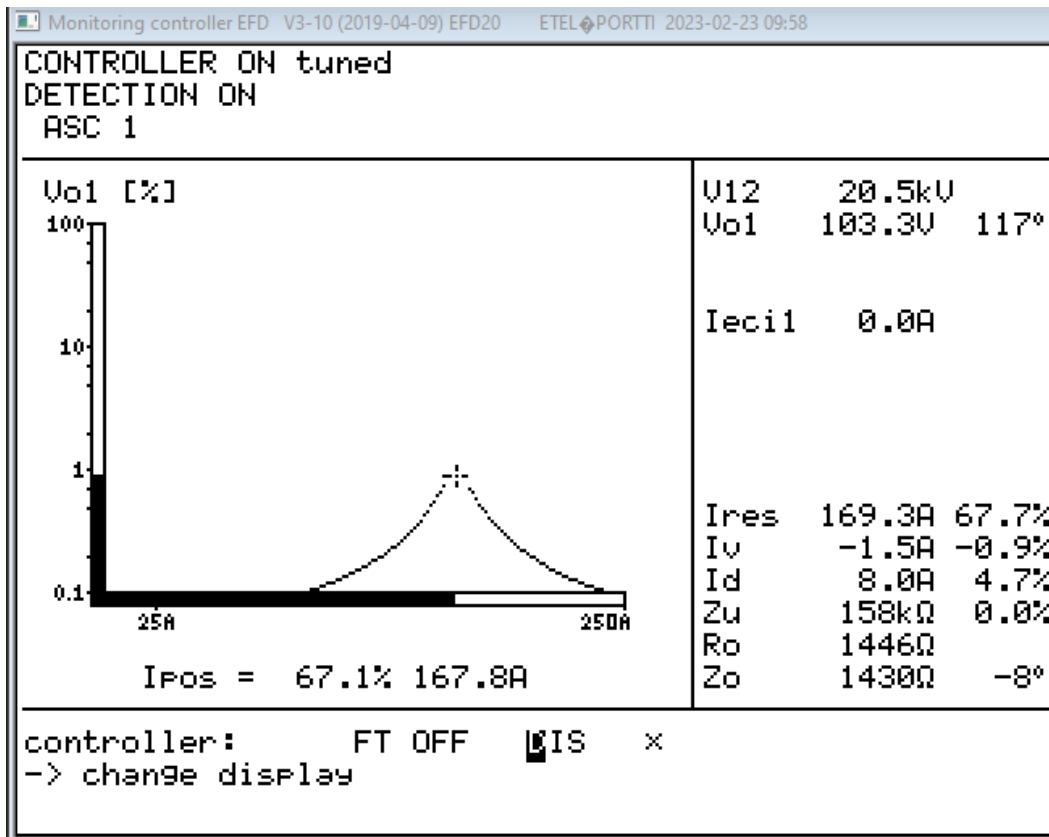
Kuvio 8. Powergrid-verkostolaskenta perustilanteessa. (Kauppinen 2020)

Kuviossa 9 on periaatteellinen kuva maasulusta kompensoidussa verkossa. Taustaverkon tuottaman kapasitiivinen virta on kuvattu vihreällä, joka voidaan perustilanteessa kompensoida osittain. Kelan tuottaman induktiivinen virta kuvattu keltaisella. Kelan rinnakkaisvastuksella tuotetaan (lisää) resistiivistä virtaa varmistamaan suojiin toiminta, mikä on kuvattu kuviossa 9. Resistiivinen virta on kuvattu punaisella. Verkon häviöt ja vuotovirrat kuvattu pienemmällä punaisella. Malli on ylikompensoidusta tilanteesta. Verkkoja ajetaan pääsääntöisesti hieman alikompensoituna. Tällä parannetaan perinteisen kulmaperiaattella toimivien suojiin käyttöä. Kulmaperiaate seuraa virran ja nollajännitteen välistä kulmaa. Tällä tavalla koetetaan myös varmistaa, että suojaus pysyy toiminta-alueella.



Kuvio 9. Kompensoidun verkon maasulkulmiö kaaviona. (Wahlroos & Aaltonen 2020)

Kuviossa 10 on kuvattu sammutuskelan tapahtumat perustilanteessa. Kuvakaappaus on sammutuskelan ohjaimelta. Kuviossa on sammutuskelan ohjaimen säätötilanne perustilanteessa missä taustaverkon koko I_{res} on 169.3 A. Kela on säätänyt itsensä arvoon 167.8 A, siis 1.5 A alikompensointina. Resistiivisen virran osuus on 8.0 A, josta lisävastuksen osuus on 4.0 A. Perustilanteessa maasulkuvirta on pieni ja muodostuu lähinnä resistiivisesta virrasta. Laajoissa verkoissa sekä verkon korjauskytkentätilanteissa resistiivisen virran osuus on suhteessa suurempi kuin kapasitiivisen virran osuus.



Kuvio 10. Trench:n sammutuskelan ohjaimelta virityskuva. (Kauppinen 2023)

Kehittyneemmät kompensointikelan ohjaimet mittaavat kokonaismaasulkuvirran lisäksi johtolähtöjen tuottamat kompensoimattomat maasulkuvirrat. Kuviossa 11 on sammutuskelan ohjaimelta mitattu kompensoimaton I_c maasulkuvirta johtolähdöiltä J03-J14. Tästä näkee, kuinka paljon kyseessä olevan johtolähdön perässä on verkkoa. Taustaverkoksi muodostuu kaikkien kyseisen päämuuntajan perään kytkettyjen lähtöjen I_c summa, joka on 178.7 A. Yhtenevät tiedot pitäisi saada laskettua verkostolaskennasta, mikäli jakorajat asetellaan todellisuuden mukaisiksi. Verkon häviöistä muodostuvaa resistiivistä osaa ei voida määrittää verkostolaskennan avulla.

Monitoring controller EFD V3-10 (2019-04-09) EFD20 ETEL PORTTI 2023-02-23 10:32

CONTROLLER ON tuned
DETECTION ON
ASC 1

Vo1 106V 117° 0.9% Zu 156.4kΩ ΣIc 178.7A

feeder parameter Zu/Ic 1- 8

	Vo	Zu/Iu	Ic	
1 J03	1	> 500kΩ -69°	19.7A 92°	ok
2 J05	1	413.2kΩ -110°	16.8A 91°	ok
3 J06	1	> 500kΩ 114°	10.5A 95°	ok
4 J08	1	> 500kΩ -22°	12.5A 96°	ok
5 J09	1	212.7kΩ -154°	27.9A 92°	ok
6 J10	1	> 500kΩ 156°	11.9A 94°	ok
7 J11	1	> 500kΩ 0°	0.0A 0°	ok
8 J14	1	303.7kΩ -136°	27.6A 92°	ok

detection: FT OFF IS ×
-> change display

Monitoring controller EFD V3-10 (2019-04-09) EFD20 ETEL PORTTI 2023-02-24 13:09

CONTROLLER ON tuned
DETECTION ON
ASC 1

Vo1 101V 111° 0.9% Zu 157.0kΩ ΣIc 178.7A

feeder parameter Zu/Ic 9-16

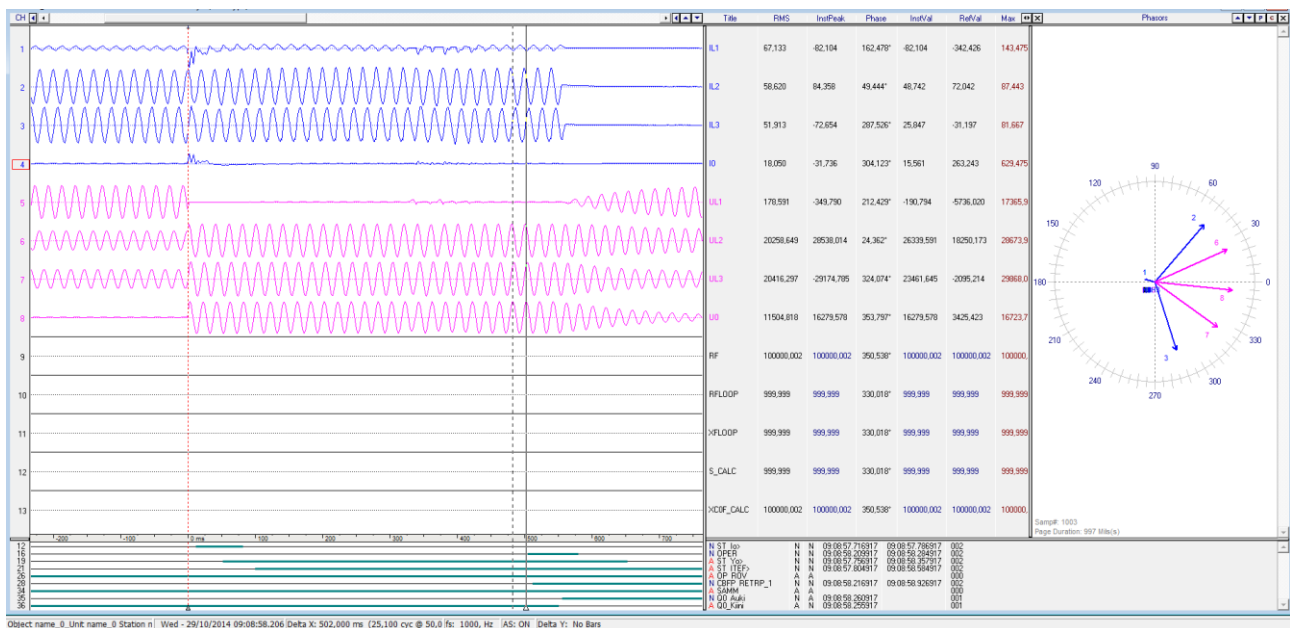
	Vo	Zu/Iu	Ic	
9 J15	1	250.6kΩ -40°	17.5A 93°	ok
10 J16	1	301.0kΩ -146°	23.6A 93°	ok
11 J19	1	> 500kΩ 68°	10.7A 103°	ok
12 J20		> 500kΩ 0°	0.0A 0°	

detection: FT OFF IS ×
-> change display

Kuvio 11. Mittaustiedot Trench:n sammutuskelan ohjaimelta johtolähdöittäin. (Kauppinen 2023)

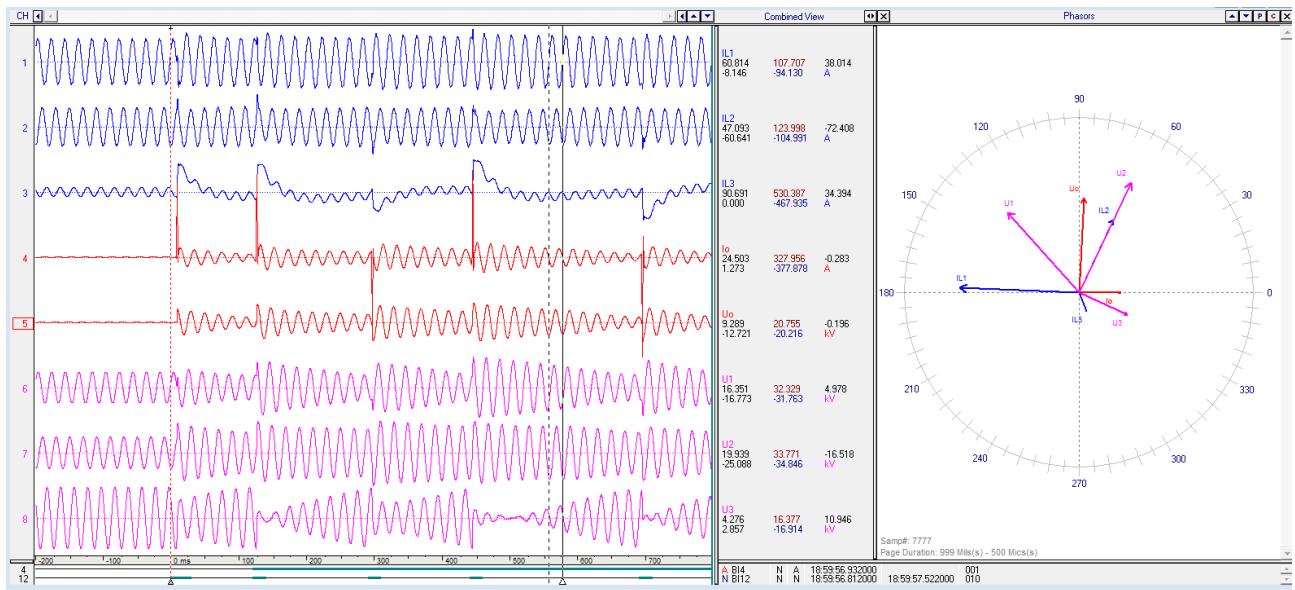
Kuviossa 12 on esitetty häiriötallenne todellisesta vikatilanteesta Wavewin-vektoriohjelmalla tu-
lostettuna. Häiriötallennin tulee asetella liipaisemaan tallenne riittävästi ennen vikaa ja tallenteen

tulee ulottua yli asetellun toiminta-ajan, jotta voidaan jälkianalysoida suojauksen sekä laitteiston oikea toiminta. Tallenteeseen rekisteröityy virrat, jännitteet nollakomponentteineen sekä osoitinvektorit. Tallennuksessa tapahtumat näkyvät aaltomuotona ja releen tila binääritietoina. Vektorit Wavewin laskee itse, jotka näkyvät kuviossa 12. Myös tärkeät katkaisijan ja erottimien asentotiedot, sekä releen havahtumis- ja laukaisutiedot tallentuvat kyseiseltä ajanjaksolta.



Kuvio 12. Kompensoitu verkko vikatilanteessa Wavewin-tallenteella. (Kauppinen 2023)

Haasteita tuo lisää kompensoidussa verkossa katkeileva maasulku ja jälkivärähtely. Kyseiset ilmiöt eivät esiinny eristetystä verkossa. Esimerkki katkeilevasta maasulusta on kuvattu kuviossa 13 Wavewin-vektoriohjelman häiriötallenteesta. Vikapaikassa tapahtuvat läpilyönnit toistuvat jatkuvasti, mikä koko ajan pahentaa vikapaikan vaurioita, joten vika tulee erottaa ensi tilassa laitevaurioiden ehkäisemiseksi. Myös nollajännite U_0 pysyy korkealla ja mikäli kiskosuoja on aseteltu laukaisevaksi, kuten pääsääntöisesti on, laukeaa kyseinen päämuuntaja verkosta kiskon maasulkusuojan toimesta. Laukaisuaikana on yleisesti käytetty 5 sekuntia.



Kuvio 13. Katkeileva maasulku Wavewin-tallenteella. (Kauppinen 2023)

9 Testimittaukset

9.1 Testijärjestelyt

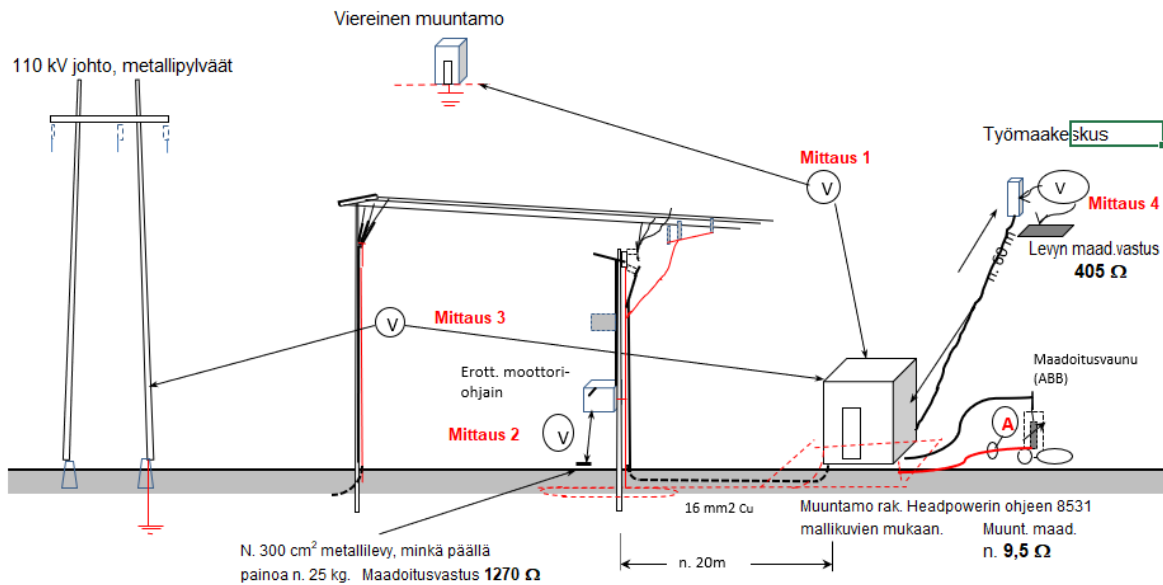
Verkostolaskennalla määritetään etukäteen verkoston suunnitteluperusteet. Kompensointikela ja poiskytkentäajat määritetään perusarvoihin. Muuntamoiden maadoitusmittausarvot tulee mittauksen jälkeen dokumentoida verkostolaskentaan. Näillä tiedoilla jokaiselle muuntopiirille lasketaan toteutunut sen hetkinen U_{tp} arvo. Käytönjohtaja määrittää mitä U_{tp} kerrointa noudatetaan. Standardi SFS 6001 antaa rajat 2x tai 4x U_{tp} . Verkostolaskenta antaa juuri kyseisellä laskentahetkellä määritetyn arvon, eikä verkostolaskennassa ole ajantasaista verkon topologiaa.

Maasulkuilmiön aikaisia sähköjakoalunverkon tapahtumia on tutkittu tässä kehittämistyössä syväliemmin tekemällä keinotekoisia vikoja verkkoon. Häiriötallenteita tutkittiin vikatilanteista suojareleiden toiminnasta Wavewin-vektoriohjelmalla, Matlab-laskennan sekä sähkölaatuanalysointori Topas1000 avulla sekä keinotekoisista että verkon todellisista vioista Alvan sähköjakoalunverkoissa.

Jakeluverkon turvallisuuksen vaikuttavien määritysten vakuuttamiseksi rakennettiin testiympäristö. Keinotekoisilla vioilla selvitettiin, mitä tapahtuu vikapaikoilla maasulkuvikojen aikana. Kuviossa 14 on vikapaikan koe- ja mittausjärjestelyt. Mittausjärjestelyt järjestettiin turvallisuuksystä erikseen rakennetussa muuntamossa, missä ei ollut kuluttajia. Laajan maadoituksen tasapotentti-

aalin määrittämiseksi mitattiin potentiaaliero viereiseen muuntamoon ja 110kV pylvääseen. Maadoitusjännite mitattiin työmaakeskukselta ja askeljännitteettä käyttöpaikalle rakennetun potentiaalirenkaan päältä.

MITTAUSKYTKENNÄT



Kuvio 14. Vikapaikan koe- ja mittausjärjestelyt. (Riikonen 2022)

Testeissä todennettiin verkostolaskennan laskennat suhteessa todellisiin käyttötilanteisiin. Verkostolaskennan tulokset on esitetty kuviossa 15. Verkostolaskennassa dokumentoiduilla tiedoilla taustaverkon kooksi saatiin 125,8 A ja 0 Ω viassa maasulkuvirraksi 6,3 A. Verkostolaskennasta saadaan tulokseksi ennakkoon määritetyt arvot, todellisuuden kanssa nämä voivat olla joskus suuntaa antavia.

Verkostolaskennan tulokset / Päämuuntaja (HML_PT1)		
Tulos	Seuranta	Suunnitelma
Jännite (V)	106857.1 V	
Etäisyys (m)	16.0 m	
Jänniteenalenema syötöstä (%)	0.0 %	
Häviöenergia (kWh)	480638 kWh	117178 kWh
Häviökustannukset (eur)	EUR 18922.46	EUR 4687.13
Päteteho (kW)	18065.5 kW	12879.9 kW
Loisteho (kVAr)	6259.6 kVAr	-4254.1 kVAr
Häviöteho (kW)	208.8 kW	43.0 kW
Tehohäviö (kW)	66.3 kW	33.4 kW
Tyhjäkäyntihäviö (kW)	0.0 kW	0.0 kW
Tyhjäkäynnin energiahäviö (kWh)	129 kWh	129 kWh
Häviöenergia (kWh)	-0 kWh	109 kWh
Maasulkuvirta 0 ohm vikaresistanssilla(A)	6.3 A	125.8 A
Maasulkuvirta annetulla vikaresistanssilla (A)	0.9 A	23.2 A

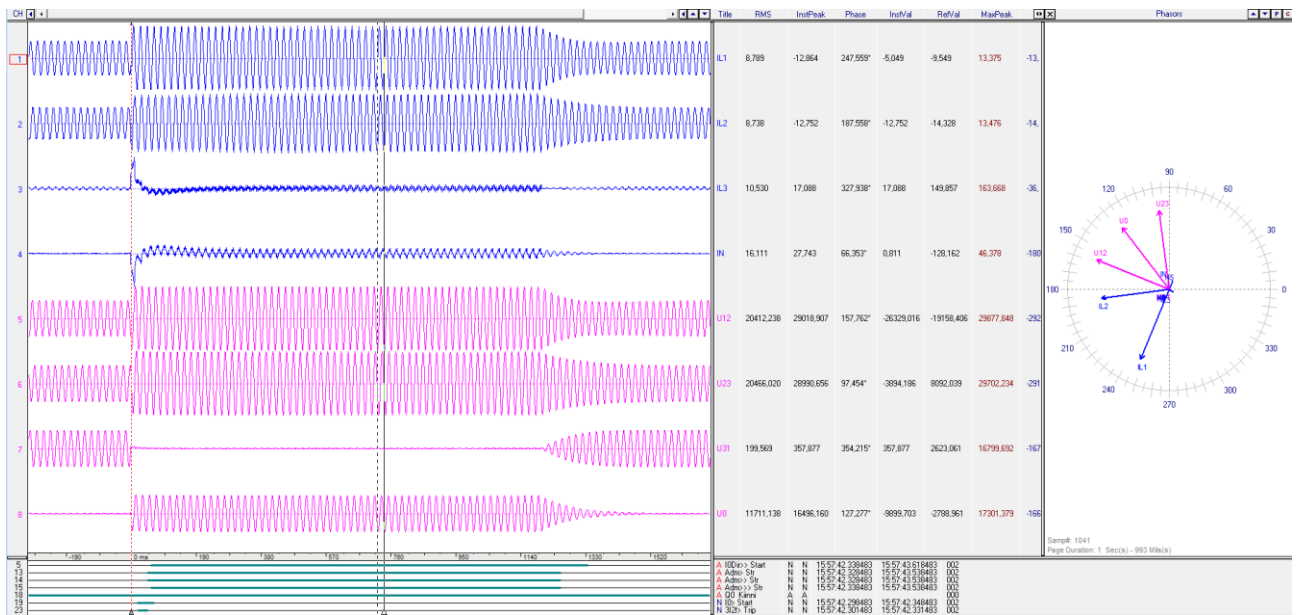
Kuvio 15. Powergrid-verkostolaskennan tulokset testiviassa. (Kauppinen 2016)

Muuntopiirin maadoitusarvoksi saatiin mitattua käännepistemenetelmällä 9.5Ω . Katkaisijavau-
nulla tehtiin keinotekoinen vika, kun verkko on kokonaisuudessaan kompensoitu perustilantee-
seen. Taustaverkon mitattu koko oli 93.2 A sammutuskuristimen ohjaimen mukaan.

9.2 Mittaus 1

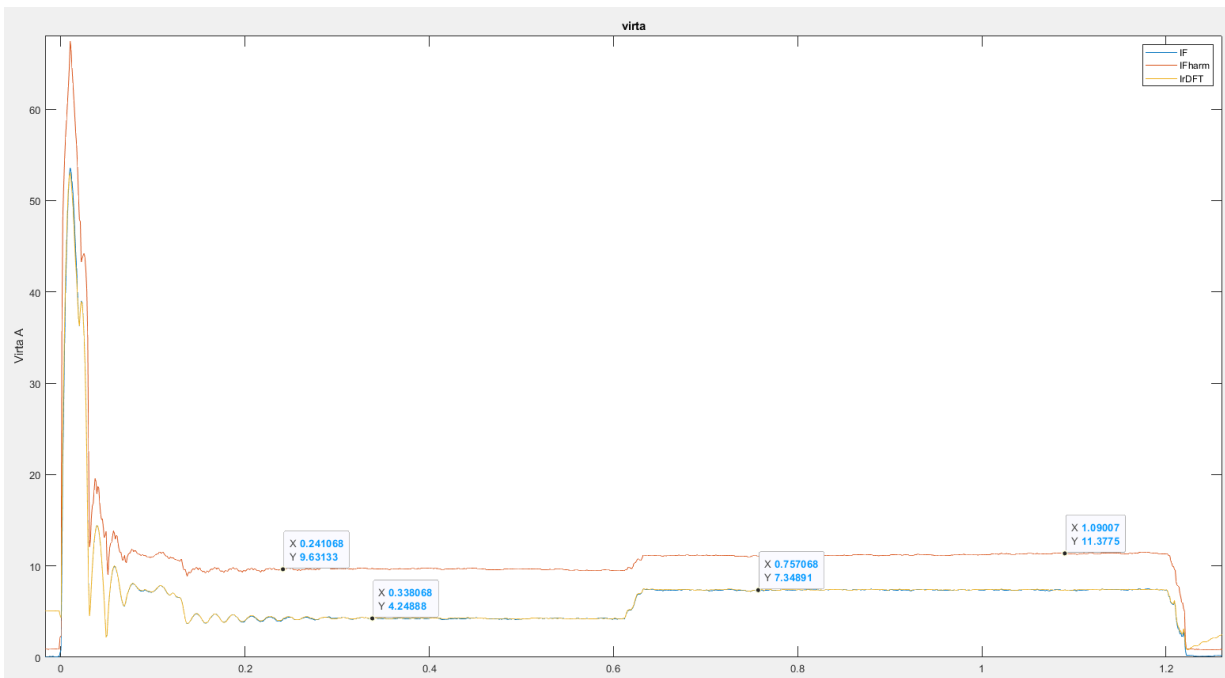
Mittauksessa 1 sivuunviritys on kapasitiivista virtaa $I_c = -2$ A ja resistiivistä virtaa $I_r = 4$ A. Vian alka-
misesta 0.62 sekunnin viiveellä kytkeytyy lisävastus, jolloin resistiivinen virta muodostuu 4 A:n lisä-
vastuksesta ja 4 A:n verkoston luonnollisista häviöistä. Yhtälön 1 mukaan saadaan kokonaismaa-
sulkuvirraksi $8.25 \text{ A } (\sqrt{2 \text{ A}^2 + (4 \text{ A} + 4 \text{ A})^2})$.

Lisävastuksen kytkentä näkyy heikosti kuvion 16 sähköaseman suojaireleen häiriötallenteesta.
Kuvion 16 tallenteesta voidaan havaita U_o :sta ja viallisen vaiheen jännitteestä, että maasulku on
pieni ohminen. Nollajännite U_o on vaihejännitteen suuruinen 11700 V ja viallisen vaiheen jännite
on tallenteen mukaan 199.596 V.



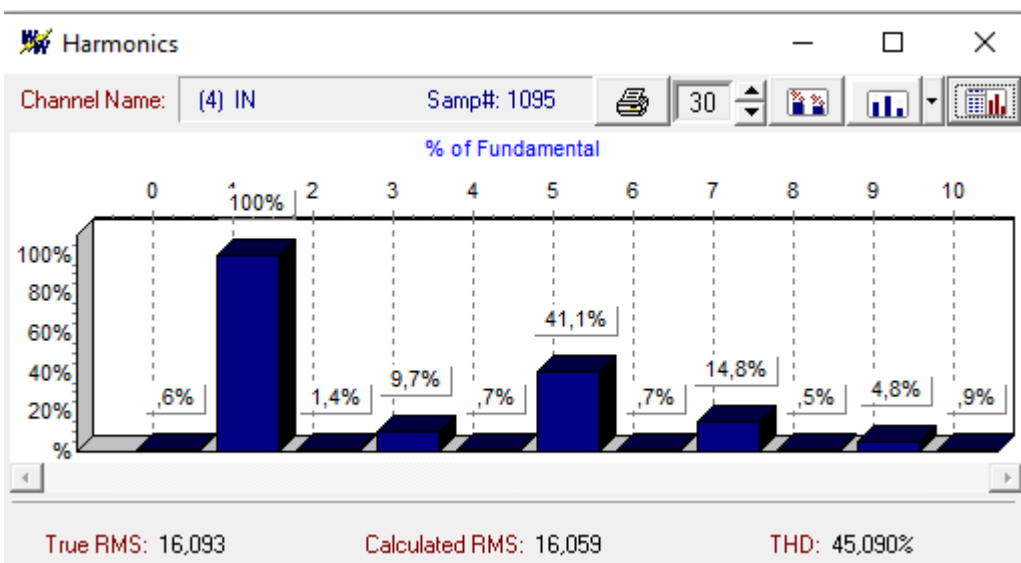
Kuvio 16. Vian aikainen Wavevin-tallenne sähköasemalta. (Kauppinen 2016).

Tarkemmin mittaustapahtumaa analysoitiin Matlab-laskennalla. Matlab-laskentakaavojen avulla voidaan tarkemmin laskea kyseisten tapahtumien ilmiöt. Matlab-laskennasta (kuvio 17) lisävastuksen kytkentähetki on helppo havaita. Matlab-laskennasta selviää myös todellinen maasulkuvirta noin 9 A. Laskenta huomioi myös vikavirrassa mahdollisesti esiintyvien harmonisten virtojen osuuden. Lisävastuksen kytkennän jälkeen virta on 11 A. Harmonisten virtojen osuus selvittää erotuksen teoreettisen virtaan.



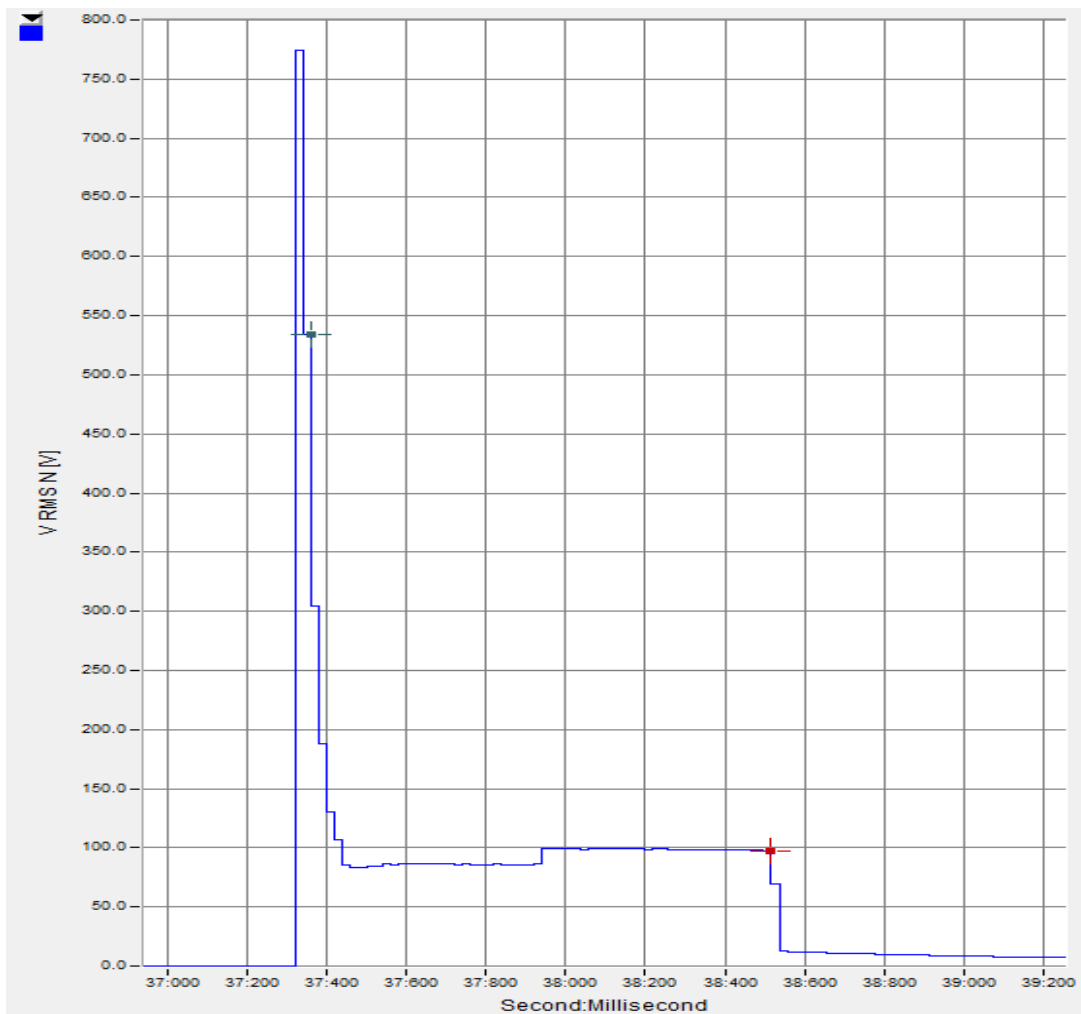
Kuvio 17. Matlab-laskenta testi 1 vikavirroista. (Pitkänen 2023)

Teoriaosuudessa olevan Jorgensenin (2003) tutkimuksessa havaittiin maasulkuvirtojen kasvavan harmonisten virtojen vuoksi. Tämä näkyy selkeästi myös tämän kehittämistyön kenttämittauksissa. Harmonisten I_o -virtojen prosentuaalinen Wavewin-laskenta on kuvattu kuviossa 18. Tässä viassa harmonisten osuus on ollut 41%.



kuvio 18. Harmonisten I_o -virtojen Wavewin-laskenta. (Kauppinen 2023)

Kuviosta 19 havaitaan, että alkutransientin jälkeen maadoitusjännite tasaantuu keskuksen ja maan välillä arvoonsa noin 100 V maasulkuvirran I_f ollessa noin 9A. Perustilanteessa transientti on lyhyt, joitain kymmeniä millisekunteja. Mittaus tehtiin sähkönlaatuanalysointilaitteella Topas1000:lla. Vikavirran vaikutus ihmiseen (kammiovärinärisyyteen) tunnetaan muuten hyvin, mutta lyhyiden transienttien vaikutusta ei tunneta. Täyttä selvyttä ilmiön vaarallisuudesta henkilö turvallisuudelle ei saada. Myös maadoitusjännitemittauksessa noin puolessa välissä vikaa havaitaan lisävastuksen kytkentä kuviossa 17 ja 19.

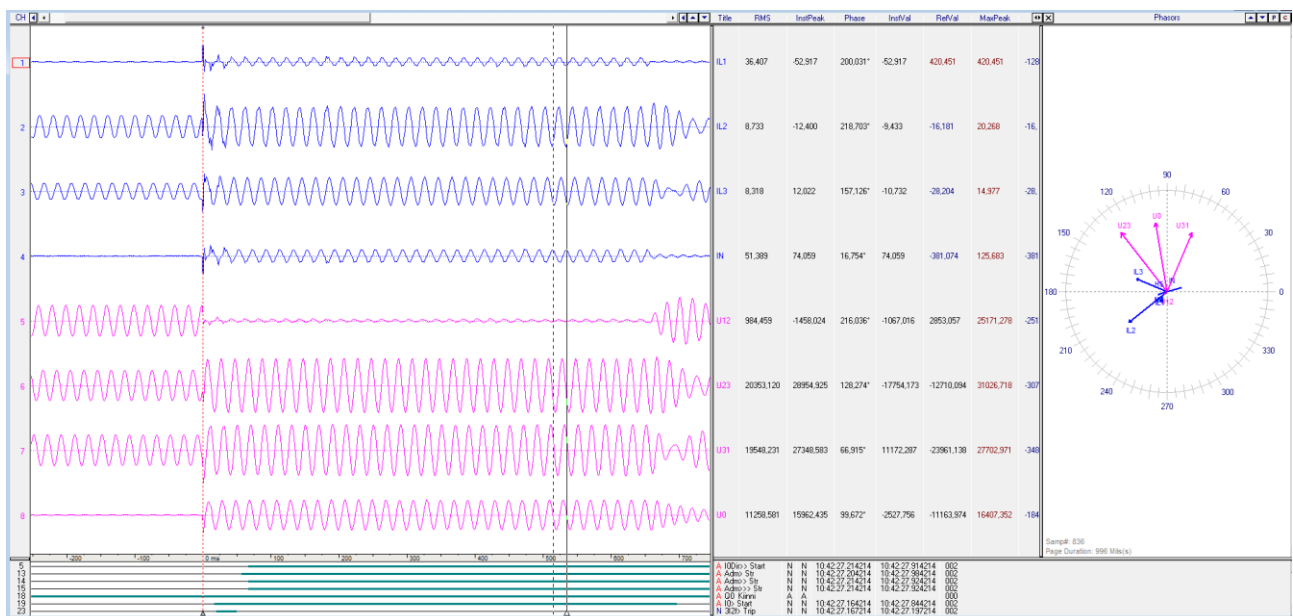


Kuvio 19. Mittauspaikan ja työmaakeskuksen välinen maadoitusjännitteen mittauksesta 1. (Kauppinen 2016)

9.3 Mittaus 2

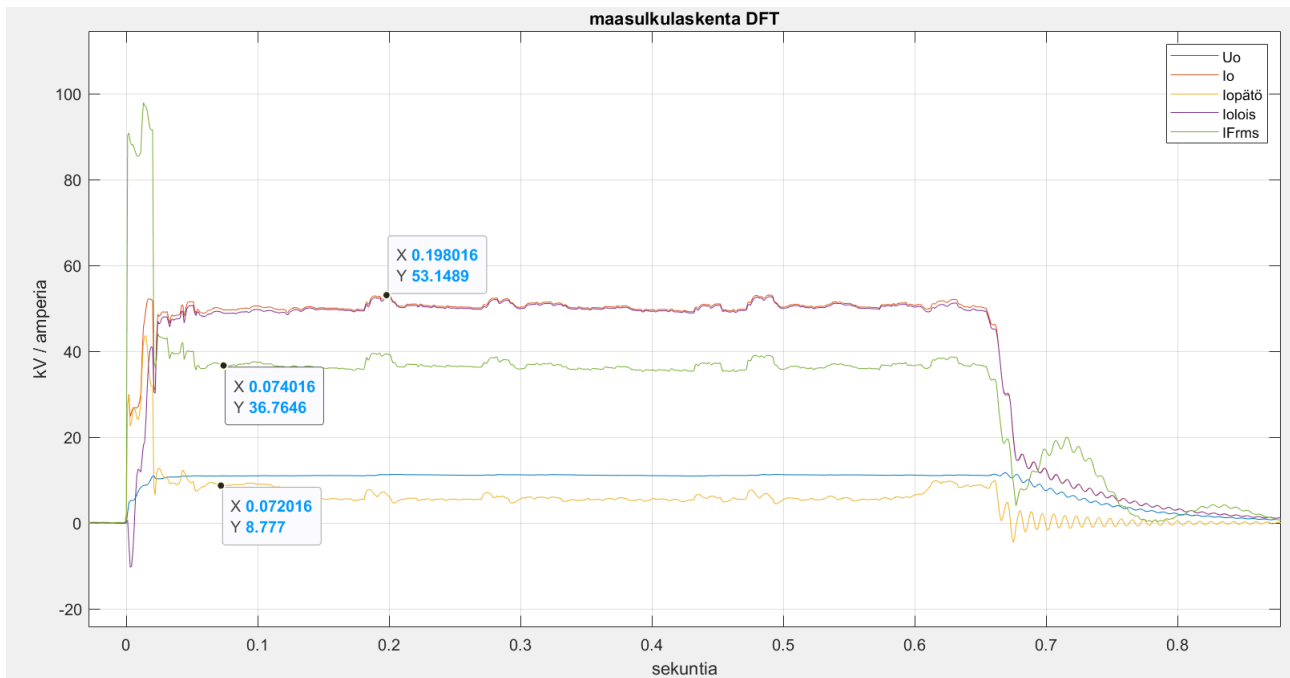
Mittauksessa 2 taustaverkon koko on sama. Kelaä säätämällä saatiin sivuunviritysarvoksi $I_c = 40$ A ja $I_r = 4$ A. Lisävastus 4 A ei ehdi kytkeytyä, sillä testivika poistuu ennen lisävastuksen kytkeytymistä. Resistiivinen virta 4 A muodostuu tässä testissä vain verkon luonnollisista häviöistä. Näin ollen yhtälön 1 mukaan laskettu kokonaismaasulkuvirta on 40.2 A ($\sqrt{40^2 + 4^2}$).

Kuviossa 20 vian alkamishetki näkyy nollajännitteen U_0 nousuna. Rele havaitsee vian, mikä näkyy suojeien havahtumisena. Jännönsjännitettä jää 1.1 kV, joten vikapaikkaan jää osa jännitteestä. Jännönsjännitteen määrästä näkee, että vika on ollut pieni ohminen.



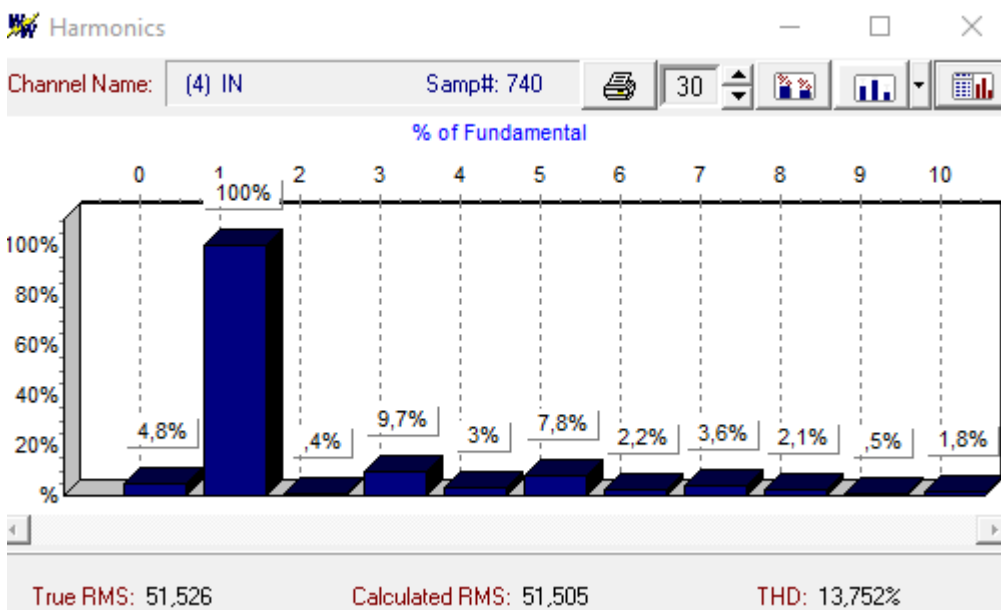
Kuvio 20. Wavewin-tallenne vian kokeilukytkennästä. (Kauppinen 2016)

Kuviossa 21 näkyy, että mitattu maasulkuvirta I_f on noin 38 A. Teoreettiseen tarkasteluun nähden vikavirta on pienempi, mikä on selvitty koejärjestelyistä ja vikapaikan vastuksesta. Harmoniset virrat nostavat vikavirtaa tässä tapauksessa noin 3 A.



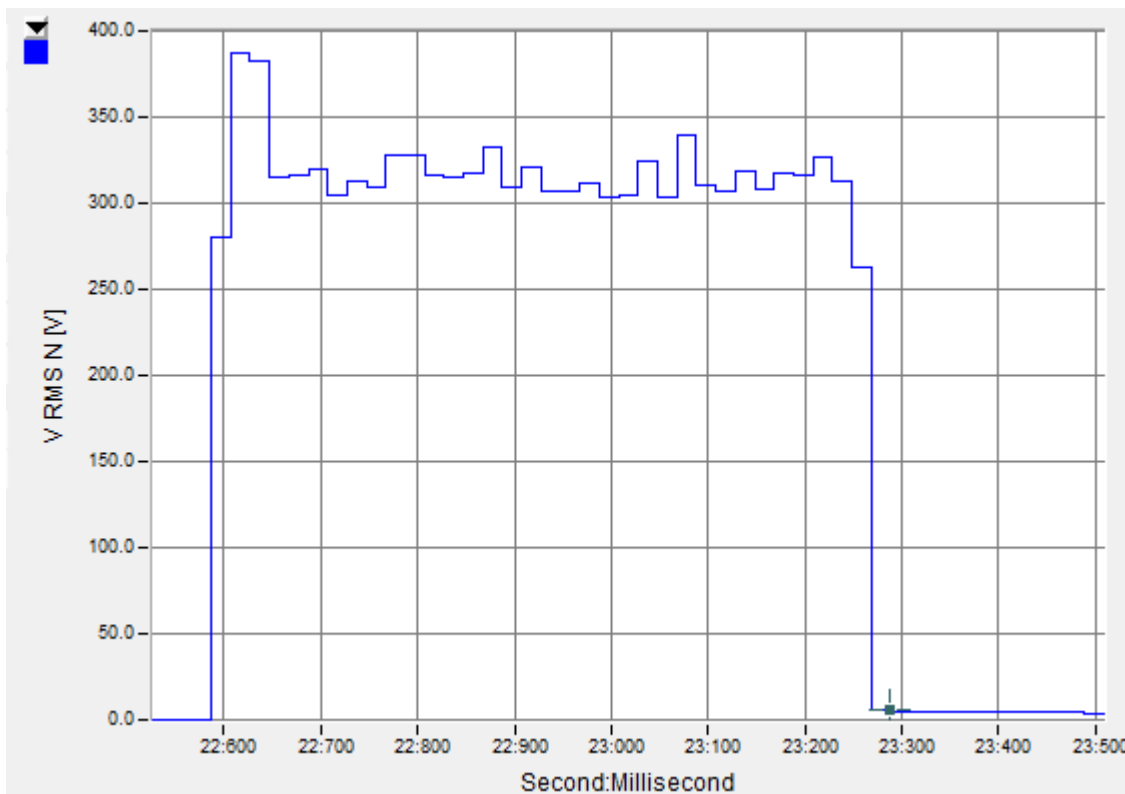
Kuvio 21. Matlab-laskenta testi 2 vikavirroista. (Pitkänen 2023)

Kuviossa 22 harmonisten virtojen osuus wavewin-laskennalla. Kun vaimennusta on enemmän, on alkutransientti pienempi, myös harmonisten suhteellinen osuus maasulkuvirrasta on pienempi. Tässä vikatyypissä harmonisten virtojen osuus on prosentuaalisesti pieni. Harmonisten vikavirtojen osuutta ei voida etukäteen tietää.



Kuvio 22. Harmonisten I_o-virtojen Wavewin-laskenta. (Kauppinen 2023)

Mittaus 2 tehtiin sähkölaatuanalysointilaite Topas1000:lla. Maadoitusjännitteeksi muodostuu noin 320 V (Kuvio 23). Potentiaalieroksi viereisen muuntamon maadoitukseen saadaan mitattua 350 V. Viereiseen 110 kV linjan pylvääseen 381 voltia. Sallittu kosketusjännite $1xU_{tp}$ kokeen poiskytkentäajalla on 170 V. Kosketusjännitevaatimus $2xU_{tp}$ on vastaavasti 340 V. Potentiaalieroja viereisiin kohteisiin ei tässä käsitellä tarkemmin, koska laajan maadoituksen käsittely ei kuulu tämän työn aihepiiriin. Alvan sähköjakeluverkossa on jo aiemmin todettu, ettei laajan maadoituksen kriteeristö täyty tasapotentiaalilentän osalta.



Kuvio 23. Mittauspaikan ja työmaakeskuksen välinen maadoitusjännitteen mittauksesta 2. (Kauppinen 2016)

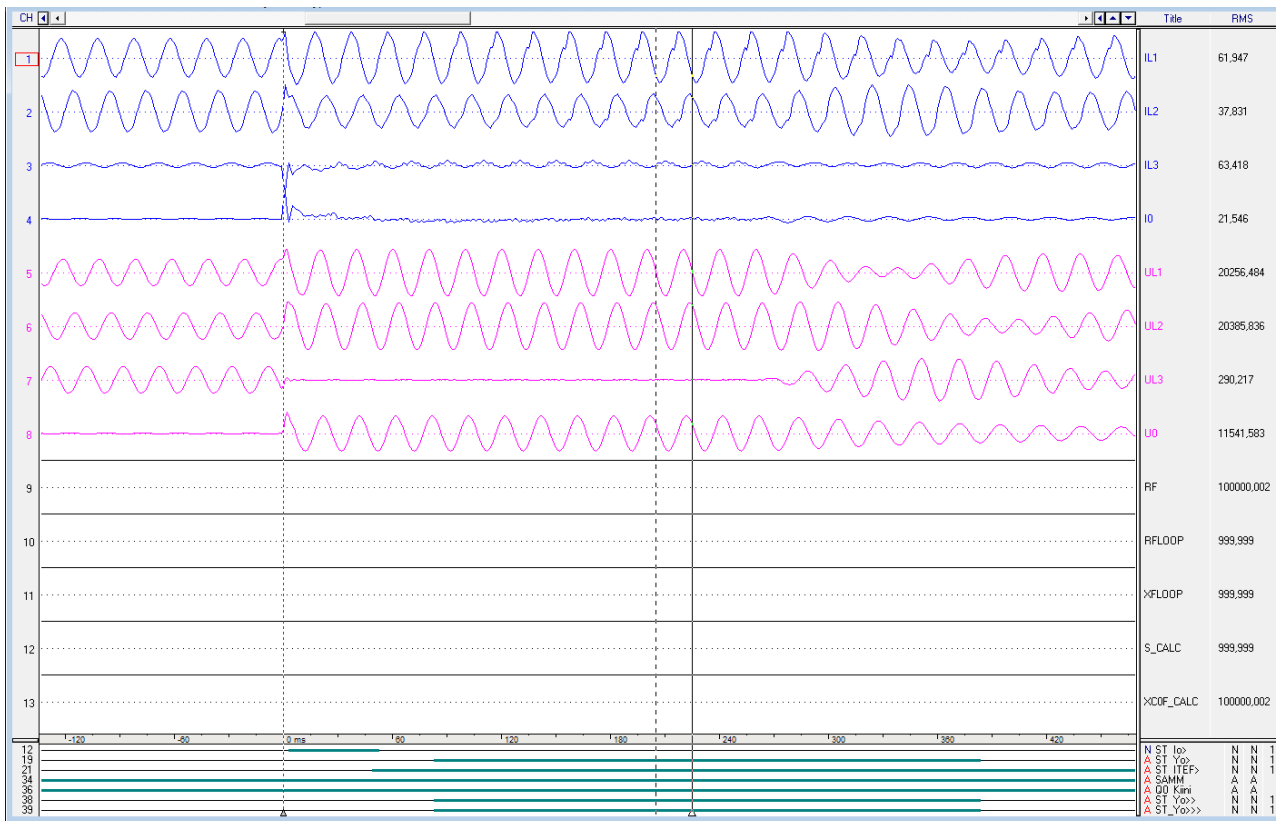
10 Mittaustilanteiden analysointia

Kompensoidussa verkossa vian hoito muuttuu huomattavasti vaikeammaksi verrattuna kompensoitomaan verkkoon. Katkeilevat maasulut ja maasulkuviat eivät aina jää pysyviksi pienemmän vikavirran vuoksi. Myöskään verkostolaskenta tai käytöntuki eivät tue verkon käyttöä vikojen hoi-

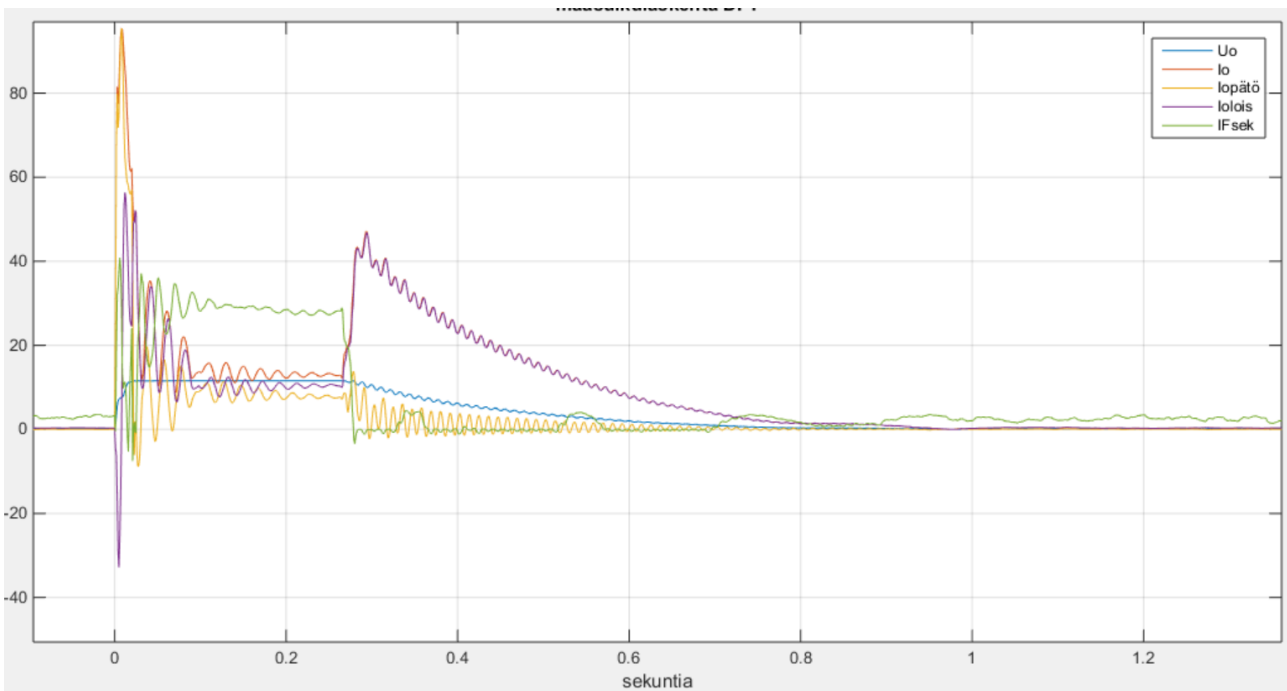
dossa. Laskenta antaa ennalta asetellun laskentahetken tilanteen, vaikka vikojen aikana kompensointiaste voi olla mitä tahansa. Myöskään resistiivisen komponentin osuutta laskenta ei osaa määrittää, vaan se on arvattava.

Vaikka edellisen sukupolven verkostolaskentaan pystyi asettelemaan kapasitiivisen ja resitiiviset virrat, ohjelma ei osannut määrittää kokonaismaasulkuvirtaa, eikä näin myöskään todellista maadoitusjännitettä. Kuviossa 8 on esitetty verkostolaskennan antama kokonaismaasulkuvirta 4 A:n sivuunvirityksellä ja 8 A:n resistiivisellä virralla antaa laskenta 3.1 A, vaikka sen tulisi olla laskennan mukaan 8,25 A. Todellinen maasulkuvirta oli vieläkin isompi (11 A). Vian aikainen kompensointiaste on tuntematon ja verkostolaskenta ei pysty laskemaan todenmukaisia maasulkuvirtoja, silloin ei myöskään DMS:stä ole apua. Joten kosketusjännitevaatimuksen toteutumisesta käyttöpaikoilla ei tiedetä, eikä tälle ole myöskään pystytty tekemään jälkiseurantaa. Vaikka perusarvot tarkistetaan sammutuskelan ohjaimelta (kuvio 10), on se kyseisen hetken tilanne. Tämäkään ei ota huomioon muutostilanteita eikä harmonisten virtojen osuutta, joiden vaikutukset voivat olla merkittävän suuria.

Kuviossa 24 on kuvattu maasulku, joka Wavewin-tallenteen perusteella näyttää varsin tavallisesta ja vaarattomalta nollavirran I_0 ollessa 21 A. Mutta tarkempi matlab-laskenta (kuvio 25) osoittaa maasulkuvirran I_f olevan yli 30 A. Viallisen vaiheen jäännösjännitteestä ja U_0 :n suhteista voidaan päätellä vian resistanssi, mutta nollavirta ei kerro edes suuntaa todellisesta vikavirrasta, sillä siihen vaikuttavat taustaverkon suhteet ja kuormitusvirrat.



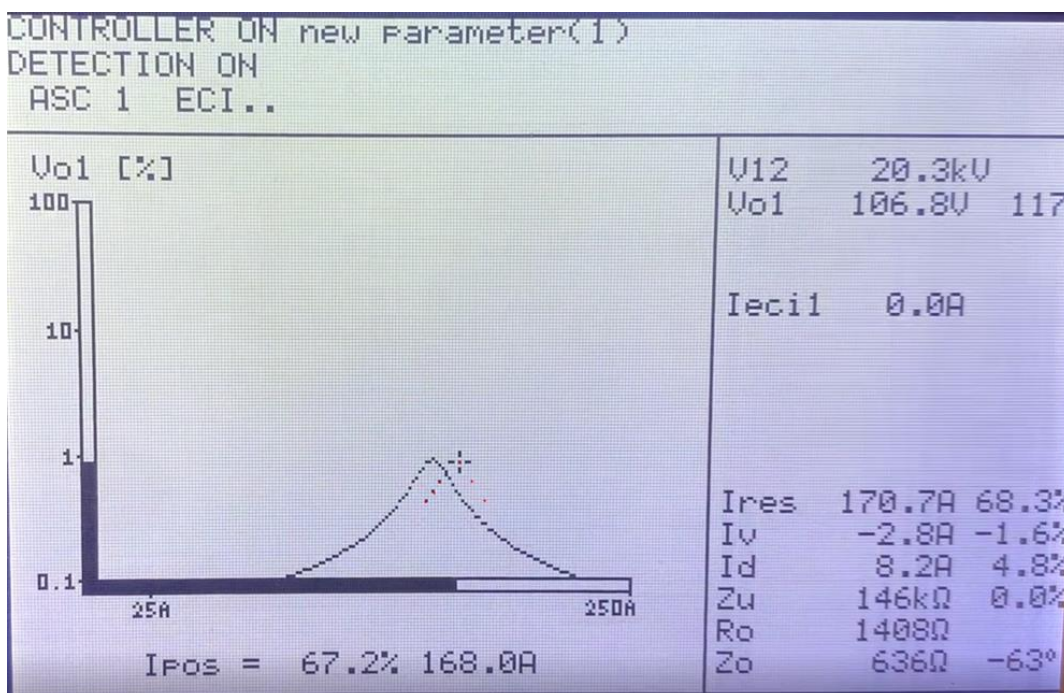
Kuvio 24. Wavewin-tallenne kokeilukytkentäviasta. (Kauppinen 2018)



Kuvio 25. Matlab-laskenta kokeilukytkentäviasta. (Pitkänen 2023)

Todellisen vikavirran määrittämistä vikapaikalla käsitellään patentissa: Menetelmä kolmivaiheisen sähköverkon maasulkusuojauksessa. (Method in the earth fault protection of a three-phase electrical network 2016). Asiaa käsiteltiin myös Madridissa Cired kansainvälinen sähkönjakelukonferenssissa (Wahlroos, Aaltonen, Pitkänen & Kauppinen 2019.) Todellinen vikavirta lasketaan vastakomponenttilaskennalla vaihevirroista. Nykyiset suojat perustuvat summavirtamuuntajan mittaustuloksiin, eikä täten perustu todelliseen maasulkuvirtaan.

Verkon muuttuessa vianrajauksen aikana kompensointikela säätää itsensä uuteen taustaverkon arvoon. Muutos näkyy kuviossa 26 sammutuskelan säätötahtumana. Kun kelan ohjain havaitsee taustaverkon muuttuneen, alkaa säätösekvenssi. Uuden arvon kela löytää 120-180 sekunnin kuluessa. Maasulkuvikojen poiskytkentäajan ollessa <1 s, muutostilanteet on otettava huomioon verkon käytössä ja mitoituksessa.



Kuvio 26. Trench-sammutuskelan ohjauksen säätötahtuma. (Kauppinen 2023)

Vian rajauskytkennöissä voi sivuunviritys olla kyseessä olevan johtolähdön suuruinen lisätynä sivuvirityksen jäännösmaasulkuvirralla. Kuviossa 26 pisteet edustavat uutta säätöä verkon taustaverkon muutostilanteen jälkeen. Mikäli suurhäiriössä vikoja on useita, tilanteessa on vielä haastavampi noudattaa SFS 6001 sallittuja kosketusjännitteitä kaikissa käyttötilanteissa.

Katkeilevaa maasulkuvirtaa ei voi kompensoida. Katkeileva maasulkuvirta on 5-500 ms välein toistuva transientti. Vikavirta voi olla kaksinkertainen päämuuntajan taustaverkon aiheuttamaan maasulkuvirtaan verrattuna. Mikäli maadoitukset on mitoitetu ja rakennettu normaalille maasululle, ylittyy laitteiden rasitusjännitteet. Mikä vaikutus korkealla transienttijännitteellä on henkilöturvallisuuteen, ei löydy tutkimustuloksista. Aiheesta löytyi ainoastaan kaksi lyhyttä artikkelia Shocking electricity ja Shocking Electricity-2 Mick Maytumin kirjoittamina (Maytum 2017, 2018). Näissä artikkeleissa tutkittiin transientti-piikin vaarallisuutta, mutta täyttä selvyyttä näistä artikkeleista saanut. Mielestäni tämä vaatii jatkoselvittelyitä.

11 Toimenpiteet sähköjakeluverkon turvalliseen käyttöön

11.1 Työnaikana tehdyt havainnot turvallisuudesta

Käyttö- ja suojamaadoitusten yhdistäminen juontaa juurensa 1970-luvun alusta. Pääsääntöisesti maadoitukset rakennettiin erillisenä. Tästä seurasi muuntajavaurioita, kun käyttö ja suojamaan välille syntyi ukkosella potentiaalieroja. Maadoitusten yhdistämiselle tehtiin selvityksiä 1970-80-lukujen aikaan, jotta muuntajavauriolta vältyttäisiin. (Pitkänen 2021).

Kuviossa 27 on vuonna 1964 rakennettu pylväsmuuntamo, missä suojamaadoitus on viety viereiselle pylväälle. Jäljempänä suojamaadoitus ja käyttömaadoitus on yhdistetty. Yhdistys näkyy ”kevisukalla” varustettuna jompilla maadoitusliittimellä. Vuoden 1966 sähkölaissa ja varmuusmääräyksissä yhdistykselle on annettu selkeät ohjeet. Nykyisin tulkinnat ovat huomattavan paljon väljemmät.

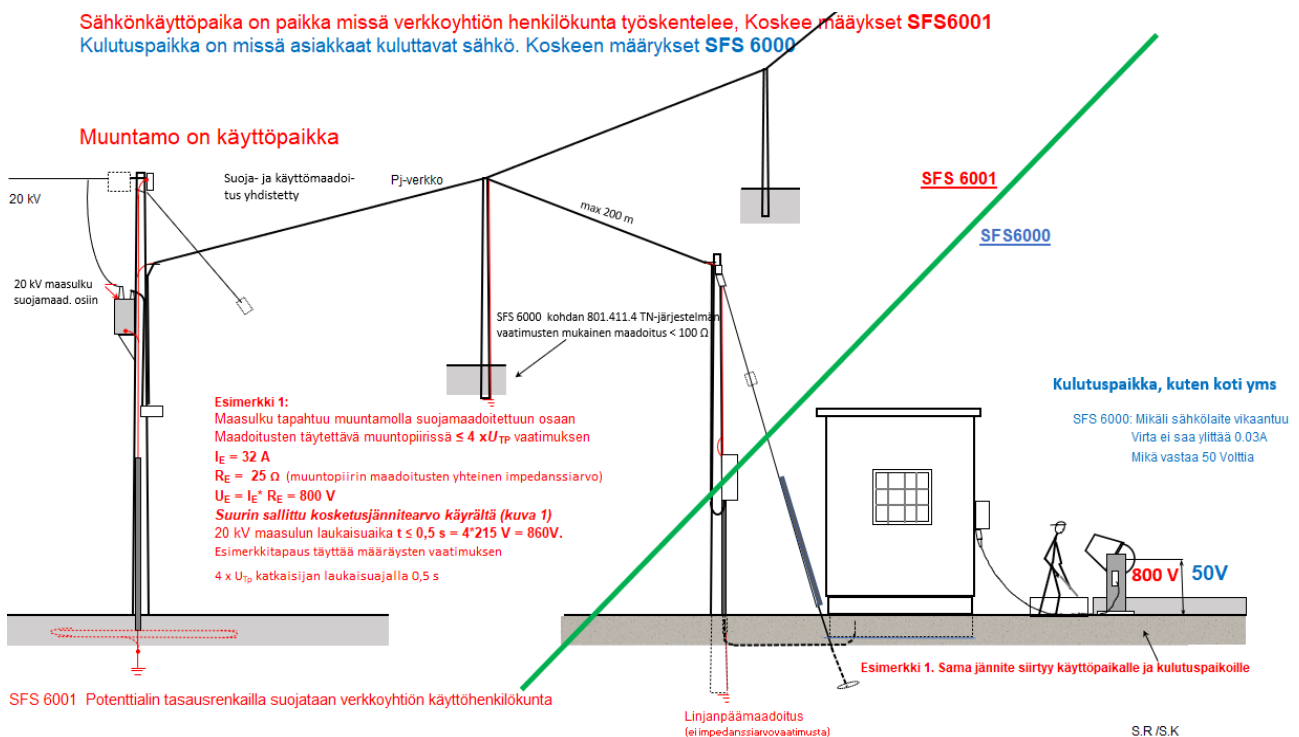


Kuvio 27. Pylväsmuuntamo vuodelta 1964 (Kauppinen 2022)

On huomionarvoista todeta, kun nykyisin rakennetaan käyttö- ja suojamaadoitukset yhdistettynä, leviää vikavirta kaikkialle ja maadoitusjännite on kaikissa galvaanisesti liitetyissä metalliosissa samansuuruinen. Standardi SFS 6001 tarkastelee tilannetta jakeluverkon kannalta ja ottaa huomioon käyttöhenkilökunnan turvallisuuden kattavasti, mutta sama jännite siirtyy myös kulutuspaikoilla, mitä ohjaa standardi SFS 6000. Kuviossa 28 on kuvattu punaisella standardin SFS 6001 ohjaava toiminta-alue ja sinisellä standardin SFS 6000 toiminta-alue. Toiminnassa on kohtuullinen ristiriita. Standardi SFS 6001 sallii siirtää 2- tai 4-kertaisia jännitteitä kohteeseen, missä SFS 6000 sallii 50V:a, kunnes vikavirtasuojakytkimen tulee toimia. Maasulkusuojaukseen ja oikeaan toimintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä se varmistaa kaikkien turvallisuuden vaikutusalueellaan. Erona oikosulkuun, vika ei näy galvaanisen erotuksen ylläpuolelle, joten varasuojaus on myös toteutettava.

On huomioitava, että maasulussa jännite siirtyy kaikkialle muuntopiirissä ja tässä on huomattava ristiriita pienjännitstandardin SFS 6000 ja suurjännitstandardin SFS 6001 välillä. Kun standardi

SFS 6000 vaatii, ettei laitteiden kuoreen nouse yli 50 V:n jännitteitä, sallii standardi SFS 6001 kuitenkin samaan pisteeseen ihmisen keskimääräisen sietorajan 2- ja 4-kertaisesti ylittäviä jännitteitä. Kuviossa 29 on kuvattu standardien SFS 6000 ja SFS 6001 vaatimusten eroa. Standardi SFS 6001 käsittelee turvallisuutta käyttöpaikoilla ja standardi SFS 6000 kulutuspaikoilla. Verkkoyhtiön henkilöstö ja muut sähkötöihin osallistuvat ovat hyvin suojattu potentiaalintasausrenkaalla ja suojaavalla varustuksella. Ihmetystä herättää myös standardin SFS 6001 kohta, missä kustannukset ja ammattitaito huomioiden voidaan ottaa kovempia riskejä, vaikka sama maadoitusjännite leviää myös kulutuspaikoille.



Kuvio 28. Standardien SFS 6001 ja SFS 6000 vaatimusten vertailu. (Riikonen & Kauppinen 2023)

Verkko mitoitetaan yleisesti 2-4 xU_{Tp} eli 2-4 kertaisesti ylittämään ihmisen keskimääräiset sietorajat. Standardissa käsitellään keskimääräisiä ihmisen sietorajoja, mutta 5 % väestöstä sietää noin puolet tästä. Sietorajat on merkitty jännitteinä, mutta vertailua virraksi samaan yhteyteen ei ole esitetty (kuviossa 2). Myös näissä tilanteissa tulee noudattaa sähköturvallisuuden 7§ missä vaaditaan, ettei sähköasennuksista saa aiheutua hengenvaaraa. Kyseisistä mitoituksista ei kukaan käytönjohtaja voi ottaa vastuuta, vaan verkko on mitoittettava ja rakennettava niin, että se on turvallinen myös kulutuspaikoilla. Käytönjohtajilla on pääsääntöisesti vastuuvakuutukset, mutta mikäli

saa sähköturvallisuuden laiminlyömisestä tuomion, ei vakuutus kata rikosoikeudellisia sanktioita, vaan ne jäävät käytönjohtajan vastattavaksi.

11.2 Toimenpiteet turvallisuuden lisäämiseksi

Tulomäen (2017) työssä kuvatut toimenpiteet, jotka ovat kuvattu tässä työssä luvussa 4, on ollut pakon saneleman ja hyvin suurpiirteistä, sillä käytöntuesta ei vian aikana pysty päivittämään laskentatietoja. Joten tarkemmat johtolähtöjen koot on saatava jatkuvaan mittaukseen kaukokäyttöjärjestelmään. Johtolähtöjen kapasitiivisen virran mittaus saatiin käyttöön 2022 loppuvuodesta. Reaaliaikainen mittaustieto rekisteröidään 3 min välein, jotta voidaan todentaa johtolähdön tuottama kapasitiivisen virran suuruus, kun kyseinen katkaisija on tullut viasta auki. Tällöin käyttöhenkilöstöllä on tiedossa, minkä suuruisen maasulku virran kanssa toimitaan. Jos maasulkuvirran kapasitiivisen ja resistiivisen virran vektoreiden summa ylittää 20 A, on vikaantuneen johtolähdön vian rajauskytkentöjä tehtävä tarpeeksi pieninä muutoksina, ettei 20 A:n maasulkuvirtaa ylitetä.

Kuviossa 29 (kuvakaappaus on otettu Microscadasta) näkyvä johtolähdön J09 I_c tuottama virta on 28.1 A, joten kokeilukytkennät on suoritettava 1/3 osissa, jotta maadoitusjännite pysyy turvallisessa rajassa. Mikäli kyseisiä toimenpiteitä ei tehdä, vian rajauskytkennöissä voi kapasitiivisen virran osuus ylittää 50 A Alvan suppeassa verkossakin. Korvauskytkennöissä voi virta olla jopa tätäkin suurempi. Kun edellä oleva asia huomattiin, muutettiin lisävastuksen toimintalogiikka vastaamaan turvallisuusvaatimuksia, sillä varsinkin korvaustilanteissa resistiivisen virran osuus nousee huomattavaksi.

Kapasitiivinen ms virta I_c	
J03	19.6A
J05	16.9A
J06	10.6A
J08	12.5A
J09	28.1A
J10	12.2A
J11	0.0A
J14	27.4A
J15	17.6A
J16	23.8A
J19	10.7A
J20	0.0A
Resistiivinen ms virta I_d	
	8.0A

Kuvio 29. Mitattu johtolähtöjen maasulkuvirran tuotto ja resistiivisen osan virta. (Kauppinen 2023)

Terveessä tilassa lisävastus kytkeytyy irti, kun resistiivinen maasulkuvirta I_d ylittää 12 A:a. Kun resistiivisen virran osuus laskee alle 6 A:n lisävastus kytkeytyy takaisin. Maasulun tullessa, kun vastus on kytkettynä, pysyy vastus vian aikana kytkettynä. Alvan käyttämä poiskytkentäaika viiveineen on 450 millisekunttia. Mikäli vika ei ole kyseessä olevana aikana poistunut, varmistetaan suojien toiminta kytkemällä lisävastus juuri tämän 450 millisekuntin viivellä. Lisävastuksena käytetään 4 A:n vastusta, sillä se riittää varmistamaan suojien toiminta. Ei ole perusteltua käyttää suurempaa lisävastusta. Maasulkuvirtaa ei voi juurikaan tästä pienentää ja mikäli kyseiset toimenpiteet eivät ole riittävät, on maadoitusolosuhteita parannettava. Maadoitusten parantaminen on joka tapauksessa suositeltavaa.

Käyttötöiminnan rajat on määritelty Alva sähköverkon käytönjohtajan pysyväismääräyksissä seuraavasti: vikaa rajatessa voidaan ensimmäinen kokeilukytkentä tehdä alle 2 min sisällä katkaisijan aukeamisesta, kun vika-alueella on ilmajohtoa. Muutoin vian rajaaminen tehdään alle 2 km pätkissä. Rajauskytkentöjen välissä kompensointikelan tulee säätää uuteen viritysarvoonsa ennen uutta kokeilukytkentää. Tästä tulee saada kelan ohjaimelta tilatieto, kun säätötapauhtuma on kesken, jottei kokeilukytkentöjä tehdä säätöprosessin aikana. Koska kompensointikelan säätö kestää 3-4 minuuttia on rajauskytkennät tehtävä tämä huomioiden.

Käyttötöiminnan parantaminen ja harjoittelu on ensiarvoisen tärkeää, jotta käsitellyt turvallisuus- huomiot voidaan toteuttaa täysimääräisesti. Maadoitusten parantaminen on ensisijainen toimenpide ja dokumentointiin tulee kiinnittää huomiota. Kun resistiivistä virtaa ei voida kompensoida pois, ainoa tapa sen pienentämiseksi, lisävastuksen ohjauksen ohella, on rakentaa maadoitukset huolella ja varmistaa kaapelin keskusköyden eheys. Keskusköysi parantaa turvallisuutta kaksois- maasuluissakin. Lisäksi kaapeliojan ollessa auki tulee ojaan asentaa maadoitus, joka parantaa maadoi- tusolosuhteita, pienentää vikapaikan potentiaaliero, kun maaperän jännite kohoaa kyseessä ole- van maadoituksen vaikutusalueella. Kaupunkialueella saattaa routa ylettyä myös maadoitusten syvyydelle saakka, jolloin maadoitusolosuhteet saattavat muuttua. Verkostolaskentaan tulee aset- taa jäännösvirraksi suurin mahdollinen tunnettu maasulkuvirta, sillä muuta laskenta ei osaa käsi- tellä.

Verkon kompensointiaste on tunnettava, jotta verkon tila on vakaa. Kelan tilan on oltava tiedossa, onko kela vireessä vai säätötapahtuma päällä. Tämä tilatieto on tuotava jatkossa Scada-järjestelmään. Kun tiedetään taustaverkon arvon muuttuneen ja halutaan säätää kela nykyiseen taustaverkon arvoon, on hyvä tehdä pakotettu säädön ohjaus. Tällöin tiedetään, kuinka suurella sivuun virityksellä kokeilukytkentöjä tehdään vikoja rajatessa. Nämä ovat ensiarvoisen tärkeitä tietoa, varsinkin jos vikoja on useita saman päämuuntajan syöttämässä verkossa.

12 Pohdinta

Kuten jo johdannossa mainittiin, tämä työ on osa Alva-yhtiöllä käynnissä olevaa jakeluverkon turvallisuuden kehittämisprojektia. Tämä osuus loi jatkon Tulomäen (2017) työlle ja antoi pohjaa tuleville projektin osille. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kuvata maasulusta aiheutuvia turvallisuusuhkia sähköjakeluverkossa ja löytää turvallinen verkon käyttötapa maasulkutilanteissa. Tämä tavoite saavutettiin, uusi käyttötapa lisää turvallisuutta sähköjakelussa sekä verkkoyhtiön ja kulluttajien kannalta. Tämän työn avulla päivitetään Alvalle ohjeistus maadoitusten mitoitukseen ja rakentamiseen. Opinnäytetyön avulla tullaan tekemään koulutuspaketti verkon käytöstä ja kunnossapidosta. Alvan käytönjohtajan pysyvääismääräykset päivitetään tämän työn tulosten perusteella, mikä oli tavoitteena.

Tavoitteena oli jakaa arvokasta tietoa ja osaamista myös muille verkkoyhtiöille sähköturvallisuuden parantamiseksi. Tämäkin tavoite toteutui. Tämä maasulkuilmiön hallinta sähköjakeluverkoissa on jo otettu käyttöön yhtiöni verkossa. Tämä toimintamalli on täysin sovellettavissa kaikkiin verkkoyhtiöihin. Laajoissa verkoissa ilmiöt ovat rajummat. Tämän kehittämistyön tulokset pitäisi saattaa tiedoksi varmennustarkastajille, palo- ja rikostutkijoille sekä vakuutusyhtiöille. Standardin laatijoiden tulee huomioida tästä työstä kuvatut maasulkuilmiön turvallisuusriskit.

Kehittämistyön luotettavuutta lisää se, että teoriapohja perustui suurelta osin lakeihin ja standardeihin. Koska toimin sähköjakeluverkon turvallisuudesta vastaavana käytönjohtajana, olen perehtynyt laajasti eri lakeihin ja standardeihin ja niiden tulkintoihin. Tämä on myös eettisesti hyvä toimintatapa, jotta voidaan taata sähköjakeluverkon turvallisuuden sekä yhtiölle että asiakkaille. IEC 60479 antaa hyvät perusteet jakeluverkkojen turvallisille maadoitusjännitterajoille.

Mittaukset ja dokumentaatioiden lähteet varmistettiin eri lähteistä ja lähdetiedot merkattiin huolellisesti. Omat mittaukset toistettiin useamman kerran luotettavuuden lisäämiseksi. Reliabiliteettia lisää toistettavuus. Testimittauksia suoritettiin 150 kpl neljässä eri kohteessa mittausten vakuudeksi. Tarkemmin tässä käsiteltiin kahta tapausta, mutta kaikissa tulokset ovat yhtenevät.

Validiteettia lisää se, että mittarit mittaavat sitä, mitä on tarkoitus mitata. Valitut mittauslaitteet tarkentuivat prosessin aikana. Näin saatiin mahdollisimman validia tietoa.

Kehittämistyön aikana syntyi useita aineistoja, joita analysoitiin jo prosessin aikana. Kerätyn aineiston perusteella tavoitteita ja päämääriä puntaroitiin kriittisesti koko kehittämistyön ajan. Analyysimenetelmiä hiottiin hieman matkan varrella, jotta saatiin luotettavaa ja ajankohtaista tietoa. Valitut mittaukset kuvasivat ongelmaa ja niiden analyysien avulla päästiin kehittämistyön tavoitteisiin eli maasulkuilmion parempaan hallintaan sähköjakeluverkoissa.

Käytössä olevat verkostolaskentaohjelmat eivät pysty määrittämään todellista maasulkuvirta, todellinen maasulkuvirta on tiedettävä tai mitattava. Maadoitusjännitetarkastelu on tehtävä todellisen maasulkuvirran mukaan eikä verkostolaskennan tuloksen mukaan. Verkostolaskentaohjelmia tulisi kehittää niin, että ne pystyisivät laskemaan todellisen maasulkuvirran. Mittausasetelmien ja niiden analyysien oikeudenmukaisuuden varmistamiseksi käytettiin asiantuntija-apua. Koko kehittämistyön ajan mittauksia ja analyyseja on tehty yhteistyössä varmennustarkastaja VTS 10 Jouko Sikasen kanssa ja konsultoitu kehitysasiantuntija Risto Pitkästä.

Standardin SFS 6001 perusvaatimukseen on kirjattu, että tämä standardi antaa sellaiset kriteerit maadoitusjärjestelmälle, että henkilön turvallisuus varmistetaan kaikissa niissä paikoissa, johon hänellä on pääsy sallittu. Mikäli kosketusjännite on isompi kuin $2xU_{tp}$ (ihmisen keskimääräinen sietoraja), käyttöpaikoilla pitää toteuttaa potentiaalinojausrenkas tai käyttöpaikka pitää eristää. Standardin SFS 6001 mukaisia käyttöpaikkoja on paikat, missä verkkoyhtiön henkilöt työskentelevät. (SFS 6001 2018.) Turvallisuusnäkökohdat eivät ulotu kulutuspaikoille, vaikka sama ilmiö esiintyy koko muuntopiirissä. Verkkoyhtiön henkilökunta on kyllä suojattu potentiaalirenkailla, mutta kulutuspaikat eivät. Kyseinen määräys lienee ajalta, kun käyttö- ja suojamaadoitukset tuli pitää erillään.

Standardin SFS 6001 liitteessä B on kuvattu kosketusjännitteen laskenta. Suurjänniteasennusten sallitut kosketusjännitteet lasketaan todennäköisin oletusarvojen mukaan. Kohonneet riskit voidaan suurjännitelaitteiston maasulun aikaisissa tilanteissa kokemuksen mukaan hyväksyä, henkilökunnan ammattitaito, kustannukset jne. huomioon ottaen. (SFS 6001 2018, 103.) Ei kustannusten varjolla voida kulutuspaikoille siirtää kohonneita maadoitusjännitteitä, vaikka käyttöpaikoilla työskentele kuinka ammattitaito henkilökuntaa. Standardi SFS 6001 ei ota huomioon, että maadoitusjännite leviää myös kulutuspaikoille. Tämä tulee ottaa huomioon Alva Sähköverkossa, mutta suositus olisi huomioida tätä kaikissa jakeluverkoissa.

Ruotsissa 10 kV:n verkoissa yli 40 A johtolähdöille tulee asettaa oma johtolähdön kela (Jordfelsdettring i mellanspänningsnät). Suomessa vastaavaa vaatimusta ei ole, vaan pelkästään U_{tp} vaatimukset. Ilmeisesti kompensoimattomana Ruotsissa ei voida jakeluverkkoa juurikaan ajaa. Lieventävänä asiana verkostomitoitukselle on Suomeen verrattuna maakaapeleille määritetty reduktiokerroin. Vastaavaa mitoitustapaa ei ole juuri keskijänniteverkon osalta Suomessa sovellettu. Reduktiokertoimen vaikutus onkin huomattava, kun koko kaapeliverkkoa ja koko reitille on galvaaninen yhteys syöttävälle sähköasemalle. Sekaverkossa tämä ei toteudu. Mäkisen (2016) selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä mallintaa tätä yhdistettyjen maadoitusten ilmiötä. Tosin tässä käsitellään kaapeleiden galvaanisia yhteyksiä kaapeleiden vaippojen kautta, eikä täten voida tarkastelussa voida huomioida kaapeliojaan laitettavan maadoitusköyden vaikutusta maaperän potentiaalin tasaukseen.

Laajoiksi maadoitusjärjestelmiksi on luettu kohteet, joihin muun muassa kuuluvat muuntamot, mihin on useita erillisiä maadoitusyhteyksiä. Miten määrittäminen laajaksi maadoitusjärjestelmän estää kosketusjännitteiden synnyn, jos ei ole rakennettu tasapotentialiksi ja estetty maadoitusten eriyttämisen kautta jännitteen leviäminen? Alva (silloinen Jyväskylän Energia) oli laajamaadoitusverkko standardin mukaan, mutta mittausten perusteella tasapotentialikenttä ei silti toteutunut. Mittausten mukaan jännite vioissa oli tappava. Tämän toteamuksen jälkeen on muuntamoiden maadoitusolosuhteiden tarkastus aloitettu Alvan verkossa.

Kun Itä-Suomessa 18.12.2021 paloi useita kiinteistöjä maasulun vuoksi (Virheellinen sähkökytkentä aiheutti Lieksassa rakennuspalojen sarjan 2022), ei Tukesin raportista ilmennyt, mikä palon syytti, mikä oli toimintamekanismisi ja miksi osa muuntopiirin kiinteistöistä paloi ja osa ei. Tästä

tehtiin matemaattinen malli ja saatiin tehtyä teoria tapahtumille saatujen tietojen perusteella. Tätä ei otettu tähän lopputyön tarkasteluun, vaan se on oma aiheensa. Mutta tästä syystä muuntamoille asennetaan jatkossa pystymaadoitukset koneellisesti, niin syvään kuin se teknisesti koh- tuudella saadaan. Näin myös vältetään roudan aiheuttamat ongelmat.

Kaikkien muuntamoiden maadoitukset tulee ottaa kriittiseen tarkasteluun, pelkästään muuntopi- rin maadoitusimpedanssi tarkastelu ei riitä varmistamaan turvallisen verkon käyttöä. Muuntamon maadoitus tulee itsessään olla riittävän hyvä, jotta vältetään vaaratilanteilta ja maasulun aiheutta- milta tulipaloilta. Mitoitusperusteen lähtökohtana tulee pitää, ettei 125 V maadoitusjännitettä yli- tetä jatkossa missään käyttötilanteessa. Myös maakaapeliverkon galvaanisten yhteyksien vaiku- tukset reduktiokertoimeen on hyvä todentaa kenttämittauksissa, missä edellä mainitut näkökohdat todennetaan.

Tarkasteluun tulee ottaa mukaan katkeilevan maasulun aiheuttamat transientit ja harmonisten vir- tojen vaikutukset, kulutuspaikkojen turvallisuus näkökohdat huomioiden. Katkeileva maasulku on yleisin vikatyyppe kompensoidussa verkossa. Uusilla mittaustekniikoilla ja mittaustietojen käsittely- menetelmillä vikatapahtumista, saadaan todennettua tietoa sähköisistä muutosilmiöistä ja niiden vaikutuksista. Tämän työn tulosten perusteella Alvan sähkönjakeluverkon turvallisuustasoa saatiin nostettua merkittävästi sekä käyttöhenkilöstön että kulutuspaikkojen osalta. Nämä menetelmät tulee ottaa käyttöön kaikilla verkkoyhtiöillä sähkön laadun ja turvallisuuden parantamiseksi. Tässä työssä esitettyjen havaintojen perusteella ABB on kehittämässä uutta maasulkusuojausalgoritmia, joka perustuu todelliseen vikavirtaan. Tämä suojaustapa menee maailman laajuiseen levitykseen.

Lähteet

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot 1. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. 2.painos. Helsinki: Otatieto.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot 2. Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.

IEC 60479-1 (2018). Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects. International Electrotechnical commission.

Jalanko, H. 2021. Sydämen rytmihäiriöt lapsella. Duodecim Terveyskirjasto. Viitattu 8.6.2022. <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00503>

Jorgensen, H. 2003. Risks in incident to harmonics in compensated mv networks. Cired. Viitattu 16.4.2023. <http://www.cired.net/publications/cired2003/reports/R%202-03.pdf>

Käytönjohtajan perustehtävät. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. 2020. Viitattu 13.8.2022. https://tukes.fi/documents/5470659/6372805/KJ_teht%C3%A4v%C3%A4t.pdf/2bb196a7-c184-0261-2558-985a5e4d5d64/KJ_teht%C3%A4v%C3%A4t.pdf?t=1612792070483

Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto.

L 5.7.1996/516. Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähköalan töissä. Viitattu 14.5.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1996/19960516>

L 9.8.2013/588. Sähkömarkkinalaki. Viitattu 4.7.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588#O2L6P51>

L 16.12.2016/1135. Sähköturvallisuuslaki. Viitattu 8.6.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161135>.

Maadoituskirja. 2001. Espoo: Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry.

Maytum, M. 2017. Shocking Electricity 2017. Peg Conference. (<https://pes-spdc.org/sites/default/files/shocking-electricity.pdf>)

Maytum, M. 2018. Shocking Electricity-2. Peg Conference. (https://peg.atis.org/wp-content/uploads/sites/16/2018/08/Effects_of_Current_on_Human_Beings_and_Livestock-MMaytum.pdf)

Method in the earth fault protection of a three-phase electrical network. WO 2016/193529 A1. International application published under the patent cooperation treaty (PCT). Viitattu 10.4.2023. <https://patentimages.storage.googleapis.com/f0/02/44/13b1aef9be8d25/WO2016193529A1.pdf>

Mäkinen, A. 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä. Raportti. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Viitattu 19.1.2023. https://energia.fi/files/1504/Maadoitusjarjestelmat_loppuraportti_TTY.pdf

Pitkänen R. 2021. Haastattelu.

Saarijärvi, E., Tammi, P. & Lehtonen, M. 2014. Low voltage network touch voltages caused by medium voltage network earth faults. Test Report No. 2014 hv14. Helsinki: Aalto yliopisto.

SFS 6000-1:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. Electrical installations of buildings. Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions. 4.painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset. High-voltage electrical installations. 5.painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Sähkölaki ja Varmuusmääräykset. 1996. Sähkötarkastuslaitoksen julkaisu A 1-66. 4.painos. Helsinki: Sähkötarkastuslaitos.

Sähkön aiheuttamat vammat (sähköisku) 2022. Terveyskirjasto. Viitattu 11.4.2023.

<https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00334>

Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoimintaa. Näkökulmia kehittämissessiin, osallistamiseen ja tiedontuotantoon. 3. korjattu painos. Tampere: Tampereen yliopisto.

Tulomäki, H. 2017. Maasulkujen analysointi häiriötallennuksilla JE-Siirto Oy:ssä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta. Viitattu 8.6.2022.

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty201704201312>.

Riikonen S. 2022. Pyytämiäsi maadoittamista kokevia piirroksia. Sähköposti.

Virheellinen sähkökytkentä aiheutti Lieksassa rakennuspalojen sarjan. 2022. Turvallisuus- ja kemialiovirasto (Tukes). Mediatiedote. Viitattu 18.4.2023. <https://tukes.fi/-/virheellinen-sahkokyt-kenta-aiheutti-lieksassa-rakennuspalojen-sarjan#17b52fde>

Wahlroos, A. Aaltonen, J. Pitkänen, R & Kauppinen, S. 2019. Improving personal safety in mv-networks through novel earth-fault current based feeder protection. Cired. Viitattu 10.4.2023.

<https://www.cired-repository.org/bitstream/handle/20.500.12455/120/CIRED%202019%20-%2020695.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wahlroos, A. & Aaltonen, J. 2020. ABB:n mittaustuloksia. Sähköposti.