



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Jani Manninen

**Maadoitusjärjestelmien tarkastelu ja
laskentamenetelmät Vakka-Suomen Voima Oy:n
sähkönjakeluverkossa**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Sähkötekniikan diplomityö
Energia- ja informaatiotekniikka

Vaasa 2020

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Jani Manninen
Tutkielman nimi:	Maadoitusjärjestelmien tarkastelu ja laskentamenetelmät Vakka-Suomen Voima Oy:n sähkönjakeluverkossa
Tutkinto:	Diplomi-insinööri
Oppiaine:	Sähkötekniikka
Työn valvoja:	Kimmo Kauhaniemi
Työn ohjaaja:	Juho Jussila
Työn tarkastaja:	Hannu Laaksonen
Valmistumisvuosi:	2020 Sivumäärä: 57

TIIVISTELMÄ

Sähkönjakeluverkon haavoittuvuus nousi keskusteluihin vuosina 2010 ja 2011, kun Tapani- ja Asta-myrskyt sekä sähkölinjoja alas painaneet lumiset puut aiheuttivat laajoja sähkökatkoja. Näiden laajojen sähkökatkojen jälkeen vaadittiin muutos, jonka mukaan lakiin tulee säätää maksimiaika sähkönjakelun keskeytykselle. Sähkönjakelu saa keskeytyä lumikuorman tai myrskyn vuoksi korkeintaan kuudeksi tunniksi taajama-alueilla ja 36 tunniksi haja-asutusalueilla kaikkien asiakkaiden kohdalla vuodesta 2029 lähtien. Tiukentuneiden toimitusvarmuusvaatimusten vuoksi jakeluverkkoa muutetaan ilmajohdoista maakaapeleihin entistä enemmän. Maadoitusten ketjuuntuminen on yleistynyt, kun kaapelointia tehdään kaupunkien keskustojen lisäksi myös taajamissa ja haja-asutusalueilla. Pistemäisiä maadoituksia yhdistetään toisiinsa keskijännitekaapeleiden suojajohtimien tai erillisten maadoitusjohtimien kautta, mikä johtaa maadoitusten rakenteiden muuttumiseen. Kaapeloinnin myötä verkon maakapasitanssien edustama nolлайmpedanssi pienenee huomattavasti, mikä näkyy kapasitiivisen maasulkuvirran kasvuna.

Diplomityö tehtiin Vakka-Suomen Voima Oy:lle (jatkossa VSV). Työn tarkoituksena oli tehdä selvitys, minkälaisia sähköverkkoyhtiön maadoitusjärjestelmät ovat vuonna 2028 ja miten kaapelointi tulee vaikuttamaan jakeluverkon maadoitusresistansseihin ja maasulkuvirtoihin. Kaapeloinnin vaikutuksia jakeluverkon maadoitusjärjestelmiin tarkasteltiin niin, että standardien vaatimukset edelleen täyttyvät. Työhön sisältyi VSV:n laajojen maadoitusjärjestelmien määrittely ja selvitys siitä, mitkä alueet olisivat muutettavissa laajaksi maadoitusverkoksi. Työssä tutkittiin yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien maadoitusresistanssin arvoja. Maadoitusten yhdistymisen vaikutuksia maadoitusresistanssien arvoihin selvitettiin esimerkkitapauksen laskentatulosten avulla. Lisäksi työssä tutkittiin kaapeloinnista johtuvaa maasulkuvirtojen kasvua koko verkossa ja päämuuntajakohtaisesti.

Työn tuloksena määriteltiin VSV:n laajat maadoitusjärjestelmät ja ehdotettiin yhtä tapaa laajan maadoitusjärjestelmän esittämiseen. Maasulkuvirrat laskettiin koko keskijänniteverkolle ja päämuuntajakohtaisesti. Laskennan tuloksia voidaan käyttää maasulkuvirran kompensoinnin suunnittelussa. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi laskettiin PSCAD-simulointiohjelmalla. Yksittäisten muuntamoiden maadoitusresistanssit määriteltiin myös laskennallisesti. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien huomattiin olevan hyvin lähellä käännepistemenetelmällä mitattuja arvoja. Vertailua pitäisi kuitenkin tehdä enemmän, ennen kuin voidaan tehdä johtopäätöksiä laskentatulosten luotettavuudesta.

AVAINSANAT: yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä, laaja maadoitusjärjestelmä, keskijänniteverkko, jakeluverkon maadoitukset, maadoitusresistanssi, maasulkuvirta

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author:	Jani Manninen	
Topic of the Thesis:	Examination and calculation methods of earthing systems in Vakka-Suomen Voima Oy's distribution network	
Degree:	Master of Science	
Major:	Electrical Engineering	
Supervisor:	Kimmo Kauhaniemi	
Instructor:	Juho Jussila	
Evaluator:	Hannu Laaksonen	
Year of Completing the Thesis:	2020	Pages: 57

ABSTRACT

The vulnerability of the electricity distribution network came up for discussion in 2010 and 2011 when storms, Tapani and Asta, as well as heavy snow loads caused extensive power outages. Due to these major power outages, an amendment was required to the law, according to which the law should provide a maximum time for the interruption of electricity distribution. Electricity distribution can be interrupted by snow load or storm for a maximum of six hours in urban areas and 36 hours in sparsely populated areas for all customers after 2028. Due to the reform of the Electricity Market Act, overhead lines are replaced by underground cables. Because of increased cabling, the earthing of separate grounding systems is connected to each other's by the sheaths of the medium voltage cables or separate grounding wires. Increased cabling reduces the zero impedance of the power grid, leading to an increase in earth fault current.

The thesis was done for Vakka-Suomen Voima Oy (VSV). The purpose of the work was to make a study of what kind of earthing systems VSV will have in 2028 and how cabling will affect to ground impedances and earth fault currents. The thesis included the examination of global earthing systems in VSV's electricity distribution network. In addition, the results of the grounding resistance of the connected earthing systems were investigated in this thesis. The effects of connected earthing on grounding resistances were investigated by the calculation results of the example case. Also, the effects of the cabling to earth fault current were investigated.

One of the results of this work, VSV's global earthing systems were defined and a way was proposed to present global earthings systems. In addition, increase of earth fault currents were calculated for the entire medium voltage network and for each main transformer. The results of the calculations can be used when planning compensation of earth fault currents. The grounding resistance of the connected earthing system was calculated with the PSCAD simulation software. The grounding resistances of the transformer substations were also determined computationally. The grounding resistances of the connected earthing system were found to be close with the measured values of the inflection point method. However, the measurement results are not reliable since more measurements should be made to verify results.

KEYWORDS: connected earthing system, global earthing system, medium-voltage network, earthing of the distribution network, grounding resistance, earth fault current

Sisällys

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
1 Johdanto	9
1.1 Työn tausta	9
1.2 Työn tavoite	10
1.3 Työn rakenne	11
2 Vakka-Suomen Voiman sähkönjakeluverkko ja toimintaympäristö	12
2.1 Vakka-Suomen Voima Oy:n sähkönjakeluverkko	12
2.2 Sähkömarkkinalain jakeluverkkoa ja sen haltijaa koskevat säännökset	13
2.3 Kaapeloinnin vaikutukset maasulkuvirtoihin	14
3 Maadoitusjärjestelmät ja maadoitusvaatimukset	16
3.1 Maadoitusjärjestelmien maadoitusvaatimukset	16
3.2 Muuntamon maadoitukset	18
3.3 Laaja maadoitusjärjestelmä	19
3.4 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä	21
4 Laajat maadoitusjärjestelmät Vakka-Suomen Voima Oy:n sähkönjakeluverkossa	23
4.1 Uudenkaupungin laaja maadoitusjärjestelmä	23
4.2 Laitilan laaja maadoitusjärjestelmä	24
4.3 Laajaksi maadoitusjärjestelmäksi muutettavissa olevat kohteet	25
5 Maadoitusten mittaaminen ja maadoitusjärjestelmien laskenta	27
5.1 Käännepestemenetelmä	27
5.2 Selektiivinen mittaus	29
5.3 Voltti-ampeerimenetelmä	30
5.4 Maaperän sähköisen resistiivisyyden mittaus	31
5.5 Vaaka- ja pysty maadoituselektrodin maadoitusresistanssi	33
5.6 Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssi	36
5.7 Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi	37

6	Muuntamon ja yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien laskentatulokset	40
6.1	Muuntamon maadoitusresistanssin laskentatulokset	40
6.2	Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskentatulokset	42
6.3	Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien vertailu käännepistemennetelmämittauksiin	44
7	Maasulkuvirtojen kasvu Vakka-Suomen Voiman jakeluverkossa	46
7.1	Maasulkuvirrat koko verkkoalueella	47
7.2	Maasulkuvirrat päämuuntajakohtaisesti	48
8	Johtopäätökset	49
8.1	Laajat maadoitusjärjestelmät	49
8.2	Maadoitusresistanssien laskenta muuntamoille ja yhteen liitetyille maadoitusjärjestelmälle	49
8.3	Maasulkuvirtojen tarkastelu	51
8.4	Jatkotutkimuskohteet	52
9	Yhteenvedo	53
	Lähteet	56

Kuvat

Kuva 1.	Vakka-Suomen Voiman keskijänniteverkko. Kuva Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä.	13
Kuva 2.	Sallittu kosketusjännite U_{TP} virran kestoajan funktiona (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).	17
Kuva 3.	Puistomuuntamon maadoitukset (Headpower, 2019).	18
Kuva 4.	Verkostosuosituksen RJ 22:20 esimerkki laajan maadoitusjärjestelmän muodostumisesta (Hälvä ja muut, 2020).	20
Kuva 5.	Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä, jossa jakelumuuntamo on yhteydessä kahteen muuhun suurjännitejärjestelmään (Hälvä ja muut, 2020).	22
Kuva 6.	Uudenkaupungin laaja maadoitusjärjestelmä. Kuva Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä.	24
Kuva 7.	Laitilan laaja maadoitusjärjestelmä. Kuva Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä	25
Kuva 8.	Havainnollistava kuva maadoitusresistanssin mittaamisesta käännepistemenetelmällä (Ylinen ja muut, 2019).	28
Kuva 9.	Havainnollistava kuva maadoitusresistanssin mittaamisesta selektiivisellä menetelmällä (Fluke Corporation, 2017).	29
Kuva 10.	Mittaus voltti-ampeerimenetelmällä (Ylinen ja muut, 2019).	31
Kuva 11.	Maan sähköisen resistiivisyyden mittauksen periaate (Elovaara & Haarla, 2011).	32
Kuva 12.	Vaakamaadoituselektrodin (nauha, lanka tai köysi) maadoitusresistanssi pituuden funktiona suoraan tai rengasmaisesti asennettuna homogeenisessä maassa (maan pinnalla) (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).	34
Kuva 13.	Pystymaadoituselektrodin resistanssi homogeenisessä maassa (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).	35
Kuva 14.	Yhteenliitetyt maadoituselektrodit (Mäkinen, 2016).	38
Kuva 15.	Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin muodostaminen (Mäkinen, 2016).	38

- Kuva 16.** Havainnollistava kuva muuntamon maadoitusresistanssin laskennasta. 41
- Kuva 17.** Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä PSCAD-simulointiohjelmalla mallinnettuna Mäkisen (2016) mallia mukaillen. Kuvaa on rajattu viiteen solmupisteeseen esityksen selkeyden vuoksi. 42
- Kuva 18.** Maadoitusresistanssien arvot yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä. 43
- Kuva 19.** Muuntamoiden maadoitusresistanssit käännepistemenetelmällä mitattuna silloin, kun muuntamo on ollut yhteydessä muihin maadoitusjärjestelmiin, ja laskennallisesti määritetyt maadoitusresistanssit. 45
- Kuva 20.** Keskijänniteverkon maasulkuvirta kaapelointiasteen funktiona. 47
- Kuva 21.** Maasulkuvirrat päämuuntajakohtaisesti kaapelointiasteen funktiona. 48

Lyhenteet

ΔU	Potentiaali ero
ρ	Maaperän sähköinen resistiivisyys
a	Maadoitus- tai mittauselektrodien välinen etäisyys
C	Virranmittauselektrodi
D	Rengaselektrodin halkaisija
d	Köysimäisen elektrodin halkaisija
F	Kerroin
I_E	Maadoituselektrodin läpi kulkeva virta
I_M	Mittausvirta
L	Maadoituselektrodien yhteispituus
l	Maadoituselektrodin pituus
P	Jännitteenmittauselektrodi
r	Johdon reduktiokerroin referenssimaahan nähden
R	Maadoitusresistanssi
U_E	Maadoitusjännite
U_{EM}	Maadoitusjärjestelmän ja referenssimaassa olevan maapiikin välinen jännite
U_{TP}	Kosketusjännite
V	Virran aiheuttama potentiaali
Z_E	Maadoitusimpedanssi

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Sähkömarkkinalain vuoden 2013 uudistus velvoittaa sähkönjakelijoita parantamaan toimitusvarmuutta asettamalla rajoituksia sähkönjakelun keskeytysaikoihin. Sähköverkko-yhtiöt parantavat asiakkaidensa sähkönjakeluverkon toimitusvarmuutta muun muassa maakaapeloimalla ilmajohtoverkkojaan ja lisäämällä verkostoautomaatiota. Kaapeloinnin seurauksena verkkojen kapasitiiviset maasulkuvirrat kasvavat, minkä vuoksi kosketusjännitevaatimusten täyttäminen edellyttää yleensä maasulkuvirran kompensointia. (Mäkinen, 2016).

Kaapeloinnin myötä avojohtoverkon pistemäiset maadoitukset yhdistyvät kaapeleiden vaippojen ja keskusköysien kautta muodostaen yhteenliittyneitä ja myös silmukoita sisältäviä maadoitusjärjestelmiä. Maadoitusjärjestelmä on liitäntöjen ja laitteiden järjestelmä, joka on välttämätön laitteiden tai järjestelmän maadoittamiseksi. Yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä muuntamon maadoitusresistanssi on huomattavasti pienempi kuin tarkasteltavan muuntopiirin oma maadoitusresistanssi erillisesti tarkasteltuna. (Mäkinen, 2016; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien maadoitusresistanssien arvot voidaan määrittää laskennallisesti. Maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi on mahdollista selvittää mallintamalla maadoitusverkko ja laskemalla maadoituselektrodien resistanssien arvot. Viime vuosina laskennallista menetelmää on tutkittu ja kehitetty. Laskennallista menetelmää voidaan hyödyntää myös verkostosuunnittelussa, kun yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluvan muuntamon maadoitusresistanssi voidaan laskea ennakoon.

1.2 Työn tavoite

Työn tarkoituksena on tehdä selvitys, miten VSV:n jakeluverkon maakaapelointi tulee vaikuttamaan maadoitusjärjestelmiin ja niiden maadoitusresistanssiin sekä keskijänniteverkon maasulkuvirtoihin. Tutkimuksen kohteena on erityisesti yksittäisten muuntamoiden ja yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien laskenta. Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssin laskennan tuloksia verrattiin käännepestemennetelmällä mitattuihin arvoihin.

Työn tavoitteena on tutkia yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssin laskentaa, ja selvittää voidaanko muuntamoiden maadoitusresistanssi määrittää laskennan avulla luotettavasti. Laskennan tuloksia verrataan mitattuihin arvoihin ja sitä kautta arvioidaan laskennan käytettävyyttä. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssit lasketaan mallintamalla maadoitusjärjestelmä PSCAD-simulointiohjelmaan. Työn yhtenä tavoitteena on, että yhteen liitettyihin maadoitusjärjestelmiin kuuluvien muuntamoiden maadoitusmittauksia voitaisiin vähentää, jos maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssit voitaisiin jatkossa määrittää laskennallisesti. Tällöin riittäisi kunnossapitotöiden ohessa tehtävä maadoitusten yhteyden tarkastaminen.

Työssä tutkitaan myös maakaapeloinnista johtuvaa maasulkuvirtojen kasvua koko verkossa ja päämuuntajakohtaisesti. Maasulkutarkastelun tavoitteena on saada karkea arvio siitä, miten maasulkuvirrat tulevat kehittymään tulevaisuudessa etenkin päämuuntajakohtaisesti. Tätä tietoa voidaan hyödyntää maasulkuvirtojen kompensoinnin suunnittelussa, kun saadaan selville ne sähköasemat, joissa kompensointia tullaan eniten tarvitsemaan. Näiden lisäksi työn tavoitteena on määrittellä VSV:n laajat maadoitusjärjestelmät. Laajojen maadoitusjärjestelmien määrittelyyn käytettiin standardin SFS 6001 mukaisia ohjeita. Tarkoituksena on myös arvioida alueita, joihin voisi tulevaisuudessa muodostua laaja maadoitusjärjestelmä.

1.3 Työn rakenne

Luvussa 1 esitetään työn sisältö ja työn tavoitteet. Luvussa 2 käsitellään Vakka-Suomen Voiman sähkönjakeluverkkoa ja sen toimintaympäristöä etenkin sähkömarkkinalain vuoden 2013 uudistuksen näkökulmasta. Luvussa käsitellään myös toimitusvarmuusvaatimuksista johtuvan kaapeloinnin vaikutusta verkon maasulkuvirtoihin. Luvussa 3 käsitellään erilaisia maadoitusjärjestelmiä ja standardin 6001 mukaisia maadoitusvaatimuksia. Lisäksi esitetään standardin asettamia vaatimuksia kosketusjännitteelle, ja sitä kautta maadoitusresistanssin mitoitusarvon määräytymistä. Luvussa 4 määritetään VSV:n nykyiset laajat maadoitusjärjestelmät ja arvioidaan tulevaisuudessa muodostuvat laajat maadoitusjärjestelmät.

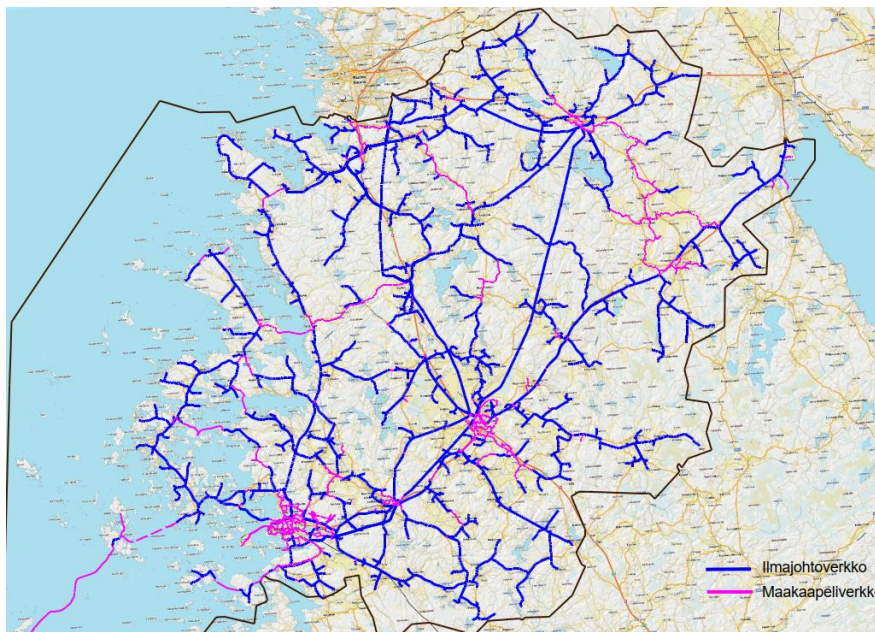
Luvussa 5 käsitellään vaihtoehtoisia maadoitusmittaustapoja, joilla muuntamon maadoitusresistanssi voidaan mitata, sekä esitetään maadoitusresistanssin laskentaan liittyviä kaavoja ja laskentamenetelmiä, joita voidaan soveltaa yksittäisen muuntamon ja yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin määrittämiseksi. Luvussa 6 lasketaan yksittäisen muuntamon ja yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien arvot. Luvussa verrataan myös yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien arvoja käännepistemenetelmällä mitattuihin arvoihin. Luvussa 7 tarkastellaan kaapeloinnista johtuvaa maasulkuvirtojen kasvua VSV:n keskijänniteverkossa, ja esitetään tulokset koko jakeluverkolle sekä päämuuntajakohtaisesti. Luvussa 8 esitellään työn lopulliset tulokset ja tarkastellaan teorian ja mittausten yhteensopivuutta sekä mahdollisia syitä eroihin. Luvussa on esitetty myös jatkotutkimuskohteet.

2 Vakka-Suomen Voiman sähkönjakeluverkko ja toimintaympäristö

Tässä luvussa esitetään VSV:n sähkönjakeluverkko ja kehittämissuunnitelman tavoitteet vuoteen 2028 asti. Luvussa käydään läpi sähkömarkkinalakia ja erityisesti vuoden 2013 uudistuksen vaikutuksia sähkönjakeluverkkoon ja sen haltijalle. Sähkömarkkinalain uudistuksen asettamien toimitusvarmuusvaatimusten myötä kaapelointi lisääntyy entisestään ja siten myös maasulkuvirrat kasvavat. Luvussa käydään läpi myös kaapeloinnin vaikutuksia keskijänniteverkon maasulkuvirtoihin.

2.1 Vakka-Suomen Voima Oy:n sähkönjakeluverkko

VSV:n verkkoalue on tyypillinen suomalainen maaseutuverkko, jossa on muutama taaajama-kaupunkityyppinen keskittymä. VSV:n verkkoalue ulottuu Uudenkaupungin saaristosta Pyhäjärven rantaan ja Mynämäen pohjoisosista Rauman kaupungin eteläosaan. Leveyttä jakelualueella on noin 65 km ja pituutta 50 km. Vuonna 2019 VSV:n omistuksessa olevan sähkönjakeluverkon pituus on yhteensä 3870 km, josta keskijänniteverkkoa on 1290 km ja pienjänniteverkkoa on 2580 km. Kuvassa 1 on VSV:n keskijänniteverkko, missä sininen väri kuvaa ilmajohtoverkkoa ja violetti väri kuvaa maakaapeliverkko. Kaapelointiaste keskijänniteverkossa on 25 % ja pienjänniteverkossa on 40 %. Asiakkaita VSV:n verkossa on 24926 ja verkkopituus asiakasta kohden on noin 160m. (Vakka-Suomen Voima Oyj, 2019).



Kuva 1. Vakka-Suomen Voiman keskijänniteverkko. Kuva Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä.

VSV:n jakeluverkon kehittämissuunnitelma on tehty vuosille 2016 – 2029. Kehittämissuunnitelma on tehty siten, että sähkömarkkinalain mukaiset välitavoitteet saavutetaan myös vuosina 2019 ja 2023. Toimitusvarmuutta parannetaan jakeluverkon kaapeloinnilla ja jakeluverkon suojausten sekä kaukokäyttöerottimien lisäämisellä. Kehittämissuunnitelman tavoitteena on, että vuonna 2028 keski- ja pienjänniteverkon kaapelointiasteet ovat noin 55 %. Tavoite saavutetaan, kun keskijänniteverkossa ilmajohtoverkkoa muutetaan maakaapeliverkoksi noin 384 km ja pienjänniteverkossa noin 420 km vuoden 2028 loppuun mennessä. (Vakka-Suomen Voima Oyj, 2019).

2.2 Sähkömarkkinalain jakeluverkkoa ja sen haltijaa koskevat säännökset

Sähkömarkkinalaki astui ensimmäistä kertaa voimaan vuonna 1995, jota on sittemmin uudistettu vuosien saatossa vaatimusten mukaisesti. Tapani- ja Asta-myrskyt sekä sähkölinjoja alas painaneet lumiset puut aiheuttivat laajoja sähkökatkoja. Näiden laajojen sähkökatkojen jälkeen lakiin vaadittiin muutos, jonka mukaan lakiin tulee säätää maksimiaika sähkönjakelun keskeytykselle. Vuoden 2013 uudistukseen liittyi myös sähkökatkoista maksettavien vakiokorvausten korottaminen. Uudistuksen yksi keskeisistä

tavoitteista on sähkönjakelun nykyisen varmuuden ja palvelutason nostaminen suurhäiriötilanteissa erityisesti haja-asutusalueilla ja maaseututaajamissa vastaamaan jakeluverkkojen asiakkaiden ja yhteiskunnan toimintojen kasvaneita vaatimuksia. (HE, 20/2013).

Sähkömarkkinalain uudistus astui voimaan vuoden 2013 syyskuussa. Vuoden 2028 jälkeen myrskyn tai lumikuorman aiheuttama sähkökatkos saa kestää taajamissa enintään kuusi tuntia ja haja-asutusalueilla enintään 36 tuntia (Sähkömarkkinalaki, 588/2013, 51 §). Sähkömarkkinalain mukainen siirtymäaika ulottuu portaittain vuoden 2028 loppuun saakka. Vuoden 2019 loppuun mennessä vaatimusten on täyttyvä vähintään 50 %:lla ja vuoden 2023 loppuun mennessä 75 %:lla kaikista käyttäjistä vapaa-ajan asunnot pois lukien. Jotkut verkkoyhtiöt voivat saada lisäaikaa jopa vuoteen 2036 asti, mikäli jakeluverkonhaltija joutuu muuttamaan keski- ja pienjännitejohdoista keskiarvoa merkittävästi suuremman osuuden ilmajohdoista maakaapeleiksi ja että jakeluverkon haltija joutuu uusimaan vaatimusten täyttämiseksi ennenaikaisesti merkittävän määrän jakeluverkkoa (Sähkömarkkinalaki 119 §).

Sähkömarkkinalain 52 §:n mukaan jakeluverkonhaltijan on laadittava jakeluverkon kehittämissuunnitelma, joka sisältää toimenpiteet, joilla 51 ja 119 §:ssä säädetyt vaatimukset täytetään. Kehittämissuunnitelmaa on päivitettävä kahden vuoden välein. Energiavirasto seuraa verkkoyhtiöiden kehittämissuunnitelmia ja toteutuneita investointeja asettamalla yhtiöille välitavoitteita. Kehittämissuunnitelmassa on kiinnitettävä huomiota sellaisten sähkönkäyttöpaikkojen sähkösaannin varmistamiseksi, joissa on yhteiskunnan johtamisen tai turvallisuuden, väestön toimeentulon tai elinkeinoelämän toimintakyvyn varmistamisen kannalta tärkeitä toimintoja. (Sähkömarkkinalaki 52 §).

2.3 Kaapeloinnin vaikutukset maasulkuvirtoihin

Sähkönjakeluverkon kaapelointi kasvattaa verkon maasulkuvirtoja, sillä maakaapeleiden maakapasitanssit ovat huomattavasti avojohtojen maakapasitansseja suurempia. Varsinkin maaseutuverkoissa pitkien etäisyyksien vuoksi verkon kokonaismaasulkuvirta voi

nousta suureksi, ollen tyypillisesti satoja ampeereja. Maasulkuvirran suuruus riippuu päämuuntajan perään kytkeytyneen galvaanisesti yhtenäisen verkon laajuudesta. Keski-jänniteajohtojen (20 kV) aikaansaama maasulkuvirta on keskimäärin 0,067 A/km ja PAS-johtojen aikaansaama maasulkuvirta on keskimäärin 0,054 A/km. Maakaapeleiden maakapasitanssit ovat huomattavasti suuremmat ja niiden aikaansaama maasulkuvirta on keskimäärin 2,7–4 A/km. Kaapeleiden maakapasitanssin suuruuteen vaikuttaa merkittävästi kaapelin rakenne. Esimerkiksi nykyään yleisillä muovieristeisillä AHXAMK-W-kaapeleilla maakapasitanssin arvo on 50 % pienempi kuin ennen yleisillä paperieristeisillä APYAKMM-kaapeleilla. Siten maasulkuvirrat pienentyvät hieman niiltä osin, kun vanhoja paperieristeisiä kaapeleita aletaan uusimaan muovieristeisillä kaapeleilla. (Nikander & Mäkinen, 2017; Lakervi & Partanen, 2009).

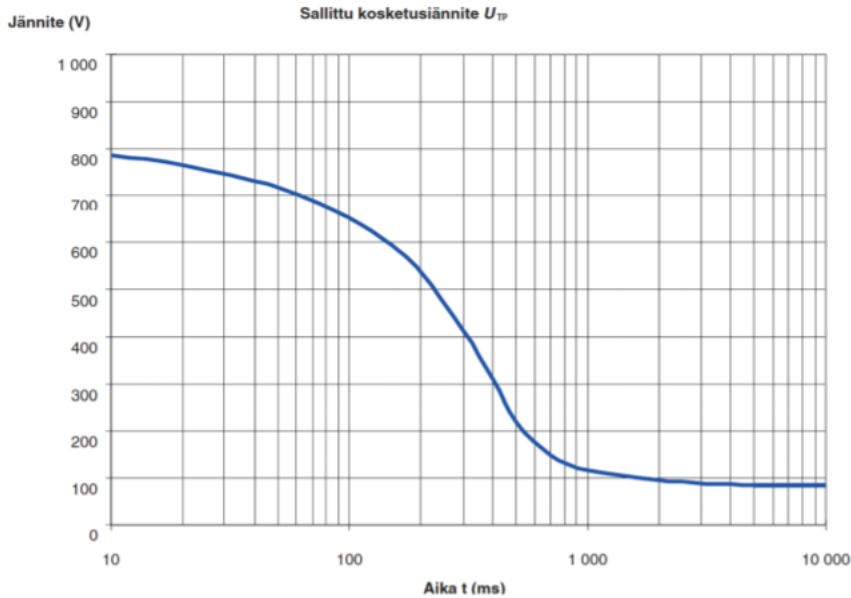
3 Maadoitusjärjestelmät ja maadoitusvaatimukset

Maadoitusjärjestelmä koostuu useista vaaka-, pysty- tai vinoelektrodeista, jotka on kaivettu maahan. Kun useita maadoituselektrodeja on yhteydessä toisiinsa galvaanisesti, niin ne muodostavat paikallisen maadoitusjärjestelmän. Maadoitusjärjestelmän tarkoituksena on pienentää kosketusjännitteitä, jotka aiheutuvat keskijänniteverkon maasuluista ja syöttävän PEN-johtimen katkeamisesta. Kosketusjännitteellä tarkoitetaan kosketustilanteessa ihmiskehon kosketuskohdan ja maan välillä vaikuttavaa jännitettä. PEN-johtin toimii suoja- ja nollajohtimena. Kosketusjännitteitä voidaan pienentää pienentämällä maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssia ja hyvällä potentiaalintasauksella. Potentiaalintasauksella on vaikutusta varsinkin pienjänniteasennusten turvallisuuteen. (Mäkinen, 2016; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2017).

Maasulku aiheutuu, kun jännitteinen johdin kytkeytyy maahan tai sen ja maan välinen eristysresistanssi pienenee alle määrätyn raja-arvon. Maasulussa kosketusjännitteen suuruus riippuu maasulkuvirrasta, maadoituksen resistanssista ja virran jakautumisesta maaperässä. Sallittu kosketusjännitteen suuruus taas riippuu virran kestoajasta kuvan 2 mukaisesti. Standardi SFS 6001 määrittää sallitut arvot kosketusjännitteelle. Standardin vaatimukset voidaan täyttää maadoituksia parantamalla, laukaisun hidastusaikaa lyhentämällä tai verkon maasulkuvirtaa pienentämällä. (Lakervi & Partanen, 2009).

3.1 Maadoitusjärjestelmien maadoitusvaatimukset

Maadoituselektrodin maadoitusresistanssin suurimman sallitun arvon ja maadoituselektrodin rakenteen määräävät maadoituselektrodin läpi kulkeva virta sekä elektrodissa syntyvälle maadoitusjännitteelle asetettu raja-arvo. Kosketusjännitteen raja-arvot riippuvat siitä, kuinka helposti kosketusjännite voi aiheuttaa vaaraa ja kuinka kauan kosketusjännitteen aiheuttava vikavirta kestää. Kuvassa 2 on esitetty sallittu kosketusjännite virran kestoajan funktiona, kun maasulku tapahtuu suurjännitejärjestelmässä. Jos vikavirta on huomattavasti suurempi kuin 10 s, niin sallitun kosketusjännitteen arvona voidaan käyttää 80 V. (Elovaara & Haarla, 2011; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).



Kuva 2. Sallittu kosketusjännite U_{TP} virran kestoajan funktiona (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

Maadoitusjännitteen U_E raja-arvo määräytyy kaavalla

$$U_E \leq F \cdot U_{TP}, \quad (1)$$

jossa U_{TP} on kosketusjännite ja F on kerroin. Kertoimen F sallittu arvo on Suomessa yleensä korkeintaan 2. Jos arvon 2 saavuttaminen on maaperän huonon johtavuuden vuoksi vaikeaa, voidaan käyttää suurempia kertoimia. Kerrointa 4 voidaan käyttää huonoissa maadoitusolosuhteissa, jos muuntamolle tehdään potentiaalinhojaus tai jokainen pienjännitejohtohaara maadoitetaan. Mikäli koko muuntopiirin alue on huonosti johtavaa, niin voidaan käyttää kertoimen arvona 5. Tällöin muuntamolle on tehtävä potentiaalinhojaus ja jokaisella liittymällä pitää olla maadoitus. Mikäli edellä olevien ehtojen täyttymistä ei voida varmistaa, tehdään liittymän rakennuksen ympärille potentiaalinhojaus. (Lakervi & Partanen, 2008).

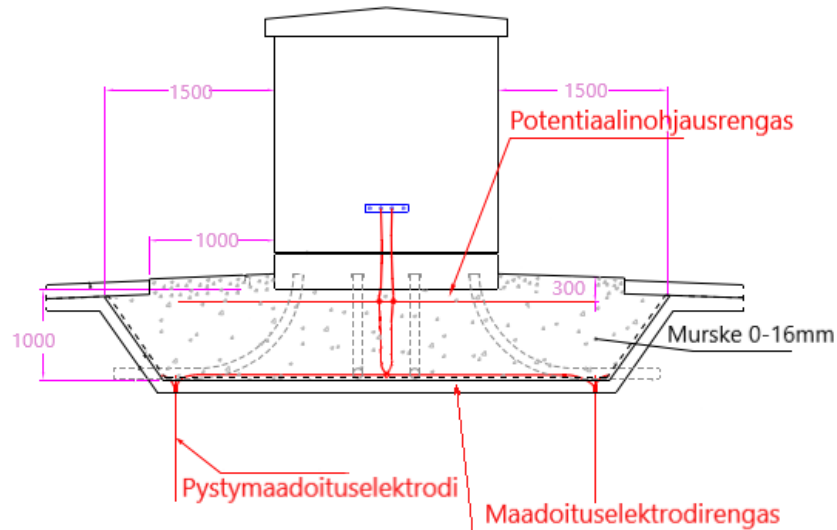
Maadoitusresistanssin R_E mitoitusarvo on yksittäisen elektrodin tapauksessa laskettavissa kaavasta

$$R_E = \frac{U_E}{I_E}, \quad (2)$$

jossa U_E on maadoitusjännite ja I_E on maadoituselektrodin läpi kulkeva virta. Esimerkiksi 0,5 s laukaisuajalla sallittu kosketusjännite on kuvan 2 mukaisesti 215 V, ja siten sallittu maadoitusjännite on kaavan 1 mukaan 430 V. 50 A maasulkuvirralla suurin sallittu maadoitusresistanssi on kaavan 2 mukaan 8,6 Ω . (Elovaara & Haarla, 2011; Lakervi & Partanen, 2008).

3.2 Muuntamon maadoitukset

Muuntamolle rakennetaan aina maadoituselektrodi ja tarpeen mukaan maadoitusta parannetaan muilla maadoituselektrodeilla, kuten pysty maadoituselektrodeilla. Kuvassa 3 ja 4 on ohje helppoihin olosuhteisiin rakennettavasta puistomuuntamosta ja sen maadoituksista. Muuntamon maadoitus koostuu siten maadoituselektrodirenkaasta, johon yhdistetään neljä sauvamaadoituselektrodiä, ja potentiaalinohjauselektrodista. (Headpower, 2019; Ylinen ja muut, 2019).



Kuva 3. Puistomuuntamon maadoitukset (Headpower, 2019).

Maadoituselektrodi ja pysty maadoituselektrodit sijoitetaan muuntamon perustuksen pohjalle. Potentiaaliohjauselektrodi asennetaan tarvittaessa 300 mm syvyydelle maan pinnasta ja 1 m etäisyydelle seinistä. Potentiaaliohjauselektrodiä ei tarvita, mikäli

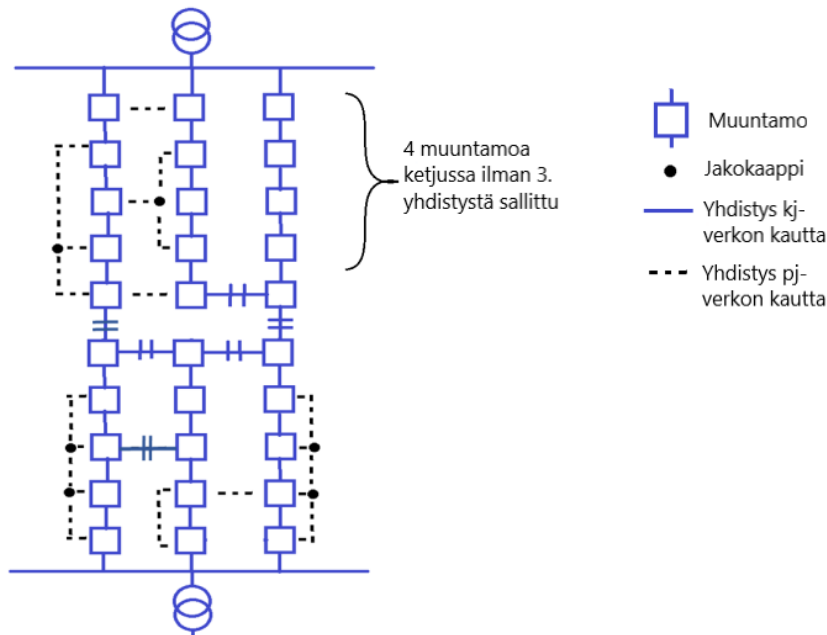
maadoitusresistanssi täyttää ehdon $U_E \leq 2 \times U_{TP}$. Potentiaalinojauselektrodiä käytetään pääasiassa potentiaalinojaukseen eikä niinkään aikaansaamaan tietty maadoitusresistanssi. Potentiaalinojauselektrodi asennetaan murskeen sekaan, minkä vuoksi sen vaikutus muuntamon maadoitusresistanssiin on vähäinen. Kaikki maadoituselektrodit yhdistetään muuntamon maadoituskiskoon, johon yhdistetään myös muut suojamaadoitusjohtimet. (Headpower, 2019; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018; Ylinen ja muut, 2019).

3.3 Laaja maadoitusjärjestelmä

”Laaja maadoitusjärjestelmä on yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, joka on toteutettu kytkemällä yhteen paikalliset maadoitusjärjestelmät. Yhteen kytkettyjen paikallisten maadoitusjärjestelmien läheisyys varmistaa sen, ettei vaarallisia kosketusjännitteitä esiinny.” (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 24). Standardi SFS 6001 ei anna tarkempaa määritelmää laajalle maadoitusjärjestelmälle, mutta jokaisen muuntamon tulee liittyä vähintään kahdella yhteydellä laajaan maadoitusjärjestelmään. Yhdysjohtimina toimivat muuntajien välisten suurjännitekaapeleiden vaipat ja keskusköydet, pienjänniteverkon PEN-johtimet, ja muut erilliset muuntamoita yhdistävät maadoitusjohtimet ja elektrodit. Useiden maadoitusten yhdysjohtimien vaatimuksen syynä on, että yksi maadoitusjohdinaurio ei katkaise yhteyttä laajaan maadoitusjärjestelmään. Laaja maadoitusjärjestelmä voi muodostua jo kolmen muuntopiirin maadoituksista, jos niiden maadoitusverkko muodostaa verkkomaisen ja riittävän tiheän maadoitusalueen. (Cafaro ja muut, 2015; Majanen ja muut, 2019; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

Verkostosuosituksessa RJ 22:20 (Hälvä ja muut, 2020) on esitetty eräs tapa laajan maadoitusjärjestelmän yksityiskohtaiseen määrittelyyn. Suosituksessa muuntopiirin maadoituksen tulee liittyä keskijänniteverkon kautta galvaanisesti vähintään kahteen muuhun laajaan maadoitusjärjestelmään kuuluvaan muuntopiirin maadoitukseen. Tämän lisäksi vähintään 20 % laajan maadoitusjärjestelmään kuuluvilla muuntopiirien maadoituksilla tulee olla enemmän kuin kaksi yhteyttä muihin muuntopiirien maadoitukseen. Keskijänniteverkon kautta muodostuvien yhteyksien lisäksi muuntopiirien maadoitusten tulee

yhdistyä riittävässä määrin pienjänniteverkon kautta. Yhteyksiä tulee olla siten, että vähintään 70 % laajaan maadoitusjärjestelmään kuuluvista muuntamoista on yhdistetty vähintään kolmeen muuntopiiriin joko pien- tai keskijänniteverkon kautta. Kuvassa 4 on havainnollistettu laajan maadoitusjärjestelmän muodostumista. (Hälvä ja muut, 2020).



Kuva 4. Verkostosuosituksen RJ 22:20 esimerkki laajan maadoitusjärjestelmän muodostumisesta (Hälvä ja muut, 2020).

Laajassa maadoitusjärjestelmässä saa pääsääntöisesti olla ketjumaisesti peräkkäin neljä muuntamo ilman, että niillä on kolmatta yhdistystä muihin muuntopiirien maadoitukseen. Yksittäistapauksina viidennen muuntamon lisääminen tällaiseen ketjuun voidaan sallia, mikäli maadoitusten yhteyksien lisääminen uuden muuntamon rakentamisen yhteydessä ei ole perusteltua. Lisäksi muuntamoiden välisten etäisyyksien tulee olla riittävästi lyhyitä, pääsääntöisesti lyhyempiä kuin 1 km. (Hälvä ja muut, 2020).

Laajan maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssia ei tarvitse mitata, kun siihen liitetään uusi muuntamo, mutta muuntamon luotettava liittyminen laajaan maadoitusjärjestelmään on todettava mittauksin. Laajojen maadoitusjärjestelmien määrittely jää verkonhaltijan vastuulle. Kuitenkaan pelkästään pieni kokonaisresistanssi ei takaa laajan maadoitusjärjestelmän määrittelyn toteutumista. Pienillä vikavirroilla maapotentiaalin

nousu pysyy kohtuullisena ja lyhyellä vian kestoajalla sallittu kosketusjännite voi olla suurempi. Laajasta maadoitusjärjestelmästä saavutettavien turvallisuusetujen vuoksi siihen tulisi pyrkiä. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018; Anjala ja muut, 2016).

Suomen olosuhteissa tyypillisiä laajan maadoitusjärjestelmän alueita ovat tiheästi asutut kaupunkien keskustat sekä laajat teollisuusalueet, joissa jakeluverkko muodostaa yhtenäisen maadoitusjärjestelmän. Esimerkiksi rivimäinen muuntamoketju ei yleensä muodosta laajaa maadoitusjärjestelmää, koska verkon rakenne ei ole verkkomainen eikä tarpeeksi tiheä. Laajasta maadoitusjärjestelmästä on oltava dokumentaatio, jossa on todettavissa perusteet laajan maadoitusjärjestelmän vaatimusten täyttymisestä. Dokumentaatioissa pitää olla nähtävillä laajaan maadoitusjärjestelmään liittyvät jakelumuuntamot, erotin- ja sähköasemat ja niiden väliset maadoitusten yhdistämiset. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018; Ylinen ja muut, 2019).

3.4 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

Yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä paikalliset maadoitusjärjestelmät ovat yhteydessä toisiinsa ketjumaisesti tai silmukkamaisesti täyttämättä kuitenkaan laajan maadoitusjärjestelmän ehtoja. Suomen olosuhteissa yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä muodostuu tyypillisesti taajamien tai maaseutualueiden jakelumuuntamoista tai sähköasemista, joiden maadoitusjärjestelmät ovat yhteydessä toisiinsa. Maadoitusjärjestelmät voivat olla yhteydessä toisiinsa kaapelien metallivaippojen ja/tai keskusköysien kautta ja lisäksi pienjänniteverkon PEN- tai suojojohdinten kautta. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

Jotta maadoitusjärjestelmiä voidaan käsitellä yhtenä maadoitusjärjestelmänä, pitää jakelumuuntamon tai vastaavan maadoitusjärjestelmän olla luotettavasti johtavassa yhteydessä vähintään kahteen muuhun suurjännitemaadoitusjärjestelmään kuvan 5 mukaisesti. Tällaisena järjestelmänä pidetään esimerkiksi vähintään kolmea ketjussa olevaa maadoitusjärjestelmää. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin

riittävän pienen arvon suuruus voidaan määritellä eri tavoilla. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).



Kuva 5. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä, jossa jakelumuuntamo on yhteydessä kahteen muuhun suurjännitejärjestelmään (Hälvä ja muut, 2020).

Maadoitusresistanssin suuruus voidaan todeta mittaamalla yhden erillisen maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi. Tällä mittauksella voidaan sitten todeta maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin täyttävän vaatimukset. Käännepestemenetelmä ei ole kuitenkaan luotettava tapa mitata yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssia. Käännepestemenetelmää käsitellään tarkemmin aliluvussa 5.1. Jos maadoitus yhdistetään aikaisemmin rakennettuun maadoitukseen, voidaan mitoituksessa käyttää hyväksi tiedossa olevaa maadoitusresistanssin arvoa. Jos maadoitusresistanssin mitaus yhteen kytketyissä maadoitusjärjestelmissä ei ole kohtuullisilla järjestelyillä mahdollista, maadoitusresistanssin arvo voidaan laskea käytettyjen maadoituselektrodien rakennetietojen ja maaperän sähköisen resistiivisyyden arvojen avulla. Tällöin maadoitusten toteutuminen suunnitelmien mukaisesti on dokumentoitava erikseen. Maadoitusjärjestelmän maadoituksen turvallisuus voidaan varmistaa muulla tavoin esimerkiksi mittaamalla kosketusjännitteen suuruus. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

4 Laajat maadoitusjärjestelmät Vakka-Suomen Voima Oy:n sähköjakeluverkossa

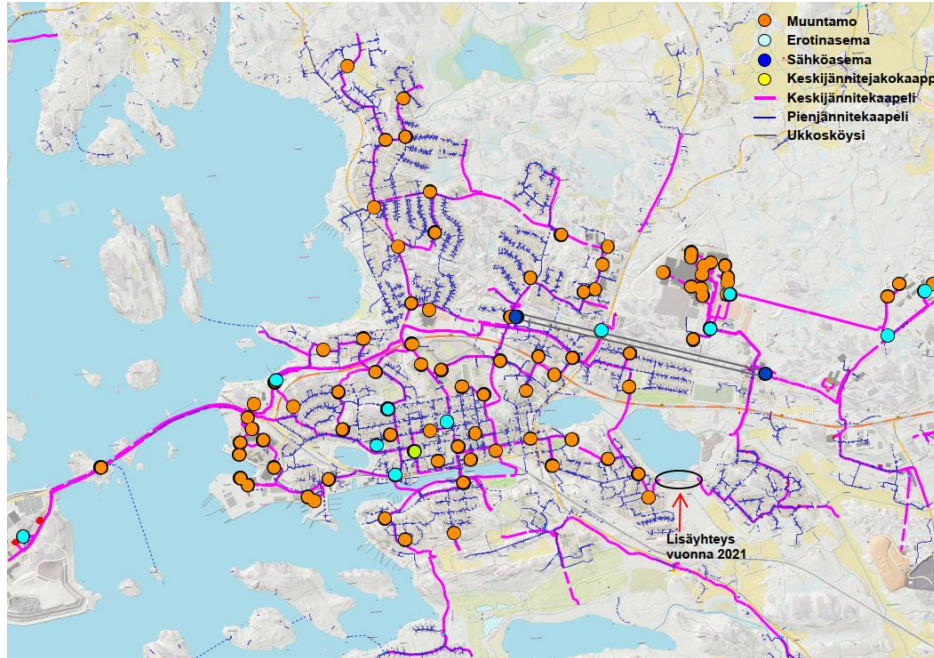
Tässä luvussa määritellään VSV:n sähköjakeluverkon laajat maadoitusjärjestelmät. Laajan maadoitusverkon määrittämiseen käytetään standardin 6001 ohjeita. Jokainen muuntamo, erotinasema, keskijännitejakokaappi tai sähköasema on yhteyksissä vähintään kahdella eri yhteydellä laajaan maadoitusjärjestelmään. Luvussa arvioidaan myös niitä alueita, joihin voisi tulevaisuudessa muodostua laaja maadoitusjärjestelmä.

Koska laajan maadoitusjärjestelmän esitystavalle ei ole vielä yksityiskohtaista määritelmää, miten se pitäisi dokumentoida, niin tässä työssä tarkempaa mallinnusta ei laajoille maadoitusjärjestelmille tehdä. Tällä hetkellä Trimble NIS-verkkotietojärjestelmässä ei ole valmista mallia, minkä pohjalta laajan maadoitusverkon voisi mallintaa. Muuntamoiden tietoihin voidaan määritellä, että se kuuluu laajaan maadoitusjärjestelmään, mutta muuntopiirien välisten maadoitusten yhdistymisen esitystavalla ei ole valmista ratkaisua. Yksi vaihtoehto muuntopiirien välisten yhteyksien esittämistavaksi olisi dokumentoida kaikille yhdysjohtimina toimiville kaapeleille attribuutteihin tieto, että kaapeli kuuluu laajaan maadoitusjärjestelmään. Sen jälkeen nämä kaapelit voitaisiin korostaa kyseisen tiedon perusteella ja silloin nähtäisiin selvästi, että mitkä kaapelit toimivat yhdysjohtimina.

4.1 Uudenkaupungin laaja maadoitusjärjestelmä

Kuvassa 6 on esitetty Uudenkaupungin laaja maadoitusjärjestelmä. Kuvassa oranssit ympyrät kuvaavat muuntamoja, turkoosit ympyrät erotinasemia, siniset ympyrät sähköasemia ja keltainen ympyrä keskijännitejakokaappia. Keskijännitemaakaapeliverkko on kuvattuna violetilla värillä, pienjännitemaakaapeliverkko sinisellä värillä ja ukkosköydet sähköasemien välillä harmaalla värillä. Laajan maadoitusjärjestelmään on liittyneenä 88 muuntamo, 11 erotinasemaa, kaksi sähköasemaa ja yksi keskijännitejakokaappi. Näiden

lisäksi maadoitusjärjestelmään kuuluu lukuisia pienjännitejakokaappien maadoituksia ja liittymien maadoituksia.



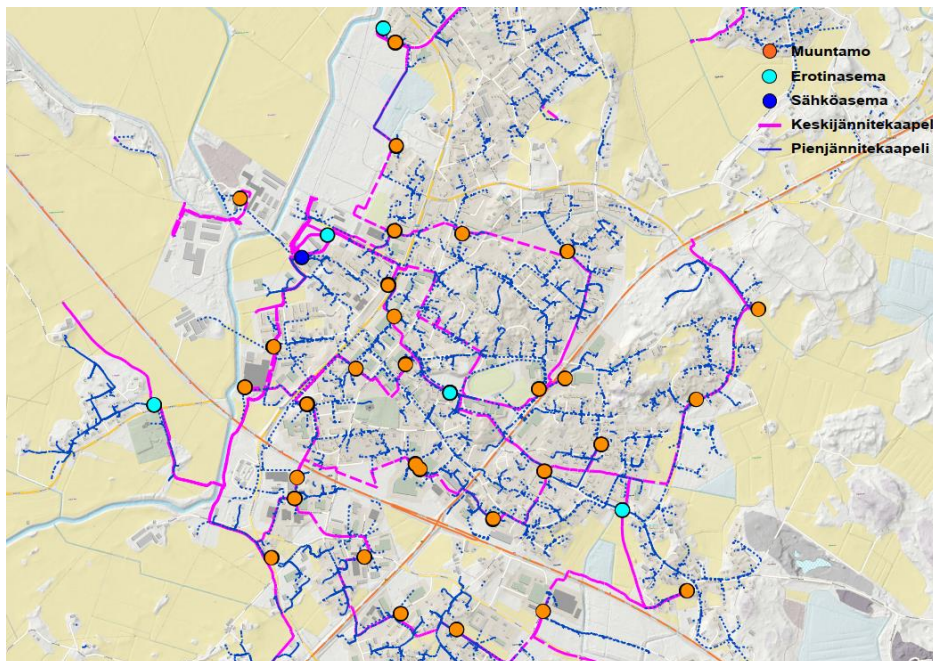
Kuva 6. Uudenkaupungin laaja maadoitusjärjestelmä. Kuva Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä.

Uudenkaupungin jakeluverkkoon vuonna 2021 tulevan kaapelointisaneerauksen myötä laajan maadoitusjärjestelmän ja laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattoman muuntopiirin maadoitusten välille muodostuu galvaaninen lisäyhteys kuvan 6 mukaisesti. Tämän lisäyhteyden myötä laaja maadoitusjärjestelmä laajenee kuuden jakelumuuntamon verran 94:ään muuntamoon. Uudenkaupungin taajamaverkko on lähes kokonaan kaapeloitu, joten sen laaja maadoitusjärjestelmä ei tulevaisuudessa tule merkittävästi laajentumaan nykyisestään.

4.2 Laitilan laaja maadoitusjärjestelmä

Kuvassa 7 on esitetty Laitilan laaja maadoitusjärjestelmä. Kuvassa oranssit ympyrät kuvaavat muuntamoita, turkoosit ympyrät erotinasemia ja sininen ympyrä sähköasemaa. Keskijännitemaakaapeliverkko on kuvattuna violetilla värillä ja pienjännitemaakaapeliverkko on kuvattuna sinisellä värillä. Laajan maadoitusjärjestelmään on liittynyt 34

muuntamoa, viisi erotinasemaa ja yksi sähköasema. Näiden lisäksi maadoitusjärjestelmään kuuluu lukuisia pienjännitejakokaappien ja -liittymien maadoituksia.



Kuva 7. Laitilan laaja maadoitusjärjestelmä. Kuva Trimble NIS-verkkotietojärjestelmästä

Laitilan laaja maadoitusjärjestelmä laajentuu kuvasta 7 katsottuna yläreunaan neljän muuntamon verran tulevan kaapeloinnin seurauksena. Lisäksi maadoitusjärjestelmä voi laajentua tulevaisuudessa kuvasta 7 katsoen alareunasta, mikäli reuna-alueen ilmajoh-toverkkoa kaapeloidaan siten, että galvaanisia yhteyksiä laajaan maadoitusjärjestelmään tulee riittävä määrä.

4.3 Laajaksi maadoitusjärjestelmäksi muutettavissa olevat kohteet

VSV verkkoalueella ei tällä hetkellä ole muita alueita, joita voitaisiin käsitellä laajana maadoitusjärjestelmänä. Lapin keskusta-alueelle tulevan laajan maakaapeloinnin seurauksena sinne tulee muodostumaan laaja maadoitusverkko vuonna 2020. Lapin alueen laajaa maadoitusjärjestelmää ei käsitellä tässä työssä sen tarkemmin, koska maasto-suunnittelua ei ole vielä tehty loppuun asti. Lapin laaja maadoitusjärjestelmä määritellään erikseen maastosuunnittelun valmistuttua ja se dokumentoidaan Trimble NIS-

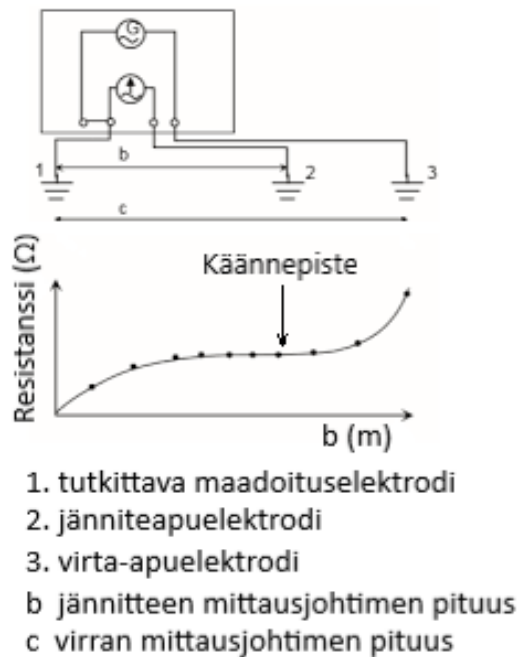
verkkotietojärjestelmään. Ihoden ja Hinnerjoen taajama-alueet ovat seuraavia mahdollisia kohteita laajoiksi maadoitusjärjestelmiksi. Niiden taajama-alueet ovat kuitenkin sen verran pieniä ja harvaan asuttuja, että alueiden maadoitusverkkoja ei voida käsitellä laajoina maadoitusjärjestelminä, ellei ylimääräisiä johtoyhteyksiä rakenneta muuntamoiden välille. Alueille muodostuu kuitenkin useista muuntamoista koostuva yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä.

5 Maadoitusten mittaaminen ja maadoitusjärjestelmien laskenta

Maadoitusimpedanssi on järjestelmän, asennuksen tai laitteen määrätyn pisteen ja referenssimaan välinen impedanssi määrätyllä taajuudella. Maadoitusimpedanssin arvo riippuu maadoituselektrodin rakenteesta ja maan ominaisresistanssista. Muuntamoissa ja muissa lyhyissä maadoitusjärjestelmissä, joissa maadoitusresistanssin arvo on suurempi kuin yksi ohmi, reaktiivisen komponentin vaikutus maadoitusimpedanssin suuruuteen on hyvin vähäinen. Tämän vuoksi muuntamoiden maadoituksen suurena käytetään maadoitusresistanssia. Maadoitusimpedanssin reaktiivinen komponentti tulee ottaa huomioon, jos maadoitusresistanssin arvo on pienempi kuin yksi ohmi. Maadoitusresistanssin ja -impedanssin mittaamiseen on käytettävissä useita menetelmiä, joista työn kannalta oleellimmat menetelmät on esitelty aliluvuissa 5.1 – 5.3. Lisäksi aliluvussa 5.4 esitetään maaperän sähköisen resistiivisyyden mittaus ja laskenta. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

5.1 Käännepistemenetelmä

Käännepistemenetelmää käytetään mitattaessa yksittäisiä maadoituselektrodeja ja pieniä tai keskikokoisia maadoitusjärjestelmiä. Mittauksissa käytetään mittalaitetta, jonka syöttämä vaihtojännite vaihtelee mittalaittevalmistajasta riippuen 100-500 V ja taajuus välillä 70-140 Hz. Mittarin sisäinen virtalähde syöttää mittausvirran kuvan 8 mukaisesti mitattavaan elektrodiin, josta virta kulkee maan kautta virta-apuelektrodiin ja sieltä takaisin virtalähteeseen. Mitattavan elektrodin ja jänniteapuelektrodin välille syntyy potentiaaliero. Mittalaite laskee maadoitusresistanssin arvon virran ja potentiaalieron avulla kaavan 2 (sivu 17) mukaisesti. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018; Ylinen ja muut, 2019).



Kuva 8. Havainnollistava kuva maadoitusresistanssin mittaamisesta käännepestemenetelmällä (Ylinen ja muut, 2019).

Mitattavan maadoituselektrodin, jännitepiikin ja virtapiikin pitää olla suorassa linjassa mahdollisimman kaukana toisistaan. Jänniteapuelektrodin etäisyys mitattavasta maadoituselektrodista pitää olla vähintään 20 m ja virta-apuelektrodin 40 m, mutta Suomen olosuhteissa suositellaan käytettävien pidempiä mittausetäisyyksiä, kuten 200 m. Pitkällä mittausetäisyydellä varmistetaan se, että apuelektrodit sijaitsevat mitattavan maadoituksen vaikutusalueen ulkopuolella. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018)

Mittaus tapahtuu siten, että jänniteapuelektrodiä siirretään mittauspisteen ja virta-apuelektrodin välillä ja jokaisessa paikassa mitataan resistanssin arvo. Mitatuista arvoista muodostetaan kuvan 8 mukaisesti resistanssikäyrä jänniteapuelektrodin etäisyyden funktiona, jonka käännepestestä saadaan mitattavan elektrodin tai elektrodijärjestelmän maadoitusresistanssi. Jos käännepestettä ei ole selkeästi havaittavissa, niin resistanssin arvo voidaan määrittää 60 % säännöllä (teoreettinen 62 %). Säännössä potentiaalien käännepestä on 60 % etäisyydellä maadoituselektrodista virtaelektrodin suuntaan. (Majanen ja muut, 2019; Short, 2014).

5.2 Selektiivinen mittaus

Selektiivinen mittaus on samankaltainen kuin käänne pistemenetelmä. Kuvassa 9 on havainnollistava esitys selektiivisestä mittausmenetelmästä. Erona käänne pistemenetelmään, selektiivisessä mittauksessa käytetään mittauselektrodien lisäksi virtapihtiä, joka poistaa rinnakkaisten vastusten vaikutukset niin, että vain tietyn maadoituselektrodin vastus mitataan. Selektiivisellä mittauksella voidaan siten mitata vain kyseisen maadoitusvastuksen arvo ilman, että maadoitusjohtimia tarvitsee irrottaa. (Fluke Corporation, 2017).



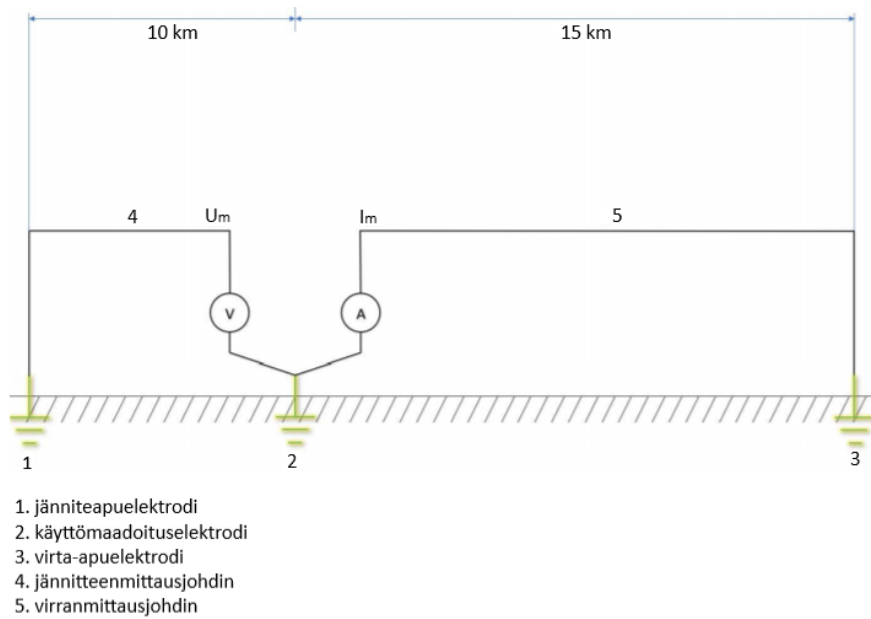
Kuva 9. Havainnollistava kuva maadoitusresistanssin mittaamisesta selektiivisellä menetelmällä (Fluke Corporation, 2017).

Selektiivisessä mittauksessa mittari syöttää virtaa uloimman sauvan ja maadoituselektrodin välille samalla, kun mitataan jännitepotentiaalinen alenema sisemmän sauvan ja maadoituselektrodin välillä. Mittarin luoma virta kulkee myös muiden rinnakkaisten vastusten läpi, mutta vain pihdin läpi kulkevaa virtaa käytetään vastuksen mittaamiseen. (Fluke Corporation, 2017).

Tämän mittausmenetelmän tueksi ei löytynyt teoriaa alan aineistoista, kuten standardeista tai oppikirjoista, minkä vuoksi mittausmenetelmän luotettavuudesta ei ole tietoa. Myöskään mitään käytännön tutkimuksia, joita tälle mittausmenetelmälle olisi tehty, ei löydetty. Oletuksena on, että tämä mittausmenetelmä antaa realistisemmän arvon kuin käänne pistemenetelmä, mutta ei kuitenkaan todellista yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssia. Mittaustulos vääristyy, jos mittarin syöttämä virta kiertää jonkin toisen keskijännitelähdön kautta takaisin mitattavalle kohteelle. Tämä tulee ottaa huomioon, mikäli tätä menetelmää käyttää. Virran kiertämisen selvittäminen voi olla haasteellista taajama-alueilla, joissa on useita keskijännitelähtiä lähellä. Haja-asutusalueilla taas varmistaminen on helpompaa, koska keskijännitelähtiä on vähemmän. Tätä mittausmenetelmää käytetään tässä työssä muuntamon maadoitusresistanssin määrittämiseen, ja saatuja arvoja verrataan käänne pistemenetelmällä mitattuihin arvoihin sekä maaperän sähköisen resistiivisyyden ja elektrodin rakennetietojen avulla laskettuihin arvoihin.

5.3 Voltti-ampeerimenetelmä

Voltti-ampeerimenetelmässä mitataan tutkittavan käyttömaadoituselektrodin kautta kulkeva mittausvirta ja maadoituselektrodin yli vaikuttava jännite. Kuvassa 10 on havainnollistettu mittausta, joka tehdään voltti-ampeerimenetelmällä. Menetelmää käytetään suurten maadoitusjärjestelmien, kuten sähköasemien, maadoitusimpedanssien mittaamiseen. Mittausvirta I_M syötetään maadoitusjärjestelmään kytkemällä järjestelmätaajuinen vaihtojännite maadoitusjärjestelmän ja kaukana sijaitsevan maadoituselektrodin välille alla olevan kuvan mukaisesti. Mittauksessa apuelektrodien pitää olla riittävän etäällä, noin 10-15km etäisyydellä, mitattavasta maadoituselektrodista, jotta voidaan olla varmoja niiden erillisistä vaikutusalueista. (Ylinen ja muut, 2019).



Kuva 10. Mittaus voltti-ampeerimenetelmällä (Ylinen ja muut, 2019).

Voltti-ampeerimenetelmällä maadoitusimpedanssin itseisarvo saadaan kaavasta

$$Z_E = \frac{U_{EM}}{I_M \cdot r'} \quad (3)$$

missä U_{EM} on maadoitusjärjestelmän ja referenssimaassa (kaukainen maa) olevan maapöikkin välinen jännite ja r' on johdon reduktiokerroin referenssimaahan nähden. (Ylinen ja muut, 2019).

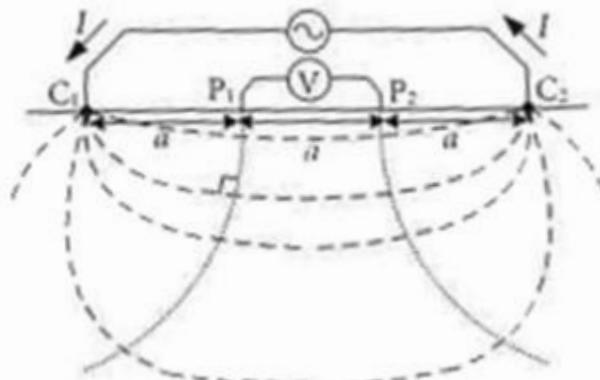
5.4 Maaperän sähköisen resistiivisyyden mittaaminen

Maaperän resistiivisyys vaihtelee huomattavasti eri paikoissa maaperän tyyppien, tiheyden, kosteuden ja raekoon mukaan. Lisäksi maaperän resistiivisyys voi vaihdella huomattavasti syvyyden mukaan, koska maaperä koostuu yleensä erityyppisistä maakerroksista. Suomessa maaperän resistiivisyydelle käytetään keskiarvoa $2300 \Omega\text{m}$. Taulukossa 1 on esitelty Suomessa tyypillisimpien maaperätyyppien resistiivisyyden arvoja. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2019).

Taulukko 1. Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2019).

Maaperän tyyppi	Keskimäärin (Ωm)	Tavallisimmat vaihteluvälit (Ωm)
Savi	40	25 ... 70
Saven sekainen hiekka	100	40 ... 300
Lieju, turve, multa	150	50 ... 250
Hiekka, hieta	2000	1000 ... 3000
Moreenisora	3000	1000 ... 10000
Harjusora	15000	3000 ... 30000
Graniittikallio	20000	10000 ... 50000
Betoni tuoreena maassa	100	50 ... 500
Betoni kuivana	10000	2000 ... 10000
Järvi- ja jokivesi	250	100 ... 400
Pohja-, kaivo ja lähdevesi	50	15 ... 150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1 ... 5

Maaperän sähköisen resistiivisyyden mittaamiseen on useita eri tapoja, joista suurin osa perustuu olennaisesti samaan mittaustekniikkaan. Yksi yleisesti käytetty mittaustapa on Wenner-menetelmä, jossa maaperän sähköisen resistiivisyyden mittaus suoritetaan kuvan 11 mukaisesti maadoitusmittarilla käyttäen neljää piikkiä. Mittauselektrodit upotetaan maahan suoraan riviin alla olevan kuvan mukaisesti saman välimatkan päähän toisistaan. Mittauselektrodien välisen etäisyyden tulee olla paljon suurempi kuin niiden upotussyvyys. Tällöin virta- ja jännitepiikit voidaan olettaa pistemäiseksi. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012; Short, 2014).



Kuva 11. Maan sähköisen resistiivisyyden mittauksen periaate (Elovaara & Haarla, 2011).

Kuvassa 11 mittauselektrodeista kaksi ulommaista (C_1 ja C_2) toimivat virtaelektrodeina ja kaksi sisempänä olevaa mittauselektroodia (P_1 ja P_2) mittaavat virran aiheuttamaa potentiaaliero. Mitattu maadoitusvastus lasketaan kaavalla

$$R_E = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\rho}{2\pi a}, \quad (4)$$

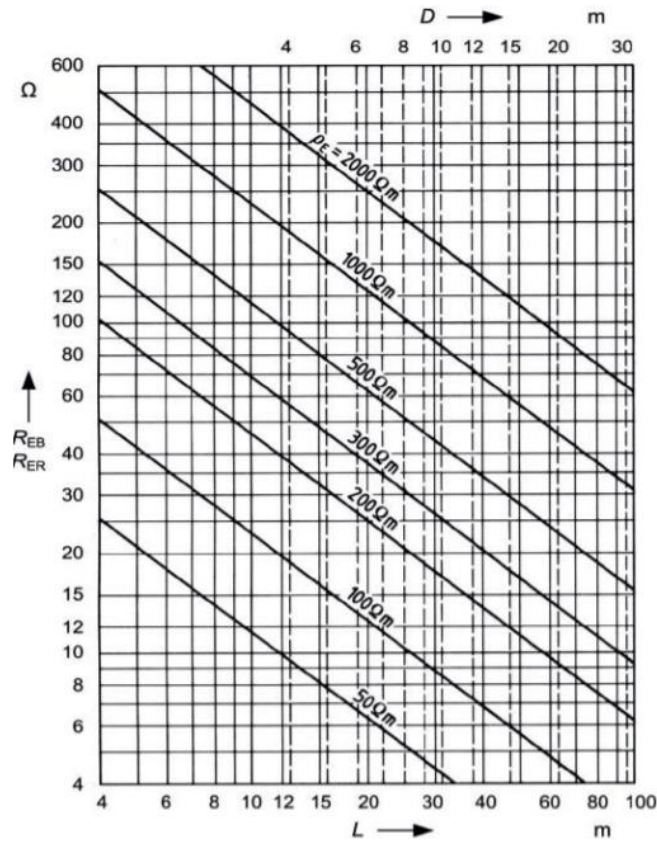
eli maaperän resistiivisyyden ρ arvo on

$$\rho = 2\pi a R, \quad (5)$$

jossa a on mittauselektrodien välinen etäisyys (Elovaara ja Haarla, 2011).

5.5 Vaaka- ja pystymaadoituselektrodin maadoitusresistanssi

Maadoitusjärjestelmien maadoitusresistanssit voidaan määrittää myös laskennallisesti, mikäli tiedetään maadoituselektrodien rakennetiedot ja maaperän resistiivisyys. Maadoitusjärjestelmä koostuu usein erillisistä vaaka- ja pystymaadoituselektrodeista, jotka ovat yhdistetty toisiinsa. Kuvassa 12 on suoraan asennetun vaakamaadoituselektrodin tai rengasmaisesti asennetun maadoituselektrodin maadoitusresistanssi homogeenisessä maassa kokonaispituuden funktiona. Kuvasta voidaan määrittää maadoituselektrodin maadoitusresistanssin arvo, kun tiedetään maaperän resistiivisyys.



Kuva 12. Vaakamaadoituselektrodin (nauha, lanka tai köysi) maadoitusresistanssi pituuden funktiona suoraan tai rengasmaisesti asennettuna homogeenisessä maassa (maan pinnalla) (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

Rengasmaisesti asennetun vaakamaadoituselektrodin maadoitusresistanssi homogeenisessä maassa voidaan laskea myös kaavalla

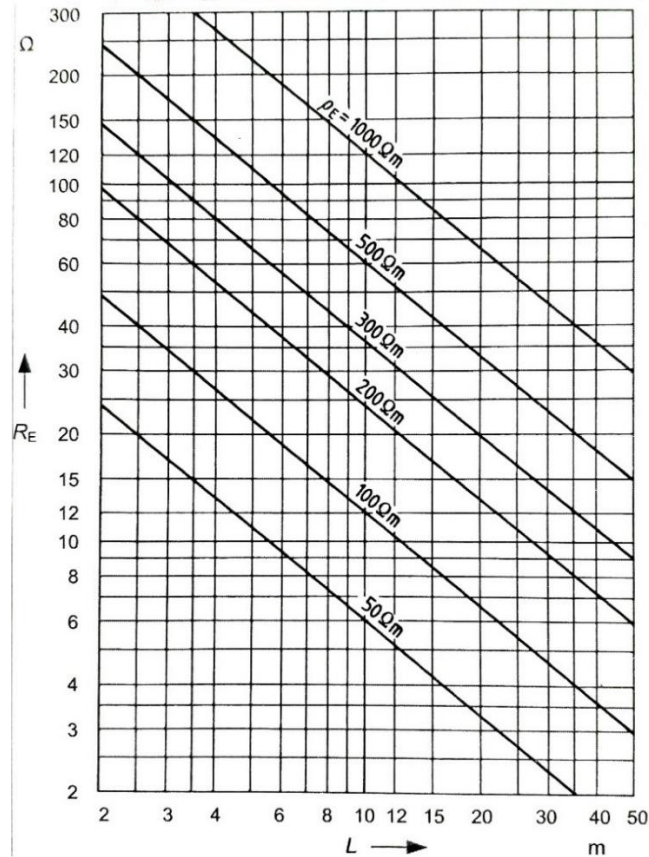
$$R_E = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{2\pi D}{d}, \quad (6)$$

jossa D on rengaselektrodin halkaisija ja d on köysimäisen elektrodin halkaisija. Vastavasti suoraan asennetun vaakamaadoituselektrodin maadoitusresistanssi homogeenisessä maassa voidaan laskea kaavalla

$$R_E = \frac{\rho}{2l} \ln \frac{2l}{d}, \quad (7)$$

jossa l on maadoituselektrodin pituus. (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018). Alla olevassa kuvassa on pysty maadoituselektrodin resistanssi homogeenisessä maassa

kokonaispituuden funktiona. Kuvan avulla voidaan määrittää pystymaadoituselektrodin maadoitusresistanssi, kun tiedetään maaperän resistiivisyys.



Kuva 13. Pystymaadoituselektrodin resistanssi homogeenisessa maassa (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018).

Pystymaadoituselektrodin maadoitusresistanssi homogeenisessa maassa voidaan laskea myös kaavalla (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018)

$$R_E = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (8)$$

Kaavoista 6-8 nähdään, että maaperän resistiivisyyden lisäksi maadoitusresistanssin määrittävät lähinnä mitat l ja D eli elektrodin pituus ja ympyrämäisen elektrodin halkaisija. Kaavoista myös nähdään, että köysimäisen maadoituselektrodin tai maadoitussauvan halkaisijalla on vähäinen vaikutus maadoitusresistanssin arvoon.

5.6 Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssi

Muuntamon maadoitusjärjestelmä koostuu potentiaalinhjausrenkaasta ja maadoitus-elektrodirenkaasta, johon on yhdistetty neljä pysty maadoituselektrodiä. Tällaisen maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskennallinen määrittäminen olisi monimutkaista, mikäli haluttaisiin ottaa huomioon maadoituselektrodien keskinäiset vaikutukset. Laskennan yksinkertaistamiseksi maadoituselektrodien keskinäistä vaikutusta ei huomioida, vaan maadoituselektrodit käsitellään erillisinä rinnakkain kytkeytyneinä vastuksina. Yksittäisellä muuntamon maadoitusresistanssilla on pieni merkitys yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssiin. Tämän vuoksi laskentaa voidaan yksinkertaistaa ilman, että lopputuloksen tarkkuus kärsisi merkittävästi. Kun muuntamon maadoituselektrodien maadoitusresistanssit on laskettu kaavojen (6-8) avulla, järjestelmän maadoitusresistanssi lasketaan kuuden vastuksen rinnankytkennästä

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}. \quad (9)$$

Laskennan tueksi tehtiin käännepistemethodella mittaus, jossa muuntamon maadoitukset irrotettiin maadoituskiskosta eli mittauksella saatiin mitattua pelkästään kyseisen muuntamon maadoitusresistanssi. Lisäksi samalle muuntamolle tehtiin mittaus selektiivisellä methodella maadoitusten ollessa kiskossa kiinni. Selektiivisellä mittauksella saatu tulos pitäisi siten olla lähellä käännepistemethodella saatua arvoa. Mittaustuloksia verrattiin sitten laskennallisella tavalla määriteltyyn arvoon. Muuntamon maadoitusresistanssin laskentaa varten tutkittiin myös laskentamethodää, joilla läheisten maadoituselektrodien keskinäiset vaikutukset voitaisiin ottaa huomioon. Nahmanin ja Djordjevićin (1997) mukaan maadoitusjärjestelmän, joka koostuu maadoituselektrodista, jota on vahvistettu pysty maadoitussauvoilla, maadoitusresistanssi voidaan laskea Laurentin sarjaa soveltaen, kun $\rho_2 > \rho_1$

$$R_E = 0,443 \frac{\rho_2}{\sqrt{A}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^g + \frac{\rho_1}{L + nl_e}, \quad (10)$$

jossa

$$g = \frac{2H}{\sqrt{A+nl_e}} \quad (11)$$

ja

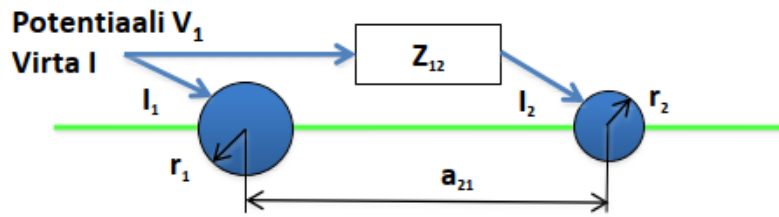
$$l_e = l_1 + l_2 \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (12)$$

joissa ρ_1 on ylemmän maaperäkerroksen resistiivisyys, ρ_2 on alemman maaperäkerroksen resistiivisyys, n on maadoituselektrodien lukumäärä, H on ylemmän maaperän syvyys, l_1 on ylemmän maadoituselektrodin pituus, l_2 on alemman maadoituselektrodin pituus, L on maadoituselektrodien yhteispituus ja A on rengasmaisen maadoituselektrodin pinta-ala. (Nahman ja Djordjević, 1997).

Laskentamenetelmän ongelmaksi koitui ehto $\rho_2 > \rho_1$, sillä työssä tehtyjen maaperän resistiivisyysmittausten perusteella resistiivisyys oli pienempi alemmassa maaperäkerroksessa. Tämän takia kaavalla 10 saatu maadoitusresistanssin arvo poikkesi huomattavasti kaavalla 9 tai käännepistemenetelmällä saatuun arvoon. Mikäli tätä laskentamenetelmää haluttaisiin käyttää, pitäisi tutkia tarkemmin, että miten kaava on johdettu ja kuinka kaavaa voitaisiin soveltaa sellaiseen tilanteeseen, missä $\rho_2 < \rho_1$. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin yksinkertaistamaan laskentaa, sillä sen kanssa päästään riittävään tarkkuuteen.

5.7 Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi

Kahden toisiinsa galvaanisesti yhdistetyn maadoituselektrodin tapauksessa kuvan 14 mukaisesti elektrodin 1 potentiaali lasketaan summaamalla virran I_1 aiheuttama potentiaali V_{11} ja virran I_2 aiheuttama lisäpotentiaali V_{12} . Oletuksena on, että elektrodien välinen etäisyys on huomattavasti suurempi kuin elektrodien säteet.

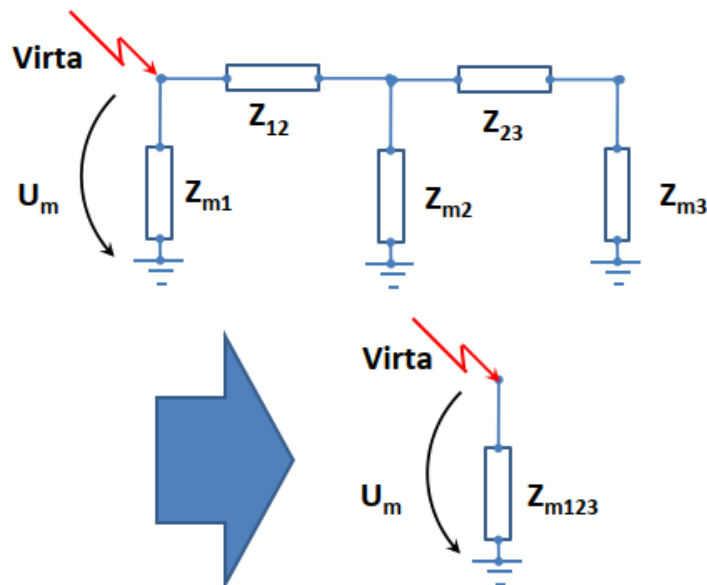


Kuva 14. Yhteenliitetyt maadoituselektrodit (Mäkinen, 2016).

Tällöin elektrodin 1 potentiaali on

$$V_1 = V_{11} + V_{12} = R_1 I_1 + \frac{\rho I_2}{2\pi a_{21}}, \quad (13)$$

Samaa periaatetta voidaan käyttää useamman maadoituselektrodin tapauksessa. Kuvas-
sassa 15 on havainnollistettu maadoitusresistanssin muodostumista yhteen liitettyssä
maadoitusjärjestelmässä.



Kuva 15. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin muodostaminen (Mä-
kinen, 2016).

Mallinnukseen sisällytetään kaikki maadoitusresistanssit ja verkon impedanssien kytkey-
tymiset. Ratkaisemalla mallinnuksesta muodostettavat piiriyhtälöt saadaan maadoitus-
järjestelmän kokonaismaadoitusresistanssi jakamalla summattu potentiaali

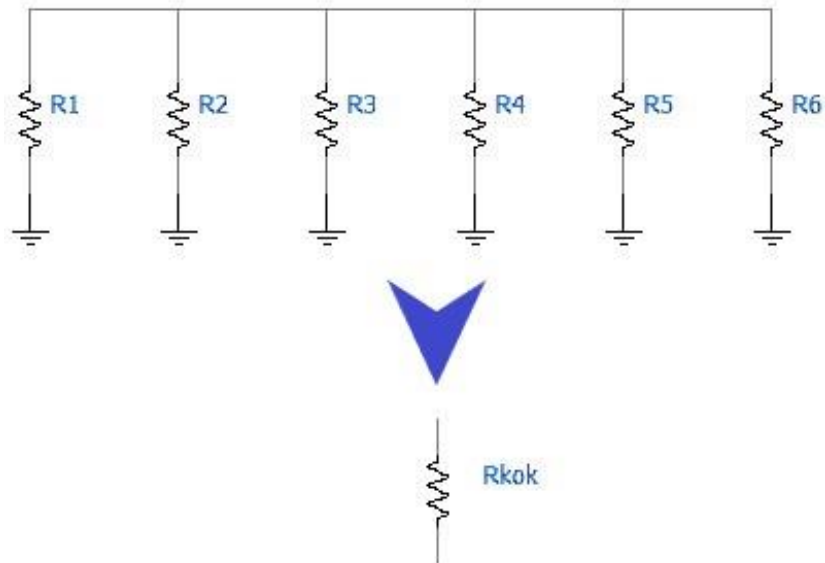
kokonaisvirralla. Piiriyhtälöt muodostuvat monimutkaiseksi yhteen liitetyissä maadoitusjärjestelmissä, jotka koostuvat useista maadoituselektrodeista. Tällöin maadoitusresistanssien laskenta ilman laskentatyökalua on työlästä. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskentaan on kuitenkin jo kehitetty laskentatyökaluja, joilla maadoitusresistanssit saadaan laskettua laitteistokohtaisesti. (Mäkinen, 2016).

6 Muuntamon ja yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien laskentatulokset

Tässä luvussa esitetään yksittäisten muuntamoiden ja yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien maadoitusresistanssien laskentatulokset. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistansseja vertailtiin käännepistemethodella mitattuihin arvoihin, jotka ovat mitattu silloin, kun muuntamon maadoitukset ovat olleet yhteydessä muihin maadoitusjärjestelmiin. Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssin laskentatulosta verrattiin myös mittaustuloksiin. Muuntamon maadoitusresistanssi mitattiin käännepistemethodella siten, että maadoitukset olivat irti muista maadoitusjärjestelmistä, ja selektiivisellä methodella siten, että maadoitukset olivat yhteydessä muihin maadoitusjärjestelmiin. Tarkoituksena on selvittää, että kuinka paljon laskentatulos eroaa mittaustuloksista, ja voitaisiinko jatkossa yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssi määrittää luotettavasti laskennallisesti.

6.1 Muuntamon maadoitusresistanssin laskentatulokset

Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssin laskentaa päädyttiin yksinkertaistamaan siten, että maadoituselektrodit kuvitellaan olevan rinnakkain kuvan 16 mukaisesti ja lopullinen maadoitusresistanssi lasketaan vastusten rinnankytkennän kautta kaavan 9 mukaisesti. Maadoituselektrodien keskinäinen vaikutus jätettiin huomioimatta monimutkaisen laskennan vuoksi.



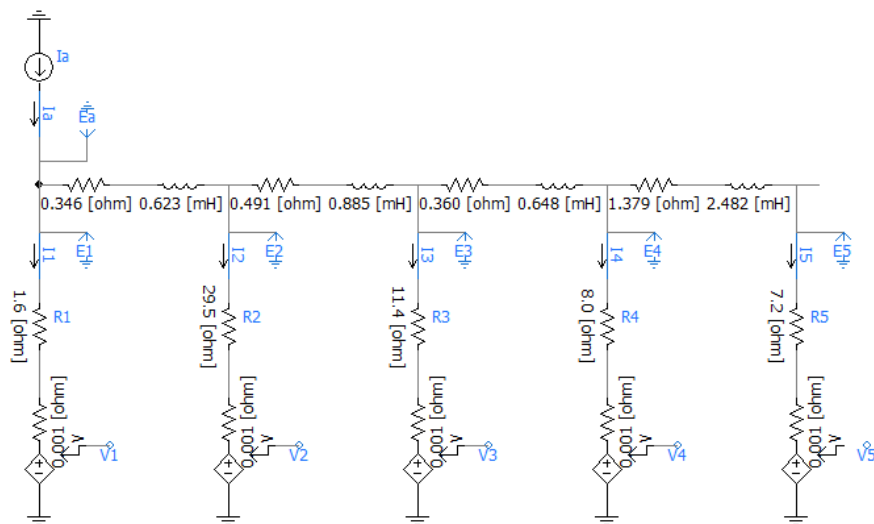
Kuva 16. Havainnollistava kuva muuntamon maadoitusresistanssin laskennasta.

Maadoitusresistanssiksi saatiin käännepestemenetelmällä $11,5 \Omega$, selektiivisellä mittauksella $26,0 \Omega$ ja laskennalla kaavan 9 mukaisesti $14,0 \Omega$. Kaikkiin edellä määriteltyihin tapoihin liittyy epävarmuustekijöitä, koska etenkin maaperän resistiivisyys voi vaihdella hyvinkin paljon lyhyillä etäisyyksillä, minkä vuoksi mittaustulos voi vääristyä. Myös maadoitusresistanssin mittaukset voivat epäonnistua, jos lähistöllä on muita maadoituksia, jotka vaikuttavat mittaustulokseen. Muuntamon maadoitusresistanssin laskentaa on yksinkertaistettu, minkä vuoksi tulos voi poiketa todellisesta arvosta.

Tuloksista huomataan, että selektiivisen mittauksen arvo on huomattavasti korkeampi kuin käännepestemenetelmällä mitattu arvo. Selektiivistä mittaustapaa ja sen käytettävyyttä tässä työssä ei päädytty tutkimaan tarkemmin, koska ero käännepestemenetelmällä mitattuun arvoon oli merkittävä. Laskennalla sen sijaan päästiin lähemmäksi käännepestemenetelmällä mitattua arvoa. Tarkastelukohteita pitäisi olla kuitenkin enemmän, jotta voitaisiin arvioida laskennan tarkkuutta. Laskennalla saatu arvo on mitattua arvoa suurempi, joten laskennan arvoa on siinä mielessä turvallista käyttää.

6.2 Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskentatulokset

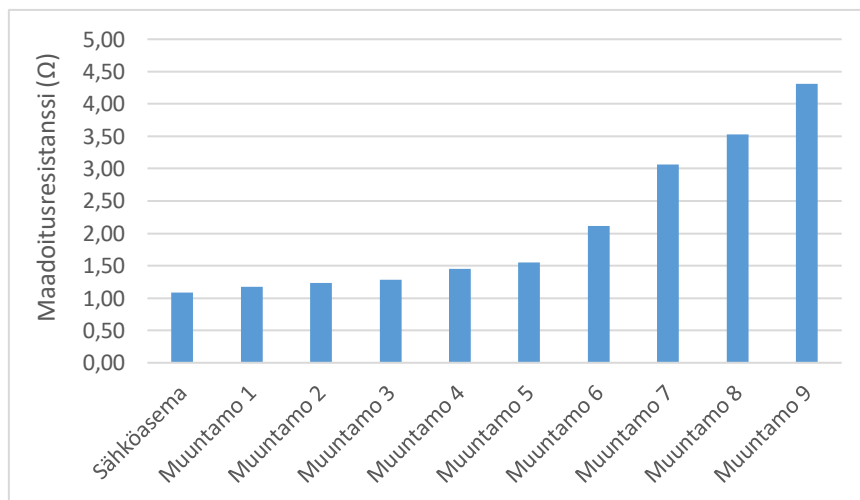
Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi voidaan laskea PSCAD-simulointiohjelmalla mallintamalla ensin maadoitusjärjestelmän kaikki maadoitusresistanssit (muuntamot) ja verkon impedanssien kytkeytyminen kuvan 17 mukaisesti. Kaapelit muuntamoiden välillä kuvataan resistanssien ja reaktanssien avulla, joiden arvot lasketaan kaapelin valmistajan ilmoittamien tietojen ja kaapelien pituuksien perusteella. Jokaisen maadoituksen yhteyteen on lisätty lisäpotentiaalien mallintamista varten jännitelähde, jonka jännite riippuu kaikkien muiden maadoitusten virroista. Jännitelähteen arvo määritellään laskentalohkoilla, joita varten on sijoitettu jokaiselle maadoitukselle jännite- ja virtamittauksia. Näin saadaan huomioitua muiden maadoitusten vaikutus kyseiseen maadoitukseen. (Mäkinen, 2016).



Kuva 17. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä PSCAD-simulointiohjelmalla mallinnettuna Mäkisen (2016) mallia mukaillen. Kuvaa on rajattu viiteen solmupisteeseen esityksen selkeyden vuoksi.

Verkkoon syötetään virtaa haluttuun solmuun kuvan 17 mukaisesti. Virran ja sen aiheuttaman maadoitusjännitteen avulla voidaan laskea maadoitusresistanssi kussakin solmupisteessä. Vaihtamalla syötettävää solmua, saadaan maadoitusresistanssit määriteltäviä jokaiselle solmupisteelle. (Mäkinen, 2016).

Mäkisen (2016) tekemän tutkimuksen mukaan muuntamoketjussa ensimmäisten muuntamoiden maadoitusten yhdistämisellä on suuri vaikutus maadoitusresistanssiin. Ketjuksen pidentyessä yksittäisten muuntamoiden lisäysten suhteellinen vaikutus alkupäähän pienentyy huomattavasti. Sama vaikutus on huomattavissa kuvasta 18, jossa on esitetty muuntamoketjun maadoitusresistanssien arvot. Tuloksista havaitaan, että maadoitusresistanssien arvot nousevat, mitä pidemmälle muuntamoketjussa edetään. Tuloksiin vaikuttaa se, että ketjussa ensimmäisenä olevan sähköaseman maadoitusarvo on huomattavasti pienempi kuin muuntamoiden maadoitusarvot, minkä vuoksi maadoitusresistanssien arvot ovat pieniä sähköaseman lähellä. Kun mennään riittävän kauaksi sähköasemasta, niin sen maadoituksella ei ole juurikaan vaikutusta maadoitusketjun loppupään arvoihin. Todellisuudessa maadoitusketjun loppupään arvot ovat tuloksista poiketen hieman pienempiä, sillä maadoitusketju jatkuu vielä pidemmälle, mitä tässä tarkastelussa oli mukana.



Kuva 18. Maadoitusresistanssien arvot yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä.

Taulukossa 2 on muuntamoiden maadoitusresistanssit yksittäisenä tarkasteltuna ja kyseisten muuntamoiden maadoitusresistanssit, kun niitä tarkastellaan osana yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää. Taulukon tarkoituksena on havainnollistaa sitä, miten maadoitusarvot muuttuvat, kun järjestelmää tarkastellaan yhteen liitettynä maadoitusjärjestelmänä.

Taulukko 2. Muuntamon maadoitusresistanssi yksittäisenä tarkasteltuna, ja vastaavan muuntamon maadoitusresistanssi, kun sitä tarkastellaan osana yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää.

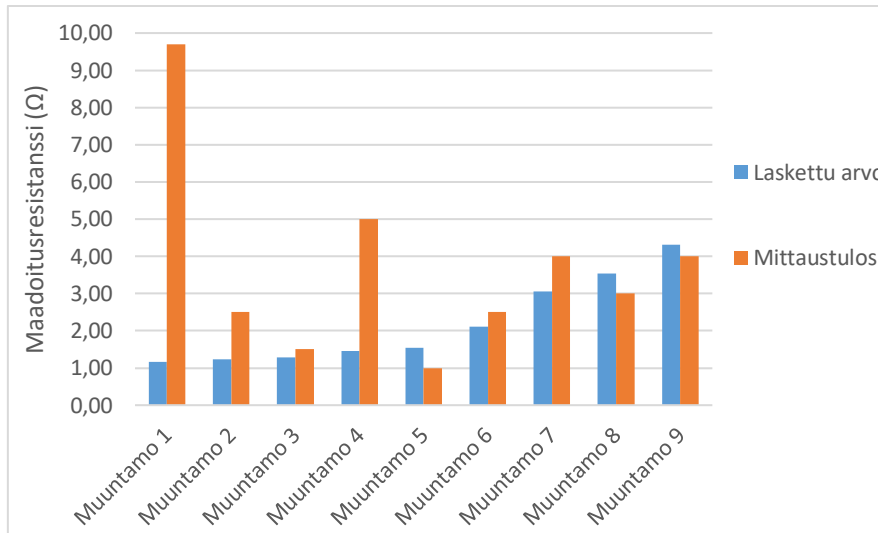
	Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssi (Ω)	Maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssit (Ω)
Muuntamo 1	29,4	1,2
Muuntamo 2	11,4	1,2
Muuntamo 3	8,0	1,3
Muuntamo 4	7,2	1,5
Muuntamo 5	4,2	1,6
Muuntamo 6	11,2	2,1
Muuntamo 7	105,1	3,1
Muuntamo 8	172,4	3,5
Muuntamo 9	207,3	4,3

Taulukosta 2 nähdään, että muuntamoiden maadoitusresistanssit ovat huomattavasti pienempiä yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä, kuin yksittäisinä maadoitusjärjestelminä tarkasteltuina. Tuloksista huomataan, että yksittäisten muuntamoiden suuretkin maadoitusarvot muuttuvat pieniksi, kun järjestelmää tarkastellaan yhteen liitettyinä maadoitusjärjestelmänä. Arvoista on pääteltävissä se, että riittää kun muutamalla yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluvalla muuntamolla on pieni maadoitusresistanssi, niin kaikkien muuntamoiden maadoitusresistanssit jäävät pieniksi. Tästä on hyötyä etenkin sellaisissa yhteen liitettyissä maadoitusjärjestelmissä, joissa yksittäisten muuntamoiden maadoitusolosuhteet ovat hankalat ja maadoitusresistanssien arvot jäävät siten suuriksi. Tuloksista on myös pääteltävissä, että mikäli yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien arvoja halutaan pienentää, kannattaa maadoitusta parantaa siellä, missä on hyvät maadoitusolosuhteet.

6.3 Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien vertailu käännepistemennettelmämittauksiin

Käännepistemennetelmä ei sovellu yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssin mittaamiseen yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä, koska käännepistemennetelmä ei osaa huomioida muiden maadoitusten vaikutuksia. Mitattu arvo on siten pienempi, kuin mitä on yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssi todellisuudessa. Tarkoituksena on

vertailla käännepestemenetelmällä mitattuja arvoja laskettuihin arvoihin. Tämä tehdään sen vuoksi, koska VSV:n verkossa olevien muuntamoiden maadoitusresistanssit ovat mitattu käännepestemenetelmällä silloin, kun muuntamo on jo kytketty osaksi muuta verkkoa. Kuvassa 19 on muuntamoiden maadoitusresistanssit käännepestemenetelmällä mitattuna ja vastaavien muuntamoiden maadoitusresistanssi laskennallisesti määriteltynä.



Kuva 19. Muuntamoiden maadoitusresistanssit käännepestemenetelmällä mitattuna silloin, kun muuntamo on ollut yhteydessä muihin maadoitusjärjestelmiin, ja laskennallisesti määritetyt maadoitusresistanssit.

Kuvasta 19 nähdään, että ensimmäisen muuntamon kohdalla mittaustulos on huomattavasti suurempi kuin laskettu arvo. Lisäksi muuntamoketjun keskellä neljännen muuntamon kohdalla mittaustulos on selvästi suurempi kuin laskettu arvo. Erot tuloksissa muuntamoilla 1 ja 4 voisivat selittyä mittausvirheellä, mutta pelkästään tämän yhden tarkastelun perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä käännepestemenetelmän luotettavuudesta yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän mittaukseen. Mittaustulokset ovat kuitenkin muilla muuntamoilla hyvin lähellä laskettuja arvoja, minkä vuoksi olisi mielenkiintoista tutkia laajemmalla otannalla käännepestemenetelmämittauksen käyttäytymistä yhteen liitettyissä maadoitusjärjestelmissä.

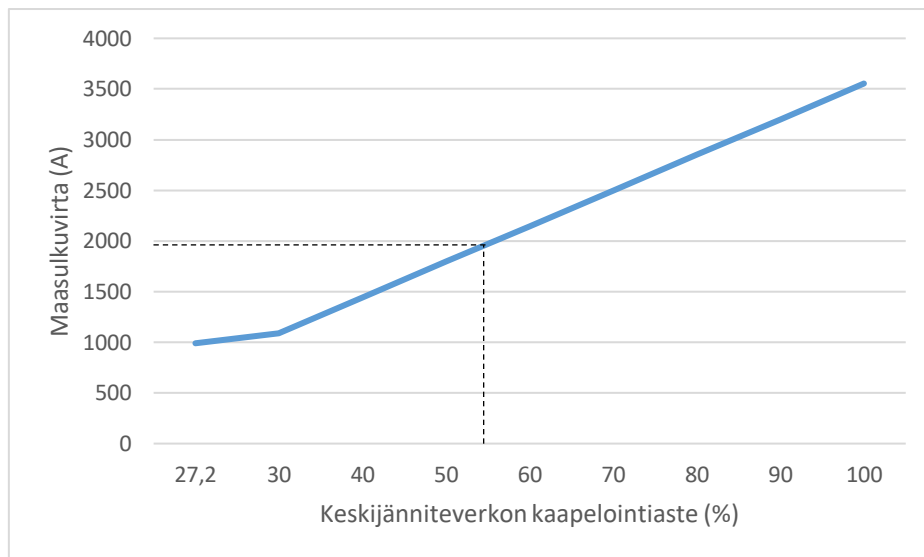
7 Maasulkuvirtojen kasvu Vakka-Suomen Voiman jakeluverkossa

Tässä luvussa tarkastellaan maasulkuvirtojen kasvua päämuuntajakohtaisesti kaapelointiasteen funktiona. Tarkoituksena on selvittää, että miten maasulkuvirrat kasvavat kaapeloinnin myötä koko verkkoalueella ja etenkin päämuuntajakohtaisesti. Sähköasemien päämuuntajien maasulkuvirtojen kasvuennustetta voidaan hyödyntää maasulkuvirran kompensoinnin suunnittelussa. Päämuuntajien takana olevan verkon ominaisuudet on selvitetty Trimble NIS-verkkotietojärjestelmän maasulkulaskennan avulla kompensoimattomassa verkossa. Laskennan avulla saadaan selville jokaisen päämuuntajan takana olevan verkon kaapelityyppien pituudet ja maasulkuvirrat. Tämän lisäksi päämuuntajien takana oleva verkko on jaettu taajamaverkoksi ja haja-asutusalueen verkoksi. Tämä tehtiin sen vuoksi, että maasulkuvirtojen tarkastelu voidaan aloittaa sellaisesta lähtökohdasta, jossa taajama-alueen jakeluverkko olisi kokonaan kaapeloitu.

VSV:n sähkönjakeluverkossa keskijännitemaakaapeleina käytetään nykyisin AHXAMK-W-tyyppisiä kaapeleita, jotka sisältävät kuparisen keskusköyden. Johtimien määrä ja poikkipinta-alat ovat käyttötarkoituksen mukaan yleensä $3 \times 95/35 \text{ mm}^2$, $3 \times 150/35 \text{ mm}^2$ tai $3 \times 185/35 \text{ mm}^2$. Kaapelin valmistaja ilmoitti näiden kaapeleiden maakapasitanssin aikaansaamaksi maasulkuvirraksi 2,4-3,0 A/km (Prysmian Group, 2018). Koska kaapeleiden poikkipinta-aloja ei etukäteen tiedetä, niin kaapeleiden maakapasitanssin aikaansaamissa maasulkuvirroissa käytetään keskiarvoa 2,7 A/km. Maasulkuvirran kasvua on arvioitu kertomalla suoraan kaapeloitavan verkon pituus kaapelien aikaansaamalla maasulkuvirralla. Laskennassa ei ole huomioitu sitä, että keskijänniteilmajohtojen purkaminen pienentää hieman maasulkuvirtaa. Tätä ei otettu siksi huomioon, koska sen vaikutus lopputulokseen ei ole merkittävä.

7.1 Maasulkuvirrat koko verkkoalueella

VSV:n investointisuunnitelman tavoitteena on nostaa keskijänniteverkon kaapelointiaste 55 %:iin vuoden 2028 loppuun mennessä. Tavoitteen taustalla on sähkömarkkinalain asettamat toimitusvarmuusvaatimukset. Kuvassa 20 on esitetty keskijänniteverkon maasulkuvirran määrä koko verkkoalueella kaapelointiasteen funktiona. Kuvaaja on muodostettu lisäämällä tämänhetkiseen maasulkuvirtaan kaapeloinnista aiheutuva maasulkuvirta.

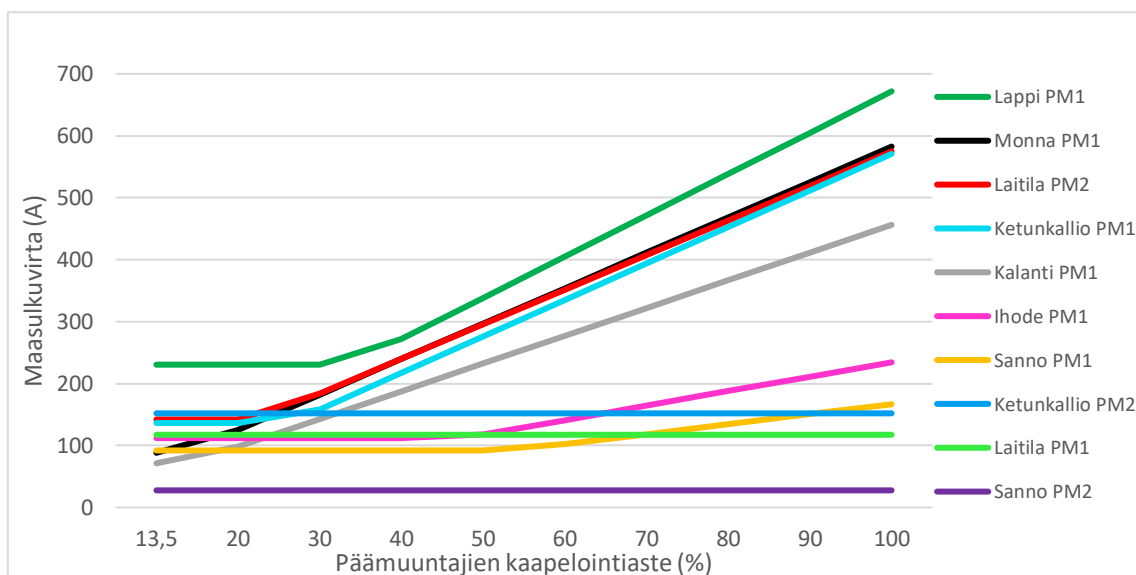


Kuva 20. Keskijänniteverkon maasulkuvirta kaapelointiasteen funktiona.

Kun keskijänniteverkon kaapelointiaste nostetaan 55 %:iin, niin maasulkuvirta verkossa ilman kompensointia olisi noin 1970 A. Keskijänniteverkon maasulkuvirta on tällä hetkellä 990 A, joten maasulkuvirta tulee kaksinkertaistumaan vuoden 2028 loppuun mennessä. Tulevaisuudessa kaapelointiaste nousee tuskin 100 %:iin, koska keskijänniteverkosta iso osa sijaitsee haja-asutusalueilla, eikä kaikkia haja-asutusalueiden ilmajohtoja ole taloudellisesti järkevää kaapeloida. Realistisempi arvio tulevaisuuden kaapelointiasteesta on noin 70 %, jolloin maasulkuvirta olisi arviolta 2500 A. Mikäli keskijänniteverkon maasulkuvirran halutaan pysyvän nykyisellään, niin maasulkuvirtaa pitäisi kompensoida yhteensä noin 1500 A.

7.2 Maasulkuvirrat päämuuntajakohtaisesti

Päämuuntajien takana olevan verkon kaapelointiaste vaihtelee sen mukaan, onko verkko pääasiassa taajamaverkkoa vai haja-asutusalueen verkkoa. Tarkastelussa lähtökohtana käytettiin sellaista tilannetta, jossa taajama-alueiden verkot on kokonaan kaapeloitu. Tämä otettiin lähtökohdaksi siksi, koska VSV:n sähkönjakeluverkossa taajama-alueiden verkot kaapeloidaan ensin, minkä jälkeen kaapeloidaan haja-asutusalueiden verkkoa. Tämän vuoksi muutaman päämuuntajan takana oleva verkko on kokonaan kaapeloitu, koska niiden takana oleva verkko sijaitsee pelkästään taajama-alueilla. Kuvasta 21 nähdään maasulkuvirtojen kasvu päämuuntajakohtaisesti kaapelointiasteen funktiona.



Kuva 21. Maasulkuvirrat päämuuntajakohtaisesti kaapelointiasteen funktiona.

Viivojen vaakasuorissa osuuksissa kaapelointiaste on jo lähtötilanteessa suurempi. Mikäli viiva on täysin vaakasuora, kyseisen päämuuntajan kaapelointiaste on 100 % eli sen päämuuntajan takana oleva verkko on pelkästään taajama-alueella. Kuvaajista nähdään, että viiden ylimmän päämuuntajien takana olevan verkon maasulkuvirta tulee kasvamaan eniten eli nämä päämuuntajat tulevat tarvitsemaan eniten kompensointia. Tästä tiedosta on hyötyä maasulkuvirran kompensoinnin suunnittelussa, kun tiedetään, kuinka paljon päämuuntajakohtaisesti pitää lisätä kompensointia.

8 Johtopäätökset

Tässä luvussa käydään läpi työn tuloksia ja arvioidaan, kuinka hyvin tutkimukset onnistuivat. Luvussa käydään läpi ne kohteet, joihin jäi kehitettävää, ja esitetään niihin joitain vaihtoehtoisia toteutustapoja. Luvussa esitetään myös työn aikana esille tulleet jatkotutkimuskohteet.

8.1 Laajat maadoitusjärjestelmät

Laajojen maadoitusjärjestelmien määrittely tehtiin standardin SFS 6001 ohjeiden mukaan. Uudenkaupungin maadoitusjärjestelmä oli osittain määritelty jo aikaisemmin, mutta tarkastelua tehdessä havaittiin, että maadoitusjärjestelmään dokumentoinnissa oli puutteita. Kaikkia laajaan maadoitusjärjestelmään kuuluvia muuntamoita, erotinaseamia, keskijännitejakokaappeja ja sähköasemia ei oltu dokumentoitu eli laaja maadoitusjärjestelmä oli aikaisemmin suppeampi. Laitilan taajama-alue muodostettiin kokonaan uutena laajana maadoitusjärjestelmänä työn tarkastelun seurauksena. Tarkastelun seurauksena tiedetään myös, että Lapin taajama-alueeseen tulevan kaapeloinnin myötä sinne muodostuu myös laaja maadoitusjärjestelmä. Tämä tarkastelu oli hyödyllinen, sillä nyt laajat maadoitusjärjestelmät ovat ajan tasalla ja perusteet laajan maadoitusjärjestelmän määräytymiseen ja uusien muuntamoiden liittymiseen ovat selvillä.

8.2 Maadoitusresistanssien laskenta muuntamoille ja yhteen liitetyille maadoitusjärjestelmälle

Työssä tutkittiin mahdollisuutta ottaa huomioon muuntamon maadoituselektrodien keskinäinen vaikutus. Maadoitusresistanssi laskettiin Nahmanin ja Djordjevićin (1997) esittämän kaavan 10 avulla, mutta ongelmaksi koitui maaperäkerrosten resistiivisyyksien vaatimus $\rho_2 > \rho_1$. Koska käytössä ei ollut laskentamenetelmiä, joilla keskinäinen vaikutus voitaisiin huomioida, laskentaa päädyttiin yksinkertaistamaan siten, että maadoituselektrodien kuviteltiin olevan rinnakkaisia ja maadoitusresistanssi laskettiin siten

vastusten rinnankytkennän kautta. Tätä laskutapaa varten tehtiin kaksi mittausta, joiden perusteella laskennan luotettavuutta arvioitiin. Laskennan luotettavuuden arviointia varten olisi pitänyt kuitenkin tehdä laajempi tarkastelu yhden tarkastelun sijaan. Pelkästään tämän yhden mittauksen perusteella ei voida todistaa laskennan käytettävyyttä siitä huolimatta, että tuloksessa päästiin lähelle mitattua arvoa.

Työssä tehtyjen mittausten ja laskelmien perusteella huomattiin, kuinka muuntamoiden maadoitusresistanssit pienenevät huomattavasti, kun niitä alettiin tutkia yhteen liitettynä maadoitusjärjestelmänä. Esimerkiksi tarkastelussa mukana olleen muuntamon 9 maadoitusresistanssin arvo oli 207Ω , kun muuntamoa tutkittiin yksittäisenä maadoitusjärjestelmänä. Kun muuntamoa käsiteltiin osana yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää, muuntamon maadoitusresistanssi oli enää vain $4,3 \Omega$. Tulokset vahvistavat Mäkisen (2016) jo aikaisemmin tekemää tutkimusta yhteen liitettyistä maadoitusjärjestelmistä ja niiden maadoitusresistanssien määräytymisestä. Tässä työssä lähtöarvojen määrittely tehtiin eri tavalla ja lisäksi tutkimuksen kohteena oli oikeasti olemassa oleva yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä. Tulokset havainnollistivat hyvin sitä, että yhteen liitettyissä maadoitusjärjestelmissä riittää, kun muutamalla muuntamalla on hyvä maadoitusarvo. Siten koko maadoitusjärjestelmän arvot jäävät pieniksi. Sen perusteella voidaan päätellä, että mikäli yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistansseja halutaan pienentää, kannattaa maadoituksia parantaa siellä, missä on hyvät maadoitusolosuhteet.

Esimerkkitapauksen laskentamallissa muuntamoiden väliset kaapelit ovat AHXAMK-W tyyppin kaapeleita, jotka sisältävät kuparisen keskusköyden. Keskusköyden maadoitusvaikutuksia ei ole otettu laskennassa huomioon, millä kuitenkin voisi olla merkittävä maadoitusresistanssia pienentävä vaikutus. Keskusköyden maadoitushyödytystä ei kuitenkaan ollut tarkempaa arviota käytössä. Lisäksi on huomioitava, että laskennassa on huomioitu pelkästään muuntamoiden maadoitusresistanssit ja niiden välisten kaapeleiden maadoitusresistanssit. Pienjänniteverkon maadoituksia, kuten liittymien ja jakokaappien maadoituksia ei ole laskennassa otettu ollenkaan huomioon. Pienjänniteverkon maadoitukset pienentävät kuitenkin entisestään laskentamallin maadoitusresistanssin arvoja.

Niiden huomioiminen olisi todella haastavaa ilman sopivaa laskentatyökalua, minkä vuoksi laskentaa päädyttiin yksinkertaistamaan. (Mäkinen, 2016).

Käännepistemethoden mittautulokset olivat yllättävän lähellä yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistansseja muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Tarkastelun kohteena olisi pitänyt olla muitakin järjestelmiä, jotta oltaisiin voitu tehdä päätelmiä käännepistemethoden mittautulosten käyttäytymisestä yhteen liitettyissä maadoitusjärjestelmissä. Vaikka standardissa SFS 6001 on mainittu, että käännepistemethoden ei ole luotettava mittautapa yhteen liitettyissä maadoitusjärjestelmissä, olisi mielenkiintoista vertailla laajemmalla otannalla käännepistemethoden mittautuloksia laskettuihin arvoihin. PSCAD-simulointiohjelmalla tehtyä laskentaa olisi mielenkiintoista verrata myös Trimble NIS-verkkotietojärjestelmässä tehtävään laskentaan. Tätä vertailua ei kuitenkaan ollut mahdollista tehdä, koska VSV:n käyttämä Trimble NIS-verkkotietojärjestelmän versio ei tue maadoitusten laskentaa. Vertailua on kuitenkin mahdollista tehdä myöhemmin, kun maadoitusten laskentatyökalu on käytettävissä.

8.3 Maasulkuvirtojen tarkastelu

Maasulkuvirtojen laskenta VSV:n jakeluverkossa onnistui hyvin. Laskennassa ei huomioitu ilmalinjojen purkamisesta vähentyneitä maasulkuvirtaa eikä vähentyneitä maasulkuvirtaa niissä tapauksissa, joissa vanhoja paperieristeisiä kaapeleita korvataan muovieristeisillä kaapeleilla. Näitä ei kuitenkaan ollut tarpeen huomioida, koska laskennassa käytettiin kaapeleiden aikaansaamalle maasulkuvirralle keskiarvoa, ja siten tulokset ovat suuntaa antavia. Tuloksien perusteella on nähtävissä, miten maasulkuvirrat kehittyvät koko verkossa sekä päämuuntajittain. Kun maasulkuvirtojen kasvu tiedetään päämuuntajittain, tiedetään myös maasulkuvirran kompensoinnin tarve sähköasemittain. Tämän tarkastelun tuloksia voidaan siten käyttää hyväksi maasulkuvirran kompensoinnin suunnittelussa.

8.4 Jatkotutkimuskohteet

Yksi työn jatkotutkimuskohteista on laajojen maadoitusjärjestelmien esitystavan kehittäminen. Kun VSV:n laajat maadoitusjärjestelmät on nyt määritelty, niin seuraava askel olisi kehittää laajojen maadoitusjärjestelmien esitystapaa. Esitystapaa olisi mahdollista kehittää esimerkiksi siten, että yhdysjohtimena toimivien kaapeleiden attribuutteihin lisättäisiin tieto, että kaapeli on laajan maadoitusjärjestelmän yhdysjohdin. Lisäksi muuntamoiden tietoihin voitaisiin kirjata arvo, että kuinka monta yhteyttä kyseisestä muuntamosta on laajaan maadoitusjärjestelmään. Korostamalla laajaan maadoitusjärjestelmään liittyneet muuntamot ja yhdysjohtimena toimivat kaapelit saataisiin näkyviin pelkästään kaikki laajan maadoitusjärjestelmän muuntamot ja yhdysjohtimena toimivat kaapelit.

Työssä ei määritelty erikseen VSV:n yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä. Jatkotutkimuskohteena on myös yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien määrittely VSV:n jakeluverkossa ja niiden esitystapojen kehittäminen samoin, kuten laajoilla maadoitusjärjestelmillä. Jatkotutkimuskohteena voisi olla Trimble NIS-verkkotietojärjestelmän maadoituslaskennan hyödyntäminen suunnittelussa. Käännepestemenetelmällä mitatut arvot olivat hyvin lähellä yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistansseja, minkä vuoksi tutkimuksia olisi mielenkiintoista tehdä lisää usealla kohteella.

9 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli tehdä selvitys, miten VSV:n jakeluverkon maakaapelointi tulee vaikuttamaan maadoitusjärjestelmiin ja niiden maadoitusresistansseihin sekä keskijänniteverkon maasulkuvirtoihin. Työ koostui kolmesta eri tutkimusalueesta, joista ensimmäisenä määriteltiin VSV:n laajat maadoitusjärjestelmät. Laajan maadoitusjärjestelmän määrittely tehtiin standardin SFS 6001 mukaisesti eli jokainen muuntamo oli yhteydessä vähintään kahteen muuhun maadoitusjärjestelmään. Laajat maadoitusjärjestelmät dokumentoitiin VSV:n käyttämään Trimble NIS-verkkotietojärjestelmään kirjaamalla muuntamon tietoihin, että se kuuluu laajaan maadoitusjärjestelmään.

Toisena tutkimusalueena oli yksittäisten muuntamoiden ja yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien laskentamenetelmät. Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssin laskentaa varten tutkittiin ensin mahdollisuutta ottaa huomioon maadoituselektrodien keskinäinen vaikutus. Laskentaa päädyttiin kuitenkin yksinkertaistamaan siten, että maadoituselektrodien kuviteltiin olevan rinnakkain ja maadoitusresistanssi laskettiin vastusten rinnankytkennän kautta. Tämän laskennan tueksi tehtiin mittaus, joka vahvisti laskennan käytettävyyden tässä työssä. Mittauksia olisi ollut syytä tehdä kuitenkin enemmän, jotta laskennan luotettavuutta olisi voitu arvioida paremmin.

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi laskettiin mallintamalla maadoitusjärjestelmä PSCAD-simulointiohjelmalla. Tulokset havainnollistivat hyvin sitä, kuinka yksittäisten muuntamoiden suuretkin maadoitusresistanssit muuttuivat pieniksi, kun muuntamoketjua tutkitaan yhteen liitettynä maadoitusjärjestelmänä. Näin myös voitiin päätellä, että mikäli yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistansseja halutaan pienentää, niin maadoituksia kannattaa parantaa siellä, missä on hyvät maadoitusolosuhteen. Maadoitusresistansseja verrattiin myös käännepistemenetelmällä mitattuihin arvoihin. Tuloksista huomattiin, että arvot olivat melko lähellä toisiaan muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Tarkastelukohteita pitäisi kuitenkin olla enemmän, jotta voitaisiin vertailla paremmin mittaustulosten ja laskentatulosten eroja ja tehdä siten päätelmiä mittaustulosten ja laskentatulosten riippuvuuksista.

Kolmantena tutkimusalueena oli kaapeloinnista johtuvan maasulkuvirran kasvun tarkastelu VSV:n keskijänniteverkossa. Kaapeleiden aikaansaamalle maasulkuvirralla käytettiin keskiarvoa 2,7 A/km. Lähtötilanne laskettiin Trimble NIS-verkkotietojärjestelmässä, jolla saatiin selville päämuuntajien takana oleva verkko ja päämuuntajakohtainen maasulkuvirta. Tarkastelun lähtötilanteena käytettiin tilannetta, jossa taajama-alueen verkko on kokonaan kaapeloitu. Näiden lähtötietojen perusteella maasulkuvirran kasvua arvioitiin, kun haja-asutusalueiden kaapelointiastetta nostettiin. Maasulkuvirran kasvua arvioitiin ensin koko keskijänniteverkossa ja sitten päämuuntajakohtaisesti.

Laajojen maadoitusjärjestelmien määrittely saatiin tavoitteen mukaisesti tehtyä. Laajan maadoitusjärjestelmän esitystapaan jäi kuitenkin vielä kehitettävää. Valmista ratkaisua esitystavalle ei tässä työssä kehitetty, mutta työssä ehdotettiin yhtä tapaa laajan maadoitusjärjestelmän esittämiseen. Maasulkuvirtojen laskenta saatiin myös tavoitteiden mukaisesti tehtyä. Tuloksista on hyötyä maasulkuvirtojen kompensoinnin suunnittelussa, kun tiedetään, miten maasulkuvirrat kehittyvät päämuuntajakohtaisesti.

Yksittäisen muuntamon maadoitusresistanssin laskennan arviointia varten tehtiin vain yksi mittaus, minkä vuoksi laskennan luotettavuutta ei voitu täysin vahvistaa. Tutkittavia kohteita olisi pitänyt olla enemmän, jotta laskennan luotettavuutta ja tarkkuutta oltaisiin voitu arvioida paremmin. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskenta onnistui hyvin PSCAD-simulointiohjelmalla. Tulokset havainnollistivat hyvin sitä, kuinka maadoitusresistanssit ovat huomattavasti pienempiä yhteen liitetyissä maadoitusjärjestelmissä kuin yksittäisinä muuntamoina tarkasteltuina. Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssien laskennassa ei otettu kaikkia maadoituksia huomioon, kuten kaapelien keskusköysien ja pienjänniteverkon maadoitusten maadoitusvaikutuksia. Tämän vuoksi laskennan arvoja on turvallista käyttää, koska arvot jäävät joka tapauksessa suuremmaksi kuin todelliset arvot ovat.

Laskennan tuloksena huomattiin myös, että käännepestemenetelmällä mitatut arvot olivat hyvin lähellä yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistansseja muutama poikkeusta lukuun ottamatta. Koska tiedetään, että lasketut maadoitusresistanssit

ovat todellisuudessa vielä pienempiä ja käännepestemenetelmällä mitatut arvot olivat pääsääntöisesti suurempia kuin lasketut arvot, niin mitattuja arvoja olisi turvallista käyttää suoraan maadoitusjärjestelmien maadoitusarvoina. Tämän vuoksi käännepestemenetelmän mittaustulosten käytettävyyttä olisi mielenkiintoista tutkia lisää, koska silloin yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskentaa ei välttämättä tarvittaisi, jos riittävän pieni maadoitusresistanssin arvo voitaisiin luotettavasti mitata käännepestemenetelmällä.

Lähteet

- Anjala, R., Pernu, S., Harttunen, R., Nurmi, H., Karvonen, J., Mutttilainen, J. & Roine, R. (2016). *Muuntopiirien ja pylväserotinasemien maadoitukset SFS 6001/2015 mukaan, verkostosuositus RJ 19: 16.*
- Cafaro, G., Montegiglio, P., Torelli, F., Colella, P., Napoli, R., Pons, E., Tommasini, R., De Simone, A., Morozova, E., Valtorta, G., Barresi, A., Tummolillo, F., Campoccia, A., Di Silvestre, M. L., Riva Sanseverino, E., Zizzo, G., Martirano, L., Parise, G. & Parise, L. (2015). *The Global Grounding System: Definitions and guidelines.* Esitetty IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Rooma, 10.–13.6.2015.
- Elovaara, J., & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot. II, Verkon Suunnittelu, järjestelmät ja laitteet.* Helsinki: Otatieto.
- Fluke Corporation (2017). *Maadoitusresistanssi – Periaatteet, testausmenetelmät ja sovellukset.* Noudettu 2020-4-14 osoitteesta https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902801_FIN_A_W.PDF
- HE 20/2013. *Hallituksen esitys eduskunnalle sähkö- ja maakaasumarkkinoita koskevaksi lainsäädännöksi.* Noudettu Edita Publishing Oy:n osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2013/20130020>
- Headpower (2019). *Puistomuuntamot kuvakooste [Rajattu pääsy]* Noudettu 2019-12-15 osoitteesta <https://ohjeistot.headpower.fi/hpo170/2019>
- Hälvä, V., Lähdeaho, T., Välimäki, J., Ristimäki, R., Vierimaa, H., Reikko, J., Laitinen, J-P., Puoskari, E., Järviluoma, R., Niemelä, E., Heikkilä, T. & Lukka, E. (2020). *Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen, verkostosuositus, verkostosuositus RJ 22: 20.*
- Institute of Electrical and Electronics Engineering (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System* (IEEE Std 81-2012). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>
- Majanen, H., Roine, R., Anjala, R. & Mutttilainen, J. (2019). *Sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset, verkostosuositus TJ 1: 05.*

- Mäkinen, A. (2016). *Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä*. Noudettu 2019-11-06 osoitteesta https://energia.fi/files/1504/Maadoitusjarjestelmat_loppuraportti_TTY.pdf
- Nahman, J., & Djordjević, V. (1997). *Resistance to earth of substation earth electrodes in uniform and two-layer soils*. *Electrical Engineering* 80, 337-342 (1997). <https://doi.org/10.1007/BF01370970>
- Nikander, A., & Mäkinen, A. (2017). *Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset – suojaushasteet, yliaallot, vaarajännitteet*. Noudettu 2019-10-15 osoitteesta https://energia.fi/files/2130/Laajan_kaapeloidun_keskijanniteverkon_maasulkuilmioiden_vaikutukset_TTY_2017.pdf
- Prysmian Group (2018). *AHXAMK-W 20 kV 3-johtiminen maakaapeli*. Noudettu 2020-1-15 osoitteesta <https://fi.prysmiangroup.com/AHXAMK-W%2020%20kV%20import>
- Short, T. A. (2014). *Electric Power Distribution Handbook* (2. painos). New York: CRC Press.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2017). *Pienjännitesähköasennukset : Osa 1-1, Yleisvaatimukset (SFS 6000 osat 1-6) = Low-voltage electrical installations. Part 1-1, General requirements (SFS 6000 parts 1 to 6)*.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2018). *Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot = High-voltage electrical installations and overhead lines (SFS 6001)*.
- Sähkömarkkinalaki (588/2013). Noudettu Edita Publishing Oy:n osoitteesta <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>
- Vakka-Suomen Voima Oyj. (2019). *Sähköjakeluverkon kehittämissuunnitelma 2019–2029*. [Rajattu pääsy].
- Vakka-Suomen Voima Oyj. (2019). *VSV Sähköverkkoinvestoinnit 2020–2028*. [Rajattu pääsy].
- Ylinen, T., Koivisto, P., Kauppila, J., Tiainen, E., & Nurmi, T. (2019). *Maadoituskirja* (7., uusittu painos). Espoo: Sähköinfo Oy.