

Tommi Salo

**YHTEEN LIITETTYJEN MAADOITUSJÄRJESTELMIEN
LASKENNALLINEN TODENTAMINEN**

**YHTEEN LIITETTYJEN MAADOITUSJÄRJESTELMIEN
LASKENNALLINEN TODENTAMINEN**

Tommi Salo
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-
ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma, sähkötekniikka

Tekijä: Tommi Salo

Opinnäytetyön nimi: Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien laskennallinen todentaminen

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Calculational Verification of Connected Earthing Systems

Työn ohjaaja: Yliopettaja Heikki Kurki

Työn valmistuslukuksi ja -vuosi: Kevät 2020

Sivumäärä: 43 + 7 liitettä

Tämä opinnäytetyö tehtiin Oulun Seudun Sähkö Verkkopalvelut Oy:lle. Työn aiheena oli yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien todentaminen laskennallisesti sekä dokumentointi OSSV:n jakeluverkossa.

Työn tavoitteena oli selvittää, miltä osin OSSV:n jakeluverkko muodostaa yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä. Opinnäytetyön perustella voitiin luoda toimintaohjeet OSSV:n henkilöstölle, miten jakeluverkko tulee tulevaisuudessa dokumentoida maadoitusten osalta ja miten suurjännitelaitteistojen maadoitukset tulee huomioida jatkossa.

Vuonna 2018 uudistettu SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset -standardi mahdollistaa yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän. Se poikkeaa perinteisestä laajasta maadoitusjärjestelmästä siten, että muuntamoiden välimatkat voivat olla pidempiä ja muuntamot voivat olla toisiinsa yhteydessä ketjumaisesti. Trimble NIS -verkkotietojärjestelmän versiopäivitys mahdollisti yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien todentamisen ja dokumentoinnin.

Suurimpina tekijöinä tarkastelulle olivat taloudellisuus ja haastavat mittausolosuhteet taajama-alueilla. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä tuo taloudellisen hyödyn siten, että perinteisiä käänne-pistemenetelmällä suoritettuja mittauksia ei enää tarvitse suorittaa, vaan laskennallisesti todennettu maadoitusjärjestelmä ja määräaikaistarkastusten yhteydessä tehtävät tarkastukset riittävät täyttämään standardin vaatimukset.

Työssä todennettiin 23 yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää, koska jakeluverkossa on vielä paljon ilmajohtoja. Maakaapeloinnin edetessä saadaan luotua laajempia yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä, jolloin järjestelmien määrä pienenee.

Osa työssä tuotetuista liitteistä sisältää aineistoa, jonka työn tilaaja on määritellyt luottamukselliseksi, joten niitä ei julkaista tässä opinnäytetyössä.

Asiasanat: yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä, ketjutettu maadoitus, maadoitus, maadoitusten todentaminen laskennallisesti, resultoiva maadoitusimpedanssi

ALKULAUSE

Aluksi haluan kiittää Oulun Seudun Sähkö Verkkopalvelut Oy:tä mielenkiintoisesta ja opettavasta opinnäytetyönaiheesta. Erityiskiitokset suunnittelupäällikkö Jouni Perälälle sekä käyttöpäällikkö Risto Piriselle tuesta ja opastuksesta. Kiitos myös Heikki Kurjelle opinnäytetyön ohjauksesta.

Oulussa 07.04.2020

Tommi Salo

SISÄLLYS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 1.1 | Työn tausta..... | 7 |
| 1.2 | Toimeksiantajan esittely | 7 |
| 2 | YHTEEN LIITETTY MAADOITUSJÄRJESTELMÄ | 9 |
| 2.1 | Standardin määritelmä | 10 |
| 2.2 | Laitteistojen maadoitusvastuksen määrittäminen | 10 |
| 2.2.1 | Maadoitusresistanssin laskennallinen määrittäminen | 11 |
| 2.2.2 | Mittaus | 11 |
| 2.2.3 | Yhdistäminen aikaisemmin rakennettuun maadoitukseen | 12 |
| 2.3 | Yhteen liitetyn ja laajan maadoitusjärjestelmän erot..... | 12 |
| 3 | MAADOITUSTEN MITOITUS | 15 |
| 3.1 | Korroosionkestävyys ja mekaaninen lujuus..... | 15 |
| 3.2 | Terminen lujuus..... | 17 |
| 3.3 | Kosketusjännite | 18 |
| 3.4 | Maadoitusjännite | 19 |
| 3.5 | Maadoitusjännitteen tavoitetaso | 20 |
| 3.6 | Resultoiva maadoitusimpedanssi | 21 |
| 3.7 | OSSV:n jakeluverkossa käytettävät kj-kaapelityypit ja -pituudet | 22 |
| 4 | MAADOITUSTEN JA MAAPERÄN MITTAUS | 23 |
| 4.1 | Mittausajankohta | 23 |
| 4.2 | Maadoitusmittausmenetelmät..... | 23 |
| 4.2.1 | Käänepistemenetelmä | 24 |
| 4.2.2 | Voltti-ampeeri-menetelmä..... | 25 |
| 4.3 | Maaperän resistiivisyyden mittaus..... | 27 |
| 5 | YHTEEN LIITETTYJEN MAADOITUSJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU, TOTEUTUS JA VARMISTAMINEN..... | 29 |
| 5.1 | Suunnittelu | 29 |
| 5.2 | Maadoitusimpedanssin vähimmäisvaatimus | 35 |
| 5.3 | Toteutus ja määräaikaistarkastukset..... | 35 |
| 6 | MAADOITUSVERKKOLASKENTA VERKKOTIETOJÄRJESTELMÄLLÄ..... | 36 |
| 6.1 | Esimerkkikohde | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.1.1 | Suurjännitemaadoitukset..... | 38 |
| 6.1.2 | Pienjännitemaadoitukset..... | 38 |
| 6.1.3 | Maasulkulaskenta | 39 |
| 6.2 | Yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät OSSV:n jakeluverkossa..... | 40 |
| 7 | YHTEEN LIITETTYJEN MAADOITUSJÄRJESTELMIEN TUOMAT HYÖDYT | 41 |
| 8 | YHTEENVETO | 42 |
| | LÄHTEET..... | 43 |
| | LIITTEET | 44 |

1 JOHDANTO

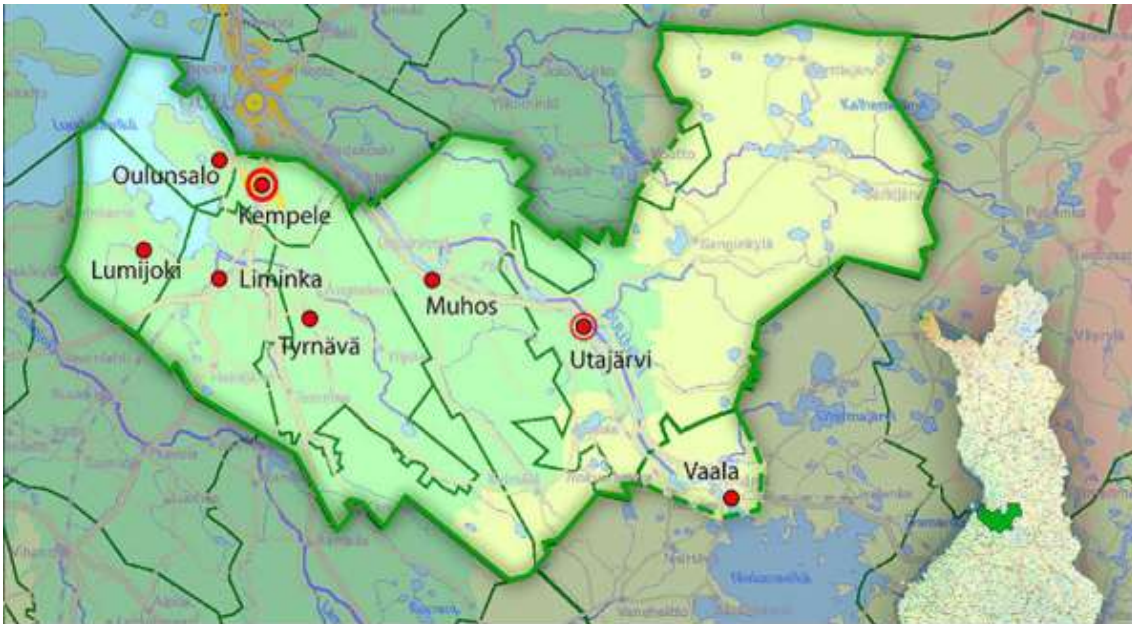
1.1 Työn tausta

Vuonna 2018 uudistettuun Suurjännitesähköasennukset-standardiin lisättiin yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän määritelmä. Tämä oli hyvä uutinen Oulun Seudun Sähkö Verkkopalvelut Oy:n (OSSV) kaltaiselle jakeluverkkoyhtiölle, jolla on paljon jakeluverkkoa taajama- ja haja-asutusalueilla. Vaikka jakeluverkko ei täyttäisi laajan maadoitusjärjestelmän vaatimuksia, se kuitenkin voi täyttää yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän vaatimukset. Laajan maadoitusjärjestelmän tapaan yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluville jakelumuuntamoille ei tarvitse suorittaa maadoitusmittauksia määrävälein (6–12 vuotta) käännepestemenetelmällä, näin säästyy yksi kuluerä. SFS 6001:2018 -standardin mukaan riittävä dokumentointi, mitoituslaskelmat sekä määrävälein suoritettavat silmämääräiset tarkastukset ovat riittäviä täyttämään standardin asettamat vaatimukset, jotka koskevat yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien todentamista. (1, s. 145.)

Tämän työn tavoitteena on todentaa, miltä osin OSSV:n jakeluverkko muodostaa standardin mukaisia yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä. Todennuksen lisäksi, toisena tavoitteena on luoda toimintaohjeet OSSV:n henkilöstölle sekä urakoitsijoille.

1.2 Toimeksiantajan esittely

OSSV on Kempeleen, Oulunsalon, Limingan, Lumijoen, Tyrnävän, Muhoksen ja Utajärven kuntien sekä Vaalan keskustan alueella toimiva jakeluverkkoyhtiö (kuva 1). Sähkön siirron lisäksi OSSV huolehtii sähköverkon suunnittelusta, rakennuttamisesta ja kunnossapidosta. (2.)



KUVA 1. OSSV:n jakelualue (2)

OSSV:n keskeiset tunnusluvut ovat:

- 10 sähköasemaa
- noin 1470 jakelumuuntamoita, joista noin 350 on maakaapeliverkon jakelumuuntamoita
- noin 1500 km 20 kV johtoja, joista noin 260 km on maakaapelia
- noin 2200 km 0,4 kV johtoja, joista noin 900 km on maakaapelia
- noin 21000 pienjänniteliittymää (3).

2 YHTEEN LIITETTY MAADOITUSJÄRJESTELMÄ

Vuonna 2011 laajoja sähkönjakeluhäiriöitä aiheuttanut Tapani-myrsky johti sähkömarkkinalain uudistumiseen. Vuonna 2013 uudistettuun sähkömarkkinalakiin määritettiin uudet toimintavarmuusvaatimukset: sääolojen aiheuttamat sähkökatkot saavat kestää taajamissa enintään 6 tuntia ja haja-asutusalueilla enintään 36 tuntia. Tämä johti käytännössä siihen, että keskijänniteverkkoja ryhdyttiin maakaapeloimaan kaupunkien keskustojen lisäksi taajamissa ja haja-asutusalueilla, jotta lain asettamat vaatimukset saataisiin täytettyä.

Maakaapelointi mahdollistaa maadoitusten ketjuttamisen suurjännitelaitteistojen välillä myös taajamissa ja haja-asutusalueilla kaupunkien keskustojen lisäksi. Tyypillisiä yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä ovat maakaapeloituun keskijänniteverkkoon liittyvät jakelumuuntamot, erotinasemat ja muut sähköasemat, joiden maadoitusjärjestelmät ovat toisiinsa yhteydessä ketjumaisesti tai silmukkamaisesti syöttökaapelin kosketussuojien tai kosketussuojien sekä keskusköyden välityksellä. Tässä tarkoitettujen yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien ei tule täyttää laajalle maadoitusjärjestelmälle asetettuja vaatimuksia. Etenkin haja-asutusalueilla ketjuuntuviin järjestelmissä rezultoiva maadoitusimpedanssi on merkittävästi pienempi kuin tarkasteltavan laitteiston oma maadoitusresistanssi. (4, s. 71–72.)

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän määrittelyä lisättiin SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset -standardiin. Standardi mahdollistaa tällaisten yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien rezultoivien maadoitusimpedanssien määrittämisen laskennallisesti esimerkiksi verkkotietojärjestelmän avulla. Edellytyksenä kuitenkin on, että standardissa esitetyt erilaisia asennuksia koskevat yksityiskohdat myös täytetään. Tässä työssä on keskitytty noudattamaan Suomen Standardisointiliiton SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset -standardin asettamia vaatimuksia maadoitusjärjestelmien mitoituksen, maadoitusresistanssin määrittämisen sekä yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän todentamisen osalta.

Työssä selvitettiin, miltä osin OSSV:n jakeluverkko muodostaa SFS 6001:2018 -standardin asettamien vaatimusten mukaisia yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä. Laajaa maadoitusjärjestelmää ei lähdetty tavoittelemaan, sillä jo maadoitusverkkotarkastelun alussa huomattiin, että laajan maadoitusjärjestelmän vaatimuksia ei voida täyttää ainakaan tämän hetkisen verkonrakenteen kanssa.

2.1 Standardin määritelmä

Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä määritellään SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset - standardin velvoittavan liitteen NA.O.2 mukaan seuraavasti:

Suomen olosuhteissa tyypillisiä yhteen liitettyjä maadoitusjärjestelmiä ovat taajamien ja maaseudun maakaapeloituun keskijänniteverkkoon liittyvät jakelumuuntamot ja muut sähköasemat, joiden maadoitusjärjestelmät ovat yhteydessä toisiinsa ketjumaisesti tai silmukkamaisesti. Yksittäisen maadoituksen mittaaminen esim. käännepestemenetelmällä irrottamatta syöttökaapeleita ei yleensä anna luotettavaa tulosta.

Yhdistäminen voidaan tehdä erillisellä johtimella, kaapelin keskusköydellä tai riittävän suurella poikkipinnalla varustetulla kaapelin kosketussuojalla tai vastaavalla tavalla.

Suurjännitesähköaseman vaikutukset pitää selvittää erikseen.

Kustakin yhteen liitetystä maadoitusjärjestelmästä on oltava käytettävissä dokumentaatio, jossa on todennettavissa maadoituksen mittaustulokset tai mitoituslaskelma, järjestelmään liittyvät sähköasemat, jakelumuuntamot ja niiden väliset maadoitusten yhdistämiset. (1, s. 149–150.)

2.2 Laitteistojen maadoitusvastuksen määrittäminen

Resultoivan maadoitusimpedanssin takia maadoitusjohtimien kautta yhdistyneitä maadoituksia on syytä tarkastella kokonaisuutena eikä paikallismaadoituksina niin kuin ilmajohtoverkossa tehdään. Ketjuuntuvassa järjestelmässä, jossa on kymmenen muuntopiiriä, resultoiva maadoitusimpedanssi voi olla 13–47 % pienempi kuin tarkasteltavan muuntopiirin oma maadoitusimpedanssi erillisesti tarkasteltuna. Resultoiviin maadoitusimpedansseihin vaikuttavat yksittäisten maadoitusten resistanssi, välimatkat maadoitusten välillä, kaapelointien nollapiirien resistanssit sekä maaperän resistiivisyys. (5, s. 23.)

Maadoitusjärjestelmää voidaan käsitellä yhtenä kokonaisuutena, kun vähintään kolmen jakelumuuntamon tai vastaavan suurjännitelaitteiston maadoitusjärjestelmät ovat galvaanisessa yhteydessä toisiinsa. Tällaisen yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin arvo voidaan määritellä asennuksen yksityiskohtien mukaan kolmella eri tavalla, jotka ovat: maadoitusresistanssin mittaaminen, yhdistäminen aikaisemmin rakennettuun maadoitukseen sekä laskennallinen todennus. Lisäksi maadoituksen turvallisuus voidaan varmistaa esimerkiksi mittaamalla kosketusjännitteen suuruus. (1, s. 149.)

Työssä todettiin, että yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssin laskennallinen määrittäminen on luotettavin ja kustannustehokkain tapa. Käännepistemenetelmällä saatu mittaus-tulos olisi epäluotettava ja kosketusjännitteen mittausta vaatisi mittavat järjestelyt.

2.2.1 Maadoitusresistanssin laskennallinen määrittäminen

SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset -standardin velvoittavan liitteen NA.13 kohdassa II sanotaan:

Jos maadoitusten mittaaminen yhteen kytketyissä maadoitusjärjestelmissä ei ole kohtuullisilla mittausjärjestelyillä mahdollista ja tiedossa on maadoitusjärjestelmän sijaintipaikan maaperän sähköisen resistiivisyyden arvo, maadoitusresistanssin arvo voidaan laskea käytettyjen maadoituselektrodien rakennetietojen avulla. Maadoitusten toteutuminen suunnitelman mukaisena on dokumentoitava esimerkiksi valokuvaamalla. (1, s. 145.)

Tämä standardin esittämä vaihtoehto maadoitusresistanssin määrittämisestä tukee parhaiten OSSV:n tarpeita. Maakaapeloituun jakeluverkkoon liittyvät jakelumuuntamoiden ja erotinasemien maadoituselektrodijärjestelmät ovat HeadPower-järjestelmässä esitettyjen ohjeiden mukaisia. Maaperän resistiivisyyden arvo pystytään määrittämään Geologian tutkimuskeskuksen tekemän maaperätutkimusaineiston ja SFS 6001:2018 -standardissa esitetyn maaperän resistiivisyydet-taulukon (taulukko 6) avulla.

Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien dokumentointiin ja laskentaan käytettiin Trimble NIS -verkkotietojärjestelmää. Sen avulla yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät saatiin sujuvasti dokumentoitua SFS 6001:2018 -standardin asettamien vaatimusten mukaisesti.

2.2.2 Mittaus

Maadoitusresistanssin mittaus voidaan suorittaa käännepistemenetelmällä. Käännepistemenetelmällä suoritettu mittaus tapahtuu samoin kuin paikallisen maadoituksen mittaus. Standardissa SFS 6001:2018 todetaan: Yksittäisen maadoituksen mittaaminen esim. käännepistemenetelmällä irrottamatta syöttökaapeleita ei yleensä anna luotettavaa tulosta (1, s. 150).

Näin ollen käännepistemenetelmällä suoritettu mittaus ei ole paras mahdollinen maadoitusresistanssin arvon määrittäytapa yhteen liitettyissä maadoitusjärjestelmissä. Jos käännepistemenetel-

mällä suoritettua mittausta kuitenkin käytettäisiin yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluvalla laitteistolla, täytyisi syöttökaapelit maadoituksineen irrottaa mittauksen ajaksi luotettavan mitaustuloksen saamiseksi. (1, s. 149–150.)

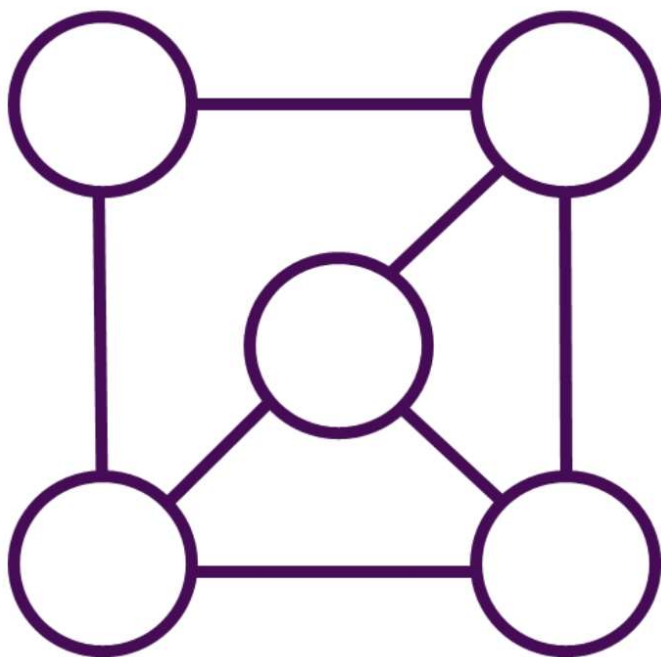
Maadoituksen turvallisuuden voi myös varmistaa mittaamalla kosketusjännite voltti-ampeeri-menetelmällä. Voltti-ampeeri-mittaus soveltuu yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien mittaamiseen, mutta mittaus vaatii niin mittavat järjestelyt, ettei menetelmä sovellu jakeluverkkoyhtiöiden tavanomaisiin maadoitusmittauksiin. (6, s. 33.) Jos virransyöttökohteeksi valittaisiin esimerkiksi puistomuuntamo, jonka maadoitusvastus on 5Ω ja syötetty mittausvirta on 50 A, potentiaali nousisi jopa 250 V:iin, joka olisi vaarallinen muuntopiirin kuluttajille. Suurin sallittu maasulkujännite on SFS 6001:2018 -standardin mukaisesti 80 V. (7, s. 8.)

2.2.3 Yhdistäminen aikaisemmin rakennettuun maadoitukseen

Jos maadoitus yhdistetään aikaisemmin rakennettuun maadoitukseen, voidaan mitoituksessa käyttää hyväksi tiedossa olevaa maadoitusresistanssin arvoa. Luotettavana tiedossa olevana mittaus-tietona voidaan pitää esimerkiksi sellaista mittaustulosta, jossa pylväsmuuntamon vaakamaadoituselektrodi on mitattu käännepestemenetelmällä, eikä maadoitukseen ole tehty muutoksia myöhemmin. (8, s. 6.)

2.3 Yhteen liitetyn ja laajan maadoitusjärjestelmän erot

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän vaatimukset täyttyvät useimmiten taajama- ja haja-asutus-alueilla. Laajan maadoitusjärjestelmän vaatimukset täyttyvät esimerkiksi kaupungin keskustassa, jossa jakelumuuntamoita on tiheässä. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki laajan maadoitusjärjestelmän muodostumisesta.



KUVA 2. Laaja maadoitusjärjestelmä (8, s. 19)

Laajalla maadoitusjärjestelmällä tarkoitetaan laajaa yhteen liitettyjen maadoitusten muodostamaa kokonaisuutta, jonka alueella ei esiinny potentiaalieroja tai ne ovat hyvin pieniä. SFS 6001:2018 -standardi ei anna tarkkaa määritelmää laajalle maadoitusjärjestelmälle, mutta laajan maadoitusjärjestelmän tulee olla verkkomaisesti silmukoituva. Lisäksi pienjänniteverkon puolella tulee olla riittävä määrä muuntopiirejä yhdistäviä kaapeliyhteyksiä. Jokaisen laajan maadoitusverkon muuntopiiriin tulee olla yhteydessä vähintään kahden muun muuntopiiriin maadoituksiin. Tyypillisiä laajan maadoitusjärjestelmän alueita ovat tiheästi asutut kaupunkikeskustat ja vastaavat alueet sekä laajat teollisuusalueet, joissa jakeluverkko muodostaa galvaanisesti yhtenäisen maadoitusjärjestelmän. Laajan maadoitusjärjestelmän perustana toimii yleensä rengasmaisesti rakennettu kj-maakaapeliverkko, jossa on varayhteyksikaapeleita sekä saman että viereisten sähköasemien syöttämien lähtöjen välillä. (8, s. 18.)

Pieni maadoitusimpedanssi ei takaa yksinään laajan maadoitusjärjestelmän toteutumista. Eikä laajalle maadoitusjärjestelmälle aseteta impedanssiarvoihin perustuvia vaatimuksia. Laitteistokohtainen pieni resultoiva maadoitusimpedanssi on hyväksi myös laajassa maadoitusjärjestelmässä, mutta se ei ole välttämättä asia, jota tulisi tavoitella. Laaja maadoitusjärjestelmä voi toteutua asennuksissa, jotka sijaitsevat maaperässä, jolla on suuri resistiivisyys ja maadoituselektrodien maadoitusresistanssiarvot voivat olla suuria. (8, s.19.)

Kuvassa 3 on esitetty esimerkki yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän muodostumisesta. Kuvassa 3 jakelumuuntamo on yhteydessä kahteen muuhun suurjännitejärjestelmään, kuten jakelumuuntamoon. Maadoitusjärjestelmien yhdistäminen voidaan tehdä erillisellä maassa tai ilmassa kulkevalla johtimella. Yhdistäminen voidaan tehdä esimerkiksi kj-kaapelin kosketussuojilla tai kosketussuojilla sekä keskusköydellä. Kosketussuojien poikkipinta-ala on oltava vähintään 16 mm² kuparia tai 35 mm² alumiinia, terminen kestävyys huomioon ottaen. Lisäksi pienjänniteverkon PE tai PE sekä PEN -yhdistykset voidaan huomioida koko maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssin laskennassa. (8, s. 14.)



KUVA 3. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä (8, s. 14)

3 MAADOITUSTEN MITOITUS

Maadoitusjärjestelmä täytyy suunnitella siten, että kaikki siihen kuuluvat komponentit täyttävät SFS 6001:2018 -standardin asettamat vaatimukset korroosionkestävyyden, mekaanisen ja termisen lujuuden sekä kosketusjännitteiden osalta. Näin saavutetaan turvallinen ja toimintavarma maadoitusjärjestelmä. Olennaisimmat maadoitusjärjestelmän mitoitukseen vaikuttavat tekijät ovat vikavirran suuruus, vian kestoaika sekä maaperän ja maadoituselektrodien ominaisuudet. (1, s. 86–91.)

3.1 Korroosionkestävyys ja mekaaninen lujuus

Korroosionkestävyyden ja mekaanisen lujuuden osalta maadoitusjärjestelmän kaikki komponentit täytyy mitoittaa siten, että ne kestävät asennuksen koko odotettavissa olevan eliniän. Maadoituselektrodi on suoraan kosketuksissa maaperän kanssa, joten sen täytyy olla valmistettu korroosion kestävästä materiaalista. Komponenttien täytyy myös kestää asennuksen ja normaalin käytön aikana aiheutuvat mekaaniset rasitukset. Myös luonnollisia maadoituselektrodeja voidaan käyttää maadoitusjärjestelmän osana. Sellaisia ovat esimerkiksi betoniperustuksiin upotetut teräkset ja teräspaalutukset. (1, s. 88.)

Taulukossa 1 on esitetty SFS 6001:2018 -standardissa määritetyt vähimmäismitat erityyppisille maadoituselektrodeille, jotka täyttävät korroosion kestävyyttä ja mekaanista lujuutta koskevat vaatimukset.

TAULUKKO 1. Maadoituselektrodien tyyppi ja vähimmäismittat, jotka takaavat riittävän mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden (1, s. 108)

| Materiaali | | Elektrodin tyyppi | Vähimmäismitta | | | | |
|------------|------------------------------------|---|------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
| | | | Ydinosa | | | Pinnoite/vaippa | |
| | | | Halkaisija mm | Poikki- pinta mm ² | Paksuus mm | Yksittäi- nen arvo µm | Keskiarvo µm |
| Teräs | Kuumasinkitty | Nauha ^b | | 90 | 3 | 63 | 70 |
| | | Profiili (ml. levy) | | 90 | 3 | 63 | 70 |
| | | Putki | 25 | | 2 | 47 | 55 |
| | | Sauvaelektrodin pyörötanko | 16 | | | 63 | 70 |
| | | Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka | 10 | | | | 50 |
| | Lyijyvaipalla ^a | Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka | 8 | | | 1000 | |
| | Päällystetyllä ku- parivaipalla | Sauvaelektrodin pyörötanko | 15 | | | 2000 | |
| | Elektrolyytti- kuperivaipalla | Sauvaelektrodin pyörötanko | 14,2 | | | 90 | 100 |
| Kupari | Paljas | Nauha | | 50 | 2 | | |
| | | Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka | | 25 ^c | | | |
| | | Köysi | 1,8 ^d | 25 ^c | | | |
| | | Putki | 20 | | 2 | | |
| | Tinattu | Köysi | 1,8 ^d | 25 ^c | | 1 | 5 |
| | Sinkitty | Nauha | | 50 | 2 | 20 | 40 |
| | | Lyijyvaipalla ^a | Köysi | 1,8 ^d | 25 ^c | | 1000 |
| | | Pyöreä lanka | | 25 ^c | | 1000 | |

a Ei sovellu asennettavaksi suoraan betoniin. Lyijyn käyttöä ei suositella ympäristösyistä.
b Valssattu tai leikattu nauha pyöristetyn reunoin.
c 16 mm² poikkipintaa voidaan käyttää erityisolosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosion ja mekaanisen vaurioitumisen riski on vähäinen
d Yksittäiselle langalle.

Taulukossa 2 on esitetty SFS 6001:2018 -standardissa on määritetyt vähimmäispoikkipinta-alat maadoitusjohtimille. Potentiaalintasausjohtimet mitoitetaan maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinta-alojen mukaisesti. (1, s. 88.)

TAULUKKO 2. Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinta-alat (1, s. 88)

| Materiaali | Poikkipinta-ala |
|------------|--------------------|
| kupari | 16 mm ² |
| alumiini | 35 mm ² |
| teräs | 50 mm ² |

3.2 Terminen lujuus

Mitottaessa maadoituselektrodeja ja -johtimia termisen lujuuden osalta on huomioitava vikavirran aiheuttama lämpötilan nousu. Vikavirran nostaessa maadoituselektrodien ja -johtimien lämpötilaa, ei materiaalin lujuus saa heikentyä eivätkä ympäröivät materiaalit kuten eristeet tai betoni saa vaurioitua.

Kun viankesto aika on alle 5 sekuntia, maadoituselektrodien ja -johtimien vähimmäispoikkipinta-ala lasketaan kaavalla 1 (1, s. 109).

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad \text{KAAVA 1}$$

A = poikkipinta-ala (mm²)

i = johtimen virran tehollisarvo (A)

t_f = vikavirran kesto aika (s)

K = virrallisen osan materiaalista riippuva vakio; ne on esitetty taulukossa 3 yleisimmille materiaaleille olettaen alkulämpötilan olevan 20 °C

β = virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C; arvot on esitetty taulukossa 3

θ_i = alkulämpötila (°C), alkulämpötilana Suomessa yleensä käytetään 20 °C

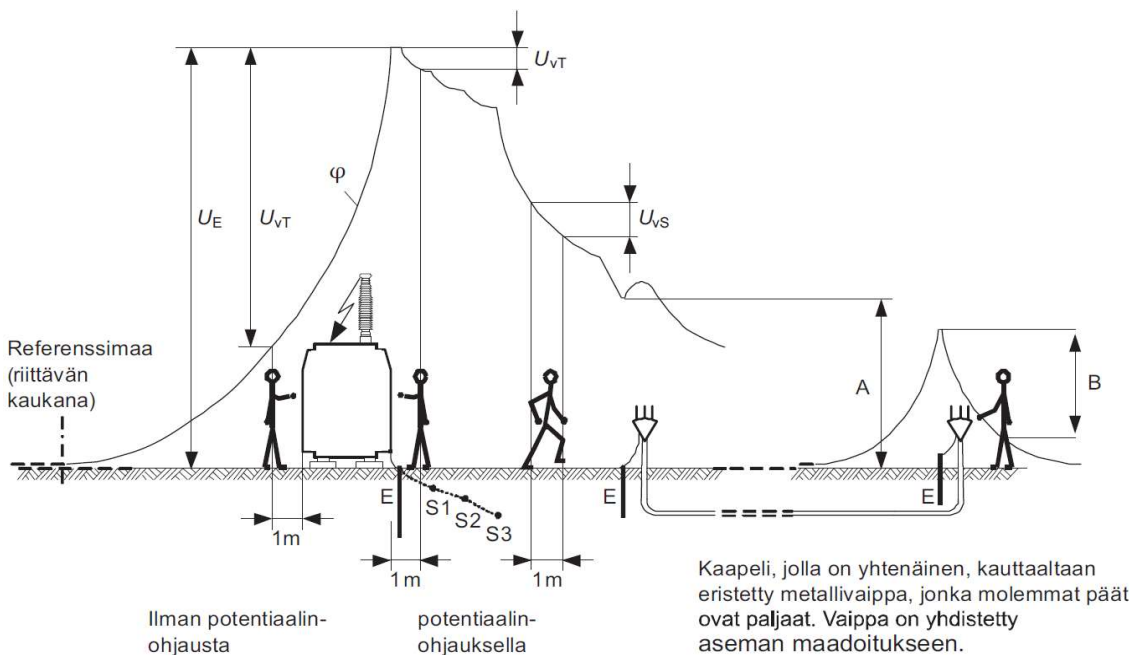
θ_f = loppulämpötila (°C), loppulämpötila on valittava materiaalin ja asennusympäristön mukaan, yleensä 300 °C

TAULUKKO 3. Materiaalivakiot (1, s. 109)

| Materiaali | β [°C] | K [A * $\sqrt{s/mm^2}$] |
|------------|--------------|----------------------------|
| kupari | 234,5 | 226 |
| alumiini | 228 | 148 |
| teräs | 202 | 78 |

3.3 Kosketusjännite

Sähköturvallisuuden kannalta maadoitusten ensisijaisena tehtävänä on estää kosketusjännitteen nousu liian suureksi vikatilanteen aikana. Siksi on tärkeää, että maadoitusjärjestelmän suoritussyky on riittävä. Henkilön koskettaessa suojamaadoitettua osaa maasulkuvian aikana hän kytkeytyy osaksi vikavirtapiiriä ja tällöin hänen yli alkaa vaikuttaa kosketusjännite U_{VT} . Kosketusjännite voi periaatteessa olla maadoitusjännitteen U_E suuruinen, mutta todellisuudessa se on aina pienempi maadoituselektrodien ja potentiaaliohjauselektrodien ansiosta kuten kuvasta 4 nähdään. Kuvassa 4 on esitetty muuntamalla tapahtuvan maasulkuvian aiheuttamat jännitteet.



KUVA 4. Maan potentiaaliprofiili maasulkuvian aikana (1, s. 23)

U_E = maadoitusjännite

U_{VT} = kosketusjännite

U_{VS} = askeljännite

A = siirtävästä potentiaalista johtuva kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu vain toisesta päästään

B = siirtävästä potentiaalista johtuva kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu molemmista päistään

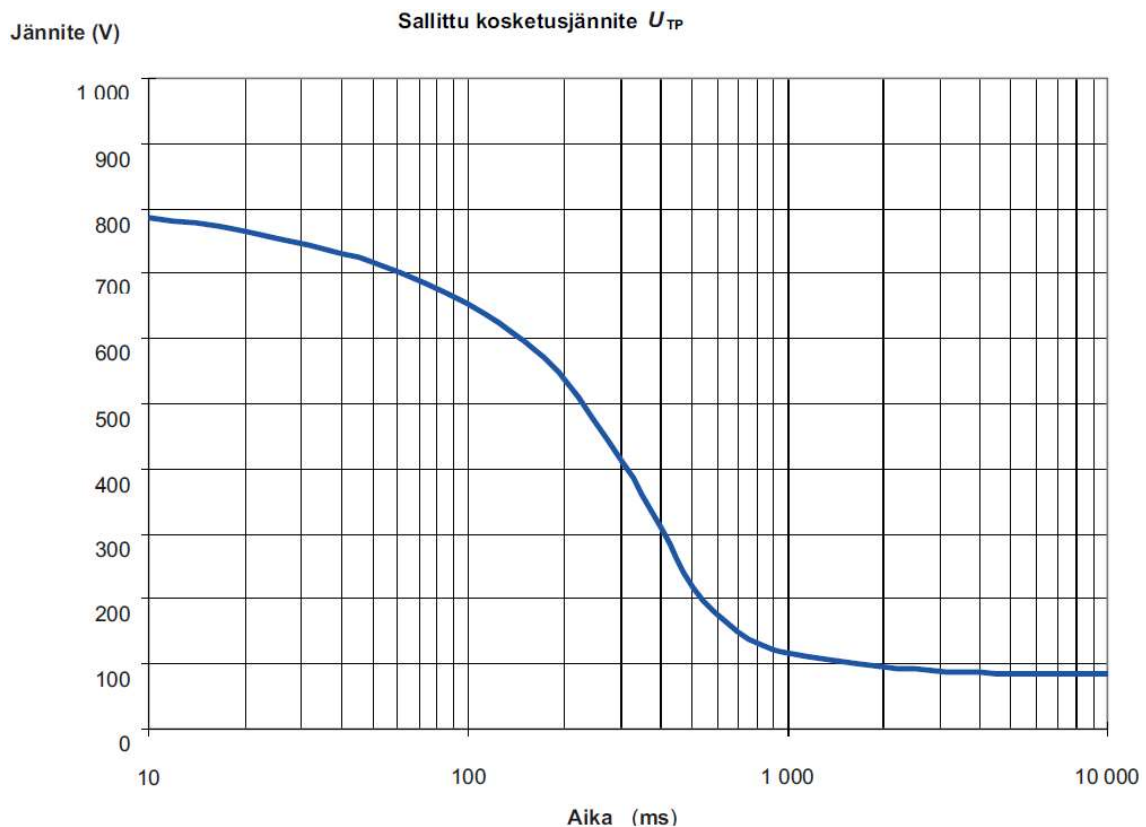
φ = maapinnan potentiaali

E = maadoituselektrodi

$S1-S3$ = maadoituselektrodiin yhdistetyt potentiaaliohjauselektrodit

Maasulkuviasta voi aiheutua suuruudeltaan sellainen virta, joka kulkiessaan sydämen alueen kautta aiheuttaa sydänkammiovärinän. SFS 6001:2018 -standardissa kehon kautta kulkevan virran raja-arvo on muutettu jännitteen raja-arvoiksi, jotta sitä voidaan verrata laskettuihin kosketusjännitteisiin.

Askeljännitteiden raja-arvot ovat paljon suurempia kuin kosketusjännitteiden raja-arvot, koska virtatie kehon läpi on erilainen. Vaatimusten täytyessä kosketusjännitteen osalta voidaan olla varmoja, että vaatimukset täyttyvät myös askeljännitteiden osalta. (1, s. 87.) Kuvasta 5 nähdään, että sallittuun kosketusjännitteen raja-arvoon vaikuttaa vian kesto aika. Suurin sallittu jatkuva kosketusjännite on 80 V.



KUVA 5. Sallitun kosketusjännitteen raja-arvo vian keston suhteen (1, s. 93)

3.4 Maadoitusjännite

Maavirta I_E on maasulkuvirran I_f osa, joka kulkiessaan maadoitusimpedanssin Z_E kautta maahan aiheuttaa maadoitusjännitteen U_E (1, s. 19).

Maadoitusjännite on laitteiston suojamaadoitetun osan ja referenssimaan välinen potentiaaliero, joka lasketaan kaavalla 2 (9, s. 8).

$$U_E = Z_E \times I_E \quad \text{KAAVA 2}$$

U_E = maadoitusjännite (V)

Z_E = maadoitusimpedanssi (Ω)

I_E = maavirta (A)

3.5 Maadoitusjännitteen tavoitetaso

Sallittu maadoitusjännite riippuu kosketusjännitteen suuruudesta, joka lasketaan kaavalla 3 (9, s. 8).

$$U_E = F \times U_{TP} \quad \text{KAAVA 3}$$

U_E = maadoitusjännite (V)

F = kerroin, jonka suuruus riippuu asennuksen yksityiskohdista, Suomessa arvo on yleensä 2

U_{TP} = kosketusjännite (V)

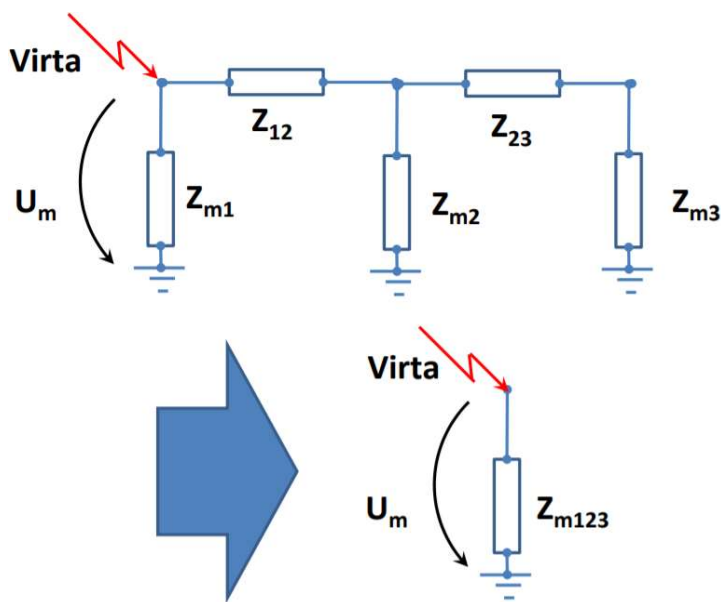
Kuten taulukosta 4 nähdään, kun poiskytkentäaika on 0,6 s maadoitusjännite saa olla enintään 174 V ja $2 \times U_{TP}$ maadoitusryhmään kuuluvalla laitteistolla maadoitusjännite saa olla enintään 348 V.

TAULUKKO 4. Sallitun maadoitusjännitteen arvot eripituisilla laukaisujailla (9, s. 7)

| Laukaisuaika s | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 2,0 | 5,0 | 10,0 |
|-------------------------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $U_E = U_{TP}$ | 415 | 305 | 220 | 174 | 143 | 130 | 120 | 117 | 96 | 86 | 85 |
| $U_E = 2 \times U_{TP}$ | 830 | 610 | 440 | 348 | 286 | 260 | 240 | 234 | 192 | 172 | 170 |
| $U_E = 4 \times U_{TP}$ | | 1220 | 880 | 696 | 572 | 520 | 480 | 468 | 384 | 344 | 340 |
| $U_E = 5 \times U_{TP}$ | | | 1100 | 870 | 715 | 650 | 600 | 585 | 480 | 430 | 425 |

3.6 Resultoiva maadoitusimpedanssi

Resultoiva maadoitusimpedanssi on sellaisen maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi, jossa on liitetty yhdistysjohtimilla, kuten kj-kaapelin kosketussuojilla tai kosketussuojilla sekä keskusköydellä toisiinsa enemmän kuin kaksi maadoituselektrodia. Resultoiva maadoitusimpedanssi vaihtelee riippuen tarkastelukohdasta: maadoitusketjun keskellä se on pienimmillään ja reunoilla suurimmillaan. Kuvassa 6 on havainnollistettu resultoivan maadoitusimpedanssin muodostaminen esimerkiksi kolmen puistomuuntamon maadoituselektrodijärjestelmien ketjumaisessa kytkeytymisessä.



KUVA 6. Resultoivan maadoitusimpedanssin muodostaminen (5, s. 19)

Kuvasta 6 voidaan johtaa kaava, jolla voidaan laskea resultoiva maadoitusimpedanssi maadoitusjärjestelmän eri pisteille. Jos vika olisi muuntamolla 2 (Z_{m2}), resultoivan maadoitusimpedanssin arvo voidaan laskea kaavalla 4. (5, s. 19.)

$$Z_{m123} = \left(\frac{1}{Z_{m2}} + \left(\frac{1}{Z_{12} + Z_{m1}} \right) + \left(\frac{1}{Z_{23} + Z_{m3}} \right) \right)^{-1} \quad \text{KAAVA 4}$$

Z_{mx} = muuntamon maadoitusjärjestelmä (Ω)

Z_{xx} = muuntamoiden yhdistysjohto (Ω)

Suurienkin maadoitusjärjestelmien resultoivat maadoitusimpedanssit voidaan laskea samalla tavalla, mutta se olisi hyvin työlästä. Trimble NIS -verkkotietojärjestelmässä on resultoivien maadoitusimpedanssien laskentatyökalu, jolla resultoivat maadoitusimpedanssit saadaan laskettua laitteistokohtaisesti.

3.7 OSSV:n jakeluverkossa käytettävät kj-kaapelityypit ja -pituudet

Taulukossa 5 on esitetty OSSV:n jakeluverkossa käytettävät kaapelityypit pituuksineen. Suurin osa kaapeleista on AHXAMK-W Wiski-kaapelia, jonka keskellä kulkee 35 mm² kupariköysi ja 240 mm² Wiski-kaapelin keskellä kulkee 70 mm² kupariköysi. Keskusköydetöntä AHXAMK-WP 3x50 Wiski Plain -kaapelia on 4,9 kilometriä, mutta sitä ei esiinny yhteen liitetyissä maadoitusjärjestelmissä. Vanhempia AHXCMKM-kaapeleita esiintyy pienissä määrin yhteen liitetyissä maadoitusjärjestelmissä, näissä kaapeleissa on kuparista valmistettu 16 mm² konsentrinen johdin. Wiski-kaapeleilla on myös alumiinilaminaatista valmistetut kosketussuojat keskusköyden lisäksi. Liitteen 1 AHXAMK-W -taulukon mukaan Wiski-kaapeleiden nollapiirin resistanssi r_n on 0,466–0,910 Ω /km riippuen kaapelityypistä. Nollapiirin resistanssi vaikuttaa resultoivan maadoitusimpedanssin suuruuteen. Liitteessä 1 on esitetty Wiski-kaapeleiden teknisiä tietoja.

TAULUKKO 5. Kj-kaapelit (3)

| Kaapelin tyyppi | pituus (km) |
|---------------------------|-------------|
| AHXW150 AHXAMK-W 3X150/35 | 160,9 |
| AHXW185 AHXAMK-W 3X185/35 | 40,4 |
| AHXW240 AHXAMK-W 3X240/70 | 17,3 |
| AHXW120 AHXAMK-W 3X120/35 | 11,7 |
| AHXW95 AHXAMK-W 3X95/35 | 10,8 |
| AHXWP50 AHXAMK-WP 3x50 | 4,9 |
| AHXW50 AHXAMK-W 3x50/35 | 3,9 |
| AHXW70 AHXAMK-W 3X70/35 | 3,0 |
| AHXCM120 AHXCMKM 3x120 | 2,3 |
| AHXCM70 AHXCMKM 3x70 | 2,0 |

4 MAADOITUSTEN JA MAAPERÄN MITTAUS

Maadoitusten mittaaminen on olennaista sähköturvallisuuden kannalta, sillä mittaamalla todetaan riittävän pienen maadoitusvastuksen arvo. Näin vikatilanteessa kosketus- ja askeljännite pysyvät SFS 6001:2018 -standardin määrittelemien rajojen sisäpuolella.

4.1 Mittausajankohta

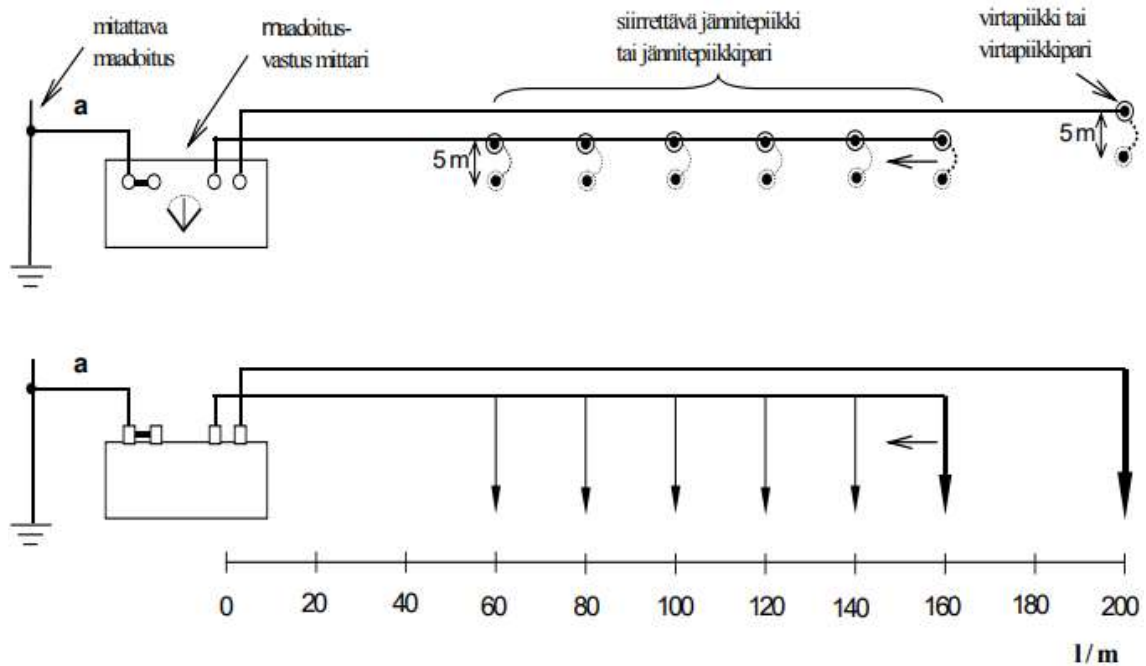
Maadoitusmittaukset sekä maaperän resistiivisyyden mittaukset tulee suorittaa sulan maan aikana. Maadoitusresistanssi mitataan laitteiston käyttöönoton yhteydessä sekä määräajoin tehtävissä tarkastuksissa. Yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluville laitteistoille ei tarvitse suorittaa mittauksia, mutta uusien laitteistojen, kuten jakelumuuntamoiden, liittyminen yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään tulee varmistaa mittaamalla. (4, s. 147.)

4.2 Maadoitusmittausmenetelmät

Yleisimpiä jakeluverkkoyhtiöiden käyttämiä maadoitusmittausmenetelmiä ovat käännepistemenetelmä sekä voltti-ampeeri-menetelmä. Näistä yleisimmin käytetty menetelmä on käännepistemenetelmä, sillä sen suorittaminen ei vaadi erikoislaitteistoa, käyttökeskeytyksiä tai suurta ammattitaitoa, kuten esimerkiksi voltti-ampeeri-menetelmä vaatii. Käännepistemenetelmän heikkoutena kuitenkin on pitkähköt mittajohdot ja mittaustuloksen epätarkkuus tiheästi asutetuilla alueilla. Neutraalin maan löytäminen voi olla mahdotonta, koska alueella voi esiintyä paljon maadoituselektrodeja ja esteitä kuten kiinteistöjä. Voltti-ampeeri-menetelmällä suoritettu mittaus antaa tarkimman mahdollisen tuloksen, sillä se vastaa parhaiten todellista maasulkutilannetta.

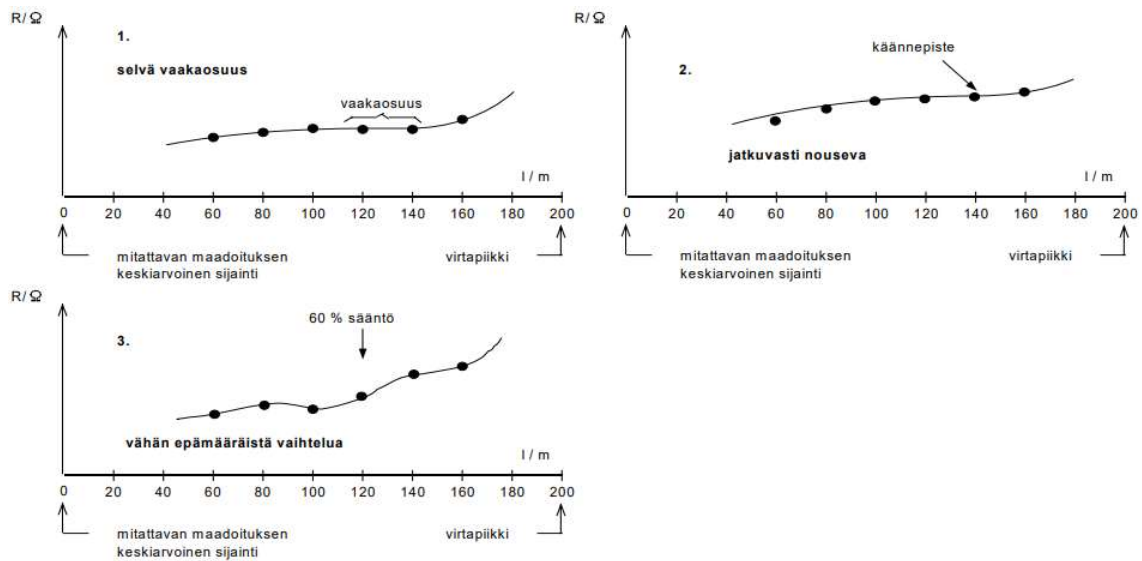
4.2.1 Käännepistemenetelmä

Käännepistemenetelmässä (kuva 7) mittaus suoritetaan 100 tai 200 metrin mittajohtimilla ja jännitepiikkiä siirretään 10 tai 20 metrin välein. Näin saadaan muodostettua oleelliset maadoitusvastuskäyrän pisteet. Huonosti johtavilla maaperillä voidaan käyttää virta- ja jännitepiikkiparia.



KUVA 7. Käännepistemittausmenetelmä (7, s. 13)

Mittauksella pyritään löytämään mittauspisteiden luomasta käyrästä vaakaosuus tai käännepiste, joka on esimerkiksi tutkittavan pylväsmuuntamon maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi. Jos käyrällä on epämääräistä vaihtelua, voidaan maadoitusvastus määrittää 60 %:n säännöllä. Säännössä oletetaan, että potentiaalien käännepisteen etäisyys on 60 % maadoituselektrodista virtapiikin suuntaan. Mikäli käyrän muoto poikkeaa kuvassa 8 esitetystä käyrän muodoista, täytyy mittausta paikkaa tai -suuntaa vaihtaa, kunnes saadaan muodostettua käyrä, jolta voidaan lukea oikea mittaustulos. (7, s. 5–6.)



KUVA 8. Käännepistemethodin käyrämuodot (7, s. 14)

4.2.2 Voltti-ampeeri-menethodä

Voltti-ampeeri-menethodässä mitataan tutkittavan maadoituselektrodin yli vaikuttavaa jännitettä ja sen kautta kulkevaa mittaussvirtaa. Menethodällä on tarkoitus jäljitellä todellista maasulkutilannetta johtamalla mittauksessa käytetyn virransyöttömuuntajan mittaussvirta I_m tutkittavaan maadoituselektrodiin esimerkiksi avojohtoa myöten. Virta kulkee kauempana sijaitsevan vastamaadoituselektrodin ja mitattavan käyttömaadoituselektrodin kautta. (4, s. 150.)

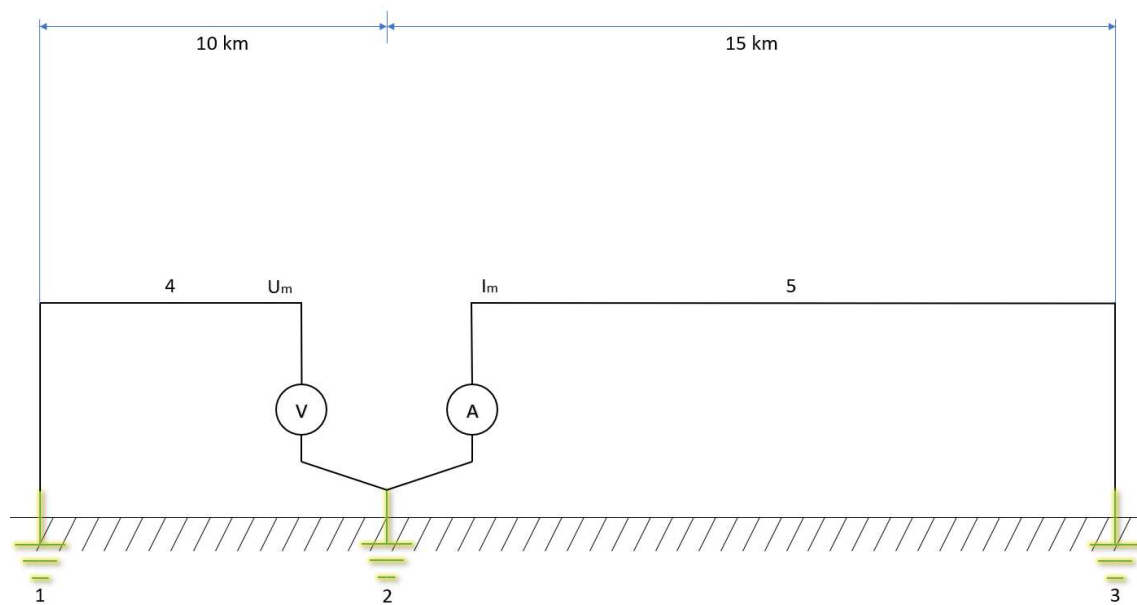
Maadoitusjännite mitataan apuelektrodin ja käyttömaadoituselektrodin väiltä. Koska mitään virtaa ei kulje apuelektrodin kautta ja se on käyttö- ja vastamaadoituselektrodin luoman maadoituskentän ulkopuolella, on mitattu jännite suoraan maadoitusjännite U_m . (4, s. 150.)

Mittauksessa käytettävä apuelektrodi ja vastamaadoituselektrodi ovat kaukana toisistaan ja mitattavasta käyttömaadoituselektrodista. Apuelektrodi ja vastamaadoituselektrodi viedään eripuolille mitattavaa maadoituselektrodia. Mittauksessa on noudatettava erityisvaatimuksia, koska virransyöttömuuntajalla voidaan syöttää suuria jännitteitä mittausspiiriin. (4, s. 150.)

Virransyöttöjohdoksi voidaan valita esimerkiksi 110 kV:n tai 20 kV:n avojohto, jolla on sopiva virransyöttöpaikka. Virransyöttöjohtoon syötetty virta aiheuttaa syöttökohteessa potentiaalinnousun,

joka on mittausvirran ja maadoitusvastuksen tulo. Esimerkiksi syöttökohteen ollessa sähköasema, jonka maadoitusvastus on 1Ω ja syötetyn mittausvirran ollessa 50 A , potentiaali nousee 50 volttiin, jolloin vaaratekijöitä ei aiheudu. Jos virransyöttökohteeksi valittaisiin esimerkiksi puistomuuntamo, jonka maadoitusvastus on 5Ω ja syötetty mittausvirta on 50 A , potentiaali nousisi jopa 250 volttiin, joka olisi vaarallinen muuntopiirin kuluttajille. Suurin sallittu jatkuva maadoitusjännite on 80 V SFS 6001:2018 -standardin mukaisesti. (7, s. 8.)

Kuvassa 9 on esitetty voltti-ampeeri-menetelmän mittausperiaate. Jännitteen mittausjohtimeksi voidaan esimerkiksi valita 20 kV avojohto tai puhelinjohto, joka ylettyy vähintään 10 km päähän mitattavasta kohteesta. Osakaan mittausjohtimesta ei saa olla saman suuntainen virransyöttöjohdon kanssa. Jännitteen mittausjohtimen ja virransyöttöjohdon välisen kulman täytyy olla vähintään 90 astetta. (7, s. 8.)



KUVA 9. Voltti-ampeeri-mittauksen mittausjärjestely (4, s. 151)

- 1 = apuelektrodi
- 2 = käyttömaadoituselektrodi
- 3 = vastamaadoituselektrodi
- 4 = jännitteenmittausjohdin

4.3 Maaperän resistiivisyyden mittaus

Yleisin maaperän resistiivisyyden arvon määrittämiseen käytetty menetelmä on Wenner-menetelmä. Mittausmenetelmässä (kuva 10) maahan upotetaan neljä samanpituista mittauselektrodia (maapiikkiä) suoraan linjaan tasain välein a . Mittauselektrodien välisten etäisyyksien a tulee olla kolme kertaa niin suuret kuin yhden mittauselektrodin upotussyvyys h on, suositeltava vähimmäisetäisyys on neljä metriä. Mittauselektrodit upotetaan asennettavan elektrodin asennussyvyyteen esimerkiksi 0,7 metriä maanpinnasta mitattuna. Mittalaite G syöttää mittausvirran kahden uloimman elektrodin (E ja H) välille ja mittaa jännitepotentiaalihäviön sisempien piikkien (ES ja S) väliltä. Koska maanalaiset metallirakenteet, kuten vesijohdot ja maadoituselektrodit sekä pohjavesikerrokset, voivat vääristää mittaustulosta, täytyy suorittaa lisämittaus, jossa mittaussuoraan käännetään 90 asetetta alkuperäiseen mittaussuoraan nähden. (10, s. 5.)

Maadoitusvastustesteri laskee maadoitusvastusarvon R_E syötetyn mittausvirran ja jännitepotentiaalihäviön avulla. Maadoitusvastusarvon avulla voidaan laskea maaperän resistiivisyys ρ kaavalla 5. (10, s. 5.)

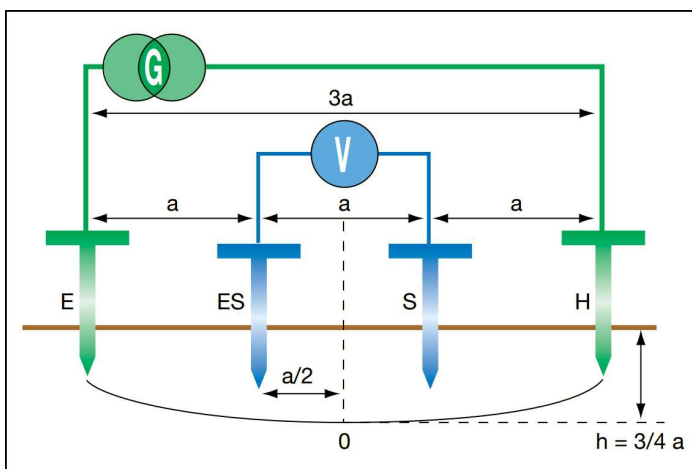
$$\rho = 2\pi \times a \times R_E$$

KAAVA 5

ρ = maaperän resistiivisyys (Ω/m)

a = mittauselektrodien etäisyys (m)

R_E = maadoitusvastus (Ω)



KUVA 10. Wenner-mittausmenetelmä (10, s. 5)

Taulukossa 6 on esitetty tyypillisimmät resistiivisyyden arvot eri maaperille sekä betonille ja vedelle. Näitä arvoja käytetään maadoitusjärjestelmien suunnitteluvaiheessa.

TAULUKKO 6. Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet (1, s. 147)

| Aine | 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 tai maassa | 100 | 50...500 |
| Betoni kuivana | 10000 | 2000...100000 |
| Järvi- ja jokivesi | 250 | 100...400 |
| Pohja- kaivo- ja lähdevesi | 50 | 10...150 |
| Merivesi (Suomenlahti) | 2,5 | 1...5 |

Maaperän resistiivisyyden mittaamiseen voidaan käyttää mitä tahansa maadoitusvastusmittaria, johon voi liittää neljä mittauselektrodia, kuten Chauvin Arnoux:n valmistamaa CA 6460 -laitetta (kuva 11). Mittauselektrodina voidaan käyttää esimerkiksi syvämaadoituselektrodia tai työmaadoituselektrodia. Mittauselektrodia upottaessa maahan tulee ottaa huomioon, että elektrodin kärki ei osu kaapeliin.



KUVA 11. Maadoitusvastusmittari (11)

5 YHTEEN LIITETTYJEN MAADOITUSJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU, TOEUTUS JA VARMISTAMINEN

5.1 Suunnittelu

Suunnitteludokumenteista on nähtävä maadoitusten rakenne, mitoituslaskelmat ja yhdystopologia täsmällisesti. OSSV:llä nämä dokumentit tallennetaan Trimble NIS -verkkotietojärjestelmään. Ensimmäiseksi määritellään sähköaseman syöttämän jakeluverkon maasulkuvirta I_f ja 1-vaiheisen maasulkuvian automaattinen poiskytkentäaika sekä syötettävän laitteiston maadoitusryhmä. Suomessa maadoitusryhmänä käytetään usein $2 \times U_{TP}$. Näillä lähtötiedoilla voidaan laskea laitteisto-kohtainen resultoivan maadoitusimpedanssin tavoitearvo kaavalla 6, joka on johdettu kaavoista 2 ja 3. (8, s. 14.)

$$Z_E = \frac{F \times U_E}{I_f} \quad \text{KAAVA 6}$$

Z_E = resultoivan maadoitusimpedanssin tavoitearvo (Ω)

F = kerroin, jonka suuruus riippuu asennuksen yksityiskohdista, Suomessa arvo on yleensä 2

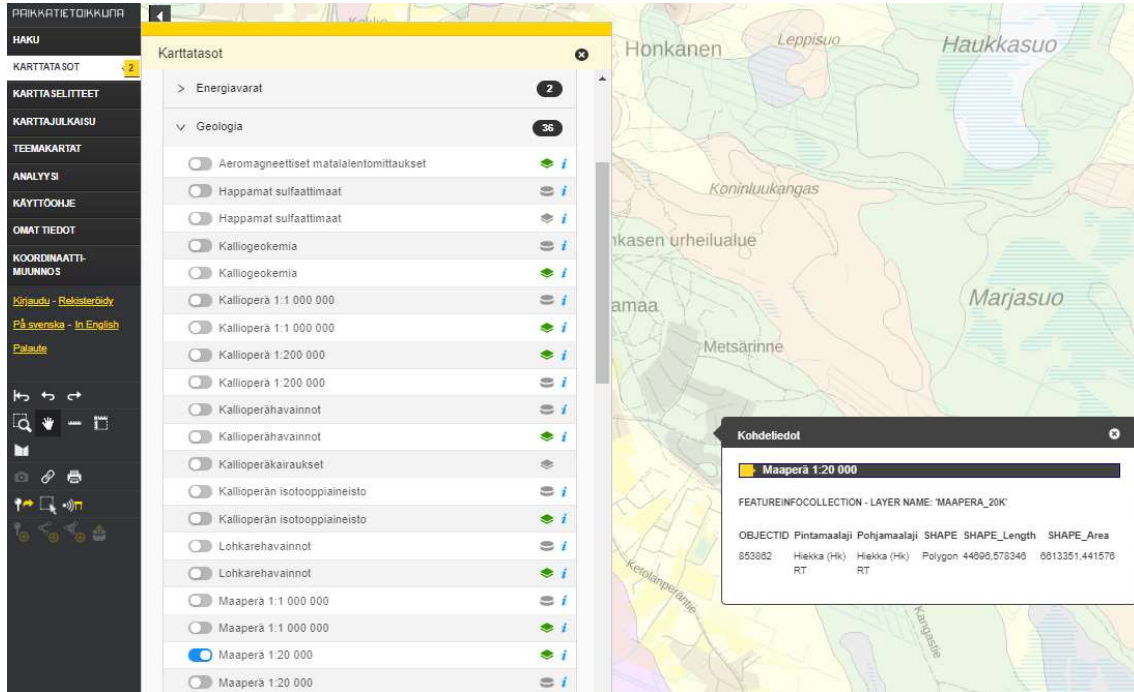
U_E = maadoitusjännite (V)

I_f = maasulkuvirta (A)

Pisin maasulkuvian poiskytkentäaika OSSV:n jakeluverkossa on 0,6 sekuntia ja tyypillisin muuntamoilla oleva maadoitusryhmä on $2 \times U_{TP}$, näin ollen suurin sallittu kosketusjännitteen arvo on 348 V. OSSV:n normaalin käyttötilanteen sammutetun jakeluverkon maasulkuvirrat ovat kokemusperäisesti 5–8 A, mutta laskennoissa käytetään 10 A:n maasulkuvirtaa varmuuden vuoksi. Näillä lähtötiedoilla muuntamon resultoivan maadoitusimpedanssin tavoitearvoksi saadaan noin 35 Ω .

Suunnitteluvaiheessa maadoitusverkkolaskennan lähtötietoina voidaan käyttää maaperäkartasta johdettua arviota maaperän resistiivisyydelle (kuva 12) sekä maadoituselektrodien rakenne- ja geometriatietoja tai vaihtoehtoisesti olemassa olevaa maadoitusresistanssimittaustietoa (esim. käännepistemenetelmällä mitattu pylväsmuuntamon vaakamaadoituselektrodin maadoitusresistanssi). Suunnittelun edetessä maastosuunnitteluvaiheeseen maadoitusjärjestelmän todelliselta sijainnilta

mitataan maaperän resistiivisyys esimerkiksi Wenner-menetelmällä. Mittaustuloksen sekä suunnittelussa valitun maadoituselektrodin rakenne- ja geometriatietojen perusteella lasketaan todellinen resultoiva maadoitusimpedanssi, jota verrataan tavoitearvoon. (8, s. 14.)



KUVA 12. Maaperäkartta (12)

Maadoituselektrodin maadoitusresistanssi R_E riippuu maadoituselektrodien rakennetiedoista, geometriasta ja maaperän resistiivisyydestä ρ_E . Vaikuttavin tekijä maadoitusresistanssin arvoon on elektrodin pituus, ei niinkään poikkipinta-ala. Poikkipinta-alan tulee kuitenkin olla riittävän suuri, jotta riittävä korroosionkestävyys, mekaaninen ja terminen lujuus saavutettaisiin. (1, s. 148.)

Taulukossa 7 on esitetty laskentakaavat erityyppisille maadoituselektrodeille. Maadoitusresistanssi riippuu maadoituselektrodin mitoista, asennustavasta sekä maaperän resistiivisyydestä.

TAULUKKO 7. Erityyppisten maadoituselektrodien maadoitusresistanssin laskentakaavoja (1, s. 148)

| Elektrodin laatu | Kaava | Huomautukset |
|---------------------------------------|---|--------------|
| Pallo pinnassa | $R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$ | |
| Levy pinnassa | $R_E = \frac{\rho_E}{2D}$ | $s \ll D$ |
| Pystysuora tanko tai putki pinnassa | $R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$ | $d \ll L$ |
| Pystysuora tanko tai putki upotettuna | $R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h + L}{4h + L}$ | $d \ll L$ |
| Vaakasuora johdin pinnassa | $R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$ | $d \ll L$ |
| Vaakasuora johdin upotettuna | $R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$ | $d \ll 4h$ |
| Ruudukko | $R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$ | |

L = elektrodin pituus (m)

D = pallon, levyn tai ruudukon halkaisija (m)

d = johtimen halkaisija tai puolet nauhan leveydestä (m)


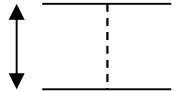






s = levyn paksuus (m)

ρ_E = maaperän resistiivisyys (Ωm)

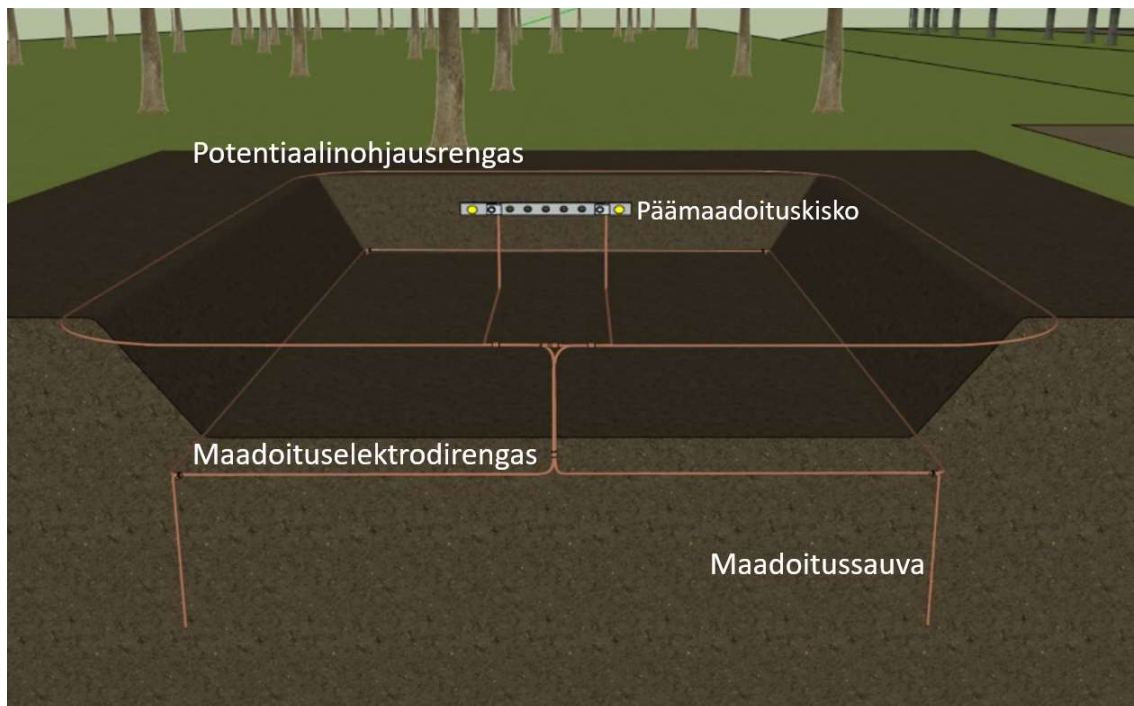
h = elektrodin upotussyvyys (m)

Taulukossa 8 on esitetty samalla maadoituselektrodin kokonaispituudella saavutettavan maadoitusresistanssin suhde yhteen vaakamaadoituselektrodiin, kun maadoituselektrodin upotussyvyys on 0,7 metriä. Esimerkiksi 60 metriä pitkän rengasmaisen maadoituselektrodin maadoitusresistanssi olisi 1,08 kertaa suurempi kuin yhden 60 metriä pitkän vaakamaadoituselektrodin, kun upotussyvyys on 0,7 metriä.

TAULUKKO 8. Samalla maadoituselektrodin kokonaispituudella maadoitusresistanssin suhde vaakasuoran johtimen maadoitusresistanssiin (1, s. 149)

| Elektrodin pituus L (m) | | 20 | 60 | 200 | 600 |
|---|---|--|-----|-----|-----|
| Elektrodin muoto | | Maadoitusresistanssin suhde vaakasuoraan johtimen maadoitusresistanssiin | | | |
|  | | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 0,2 m |  | 133 | 144 | 155 | 159 |
| 2 m | | 109 | 123 | 135 | 143 |
| 20 m | | 92 | 98 | 109 | 119 |
|  | | 103 | 103 | 102 | 102 |
|  | | 107 | 106 | 106 | 105 |
|  | | 116 | 115 | 114 | 112 |
|  | | 136 | 135 | 132 | 129 |
|  | | 159 | 158 | 154 | 148 |
|  | | 109 | 108 | 107 | 106 |

OSSV:n maakaapeloituun jakeluverkkoon liittyvien puistomuuntamoiden sekä erotinasemien maadoituselektrodijärjestelmä on toteutettu potentiaalinhjousrenkaalla, maadoituselektrodirenkaalla sekä maadoituselektrodirenkaan nurkkiin asennettavilla maadoitussauvoilla (kuva 13) (13).



KUVA 13. Puistomuuntamon maadoituselektrodijärjestelmä (13)

Maadoituselektrodijärjestelmän geometrian vuoksi verkkotietojärjestelmä ei osaa laskea maadoitusresistanssia järjestelmälle. Tällaisen maadoituselektrodijärjestelmän kokonaismaadoitusresistanssi voidaan laskea kaavalla 7. Kaava on johdettu vastusten rinnankytkentälaskukaavasta. Kaavan toimivuudesta ei ole vielä täyttä varmuutta. Muhoksella sijaitsee puistomuuntamon maadoituselektrodijärjestelmä, joka on kuvan 13 mukainen. Tämä maadoituselektrodijärjestelmä ei ole vielä yhteydessä muihin maadoituselektrodeihin. Maaperän sulaessa maadoituselektrodijärjestelmän maadoitusresistanssi mitataan käännepestemenetelmällä. Tätä mitattua arvoa verrataan kaavalla 7 laskettuun arvoon, jotta laskentakaavan toimivuudesta voidaan olla varmoja.

$$R_E = \left(\left(\frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d} \times a \right)^{-1} + \left(\frac{\rho_E \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}}{n} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad \text{KAAVA 7}$$

R_E = maadoitusresistanssi (Ω)

L = elektrodin pituus (m)

d = johtimen halkaisija (m)

ρ_E = maaperän resistiivisyys (Ωm)

h = elektrodin upotussyvyys (m)

a = kerroin taulukosta 8 (s. 33)

n = maadoitussauvojen määrä

Kerroin a voidaan katsoa taulukosta 8. Puistomuuntamon maadoituselektrodirenkaan ollessa noin 20–25 metriä pitkä kertoimena voidaan käyttää 1,09. Maadoitussauvoja on neljä maadoituselektrodirenkaan nurkissa. Tästä on poikkeuksena ennen 2000-lukua rakennetut muuntamot, joissa sauvoja on kaksi.

OSSV:n maakaapeloituun jakeluverkkoon liittyvillä puistomuuntamoilla ja erotinasemilla käytettävien maadoituselektrodijärjestelmien maadoitusresistanssi maaperän resistiivisyyden ollessa 1000 Ωm on noin 44 Ω . Kun kolme tällaista maadoituselektrodijärjestelmää yhdistetään ketjumaisesti toisiinsa AHXAMK-W 3x150/35 -kaapelilla maadoituselektrodijärjestelmien välimatkojen ollessa 1 km, saadaan resultoiviksi maadoitusimpedansseiksi maadoitusjärjestelmän reunoille 15,12 Ω ja keskelle 14,85 Ω Trimble NIS:n laskentatyökalulla (kuva 14).

| Tunnus | Pit./m - Pituus | ZA/ohm = Alkusalun maadoitusimpedanssi | ZL/ohm = Loppusalun maadoitusimpedanssi | Re/ohm - Maadoituselektrodin resistanssi | RJ/ohm - Johdon resistanssi |
|----------|-----------------|--|---|--|-----------------------------|
| reuna | 0.0 | 15.120 | 15.120 | 44.000 | 0.000 |
| AHXW150* | 999.9 | 14.850 | 15.120 | 0.000 | 0.829 |
| keski | 0.0 | 14.850 | 14.850 | 44.000 | 0.000 |
| AHXW150* | 1000.3 | 14.850 | 15.120 | 0.000 | 0.829 |
| reuna | 0.0 | 15.120 | 15.120 | 44.000 | 0.000 |

KUVA 14. Maadoitusjärjestelmän laskentatulokset (3)

Kuten laskentatuloksista nähdään, maadoituselektrodijärjestelmien resultoivat maadoitusimpedanssit ovat alle tavoitearvon. Voidaan todeta, että suunnitelma täyttää vaatimukset. Jos jokin maadoitusjärjestelmän resultoiva maadoitusimpedanssi on yli tavoitearvon, voidaan tilannetta korjata kolmella eri tavalla: siirtämällä muuntamo paremmin johtavaan maaperään, lisäämällä maadoituskia paremmin johtavaan maaperään sekä parantamalla tai lisäämällä yhteyksiä muihin muuntopiireihin. Tämä toimenpide parantaa koko maadoitusjärjestelmän resultoivia maadoitusimpedansseja. (8, s. 16–17.)

5.2 Maadoitusimpedanssin vähimmäisvaatimus

Mikäli jokin yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluva laitteisto ei täytä maadoitusryhmälle asetettua vaatimusta rezultoivan maadoitusimpedanssin osalta, on kannattavaa tarkastella maadoitusjärjestelmän kaikkien laitteistojen rezultoivia impedansseja. Maadoituselektrodeja kannattaa lisätä erityisesti sellaisiin pisteisiin, joissa maaperän ominaisresistiivisyys on pieni. Tämä toimenpide parantaa rezultoivaa maadoitusimpedanssia koko yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän osalta. Maadoitusjärjestelmän eri kohdissa maadoitusimpedanssin vähimmäisvaatimus voi vaihdella riippuen siitä, mikä aiheuttaa kyseiseen maadoitusjärjestelmään suurimman maasulkuvirran. (8, s. 17.)

Suurjännitesähkösaman kautta siirtyvien jännitteiden vaikutukset on aina selvitettävä erikseen, sillä maasulkuvirta 110 kV:n puolelta voi olla yli 100 kertaa suurempi kuin 20 kV:n maasulkuvirta. Selvitys tapahtuu sähköaseman maadoitusmittauksena ja kosketusjännitevaatimuksena voidaan pitää esimerkiksi $U_E = 2 \times U_{TP}$. (7, s. 9.)

5.3 Toteutus ja määräaikaistarkastukset

Laskelmat toteutettavien laitteistojen maadoitusimpedansseista tulee olla käytettävissä rakennusvaiheessa ennen laitteistojen käyttöönottoa. Maadoitusjärjestelmä on rakennettava suunnitelmien ja rakennekuvien mukaisesti. Mikäli toteutusvaiheessa on tarve poiketa suunnitelmasta, on vaikutukset laitteistojen maadoitusimpedansseihin tarkasteltava uudelleen. Mahdolliset poikkeamat on dokumentoitava. (8, s. 18.)

Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien eheys ja yhteys toisiinsa on varmistettava kunnossapitoon liittyvien tarkastusten yhteydessä. Maadoitusresistanssin arvoa ei tarvitse mitata, ellei lähtöarvoissa tai verkon rakenteessa ole tapahtunut olennaisia muutoksia. Tiedot tarkastuksista on dokumentoitava. (1, s. 149.)

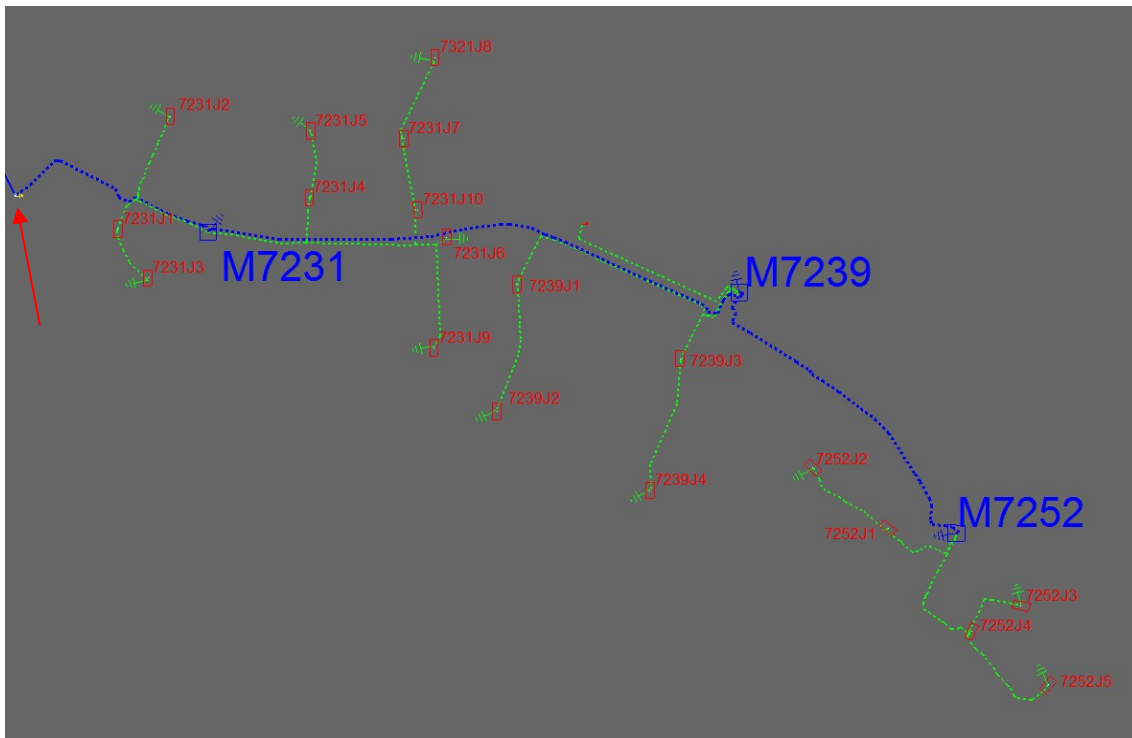
6 MAADOITUSVERKKOLASKENTA VERKKOTIETOJÄRJESTELMÄLLÄ

Yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien tarkasteluun, laskentaan, dokumentointiin sekä todentamiseen käytettiin Trimble NIS -verkkotietojärjestelmää. Laskenta onnistui hyvin verkkotietojärjestelmän laskentasovelluksella. Maakaapeloituun jakeluverkkoon liittyvien puistomuuntamoiden sekä erotinasemien maadoituselektrodijärjestelmän rakenteen vuoksi laskennan apuna täytyi käyttää Excel-työkalua, jolla laskettiin maadoitusresistanssi laitteistojen maadoituselektrodijärjestelmille.

6.1 Esimerkkikohte

Esimerkkikohteeksi valittiin Kempeleessä Metsärinteellä sijaitsevan kolmen muuntopiirin muodostama yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä. Tässä maadoitusjärjestelmässä on dokumentoitu kj-verkon maadoitusten lisäksi pj-verkon maadoitukset heikkojen maadoitusolosuhteiden vuoksi. Laajemmissa yhteen liitetyissä maadoitusjärjestelmissä tällaista ongelmaa ei esiinny. Alueen maaperä koostuu hiekasta, joten maaperän resistiivisyys on noin 2000 Ω m. Esimerkkikohteeksi olisi voitu valita myös paljon laajempi yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä, mutta sen tarkasteluun vaadittaisiin verkkotietojärjestelmän näkymä.

Kuvassa 15 kj-syöttö tulee kuvan vasemmasta reunasta kj-ilmajohdosta, joka on esitetty sinisellä viivalla ja kj-maakaapelin pylväslasku on korostettu kuvaan punaisella nuolella. Sinisellä katkoviivalla on esitetty kj-maakaapelit (tässä tapauksessa kaapelit ovat tyypiltään AHXAMK-W 3x150/35), vihreällä katkoviivalla on esitetty pj-verkon mukana kulkevat maadoitusköydet (Cu25). Siniset maadoitussymbolit kuvaavat puistomuuntamoiden maadoituselektrodijärjestelmiä ja vihreät kuvaavat pj-verkon mukana kulkevia maadoitusköysiä. Luettavuuden parantamiseksi taustakartta, pj-johdot, liittymät, johto-osat sekä muu alueen verkko on piilotettu.



KUVA 15. Metsärinteen yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä (3)

Tämän maadoitusjärjestelmän resultoiva maadoitusimpedanssi tarkastelukohdasta riippuen on 2,1–2,4 Ω , kun pj-verkon maadoitusköydet huomioidaan laskennassa. Jos pj-verkon maadoituksia ei huomioitaisi laskennassa, resultoiva maadoitusimpedanssi olisi tarkastelukohdasta riippuen noin 25 Ω . Tämäkin tulos olisi maasulkuvian aiheuttaman kosketusjännitteen kannalta riittävän pieni arvo, mutta tarkastelussa päädyttiin dokumentoimaan järjestelmä myös pj-verkon maadoitusten osalta, jotta se vastaisi paremmin todellista tilannetta.

Esimerkkikohteen muuntamot on aiemmin mitattu käännepestemenetelmällä. Mitattu maadoitusresistanssi on 1,5 Ω muuntamalla M7231, 1,2 Ω muuntamalla M7239 ja 0,5 Ω muuntamalla M7252. Vaikka käännepestemenetelmällä mitattua maadoitusresistanssin arvoa ei voida pitää luotettavana yhteen liitettyissä maadoitusjärjestelmissä, on tulos kuitenkin suuntaa antava. Jos lasketua resultoivaa maadoitusimpedanssia verrataan mitattuun maadoitusresistanssiin, voidaan nähdä, että ne ovat hyvin linjassa toistensa kanssa. Laskettu tulos olisi varmasti vieläkin pienempi, jos AHXAMK-W 3x150/35 -kaapeleiden keskusköydet otettaisiin laskentaan mukaan. Se olisi kuitenkin haastavaa sekä aikaa vievää senkin lisäksi, että ei voida olla varmoja onko keskusköydsillä luotettavaa maayhteyttä.

6.1.1 Suurjännitemaadoitukset

Muuntamon maadoituselektrodin laitekortille (kuva 16) on syötetty maadoituselektrodijärjestelmän geometria, maaperän resistiivisyys, maadoituselektrodirenkaan poikkipinta-ala ja kokonaispituus, asennussyvyys sekä laskettu resistanssi. ”Laskettu resistanssi” on laskettu kaavalla 7, joka on luettu laitekortille ”Älä päivitä laskettua resistanssia” -valinnalla. Laitekortilla näkyy myös käännepestemenetelmällä mitattu maadoitusresistanssin arvo.

| Maadoituselektrodi, EAM7252, 230 - KJ-MAADOITUSELEKTRODI, Muutettu | | | |
|---|----------|------------------|--|
| Yleistiedot Tekniset tiedot Sijainti Vapaat attribuutit -lista Liitteet Huomautus Kunnossapitotiedot Mittauserä | | | |
| Maadoitusverkkolaskennassa käytetty resistanssi: Laskettu resistanssi | | | |
| Laskettu resistanssi | | | |
| Geometria | Rengas | | |
| Maan ominaisvastus (ohmm) | 2000.000 | Halkaisija (m) | 0.000 |
| Poikkipinta-ala (mm ²) * | 25 | Välimatka (m) | 0.000 |
| Kokonaispituus (m) * | 25.000 | Syvyys (m) | 0.700 |
| Laskettu resistanssi (ohm) | 89.000 | Laske | <input checked="" type="checkbox"/> Älä päivitä laskettua resistanssia |
| Mitattu resistanssi | | | |
| Mitattu resistanssi (ohm) | 0.530 | Mittauspäiväys | 06.07.2018 |
| Mittaaja | Infratek | Mittausmenetelmä | Ei määritelty |
| OK | Hyväksy | Peruuta | Ohje |

KUVA 16. Muuntamo M7252 maadoituselektrodin laitekortti (3)

6.1.2 Pienjännitemaadoitukset

Muuntamolta M7252 kaapin 7252J4 kautta kaapille 7252J5 kulkeva maadoitusköysi on mallinnettu pistemäisenä maadoituselektrodina kaapilla 7252J5, jolle on annettu kyseisen maadoitusköyden kokonaispituus. Laitekortti on esitetty kuvassa 17. Kaappien 7252J4 ja 7252J3 välinen haara on dokumentoitu samalla tavalla. Haaralla oleva maadoitusköysi on mallinnettu pistemäisenä maadoituselektrodina kaapilla 7252J3, jolle on syötetty köyden kokonaispituus. Maadoitusjärjestelmän muikin pienjänniteverkon mukana kulkeva maadoitusverkko on dokumentoitu samalla tavalla, kuten kuvasta 15 voi nähdä. Maadoitusverkko on dokumentoitu näin, koska verkkotietojärjestelmä

osaa käsitellä vain tällaisia pistemäisiä maadoituselektrodeja, joille on syötetty tiedot. Maadoitus-
köydet ovat kuitenkin yhteydessä pistemäisiin maadoituselektrodeihin, jolloin laskenta osaa huo-
mioida ne.

| Maadoituselektrodi, 7252J5, 231 - PJ-MAADELEKTRODI, Uusi | | | |
|--|---------------------|------------------|---|
| Yleistiedot Tekniset tiedot Sijainti Vapaat attribuutit -lista Liitteet Huomautus Kunnossapitotiedot Mittauseriä | | | |
| Maadoitusverkkolaskennassa käytetty resistanssi: Laskettu resistanssi | | | |
| Laskettu resistanssi | | | |
| Geometria | 1 vaakasuora johdin | | |
| Maan ominaisvastus (ohmm) | 2000.000 | Halkaisija (m) | 0.000 |
| Poikkipinta-ala (mm ²) * | 25 | Välimatka (m) | 0.000 |
| Kokonaispituus (m) * | 255.700 | Syvyys (m) | 0.700 |
| Laskettu resistanssi (ohm) | 19.926 | Laske | <input type="checkbox"/> Älä päivitä laskettua resistanssia |
| Mitattu resistanssi | | | |
| Mitattu resistanssi (ohm) | 0.000 | Mittauspäiväys | |
| Mittaja | | Mittausmenetelmä | Ei määritelty |
| OK | Hyväksy | Peruuta | Ohje |

KUVA 17. Muuntamolta kaapille J4 kaapin J5 kautta kulkeva maadoituselektrodi (3)

6.1.3 Maasulkulaskenta

Laskettu resultoiva maadoitusimpedanssi tulee näkyviin yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluville laitteistoille (kuva 18). Tätä maadoitusimpedanssia voidaan myöhemmin hyödyntää maasulkulaskennoissa.

| Muuntamo, M7252, 52 - PUISTOMUUNTAMO | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------------------|----------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|--|
| Liitteet | | Huomautus | | Kunnossapitotiedot | | Mittauserä | |
| Yleistiedot | Tekniset tiedot | Maadoitukset | Sijainti | Vapaat attribuutit + | Vapaat attribuutit -lista + | | |
| Maadoitusmittaus | | Työmaadoitusvälineluokka (kA) | | 0.000 | | | |
| Suoja | | Työmaadoitusväline | | Ei määritetty | | | |
| Yhdistetty M7252 | | Maadoitusryhmä * | | 2UTP | | | |
| Käyttö | | | | | | | |
| Resultoiva maadoitusimpedanssi | | | | | | | |
| Maadoitusimpedanssi (ohm) | | 2.266 | | Maadoitusimpedanssin lähde | | Suunnitelma | |
| Maadoitusresistanssi (ohm) | | 2.265 | | Laskenta-aika | | 20.03.2020 14:28:02 | |
| Maadoitusreaktanssi (ohm) | | 0.031 | | | | | |
| Keskeytyskriittisyys Tavanomainen | | | | | | | |
| OK | | Hyväksy | | Peruuta | | Ohje | |

KUVA 18. Puistomuuntamon M7252 resultoiva maadoitusimpedanssi (3)

6.2 Yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät OSSV:n jakeluverkossa

OSSV:n jakelualueelle saatiin muodostettua 23 yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää. Näihin järjestelmiin kuuluu yhteensä 243 puistomuuntamoa, joista pieni osa on erotinasemia. Suppeimmat järjestelmät muodostuvat kolmesta jakelumuuntamosta. Laajimmassa on 35 jakelumuuntamoa, kolme erotinasemaa sekä kaksi 110 kV sähköasemaa. Kyseinen maadoitusjärjestelmä sijaitsee Limingan ja Lumijoen alueella. Näille yhteen liitetyille maadoitusjärjestelmille suoritetaan maaperän resistiivisyyssmittaukset sulan maan aikana, jotta resultoivat maadoitusimpedanssit saadaan todennukaisiksi.

7 YHTEEN LIITETTYJEN MAADOITUSJÄRJESTELMIEN TUOMAT HYÖDYT

Yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluville jakelumuuntamoille sekä erotinasemille ei tarvitse suorittaa maadoitusmittausta määrävälein. Tämän johdosta OSSV:n käännepestemenetelmämittausmenot pienenevät noin 20 %. Vaikka summa kuulostaa pieneltä, maakaapelointiprojektien edetessä mitattavien laitteistojen määrä vähenee entisestään. Tämän seurauksena käännepestemenetelmämittauksista koituvat menot laskevat lisää.

Laskennallisen maadoitusjärjestelmien todentamisen myötä voidaan olla varmoja resultoivien maadoitusimpedanssien paikkansapitävyydestä. Laajaan yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään kuuluvalla laitteistolle suoritettu käännepestemenetelmämittaus antaa usein epäluotettavan maadoitusresistanssin arvon.

8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön päätavoitteena on todentaa yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät laskennallisesti OSSV:n jakeluverkossa. Maadoitusjärjestelmien todentamisen ansiosta OSSV:n jakeluverkkoon suoritettavista maadoitusmittauksista aiheutuvia kuluja saadaan pienennettyä ja epäluotettavia mittaustuloksia korvattua luotettavammilla lasketuilla tuloksilla. Todennus suoritetaan määrittämällä laskennallisesti resistoiva maadoitusimpedanssi käyttäen apuna Trimble NIS -verkkotietojärjestelmää. Maadoitusverkkolaskennan lähtötietoina käytetään maaperän resistiivisyyttä, maadoituselektrodijärjestelmien rakennetietoja, maadoituksia yhdistävien johtojen teknisiä tietoja sekä yhdysjohtotopologiaa.

Työssä todennetaan kaikki OSSV:n jakeluverkossa muodostuvat yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät. Näille kohteille suoritetaan maaperän resistiivisyydsmittaukset, kunhan maaperä sulaa roudasta, jotta resultoivat maadoitusimpedanssit saadaan todenmukaisiksi.

Opinnäytetyön puitteissa laaditaan toimintaohjeet OSSV:n henkilöstölle sekä urakoitsijoille. OSSV:n henkilöstölle luodut ohjeet (liitteet 2–4) käsittelevät jakeluverkon dokumentointia maadoitusten osalta sekä suurjännitelaitteistojen maadoitusten huomiointia. Urakoitsijoille luodut ohjeet (liitteet 5–7) käsittelevät maaperän resistiivisyyden mittausta, maadoitusten valokuvausta sekä kijaapelin jatkuvuuden mittausta. Kyseiset liitteet jäävät luottamuksellisina toimeksiantajan käyttöön, eikä niitä julkaista tässä opinnäytetyössä.

Trimble NIS -verkkotietojärjestelmä soveltuu hyvin yhteen liitettyjen maadoitusjärjestelmien dokumentointiin ja laskennalliseen todentamiseen. Dokumentoidusta maadoitusverkosta ei saada automaattisesti kaaviota, mutta poistamalla verkkotietojärjestelmän näkymästä kaikki ylimääräiset kohteet, saadaan aikaiseksi todenmukainen näkymä maadoitusjärjestelmästä.

Tämän opinnäytetyön aiheeseen löytyi niukasti lähdemateriaalia, sillä aihe oli uusi. Energiateollisuuden 18.03.2020 julkaisema verkostosuositus RJ 22:20 oli suuri apu lähdemateriaalipuutteen. Verkostosuositusten lisäksi opinnäytetyön toisena keskeisenä lähteenä käytetään SFS 6001:2018 -standardia.

LÄHTEET

1. SFS 6001:2018. 2018. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
2. Oulun Seudun Sähkö Verkkopalvelut Oy. Oulun Seudun Sähkön jakelualue. Saatavissa: <https://www.oulunseudunsahko.fi/sahko/sahkoliittymat.html>. Hakupäivä 23.3.2020.
3. Trimble NIS -verkkotietojärjestelmä. OSSV:n Master-tietokanta. (sisäinen lähde)
4. Tiainen, Esa – Ylinen, Timo – Nurmi, Tapani – Koivisto, Pekka – Kauppila, Jenna 2019. Maadoituskirja. Espoo: Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.
5. Mäkinen, Antti 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä. Tampereen Teknillinen Yliopisto
6. Lähdeaho, Tommi – Niemelä, Esa 2016. Maadoitusjärjestelmät – hankkeen tuloksia (sisäinen lähde)
7. Energiateollisuus ry. Verkostosuositus TJ 1:05, Sähköverkkojen maadoitusmittaukset.
8. Energiateollisuus ry. Verkostosuositus RJ 22:20, Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen
9. Energiateollisuus ry. Verkostosuositus RJ 19:16, Muuntopiirien ja pylväserotinasemien maadoitukset SFS 6001:2015 mukaan
10. Chauvin Arnoux. Maadoitusvastuksen mittaussopas. Saatavissa: https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FL_-Jordtag_webb.pdf. Hakupäivä 23.3.2020.
11. Chauvin Arnoux. CA6460 & CA6462 Maadoitusvastustesterit, maadoitusvastuksen sekä maaperän resistiivisyyden mittaamiseen. Saatavissa: <https://chauvin-arnoux.fi/tuote/3-ja-4-napa-maadoitusvastustesterit-maadoitusvastuksen-seka-resistiivisyyden-mittaamiseen/>. Hakupäivä 24.3.2020.
12. Maaperäkartta. Paikkatietoikkuna. Saatavissa: <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/>. Hakupäivä 25.3.2020
13. HeadPower. Puistomuuntamon perustuksen maadoitukset. Saatavissa: <https://ohjeistot.headpower.fi/hpo170/2019#a5464a30-3c23-4c92-a581-3e4ba494efd3> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 24.3.2020.

LIITTEET

Liite 1 AHXAMK-W ja AHXAMK-WP teknisiä tietoja

Liite 2 Maadoitusten dokumentointi -ohje (Luottamuksellinen)

Liite 3 Maadoitusverkkolaskenta-ohje (Luottamuksellinen)

Liite 4 Elektrodijärjestelmän laskenta -työkalu (Luottamuksellinen)

Liite 5 K_j-kaapelin jatkuvuuden mittaus -ohje (Luottamuksellinen)

Liite 6 Maadoituselektrodien valokuvaus -ohje (Luottamuksellinen)

Liite 7 Maaperän resistiivisyyden mittaus -ohje (Luottamuksellinen)

PRYSMIAN Group Finland Oy
 Tuote- ja järjestelmäsuunnittelu

TUOTEINFO
 6.9.2018

D016527
 RK
 1 (2)

AHXAMK-W Wiski®, AHXAMK-WP Wiski Plain® ja AHXAMK-WM Multi-Wiski®: TEKNISIÄ TIETOJA

| | AHXAMK-W 20 kV | | AHXAMK-W 3x50+35 20kV | AHXAMK-W 3x70+35 20kV | AHXAMK-W 3x95+35 20kV | AHXAMK-W 3x120+35 20kV | AHXAMK-W 3x150+35 20kV | AHXAMK-W 3x185+35 20kV | AHXAMK-W 3x240+70 20kV | AHXAMK-W 3x300+70 20kV |
|---|------------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | m | kg/km | | | | | | | | |
| Kaapelin massa | r | Ω/km | 2300 | 2600 | 3050 | 3350 | 3700 | 4150 | 5350 | 6100 |
| Vaihejohtimen AC-resistanssi 20°C | r | Ω/km | 0.641 | 0.443 | 0.320 | 0.254 | 0.207 | 0.165 | 0.126 | 0.102 |
| Vaihejohtimen nolaresistanssi | r ₀ | Ω/km | 0.641 | 0.443 | 0.320 | 0.254 | 0.207 | 0.165 | 0.126 | 0.102 |
| Kosketussuojan ekv. AC-resistanssi 20°C (ml. keskusköysi) | r _n | Ω/km | 0.910 | 0.871 | 0.872 | 0.851 | 0.829 | 0.805 | 0.466 | 0.455 |
| Vaiheen induktanssi | L | mH/km | 0.45 | 0.43 | 0.40 | 0.39 | 0.37 | 0.36 | 0.35 | 0.34 |
| Vaihejohtimen myötäreaktanssi | x | Ω/km | 0.141 | 0.135 | 0.126 | 0.123 | 0.116 | 0.113 | 0.110 | 0.107 |
| Vaihejohtimen nolareaktanssi | x ₀ | Ω/km | 0.055 | 0.048 | 0.043 | 0.038 | 0.036 | 0.033 | 0.030 | 0.026 |
| Kosketussuojan ekv. reaktanssi (ml. keskusköysi) | x _n | Ω/km | 0.124 | 0.122 | 0.121 | 0.117 | 0.114 | 0.110 | 0.116 | 0.108 |
| Maakapasitanssi | C _m | µF/km | 0.17 | 0.19 | 0.22 | 0.24 | 0.26 | 0.28 | 0.31 | 0.34 |
| Maasuskeptanssi | B ₀ | µS/km | 53 | 60 | 69 | 75 | 82 | 88 | 97 | 107 |
| Käyttökapasitanssi | C | µF/km | 0.17 | 0.19 | 0.22 | 0.24 | 0.26 | 0.28 | 0.31 | 0.34 |
| Käyttösuskeptanssi | B _k | µS/km | 53 | 60 | 69 | 75 | 82 | 88 | 97 | 107 |
| Suurin sallittu kuormitusvirta: maassa * | I | A | 155 | 200 | 235 | 265 | 300 | 330 | 385 | 435 |
| Vaihejohtimen sallittu 1 s oikosulkuvirta | I _{k15} | kA | 4.7 | 6.7 | 8.9 | 11.3 | 14.1 | 17.4 | 22.6 | 28.3 |
| Jäähtymisaikavakio | τ | min | 31 | 33 | 38 | 41 | 43 | 47 | 56 | 61 |

| | AHXAMK-WP 20 kV | | AHXAMK-WP 3x50 20kV | AHXAMK-WP 3x95 20kV | AHXAMK-WP 3x150 20kV | AHXAMK-WP 3x240 20kV |
|---|------------------|-------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | m | kg/km | | | | |
| Kaapelin massa | r | Ω/km | 2000 | 2700 | 3400 | 4750 |
| Vaihejohtimen AC-resistanssi 20°C | r | Ω/km | 0.641 | 0.320 | 0.207 | 0.126 |
| Vaihejohtimen nolaresistanssi | r ₀ | Ω/km | 0.641 | 0.320 | 0.207 | 0.126 |
| Kosketussuojan AC-resistanssi 20°C | r _n | Ω/km | 2.1 | 1.9 | 1.7 | 1.0 |
| Vaiheen induktanssi | L | mH/km | 0.44 | 0.40 | 0.37 | 0.35 |
| Vaihejohtimen myötäreaktanssi | x | Ω/km | 0.138 | 0.126 | 0.116 | 0.110 |
| Vaihejohtimen nolareaktanssi | x ₀ | Ω/km | 0.077 | 0.064 | 0.057 | 0.051 |
| Kosketussuojan reaktanssi | x _n | Ω/km | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maakapasitanssi | C _m | µF/km | 0.17 | 0.22 | 0.26 | 0.31 |
| Maasuskeptanssi | B ₀ | µS/km | 53 | 69 | 82 | 97 |
| Käyttökapasitanssi | C | µF/km | 0.17 | 0.22 | 0.26 | 0.31 |
| Käyttösuskeptanssi | B _k | µS/km | 53 | 69 | 82 | 97 |
| Suurin sallittu kuormitusvirta: maassa * | I | A | 155 | 235 | 300 | 385 |
| Vaihejohtimen sallittu 1 s oikosulkuvirta | I _{k15} | kA | 4.7 | 8.9 | 14.1 | 22.6 |
| Jäähtymisaikavakio | τ | min | 40 | 48 | 54 | 65 |