



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Sähkötekniikan laitos

A. Mäkinen

Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmistä

Alkusanat

Tämä raportti esittelee Maadoitusjärjestelmät –hankkeeseen Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähkötekniikan laitoksella tehdyn selvitystyön keskeisiä tuloksia. TTY:n osuuteen rahoitusta on saatu Sähkötutkimuspoolilta, Sähköturvallisuuden edistämiskeskus STEK ry:ltä ja Energiateollisuus ry:ltä.

Projektin ohjausryhmään kuuluivat:

Tommi Lähdeaho, Elenia Oy, puheenjohtaja
Jussi Antikainen, Savon Voima Verkko Oy
Kalle Sato, Caruna Oy
Rauno Ristimäki, Caruna Oy
Jussi Niskanen, Loiste Sähköverkko Oy
Jenny Martiskainen, Loiste Sähköverkko Oy
Tuomo Hakkarainen, Kymenlaakson Sähköverkko Oy
Asmo Karvinen, Kymenlaakson Sähköverkko Oy
Tuomas Åhlman, Vantaan Energia Sähköverkot Oy
Juha-Pekka Laitinen, Headpower Oy
Eero Saarijärvi, Trimble
Arto Nieminen, Suur-Savon Sähkötyö Oy
Eero Puoskari, PKS Sähkönsiirto Oy
Pertti Lindberg, Energiateollisuus ry
Esa Niemelä, Energiateollisuus ry, sihteeri
Jussi Välimäki, Vantaan Energia Sähköverkot OY
Rauno Järviluoma, Inspecta Oy

Kaikki projektiin osallistuneet ovat ansainneet lämpimät kiitokset hyvästä yhteistyöstä.

Tampereella

Antti Mäkinen
projektipäällikkö

SISÄLLYS

Alkusanat	1
Sisällys.....	2
1. Johdanto ja tutkimusongelman kuvaus.....	3
2. Maadoitusjärjestelmien perusteita ja teoriaa	5
2.1 Maadoittamiseen liittyviä määritelmiä	5
2.2 Maadoituselektrodien potentiaalit homogeenisessä maaperässä sekä maadoitusresistanssien ja -impedanssien määrittäminen	7
3. Maadoitusjärjestelmien kuvaukset	10
4. Maadoitusverkkojen mallinnus ja laskentaperiaatteet käytännössä	12
4.1 Verkkomallit PSCAD simuloinneissa	12
4.2 Laskentamallit Excel tai Matlab pohjaisena.....	13
5. Tyyppikohteet: Haja-asutusalue, Kylä-taajama ja Taajama	14
6. Maadoitusjärjestelmien simulointi- ja laskentatuloksia	17
6.1 Laskenta-asetelman periaatteita ja johdattelevia laskelmia.....	17
6.2 Haja-asutusalueen laskentatuloksia	19
6.3 Kylä-taajamien laskentatuloksia.....	22
6.4 Taajamien silmukoidut verkot	24
6.5 110 kV vikavirtojen huomiointi	28
7. Johtopäätökset	31
8. Yhteenveto.....	33
Lähdeluettelo	34
Liite 1 Maadoitusmittausaineistoa.....	35
Liite 2 Kaapeloinnin maadoitettujen osien (itse)reaktanssin määrittäminen.....	36

1. JOHDANTO JA TUTKIMUSONGELMAN KUVAUS

Tämä raportti esittelee Maadoitusjärjestelmät –hankkeeseen Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähkötekniikan laitoksella tehdyn selvitystyön keskeisiä tuloksia.

Maadoitusjärjestelmät –hankkeen taustana on ollut:

- Sähköverkkoinvestoinnit ovat voimakkaassa kasvussa
 - Maadoitusverkon rakenne muuttuu, kun maakaapeleita asennetaan myös taajamien ulkopuolella
 - Maadoitusten laajamittainen yhdistyminen keskijännitekaapeleiden kautta haja-asutusaluemaisessa verkossa on uusi asia ja yleistyy tulevaisuudessa
- Standardin SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset [1] uusimisen yhteydessä havaitut epäselvyydet maadoitusjärjestelmissä
- Aalto-yliopistolla oli teetetty tutkimus siirtyvistä jännitteistä vuonna 2014. Tehtävänä oli tarkastella millaisia kosketusjännitteitä keskijännitejakeluverkon maasulun aikana voi asiakkaille siirtyä ja millaisen riskin nämä jännitteet voivat aiheuttaa.

Energiateollisuus ry:n verkko-omaisuustoimikunta esitti syksyllä 2014 tutkimushankkeen käynnistämistä. Rahoitusta järjestyi Sähkötutkimuspoolilta, Sähköturvallisuuden edistämiskeskus STEK ry:ltä ja Energiateollisuus ry:ltä. Ohjausryhmä järjestäytyi ja Tampereen teknilliseltä yliopistolta (TTY) tilattu tutkimustyö käynnistyi vuoden 2015 aikana.

Seuraavanlaisia tutkimustarpeita oli tunnistettu:

1. Erilaisten maadoitusjärjestelmien määrittely
 - a. laaja maadoitusjärjestelmä
 - b. haja-asutusalueen yhdistyvä maadoitusjärjestelmä huomioiden myös haarautuvat ketjut
 - c. pistemäinen maadoitusjärjestelmä
2. Maadoitusjärjestelmän rakenne:
 - a. Millä edellytyksin maadoitusjärjestelmää voidaan pitää yhtenä kokonaisuutena?
 - b. Onko olemassa jokin tietty sähköinen etäisyys, minkä ylityttyä maadoitusjärjestelmää ei voi enää tarkastella yhtenä kokonaisuutena?
 - c. Mistä komponenteista maadoitusjärjestelmät rakenteellisesti muodostuvat?
3. Eri maadoitusjärjestelmien sähkötekniinen mallintaminen ja järjestelmiin liittyvien turvallisuusriskien analysointi
4. Maapotentiaalın jakautumisen mallintaminen erityyppisissä maadoitusolosuhteissa
5. Erilaisten mittausmenetelmien soveltuminen ja soveltuvuus erityyppisissä maadoitusjärjestelmissä
6. Mikä olisi tarkoituksenmukaisin tapa varmentaa erityyppisten maadoitusjärjestelmien eheys ja miten käyttöönotto- ja määräaikaismittaukset olisi tarkoituksenmukaista tehdä.

7. Onko käytönvalvontajärjestelmällä mahdollista joka tilanteessa todentaa maadoitusketjun katkeaminen? (ts. onko aina ketjun katketessa kyseessä kaapeli-, jatko- tai päätevika)
8. Onko aiheeseen liittyvää kansainvälistä tutkimusaineistoa olemassa?
9. Millainen on eri maadoitusjärjestelmien turvallisuustaso SFS 6001 standardin mukaisesti toimittaessa?

TTY:ssä tehtävän tutkimustyön prioriteeteiksi määriteltiin alkuvaiheessa:

- Erilaisten keskijänniteverkon maadoitusratkaisuiden sähkötekninen mallintaminen teoreettisesti ja simulointiympäristöissä
- Vikavirtojen ja maadoitusjännitteiden jakautuminen erityyppisissä maadoitusolosuhteissa
- Keskijänniteverkon vikatilanteiden lisäksi myös sähköasemalla ja suurjänniteverkosta johtuvien vikavirtojen huomioiminen
- Esimerkkitarkastelut erilaisilla verkoilla ja maadoitusratkaisuilla

Keskeisiksi tarkastelukohteiksi arvioitiin:

- Yhtenäiseksi kokonaisuudeksi tulkittavan maadoitusjärjestelmän laajuus
- Laskennallinen maadoitusjärjestelmän impedanssi
- Maadoitusjärjestelmän kriittiset solmupisteet (mittauspisteet)

Ydinkysymyksenä on tarkastella keskijänniteverkon yhdistyvien maadoitusten vaikutuksia resultoiviin maadoituksiin.

Vuonna 2016 painopisteen haluttiin siirtyvän kenttämittauksiin, joilla teoreettisten tarkastelujen tuloksia pyrittäisiin todentamaan.

2. MAADOITUSJÄRJESTELMIEN PERUSTEITA JA TEORIAA

Tässä luvussa esitetään lyhyesti maadoitukseen liittyviä peruskäsitteitä ja perusteoriaa.

Standardi SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset esittää kriteerit maadoitusjärjestelmän suunnittelulle, asennukselle, testaamiselle ja kunnossapidolle siten, että se toimii kaikissa tilanteissa ja varmistaa henkilöiden turvallisuuden kaikissa paikoissa, joihin henkilöiden pääsy on sallittu. Se esittää myös kriteerit, joilla varmistetaan, että maadoitusjärjestelmään liitettyjen ja sen lähellä olevien laitteiden eheys säilyy. [1]

Standardin laajamittaista referointia ei ole katsottu tässä yhteydessä tarpeelliseksi. Tarvittaessa kannattaa perehtyä standardin alkuperäiseen tekstikokonaisuuteen.

2.1 Maadoittamiseen liittyviä määritelmiä

Seuraavassa on esitetty joitakin oleellisia maadoitukseen liittyviä käsitteitä ja standardissa SFS 6001 [1] käytettyjä määritelmiä.

(Paikallinen) Maa on maadoituselektrodiin yhteydessä oleva maan johtava osa, jonka potentiaali ei välttämättä ole nolla.

Huom. Maaplaneetan johtavan massan potentiaalın on sovittu missä tahansa paikassa olevan nolla.

Referenssimaa (neutraalimaa) (kaukana oleva maa) on maan johtava osa, jonka sähköiseksi potentiaaliksi missä tahansa kohdassa on sovittu nolla, ja joka on kaikkien tarkasteltavien maadoitusjärjestelmien vaikutusalueen ulkopuolella.

Maadoituselektrodi on maahan sähköisessä yhteydessä oleva johtava osa, joka voi olla upotettu johtavaan väliaineeseen, esim. betoniin tai koksiin.

Maadoitusjärjestelmä on standardin SFS 6001 mukaan liitännöjen ja laitteiden järjestelmä, joka on välttämätön laitteiden tai järjestelmän maadoittamiseksi yhdessä tai erikseen.

Maadoitusjärjestelmän sähköiset ominaisuudet riippuvat oleellisesti seuraavista parametreista:

- Maadoitusimpedanssi ja $-$ resistanssi
- Maadoituselektrodien ja maadoitusjärjestelmien rakenne

Maadoitusimpedanssi on järjestelmän tai asennuksen määrätyn kohdan ja neutraalimaan välinen impedanssi annetulla taajuudella.

Resultoiva maadoitusimpedanssi on sellaisen maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi, jossa on liitetty yhdistysjohtimilla toisiinsa kaksi tai useampia maadoituselektrodeja. Huomautus: Em. määritelmää ei ole löydetty standardeista.

Maadoitusresistanssi on maadoitusimpedanssin reaaliosa.

Maasulkuvirta on virta, joka kulkee pääpiiristä maahan tai maadoitettuihin osiin vikakohdassa (maasulkukohdassa).

Maavirta on maadoitusimpedanssin kautta maahan kulkeva virta. Maavirta on se osa maasulkuvirtaa, joka aiheuttaa maadoitusjännitteen.

Reduktiokerroin on kolmivaihejohdon kerroin r , joka on maavirran suhde päävirtapiirin vaihejohtimien nollavirtojen summaan pisteessä, joka sijaitsee kaukana oikosulkupaikalta ja asennuksen maadoitusjärjestelmästä.

Maadoitusimpedanssi ja –resistanssi yhdessä virran kanssa vaikuttavat syntyvään maadoitusjännitteeseen.

Maadoitusjännite on maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välinen jännite.

- Osa maadoitusjännitteestä voi esiintyä vaarajännitteenä kosketus- tai askeljännitteen muodossa. Standardissa SFS 6001 esitetään vaatimukset ja toimenpiteet vaarojen välttämiseksi.

(Tehollinen) kosketusjännite on samanaikaisesti kosketeltavissa olevien johtavien osien välinen jännite.

Huom. Kosketusjännitteen arvoon voi vaikuttaa huomattavasti johtaviin osiin sähköisessä yhteydessä olevan henkilön impedanssi.

Askeljännite on kahden toisistaan 1 metrin (oletettu askelpituuden mitta) etäisyydellä olevan maanpinnan pisteen välinen jännite.

Laaja maadoitusjärjestelmä on yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, joka on toteutettu kytkemällä yhteen paikalliset maadoitusjärjestelmät. Yhteen kytkettyjen paikallisten maadoitusjärjestelmien läheisyys varmistaa sen, ettei vaarallisia kosketusjännitteitä esiinny.

2.2 Maadoituselektrodien potentiaalit homogeenisessa maaperässä sekä maadoitusresistanssien ja -impedanssien määrittäminen

2.2.1 Palloelektrodi maan pinnassa [2]

Jos maadoituselektrodi sijaitsee maan pinnassa tai lähellä sitä, sanotaan elektrodin virran aiheuttaman ympäristön potentiaalilin vaihtelun muodostavan tietyn muotoisen jännitesuppilon.

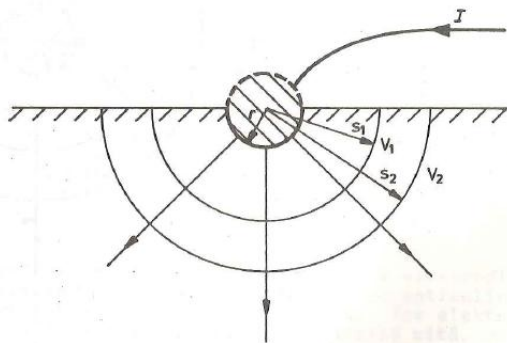
Kuvassa 2.1 on palloelektrodi puolittain maahan upotettuna. Elektrodin potentiaali V ja maadoitusresistanssi R_e saadaan yhtälöistä

$$V = \oint_r \frac{r I}{2\rho s^2} ds = \frac{r I}{2\rho r} \quad (2.1)$$

ja

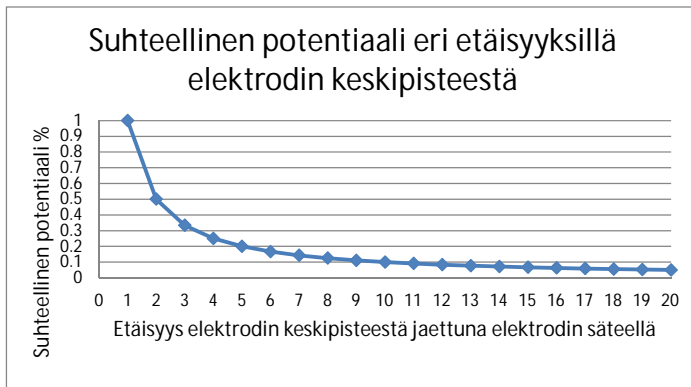
$$R_e = \frac{r}{2\rho r}, \quad (2.2)$$

missä ρ on maan resistiivisyys
 I on elektrodiin viety virta
 s on vaakasuora etäisyys elektrodin keskipisteestä
 r on elektrodin säde.



Kuva 2.1. Palloelektrodi maan pinnassa

Jännitesuppilon muoto elektrodin ympäristössä saadaan sijoittamalla yhtälöön 2.1 säteen r sijalle vaakasuora etäisyys s elektrodin keskipisteestä ja vaihtelemalla sitä välillä $r \dots \infty$. Kuvassa 2.2 on esitetty esimerkki potentiaalilin muotoutumisesta.

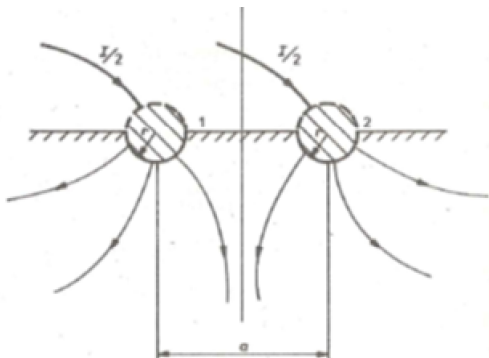


Kuva 2.2. Esimerkki potentiaalin kohoamisesta suhteessa referenssimajaan.

Monen muun rakenteeltaan toisenlaisen maadoituselektrodin jännitesuppiloa voidaan yleisesti approksimoida maan pinnassa sijaitsevan palloelektrodin jännitesuppilolla, jos tarkastellaan potentiaalia elektrodin lähialueen ulkopuolella.

2.2.2 Kaksi samanlaista palloelektrodiä maan pinnassa [2]

Kuvassa 2.3 on kaksi palloelektrodiä puolittain maahan upotettuna. Maan resistiivisyys on ρ .



Kuva 2.3. Kaksi palloelektrodiä maan pinnassa

Oletetaan, että elektrodien välinen etäisyys $a \gg r$. Palloelektrodin 1 kokonaispotentiaali V_1 maan pinnassa saadaan summaamalla elektrodin 1 virran aiheuttama potentiaali ja elektrodin 2 virran aiheuttama lisäpotentiaali V_{12} .

$$V_1 = V_{11} + V_{12} = \frac{r I/2}{2\rho r} + \frac{r I/2}{2\rho a} = \frac{r I}{4\rho} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{a} \right) \quad (2.3)$$

Jännitesuppilon muoto saadaan määrittämällä elektrodien ympäristön pisteiden potentiaaleja:

$$V_s = \frac{r I}{4\rho} \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \right) \quad (2.4)$$

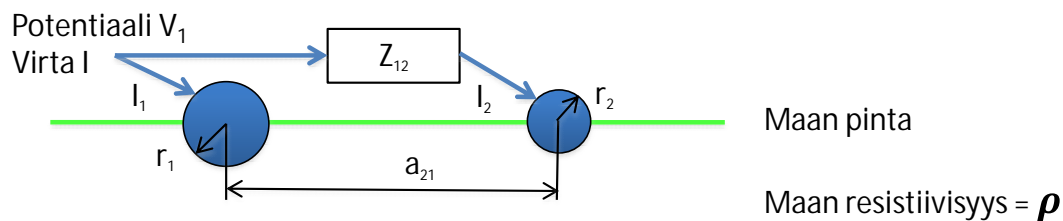
missä s_1 on tutkittavan pisteen etäisyys maan pinnan tasossa elektrodista 1
 s_2 on tutkittavan pisteen etäisyys maan pinnan tasossa elektrodista 2

Symmetriasyistä on elektrodin 2 kokonaispotentiaali $V_2 = V_1$. Kahden maan pinnassa sijaitsevan palloelektrodin muodostaman järjestelmän maadoitusresistanssiksi saadaan

$$R_e = \frac{r}{4\rho} + \frac{1}{a} \quad (2.5)$$

2.2.3 Yhdistetyt maadoitusjärjestelmät

Kuvassa 2.4 on kaksi toisiinsa galvaanisesti yhdistettyä maadoituselektrodia puolittain maahan upotettuna.



Kuva 2.4. Yhdistetyt maadoituselektrodit

Oletetaan, että elektrodien keskipisteiden välimatka $a_{21} \gg$ elektrodien säteet r_1 ja r_2 . Z_{12} on elektrodien välisen galvaanisen yhteyden impedanssi.

Elektrodin 1 potentiaali maan pinnalla = virran I_1 aiheuttama potentiaali V_{11} + virran I_2 aiheuttama lisäpotentiaali V_{12} :

$$V_1 = V_{11} + V_{12} = R_1 I_1 + \frac{\rho I_2}{2\pi a_{21}} = \frac{\rho I_1}{2\pi r_1} + \frac{\rho I_2}{2\pi a_{21}} \quad (2.6)$$

missä ρ on maan resistiivisyys
 R_1 on maadoituksen 1 resistanssi
 I_1 ja I_2 ovat elektrodeihin syötetyt virrat
 a_{21} on vaakasuora etäisyys elektrodien keskipisteiden välillä
 r_1 ja r_2 ovat elektrodien säteet.

Samalla periaatteella voidaan menetellä useampienkin elektrodien välillä.

Sisällyttämällä mallinnukseen maadoitusjärjestelmän kaikki maadoitusresistanssit ja verkon impedanssien kytkeytymiset sekä ratkaisemalla muodostettavat piiriyhtälöt saadaan resultoiva kokonismaadoitusimpedanssi jakamalla summattu potentiaali kokonaisvirralla.

3. MAADOITUSJÄRJESTELMIEN KUVAUKSET

Maadoitusjärjestelmä koostuu yleensä useista vaaka-, pysty- tai vinoelektrodeista, jotka on kaivettu tai lyöty maahan. Yhdessä kohdassa voi olla yhdistettynä galvaanisesti useita maadoituselektrodeja muodostaen paikallisen maadoitusjärjestelmän.

Kaapeliverkossa kaapelien kosketussuojat ja mahdolliset kaapelien keskusköydet ja muut maadoitusjohtimet muodostavat galvaanisia yhteyksiä eri maadoitusten välille. Tällöin muodostuu ketjuuntuneita ja myös silmukoita sisältäviä verkkomaisia laajempia maadoitusjärjestelmiä.

Pistemäisen maadoituksen muodostaa yksi maadoituselektrodi tai maadoituselektrodit, jotka ovat lyhyitä ja sijaitsevat lähellä toisiaan. Muuntamon keskijännitepuolen suojamaadoitus ja muuntopiirin pienjänniteverkon maadoitukset yhdistetään lähes aina.

Standardin SFS 6001 mukaan laajat maadoitusjärjestelmät mahdollistavat maasulkuvirtojen jakautumisen siten, että paikallisen maadoitusjärjestelmän potentiaalinen nousu pienenee. Järjestelmän voidaan sanoa muodostavan näennäisen tasapotentiaalipinnan. Laajan maadoitusjärjestelmän olemassaolo voidaan todeta mittauksin tai laskennallisesti tyypillisten järjestelmien tapauksessa. Tyypillisiä esimerkkejä laajasta maadoitusjärjestelmästä ovat kaupunkien keskustat sekä kaupunki- ja teollisuusalueet, joilla on hajautettu suur- ja pienjännitemaadoitus. [1]

Laajan maadoitusjärjestelmän ulkopuolella olevien asennusten maadoitusresistanssit on laskettava tai mitattava järjestelmällisesti (mittausmenetelmien yksityiskohdat on esitetty standardin SFS 6001 liitteessä L) ja maadoitusjännite laskettava tai mitattava. Kosketusjännitteiden tarkistukset on tarvittaessa tehtävä mittauksin tai laskelmin. Laajan maadoitusjärjestelmän sisäpuolella maadoitusjärjestelmän perussuunnitelma on riittävä, eikä maadoitusresistanssin tai maadoitusjännitteen todentaminen ole tarpeen. [1]

Maadoitusimpedanssi määritetään ottaen huomioon suoraan kytketyt maadoituselektrodit ja myös maahan yhdistetyt ilmajohtojen ukkosjohtimet ja maadoitukset, maadoituselektrodeina toimivat maakaapelit ja muut maadoitusjärjestelmät, jotka kytkeytyvät asianomaiseen maadoitusjärjestelmään johtavien kaapelivaippojen, kosketussuojien ja PEN-johtimien välityksellä tai muulla tavalla. [1]

Tämän hankeosion taustalla olleen tutkimussuunnitelman mukaan SFS 6001 standardin uusimisen yhteydessä on noussut esille sähkönjakeluverkon erityyppiset maadoitusjärjestelmät ja erityisesti ketjuuntuneet maadoitukset, joissa maakaapeliverkon muuntopiirien maadoitukset yhdistyvät toisiinsa keskijännitekaapeleiden suojajohtimien ja/tai erillisten maadoitusjohtimien kautta.

Maadoitusten ketjuuntuminen on yleistymässä juuri nyt, kun yhtiöt eivät enää kaapeloi pelkästään kaupunkien keskustoissa, vaan myös taajamissa ja haja-asutusalueilla. Toisaalta tilanne eroaa perinteisestä haja-asutusalueen säteittäisen ilmajohtoverkon maadoitusrakenteesta. Muuntopiirien maadoitukset eivät ole pistemäisesti erillään toisistaan niin kuin ilmajohtoverkossa, vaan niillä on galvaaninen kontakti toisiinsa maakaapeleiden suojajohtimien ja/tai erillisten maadoitusjohtimien kautta.

Ketjuuntuneiden maadoitusten kohdalla tilanne poikkeaa laajasta maadoitusverkosta siinä määrin, että maadoitukset eivät muodosta verkkomaista usean eri reitin kautta yhdistynyttä rakennetta ja muuntopiirien välimatkat vaihtelevat tiheistä taajamaverkoista usean kilometrin etäisyyksiin haja-asutusalueella.

4. MAADOITUSVERKKOJEN MALLINNUS JA LASKENTAPERIAATTEET KÄYTÄNNÖSSÄ

Maadoitusverkkojen laskentaperiaatteet pohjautuivat tässä selvityksessä luvussa 2 esitettyihin mallinnuksiin

Maadoitusverkkojen mallinnuksessa lähtötietoja olivat:

- Solmupisteiden mitatut ja/tai tavoitteelliset maadoitusresistanssit
- Solmupisteiden välisten (kaapeli)yhteyksien pituudet ja kaapelilajit
- Kaapelityyppien ja maapiirien impedanssiarvot
- Kaapelityyppien geometriset ym. mallinnusparametrit
- Maadoitusten väliset maantieteelliset etäisyydet
- Maaperän resistiivisyys

4.1 Verkkomallit PSCAD simuloinneissa

PSCAD-ympäristön yksinkertaistetusta verkkomallista on esimerkki kuvassa 4.1. Verkko on siinä mallinnettu solmupisteiden välisinä impedanssiarvoina ja maadoitusresistansseina. Lisäpotentiaalien mallinnus on tehty lisäämällä kunkin maadoituksen yhteyteen jännitelähde, jonka jännite riippuu kaikkien muiden maadoitusten virroista.

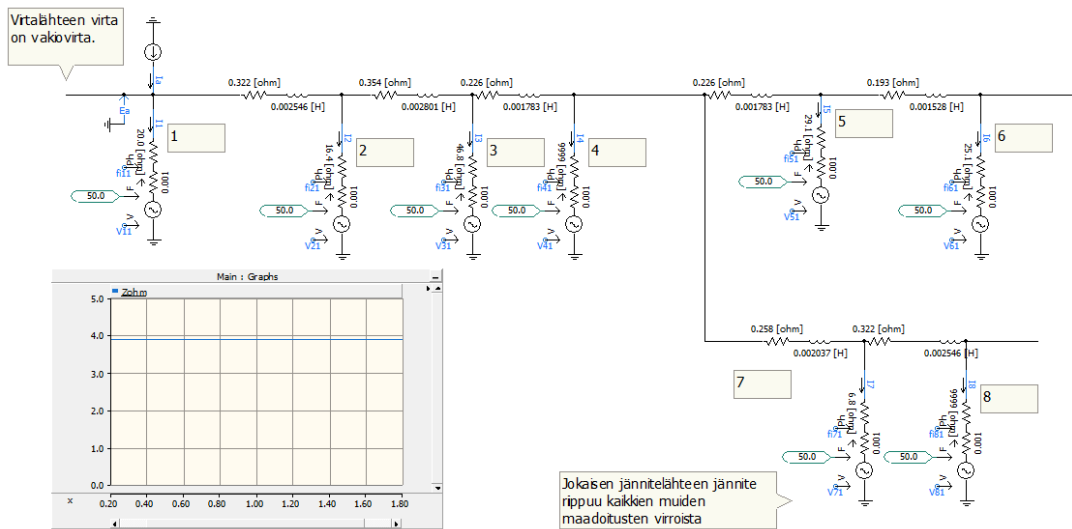
Verkkoon syötetään haluttuun solmuun virtaa. Virran ja sen aiheuttaman maadoitusjännitteen pohjalta lasketaan resultoiva maadoitusimpedanssi.

Jännite- ja virtamittauksia voidaan sijoittaa samanaikaisesti useampiinkin kohtiin.

Kaapeleiden impedansseja mallinnettiin mm. viitteessä [3] esitetyn teorian sekä laskelmien ja PSCAD ympäristössä tehdyn mallinnuksen pohjalta. Tarkastelut perustuivat kaapelointien sähköiseen ja geometriseen mallinnukseen sekä maaperän ominaisuuksiin.

PSCAD simuloinnissa syötettiin kaapelimallin läpi virtaa ja laskettiin virran nollapiirissä aiheuttaman jännitehäviön pohjalta impedanssiarvot.

Tavoitteena oli päästä kuvaamaan kaapelit resistanssien ja reaktanssien avulla. Tämä tapa soveltuisi simulointiympäristön lisäksi Excel-pohjaisen laskentatyökalun muodostamiseen ja näin pystytään myös verifioimaan tuloksia keskenään.



Kuva 4.1. Yksinkertaistettu verkkomalli PSCAD-ympäristössä

4.2 Laskentamallit Excel tai Matlab pohjaisena

Excel ympäristössä useamman yhdistettävän maadoituselektrodin tarkastelu tuntui varsin monimutkaiselta. Siksi tässä on päädytty soveltamaan resultoivan maadoitusarvon laskennassa seuraavasti heuristiikkaa:

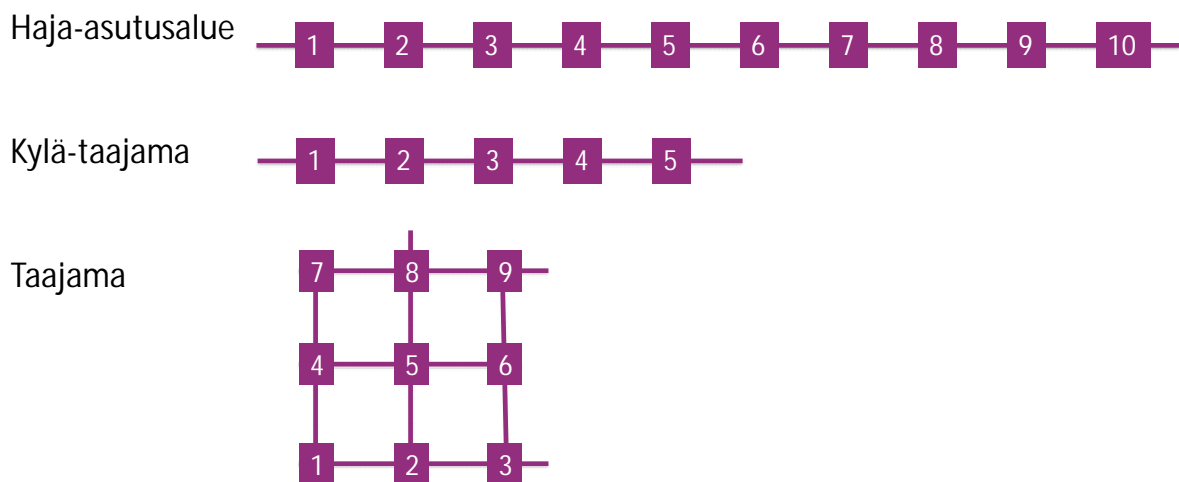
1. Otetaan ensin huomioon vain maadoitusverkon maadoitusten väliset pitkittäisimpedanssit ja maadoitusresistanssit sekä jätetään pois lisäpotentiaalien mallinnus
 - a. Vikavirta kohdistetaan haluttuun solmuun
 - b. Resultoiva maadoitusimpedanssi tarkasteltavassa kohdassa saadaan solmu-pisteyhtälöiden ratkaisun jälkeen itseisarvona jännitteen ja virran suhteesta
2. Lasketaan likimääräisesti muiden maadoitusten virtojen aiheuttamat lisäpotentiaalit olettaen, että maadoitusten välisten yhteyksien pitkittäisimpedanssit = 0
 - a. Laskennassa huomioidaan maadoitusresistanssit, maan resistiivisyys ja maantieteelliset etäisyydet
 - b. Jännite on nyt sama kaikkien maadoitusten yli ja potentiaalien summautumisyhtälöistä voidaan ratkaista maadoitusresistanssi jännitteen ja kokonaisvirran suhteena.
 - c. Lasketaan maadoitusten rinnankytkennän resistanssi ottaen huomioon vain niiden resistanssit. Vähentämällä tämä kohdan b resistanssista saadaan lisäpotentiaaleihin liittyvälle lisäresistanssille approksimoitu arvo.
3. Maadoitusimpedanssille lasketaan likiarvo laskemalla aritmeettisesti yhteen kohdan 1 maadoitusimpedanssin itseisarvo ja kohdan 2 lisäresistanssi. Käyttämällä aritmeettista summausta eikä geometrista summausta on pyritty siihen, että tulos olisi mieluummin hieman todellista suurempi kuin pienempi.

5. TYYPPIKOHTEET: HAJA-ASUTUSALUE, KYLÄ-TAAJAMA JA TAAJAMA

Maadoitustarkasteluja ja -laskelmia varten määriteltiin esimerkkitarkasteluja ja käytettiin mm. kuvassa 5.1 esitettyjen verkkojen tapaisia erilaisia teoreettisia tyyppitapauksia. Perustyyppitapaukset olivat:

- Haja-asutusalue
 - 10 muuntamomaadoitusta yhdistettynä galvaanisesti
- Kylä-taajama
 - 5 muuntamomaadoitusta yhdistettynä galvaanisesti
- Taajama
 - 4...16 muuntamomaadoitusta yhdistettynä galvaanisesti
 - Sisältää myös silmukkayhteyksiä

Kuvassa 5.1 numeroidut neliöt kuvaavat muuntamoita ja muuntamoiden maadoituksia, joiden välillä on galvaanisia yhteyksiä.



Kuva 5.1 Maadoitusjärjestelmien teoreettisia tyyppitapauksia

Verkkojen tarkasteluissa varioitiin seuraavia laskentaparametreja:

- Muuntamoiden maadoitusresistanssit
- Kaapelityypit ja -pituudet
- Muuntamoiden väliset maantieteelliset etäisyydet
- Maan ominaisresistiivisyys

Maadoitustarkastelujen lähtötietoja olivat:

- Muuntamoiden mitatut ja/tai tavoitteelliset maadoitusresistanssit
- Maadoitusten väliset maantieteelliset etäisyydet
- Maaperän resistiivisyys
- Muuntamoiden välisten kaapeliyhteyksien pituudet
- Kaapelityypit sekä kaapelityyppien ja maapiirien impedanssiarvot

Lähtötiedot pyrittiin valitsemaan siten, että maadoitusten kannalta mahdollisimman vaikeatkin, mutta kuitenkin realistiset, tilanteet tulevat käsitellyksi riittäväksi arvioidussa laajuudessa.

Liitteessä 1 on tarkasteltu maadoitusresistanssien valinnan taustalla ollutta aineistoa. Maadoitusresistansseiksi valittiin tarkasteluja varten:

- Haja-asutusalue
 - Normaali maadoitusolosuhde 20 ohm
 - Vaikea maadoitusolosuhde 50 ohm
- Kylä-taajama
 - Normaali maadoitusolosuhde 10 ohm
 - Vaikea maadoitusolosuhde 15 ohm
- Taajama
 - Vaihteluväli 2 ... 10 ohm
 - Yksittäinen case myös 30 ohm

Maaperän resistiivisyytenä on käytetty 2300 ohmm, 4600 ohmm sekä 15000 ohmm. Näistä 2300 ohmm on arvioitu vastaavan Suomessa jonkinlaista keskitasoa ja 15000 ohmm suurehkoa resistiivisyyttä

Kaapeloinnin kosketussuojat ja mahdollisen keskusköyden mallintavina resistansseina on käytetty seuraavia arvoja sisältäen paluumaapiirin:

AXAL50:	AXAL-TT PRO 12/20(24) kV 3x50/25Al	1.25 ohm/km
WP95.	AHXAMK-WP 3x95 20 kV	0.68 ohm/km
WP150:	AHXAMK-WP 3x150 20 kV	0.62 ohm/km
W240:	AHXAMK-W 3x240Al+70Cu 20 kV	0.19 ohm/km

Resistansseina on käytetty tasavirtaresistansseja 20 asteen lämpötilassa.

Kaapelilla AHXAMK-W 3x240Al+70Cu keskusköyden maadoitusvaikutuksia ei ole otettu huomioon. Jos maadoitusvaikutus otettaisiin huomioon, voisi sillä ehkä olla merkittäväkin rezultoivaa maadoitusimpedanssia pienentävä vaikutus. Maadoitushyödyistä ei ollut kuitenkaan tarkempaa arviota käytettävissä.

Reaktanssina on käytetty simulointien ja laskelmien perusteella arvoa 0.8 ohm/km. Reaktanssien määrittämistä on käsitelty tarkemmin liitteessä 3.

Kaapeleiden impedansseja määritettiin PSCAD simulointiympäristössä tehdyn mallinnuksen ja mm. viitteessä [3] esitetyn teorian pohjalta. Simuloinneissa hyödynnettiin PSCAD:in valmiita kaapelimalleja, joihin päivitettiin tarvittavat lähtötiedot. Impedanssitarkastelut perustuivat kaapelointien sähköiseen ja geometriseen mallinnukseen sekä maaperän ominaisuuksiin. Simuloinneissa syötettiin kaapelin kautta virtaa ja impedanssi saatiin selville jännitehäviön ja virran perusteella.

Reaktanssit vaihtelivat tyypillisesti välillä 0.76 – 0.83 riippuen sekä kaapelityypeistä että maan resistiivisyydestä. Maadoituslaskelmissa on käytetty kuitenkin arvoa 0.8 ohm. Perusteena tähän oli arvio, että vain yhtä reaktanssiarvoa käytettäessä laskentatyön määrä väheni oleellisesti tarkkuuden kärsimättä oleellisesti tämän selvityksen tavoitteiden kannalta. Jatkossa toki voidaan haluttaessa käyttää tarkempiakin lähtötietoja.

6. MAADOITUSJÄRJESTELMIEN SIMULOINTI- JA LASKENTATULOKSIA

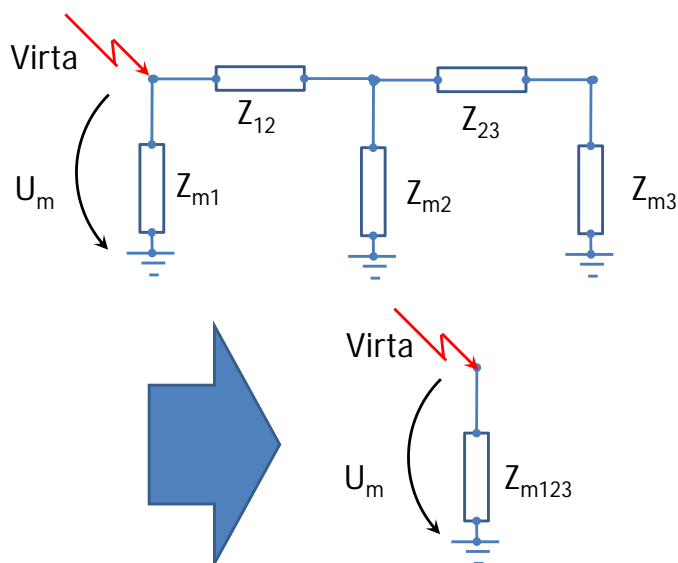
Tässä luvussa esitetään aiemmin esitetyille tyyppiverkoille tehtyjä laskelmia. Laskelmat on tehty sekä PSCAD simuloinneilla että muokatulla Excel laskentatyökalulla. Esitetyt tulokset perustuvat pääosin PSCAD simulointiin. Joitakin vertailevia tuloksiakin kuitenkin esitetään.

Excel laskennalla ja PSCAD:illa saadut tulokset olivat lähellä toisiaan. Absoluuttisina arvoina eroja voi kuitenkin pitää käytännön kannalta hyvin vähäisinä. Haja-asutusalueiden ja Kylätaajamien osalta Excel laskennan tulosten ero PSCAD simulointituloksiin verrattuna oli rajoissa $-0.1 \text{ ohm} \dots +0.1 \text{ ohm}$. Ruudukkomaisissa 4, 9 ja 16 solmun verkoissa ero oli $0 \text{ ohm} \dots +0.1 \text{ ohm}$ rajoissa.

6.1 Laskenta-asetelman periaatteita ja johdattelevia laskelmia

Laskennan perusasetelma

Tässä luvussa esitetään keskeisempiä laskentatuloksia maadoitusjärjestelmätarkasteluista. Kuvassa 6.1 on kuvattu yleisesti laskennan perusasetelmaa, kun keskeisimpänä tuloksena pidetään resultoivaa maadoitusimpedanssia. Periaatteena on, että tarkasteltavaan verkko-osaan syötetään maadoituskohdan ja referenssimaan välille virtaa.

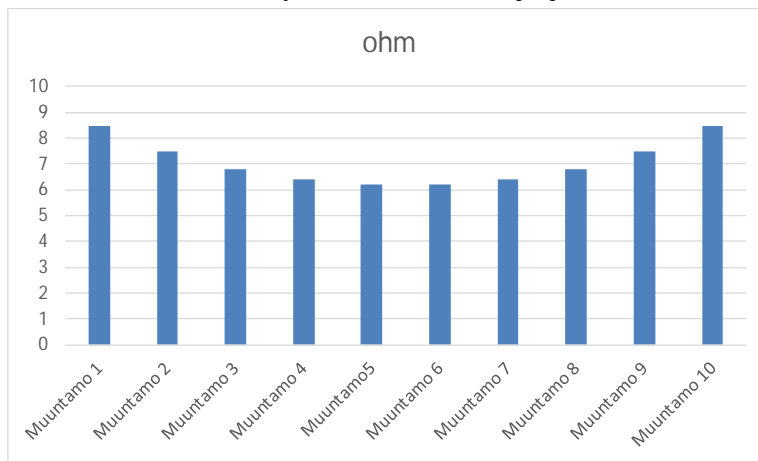


Kuva 6.1 Resultoivan maadoitusimpedanssin muodostaminen

Maadoitusten ja referenssimaan kautta kulkeva maavirta aiheuttaa maadoituksen ja referenssimaan välille maadoitusjännitteen U_m . Resultoiva maadoitusimpedanssi saadaan jakamalla tämä maadoitusjännite virralla.

Resultoivan maadoitusimpedanssin riippuvuus tarkastelukohdasta

Kuvassa 6.2 on esitetty maadoitusketjun resultoivan maadoitusarvon riippuvuus tarkastelukohdasta. Havaitaan, että maadoitusketjun suurimmat resultoivat maadoitusimpedanssit ovat ketjun päissä samanlaisten maadoitusten ketjussa. Kiinnostuksen kohteena ovat yleisesti lähinnä huonoimmat resultoivat maadoitukset ja siksi kriittiset tarkastelukohdat ovat yleensä maadoitusjärjestelmän reunoilla.



Kuva 6.2. Resultoivan maadoitusimpedanssin riippuvuus tarkastelukohdasta, kun muuntamot ovat 1 km välein toisistaan 10 muuntamon ketjussa.

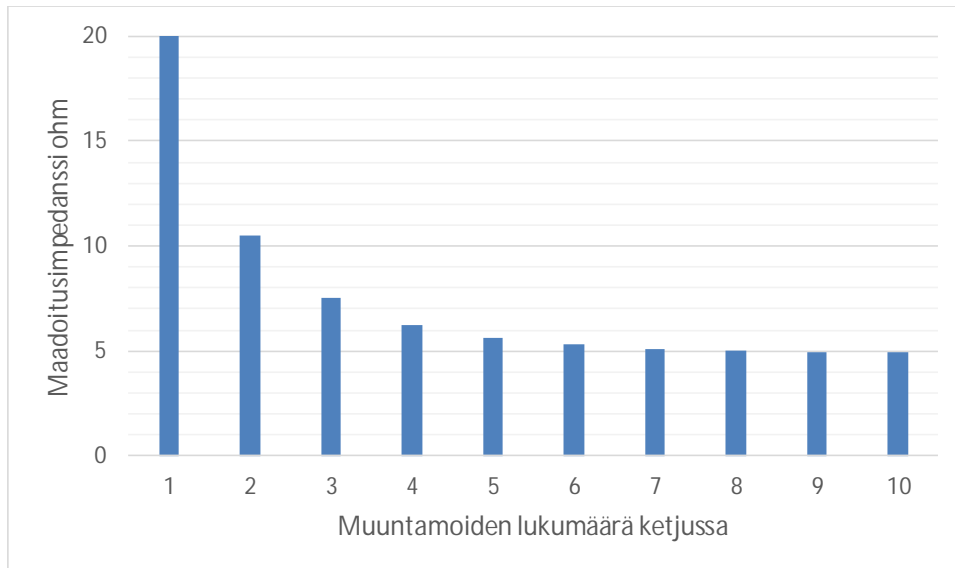
- Muuntamoiden maadoitukset 50 ohm/kpl
- Kaapeli AXAL50

Erillisten maadoitusten lukumäärän vaikutus resultoivaan maadoitusimpedanssiin

Kuvassa 6.3 on esimerkki maadoitusten lukumäärän vaikutuksesta resultoivaan maadoitusimpedanssiin. Yksittäisten maadoitusten maadoitusresistanssit ovat 20 ohm/kpl. Muuntamot sijaitsevat 1 km välein ja kaapelityyppi on AXAL-TT 3x50. Tarkastelukohta on maadoitusjärjestelmän alussa.

Yhden muuntamon maadoitusresistanssi on 20 ohm. Kun siihen yhdistetään toinen muuntamo, pienenee resultoiva maadoitusimpedanssi 48 %:lla 52 %:iin. Tämä on 10.5 ohm ja kolmannen muuntamon lisäyksen jälkeen maadoitusimpedanssi on 38 % ja neljännen jälkeen 31 %. Viidennen maadoituksen lisääminen pienentää maadoitusimpedanssia vain alle 1 ohmilla 28 %:iin verrattuna yhden muuntamon maadoitukseen. Kymmenen muuntamon tapauksessa impedanssi on 25 % verrattuna yhden muuntamon maadoitukseen.

Voidaan todeta, että ensimmäisten muuntamoiden yhdistämisellä on varsin suuri vaikutus resultoivaan maadoitusimpedanssiin. Ketjutuksen pidentyessä kuitenkin yksittäisten lisäysten suhteellinen vaikutus alkupäähän pienentyy merkittävästi.

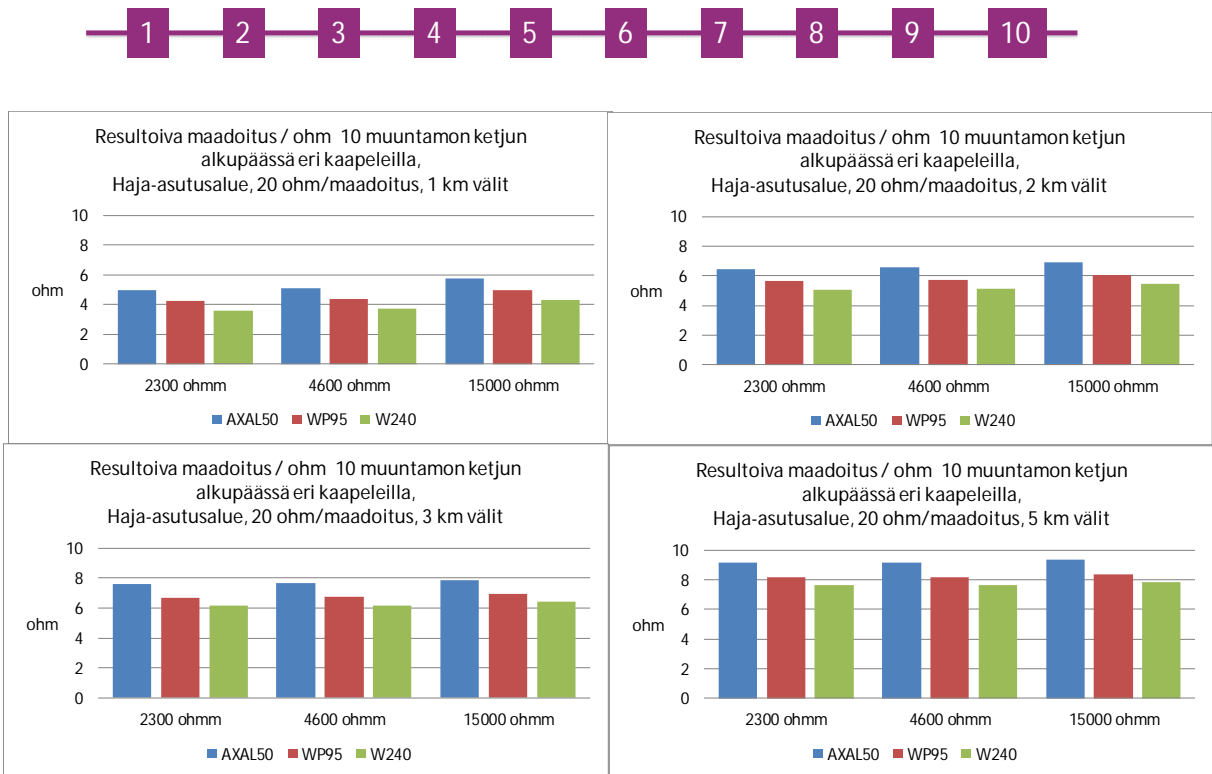


Kuva 6.3. Resultoivan maadoitusimpedanssin riippuvuus 1 km välein ketjussa olevien muuntamoiden lukumäärästä tarkastelukohdan ollessa maadoitusjärjestelmän alussa.

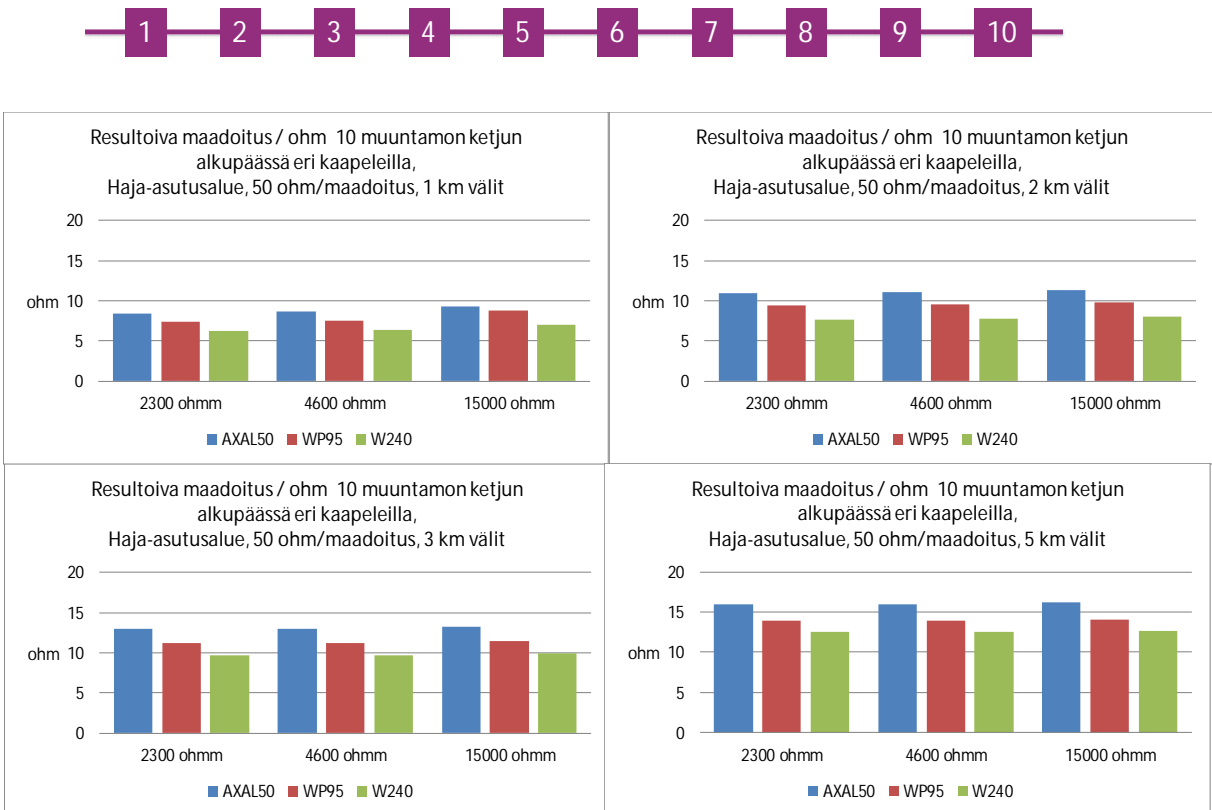
6.2 Haja-asutusalueen laskentatuloksia

Kuvissa 6.4 ja 6.5 esitetään tyyppiverkoilla 'Haja-asutusalue' saatuja laskentatuloksia. Maadoitusimpedansseja on laskettu seuraavilla lähtöarvoilla:

- 10 muuntamon maadoitukset ketjussa
- Kunkin muuntamon maadoitusarvo on tarkastelussa ensin 20 Ω (normaali maadoitusolosuhde) ja sen jälkeen tehdään tarkastelu 50 Ω (vaikea maadoitusolosuhde) arvoilla
- Herkkyystarkastelu muuntamoiden etäisyyksien suhteen etäisyyksillä 1...5 km kasvattaen muuntamoiden keskinäistä etäisyyttä tasaisesti 1 km välein
- Herkkyystarkastelu maaperän resistiivisyyden suhteen 2300...15000 Ω
- Tarkasteltavat kaapelityypit ovat AXAL-TT 20 kV 3x50 mm², AHXAMK-WP 20 kV 3x95 mm² ja AHXAMK-W 20 kV 240 mm²



Kuva 6.4 Haja-asutusalueen resultoivia maadoitusimpedansseja



Kuva 6.5 Haja-asutusalueen resultoivia maadoitusimpedansseja

Tarkasteluissa tehtiin seuraavia havaintoja:

- Kuvassa 6.4 muuntamoiden maadoitukset ovat 20 ohm/kpl ja kuvassa 6.5 50 ohm/kpl
- 20 ohm muuntamomaadoituksilla:
 - o 1 – 2 km muuntamoiden välisillä etäisyyksillä maadoitusjärjestelmien rezultoivat maadoitusimpedanssit ovat välillä 4 – 7 ohm
 - o 1 – 5 km etäisyyksillä impedanssit vaihtelevat välillä 4 – 9 ohm. Tämä on 18 – 47 % yksittäisen muuntamon 20 ohm maadoitusresistanssista.
 - o Välimatkojen kasvattaminen suurentaa impedanssiarvoja.
 - o Kaapelityypin valinnan vaikutukseksi rezultoivaan maadoitusimpedanssin pienenemiseen on laskettu enintään 1.5 ohm.
 - o Maan resistiivisyyden vaikutukseksi maaadoitusimpedanssia lisäävänä tekijänä on saatu välillä 2300 – 15000 ohmm enintään 0.8 ohm.
- 50 ohm muuntamomaadoituksilla:
 - o 1 – 2 km muuntamoiden välisillä etäisyyksillä maadoitusjärjestelmien rezultoivat maadoitusimpedanssit ovat välillä 6 – 12 ohm
 - o 1 – 5 km etäisyyksillä impedanssit vaihtelevat välillä 6 – 16 ohm. Tämä on 13 – 32 % yksittäisen muuntamon 50 ohm maadoitusimpedanssista.
 - o Pidemmistä välimatkoista aiheutuu suurempia impedansseja.
 - o Kaapelityypin valinnan vaikutukseksi rezultoivaan maadoitusimpedanssin pienenemiseen on laskettu enintään 3.5 ohm.
 - o Maan resistiivisyyden vaikutukseksi maaadoitusimpedanssia lisäävänä tekijänä on saatu välillä 2300 – 15000 ohmm enintään 0.8 ohm.

Oleellinen havainto on, että ketjuuntuvassa järjestelmässä rezultoiva maadoitusimpedanssi on merkittävästi pienempi kuin tarkasteltavan muuntopiirin oma maadoitusimpedanssi erillisesti tarkasteltuna. Vaihteluväli oli 13 – 47 % yksittäiseen maadoitukseen verrattuna.

Pienimpiin rezultoiviin maadoitusimpedansseihin liittyvät yleisesti seuraavat tekijät:

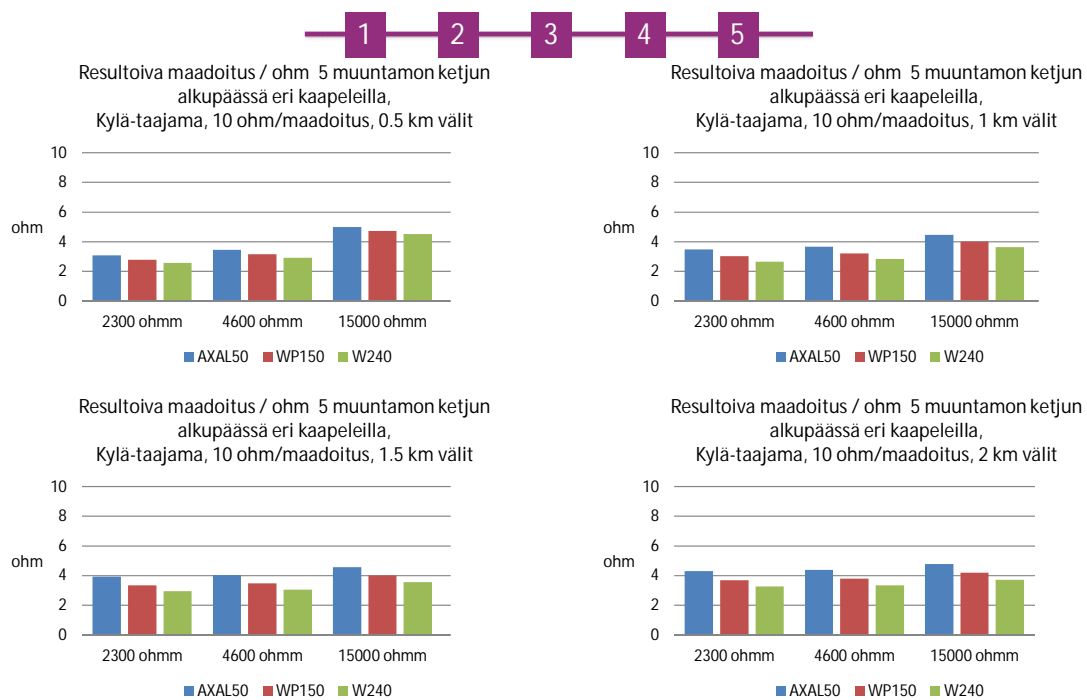
- Pienimmät yksittäisten maadoitusten resistanssit
- Lyhimmät välimatkat maadoitusten välillä
- Pienimmät kaapelointien nollapiirien resistanssit
- Pienimmät maaperän resistiivisyydet..

6.3 Kylä-taajamien laskentatuloksia

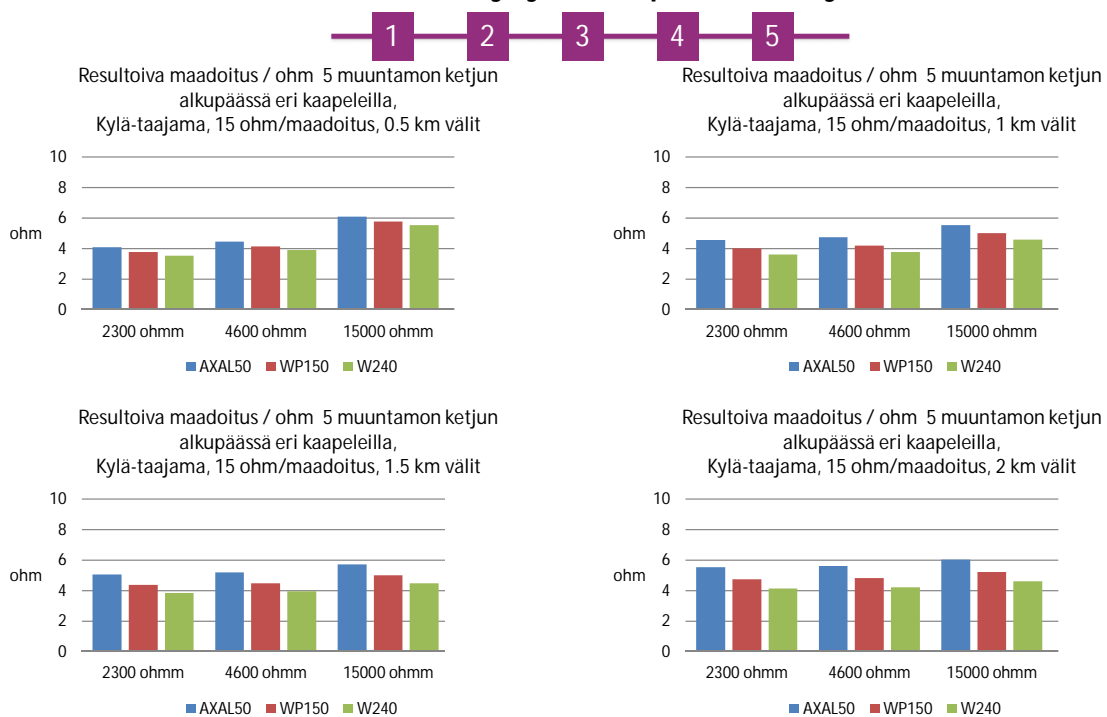
Kuvissa 6.6 ja 6.7 esitetään tyyppiverkoilla 'Kylä-taajama' saatuja laskentatuloksia.

Maadoitusimpedansseja on laskettu seuraavilla lähtöarvoilla:

- 5 muuntamon maadoitukset ketjussa
- Kunkin muuntamon maadoitusarvo on tarkastelussa ensin 10 Ω (vaikea maadoitusolosuhde) ja sen jälkeen tehdään tarkastelu 15 Ω (normaali maadoitusolosuhde) arvoilla
- Herkkyystarkastelu muuntamoiden etäisyyksien suhteen 0.5 – 2 km kasvattaen muuntamoiden keskinäistä etäisyyttä tasaisesti 0,5 km välein
- Herkkyystarkastelu maaperän resistiivisyyden suhteen, 2300...15000 Ω
- Tarkasteltavat kaapelityypit ovat AXAL-TT 20 kV 3x50 mm², AHXAMK-WP 20 kV 3x150 mm² ja AHXAMK-W 20 kV 240 mm²



Kuva 6.6 Kylä-taajaman resultoivia maadoitusimpedansseja



Kuva 6.7 Kylä-taajama resultoivia maadoitusimpedansseja

Tarkasteluissa tehtiin seuraavia havaintoja:

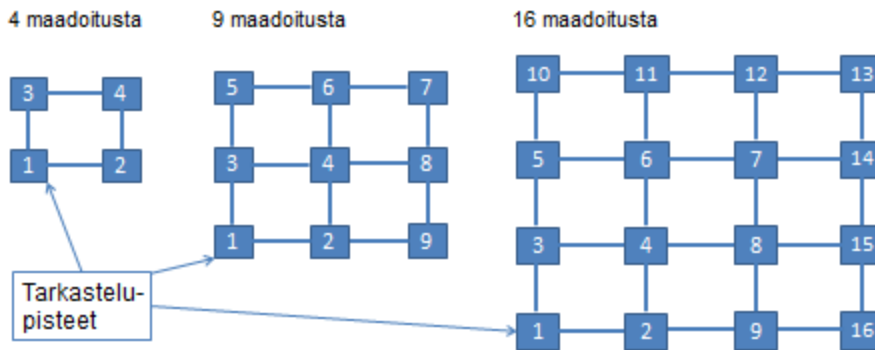
- Kuvassa 6.6 muuntamoiden maadoitukset ovat 10 ohm/kpl ja kuvassa 6.7 15 ohm/kpl
- 10 ohm muuntamomaadoituksilla:
 - o 0.5 – 2 km muuntamoiden välisillä etäisyyksillä maadoitusjärjestelmien resultoivat maadoitusimpedanssit ovat 3 - 5 ohm. Tämä on 26 – 48 % yksittäisen muuntamon 10 ohm maadoitusimpedanssista.
 - o Kaapelityypin valinnan vaikutukseksi resultoivaan maadoitusimpedanssin pienenemiseen on laskettu enintään 1.0 ohm.
 - o Maan resistiivisyyden vaikutukseksi maaadoitusimpedanssia lisäävänä tekijänä on saatu välillä 2300 – 15000 ohmm enintään 2.0 ohm.
- 15 ohm muuntamomaadoituksilla:
 - o 0.5 – 2 km muuntamoiden välisillä etäisyyksillä maadoitusjärjestelmien resultoivat maadoitusimpedanssit ovat 4 – 6 ohm. Tämä on 24 – 40 % yksittäisen muuntamon 15 ohm maadoitusresistanssista.
 - o Kaapelityypin valinnan vaikutukseksi resultoivaan maadoitusimpedanssin pienenemiseen on laskettu enintään 1.4 ohm.
 - o Maan resistiivisyyden vaikutukseksi maaadoitusresistanssia lisäävänä tekijänä on saatu välillä 2300 – 15000 ohmm enintään 2.0 ohm.

Oleellinen havainto tässäkin kohdassa on, että ketjuuntuvassa järjestelmässä resultoiva maadoitusimpedanssi on merkittävästi pienempi kuin tarkasteltavan yksittäisen muuntopiirin oma maadoitusimpedanssi erillisesti tarkasteltuna. Vaihteluväli oli 24 – 50 % yksittäiseen maadoitukseen verrattuna.

6.4 Taajamien silmukoidut verkot

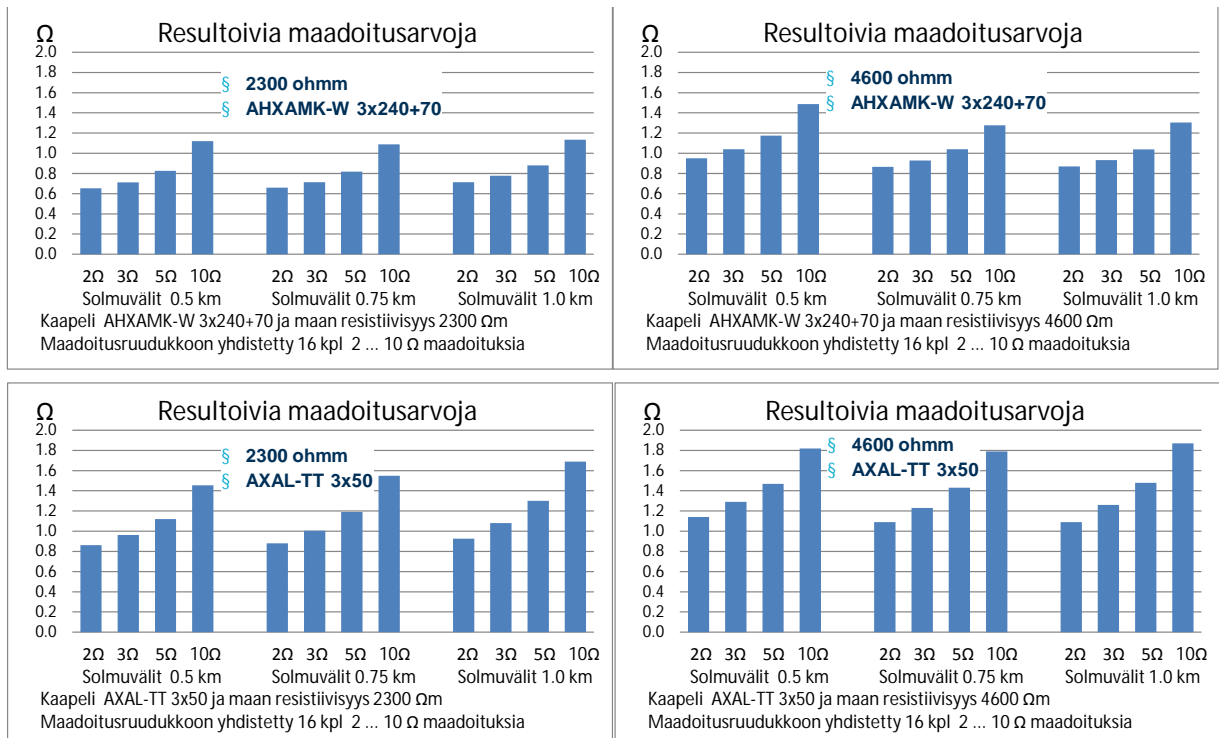
Silmukoidun verkon laajuuden vaikutus

Taajamien silmukoituja verkkoja kuvaavina kohteina käytettiin perustapauksina kuvan 6.8 kaltaisia kohteita, joissa verkon laajuutta on varioitu välillä 4 – 16 maadoitusta.



Kuva 6.8. Silmukoituja taajamien maadoitusjärjestelmiä

Kuvissa 6.9 esitetään silmukoidulla ruutumaisilla taajamien 16 solmun tyyppiverkoilla saatuja laskentatuloksia. Muntamoiden maadoitusarvot ovat olleet 2, 3, 5 ja 10 ohm/kpl. Solmuvälejä on vaihdeltu välillä 0.5 – 1 km. Maaperän resistiivisyyksinä on käytetty 2300 ohmm ja 4600 ohmm. Tarkasteltavat kaapelityypit ovat olleet AXAL-TT 3x50 ja AHXAMK-W 3x240+70.



Kuva 6.9. 16 maadoituksen taajamaverkon resultoivia maadoitusimpedansseja.

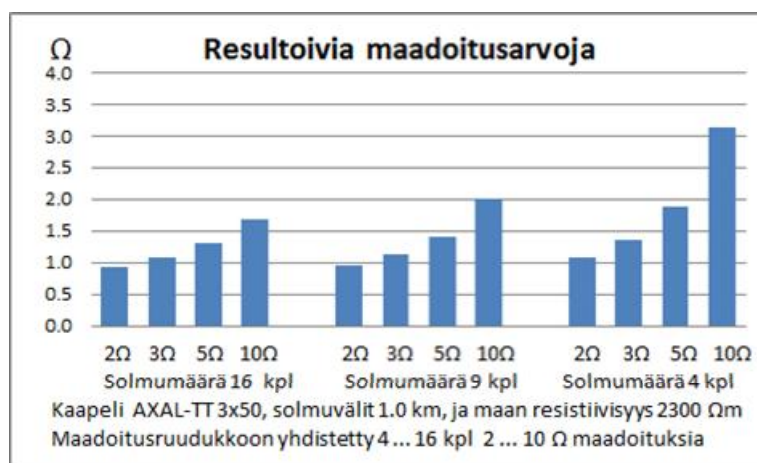
Tarkasteluista tehtiin seuraavia havaintoja 16 maadoituksen verkoilla:

- Resultoivat maadoitusimpedanssit ovat olleet välillä 0.7 – 1.9 ohm.
Nämä ovat huomattavasti pienempiä kuin vastaavat yhtä maadoitusta vastaavat arvot 2 – 10 ohm.
- Maadoitusten välimatkojen vaikutus resultoiviin maadoituksiin on enintään +/-0.2 ohm eli absoluuttisena arvona melko pieni.
- Maan resistiivisyyden vaikutus on enintään 0.4 ohm.
- Kaapelilajin valinnan vaikutukseksi on saatu 0.2 – 0.6 ohm.

Kuvassa 6.10 on lisää esimerkkejä 4 – 16 maadoituksen verkkojen tarkasteluista. Muuntamoiden maadoitusarvot ovat olleet 2, 3, 5 ja 10 ohm/kpl. Solmuvälinä on ollut 1km. Maaperän resistiivisyyksinä on käytetty 2300 ohmm. Kaapelityyppinä on ollut AXAL-TT 3x50.

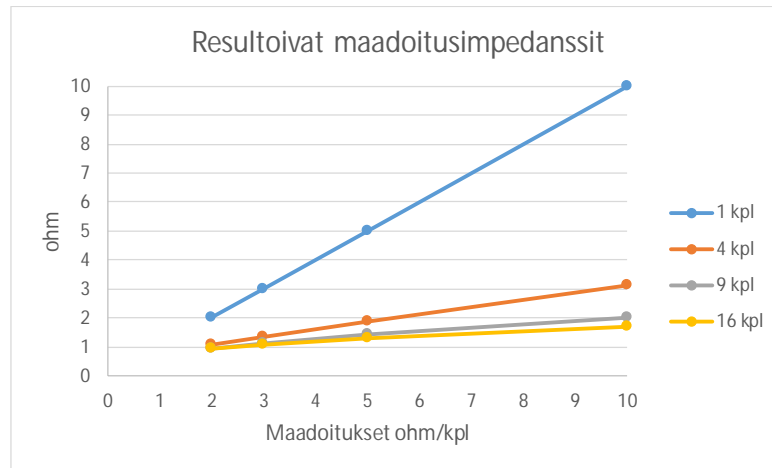
Kuvan 6.10 tuloksista tehtiin seuraavia havaintoja 16 maadoituksen verkoilla:

- Resultoivat maadoitusimpedanssit ovat välillä 0.9 – 3.1 ohm.
- 2 ja 3 ohm kohdalla maadoitusten lukumäärän vaikutus on absoluuttisena arvona melko pieni
- Maadoitusten lukumäärän vähentämisen vaikutus korostuu 4 maadoituksen kohdalla kasvaneina maadoitusarvoina

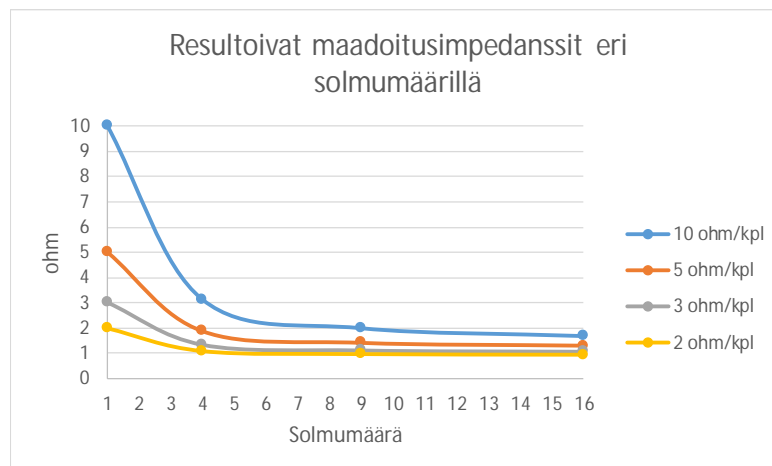


Kuva 6.10. 4 – 16 maadoituksen ruudukkomaisten taajamaverkkojen resultoivia maadoitusimpedansseja.

Kuvissa 6.11 ja 6.12 on esitetty resultoivia maadoitusimpedansseja ruudukkomaisille verkoille, joissa on maadoituksia yhdistettynä 1 – 16 kpl. Muuntamoiden maadoitusarvot ovat olleet 2, 3, 5 ja 10 ohm/kpl. Solmuvälinä on ollut 1km. Maaperän resistiivisyyksinä on käytetty 2300 ohmm. Kaapelityyppinä on ollut AXAL-TT 3x50.



Kuva 6.11. Resultoivia maadoitusimpedansseja ruudukkomaisilla verkoilla, joissa on maadoituksia yhdistettynä 1 – 16 kpl



Kuva 6.12. Resultoivia maadoitusimpedansseja ruudukkomaisilla verkoilla, joissa on maadoituksia yhdistettynä 1 – 16 kpl

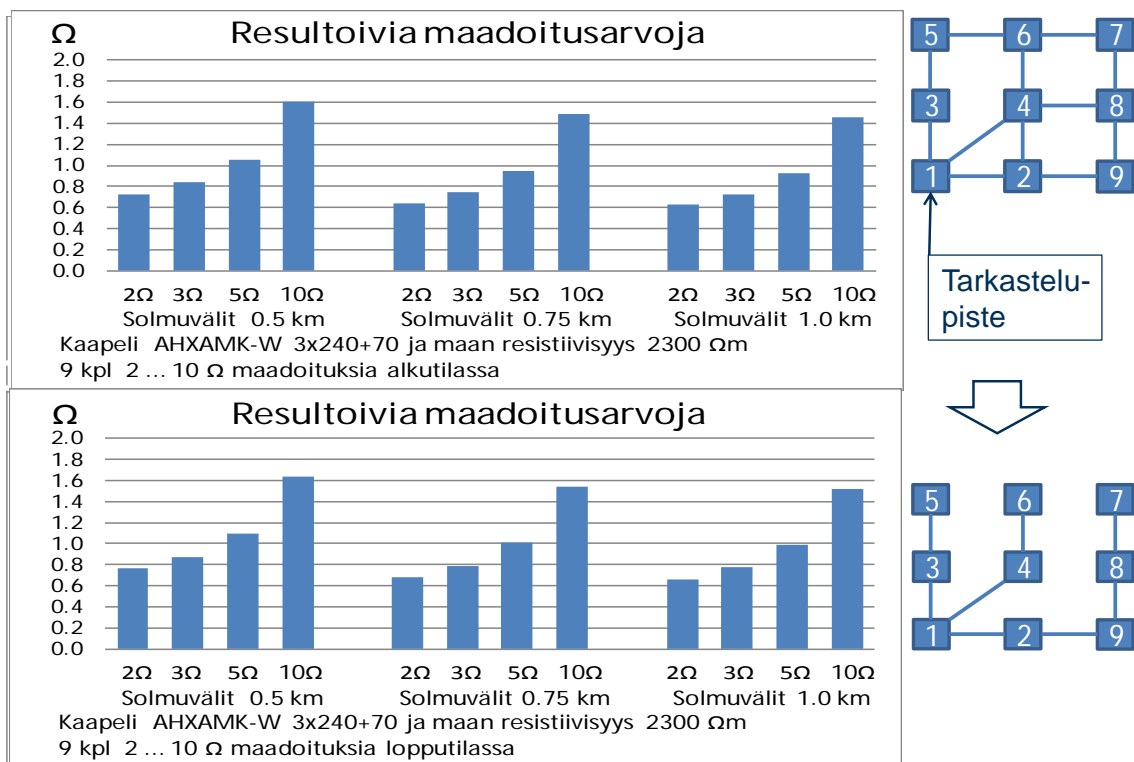
Seuraavia tuloksia havaittiin kuvista 6.11 ja 6.12:

- Selvä tulos on, että resultoivat maadoitusimpedanssit ovat merkittävästi pienempiä kuin tarkasteltavan muuntopiirin oma maadoitusimpedanssi erillisesti tarkasteltuna.
- Esimerkiksi 4 kpl 10 ohm maadoituksia yhdistettynä vastaa 3.1 ohm eli 31 % 10 ohm:sta. 16 kpl 10 ohm maadoituksia yhdistettynä vastaa 1.7 ohm eli 17 % 10 ohm:sta.
- Solmumäärän vaikutus 16 ja 9 solmun verkkojen välillä absoluuttisena arvona on melko pieni. 5 – 10 ohm/muuntamo kohdalla ero 4 solmun verkkoihin kasvaa kuitenkin huomattavasti.

Kaapeliyhteyksien poiston vaikutus

Kuvassa 6.13 on alkutilassa aiemmasta 9 solmun taajamaverkosta hieman modifioitu rakenne. Kuvassa on esitetty myös resultoivia maadoitusimpedansseja sekä silmukoidussa että säteittäisessä maadoitusjärjestelmässä.

Tarkastellaan esimerkiksi 1 km solmuväleillä olevia 5 ohm maadoituksia. Silmukkayhteyksien poiston vaikutus näyttää kuvan 6.13 perusteella suhteellisen vähäiseltä. Tarkastelupisteessä 1 silmukoidussa verkossa resultoiva maadoitusimpedanssi on 0.9 ohm ja säteittäisessä järjestelmässä 1.0 ohm. Eron ollessa alle 10%.



Kuva 6.13. Kaapeliyhteyksien poiston vaikutus resultoiviin maadoitusimpedansseihin

Tarkastelupisteen sijainnin vaikutus

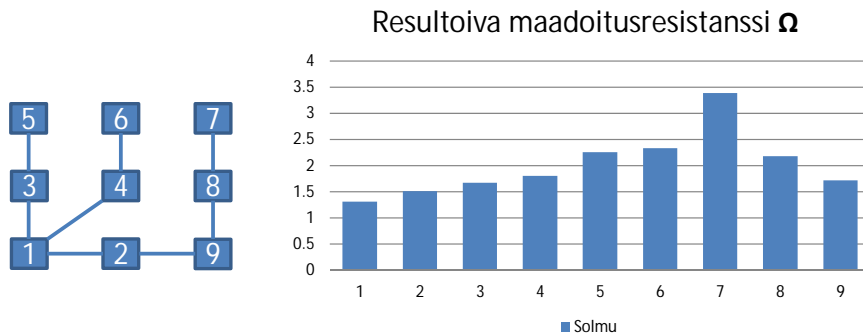
Vaihdetaan tarkastelupistettä edellisen tarkastelun pisteestä 1 solmuun 7. Lisäksi solmun 7 maadoitusresistanssi on nyt 30 ohm ja muiden 5 ohm/kpl. Lisäksi kaapelina on nyt AXAL-TT 3x50.

Ilman yhteyksien poistoa resultoiva maadoitusimpedanssi olisi solmussa 7 1.7 ohm ja silmukkayhteyksien poiston jälkeen 3.4 ohm. Tarkastelupisteen 1 kannalta vastaavat arvot olisivat 1.3 ohm ja 1.3 ohm.

Kuvassa 6.14 solmun 7 maadoitus on nyt 30 ohm ja muiden 5 ohm/kpl. Kuvassa 6.14 on esitetty resultoivan maadoitusimpedanssin suuruus eri solmuissa. Suurin resultoiva

maadoitusarvo (3,4 ohmia) on nyt 2.6-kertainen pienimpään verrattuna. Muuntamon omaan maadoitusimpedanssiin verrattuna tulos on kuitenkin pieni tässäkin tapauksessa.

Käytännössä ketjumaisissa ja verkottuvissa maadoitusjärjestelmissä eri kohdissa tarkasteltuna resultoivat maadoitusimpedanssit voivat poiketa merkittävästikin toisistaan.



Solmun 7 maadoitus on 30 ohm ja muut 5 ohm/kpl
 Solmuvälit ovat 1 km
 Kaapeli on AXAL-TT 3x50
 Maan resistiivisyys on 2300 ohmm

Kuva 6.14. Tarkastelupisteen vaikutus

6.5 110 kV vikavirtojen huomiointi

Sähköasemilla käytetään tavallisesti verkkomaista maadoituselektrodia (maadoitusruudukko), johon yhdistetään muun muassa laitteiden maadoitusjohtimet. Maadoitusruudukko yhdistetään myös asemalta lähtevien johtojen ukkosjohtimiin. Lisäksi maadoitusjärjestelmään voidaan liittää tarpeen mukaan vaakamaadoituselektrodeja. Maadoitusruudukon ja siihen liitettyjen muiden maadoituselektrodien avulla huolehditaan siitä, etteivät kosketus- ja askeljännitteet nouse aseman alueella vikatapauksissa liian suuriksi. Asemalta ulos meneviä maadoituselektrodeja käytettäessä on muistettava potentiaalin leviäminen ympäristöön ja siitä mahdollisesti aiheutuvat ongelmat. [4]

Maadoitusjärjestelmille asetettavat vaatimukset esitetään standardissa SFS 6001 [1] ja siinä kuvatut suurjänniteasennuksia koskevat vaatimukset pätevät sähköasemilla.

Maadoitusimpedanssi määräytyy maadoitusruudukon ja siihen liitettyjen muiden elektrodien ja johtimien resultoivana arvona. Viitteen [4] mukaan mittaaminen on ainoa luotettava tapa saada selville maadoitusimpedanssin suuruus.

Standardin SFS 6001 mukaan Suomen olosuhteissa kannattaa suur- ja pienjännitejärjestelmien maadoitukset yleensä yhdistää. Suurjännitesähköaseman maadoitukset voidaan vaihtoehtoisesti erottaa muista maadoituksista. Esimerkiksi vähintään 110 kV järjestelmän maadoitukset voidaan erottaa aseman ulkopuolisista

pienjännitemaadoituksista ja pienjännite- ja suurjännitejärjestelmien yhteisistä maadoituksista, jotta vältetään vähintään 110 kV suurjännitejärjestelmistä pienjännitejärjestelmiin siirtyvät kosketusjännitteet. [1]

Mikäli sähköaseman ja keskijänniteverkon maadoitukset ovat olleet erillään tai rakennetaan uusi sähköasema, voi tulla keskijänniteverkon kaapeloinnin yleistyessä ja galvaanisesti yhteen kytkettyjen maadoitusten lisääntyessä ajankohtaiseksi selvittää, olisiko järkevää yhdistää niiden maadoitusjärjestelmät. Vaihtoehtoiksi tulee:

1. Maadoitusjärjestelmät pidetään erillään
2. Selvitetään kaapeloinneista aiheutuvat vaikutukset maadoituksiin. Kaapeloinnin ja galvaanisesti yhdistyvien maadoitusjärjestelmien vaikutuksesta voidaan maadoitusolosuhteiden olettaa paranevan oleellisesti, kun ennestään erilliset järjestelmät kytkeytyvät yhteen. Tarvittaessa voidaan tällöin myös pienentää 110 kV maavirtoja tai muulla tavoin pienentää yhdistyvien maadoitusten resultoivaa maadoitusimpedanssia.

Ohjausryhmän keskusteluissa arvioitiin 110 kV sähköasemien maasulkuvirtojen vaihtelualueeksi 0 ... 5 kA. Vikavirtojen suuruuden takia maadoitusten yhdistäminen voi muodostua useita toimenpiteitä vaativaksi, mutta toisaalta jo pelkkä maadoitusten yhdistäminen voi pienentää maadoitusolosuhteita oleellisesti. Tällöin on syytä tehdä tapauskohtainen tarkastelu.

Sähköasemien maadoitusjännitettä voi pienentää parantamalla maadoitusta tai pienentämällä vikavirtoja. 110 – 400 kV asemilla voidaan maadoitusjännitettä alentaa myös pienentämällä maasulkuvirtaa syöttävien johtojen reduktiokertoimia. Ilmajohtojen ukkosjohtimet ja maakaapeleiden metallivaipat osallistuvat vikavirtojen johtamiseen, ts. osa virtapiirin maasulkuvirrasta kulkee niiden kautta. Suurjännitejärjestelmän maadoituksen kautta kulkee vain osa vikavirrasta. Tätä maavirran pienenemistä kuvataan reduktiokertoimen avulla. Reduktiokertoimin vaikuttaa ukkosköysien rakenne ja kaapeloinnin toteutus. [1]

Myös maadoituselektrodeja voidaan lisätä ja jakeluverkon maadoituksia voidaan parantaa tarpeen mukaan.

Sähköaseman maadoitustarkastelu sisältää pääpiirteittäin seuraavia vaiheita:

- Noudatetaan standardin SFS 6001 vaatimuksia.
- Sähköasemalla tapahtuvassa 110 kV yksivaiheisen vian tarkastelussa perustietoina ovat:
 - o 110 kV verkon vikavirran suuruus ja kesto aika
 - o Maadoitusverkon rakenne
 - o Ukkosköysien ja kaapelien reduktiokertoimet
- Määritetään vikavirrasta maadoitukseen menevä maavirta soveltaen SFS 6001 mukaisesti reduktiokertoimia.

- Määritetään maadoitusimpedanssi ottaen huomioon sähköaseman maadoitukset ja keskijänniteverkon maadoitusten kytkeytyminen.
- Määritetään maadoitusjännite.
- Varmistetaan, että maadoitusjännite täyttää SFS 6001 kosketusjännitteeseen perustuvat ehdot. Tarvittaessa tukeudutaan SFS 6001 mukaisiin toimenpiteisiin.
- Mahdollisesti joudutaan arvioimaan myös keinoja reduktiokertoimien pienentämiseksi, jotta maavirtaa saataisiin pienennettyä. Myös verkon maadoituksia voidaan parantaa lisämaadoituksilla.

7. Johtopäätökset

Selvitystyössä paneuduttiin maadoitusjärjestelmien sähkötekniseen mallintamiseen teoreettisesti ja laadittiin laskentamalleja.

Maadoitustarkasteluja ja -laskelmia varten määriteltiin esimerkkitarkasteluja ja käytettiin mm. teoreettisia tyyppitapauksia. Perustyyppitapaukset olivat:

- Haja-asutusalue
 - 10 muuntamomaadoitusta yhdistettynä galvaanisesti peräkkäin ketjuksi
- Kylä-taajama
 - 5 muuntamomaadoitusta yhdistettynä galvaanisesti peräkkäin ketjuksi
- Taajama
 - 4...16 muuntamomaadoitusta yhdistettynä galvaanisesti toisiinsa ruudukkomuodossa ja sisältäen myös silmukkayhteyksiä

Verkkojen tarkasteluissa varioitiin seuraavia laskentaparametreja:

- Muuntamoiden maadoitusresistanssit
- Kaapelityypit ja -pituudet
- Muuntamoiden väliset maantieteelliset etäisyydet
- Maan ominaisresistiivisyys

Maadoitustarkastelujen lähtötietoja olivat:

- Muuntamoiden mitatut ja/tai tavoitteelliset maadoitusresistanssit
- Maadoitusten väliset maantieteelliset etäisyydet
- Maaperän resistiivisyys
- Muuntamoiden välisten kaapeliyhteyksien pituudet
- Kaapelityypit sekä kaapelityyppien ja maapiirien impedanssiarvot

Lähtötiedot pyrittiin valitsemaan siten, että maadoitusten kannalta vaikeatkin, mutta kuitenkin realistiset, tilanteet tulivat käsitellyksi riittäväksi arvioidussa laajuudessa.

Haja-asutus alueilla resultoivat yhdistetyt maadoitukset vaihtelivat välillä 4 – 16 ohm, kun yksittäiset maadoitukset erillisinä tarkasteltuina olivat 20 – 50 ohm.

Kylä-taajamien alueilla resultoivat yhdistetyt maadoitukset vaihtelivat välillä 3 - 6 ohm, kun yksittäiset maadoitukset erillisinä tarkasteltuina olivat 10 - 15 ohm.

Taajamien alueilla resuloivat yhdistetyt maadoitukset vaihtelivat välillä 0.7 – 1.9 ohm, kun yksittäiset maadoitukset erillisinä tarkasteltuina olivat 2 – 10 ohm.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että keskijännitekaapeleiden kosketussuojien sekä mahdollisten kaapelien keskusköysien kautta yhdistyvissä maadoitusverkoissa yksittäisten muuntopiirien maadoituksilla on laskentatulosten perusteella olennainen vaikutus laajempaan maadoitusjärjestelmään ja muiden muuntamoiden resuloiviin maadoitusimpedansseihin. Tulos on merkittävä maadoitusverkon suunnittelun kannalta.

Kaapeliverkon maadoitussuunnittelussa ei pitäisi tarkastella yksittäisten muuntopiirien maadoituksia vain erikseen, vaan kaapelien kosketussuojien ja kaapelien keskusköysien ym. johtimien kautta yhdistyvää maadoitusjärjestelmää olisi syytä tarkastella laajempaan kokonaisuutena. Etenkin haja-asutusalueen osalta ketjuuntuivissa järjestelmissä resuloivat maadoitukset olivat tarkastelluissa tyyppitapauksissa merkittävästi pienempiä kuin tarkasteltavan muuntopiirin oma maadoitus.

Yhteen kytkeytyvät ketjumaiset ja verkottuvat maadoitusjärjestelmät tukevat toisiaan ja vaikuttavat yhteisiin maadoitusarvoihin nopeasti verkoston laajentuessa. Resuloiva maadoitusarvo pienenee muuntamoiden lukumäärän lisääntyessä ja selkeästi suurin vaikutus on ensimmäisten maadoitusten yhdistämisellä. Muuntamomäärän kasvaessa yksittäisen muuntamon absoluuttinen vaikutus pienenee oleellisesti.

Maadoitusjärjestelmän muodostuessa useammasta kuin yhdestä toisiinsa yhdistetystä paikallisesta maadoitusjärjestelmästä ovat maadoitusimpedanssit ja maadoitusjännitteet erisuuruisia eri kohdissa. Laskentatulosten perusteella suurimmat resuloivat impedanssit löytyvät homogeenisen maadoitusketjun päistä. Ketjun keskiosissa resuloiva impedanssi oli alempi kuin reunoilla.

Laskentatuloksiin sisältyy laskentamenetelmien ja lähtötietojen epätarkkuuden takia aina epävarmuutta. Käytännön tasolla maadoitustarkastelujen tulosten hyödyntäminen tulee varmentaa riittävästi standardin SFS 6001 edellyttämällä mittauksilla ja muilla tavoilla.

Galvaanisesti yhteen kytkeytyvien keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmien lisääntyminen pienentää oleellisesti resuloivia maadoitusimpedansseja. Tällöin myös edellytykset 110 kV sähköasemien ja keskijänniteverkon maadoitusten yhdistämiseen paranevat. Käytännössä mahdollinen toteutustapa on tarkasteltava tapauskohtaisesti.

8. YHTEENVETO

Selvitystyön keskeiset tulokset ovat:

- On selvitetty yhdistyvien maadoitusjärjestelmien sähkötekniistä mallintamista teoreettisesti
- On selvitetty maadoitustarkastelujen mallinnusta PSCAD simulointiympäristössä ja Excel- sekä Matlab –laskennassa
- Esimerkkiverkoilla tehdyt simuloinnit ja laskelmat lähtötietoja varioiden
- Excel:illä toteutettu työkalu maadoitussuunnittelun tueksi.

Selvityksen tulokset tarjoavat uutta tietoa maadoitusjärjestelmien, erityisesti ketjuuntuneiden maadoitusverkkojen, ominaisuuksista. Laskentatulosten ja -menetelmien avulla on yhä paremmat edellytykset arvioida maadoitusjärjestelmien turvallisuutta ja toisaalta optimoida maadoitusjärjestelmiä mahdollisimman kustannustehokkaiksi.

Lähtötietojen ja laskentatulosten varmistamiseksi mittauksilla tulee olla jatkossa myös riittävän merkittävä rooli.

LÄHDELUETTELO

- [1] Suurjännitesähköasennukset (High-voltage electrical installations), Standardi SFS 6001:2015

- [2] Valjus, J., Maadoituselektrodien teoriaa, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, Julkaisu 39-79, Sähköverkkojen maadoitusten suunnittelu rakentaminen ja mittaaminen, Helsinki 1979

- [3] Parsotam, A., March 1997. Fundamentals of Calculation of Earth Potential Rise in the Underground Power Distribution Cable Network., Paper. Viitattu 25.9.2016. Saatavissa <http://www.nzccpts.co.nz/publications/Cable%20Sheath%20Bonding%20Application%20Guide%20Companion.pdf>

- [4] Elovaara Jarmo, Haarla Liisa, Sähköverkot 2, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, Otatieto 2011

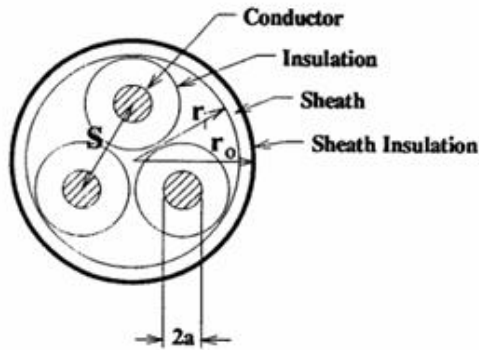
Liite 1 Maadoitusmittausaineistoa

Maadoitusmittausaineistoa oli käytettävissä tyyppitapausten arviointia varten kolmesta eri verkkoyhtiöstä:

1. Mittaustulokset yhtiö A:n yksittäisten puistomuuntamoiden maadoitusarvoista. Kohteet ovat erillisiä ilmajohton alle rakennettuja puistomuuntamoita, jotka on kytketty alle 50 metrin keskijännitekaapelilla kiinni ilmajohtoon.
 - 166 kpl muuntamoita
 - Maadoitusresistanssien keskiarvo 16 ohm ja mediaani 11 ohm
 - 5 % muuntamoista yli 43 ohm
2. Yhtiön B tietoja kaapeliliitännäisten puistomuuntamoiden maadoituksia.
 - 32 kpl
 - Maaperä pääosin hiekka/sora. Osin myös savi ja hiekkamoreeni.
 - Maadoitusresistanssien keskiarvo 8 ohm ja mediaani 7 ohm
 - 5 % muuntamoista yli 23 ohm
3. Yhtiön C muuntamot
 - Maadoitusresistanssien keskiarvo 17 ohm ja mediaani 11 ohm
 - 5 % muuntamoista yli 50 ohm

Liite 2 Kaapeloinnin maadoitettujen osien (itse)reaktanssin määrittäminen

Tarkastellaan ensin kuvan a1 mukaista kaapelia. Seuraava teoria on saatu viitteestä [3].



Kuva a2. Kaapelin poikkileikkaus

Kaapelin maadoitettujen osien (itse)impedanssin määrittäminen voidaan tehdä seuraavasti:

3.3.2 The Zero Sequence Self Impedance of the Sheath Z_{ss0}

The zero sequence self impedance of the sheath is calculated by equation 7 given below.

$$Z_{ss0} = 3 \left\{ R_{sh} + 988.2 \times 10^{-6} f + 2.893 \times 10^{-3} f \log_{10} \left(\frac{658368 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{GMR_{sh}} \right) \right\} \Omega/\text{km} \quad \text{eqn. 7}$$

$$\text{where } R_{sh} = \frac{\rho_{sh} \times 10^9}{\pi (r_o^2 - r_i^2)} \quad \Omega/\text{km} \quad \text{eqn. 8}$$

- ρ_{sh} - resistivity of the sheath material ($\Omega\text{-m}$)
- r_o - outer radius of the sheath mm
- r_i - inner radius of the sheath mm
- ρ - deep layer soil resistivity $\Omega\text{-m}$
- f - frequency Hz

Typical values at 20°C are:

Lead (Pb)	$21.4 \times 10^{-8} (\Omega\text{-m})$
Aluminium (Al)	$2.84 \times 10^{-8} (\Omega\text{-m})$

$$GMR_{sh} - \text{GMR of the sheath} = \frac{r_o + r_i}{2} \text{ mm} \quad \text{eqn. 9}$$

The cable sheath self impedance is its zero sequence self impedance divided by 3.

Kaapelin maadoitettujen osien itsereaktanssi saadaan siis jakamalla kaavasta eqn. 7 saatava reaktanssiosa kolmella.

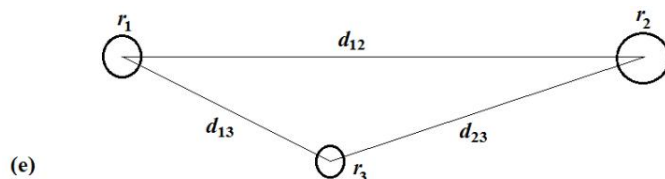
Muunlaisille kaapelityypeille voidaan laskea ko. reaktanssi määrittämällä niille ensin tapauskohtaisen keskisäteen GMR_{sh} ja sijoittamalla se kaavaan eqn. 7. Seuraava kuva havainnollistaa keskisäteen laskentaa.

GMR-is the Geometric Mean Radius of one conductor (mm) and is calculated by the following equation:

$$\text{GMR} = (k a) \quad \text{mm} \quad \text{eqn. 3}$$

- a** radius of the conductor mm. See figure 3.1.
k factor to convert the conductor radius to the Geometric Mean Radius (GMR) of the conductor (See Table 3.1).

Conductor Type	k
Solid round conductor	0.779
Full Stranding	
7	0.726
19	0.758



Kuva a1. Kolmen maadoitusyhteyden etäisyydet ja keskisäteet

Tarkastellaan seuraavaksi n kpl rinnakkaisia maadoitusyhteyksiä. Tällöin saadaan:

$$\text{GMR}_{sh} = (r_1 r_2 r_3 \dots r_n d_{12}^2 d_{13}^2 \dots d_{1n}^2 d_{23}^2 \dots d_{(n-1)n}^2)^{1/n^2}$$

jossa $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ ovat eri osajohtimien geometrisia keskisäteitä

$d_{12}, d_{13}, \dots, d_{(n-1)n}$ ovat osajohtimien keskipisteiden välisiä etäisyyksiä

Kuvassa a2 on esitetty em. mallinnuksen pohjalta laskettuja reaktansseja 50 Hz taajuudella. Laskennassa on käytetty seuraavia lähtötietoja:

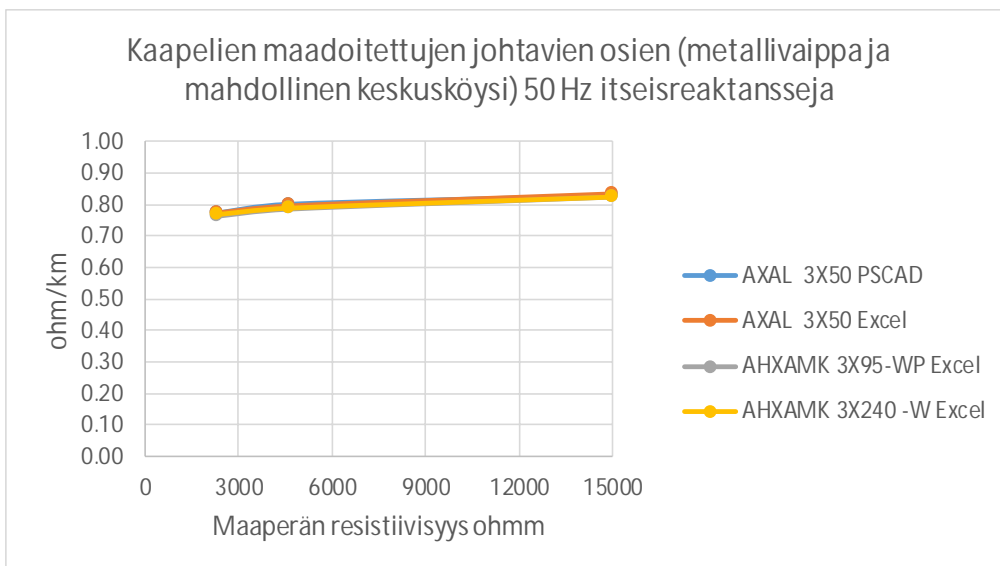
1. AXAL 3x50
 - Johtimia ympäröivän metallivaipan halkaisija 4.0 cm
2. AHXAMK 3x95-WP
 - Kunkin vaihejohtimen erillisen metallivaipan halkaisija 2.5 cm
 - Vaihejohtinten keskipisteiden väliset etäisyydet 3.2 cm
3. AHXAMK 3x240-W
 - Kunkin vaihejohtimen erillisen metallivaipan halkaisija 3.3 cm
 - Vaihejohtinten keskipisteiden väliset etäisyydet 4.0 cm
 - Keskusköysi 70 mm² ja geometrinen keskisäde 0.34 cm

Liite 2 3(3)

Simuloinneissa hyödynnettiin PSCAD:in valmiita kaapelimalleja, joihin päivitettiin tarvittavat lähtötiedot. Impedanssitarkastelut perustuivat kaapelointien sähköiseen ja geometriseen mallinnukseen sekä maaperän ominaisuuksiin. Simuloinneissa syötettiin kaapelin kautta virtaa ja impedanssi saatiin selville jännitehäviön ja virran perusteella.

Kuvassa a3 on esitetty PSCAD:illa ja Excelissä laskentakaavoilla saatuja tuloksia. Simuloinnilla ja kaavoilla saadut tulokset vastaavat hyvin toisiaan.

Reaktanssit vaihtelivat tyypillisesti välillä 0.76 – 0.83 riippuen sekä kaapelityypeistä että maan resistiivisyydestä. Kuvaava likiarvo olisi 0.8 ohm, jos halutaan käyttää laskelmissa vain yhtä lukuarvoa.



Kuva a3 Kaapelien maadoitettujen osien (metallivaippa ja mahdollinen keskusköysi) itsereaktansseja

Tampereen teknillinen yliopisto
PL 692
33101 Tampere

Tampere University of Technology
P.O. box 692
FI-33101 Tampere, Finland