



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# MAADOITUKSEN SUUNNITTELUOHJE TAM- PEREEN SÄHKÖVERKKO OY:LLE

Ville Keränen

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2017  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka

KERÄNEN, VILLE:

Maadoituksen suunnitteluohje Tampereen Sähköverkko Oy:lle

Opinnäytetyö 40 sivua, joista liitteitä 1 sivu  
Joulukuu 2017

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli päivittää Tampereen Sähköverkko Oy:n jakeluverkon maadoituksen suunnitteluohje vastaamaan viimeisimpiä standardeja. Tarkoituksena oli myös varmistaa, että kosketusjännitevaatimukset täyttyvät tämänhetkisillä maasulkusuo-  
jauksen asetteluilla kaikilla verkon alueilla. Lopuksi työssä vielä selvitettiin mahdollisia muutoksia standardin SFS- 6001 maadoitusosion seuraavaan versioon.

Standardeja sekä muuta kirjallisuutta tutkimalla selvitettiin aluksi keskijänniteverkon maadoitusten rakennetta ja tämän hetken vaatimukset. Eri muuntopiirien yhdistyvien maadoitusten vaikutusta resultoivaan maadoitusimpedanssin arvoon myös pohdittiin uusimpien tutkimusten valossa.

Työn tuloksena päivitettiin Tampereen Sähköverkko Oy:n aiempaa dokumenttia jakelu-  
verkon maadoitusten suunnittelusta siltä osin kuin standardit olivat muuttuneet. Aikai-  
sempaa maadoituksen suunnitteluohjetta tutkittaessa huomattiin myös, että muuntopiirien  
yhdistyvien maadoitusten resultoivan maadoitusimpedanssin laskenta on suoritettu liian  
optimistisesti. Uuteen ohjeeseen maadoituselektrodien mitoituksen laskenta on suoritettu  
realistisemmin. Suurimmat muutokset SFS -6001 maadoitusosioon tulevat luultavasti  
koskemaan sitä, kuinka maadoitusjärjestelmät jaotellaan ja sitä kautta siihen, kuinka niille  
tulee suorittaa tarkastusmittauksia.

---

Asiasanat: kosketusjännite, maadoitus, maadoitusmittaus, maadoitusjärjestelmä, maa-  
sulku, resultoiva maadoitusimpedanssi

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Electric power engineering

KERÄNEN, VILLE:

Designing Earthing Systems for Tampere Sähköverkko Ltd.

Bachelor's thesis 40 pages, appendices 1 page  
December 2017

---

The purpose of this thesis was to update the internal document of Tampere Sähköverkko Ltd on the design of earthing systems to comply with the latest edition of SFS 6001 - standard. The earth fault currents and parameters of earth fault protection had changed in addition to the updated standard. Hence it was also necessary to calculate the new maximum ground resistances for the installations to make sure that the touch voltages are within safe limits in case of an occurring earth fault. It was also contemplated how the SFS -6001 standard will be modified in the next revision.

The research was conducted by examining standards and literature on earthing systems in distribution networks. The calculation of resultant impedance of interconnected earthings was also contemplated in the light of new studies.

As a result of the study an updated document on the design of earthing systems was produced. It was also found out that the calculation of the resultant impedances had been done with overconfidence in the old document. In the new document the maximum ground resistances are calculated in a more conservative way. The biggest changes to SFS -6001 probably concern the way different earthing systems will be classified and what kind of inspection requirements there will be for the different categories.

---

Key words: earthing measurement, earthing system, ground fault, resultant earthing impedance, touch voltage

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Työn tarkoitus .....	7
1.2	Tampereen Sähköverkko Oy.....	7
2	MAASULKUVIAT KESKIJÄNNITEVERKOSSA .....	9
2.1	Verkon jännitteet maasulkuvian aikana .....	10
2.2	Maasulkuvirta .....	10
2.2.1	Maasulku maasta erotetussa verkossa.....	10
2.2.2	Maasulku sammutetussa verkossa.....	12
2.3	Maavirta .....	13
2.4	Katkeileva maasulku .....	15
3	MAADOITUKSET JA NIIDEN MITOITUS .....	17
3.1	Kosketus- ja askeljännite .....	17
3.2	Maadoitusjännite ja –impedanssi.....	19
3.2.1	Maadoitusjännitteen tavoitetaso.....	21
3.3	Maadoitusten mitoitus Tampereen Sähköverkossa.....	23
3.3.1	Sallitut maadoitusimpedanssit vanhan suunnitteluohjeen mukaan	23
3.3.2	Sallitut maadoitusimpedanssit uuden suunnitteluohjeen mukaan.	24
3.3.3	Maadoitusjännitevaatimuksen toteutuminen TSV:n verkossa ....	26
3.4	Siirtyvät jännitteet .....	27
3.5	Mekaaninen ja korroosion kestävyys.....	28
3.6	Terminen kestävyys .....	29
4	MAADOITUSJÄRJESTELMÄT .....	31
4.1	Laaja maadoitusjärjestelmä.....	31
4.2	Paikallinen maadoitusjärjestelmä.....	32
5	MAADOITUSTEN MITTAAMINEN.....	33
5.1	Maadoitusmittausten ajankohdat .....	33
5.2	Käänne pistemenetelmä .....	33
5.3	Voltti - ampeerimenetelmä .....	34
6	DOKUMENTOINTI .....	35
7	MAHDOLLISET MUUTOKSET STANDARDIN SFS- 6001 MAADOITUS OSION SEURAAVAAN VERSIOON .....	36
7.1	Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä .....	36
7.1.1	Mittaukset.....	36
7.1.2	Resultoiva maadoitusimpedanssi .....	37
8	POHDINTA.....	38
	LÄHTEET.....	39

LIIITEET ..... 40

**LYHENTEET JA TERMIT**

$I_E$	Maavirta
$I_{eF}$	Maasulkuvirta
$R_E$	Maadoitusresistanssi
$U_E$	Maadoitusjännite
$U_{Tp}$	Sallittu kosketusjännite
$U_{vS}$	Askeljännite
$U_{vT}$	Kosketusjännite
$Z_E$	Maadoitusimpedanssi

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tarkoitus

Sähköturvallisuuden kannalta ovat oikein tehdyt ja riittävät maadoitukset kriittisen tärkeitä. Keski-jänniteverkon maadoituksissa noudatetaan standardia SFS 6001 Suurjännite-sähköasennukset, johon julkaistiin vuonna 2015 kokonaisuudistus. Käytettäessä suurjännite- ja pienjännitejärjestelmille yhteistä maadoitusta otetaan huomioon myös SFS 6000 standardin vaatimukset.

Tämän työn tavoitteena on selvittää sähköjakeluverkon maadoitusjärjestelmiin liittyvät vaatimukset ja toteutustavat sekä päivittää Tampereen Sähköverkko Oy:n sähköjakeluverkon maadoituksen suunnitteluohje vastaamaan viimeisimpiä standardeja. Tarkoituksena on myös selvittää suurimmat sallitut maadoitusresistanssi arvot, jotta kosketusjännitevaatimukset täyttyvät tämänhetkisillä maasulkusuojauksen asetteluilla kaikilla verkon alueilla. Lopuksi pohditaan vielä uusimpien tutkimustulosten perusteella keski-jänniteverkon yhdistyvien maadoitusten vaikutusta resultoiviin maadoituksiin ja selvityksen sekä asiantuntijahaastattelun avulla pyritään ennakoimaan lähitulevaisuudessa mahdollisesti tulevia muutoksia SFS 6001 standardiin.

## 1.2 Tampereen Sähköverkko Oy

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Tampereen Sähköverkko Oy (TSV), joka on osa Tampereen Sähkölaitos -konsernia. TSV toimii jakeluverkon haltijana pääosin Tampereen alueella ja sen tehtävänä on siirtää sähköä omalla jakelualueellaan. TSV vastaa myös sähköverkon suunnittelusta, rakennuttamisesta, kunnossapidosta ja käytöstä sekä hoitaa asiakkaiden sähköenergian mittauksen ja välittää mittaustiedot sähkönmyyjille. (Tampereen Sähköverkon www-sivut 2017)

Tampereen Sähköverkko Oy:n sähköverkko jakautuu maadoitusjärjestelmän osalta kolmeen alueeseen. Alueet ovat laajan maadoitusjärjestelmän alue, muu taajama-alue ja Teiskon alue. Näillä alueilla maadoituksen maadoitusimpedanssin mitoitusvaatimus ja impedanssin mittaustarve on erilainen. Kuvassa 1 on esitetty Tampereen Sähköverkon sähköjakelualue.



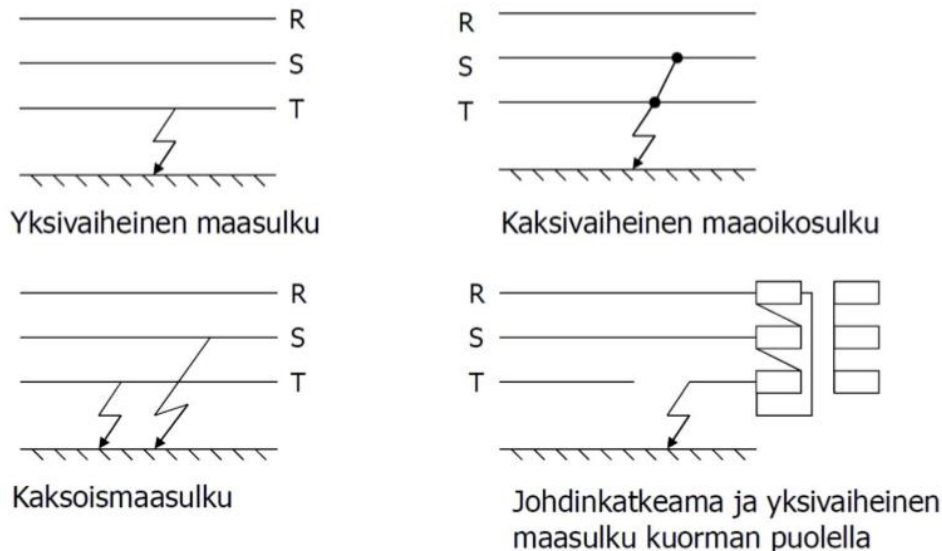
Kuva 1 Tampereen Sähköverkko Oy:n sähkönjakelualue

Kuvassa 1 laajamaadoitusjärjestelmä on merkitty A:lla, muu taajama-alue B:llä ja Teiskon alue C:llä. Muu taajama-alue on aluetta, jolla maadoitusjärjestelmän verkkomaisuutta ei pystytä toteuttamaan, mutta jokaisen muuntamon maadoitus on kuitenkin yhdistetty vähintään kahden viereisen muuntamon maadoitukseen. Teiskon syöttöalue eroaa muusta taajama alueesta siinä, että yksittäisen muuntamon maadoituselektrodi on yleensä yhdistetty vain yhteen naapurimuuntamoon tai sitä ei ole yhdistetty toisiin maadoituksiin ollenkaan.



## 2 MAASULKUVIAT KESKIJÄNNITEVERKOSSA

Maasulku on käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maan kanssa johtavassa yhteydessä olevan osan välinen eristysvika. Maasulku voi olla yksi- tai monivaiheinen. Jos monivaiheisen maasulun eristysviat sattuvat samassa kohdassa järjestelmää, on kyseessä maaokosulku. Jos viat ovat eri kohdissa järjestelmää, on kyseessä kaksois- tai kolmoismaasulku. Kuvassa 2 on esitetty erilaisia maasulkutilanteita.



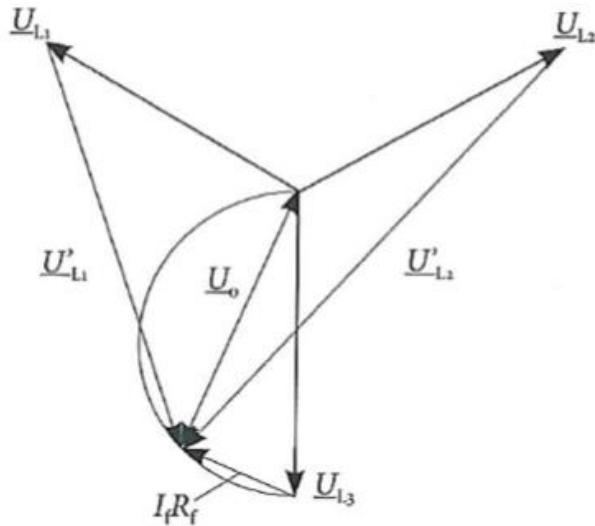
Kuva 2 Maasulkutilanteita (Partanen, J. 2011)

Maasulkuja aiheuttaa yleisimmin kaatuneet puut, ukkonen, työkoneet, eristimien rikkoutuminen ja katkenneet johtimet. Maasulusta aiheutuvia vaara- ja haittatekijöitä ovat: vikapaikkaan ja sen ympäristöön syntyvät jännitteet, maasulkuvirran lämpövaikutukset sekä maasulussa syntyvät ylijännitteet. (ABB Oy. 2000. TTT-käsikirja 2000–07).

Yksivaiheinen maasulku on maasulkusuojauksen kannalta olennaisin, koska sen kesto on yleensä pisin, kaksoismaasulun laukaistessa nopeammin toimivan ylivirtasuojauksen. Ihmiselle sallittu virta-altistus on voimakkaasti riippuvainen paitsi virran suuruudesta myös sen kestosta. Maadoitustapana keskijänniteverkoissa käytetään Suomessa tähtipisteestään erotettua verkkoa tai sen erityismuotoa sammutettua verkkoa. Suurin syy maasta erotetun verkon käyttöön on huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuvat vaarallisen suuret kosketusjännitteet. (Lakervi, E., Partanen J. 2008)

## 2.1 Verkon jännitteet maasulkuvian aikana

Terveessä tilassa verkon vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä eli niiden summa on nolla. Maasulku aiheuttaa epäsymmetriaa vaihejännitteisiin, jonka seurauksena tähtipisteen potentiaali poikkeaa maan potentiaalista. Tätä maan ja tähtipisteen välistä potentiaali eroa kutsutaan nollajännitteeksi ( $U_0$ ). Kuvassa 3 on esitetty jännitevektorit yksivaiheisessa maasulussa.



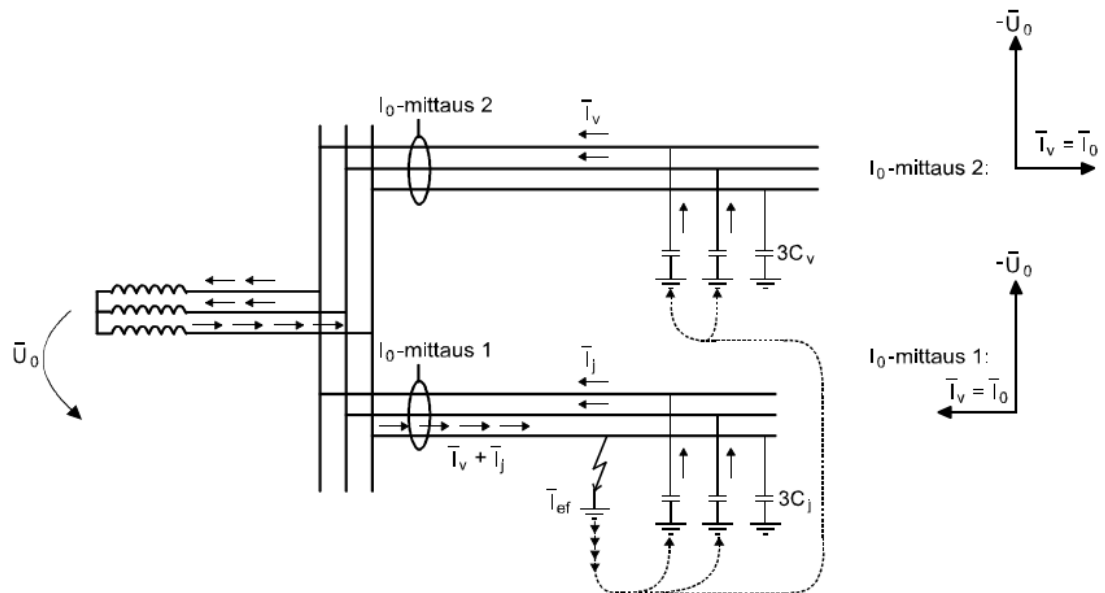
Kuva 3 Jännitteet maasulun aikana (Lakervi, E., Partanen J. 2008 s.187)

Vikatapauksessa terveiden vaiheiden (L1 ja L2) jännitteet nousevat ja viallisen vaiheen (L3) jännite maahan nähden pienenee. Vikaresistanssittomassa maasulussa terveiden vaiheiden jännite maata vasten on pääjännitteen suuruinen ja viallisen vaiheen jännite putoaa nolnaan. Tällöin nollajännite ( $U_0$ ) on vaihejännitteen suuruinen.

## 2.2 Maasulkuvirta

### 2.2.1 Maasulku maasta erotetussa verkossa

Terveessä verkossa vaihejännitteiden ollessa symmetrisiä myös maakapasitanssien kautta kulkevat varausvirrat muodostavat symmetrisen järjestelmän ja näin ollen niiden summa on nolla. Maasulkutilanteessa varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä osa virrasta kulkee vikapaikan kautta maahan. Kuvassa 4 on esitetty maasulkuvirran kulkureitti yksivaiheisessa maasulussa.



Kuva 4 Maasulkuvirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa (ABB Oy. 2000.)

Kuten kuvasta 4 nähdään, kulkee maasulkuvirta vikapaikan kautta maahan ja maakapasitanssien sekä terveiden vaiheiden kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä taas vian kautta maahan. Maasulkuvirran suuruus on siis riippuvainen vikaresistanssista ja verkon maakapasitansseista.

Vikaresistanssittomassa yksivaiheisessa maasulussa voidaan maasulkuvirran arvo laskea lausekkeella:

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 U \quad (1)$$

jossa,

$\omega$  on kulmataajuus

$C_0$  on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

$U$  on verkon pääjännite

Avojohtoverkoille voidaan maasulkuvirran arvo laskea likimäärin kaavalla:

$$I_e \approx \frac{U \cdot l}{300} \quad (2)$$

missä,

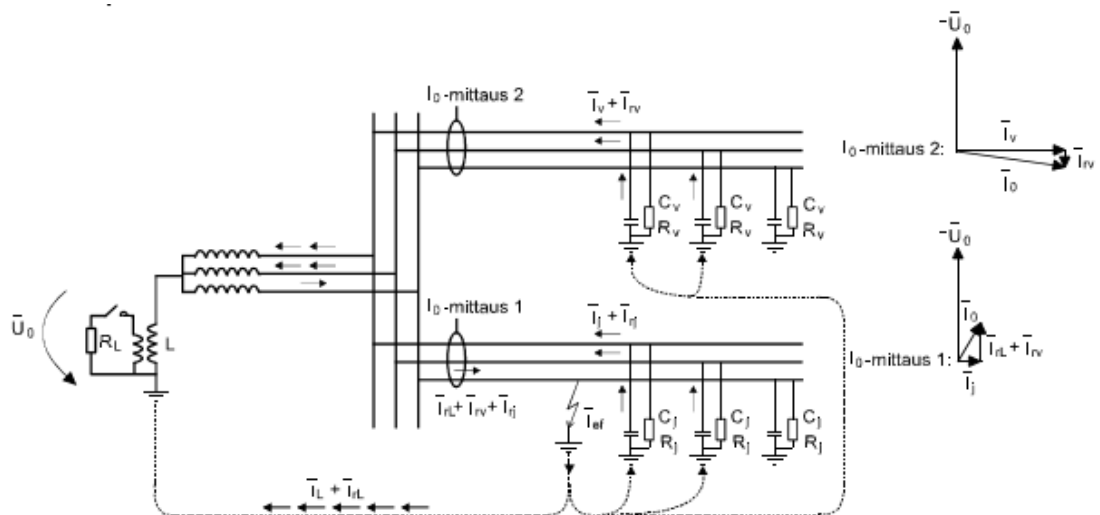
$U$  on verkon pääjännite [kV]

$l$  on galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pituus [km]

Vikaresistanssiton maasulku on henkilöiden kannalta vaarallisin, joten maasulkusuojauksen kannalta tulee tarkastella tällaista tilannetta. Sammutetussa verkossa voidaan sammutskeloilla pienentää maasulkuvirtaa.

### 2.2.2 Maasulku sammutetussa verkossa

Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteen ja maan välille kytketään kompensointikela kuvan 5 mukaisesti. Kelan induktanssi viritetään niin, että kelan kautta kulkeva induktiivinen loisvirta on suunnilleen yhtä suuri kuin vastakkaisuuntainen maakapasitanssien kautta kulkeva kapasitiivinen loisvirta. Näin vikapaikan kautta kulkeva maasulkuvirta jää pieneksi, joka johtaa pienempiin kosketusjännitteisiin ( $U_{VT}$ ).



Kuva 5 Maasulkuvirran muodostuminen kompensoidussa verkossa (ABB Oy, 2000.)

Täysin kompensoidussa verkossa kulkee vikapaikan kautta vain jäännösvirta. Jäännösvirta muodostuu kuristimen ja verkon häviöistä (verkon vuotohäviöitä vastaavat resistanssit  $R_j$  ja  $R_v$ ) sekä kuristimen toisiovastuksen aiheuttamasta pätövirrasta sekä yliaalloista. Tosin yleensä verkko jätetään alikompensoiduksi eli verkon kapasitiivinen maasulkuvirta on suurempi kuin induktiivinen maasulkuvirta. (ABB Oy, 2000. TTT-käsikirja 2000–07).

Vikaresistanssittomassa tapauksessa maasulkuvirta sammutetussa verkossa voidaan laskea kaavalla:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}{\sqrt{(R_0)^2}} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

missä,

$\omega L$  on kompensointikuristimen reaktanssi

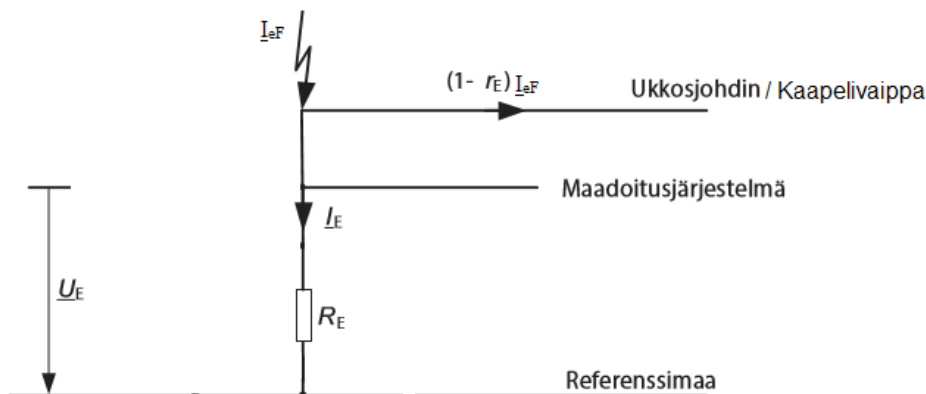
$C_0$  on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi

$R_0$  on kompensointikuristimen ja verkon häviöitä vastaavan resistanssin sekä mahdollisen kuristimen toisioresistanssin tähtipisteen redusoitu kokonaisresistanssi

Sammutuskuristimen rinnalla on yleensä lisävastus, joka kytkemällä saadaan maasulun pätövirta komponenttia kasvatettua, joka on suojarleen toiminnan kannalta tarpeellista. Tampereen Sähköverkossa lisävastus kytketään päälle kun nolajännite ( $U_0$ ) nousee yli 20% eli 2,31 kV ja pysyy korkealla yli 0,5 sekuntia. Lisävastus on päällä 5 sekuntia.

### 2.3 Maavirta

Maavirta ( $I_E$ ) on se osa maasulkuvirtaa ( $I_{eF}$ ), joka kulkee maadoituksen kautta. Osa maasulkuvirrasta kulkee ilmajohtojen ukkosjohtimien (ei yleensä keskijänniteverkossa ole), maakaapeleiden metallivaippojen ja keskusköysien kautta muihin maadoituksiin. Kuvas-  
sessa 6 on esitetty maasulkuvirran ( $I_{eF}$ ) jakautuminen ja maavirran ( $I_E$ ) muodostuminen.



Kuva 6 Maavirran muodostuminen (SFS 6001, 2015, muokattu)

Kuvassa 6 esitetty  $R_E$  on maadoitusresistanssi,  $U_E$  on maadoitusten yli vaikuttava maadoitusjännite ja  $(1-r_E)I_{eF}$  on ukkosjohtimien tai kaapeleiden metallivaippojen kautta kulkeva virta, jossa  $r_E$  on ukkosjohtimen/kaapelivaipan reduktiokerroin. Reduktiokertoimien arvoja keskijännitekaapeleille on esitetty taulukossa 1.

*Taulukko 1 keskijännitekaapeleiden reduktiokertoimia*

Kaapeli	Reduktiokerroin ( $r_E$ )
Paperieristeinen	
Cu 95 mm <sup>2</sup>	0,2-0,6
Al 95 mm <sup>2</sup>	0,2-0,3
PEX-eristeinen	
Cu 95 mm <sup>2</sup>	0,5-0,6

Maavirta ( $I_E$ ) voidaan siis laskea kaavalla:

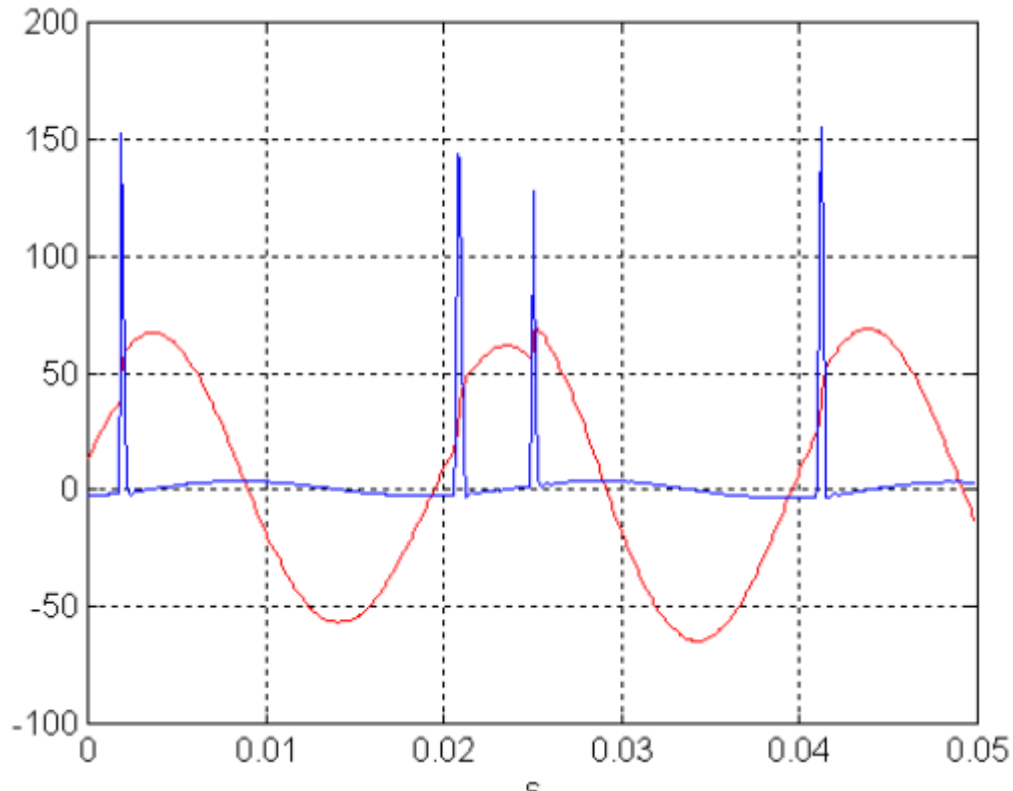
$$I_E = r_E \cdot I_{eF} \quad (4)$$

Keskijänniteverkossa reduktiokertoimen sijaan lasketaan yleensä yhdistetyille maadoituksille resultoiva maadoitusimpedanssi  $Z_E$  (tästä enemmän kappaleessa 3.2). Tällöin maadoitusjännite  $U_E$  voidaan laskea suoraan maasulkuvirran avulla kaavan 5 mukaan:

$$U_E = Z_E \cdot I_{eF} \quad (5)$$

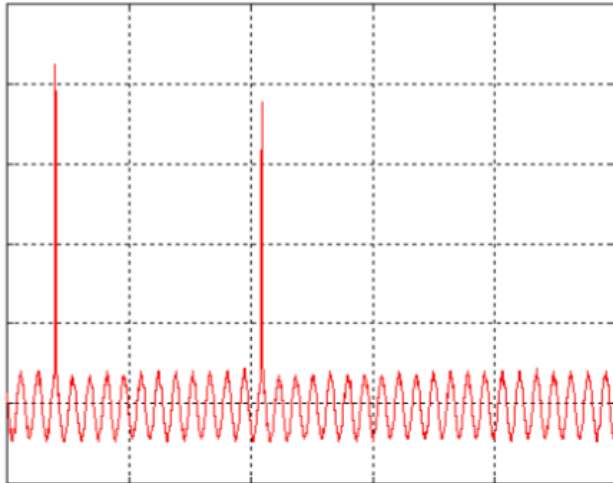
## 2.4 Katkeileva maasulku

Katkeileva maasulku on maasulku joka syttyy ja sammuu vuorotellen nopealla tahdilla. Riippuen tilanteesta voi maasulku syttyä ja sammua joitakin kertoja jaksonajassa tai ker- ran useamman jakson aikana. Verkossa tämä näkyy nopeana virran nousuna ja laskuna (transienttina), joka aiheuttaa kuvan 7 kaltaisen epäsäännöllisen nollavirran ( $I_0$ ) käyrä- muodon.



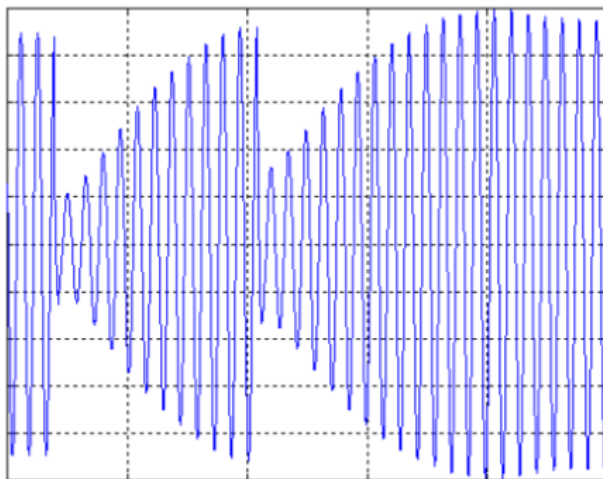
Kuva 7 Katkeilevan maasulun nollavirran ja nollajännitteen käyrämuoto. Sinisellä  $I_0$ , punaisella  $U_0$  (Kuisti, H., Aaltonen, J., Svensson, H. & Isakson M. 2003)

Katkeilevia maasulkuja esiintyy erityisesti kompensoidussa maakaapeliverkossa, joissa maasulkuvirta on kohtuullisen pieni. Ne syntyvät esimerkiksi kaapeliin tulleen eristysvian vuoksi, joka heikentää kaapelin jännitekestoisuutta. Jos eristevika ei aiheuta suoraa maasulkua voi se aiheuttaa katkeilevan maasulkuvian, jossa läpilyönti tapahtuu aina kun vaiheen jännite nousee tarpeeksi suureksi. Kuvissa 8 ja 9 esitetään viallisen vaiheen virta- ja jännitekäyrät. Kuvassa 8 virran transienttipiikit ovat hetkillä, joilla vioittunut kaapelin eriste ei enää kestä kohonnutta jännitettä.



Kuva 8 Viallisen vaiheen virta katkeilevassa maasulussa (Kuisti, H., Aaltonen, J., Svensson, H. & Isakson M. 2003)

Kuten kuvasta 9 nähdään maasulun tapahtuessa viallisen vaiheen jännite romahtaa ja nousee tämän jälkeen hitaasti. Uusi läpilyönti tapahtuu vasta kun jännite on noussut liian suureksi vialliselle eristeelle.



Kuva 9 Viallisen vaiheen jännite katkeilevan maasulun aikana (Kuisti, H., Aaltonen, J., Svensson, H. & Isakson M. 2003)

Kaapeleiden eristysviat kehittyvät tyypillisesti pitkän ajan kuluessa. Mekaaniset rasitukset ja kemialliset reaktiot vanhentavat kaapeleiden eristeitä vuosien saatossa. Erityisesti kosteuden pääsy kaapeleiden vaipan sisään heikentää kaapelin eristyskykyä. (Kuisti, H., Aaltonen, J., Svensson, H. & Isakson M. 2003)



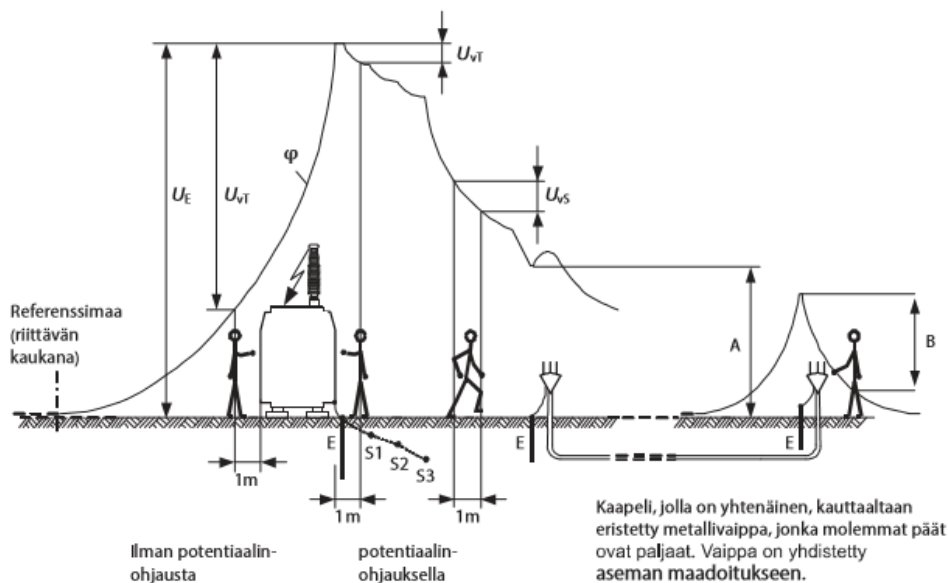
### 3 MAADOITUKSET JA NIIDEN MITOITUS

Maadoituksilla on tärkeä rooli sähköasennusten turvallisuuden, toiminnan ja häiriöttömyyden varmistamisessa. Nimellisjännitteeltään yli 1kV ja taajuudeltaan enintään 60Hz vaihtojännitteisten sähköasennusten maadoituksissa noudatetaan suurjännitesähköasennukset standardin SFS 6001 määräyksiä. SFS 6001 edellyttää, että suurjännite- ja pienjänniteverkon maadoitukset yhdistetään aina kun se on mahdollista. Tällöin tulee ottaa huomioon myös pienjännitesähköasennukset standardin SFS 6000 vaatimukset.

Maadoitusjärjestelmän suunnittelussa tulee ottaa huomioon sen suurimman vikavirran kestävyys termisesti, riittävä mekaaninen sekä korroosiokestävyys, riittävä suorituskyky laitevikojen estämiseksi ja varmistaa vikatilanteessa esiintyvien kosketusjännitteiden pysyminen sellaisissa rajoissa, että henkilöiden turvallisuus säilyy. Maadoitusjärjestelmän mitoituksen olennaiset tekijät ovat vikavirran suuruus, vian kestoaika sekä maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet. (SFS 6001 2015, kappale 10)

#### 3.1 Kosketus- ja askeljännite

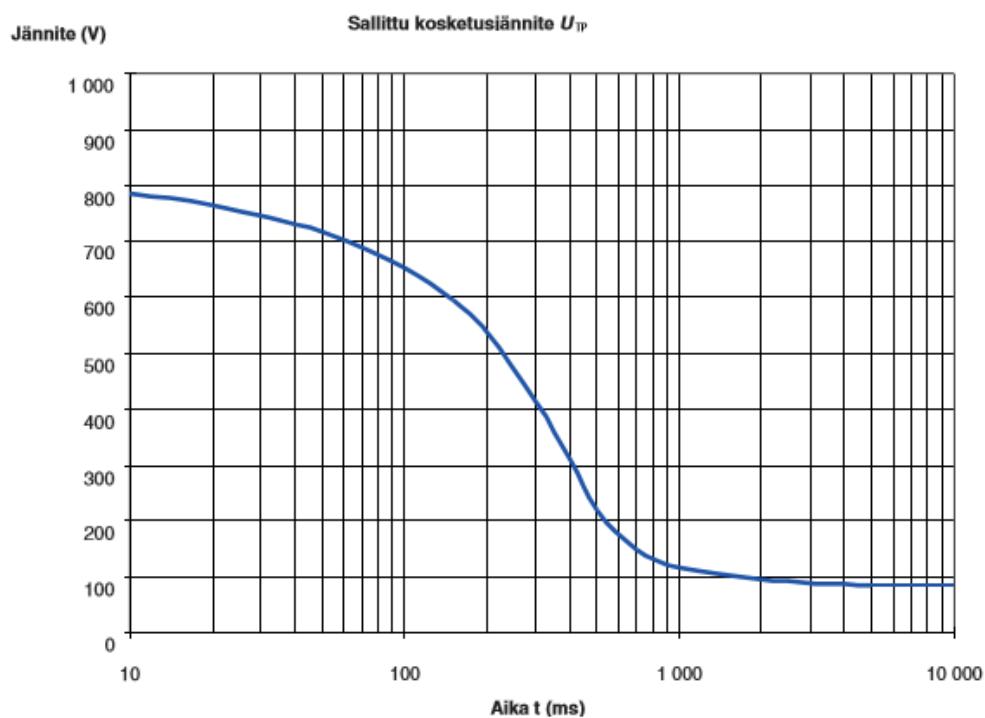
Henkilön koskettaessa suojamaadoitettua osaa vian aikana, kytkeytyy hän osaksi virtapiiriä ja tällöin henkilön yli vaikuttaa kosketusjännite ( $U_{vT}$ ). Periaatteessa kosketusjännite voi olla maadoitusjännitteen suuruinen, mutta käytännössä se on aina pienempi. Kuvassa 10 on esitetty maadoitus- ( $U_E$ ), kosketus- ( $U_{vT}$ ) ja askeljännitteiden ( $U_{vS}$ ) muodostuminen muuntamalla tapahtuvan maasulkuvian aikana.



Kuva 10 maanpotentiaaliprofiili maasulkuvian aikana (SFS 6001, 3.7.35)

Kuvasta 10 näkyy myös selkeästi kuinka potentiaalinhjauksen käyttäminen (S1, S2, S3) pienentää kosketusjännitettä ( $U_{vT}$ ) muuntamon läheisyydessä.

Henkilöturvallisuutta silmälläpitäen kosketusvirrasta mahdollisesti aiheutuva sydänkammiövärinä on suurin terveydellinen vaara. Standardissa SFS 6001 on kehon kautta kulkevan virran raja-arvo muutettu jännitteen raja-arvoiksi, jotta sitä voidaan verrata laskettuihin askeljännitteisiin ( $U_{vS}$ ) ja kosketusjännitteisiin ( $U_{vT}$ ). Toisin sanottuna SFS 6001 asettaa vaatimuksen suurimmalle sallitulle perustaajuiselle kosketusjännitteelle ( $U_{IP}$ ), tämä sallittu kosketusjännite ajan suhteen on esitetty kuvassa 11.



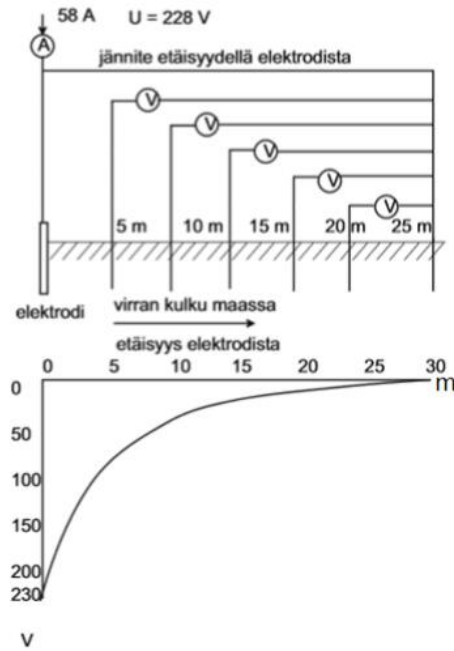
Kuva 11 Sallitun kosketusjännitteen raja-arvot vian keston suhteen (SFS 6001 2015, 10.5.3)

Kuten kuvasta 11 havaitaan, vaikuttaa kosketusjännitteen sallittuun suuruuteen olennaisesti kuinka pitkä vian kesto-aika on.

Sallitut askeljännitteen raja-arvot ovat paljon suurempia kuin kosketusjännitteen, koska virtatie kehon läpi on erilainen (pienempi vaara aiheuttaa sydänkammiövärinää). Kosketusjännite vaatimusten toteutuessa voidaan siis olettaa askeljännite vaatimustenkin toteutuvan. (SFS 6001 2015, 10.2.1)

### 3.2 Maadoitusjännite ja –impedanssi

Maavirta ( $I_E$ ) aiheuttaa vikatapauksessa maadoituselektrodin ympäristöön kohonneen sähköpotentiaalın (verrattuna kaukaiseen referenssimajaan), joka pienenee etäisyyden kasvaessa. Kuvassa 12 on esitetty kohonnut potentiaali maadoituselektrodin etäisyyden suhteen.



Kuva 12 Maan kohonnut potentiaali maadoituselektrodin etäisyyden suhteen (Tiainen, E., Nurmi, T. & Koivisto, P. 2014)

Maadoitusjännite ( $U_E$ ) on tämä sähköasennuksen suojamaadoitetun osan ja referenssimajaan välinen potentiaaliero. Maadoitusjännite voidaan laskea yksinkertaisesti ohmin lailla

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

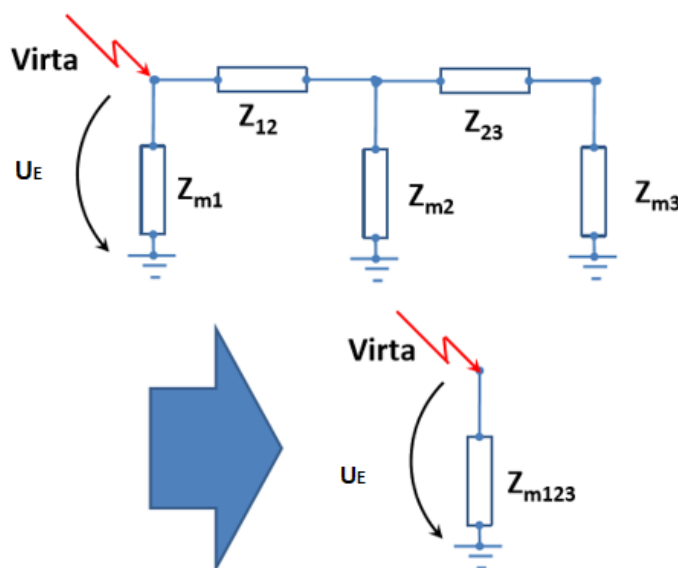
jossa  $I_E$  on maavirta ja  $Z_E$  on maadoitusimpedanssi.

Maadoitusresistanssi ( $R_E$ ) on maadoitusimpedanssin reaaliosa. Maadoitusresistanssi voidaan mitata yksittäiselle maadoitukselle. Yhdistettyjen maadoitusten yhdysjohtimet tuovat mukaan reaktanssin, jolloin puhutaan maadoitusimpedanssista ( $Z_E$ ).

Resultoivaan maadoitusimpedanssiin otetaan huomioon suoraan kytketyt maadoituselektrodit, maahan yhdistettyjen ilmajohtojen ja ukkosjohtimien maadoitukset, maadoituselektrodeina toimivat maakaapelit ja muut maadoitusjärjestelmät, jotka kytkeytyvät asianomaiseen maadoitusjärjestelmään johtavien kaapelivaippojen, kosketussuojien ja PEN-johtimien välityksellä tai muulla tavalla (SFS 6001 2015, 3.7.11)

Käytännössä erillisistä maadoituselektrodeista koostuvan yhdysjohtimilla toisiinsa liitetyn maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi voidaan määrittää mittaamalla kunkin maadoituselektrodin maadoitusresistanssi käännepestemenetelmällä yhdistysjohtimien ollessa irti kytkettyinä. Liitosjohtimien impedanssi lasketaan ja resultoiva maadoitusimpedanssi lasketaan impedanssien muodostamasta ekvivalenttipiiristä. (SFS 6001, liite L.2.2)

Kuvassa 13 on esitetty resultoivan maadoitusimpedanssin muodostaminen ketjumaisen maadoitusjärjestelmän tapauksessa.



Kuva 13 Resultoivan maadoitusimpedanssin muodostaminen (Mäkinen, A. 2016, s.17, muokattu)

Resultoiva maadoitusimpedanssi riippuu tarkastelukohdasta. Maadoitusketjun keskellä resultoiva maadoitusimpedanssi on jonkin verran pienempi kuin ketjun päissä. Resultoiva maadoitusimpedanssi, kun vika on muuntamolla 1, voidaan laskea likimääräisesti:

$$\bar{Z}_{m123} = \left( \frac{1}{\bar{Z}_{m1}} + \left( \frac{1}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{m2}} \right) + \left( \frac{1}{\bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{23} + \bar{Z}_{m3}} \right) \right)^{-1} \quad (6)$$

Jos yhdysjohtimien impedanssi oletetaan merkityksettömäksi, on resultoiva maadoitusimpedanssi sama tarkastelukohdasta riippumatta. Yhdysjohtimien impedanssin ollessa nolla voidaan resultoiva maadoitusimpedanssi laskea kaavalla:

$$\bar{Z}_{m123} = \left( \frac{1}{\bar{Z}_{m1}} + \frac{1}{\bar{Z}_{m2}} + \frac{1}{\bar{Z}_{m3}} \right)^{-1} \quad (7)$$

Todellisuudessa impedanssin laskeminen on monimutkaisempaa. Tampereen Teknillisessä yliopistossa on mallintamalla tutkittu ketjuuntuvassa järjestelmässä maadoitusten resultoivaa impedanssia erilaisissa tilanteissa. Oleellinen havainto on, että ketjuuntuvassa järjestelmässä resultoiva maadoitusimpedanssi on merkittävästi pienempi kuin tarkasteltavan muuntopiirin oma maadoitusimpedanssi erillisesti tarkasteltuna. Kuitenkin pitkissäkin ketjuissa, voi ketjun päästä tarkasteltuna, resultoiva maadoitusimpedanssi olla lähes 50% yksittäisen muuntopiirin impedanssiin verrattuna. (Mäkinen, A. 2016). Pienempään resultoivaan maadoitusimpedanssiin vaikuttaa erityisesti maadoitusten lyhyempi etäisyys toisistaan, mutta myös pienemmät maaperän resistiivisyydet. Varsinkaan pidemmällä etäisyyksillä kaavaa 7 ei tulisi käyttää resultoivan impedanssin laskemiseen.

### 3.2.1 Maadoitusjännitteen tavoitetaso

Sallittujen kosketusjännitearvojen ( $U_{Tp}$ ) toteutumiseksi on järjestelmän maadoitusjännitteelle ( $U_E$ ) laskettavissa olosuhteiden mukainen sallittu maadoitusjännite. Sallittu maadoitusjännite riippuu kosketusjännitteestä kaavan 8 mukaan:

$$U_E = F \cdot U_{Tp} \quad (8)$$

jossa  $F$  on kerroin, jonka suuruus määräytyy muuntopiirin olosuhteiden ja toteutetun maadoitusasennuksen mukaan. Suomessa kertoimelle  $F$  sallittu arvo on yleensä 2, josta voidaan tietyin ehdoin poiketa, jos tämän arvon saavuttaminen on teknisistä tai taloudellisista syistä hyvin vaikeaa. (SFS 6001, liite NA.11.1.3)

Kerroin  $F$  saa olla 4 eli maadoitusjännite saa olla korkeintaan  $4U_{Tp}$  jos seuraavat ehdot toteutuvat:

- Muuntopiirin alueella maaperä on pääosin huonosti johtavaa
- Syöttävässä verkossa käytetään laukaisevaa maasulkusuojausta
- Muuntajan ylijännitepuolen maasulun todennäköisyyttä on pienennetty käyttämällä virtaa rajoittavia ylijännitesuojia ja eristämällä muuntajan navat ja liitäntäjohtimet tai käyttämällä koteloituja muuntamoita. Pylväsmuuntamon erottimen napoja ei kuitenkaan tarvitse eristää.
- Muuntamolle rakennetaan potentiaalinojaus SFS 6001 mukaisesti
- Jokaisessa pienjänniteverkonhaarassa on vähintään yksi johtohaaran maadoitus ja lisäksi pj-verkon maadoitukset täyttävät SFS 6000-8-801 vaatimukset (mm. liittymissä on ns. liittymämaadoitus).
- Pienjänniteverkosta ei syötetä kouluja, leirintäalueita tai muita vastaavia kohteita joiden ulkotiloissa voi oleskella runsaasti ihmisiä usein.

Kerroin  $F$  saa olla 5 eli maadoitusjännite saa olla korkeintaan  $5U_{Tp}$  jos kaikkien edellisten ehtojen lisäksi toteutuvat seuraavat lisäehdot:

- Muuntopiiri on tarkoitettu vain yhden rakennuksen tai sähkölaitteiston syöttöön.
- Maaperä on huonosti johtavaa (esim. hiekkaa, soraa, moreenia tai kalliota).
- Syöttävässä rakennuksessa tai muussa laitteistossa on pääpotentiaalintaus ja päämaadoituskisko, joka on kytketty maadoituselektrodiin. Maadoituselektrodina voidaan käyttää esim. rakennuksen perustuksiin sen sisälle, alle tai ympärille asennettavaa rengasta.

(Verkostosuositus RJ 19:16, 4.3 ja 4.4).

Kertoimen  $F$  arvoja ja sallitun kosketusjännitteen arvoja (kuva 11) käyttämällä saadaan laskettua maadoitusjännitteelle taulukon 2 mukaiset raja-arvot.

Taulukko 2 Sallitun maadoitusjännitteen arvot (Verkostosuositus RJ 19:16)

Laukaisuaika s	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	5,0	1,0
$U_E = U_{Tp}$	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

Maadoitusjännite voidaan määrittää maahan menevän maavirran ( $I_E$ ) ja maadoitusimpedanssin tulona:

$$U_E = Z_E \cdot I_E \quad (9)$$

jossa  $Z_E$  on mitattu tai laskettu maadoitusimpedanssi ja  $I_E$  on maadoitus impedanssin kautta maahan kulkeva virta.

### 3.3 Maadoitusten mitoitus Tampereen Sähköverkossa

Tampereen Sähköverkko Oy:n verkossa pyritään normaalisti sellaisiin maadoitusimpedanssin arvoihin, että maadoitusjännitteen arvo on korkeintaan  $2U_{Tp}$ . Ainoastaan erityisen huonoissa maadoitusolosuhteissa sallitaan maadoitusjännitteen olevan korkeintaan  $4U_{Tp}$ .

Maadoitusten kannalta TSV:n verkko jakautuu kolmeen alueeseen; laajan maadoitusjärjestelmän alueeseen, muuhun taajama alueeseen ja Teiskon alueeseen. Maadoitusjännitteen pitäminen sallituissa rajoissa on haasteellisinta Teiskon alueella, jossa muuntamoiden maadoitukset ovat yhdistettynä vain yhden toisen muuntopiirin maadoituksiin. Joissain tapauksissa muuntamon maadoitukset saattavat olla myös pistemäisiä maadoituksia, joita ei ole yhdistetty toisten muuntopiirien maadoituksiin ollenkaan. Muualla laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattomalla alueella jokaisen muuntamon maadoitus on yhdistetty vähintään kahden muun muuntamon maadoitukseen.

#### 3.3.1 Sallitut maadoitusimpedanssit vanhan suunnitteluohjeen mukaan

Aikaisemmin TSV:n maasulkusuojaus oli aseteltu niin, että maasulkuvirran pisin yhtäjaksoinen kesto-aika oli 0,7 sekuntia ja suurin maasulkuvirran arvo oli 60 A. Teiskossa, vastaavat arvot olivat 0,7 sekuntia ja 45 A. Tällöin kosketusjännitteen  $U_{Tp}$  maksimi-arvo oli aikaisemman SFS 6001 standardin mukaan 132 voltia ja maksimi maadoitusjännitteen arvo 264 voltia. Aiemmassa maadoituksen suunnitteluohjeessa suurin sallittu resurtoiva maadoitusimpedanssin arvo oli siis:

$$Z_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{264 \text{ V}}{60 \text{ A}} \approx 4,4 \Omega \quad (10)$$

ja Teiskossa vastaavasti  $5,9 \Omega$ . Kaavaa 7 käyttämällä saatiin yksittäisen maadoitusresistanssin sallituksi arvoksi laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattomalla alueella  $13,2$

$\Omega$ . Teiskossa, jossa rinnan on kytkettynä vain kaksi maadoitusta, saatiin yksittäisen maadoitusresistanssin sallituksi arvoksi 11,8  $\Omega$ .

### 3.3.2 Sallitut maadoitusimpedanssit uuden suunnitteluohjeen mukaan

TSV Oy:n 20 kV verkossa maasulkusuojaus on nykyään aseteltu niin, että maasulkuvirran pisin yhtäjaksoinen kestoaika on 1,05 sekuntia. Teiskossa sammutuskelan kokoa on täytynyt nostaa 160 ampeerista 320 ampeeriin. Näin ollen suurin maasulkuvirran arvo on koko verkon alueella 60 A. Tällöin kosketusjännitteen ( $U_{Tp}$ ) maksimiarvo on taulukon 2 mukaan 115 voltia ja maksimi maadoitusjännitteen arvo 230 voltia. Kaavalla 11 voidaan laskea suurin sallittu resultoiva maadoitusimpedanssi:

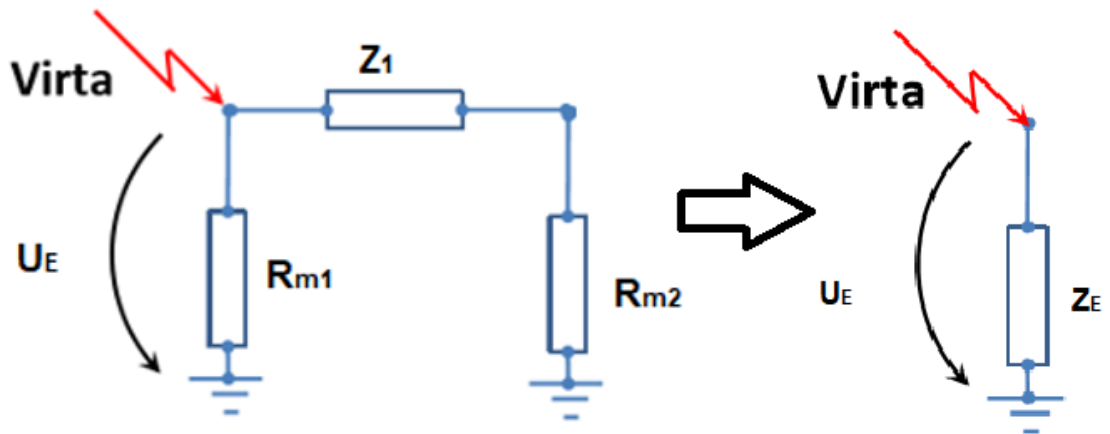
$$Z_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{230 \text{ V}}{60 \text{ A}} \approx 3,83 \Omega \quad (11)$$

Resultoiva maadoitusimpedanssi saa siis olla korkeintaan 3,83  $\Omega$ , jotta standardin SFS 6001 mukainen kosketusjännitevaatimus täytetään.

Yksittäisen maadoituksen suurimmaksi sallituksi maadoitusresistanssi arvoksi saadaan laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattomalla alueella kaavaa 7 käyttämällä 11,4  $\Omega$  ja Teiskossa vastaavasti 7,6  $\Omega$ .

Kuten kappaleessa 3.2 todettiin, resultoivan maadoitusimpedanssin laskeminen pelkääntään yksittäiset maadoitusresistanssit huomioiden, antaa resultoivasta maadoitusimpedanssista ja sitä kautta maadoitusjännitteestä liian optimistisen kuvan. Maadoitusjännitevaatimuksen tulee toteutua myös kun poikittaisimpedanssi (kuvassa 14 esitetty  $Z_1$ ) on suurimmillaan.





Kuva 14 Resultoivan impedanssin muodostuminen kahden muuntamon rinnankytkennässä

Teiskon alueella suurimmat yhdistyvien maadoitusten väliset etäisyydet ovat n. 2,5 km. Taulukossa 3 on esitetty maadoitukset yhdistävän kaapeloinnin kosketussuojan ja keskusköyden sähköiset arvot.

Taulukko 3 Maadoitukset yhdistävän kaapeloinnin keskusköyden ja kosketussuojan sähköiset arvot

Kaapeli	Resistanssi $\Omega/\text{km}$	Reaktanssi $\Omega/\text{km}$
AHXAMK-W 3x120 +35Cu	0,524	0,8

Resultoivan impedanssin arvo Teiskossa saadaan kaavalla 12.

$$|\overline{Z_E}| = \left( \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{Z_1 + R_{m2}} \right)^{-1} \quad (12)$$

Resultoiva maadoitusimpedanssi on alle  $3,83 \Omega$  kun  $R_m \leq 6,9 \Omega$

$$|\overline{Z_E}| = \left( \frac{1}{6,9 \Omega} + \frac{1}{(1,31 + 2i)\Omega + 6,9 \Omega} \right)^{-1} \approx 3,83 \quad (13)$$

Eli maadoitusjännitevaatimus toteutuu kaavalla 12 laskemalla, jos yksittäisen maadoitusresistanssin arvo on korkeintaan  $6,9 \Omega$ .

Mikäli maadoitusimpedanssin tavoitearvot halutaan laskea vielä tarkemmin, voidaan käyttää esim. Antti Mäkisen Excel työkalua maadoitusten mitoittamiseen (Mäkinen, A. 2016. Excel työkalu maadoitusten suunnitteluun). Taulukossa 4 on esitetty resultoiva maadoitusimpedanssi erilaisilla yksittäisen maadoituksen arvoilla.

Taulukko 4 Resultoiva maadoitusimpedanssi Teiskossa eri maadoitus resistanssin arvoilla

Maadoituksia yhdistävä kaapeli (pituus 2,5 km)	Yksittäinen maadoitus $R_m$ ( $\Omega$ )		
	$R_m = 6 \Omega$	$R_m = 6,5 \Omega$	$R_m = 7 \Omega$
AHXAMK-W kosketussuojat +35Cu	3,56	3,81	4,06
AHXAMK-W kosketussuojat +35Cu ja 25 Cu rinnan	3,44	3,7	3,95
Sparrow (Al40)	3,65	3,9	4,16

Taulukon 4 mukaan yksittäisen maadoituksen resistanssi saa olla vain  $6 \Omega$ , jotta rezultoiva maadoitusimpedanssi pysyisi alle  $3,83 \Omega$  kaikilla maadoitusten yhdistystavoilla.

TSV:lle laaditussa maadoituksen suunnitteluohjeessa edellisen kaltaiset laskelmat on suoritettu verkon kaikille alueille sekä maadoitusjännite vaatimukselle  $4U_{IP}$ .

### 3.3.3 Maadoitusjännitevaatimuksen toteutuminen TSV:n verkossa

Yksittäisen maadoituksen sallittu maadoitusresistanssi laskee TSV:n verkossa Teiskossa melkein puoleen aiemmin voimassa olleesta arvosta ( $11 \Omega \rightarrow 6 \Omega$ ) ja muuallakin 3 ohmia ( $13 \Omega \rightarrow 10 \Omega$ ). Uudessa SFS 6001 standardissa maadoitusjännitevaatimus on itseasiassa hieman löystynyt aiemmin vaadittuun nähden, mutta maasulkusuojauksen uudet asettelu-arvot ja rezultoivan maadoitusimpedanssin realistisempi laskentatapa aiheuttavat sen, että maadoitusresistanssi vaatimus tiukentuu huomattavasti.

Erityisesti Teiskossa tähän uuteen vaatimukseen ei kaikkien maadoitusten osalta tällä hetkellä päästä. Olemassa oleviin maadoituksiin lisämaadoitusten tekeminen on kallista, joten käytännössä asia pitää ratkaista jollakin muulla tavalla. Seuraavassa korjausehdotuksia joilla maadoitusresistanssilta vaadittua arvoa saataisiin nostettua:

- Teiskon maasulkuvirran tarkempi tarkastelu mitoittavan virran suhteen. Voisiko 60 A mitoitusvirrasta mahdollisesti päästä pienempään arvoon?
- Teiskossakin maadoitusten yhdistäminen vähintään kahden toisen muuntamon maadoitukseen. Tällöin vaadittu  $R_m < 9,5 \Omega$ .
- Maasulkuvirran kestoajan rajoittaminen 0,7 sekuntiin. Tällöin vaadittu  $R_m < 8 \Omega$  Teiskossa ja  $R_m < 12,5 \Omega$  muualla.

### 3.4 Siirtyvät jännitteet

Maadoitusjärjestelmiä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että osa suurjännitejärjestelmän maadoitusjännitteestä saattaa esiintyä pienjännitejärjestelmässä, jos maadoitukset eivät muodosta laajaa maadoitusjärjestelmää. Tällöin suur- ja pienjännitemaadoitukset voidaan joko yhdistää tai suurjännitemaadoitukset voidaan erottaa pienjännitemaadoituksista. Kummassakin tapauksessa tulee kosketusjännitevaatimusten täytyttyä niin muuntamalla kuin syötetyssä pienjänniteasennuksessakin. Jos pienjännitejärjestelmä kuitenkin rajoittuu kokonaan suurjännitemaadoituksen kattamalle alueelle, tulee molemmat maadoitusjärjestelmät kytkeä yhteen, vaikkei kyseessä olisikaan laaja maadoitusjärjestelmä. (SFS 6001 2015, 11)

Käytännössä maadoitukset yhdistetään aina. Laajan maadoitusjärjestelmän ulkopuolella yhdistettyjä maadoituksia käytettäessä on taulukon 5 vaatimusten täytyttävä.

*Taulukko 5 Maadoitusjänniterajoihin perustuvat vähimmäisvaatimukset pienjännite- ja suurjännitemaadoitusten yhdistämiselle (SFS 6001, 11.1.3)*

Pienjännitejärjestelmä <sup>a, b</sup>		Maadoitusjännitevaatimukset		
		Maadoitusjännite $U_E$	Rasitusjännite <sup>c</sup>	
			Vian kestoaika $t_f \leq 5$ s	Vian kestoaika $t_f > 5$ s
<i>TT</i>		Ei sovellettavissa	$U_E \leq 1\ 200$ V	$U_E \leq 250$ V
<i>TN</i>		$U_E \leq F \cdot U_{Tp}$ <sup>d, e</sup>	$U_E \leq 1\ 200$ V	$U_E \leq 250$ V
<i>IT</i>	Suojamaadoitusjohtimet mukana verkossa	Kuten <i>TN</i> -järjestelmässä	$U_E \leq 1\ 200$ V	$U_E \leq 250$ V
	Suojamaadoitusjohtimia ei ole mukana verkossa	Ei sovellettavissa	$U_E \leq 1\ 200$ V	$U_E \leq 250$ V

<sup>a</sup> Pienjännitejärjestelmät, katso SFS 6000-1.  
<sup>b</sup> Tietoliikennelaitteille tulisi noudattaa ITU:n suosituksia.  
<sup>c</sup> Rajoja voidaan nostaa, jos käytetään soveliaita pienjännitelaitteita tai jos maadoitusjännitteen asemesta sovelletaan laskelmiin tai mittauksiin perustuvia paikallisia potentiaalieroja.  
<sup>d</sup> Jos pienjännitejärjestelmän PEN- tai nollajohdin on maadoitettu vain suurjännitemaadoituksen yhteydessä, suureen  $F$  arvo tulee olla 1.  
<sup>e</sup>  $U_{Tp}$  saadaan kuvasta 15.

HUOM. Tavallinen kertoimen  $F$  arvo on 2. Suurempia arvoja voidaan käyttää, jos PEN-johtimella on lisäyhdistyksiä maahan. Tietyissä maaperissä  $F$ :n arvo voi olla jopa 5. Harkintaa tulee käyttää, kun tätä sääntöä noudatetaan suuriresistiivisissä maaperissä, joissa pintakerroksen resistiivisyys on alla olevia kerroksia suurempi. Kosketusjännite voi tällöin ylittää 50 % maadoitusjännitteestä.

Tampereen Sähköverkolla kaikki suur- ja pienjännitemaadoitukset on yhdistetty. Sähköasemilla ja jakelumuuntamoilla pienjännitepuolen käyttömaadoitus on yhdistetty johtimella suurjännitepuolen maadoituskiskoon.

### 3.5 Mekaaninen ja korroosion kestävyys

Maadoitusjärjestelmä tulee suunnitella niin, että sen kaikki komponentit kestävät asennuksen koko odotettavissa olevan eliniän. Maadoituselektrodi on kosketuksissa suoraan maan kanssa, joten sen tulee olla valmistettu korroosion kestävästä materiaalista. Osien tulee myös kestää asennuksen ja käytön aikaiset mekaaniset rasitukset. Taulukossa 6 on esitetty standardin SFS 6001 mukaiset minimimitat erilaisille maadoituselektrodi tyypeille, joilla mekaaninen ja korroosio kestävyys vaatimukset täyttyvät.

*Taulukko 6 Maadoituselektrodien tyyppi ja minimimitat, jotka takaavat riittävän mekaanisen lujuuden ja korroosion kestävyuden (SFS 6001, liite C)*

Materiaali		Elektrodin tyyppi	Vähimmäismitta				
			Ydinosa		Pinoite/vaippa		
			Halkaisija mm	Poikkipinta mm <sup>2</sup>	Paksuus mm	Yksittäinen arvo µm	Keskiarvo µm
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha <sup>b</sup>		90	3	63	70
		Profiili (ml. levy)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	10				50
	Lyijyvaipalla <sup>a</sup>	Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	8			1 000	
	Päällistetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2 000	
	Elektrolyytti-kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka		25 <sup>c</sup>			
		Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>			
		Putki	20		2		
	Tinattu	Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1	5
	Sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla <sup>a</sup>	Köysi	1,8 <sup>d</sup>	25 <sup>c</sup>		1 000	
		Pyöreä lanka		25 <sup>c</sup>		1 000	
<sup>a</sup> Ei soveltu asennettavaksi suoraan betoniin. Lyijyn käyttöä ei suositella ympäristösyistä. <sup>b</sup> Valssattu tai leikattu nauha pyörästetyin reunoin. <sup>c</sup> 16 mm <sup>2</sup> poikkipintaa voidaan käyttää erityisolosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosion ja mekaanisen vaurioitumisen riski on vähäinen. <sup>d</sup> Yksittäiselle langalle.							

Myös luonnollisia maadoituselektrodeja voidaan käyttää osana maadoitusta, kuten betoniperustusten teräksiä ja teräsmaalutuksia.

Maadoitusjohtimille SFS 6001 antaa mekaanisen lujuuden ja korroosion kestävyuden perusteella taulukon 7 mukaiset vähimmäispoikkipinnat.

Taulukko 7 Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinta-alat

Materiaali	Poikkipinta-ala
kupari	16 mm <sup>2</sup>
alumiini	35 mm <sup>2</sup>
teräs	50 mm <sup>2</sup>

Maadoitusjohtimien tulisi olla myös mahdollisimman lyhyitä mahdollisten suuritaajuisten häiriövaikutusten pienentämiseksi. (SFS 6001, liite F)

### 3.6 Terminen kestävyys

Maadoitusjohtimien ja –elektrodien mitoituksessa on huomioitava, että vikavirrat eivät nosta näiden lämpötilaa niin, että komponenttien lujuus heikkenee tai ympäröivät materiaalit vaurioиду. Alle 5 sekuntia kestäville vioille vähimmäispoikkipinnat maadoitusjohtimille ja –elektrodeille voidaan laskea kaavalla:

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (14)$$

jossa

$A$	poikkipinta-ala [mm <sup>2</sup> ]
$I$	johtimen virran tehollisarvo [A]
$t$	vikavirran kesto aika [s]
$K$	virrallisen osan materiaalista riippuva vakio (taulukossa 6 on K arvot yleisimmille materiaaleille, kun oletetaan että alkulämpötila on 20 °C).
$\beta$	virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C. (Taulukon 8 mukaiset lämpötilakertoimet.)
$\theta_i$	Alkulämpötila [°C] (alkulämpötilana Suomessa käytetään yleensä 20 °C)
$\theta_f$	loppulämpötila [°C] (Loppulämpötila on valittava ottaen huomioon materiaali ja ympäristö, yleensä 300 °C)

Taulukko 8 Materiaalista riippuvat vakiot (SFS 6001, liite D)

<b>Materiaali</b>	$\beta$ [°C]	$K$ [ $A \times \sqrt{s} / mm^2$ ]
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Virran tehollisarvon voidaan olettaa maasta erotetussa ja sammutetussa järjestelmässä olevan 85% symmetrisen oikosulkuvirran arvosta. Jos maasulku kytketään pois alle yhdessä sekunnissa, voidaan kapasitiivista maasulkuvirtaa ( $I_C$ ) käyttää virran tehollisarvona kaavassa 14. Tällöin poiskytkentäaikaan käytetään ekvivalenttista poiskytkentäaika. Sammutuskelan maadoitusjohdin tulee mitoittaa kelan maksimivirran mukaan. (SFS 6001, 10.4.2)

## 4 MAADOITUSJÄRJESTELMÄT

SFS 6001 määrittelee että maadoitusjärjestelmän on liitäntöjen ja laitteiden järjestelmä, joka on välttämätön laitteiden tai järjestelmän maadoittamiseksi yhdessä tai erikseen. Yleensä se koostuu useista vaaka-, pysty- tai vinoelektrodeista, jotka on kaivettu tai lyöty maahan. Sähkönjakeluverkossa kaapelien kosketussuojat, keskusköydet ja muut maadoitusjohtimet muodostavat galvaanisia yhteyksiä eri maadoitusten välille. Tällöin muodostuu ketjuuntuneita ja myös silmukoita sisältäviä verkkomaisia laajempia maadoitusjärjestelmiä. Maadoitusjärjestelmän rakenteesta riippuu yksittäisen maadoituksen maadoitusimpedanssin mitoitusvaatimus, sekä täytyykö uudelle asennukselle tehdä maadoitusmittaukset. (Mäkinen, A. 2016.)

### 4.1 Laaja maadoitusjärjestelmä

Laajan maadoitusjärjestelmän määritelmä perustuu siihen, että sen alueella ei ole lainkaan tai on vain vähäisiä potentiaalieroja. Tällainen maadoitusjärjestelmä toteutuu, kun paikalliset maadoitusjärjestelmät on kytketty verkkomaisesti yhteen vähintään kolmen yhteyden kautta. SFS 6001 liitteessä NA.O sanotaan, että ”kunkin muuntamon maadoitukset on yhdistetty vähintään kahden muun muuntamon maadoitukseen ja myös muulla tavalla”. Yhdysjohtimina toimivat suurjännitekaapeleiden vaipat ja keskusköydet, pienjänniteverkon PEN- johtimet, mahdolliset erilliset muuntamoita yhdistävät maadoitusjohtimet ja elektrodit. Syntyvän verkkomaisen rakenteen tulee olla myös riittävän tiheä, mikä varmistaa että vaarallisia kosketusjännitteitä ei esiinny. Yleensä tällaisia alueita ovat esim. tiheästi asutut kaupunkikeskustat ja laajat teollisuusalueet. Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituksina toimivat sähköasemien, muuntamoiden, pienjänniteverkon ja liittymien maadoitukset. (Verkostosuositus RJ 19:16).

Laajan maadoitusjärjestelmän sisäpuolelle riittää, että uusille paikallisille maadoituksille tehdään maadoitukset perussuunnitelman mukaan. Maadoitusresistanssin tai maadoitusjännitteen todentaminen mittaamalla ei järjestelmän uusille osille kuitenkaan ole tarpeen. On kuitenkin varmistettava mittaamalla, että yksittäiset maadoitukset on luotettavasti yhdistetty laajaan maadoitusjärjestelmään ja mittauksien tulokset on dokumentoitava. Laajan maadoitusjärjestelmän tapauksessa myös säännöllisiltä maadoitusresistanssien tarkas-

tusmittauksilta vältytään. Maadoituksen kunto ja sen liittyminen laajaan maadoitusjärjestelmään voidaan todeta laajan maadoitusjärjestelmän testauslaitteella (silmukkamittausena). (SFS 6001 2015, liitteet M,O, NA.13, NA.O)

#### **4.2 Paikallinen maadoitusjärjestelmä**

Paikallinen maadoitusjärjestelmä on maadoitusjärjestelmä, joka ei kuulu laajaan maadoitusjärjestelmään. Se voi olla yksittäinen muuntopiiri tai esimerkiksi maakaapeliin suojajohtimien tai erillisten maadoitusjohtimien kautta yhdistynyt muuntopiirien ketju. Laajasta maadoitusjärjestelmästä tällainen ketjuuntunut maadoitusjärjestelmä eroaa sillä, että se ei muodosta verkkomaista rakennetta ja muuntopiirien välimatkat voivat olla useitakin kilometrejä haja-asutusalueella.



## 5 MAADOITUSTEN MITTAAMINEN

Maadoituselektrodin sijaintia ja laajuutta koskevia suunnitelmia varten on tarpeellista tietää maan ominaisresistanssi. Tämä voidaan mitata esimerkiksi Wenner-menetelmällä. Vaikka maaperän ominaisresistanssi tiedettäisiin, tulee laajan maadoitusalueen ulkopuolelle valmistuvan uuden maadoituksen maadoitusresistanssi mitata ja on varmistettava, että maadoitusjännite pysyy tarpeeksi alhaisena, jotta sallittua kosketusjännite arvoa ei ylitetä. (SFS 6001, liite NA.13)

### 5.1 Maadoitusmittausten ajankohdat

Sähköaseman maadoitusresistanssi on yleensä mitattava ennen sen käyttöönottoa. Muuntamon maadoitusresistanssi voidaan mitata myöhemminkin huonojen mittausolosuhteiden takia (esim. routa), mutta viimeistään vuoden kuluttua, kunhan maadoitukset on toteutettu maaperän ominaisuudet huomioon ottaen.

Määrävälein tehtävät maadoituksen kuntotarkastusmittaukset suositellaan tehtäväksi 6 vuoden välein, kun maadoitus on yhden maadoitusjohtimen varassa ja 12 vuoden välein, kun maadoitus on vähintään kahden maadoitusjohtimen varassa. Laajan maadoitusjärjestelmän impedanssia ei tarvitse mitata, vaan sen kunto voidaan todeta silmukkamittauksena, sopivaa testauslaitetta käyttäen. (SFS 6001, liite NA.13)

### 5.2 Käännepestemenetelmä

Käännepestemenetelmällä voidaan mitata yksittäisiä maadoituselektrodeja ja pieniä tai keskikokoisia maadoitusjärjestelmiä. Esimerkkejä kohteista ovat sauvaelektrodit, vaakaelektrodit, ilmajohtopylväiden elektrodit, sekä keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmät ja erilliset pienjänniteverkon maadoitusjärjestelmät. (SFS 6001 2015, liite L.2.2)

Myös laajan verkon maadoitusvastukselle saadaan suuntaa-antava tulos käännepestemenetelmällä, jos mitataan verkon reunalta ulospäin vähintään 200m mittajohtimilla. (Verkostosuositus TJ 1:05)

### 5.3 Voltti - ampeerimenetelmä

Suurten maadoitusjärjestelmien tarkemman impedanssin mittaamiseen käytetään voltti-ampeerimenetelmää. Mittausvirta syötetään maadoitusjärjestelmään kytkemällä likimain järjestelmätaajuinen vaihtojännite maadoitusjärjestelmän ja kaukana sijaitsevan maadoituselektrodin välille. Maadoitusjärjestelmään syntyy näin mitattavissa oleva jännite. (SFS 6001 2015, liite L.2.2) Tähän mittaukseen on erikoistunut joitakin maadoitusmittauksia tekeviä yrityksiä. Mittauksen aikana virran syöttöjohto ja jännitteen mittausjohto ovat poissa normaali käytöstä. (Verkostosuositus TJ 1:05)

## 6 DOKUMENTOINTI

Standardin SFS 6001 liitteessä M velvoitetaan, että ennen asennuksen vastaanottoa tulee laatia raportti, josta ilmenee, että kaikki standardin vaatimukset täyttyvät. Maadoitusjärjestelmästä tulee lisäksi olla käytettävissä asemapiirros, josta selviää maadoituselektrodien materiaali ja sijainti, elektrodien haaroituspisteet sekä asennussyvyys.

Laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattomien impedanssien tai maadoitusjännitteiden mittaukset on tehtävä ja dokumentoitava. Jos sallittujen kosketusjänniteraja-arvojen saavuttamiseksi on tarvittu erityistoimenpiteitä, on ne sisällytettävä asemapiirrokseen ja kuvattava dokumenteissa. (SFS 6001, liite M)

Laajasta maadoitusjärjestelmästä on oltava käytettävissä dokumentit, joissa on kerrottu perusteet laajan maadoituksen käytöstä mukaan lukien järjestelmään liittyvät sähköasemat, sähköasemien väliset maadoitusten yhdistämiset ja tulokset yhdistysten tarkastamisesta sekä selvitys siitä, että potentiaalierot ovat riittävän pienet. (SFS 6001, liite NA.O)

## 7 MAHDOLLISET MUUTOKSET STANDARDIN SFS- 6001 MAADOITUS OSION SEURAAVAAN VERSIOON

Tällä hetkellä standardissa SFS 6001 on maadoitusjärjestelmät jaoteltu vain laajaan maadoitusjärjestelmään ja paikalliseen eli laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumattomaan järjestelmään. Maakaapeloinnin yleistyessä galvaanisesti yhteen liitetyt maadoitusjärjestelmät yleistyvät. Taajamissa ja maaseudulla nämä yhteen liitetyt maadoitukset eivät kuitenkaan yleensä muodosta riittävän tiheää verkkoa kuuluakseen laajaan maadoitusjärjestelmään, vaan usein ne ovat yhteydessä toisiinsa ketjumaisesti tai silmukkamaisesti. Tällainen maadoitusjärjestelmä poikkeaa kuitenkin merkittävästi ”saarekemaisesta” paikallisesta maadoitusjärjestelmästä esim. resistoivan maadoitusimpedanssin muodostumisessa. Myöskään yksittäisen maadoituksen mittaaminen esim. käännepestemenetelmällä irrottamalla syöttökaapeleita ei yleensä anna luotettavaa tulosta. Seuraavassa kappaleessa on pohdittu kuinka tällaista ”yhteen liitettyä maadoitusjärjestelmää” saatetaan standardin SFS 6001 päivityksessä käsitellä.

### 7.1 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

#### 7.1.1 Mittaukset

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän resistoivan maadoitusimpedanssin mittaaminen on normaaleilla menetelmillä käytännössä hankalaa ja tulos epäluotettava. Tällaisen järjestelmän riittävän pienen maadoitusresistanssin suuruus voitaisiin määrittellä esim.

- Käyttämällä hyväksi jo tiedossa olevaa maadoitusresistanssin arvoa, johon liitytään.
- Laskemalla maadoitusresistanssi maaperän sähköisen resistiivisyyden ja maadoituselektrodien rakennetietojen perusteella.
- Varmistetaan turvallisuus muulla tavoin esim. mittaamalla kosketusjännite.

On mahdollista, että seuraavassa SFS 6001 päivityksessä yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän yksittäisten maadoitusten maadoitusresistanssin mittaamisesta määrävällein luovutaan. Maadoitusjärjestelmän eheys tulisi kuitenkin varmistaa laitteiston kunnossapitoon liittyvien tarkastusten yhteydessä. (SESKO SK 99, 2017 ehdotus)

### **7.1.2 Resultoiva maadoitusimpedanssi**

Yhteen liitetyn maadoitusjärjestelmän resultadoiva maadoitusimpedanssi riippuu paitsi yksittäisten maadoitusten maadoitusresistanssista myös maadoituksia yhdistävien kaapeleiden impedansseista ja maan resistiivisyydestä. Erityisesti pidemmällä välimatkoilla maadoitusten välillä on maadoituskaapelin impedanssilla ja maan resistiivisyydellä huomattava vaikutus resultadoivan impedanssin arvoon. Resultoivan impedanssin laskemiseen tulisikin kiinnittää huomiota ja suunnittelussa käyttää esimerkiksi laskentaan suunniteltua työkalua.

## 8 POHDINTA

Standardeihin ja kirjallisuuteen tutustumisen jälkeen laadittiin keskijänniteverkon maadoituksista ja niihin liittyvistä vaatimuksista ajantasainen yhteenveto. Tampereen Sähköverkko Oy:n maadoitusten suunnitteluohje käytiin tarkasti läpi ja päivitettiin niiltä osin kuin standardit olivat muuttuneet.

Vanhan suunnitteluohjeen resaltoivan maadoitusimpedanssin laskennassa huomattiin puutteita. Uudessa ohjeessa maadoitusresistanssi vaatimukset on laskettu käyttämällä Antti Mäkisen tekemää Excel työkalua maadoitusresistanssien laskemiseen. Tämä työkalu ottaa huomioon maadoitukset yhdistävien kaapeleiden impedanssit sekä maadoituselektrodien lähekkäisyydestä aiheutuneen lisäresistanssin. Uudessa laskennassa yksittäisten maadoitusten maadoitusresistanssi vaatimukset tiukkenivat huomattavasti, vaikka viimeisimmässä SFS -6001 standardissa, sallitut maadoitusjännite vaatimukset hieman löysyivät. Tämä johtui siitä, että aiempi tapa laskea resaltoiva maadoitusimpedanssi oli liian optimistinen ja maasulkusuojauksen laukaisuaika ja Teiskon alueen maksimi maasulkuvirta olivat kasvaneet.

SFS- 6001 standardin maadoitusosion seuraavaan versioon tulevia muutoksia spekuloiitiin erityisesti SESKO SK 99 tekemän ehdotuksen perusteella (SESKO SK 99, 2017). Suurimmat muutokset näyttäisivät tulevan siinä, kuinka muuntopiirien yhdistyviä maadoituksia käsitellään. Tulevaisuudessa maadoitusjärjestelmät jaetaan ehkä kolmeen osaan: laajaan maadoitusjärjestelmään, yhteen liitettyyn maadoitusjärjestelmään ja paikalliseen maadoitusjärjestelmään.

## LÄHTEET

ABB Oy. 2000. TTT-käsikirja 2000–07.

Lakervi, E., Partanen J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Otatieto 3. painos. Helsinki Gaudemus University Press

Kuisti, H., Aaltonen, J., Svensson, H. & Isakson M. 2003. Intermittent earth faults challenge conventional protection schemes, Cired publications

Tiainen, E., Nurmi, T. & Koivisto, P. 2014. Maadoituskirja. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 6. uusittu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Mäkinen, A. 2016. Excel työkalu maadoitusten suunnitteluun

Mäkinen, A. 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmästä, Tampereen Teknillinen Yliopisto

Partanen J. 2011. Sähkönjakelutekniikka. Maasulkusuojaus-luentomateriaali. LUT

Prysmian Group. AHXAMK-W 20 kV 3-core datasheet.

[http://fi.prysmiangroup.com/en/business\\_markets/markets/ti/downloads/datasheets-english/AHXAMK-W\\_20kv\\_EN\\_150916.pdf](http://fi.prysmiangroup.com/en/business_markets/markets/ti/downloads/datasheets-english/AHXAMK-W_20kv_EN_150916.pdf)

SESKO SK 99, 2017, Suurjännitesähkösäennukset SFS 6001 ehdotus

SFS-käsikirja 6000, 2012, Pienjännitesähkösäennukset. Helsinki: SFS

SFS-käsikirja 6001, 2015, Suurjännitesähkösäennukset. Helsinki: SFS

Verkostosuositus RJ 19:16, 2016,

Pylväserotinasemien ja muuntopiirien maadoitukset standardin SFS 6001 / 2015 mukaan. Helsinki: Energiateollisuus ry

Verkostosuositus RM 3:16, 2016, Kaapeliliitäntäinen verkonhaltijan muuntamo. Helsinki: Energiateollisuus ry

Verkostosuositus RM 5:16, 2016, Pylväsmuuntamon maadoitusjohtimet, ylijännite ja eläinsuojaus. Helsinki: Energiateollisuus ry

Verkostosuositus TJ 1:05, 2005, Sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset. Helsinki: Energiateollisuus ry

[http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCsahkoturvallisuus\\_siirrossa.aspx](http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCsahkoturvallisuus_siirrossa.aspx)

**LIITTEET**

Liite 1. Käyttöohje sivu Excel työkalusta maadoitusten mitoittamiseen (Mäkinen, A. 2016. Excel työkalu maadoitusten suunnitteluun)

**LASKENTAESIMERKKI JA KÄYTTÖOHJE**

**Solmujen maadoitusresistanssit**

Solmu	ohm
1	5
2	5
3	5
4	5
5	5
6	5
7	5
8	5
9	5

Yllä olevat resistanssit syötetään alla olevaan taulukkoon

**Esimerkkiverkko**

Solmu1	Solmu	Kaape	Kaapelilaji
1	2	1	1
1	3	1	1
1	4	1,41	1
2	4	1	1
2	9	1	1
3	5	1	1
4	6	1	1
5	6	1	1
6	7	1	1
7	8	1	1
8	9	1	1

Yllä olevat verkotiedot syötetään alla olevaan taulukkoon

**Solmujen koordinaattitiedot**

Nämä voidaan antaa haluttuina yksikköarvoina. Etäisyyksien laskentaan käytetään haluttua kerrointa "km/yks."  
Jos kerroin on esim. = 1 niin se syötetään koordinaattitaukon yhteyteen

Solmu	x yks.	y yks.
1	0	0
2	1	0
3	0	1
4	1	1
5	0	2
6	1	2
7	2	2
8	2	1
9	2	0

Yllä olevat koordinaattitiedot syötetään oikealla alhaalla olevaan taulukkoon

**MAADOITUSVERKON LASKENTA**

Käyttöohje: Lähötiedot vihreällä, etäisyys ja maadoitusresistanssi keltaisella solussa.

Solmu	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
Lap	km	km	km	km	km	km	km	km	km
1	1,00	1,00	1,41						
2				1,00					
3					1,00				
4						1,00			
5							1,00		
6								1,00	
7									1,00
8									
9									
10									

**Syötettävä virta vain yhdessä solmuun**

Solmu	A
1	1
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Tähän sarakkeeseen syötetään halutun solmun kohdalle syötettävä virta

**Solmu-numeroita**

Solmu	Zellid	Put. lähekkäisyys
1	1,03	0,22
2	0,00	
3	0,00	
4	0,00	
5	0,00	
6	0,00	
7	0,00	
8	0,00	
9	0,00	
10	0,00	

Sarakkeessa on maadoitusimpedanssi ilman elektrodien lähekkäisyydestä aiheutuvaa lisää

Sarakkeessa on elektrodien lähekkäisyydestä aiheutunut lisä

Sarakkeessa on tuloksena saatu maadoitusimpedanssi

**Maan ominaisresistanssi**

Maan ominaisresistanssi: 2300 ohmm

Potentiaalilien laskenta

Resistanssi voi keskellä 1/0

Jos ei tule järkevästi, niin keskellä ei muuttua yllä 1=0

Haluttu maan resistiivisuus [ohmm]

Jos tämä = 0, niin elektrodien lähekkäisyyksilä lasketaan etäisyyksillä keskipisteistä keskipisteisiin. Tämä ollee normaolioetus.

Jos tämä = 1, niin lasketaan etäisyyksillä keskipisteistä elektrodien reunaan. Teorian osalta ei ole varmennettu, että kannattaisiko näin tehdä.

**Solmujen koordinaattitiedot**

Solmu	x yks.	y yks.	Kerroin km/yks.
1	0	0	1
2	1	0	
3	0	1	
4	1	1	
5	0	2	
6	1	2	
7	2	2	
8	2	1	
9	2	0	

Tuosta voi tarkistaa menikö skaalaus

Tuonne syötetään kaapelilajeille resistanssi- ja reaktanssiarvot [ohm/km]