



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Topias Katajamäki

VAASAN SÄHKÖVERKKO OY:N JA-
KELUVERKON MAADOITUKSIEN
TARKASTELU STANDARDIEN NÄKÖ-
KULMASTA

Vaasan Sähköverkko Oy

Tekniikka
2016

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Topias Katajamäki
Opinnäytetyön nimi	Vaasan Sähköverkko Oy:n jakeluverkon maadoitusten tarkastelu standardien näkökulmasta
Vuosi	2016
Kieli	suomi
Sivumäärä	77+1
Ohjaajat	Jari Koski & Toni Ahola

Opinnäytetyö tehtiin Vaasan Sähköverkko Oy:lle. Työn tarkoituksena oli luoda selkeä katsaus, siitä kuinka sähköjakeluverkkojen maadoituksia täytyy rakentaa ja suunnitella standardien perusteella.

Tarkasteluihin sisältyi muun muassa erilaisten maadoitusjärjestelmien rakennus-tyylit, joista tärkeimpänä tarkasteluna oli laaja maadoitusjärjestelmä. Lisäksi työssä tarkasteltiin maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyviä asioita, joita oli muun muassa, mitä vaatimuksia standardit asettavat eri maasulun kompensointitilanteisiin.

Työssä tarkasteltiin esimerkkejä Vaasan Sähköverkko Oy:n jakeluverkosta, joiden avulla saatiin luotua käytännön näkemys jakeluverkkojen maadoitusjärjestelmistä. Lisäksi työssä käytiin läpi esimerkkejä maadoituselektrodien ja -johtimien mito- tuksesta, kaksoismaasulkuvirran huomioinnista sekä muuntamoiden maadoitusjär- jestelmien ketjutuksesta. Näitä voidaan hyödyntää myöhemmin suunnittelun tu- kena. Tarkasteluissa käytettiin apuna Tekla NIS -verkkotietojärjestelmää sekä Excel -laskentaohjelmaa.

Laajan maadoitusjärjestelmän tunnistamiseen ei ole yksinkertaisia tai yksiselitteisiä tapoja, silti voidaan sanoa, että tämä opinnäytetyö tuo helpotuksia tällaisten järjes- telmien tunnistamiseen ja suunnitteluun. Lisäksi tämän opinnäytetyön perusteella voidaan kaikenlaisia maadoitusjärjestelmiä suunniteltaessa miettiä, mikä on opti- maalisin toteutustapa erilaisissa tilanteissa ottaen huomioon kustannustehokkuus ja turvallisuus.

Avainsanat	sähkönjakeluverkon maadoitukset, laaja maadoitusjärjes- telmä, kompensoitu verkko, kosketusjännite
------------	--

ABSTRACT

Author	Topias Katajamäki
Title	Inspection of the Earthing in Vaasan Sähköverkko Oy Distribution Network from the Perspective of the Standards.
Year	2016
Language	Finnish
Pages	77+1
Name of Supervisors	Jari Koski & Toni Ahola

The thesis was made for Vaasan Sähköverkko Oy. The purpose of this thesis was to create a clear overview of how the earthing systems of the distribution network have to be built and designed based on standards.

Inspections included among other things, the method of construction of the various earthing systems, from which the most important inspection was the global earthing system. In addition, the design of the earthing systems were explored in the thesis. These were among other things what the requirements the standards set to the different situations of the compensation of the earth fault.

For the thesis some examples from the distribution network owned by Vaasan Sähköverkko Oy were taken. These examples demonstrated a practical approach to the earthing systems of the distribution network. In addition, examples, such as dimensioning of the earth electrodes, double faults situation and concatenation of the transformers earthing systems were defined. These results can be used later to support the designing. Inspections were made with the help of the Tekla NIS -network information system and the Excel -calculation program.

There are no simple and unambiguous ways to identify the global earthing system. Still it can be said that this thesis will make it easier to identify and design these kinds of systems. In addition, owing to this thesis while designing all kinds of earthing systems, the most optimal method of the implementation in different situations can be considered, taking into account cost-effectiveness and safety.

Keywords	Earthing systems of distribution network, global earthing system, compensated network, touch voltage
----------	--

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	10
2	OPINNÄYTETYÖN TOIMEKSIANTAJA	11
3	SÄÄVARMA SÄHKÖNJAKELUVERKKO.....	12
	3.1 Sähkömarkkinalaki	12
	3.2 Maakaapeloinnin tuomat ongelmat.....	12
4	MAADOITUSJÄRJESTELMÄT.....	15
	4.1 Laaja maadoitusjärjestelmä.....	15
	4.2 Muuntamoiden ja erotinasemien maadoitusjärjestelmät.....	17
	4.2.1 Puistomuuntamoiden maadoitukset	18
	4.2.2 Kiinteistömuuntamoiden maadoitukset.....	20
	4.2.3 Pylväsmuuntamoiden maadoitukset.....	20
	4.2.4 Käsini ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset.....	22
	4.2.5 Kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset.....	24
	4.3 Erilliset maadoitukset.....	27
	4.4 Sähköasemien maadoitusjärjestelmät	28
	4.5 Kaapelipäätteiden maadoittaminen.....	29
	4.6 Ylijännitesuojien maadoitukset.....	30
5	MAADOITUSTEN TARKASTELU VERKON ERI KYTKENTÄ- JA MAASULKUTILANTEISSA	31
	5.1 Maasulku ja sen vikatyypit	31
	5.1.1 Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku	32
	5.1.2 Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku	34
	5.1.3 Kaksoismaasulku	35
	5.1.4 Katkeileva maasulku	36
	5.2 Maasulun kompensointi- ja suojaustavat sammutetussa verkossa.....	37
	5.3 Standardin asettamat vaatimukset eri kompensointitilanteisiin.....	40

6	MAADOITUSTEN SUUNNITTELU.....	42
6.1	Perusvaatimukset	42
6.2	Mitoitus korroosionkestävyyden ja mekaanisen lujuuden mukaan	43
6.2.1	Maadoituselektrodit.....	43
6.2.2	Maadoitusjohtimet	44
6.3	Mitoitus termisen lujuuden mukaan.....	44
6.3.1	Mitoitusvirran laskenta.....	46
6.4	Mitoitus kosketusjännitteiden mukaan	49
6.5	Mitoitus maaperän resistiivisyyden mukaan.....	52
6.5.1	Maaperän resistiivisyyden mittaus.....	53
6.5.2	Maadoitusresistanssin laskenta	54
6.6	Suunnittelumenetelmä.....	56
7	ESIMERKKITARKASTELUJA JAKELUVERKKOJEN MAADOITUSJÄRJESTELMISTÄ	58
7.1	VSV:n jakeluverkon maadoitusjärjestelmät eri vuosilta.....	58
7.2	Vaasan sähköaseman maadoitusjärjestelmän toteutus.....	65
7.3	Vaasan ja Gerbyn sähköasemien väliset maadoitusyhteydet.....	68
7.4	Kaksoismaasulkuvirtatarkastelu	68
7.5	Muuntamoiden maadoitusjärjestelmien ketjutuksen vaikutus maadoitusimpedanssiin.....	71
8	POHDINTA.....	76
	LÄHTEET	78

LIITTEET

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Vaasan Sähköverkko Oy:n vastuualue	11
Kuva 2. Esimerkki maan potentiaaliprofiilista ja jännitteistä maasulun aikana... 13	13
Kuva 3. Maasulkuvirran kasvu Vaasan Sähköverkko Oy:n jakeluverkossa	14
Kuva 4. Puistomuuntamon maadoitusjärjestelmä	18
Kuva 5. Puistomuuntamon maadoitusjohtimien ja –elektrodien kytkentä.....	19
Kuva 6. Pylväsmuuntamon maadoitusjohtimet	21
Kuva 7. Käsini ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset	23
Kuva 8. Kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset, jossa apujännite muuntopiiristä	25
Kuva 9. Kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset, jossa apujännite omakäyttömuuntajasta.....	26
Kuva 10. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulkutilanne	31
Kuva 11. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulkutilanne.....	32
Kuva 12. Maasta erotetun tai sammutetun verkon kaksoismaasulkutilanne.....	32
Kuva 13. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku	33
Kuva 14. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku	34
Kuva 15. Sammutetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkentä	35
Kuva 16. Katkeilevan maasulun aikana näkyvät virran ja jännitteen käyrämuodot	37
Kuva 17. Keskitetyn kompensoinnin toteutustapa	38
Kuva 18. Hajautetun kompensoinnin toteutustapa.....	39
Kuva 19. Poikkipinnaltaan pyöreän maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D	48
Kuva 20. Poikkipinnaltaan suorakulmaisen maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D	48
Kuva 21. Sallittu kosketusjännite vian kestoajan funktiona.....	50
Kuva 22. Maaperän resistiivisyyden mittaustapa.....	54
Kuva 23. Maadoitusresistanssin laskentatyökalu.	56
Kuva 24. Muuntamon johdinkartta, jonka käyttöönottovuosi on 1979.....	59
Kuva 25. Muuntamon 641 pj-keskus ja potentiaalintasauskisko.	59
Kuva 26. Muuntamon 641 keskijännitekaapelien vaippojen maadoitukset.	60
Kuva 27. Muuntamon johdinkartta, jonka käyttöönottovuosi on 2003.....	61

Kuva 28. Muutammon 4040 pj-keskus.....	61
Kuva 29. Muutammon 4040 kojeistoon menevät kj-kaapelit ja keskusköydet.....	62
Kuva 30. Muutammon 4040 kojeistosta lähtevä maadoitusyhteys potentiaalintasauskiskoon.	62
Kuva 31. Muutammon johdinkartta, jonka käyttöönottovuosi on 2015.....	63
Kuva 32. Muutammon 4229 pj-keskus.....	64
Kuva 33. Muutammon 4229 jakelumuuntajan maadoitukset.....	64
Kuva 34. Vaasan sähköasemalta lähtevät kj-kaapelit sekä maadoituskuparit.....	66
Kuva 35. Vaasan sähköaseman päämaadoituskisko.....	67
Kuva 36. Päämuuntajan 1 päämaadoituskisko.....	67
Kuva 37. Maadoitusjohtimien virtakestoisuudet.....	70
Kuva 38. Ketjumaisen maadoitusjärjestelmän kokonaismaadoitusimpedanssit, kun ketjutus on tehty ilman saattomaadoituskuparia	73
Kuva 39. Kokonaisimpedanssit ketjumaisessa maadoitusjärjestelmässä, jossa on mukana saattomaadoituskupari	74
Taulukko 1. Kuvien 8 ja 9 johtimien numerointien selvitykset.....	27
Taulukko 2. Maadoituselektrodien eri tyyppien minimimitat, jotka takaavat riittävän mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden.....	43
Taulukko 3. Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinnat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden perusteella	44
Taulukko 4. Kaavassa 6 käytettävät materiaalivakiot	47
Taulukko 5. Jatkuvan virran muunnoskerroin loppulämpötilasta 300 °C toiseen lop-pulämpötilaan	47
Taulukko 6. Kosketusjännitteiden tarkat arvot, kun tiedetään laukaisuajat	50
Taulukko 7. Eri maaperien resistiivisyysarvoja.....	53
Taulukko 8. Erityyppisten maadoituselektrodien maadoitusresistanssin laskenta-kaavoja	55

LYHENTEET

VSV	Vaasan Sähköverkko Oy/
kj-verkko	Keskijänniteverkko, 20 kV Suomessa
pj-verkko	Pienjänniteverkko, 0,4 kV Suomessa
U_E	Maadoitusjännite
U_{Tp}	Sallittu kosketusjännite
n-napa	Muuntajan tähtipiste
I_E	Maasulkuvirta
r	Reduktiokerroin
I_{RES}	Maasulun jäännösvirta
I_C	Laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta
I_L	Sammutuskelan nimellisvirta
A	Johtimen poikkipinta
I	Johtimen virran tehollisarvo
t_r	Vikavirran kesto aika
K	Materiaalista riippuva vakio
β	Virrallisen osan resistanssin lämpötilan käänteisarvo lämpötilassa 0 °C
Θ_i	Alkulämpötila
Θ_r	Loppulämpötila
I_D	Johtimen sallittu jatkuva virta

U_T	Todellinen kosketusjännite
F	Kerroin, jonka suuruus määräytyy muuntopiirien olosuhteiden ja toteutetun maadoitusasennuksen mukaan
Z_E	Maadoitusimpedanssi
K	Kompensointiaste
a	Mittauspiikkien välinen matka metreinä
ρ_E	Maaperän resistiivisyys
R_E	Maadoitusresistanssi
$Cu25$	25 mm ² kupariköysi

1 JOHDANTO

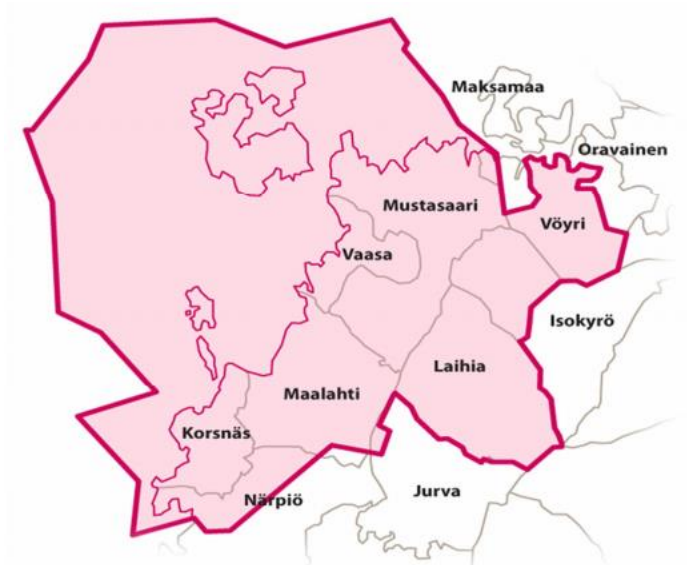
Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää yksityiskohtaisesti, että mitä vaatimuksia standardit asettavat sähkönjakeluverkkojen maadoitusten rakentamiseen ja suunnitteluun. Tämä aihe on tällä hetkellä hyvin ajankohtainen, koska kaikki sähkönjakeluyhtiöt maakaapeloivat merkittäviä määriä sähköverkkoonsa. Vaasan Sähköverkko Oy:llä on tavoitteena kaivaa kj-maakaapelia vuodessa noin 60 km ja lisäksi sen myötä tulee runsaasti pj-kaapelointia. Tämän vuoksi sähkönjakeluverkkojen maadoituksiin liittyvät asiat ovat heillekin ajankohtaisia.

Työssä tullaan esittelemään erilaisia maadoitusjärjestelmiä standardin näkökulmasta sekä perehdytään niiden suunnitteluun standardin mukaisesti. Tämän lisäksi työssä otetaan esimerkkitapauksia Vaasan Sähköverkko Oy:n jakeluverkosta muun muassa laajasta maadoitusjärjestelmästä ja sen toteutustyyleistä.

Lisäksi työssä tarkastellaan maadoituksia eri kompensointitilanteissa ja määritetään toimintatavat näille tilanteille. Nämäkin asiat pyritään käymään läpi standardien mukaisesti.

2 OPINNÄYTETYÖN TOIMEKSIANTAJA

Vaasan Sähköverkko Oy (myöhemmin VSV) vastaa sähkön siirrosta ja jakelusta sekä niihin liittyvien palvelujen tarjoamisesta Vaasan, Mustasaaren, Laihian, Maalahden, Korsnäs, Vöyrin sekä Närpiön pohjoisosan asukkaille ja yrityksille. Yhtiö on kokonaan Vaasan Sähkön omistama, eriytettyä sähköverkkoliiketoimintaa harjoittava tytäryhtiö. Kuvassa 1 on esitetty VSV:n vastuualue. /1/



Kuva 1. Vaasan Sähköverkko Oy:n vastuualue. /2/

VSV:n toimintapolitiikkana on tuottaa asiakkaille edullista ja käyttövarmaa verkopalvelua. Yhtiön pyrkimyksenä on asiakastyytyväisyyden lisääminen olemalla luotettava ja toimiva kumppani. Alueen hyvinvointi on yhtiölle tärkeää, minkä vuoksi se pyrkii hoitamaan liiketoimintaa ympäristöä säästämällä muun muassa vähentämällä ympäristölle haitallisten materiaalien käyttöä, sekä vähentämällä sähköverkon vaikutuksia ympäristöön. VSV:n toimintajärjestelmä on sertifioitu ja yrityksellä on hallussaan SFS ISO 9001-laatu- ja SFS ISO 14001-ympäristösertifikaatit sekä OHSAS 18001-työturvallisuus- ja työterveysjärjestelmästandardien vaatimusten täyttämistä. /1/

Vuonna 2015 yhtiön liikevaihto oli 30,7 miljoonaa euroa ja henkilöstöä oli 32 henkilöä. Sähköä siirrettiin 69 212 asiakkaalle yhteensä 938 GWh:n verran. Sähkön siirron huipputeho oli 202 MW ja sähköverkon pituus oli 6751 km. /1/

3 SÄÄVARMA SÄHKÖNJAKELUVERKKO

3.1 Sähkömarkkinalaki

Uusi sähkömarkkinalaki tuli voimaan 1.9.2013. Se edellyttää, että sähkön jakeluverkko on suunniteltava, rakennettava ja sitä on ylläpidettävä siten, että jakeluverkon vioittuminen myrskyn tai lumikuorman seurauksena ei aiheuta asemakaava-alueella asiakkaille yli 6 tuntia kestävästä sähkönjakelun keskeytystä. Asemakaavan ulkopuolella aikaraja on 36 tuntia. Jakeluverkon haltijan on täytettävä kyseiset vaatimukset vastuualueellaan viimeistään 31. päivänä joulukuuta 2028. Vaatimusten on täytyttävä viimeistään 31. päivänä joulukuuta 2019 vähintään 50 prosentilla jakeluverkon kaikista käyttäjistä, vapaa-ajan asunnot pois lukien, ja viimeistään 31. päivänä joulukuuta 2023 vähintään 75 prosentilla jakeluverkon kaikista käyttäjistä, vapaa-ajan asunnot pois lukien. /3/

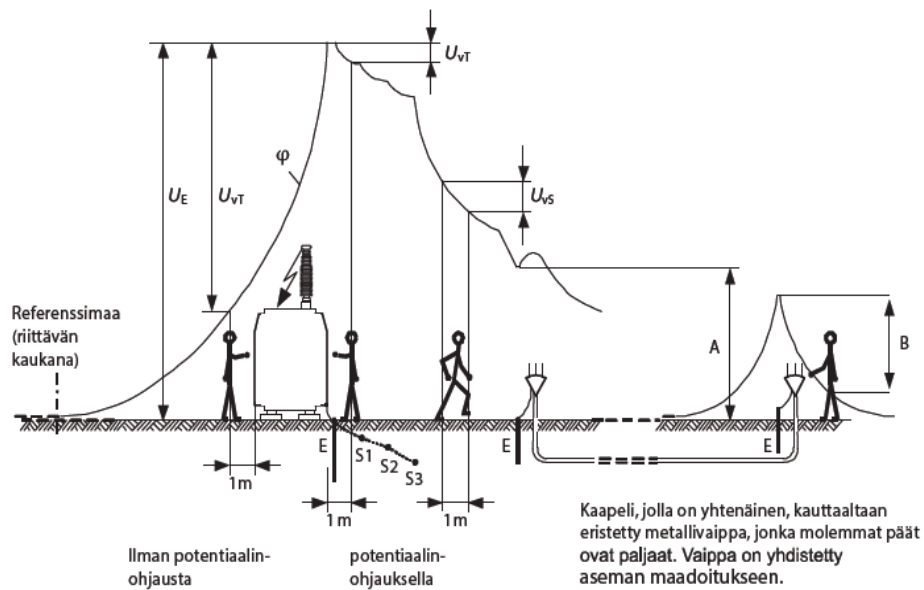
Ilmajohtoverkkojen korvaaminen maakaapeleilla on tehokas tapa suojautua myrskyjä vastaan. Tämä ei ole kuitenkaan aina hyvä ratkaisu, ja sen vuoksi täytyy miettiä myös muita tapoja suojautua myrskyiltä. Esimerkiksi vika-alue voidaan rajata nopeasti sähkölaitoksen valvomosta, kun lisätään verkostoautomaatiota. Korjausajat puolestaan lyhenevät huomattavasti, kun ilmajohdot siirretään teiden läheisyyteen. /4/

3.2 Maakaapeloinnin tuomat ongelmat

Maakaapelointi tuo pääasiassa ongelmia sähköasemien johtolähtöjen suojauksiin, koska maakaapelit nostavat merkittävästi maasulkuvirtojen arvoja verrattaessa ilmajohtoihin. Maasulkuvirrat aiheuttavat vaaraa kuvan 2 osoittamalla tavalla ja tämän vuoksi niiltä täytyy suojautua. Suojautumistyypleihin ja suunnitteluun liittyviin asioihin otetaan kantaa kohdassa 6. /17/

Keskijänniteverkossa avojohdon maasulkuvirta kilometriä kohti on noin 66 mA/km ja maakaapeleilla ne ovat suuruusluokkaa 2..5 A/km. Kuvassa 3 on ennustettu VSV:n sähkönjakeluverkon maasulkuvirtojen kasvu ennustettuun maakaapelointimäärään nähden. /12/

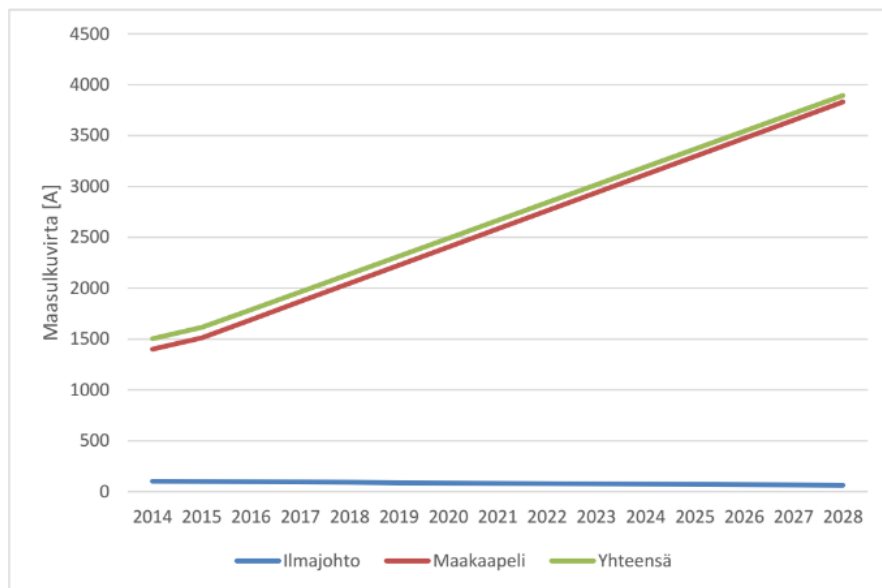
Kohonneiden maasulkuvirta-arvojen takia sähköasemalla joudutaan lisäämään maasulkuvirtojen kompensointia ja tämä tuo sähköyhtiöille merkittäviä kustannuksia, koska kompensointilaitteistot ovat kalliita. Lisäksi tämä tuo haasteellisuutta suunnitteluun, koska erilaisiin kompensointitilanteisiin täytyy varautua. Tätä asiaa käsitellään tarkemmin kohdassa 5.



Selite

E	Maadoituselektrodi	U_E	Maadoitusjännite
S1, S2, S3	Maadoituselektrodiin E yhdistetyt potentiaaliohjauslektrodit (esim. rengasmaadoituselektrodit)	U_{VS}	Suurin askeljännite
		U_{VT}	Suurin kosketusjännite
		A	Siirtyvästä potentiaalista johtuva suurin kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu vain toisesta päästään
		B	Siirtyvästä potentiaalista johtuva suurin kosketusjännite, jos kaapelin vaippa on maadoitettu molemmista päistään
		φ	Maanpinnan potentiaali

Kuva 2. Esimerkki maan potentiaaliprofiilista ja jännitteistä maasulun aikana. /5/



Kuva 3. Maasulkuvirran kasvu Vaasan Sähköverkko Oy:n jakeluverkossa. /14/

4 MAADOITUSJÄRJESTELMÄT

4.1 Laaja maadoitusjärjestelmä

Suurjännitesähköasennuksiin liittyvä standardi SFS 6001 määrittelee laajan maadoitusjärjestelmän seuraavasti:

”Yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, joka on toteutettu kytkemällä yhteen paikalliset maadoitusjärjestelmät. Yhteen kytkettyjen paikallisten maadoitusjärjestelmien läheisyys varmistaa sen, ettei vaarallisia kosketus jännitteitä esiinny. Tällaiset järjestelmät mahdollistavat maasulkuvirtojen jakautumisen siten, että paikallisen maadoitusjärjestelmän potentiaalın nousu pienenee. Järjestelmän voidaan sanoa muodostavan näennäisen tasapotentiaalipinnan.” /5/

SFS 6001 -standardin opastavassa liitteessä sallitaan, että tarkasteltavalla alueella on vähäisiä potentiaalieroja tai ei ollenkaan. Tämän vuoksi standardi ei ota kantaa maadoitusresistanssien arvoihin, jotka olisivat riittäviä laajan maadoitusjärjestelmän toteutumisen kannalta. /5/

Laaja maadoitusjärjestelmä muodostuu muuntopiirien maadoituksista, missä niiden maadoitusverkko muodostaa verkkomaisen ja riittävän tiheän maadoitusalueen. Jokainen muuntamo tulee liittää vähintään kolmella yhteydellä laajaan maadoitusjärjestelmään. Yhteydet muodostuvat esimerkiksi siten, että kaksi yhteyttä tulee suurjännitekaapeleiden keskusköysien ja vaippojen avulla lähimuuntamoihin ja tämän lisäksi pienjänniteverkon kautta muodostuu normaalisti useita yhteyksiä. Useat verkkoyhtiöt käyttävät myös lisänä saattomaadoituskuparia, joka toimii myös yhtenä yhteytenä. Tämä tarkoittaa sitä, että yhden yhteyden vioittuessa, laaja maadoitusjärjestelmä ei silti jää toteutumatta. /6, 5/

Mikäli todetaan uutta muuntopiiriä käyttöönotettaessa, että muuntopiiri liittyy laajaan maadoitusjärjestelmään, muuntopiirille ei tarvitse mitata maadoitusimpedanssia. On kuitenkin syytä varmistaa, että muuntopiiri liittyy laajaan maadoitusjärjestelmään luotettavasti sekä usean yhteyden kautta. /7/

Laajan maadoitusjärjestelmän yhdistysjohtimia ovat

- suurjännitekaapeleiden riittävän suurella poikki-pinnalla varustetut vaipat ja keskusköydet
- pienjänniteverkon PEN – johtimet sekä maakaapeleissa että ilmajohdoissa
- mahdolliset erilliset, muuntamoita yhdistävät maadoitusjohtimet ja elektrodit
- tarvittaessa voidaan muuntamoiden maadoituksia yhdistää myös keskijänniteilmajohdon pylväisiin rakennetuilla maadoitusjohtimilla. /7/

Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituksiksi luetaan sähköasemien, muuntamoiden, pienjänniteverkon ja liittymien maadoitukset. Taajamissa on myös 110/20 kV sähköasemien maadoitukset liitetty laajaan maadoitusjärjestelmään. /7/

Haja-asutusalueella on usein syytä pitää 110/20 kV sähköaseman maadoitukset erillään sähköasemalta syötettävän kj- ja pj-verkon yhteen kytketyistä maadoituksista. Mikäli näitä ei pidettäisi erillään, jouduttaisiin tekemään valtavasti työtä laskelmiin ja mittauksiin, että pystyttäisiin varmasti toteamaan, ettei 110 kV verkon maasulku aiheuta näissä verkoissa vaarallista kosketusjännitettä niiden yhteenkytkentä-pauksissa.

Maadoitusjärjestelmiä tutkiessa tai suunniteltaessa tulee ottaa huomioon seuraavia asioita:

- Rivimäinen muuntamoketju, esimerkiksi jokivarren asutuksessa, ei muodosta laajaa maadoitusjärjestelmää, koska siitä puuttuu verkkomaisuus ja riittävä tiheys.
- Ruutukaavamaiselle kaupunkialueelle muodostuu usein laaja maadoitusjärjestelmä.
- Laajaan maadoitusjärjestelmään on syytä pyrkiä aina kun on mahdollista, koska siitä saavutetaan parhaimmat turvallisuus- ja taloudellisuusedut. /8/

Laajaan maadoitusjärjestelmään liittyy myös vaaroja, joita aiheuttavat muun muassa seuraavat alueet:

- Laajan maadoitusjärjestelmän reunoilla saattaa muodostua tilanne, jossa järjestelmään kuulumattomalta muuntamolta syötetään laajan maadoitusjärjestelmän alueelle, jolloin vikavirta voi siirtyä esimerkiksi puhelinverkon kaapelivaippojen kautta aiheuttaen ongelmia.
- Reuna-alueet tulee tarkistaa huolellisesti ja tarpeen mukaan joko erottaa syötöt niin, ettei ongelmia pääse aiheutumaan tai sitten rakentaa yhteydet laajaan maadoitusjärjestelmään. /8/

Laajan maadoitusjärjestelmän toteutumiseen tuo haastavuutta myös tilanne, jossa verkkomaisen rakenteen omaavassa järjestelmässä syntyy merkittäviä maapotentiaalien nousuja. Tällöin yksittäistä maadoituselektrodiä tarkasteltaessa, maaperän johtavuudella on vaikutusta maadoitusvirran synnyttämän potentiaalisuppilon jyrkkyyteen. Tämän perusteella voidaan todeta, että laajaa maadoitusta tarkasteltaessa, saattaa olosuhteista riippuen taajamissakin maadoitusten väliin syntyä merkittäviä potentiaalikuoppia. Tällaisissa tilanteissa mahdollisimman pienet vikavirrat ovat eduksi, koska tällöin maapotentiaalien nousut pysyvät loivempina. /5, 18/

4.2 Muuntamoiden ja erotinasemien maadoitusjärjestelmät

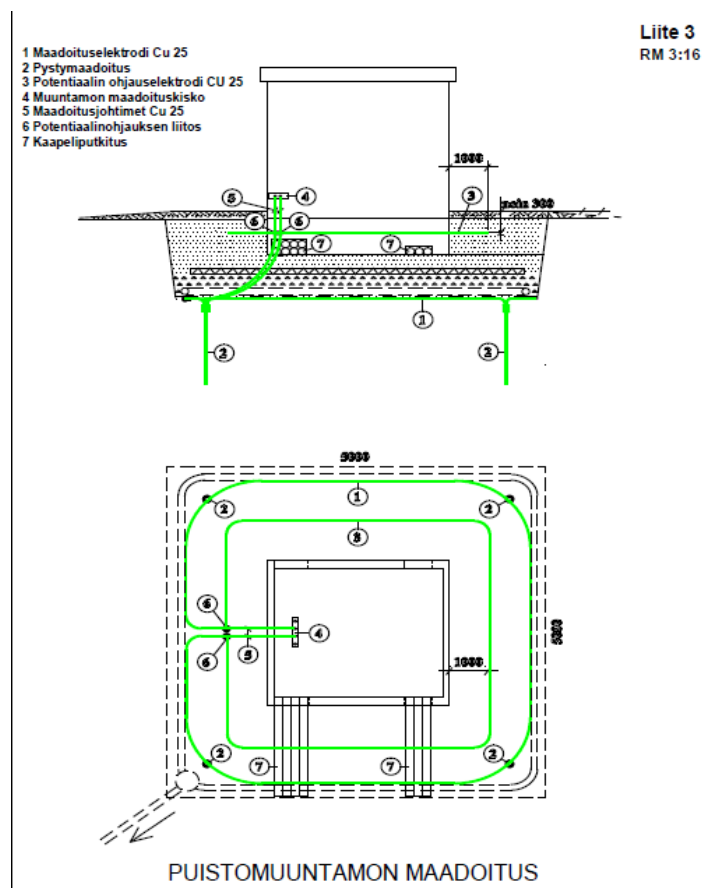
Nykyään jakelumuuuntajilla käytetään yhteistä maadoitusjärjestelmää keskijännitteelle ja pienjännitteelle aina kun se on mahdollista. Muuntopiirin maadoitusjärjestelmässä muuntamolle rakennetaan aina maadoituselektrodi, jonka muoto määräytyy muuntamon rakenteista ja muun muassa maaperästä. Lisäksi maadoituselektrodin muotoa määritettäessä tulee ottaa huomioon ylijännitesuojaus. /8/

Verkostosuosituksissa RJ 19:16, RM 3:16 ja RM 5:16 on annettu tarkat ohjeet muuntamoiden maadoitusjärjestelmien rakentamiseen. Sähkönjakeluverkoissa muuntajatyypit ovat pääasiassa puisto- ja kiinteistömuuntajia tai pylväsmuuntajia. Näiden lisäksi ilmajohtoverkoissa oleville pylväserottimille on annettu tarkat ohjeet maadoitusten rakentamiseen.

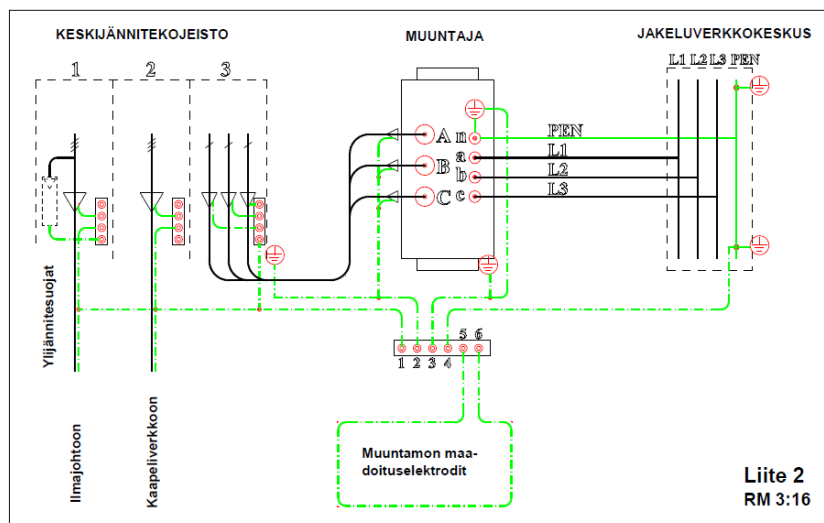
4.2.1 Puistomuuntamoiden maadoitukset

Puistomuuntaja on jakelumuuntaja, jota käytetään maakaapeliverkossa. Se asennetaan yleensä taajamiin ja haja-asutusalueille, jonne on rakennettu tai ollaan rakentamassa maakaapeliverkkoa.

Muuntamolle tulee aina rakentaa maadoituselektrodi ja tarpeen mukaan maadoitusta parannetaan kaapeliojiin ja jakokaapeille asennettavilla maadoituselektrodeilla. Kuvassa 4 on havainnollistettu puistomuuntamolle rakennettava maadoitusjärjestelmä. /8/



Kuva 4. Puistomuuntamon maadoitusjärjestelmä. /9/



Kuva 5. Puistomuuntamon maadoitusjohtimien ja –elektrodien kytkentä. /9/

Puistomuuntamon maadoituselektrodit voidaan asentaa kuvan 4 mukaisesti. Toteutuksesta voidaan mainita seuraavia asioita:

- Perustuksen kaivannon pohjalle asennetaan kuvan 4 mukaisesti renkaan muotoinen maadoituselektrodi, jonka maadoitusresistanssia parannetaan pysty- tai vaakamaadoituksin niin paljon kuin on tarve.
- Mikäli voidaan asentaa syvälle ulottuvia pysty- ja vaakamaadoituksia ja tiedetään maaperän kerrostuma, päästään todennäköisesti parempaan maadoitusresistanssin arvoon asentamalla yksi kunnon syvämaadoitus neljän lyhyen asemasta.
- Mikäli muuntamo ei asenneta laajaan maadoitusjärjestelmään, potentiaalinojauselektrodi rakennetaan enintään 0,5 m syvyydelle ja noin metrin etäisyydelle muuntamon seinästä.
- Mikäli keskijännite- tai pienjännitekaapeliverkon kaapeliojaan lasketaan erillisiä vaakamaadoituselektrodeja, ne yhdistetään muuntamon maadoituskiskoon.
- Muuntamon maadoitus- ja potentiaalinojauselektrodi rakennetaan vähintään 25 mm² kupariköydellä kuvan 4 mukaisesti. /9/

4.2.2 Kiinteistömuuntamoiden maadoitukset

Kiinteistömuuntamo on jakelumuuntaja, joka on rakennettu rakennuksen sisään, esimerkiksi kellaritilaan. Tätä käytetään yleisesti kaupunkialueella, koska puistomuuntajalle voi olla vaikea saada rakennuslupaa, varsinkin tiheään rakennetulla kaupunkialueella. Lisäksi puistomuuntajalle voi olla vaikea löytää sopivaa tilaa kaupunkialueilla.

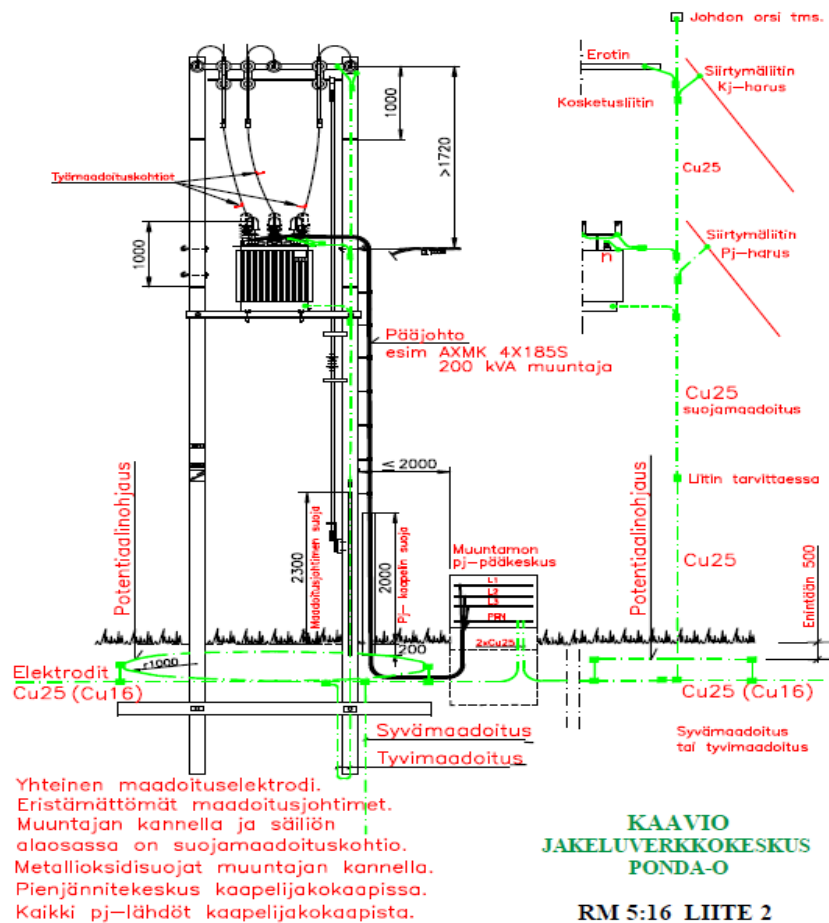
Kiinteistömuuntamon maadoituselektrodi rakennetaan useimmiten pysty- tai vaakaelektrodina muuntamon välittömään läheisyyteen. Joissakin tapauksissa halutaan parantaa maadoitusresistanssin arvoa ja silloin voidaan rakentaa molemmat elektrodit. Rakentamisessa voidaan hyödyntää rakennuksen perustuksen paalutusta esimerkiksi siten, että valitaan rakentamisvaiheessa tarvittava määrä paaluja, joiden mukana asennetaan maadoituselektrodit maahan. /9/

Muuntamon maadoituskiskon ja elektrodien välille täytyy asentaa kaksi 25 mm^2 maadoitusköyttä, koska silloin toisen johtimen katketessa, maadoitusjärjestelmän toimivuus vielä säilyy. /9/

Kiinteistömuuntamon maadoitusjärjestelmiä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että SFS 6000 -standardin mukaan maanalaisia vesi- tai viemäriputkistoja ei saa käyttää maadoituselektrodeina. Tämä säädös on aseteltu sen vuoksi, että vesijohdoissa on esiintynyt korroosion aiheuttamia vuotoja maadoitusjohtimen ja putken liitoksissa. Metallisissa vesijohdoissa käytetään usein eristäviä liitoksia, jolloin ne eivät voi toimia elektrodeina. Toisaalta vesijohtoputket ovat usein muovia, jolloin niitä ei voi tästäkään syystä käyttää elektrodeina. Mikäli nykyisessä muuntamossa on käytössä maadoituselektrodi, joka perustuu maanalaiseen vesi- ja viemäriverkostoon, tulisi sen käytöstä luopua. /9/

4.2.3 Pylväsmuuntamoiden maadoitukset

Pylväsmuuntamolle rakennetaan maadoitus, joka on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Pylväsmuuntamon maadoitusjohtimet. /10/

Maadoitusjärjestelmä koostuu potentiaalinhojauselektrodista, joka upotetaan enintään 0,5 m syvyydelle ja 1 m etäisyydelle pylvästä. Potentiaalinhojauselektrodi kytetään aina kahdesta pisteestä vaakasuoraan maadoituselektrodiin. Tämän lisäksi maadoitusjärjestelmä muodostuu suurjännitteen suojavaadoitusjohtimesta, joka asennetaan pylvästä pitkin suoraan maahan. Tähän maadoitusjohtimeen kytetään kaikki suojavaadoitettavat osat, kuten

- muuntajan kansi ja alapuoli
- pylväserottimen runko
- johdon orsi
- harukset. /8/

Kuvan 6 mukaisesti muuntajan n-navasta asennetaan Cu 25 mm² johdin suoraan maahan. Tämän lisäksi n-napaan kytetään haara suojavaadoitusjohtimesta. Tämä

tarkoittaa sitä, että muuntajan n-navan järjestelmämaadoituksena toimii $2 \times 25 \text{ mm}^2$ kuparijohtimet. Suoraan maahan menevä johdin asennetaan tyvimaadoituselektrodiksi ja yhdistetään vaakasuoraan maadoituselektrodiin. /8/

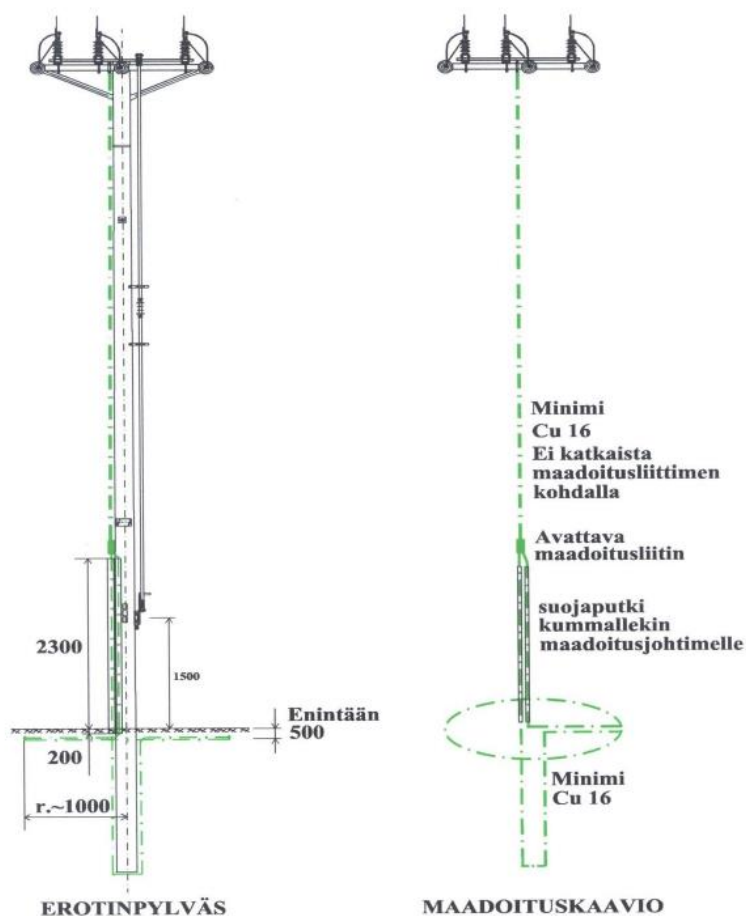
Mikäli tyvimaadoitus jostain syystä halutaan jättää pois, se voidaan korvata syvämaadoituksella. Kuitenkin uusissa asennuksissa, joihin liittyy muuntamopylväiden pystytys, voidaan yleensä asentaa tyvimaadoitus. /8/

Pylvään kyljessä olevat maadoitusjohtimet tulee aina suojata 2,3 m korkeudelle suojaputkella. Suojaputken yläpuolelle asennetaan yleensä liittimet, että järjestelmän eheys voidaan todeta määräaikaistarkastuksessa. /8/

Mikäli pylväsmuuntamo joudutaan asentamaan kalliolle, ei potentiaalinhojausta tarvitse asentaa. Muuntamon maadoituselektrodi täytyy kuitenkin asentaa ylijännitesuojausta varten mahdollisimman lähelle muuntamo. Tämä voidaan toteuttaa joko erillisellä pylväällä ja siirtomaadoituksella tai sitten asennetaan siirtomaadoitus keskijännitelinjan seuraavalle pylväälle. Tällöin kuitenkin täytyy kiinnittää huomiota maadoituselektrodin muotoon, koska sen tulisi olla useampihaarainen, jolla saavutetaan pienempi aaltovastus. Hyvänä esimerkkinä pidetään 3–4 kappaletta 10 m haaraa noin 0,5–0,7 m syvyydessä. /8/

4.2.4 Käsin ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset

Käsin ohjattavan pylväserotinaseman maadoitusjärjestelmä tulisi rakentaa kuvan 7 mukaisesti.



Kuva 7. Käsini ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset. /7/

Kuvassa 7 vasemmalla puolella on havainnollistettu kyseisen erotinaseman rakenne ja oikean puoleinen kuva puolestaan osoittaa maadoitusjohtimien ja potentiaaliohjausrenkaan kytkennän. /8/

Kuvan 7 mukaisesti erottimen suojamaadoitusjohdin asennetaan erottimelta suoraan maahan, varmistaen näin maadoitusjärjestelmän toiminta myös mittaustilanteissa. Johdin asennetaan pylväällä suojaputkeen, joka ulottuu 2300 mm korkeudelle maasta ja vähintään 200 mm syvyydelle maahan. /7/

Maadoituselektrodi kierretään pylvään tyveen ja tämän lisäksi pylvään ympärille noin metrin etäisyydelle ja enintään 0,5 metrin syvyydelle asennetaan potentiaaliohjausrenkas. Siitä maadoituselektrodi jatkuu maadoitusjohtimena toisessa suojaputkessa avattavalle liittimelle. Liittimeltä voidaan määräaikaistarkastusten yhteydessä todeta maadoitusjärjestelmän toimivuus. /7/

Mikäli pylväserotinasema on kalliolla, asennuksiin pätee seuraavat määräykset:

- Ei tarvitse asentaa potentiaalinohjausrengasta.
- Kallion osalla maadoitusjohdin tulee suojata 2 m etäisyydelle pylvästä.
- Maadoituselektrodin rakenne tulisi olla useampihaarainen, jolloin mahdolliset ylijännitteet pienenevät tehokkaasti.
- Maadoitusjärjestelmä voidaan rakentaa myös toiselle pylvälle käyttäen vaaka tai pystymaadoituselektrodeja.
- Koska erottimen ohjaus tapahtuu erotinpylväällä, ei toiselle pylvälle rakennettava maadoitusjärjestelmä tarvitse potentiaalinohjausrengasta.
- Toinen pylvästä täytyy kuitenkin sijaita mahdollisimman lähellä erotinpylvästä. /7/

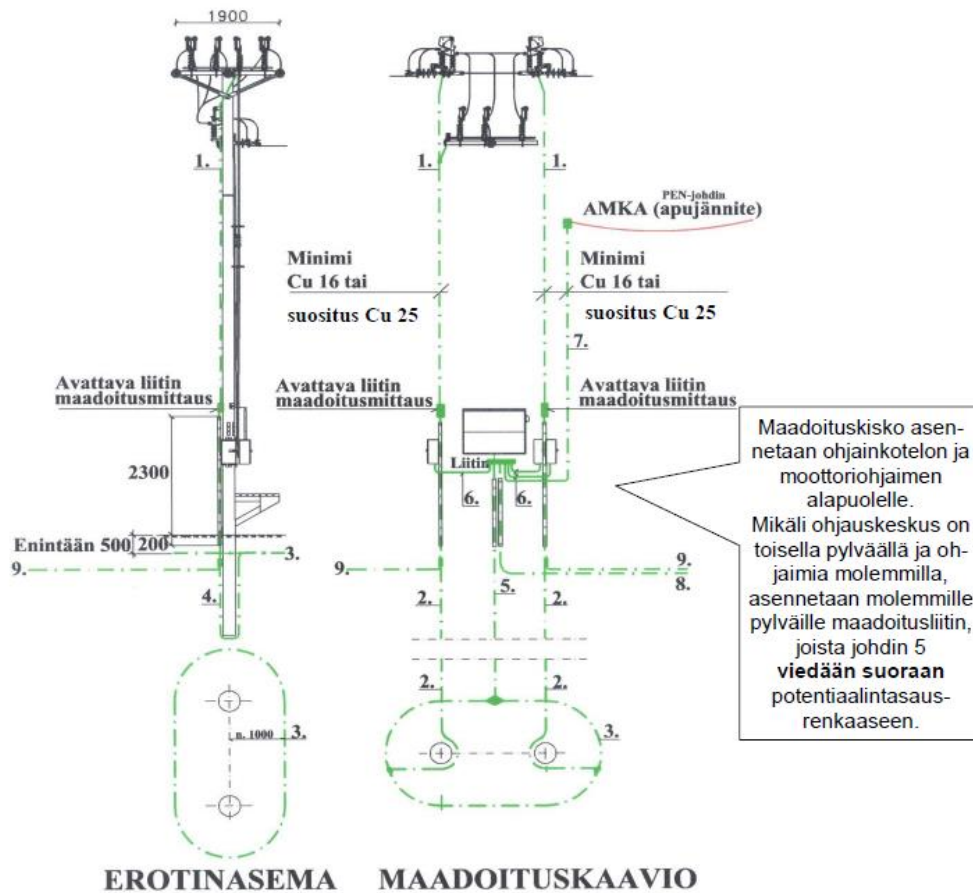
Erottimen ohjauskampea ei saa yhdistää pylvällä olevaan suojamaadoitusjohtimeen, koska salamaylijännitteen aikana siihen saattaisi muodostua useiden kilovolttien syöksyjännite. /8/

4.2.5 Kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset

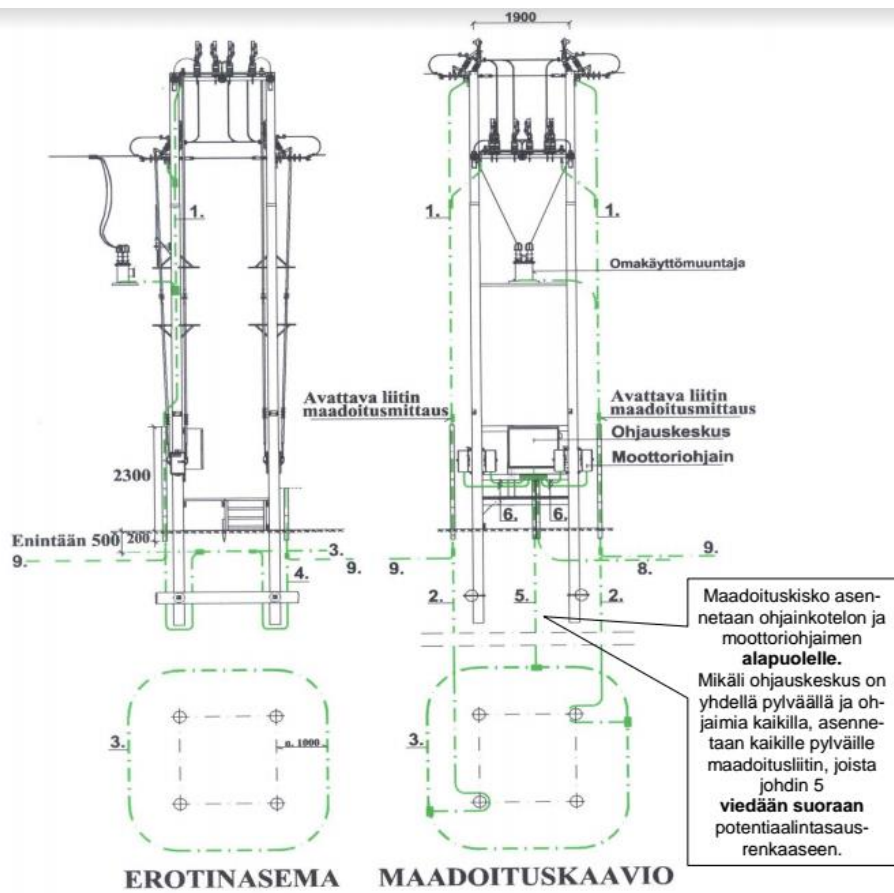
Sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuneita kustannuksia pystytään vähentämään merkittävästi kauko-ohjattavilla pylväserotinasemilla. Tämän vuoksi verkkoyhtiöt rakentavat niitä koko ajan mahdollisuuksien mukaan lisää.

Mikäli kauko-ohjattu pylväserotinasema saa tarvittavan sähköenergiansa läheisestä muuntopiiristä, maadoitusjärjestelmä on yksinkertainen rakentaa. Riittävän pieni maadoitusimpedanssi saavutetaan yleensä muuntopiirin maadoitusten avulla. Toisaalta kauko-ohjattu pylväserotinasema voi saada sähköenergiansa omakäyttömuuntajasta, jolloin sille täytyy rakentaa oma maadoitusjärjestelmä, joka täyttää kaavan 1 kosketusjännitevaatimukset. /7/

Kahden erilaisen kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoitusjärjestelmät on esitetty kuvissa 8 ja 9.



Kuva 8. Kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset, jossa apujännite muuntopiiristä. /7/



Kuva 9. Kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoitukset, jossa apujännite omakäyttömuuntajasta. /7/

Kuvissa 8 ja 9 nähtävien johtimien numerointien selvitykset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kuvien 8 ja 9 johtimien numerointien selvitykset. /7/

Johtimen numero	Selvitys
1	erottimen suojamaadoitusjohdin erottimelta liittimelle
2	erottimen maadoitusjohdin liittimeltä elektrodiin
3	maan pinnan potentiaalinohjauselektrodi
4	tyvimaadoituselektrodi
5	pylväserotinaseman ohjauskeskuksen maadoitusjohdin
6	erottimien moottoriohjaimien koteloiden suojamaadoitusjohdin
7	apujännitteen tuovan AMKA-kaapelin PEN-johtimen Cu-maadoitusjohdin
8	tiedonsiirtoantennin maadoitusjohdin
9	ylijännitesuojausta varten rakennettavat säteittäiset maadoituselektrodit

Kuvista 8 ja 9 nähdään, että maadoitusjärjestelmät eivät poikkea paljoa toisistaan. Ainoana erona voidaan pitää, että omakäyttömuuntajalla varustetun kauko-ohjattavan pylväserotinaseman maadoituksia voidaan joutua parantamaan vaaka- ja/tai pysty- maadoituselektrodein kosketusjännitevaatimusten saavuttamiseksi. /7/

4.3 Erilliset maadoitukset

Suurjännite- ja pienjännitemaadoitukset joudutaan rakentamaan erilleen, mikäli maadoitusolosuhteet ovat todella vaikeat ja kaavan 1, 2 tai 3 ehdoista mitkään eivät täyty. /7/

$$U_E \leq 2 \times U_{TP} \quad (1)$$

$$U_E \leq 4 \times U_{TP} \quad (2)$$

$$U_E \leq 5 \times U_{TP} \quad (3)$$

Jos suur- ja pienjännitemaadoitukset ovat erillisiä, maadoituselektrodien erotustapa pitää valita siten, että pienjänniteasennuksessa ei voi esiintyä hengen tai omaisuuden vaaraa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että suurjännitevian aiheuttamat askel-, kosketus- ja siirtyvät jännitteet ovat hyväksyttävän suuruisia. Näiden vaatimusten lisäksi pienjännitelaitteiden rasiusjännitteet täytyvät olla hyväksytyissä rajoissa. /5/

Tällaista maadoitustapaa käytetään kuitenkin niin harvoin, että yleensä sähkölaitokset eivät halua ottaa suunnittelussa huomioon tällaista vaihtoehtoa. Tämä johtuu siitä, että nykyään on tiedossa niin hyvät rakennusmenetelmät, joilla varmasti tul- laan saavuttamaan jokin kaavojen 1, 2 tai 3 ehdoista.

4.4 Sähköasemien maadoitusjärjestelmät

Sähköasemien maadoitukset rakennetaan tavallisesti verkkomaisiksi maadoitus- elektrodeiksi, johon yhdistetään muun muassa laitteiden maadoitusjohtimet. Tämän lisäksi maadoitusruudukko yhdistetään asemalta lähtevien johtojen ukkosjohtimiin. Asemat rakennetaan kovapohjaisille maille, jolloin johtavuus on huono. Sen vuoksi täytyy hyödyntää asemalta lähteviä vaakamaadoituselektrodeja, jotka vedetään ase- man ympäristön hyvin johtaville alueille. Vaakamaadoituselektrodit vedetään joh- toaukeiden reunoja myöten ja yhdistetään pylväsmadoituksiin. Vaakamaadoitus- elektrodien pituudet rajoittuvat normaalisti muutamaan kilometriin, sillä pidem- millä elektrodeilla johtimen oma impedanssi kasvaa liian suureksi. /13/

Maadoitusruudukon ja siihen liitettyjen maadoituselektrodien avulla huolehditaan siitä, etteivät kosketus- ja askeljännitteet nouse aseman alueella vian aikana liian suuriksi. Tärkein johdinelektrodi maadoitusruudukossa on se, joka on uloimpana ja ulottuu noin metrin etäisyydelle sähköaseman alueen ulkopuolelle. /13/

Asemalta ulosmeneviä maadoituselektrodeja käytettäessä on syytä ottaa huomioon potentiaalinen leviäminen ympäristöön ja siitä mahdollisesti aiheutuvat ongelmat. Asemapotentialit ovat yleensä pienemmät kuin pylväspotentialit, mutta niiden

vaikutusalue on kuitenkin huomattavasti suurempi. Näin ollen aseman ympäristön potentiaali saattaa olla useita kymmeniä prosentteja aseman maadoitusjännitteestä jopa 2–4 km päässä asemalta. /13/

Suurjänniteasennuksiin liittyvä standardi SFS 6001 asettaa seuraavia vaatimuksia sähköasemien maadoituksiin:

- Sähköasemalla paljaat metalliaidat on maadoitettava useassa pisteessä, esimerkiksi jokaisessa kulmassa.
- Tilanteen mukaan (aita maadoitusjärjestelmän sisä- tai ulkopuolella) yhdistykset tulee tehdä joko suurjänniteverkon maadoitusjärjestelmään tai erillisiin maadoituselektrodeihin.
- Sähköaseman alueen sisällä olevat metalliputket on yhdistettävä sähköaseman maadoitusjärjestelmään.
- Sähköaseman ulkopuolelta tulevat putkistot täytyvät olla materiaalia, jotka eivät johda sähköä. /5/

4.5 Kaapelipäätteiden maadoittaminen

Suurjännitekaapeleilla on aina johtava metallivaippa. Vaipan maadoittamiseen pätee seuraavat säännöt:

- Vaippa tulee aina maadoittaa.
- Pitkillä yli 100 m kaapeleilla maadoitus tulee suorittaa vaipan molemmista päistä, muuten vaipan vapaan pään jännite nousisi liian suureksi oikosulun aikana.
- Jos kaapeleilla käytetään johtavalla vaipalla varustettuja kosketussuojattuja päätteitä, maadoitetaan vaippa molemmista päistä, muuten päätteet voisivat vaurioitua vian aikana.
- Yleisesti voidaan sanoa, että keskijännitteellä maadoitetaan kaapeleiden vaipat aina molemmista päistä. /8/

Suurivirtaiset lyhyet kaapelit, esimerkiksi 110/20 kV muuntajien 20 kV kaapelit, voidaan maadoittaa vain toisesta päistä, tällöin kaapelin siirtokyky saadaan käytet-

tyä täysin hyödyksi. Tämä voidaan perustella sillä, kun kumpikin vaipan pää maadoitetaan, syntyy virtapiiri ja vaippaan indusoitunut jännite synnyttää vaippavirran, jonka seurauksena kaapelin kuormitettavuus putoaa noin 10 %:a. Tällöin täytyy kuitenkin muistaa, että ei käytetä kosketussuojattuja päätteitä ja kaapelin pituus on enimmillään noin 50 m. /8/

4.6 Ylijännitesuojien maadoitukset

Ylijännitesuojat maadoitetaan yleensä seuraavia sääntöjä noudattaen:

- Ylijännitesuojat kytketään suoraan suojattavan kohteen rinnalle lyhyin johdinkin.
- Ylijännitesuojan maadoitusjohdin tulee viedä mahdollisimman suoraan maahan.
- Maadoituselektrodi tulee olla useampihaarainen, jonka seurauksena saavutetaan pienempi aaltovastus.
- Ylijännitesuojan maadoitusresistanssiin ei tarvitse kiinnittää huomiota, koska se on yhteydessä muuntamoon ja tällöin muuntamon maadoitusimpedanssi on määrävänä tekijänä. /8/

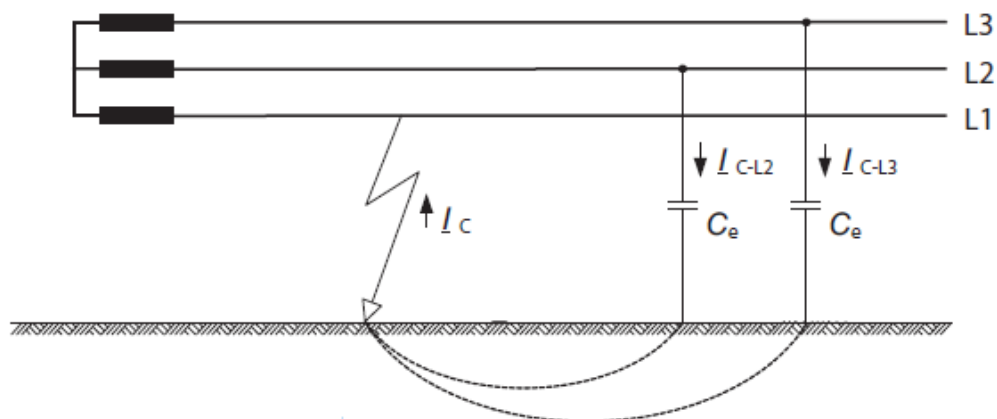
5 MAADOITUSTEN TARKASTELU VERKON ERI KYTKENTÄ- JA MAASULKUTILANTEISSA

Tässä luvussa käsitellään SFS 6001 -standardin asettamia maadoitusvaatimuksia maasulun kompensointitilanteissa. Käsiteltävinä asioina ovat muun muassa maadoitusvaatimukset, kun sähköasema on jostakin syystä poissa käytöstä ja sen syöttämiä johtolähtöjä syötetään joltain muulta sähköasemalta.

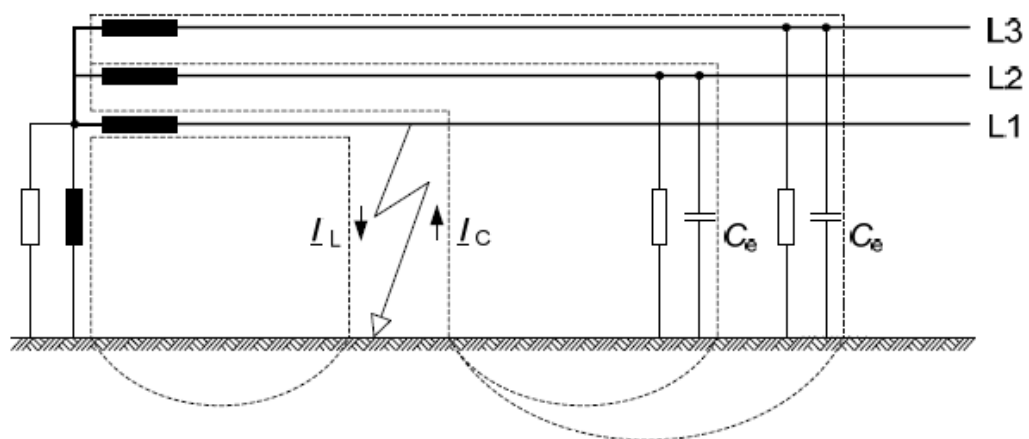
5.1 Maasulku ja sen vikatyypit

Maasulku on vika, joka aiheutuu jännitteisen johtimen kytkeytymisestä maahan tai sen ja maan välisen eristysresistanssin kautta. /5/

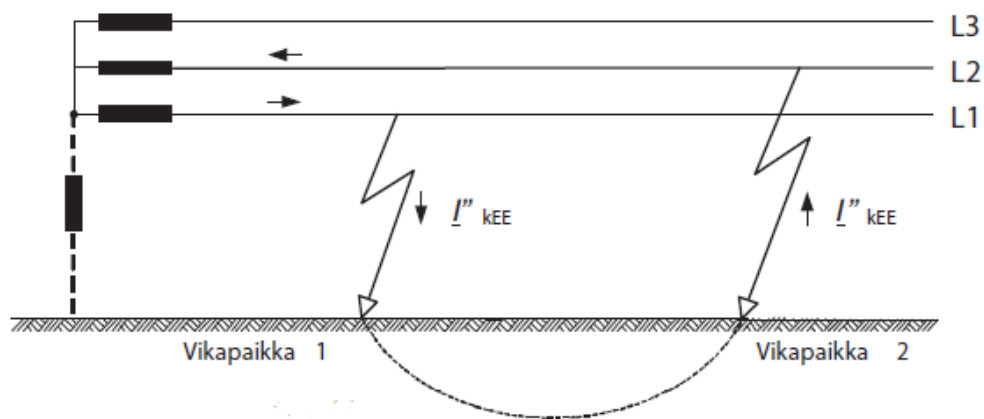
Kuvissa 10–12 nähdään erilaisia maasulkutilanteita, joita voi syntyä sähköjakeluverkossa.



Kuva 10. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulkutilanne. /5/



Kuva 11. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulkutilanne /5/



Kuva 12. Maasta erotetun tai sammutetun verkon kaksoismaasulkutilanne. /5/

5.1.1 Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku

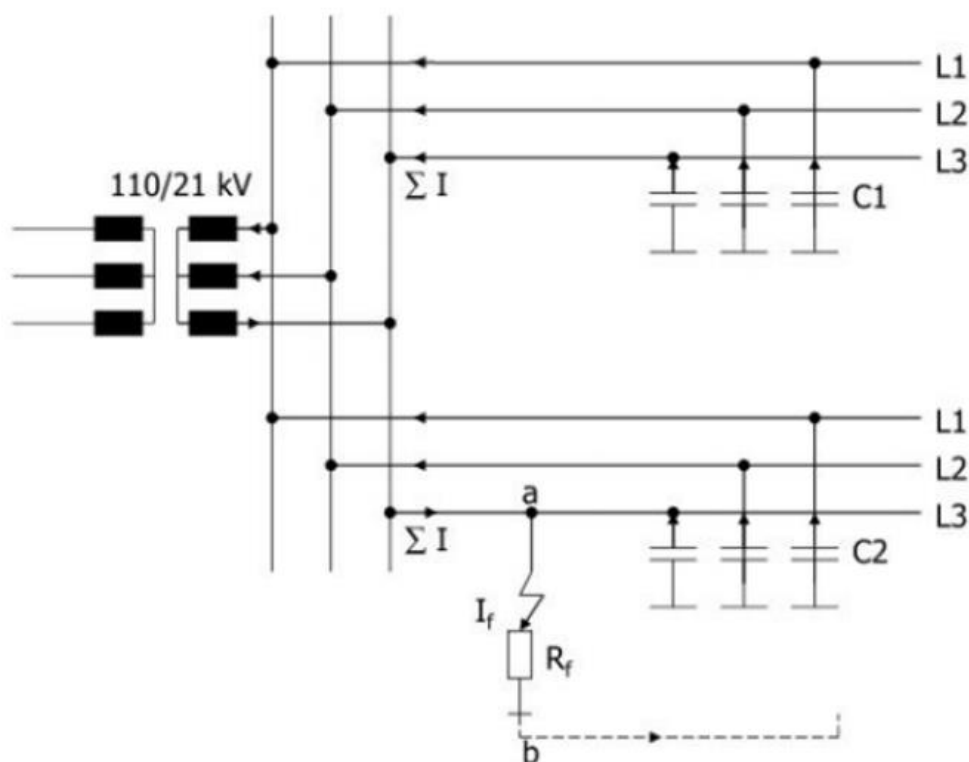
Ennen uutta sähkömarkkinalakia Suomessa on enemmän käytetty keskijänniteverkon maadoitustapana tähtipisteestään maasta erotettua verkkoa tai sen erityismuotoa. /15/

Keskeisin syy maasta erotetun keskijänniteverkon käyttöön on huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuva kosketusjänniteongelma. Usein maasulku aiheutuu vai-

hejohtimen valokaaresta tai kosketuksesta suojamaadoitettuun osaan. Tällöin kosketusjännite muodostuu maasulkuvirrasta ja maadoitusresistanssista. Sallitun kosketusjännitteen määrittämisessä pyritään arvoon, jolla vältetään sähköiskutilanteissa hengenvaarallisen sydänkammiovärinän muodostuminen. /15/

Maasta erotetun verkon maasulkutilanteessa verkon kaikkien vaiheiden ja verkon tähtipisteen jännitteet muuttuvat. Lisäksi verkon eri osissa esiintyy johtojen maakapasitanssien kautta kulkevia kapasitiivisia vikavirtoja. Maasulkuvirralla on kulkureitti vikapaikasta maahan johtojen maakapasitanssien ja vaihejohtimien impedanssien kautta 110/20 kV:n päämuuntajan käämityksiin. Sieltä se kulkee viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan. /15/

Kuvassa 13 on havainnollistettu tarkemmin maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku.

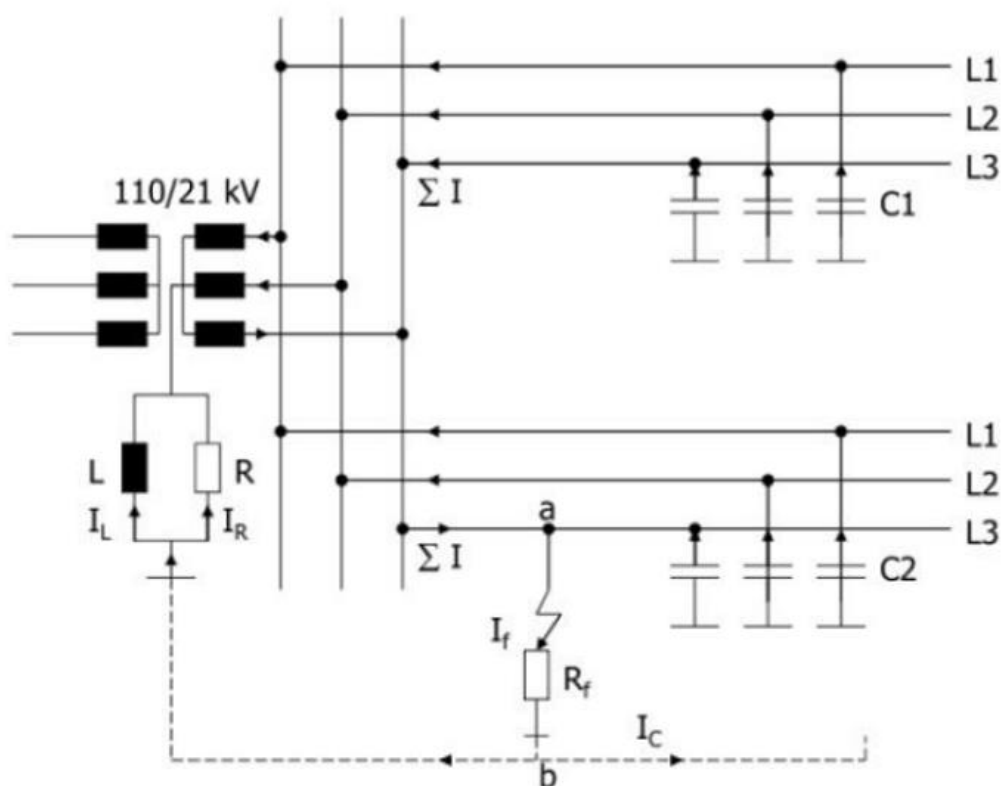


Kuva 13. Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku. /15/

5.1.2 Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku

Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteeseen kytketään maakapasitanssit kompensoiva reaktori, jota kutsutaan yleensä sammutuskuristimeksi. Sillä saadaan maasulkuvirtaa pienennetyksi ja vikapaikan palaavaa jännitettä loivemmaksi. Sammutuskuristin viritetään siten, että maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summa on suurin piirtein sama kuin sammutuskuristimen kautta kulkeva virta. /15/

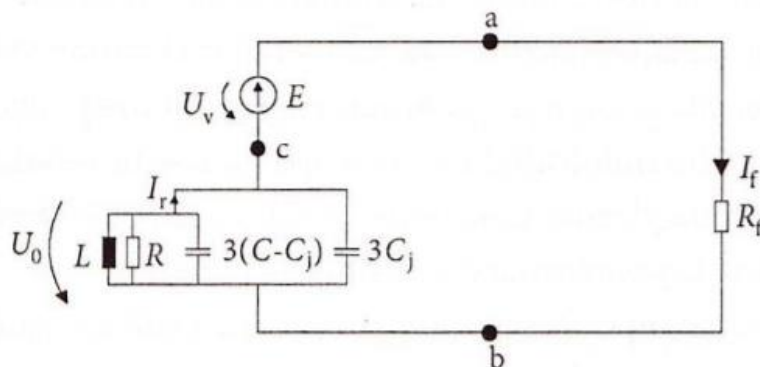
Kuvassa 14 on havainnollistettu sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku.



Kuva 14. Sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku. /15/

Kuvassa 14 nähtävä vikavirta I_f jää pieneksi sen vuoksi, koska sammutuskuristimen induktiivinen virta I_L ja kapasitiivinen maasulkuvirta I_C ovat vastakkaisuuntaisia ja näin ollen ne kumoavat toisiansa. /15/

Kuvassa 15 nähdään sammutetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkentä.



Kuva 15. Sammutetun verkon maasulkupiirin sijaiskytkentä. /15/

Vioittuneen lähdön alussa on summavirtamuuntaja, joka havaitsee kuvassa 15 nähtävän virran pätökomponentin I_r . Tämä määräytyy pääasiassa sijaiskytkennässä nähtävästä tähtipistejännitteestä U_0 ja piirin resistiivisestä osasta R . Tämän perusteella voidaan todeta, että U_0 ja I_r ovat likimain samansuuntaiset. Virran pätökomponentin suuruuteen vaikuttavat sammutuskuristimen ja mahdollisen lisävastuksen resistanssi. Lisäksi verkon johtimien resistanssit ja verkon resistiiviset vuotovirrat vaikuttavat pätökomponentin arvoon. /15/

5.1.3 Kaksoismaasulku

Kaksoismaasulku syntyy, kun kaksi vaihetta on maakosketuksessa. Vikapaikat voivat olla kaukanakin toisistaan. Kaksoismaasulussa vikavirta on normaalisti suuri ja sen suuruusluokka voi olla kaksivaiheisen oikosulkuvirran tasolla. Vikavirta on vaikea määrittää tarkasti, koska vikavirta kulkee maassa muun muassa hyvin johtavia vesijohtoputkia tai telekaapeleiden vaippoja pitkin. Etenkin huonosti johtavassa maaperässä vikavirta etsii paremmin johtavan kulkureitin. Tällainen tilanne voi aiheuttaa termisesti suuria vahinkoja kulkiessaan kaapeleiden vaipoissa. /15/

SFS 6001 -standardi määrittelee, että kaksoismaasulkuvirran maksimiarvo voidaan olettaa olevan 85 % symmetrisen alkuoikosulkuvirran arvosta. /5/

Tämä likiarvoistus voidaan selittää sillä, että IEC 60909 -standardissa kaksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan kertomalla symmetrinen alkuoikosulkuvirta kertoimella $\frac{\sqrt{3}}{2}$, joka vastaa suurin piirtein arvoa 0,85. /19/

Kaksoismaasulun poiskytkentä tapahtuu yleensä oikosulkusuojauksen avulla, koska yleensä vikavirta nousee riittäväksi ylivirtasuojan laukaisuun. /15/

SFS 6001 -standardi määrittelee, että mikäli maasulku kytketään pois alle 1 sekunnissa, niin maadoituselektrodien ja -johtimien termisen kuormitettavuuden mitoituksessa määrävänä tekijänä voidaan pitää kapasitiivisen maasulkuvirran arvoa. /5/

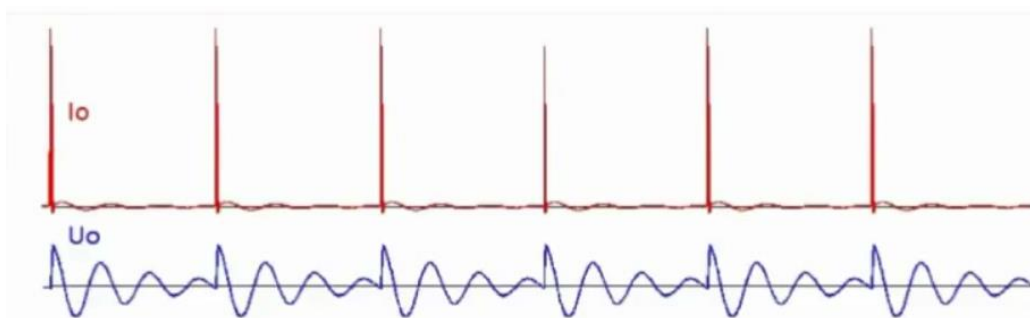
Kaksoismaasulku tulisi aina ottaa huomioon, myös lyhemmillä laukaisuajoilla, koska niitä syntyy myös maasulun poiskytkennällä varustetuissa verkoissa. /8/

Mikäli kaksoismaasulku syntyy kaukana sähköasemasta, niin tällöin vikavirta saattaa jäädä pienemmäksi ja laukaisu tapahtuu ylivirtareleen alemmalla portaalla. Tällöin laukaisuaika saattaa ylittää selvästi 1 sekunnin rajan.

5.1.4 Katkeileva maasulku

Katkeileva maasulku on ilmiö, jossa vika toistuu epäsäännöllisesti ajan funktiona. Kyseinen vika ei ole jatkuva, jonka vuoksi virran ja jännitteen käyrämuoto on hyvin epäsäännöllinen. Normaalisti vika on kaapelipäätteen tai -jatkoksen eristevika ja tällöin kaapelin sähköinen eristekyky on pysyvästi alentunut. /16/

Kuvassa 16 on havainnollistettu katkeilevan maasulun aikana näkyvät virran ja jännitteen käyrämuodot.



Kuva 16. Katkeilevan maasulun aikana näkyvät virran ja jännitteen käyrämuodot. /16/

Kuvassa 16 nähtävät käyrämuodot on tehty esimerkiksi ja niin sanotusti oppikirjaimaiseksi. Tämä voidaan perustella sillä, että normaalisti katkeilevan maasulun vika ei ole välttämättä näin säännöllisesti toistuva. /16/

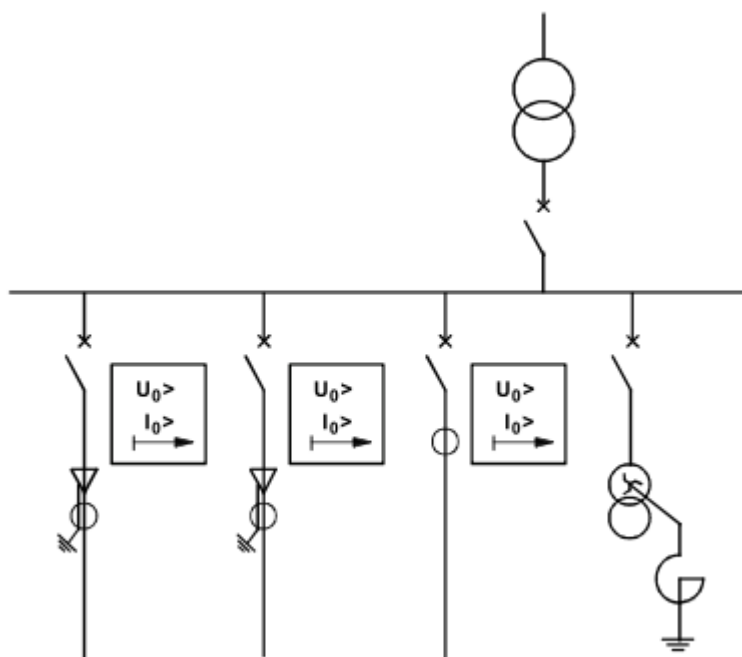
Katkeileva maasulku muodostuu, kun jännite ylittää eristevian aiheuttaman alentuneen jännitekestoisuusrajan ja tällöin vikapaikassa tapahtuu lyhyt läpilyönti vaihejohtimesta maadoitettuun vaippaan. Läpilyönnin jälkeen verkko lähtee palautumaan terveeseen tilaan ja tämä tapahtuu kuvassa 16 nähtävän jälkivärähtelyn kautta. Kaapelin eristekyky ei ilman korjausta parane ja tällöin vika alkaa toistamaan itseään ajan funktiona. /16/

Koska katkeileva maasulku on epäsäännöllinen ja siihen vaikuttaa todella monet verkon parametrit, sen matemaattinen määrittäminen on erittäin hankalaa. /16/

5.2 Maasulun kompensointi- ja suojaustavat sammutetussa verkossa

Keskijänniteverkoissa on vain harvoin muuntajan tähtipiste käytettävissä. Tämän vuoksi joudutaan muodostamaan keinotekoinen tähtipiste. Taloudellisimpana vaihtoehtona pidetään tähtipisteen muodostus Z-kytkentäisen maadoitusmuuntajan avulla, jonka tähtipisteeseen kompensointikuristin liitetään. Tällöin puhutaan, että kompensointi on toteutettu keskitetysti. /17/

Keskitetty kompensointi on havainnollistettu kuvassa 17.

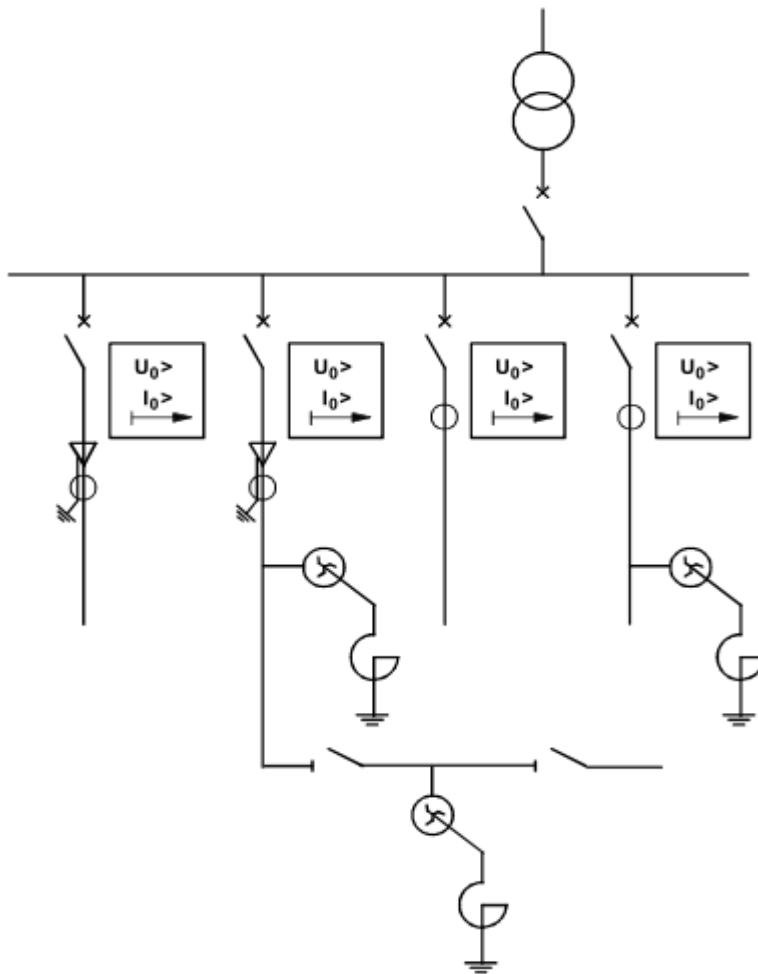


Kuva 17. Keskitetyn kompensoinnin toteutustapa. /17/

Kuvassa 17 ylimpänä näkyy sähköaseman 110/20 kV:n päämuuntaja, joka on liitetty kokoojakiskoon. Kokoojakiskosta lähtee kolme johtolähtöä sekä neljäntenä oikealla näkyy maadoitusmuuntaja ja sen tähtipisteeseen kytketty kompensointikuristin. /17/

Kompensointi voidaan toteuttaa myös hajautetusti, jolloin kompensointikuristimet sijoitetaan verkkoon johtojen varsille. Johdon varrella sijaitseva kuristin mitoiteetaan kyseisen johdon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran mukaisesti. Tyypillisesti hajautettu kompensointi toteutetaan siten, että vain osa verkon maasulkuvirrasta kompensoidaan. Tällä saadaan estettyä tilanne, missä yksittäiset johdot saataisivat tulla ylikompensoiduiksi. /17/

Kuvassa 18 on havainnollistettu hajautetun kompensoinnin toteutustapa.



Kuva 18. Hajautetun kompensoinnin toteutustapa. /17/

Kompensoinnin määrää kuvataan niin sanotulla kompensointiasteella K , joka voidaan laskea kaavan 4 avulla.

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (4)$$

I_L = kuristimen virta suorassa maasulussa

I_C = verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa. /17/

Jos kompensointiasteen arvo on yksi tai lähellä sitä, on verkko kompensoitu eli sammutettu. Verkko on ylikompensoitu kompensointiasteen ollessa suurempi kuin yksi ja vastaavasti alikompensoitu mikäli kompensointiaste on pienempi kuin yksi.

/17/

Suojaus toteutetaan suunnatuilla suojoilla, joiden toiminta perustuu maasulkuvirran pätökomponentin suuruuteen ja suuntaan tai vaihtoehtoisesti niin sanottuun kulmamittausperiaatteeseen. /17/

Kulmamittausperiaatteella toteutettu suojaus toimii, kun nollavirran ja -jännitteen suuruudet ylittävät asetteluarvot ja nollavirran vaihekulma nollajännitteeseen nähden on asetellulla toimintasektorilla. /17/

Jos kompensoitu verkko on suppea, saattaa maasulkuvirran pätökomponentti jäädä niin pieneksi, että maasulkuvirran suuntaa ei saada luotettavasti määritettyä. Jos nollavirran mittauksessa käytetään summakytkentää tai laskennallista summamittausta, täytyy pätökomponenttia kasvattaa kytkemällä kompensointikuristimen rinnalle toisiovastus. /17/

5.3 Standardin asettamat vaatimukset eri kompensointitilanteisiin

SFS 6001 -standardin mukaan kaikki sähköisesti erilliset järjestelmät on varustettava automaattisella maasulkusuojauksella, jonka avulla maasulku havaitaan ja kompensoidaan. /5/

Normaalisti maasulku pitää kytkeä pois automaattisesti. Ensimmäisestä maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa kompensointia voidaan käyttää silloin, kun verkon käytön luonteen takia maasulun aiheuttama keskeytys täytyy siirtää verkkoyhtiön näkökulmasta parempaan ajankohtaan. /5/

Hälytystä ja käsin tapahtuvaa kompensointia käytettäessä on täytettävä seuraavat ehdot:

- Verkon rakenteen on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaarimaasulku täytyy sammua itsestään.
- Maasulusta täytyy tulla hälytys ja sen on tultava välittömästi verkon käyttöä valvovan henkilön tietoon, joka käynnistää heti vian selvittämiseen liittyvät toimenpiteet.

- Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa enintään kahden tunnin ajan, ellei ole ilmeistä, että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa ihmisille, omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle.
- Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa kahden tunnin jälkeen vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan sen vaarattomuus.
- Mikäli maasulku on jakelumuuntamolla, joka ei ole liittynään laajaan maadoitusjärjestelmään, ei käyttöä saa jatkaa.
- Jatkuvasta maasulusta aiheutuva maadoitusjännite saa olla muualla kuin laajassa maadoitusverkossa korkeintaan pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, mutta kuitenkin korkeintaan 150 V.
- Kaksoismaasulkutilanteessa maasulut täytyy kytkeä pois
- on myös otettava huomioon televerkon asettamat vaatimukset. /5/

Mikäli maasulkusuojaukselle käytetään varasuojauksia kahdella toisistaan riippumattomalla suojaustoiminnolla, pitää se aina toteuttaa verkon syöttöpisteessä, jossa jännitetaso muuttuu. /5/

Maadoitusjärjestelmät voidaan suunnitella verkon normaalin kytkentätilanteen mukaan. Käyttötoimenpiteissä täytyy kuitenkin huolehtia, että SFS 6001 -standardin vaatimukset täyttyvät poikkeuksellisissakin tilanteissa. Tällainen tilanne voi esiintyä esimerkiksi silloin, kun yhteen on liitetty normaalia laajempi maakaapeliverkko tai maasulun kompensointikela on pois käytöstä. /5/

6 MAADOITUSTEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käydään läpi maadoitusjärjestelmien suunnittelua SFS 6001 -standardin mukaisesti.

Maadoitusjärjestelmien mitoituksen olennaisimmat tekijät ovat vikavirran suuruus, vian kestoaika sekä maaperän ja maadoituselektrodien ominaisuudet. /5/

6.1 Perusvaatimukset

Maadoitusten suunnittelun perusvaatimukseen lukeutuu turvallisuuskriteerit sekä toiminnalliset vaatimukset. /5/

Turvallisuuskriteerit täytetään siten, että järjestelmä ei ole henkilön turvallisuudelle uhkana tavalla, että sydämen kautta kulkee suuruudeltaan sellainen virta, joka voi aiheuttaa sydänkammiovärinän. /5/ Tällainen tilanne voi syntyä kuvassa 2 nähtävällä tavalla. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että maadoitusjärjestelmät tulee suunnitella siten, että liian suurta kosketusjännitettä ei pääse muodostumaan. Kuvassa 12 nähdään sallitut kosketusjännitteiden arvot maasulkuvirran kestoajan funktiona. /5/

Toiminnalliset vaatimukset maadoitusjärjestelmille SFS 6001 standardissa määritellään seuraavasti:

- Niiden on kyettävä jakamaan ja purkamaan vikavirta ylittämättä varasuojauksen toiminta-aikaan perustuvia termisiä ja mekaanisia suunnitteluraja-arvoja.
- Niiden on pysyttävä toimintakuntoisena koko odotettavissa olevan eliniän
- niiden tulee olla riittävän suorituskykyinen estämään laiteviat, jotka voisi aiheutua ilman suojausta.
- Niiden avulla varmistetaan, että normaaleissa suojareleiden ja katkaisijoiden toiminta-ajoissa kosketusjännitteet sekä siirtyvät potentiaalit pysyvät sallituissa rajoissa. /5/

6.2 Mitoitus korroosionkestävyyden ja mekaanisen lujuuden mukaan

Suoraan maan kanssa olevat maadoituselektrodit ja -johtimet on valmistettava korroosion kestävästä materiaaleista. Tämän lisäksi niiden täytyy kestää mekaanisia rasituksia asennuksen ja normaalin käytön aikana. /5/

6.2.1 Maadoituselektrodit

Maadoituselektrodeja asennettaessa voidaan hyödyntää betoniperustuksiin upotettuja teräksiä ja teräspaaluja tai muita luonnollisia maadoituselektrodeja. Taulukossa 2 nähdään maadoituselektrodien vähimmäismittat, jotka määräytyvät mekaanisen lujuuden ja korroosionäkökohtien perusteella. Mikäli käytetään muita materiaaleja, on tämän materiaalin ja sen mittojen täytettävä asetetut toiminnalliset vaatimukset. /5/

Taulukko 2. Maadoituselektrodien eri tyyppien minimimitat, jotka takaavat riittävän mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden. /5/

Materiaali		Elektrodin tyyppi	Vähimmäismitta				
			Ydinosa		Pinoite/vaippa		
			Halkaisija mm	Poikkipinta mm ²	Paksuus mm	Yksittäinen arvo µm	Keskiarvo µm
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha ^b		90	3	63	70
		Profiili (ml. levy)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	10				50
	Lyijyvaipalla ^a	Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka	8			1 000	
	Päällystetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2 000	
	Elektrolyyttikuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakamaadoituselektrodin pyöreä lanka		25 ^c			
		Köysi	1,8 ^d	25 ^c			
		Putki	20		2		
	Tinattu	Köysi	1,8 ^d	25 ^c		1	5
	Sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla ^a	Köysi	1,8 ^d	25 ^c		1 000	
		Pyöreä lanka		25 ^c		1 000	

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

6.2.2 Maadoitusjohtimet

Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinnat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden perusteella ovat taulukon 3 mukaiset.

Taulukko 3. Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinnat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden perusteella. /5/

Materiaali	Vähimmäispoikkipinta
kupari	16 mm ²
alumiini	35 mm ²
teräs	50 mm ²

Näiden lisäksi standardissa määritellään, että taulukon 3 vähimmäispoikkipinnat eivät koske mittamuuntajien toisiopiirien maadoituksia. Näille määritellään, että mikäli maadoitusjohdin on mekaanisesti suojattu, sen poikkipinta on oltava vähintään 2,5 mm² kuparia. Jos mekaanista suojausta ei ole, vähimmäispoikkipinta on 4 mm² kuparia. /5/

6.3 Mitoitus termisen lujuuden mukaan

Maadoitusjohtimien ja -elektrodien mitoituksessa käytetään standardissa määritettyjä virtoja. Tässä työssä käsitellään ainoastaan sammutetulle järjestelmällä määritettyjä virtoja, koska sammutetut järjestelmät ovat ajankohtaisimpia johtuen maakaapeloinnista.

Jos käytetään sammutettua järjestelmää ilman sammutuskeloja, niin termiseen kuormitukseen liittyvät virrat määritetään maadoituselektrodeille ja maadoitusjohdille kaksoismaasulkuvirran avulla. Lisäksi seuraava määritelmä SFS 6001 -standardista voidaan ottaa huomioon: ”*sammutetuissa verkoissa, joissa maasulku kytketään pois alle 1 sekunnissa, suuretta I_C (laskettu tai mitattu kapasitiivinen maa-*

sulkuvirta) voidaan käyttää termisen kuormitettavuuden mitoituksessa määrävänä tekijänä. Tällöin maasulun poiskytkentäaikana käytetään ekvivalenttista poiskytkentäaikaa.” /5/

Kaksoismaasulkuvirran maksimiarvo voidaan olettaa olevan 85 % symmetrisen alkuoikosulkuvirran arvosta.

Näiden lisäksi maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteeseen liittyvä virta määritellään kaavan 5 mukaan.

$$I_E = r \cdot I_{RES}, \text{ jossa} \quad (5)$$

I_E = maavirta

r = reduktiokerroin

I_{RES} = maasulun jäännösvirta, jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, voidaan olettaa 10 % I_C :n arvosta. /5/

Jos käytetään sammutettua järjestelmää, jossa on sammutuskelat, maadoituselektrodin termiseen mitoitukseen pätee samat asiat kuin järjestelmässä, jossa ei ole sammutuskeloja. Sammutuskelan maadoitusjohdin pitää mitoittaa kelan maksimivirran mukaan. /5/

Sammutuskelallisessa järjestelmässä maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteeseen liittyvä virta määritellään kaavan 6 mukaan.

$$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2}, \text{ jossa} \quad (6)$$

I_L = sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa /5/

Kapasitiivinen virta I_C tulee ottaa huomioon myös, jos vika sattuu sähköasemalla. Tämän lisäksi, jos sähköaseman ulkopuolisessa verkossa on muita sammutuskeloja, ne pitää ottaa huomioon. /5/

6.3.1 Mitoitusvirran laskenta

Maadoitusjohtimien tai -elektrodien poikkipinta riippuu vikavirrasta ja sen kestoajasta. Laskentamenetelmiä on määritelty kaksi ja ne eroavat sen mukaan, onko vian kesto aika alle vai yli 5 s. Loppulämpötila on valittava ottaen huomioon materiaali ja ympäristö. Näiden lisäksi taulukon 3 vähimmäispoikkipintavaatimukset tulee ottaa huomioon. On myös syytä kiinnittää huomiota liittostyyppien kuormitettavuuksiin, erityisesti ruuviliitoksien, koska huonosti kiristetty ruuviliitos saattaa ajan kuluessa aiheuttaa merkittäviä kuormituksia. /5/

Alle 5 sekuntia kestävillä vikavirroilla maadoitusjohtimien ja -elektrodien poikkipinta lasketaan kaavalla 7.

$$A = \frac{I}{K} = \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}}, \text{ jossa} \quad (7)$$

A = poikkipinta

I = johtimen virran tehollisarvo

t_f = vikavirran kesto aika

K = taulukossa 4 esitetyt virrallisen osan materiaalista riippuvat vakiot

β = taulukossa 4 esitetyt virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C

θ_i = alkulämpötila, jonka arvo saadaan muun muassa julkaisusta IEC 60287–3–1.

Ympäriöivän maan lämpötilana 1 m syvyydessä tulisi käyttää arvoa 20 °C

θ_f = taulukossa 5 esitetyt loppulämpötila-arvot /5/

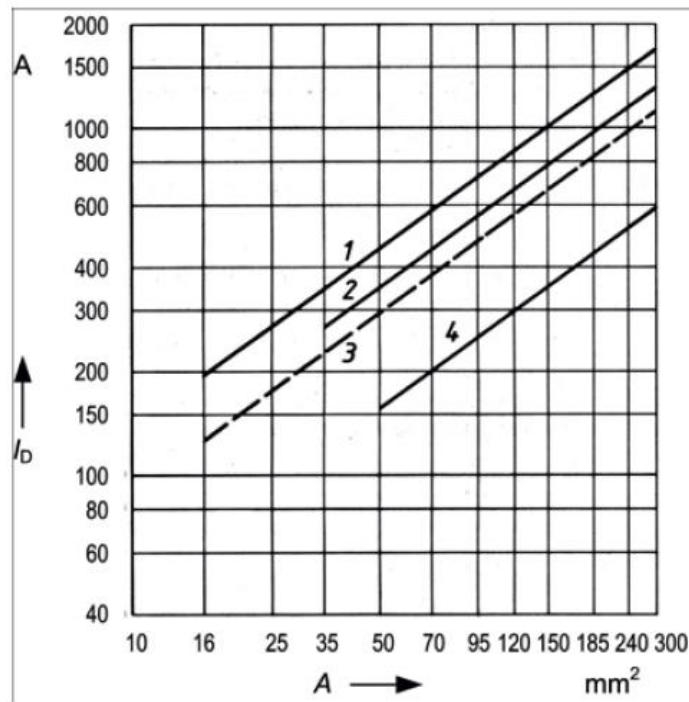
Taulukko 4. Kaavassa 6 käytettävät materiaalivakiot. /5/

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

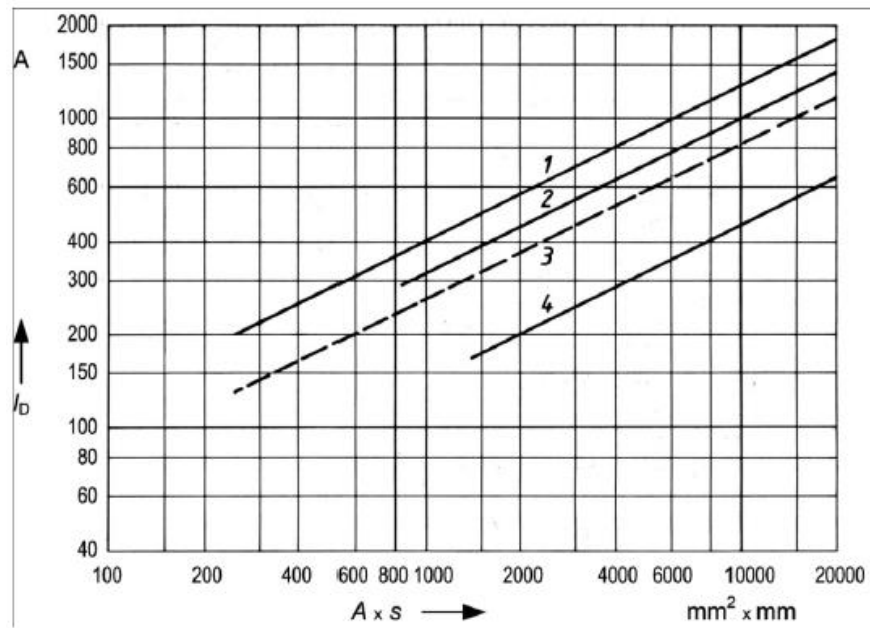
Taulukko 5. Jatkuvan virran muunnoskerroin loppulämpötilasta 300 °C toiseen loppulämpötilaan. /5/

Loppulämpötila °C	Muunnoskerroin
400	1,2
350	1,1
300	1,0
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

Yli 5 sekuntia kestäville vikavirroille sallitut poikkipinnat on havainnollistettu kuvissa 19 ja 20. Mikäli loppulämpötilaksi valitaan jokin muu arvo kuin 300 °C, virta voidaan laskea taulukon 5 mukaisella muunnoskerroimella. Alemmat loppulämpötila-arvot tulevat esiin yleensä, kun käytetään eristettyjä johtimia tai betoniin upotettuja johtimia. /5/



Kuva 19. Poikkipinnaltaan pyöreän maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D . /5/



Kuva 20. Poikkipinnaltaan suorakulmisen maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D . /5/

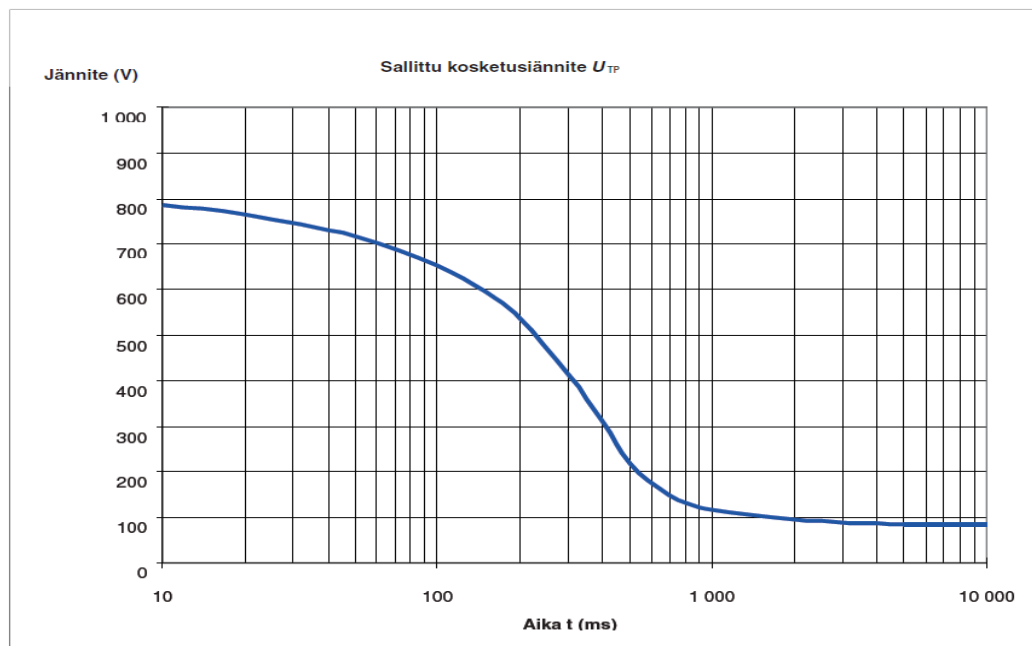
Kuvissa 19 ja 20 suorat 1, 2 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C ja suora 3 pätee loppulämpötilalle 150 °C. Suorien numeroinnit kuvaa maadoitusjohtimien materiaaleja ja ne ovat seuraavat:

- 1 paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 alumiini
- 3 tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 4 sinkitty teräs. /5/

6.4 Mitoitus kosketusjännitteiden mukaan

Standardissa on määritetty sallituille kosketusjännitteille tarkat arvot ja ne on esitetty kuvassa 21. Näillä arvoilla pystytään olosuhteiden mukaisesti laskemaan maadoitusjännitteet U_E tai vaihtoehtoisesti mitataan paikalla todellinen kosketusjännite U_T ja verrataan sitä sallittuun kosketusjännitteeseen. /7/

Vikapaikat oletetaan olevan suurjännitejärjestelmässä. Todellisen kosketusjännitteen U_T mittaaminen on mahdollista suurjännitesähköasemien erillisten maadoitusjärjestelmien yhteydessä, mutta sitä ei voi soveltaa yhdistettyjen keskijännite- ja pienjännitemaadoitusten yhteydessä. /7/



Kuva 21. Sallittu kosketusjännite vian kestoajan funktiona. /5/

Taulukossa 6 nähdään kosketusjännitteiden tarkat arvot, kun tiedetään laukaisuajat ja kehon virtatien impedanssi kädestä jalkoihin on otettu huomioon. Nämä on laadittu standardin perusteella helpottamaan suunnittelutyötä. /7/

Taulukko 6. Kosketusjännitteiden tarkat arvot, kun tiedetään laukaisuajat. /7/

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

Maadoitusjännitteen laskeminen tapahtuu taulukon 6 ja kaavan 7 osoittamalla tavalla.

$$U_E = F \times U_{TP}, \text{ jossa} \quad (7)$$

U_E = maadoitusjännite

F = kerroin, jonka suuruus määräytyy muuntopiirin olosuhteiden ja toteutetun maadoitusasennuksen mukaan. /7/

Maadoitusjännitteen tavoitetaso on kaavan 1 mukainen ja käytännössä maadoitusjännitteeksi ja maadoitusimpedanssiksi muodostuvat silloin kaavojen 8 ja 9 mukaiset arvot.

Kaavassa 8 on tilanne, jossa keskijänniteverkon maasulkuvirran laukaisuaika on 0,5 sekuntia, jolloin taulukosta 6 saadaan maadoitusjännitteen arvo. Kaavassa 9 puolestaan maasulkuvirran oletetaan olevan 10 A, mutta se täytyy tulkita aina tapauskohtaisesti. /7/

$$U_E = 2 \times 220 \text{ V} = 440 \text{ V} \quad (8)$$

$$Z_E = \frac{U_E}{I_E} = \frac{440 \text{ V}}{10 \text{ A}} = 44 \text{ } \Omega, \text{ jossa} \quad (9)$$

Z_E = maadoitusimpedanssi

I_E = maasulkuvirta

Maadoitusjännitteen arvoa määriteltäessä voidaan käyttää myös kaavassa 7 kertoimen F arvona 4. Tätä joudutaan käyttämään yleensä silloin, kun teknisistä tai taloudellisista syistä ei voida saavuttaa kertoimella 2 saatavaa arvoa. /7/

SFS 6001 -standardin mukaan kaavan 7 kerroin F saa olla 4 mikäli seuraavat vaatimukset täyttyvät:

- Muuntopiirin alueella maaperä on pääosin huonosti johtavaa.
- Syöttävässä suurjänniteverkossa käytetään laukaisevaa maasulkusuojaa.
- Silloin kun ylijännitesuojaus on tarpeen, käytetään virtaa rajoittavia ylijännitesuojia pelkkien kipinäväliin sijaan.
- Muuntajat ovat koteloituja.
- Muuntamalla käytetään SFS 6001 liitteen E mukaista erityistoimenpidettä tai kohdan NA 7.7 mukaista potentiaalinhojausta.
- Jokaisessa pienjänniteverkon haarassa on vähintään yksi johtohaaran maadoitus ja pienjänniteverkon maadoitukset täyttävät SFS 6000-8-801 vaatimukset.

- Pienjänniteverkosta ei syötetä kohteita, joiden ulkotiloissa voi oleskella runsaasti ihmisiä. /5/

Kaavan 7 kerroin F saa olla 5, mikäli syötetään yksittäistä rakennusta tai sähkölaitteistoa ja yllä näkyvien vaatimusten lisäksi seuraavat vaatimukset täyttyvät:

- Syötettävässä kohteessa on pääpotentiaalintasaus, joka on kytketty maadoituselektrodiin.
- Jos maadoituselektrodia ei voida liittää rakennuksen potentiaalintasaukseen, maadoituselektrodina voidaan käyttää rakennuksen perustusten ympärille asennettavaa rengasta.
- Maaperä on huonosti johtavaa kaikilla sähkölaitteiden todennäköisillä käyttöpaikoilla eli 50 m etäisyydellä kiinteistä sähköasennuksista. /5/

6.5 Mitoitus maaperän resistiivisyyden mukaan

Maadoituselektrodien suunnittelussa tulee ottaa huomioon maaperän resistiivisyys, joka vaikuttaa merkittävästi maadoituselektrodin kokonaismaadoitusresistanssiin. Maadoituselektrodin sijoituspaikkaa suunniteltaessa tulee tarkoin miettiä, missä maaperässä päästään parhaimpaan sähkönjohtavuuteen. Tällöin vaakamaadoituselektrodi saadaan mahdollisimman lyhyeksi tai pysty- maadoitusten lukumäärä mahdollisimman pieneksi. Tällöin kustannukset pysyvät alhaisempina. /8/

Taulukossa 7 on esitetty SFS 6001 -standardin määrittelemät maaperän resistiivisyyksien arvot eri maaperissä.

Taulukko 7. Eri maaperien resistiivisyysarvoja. /5/

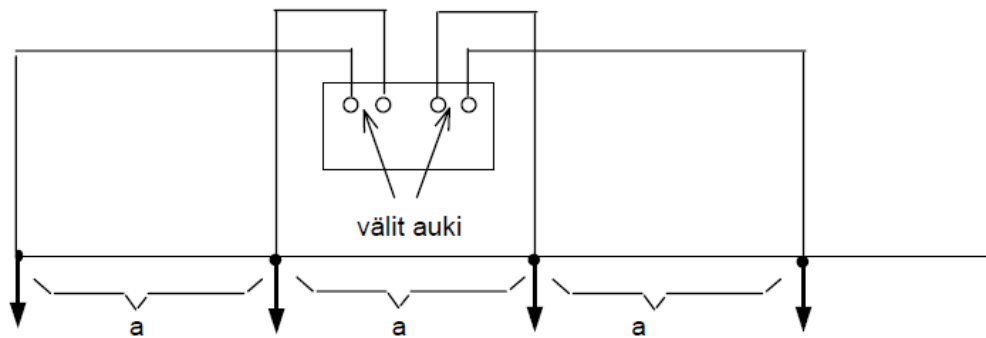
Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihteluvälit Ωm
Savi	40	25...70
Saven sekainen hiekka	100	40...300
Lieju, turve, multa	150	50...250
Hiekka, hieta	2 000	1 000...3 000
Moreenisora	3 000	1 000...10 000
Harjusora	15 000	3 000...30 000
Graniittikallio	20 000	10 000...50 000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50...500
Betoni kuivana	10 000	2 000...100 000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

6.5.1 Maaperän resistiivisyyden mittaus

Suurimmasta osasta maadoitusvastusmittareista löytyy maan resistiivisyyden mitausominaisuus. Tällaisessa mittalaitteessa täytyy olla 4 mittajohtimen liitännänapaa. Mittaus suoritetaan asettamalla 4 mittapiikkiä maahan tasavälein samansuuntaisesti. Mittapiikkien välin pituus merkitsee sen, mihin syvyyteen asti mitoitus tapahtuu. Useimmiten käytetään vaakamaadoituselektrodiä, joka asennetaan samaan kaapeliin muiden kaapeleiden kanssa ja tällöin syvyys on 0,7 m. Tämän oletuksen perusteella mittapiikkien väli kannattaa olla noin 1 m. /6/

Mikäli maaperän resistiivisyyden mittaus osoittautuu huonoksi 1 m välein asetuilla mittapiikeillä, voidaan myös suorittaa mittaus pidemmällä väleillä. Tällöin saadaan tutkituksi, kannattaako asentaa yksi kunnan syvämaadoituselektrodi pitkän vaakamaadoituselektrodin asemesta. Tällöin voidaan säästää kustannuksissa huomattavia määriä. Lisäksi syvämaadoituselektrodilla on se etu, että syvemmillä maaperässä resistiivisyys ei vaihtelee paljoakaan vuodenajan mukaan. /6/

Kuvassa 22 on esitetty maaperän resistiivisyyden mittaukseen käytettävä mittaus-tapa.



Kuva 22. Maaperän resistiivisyyden mittaustapa. /6/

Mittalaite laskee maaperän resistiivisyyden kaavan 10 perusteella.

$$\rho_E = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R, \text{ jossa} \quad (10)$$

a = mittapiikkien väli metreinä

R = mittarin näyttämä resistanssiarvo /6/

6.5.2 Maadoitusresistanssin laskenta

Maadoitusresistanssin arvo määräytyy maaperän resistiivisyyden, maadoituselektrodin mittojen ja asennustavan mukaan. Maadoituselektrodin pituutta voidaan pitää määräävänä tekijä, ei niinkään poikkipintaa. /5/

Taulukossa 8 on näytetty kaavat, jolla voidaan määrittää maadoitusresistanssien arvot ja niiden pituudet erilaisilla maadoituselektrodeilla.

Taulukko 8. Erityyppisten maadoituselektrodien maadoitusresistanssin laskenta-kaavoja. /5/

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

Mikäli halutaan käyttää useita erityyppisiä maadoituselektrodeja, niiden yhteisvaikutus kokonaismaadoitusresistanssiin voidaan laskea siten, että ajatellaan yksittäiset maadoituselektrodit olevan rinnankytkettynä maata vasten. Kyseinen laskentatapa on esitetty kaavan 11 avulla. /18/

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_{E1}} + \frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} + \dots + \frac{1}{R_{En}} \quad (11)$$

VSV:llä oli aiemmin suunniteltu Excel-laskentatyökalu, jolla voitiin määrittää vaaka- tai pysty maadoituselektrodin ominaisuudet, kun tiedettiin maan resistiivisyys. Kyseisessä laskentatyökalussa ei ollut kuitenkaan ominaisuutta, jolla voitiin määrittää niiden yhteisvaikutus. Tässä opinnäytetyössä ilmi tulleiden asioiden perusteella voitiin määrittää niiden yhteisvaikutus ja laskentatyökalusta saatiin hie- man käytännöllisempi. Kuvassa 23 nähdään kyseinen laskentatyökalu, johon annetaan parametreiksi mitattu maan resistiivisyys ja maadoituselektrodien ominaisuudet. Tämän avulla voidaan alustavasti arvioida esimerkiksi muuntamon maadoitusresistanssi. Maadoitusresistanssien arvot lasketaan taulukossa 8 näkyvillä kaavoilla

ja kahta erilaista maadoituselektrodiä käytettäessä, niiden yhteisvaikutus lasketaan kaavan 11 avulla.

Maadoitusten mitoittaminen						
Täytä keltaiset solut						
		L/m	d/m	h/m	Maadoitusresistanssi/ Ω	
Vaakamaadoitus		80	0,0065	0,7	5,39	
						Konduktanssi/S
						0,2084
						Yhteisvaikutus/ Ω
						4,80
	Tankojen lkm	L/m	d/m	h/m	Maadoitusresistanssi/ Ω	
Pystymaadoitus	5	5	0,009	5	44	
Maadoitusresistanssin tavoitearvo		5	Ω			
Mitattu maan resistiivisyys		200	Ωm			

Kuva 23. Maadoitusresistanssin laskentatyökalu.

Kuvasta 23 nähdään, että vaakamaadoituselektrodi on huomattavasti tehokkaampi kuin pystymaadoituselektrodi. Toisaalta, jos asennetaan muutama pystymaadoitus, joka ulottuu syvälle maaperään, saavutetaan myös hyvä johtavuus. Sillä saavutetaan myös se etu, että maaperän resistiivisyys ei vaihtele merkittävästi vuodenaikojen mukaan.

6.6 Suunnittelumenetelmä

Maadoitusjärjestelmien suunnitteluun on annettu SFS 6001 -standardissa esimerkki, jota voidaan soveltaa tapauskohtaisesti. Suunnittelun vaiheet esimerkissä ovat:

1. Tietojen keruu: maasulkuvirrat, vian kestoajat ja verkkojen rakenteet.
2. Toiminnallisten vaatimusten alustava katsaus.
3. Määritetään, että onko osa laajaa maadoitusjärjestelmää.
4. Jos ei, määritetään maaperän ominaisuudet, asennuspaikalla esiintyvä resurtoiva maadoitusimpedanssi.
5. Määritetään maadoitusjännite ja sen perusteella sallittu kosketusjännite.
6. Jos kosketusjännitevaatimukset täyttyvät, suunnittelu on valmis.

7. Jos ei täyty, määritetään ovatko kosketusjännitteet maadoitusjärjestelmän sisällä ja läheisyydessä alle sallittujen arvojen.
8. Määritetään joutuvatko pienjännitelaitteet alttiiksi liian suurille rasitusjännitteille.
9. Jos joutuvat, ryhdytään toimenpiteisiin, jotka voivat sisältää esimerkiksi suur- ja pienjännitemaadoitusjärjestelmien erottamisen toisistaan. /5/

Yllä kuvatun menetelmän lisäksi suunnittelussa täytyy aina varmistaa, että kaikki jännitteelle alttiit osat tulee maadoitetuksi. Rakenteelliset maadoituselektrodit tulee yhdistää maadoitusjärjestelmään. Mikäli yhdistämistä ei tehdä on varmennettava, että kaikki turvallisuusvaatimukset täyttyvät. /5/

7 ESIMERKKITARKASTELUJA JAKELUVERKKOJEN MAADOITUSJÄRJESTELMISTÄ

Tässä luvussa käydään läpi esimerkkejä, miten VSV on toteuttanut erikokoisia maadoitusjärjestelmiä. Lisäksi tutkitaan muun muassa laajaan maadoitukseen liittyviä asioita VSV:n kannalta.

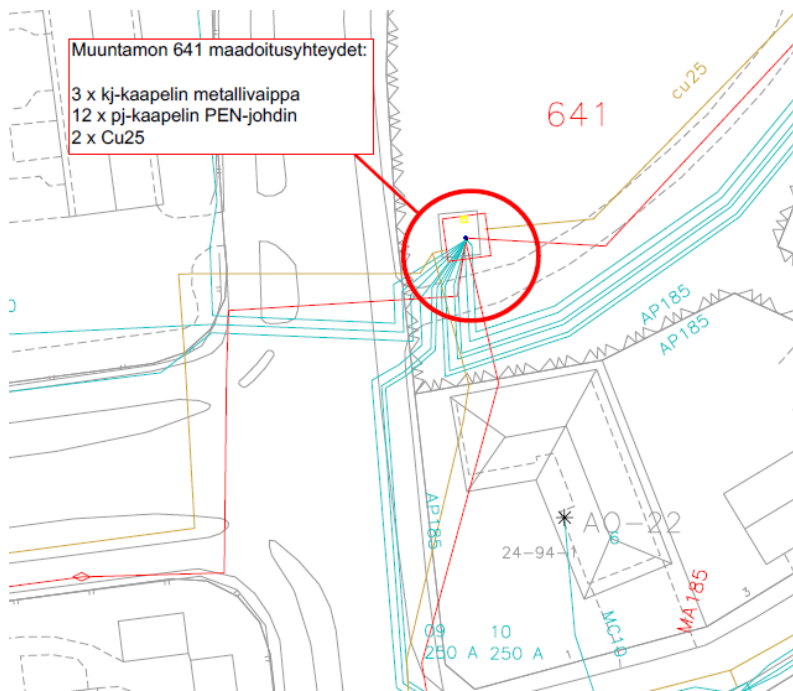
Esimerkkejä käydään läpi Tekla NIS -verkkotietojärjestelmän avulla, jolla tehdään VSV:n sähköiset dokumentoinnit. Kyseisellä ohjelmistolla pystytään tekemään erilaisia laskentoja verkkoon liittyen sekä tarkastelemaan, kuinka sähköverkot on sijoitettu maastoon ja kuinka ne on liitetty toisiinsa.

7.1 VSV:n jakeluverkon maadoitusjärjestelmät eri vuosilta

Laaja maadoitusjärjestelmä on tullut käsitteenä vasta 2000-luvun puolella, mutta jo paljon aikaisemmin muuntamojen maadoitusjärjestelmiä on yhdistetty toisiinsa. Sähköturvallisuusmääräyksessä A 1-74 kirjoitettiin, että muuntamojen maadoitukset saa liittää toisiinsa sekä kerrottiin siitä saatavat hyvät puolet. Silloin ei vielä kuitenkaan puhuttu laajasta maadoitusjärjestelmästä.

Kuvassa 24 näkyy Vaasan keskustan lähellä sijaitsevalla asuinalueella oleva muuntamo, joka on käyttöönotettu 1979. Kyseisestä kuvasta nähdään, että muuntamoon tulee runsaasti eri maadoitusyhteyksiä, mikä on normaalia tiheään asutulla alueella. Suurin osa maadoituksista tulee pj-verkon kautta, joka on myöskin verrannollinen alueen asukkaiden määrään.

Muuntamon maadoituksista voidaan sanoa, että Cu25-kupariköydet ovat hyvä lisä muuntamon maadoituksiin, koska tuohon aikaan ei ollut vielä paksulla keskusköydellä varustettuja AHXAMK-W -kj-kaapeleita. Kyseisen muuntamon vanhemmilla keskijännitekaapeleilla on metallivaippa, jotka on yhdistetty muuntamon maadoitusjärjestelmään. Metallivaipat eivät ole kuitenkaan niin varmoja esimerkiksi kaksoismaasuluissa. Tämä muuntamo on laajan maadoitusverkon alueella ja kuten aikaisemmin todettiin, maadoitusyhteyksiä on runsaasti, joten muuntamoa voidaan pitää hyvin maadoitettuna.



Kuva 24. Muuntamon johdinkartta, jonka käyttöönottovuosi on 1979.

Kuvissa 25 ja 26 näkyy yllä näkyvän muuntamon maadoitusjärjestelmän toteutus-
 tyyli.

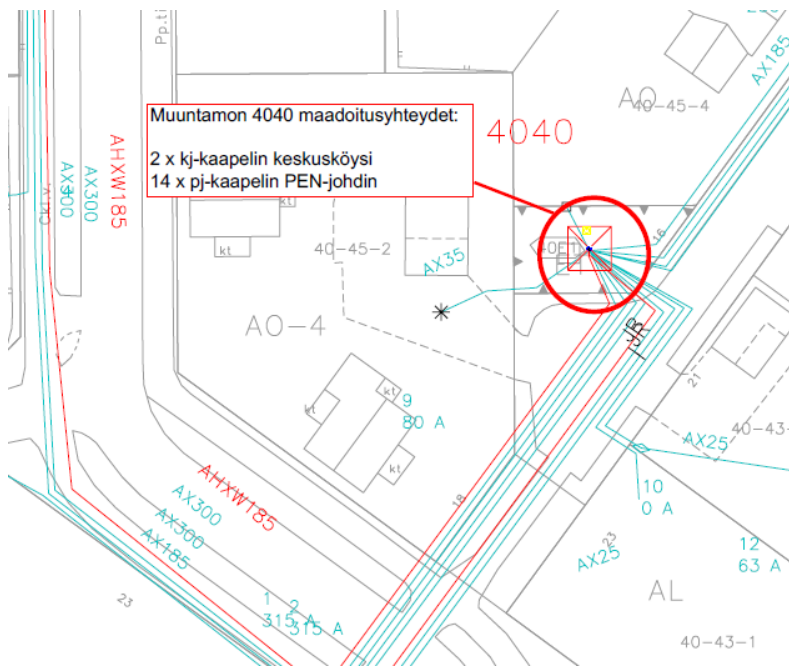


Kuva 25. Muuntamon 641 pj-keskus ja potentiaalintasauskisko.



Kuva 26. Muuntamon 641 keskijännitekaapelien vaippojen maadoitukset.

Kuvan 27 muuntamo on rakennettu 2000-luvun alkupuolella ja silloin on ollut jo käytössä AHXAMK -kj-kaapelit. Kyseinen muuntamo sijaitsee alueella, joka on laajaa maadoitusverkkoa. Tässä tapauksessa on kuitenkin huomion arvoista, että lisäkupariköydet on jätetty pois. Syynä voi olla mahdollisesti se, että on arvioitu kj-kaapelien keskusköysien sekä runsaiden pj-verkon maadoitusten olevan riittävä turvalliseen järjestelmään. Tämä voi olla kustannustehokas ratkaisu, koska lisäkuparin asennuksesta tulee aina lisää maksettavaa.



Kuva 27. Muuntamon johdinkartta, jonka käyttöönottovuosi on 2003.

Yllä näkyvän muuntamon maadoitusjärjestelmän toteutus on esitetty kuvissa 28–30.



Kuva 28. Muuntamon 4040 pj-keskus.



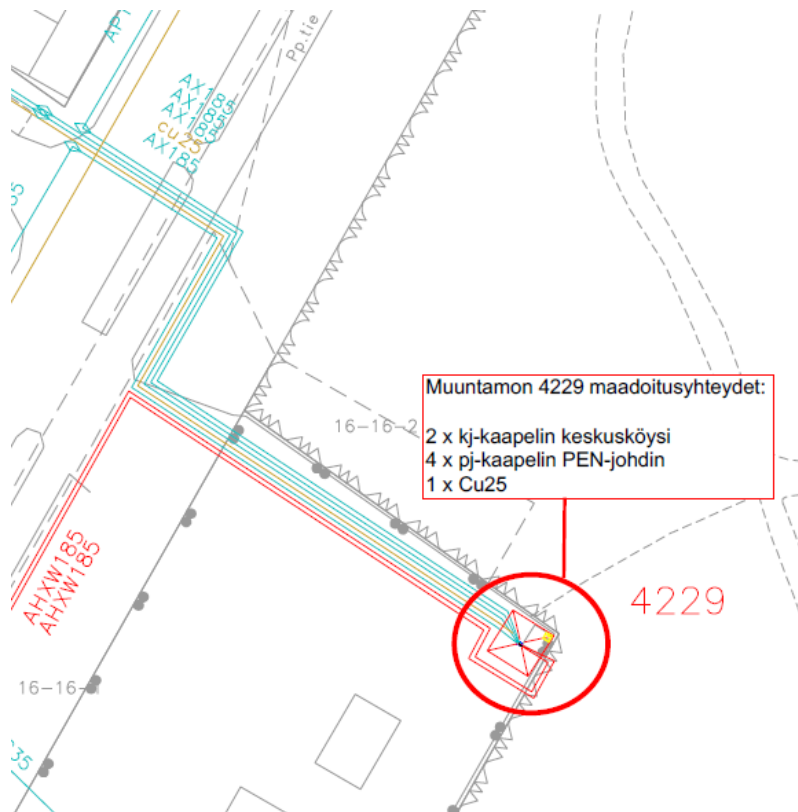
Kuva 29. Muuntamon 4040 kojeistoon menevät kj-kaapelit ja keskusköydet.



Kuva 30. Muuntamon 4040 kojeistosta lähtevä maadoitusyhteys potentiaalintasauskiskoon.

Kuvan 31 muuntamo on 2015 käyttöön otettu ja se sijaitsee niin ikään laajan maadoitusverkon alueella. Kyseinen muuntamo on rakennettu uusimpia standardeja noudattaen ja maadoitusyhteyksien määrän perusteella voidaan sanoa, että myös tämä muuntamo täyttää vaatimukset.

Ylimääräinen lisäkupari on tässä projektissa katsottu tarpeelliseksi vaikkakin useita yhteyksiä muodostuu jo kj-verkon ja pj-verkon kautta. Saattomaadoituskupari on tietenkin aina hyvä, koska eristeettömänä johtimena se tuo hyvän yhteyden maahan ja tällöin saavutetaan monia etuja. Toisaalta, kuten aikaisemmin todettiin, mikäli mahdollista, niin se voidaan jättää pois kustannustehokkuuden kannalta.



Kuva 31. Muuntamon johdinkartta, jonka käyttöönottovuosi on 2015.

Muuntamon 4229 maadoitusjärjestelmän toteutus on esitetty kuvissa 32 ja 33.



Kuva 32. Muuntamon 4229 pj-keskus.



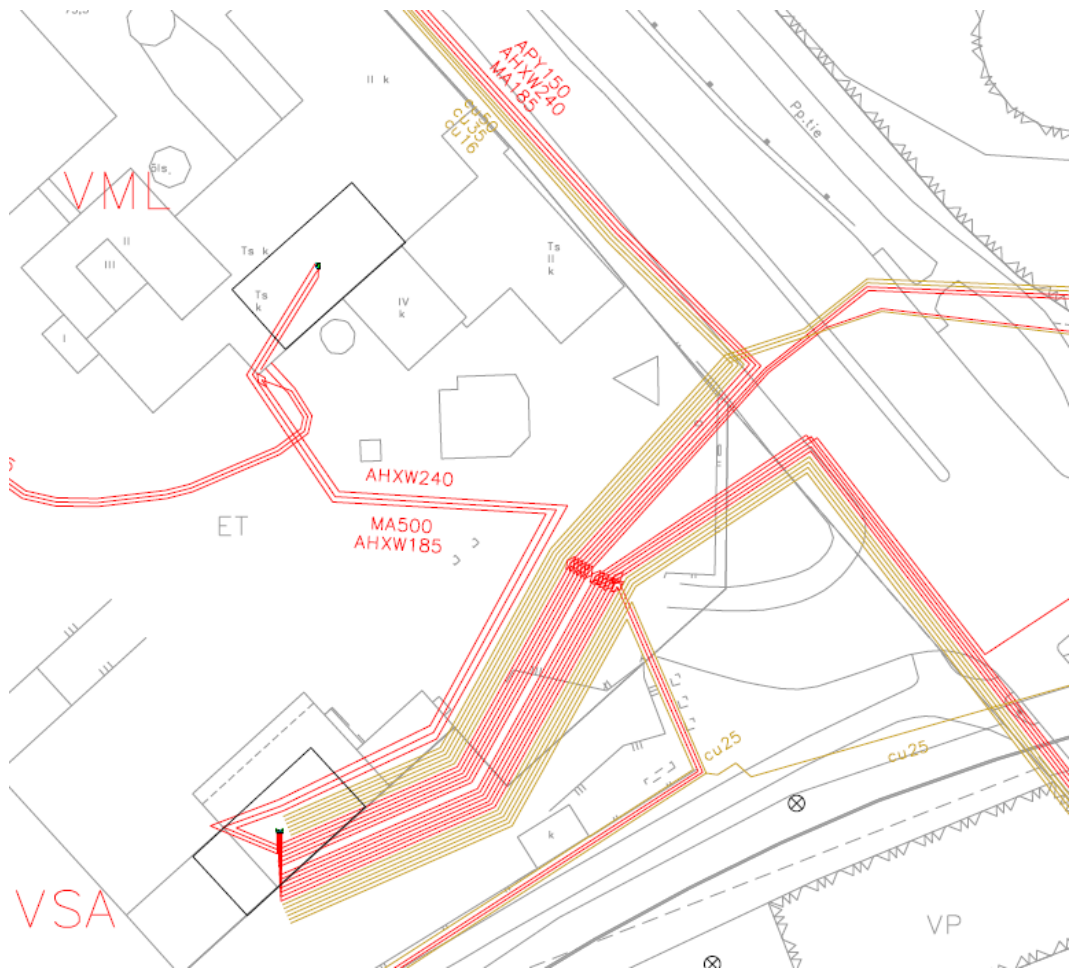
Kuva 33. Muuntamon 4229 jakelumuuntajan maadoitukset.

Kuvassa 33 näkyy jakelumuuntajan tähtipisteen, rungon ja kaapelipäätteiden maadoitukset. Kaikki kyseiset maadoitukset on kerätty jakelumuuntajan tilassa olevaan potentiaalintasauskiskoon, josta puolestaan on yhteys koko järjestelmän maadoituskiskoon.

7.2 Vaasan sähköaseman maadoitusjärjestelmän toteutus

Vaasan keskustassa sijaitseva sähköasema on hiljattain rakennettu ja näin ollen VSV:n sähköasemista kyseinen sähköasema on toteutettu uusimmalla tekniikalla. Lisäksi sähköasema on laajan maadoitusverkon alueella, joten näistä seikoista johtuen, tähän työhön haluttiin ottaa esimerkkejä kyseisen sähköaseman maadoitusjärjestelmän toteutuksesta.

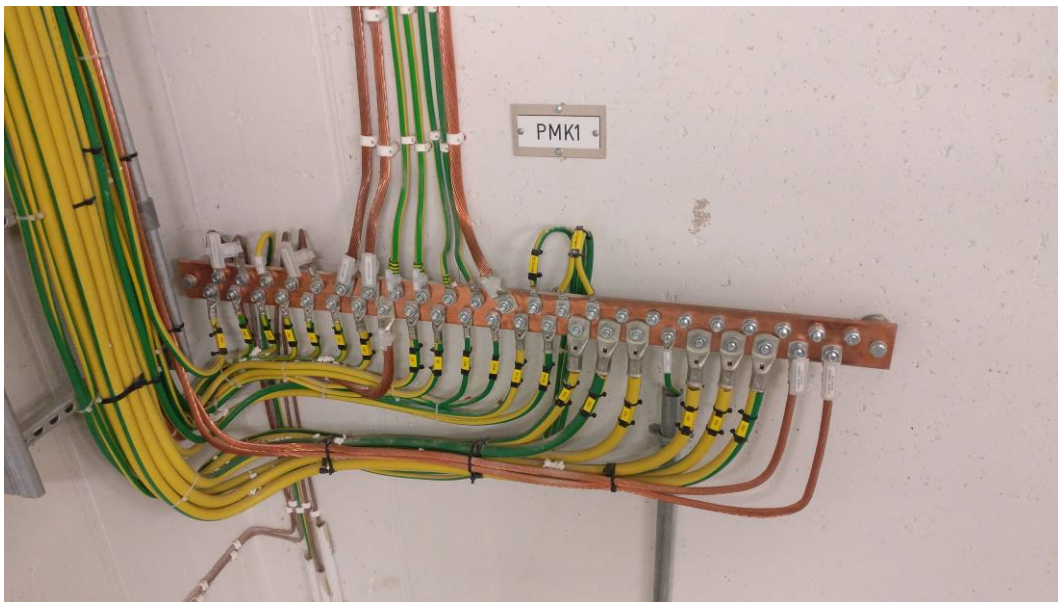
Kuvassa 34 on esitetty Vaasan sähköasemalta lähtevät kj-kaapelit sekä niiden mukana menevät saattomaadoituskuparit. Kyseinen kuva on tulostettu Tekla NIS - verkkotietojärjestelmästä.



Kuva 34. Vaasan sähköasemalta lähtevät kj-kaapelit sekä maadoituskuparit.

Kuvassa 34 alimpana näkyy Vaasan sähköasemarakennus, josta lähtee kj-kaapelit jakelumuuntajille. Kyseisestä kuvasta nähdään myös, että melkein jokaisen johtolähdön mukana on asennettu saattomaadoituskupari, joka parantaa johtolähtöjen yhteyttä maahan. Näin ollen saadaan varmasti täytettyä kosketusjännitevaatimukset eikä suurempienkaan jännitetasojen viat pääse aiheuttamaan vaaraa.

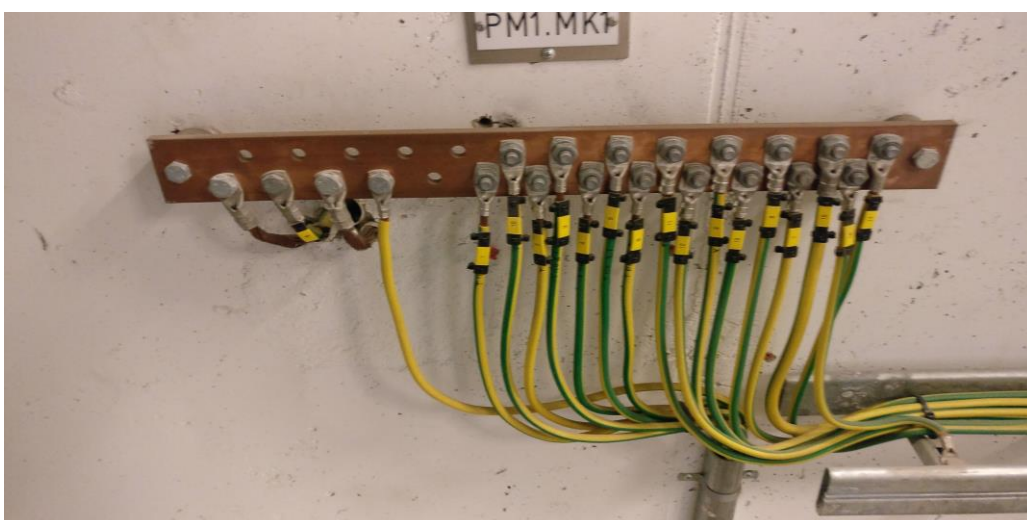
Kuvassa 35 on esitetty Vaasan sähköaseman päämaadoituskisko ja siihen liitetyt maadoitusjohtimet.



Kuva 35. Vaasan sähköaseman päämaadoituskisko.

Kuvassa 35 näkyvään päämaadoituskiskoon on kerätty kaikki sähköaseman sisällä olevat sekä sen ulkopuolella olevat maadoitusjärjestelmät. Siinä on yhteydet muun muassa 110 kV:n pylväiden maadoitukseen, sähköaseman maadoituselektrodeihin, päämuuntajien päämaadoituskiskoihin, johtolähtöjen kojeistoihin sekä sähköaseman sisällä eri tiloissa oleviin maadoituskiskoihin.

Kuvassa 36 on esitetty päämuuntajan 1 päämaadoituskisko, jonka avulla saadaan päämuuntaja ja sen kaikki johtavat osat samaan potentiaaliin sähköaseman kanssa.



Kuva 36. Päämuuntajan 1 päämaadoituskisko.

7.3 Vaasan ja Gerbyn sähköasemien väliset maadoitusyhteydet

Aiemmin todettiin, että Vaasan sähköasema sijaitsee laajan maadoitusverkon alueella. Vaasan keskustan alueelle muuntamoihin tulee varayhteyksiä myös Gerbyn sähköasemalta. Gerbyn sähköasema syöttää alueille, joissa on sekä laajaa maadoitusjärjestelmää että yhdistettyjä maadoituksia, jotka eivät kuitenkaan täytä laajan maadoitusverkon vaatimuksia. Näin ollen tässä työssä haluttiin tarkastella, että muodostuuko Vaasan ja Gerbyn sähköasemien välille maadoitusyhteys.

Määritys tehtiin Tekla NIS -verkkotietojärjestelmän avulla, jossa nähtiin maadoitusyhteyksien ketjuuntuminen muuntamoissa. Tarkastelusta olisi voitu saada luottavampi, kun olisi käyty jokaisella muuntamolla katsomassa asennuksien toteutustavat. Lisäksi kaapelitukkaa apuna käyttäen olisi todettu, että maadoitukset on asennettu, kuten ne on dokumentoitu. Tällainen tarkastelutapa olisi ollut kuitenkin erittäin työläs. Tässä työssä tämä aihe ei ollut keskipisteenä, jonka vuoksi päädyttiin tarkastelemaan ainoastaan Tekla Nis -ohjelmiston avulla.

Verkkotietojärjestelmässä seurattiin Gerbyn sähköasemalta lähteviä kj-kaapeleita sekä niiden mukana meneviä saattomaadoituksia ja päädyttiin lopulta Vaasan sähköasemalle. Tarkastelussa huomattiin, että maadoitusyhteys ei katkea missään vaiheessa sekä kaikissa muuntamoväleissä on käytetty myös saattomaadoituskuparia.

Tarkastelu on esitetty liitteessä 1, jossa vihreällä näkyy muuntamojen kautta ketjuuntuva asemien välinen maadoitusyhteys sekä punaisella näkyy muu kj-verkko. Kyseisten asemien välisten maadoitusyhteyksien yhdistymiseen on useita eri reittejä, mutta tässä tarkastelussa on esitetty ainoastaan yksi reitti.

7.4 Kaksoismaasulkuvirtatarkastelu

Kuten aiemmin todettiin, että SFS 6001 -standardin mukaan kaksoismaasulkuvirtaa ei tarvitse ottaa huomioon, mikäli tällaiset virrat laukaistaan pois alle 1 sekunnissa. Vaikkakin tällaisessa tilanteessa standardi ei sitä vaadi, on ne kuitenkin syytä ottaa huomioon aina, koska tällaiset tilanteet saattaa pahimmillaan aiheuttaa merkittävää vaaraa ihmisille tai omaisuudelle. /20/

Mikäli kyseessä on pitempi johtolähtö, niin kaksoismaasulkuvirta saattaa jäädä niin pieneksi, että laukaisu tapahtuu suojareleen alemmalla portaalla. Tällöin laukaisu-aika saattaa mennä selvästi yli 1 sekunnin. /21/

Maadoitusjärjestelmien toteutuksista on monia eri mielipiteitä ja seuraavaksi esitetään kolme toteutustapaa, joita on VSV:llä pohdittu suunnittelussa ja käytetty oman sähköjakeluverkon rakennuksessa.

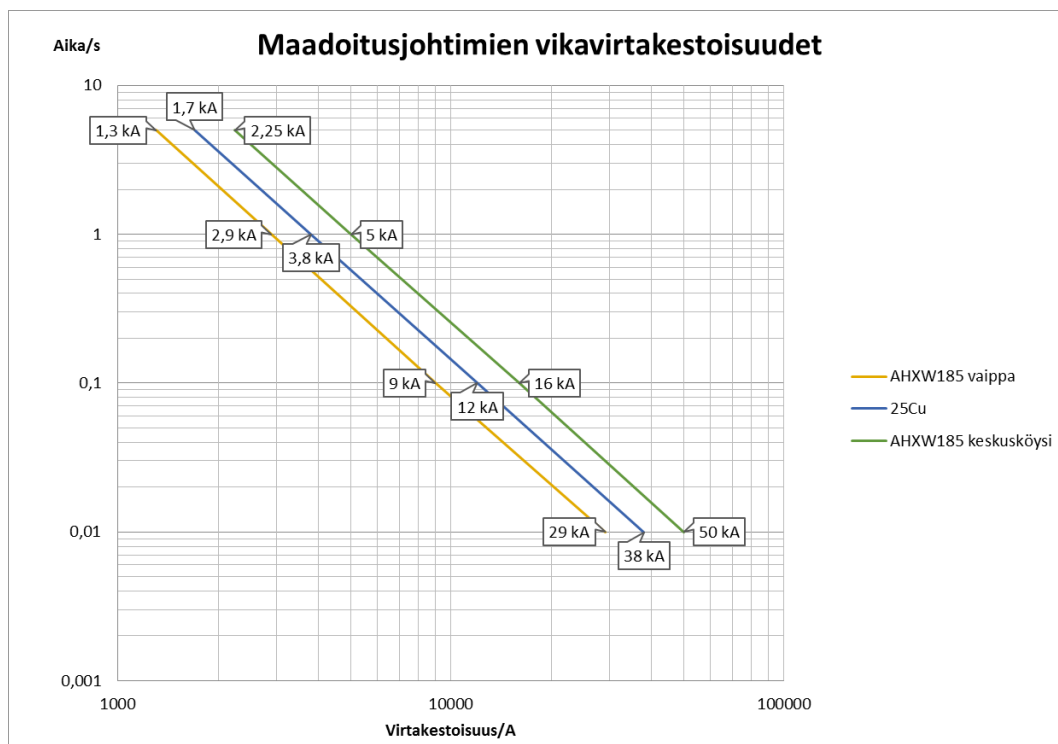
Ensimmäinen toteutustapa on, jossa käytetään maadoitusjärjestelmässä AHXAMK-W -kj-kaapelin keskusköyttä ja alumiinivaippaa. Lisäksi käytetään samassa kaapeliojassa menevää 25 mm² saattomaadoituskuparia. Tämä toteutustapa on suurimmalta osiltaan käytössä VSV:llä tällä hetkellä.

Toinen toteutustapa on, jossa käytetään samaa kj-kaapelia ja siitä muodostuvia maadoitusyhteyksiä. Erona tässä on, että saattomaadoituskuparia ei käytetä ollenkaan. Tätä toteutustapaa on käytetty joillakin alueilla VSV:n sähköjakeluverkossa, mutta se on kuitenkin vähäisempää kuin ensimmäisenä kuvattu toteutustapa.

Kolmas toteutustapa on, jossa käytetään AHXAMK-WP -kj-kaapelia sekä saattomaadoitusta. Kyseisessä kj-kaapelissa ei ole keskusköyttä ollenkaan, jolloin maadoitusyhteys muodostuu ainoastaan kaapelin vaipasta ja saattomaadoituksesta. Tällaista toteutustapaa VSV on käyttänyt vähiten näistä kolmesta.

Kaksoismaasulkuvirtatarkastelussa määritettiin virta-aikakäyrät kj-kaapelin keskusköydelle, vaipalle sekä 25 mm² kupariköydelle. Virta-aikakäyrien perusteella voidaan suunnittelussa miettiä, kuinka paljon virtaa kukin johdin kestää ja sen perusteella valita optimaalinen toteutustapa. Virta-aikakäyrät määritettiin siten, että kaapelivalmistajien antamien tietojen perusteella laskettiin virtakestoisuudet käyttäen kaavaa 7.

Eri maadoitusjohtimien virtakestoisuudet näkyvät kuvassa 37.



Kuva 37. Maadoitusjohtimien virtakestoisuudet.

Kuvan 37 virtakestoisuudet on laskettu 5 s, 1 s, 0,1 s ja 0,01 s ajoille. Ylärajana toimii 5 s sen vuoksi, että kaapelivalmistajat eivät suosittele yli 5 s kestäviä vikavirtoja kaapeleille. Kj-kaapelin kooksi tähän tarkasteluun valittiin sellainen, jota käytetään paljon muun muassa VSV:n sähköjakeluverkossa.

Kuvasta 37 nähdään, että ensimmäinen toteutustapa on kaikkein turvallisin vaihtoehto. Tämä on luonnollista, koska maassa on silloin runsaasti vikavirralla eri kulkureittejä ja se pääsee jakaantumaan kaikkia näitä kolmea johdinta pitkin. Suunnittelussa kannattaa kuitenkin miettiä, että jos maaperä on hyvin johtavaa ja johtolähdön releasettelut sallii, niin saattomaadoituskupari voidaan jättää pois ja saada näin kustannustehokkaampi ratkaisu.

Tätä voidaan perustella myös sillä, että 1989 käyttöön otettu AHXAMK-W -kaapelin keskusköysi on kehitetty huomioiden kaksoismaasulut. /8/

Kolmatta toteutustapaa voidaan käyttää mahdollisesti tilanteessa, jossa relesuojauksen on hoidettu niin, että kaksoismaasulut eivät pääse missään tilanteessa vaikuttamaan yli 1 sekuntia.

VSV:llä on useammalla johtolähdöllä ylivirtareleen ylempi porras aseteltu 1-3 kA luokkaan. Mikäli tällaisessa tilanteessa maaperä on hyvin johtavaa ja sen vuoksi yhteyttä maahan ei tarvitse parantaa saattomaadoituskuparilla, niin tällöin voidaan käyttää pelkästään keskusköydellistä kj-kaapelia. /21/

Suurin osa verkkoyhtiöistä, VSV mukaan lukien, kuitenkin haluaa saada turvallisuuden tuntoa omaan sähkönjakeluverkkoon ja tällöin halutaan saada suurempi marginaali johtimien kestotasojen ja suojalaitteiden asettelujen välillä. Sen vuoksi useat verkkoyhtiöt käyttävät aikaisemmin ensimmäisenä mainittua toteutustapaa.

7.5 Muuntamoiden maadoitusjärjestelmien ketjutuksen vaikutus maadoitusimpedanssiin

Muuntamojen maadoitusten ketjuttamista on tutkittu Energiateollisuus ry:n sähkötutkimuspoolin toimesta. Tutkimuksesta on julkaistu raportti 2016 ja tässä kapaleessa esitetyt asiat pohjautuvat tähän raporttiin.

Haja-asutusalueella, jossa ei muodostu laajaa maadoitusjärjestelmää, voidaan koko johtolähdöllä saavuttaa parempi maadoitusimpedanssin arvo muuntamoiden maadoitusten ketjuttamisella. Tämä tapahtuu yleensä keskusköysillä, kaapelien vaiipoilla ja mahdollisilla saattomaadoituskupareilla, kun on kyseessä maakaapeli-verkko. /22/

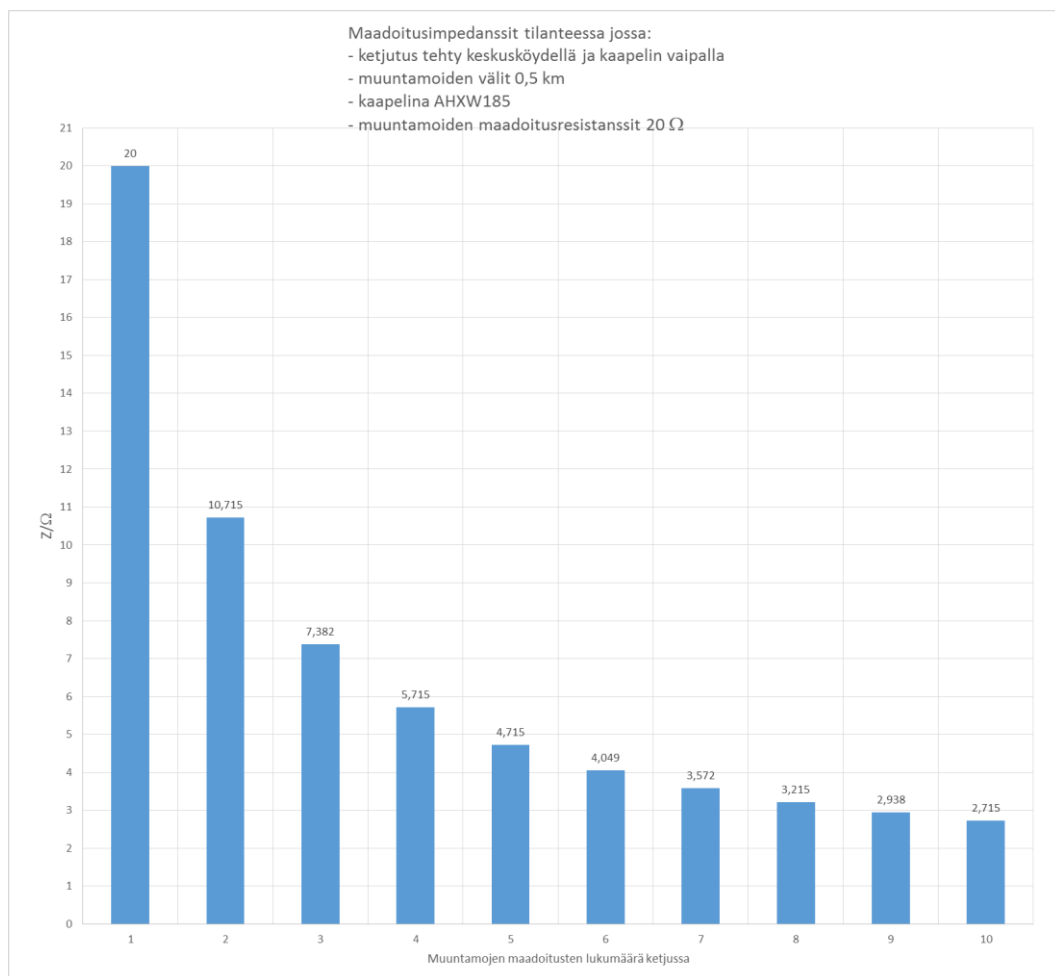
Muuntamoiden maadoitusjärjestelmien ketjutuksen vaikutusta maadoitusimpedanssiin voidaan teoreettisesti tarkastella kaavan 11 avulla. Muuntamoiden välimatkat ovat yleensä noin 0,5–2 km ja tällöin maadoitusjärjestelmien yhdistämiseen käytettävien maadoitusjohtimien impedanssit tulee ottaa myös huomioon. /22/

Mikäli käytetään maadoitusjärjestelmien yhdistämiseen kj-kaapelien keskusköysien ja vaippojen lisäksi saattomaadoituskuparia, voidaan sen vaikutus laskea vaakamaadoituselektrodin kaavalla. Kyseinen kaava on esitetty taulukossa 8. /23/

Yhdistettyjen maadoitusten määrän vaikutus maadoitusimpedansseihin saadaan määritettyä, kun tiedetään yksittäisten muuntamoiden maadoitusresistanssit. Sen lisäksi täytyy tietää muuntamojen maantieteelliset etäisyydet sekä kaapelityypit ja niiden impedanssiarvot. /22/

Kuten aiemmin on todettu, useilla sähköyhtiöillä VSV mukaan lukien, on käytössä kj-kaapeleina AHXAMK-W -tyyppiset kaapelit. Tämän vuoksi esimerkkitapauksissa oletetaan, että muuntamot ketjutetaan kyseisellä kaapelilla. Lisäksi oletetaan, että muuntamojen etäisyydet ovat 0,5 km ja niiden mitatut maadoitusimpedanssit ovat 20Ω .

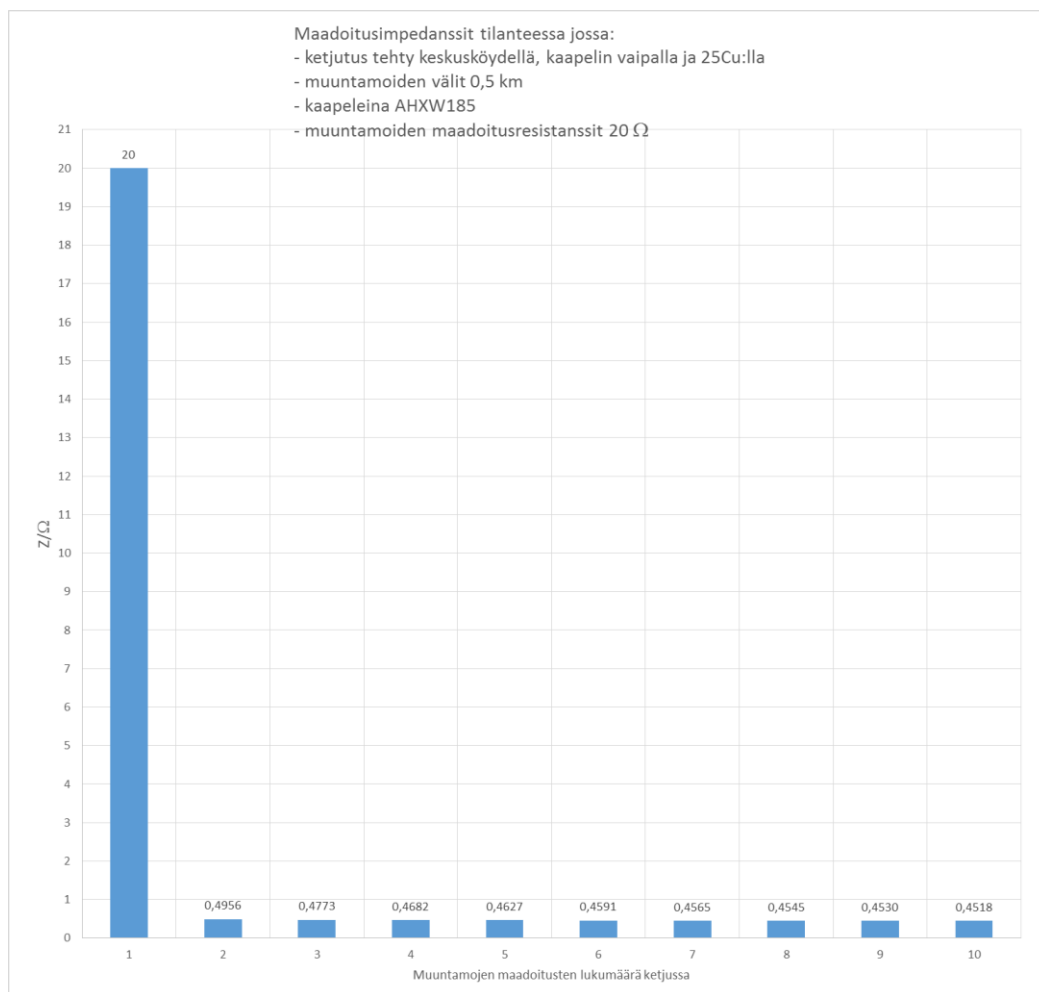
Esimerkeissä oletetut arvot ovat kuvitteellisia, koska VSV:n sähkönjakeluverkoissa kaapeloidut keskijänniteverkot ovat suurimmaksi osaksi ketjutettu. Tämän vuoksi niistä ei saanut hyviä esimerkkejä tähän tarkasteluun. Ensimmäisenä esimerkkinä on tilanne, jossa muuntamojen maadoitusjärjestelmät ketjutetaan kj-kaapelien keskusköysillä ja vaipoilla. Maadoitusjärjestelmän kokonaismaadoitusimpedanssin pientyminen muuntamojen lukumäärän funktiona nähdään kuvassa 38.



Kuva 38. Ketjumaisen maadoitusjärjestelmän kokonaismaadoitusimpedanssit, kun ketjutus on tehty ilman saattomaadoituskuparia. /22/

Kuvasta 38 nähdään, että maadoitusjärjestelmän kokonaisimpedanssi pienenee tehokkaasti muuntamoketjun alussa ja loppua kohden siihen ei tule enää merkittäviä muutoksia.

Toisena esimerkkinä on saattomaadoituskuparin tuoma vaikutus kokonaisimpedanssiin, kun tilanne on muuten sama kuin ensimmäisessä esimerkissä. Kyseinen tilanne näkyy kuvassa 39.



Kuva 39. Kokonaisimpedanssit ketjumaisessa maadoitusjärjestelmässä, jossa on mukana saattomaadoituskupari. /23/

Kuvasta 39 nähdään, että käytettäessä saattomaadoituskuparia, saavutetaan koko maadoitusjärjestelmässä lähes täysi johtavuus maahan jo kahden muuntamon ketjussa. Tästä eteenpäin kokonaisimpedanssi ei merkittävästi pienene. Mikäli toisen muuntamon jälkeen ketjutusta ei jatkettaisi enää saattomaadoituskuparilla, niin kokonaismaadoitusimpedanssin arvo alkaisi heitellä paljon. Tämä johtuu siitä, että saattomaadoituskuparin pienentävää vaikutusta ei enää olisi ja muiden johtimien impedanssit kasvattaisivat kokonaismaadoitusimpedanssia.

Yhteenvedona yllä näytetyistä esimerkeistä voidaan todeta, että alueella, jossa on hyvä maaperä, saavutetaan 10 muuntamon ketjulla hyvä kokonaismaadoitusimpe-

danssi ilman saattomaadoitustakin. Huonommin johtavilla maaperillä ja mikäli halutaan varmistua, että maadoitusimpedanssit varmasti pysyvät alhaisina, voidaan käyttää myös saattomaadoitusta.

Molemmat esimerkit ovat karkeita arvioita, joita voidaan käyttää suunnittelun tukena. Näiden olettamusten lisäksi suositellaan otettavan kenttäkokeita ja mittauksia, joilla varmistetaan laskentojen avulla saadut arvot. /23/

8 POHDINTA

Työn tavoitteena oli luoda VSV:lle selkeä katsaus, kuinka sähköjakeluverkkojen maadoituksia täytyy rakentaa ja suunnitella standardien perusteella. Lisäksi tällä työllä sain luotua itselleni hyvän kokonaiskuvan yhdestä sähköjakeluverkkojen tärkeimmästä aihealueesta. Työ herätti paljon kiinnostusta ja keskustelua VSV:n työympäristössä joten uskon, että tämän työn avulla moni muukin sai uusia näkökulmia kyseisestä aiheesta.

Aloitin työn etsimällä, mitkä standardit koskevat sähköjakeluverkkojen maadoituksia. Tämän jälkeen aloin selvittämään, miksi kyseinen aihe on tällä hetkellä ajan-kohtainen. Saatua selville työn lähtökohdat, aloin selvittämään erilaisten maadoitusjärjestelmien toteutustyyliä sekä niihin liittyviä huomioonotettavia seikkoja. Pyrin käymään tarkimmin sellaiset asiat läpi, jotka eniten saattaisivat koskettaa VSV:n sähköjakeluverkkoa. Merkittävimpänä asiana kävin läpi laajaa maadoitusjärjestelmää, jonka tunnistamisessa saattaa olla paljon vaikeuksia. Vaikeuden siihen tuo se, miten verkkomainen ja riittävän tiheä maadoitusjärjestelmä nähdään. Monet saattavat sekoittaa ketjumaisen ja laajan maadoitusjärjestelmän keskenään. Suositusten mukaan verkkoyhtiöiden tulisi määrittää laajan maadoitusjärjestelmän rajat omaan verkkoonsa, mutta tämä on niin työläs ja haastava työ, että luultavasti kaikki eivät ole sitä vielä täysin pystyneet tekemään.

Seuraavana selvitin, miten eri maasulkuilanteet käyttäytyvät verkossa ja miten niihin tulee varautua. SFS 6001 -standardista merkittävimpänä asiana nousi esiin se, että maadoitusvaatimukset tulevat täyttyä kaikissa kompensointitilanteissa. Jopa tilanteessa, jossa maasulun kompensointikela rikkoutuu, maadoitusvaatimukset tulevat täyttyä. Tämä on tietenkin loogista, koska missään tilanteessa ei saa aiheutua vaaraa millekään tai kenellekään, mutta suunnitteluun se tuo merkittäviä haasteita.

Seuraavana aiheena käsittelin, miten maadoitusjärjestelmiä tulee suunnitella SFS 6001 -standardin perusteella. Tähän sisältyi muun muassa maadoitusjohtimien ja elektrodien poikkipintojen mitoitus termisen ja mekaanisen lujuuden sekä korroosion kestävyuden mukaan.

Viimeisenä vaiheena työssä otin esimerkkitarkasteluja kaapeloitujen muuntamojen maadoitusjärjestelmien toteutuksesta VSV:n sähkönjakeluverkossa. Lisäksi tarkastelin kaksoismaasulkuvirtatilanteessa maadoitusjohtimien virtakestoisuuksia ja pohdin eri toteutustapojen käytännöllisyyksiä.

Yhtenä tarkasteluna tutkittiin muuntamojen maadoitusjärjestelmien ketjutusten vaikutukset koko järjestelmän maadoitusimpedanssiin. Nämä tarkastelut pohjautuivat Energiateollisuus ry:n sähkö tutkimuspoolin aikaisempiin tutkimuksiin. Kyseisessä tarkastelussa havainnollistettiin, miten kokonaismaadoitusimpedanssi pienenee, kun muuntamot ketjutetaan joko pelkästään kj-kaapeleilla tai kj-kaapeleilla ja saattomaadoituskupareilla. Tuloksena nähtiin, että muuntamojen ketjutus pelkästään kj-kaapeleilla pienentää merkittävästi kokonaismaadoitusimpedanssia noin 10 muuntamon ketjulla. Tämä edellyttää sitä, että yksittäisten muuntamoiden maadoitusresistanssit ovat noin 10–20 Ω .

Tuloksista nähtiin myös, että jos käytetään ketjutukseen saattomaadoituskuparia, saavutetaan täysi johtavuus maahan jo kahden muuntamon ketjulla. Tämä johtuu siitä, että vaakamaadoituselektrodina toimiva saattomaadoituskupari pienentää tehokkaasti maadoitusimpedanssia.

Selvitettäväksi jäi vielä VSV:n sähkönjakeluverkon laajan maadoituksen alueet, joka tullaan mahdollisesti toteuttamaan erillisenä työnä. Lisäksi ketjumaiset maadoitusjärjestelmät vaativat vielä lisätutkimuksia, koska tällä hetkellä oletukset pohjautuvat vain teoriaan. Tästä on kuulemani perusteella tulossa lisätutkimusraportti lähitulevaisuudessa.

Mielestäni työn tavoitteisiin päästiin, koska tämän työn aikana tuli paljon esille tekstin ja keskustelujen muodossa asioita standardeista. Mielestäni työssäni käydyt asiat ovat luotettavia, koska ne perustuvat pääasiassa standardeihin tai muista luotettavista lähteistä saatuihin tietoihin.

LÄHTEET

/1/ Vaasan Sähköverkko Oy:n yritystietoja 2015. Vaasan Sähkö Oy:n verkkosivut. Viitattu 31.8.2016 <http://www.vaasansahko.fi/FI/Sisalto/Pages/Vaasan-Sahko-verkko.aspx>

/2/ Vaasan Sähkön yritysesitysmateriaali.

/3/ L558/2013 Sähkömarkkinalaki 51 §, 119 §. Säädos säädöstietopankki Finlexin sivuilla. Viitattu 1.9.2016 <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Pidp1815040>

/4/ Energiateollisuus. Tavoite sähköverkkojen uudistamisesta. Energiateollisuuden verkkosivusto Viitattu 1.9.2016 <http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahko-verkko/sahkokatkot-ja-jakelun-keskeytykset/tavoite-sahkoverkkojen-uudistamisesta>

/5/ Suomen standardisoimisliitto SFS. SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset. 4. painos. SESKO ry.

/6/ Energiateollisuus. Sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset. Verkostosuositus TJ 1:05, 2005. Verkko dokumentti. Viitattu 2.9.2016 <http://www.sahkoverkkoekstra.fi/>

/7/ Energiateollisuus. Muuntopiirien ja pylväserotinasemien maadoitukset SFS 6001 / 2015 mukaan. Verkostosuositus RJ 19:16, 2016. Verkko dokumentti. Viitattu 2.9.2016 <http://www.sahkoverkkoekstra.fi/>

/8/ Roine, R. 2014. Suurjännitelaitteistojen maadoitukset. 49–72. Teoksessa Maadoituskirja. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 6. painos. Espoo. Painokurki.

/9/ Energiateollisuus. Kaapeliliitännäinen verkonhaltijan muuntamo. Verkostosuositus RM 3:16, 2016. Verkkodokumentti. Viitattu 17.9.2016 <http://www.sahkoverkkoekstra.fi/>

/10/ Energiateollisuus. Pylväsmuuntamon maadoitusjohtimet. Verkostosuositus RM 5:16, 2016. Verkkodokumentti. Viitattu 18.9.2016 <http://www.sahkoverkkoekstra.fi/>

/11/ Suomen standardisoimisliitto SFS. SFS-käsikirja 600-1. Sähköasennukset. Osa 1: SFS 6000 pienjännitesähköasennukset. 1. painos. 2012. SESKO ry.

/12/ Mäkinen O. Vaasan ammattikorkeakoulun luentomateriaali. 162–172. Teoksessa Sähköverkot.

/13/ Elovaara J. & Laiho Y. 1988. Maadoitukset. 413–434. Teoksessa Sähkölaitostekniikan perusteet. Neljäs korjattu painos. Helsinki, 1999. Valopaino Oy.

- /14/ Salo A. Vaasan Sähköverkko Oy:n tutkimusmateriaali. Maasulkututkimus 2016.
- /15/ Lakervi E. & Partanen J. 2008. Vikavirtasuojaus. 176–214. Teoksessa Sähkönjakelutekniikka. Helsinki. Gaudeamus Helsinki University Press Oy, Otatieto. Hakapaino.
- /16/ ABB Oy. Kompensoidun kaapeliverkon haasteet maasulkusuojaukselle. Webinaaritalenne. Viitattu 19.10.2016 <https://www.youtube.com/watch?v=hA-VKn71ShA>
- /17/ ABB Oy. 2000. Luku 8: Maasulkusuojaus. Teoksessa TTT-käsikirja.
- /18/ Aalto-yliopisto. Low voltage network touch voltages caused by medium voltage network earth faults. Verkkodokumentti. Viitattu 29.10.2016 <http://energia.fi/julkaisut/maadoitusjannitteetaalto-yliopistoloppuraportti-2014>
- /19/ International Electromechanical Commission. IEC 60909-0. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems.
- /20/ Adato Energia Oy. Sähkönjakeluverkkojen maadoitukset. 8.11.2016. Kurssi. Sähkönjakeluverkon maadoitusten perusteet. Risto Anjala.
- /21/ Nylund M. Vaasan Sähköverkko Oy:n sähköasemien releasettelu listaus.
- /22/ Mäkinen A. Energiateollisuus ry:n sähkötutkimuspoolin tutkimusmateriaali. Maadoitusjärjestelmät. Verkkodokumentti. Viitattu 15.11.2016 http://energia.fi/files/1114/Maadoitusjarjestelmat_-hankkeen_tuloksia_Antti_Makinen.pdf
- /23/ Adato Energia Oy. Sähkönjakeluverkkojen maadoitukset. 8.11.2016. Kurssi. Maadoitusjärjestelmät tutkimushanke. Antti Mäkinen.

LIITE 1

