



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Ilari Kemppi

Jakeluverkon maadoituksen suunniteluohje

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

25.5.2020

Tekijä Otsikko	Ilari Kemppi Jakeluverkon maadoituksen suunnitteluohje
Sivumäärä Aika	38 sivua 25.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	projektipäällikkö Mikko Vainikka lehtori Tuomo Heikkinen
<p>Insinööriyön aiheena oli jakeluverkon maadoituksen suunnitteluohjeen tekeminen. Muuttuva sähköverkko asettaa uusia haasteita maadoitusten tehokkaalle tekniselle ja taloudelliselle suunnittelulle ja ohjeella halutaan tuoda esiin tärkeimpiä asioita maadoituksen suunnitteluun liittyen. Nykyisin jakeluverkon suuren maakaapelointi määrän takia joudutaan rakentamaan maadoituksia eri tavalla kuin ennen ja ohjeella on tarkoitus selkeyttää vaatimuksia mitä maadoituksille on annettu. Ohjetta voidaan tulevaisuudessa käyttää suunnittelijoiden apuna jakeluverkon maadoituksia suunniteltaessa.</p> <p>Työssä selvitettiin nykyisten standardien asettamia rajoituksia jakeluverkkojen maadoituksille ja maadoitusten tarkoitusta yleisesti suojauksen osana. Maadoitusverkkojen erilaisiin rakennustyyliin tehtiin yleinen selvitys ja katsottiin minkälaisissa ympäristöissä voi maadoituksen rakennustyyliä esiintyä. Jakeluverkon mahdollisia mittaamistyyliä selvitettiin ja tarkasteltiin mihin maadoitusverkko ympäristöihin erilaiset mittaamistyyli sopivat. Kustannustehokkuuteen otettiin työssä kantaa huomioon ottaen maadoitusten nykyinen suunnittelutilanne.</p> <p>Työssä havaittiin standardien asettamat rajoitukset maadoituksille ja tehtiin maadoitusohje standardeja seuraten. Maadoitusohjetta lähdettiin tekemään yleistasolla ja sitä voitaisiin käyttää jatkossa käyttä tukemaan maadoitusten suunnittelua teknisesti toimivasti ja kustannustehokkaasti. Maadoitusohje saatiin tehtyä Rejlersille ja sitä voidaan käyttää jatkossa maadoitusohjeen tarkoitettuihin käyttötarkoituksiin.</p>	
Avainsanat	jakeluverkko, maadoitus, kosketusjännitteet, kompensointi

Author Title	Ilari Kemppe Electricity Distribution Network Earthing Design Guide
Number of Pages Date	38 pages 25 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Mikko Vainikka, Project Manager Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer
<p>The aim of this study was to produce a design guide for electricity distribution network earthing. Changes in the electricity distribution network over the years have caused new challenges to rise for designing technically and financially efficient earthing. This study's guide is meant to bring up the most important points about designing earthings. There are a lot of underground cables being built currently for electricity distribution networks and the required earthings need to be different compared to the past, when cables were built in air. The design guide is supposed to clarify requirements for new earthings and it can be used in the future as a guide to help engineers to design earthings for electricity distribution networks.</p> <p>In this study, the Finnish standards regarding earthings were investigated for limitations towards building earthings and the role of earthings in general for protection from electricity. Research was also done for the common building practices of earthing and the different situations where they can be used. There was also a need to find the current measurements for earthings and where they can be used for measurement of earthings. Financial efficiency in the current electricity distribution network design was also taken into account.</p> <p>As a result of the study, the limitations regarding earthings in the standards became clear and a design guide was made according to the limitations found. The design guide that was made is general knowledge about earthings and can be used in the future for efficient designing of earthing. The design guide was made for Rejlers and it can be used in the future for its original purposes.</p>	
Keywords	Electricity distribution network, Earthing, Touch voltage limit, Compensation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Mahdollisia vikatilanteita jakeluverkossa	2
2.1	Maasulkutyyppejä	2
2.2	Oikosulut	3
2.3	Yli- ja alijännitteet	3
3	Standardit Suomessa	4
4	Maadoitusten mitoitus	5
4.1	Mekaaninen kestoisuus ja korroosion kestävyys	6
4.2	Terminen kestoisuus	7
5	Kosketusjännitteet ja suunnittelu	9
5.1	Maasulkusuojaus ja -kompensointi	16
5.2	Kompensoinnin toteutustavat	18
6	Jakeluverkon maadoituksen rakenteet	19
6.1	Laaja maadoitusverkko	20
6.2	Ketjuuntuva maadoitusverkko	21
6.3	Keskijännite ja pienjännite maadoitus	22
6.4	Muuntamot ja erottimet	25
6.5	Sähköasemat	26
7	Maadoitusverkon mittaukset	26
8	Kustannustehokkuus eri maadoitustyyyleillä	30
8.1	Taajamaja-alue	34
8.2	Haja-asutusalue	35
9	Yhteenveto	37

Lyhenteet

Ib	Kehon kautta kulkeva virta. Virta, joka kulkee ihmisen läpi vikatilanteessa.
Ibp	Sallittu kehon kautta kulkeva virta. Maksimivirta, joka sallitaan menevän ihmisen läpi vikatilanteessa.
Ie	Maavirta. Maadoitusimpedanssin kautta maahan kulkeva virta.
Tf	Vian kesto aika. Vian kesto aika sekunteina, kun lasketaan Ibp-arvoa.
Ue	Maadoitusjännite. Maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välinen jännite.
Ut	(Tehollinen) kosketusjännite. Samanaikaisesti kosketeltavissa olevien johtavien osien välinen jännite.
Uvs	Suurin askeljännite. Kahden toisistaan yhden metrin etäisyydellä olevan maanpinnan pisteen välinen jännite.
Uvt	Suurin kosketusjännite. Samanaikaisesti kosketeltavissa olevien johtavien osien välinen jännite, kun näitä osia ei kosketa.
Utp	Sallittu kosketusjännite. Maksimijännite samanaikaisesti kosketeltavissa olevien johtavien osien välinen jännite.
Ze	Maadoitusimpedanssi. Järjestelmän tai asennuksen määrätyn kohdan ja neutraalimaan välinen impedanssi annetulla taajuudella.

1 Johdanto

Tein insinööriyöni Rejlersille, sillä Rejlersillä oli tarvetta maadoitusohjeelle suunnittelua tukemaan. Rejlers Finland on osa pohjoismaissa toimivaa Rejlers AB-yhtiötä. Rejlersillä on yhteensä töissä noin 2000 ihmistä, ja se on yksi suurimmista konsultointiyrityksistä Pohjoismaissa ja omistaa yli 80 toimistoa Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa. Rejlers Finland Oy tarjoaa monipuolisia palveluja teollisuuden, energian, rakentamisen ja infran asiakkaille. Rejlers toimii Suomessa 19 paikkakunnalla ja Rejlersillä on tällä hetkellä Suomessa henkilökuntaa yli 700 henkilöä. [1.]

Rejlers on toiminut sähköverkkoyhtiöiden yhteistyökumppanina jo lähes kymmenen vuoden ajan ja tarjoaa palveluja kanta-, alue- ja jakeluverkkoyhtiöille, sekä hajautettuun energiatuotantoon. Sähköverkot tarjoavat runsaasti palveluja asiakkailleen ja Rejlersillä työskentelee 90 sähköverkostojen ammattilaista. [1.]

Työn tarkoituksena on tehdä maadoituksen suunnitteluohje, jota voidaan soveltaa jakeluverkkoja suunniteltaessa, että voidaan rakentaa standardit täyttävä verkko, joka on teknisesti toimiva ja kustannustehokas. Nykyään maadoitusverkon suunnittelussa on hankaluuksia, koska ei olla täysin varmoja, mikä on riittävä taso maadoitusten suunnittelussa. Hankaluuksia aiheuttaa myös laajan maadoitusverkon tulkinnot, sekä rajaukset että mihin asti maadoitusverkkoa voidaan pitää laajana maadoitusverkkona.

Jakeluverkkoyhtiöillä on hyvin erilaisia maadoitusympäristöjä, koska kaupunkiseuduilla maadoittaminen on yleisesti helppoa, kun liittymiä on paljon ja siirtomatkat ovat suhteellisen pieniä, mutta taajama-alueella ja haja-asutusalueella ollessa maadoituksen rakentamiseen joutuu kiinnittämään paljon tarkempaa huomiota, koska maakaapelit voivat olla hyvinkin pitkiä, kun liittymien väli voi olla useita satoja metrejä, mikä aiheuttaa ongelmia maadoituksen kustannustehokkaaseen mitoittamiseen.

2 Mahdollisia vikatilanteita jakeluverkossa

Sähköverkossa on runsaasti erilaisia vikatilanteita ja käyttötilanteita, jotka aiheuttavat muutoksia sähköverkon omiin jännitteisiin ja virtoihin, jotka vuorostaan vaikuttavat maadoitusten omiin vaatimuksiin.

2.1 Maasulkutyppejä

Maasulkuja on useita erityyppejä ja maasulkutyyppin mukaan, voivat vikajännitteet ja virrat vaihdella hyvinkin suuresti, mikä aiheuttaa maadoituksille vaatimuksia kosketusjännitteiden ja vikojen sammutusaikojen muodossa.

Yksivaiheisessa maasulussa on johtavan johtimen yksi vaihe yhteydessä maahan suoraan tai maahan johtavan yhteyden omaavan kautta esimerkiksi puun oksan kautta [2, s. 6.]. Yksivaiheinen maasulku on maasulku tyypeistä kevyin sähköverkkoa ajatellen, koska maahan oleva yhteys on vain yhden vaiheen kautta. yksivaiheisen maasulun hankaluuksena on vikavirtojen suuruus, koska vikavirtojen tulee nousta tarpeeksi suuriksi, että suojaukseen suunnitellut järjestelmät toimivat ilman että laitteistot vahingoittuvat, tai maadoituksen tulee olla sen verran vahva, että sähköverkon toimintaa voi jatkaa maasulun ollessa päällä.

Maasulku voi olla myös useampinapainen, jos vikatilanne tapahtuu useammassa virtajohtimessa samanaikaisesti [2, s. 6.]. Useampinapainen maasulkutilanne voi johtua yhden vaihteen maasulun alkamisesta, koska normaalisti toimivien johtimien oma jännite maata vasten nousee ja voi aiheuttaa läpilyönnin. Kahden vaihteen oikosulku maakoetoksella on myös mahdollinen tilanne sähköverkoissa, jossa suojaus riippuu täysin vian kestoajasta, koska oikosulkusuojaus ja maasulkusuojaus toimivat eri parametreilla teknisesti ajatellen.

2.2 Oikosulut

Oikosulku-tapauksessa kaapelin johtimet yhdistyvät toisiinsa sähköisesti ilman että johtimien välissä on minkäänlaista kuormaa, tai vain pieni-impedanssinen yhteys, joka aiheuttaa vikatilanteen sähköverkkoon ja virran nousemisen kaapeleilla, jonka takia lämpötila nousee ja kaapeli on altis vikaantumiselle. Yksivaiheinen oikosulku eroaa yksivaiheisesta maasulusta tähtipisteen maadoituksessa. Yksivaiheisessa oikosulussa tähtipiste on suoraan maassa, eli järjestelmä on käyttömaadoitettu. Kaksivaiheinen oikosulku on kahden johtavan johtimen sähköinen yhdistyminen, jossa kahden johtimen välinen vikavirta nousee huomattavan suureksi, koska resistanssi laskee minimaaliseksi, kun kaapelin virran kierto reitillä ei ole enää ollenkaan kuormaa. Kolmivaiheisessa oikosulussa tilanne on muuten sama kuin kaksivaiheisessa, mutta vikavirran nousu on vieläkin suurempi koska kaikki vaiheet ovat oikosulussa. [2, s. 6.]

2.3 Yli- ja alijännitteet

Ylijännitteet sähköverkossa on luokiteltu niiden muotoon perustuen nykyisin, vaikka aikaisemmin ne oli lajiteltu ylijännitteen alkuperään liittyen. Ylijännitteet on kategorisoitu neljään eri kategoriaan, jotka ovat pienitaajuiset ylijännitteet, jotka aikaisemmin tunnettiin käyttötaajuisina ylijännitteinä, loivina transienttiylijännitteitä eli kytkentäylijännitteinä, jyrkinä transienttiylijännitteinä, jotka johtuvat ilmastollisista syistä ja erittäin jyrkkiin transienttiylijännitteisiin. [3, s. 253.]

Pienitaajuisia ylijännitteitä syntyy sähköverkkoon tilanmuutoksien takia esimerkiksi katkaisijoiden käyttämisestä tai vikatilanteista ja lähes aina kun pienitaajuisia ylijännitettä on havaittavissa, on myös loivaa transienttiylijännitettä järjestelmässä. Pienitaajuisia ylijännitteitä syntyy myös sähköverkon maasulkutilanteissa, mikä on yleisin pienitaajuisen ylijännitteen syy. [3, s. 255.]

Jyrkät transienttiylijännitteet ovat useimmiten seurausta salamaniskusta. Salamanisku voi induktoitua sähköverkkoon ja aiheuttaa ylijännitteen, tai osumalla suoraan sähköverkon osaan tai maadoitettuun osaan. [3, s. 287.] Erittäin jyrkät transienttijännitteet ovat havaittavissa erottimia käytettäessä, mikä johtuu erotinta käytettäessä syntyvän valo-kaaren syttymisestä ja katkeamisesta. [3, s. 310.]

Alijännitteitä voi syntyä sähköverkkoon vaiheviassa, kun jännite nousee muissa vaiheissa, tai tilanteessa, jossa sähköntuottoa ei ole tarpeeksi. Alijännitteet voivat olla hyvinkin vahingollisia sähköverkolle.

3 Standardit Suomessa

Maadoituksen suunnittelussa tulee ottaa aina huomioon voimassa olevien standardien noudattaminen, jotta maadoituksesta tulee Suomen kansallisten säädösten mukainen. Standardit antavat rajoituksia ja määräyksiä, jotka määrittävät jakeluverkolle minimivaatimuksia, jotka tulee täyttää. Standardeissa on myös ohjeistuksia, kuinka vaadittuihin arvoihin päästään tilanteissa joissa niitä ei suoraan täytetä.

Standardi SFS 6000 liittyy pienjännitesähköasennuksiin ja sen uusin versio SFS 6000-1:2017 korvasi vanhan SFS 6000-1:2012-standardin, joka sisältää pienjännitesähköasennuksille peruseriaatteita ja yleisten ominaisuuksien määrittelyt ja määritelmät. SFS 6000-1 Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät, SFS 6000-4-44 Suojausmenetelmät. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä, SFS 6000-5-54 Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen, maadoittaminen ja suojajohtimet ja SFS 6000-8-801:2017 Täydentävät vaatimukset. Jakeluverkot, antaa jakeluverkkojen pienjännitemaadoituksille rajoituksia ja ohjeistuksia, miten ne tulisi toteuttaa. Pienjännitemaadoitukset ovat erityisen tärkeitä suojauksen kannalta, koska maallikot ovat yleensä pienjännitteiden kanssa toiminnassa, jolloin tulee kiinnittää erikoishuomiota turvallisuuteen, koska maallikot eivät ole välttämättä tietoisia sähkön vaarallisuudesta ja eivät osaa varoa tarpeeksi.

Standardi SFS 6001 liittyy suurjännitesähköasennuksiin ja sen uusin versio SFS 6001:2018 korvasi vanhan SFS 6001:2015-standardin, joka sisältää suurjännitesähköasennuksille määräyksiä. Suurjännitesähköasennuksissa on erityisen tärkeää seurata SFS 6001:n ohjeistuksia, koska standardissa on määritetty työskentelyperiaatteita suurjännitteiden parissa, kuten työskentely alueiden minimi vaatimukset, että voidaan työskennellä turvallisesti. Standardissa on annettu maadoituksen suunnittelulle jakeluverkoja koskien ohjeistukset ja rajoitukset, jotka koskevat esimerkiksi kosketusjännitteitä, askeljännitteitä, maavirtoja ja maadoituksen mekaanisia ja termisiä kestoisuuksia ja korroosion kestävyyttä, että jakeluverkko toimii turvallisesti jokaisessa toiminta tilanteessa. Suurjännitteillä toimiessa maadoitus on erityisen tärkeää, koska suuren jännitteen takia vikatilanteissa vikajännitteet ja virrat heijastuvat todella suurina turvallisuus riskeinä, ellei suojausta ole toteutettu oikein.

Standardi SFS 6002 liittyy sähkötyöturvallisuuteen ja sen uusin versio SFS 6002 korvasi vanhan SFS 6002:2005-standardin, joka sisältää sähkötyöturvallisuuteen liittyviä määräyksiä ja suosituksia. Sähköverkkoja rakentaessa sähkötyöturvallisuus on tärkein asia, koska Suomessa tavoitteena on nolla tapaturmaa sähkötöissä ja SFS 6002 antaa turvallisuuteen liittyen tärkeitä ohjeistuksi. SFS 6002 määrittää sähkötyöturvallisuuteen liittyviä koulutuksia ja perehdytyksiä sähköalan ammattilaisille, sekä maallikoille jos he työskentelevät sähkötilojen parissa. Standardissa on myös määritetty työskentelyperiaatteita ja vaatimuksia työskennellessä sähkön parissa.

4 Maadoitusten mitoitus

Maadoituksia suunnitellessa tulee ottaa huomioon maadoituksen sähköisen riittävyyden lisäksi myös mekaaninen kestävyys ja asennusympäristöstä riippuvat rajoitteet maadoitukselle, esimerkiksi korroosion kestävyys. Jos maadoitusta ei rakenneta näitä raja-arvoja huomioon ottaen, voi maadoitus mennä rikki ennen aikojaan, mikä johtaa vaaratilanteisiin nopeasti.

4.1 Mekaaninen kestoisuus ja korroosion kestävyys

Suurjännitesähköasennuksien standardissa SFS 6001 on annettu mekaanisen kestävyden ja korroosion kestävyden puolesta minimi poikkipinta-aloja riippuen maadoitus-elektrodin omasta materiaalista, joita tulee noudattaa, jotta maadoitus kestää suunnitellun käyttöikänsä. Maahan asennettavat maadoituselektrodit tulee olla tehty korroosion kestävästä materiaaleista, ja niiden tulee kestää asennuksen ja normaalin käytön aikana esiintyvät mekaaniset rasitukset. Taulukon 1 asettamat vähimmäismitat on asetettu standardissa mekaanisen ja korroosion kestävyden kannalta ja niitä tulee noudattaa, jos käytetään muita materiaaleja, tulee varmistaa, että materiaali täyttää käytetyillä mitoilla toiminnalliset vaatimukset, jotka maadoituksille on asetettu. [4, s. 88.]

Taulukko 1. Maadoituselektrodeille minimimitat eri materiaaleilla, joilla täytetään mekaaninen ja korroosion kestävyys. [4, s. 108.]

Materiaali		Elektrodin tyyppi	Vähimmäismita				
			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	
	Päällistetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2 000	
	Elektrolyytti-kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakamaadoitus-elektrodin pyöreä lanka		25 ^c			
		Köysi	1,8 ^d	25 ^c			
	Putki	20		2			
	Tinattu	Köysi	1,8 ^d	25 ^c		1	5
	Sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla ^a	Köysi	1,8 ^d	25 ^c		1 000	
	Pyöreä lanka		25 ^c		1 000		

^a Ei soveltu asennettavaksi suoraan betoniin. Lyijyn käyttöä ei suositella ympäristösyistä.

^b Valssattu 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.

Pienjännite sähköstandardista SFS 6000-5-54 löytyy taulukko 2, joka on yksinkertaistettu taulukko esikuvastandardista, missä on mukana elektrodille vaadittu poikkipinta-ala, mahdollisen korroosiosuojauskerroksen paksuus ja materiaalin paksuus. Maadoituselektrodit on valittu vain sähköiskulta suojausta koskevien vaatimusten mukaisesti. Tapauksissa, jossa maadoituselektrodia käytetään myös salamasuojauksessa, elektrodin poikkipinnan standardin SFS-EN 62305-3 mukaan olla suurempi. [5, s. 8.]

Taulukko 2. SFS 6000-5-54:n yksinkertaistettu taulukko. [5, s. 8.]

Materiaali	Poikkipinta-ala mm ²	Halkaisija Ø mm	Minimipaksuus mm ^a	Korroosiosuojauskerroksen paksuus µm
Kupari	16		1,6	-
Kuumasinkitty teräs	90	10	3	45
Ruostumaton teräs	90	10	3	-
Betoniin upotettu teräs	90	10	3	- ^b
Kuparivaipalla varustettu teräs		15		2000
Sähköisesti kuparilla päällystetty teräs		14 (vaaka- tasossa 10)		250 (vaakaelektrodilla 70)

^a Nauhan tai levyn paksuus tai köyden yksittäisen langan halkaisija Ø

^b Betoniin upotetulla perustusmaadoituselektrodilla ei tarvita korroosiosuojausta

4.2 Terminen kestoisuus

Maadoituksien terminen kestoisuus on tärkeää vikatilanteissa, että maadoitukset eivät vikaannu vikatilanteissa aiheutuvista lämpötilan nousuista. Vikavirta jakautuu maadoituksissa usein useammalle kuin yhdelle maadoituselektrodille, joten on mahdollista mitoitaa maadoituselektrodit vain osalle vikavirrasta, jolloin loppulämpötilat vikatilanteessa eivät nouse läheskään niin suuriksi. [4, s. 89.]

Maadoitusjärjestelmää suunniteltaessa tulee ottaa huomioon olennaiset virrat, jotka on esitetty taulukossa 3, koska virtamäärät ovat erittäin tärkeitä maadoitusjärjestelmän kestävyydelle.

Taulukko 3. Olennaiset virrat maadoitusjärjestelmää suunniteltaessa. [4, s. 90.]

Suurjännitejärjestelmän tyyppi	Termiseen kuormitukseen liittyvä virta ^{a e}		Maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvä virta
	Maadoituselektrodi	Maadoitusjohdin	
Maasta erotetut järjestelmät			
	I''_{kEE} ⁱ	I''_{kEE} ⁱ	$I_E = r \cdot I_C$ ^b
Sammutetut järjestelmät			
Sisältäen lyhytaikaisen maadoittamisen vianilmaisua varten			
Järjestelmät ilman sammutuskeloja ^f	I''_{kEE} ⁱ	I''_{kEE} ⁱ	$I_E = r \cdot I_{RES}$ ^b
Järjestelmät, joissa on sammutuskelat	I''_{kEE} ⁱ	I''_{kEE} ^{ci}	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2}$ ^{b h}
Pienen impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät			
Sisältäen lyhytaikaisen maadoittamisen laukaisua varten ^g			
Järjestelmä, jossa ei ole tähtipisteen maadoitusta	I''_{k1}	I''_{k1}	$I_E = r \cdot I''_{k1}$
Järjestelmä, jossa on tähtipisteen maadoitus	I''_{k1}	I''_{k1}	$I_E = r \cdot (I''_{k1} - I_N)$ ^d

^a Jos virralla on useita kulkuteitä, virran jakautuminen voidaan ottaa huomioon.

^b Jos maasululle ei ole automaattista poiskytkentää, kaksoismaasulkujen huomioon ottamisen tarve riippuu käyttökokemuksista.

^c Petersenin kelan eli maasulkuvirran sammutuskelan maadoitusjohdin pitää mitoittaa kelan maksimivirran mukaan.

^d On tarkistettava, voiko aseman ulkopuolinen vika olla määräävä.

^e [Liitteen C](#) mukaiset vähimmäispoikkipinnat pitää ottaa huomioon.

^f Jos järjestelmä ei ole riittävän hyvin kompensoitu, yleistä arvoa 10 % arvosta I_C ei voi soveltaa. Jäännösvirran reaktiivinen/kapasitiivinen komponentti on lisäksi otettava huomioon.

^g Sammutetuissa järjestelmissä oletetaan, että lyhytaikainen maadoittaminen (vastuksen kytkeminen sammutuskelan rinnalle) alkaa automaattisesti 5 s kuluttua maasulun havaitsemisesta.

^h Kun vika sattuu sähköasemalla, pitää ottaa huomioon kapasitiivinen vikavirta I_C . Jos sähköaseman ulkopuolisessa verkossa on muita sammutuskeloja, ne pitää ottaa huomioon.

ⁱ **(FI)** Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa, joissa maasulku kytketään pois alle 1 sekunnissa, suuretta I_C voidaan käyttää maadoituselektrodien ja -johtimien termisen kuormitettavuuden mitoituksessa määräävänä tekijänä. Tällöin maasulun poiskytkentäaikana käytetään ekvivalenttista poiskytkentäaikaa. **(FI)**

Selitykset:

I_C Laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta

I_{RES} Maasulun jäännösvirta (katso [kuva 3b](#)). Jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta I_C .

I_L Kyseessä olevan sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa

I''_{kEE} Standardin SFS-EN 60909 mukaisesti laskettu kaksoismaasulkuvirta. Virran I''_{kEE} maksimi-arvon voidaan olettaa olevan 85 % symmetrisen alkuoikosulkuvirran arvosta

I''_{k1} Standardin SFS-EN 60909 mukaan laskettu yksivaiheisen symmetrisen maasulkuvirran alkuarvo

I_E Maavirta (katso [kuva 2](#))

I_N Muuntajan tähtipistevirta (katso [kuva 2](#))

r Reduktiokerroin (katso [liite I](#))

Jos asemalta lähtevillä ilmajohdoilla ja kaapeleilla on erilaiset reduktiokertoimet, tulee tarvittava resultoiva virta määrittää [liitteen L](#) mukaisesti.

Alle viisi sekuntia kestäville vikatilanteille voidaan laskea maadoituselektrodin oma poikkipinta A käyttäen kaavaa 1 [4, s. 109.]

$$A = \frac{I}{k} \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (1)$$

I on johtimen virran tehollisarvo

k on maadoituselektrodin materiaalista riippuva vakio arvo, joka löytyy standardista

t_f on vikavirran kesto aika

β on materiaalista riippuva vakio, joka tulee virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen omasta käänteisarvosta lämpötilassa 0 °C

θ_f on loppulämpötila

θ_i on alkulämpötila.

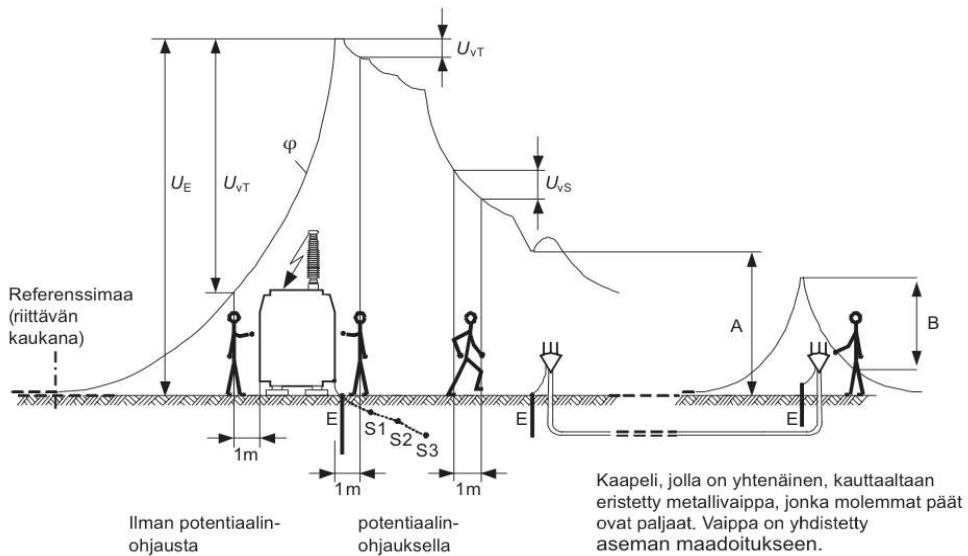
Tapauksessa, jossa vikatilanne kestää yli viisi sekuntia, on annettu standardissa annettu kuvat ja taulukot, joiden mukaan tulee poikkipinta määrittää. [4, s. 109.]

5 Kosketusjännitteet ja suunnittelu

Maadoituksen tärkeimpänä asiana on pitää kosketusjännitteet standardin SFS 6001 määrittämien rajojen sisässä, jotta maasulku tilanteessa ei tapahdu henkilö tai eläin vahinkoja.

Maasulku on vika, joka aiheutuu jännitteisen johtimen kytkeytymisestä maahan tai sen ja maan välisen eristysresistanssin pienentymisestä alle määrätyn raja-arvon. [4, s. 21.] Kaksoismaasulussa verkossa tapahtuu samanaikaisesti eristysvika kahdessa eri kohtaa ja kahdessa eri vaihteessa. Jos verkko on käyttömaadoitettu, on maasulku luonteeltaan yksivaihteinen oikosulku ja jos tarvetta on, voidaan myös vikavirran määrät laskea. Tarpeeksi alhaisella vikaresistanssilla maasulkukohdassa voi verkon oikosulkusuoijat toimia. Kompensoidussa ja maasta erotetussa verkolla tulee tarkastella koko galvaanisesti yhteen kytkettyä verkkoa, jotta maasulkuvirrat sekä nollajännitteet voidaan määrittellä. [6, s. 1.]

Askeljännitteellä tarkoitetaan yhden metrin etäisyyden välistä jännitettä maanpinnalla, joka johtaa mittansa siitä, että oletettu ihmisen askelpituuden määrä on yksi metri standardeissa. [4, s. 19.] Yleissääntönä askeljäännitteitä tarkasteltaessa voidaan pitää sitä, että jos täytetään kosketusjännite vaatimukset, on myös täytetty askeljäänniteiltä vaaditut kriteerit. Kosketusjännitteiden raja-arvot ovat huomattavasti pienempiä verrattuna askeljäännitteisiin, koska kehon läpi menevä virtatie on erilainen. [4, s. 88.]



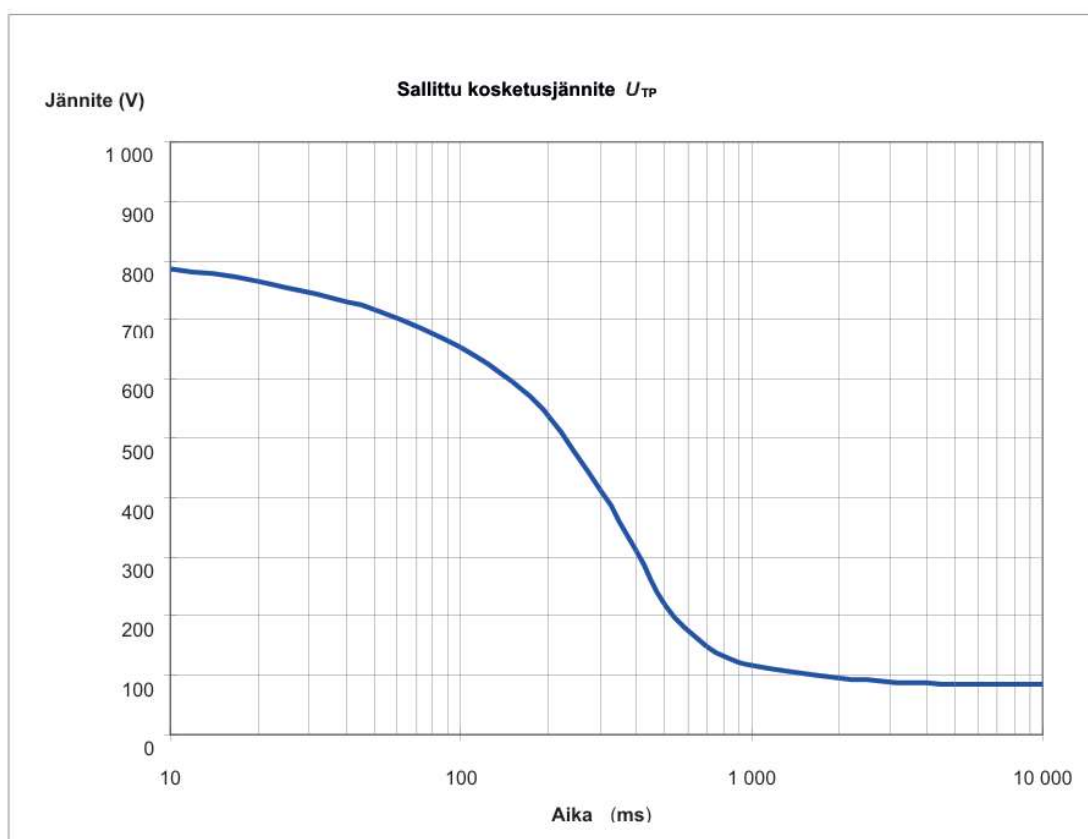
Selite

E	Maadoituselektrodi	U_E	Maadoitusjännite
S1, S2, S3	Maadoituselektrodiin E yhdistetyt potentiaaliohjauselektrodit (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 1. Potentiaaliprofiilit ja jännitteet, kun maadoituselektrodeissa kulkee virta [4, s. 23.]

Kuvassa 1 oleva U_{vT} eli suurin kosketusjännite tulee olla standardin määrittämien arvojen alapuolella ja maadoitus tulee suunnitella sen mukaan. Standardissa on määritetty jännitteen raja-arvot kosketusjännitteelle.

Maadoitusjärjestelmän tulee olla tarpeeksi vahvasti rakennettu, että se pystyy estämään laiteviat, joita syntyy maadoitusjännitteen nousun takia, tai isoista hajavirroista osissa, jotka eivät ole suunniteltu kuljettamaan vikavirtoja, tai potentiaalieroista, joita maadoitusjärjestelmässä voi esiintyä. Maadoitusjärjestelmää suunniteltaessa tulee myös ottaa huomioon, että katkaisijoiden ja suojarleiden normaaleina toiminta-aikoina ei saa siirtyvät potentiaalit, sekä askel- ja kosketusjännitteet nousta sallittuja jänniterajoja suuremmiksi, jotka on esitetty kuvassa 2. [4, s. 88.]



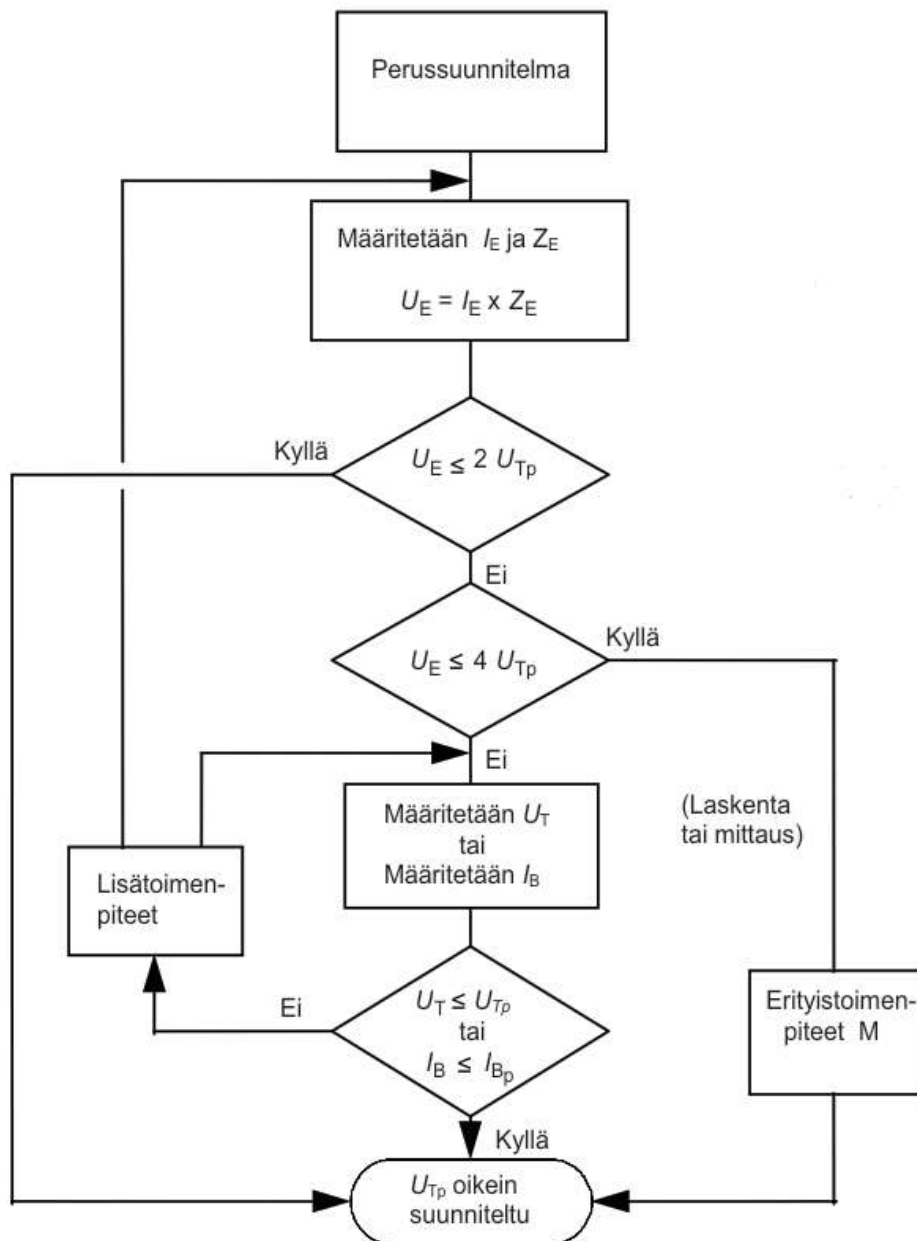
Kuva 2. Sallittu kosketusjännite [4, s. 93.]

Jos virran kestoaika on pidempi kuin kymmenen sekuntia, voidaan kosketusjännitteen arvona pitää 80 V. [4, s. 93.]

Maadoitukset tulee rakentaa huomioon ottaen niiden korroosionkestävyys ja mekaaninen lujuus. Maadoituselektrodit, jotka ovat kosketuksissa suoraan maan kanssa, tulee

valmistaa korroosion kestävästä materiaaleista, sekä niiden täytyy kestää asentamisen ja normaalin käytön aikana olevat mekaaniset rasitukset. [4, s. 88.] Standardissa on määritelty liitteessä C olevassa kuvassa minimimitat eri materiaaleille, jotka takaavat maadoituksille korroosion kestävyden ja mekaanisen lujuuden. [4, s. 108.]

Maadoituksia suunniteltaessa on annettu standardissa ohjeistus, kuinka suunnittelussa tulisi edetä, jotta päästään sallittuun raja arvoihin uhraamatta turvallisuuden puolesta mitään, mikä on esitetty kuvassa 3, jos maadoitusalue on todistetusti osa laajaa maadoitusjärjestelmää, se on suoraan hyväksyttävästi suunniteltu.



Kuva 3. Muun kuin laajan maadoitusjärjestelmän oma suunnitteluperiaate. [4, s. 94.]

Maadoitusjärjestelmän suunnittelussa on useita vaiheita ja se aloitetaan tietojen keräämisellä rakennettavasta verkosta, kuten maasulkuvirrat ja vian kestoajat. Maadoitusjärjestelmä suunnitellaan alustavasti verkon haltijan toiminnallisiin vaatimuksiin perustuen ja määritellään, onko se osa laajaa maadoitusverkkoa ja jos ei ole osa laajaa maadoitusverkkoa, tulee määrittää maaperän avulla asennuspaikalla esiintyvä maadoitusimpedanssi. Maasulkuvirran avulla määritetään maahan menevä virta maadoitusjärjestelmästä ja määritetään myös kokonaisuimpedanssi, jonka avulla voidaan määrittää maadoitusjännite. Määritetään sallittu kosketusjännite ja jos maadoitusjännite on pienempi kuin sallittu kosketusjännite ja kuvan 3 vaatimukset ovat täytetty, voidaan suunnittelua pitää valmiina ja suunnittelu on myös valmis, jos maadoitusjännite on pienempi kuin $2 \times U_{Tp}$. [4, s. 92.]

Tapauksessa, jossa maadoitusjännite on suurempi kuin sallittu kosketusjännite, eivätkä kuvan 3 vaatimukset täyty, tulee määrittää, ovatko kosketusjännitteet maadoitusjärjestelmän sisällä ja läheisyydessä pienemmät kuin sallitut arvot. Määritetään, onko siirtävistä potentiaaleista vaaraa sähköasennuksen sisä- tai ulkopuolelle ja jos on, aloitetaan toimenpiteet potentiaalierojen vaikutuksien alttiina oleville paikoille. Määritetään rasitusjännitteet pienjännitelaitteille, ja jos ne ovat liian suuria, ruvetaan vaikutuksia vähentäviin toimenpiteisiin esimerkiksi suur- ja pienjännitemaadoitusjärjestelmät toisistaan erottamalla. Varmistetaan lopuksi vielä, että muuntajien nollavirrat eivät aiheuta liian suuria potentiaalieroja maadoitusjärjestelmien eri osien välillä, jos potentiaalieroja havaitaan, tehdään toimenpiteet potentiaalierojen pienentämiseen. Suunnittelua voidaan tarkentaa tekemällä aiempia suunnittelun vaihteita uudestaan. [4, s. 92.] Lisätoimenpiteet, jos $4 \times U_{Tp}$ ei toteudu, löytyvät standardista SFS 6001. Erityistoimenpiteet M näkyvät taulukossa 4.

Taulukko 4. Lisätoimenpiteet M eri tilanteissa. [4, s. 113.]

Vian kestoaika t_f	Maadoitusjännite U_E	Asennuksia ympäröivät aidat ja ulkoseinät	Asennustyyppi	
			Sisäasennus	Ulkoasennus
$t_f > 5 \text{ s}$	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	M 1 tai M 2	M 3	M 4.1 tai M 4.2
	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	Osoitettava, että $U_T \leq U_{Tp}$	M 3	M 4.2
$t_f \leq 5 \text{ s}$	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	M 1 tai M 2	M 3	M 4.2
	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	Osoitettava, että $U_T \leq U_{Tp}$		

M 1 -luokassa tehdään erityistoimenpiteitä rakennukselle, jossa on sisäasennuksia rakennuksen aidoille ja ulkoseinille. Ohjeistukset–M 1.1-1.3 ovat ulkopuolisilta kosketusjännitteiltä suojaamiseen. Ohjeistuksessa M 1.1 kerrotaan käyttämään johtamattomia materiaaleja ulkoseinissä, sekä välttämään metallisia maadoitettuja osia, jotka ovat ulkopuolelta kosketeltavissa. Kohdassa M 1.2 asennetaan yhden metrin päähän ulkopuolelle maksimissaan puolen metrin syvyyteen vaakamaadoituselektrodi, joka yhdistetään maadoitusjärjestelmään. Kohdassa M 1.3 eristetään käyttöpaikka riittävän kokoisilla eristävillä materiaaleilla, että eristyksen ulkopuolelta ei voi koskea maadoitettuihin osiin. Tapauksessa että sivuttaissuunnassa voi koskea maadoitettuun osaan, riittää 1,25 metriä eristävän kappaleen leveydeksi. Eristäminen on toimiva ratkaisu, kun eristyksenä on vähintään sata millimetriä kivimurskaa, tai asfalttikerros, joka on sopivalla maapohjalla, tai eristematto, jonka paksuus on vähintään 2,5 millimetriä ja pinta-ala 1000 x 1000 millimetriä. [4, s. 113.]

M 2 -luokassa on ohjeistukset ulkoasennuksia ympäröiville aidoille, jossa on myös kohdassa M 2.4 annettu porteille ohjeistus. Ohjeistukset–M 2.1-2.3 ohjeistukset ovat ulkopuolisilta kosketusjännitteiltä suojaamiseen. Ohjeistuksessa M 2.1 tehdään aita johtamattomista materiaaleista, tai vaihtoehtoisesti metallilankaverkosta, joka on päällystetty muovilla. Kohdassa M 2.2 asennetaan yhden metrin päähän aidan ulkopuolelle maksimissaan puolen metrin syvyyteen vaakamaadoituselektrodi, joka on aitaan yhteydessä ja voidaan yhdistää maadoitusjärjestelmään tahdottaessa. Kohdassa M 2.3 tehdään käyttöpaikalle samat eristystoimenpiteet kuin kohdassa M 1.3, tai yhdistetään se maadoitusjärjestelmään. Ohjeistuksessa M 2.4 jos aita ympäröivät portit on yhdistetty maadoitusjärjestelmään, tulee käyttöpaikan eristys tai potentiaaliohjaus tehdä ohjeen M 1.3 mukaan. Jos erillisesti maadoitetun aidan porttien oma maadoitus päätetään yhdistää päämaadoitusjärjestelmään, tulee porttien ja aidan väliin muodostua vähintään 2,5 metrin pituinen sähköinen erotus, joka toimii myös porttien ollessa auki. [4, s. 114.]

M 3 -luokan erikoistoimenpiteet ovat sisätilojen asennuksille. Erityistoimenpiteet–M 3.1-3.3 antavat ohjeistuksen tehtäviin toimenpiteisiin. Kohdan M 3.1 toimenpiteessä potentiaaliohjaus toteutetaan rakennuksen perustusten sisälle asennetuilla ruudukon muotoisilla elektrodeilla, joiden leveys on maksimissaan kymmenen metriä ja poikkipinta vähintään 50 mm² ja on liitetty maadoitusjärjestelmään vähintään kahdesta kohdasta. Teräk-

sille tulee laskea virrankestokyky, jos käytetään vikavirran kulkutienä. Rakenneteräsverkkoja käytettäessä tulee vierekkäiset verkot yhdistää toisiinsa vähintään yhdellä pisteellä, sekä kaikki rakenneteräsverkot tulee yhdistää vähintään kahdesta pisteestä maadoitusjärjestelmään. Jos rakennus on jo olemassa, voidaan kaivaa rakennuksen ulkopuolelle vaakamaadoituselektrodi, joka yhdistetään päämaadoitusjärjestelmään. Erikoistoimenpiteessä M 3.2 käytetään metallisia rakenneosia, kuten metallilevyä tai metalliruu-dukkoa, joka yhdistetään maadoitettuun metalliosiin, jotka ovat kosketeltavissa. Toimenpiteessä M 3.3 toimenpiteessä tehdään käyttöpaikan eristys toimenpiteen M 1.3 tavalla. Kaikki samanaikaisesti kosketeltavissa olevat johtavat osat tulee yhdistää toisiinsa potentiaalintasaamiseksi. [4, s. 114.]

M 4 -erikoistoimenpiteet koskevat ulkoasennuksia ja siitä on annettu kaksi ohjeistusta M 4.1-4.2. Toimenpiteessä M 4.1 asennetaan vaakamaadoituselektrodi yhden metrin päähän ja noin 0,2 metrin syvyyteen käytettävistä laitteista ja kyseinen vaakamaadoituselektrodi yhdistetään maadoitettaviin metalliosiin, jotka ovat kosketeltavissa, tai käytetään metallisia rakenneosia, joka yhdistetään kosketeltaviin johtaviin osiin, tai yhdistetään kosketeltavat metalliosat toisiinsa ja maadoitetaan ne, sekä eristetään käyttöpaikka erikoistoimenpiteen M 1.3 mukaan. Erikoistoimenpiteessä M 4.2 rakennetaan suljetun renkaan muotoinen rakennusta ympäröivä vaakamaadoituselektrodi, jonka sisälle asennetaan maksimissaan 10 x 10 metristä maadoitusruudukkoa. Vaakamaadoituselektrodi renkaan ulkopuolella sijaitsevien laitteiden ja osien, jotka on yhdistetty maadoitusjärjestelmään, tulee asentaa oma potentiaalinhjauselektrodi metrin päähän ja noin 0,2 metrin syvyyteen. [4, s. 114.]

5.1 Maasulkusuojaus ja -kompensointi

Maasulkutilanteessa kosketusjännitteet nousevat suuresti, jolloin on tärkeää, että maasulkusuojaus on kunnossa, koska kosketusjännitteille on asetettu standardissa arvot joita ei saa ylittää. Maasulussa olevassa verkossa joudutaan maasulkutilanne katkaistamaan heti, elleivät maadoitukset ole tarpeeksi vahvat, että pystytään pitämään kosketusjännitteet tarpeeksi alhaisena, mutta jos on rakennettu tarpeeksi vahva maadoitusverkko, voidaan käyttöä jatkaa. Maasulkutilanne on maadoitukselle erittäin tärkeä asia tästä syystä, koska vahvemman maadoitusverkon rakentaminen voi tulla erittäin kalliiksi.

Kaikki sähköisesti erilliset järjestelmät on varustettava automaattisella maasulkusuojuksella, jonka avulla maasulku havaitaan ja kytketään pois. Maasulkusuojaus tulee toteuttaa yleisesti automaattisella pois kytkennällä, mutta tilanteessa, jossa verkon käytön tulisi jatkua ja on tarvetta siirtää verkon poiskytkentää eteenpäin, voidaan siirtää verkon käytön keskeyttäminen eteenpäin sopivammalle ajankohdalle lisäämällä hälytys verkolle ja käyttämällä manuaalista verkon katkaisua. [4, s. 140.]

Hälytykselle ja käsin poiskytkennälle on asetettu ehtoja, jotka tulee täyttyä, että kyseistä kytkemistyyliä voidaan käyttää. Valokaarimaasulun mahdollisuus tulee olla pieni verkolla eli käytännössä verkko pitää olla maakaapelia tai ilmajohtoverkkoa, jossa maasulkuvalokaari sammuu itsestään. [4, s. 140.]

Maasulkutilanteessa tulee verkon käyttöä valvovalle henkilöstölle tulla ilmoitus heti järjestelmässä olevasta hälytyksestä, jotta henkilöstö pääsee heti verkon vian selvitykseen. Maasulussa verkon käyttöä voidaan yleensä jatkaa kaksi tuntia paitsi tilanteessa, jossa on selvää, että verkon käytön jatkaminen aiheuttaisi haittaa ihmisille, omaisuudelle tai muille laitteistolle. [4, s. 140.]

Tilanteessa, jossa maasulun sijainti on löydetty ja voidaan turvallisesti varmistaa, että siitä ei aiheudu vaaraa kenellekään, voidaan käyttöä jatkaa pidempään kuin kaksi tuntia. Maasulkutapauksessa jakelumuuntamalla, joka ei kuulu laajanmaadoitusjärjestelmän alueelle, tulee verkon käyttö lopettaa. [4, s. 140.]

Jos maasulkua ei katkaista, saa jännite olla pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen ja korkeintaan 150 V, jos toimitaan laajanmaadoitusjärjestelmän ulkopuolella. Kaksoismaasulkutilanteessa tulee verkon käyttö lopettaa ja maasulku katkaista heti. Jos maasulkua ei katkaista heti, tulee ottaa huomioon tietoverkkoliikenteen asettamat vaatimukset. [4, s. 140.]

Maasulussa verkon käyttämisestä voidaan saada suuria rahallisia hyötyjä, koska verkkoyhtiö ei joudu korvaamaan keskeytyksistä aiheutuneita kustannuksia asiakkailleen ja pystyy jatkamaan sähkön siirtoa. Maasulussa käytön jatkamisella voidaan saavuttaa myös hyötyä huollon kannalta, koska verkkoyhtiön huoltohenkilökunnalla voi olla muita

kiireitä maasulun sattuessa, joten huoltotoimenpiteitä verkolle voidaan lykätä sopivampaan ajankohtaan. Maasulun jatkamisen takia joudutaan tosin rakentamaan vahvempaa maadoitusta, jotta päästään sallittuihin kosketusjännitteisiin, joten verkon rakentamiselle tulee lisäinvestointeja alkutilanteessa, mutta henkilömäärällisesti pienemmän huoltohenkilökunnan pitäminen tuo taas ajan kuluessa säästöjä, koska ei ole tarvis pitää valmiudessa suurta määrää huoltohenkilökuntaa, kun huollot eivät ole niin kiireisiä tapauksia, joten seudulla jossa on mahdollista maasulkutilanteessa jatkaa käyttöä, kannattaa näin ehdottomasti tehdä, vaikka alkuinvestointeja tästä tuleeekin.

Kompensoinnin tarkoituksena on poistaa kaapeloinnista johtuvaa kapasitiivista maasulkuvirtaa lisäämällä verkkoon reaktiivisia komponentteja, jotka lisäävät induktiivista kuormaa, eli kuristimia. Kompensoidessa verkkoa asennetaan verkon tähtipisteeseen kuristimia. Keskijänniteverkkoja kompensoidessa on harvemmin tähtipiste käytettävissä, joten joudutaan muodostamaan keinotekoinen tähtipiste. [6, s. 7.]

Kompensoinnilla voidaan saavuttaa suurta hyötyä, koska maasulkuvirran vähentyessä sähköverkossa, voidaan rakentaa maadoituksen näkökulmasta halvempaa verkkoa, koska kosketusjännitteet pienenevät samassa suhteessa. Maadoituksen näkökulmasta päästään helpommin $2 \times U_{tp}$ arvoon, jolloin ei ole tarvis lisätä kuparia maadoituksen vahvistamiseksi, mikä aiheuttaa lisäkustannuksia.

5.2 Kompensoinnin toteutustavat

Maasulkuvirtaa voidaan kompensoida usealla erilaisella tavalla ja eri kompensointitavat toimivat tilanteen mukaan toisiaan paremmin. Kompensointi voidaan rakentaa keskitetysti, että yhdellä sähköasemalla on isot kompensointilaitteistot, jotka voivat kompensoida runsaasti maasulkuvirtaa verkosta. Kompensoinnin voi suorittaa myös hajautetusti, eli asennetaan pienempiä kompensointilaitteistoja useampaan sijaintiin, että maasulkuvirtaa voidaan vähentää siellä missä sitä esiintyy [7.]

Keskitetyn kompensointilaitteiston helppoutena verrattuna hajautettuun on huoltaminen. Keskitetty kompensointilaitteisto on myös kooltaan huomattavasti suurempi kuin hajautetut kompensointilaitteistot voivat olla, joten saadaan sähköasemalle asennettavalla

kompensointilaitteistolla suuri hyöty sähköverkkoa ajatellen. Keskitetyn kompensointilaitteiston huonona puolena on rajoitettu koko ja uusimisen hinta, joka näkyy, jos sähköverkkoa laajennetaan suuresti kompensointikapasiteetin loppumisena, jolloin kompensointilaitteisto pitää uusia ennen pitoaikansa loppumista, joka tulee kalliiksi. [8.] Koska kompensointilaitteisto on kooltaan niin suuri, tulee uusimiselle myös hintaa huomattavan paljon ja se vie myös runsaasti aikaa, ellei uusimista suunnitella hyvin. Kaupunkialueilla keskitetyt kompensointilaitteistot toimivat erittäin hyvin, koska kompensoitavaa maavirtaa on runsaasti suuren kaapelointi määrän takia ja kaupunkialueilla kaapeloinnit ovat keskittyneet pienelle alueelle. Haja-asutusalueella ja harvemmin asutuissa taajamissa käytetään pienempiä keskitettyjä kompensointilaitteistoja, jotka on mitoitettu tarpeen mukaan. [7.]

Hajautettuja kompensointilaitteistoja on kokonsa puolesta helppo lisätä sähköverkkoon tarpeen mukaan ja suoraan sijainteihin, joissa kompensointia tarvitaan, joten se toimii erinomaisesti tilanteissa, jossa tarvitaan lisäkompensointia kaupungeissa, mutta ei olla valmiita uusimaan sähköasemien keskitettyjä kompensointiparistoja. Harvemmin asutuilla alueilla hajautettu kompensointi on todennäköisesti parempi vaihtoehto, koska voidaan kompensoida suoraan siellä missä on tarvetta kompensoinnille. Yleisesti voitaisiin kuitenkin suositella keskitettyjen ja hajautettujen kompensointilaitteistojen yhteiskäyttöä, jotta saadaan sähköverkkoa tasaisesti kompensoitua ja vältetään kalliilta uusimisilta keskitetyissä kompensoinneissa, kun laitteistolla voi olla vielä käyttöikä jäljellä.

6 Jakeluverkon maadoituksen rakenteet

Jakeluverkoissa kaapelointien yhteydessä on runsaasti erilaisia tapoja rakentaa maadoitusjärjestelmää, ja rakentamisessa käytettävän maadoitusjärjestelmän valinta riippuu suuresti rakentamisen sijainnista, eli suoritetaanko rakentamista kaupunki, taajama tai haja-asutus alueelle.

Kaupunkialueella maadoittaminen on suhteellisen helppoa, koska liittymiä on paljon ja etäisyydet eivät ole pitkiä, mikä helpottaa standardien edellyttämien maadoitusarvojen täyttämistä. Taajama- ja haja-asutus alue ovat hankalampia sijainteja liittymien vähäi-

syyden ja kaapelien pituuksien takia, koska standardin mukaisen maadoituksen rakentamiseen tarvitaan huomattavasti enemmän maadoituskuparia, mikä tulee verkonrakentajalle erittäin kalliiksi.

6.1 Laaja maadoitusverkko

Laaja maadoitusjärjestelmä normaalisti on verkkomainen ja siihen kuuluvat jakelumuuntamot ovat lyhyillä etäisyyksillä toisistaan. Suomessa laajan maadoitusverkon alueet ovat normaalisti tiheästi asustetuilla kaupunkialueilla, sekä vastaavat seudut ja teollisuusalueet, jossa jakeluverkko muodostaa yhtenäisen maadoitusjärjestelmän. [4, s. 149.]

Standardissa on määritelty, että muuntopiirien tulee olla vähintään yhdistetty kahteen muun muuntopiirin maadoitukseen ja muuntopiireillä tulee olla yhdistyksiä muihin muuntopiireihin riittävillä väleillä enemmän kuin kaksi, mutta riittävää välimäärää ei ole suoraan määritelty. Maadoitusmittaukset yksittäiselle maadoitukselle käännepistemennellä ei anna luotettavaa tulosta. [4, s. 149.]

Maadoitusten yhdistäminen toisiinsa voidaan tehdä kaapelin keskusköydellä tai tarpeeksi isolla poikkipinnalla olevalla kaapelin kosketussuojalla, PEN- tai PE-johtimella, erillisellä johtimella tai vastaavalla tavalla. Jos suurjännitesähköasemalla on useita yhteyksiä keskijänniteverkon laajaan maadoitusjärjestelmään, voidaan sekin katsoa kuuluvaksi laajaan maadoitusjärjestelmään. [4, s. 149.]

Laajalle maadoitusverkolle tulee tehdä dokumentaatio, josta voidaan varmistaa laajaan maadoitusjärjestelmään liittyvät sähköasemat, jakelumuuntamot sekä niiden välisten maadoitusten yhdistymiset. Dokumentaatiosta tulee selvitä, että laaja maadoitusverkko täyttää vaatimukset, joita standardi on sille asettanut. [4, s. 149.]

Laajan maadoitusjärjestelmän voi mahdollisesti rakentaa myös kaupunkialueen ulkopuolelle esimerkiksi taajamaan, missä on muuntajat suhteellisen lähellä toisiaan vetämällä maadoituskuparit muuntamoiden välille, vaikka muuntamoiden välille ei olisikaan tulossa kaapelia saavuttaakseen standardin oman määritelmän laajasta maadoitusjärjestel-

mästä. Tällä saavutetaan hyötyjä sähköverkkoa ajatellen, koska laajalle maadoitusjärjestelmälle on annettu standardissa paljon hyötyjä verrattuna muihin maadoitusjärjestelmän rakenteisiin. Laajan maadoitusverkon rakentamiselle muodostuu hyvin runsaasti hintaa, koska joudutaan kaivamaan tai auraamaan kuparit maahan, missä ei olisi ollut kaapelia ilman laajan maadoitusverkon rakentamista. Maadoitusjärjestelmä pitää mittaamalla todentaa, että se on osa laajaa maadoitusjärjestelmää. Laajan maadoitusjärjestelmän rakentaminen taajamiin voi olla järkevää maaperän ollessa huonoa maadoituksien näkökulmasta, jotta saadaan vahvat maadoitukset rakennetuksi, jotka täyttävät standardit, vaikkakin siitä lisäkustannuksia syntyy.

6.2 Ketjuuntuva maadoitusverkko

Yhteen liitetyjä maadoitusjärjestelmiä on suomessa taajamissa ja maaseudulla, jossa jakelumuuntamot ja sähköasemat ovat liittyneet maakaapeloituun keskijänniteverkkoon ja muodostavat toisiinsa nähden ketjumaisesti tai silmukkamaisesti. Maadoitusmittauksissa käännepestemenetelmä ei anna luotettavia arvoja ketjumaisissa maadoitusverkoissa yhden maadoituksen mittaamista varten ilman, että irrottaa syöttökaapeleita. [4, s. 150.]

Maadoituksien yhdistäminen toisiinsa voidaan tehdä kaapelin keskusköydellä tai tarpeeksi isolla poikkipinnalla olevalla kaapelin kosketussuojalla, erillisellä johtimella tai vastaavalla tavalla. Suujännitesähköasemien vaikutus ketjuuntuvaan maadoitusverkkoon pitää selvittää erikseen. [4, s. 150.]

Yhteen liitettyistä maadoitusjärjestelmistä tulee tehdä dokumentaatio, jolla voidaan näyttää, että maadoitusmittaukset on tehty maadoitusverkolle, ja mahdolliset maadoituslaskelmat, jos niitä on tehty. Dokumentaatioissa tulee myös tulla esille maadoitukseen liittyvät sähköasemat, jakelumuuntamot sekä niitä yhdistävät maadoitukset. [4, s 150.]

Tampereen yliopiston tekemän tutkimuksen mukaan ketjuuntuvassa maadoitusverkossa maadoituksien yhdistämisellä on suuri vaikutus maadoitusimpedanssin määrään. Maadoitusimpedanssin määrään on suurin vaikutus, kun muuntajia on ketjutettu vähemmän,

mutta jos muuntajia on ketjussa runsaasti, rupeaa yksittäisen muuntamon vaikutus laskemaan todella pieneksi. Haja-asutusalueella tutkimuksessa oli käytetty muuntamoita, joiden yksittäisenä maadoitusimpedanssi arvona oli käytetty 20 ohmia ja 50 ohmia ja muuntamoiden välimatkat olivat yhden kilometrin ketjutuksien välissä. Jos muuntamoiden maadoitusimpedanssi oli 20 ohmia, pystyi ketjutuksen vaikutus laskemaan maadoitusimpedanssia jopa 18–47 %. Tapauksessa, jossa maadoitusimpedanssi muuntamolla oli 50 ohmia, laski maadoitusimpedanssi 13–32 %. [9, s. 21.]

Taajama-alueella tutkimuksessa oli käytetty muuntamoita, joiden yksittäisenä maadoitusimpedanssi arvona oli käytetty 10 ohmia ja 15 ohmia ja muuntamoiden välimatkat olivat puoli kilometriä ketjutuksien välissä. Jos muuntamoiden maadoitusimpedanssi oli 10 ohmia, pystyi ketjutuksen vaikutus laskemaan maadoitusimpedanssia jopa 26–48 %. Tapauksessa, jossa maadoitusimpedanssi muuntamolla oli 50 ohmia, laski maadoitusimpedanssi 24–40 %. [9, s. 23.]

Tampereen tutkimuksen perusteella pystyy toteamaan, että verkkoyhtiöt voivat laskea maadoitusimpedanssi arvoja runsaasti ketjuttamalla muuntamoiden maadoituksia toisiinsa. Ketjuttamalla muuntamoita päästään parempiin maadoitusarvoihin ilman, että tarvitsee vahvistaa jokaisen muuntamopiirin omia maadoituksia runsaasti, joka johtaa säästöjen tekemiseen rakentamisessa.

6.3 Keskijännite ja pienjännite maadoitus

Suomen olosuhteisiin on suositeltu, että pien- ja suurjännite–maadoitukset yhdistettäisiin toisiinsa. Kokemus verkon maadoittamisessa on osoittanut, että maasulkutapauksissa erilliset maadoitukset koittavat yhdistyä. suurjännitesähköasemien maadoitukset voidaan myös haluttaessa erottaa muista maadoituksista. Esimerkkinä 110 kV voidaan erottaa muista pienjännitemaadoituksista sekä pienjännite- ja suurjännite–yhdistelmä maadoituksista, jotta 110 kV järjestelmistä ei siirry pienjännitepuolelle kosketusjännitteitä. Jos erotus tehdään suurjännitemaadoituksien ja pienjännitemaadoituksien väliin jakelumuuntamoilla, tulee ottaa huomioon muuntajan tähtipisteen eristysten läpilyönnin riski ja pienjännitepuolella esiintyvät jännitteet. [4, s. 142.]

Suurjännitejärjestelmän maasulusta johtuvien käyttötaajuuisten rasisusjännitteiden kesto- ja suuruus pienjänniteasennuksissa eivät saa ylittää taulukossa 5 olevia vaatimuksia. [10, s. 10.]

Taulukko 5. Sallitut käyttötaajuiset rasisusjännitteet [10. s 10]

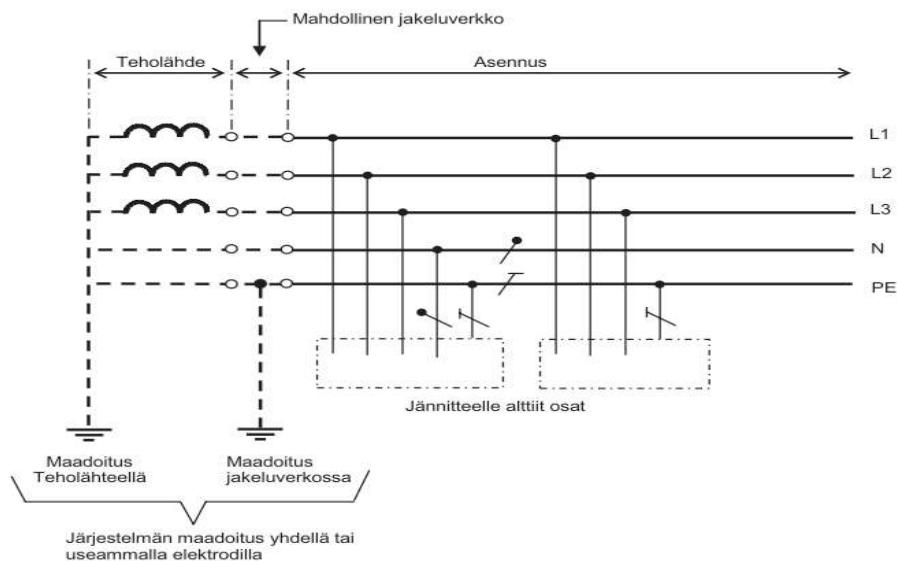
Suurjännitejärjestelmän maasulun kesto-aika t	Pienjännitejärjestelmän laitteen sallittu rasisusjännite U
$> 5 \text{ s}$	$U_0 + 250 \text{ V}$
$\leq 5 \text{ s}$	$U_0 + 1200 \text{ V}$

Järjestelmissä, joissa ei ole nollajohdinta, jännitteen U_0 arvona käytetään vaiheiden välistä jännitettä.

HUOM. 1 Taulukon ensimmäinen rivi koskee suurjännitejärjestelmiä, joilla on pitkä poiskytkentäaika tai maasulkuhälytys. Tällaisia voivat olla esim. eristetyt ja sammutetut suurjänniteverkot. Toinen rivi viittaa suurjännitejärjestelmiin, joissa on lyhyt poiskytkentäaika, esim. impedanssin kautta maadoitetut suurjännitejärjestelmät. Molemmat rivit yhdessä muodostavat pienjännitelaitteiden eristykselle suunnittelukriteerit tilapäisten käyttötaajuuisten ylijännitteiden suhteen, katso IEC 60664-1.

HUOM. 2 Järjestelmässä, jossa nolla on yhdistetty muuntamon maadoitusjärjestelmään, tällainen tilapäinen käyttötaajuinen ylijännite on odotettavissa myös rakennuksen ulkopuolella laitteen eristyksen yli, jos se ei ole maadoitetussa kotelossa.

Keskijännitteillä maadoitukset voidaan suorittaa monella eri tavalla muuntamoiden välillä, joista normaaleita tapoja on maadoittaa KJ-kaapelin keskusköydellä, kaapelin omalla vaipalla, tai erillisellä kuparijohtimella. Riippuen mitä kaapelityyppiä käytetään asennuksessa, on järkevää käyttää kaapelin keskusköyttä, jos sellaista on, tai kaapelin vaippaa maadoituksessa, mutta maadoitusarvojen takia voidaan joutua lisäämään erillinen kupariköysi maadoitukseen, vaikka muita maadoitustapoja olisikin käytetty. Kustannuksia ajatellen tulee ottaa huomioon käytettävä kaapelityyppi ja maadoituksen lisätarve, jos kaapelilla ei esimerkiksi ole keskusköyttä, jota voisi maadoittaa. Kuvassa 4 on esitetty Suomessa käytettävä kolmivaiheinen pienjännite TN-S-järjestelmä.



Kuva 4. Kolmivaiheinen pienjännite TN-S-järjestelmä. [11, s. 40]

Pienjänniteverkon maadoitukset on yleisesti yhdistetty keskijännite maadoituksiin muuntamoilta lähteviltä pienjännitelähdöiltä hyvän maadoitusimpedanssin saavuttamiseksi. Pienjänniteverkossa käytetään jakokaapeilla tilanteen mukaan lisämaadoituksia, jos on tarvetta epäillä maadoituksen riittämättömyyttä kosketusjännitteiden puolesta maadoitusimpedanssi mittauksien takia tai laskujen takia, jolla on määritetty maadoitukselle lisätarvetta. Taulukossa 6 on esitetty pien- ja suurjännite–maadoitusten yhdistämiselle minimi maadoitusjännitevaatimuksia.

taulukko 6. Pien- ja suurjännite–maadoitusten yhdistämiselle asetetut minimi maadoitusjännitevaatimukset [4, s. 96.]

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

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

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

6.4 Muuntamot ja erottimet

Jakelumuuntamoissa, joissa on yhdistetty suurjännite- ja pienjännitemaadoitukset, sallittu maadoitusjännite U_E riippuu standardin mukaisesta Utp-kosketusjännitteestä kaavan 2 mukaisesti.

$$U_E \leq F \times U_{Tp} \quad (2)$$

Maadoitusjännitteen laskennassa voidaan käyttää yhteen kytketyissä maadoituksissa mittaamalla tai laskemalla selvitettyjä maadoitusarvoja. Kertoimena F Suomessa on sallittuna arvona yleensä 2. Tapauksissa, jossa arvoa 2 on erityisen hankala saada aikaisiksi, voidaan siirtyä suurempiin kertoimiin, kunhan standardissa asetetut vaatimukset täyttyvät. [4, s. 143.]

Kertoimelle F on annettu seuraavien ehtojen täytyessä arvo 4. Maaperä muuntopiirin alueella on johtavuudelta erityisen huonoa. Muuntamo syöttävässä suurjänniteverkossa on käytössä laukaiseva maasulkusuojaus. Kun muuntajalle tarvitaan ylijännitesuojasta, on käytetty muuntajan yläjännitepuolella kipinäväliä sijasta virtaa rajoittavia ylijännitesuojia suoran maasulun todennäköisyyttä pienentämään ja käyttämällä koteloituja muuntamoita tai eristämällä muuntajan liitäntäjohtimet ja navat, mutta tämä ei koske pylväsmuuntamoiden erottimen napoja. Muuntamolla on potentiaalinhjaus tai on käytetty jotain M -luokan erikoistoimenpidettä. Muuntamon pienjänniteverkon haaroissa on vähintään yksi johtohaaran maadoitus ja standardin SFS 6000-8-801 asettamat maadoitusvaatimukset pienjänniteverkolle täyttyvät. Pienjänniteverkolla ei syötetä tiloja, joiden ulkotiloissa voi oleskella usein runsaasti ihmisiä. [4, s. 144.]

Kertoimelle F on annettu arvo 5, jos edellisen kappaleen vaatimukset täyttyvät ja syötetään yksittäistä sähkölaitteistoa tai rakennusta. Laitteistossa tai rakennuksessa tulee myös olla pääpotentiaalintasaus, joka kytketään maadoituselektrodiin. Jos rakennuksen potentiaalintasaukseen ei ole mahdollista kytkeytyä, suositellaan käytettäväksi perustusten ympärille asennettavaa rengasta. Jos kiinteiden sähköasennusten todennäköisten

sähkölaitteiden käyttöpaikkojen eli 50 metrin sisällä maaperä on erityisen huonosti johettava. [4, s. 144.]

Sähköverkostoa suunniteltaessa kannattaa yleisesti ottaa huomioon suunnittelukohteen oma sijainti, jossa on tietynlainen maaperä ja maadoitusimpedanssi, eli onko mahdollista $2 \times U_{tp}$ arvoon edes mahdollista päästä suunnittelukohteen sijainnilla. Jos lähtötilanteessa $2 \times U_{tp}$ arvoon pääseminen on lähes mahdotonta, kannattaa suunnittelijan miettiä, suunnitteleeko sähköverkon suoraan $4 \times U_{tp}$ arvoja ajatellen, joka helpottaa suunnittelun tekemistä, kun tietää heti kuinka vahvaa maadoitusverkkoa suunnittelukohteeseen tullaan todennäköisesti rakentamaan.

6.5 Sähköasemat

Sähköasemille on annettu määritelmä, että kosketusjännitteet ovat tarpeeksi alhaalla, jos käytetään laajaa maadoitusjärjestelmää. Jos sähköasemalla on mahdollisuus olla yhteydessä sähköaseman ulkopuolella suoraan, tai jakelumuuntamon kautta johon sähköaseman kautta menee yhdistetty maadoitus, tulee varmistaa, että pienjännitejärjestelmän maadoituksiin ei siirry liian isoa kosketusjännitettä. Tämä tilanne voidaan varmistaa kahdella tavalla. Pienjännitejärjestelmän ja jakelumuuntamon maadoitusjärjestelmät tai yhdistetyt maadoitukset ja sähköaseman omat maadoitukset eivät ole yhteydessä toisiinsa, tai toteamalla laskelmilla ja mittauksilla, että kosketusjännitteet U_t ja ihon läpi menevä virta I_b ovat tarpeeksi pieniä pienjännitemaadoitusjärjestelmässä. [4, s. 143.]

7 Maadoitusverkon mittaukset

Maadoitusjärjestelmän oma maadoitusresistanssin arvo tulee mitata määräjain sen oman toiminnan varmistamiseksi. Jos maadoitusjärjestelmä ei ole yhteydessä suurjännitejärjestelmiin, tulee maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi mitata kuuden tai kahdentoista vuoden välein riippuen siitä, onko maadoitus, kuinka monen maadoitusjohtimen varassa. Jos maadoitus on yhden maadoitusjohtimen varassa, tulee tarkistusmit-

taukset tehdä kuuden vuoden välein. Jos maadoitus on useamman kuin yhden maadoitusjohtimen varassa, tulee tarkistusmittaukset tehdä kahdentoista vuoden välein. [4, s. 145.]

Jakeluverkoissa mitataan aina uuden rakennetun verkon resistiivisyysarvot, jotta saadaan standardit täyttävä, turvallinen verkko, josta ei aiheudu vaaraa ihmisille tai eläimille maasulkutilanteissa. Resistiivisyysarvot eri maaperissä vaihtelevat suuresti kuten taulukossa 7 näkyy, joten maadoitusta rakentaessa tulee ottaa maatyypin huomioon isona osana, että tietää, kuinka vahvaa maadoitusta tulee lähteä rakentamaan.

Taulukko 7. Yleisiä resistiivisyysarvoja maaperälle, betonille ja vedelle. [4, s. 147]

Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihteluvälit Ωm
Savi	40	25 ... 70
Saven sekainen hiekka	100	40 ... 300
Lieju, turve, multa	150	50 ... 250
Hiekka, hieta	2000	1000 ... 3000
Moreenisora	3000	1000 ... 10000
Harjusora	15000	3000 ... 30000
Graniittikallio	20000	10000 ... 50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50 ... 500
Betoni kuivana	10000	2000 ... 100000
Järvi- ja jokivesi	250	100 ... 400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10 ... 150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1 ... 5

Maaperän resistiivisyydsmittaukset tehdään niin sanotulla neljän piikin menetelmällä (esimerkiksi wenner-metelmällä), jolla voidaan mitata maaperänresistanssi alustavasti eri maan syvyyksillä. [4, s. 127.]

Maadoitusresistanssit ja -impedanssit voidaan mitata useilla eri tavoilla ja käytettävän tavan määrittää verkon laajuus, sekä se että kuinka häiriöherkkää verkko on. Mittauksia tehdessä tai aloittaessa tulee muistaa varoa kosketusjännitteitä, joita voi järjestelmissä vielä olla. Standardissa on mainittu neljä mittaustapaa, jota käytetään ja jokainen mittaa hieman eriasioita, joista resistanssi voidaan katsoa suoraan tai laskea. [4, s. 127.]

Käännepistemenetelmä maadoitusmittarin kanssa on käytössä, kun halutaan mitata yhden maadoituselektrodin arvot ja kyseinen mittaustyyli sopii myös pienille tai keskikokoisille maadoitusjärjestelmille. Esimerkkeinä mitattavista kohteista ovat vaakaelektrodit, sauvaelektrodit sekä ilmajohtopylväiden elektrodit, jotka ovat kiinnitettynä ilmajohtojen ukkosjohtimien maadoituksiin, keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmille, sekä joihinkin pienjänniteverkon maadoitusjärjestelmiin. Standardissa on annettu suositus, että taajuus vaihtojännitteellä ei ylitä 150 Hz. [4, s. 127.]

Käännepistemenetelmässä mitattavan maadoituselektrodin, jännitepiikin ja virtapiikin tulee olla mahdollisimman kaukana toisistaan, sekä suorassa linjassa jotta mittaus toimii. Jännitepiikin tulee olla mitattavasta maadoituselektrodista minimissään 2,5 kertaa elektrodin suurin laajuus, mutta vähintään 20 m. Virtaelektrodille on annettu vastaavat arvot niin, että minimissään 4 kertaa elektrodin suurin laajuus, mutta vähintään 40 m. Suomessa on määritetty, että voi olla tarvetta huonojen maadoitus olosuhteiden takia käyttää pidempi etäisyyksiä esimerkiksi 200 m. [4, s. 127.]

Suuritaajuista maadoitusmittaria käytetään yksittäisten pylväiden maadoitusresistanssien mittaamiseen, ilman että ukkosjohtinta tarvitsee eristää. Mitattaessa on muistettava, että mittausvirran taajuus on tarpeeksi suuri, ettei naapuripylväiden ja ukkosjohtimien yhteinen ketjuimpedanssi vaikuta suuresti mitattuun maadoitusresistanssiarvoon. [4, s. 127.]

Voltti-ampeerimittarimenetelmä on käytössä, kun halutaan mitata suuren maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssia. Maadoitusjärjestelmän mittaus suoritetaan syöttämällä mittausvirta 1m maadoitusjärjestelmään kytkemällä kaukana olevan maadoituselektrodin ja maadoitusjärjestelmän välille suunnilleen järjestelmätaajuinen vaihtojännite. Maadoitusjärjestelmään tulee mitattava jännite edellisellä menetelmällä ja kyseisessä mittauksessa ei irroteta yhdistettyjä ukkosjohtoja, eikä maadoituselektrodien tavalla toimivia kaapelivaippoja. [4, s. 127.]

Maadoitusimpedanssin itseisarvolle on annettu laskukaava 3 standardissa, jossa U_{em} on maadoitusjärjestelmän ja maadoituspiikin välissä olevan jännitteen itseisarvo, I_m on mittausvirran itseisarvo ja r eli johdon reduktiokerroin referenssimaahan verrattuna.

Reduktiokertoimen voi mitata tai laskea ja ilmajohdolle, jolla ei ole ukkosjohtinta ja armeeraamattoman ja vaipattoman kaapelin itseisarvo r on 1. [4, s. 128.]

$$z_E = \frac{U_{EM}}{I_{M+r}} \quad (3)$$

Tilanteessa, jossa virransyöttöjohdon vieressä kulkevien johtojen ukkosjohtimet ovat yhdistetty kaukana olevaan maadoituselektrodiin ja mitattavaan maadoitusjärjestelmään, tulee huomioida myös niiden arvot. Tilanteessa, jossa mittauspisteiden välissä kulkee molemmista päistään maadoitettu kaapeli, jossa on pieni maadoitusresistanssi vaipalla, kulkee suurin osa mittausvirrasta vaipan kautta takaisin. Jos kaapelin ympärillä on eristävää päällystä, voi olla syytä irrottaa vaipan omat maadoitukset. Tapauksessa, jossa metallivaippa toimii maadoituselektrodina maadoitusjärjestelmälle, ei sitä tule ottaa irti. [4, s. 128.]

Mittausta tehdessä tulee maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan maadoituselektrodin olla tarpeeksi kaukana toisistaan ja yhdeksänkymmenen asteen kulmassa toisistaan, jotta vaikutusalueet eivät vaikuta toisiinsa. Tilanteen salliessa tulee käyttää niin suurta mittausvirtaa, että maadoitusjännite ja kosketusjännitteet ovat suurempia kuin häiriöjännitteet, jos häiriöjännitteitä esiintyy. Mittausvirran suuruus tulisi olla viisikymmentä ampeeria, jotta päästään edelliseen tilanteeseen ja jännitemittarille on annettu ohjeistus, että sen sisäisen resistanssin tulee olla kymmenkertainen verrattuna maapiikin maadoitusresistanssiin. Jos häiriöjännitteitä esiintyy, ne tulee eliminoida pois. [4, s. 128.]

Yksittäisiin resistansseihin perustuvaa menetelmää voidaan käyttää, jos maadoitusjärjestelmä muodostuu yksittäisistä maadoituselektrodeista, jotka eivät vaikuta toisiinsa, mutta ovat kuitenkin toisiinsa yhdistetty yhdistysjohtimilla. Kytkemällä irti yhdistysjohtot ja mittaamalla käännepistemenetelmällä yksittäisten maadoituselektrodien omat maadoitusresistanssit ja laskemalla liitosjohtimien omat impedanssit, voidaan maadoitusimpedanssi määrittää liitosjohtimien ja maadoitusresistanssien muodostamasta ekvivalenttipiiristä. [4, s. 128.]

8 Kustannustehokkuus eri maadoitustyyeillä

Jakeluverkkoja rakennettaessa maadoitukset tehdään kuparilla lähes poikkeuksetta ja kuparin hinnan takia on tärkeää miettiä, millä tyyllillä maadoituksia ruvetaan rakentamaan. Taajama-alueella kaapelien asennus etäisyydet eivät useasti ole sataakaan metriä verrattuna haja-asutus alueiden useiden satojen metrien välisiin kaapelivetoihin, joten on huomattava, että saattomaadoitukset saattavat olla erittäin kalliita verrattuna siihen, että rakennettaisiin sähkölaitteille omat maadoituskuparit, mutta saattomaadoituksilla useissa tilanteissa voidaan saada paremmat maadoitusimpedanssi arvot verrattuna pelkkiin sähkölaitteiden omiin maadoituksiin.

KJ-puolella isommat kaapelit johtavat parempiin maadoitusarvoihin luonnollisesti, koska kaapelien kosketussuojat ja mahdolliset keskusköydet ovat parempia maadoituksessa, mutta yleisesti ei kannata kaapelien kokoa nostaa maadoittamisen kannalta, koska kaapelien asentaminen hankaloituu ja hinta nousee huomattavasti. Saattomaadoittaminen pienentää maadoitusimpedanssi arvoja suuresti ja on suositeltavaa tehdä saattomaadoitukset, että maadoitusverkkoa ei ole pakollista vahvistaa jokaisella muuntamolla erikseen, eikä jouduta tekemään muuntajalle erikoistoimenpiteitä, joista aiheutuu kanssa lisäkustannuksia rakentamisessa. Muuntamoille omien maadoituksien tekeminen voi myös muodostua erittäin kalliiksi, jos muuntamolla on huono maaperä maadoitusimpedanssia ajatellen.

Maasulkuvirtoja kannattaa yleisesti kompensoida, vaikka kompensointilaitteisto onkin lisäinvestointi sähköverkkoja ajatellen. Kompensoimalla maasulkuvirtoja voidaan saavuttaa suuria hyötyjä jakeluverkkoja ajatellen, koska pienemmillä maasulkuvirta-arvoilla voidaan rakentaa maadoituksen kannalta kevyempää verkkoa, joka on huomattavasti edullisempaa materiaaleissa ja suunnittelussa. Vikatilanteissa voidaan myös jatkaa verkon käyttöä, jos kompensointia on tarpeeksi ja kosketusjännitteet pysyvät hallussa. Ilman keskeytyksiä ei tarvitse maksaa keskeytyskorvauksia jakeluverkon asiakkaille, joka voi isommassa vikatilanteessa muodostua todella suureksikin kustannukseksi.

Seuraavassa on esimerkkitapaus, jossa lasketaan KJ-puolelle kustannuksia. Kytetään viisi muuntajaa toisiinsa 500 metrin välimatkoilla erilaisilla kaapelityypeillä. Kaapeleina käytetään normaalia AHXAMK-W 3x150AL +35CU 20 kV:n Wiski-kaapelia yksinään ja

samaa normaalia Wiski-kaapelia saattokuparin kanssa, sekä AHXAMK-WP 3x150AL 20 kV:n Wiski Plain-kaapelia. Laskun tarkoituksen on selvittää, mitä KJ-kaapelityyppejä on parasta käyttää maadoituksessa kustannuksen näkökulmasta, jotta kaapeli kestää eikä ylimitoiteta maadoituksia. Erilaiset KJ-maadoitustyyliet eroavat kustannuksiltaan suuresti, joten on tärkeää ottaa huomioon, ettei turhaan ylimitoita sähköverkkoa, koska siitä ei saada hyötyä turvallisuusnäkökulmasta, sekä se on erittäin kallista. Kaapeleina käytetään Prysmian kaapeleita, joiden kaapelityypit ilmoitettiin edellä olevassa tekstissä ja ilmoitetut hinnat ovat SLO:n sivuilta. Taulukossa 8 on vertailtavien kaapeleiden teknisiä arvoja, sekä kustannukset.

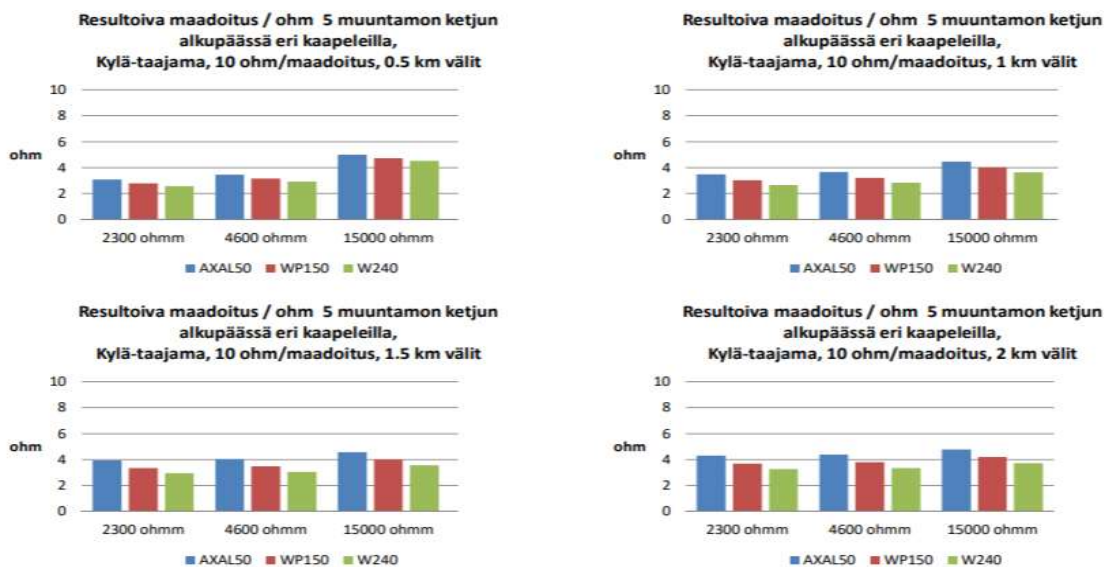
Taulukko 8. Vertailtavien kaapeleiden teknisiä arvoja ja kustannukset.

KAAPELI- TYYPPI	VAIHEJOH- TIMEN RE- SISTANSSI	INDUK- TANSSI VAI- HETTA KOHTI	KÄYTTÖKA- PASITANSSI	MAASULKU- VIRTA	SUURIN SALLITTU OIKOSUL- KUVIRTA 1S VAIHEJOH- DIN	SUURIN SALLITTU OIKOSUL- KUVIRTA 1S KOSKETUS- SUOJA	SUURIN SALLITTU OIKOSUL- KUVIRTA 1S KESKUS- KÖYSI	KUSTAN- NUKSET VA- LITUSTA KAAPELI- TYYPEISTÄ
AHXAMK-W 3X150AL 20 KV	0.27 Ω/km	0.37 mH/km	0.26 µF/km	2.8 A/km	14.1 kA	3.0 kA	5.0 kA	47200€
AHXAMK-W 20 KV WISKI + SAATTOKU- PARI	0.27 Ω/km	0.37 mH/km	0.26 µF/km	2.8 A/km	14.1 kA	3.0 kA	5.0 kA	53400€
AHXAMK-WP 20 KV	0.27 Ω/km	0.37 mH/km	0.26 µF/km	2.8 A/km	14.1 kA	3.0 kA	-	42400€

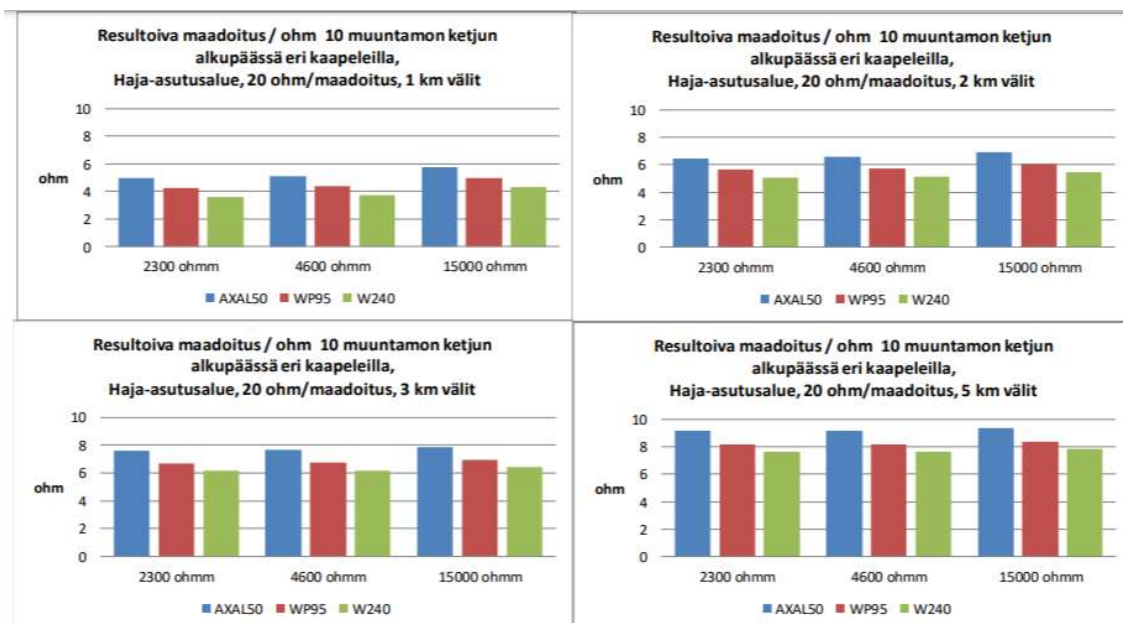
Normaali-kaapeliksi on valittu AHXAMK-W 3x150AL+35CU 20 kV Wiski. Kyseisellä kaapelilla on hintaa SLO:n sivujen mukaan 23,20 €/m ja viiden muuntamon välissä kaapelia on yhteensä kahdentuhannen metrin verran, joten hinnaksi muodostuu 47200 €. Tapauksessa, jossa on saattokupari mukana, tulee hintaa lisää 3,10 €/m, joten loppuhinta

on 53400 € ja AHXAMK-WP 3x150AL 20 kV Wiski Plain-kaapelilla hinta on 21,20 €/m, joten loppukustannus on 42400 €. Eri kaapeli-ratkaisuilla tulee oikosulkuvirta-kestoisuuksissa suuria eroja esimerkiksi AHXAMK-WP 3x150AL 20 kV Wiski Plain-kaapelissa ei ole keskusköyttä, mutta kaikki ratkaisut ovat teknisesti toimivia, kunhan vain kiinnitetään huomiota oikosulkuvirtojen määriin.

Kolmessa vaihtoehdossa suurin kysymys on, ketjutetaanko muuntamoiden maadoitukset vai ei, koska ketjuttamalla muuntamoihin saadaan suurta hyötyä maadoitusimpedanssia ajatellen, mikä vuorostaan johtaa alennettuihin kosketusjännitearvoihin. Ketjuttamalla muuntamot saadaan vikatilanteessa hyötyä muiden muuntamoiden maadoituksesta ja suurempi kuparin määrä muuntamoiden välissä on hyödyksi vikavirran ohjaimiseksi, joten kalliimmat kaapeliratkaisut ovat hyviä silloin. AHXAMK-WP 3x150AL 20 kV Wiski Plain-kaapelilla saadaan jo huomattava hyöty maadoitusten yhdistämisestä, kun se kestää vikavirrat niin kuin tässä tapauksessa, mutta normaali AHXAMK-W 3x150AL+35CU 20 kV Wiski-kaapelin keskusköysi lisää vielä maadoitusten yhdistämisestä saatavaa hyötyä. Tarvittava kompensointi-määrä myös laskee, kun maadoitusimpedanssin määrä pienenee ketjuttamisen takia, mikä vuorostaan vaikuttaa kustannuksiin suoraan, joten kannattaa vaihtoehtoja tapauskohtaisesti tutkia. Maaseudulla erityisesti kannattaa kiinnittää huomiota hintoihin kaapelietäisyyksien takia, koska kompensointilaitteisto voi tulla halvemmaksi vaihtoehdoksi verrattuna pitkän kaapelivedon vahvistamiseen, mutta todennäköisesti on järkevämpää kompensoida pienellä kompensointilaitteistolla kaapelin vahvistamisen sijasta. Kuvissa 5 ja 6 näkyy muuntamoiden ketjutuksesta resultoivat maadoitusimpedanssit kahdessa eri tapauksessa.



Kuva 5. KJ-muuntamoiden ketjutuksesta resultoivat maadoitusimpedanssit puolen kilometrin väleillä taajama alueella. [9, s. 24.]



Kuva 6. KJ-muuntamoiden ketjutuksesta resultoivat maadoitusimpedanssit yhden kilometrin väleillä haja-asutus alueella. [9, s. 22.]

Tapauksessa, jossa verkossa olisi jo aikaisemmin asennettua kompensointilaitteistoa, voitaisiin rakentaa halvempaa verkkoa maadoituksen puolesta, koska maasulkuvirrat olisivat suhteellisen pienet. Halvemman verkon rakentaminen ei välttämättä olisi kannattavaa, koska verkko olisi toimintavarmempaa vahvemalla verkolla, jos kompensointilaitteistoon tulisi vikaa ja maasulkuvirrat nousisivat äkillisesti, mutta yleisesti kompensointilaitteiston vikaantuminen voidaan myös huomioida suojauksien asetuksilla. Järkevintä on rakentaa toimivaa verkkoa huomioiden kompensointilaitteisto ja suojauksella huomioida vikatilanteet, että ei tarvitse turhaan maksaa ylimääräistä kaapelin vahvistamisesta.

Esimerkkikustannuslaskelman mukaan loppuhinnat kaapelivetojen mukaan eivät eroa ihan järkyttävästi, mutta jos kaapeloidaan isompia alueita, joihin kaapelia tulee kymmeniä kilometrejä, tai samoihin kaapeliojiin useampia kaapeleita niin kuin yleensä onkin, rupeavat kaapelihinnat vaikuttamaan huomattavasti enemmän loppukustannuksiin ja kaapelivalinnalla on suurempi merkitys. Suuremmissa kaapeloinneissa tulee kiinnittää huomiota erityisesti siihen, onko halvempaa kaapeloida kalliimmalla kaapelivalinnalla vai kompensoida maasulkuvirtaa pois, mutta todennäköisesti kompensointi tulee halvemmaksi vaihtoehdoksi, kun yhdellä kompensointilaitteella voidaan kompensoida suurempia alueita. AHXAMK-WP 3x150AL 20 kV Wiski Plain-kaapeli on halvin kolmesta vaihtoehdoista ja toimii teknisesti, mutta sitä käytettäessä tulee kiinnittää huomioita vikavirtoihin erityisemmin, jos ne nousevat jossain kohtaa maadoitusjärjestelmää suuremmiksi esimerkiksi sähköaseman läheisyydessä. Normaali AHXAMK-W 3x150AL+35CU 20 kV Wiski-kaapeli toimii vikatilanteissa hyvin keskusköyden lisäämällä vikavirran kestolla, mutta on hieman kalliimpi vaihtoehto verrattuna AHXAMK-WP 3x150AL 20 kV Wiski Plain ja vastaavasti saattokuparin lisääminen AHXAMK-W 3x150AL+35CU 20 kV Wiski-kaapelin rinnalle lisää taas kaapelin vikavirtakestoaa, mutta myös kustannuksia vähän.

8.1 Taajamaja-alue

Taajama-alueille on yleensä lähiöalueita, joissa on omakotitalo tontteja vierekkäin useita ja jakokaappien väliset matkat eivät välttämättä ole edes sataa metriä, joten kannattaa saattomaadoitus rakentaa useasti. Taajamassa tulee myös vastaan tapauksia, jossa ta-

loja on hieman harvemmassa, jolloin kannattaa miettiä jakokaapeille omien maadoitusten rakentamista kustannuksien ja maadoitusarvojen puolesta, jos maaperä sen vain sallii maadoitusarvojen puolesta.

Poikkipinnaltaan 25 mm²:n kupariköysi maksaa kaksi ja puoli euroa metriltä Sähkötukun hinnaston mukaan, ja jos jakokaappien välinen matka on viisikymmentä metriä, tulee saattomaadoitukselle hintaa 125 euroa. Tapauksessa, jossa on hyvä maadoitusperä ja maadoitusimpedanssi jakokaapilla, voidaan tehdä maadoitus suoraan jakokaapille ja saadaan riittävät arvot standardien täyttämiseen. Jos tehdään 25 metrillä kuparikaapelia rengasmaadoitus jakokaapille, sille tulee hintaa 62,50 euroa. Saattomaadoituksella saadaan todennäköisesti paremmat maadoitusimpedanssiarvot pienellä lisäinvestoinnilla, joten kannattaa maadoitus tehdä saattomaadoituksilla. huonossa maadoitusympäristössä maadoitusimpedanssit eivät välttämättä täytä standardeja jakokaapin omalla maadoituksella ja maadoitusympäristöt voivat vaihdella taajama-alueillakin runsaasti, joten saattomaadoituksen rakentaminen on järkevämpää, että saadaan maadoituksellisesti vahvaa sähköverkkoa kaikille jakokaapeille.

Poikkipinnaltaan 35 mm²:n kupariköysi maksaa 3,30 euroa metriltä sähkötukun hinnaston mukaan ja jos muuntamoiden välinen matka on viisisataa metriä, tulee saattomaadoitukselle hintaa 1650 euroa. Tapauksessa, jossa on hyvä maadoitusperä ja maadoitusimpedanssi muuntamolla, voidaan tehdessä maadoitus suoraan muuntamolle saada ehkä riittävät arvot standardien täyttämiseen. Jos tehdään 25 metrillä kuparikaapelia rengasmaadoitus muuntamolle, sille tulee hintaa 82,5 euroa. Maadoitusimpedanssi arvot eivät ole todennäköisesti lähelläkään arvoja, mitä yhdistämällä muuntamon oma maadoitus ja saattomaadoitus saataisiin maadoitusimpedanssiksi. On kannattavaa maadoitus tehdä yhdistämällä muuntamoiden maadoitukset ja muuntamon oma maadoitus, sekä tarvittaessa saattomaadoitus, jos tarvittavat arvot eivät muuten täyty, että voi varmistua maadoitusverkon riittävästä vahvuudesta.

8.2 Haja-asutusalue

Haja-asutusalueella yleensä asutus on hyvin harvassa ja kaapelivedot ovat tyypillisesti yli sata metrisiä, joten jakokaappienkin välinen etäisyys on yleensä useita satoja metrejä.

Saattokuparin rakentaminen voi tulla erittäin kalliiksi tällöin verrattuna omien maadoitusten rakentamiseen joka jakokaapille, mutta omien maadoitusten rakentaminen hankalalla maaperällä on myös erittäin kallista eikä maadoitusarvoja välttämättä saada siltikään täytettyä. Jakokaapeille rakentamalla omat maadoitukset saadaan myös aikaiseksi hyvät maadoituspisteet, kunhan maaperä on hyvää maadoituksen kannalta tasaisilla välimatkoilla jakeluverkkoa katsoessa, joka sallii hyvän maadoitusarvon.

Poikkipinnaltaan 25 mm²:n kupariköysi maksaa kaksi ja puoli euroa metriltä sähkötukun hinnaston mukaan ja jos jakokaappien välinen matka on kaksisataa metriä, tulee saattomaadoitukselle hintaa viisisataa euroa. Tapauksessa, jossa on hyvä maadoitusperä ja maadoitusimpedanssi jakokaapilla, voidaan tehdä maadoitus suoraan jakokaapille ja saadaan riittävät arvot standardien täyttämiseen. Jos tehdään 25 metrillä kuparikaapelia rengas maadoitus jakokaapille, sille tulee hintaa 62,50 euroa. Saattomaadoituksen käyttäminen ei olisi kannattavaa verrattuna, että tekisi jakokaapille oman maadoituksen. Huonossa maadoitusympäristössä maadoitusimpedanssit ei välttämättä täytä standardeja jakokaapin omalla maadoituksella ja on pakko turvautua saattomaadoituksiin, joten maadoittamistyyliä joudutaan katsomaan aina tapauskohtaisesti.

Poikkipinnaltaan 35 mm²:n kupariköysi maksaa 3,30 euroa metriltä sähkötukun hinnaston mukaan ja jos muuntamoiden välinen matka on yhden kilometrin, tulee saattomaadoitukselle hintaa 3300 euroa. Tapauksessa, jossa on hyvä maadoitusperä ja maadoitusimpedanssi muuntamolla, tehdessä maadoitus suoraan muuntamolle saadaan ehkä riittävät arvot standardien täyttämiseen. Jos tehdään 25 metrillä kuparikaapelia rengas maadoitus muuntamolle, sille tulee hintaa 82,50 euroa, mutta maadoitusimpedanssi arvot eivät ole todennäköisesti lähelläkään arvoja, mitä yhdistämällä muuntamon oma maadoitus ja saattomaadoitus saataisiin maadoitusimpedanssiksi. On kannattavaa maadoitus tehdä yhdistämällä muuntamoiden maadoitukset ja muuntamon oma maadoitus, sekä tarvittaessa saattomaadoitus, jos tarvittavat arvot eivät muuten täyty, että voi varmistua maadoitusverkon riittävästä vahvuudesta.

9 Yhteenveto

Insinööriyön aiheena oli jakeluverkon maadoituksen suunnitteluohjeen tekeminen. Muuttuva sähköverkko asettaa uusia haasteita maadoitusten tehokkaalle tekniselle ja taloudelliselle suunnittelulle ja ohjeella halutaan tuoda esiin tärkeimpiä asioita maadoituksen suunnitteluun liittyen. Nykyisin jakeluverkon suuren maakaapelointi määrän takia joudutaan rakentamaan maadoituksia eri tavalla kuin ennen ja ohjeella on tarkoitus selkeyttää vaatimuksia mitä maadoituksille on annettu. Ohjetta voidaan tulevaisuudessa käyttää suunnittelijoiden apuna jakeluverkon maadoituksia suunniteltaessa.

Työssä selvitettiin nykyisten standardien asettamia rajoituksia jakeluverkkojen maadoituksille ja maadoitusten tarkoitusta yleisesti suojauksen osana. Maadoitusverkkojen erilaisiin rakennustyyliin tehtiin yleinen selvitys ja katsottiin minkälaisissa ympäristöissä voi maadoituksen rakennustyyliä esiintyä. Jakeluverkon mahdollisia mittaamistyyliä selvitettiin ja tarkasteltiin mihin maadoitusverkko ympäristöihin erilaiset mittaamistyyli sopivat. Kustannustehokkuuteen otettiin työssä kantaa huomioon ottaen maadoitusten nykyinen suunnittelutilanne.

Työssä havaittiin standardien asettamat rajoitukset maadoituksille ja tehtiin maadoitusohje standardeja seuraten. Maadoitusohjetta lähdettiin tekemään yleistasolla ja sitä voitaisiin käyttää jatkossa käyttäen tukemaan maadoitusten suunnittelua teknisesti toimivasti ja kustannustehokkaasti. Maadoitusohje saatiin tehtyä Rejlersille ja sitä voidaan käyttää jatkossa maadoitusohjeen tarkoitettuihin käyttötarkoituksiin.

Lähteet

- 1 Rejlers Yritys ja Konserni. 2019. Verkkoaineisto. <<https://www.rejlers.fi/>>. Luettu 20.05.2019
- 2 Sähköverkon automaatio ja suojaus. Verkkoaineisto. <http://www.leenakorpi-nen.fi/archive/svt_opus/5sahkoverkon_automaatio_ja_suojaus.pdf>. Luettu 10.03.2020
- 3 Aro, Martti; Elovaara, Jarmo; Karttunen, Matti; Nousiainen, Kirsi & Palva, Veikko. 2015 Suurjännitetekniikka. 4., painos. Otatieto.
- 4 Standardi SFS 6001:2018 5. Painos Suurjännitesähköasennukset
- 5 Standardi SFS 6000-5-54. Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojajohtimet
- 6 ABB TTT-käsikirja. Verkkoaineisto. <http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTT/08_0_Maasulkusuojaus.pdf>. Luettu 28.2.2019
- 7 Maasulkutilanne ja kompensoinnin tarkoitus. Verkkoaineisto Multirel. <<https://multirel.fi/kompensointi-ja-maasulkureleet/maasulkuvirran-kompensointi/maasulkutilanne-ja-kompensoinnin-tarkoitus/>>. Luettu 22.05.2019
- 8 Hajautettu kompensointi. Verkkoaineisto Maviko. <<https://www.maviko.fi/tuotteet/hajautettu-kompensointi/>>. Luettu 22.05.2019
- 9 Mäkinen, Antti. 2016. Selvitys keskijänniteverkon maadoitusjärjestelmästä. Verkkoaineisto Tampereen teknillinen yliopisto. <<http://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Selvitys%20keskij%C3%A4nniteverkon%20%20maadoitusj%C3%A4rjestelmist%C3%A4.pdf>>. Luettu 16.4.2019
- 10 Standardi SFS 6000-4-44. Suojausmenetelmät. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä
- 11 Standardi SFS 6000:2017 4. Painos pienjännitesähköasennukset