



TEKNIikka JA LIKENNE

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

INSINÖÖRITYÖ

SÄHKÖASEMAN MAADOITTAMINEN

Työn tekijä: Sakari Lehtonen
Työn valvoja: Tkl Jarno Varteva
Työn ohjaaja: toteutuspäällikkö,
Niklas Grönroos

Työ hyväksytty: 17.4. 2009

Lehtori Jarno Varteva



ALKULAUSE

Tämä insinööriytyö tehtiin Siemens Osakeyhtiölle. Työn ohjaajana toimi toteutuspäällikkö Niklas Grönroos ja valvojana lehtori Jarno Varteva Metropolia Ammattikorkeakoulusta. Haluan kiittää molempia saamastani tuesta ja neuvoista.

Esimieheni Niklas Grönroos ansaitsee suuret kiitokset, koska hän otti minut harjoittelijaksi ja tarjosi mahdollisuuden työn tekemiselle. Lisäksi haluan kiittää myös muita mukana olleita ja työhöni myötävaikuttaneita henkilöitä.

Helsingissä 17.4.2009

Sakari Lehtonen

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Sakari Lehtonen	
Työn nimi: Sähköaseman maadoittaminen	
Päivämäärä: 17.4.2009	Sivumäärä: 40 s. + 8 liitettä
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Työn valvoja: lehtori Jarno Varteva	
Työn ohjaaja: toteutuspäällikkö Niklas Grönroos	
<p>Tässä insinööriyössä on esitelty sähköaseman maadoittamisen kannalta oleellisia seikkoja ja käyty yksityiskohtaisesti läpi maadoitusten mitoittamiseen, suunnitteluun ja toteuttamiseen liittyviä asioita. Mitoitusta ja suunnittelua koskevaa teoriaa sekä laskenta periaatteita on tarkasteltu standardin SFS 6001+A1 pohjalta ja työn suunnittelua käsittelevä osio tehtiin todellista sähköasemaa esimerkkinä käyttäen. Teoriaa ja tietoa hankittiin standardeista, alan kirjallisuudesta, laitteistovalmistajilta ja sähköverkkoyhtiöiden ohjeista.</p> <p>Aluksi on esitelty työn kannalta oleellista teoriaa niin maadoittamisen kun niiden mitoittamisen ja suunnittelun osalta. Teoriaa on käsitelty lähinnä suurjännitemaadoitusten kannalta, koska maadoitus on aihealueena todella laaja käsiteltäväksi. Seuraavaksi on esitelty maadoitusten mittauksiin liittyvää teoriaa ja eri mittausmenetelmiä, koska mittauksilla saadaan tieto maaperän ominaisresistanssista, joka on tärkeä tekijä maadoitusten kannalta. Tämän jälkeen maadoitusten suunnittelu on käyty läpi todellista sähköasemaa esimerkkinä käyttäen, jolle on laadittu maadoitusten perus- ja mallisuunnitelma.</p> <p>Viimeisessä kappaleessa on käsitelty maadoitusten toteuttamista sähköasemalla. Kappaleessa on käsitelty maadoituselektrodien ja maadoitusjohtimien toisiinsa liittämistä sekä selvitetty miten sähköaseman eri jännitetasojen maadoitukset saadaan liitettyä yhtenäiseksi laajaksi maadoitusjärjestelmäksi. Maadoitusjärjestelmä koostuu tällöin päämuuntajan maadoituksista, ulkona olevien ensiolaitteiden maadoituksista, rakennuksen ja sen sisällä olevien kojeistojen sekä jakokaappien maadoituksista. Lopuksi on käyty läpi eri laitteiden ja osa-kokonaisuuksien maadoittaminen esimerkki kuvia hyväksi käyttäen.</p> <p>Työn on tarkoituksena toimia ohjeena maadoitusten suunnittelulle ja asentamiselle. Toteutusta koskevat asiat ovat yleisiä periaatteita, jonka vuoksi maadoitukset on toteutettava aina sähköverkonhaltijan ohjeiden ja vaatimusten perusteella.</p>	
Avainsanat: maadoittaa, maadoitusjärjestelmä, maadoituselektrodi, maadoitusjohdin, maadoitusresistanssi	

ABSTRACT

Name: Sakari Lehtonen	
Title: Substation Earthing	
Date: 17 April 2008	Number of pages: 40
Department: Electrical Engineering	Study Programme: Power Systems
Instructor: Jarno Varteva, Senior Lecturer	
Supervisor: Niklas Grönroos, Engineering Manager	
<p>The purpose of this graduate project is to examine important facts concerning high voltage substation earthings. The aim is to introduce in detail how the calculation of earthing conductor sizing is carried out and how substation earthings are designed and constructed in practice. The planning, design and the calculation principles of the earthing system are performed according to the Finnish standard SFS 6001+A1. An existing substation is used to represent how the design process is carried out. This study is based on information obtained from hardware and software manufacturers, standards, professional literature and from transmission system operators' instructions.</p> <p>First, the essential theory regarding earthing and design of the earthing system is introduced. The theory focuses on high voltage earthing in particular. Also, the measurements of an earthing system and the measuring methods are described because the measurements provide important information on soil resistivity, which is a decisive factor for the earthing system. After that the design of the earthing system is presented with the help of an existing substation and the earthing plan is implemented.</p> <p>The final chapter demonstrates how earthings are carried out in a substation. It describes how earthing conductors are connected to the earthing electrodes (earthing grid). It also presents how different voltage level earthings are integrated as part of an extensive earthing arrangement. This means that the earthings comprise of main transformer earthings, outdoor primary equipment earthings, switchgear building earthings and earthings which are inside the building, for example medium voltage switchgear earthings and distribution cabinets earthings. To finish off, different equipment earthings and earthing subassembly are demonstrated with example photos.</p> <p>Based on the findings of this thesis a document was created which gives information about the design of an earthing system and earthing construction in practice. Information affecting practical construction is, however, universal and therefore earthings should be carried out according to the transmission system operator's instructions.</p>	
Keywords: Earth (verb), Earthing Arrangement, Earth Electrode, Earthing Conductor, Resistance to Earth	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	1
2	YLEISTÄ MAADOITTAMISESTA	2
2.1	Maadoittamisen tarkoitus	2
2.2	Maadoitusjärjestelmä	3
2.3	Maaperän johtavuus ja ominaisresistanssi	4
2.4	Maadoitusresistanssi	5
2.5	Maadoitusjärjestelmien mitoitus	7
2.5.1	<i>Mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys</i>	8
2.5.2	<i>Terminen lujuus</i>	8
2.5.3	<i>Kosketus- ja askeljäännitteiden vaikutus</i>	10
2.5.4	<i>Maadoitusjäännite</i>	12
2.5.5	<i>Kosketusjännite vaatimuksien toteutuminen</i>	13
2.6	Sähköaseman muuntajan tähtipisteen maadoitustavat	14
3	MAADOITUKSIEN MITTAUKSISTA	16
3.1	Maaperän johtavuuden mittaaminen	16
3.2	Maadoitusresistanssin mittaaminen	17
3.2.1	<i>Käännepistemenetelmä</i>	19
3.2.2	<i>Voltti-ampeerimittarimenetelmä</i>	20
3.2.3	<i>Suurtaajuusmenetelmä</i>	22
4	SÄHKÖASEMAN MAADOITUSTEN SUUNNITTELU	22
4.1	Maarian sähköasema	24
4.2	Maarian sähköaseman sähkötekniset arvot	24
4.3	Maadoitusten perussuunnitelma Maarian sähköasemalle	25
4.4	Maadoitusten mallisuunnitelma Maarian sähköasemalle	26

5	MAADOITUKSIEN TOTEUTTAMINEN SÄHKÖASEMALLA	28
5.1	Maadoituselektrodien asentaminen ja liitokset	29
5.2	Maadoitusverkko ja aita	31
5.3	Perustukset ja teräsrakenteet	32
5.4	Päämuuntajat, tähtipistereaktorit ja huoltotasot	33
5.5	Reaktorilaitokset	33
5.6	Katkaisijat, erottimet, maadoituserottimet ja mittamuuntajat	34
5.7	Maadoituskela, ylijännitesuoja ja tukieristin	34
5.8	Sähköasemarakennus	35
5.8.1	<i>Keskijännitekojeisto</i>	36
5.8.2	<i>Kaapit ja kotelot</i>	36
5.8.3	<i>Kaapelihyllyt ja kaapelit</i>	37
5.9	GIS-rakennus	38
6	YHTEENVETO	39
	LÄHTEET	40
	LIITTEET	
	LIITE 1	Maadoituselektrodien vähimmäismitat
	LIITE 2	Mitoituksessa käytettävät virrat
	LIITE 3	Oikosulkuvirran tiheys
	LIITE 4	Pyöreiden maadoitusjohtimien poikkipinnat
	LIITE 5	Suorakulmaisten maadoitusjohtimien poikkipinnat
	LIITE 6	Reduktiokertoimet
	LIITE 7	Erityistoimenpiteet
	LIITE 8	Pylväsmaadoitusten periaatekuva

1 JOHDANTO

Siemens on yksi maailman suurimmista sähkö- ja elektroniikka-alan yrityksistä, joka toimii noin 190 maassa työllistäen 400 000 henkilöä. Yhtiö on vaativien innovatiivisten teknologioiden ja asiantuntijapalvelujen osa- ja kokonaisratkaisujen toimittaja, joka toimii kolmella tulevaisuuden kasvualueella. Liiketoiminta-alueita ovat energia ja ympäristö, automaatio ja infrastruktuurit ja terveydenhuollon palvelut.

Siemens Osakeyhtiö

Siemens Osakeyhtiö vastaa Siemensin liiketoiminnasta Suomessa ja Baltiassa. Euroopassa maarajojen ulkopuolelle ulottuva kokonaisvaltainen liiketoimintavastuu on Suomen Siemensin lisäksi vain Itävallan Siemensillä. Suomessa toimivia Siemens-yhtiöitä ovat Siemens Osakeyhtiön lisäksi Siemens Medical Solutions, Siemens Medical Solutions Diagnostics, Oy Osram Ab ja Siemens Financial Services.

Siemens Osakeyhtiön tytäryhtiöitä ovat AS Siemens Virossa, Siemens SIA Latviassa, UAB Siemens Liettuassa sekä Bewator Oy Suomessa. Edellä mainitut yhtiöt muodostavat regionan, jonka henkilöstömäärästä noin 65 % työskentelee Suomessa. Suomessa työskentelevien määrä on noin 953 henkilöä. Virossa Siemens työllistää noin 326 henkilöä, Latviassa noin 81 ja Liettuassa noin 111. Suomen ja Baltian alueiden yhtiöiden yhteenlaskettu liikevaihto oli vuonna 2008 noin 760 miljoonaa euroa. [1.]

Tässä työssä on tarkoituksena selvittää ja tutkia sähköaseman maadoituksia koskevaa mitoitusta, suunnittelua ja käytännön toteutusta. Lisäksi selvitetään, kuinka eri jännitetasojen maadoitukset yhdistetään yhteiseen maadoitusjärjestelmään.

Maadoituksia koskevia mittauksia käsitellään myös, koska mitoitus perustuu suurelta osin mittaamalla saatuihin tuloksiin. Mitoitusta ja suunnittelua koskevia laskentaperiaatteita tarkastellaan standardien pohjalta ja esimerkkinä käytetään erästä Siemensin toteuttamaa sähköasemaa.

Suurjännitteisten ulkoalueiden osalta tarkastellaan erityisesti maanpinnan alapuolisia maadoituksia. Sähköaseman kojeiden maadoituksiin ei keskitytä kovin yksityiskohtaisesti, koska maadoitukset toteutetaan usein laitevalmis-

tajan suositusten ja kokemusperäisten tietojen mukaisesti, jolloin toteutustavat ovat tapauskohtaisia.

Sähköasemarakennuksen maadoitusta käsitellään kokonaisuutena ja painopisteenä on keskijännitekojeiston ja rele- ja jakokaappien maadoittamisen toteutus. Rakennuksen alempia jännitetasoja koskevia maadoituksia ei käsitellä kovin syvällisesti, koska aihealue on liian laaja käsiteltäväksi.

2 YLEISTÄ MAADOITTAMISESTA

Sähkölaitteiden maadoittamisella tarkoitetaan virtapiiriin kuuluvan osan tai sähkölaitteen johtavan osan yhdistämistä maahan. Yhdistäminen tehdään maanalaiseen maadoituselektrodiin maadoitusjohtimien avulla. Maadoittamisesta on annettu tarkat määräykset ja ohjeet sähkötyöturvallisuusmääräyksissä.

Maadoitukset jaetaan käyttö- ja suojamaadoituksiin. Käyttömaadoittamisella tarkoitetaan virtapiirin osan yhdistämistä maahan, joko suoraan tai pienen impedanssin välityksellä. Suojamaadoittamisella puolestaan tarkoitetaan virtapiiriin kuulumattoman jännitteelle alttiin osan, kuten sähkölaitteen metallirungon yhdistämistä maahan.

Käyttömaadoituksella varmistetaan, että virtajohtimen jännite maan suhteen pysyy turvallisuuden ja laitevaurioiden kannalta sallituissa rajoissa. Lisäksi sen tehtävänä on pitää jännite-epäsymmetria ja maavirta niin pienenä, ettei niistä aiheudu merkittäviä häiriöitä pienjännitejärjestelmille, kuten puhelinjohdoille. Suojamaadoituksilla estetään vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen kosketeltavaan jännitteelle alttiiseen osaan. [2, s. 413.]

2.1 Maadoittamisen tarkoitus

Maadoituksien tarkoituksena on lisätä sähköjärjestelmien turvallisuutta. Turvallisuutta parannetaan ensisijaisesti rajoittamalla vikatapauksissa esiintyviä kosketus- ja askeljännitteitä. Vikatilanteet voivat esiintyä rakennusten sähköasennuksissa, sitä syöttävässä järjestelmässä tai suurjänniteverkossa. Oleellista on kuitenkin, että vikatilanteet eivät aiheuta ihmisille vaaraa eivätkä laitteille vaurioita. Vioiksi lasketaan myös ilmastolliset tekijät, kuten ukkosien aiheuttamat ylijännitteet. Lisäksi maadoituksien tarkoituksena on luoda vikavirralla hallittu kulkureitti maahan.

Sähköturvallisuuden kannalta maadoitusten tarkoituksena on estää vaarallisten jännitteiden siirtyminen järjestelmästä toiseen sekä estää vaarallisten vuotovirtojen, kipinöiden ja valokaarien syttyminen. Maadoituksilla luodaan toimintaedellytykset maasulku- ja vikasuojaukselle, joiden avulla voidaan lyhentää vikojen kestoaikaa ja sitä kautta estää laitteille ja ihmisille aiheutuvia vaaroja. [3, s. 53.]

2.2 Maadoitusjärjestelmä

Maadoitus järjestelmä koostuu maadoituselektrodeista ja maadoitusjohtimista, joilla suojataan sähkölaitteita sekä niitä käyttäviä ihmisiä. Järjestelmä koostuu useista vaaka-, pysty-, tai vinoelektrodeista, jotka on kaivettu tai lyöty maahan [4, s. 74].

Maadoitusjärjestelmien toteuttamiseen käytetään kahta eri ratkaisua:

1. säteittäistä maadoitusjärjestelmää
2. verkkomaista maadoitusjärjestelmää.

Säteittäinen järjestelmän toteuttamisessa pyritään välttämään silmukoita, koska niissä esiintyy helpommin potentiaalieroista johtuvia tasoisvirtoja ja induktiivisia häiriöitä. Järjestelmä koostuu yksittäisistä maadoituselektrodeista, jotka on kytketty toisesta päästä samaan pisteeseen, jolloin maadoitusresistanssit ovat rinnankytkettyjä.

Täysin säteittäisen järjestelmän toteuttaminen sähköverkon suojajohtimien avulla on kuitenkin vaikeaa, koska sähkökojeet, kuten sähkökeskukset, kiinnitetään usein seinään tai lattiaan, jolloin ne joutuvat kosketuksiin rakennuksen rungon kanssa ja muodostavat silmukoita järjestelmän eri osien välille. Siksi kyseisen järjestelmän toteuttamisessa käytetäänkin suojajohtimesta erillään olevaa häiriötöntä maadoitusjohdinta, jonka kautta maadoitetut laitteet eristetään runkorakenteista ja sähköverkon suojajohtimeen maadoitettuihin laitekaapeihin. Häiriöttömällä maadoitusjohtimella toteutettuja järjestelmiä käytetään yleensä vain erittäin häiriöherkkien järjestelmien, kuten automaatiojärjestelmien maadoittamiseen.

Verkkomainen maadoitusjärjestelmä on nimensäkin mukaan verkkomainen ja sen rakenne yritetään saada sellaiseksi, että maadoituspiirin impedanssit saataisiin mahdollisimman pieneksi. Sitä käytetään erityisesti suuritaajuuksien häiriöiden eliminoimiseksi, koska verkon silmukoihin ei pääse indusoitumaan

häiriöitä, jos verkko on rakennettu riittävän tiiviiksi. Verkkorakennetta käytetään tyypillisesti sähköasemilla, joilla ulkokytkinlaitoksen ja valvomorakennuksen alle sijoitettu maadoitusverkko toimii maadoituselektrodina.

Käytetyin maadoitusjärjestelmä on niin sanottu sekajärjestelmä, joka on säteittäisen järjestelmän kaltainen. Kyseisessä järjestelmässä laitteiden maadoittaminen toteutetaan sähköverkon suojajohtimen kautta, jolloin silmukoita pääsee muodostumaan signaalijohtojen ja johtavien rakenteiden kautta. Järjestelmässä ei esiinny kuitenkaan merkittävästi häiriöitä, mikäli käytetään TN-S-järjestelmää, koska laitteiden häiriöiden sietokyky on yleensä mitoitettu kyseiselle maadoitustavalle. [3, s. 54 - 55.]

2.3 Maaperän johtavuus ja ominaisresistanssi

Uuden sähköaseman paikkaa valittaessa kannattaa huomioida maadoitusolosuhteet. Maadoitusolosuhteita voidaan arvioida ominaisresistanssin r avulla, joka ilmoittaa maaperän resistanssin pituusyksikköä kohti (? m).

Ominaisresistanssi kuvaa maaperän kykyä johtaa sähköä ja sen suuruus määräytyy maan ominaisuuksien ja koostumuksen perusteella. Ominaisresistanssin arvo voi vaihdella hyvin paljon jo pienilläkin etäisyyksillä, koska maaperän on epähomogeeninen ja sen koostumukseen vaikuttavat monet eri tekijät, kuten maaperän tyyppi, raekoko, tiheys ja kosteus sekä vuodenaikat.

Suomessa maaperän ominaisresistanssi on erittäin suuri, joka johtuu lähelle maanpintaa ulottuvasta kallioperästä, joka on suuren ominaisresistanssin omaavaa graniittia. Lisäksi kallion päällä oleva irtomaakerros on usein huonosti johtavaa hiekkaa tai soraa, joten maadoitusolosuhteet ovat huonot.

Huonoista maadoitusolosuhteista aiheutuu monia ongelmia varsinkin, jos maasulkuvirrat ovat suuria. Maasulkuvirrat indusoivat viestijohtoihin liian suuria häiriöjännitteitä, jolloin telejärjestelmät saattavat häiriintyä. Lisäksi kosketusjännitteiden suurimpia sallittuja arvoja on vaikea alittaa.

Huonoja maadoitusolosuhteita voidaan kompensoida maadoituksia lisäämällä, jolloin ominaisresistanssi saadaan pienemmäksi. Lisämaadoitusten tekeminen on kuitenkin työlästä ja niistä saatava hyöty on vähäinen kustannuksiin nähden. Tämä johtuu siitä, että maaperä koostuu huonosti johtavista

tai jopa eristeisistä aineosista, jolloin kuparijohtimien lisääminen ei juuri muuta maadoitusolosuhteita. Taulukossa 1 on esitetty Suomessa esiintyvien tyyppisimpien maalajien ominaisresistanssiarvot.

Taulukko 1. Ominaisresistanssien arvoja [lähde 2, s.416 mukailleen]

Aine	Ominaisresistanssi/? m	Tavallisimmat vaihtelurajat/? m
Savi	40	20... 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

Taulukon 1 arvoja voidaan käyttää alustavissa laskelmissa, mutta yleensä ominaisresistanssit on mitattava paikallisesti. [2, s. 416 - 418; 4, s. 101; 5, s. 190 - 192.]

2.4 Maadoitusresistanssi

Maadoitusresistanssilla R_E tarkoitetaan maahan upotetun maadoituselektrodien resistanssiarvoa ja sen suuruudella kuvataan maadoitusten hyvyttä. Se on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssiin, mutta arvoon vaikuttavat myös maadoituselektrodin muoto ja pituus sekä johtimen sijoittelu maaperään.

Suomessa maadoitusresistanssi on yleensä suuri, koska maan ominaisvastuskin on suuri. Tämä on epäedullista maadoitusten hyvyyden kannalta, koska mitä suurempi arvo maadoitusresistanssille on, sitä huonompi ja vaarallisempi maadoitus on sähkölaitteiden ja ihmisten kannalta.

Maadoituselektrodien resistanssit voidaan laskea ominaisvastusmittauksien avulla saatujen arvojen perusteella. Tulokset saadaan tyydyttävälle tasolle, jos ympäröivän maan ominaisresistanssi on homogeeninen. Laskennassa käytetään yleensä valmiita yhtälöitä, jotka on määritetty tavallisimmin käytettyjen elektrodirakenteiden perusteella. Yhtälöt löytyvät taulukosta 2.

Taulukko 2. Maadoitusresistanssien yhtälöitä [4, s. 102]

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	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Verkko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

Taulukon suureet tarkoittavat seuraavaa:

L = maadoituselektrodin pituus (m)

D = pallon, levyn tai verkon halkaisija (m)

d = köysimaadoituselektrodin halkaisija tai puolet nauhaelektrodin leveydestä (m)

s = levyelektrodin paksuus

ρ_E = maaperän ominaisresistanssi


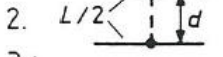
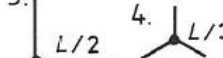
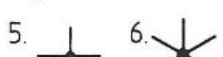
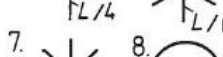
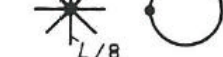

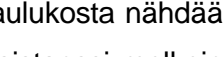
h = elektrodin upotussyvyys.

Yhtälöistä nähdään, että ominaisresistanssin lisäksi maadoitusresistanssiin vaikuttavat lähinnä mitat L ja D . Logaritmiyhtälössä olevat tekijät puolestaan vaikuttavat maadoitusresistanssiin vähemmän.

Yhtälöiden termit pinnassa ja upotettuna on käsiteltävä sähkötekniset näkökulmat huomioiden. Esimerkiksi kuivalle tai roudassa olevalle maalle tulkinta on tehtävä siten, että pintamaakerroksen alapinta tulkitaan pinnaksi kaavoja sovellettaessa. Lisäksi niitä johdettaessa on tehty oletus, että elektrodien poikkileikkaukset ovat pyöreitä.

Maadoituseloelektrodin muoto ja rakenne vaikuttavat maadoitusresistanssin arvoon. Taulukossa 3 on esitetty maadoitusresistanssin suhteellinen kasvu verrattaessa erimuotoisten johtimien resistanssiarvoja saman kokonaispituuden omaavaan suoran johtimen arvoon.

Taulukko 3. Eri maadoituselektrodien maadoitusresistanssin suhde verrattuna suoran johtimen maadoitusresistanssiin [2, s. 418]

L/m	20	60	200	600
Maadoituksen muoto	Maadoitusresistanssin suhde suoran johtimen maadoitusresistanssiin, %			
1. 	100	100	100	100
2. 	133 $d = 0,2 \text{ m}$ 109 $d = 2 \text{ m}$ 92 $d = 20 \text{ m}$	144 123 98	155 135 109	159 143 119
3. 	103	103	102	102
4. 	107	106	106	105
5. 	116	115	114	112
6. 	136	135	132	129
7. 	159	158	154	148
8. 	109	108	107	106

Taulukosta nähdään, että suoralla johtimella saavutetaan pienin maadoitusresistanssi melkein kaikilla johdin pituuksilla. Poikkeuksena on kahden rinnakkaisen maadoituselektrodin tapaus, kun käytetään johtimien välisenä etäisyytenä 20 metriä. Maadoitusresistanssin pienentynyt arvo menetetään kuitenkin pitkillä johtimilla. [2, s. 416 - 418; 4, s. 101; 5, s. 190 - 192.]

2.5 Maadoitusjärjestelmien mitoitus

Seuraavat asiat perustuvat standardissa SFS 6001 + A1 esitettyihin normeihin [4].

Maadoitusjärjestelmän on täytettävä neljä vaatimusta:

1. riittävä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys
2. suurimman vikavirran kestävyys termisesti (suurin vikavirta saadaan tavallisesti laskemalla)
3. omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen
4. henkilöiden turvallisuuden varmistaminen suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien jännitteiden suhteen.

Maadoitusjärjestelmän mitoittamisen kannalta oleellimmat tekijät ovat vikavirran arvo, vian kesto aika ja maaperän ominaisuudet. Mikäli asennuksessa on useita eri jännitetasoja, on kunkin suurjännitejärjestelmän täytettävä edellä mainitut vaatimukset. Samanaikaisia vikoja eri jännitetasoilla ei tarvitse kuitenkaan huomioida. Käytännössä tämä tarkoittaa, että sähköaseman suu-

rimman jänniteportaan maasulkuvirta on määräävä tekijä maadoitusten mitoittamiselle.

2.5.1 Mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys

Maan kanssa kosketuksissa olevat maadoituselektrodit on valmistettava korroosion kestävästä materiaaleista. Tämä tarkoittaa, että materiaalin on kestävä kemiallinen tai biologinen syöpyminen, hapettuminen ja elektrolyysi. Lisäksi materiaali ei saa muodostaa elektrolyyttipareja muiden materiaalien kanssa. Maadoituselektrodien on myös kestävä mekaanisia rasituksia asennuksen ja normaalikäytön aikana.

Betoniperustuksiin upotettuja teräksiä ja teräspaaluja tai muita luonnollisia maadoituselektrodeja voidaan käyttää maadoitusjärjestelmän osana, jolloin maadoitusresistanssin arvo saadaan pienemmäksi. Liitteessä 1 on esitetty maadoituselektrodien vähimmäismitat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden kannalta.

Maadoitus- ja potentiaalintausjohtimien vähimmäispoikkipinnat eri materiaaleille ovat:

- kuparille 16 mm^2 (ei koske mittamuuntajien maadoitusjohtimia)
- alumiinille 35 mm^2
- teräkselle 50 mm^2 .

Mittamuuntajien toisiopiirien maadoitusjohtimien osalta vähimmäispoikkipinnat ovat suojatuille johtimelle vähintään $2,5 \text{ mm}^2$ kuparia ja suojaamattomalle paljaille johtimille 4 mm^2 kuparia. [4, s.71; 6.]

2.5.2 Terminen lujuus

Maadoitusjohtimien ja maadoituselektrodien mitoitus termisen lujuuden perusteella tehdään laskemalla. Termiseen lujuuteen vaikuttavat vikavirran suuruus ja vian kesto aika. Vikavirran suuruuteen vaikuttaa merkittävästi suurjännitejärjestelmän tähtipisteen maadoitustapa ja vian kesto aikaan taas suojauksien toiminta-aika. Mitoituksessa käytettävät virrat eri maadoitusjärjestelmissä on määritelty liitteessä 2.

Mikäli järjestelmässä on useita jännitetasoja, käytetään laskennassa sen jänniteportaan vikavirran arvoa, jolle mitoitus tehdään.

Alle 5 sekuntia kestävillä vikavirroilla poikkipinta lasketaan yhtälön 1 mukaan. Mitoituksen lopputuloksen tulee kuitenkin täyttää kappaleen 2.4.1 vähimmäisvaatimukset.

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{q_f - b}{q_j + b}}}, \text{ jossa} \quad (1)$$

A = poikkipinta (mm^2)

I = johtimen virran tehollisarvo (A)

t = vikavirran kesto aika (s)

K = virrallisen osan materiaalista riippuva vakio

b = virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo $0\text{ }^\circ\text{C}$:ssa

q_f = alkulämpötila ($^\circ\text{C}$). Alkulämpötilana käytetään yleensä $20\text{ }^\circ\text{C}$

q_j = loppulämpötila ($^\circ\text{C}$).

Materiaalista riippuville vakioille on annettu taulukon 4 mukaiset arvot.

Taulukko 4. Materiaalista riippuvien vakioiden arvot [lähde 4, s. 82 mukailleen]

Materiaali	$b(^\circ\text{C})$	$K(A \cdot \sqrt{s} / mm^2)$
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Loppulämpötilan arvona käytetään usein $300\text{ }^\circ\text{C}$ ja alkulämpötilan arvona $20\text{ }^\circ\text{C}$, mutta standardin IEC 60287-3-1 mukaan Suomessa voidaan käyttää alkulämpötilan arvona myös $15\text{ }^\circ\text{C}$. Mitoitusta varten on myös kuva, josta selviää sallittu virrantiheys vikavirran kestoajan funktiona, jota voidaan käyttää, jos poikkipinta on ennalta määritetty. Kuva löytyy liitteestä 3.

Yhtälön 1 laskenta ei päde yli 5 sekuntia kestäville vikavirroille, koska lämmön nousu on adiabaattista. Adiabaattisella lämmön nousulla tarkoitetaan lämpötilan vakiona pysymistä, jolloin johdin ei jäähdy kunnolla ja joutuu kovemmalle rasitukselle. Mikäli loppulämpötilaksi valitaan jokin muu arvo kuin $300\text{ }^\circ\text{C}$, on virrat laskettava taulukon 5 kertoimien avulla.

Taulukko 5. Virran laskemisessa käytettävät muutoskerroimet [lähde 4, s. 82 mukailleen]

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

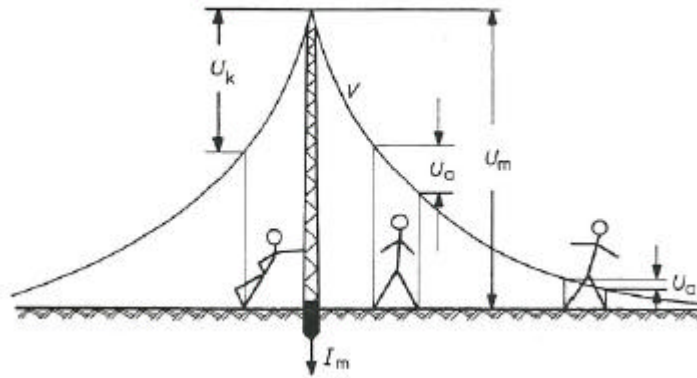
Yli 5 sekuntia kestäville vikavirroille sallitut poikkipinnat pyöreille maadoitusjohtimille on esitetty liitteessä 4 ja suorakulmaisille maadoitusjohtimille liitteessä 5. [4, s. 71 - 72; 6.]

2.5.3 Kosketus- ja askeljännitteiden vaikutus

Kosketus- ja askeljännitteiden tarkastelun taustana on tekninen raportti IEC 60479-1, johon on koottu tietoa ihmiskehon kautta kulkevan virran vaikutuksista. Sähkön vaarallisuus riippuu kosketusjännitteestä ja kehon kautta kulkevasta virrasta. Virran kestoajalla on myös suuri merkitys, sillä mitä lyhyemmän ajan virta vaikuttaa, sitä vähäisempi on virran aiheuttama hengenvaara.

Suomen olosuhteissa vikavirtojen suuruutta on usein vaikea rajoittaa maadoitusresistanssin avulla, koska maaperän johtavuus on heikko. Sähkön hengenvaarallisten vaikutusten estäminen on siksi tehtävä rajoittamalla kosketus- ja askeljännitteitä, sekä vikavirran kestoaikaa. Edellä mainitut seikat on otettu lähtökohdaksi myös laadittaessa suurjännitestandardia SFS-6001+A1, jonka mukaan kosketus- ja askeljännitteille voidaan sallia sitä suurempia arvoja, mitä lyhyemmän aikaa vika kestää.

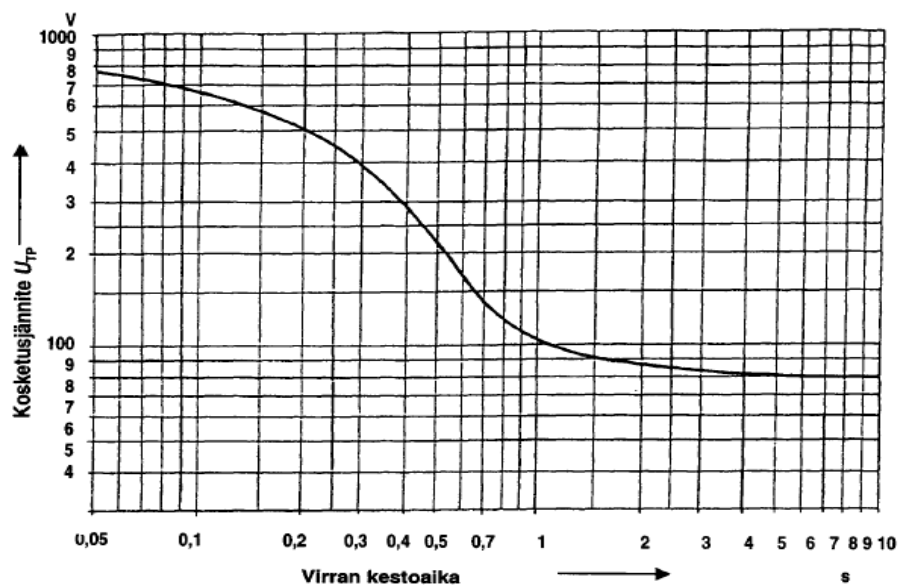
Kosketus- ja askeljännitteiden vaikutusten tarkastelu aloitetaan yleensä maadoitusjännitteen määrittämisestä, joka koostuu osittain kosketus- tai askeljännitteestä. Kuva 2 havainnollistaa kosketus- ja askeljännitteiden syntyä sekä niiden suhdetta maadoitusjännitteeseen.



Kuva 2. Maadoitusjännitteen, kosketusjännitteen ja askeljännitteen syntyminen [2, s.414]

Kosketusjännitteellä U_k tarkoitetaan ihmisen keholla samanaikaisesti kosketettavan kahden osan tai kahden kohdan välistä jännitettä, joka kohdistuu ihmiskehoon. Kosketusjännitettä, joka esiintyy kahden jaloilla samanaikaisesti kosketeltavan pisteen välillä, kutsutaan askeljännitteeksi U_a . Maadoitusjännitteestä U_m esiintyy kosketus- tai askeljännitteenä yleensä vain osa. I_m on elektrodin kautta kulkeva virta ja V maan pinnan potentiaali.

Maadoituksia suunniteltaessa mitoitus perustuu sallittuihin kosketusjännitearvoihin, joita verrataan laskettuun maadoitusjännitteeseen. Kuvassa 3 on esitetty sallitut raja-arvot maasulusta johtuville kosketusjännitteille vikavirran kestoajan funktiona. Mikäli virran kestoaika on paljon pitempi kuin 10 s, voidaan kosketusjännitteelle käyttää arvoa 75 V.



Kuva 3. Sallitut raja-arvot maasuluista johtuville kosketusjännitteille [4, s.78]

Kuvan 3 käyrä esittää jännitteen arvoa, joka voi esiintyä ihmiskehon yli virran kulkiessa paljaasta kädestä paljaisiin jalkoihin. Kuvan arvoja määritettäessä ei ole huomioitu lisäresistanssien arvoja. Lisäresistanssien arvot voidaan kuitenkin ottaa huomioon SFS 6001+A1 standardin liitteen C esitettyjen menetelmien mukaisesti.

Lisäresistansseilla tarkoitetaan esineitä, joilla on suuri resistanssi, kuten jalkineilla. Askeljännitteille ei ole määritelty sallittuja arvoja, koska maadoitusjärjestelmän katsotaan täyttävän vaatimukset, jos kosketusjännitevaatimukset täytetään. [2, s. 413 - 416; 4, s. 72 - 79; 6.]

2.5.4 Maadoitusjännite

Kosketus- ja askeljännitteiden laskeminen on hankalaa, mutta maadoitusjännite voidaan laskea Ohmin lain avulla yhtälön 2 mukaan. Virta aiheuttaa maadoitusresistanssissa jännitehäviön, jota kutsutaan maadoitusjännitteeksi.

$$U_E = R_E * I_E, \text{ jossa} \quad (2)$$

U_E = maadoitusjännite

R_E = maadoitusresistanssi (-impedanssi)

I_E = maavirta.

Laskentaa suoritettaessa on kuitenkin huomioitava, että koko vikavirta ei välttämättä kulje maadoituselektrodiin ja sitä kautta maahan, vaan osa siitä voi kulkea rinnakkaistietä muihin maadoituksiin. Esimerkiksi sähköasemilla ilmajohtojen ukkosjohtimet ja maakaapeleiden metallivaipat osallistuvat maahan palaavien vikavirtojen johtamiseen, jolloin osa maasulkuvirrasta kulkee niiden kautta pienentäen maavirtaa. Tällöin laskennassa käytettävää virtaa korjataan reduktiokertoimella r yhtälön 3 mukaisesti.

$$I_E = r * I_F, \text{ jossa} \quad (3)$$

r = reduktiokerroin

I_F = maasulkuvirta.

Reduktiokertoimet kuvaavat virtaa pienentävää vaikutusta ja niiden tyypillisiä arvoja löytyy liitteestä 6. [2, s. 413 - 416; 4, s. 72 - 79; 6.]

2.5.5 Kosketusjännite vaatimuksien toteutuminen

SFS 6001+A1 standardin mukaan kosketusjännitteiden katsotaan pysyvän automaattisesti turvallisen pieninä seuraavissa tapauksissa:

- sähköasennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää (ehto C1)
- mittauksilla tai laskemalla määritetty maadoitusjännite ei ole suurempi kuin kuvan 3 mukaisen kosketusjännitteen arvo kaksinkertaisena (ehto C2).

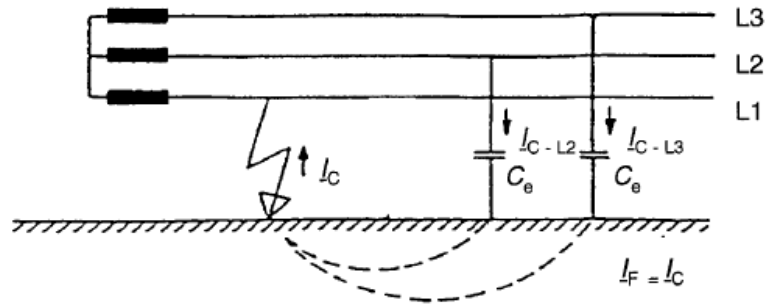
Joskus edellä mainitut ehdot eivät toteudu, jolloin maadoitusjännitteen arvoiksi sallitaan neljä kertaa kosketusjännitteiden suurin sallittu arvo. Tällöin on kuitenkin toteutettava liitteen 7 erikoistoimenpiteet.

Edellä esitettyjen määräyksien lisäksi jokainen maasulku on kytkettävä pois automaattisesti tai käsin, jolloin pitkäaikaista tai jatkuvaa kosketusjännitettä ei esiinny maasulkujen seurauksena. Yleensä maasulku pitää kytkeä pois automaattisesti, mutta maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää voidaan käyttää silloin, kun verkon käytön luonteen takia maasulun aiheuttamaa keskeytystä on tarpeellista siirtää. Tällöin järjestelmän on täytettävä seuraavat ehdot [2, s. 413 - 416; 4, s. 72 - 79; 6.]:

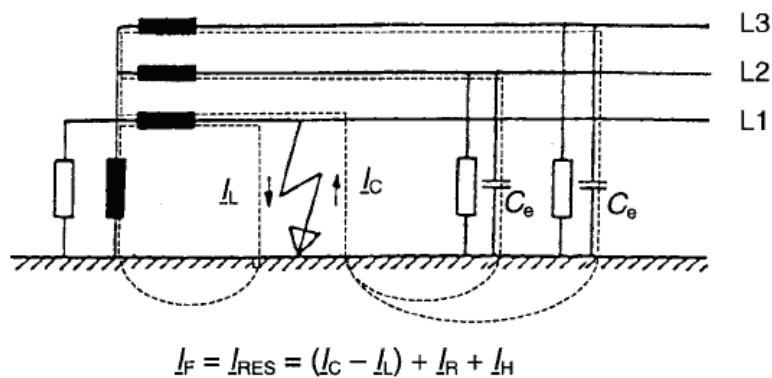
- Verkon rakenteen tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaarimaasulun on sammuttava itsestään.
- Maasulusta on tultava hälytys, joka saatetaan verkon käyttöä valvovan henkilön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa yleensä enintään kahden tunnin ajan, mikäli maasulusta ei aiheudu välitöntä vaaraa ihmisille, omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa pitempään vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan ettei siitä aiheudu vaaraa. Mikäli maasulku sijaitsee jakelumuuntamalla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella, ei käyttöä saa jatkaa.
- Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla korkeintaan pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, kuitenkin korkeintaan 150 V.
- Televerkon asettamat vaatimukset on otettava huomioon.

2.6 Sähköaseman muuntajan tähtipisteen maadoitustavat

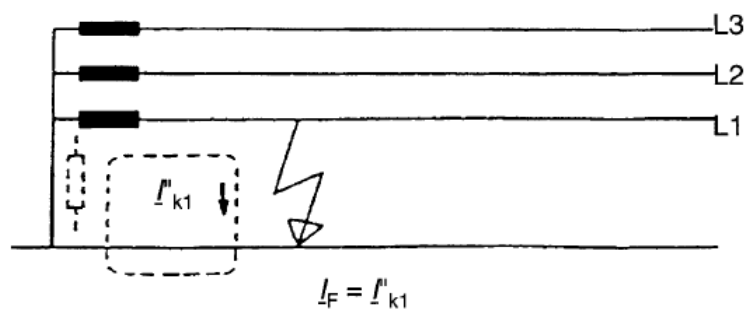
Vikatapauksissa esiintyvien käyttötaajuuisten ylijännitteiden suuruus sähköasemalla riippuu muuntajan tähtipisteen maadoitustavasta. Maadoitustapa määrää myös virran, jota käytetään, kun määritellään kosketusjännitteen arvoa. Kuvissa 4 - 8 on esitetty eri maadoitustavat ja niissä käytettävät virrat.



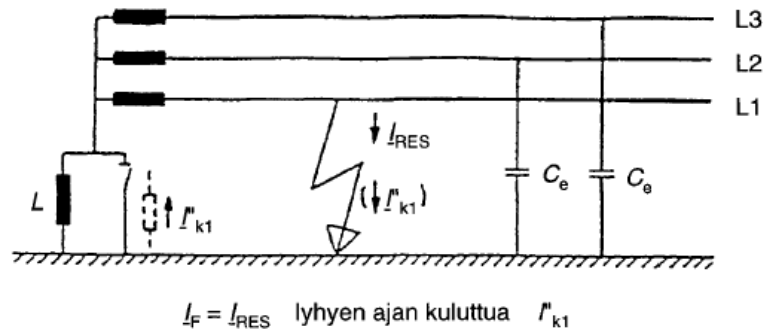
Kuva 4. Maasulkuvirta maasta erotetussa järjestelmässä [4, s. 21 - 22]



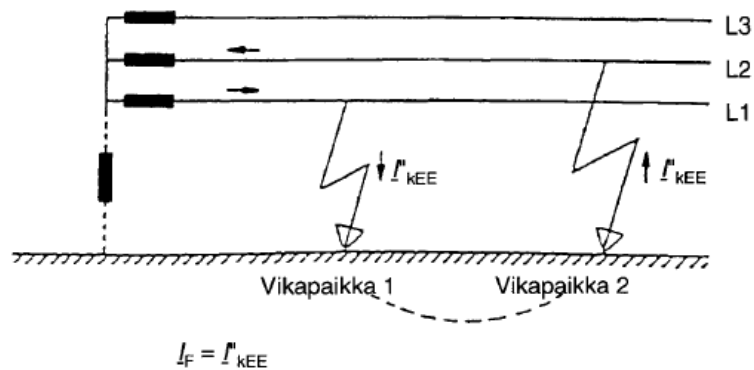
Kuva 5. Maasulkuvirta sammutetussa järjestelmässä [4, s. 21 - 22]



Kuva 6. Maasulkuvirta impedanssin kautta maadoitetussa järjestelmässä [4, s. 21 - 22]



Kuva 7. Maasulkuvirta sammutetussa järjestelmässä ja tilapäisesti suoraan maadoitetussa järjestelmässä [4, s. 21 - 22]



Kuva 8. Kaksoismaasulun virta maasta erotetuista tai sammutetuissa järjestelmissä [4, s. 21 - 22]

Kuvissa käytetyt symbolit tarkoittavat [4, s. 21 - 22.]:

\underline{I}_F = maasulkuvirta

\underline{I}_C = kapasitiivinen maasulkuvirta

\underline{I}_L = rinnakkaisten sammutuskelojen virtojen summa

\underline{I}_R = vuotovirta

\underline{I}_H = harmoninen virta

\underline{I}_{Res} = maasulun vikavirta

\underline{I}_{k1}'' = oikosulun symmetrinen alkuoikosulkuvirta yksivaiheisessa maasulussa

\underline{I}_{KEE}'' = kaksoismaasulkuvirta.

Verkot jaetaan maadoitustavan perusteella maasta erotettuihin, sammutettuihin ja maadoitettuihin verkkoihin. Maasta erotetussa verkossa muuntajan

tähtipiste kytketään maahan suuren impedanssin välityksellä. Maasulkuvirta kulkee tällöin maakapasitanssien kautta. Sammutetussa verkossa tähtipisteet on maadoitettu kuristimien kautta, jolloin ne kompensoivat verkon kapasitiivisen maasulkuvirran. Virtaa ei saada kompensoitua kokonaan, mutta sen haittavaikutukset pienenevät huomattavasti.

Maadoitetuissa verkoissa tähtipiste maadoitetaan suoraan tai pienen resistanssin tai reaktanssin kautta. Verkosta, jossa maasuluista aiheutuvat häiriöt jäävät suhteellisen alhaisiksi käytetään nimitystä tehollisesti maadoitettu verkko. [2, s. 169 - 170.]

3 MAADOITUKSIEN MITTAUKSISTA

Sähkönjakelujärjestelmien maadoituksille tehdään erilaisia mittauksia. Yleisesti tehtäviä mittauksia ovat maaperän johtavuuden, maadoitusresistanssin ja kosketusjännitteiden mittaukset. Edellä mainituista mittauksista kahden ensimmäisen tekeminen on välttämätöntä, koska maadoitusten suunnittelu perustuu mittauksista saatuihin arvoihin. Kosketusjännitteiden arvoja puolestaan ei ole välttämätöntä mitata, jos niiden suurimpien sallittujen arvojen rajoissa pysyminen suoritetaan laskemalla. [4, s. 77 - 78.]

Maadoitusmittauksia tehdään tyypillisesti [3, s. 144 - 145.]:

- suurjännite-erottimen suojamaadoituksille
- muuntajan suurjännitepuolen suojamaadoituksille
- sähköaseman maadoituksille
- enintään 1000 V jakeluverkon maadoituksille silloin, kun järjestelmä on alttiina yli 1000 V jännitteille
- edellä mainittujen järjestelmien yhteisille maadoituksille.

3.1 Maaperän johtavuuden mittaaminen

Maaperän johtavuuden mittaukset ovat tärkeitä, koska ominaisvastuksen arvoja käytetään maadoitusten suunnittelun pohjana. Mittaukset suoritetaan käyttäen neljän piikin menetelmää (esimerkiksi Wenner-menetelmää), jolla maaperän ominaisresistanssi eri syvyyksillä voidaan määrittää.

Wenner-menetelmässä kaksi virtaa syöttävää elektrodia ja kaksi potentiaalieroa mittaavaa elektrodia asetetaan samaan linjaan maahan noin 20 cm:n

syvyyteen siten, että elektrodien etäisyydet toisistaan ovat yhtä suuret. Kuvassa 9 on periaatekuva mittauskytkennästä, jossa uloimmat elektrodit syöttävät virran ja sisemmät elektrodit mittaavat potentiaalieron. Elektrodien välimatkaa a muuttamalla saadaan uusia mittaustuloksia, jotka mittari näyttää ohmeina. Maan keskimääräinen ominaisvastus tulee tällöin mitatuksi välimatkaa a vastaavaan syvyyteen asti. Tämän jälkeen ominaisvastus voidaan laskea mittaustuloksista yhtälön 4 mukaisesti. [7.]

$$r = 2\rho * a * \frac{\Delta V}{I} = 2\rho * a * R, \text{ jossa} \quad (4)$$

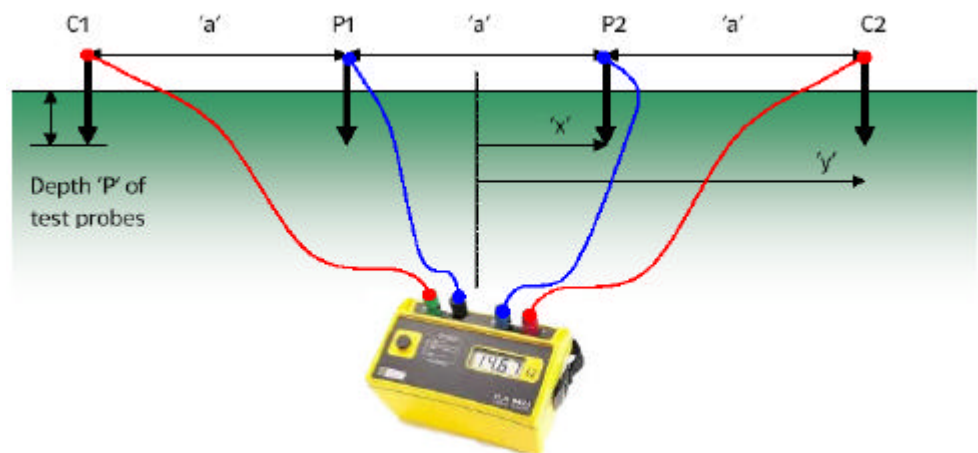
r = ominaisresistanssi (? m)

a = etäisyys (m)

ΔV = elektrodien potentiaaliero (V)

I = syötetty virta (A)

R = resistanssi ? .



Kuva 9. Wenner-menetelmän periaatekuva maaperän vastusmittauksessa [8]

3.2 Maadoitusresistanssin mittaaminen

Maadoitusresistanssin mittaaminen sähköasemilla on tärkeää, koska ilman sitä maadoitusjännitettä koskevia tarkasteluja ei voida tehdä, jolloin laitteistoa ei myöskään saada käyttöönottaa. Poikkeuksena ovat talviolosuhteet, jolloin käyttöönotto sallitaan maadoitusten keskeneräisyydestä huolimatta, koska niiden viimeistely ja maadoitusresistanssin mittaaminen on silloin vaikeaa. Ehtona edellä mainitulle menettelylle on, että mittaus suoritetaan vuoden sisällä käyttöönotosta ja maadoitukset viimeistellään mahdollisimman pian roudan sulamisen jälkeen.

Käyttöönoton yhteydessä tehtävän mittauksen lisäksi mittaus tulisi toistaa kuuden vuoden välein järjestelmissä, joissa maadoitus on yhden maadoitusjohtimen varassa ja kahdentoista vuoden välein järjestelmissä, joissa maadoitukset ovat toteutettu useammilla johtimilla. Paras ajankohta mittaamiselle on silloin, kun maa ei ole roudassa, koska jäätynyt maa hankaloittaa mittauksen suorittamista tai tekee siitä mahdotonta.

Maadoitusresistanssi voidaan mitata usealla eri menetelmällä. Käytettävä menetelmä riippuu maadoitusjärjestelmän laajuudesta ja häiriötasosta. Mittausmenetelmä on valittava myös vallitsevien olosuhteiden mukaan, koska maadoitetuissa osissa voi esiintyä vaarallisia kosketusjännitteitä.

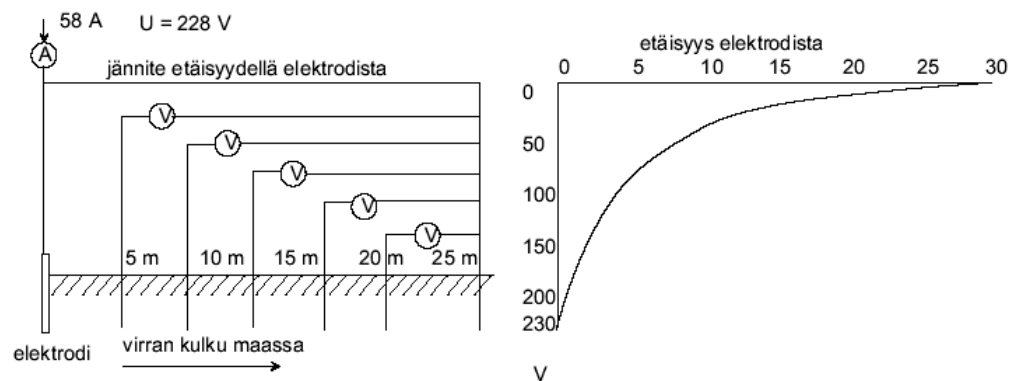
Tavallisesti maadoitusresistanssi mitataan syöttämällä mitattavan maadoituselektrodin kautta virtaa, jolloin elektrodin yli vaikuttaa jännite saadaan mitattua. Virran ja jännitteen avulla voidaan laskea maadoitusresistanssi yhtälön 5 mukaisesti.

$$R = \frac{U}{I}, \text{ jossa} \quad (5)$$

U = elektrodin yli vaikuttava jännite (V)

I = elektrodin kautta syötettävä virta (A).

Virta jakautuu maadoituselektrodista siten, että virrantiheys on sitä suurempi, mitä lähempänä elektrodia ollaan. Elektrodi johtaa virran maahan, jolloin elektrodin läheisyyteen syntyy jännite-eroja, jotka ovat sitä suurempia, mitä lähempänä elektrodia ollaan. Kuva 10 esittää jännitteen jakautumista elektrodin läheisyydessä. [4, s. 77 - 78; 9, s. 1 - 4.]

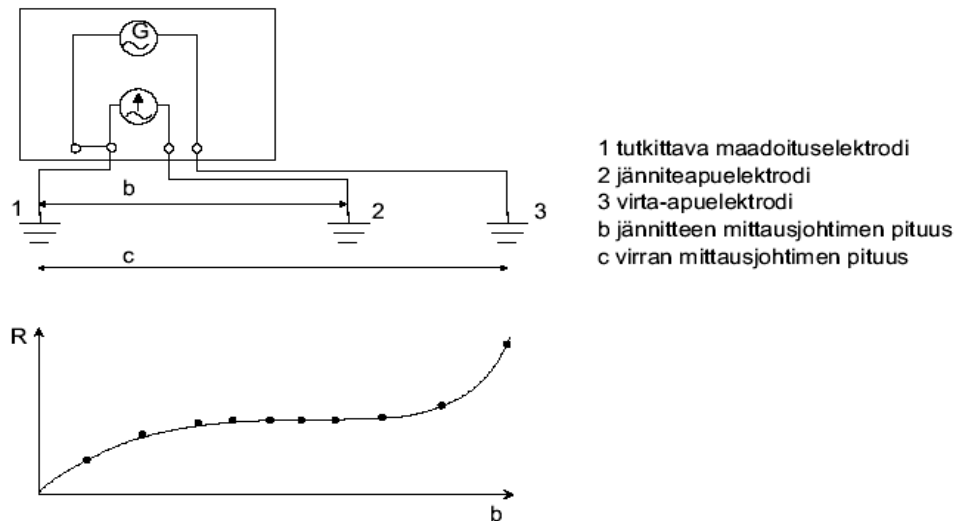


Kuva 10. Jännitteen jakautuminen maadoituselektrodin läheisyydessä [9, s. 2]

3.2.1 Käänne pistemenetelmä

Käänne pistemenetelmä eroaa tavallisesta menetelmästä siten, että siinä mitataan resistanssiarvot suoraan. Mitatuista arvoista muodostetaan kuvaaja, jonka käänne pisteestä saadaan tutkittavan elektrodin tai järjestelmän maadoitusresistanssi.

Mittauksia varten löytyy eri valmistajien kehittämiä mittalaitteita, jotka toimivat kompensatioperiaatteella (siltamittaus). Mittarin sisällä useamman resistanssin muodostama silta, jonka resistanssi arvo muuttuu mitattavan suureen vaikutuksesta. Mittaukseen käytetään mittalaitteen syöttämää vaihtojännitettä, jonka suuruus vaihtelee valmistajasta riippuen 100 - 500 V välillä. Jännitteen taajuus vaihtelee välillä 70 - 140 Hz. Kuvassa 11 on esitetty mittauskytkennän periaate ja mittausarvoista saatu kuvaaja.



Kuva 11. Käänne pistemenetelmän mittauskytkentä ja kuvaaja [9, s. 2]

Apuelektrodit on vietävä mitattavan maadoituselektrodin vaikutusalueen ulkopuolelle ja ne on pyrittävä sijoittamaan etäälle muista maadoituselektrodeista tai metallisista vesijohdoista. Mitattavan maadoituksen koostuessa useista osaelektrodeista, on mittauskohta valittava siten, että se on mahdollisimman keskeltä järjestelmää.

Varsinainen mittaaminen tapahtuu siten, että mittarin sisäinen virtalähde syöttää mittausvirran elektrodin (1). Virta kulkee maan välityksellä virta-apuelektrodin (3) ja sitä kautta takaisin virtalähteeseen. Mitattavan elektrodin ja jännite-apuelektrodin (2) välille syntyy potentiaaliero. Tämän jälkeen odotetaan, että mittarin siltakytkentä on tasapainossa, jonka jälkeen mittaris-

ta voidaan lukea resistanssin arvo. Mittausta jatketaan siirtämällä jänniteapuelektrodia mittauspisteen ja virta-apuelektrodin välillä, jonka jälkeen mittarin näyttämä resistanssin arvo otetaan muistiin.

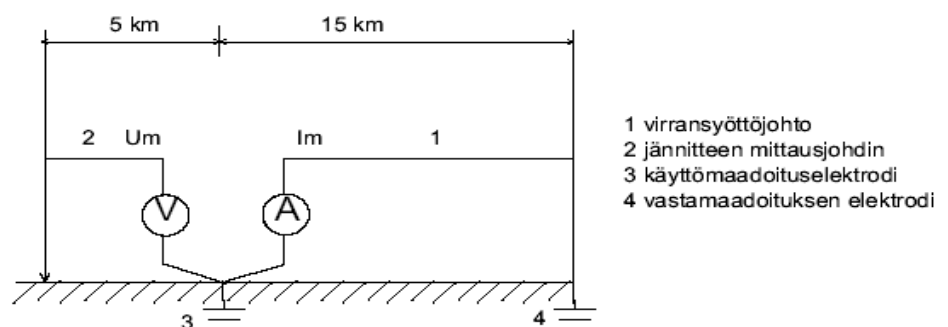
Mittaustuloksista muodostetaan kuvan 11 kaltainen resistanssikäyrä jänniteapuelektrodin etäisyyden (b) funktiona. Virta-apuelektrodia pidetään koko mittauksen ajan samassa paikassa ja sen etäisyydeksi riittää 200 m. Mittausjohtimet pidetään vähintään 0,5 m etäisyydellä toisistaan. [9, s. 2 - 3.]

3.2.2 Voltti-ampeerimittarimenetelmä

Menetelmää käytetään erityisesti isojen maadoitusjärjestelmien maadoitusresistanssien (-impedanssien) mittaamiseen, koska menetelmä vastaa parhaiten todellista maasulkutilannetta. Mittaus perustuu maadoituselektrodin kautta kulkevan mittausvirran ja sen yli vaikuttavan jännitteen mittaamiseen.

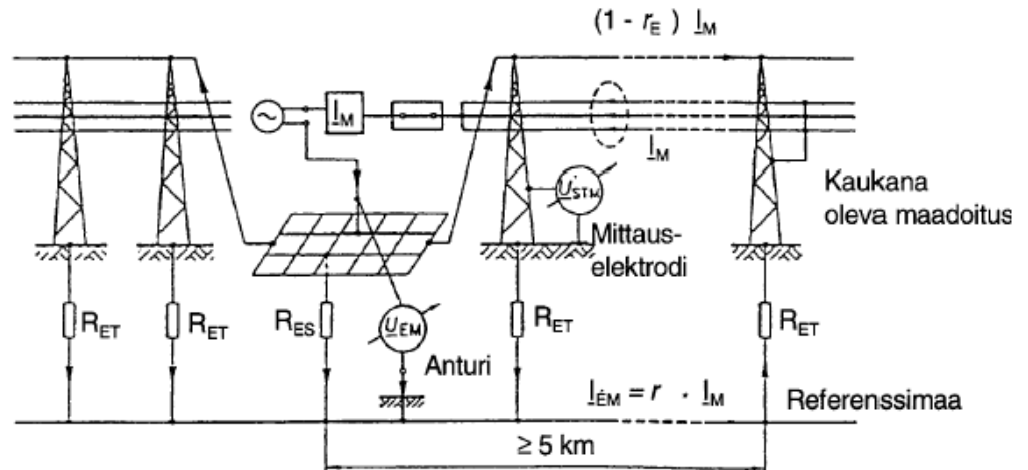
Todellista maasulkutilannetta pyritään jäljittelemään siten, että maadoitukseen johdetaan kaukaa esimerkiksi avojohtoa pitkin virransyöttömuuntajalla syötetty mittausvirta (I_m). Virta kulkee tällöin kauempana sijaitsevan vastamaadoituselektrodin ja mitattavan maadoituselektrodin kautta. Jännite mitataan apuelektrodin ja maadoituksen väliltä. Apuelektrodin kautta ei viedä virtaa, jolloin se on muiden maadoituselektrodien kentän ulkopuolella ja mitattu jännite on tällöin maadoitusjännite (U_m).

Mittaus toteutetaan siten, että apuelektrodit ovat etäällä mitattavasta maadoituselektrodista ja toisistaan. Apuelektrodit viedään eri puolille mitattavaa maadoitusta. Maadoitusresistanssi saadaan jännitteen ja virran osamääränä, kuten yhtälössä viisi on esitetty. Mittausmenetelmän periaate on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Voltti-ampeerimittarimenetelmän periaate [9, s. 3]

Mittauksen suorittamisen yhteydessä ei saa irrottaa ukkosjohtimia, eikä maadoituselektrodeina toimivia kaapelivaippoja, jotka on kytketty maadoitusjärjestelmään. Vastamaa eli referenssimaan minimietäisyydeksi suositellaan vähintään 5 km etäisyyttä ja mittausvirta valitaan niin suureksi, että mitattavat jännitteet (maadoitusjännite ja kosketusjännitteet) ovat suurempia kuin mahdolliset häiriöjännitteet. Kuvassa 13 on esimerkki maadoitusresistanssin määrittämisestä.



Kuva 13. Esimerkki maadoitusresistanssin määrittämisestä [4, s. 110]

\underline{I}_M = mittausvirta (yleensä määritetään vain jännitteen ja virran itseisarvo)

\underline{I}_{EM} = maavirta mittauksen aikana (tässä tapauksessa ei mitattavissa suoraan)

r_E = vertailumaan maadoituselektrodin kulkevan johdon reduktiokerroin

\underline{R}_{ES} = maadoitusverkon maadoitusresistanssi

\underline{R}_{ET} = pylvään maadoitusresistanssi

\underline{U}_{EM} = maadoitusjännite mittauksen aikana

\underline{U}_{STM} = suurin kosketusjännite mittauksen aikana.

Kuvassa maadoitusresistanssin mittaamiseksi käytetään asemalta lähteviä avojohtoja. Mittausvirran arvona käytetään 50 A, jolloin vältetään häiriöjännitteitä. Lisäksi jännitemittarin sisäisen resistanssin tulisi olla vähintään 10 kertaa maapiikin maadoitusresistanssin suuruinen. [4, s. 110; 9, s. 3.]

3.2.3 Suurtaajuusmenetelmä

Suurtaajuusmenetelmällä saadaan helposti mitattua yksittäisen pylvään maadoitusresistanssin ilman, että maadoitusjohdinta kaivetaan esiin. Mittausvirran taajuuden on oltava mahdollisimman korkea, että ukkosjohtimien ja naapuripylväiden sarjaimpedanssi tulee suureksi, jolloin se edustaa käytännössä mitätöntä rinnakkaisvirtapiiriä ilmajohtopylvään maadoitukseen [4, s. 107].

Mittaus suoritetaan suurtaajuusvirtapihdillä. Muut maadoitetut pylvääet toimivat referenssimana. Virtapihdissä on elektroninen jännitelähde, jonka avulla maadoitukseen syötetään jännite, jonka suuruus tunnetaan. Maadoitukseen menevä virta mitataan pihtiosalla, jonka toiminta perustuu Hall-ilmiöön. Maadoitusresistanssin arvo saadaan jännitteen ja virran osamääränä suoraan pihtin näytölle. [10.]

4 SÄHKÖASEMAN MAADOITUSTEN SUUNNITTELU

Maadoitusten suunnittelu aloitetaan yleensä perussuunnitelman laatimisella. Perussuunnitelma pitää sisällään SFS 6001+A1:n määrittämien vaatimusten kolme ensimmäistä kohtaa, jotka ovat:

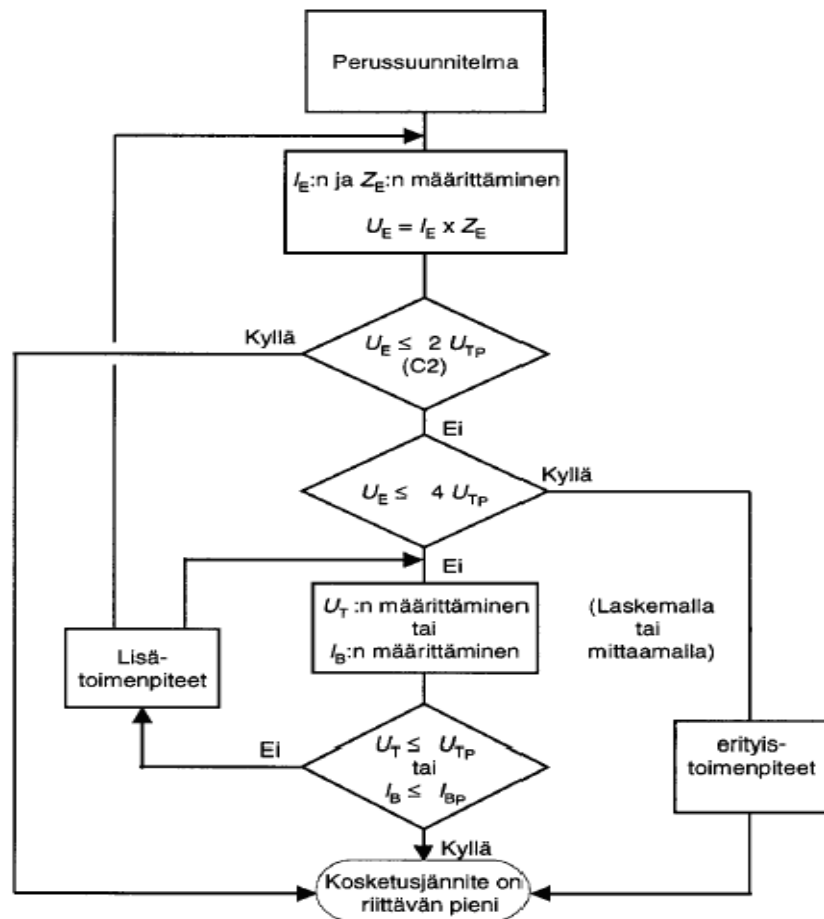
1. riittävä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys
2. suurimman vikavirran kestävyys termisesti
3. omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen.

Kaksi ensimmäistä ehtoa saadaan täyttymään suorittamalla tarvittavat laskelmat. Viimeinen ehto saadaan täyttymään käyttämällä oikeita suojalaitteita ja suojalaitteasetteluja, jotka verkonhaltija etukäteen määrittelee.

Vaatimusten täytyttyä suunnitelma on tarkistettava kosketusjännitteiden osalta, minkä jälkeen sitä voidaan pitää mallisuunnitelmana. Tarkastaminen voidaan tehdä alustavasti laskemalla jo aseman rakennusvaiheessa, mutta usein se tehdään vasta ennen käyttöönottoa, jolloin maadoitukset ovat jo valmiit ja ominaisresistanssin arvo tiedetään tarkasti.

Alustavilla laskelmilla voidaan arvioida lisämaadoitusten toteuttamisen tarvetta, mikäli kosketusjännitteille asetettuja vaatimuksia ei täytetä. Tällä tavoin vältetään käyttöönoton viivästyminen, kun tiedetään, että maadoituksia täytyy parantaa.

Usein kuitenkin menetellään siten, että toteutetaan maadoitukset kokemuseräisen tiedon mukaan hyödyntämällä vanhoja projekteja. Sähköaseman maadoitukset mitataan käyttöönoton yhteydessä, minkä jälkeen tehdään kosketusjännitteitä koskevat tarkastelut. Mikäli asema ei täytä sallittuja arvoja tehdään lisämaadoituksia määräysten mukaan, jolloin kosketusjännitteille sallitaan suurempia arvoja. Kuvan 14 mukainen lohko-kaavio esittää yleisen mallin suunnitelman kulusta.



Kuva 14. Maadoitusjärjestelmän suunnittelun kulku [lähde 4, s.79 mukailen]

Kappaleessa 4.3 ja 4.4 on käytetty kuvan 14 lohko-kaavioon perustuvaa suunnittelumallia. Kappaleessa 4.3 on tehty maadoitusten perussuunnitelma ja kappaleessa 4.4 on tarkistettu kosketusjännitteiden arvot, jolloin suunnitelma vastaa mallisuunnitelmaa. [4, s. 70 - 79; 11.]

4.1 Maarian sähköasema

Turku Energia Sähköverkot Oy rakennuttaa vuoden 2009 aikana Maarian kaupunginosaan 110/(20)10 kV sähköaseman, jonka toimittaa Siemens Osakeyhtiön Energia-toimiala. Asema korvaa vanhan sähköaseman, joka on tekniikaltaan ja laitekannaltaan vanhentunut sekä teholtaan liian pieni [12].

Rakennuspaikan yli kulkee Turku Energian 110 kV:n voimajohto (Munttismäki - Karhunorko), joka katkaistaan sähköasema-alueella ja päätetään vapaasti seisovaan teräsrakenteiseen portaaliin. Maarian sähköasema liitetään T-haarana olevaan voimajohtoon. Aseman aidattu pinta-ala on 35 m x 44 m, eli 1 540 m².

Kyseistä sähköasemaa käytetään esimerkkinä maadoitusten perussuunnitelman ja mallisuunnitelman tekemisessä. Mitoitus tehdään osittain arvioitujen tietojen perusteella ja laskelmissa käytetään epäedullisia arvoja.

Sähköasema koostuu seuraavista osakokonaisuuksista [13, s. 1 - 17.]:

- 110/(20)10 kV:n päämuuntajasta
- 110 kV:n ulkokytkinlaitoksesta
- 11-kenttäisestä 10(24) kV:n SF₆-eristeisestä tyhjökatkaisijakojeistosta
- Sähköasemarakennuksesta laitteineen.

4.2 Maarian sähköaseman sähkötekniset arvot

Maarian sähköaseman 110 kV:n järjestelmän arvot ovat taulukon 6 mukaisia ja päämuuntajan arvot taulukon 7.

Taulukko 6. 110 kV:n järjestelmän arvot

Nimellisjännite U_n	110 kV
Suurin käyttöjännite U_m	123 kV
Maasulkuvirta I_F	3 kA
Terminen oikosulkuvirran kestoisuus I_{th}	25 kA
Vian kesto aika t_c	1,0 s
Suojauksen toiminta-aika t_s	0,15 s
Maadoitustapa	tehollisesti maadoitettu
Taajuus f	50 Hz

Taulukko 7. Päämuuntajan arvot

Nimellisteho S_n	25 MVA
Nimellisjännite U_n	110/(20) 10 kV
Oikosulkuimpedanssi u_k	10 %
Kytöntäryhmä	YNyn0

(20) 10 kV:n keskijännitekytkinlaitoksen arvot ovat taulukon 8 mukaisia. Keskijännitekytkinlaitos sijaitsee sähköasemarakennuksen sisällä. Kojeistot ovat SF₆-eristeisiä ja tyyppiä Siemens NXPLUS C.

Taulukko 8. Keskijännitekytkinlaitoksen arvot

Nimellisjännite U_n	20 kV
Suurin käyttöjännite U_m	24 kV
Nimellisvirta I_n	1443 A
Terminen oikosulkuvirran kestoisuus I_{th}	25 kA
Vian kesto aika t_c	1,0 s
Maadoitustapa	maasta erotettu
Taajuus f	50 Hz

Osa edellä esitetyistä arvoista on käytetty maadoitusjohtimia mitoitettaessa. Laskelmat löytyvät kappaleesta 4.3. [13, s. 1 - 17.]

4.3 Maadoitusten perussuunnitelma Maarian sähköasemalle

Maadoituselektrodien valinta tehdään suurimman vikavirran, vian kestoajan, mekaanisen lujuuden, korroosionkestävyyden ja loppulämpötilan mukaan. Mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden sekä käytännön syiden vuoksi maadoituselektrodien materiaali tulisi olla kuparia, koska sen johtavuus ja korroosionkestävyys ovat hyviä.

Vikatilanteiden kannalta terminen mitoitus on järkevää tehdä jänniteportaan suurimman mahdollisen vikavirran mukaan. Tehollisesti maadoitetussa järjestelmässä mitoitukseen käytetään maasulkuvirtaa, jolloin johtimen poikkipinnaksi tulee yhtälön 1 mukaan:

$$A = \frac{I_F}{K} * \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{q_f + b}{q_i - b}}} = \frac{3000 \text{ A}}{226} * \sqrt{\frac{1 \text{ s}}{\ln \frac{300 \text{ °C} + 234,5 \text{ °C}}{20 \text{ °C} + 234,5 \text{ °C}}}} = 15 \text{ mm}^2$$

Laskettu arvo ei täytä standardin määräyksiä mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden kannalta, joten maadoituselektrodiksi on valittava poikkipinnaltaan suurempi johdin. Liitteen 1 mukaan maadoituselektrodin tulee olla vähintään 25 mm^2 kuparia käytettäessä köysirakennetta.

Maarian sähköasemalle on kuitenkin suunniteltu toisen muuntajan hankintaa tulevaisuudessa, joten minimi poikkipinta ei ole riittävä, koska oikosulkuvirrat kasvavat toisen muuntajan myötä. Niinpä johtimen poikkipinnaksi valitaan 50 mm^2 , joka on myös asiakkaan vaatimus.

Suojauksien toteuttamiseen käytetään mikroprosessoripohjaisia suojareleitä, joissa relesuojaus-, mittaus-, ohjaus- ja asennonosoitustoiminnot on yhdistetty samaan kokonaisuuteen. Yhdistelmien toiminnot liitetään paikalliseen hälytyskeskukseen ja kaukokäyttöjärjestelmään. Suurjännitejohdot suojataan ylivirtasuojilla, maasulkusuojilla ja varustetaan jälleenkytkentäyksiköllä ja häiriöntallentimella, jolloin perussuunnitelman vaatimukset on täytetty ja suunnitelma on valmis. [4, s. 71 - 79; 11; 13, s. 1 - 17.]

4.4 Maadoitusten mallisuunnitelma Maarian sähköasemalle

Mallisuunnitelman tekemiseksi tarvitaan maan ominaisresistanssia, jotta kosketusjännitteet voidaan tarkistaa. Maan ominaisresistanssi saadaan taulukosta 1, kun tiedetään, millaista maaperä on. Maarian sähköaseman maaperä on savista peltoa, joten ominaisresistanssin arvoksi voidaan arvioida $r_E = 140 \text{ } \Omega m$, joka on mullan tyypillinen arvo.

Tarkempi arvo saataisiin mittaamalla, mutta mittauksia ei ole vielä suoritettu, joten on tyydyttävä taulukon arvoon. Arvolla ei kuitenkaan ole tässä vaiheessa merkitystä, koska suunnitelma on alustava.

Maadoitusjännitteen määrittämiseen tarvitaan maadoitusresistanssin ja maavirran arvot. Sähköasema alueen maadoitukset tehdään laajaksi verkoksi, joka kattaa koko alueen. Verkon resistanssi saadaan laskettua taulukon 2 kaavalla. Alue voidaan olettaa levypinnaksi, jolloin maadoitusresistanssin yhtälö on seuraava:

$$R_E = \frac{r_E}{2 * D}, \text{ jossa} \quad (6)$$

R_E = maadoitusresistanssi (?)

r_E = ominaisresistanssi (? m)

D = sähköasema alueen kokoisen ympyrän halkaisija (m).

Halkaisija D saadaan laskettua siten, että sähköasema alue oletetaan ympyrän muotoiseksi. Tällöin halkaisija saadaan laskettua ympyrän pinta-alan avulla yhtälöllä 7, kun aseman pinta-ala tiedetään.

$$A = p * r^2, \text{ missä } r = \frac{D}{2} \quad (7)$$

$$A = p * \frac{D^2}{4} \rightarrow 4A = p * D^2 \rightarrow D = \sqrt{\frac{4A}{p}} = \sqrt{\frac{4 * 1540 \text{ m}^2}{p}} = 44,28 \text{ m}$$

Seuraavaksi lasketaan maadoitusresistanssi, jonka arvoksi saadaan:

$$R_E = \frac{r_E}{2 * D} = \frac{140 \text{ } \Omega\text{m}}{2 * 44,28 \text{ m}} = 1,58 \text{ } \Omega \quad (8)$$

Maavirran määrittämiseksi tarvitaan tieto ukkosjohtimien tyypistä. Ukkosjohtimia ovat muun muassa Savo, Imatra, Suursavo (Sustrong) ja Ostrich. Maarian sähköasemalla käytetään 2xACSR 106/25 Sustrong-ukkosjohtimia, joiden reduktio kerroin $r_E = 0,382$. Maasulkuvirran ja reduktiokertoimen avulla voidaan laskea maavirta yhtälön 3 mukaan.

$$I_E = r_E * I_F = 0,382 * 3000 \text{ A} = 1146 \text{ A} \quad (9)$$

Maadoitusjännite voidaan nyt laskea yhtälöllä 2, jolloin arvoksi saadaan:

$$U_E = I_E * R_E = 1146 \text{ A} * 1,58 \text{ } \Omega = 1811 \text{ V} \quad (10)$$

Kosketusjännitteen arvo saadaan kuvasta 3, kun suojausajan toiminta-ajan tiedetään olevan 0,15 s. Kosketusjännitteen arvoksi tulee tällöin $U_{Tp} = 550 \text{ V}$, joten $U_E \leq 2 U_{Tp}$ arvoon ei päästä. Tästä johtuen sähköasemalle tehdään liitteessä 7 kuvattuja erityistoimenpiteitä ja hyväksytään kosketusjännitteelle arvo $U_E \leq 4 * U_{Tp} \rightarrow 1811 \text{ V} \leq 2200 \text{ V}$, jolloin vaatimukset täytetään ja suunnitelma on valmis.

Tehtäviä erityistoimenpiteitä ovat muun muassa. potentiaali-ohjauselektrodin asentaminen ja pienjänniteverkon haarojen maadoittaminen siten, että jokaisessa johtohaaran päässä tai sen läheisyydessä on maadoitus.

Laskenta on tehty epäedullisten olosuhteiden ja arvojen mukaan. Esimerkiksi rinnakkaisimpedanssien maadoitusresistanssin pienentävää vaikutusta ei ole huomioitu, koska niiden arvoja ei tiedetä. Lisäksi maavirran arvo on suuri, koska virta vaimenee jonkin verran kulkiessaan muuntajan tähtipisteen läpi. [4, s. 71 - 79; 11; 13, s. 1 - 17; 14, s. 110.]

5 MAADOITUKSIEN TOTEUTTAMINEN SÄHKÖASEMALLA

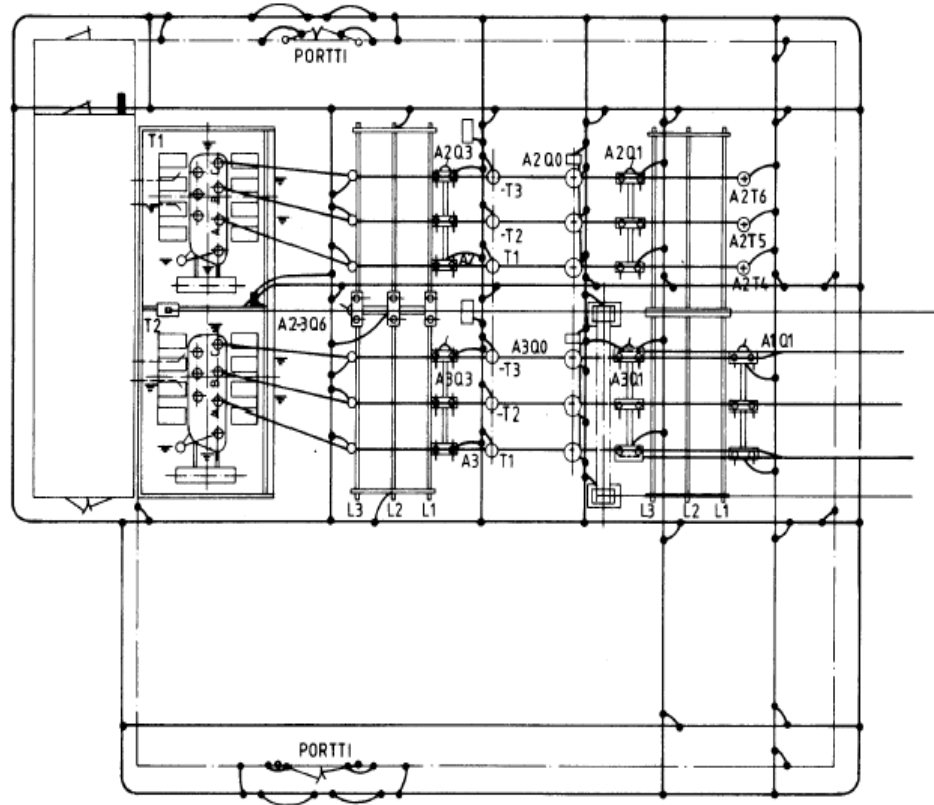
Sähköasemilla on paljon kalliita laitteita ja kojeita, joiden maadoittaminen on tärkeää, koska kyseisten laitteiden vaurioituminen voi katkaista sähkönjake-lun asiakkaille. Tärkeimpiä kohteita maadoittamisen kannalta ovat kytkinlaitteistot, päämuuntajat, valvomorakennukset, pylväs rakenteet, aseman ympärillä oleva aita ja muut johtavat osat.

Sähköaseman perusmaadoitukseksi rakennetaan yleensä maadoitusverkko, jolla pystytään pienentämään:

1. kosketus- ja askeljäännitteitä
2. maadoituksen aaltoimpedansseja
3. sähköaseman maadoitusresistanssia (-impedanssia).

Sähköaseman kaikki ulkona olevat laitteet ja kojeet maadoitetaan kyseiseen verkkoon. Lisäksi Suomessa sijoitetaan aidan ulkopuolelle potentiaalintasausrenkaat noin 1 metrin etäisyydelle aidasta, koska maadoitusolosuhteet ovat usein huonot.

Perusmaadoittamisella saavutetaan harvoin riittävän hyvä maadoitus, josta johtuen sähköasemalla joudutaan usein käyttämään lisämaadoituselektrodeja. Lisämaadoituselektrodit sijoitetaan usein asemalta lähteville johtoreiteille. Johtoreiteillä olevien pylväiden perustuksien alle asennetaan J-lenkki ja pylväsjalat yhdistetään toisiinsa, jolloin maadoitusresistanssin arvo paranee. Tämän jälkeen pylväille rakennetaan nelihaarainen vaakamaadoituselektrodi, joka asennetaan säteittäisesti pylväältä pois päin. Liitteessä 8 on esitetty pylväiden maadoittamisen periaatekuva ja kuvassa 15 on esimerkki sähköaseman maadoitusverkosta.



Kuva 15. Sähköaseman maadoituksien rakenne [14, s. 111]

Maadoituksien toteuttamiseen käytettävien maadoitusjohtimien tulee olla poikkipinnaltaan riittävän suuria ja niiden liitokset on tehtävä sähköisesti ja mekaanisesti luotettaviksi. [14, s.110 - 111.]

5.1 Maadoituselektrodien asentaminen ja liitokset

Vaakasuorat maadoituselektrodit asennetaan routarajan alapuolelle noin 0,7 metrin syvyyteen. Elektrodit ympäröidään kevyesti tiivistetyllä maalla siten, että ne eivät ole suorassa kosketuksessa kivien kanssa. Elektrodirakenteen kanssa sopimaton maa-aines korvataan sopivalla täytemaalla.

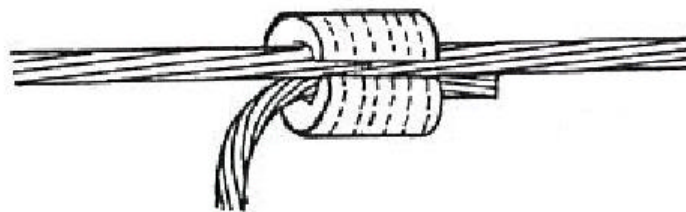
Pystyyn tai vinoon asennettavat sauvaelektrodit lyödään maahan siten, että niiden yläosa jää maanpinnan alapuolelle. Niitä käytetään erityisesti silloin, kun maaperän ominaisresistanssin tiedetään pienenevän syvemmälle mentäessä. Vierekkäiset sauvojen välinen etäisyys ei saa olla pienempi kuin sauvan pituus. [4, s. 104 - 105.]

Liitokset ovat oleellinen osa maadoitusjärjestelmää, sillä niillä liitetään maadoitusjohtimet maadoituselektrodeihin, toisiinsa ja laitteisiin. Ne ovat sähköisten virtapiirien heikoimpia kohtia, joten niiden tulee olla luotettavia ja taa-

ta hyvä sähköinen johtavuus, ettei vikavirtojen aiheuttamat lämpenemät muodostuisi liian suuriksi. [3, s. 142.]

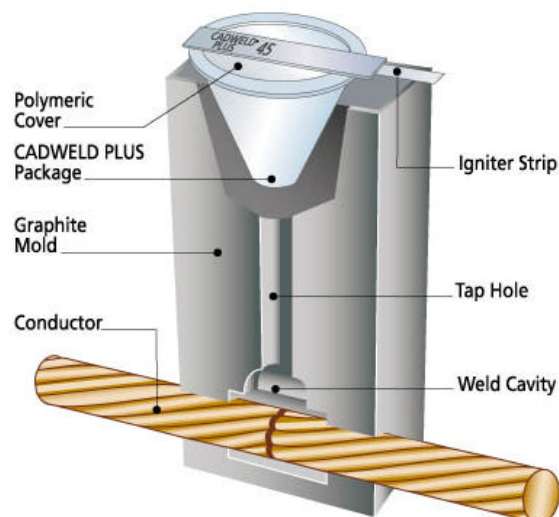
Maadoituselektrodiverkon johtavien osien liittämiseen toisiinsa käytetään liittoksia, jotka omaavat vähintään saman sähköisen johtavuuden, mekaanisen lujuuden ja termisen lujuuden kuin käytettävät elektrodit. Liittimien ja niillä tehtyjen liitosten on toimittava kaikissa käyttöolosuhteissa. [4, s. 104 - 105.]

Maan alapuolella tehtävät liitokset tehdään yleensä puristus- tai hitsausliitoksiin. Kupariköysillä luotettava liitos saadaan aikaan C-puristusliittimillä. Kuvassa 15 on esitetty esimerkki C-puristusliitoksesta.



Kuva 15. C-puristusliitos [3, s.139]

Käytettäessä rakennuksen betoniraidoitusta maadoituselektrodina tai sen osana, voidaan luotettava liitos tehdä maadoitusjohtimeen hitsaamalla tai Cadweld-liitosmenetelmällä. Kuvassa 16 on esimerkki Cadweld-hitsausliitoksesta.



Kuva 16. Cadweld-hitsausliitos [15]

Cadweld-molekyyliliitos on ylivoimainen liitosmenetelmä korroosioherkille maadoitusliitoksille, jotka vaativat suurta johtavuutta ja elinikää, koska liitos

ei vanhene, heikkene eikä korrosoidu. Lisäksi sen johtavuus on parempi kuin maadoitusjohtimen johtavuus. Cadweld-liitoksen etuna on se, että sitä voidaan käyttää kupariköyden liittämiseen toiseen kupari köyteen, metallirakenteeseen, betonirauδοitukseen tai maadoitussauvaan. [15.]

5.2 Maadoitusverkko ja aita

Maadoitusverkko suunnitellaan sähköaseman johtokenttien mukaan, siten että elektrodi ympäröi sähköaseman kojeet. Elektrodi kulkee pääkiskojen rinnalla ja niitä kohtisuorassa olevien kenttien reunoilla siten, että maadoituselektrodista tulee verkkomainen. Maadoitusverkon elektrodit mitoitetaan vikavirran mukaan yhtälön 1 kaavalla ja ne asennetaan 0,7 metriin routarajan alapuolelle.

Sähköaseman maadoitusverkon silmukkakoko on kojeiden alueella 10 m x 10 m ja kojeiden ulkopuolisella alueella 20 m x 20 m. Kojeet on helppo maadoittaa edellä mainitun kokoiseen verkkoon, koska kentän tyypillinen leveys 110 kV:lla on 9 metriä. Tällöin maadoitusjohtimet saadaan myös pidettyä mahdollisimman lyhyinä. Ulkopuoliselle alueelle maadoitusverkko tehdään tulevaisuuden laajennuksia varten.

Aidan tulee olla hyvin johtavaa materiaalia, koska sen tolpat liitetään maadoituselektrodiin siten, että liitoksia on vähintään 40 metrin välein. Voimajohtojen alla kulkevan aidan osuudella maadoitukset tehdään jokaiselle tolpalle ja mikäli aita on huonosti johtavaa materiaali pitää sen yläreunaan asentaa erillinen maadoitusjohdin. Kuvassa 17 a) on esitetty esimerkki aidan tolpan maadoittamisesta ja 17 b) esimerkki aidan maadoittamisesta voimajohdon alla, kun aita on huonosti johtava.

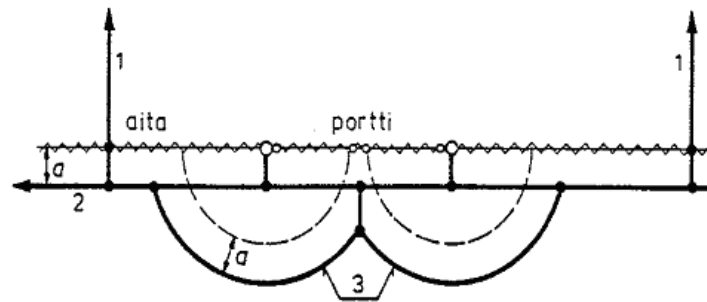


Kuva 17 a) Aidan tolpan maadoittaminen



Kuva 17 b) Aidan maadoittaminen

Myös liukuportin johtavat osat maadoitetaan ja liukumekanismiin tulee olla johtavaa materiaalia. Kuvassa 18 on esitetty perinteisen kääntöportin maadoitus.

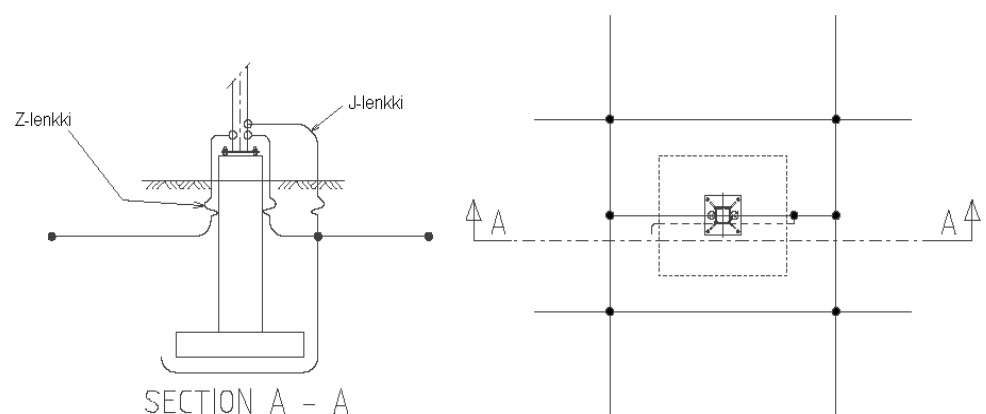


Kuva 18. Sähköaseman aita ja portti [16]

Kuvan numero 1 tarkoittaa sähköasema alueen sisäpuolella olevaa maadoitusverkkoa. Numerolla 2 tarkoitetaan aidan ulkopuolella noin metrin etäisyydellä kulkevaa ruudukon ulointa johdinelektrodiä. Numero 3 on portin edustan potentiaalintasauselektrodi. [16.]

5.3 Perustukset ja teräsrakenteet

Sähköaseman kojeiden teräsrakenteet maadoitetaan maadoitusverkkoon maadoitusjohtimilla. Maadoitusjohtimiin jätetään 100 mm:n lenkki, jota kutsutaan Z-lenkiksi. Se sijoitetaan maanpinnan alapuolelle noin 0,1 - 0,3 metrin syvyyteen ja sen tehtävänä on estää johtimeen vahingoittuminen maan routimisen aikana. Z-lenkki on esitetty kuvassa 19 a).



Kuva 19 a) Z-lenkki ja J-lenkki

Kuva 19 b) Verkkoon liittäminen

Maadoitusjohtimet kiinnitetään kojeteräkseen yleensä kahdesta kohdasta ja toisista päistään maadoitusverkkoon kuvan 19 b) osoittamalla tavalla. Johtimien poikkipinta pitää olla vähintään puolet maadoituselektrodin poikkipin-

nasta. Tällöin kahden maadoitusjohtimen yhteenlaskettu poikkipinta on yhtä suuri kuin maadoituselektrodin poikkipinta, jolloin johtimet ovat yhtä kestäviä kuin maadoituselektrodi.

Näiden lisäksi jokaisen kojeen, kuten katkaisijan tai erottimen betoniperustuksen alle asennetaan 25 mm² kuparijohdin, josta käytetään nimitystä J-lenkki. Poikkeuksena on reaktorialue, jonka perustuksien alle sitä ei asenneta. J-lenkillä saadaan parannettua maadoitusta ja ohjattua vikavirta betoniperustuksen ohi. J-lenkki on esitetty kuvassa 19 a). [16.]

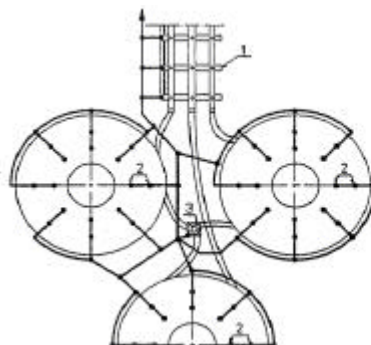
5.4 Päämuuntajat, tähtipistereaktorit ja huoltotasot

Päämuuntajan runko maadoitetaan vikavirran mukaan mitoitetuilla maadoitusjohtimilla neljästä eri pisteestä maadoitusverkkoon. Muuntajan paisuntasäiliöt maadoitetaan kahdesta pisteestä. Näiden lisäksi muuntajan tähtipisteestä viedään vähintään 638 Al johtimella maadoitus ylijännitesuojalle ja maadoituskelalle. Tertiäärikäämi maadoitetaan yhdestä pisteestä 2 x KEVI 95 mm² johtimella (yhdistetty suoja- ja toiminnallinen maadoitus), mikäli siihen ei kytketä reaktorilaitosta.

Muuntajien erilliset kiinteät huoltotasot on maadoitettava kahdesta pisteestä ja katkaisijoilla yhdestä pisteestä. Johtimen on oltava rungossa kiinni tai nosteltavissa. Liikuteltavia huoltotasoja ei maadoiteta. [16.]

5.5 Reaktorilaitokset

Aidattujen reaktorilaitoksien maadoitukset toteutetaan säteittäisesti ja mahdollisimman yksinkertaisesti siten, että maadoituksessa ei esiinny silmukoita. Kuvassa 20 a) on periaatekuva reaktorin maadoituksen toteutuksesta ja kuvassa 20 b) kuva todellisesta reaktorilaitoksesta ja sen maadoittamisesta.



Kuva 20 a) Reaktorilaitoksen maadoitus [16.] 20 b) Todellinen reaktorilaitos

Kuvan 20 a) numerolla 1 tarkoitetaan kiskoston telinettä, johon ei tehdä silmukoita. Numero 2 on tukieristimen alapään maadoitus ja numero 3 virtamuuntajan maadoitus. Silmukkamainen maadoitus yhdistetään yhdestä pisteestä maadoitusverkkoon. [16.]

5.6 Katkaisijat, erottimet, maadoituserottimet ja mittamuuntajat

Katkaisijat, erottimet, maadoituskytkimet ja mittamuuntajat maadoitetaan kaapeleiden mukana tulevalla 25 mm² kuparijohtimella, joka viedään ohjaimen maadoitusliittimelle. Kuvassa 21 on esitetty maadoitusjohtimen vienti erottimen ohjaimelle.



Kuva 21 a) Erottimen maadoitus



21 b) Mittamuuntajien maadoitus

Maadoituskytkimen ja sen liikkuvien osien liittäminen runkoon on yleensä tehty luotettavasti valmistajan toimesta.

Maadoituskytkimen oikosulkukestoiset maadoitukset puolestaan pidetään erillään telineiden maadoituksista. Mittamuuntajille, kuten jännite- ja virtamuuntajille lisätään varmistava 25 mm² kuparijohtin telineen yläpäähän ja muuntajan rungon välille. Kuvassa 21 b) on esitetty esimerkki mittamuuntajan ylimääräisestä maadoituslenkistä. [16.]

5.7 Maadoituskela, ylijännitesuoja ja tukieristin

Maadoituskelat maadoitetaan mustilla eristepäällysteisillä kuparijohtimilla. Johtimen poikkipintana käytetään vähintään 2 x 95 mm² maadoitusjohtimia, jotka asennetaan perustusteräksen eri puolille. Molempien johtimien on kestettävä suurin oikosulkuvirta yhdessä ja yksinään.

Ylijännitesuojat asennetaan eristysjaloille ja maadoitetaan alapäästä mustalla eristepäällysteisellä maadoitusjohtimella maasta eristettyyn kiskoon. Johtimen poikkipintana on käytettävä vähintään 95 mm^2 maadoitusjohdinta. Kuvassa 22 on esitetty ylijännitesuojan maadoittamisesta esimerkki.



Kuva 22. Ylijännitesuojan maadoitus

Kuvassa 22 ylijännitesuojan teräkseen on asennettu laskuri, joka on 1,5 m korkeudella maasta. Johtimen alapää on maadoitettu ruudukkoon. Tukieristimille ei tehdä erillisiä maadoituksia, paitsi reaktorilaitoksen alueella. [16.]

5.8 Sähköasemarakennus

Sähköasemarakennuksen ympärille asennetaan elektrodisilmukka, jota kutsutaan potentiaalintasausrenkaaksi. Tämä potentiaalintasausrenkas yhdistetään maadoitusverkkoon vähintään neljästä eri pisteestä esim. rakennuksen nurkista. Maadoitusverkkoon liittämisen lisäksi rengas yhdistetään rakennuksen sisälle asennettavaan päämaadoituskiskoon vähintään kahdella kelta-vihreällä maadoitusjohtimella. Näiden maadoitusten lisäksi rakennuksen perustuksen alle asennetaan 25 mm^2 J-lenkki, kuten muillekin sähköasema-alueella oleville betoniperustuksille. J-lenkki asennetaan siten, että se kulkee perustuksen kulmasta kulmaan.

Rakennuksen sisälle asennettavaan päämaadoituskiskoon liitetään:

- suojamaadoituskiskot (PE)
- potentiaalintasaus- ja lisämaadoitusjohtimet

- päämaadoitusjohtimet
- metalliset putkistot ja rakennusrungon metalliosat
- mahdolliset nosturikiskot
- häiriöttömän maan kiskot (TE)
- antenni- ja puhelinlaitteiden maadoitus.

Lisäksi kaikki rakennuksen metalliset osat, kuten betonirauditus ja peltikatto maadoitetaan päämaadoituskiskoon. Kuvassa 23 on esitetty päämaadoituskisko, johon on liitetty eri maadoitusjohtimia, joiden lähdöt on merkitty.



Kuva 23. Päämaadoituskisko

Päämaadoituskiskoon on hyvä jättää tyhjiä paikkoja mahdollisten lisämaadoitusten ja tulevaisuuden laajennuksien varalta. [16.]

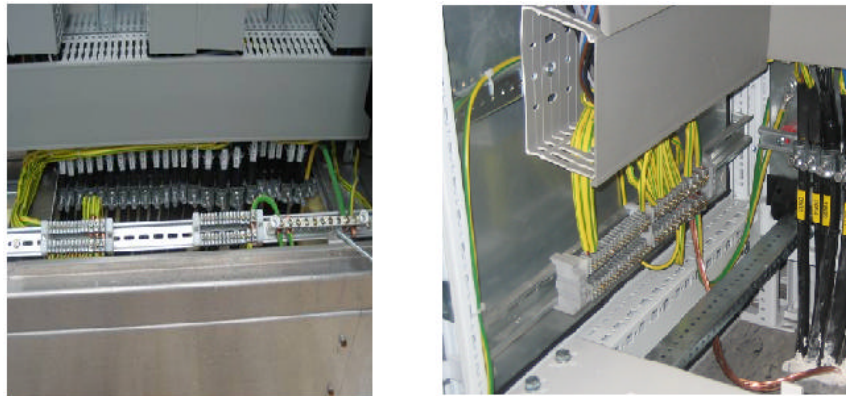
5.8.1 Keskijännitekojeisto

Kojeistot maadoitetaan päämaadoituskiskoon molemmista päistään vähintään 50 mm^2 kuparijohtimella. Lisäksi suositellaan, että kojeiston kennot maadoitetaan viiden kennon välein. Kojeeistoon tulevien keskijännitekaapeleiden metallivaipat kytketään suojamaadoitukseen siten, että suojamaadoitusjohdin on tuotu kaapelivirtamuuntajan läpi ja maadoitettu kaapelin puolelta. Syöttökaapeleiden ja mittamuuntajien toisiopiirien kaapeleiden sekä ohjauskaapeleiden vaipat maadoitetaan molemmista päistä. [16.]

5.8.2 Kaapit ja kotelot

Relekaapeille asennetaan 25 mm^2 kuparimaadoitus rakennuksen päämaadoituskiskolta kaapin PE-kiskoon. Kaapin sisällä olevaan maadoituskiskoon liitetään kaikki kaapin sisällä olevat metalliset ja johtavat osat, kuten releiden

metalliset rungot. Ovet ja kääntökehukset maadoitetaan vähintään 4 mm^2 kuparijohtimilla. Jakokaapit maadoitetaan myös 25 mm^2 kuparijohtimella, mutta yhdistys PE-kiskolta tehdään maadoitusverkkoon. Lisäksi kaapeleiden mukana tuleva seurantamaadoitus liitetään kaapin sisällä olevaan PE-kiskoon. Kuvassa 24 a) on esitetty esimerkki jakokaapin maadoituksesta ja kuvassa 24 b) relekaapin maadoituksesta.



Kuva 24 a) Jakokaapin maadoitus Kuva 24 b) Relekaapin maadoitus

Sähköasema-alueen ulkopuolelle asennettavien kaappien ympärille asennetaan renkaan muotoinen maadoituselektrodi, joka yhdistetään aidan ulkopuolella olevaan maadoitukseen. [16.]

5.8.3 Kaapelihyllyt ja kaapelit

Kaapelihyllyt maadoitetaan molemmista päistä 25 mm^2 kuparijohtimella 50 metrin välein. Mikäli kaapelikanavassa kulkee esimerkiksi kolme hyllyä päällekkäin, maadoitusjohdin asennetaan keskimmaiselle hyllylle. Myös kaapeliputkiin asennetaan maadoitusjohdin, joka on poikkipinnaltaan yhtä paksu kuin kaapelihyllyjen maadoitusjohdin. Useamman putken ryhmässä maadoitus on tehtävä ainakin yhteen putkeen.

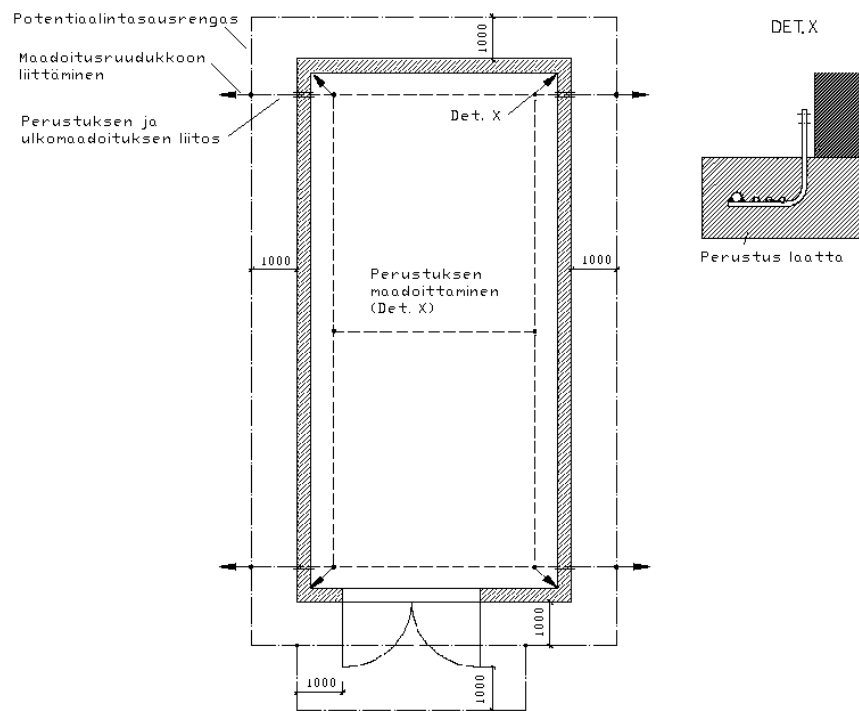
Kaapeleiden mukana viedään 25 mm^2 maadoitusjohdin, jos sitä ei asenneta kaapelihyllylle. Yleensä kaapelit asennetaan hyllyille, jolloin maadoitusjohtimeksi riittää kaapelihyllyn johdin. Voima- ja ohjauskaapeleiden metallinen vaippa/armeeraus maadoitetaan molemmista päistä PE-kiskoon ja suoja-maadoittaminen toteutetaan KEVI-johtimella.

Instrumenttikaapeleiden yhteinen metallinen vaippa ja parin vaippa maadoitetaan vain syöttöpäästä. Häiriötöntä maadoitusta käytetään, jos järjestelmä

vaatii sitä, jolloin viestikaapeille ja ala-asemille asennetaan TE-kisko, johon parin vaippa maadoitetaan. Toiminnallisen ja häiriöttömän maadoitusjohtimen väri on musta, koska johdin on eristetty. [16.]

5.9 GIS-rakennus

GIS-rakennuksen (GIS = Gas Insulated Switchgear) maadoitus toteutetaan yleensä valmistajan ohjeiden mukaisesti varsinkin kojeistojen osalta, koska kaasueristeisiä kojeistoja koskevat ratkaisut vaativat erikoisosaamista. Itse rakennus maadoitetaan hyvin samalla tavalla kuin normaali sähköasemarakennus. Rakennuksen ympärille asennetaan potentiaalintasausrengas, joka yhdistetään neljästä pisteestä maadoitusruudukkoon. Myös rakennuksen perustus yhdistetään ulkona olevaan maadoitusruudukkoon neljästä pisteestä. Liittäminen tehdään betoniraidoitukseen hitsattuun lattateräkseseen, joka on betonin ulkopuolella. Kuvassa 25 on esitetty rakennuksen maadoittaminen sekä yksityiskohtainen kuva betoniperustuksen lattaraidasta.



Kuva 25. Rakennuksen maadoittaminen

Maanpäällinen osa lattaraidasta on kuumasinkitty ja siinä on reikä liitosta varten. Rakennuksen sisällä olevat maadoitukset tehdään valmistajan ohjeiden mukaisesti. Rakennuksen asennetaan päämaadoituskisko, johon liitetään kaikki johtavat osat ja osamaadoitukset. [16.]

6 YHTEENVETO

Kirjallisuuden ja muun lähdeaineiston perusteella saatiin kerättyä melko paljon erilaista tietoa sähköaseman maadoittamisesta. Saatuja tietoja ja menetelmiä voidaan käyttää apuna sähköaseman maadoituksia suunniteltaessa ja toteutettaessa. Aluksi työn oli tarkoituksena olla hieman laajempi ja yksityiskohtaisempi, mutta työn edetessä siitä jouduttiin jättämään osia pois, koska aikataulu alkoi tulla esteeksi.

Lopputuloksena syntyi melko paljon maadoittamisen kannalta oleellista tietoa ja aineistoa. Työn alkuperäinen päämäärä eli sähköaseman maadoitusten suunnittelu ja toteutus saatiin melko hyvin käsiteltyä ja selvitettyä. Lisäksi Maarian sähköasemalle tehty perus- ja mallisuunnitelma auttavat hahmottamaan maadoitusten suunnittelua kokonaisuutena.

Maadoitusten toteuttamista koskeva osio saatiin käsiteltyä riittävässä laajuudessa, joten sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi työmaalla maadoituksia tehtäessä. Käsitellyt periaatteet ovat kuitenkin yleisiä, joten toteutuksessa on huomioitava asiakkaan suositukset ja mahdolliset määräyksien muutokset. Lisäksi erikoisempien osa-alueiden, kuten GIS-kojeistojen maadoittamisessa on noudatettava valmistajan antamia ohjeita.

Maadoitusten mittauksia saatiin käsiteltyä myös aika kattavasti. Osiossa esiteltiin eri mittausmenetelmiä ja uskon, että siitä on hyötyä maadoitusten mittauksia suorittaville henkilöille. Mittauksissa saattaa esiintyä eri häiriötekijöitä, jotka on otettava huomioon mittauksia tehtäessä. Eri menetelmät voivat myös poiketa toisistaan, joten menetelmä on valittava mittauskohteen mukaan. Tässä työssä ei kuitenkaan suoritettu eri menetelmien keskenään vertailua, eikä käsitelty niissä esiintyviä häiriöitä tai niiden ehkäisemiseksi käytettäviä menetelmiä.

Kokonaisuudessaan työssä saavutettiin riittävän kattava dokumentti, joka käsittelee sähköasemaa ja sen maadoituksia. Työssä on pyritty kuvaamaan maadoittamiseen liittyviä asioita melko tarkasti ja yritetty myös perustella niiden merkitystä. Mielestäni olen myös onnistunut edellä mainitussa melko hyvin.

LÄHTEET

- [1] Siemens Osakeyhtiö. *Vuosikatsaus 2007* [verkkodokumentti, viitattu 20.1.2009]. Saatavissa: <http://www.siemens.fi/portal.nsf/all/6E973539D4649AEFC2257411003A9D31?opendocument&expand=1>.
- [2] Elovaara, Jarmo - Laiho, Yrjö, *Sähkölaitostekniikan perusteet*. 4. uud. painos. Helsinki: Otatieto. 2001 (1988).
- [3] Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL, *Maadoituskirja*. Helsinki: Painokurki Oy. 2007.
- [4] Suomen Standardisoimisliitto SFS. *SFS 6001+A1 Suurjännitesähköasennukset*. 2. painos. Helsinki: SESKO ry. 2005.
- [5] Aura, Lauri - Tonteri, Antti J, *Sähkölaitostekniikka*. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö. 1993.
- [6] Sähköinfo Oy. *Maadoituskurssi 17.12.2008*. Espoo: Siemens Osakeyhtiö.
- [7] Tiehallinto. *Sähköinen vastusluotaus tien painaumalaskelman lähtötietojen hankinnassa 2001* [verkkodokumentti, viitattu 23.2.2009]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/tppt/tppt_suunmat.htm#2.
- [8] E.ON UK. Measurement of *Earthing Systems 2007* [verkkodokumentti, viitattu 23.2.2009]. Saatavissa: http://www.eon-uk.com/263.aspx?q=soil+resistivity&site=default_collection.
- [9] Sähkötieto ry, *St-kortisto 53.22 Maadoitusresistanssin mittaus*. Espoo: Sähkötieto ry. 2005.
- [10] Kohvakka, Ari, *Sähkömittaustekniikka*. Kurssimateriaali 2007.
- [11] Projektipäällikkö Mikko Parkkosen haastattelu. 12.3.2009. Siemens Osakeyhtiö
- [12] Turun kaupunki, kaupunginhallitus, *Esityslistat ja pöytäkirjat* [verkkodokumentti, viitattu 9.3.2009]. Saatavissa: <http://www05.turku.fi/ah/kh/2002/080-5021x/692164.htm>
- [13] Turku Energia Sähköverkot Oy, *Maarian 110/(20) 10 kV sähköaseman hankintaohjelma*. Tekninen erittely. Turku: 2008
- [14] Suomalaiset ABB-yhtiöt, *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 9. uud. painos. Vaasa: 2000.
- [15] TSP Tampereen Sähköpalvelu Oy. *Cadweld-liitos* [verkkodokumentti, viitattu 23.3.2009]. Saatavissa: http://www.tsp.fi/liit_luet.htm
- [16] Fingrid Oyj. *Hyvät asennustavat*. Kurssimateriaali 2008.

MAADOITUSELEKTRODIEN VÄHIMMÄISMITAT

Materiaali		Elektrodin tyyppi	Vähimmäiskoko				
			Ydinosa			Päällyste/vaippa	
			Halkaisija (mm)	Poikkipinta (mm)	Paksuus (mm)	Yksittäiset arvot (µm)	Keskimääräiset arvot (µm)
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha ²⁾		90	3	63	70
		Profiili (ml.levyt)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin	10				50
	Lyijyvaipalla ¹⁾	Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin	8			1000	
	Päällystetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2000	
	Elektrolyytti-kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakasuoran maadoituselektrodin pyöreä johdin		25 ³⁾			
		Köysi	1,8*	25 ³⁾			
		Putki	20		2		
	tinattu	Köysi	1,8*	25		1	5
	sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla ¹⁾	Köysi	1,8*	25		1000	
		Pyöreä johdin		25		1000	

* köyden yksittäisen johtimen halkaisija

1) ei sovellu upotettavaksi suoraan betoniin

2) nauha, valssattu tai leikattu pyörästetyillä reunoilla

3) olosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosioriski ja mekaanisen vaurion riski on alhainen, voidaan käyttää poikkipintaa 16 mm²

MITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT VIRRAT

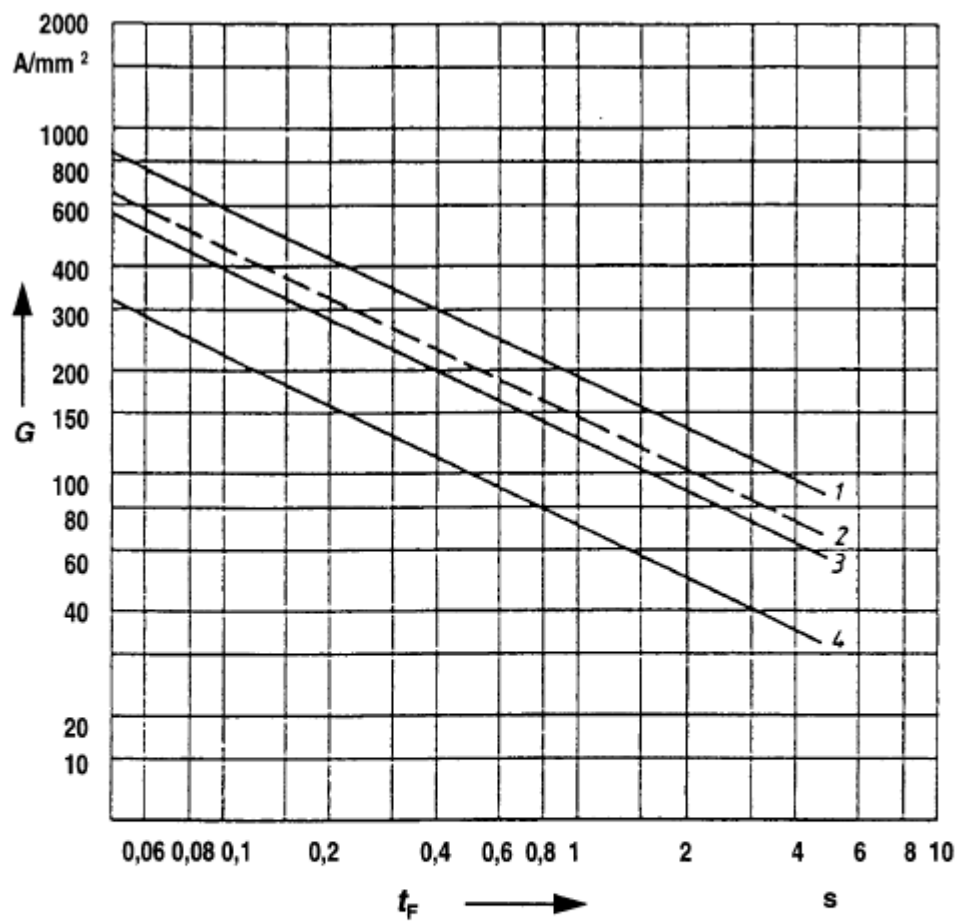
Suurjännitejärjestelmän tyyppi		Termiseen kuormitukseen liittyvä virta ¹⁾		Maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvät virrat
		maadoitus-elektrodi	maadoitus-johdin	
Maasta erotetut järjestelmät		– ⁶⁾	I''_{kEE} ⁹⁾	$I_E = r \times I_C$ ⁷⁾
Sammutetut järjestelmät	Sähköasemat, joissa sammutuskelat	– ⁶⁾	I''_{kEE} ^{3) 9)}	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$ ²⁾
	Sähköasemat ilman sammutuskeloja			$I_E = r \times I_{Res}$
Impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät		I''_{k1} ⁴⁾	I''_{k1}	I_E ⁵⁾
Sammutetut järjestelmät ja väliaikaisesti impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät	Sähköasemilla, joilla tähtipiste on väliaikaisesti maadoitettu	I''_{k1} ⁴⁾	I''_{k1} ⁸⁾	I_E ⁵⁾
	Muilla sähköasemilla	– ⁶⁾	I''_{kEE} ³⁾	$I_E = r \times \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}$ ²⁾
	sammutuskelat käytössä			$I_E = r \times I_{Res}$
	ilman sammutuskeloja			

¹⁾ Liitteen A mukaiset vähimmäispoikkipinnat on otettava huomioon.
²⁾ Kaavaa voidaan soveltaa vain järjestelmiin, joissa kompensointitaste on korkea. Kun kompensoitua järjestelmää käytetään selvästi sivussa resonanssitaajuudesta, on otettava huomioon myös vikapaikassa kulkevan virran loiskomponentti.
³⁾ Sammutuskelojen mitoitusvirrat on otettava huomioon myös kelojen maadoitusjohtimien suunnittelussa.
⁴⁾ Maadoituselektrodijärjestelmän suunnittelussa voidaan ottaa huomioon virran jakautuminen jos on käytössä useita reittejä.
⁵⁾ Yleistä laskentakaavaa ei ole käytössä (ks. esimerkiksi kuva 2.2).
⁶⁾ Liitteen A mukaiset vähimmäispoikkipinnat ovat riittäviä.
⁷⁾ Jos paikallisissa suurjännitejärjestelmissä, esimerkiksi teollisuuslaitoksissa, maasulun todennäköinen kestoaika on huomattavan pitkä, esim. useita tunteja, on syytä käyttää arvoa I''_{kEE} arvon I_E asemasta.
⁸⁾ Käytetään suurempaa arvioista I''_{kEE} ja I''_{k1} .
⁹⁾ Jos maadoitusjohdinta rasittava maasulun kokonaiskestoaika on alle 1 s, voidaan käyttää virtaa I_C tai I_{Res} .

Taulukon 5 merkkien selitykset:

I_C Laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta.
 I_{Res} Maasulun jäännösvirta (ks. kuva 2.3b). Jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta I_C .
 I_L Kyseisen sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa.
 I''_{kEE} Kaksoismaasulkuvirta, joka on laskettu standardin HD 533 mukaisesti (virralle I''_{kEE} voidaan käyttää maksimiarvona 85 % symmetrisestä alkukoiosulkuvirrasta).
 I''_{k1} Vaiheen ja maan välisen oikosulun (vikaresistanssi on 0) symmetrinen alkukoiosulkuvirta, joka on laskettu standardin HD 533 mukaisesti.
 I_E Maaperään siirtyvä virta (ks. kuva 2.2).
 r Reduktiokerroin (ks. liite J). Jos sähköasemalta lähtevillä johdoilla ja kaapeilla on eri reduktiokerroimet, on määritettävä asianmukainen virta (liitteen N mukaisesti).

OIKOSULKUVIRRRAN TIHEYS

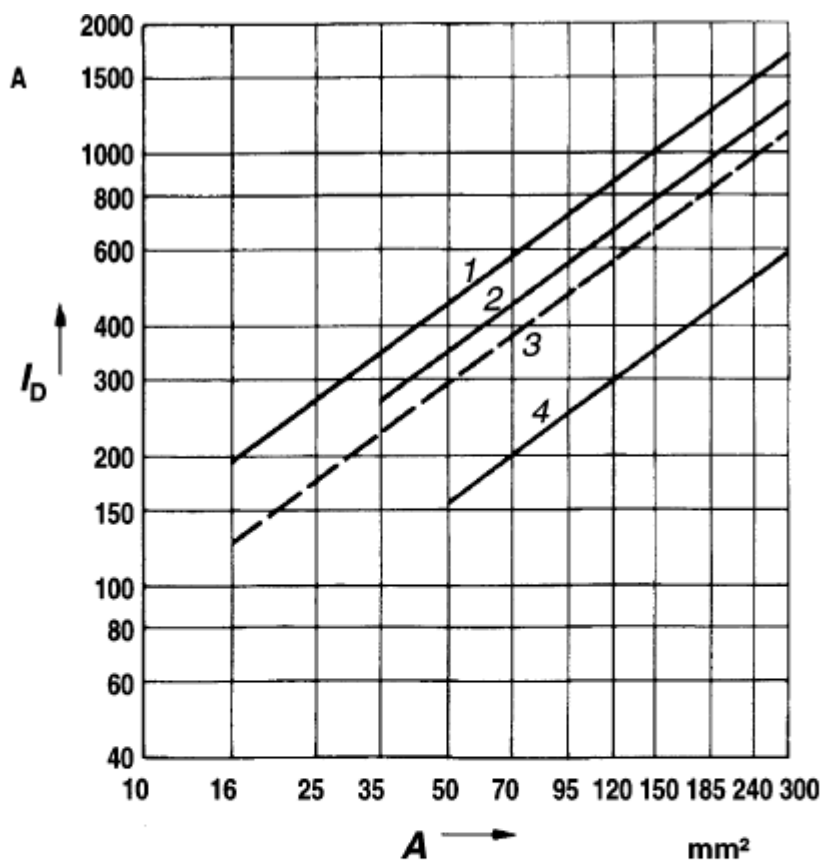


Suorat 1, 3 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 2 loppulämpötilalle 150 °C.

- 1 Kupari, paljas tai sinkkipäällysteinen
- 2 Kupari, tinattu tai lyijyvaipalla
- 3 Alumiini, vain maadoitusjohdin
- 4 Sinkitty teräs

Kuva B.1 Maadoitusjohtimien ja maadoituselektrodien oikosulkuvirran tiheys G vikavirran kestoajan t_F funktiona

PYÖREIDEN MAADOITUSJOHTIMIEN POIKKIPINNAT



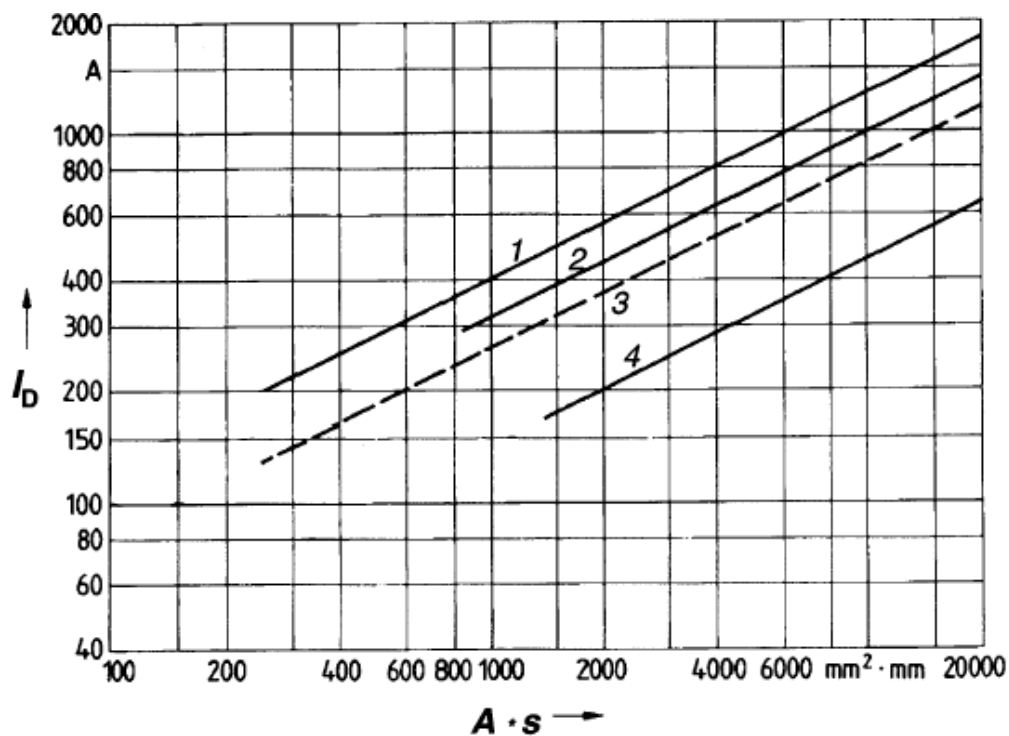
Suorat 1, 3 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 2 loppulämpötilalle 150 °C.

Taulukossa B.2 on esitetty muunnoskerroimet muille loppulämpötiloille.

- 1 Kupari, paljas tai sinkkipäällysteinen
- 2 Kupari, tinattu tai lyijyvaipallinen
- 3 Alumiini
- 4 Sinkitty teräs

Kuva B.2a Poikkinnaltaan pyöreän maadoitusjohtimien jatkuva virta I_D poikkipinnan A funktiona

SUORAKULMAISTEN MAADOITUSJOHTIMIEN POIKKIPINNAT



Suorat 1, 3 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 2 loppulämpötilalle 150 °C.

Taulukossa B.2 on esitetty muunnoskerroimet muille loppulämpötiloille.

- 1 Kupari, paljas tai sinkitty
- 2 Kupari, tinattu tai lyijyvaipallinen
- 3 Alumiini
- 4 Sinkitty teräs

Kuva B.2b Poikkipinnaltaan suorakulmaisten maadoitusjohtimien jatkuva virta I_D poikkipinnan ja profiilin ympärysmittan tulon ($A \times s$) funktiona

REDUKTIOKERTOIMET**Ilmajohtojen ja kaapeleiden reduktiokertoimien tyypillisiä arvoja**

Ilmajohtojen (110 kV) ukkosjohtimet

Teräs 50 - 70 mm ²	r = 0,98
ACSR 44/32 mm ²	r = 0,77
ACSR 300/50 mm ²	r = 0,61
2 x 35 St	r = 0,951
2 x 50 St	r = 0,904
2 x Savo	r = 0,534
2 x Imatra	r = 0,393
2 x Suursavo	r = 0,382
2 x Ostrich	r = 0,360

Paperieristeiset kaapelit (10 kV ja 20 kV)

Cu 95 mm ² /1,2 mm lyijyvaippa	r = 0,2 - 0,60
Al 95 mm ² /1,2 mm alumiinivaippa	r = 0,2 - 0,30

Yksijohtimiset PEX-kaapelit (10 kV ja 20 kV)

Cu 95 mm ² /16 mm ² kuparisuoja	r = 0,50 - 0,60
---	-----------------

Yksijohtimiset öljykaapelit (110 kV)

Cu 300 mm ² /2,2 mm alumiinivaippa	r = 0,37
---	----------

Painekaasukaapelit teräsputkessa (110 kV)

Cu 300 mm ² /1,7 mm teräs	r = 0,01 - 0,03
--------------------------------------	-----------------

Yksijohtimiset PEX-kaapelit (110 kV)

Cu 300 mm ² /35 mm ² kuparisella suojavaipalla	r = 0,32
--	----------

Yksijohtimiset öljykaapelit (400 kV)

Cu 1200 mm ² /1200 mm ² alumiinivaippa	r = 0,01
--	----------

ERITYISTOIMENPITEET

Erityistoimenpiteiden M kuvaus

Taulukko D.1 Olosuhteet erityistoimenpiteiden M käytölle sallittujen kosketusjännitteiden U_{Tp} (ks. kuva 9.1) varmistamiseksi

Vian kestoaika t_F	Maadoitusjännite U_E	Asennusten ympärillä sijaitsevilla ulkoseinillä ja aidoilla	Asennusten sisäpuolella	
			Sisäasennus	Ulkoasennus
$t_F > 5$ s	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	M1 tai M2	M3	M4.1 tai M4.2
	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	Osoitetaan, että $U_T \leq U_{Tp}$	M3	M4.2
$t_F \leq 5$ s	$U_E \leq 4 \times U_{Tp}$	M1 tai M2	M3	M4.2
	$U_E > 4 \times U_{Tp}$	Osoitetaan, että $U_T \leq U_{Tp}$		

M1 Erityistoimenpiteet sisäasennuksia sisältävien rakennusten ulkoseinille.

Suojaukseen ulkoiselta kosketusjännitteeltä voidaan käyttää jotain erityistoimenpiteistä M1.1...M1.3.

M1.1: Johtamattoman materiaalin (esimerkiksi tiilen tai puun) käyttö ulkoseinissä ja ulkopuolelta kosketeltavissa olevien maadoitettujen metalliosien välttäminen.

M1.2: Potentiaalinhjaus maadoitusjärjestelmään kytketyllä vaakasuoralla maadoituselektrodilla, joka on noin 1 m etäisyydellä ulkoseinän ulkopuolella ja enintään 0,5 m syvyydellä.

M1.3: Käyttöpaikan eristys käyttämällä riittävän suuria eristeainekerroksia, jolloin eristekerroksen ulkopuolelta on mahdotonta kädellä koskettaa maadoitettuja johtavia osia.

Jos koskettaminen on mahdollista vain sivusuunnassa, eristekerroksen leveydeksi riittää 1,25 m.

Seuraavia tapoja tehdä käyttöpaikan eristys pidetään riittävänä:

- eristyksen muodostaa vähintään 100 mm paksu kivimurskekerros
- eristyksen muodostaa asfalttikerros, jossa on sopiva pohja (esimerkiksi sora)
- eristyksen muodostaa eristematto, jonka pinta-ala on vähintään 1000 mm x 1000 mm ja jonka paksuus on vähintään 2,5 mm tai toimenpide, jolla varmistetaan vastaava eristys.

M2 Erityistoimenpiteet ulkoasennusten ulkopuolisille aidoille

Ulkoiselta kosketusjännitteeltä suojaukseen voidaan käyttää vähintään yhtä erityistoimenpiteistä M2.1...M2.3. Ulkopuolisten aitojen porteille on otettava huomioon myös erityistoimenpide M2.4.

M2.1: Käytetään aitoja, jotka on tehty johtamattomasta materiaalista tai muovipäällysteisestä metallilankaverkosta (jossa voi olla myös paljaita johtavia poikkiävenejä).

M2.2: Käytetään johtavasta materiaalista tehtyjä aitoja ja rakennetaan potentiaalinhjaus aitaan kytketyllä vaakasuoralla maadoituselektrodilla, joka on noin 1 m etäisyydellä aidan ulkopuolella ja enintään 0,5 m syvyydellä. Aidan kytkentä maadoitusjärjestelmään on valinnainen (ks. kuitenkin erityistoimenpide M2.4).

M2.3: Käytetään käyttöpaikan eristystä erityistoimenpiteen M1.3 mukaisesti ja aidan maadoitus tehdään joko velvoittavan liitteen F mukaisesti tai kytkemällä aita maadoitusjärjestelmään.

M2.4: Jos ulkopuolisten aitojen portit kytketään maadoitusjärjestelmään suoraan tai henkilökunnan kulunvalvontajärjestelmien tms. suojajohtimien tai kaapelien metallivaippojen kautta, potentiaalinojhaus tai käyttöpaikan eristys porttien avausalueella on tehtävä erityistoimenpiteen M1.3 mukaisesti.

Jos erikseen maadoitetun johtavan aidan portit kytketään päämaadoitusjärjestelmään, portit on eristettävä aidan johtavista osista siten, että muodostuu vähintään 2,5 metrin sähköinen erotus. Tämä voidaan aikaansaada käyttämällä johtamattomasta materiaalista olevan aidan osaa tai käyttämällä johtavaa aitausta, jonka päässä on eristetulpat. On huolehdittava, että sähköinen erotus säilyy porttien ollessa täysin auki.

M3 Erityistoimenpiteet sisäasennuksissa

Sisäasennuksissa voidaan soveltaa vähintään yhtä erityistoimenpiteistä M3.1...M3.3.

M3.1: Potentiaalinojhaus rakennuksen perustuksiin upotetuilla ruudukkotypyisillä elektrodeilla (esimerkiksi käyttäen elektrodeja, joiden poikkipinta on vähintään 50 mm² ja ruudukon leveys enintään 10 m tai käyttäen potentiaalinojhausrakenneteräsverkkoja) ja kytkentä maadoitusjärjestelmään vähintään kahdesta eri paikasta.

Jos betoniteräksiä käytetään myös vikavirran poisjohtamiseen, terästen virranjohtokyky on tarkistettava laskemalla.

Jos rakenneteräsverkkoja käytetään, vierekkäiset verkot on kytkettävä yhteen ainakin yhdestä paikasta ja kaikki verkot yhdessä on kytkettävä maadoitusjärjestelmään vähintään kahdesta paikasta.

Aikaisemmin rakennetuissa rakennuksissa voidaan käyttää ulkoseinien lähelle maahan kaivettua vaakasuoraa maadoituselektrodiä, joka yhdistetään maadoitusjärjestelmään.

M3.2: Käyttöpaikkojen rakenne tehdään metallista (esimerkiksi metalliruudukosta tai metallilevystä) ja kytketään maadoitettaviin käyttöpaikalta kosketettaviin metalliosiin.

M3.3: Käytetään käyttöpaikkojen eristystä erityistoimenpiteen M1.3 mukaisesti. Potentiaalintasausta varten on maadoitettavat samanaikaisesti kosketeltavat metalliosat kytkettävä yhteen.

M4 Erityistoimenpiteet ulkoasennuksissa

M4.1: Käyttöpaikoilla:

Potentiaalinojhaus vaakasuoralla maadoituselektrodilla noin 0,2 m syvyydellä ja noin 1 m etäisyydellä käytettävistä laitteista. Tämä vaakasuoraa maadoituselektrodi on kytkettävä kaikkiin käyttöpaikalta kosketeltaviin maadoitettaviin metalliosiin.

tai

Käyttöpaikkojen rakenne on metallia (esimerkiksi metalliruudukkoa tai metallilevyä) ja rakenne kytketään maadoitettaviin käyttöpaikalta kosketeltaviin metalliosiin.

tai

Paikan eristys erityistoimenpiteen M1.3 mukaisesti. Metalliosat, jotka on maadoitettava ja joita voidaan koskettaa samanaikaisesti käyttöpaikalta, on kytkettävä yhteen potentiaalintasausta takia.

M4.2: Asentamalla maadoitusjärjestelmää ympäröivä vaakasuora maadoituselektrodi maahan suljetun renkaan muotoon. Tämän renkaan sisäpuolella maahan asennetaan maadoitusverkko, jonka yksittäisen ruudukon koko on enintään 10 m x 50 m. Renkaan ulkopuolelle sijoitettavissa asennuksen yksittäisissä osissa, jotka on yhdistetty maadoitusjärjestelmään (esimerkiksi valomastot, jotka kytketään maadoitusjärjestelmään suojajohtimilla) on käytettävä noin 1 m etäisyydellä ja noin 0,2 m syvyydellä olevaa potentiaalinojhauslektrodiä.

PYLVÄSMAADOITUSTEN PERIAATEKUVA

