



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Teemu Vähäsarja

Laajan maadoitusjärjestelmän vaatimukset teollisuudessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja Automaatiotekniikka

Insinöörityö

12.01.2021

Tekijä Otsikko	Teemu Vähäsarja Laajan maadoitusjärjestelmän vaatimukset teollisuudessa
Sivumäärä Aika	31 sivua + 7 liitettä 12.01.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Tuomo Heikkinen sähkönjakelun asiantuntija Sami Tuomela
<p>Insinööriyön tavoitteena oli laatia AFRY Finland Oy:lle ohje laajan maadoitusjärjestelmän suunnittelusta teollisuusympäristöön. Laaja maadoitusjärjestelmä rakentuu yhteen liitetystä paikallisista maadoitusjärjestelmistä, joten sen ymmärtämiseksi on tunnettava myös maadoittamisen perusteet.</p> <p>Työ suoritettiin tekemällä selvitys maadoittamisesta sekä laajasta maadoitusjärjestelmästä käyttäen lähdemateriaalina keskeisimpiä voimassaolevia SFS-standardeja, ST-kortistoa, Energiateollisuuden sähköverkkosuosituksia sekä alan kirjallisuutta. Selvitys suoritettiin teollisuuden sähköjärjestelmien näkökulmasta, joten se käsittää sekä pien- että suurjännitejärjestelmien tarkastelua.</p> <p>Työssä käsitellään maadoittamisen perusteita, sekä sähkönjakelujärjestelmän, että maadoitus- ja potentiaalintausjärjestelmien osalta. Työssä esitetään kosketus- ja rasisusjännitteiden muodostuminen ja annetaan ohjeet niiden määrittelemiseen. Laajan maadoitusjärjestelmän muodostaville paikallisille maadoitusjärjestelmille annetaan mitoitusohjeet sekä ohjeet pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitusten yhdistämiselle. Työn viimeisessä osiossa käsitellään laajaa maadoitusjärjestelmää. Siinä käydään läpi laajalle maadoitusjärjestelmälle annetut vaatimukset, esitetään sen toteuttavan verkon topologia sekä annetaan ohjeita sen suunnitteluun ja dokumentoimiseen.</p> <p>Työssä havaittiin, että laajalle maadoitusjärjestelmälle ei ole olemassa yksiselitteistä määrittelytapaa, vaan sen syntyminen tulee aina tapauskohtaisesti määritellä. Tämä asia korostaa huolellisen dokumentoinnin tärkeyttä laajojen maadoitusjärjestelmien yhteydessä.</p> <p>Insinööriyön tuloksena saatua ohjeistusta voidaan käyttää AFRY:n henkilöstön kouluttamiseen sekä tukemaan suunnittelutyötä. Ohjeistusta noudattamalla pystytään toteuttamaan laaja maadoitusjärjestelmä suunniteltaviin teollisuuskohteisiin sekä laatimaan siitä vaadittu dokumentaatio.</p>	
Avainsanat	teollisuus, maadoittaminen, paikallinen maadoitusjärjestelmä, laaja maadoitusjärjestelmä, kosketusjännite

Author Title	Teemu Vähäsarja Requirements of a Global Earthing System in Industry	
Number of Pages Date	31 pages + 7 appendices 12 January 2021	
Degree	Bachelor of Engineering	
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering	
Professional Major	Electrical Power Engineering	
Instructors	Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer Sami Tuomela, Power Distribution specialist	
<p>This thesis study was carried out for the needs of AFRY Finland Oy. The purpose of this study was to create instructions for the design of a global grounding system for an industrial environment. This paper describes the basic requirements of the global grounding system. It also provides the basic theory of grounding, as well as sizing instructions for local grounding systems.</p> <p>The research was based on a literature review. Different documents were confronted, these included Finnish SFS standards, ST cards, Electricity Grid Recommendations among other sources.</p> <p>The thesis explains the basics of earthing from the perspective of the electricity distribution system. It also provides a general overview of earthing and equipotential bonding systems. The thesis introduces contact and stress voltages and explains how to determine their magnitude. Dimensioning instructions are given for local earthing systems that form an extensive earthing system. Requirements for connecting the earthing of low and high voltage systems are given. The last section of this the thesis reviews the requirements for a global grounding system and presents the topology of the network that implements it. Finally this sections provides instructions for the design and documentation of global grounding system.</p> <p>During the project it was found that the definition of a global grounding system is a relative concept. It should always be determined on a case-by-case examination. This issue highlights the importance of careful documentation in the context of global grounding systems.</p> <p>The resulting instructions can be used to train AFRY staff and it can be used to support grounding design work. By following the instructions, it is possible to implement a global grounding system for the industrial sites and to prepare the required documentation.</p>		
Keywords	Industry, Grounding, Local grounding system, Global grounding system, Contact voltage	

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkönjakelujärjestelmät	2
2.1	Yleisesti	2
2.2	TN-järjestelmä	2
2.2.1	TN-C-järjestelmä	3
2.2.2	TN-S-järjestelmä	4
2.2.3	TN-C-S-järjestelmä	4
2.3	IT-järjestelmä	5
3	Kosketusjännite	7
3.1	Kosketusjännitteen raja-arvot	7
3.2	Kosketusjännite pienjännitejärjestelmissä	9
3.3	Kosketusjännite suurjännitejärjestelmissä	10
4	Maadoittaminen	11
4.1	Maadoittamisen peruseriaatteet	11
4.2	Pienjännitejärjestelmän maadoitusten mitoittaminen	12
4.2.1	Maadoituselektrodi	12
4.2.2	Suoja- ja maadoitusjohtimet	13
4.3	Suurjännitejärjestelmän maadoitusten mitoittaminen	15
4.3.1	Korroosionkestävyyden ja mekaanisen lujuuden mukaan	15
4.3.2	Termisen lujuuden mukaan	16
4.4	Potentiaalintasaus	18
5	Pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitusten yhdistäminen	19
6	Laaja maadoitusjärjestelmä	21
6.1	Määritelmä	21
6.2	Rakenne	22
6.3	Suunnittelu	23
6.4	Todentaminen ja dokumentointi	25

6.5	Saavutettavat hyödyt ja mahdolliset haitat	25
7	Yhteenveto	27
	Lähteet	30
	Liitteet	
	Liite 1. Sallittujen kosketusjännitteiden laskentamenetelmä	
	Liite 2. Esimerkkejä kosketusjännitteen muodostumisesta vikatilanteissa	
	Liite 3. Maadoitusjärjestelmän periaatepiirros	
	Liite 4. Maadoituselektrodien minimimitat mekaanisen ja korroosiokestävyyden mukaan	
	Liite 5. Suurjännitejärjestelmien maadoitusten suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat	
	Liite 6. Maadoitusjohdinten ja -elektrodien poikkipinta-alan määrittäminen	
	Liite 7. Pienjännitejärjestelmän ylijännitteet suurjännitejärjestelmän vian aikana	

Lyhenteet

EMC	Electromagnetic compatibility. Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
IT	Isolated Terra. Sähkönjakelujärjestelmä, joka perustuu jännitteisten osien eristämiseen maasta tai niiden yhdistämiseen maahan impedanssin välityksellä.
MK KEVI	Keltavihreäraidallisella muovieristeellä päällystetty kuparijohdin, jota käytetään yleisesti suomaadoitusjohtimena.
PEN-johdin	Johdin joka toimii samanaikaisesti suojamaadoitus- että nollajohtimena.
PVC	Polyvinyylidikloridi. Kaapeleissa yleisesti käytetty eristemateriaali.
TN-C	Terra Neutral - Combined. Sähkönjakelujärjestelmä, jossa nolla ja suojamaadoitusjohdin on yhdistetty yhdeksi PEN-johtimeksi.
TN-S	Terra Neutral - Separated. Sähkönjakelujärjestelmä, jossa nolla ja suojamaadoitusjohdin on jaettu erillisille johtimille.
TN-C-S	Terra Neutral - Combined - Separated. Sähkönjakelujärjestelmä, johon sisältyy TN-C- ja TN-S-järjestelmällä toteutettuja osuuksia.
U_{Tp}	Kosketusjännite.

1 Johdanto

Kysymykseen 'Mikä on laaja maadoitusjärjestelmä?' ei ole helppoa löytää kattavaa ja yksiselitteistä vastausta. Sähköalan kirjallisuudessa laajaa maadoitusjärjestelmää on käsitelty yleensä hyvin yleisellä tasolla eivätkä edes standardit tarjoa sille yksiselitteistä määritelmää. Tämän insinööriyön tarkoitus on tarjota vastaus tuohon kysymykseen.

Työn aiheena on tehdä selvitys laajasta maadoitusjärjestelmästä teollisuuden sähköjärjestelmien näkökulmasta. Koska laaja maadoitusjärjestelmä muodostuu yhteen liitetyistä paikallisista maadoitusjärjestelmistä, on sen ymmärtämiseksi tunnettava myös maadoittamisen perusteet. Työn tavoitteena on luoda suunnitteluohje, jota soveltamalla voidaan suunnitella teollisuuslaitoksen paikalliset maadoitusjärjestelmät siten, että yhdessä ne muodostavat toimivan laajan maadoitusjärjestelmän.

Työssä käsitellään maadoittamisen perusteita, sekä sähkönjakelujärjestelmän, että maadoitus- ja potentiaalintausjärjestelmien osalta. Työssä esitetään kosketus- ja rasi- tusjännitteiden muodostuminen ja annetaan ohjeet niiden määrittelyyn. Laajan maadoitusjärjestelmän muodostaville paikallisille maadoitusjärjestelmille annetaan mitoitusohjeet sekä ohjeet pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitusten yhdistämiseksi. Työn viimeisessä osiossa käsitellään laajaa maadoitusjärjestelmää. Siinä käydään läpi laajalle maadoitusjärjestelmälle annetut vaatimukset, esitetään sen toteuttavan verkon topologia sekä annetaan ohjeita sen suunnitteluun ja dokumentointiin.

Insinööriyön tilaajana toimi AFRY Finland Oy. Työn motivaatio on yrityksessä syntynyt tarve päivittää sen työntekijöiden tietoa laajasta maadoitusjärjestelmästä. Viime vuosina laajaa maadoitusjärjestelmää koskevat vaatimukset ovat tarkentuneet ja sen toteutumiseen on alettu kiinnittää enemmän huomiota.

AFRY Finland Oy on osa kansainvälistä suunnittelu- ja konsultointiyhtiö ÅF Pöyry AB:ta. Yhtiö syntyi helmikuussa 2019 yrityskaupan seurauksena, kun ruotsalainen ÅF osti suomalaisen Pöyryn. Marraskuusta 2019 lähtien ÅF Pöyry on kulkenut yhteisen AFRY-nimen alla. Yhtiön on jaettu viiteen divisioonaan, joista neljä toimii Suomessa: Prosessiteollisuus, Energia, Infra ja Liikkeenjohdon konsultointi. AFRY Finland Oy työllistää

Suomessa lähes 2 000 asiantuntijaa ja sillä on toimistoja 23 paikkakunnalla. Globaalisti yhtiöllä on 17 000 työntekijää ja toimistoja 50 maassa. (1; 2.)

2 Sähkönjakelujärjestelmät

2.1 Yleisesti

Sähkönjakelujärjestelmille on aina määriteltävä jännitteisten johtimien järjestelyt sen normaaleissa käyttöolosuhteissa sekä järjestelmän maadoitustapa (3, s. 37). Tässä työssä tarkastellaan sähkönjakelujärjestelmää sen maadoitustapojen osalta.

Suomessa on yleisesti sähkönjakelun maadoituksen osalta käytössä ainoastaan TN- ja IT-järjestelmiä. TT-järjestelmän käyttö Suomessa on harvinaista, joten sitä ei tässä työssä käsitellä. Järjestelmän tunnuksessa ensimmäinen kirjain merkitsee koko järjestelmän maadoitustapaa ja toinen kirjain sähkölaitteiston jännitteelle alltiiden osien maadoitustapaa. Lisäksi tunnuksessa voi olla vielä kolmas kirjain, joka ilmaisee nolla- ja suojamaajohtimien keskinäiset suhteet. (3, s. 39; 4, s. 9.)

2.2 TN-järjestelmä

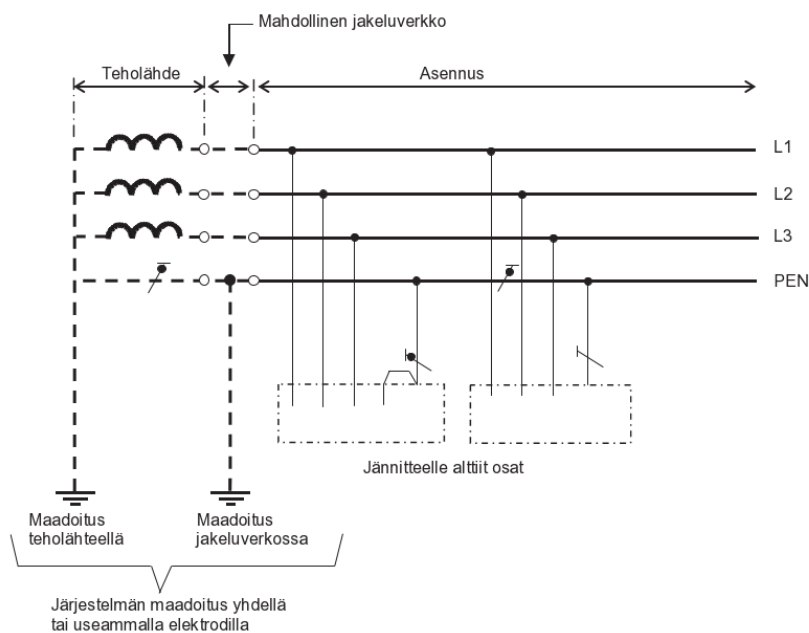
TN-verkkoa voidaan kutsua myös maadoitetuksi sähköverkoksi. TN-järjestelmässä yksi piste, tyypillisesti muuntajan tähtipiste, on yhdistettynä suoraan maahan. Järjestelmän jännitteelle alltiit osat ovat yhdistettynä tähän pisteeseen suojamaadoitusjohtimien välityksellä. TN-järjestelmän merkittävin etu on, kun siinä sattuu vika jännitteelle alltiiseen osaan, virtapiirissä syntyvä virta on niin suuri, että se aiheuttaa ylivirtasuojan nopean toimimisen. (3, s. 40; 5, s. 112.)

TN-järjestelmä jakautuu edelleen TN-S- ja TN-C-järjestelmiin sekä näiden yhdistelmään TN-C-S-järjestelmään. Niiden erottavana tekijänä toimii nolla- ja suojamaadoitusjohtimien keskinäinen järjestely. (3, s. 40.)

2.2.1 TN-C-järjestelmä

TN-C-järjestelmässä on nolla- ja suojamaadoitusjohtimen toiminnot yhdistetty yhteen johtimeen koko järjestelmässä (kuva 1). Tätä yhdistettyä johdinta kutsutaan PEN-johtimeksi. Järjestelmän suurimpina haittoina on suojamaadoitettujen jännitteelle alttiiden osien tuleminen jännitteisiksi PEN-johtimen katketessa. Johtimen poikkipinta-alalle onkin annettu vaatimuksia, jotta riittävä mekaaninen kestävyys saataisiin turvattu. Tämän lisäksi järjestelmän ongelmana on potentiaalintasauksen kautta rakennuksen johtaviin osiin leviävät kuormitus- ja vikavirrat, jotka muodostavat sähkömagneettisia häiriöitä synnyttäviä johdinsilmukoita. Näiden turvallisuus- ja EMC-syiden takia PEN-johdinta ei saa enää käyttää uudiskohteissa liittymispisteen jälkeen. (3, s. 42; 6, s. 32–33; 7, s. 20–21.)

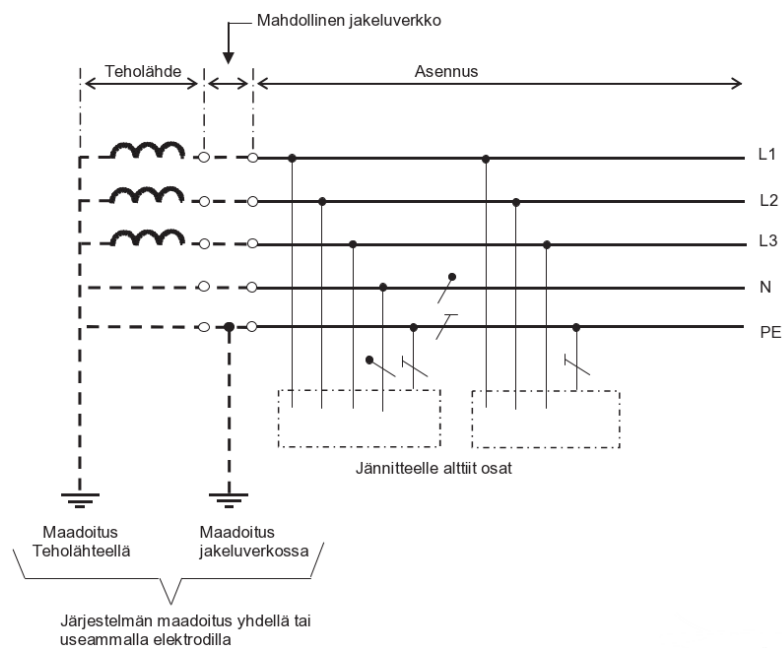
Järjestelmä oli aiemmin yleisesti käytössä rakennusten pienjänniteasennuksissa. Nykyisin sen käyttö on uudiskohteissa kielletty ja sen korvaamista TN-S-järjestelmällä suositellaan vanhojen asennusten saneerausten yhteydessä. TN-C-järjestelmää käytetään nykyään lähinnä pienjännitejakeluverkoissa. (6, s. 32–33.)



Kuva 1. TN-C-järjestelmä, jossa nolla- ja suojamaajohtimen toiminnot on yhdistetty koko järjestelmässä (3, s. 42).

2.2.2 TN-S-järjestelmä

TN-S-järjestelmässä käytetään erillisiä nolla- ja suojamaadoitusjohtimia koko järjestelmässä (kuva 2). Erilliset johtimet mahdollistaa palaavan yksivaiheisen kuormavirran pysymisen nollassa, jolloin häiriövirrat ja -kentät saadaan pysymään pieninä. Tämän ominaisuus on ollut osaltaan vaikuttamassa siihen, että standardeissa on määrätty käytettäväksi TN-S-järjestelmää rakennuksen liittymiskohdasta eteenpäin. Järjestelmää käytettäessä on tärkeää valvoa nolla- ja suojajohtimen erillään pysymistä eli verkon vikavirtoja. Valvonta voidaan toteuttaa esimerkiksi järjestelmän lähtöpisteessä toteutettavalla hälyttävällä summavirtamittauksella. (5, s.112; 6, s. 32–33.)

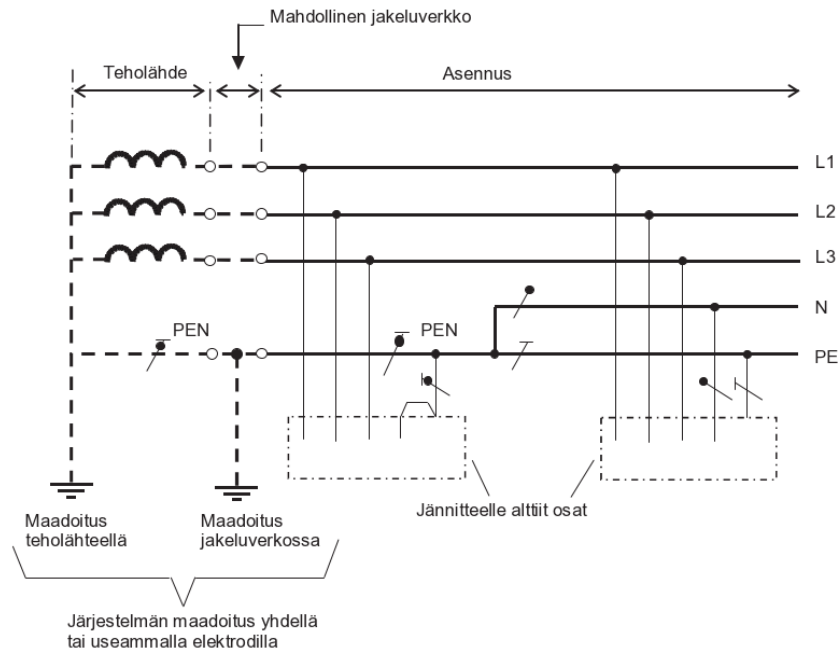


Kuva 2. TN-S-järjestelmä, jossa on erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet koko järjestelmässä (3, s. 40).

2.2.3 TN-C-S-järjestelmä

TN-C-S-järjestelmä on kahden edellä esitetyn järjestelmän yhdistelmä (kuva 3). Siinä nolla- ja suojamaadoitusjohtimien toiminnot on yhdistetty yhteen osassa järjestelmää. Käytettäessä tällaista sekajärjestelmää on TN-C-järjestelmän oltava aina syöttävän verkon puolella, sillä erottamisen jälkeen nolla- ja suojamaadoitusjohtimia ei saa enää yhdistää takaisin PEN-johtimeksi. Yleisimmin rakennuksen pääkeskukselle tuleva

pienjännitesyöttö on TN-C-järjestelmää. Pääkeskuksella nolla ja suojamaadoitus jaetaan omille johtimilleen ja keskukselta eteenpäin noudatetaan TN-S-järjestelmää. (3, s. 41; 8, s. 64.)



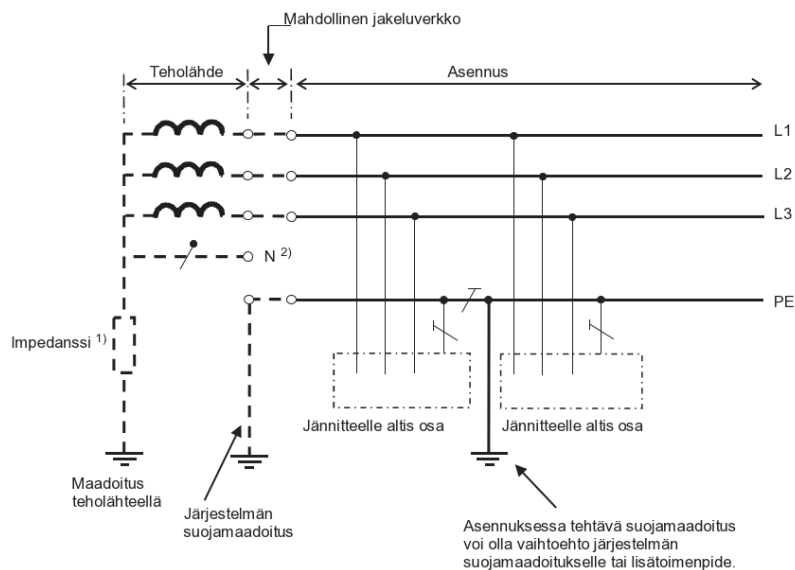
Kuva 3. Kolmivaiheinen neljän jännitteisen johtimen TN-C-S-järjestelmä, jossa PEN-johdin on erotettu nolla- ja suojamaadoitusjohtimiksi muualla järjestelmässä (3, s. 41).

2.3 IT-järjestelmä

IT-järjestelmä voidaan toteuttaa kahdella tavalla. Sen kaikki jännitteiset osat voivat olla erotettuna maasta tai se voi muodostaa yhteyden maahan yhdestä pisteestä riittävän suuren impedanssin kautta. Yhdistyspisteenä voidaan käyttää järjestelmän nollapistettä, keskipistettä tai keinotekoisesta nollapistettä. Kokonaisnollaimpedanssin ollessa riittävän suuri voidaan keinotekoinen nollapiste kytkeä suoraan maahan. Jos tähtipistettä ei ole, voidaan myös vaihejohdin kytkeä tarpeeksi suuren impedanssin kautta maahan. Järjestelmän maadoittaminen voi olla tarpeellista ylijännitteiden pienentämiseksi ja jännitevärähtelyjen vaimentamiseksi. (3, s. 45–46; 8, s. 66.)

IT-järjestelmässä jännitteelle alttiiden osien kytkemiseksi maahan voidaan käyttää joko erillisiä laitekohtaisia elektrodeja, ryhmäkohtaisia elektrodeja tai koko järjestelmälle

yhteistä elektrodiä (kuva 4). Nollajohtimen käyttö on mahdollista mutta sitä ei suositella käytettäväksi. (8, s. 66; 9, s. 12.)



Kuva 4. IT-järjestelmä, jossa kaikki jännitteelle alttiit johtavat osat on yhdistetty suojamaadoitusjohtimella, joka on maadoitettu yhteisesti (3, s. 46).

IT-järjestelmässä jännitteisen johtimen tahaton yhdistyminen maahan aiheuttaa maasulun. Kaikki sähköisesti erilliset järjestelmät vaaditaan varustettavaksi automaattisella maasulkusuojauksella, jonka avulla maasulku havaitaan tai pois kytketään. Yksittäisen vian sattuessa vikavirta jännitteelle alttiiseen osaan tai maahan on pieni, eikä syötön automaattista poiskytkentää välttämättä vaadita. Tällöin kuitenkin edellytetään standardin määrittämän kaavan 1 mukaisen ehdon täyttymistä. Tämän ehdon katsotaan automaattisesti täyttyvän, jos piiri on osa laajaa maadoitusjärjestelmää. Toisen samanaikaisen vian eli kaksoismaasulun tapauksessa, on ryhdyttävä aina toimiin henkilöihin kohdistuvan vaaran välttämiseksi. (9, s. 12–13.)

$$R_A \times I_d \leq 50 V \quad (1)$$

R_A on jännitteelle alttiiden osien suojamaadoitusjohtimen ja maadoituselektrodin resistanssien summa (Ω)

I_d on ensimmäisen vian vikavirta (A) äärijohtimen ja jännitteelle alttiin osan välillä kun vikaimpedanssia ei oteta huomioon.

IT-järjestelmää käytetäänkin etenkin silloin, kun halutaan estää tai siirtää maasulusta aiheutuva käyttökeskeytys. Sen yleisiä käyttökohteita ovat teollisuuden prosessisähkönjakelu, sairaaloiden leikkaussalit sekä erilaiset ohjauspiirit. (8, s. 66, 69.)

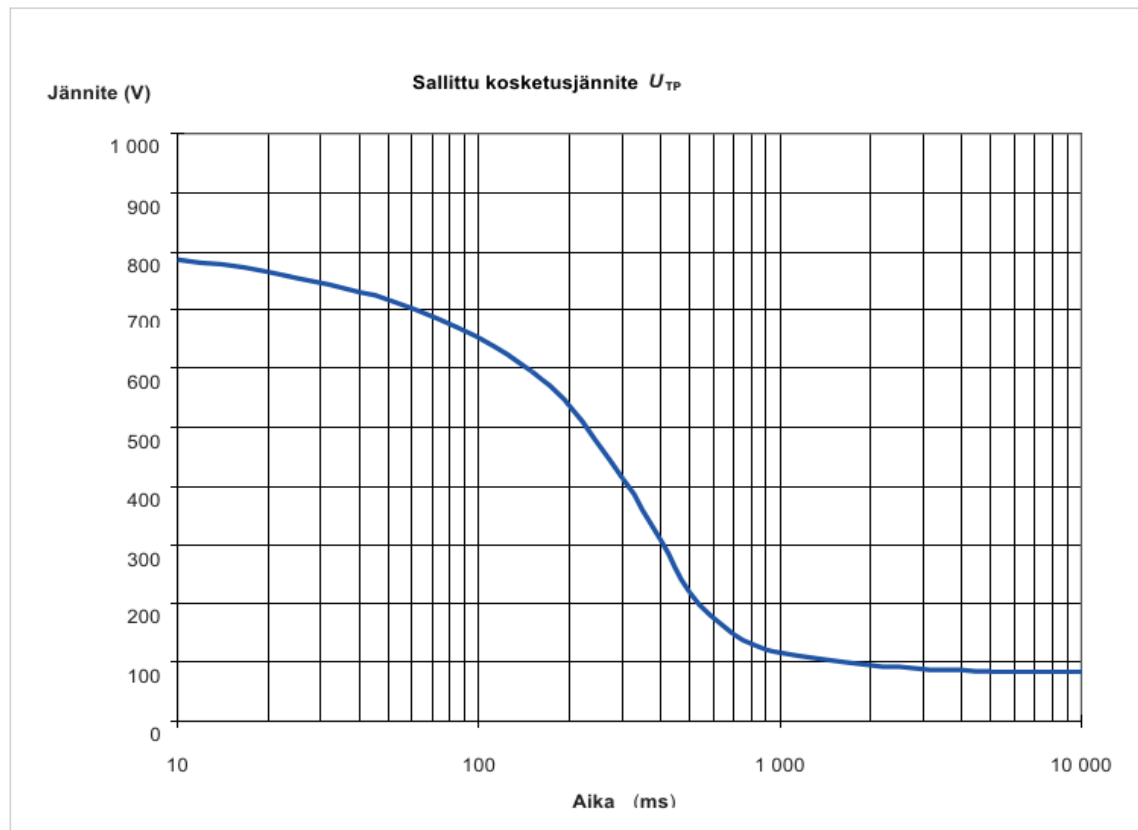
3 Kosketusjännite

3.1 Kosketusjännitteen raja-arvot

Sähköturvallisuuden näkökulmasta maadoitusten pääasiallinen tehtävä on estää liian suurten kosketus- ja askeljännitteiden muodostuminen vikatilanteissa. Kosketusjännitteellä tarkoitetaan kahden, ihmisen keholla samanaikaisesti kosketeltavan, osan tai kohdan välistä kehoon vaikuttavaa jännitettä. Tämän jännitteen vaikuttaessa ihmisen jalasta jalkaan, jalkojen ollessa metrin etäisyydellä toisistaan, sitä kutsutaan askeljännitteeksi. Näistä kahdesta kosketusjännitteelle on virran kulkureitin perusteella annettu tiukemmat rajat, joten se on määrittävässä asemassa maadoitusjärjestelmää mitoittaessa. (5, s. 30; 10, s. 93.)

Kosketusjännitteen raja-arvojen perusteena on sähkön vaarallisuus ihmiselle, joten raja-arvot ovat verkon käyttöjännitteestä riippumattomia. Sen sijaan kosketusjännitteen raja-arvot riippuvat sekä siitä, kuinka helposti kosketusjännite voi aiheuttaa vaaraa, että siitä, kuinka kauan kosketusjännitteen aiheuttava vikavirta kestää. Vaarallisen suuri kosketusjännite saa elimistön läpi kulkemaan elintoimintojen kannalta kriittisen suuren sähkövirran. Jo lyhytkestoinenkin 50–100 mA:n sähkövirta voi aiheuttaa ihmiselle sydänkammiövärinän, joka johtaa pahimmillaan kuolemaan. (11, s. 429–430, 501.)

Standardin SFS 6001 mukaiset suurimmat sallitut kosketusjännitteen arvot on esitetty kuvassa 5. Siinä esitetty, kosketusjännite vikavirran kestoajan funktiona, kuvaaja perustuu neljän erilaisen kosketusjännitetapauksen painotettuun keskiarvoon. Kuvaajassa ei ole otettu huomioon mahdollisia lisäresistansseja, vaan kosketuksen oletetaan tapahtuvan esimerkki paljaasta kädestä paljaaseen jalkaan. Joissain tapauksissa voi olla tarpeen tarkastella sallittujen kosketusjännitteiden rajoja tarkemmin, jolloin voidaan soveltaa liitteessä 1 annettuja laskentamenetelmiä. (10, s. 91, 101–102.)



Kuva 5. Sallittu kosketusjännite (10, s. 93).

Kuvassa 5 esitettyjen sallittujen kosketusjännitteiden arvojen katsotaan toteutuvan, jos kyseessä oleva asennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää tai sen mittauksin tai laskennallisesti määritetty maadoitusjännite ei ole suurempi kuin kuvan 5 mukaisen sallitun kosketusjännitteiden arvo kaksinkertaisena. Jos kumpikaan näistä ehdoista ei toteudu annetaan standardissa SFS 6001 toimintaohjeita, joita noudattamalla kosketusjännitevaatimukset voidaan saada täytettyä. (10, s. 91.)

Maadoitusjännite on referenssimaan ja maadoitusjärjestelmän välinen jännite. Sen suuruus on suoraan verrannollinen maadoitusimpedanssin suuruuteen sekä maavirran eli maadoituselektrodin kautta kulkevan virran arvoon. Koska kosketusjännite on hankalampi laskea ja mitata kuin maadoitusjännite, käytetään maadoitusjärjestelmän mitoistusta koskevilla vaatimuksilla pitkälti maadoitusjännitettä. (10, s. 129; 6, s. 51–53.)

3.2 Kosketusjännite pienjännitejärjestelmissä

Pienjännitejärjestelmien vikatilanteista aiheutuvat kosketusjännitteiden pyritään pitämään sallituissa rajoissa syötön automaattisen poiskytkennän avulla. Eristysvian aiheuttama vikavirta ja syntyvä kosketusjännite on poistettava niin nopeasti, ettei se aiheuta vaaraa ihmiselle. Vaadittu poiskytkentäaika riippuu eri tekijöistä, kuten kosketusjännitteiden suuruudesta, vian tapahtumisen todennäköisyydestä sekä sen todennäköisyydestä, että henkilö altistuu kosketusjännitteelle. Suojausta koskevien vaatimusten soveltamisen helpottamiseksi vaaditut poiskytkentäajat on määritetty asennuksen nimellisjännitteestä riippuvina eikä suurimman kosketusjännitteiden mukaan. Määrittelyn mukaiset kosketusjännitteet ja poiskytkentäajat on esitetty taulukossa 1. Vian aikana esiintyvien kosketusjännitteiden muodostumisesta on annettu esimerkki liitteen 2 kuvassa 1. Kosketusjännitteitä voidaan tarvittaessa pienentää kytkemällä jännitteelle alttiit osat ja muut johtavat osat potentiaalintasaukseen. (8, s. 86–90.)

Taulukko 1. Suurimmat sallitut poiskytkentäajat pienjännitejärjestelmässä (9, s. 9).

Järjestelmä	50 V < $U_0 \leq 120$ V s		120 V < $U_0 \leq 230$ V s		230 V < $U_0 \leq 400$ V s		$U_0 > 400$ V s	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
TN	0,8	^a	0,4	1	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3	^a	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

Jos TT-järjestelmässä poiskytkentä saadaan aikaan ylivirtasuojilla ja suojaava potentiaalintasaus on kytketty kaikkiin asennuksen muihin johtaviin osiin, voidaan käyttää TN-järjestelmän poiskytkentäaikoja.

U_0 on nimellinen tasa- ja vaihtojännite äärijohtimesta maahan.

Taulukon 1 mukaisia poiskytkentäaikoja on sovellettava ryhmäjohtoihin, joiden suojalaitteiden mitoitusvirta ei ylitä 63 A syötettäessä yhtä tai useampaa pistorasiaa, tai 32 A syötettäessä vain kiinteästi asennettuja sähkölaitteita. TN-järjestelmässä voidaan soveltaa korkeampia poiskytkentäaikoja pääjohtoille sekä piireille, joiden suojalaite on aiemmin määritettyjä arvoja suurempi. Niiden osalta poiskytkentäaika voi olla korkeintaan viisi sekuntia. (9, s. 9.)

Tarvittaessa voidaan pienjännitejärjestelmissä syntyvät kosketusjännitteet määrittää tarkemmin. Vian sattuessa TN-S-järjestelmällä toteutetun pienjännitepiirin vikavirran reitti on liitteen 2 kuvat 1 mukainen. Syntyvä kosketusjännite on referenssipisteen ja vikapisteen välisten suojamaadoitusjohtimien impedanssien aiheuttamana jännitteenalennus.

Referenssipisteeksi valitaan jännitteelle alttiin osan lähin kohta, jossa potentiaali pysyy vian aikana likimain samana kuin jännitteelle alttiista osasta kosketusetäisyydellä olevien muiden johtavien osien potentiaali. Pienjännitejärjestelmän vikatilanteessa syntyvä kosketusjännite voidaan laskea kaavan 2 avulla. (8, s. 86.)

$$U_{TP} = Z_{PE} \times I_k \quad (2)$$

U_{TP} on kosketusjännite (V)
 Z_{PE} on suojajohtimen impedanssien summa vikapisteen ja referenssipisteen välillä (Ω)
 I_k on vikavirran suuruus (A)

3.3 Kosketusjännite suurjännitejärjestelmissä

Suurjännitejärjestelmissä kosketusjännitteet syntyvät vikatilanteiden eli maasulkujen vaikutuksesta. Maasulku aiheutuu jännitteisen johtimen kytkeytymisestä maahan tai sen ja maan välisen eristysresistanssin pienentymisestä alle määrätyn raja-arvon. Kaksoismaasulussa verkossa tapahtuu samanaikaisesti kahden tai useamman saman järjestelmän vaihejohtimen maasulku järjestelmän eri pisteissä. Keskijänniteverkon maadoitustavasta johtuen sen vikavirrat voivat kulkea maadoitusimpedanssin kautta maahan aiheuttaen maadoitusjännitteen. Liitteen 2 kuvassa 2 on havainnollistettu virrallisen maadoituselektrodin ympärillä esiintyvää potentiaalijakaumaa sekä siitä syntyviä vaarajännitteitä. Potentiaali on korkeimmillaan vikakohteen läheisyydessä ja laskee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Alueelle muodostuukin suppilomainen potentiaalijakauma, jossa kosketus- ja askeljäännitteet ovat suurimmillaan lähellä vikapistettä. Liitteen 2 perusteella voidaan myös havaita se, kuinka ainoastaan osa maadoitusjännitteestä esiintyy kosketusjännitteenä. (11, s. 428.)

Syntyvän maadoitusjännitteen suuruutta voidaan rajoittaa joko pienentämällä maadoitusimpedanssia eli parantamalla maadoituksia tai pienentämällä maavirran suuruutta. Maadoitusimpedanssi riippuu maaperän resistiivisyydestä, maadoituselektrodin ja -johtimien mitoista sekä asennustavasta. Maadoituselektrodin osalta vaikuttavin tekijä on sen pituus, ei niinkään sen poikkipinta-ala. Maavirta on osa maasulkuvirtaa liitteen 5 taulukossa esitetyn mukaisesti. Sen suuruuteen voidaan vaikuttaa esimerkiksi vaihtamalla muuntajan tähtipisteen maadoitustapaa. (10, s. 148.)

Vaihtoehtoisesti voidaan verkon suoja-alueiden toiminta-aikojen asettelun avulla kasvattaa suurimman sallitun maadoitusjännitteen arvoa. Suurimman sallitun kosketusjännitteen arvo riippuu kuvan 5 mukaisesti vikavirran kestoajasta, joten pienempi kesto-aika johtaa myös suurempaan sallittuun maadoitusjännitteen arvoon. Lisäksi käyttämällä laukaisevaa maasukusuojaa voidaan estää kaksoismaasulkujen esiintyminen järjestelmässä.

4 Maadoittaminen

4.1 Maadoittamisen peruseräatteen

Maadoittamisen tarkoituksena on saada aikaan sähköinen liitäntä järjestelmän, asennuksen tai laitteen jonkin pisteen ja paikallisen maan välille. Yhteyden aikaansaamiseksi vaaditaan vähintään maahan yhteydessä oleva kappale, eli maadoituselektrodi, sekä sen ja maadoitettavan pisteen yhdistävä maadoitusjohdin. Yleensä teollisuuden maadoitusjärjestelmät ovat kuitenkin liitteen 3 mukaisia laajoja kokonaisuuksia. Niihin kuuluu edellä mainittujen lisäksi maadoituskiskoja, joihin on yhdistetty suojojohdin- ja potentiaalintasausjärjestelmät. Teollisuuden sähköjärjestelmiin sisältyy usein sekä pienjännitteitä suurjänniteasennuksia sekä niiden maadoituksia. Jos asennusta syötetään suurjännitteellä, on huomioitava sekä suurjännite- että pienjännitejärjestelmien maadoituksille annetut vaatimukset. Pienjännitejärjestelmien maadoituksien vaatimukset annetaan standardissa SFS 6000 ja suurjännitejärjestelmien maadoituksille standardissa SFS 6001. (5, s. 30; 6, s. 14–26.)

Teollisuuslaitoksissa maadoituksia rakennetaan kolmesta syystä. Sen avulla voidaan haluta parantaa sähköturvallisuutta, häiriösuojaa tai ukkosuojaa. Maadoituksia voidaan siis käyttää sekä järjestelmän turvallisuutta että toiminnallisia ominaisuuksia parantaviin tarkoituksiin. On kuitenkin määrätty, että maadoituksen ensisijainen tarkoitus tulee olla aina sähköturvallisuuden takaaminen. (4, s. 11; 6, s. 31.)

Maadoitusjärjestelmän yleisinä toiminnallisina vaatimuksina voidaan pitää seuraavia asioita. Siihen kuuluvien komponenttien ja potentiaalintasausjohtimien on kyettävä jakamaan ja purkamaan vikavirta ylittämättä varasuojauksen toiminta-aikaan perustuvia

termisiä ja mekaanisia suunnitteluraja-arvoja. Suojareleiden ja katkaisijoiden normaaleina toiminta-aikoina askel- ja kosketusjännitteiden sekä siirtyvien potentiaalien on pysyttävä sallituissa jänniterajoissa. Maadoitusjärjestelmän tulee kyetä estämään laiteviat, jotka aiheutuvat maadoitusjännitteen noususta, maadoitusjärjestelmässä esiintyvistä potentiaalieroista ja suurista hajavirroista osissa, joita ei ole tarkoitettu vikavirran kuluteiksi. Edellä mainitut maadoitusjärjestelmän suorituskykyyn liittyvät vaatimukset on pysyttävä täyttämään koko asennuksen odotettavissa olevan eliniän ajan. Tästä syystä myös korroosion ja mekaanisten rasitusten vaikutukset on otettava huomioon. (10, s. 88; 12, s. 7.)

4.2 Pienjännitejärjestelmän maadoitusten mitoittaminen

Pienjännitemaadoituksia koskevat vaatimukset jaetaan yleisesti maahan liittymisen vaatimuksin ja potentiaalintasausta koskeviin vaatimuksiin. Maadoitusjärjestelmän päätarkoituksena on varmistaa järjestelmän suojauksen toimivuus ja toisaalta olla osana varmistamassa järjestelmän häiriötöntä toimimista. (6, s. 33.)

4.2.1 Maadoituselektrodi

Pienjännitejärjestelmässä maadoituselektrodille ei ole annettu erillisiä termisen lujuuden vaatimuksia. Sen kautta kulkee käytännössä normaaleissa vikatilanteissa korkeintaan vain pieni virta, joten se voidaan yleensä mitoittaa mekaanisen ja korroosiokestävyyden perusteella. Maadoituselektrodin tyyppi, materiaali ja mitoitus on valittava siten, että se kestää korroosiota sekä mekaanisia rasituksia, asennusympäristön olosuhteet huomioon. Suomessa käytettävät, standardissa SFS 6000 annettujen sähköiskulta suojausta koskevien vaatimusten mukaiset, elektrodien minimimitat on annettu liitteen 4 taulukossa 1. Vaikka Suomen olosuhteissa on katsottu poikkipinnaltaan 16 mm² kupari riittäväksi, on teollisuudessa tarpeellista käyttää vähintään 25 mm² kuparia, alueen korkeamman mekaanisten vaurioiden riksiin vuoksi. (12, s. 7; 13, s. 6.)

Mikäli teollisuuslaitokseen asennetaan salamasuojaus, on suositeltavaa liittää se osaksi maadoitusjärjestelmää käyttämällä niille yhteistä maadoituselektrodia. Erillisten elektrodien käyttö on sallittua, mutta myös silloinkin elektrodit tulee yhdistää toisiinsa, jotta

vältetään niiden hallitsematon yhdistyminen salaman iskiessä. Käytettäessä yhteistä maadoituselektrodia, sen poikkipinnan pitää standardin SFS-EN 62305-3 mukaan olla yleensä 50 mm² kuparia ja minimissään 25 mm² kuparia. (13, s. 6.)

Suosittelava maadoituselektrodin tyyppi on perustuksissa tai perustusten alla oleva renkaan muotoinen perustusmaadoituselektrodi. Pienissä rakennuksissa voidaan käyttää yhtä rengasta. Suurissa rakennuksissa perusmaadoituselektrodi suositellaan jaettavaksi korkeintaan 10 x 20 m:n kokoisiin silmukoihin. Tätä rakennetta suositetaan sen hyvien potentiaalintasausominaisuuksien vuoksi. Perustusmaadoituselektrodi ja sekä muut renkaan muotoon asennetut elektrodi suositellaan asennettavaksi niin, että elektrodille menee kaksi johdinta ja rengas sulkeutuu päämaadoituskiskolla, kuten liitteessä 3 on esitetty. (13, s. 5–6.)

4.2.2 Suoja- ja maadoitusjohtimet

Maadoitusjohtimella tarkoitetaan johdinta, joka muodostaa johtavan yhteyden asennuksen, järjestelmän tai jonkin halutun osan ja maadoituselektrodin välille. Suojajohtimilla tarkoitetaan suojauksen takia käytettäviä johtimia. Niitä ovat esimerkiksi suojamaadoitusjohtimet, suojaavat potentiaalintasausjohtimet sekä suojaamiseen käytettävät maadoitusjohtimet. (6, s. 18, 23.)

Suojajohtimien on kestettävä suojalaitteen toiminta-aikana esiintyvät vikavirran aiheuttamat mekaaniset ja termiset rasitukset. Sen poikkipinta voidaan joko laskea kaavan 3 mukaisesti tai käyttää taulukon 2 mukaisia arvoja (12, s. 11). Kaavaa 2 voidaan soveltaa poiskytkentäajan ollessa enintään viisi sekuntia. Riittävän termisen kestävyuden lisäksi pienjännitejärjestelmän suojajohtimen poikkipinnan on täytettävä luvussa 3.2 esitetyt syötön automaattisen poiskytkennän ehdot. (12, s. 10.)

$$S = \frac{\sqrt{I^2 \times t}}{k} \quad (3)$$

S on suojajohtimen poikkipinta-ala (mm²)
I on suojalaitteen kautta kulkeva prospektiivisen vikavirran tehollisarvo (A), kun tapahtuu hyvin pieni-impedanssinen vika
t on suojalaitteen toiminta-aika (s)

k on kerroin, jonka arvo riippuu suojajohtimen materiaalista, eristyksestä jne. Arvon laskeminen suoritetaan SFS 6000 liitteen 54A mukaan.

Taulukko 2. Suojajohtimien minimipoikkipinnat (12, s. 11).

Äärijohtimen poikkipinta S mm ² kuparia	Vastaavan suojajohtimen minimipoikkipinta mm ² kuparia	
	Suojajohdin on samaa materiaalia kuin äärijohtin	Suojajohdin on eri materiaalia kuin äärijohtin
$S \leq 16$	S	$\frac{k_1}{k_2} \times S$
$16 < S \leq 35$	16 ^a	$\frac{k_1}{k_2} \times 16$
$S > 35$	$\frac{S}{2}$ ^a	$\frac{k_1}{k_2} \times \frac{S}{2}$

jossa
 k_1 on äärijohtimen materiaalista ja eristyksestä riippuva kertoimen k arvo, joka on esitetty taulukossa [A.54.1](#) tai SFS 6000-4-43 taulukoissa
 k_2 on kertoimen k arvo, joka on esitetty [taulukoissa A.54.2 - A.54.6](#).
^a PEN-johtimen poikkipinnan pienentäminen on sallittu vain noudattamalla nollajohtimen mitoituksen sääntöjä (ks. SFS 6000-5-52).

Suojajohtimen ollessa yhteinen kahdelle tai useammalle virtapiirille, sen poikkipinta-ala määritellään seuraavalla tavalla (12, s. 12):

- Laskemalla kaavan 2 mukaan ottaen huomioon kaikkien piirien eniten rasituksia aiheuttava prospektiivinen vikavirta ja toiminta-aika.
- Valitsemalla taulukon 1 mukaan vastaamaan piirien suurinta äärijohtinta.

Erillisen, mekaanisesti suojaamattoman, suojajohtimen on oltava poikkipinta-alaltaan vähintään 4 mm² kuparia tai 16 mm² alumiinia. Mekaanisena suojauksena voidaan käyttää esimerkiksi asennusta putkeen, jolloin vähimmäispoikkipinta-ala vaatimus on 2,5 mm² kuparia tai 16 mm² alumiinia. Näistä poikkeuksena on pääkeskuksen ja päämaadoitus-kiskon välinen suojajohdin, jonka osalta sovelletaan maadoitusjohtimien vaatimuksia. (12, s. 12.)

Pienjännitejärjestelmän maadoitusjohtimien poikkipinta-ala mitoitetaan lähes samalla tavalla kuten suojajohtimien. Poikkeuksena on sen poikkipinta-alalle asetettu mekaanisen kestoisuuden mukainen vähimmäisraja. Maadoitusjohtimen tulee olla poikkipinnaltaan vähintään 6 mm² kuparia tai 50 mm² terästä. Jos maadoitusjohdin upotetaan maahan, on sille sovellettava samoja poikkipinta-aloja kuin maadoituselektrodille liitteen 4 taulukossa 1. On yleistä että kupariköydellä tai -langalla toteutettu maadoituselektrodi jatkuu

suoraa ilman liitoksia maadoitusjohtimena. Tuolloin niissä tulee käyttää poikkipinta-alaa, jonka täyttää molemmille annetut vaatimukset. (12, s. 9.)

Jos maadoituselektrodiin on liitetty salamasuojaus, on yhdistämiseen käytettävän maadoitusjohtimen poikkipinta-alan oltava vähintään 16 mm² kuparia tai 50 mm² terästä. (12, s. 9.)

4.3 Suurjännitejärjestelmän maadoitusten mitoittaminen

Suurjännitejärjestelmän maadoituksia mitoitettaessa olennaisimmat tekijät ovat vikavirran suuruus, vian kesto aika sekä maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet. Mitoitettaessa maadoitusjärjestelmän komponentteja on niille varmistettava sekä riittävä mekaaninen että termien kestävyys. (10, s. 88.)

Maadoituselektrodien sekä maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimien vähimmäispoikkipinta-alat määräytyvät yleensä niiden mekaanisen lujuuden ja korroosionäkökohtien perusteella. Suurempia poikkipinta-aloja voidaan tarvita silloin, kun termien kestävyys mukaan vaaditaan suurempaa poikkipintaa tai asennukseen liittyy salamasuojausjärjestelmä. Asennuksissa joissa salamasuojausjärjestelmä liittyy osaksi maadoitusjärjestelmää tulee soveltaa SFS-EN 62305-3 mukaisia vähimmäispoikkipintoja. (10, s. 146.)

4.3.1 Korroosionkestävyyden ja mekaanisen lujuuden mukaan

Maadoituselektrodien mitoituksessa sovellettavat poikkipinta-alat ja materiaalit on esitetty liitteen 4 taulukossa 2. Suomessa käytetään maadoituselektrodeina lähinnä kupariköysiä ja -lankoja. Käytäntö on osoittanut kuumasinkityn teräksen syöpyvän Suomen maaperässä, joten sen käyttö ei ole suositeltavaa. Standardi mahdollistaa 16 mm²:n kupariköyden ja -langan käytön maadoituselektrodina silloin, kun mekaanisen vaurion ja korroosion riski on kokemuksen mukaan vähäinen. Tämä ei kuitenkaan päde teollisuusalueilla, joten niillä tulee käyttää aina vähintään 25 mm² poikkipinta-alaa. (6, s. 58.)

Suoja-, maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimille sovellettavat vähimmäispoikkipinta-alat korroosiokestävyyden ja mekaanisen lujuuden näkökulmasta ovat (10, s. 88):

- kupari 16 mm² (poikkeuksena mittamuuntajien maadoitusjohtimet)
- alumiini 35 mm²
- teräs 50 mm²

4.3.2 Termisen lujuuden mukaan

Mitoitettaessa suoja- ja maadoitusjohtimia sekä maadoituselektrodia termisen lujuuden mukaan riippuu niiden poikkipinta-ala suurimmaksi osin vikavirran arvosta ja sen kestoajasta. Poikkipintaan vaikuttavia tekijöitä ovat myös valittu johdinmateriaali sekä suurin sallittu loppulämpötila. Tarvittava poikkipinta-ala saadaan laskettua standardissa SFS 6001 annetun kaavan 4 avulla. Tämä kaava pätee tapauksissa, joissa vikavirta kestää alle 5 sekuntia. (10, s. 89, 109.)

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t}{\frac{\theta_f + \beta}{I_n^{\theta_i + \beta}}}} \quad (4)$$

A on poikkipinta (mm²).

I on johtimen virran tehollisarvo (A).

t on vikavirran kesto-aika (s).

K on virrallisen osan materiaalista riippuva vakio

β on virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C

θ_i on alkulämpötila (°C)

θ_f on loppulämpötila (°C).

Mitoituksessa käytettävät virrat on määritetty liitteessä 5 esitetystä taulukosta 1. Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa, joissa maasulku kytketään pois alle yhdessä sekunnissa, voidaan käyttää maadoituselektrodien ja -johtimien termisen kuormittavuuden mitoituksessa määrävänä tekijänä kapasitiivista maasulkuvirtaa. Tällöin maasulun poiskytkentäaika käytetään ekvivalenttista poiskytkentäaikaa. Koska vikavirta usein jakaantuu maadoituselektrodijärjestelmään, on mahdollista mitoittaa kukin elektrodi ainoastaan osalle vikavirtaa. (10, s. 89–90.)

Kaavassa 4 käytettävänä alkulämpötilana voidaan yleensä käyttää arvoa 20 °C, joka vastaa ympäröivän maan lämpötilaa metrin syvyydessä. Muita käytettäviä alkulämpötiloja on annettu esimerkiksi standardissa IEC 60287-3-1. Standardi SFS 6001 käyttää laskentaohjeissaan loppulämpötilalle yleisesti arvoa 300 °C. Yleisäntönä voidaan

kuitenkin pitää, että jos terminen mitoitus on suoritettu 300 °C mukaisesti, oletetaan maadoitusjohtimien olevan eristämättömiä. Tapauksissa, joissa maadoitusjohdin on sijoitettu alumiini tai kuumasinkitylle teräshyllylle ja asennusympäristö on kostea, tulee maadoitusjohdin olla eristetty tai metallien välinen korroosio tulee muilla soveltuvilla tavoilla estää. Käytettäessä eristettyä maadoitusjohdinta tulee terminen mitoitus suorittaa johdineristeen mukaiselle loppulämpötilalle. Esimerkiksi eristetyt KEVI-johtimet ovat yleisesti PVC-eristeisiä, jolloin sille sallittu suurin loppulämpötila vikatilanteen jälkeen on 160 °C. (6, s. 61–62.)

Taulukossa 3 on esitetty kaavassa 4 käytettävien materiaalivakioiden β ja K arvot. Arvon K kohdalla on oletettu alkulämpötilan olevan 20 °C. (10, s. 109.)

Taulukko 3. Maadoituselektrodin ja -johtimen termisen kuormitettavuuden laskennassa käytettävät materiaalivakiot (10, s. 109).

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

Normaaliolosuhteissa, joissa maadoitusjohdin on ilmassa ja maadoituselektrodi asennettuna maahan, voidaan niiden poikkipinnan määrittämisessä käyttää liitteen 6 kuvan 1 mukaisia oikosulkuvirran tiheyden arvoja. Oikosulkuvirran tiheys on laskettu kaavalla $G = I / A$, jossa G on oikosulkuvirran tiheys, I on oikosulkuvirran suuruus ja A poikkipinta-ala. Kuvaajan arvojen laskennassa on käytetty alkulämpötilana 20 °C. (10, s. 109.)

Mikäli järjestelmässä esiintyy yli viisi sekuntia kestäviä vikavirtoja, tulee elektrodin ja maadoitusjohtimen mitoituksessa käyttää liitteen 6 kuvien 2 ja 3 mukaisia poikkipinta-aloja. Jos loppulämpötilana käytetään tässä tapauksessa muuta arvoa kuin 300 °C, voidaan virta laskea taulukon 4 mukaisen muunnoskertoimen avulla. Alempia loppulämpötiloja suositellaan esimerkiksi eristetyille johtimille ja betoniin upotetuille johtimille. (10, s. 109.)

Taulukko 4. Jatkuvan virran muunnoskerroin loppulämpötilasta 300 °C toiseen loppulämpötilaan (10, s. 110).

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

4.4 Potentiaalintasaus

Potentiaalintasauksen tarkoitus on saattaa jännitteelle alttiit osat ja muut johtavat osat samaan potentiaaliin. Tämän avulla pyritään estämään samanaikaisesti kosketeltavien osien välillä esiintyvät vaarallisen suuret kosketusjännitteet. Potentiaalintasaus jaetaan suojaavaan ja toiminnalliseen potentiaalintasaukseen. Suojaava potentiaalintasaus jakautuu edelleen pää- ja lisäpotentiaalintasaukseen. Toiminnallista potentiaalintasaukseen ei käsitellä tässä työssä. (8, s. 303–304.)

Standardien määritelmien mukaan jännitteelle alttiita osia ovat sähkölaitteiden johtavat osat, jotka voivat tulla jännitteisiksi peruseristyksen pettäessä. Ne liittyvät potentiaalintasauksen piiriin yleensä suojajohdinjärjestelmän välityksellä. Muita johtavia osia ovat sähköasennukseen kuulumattomat osat, joissa voi esiintyä tietty potentiaali, yleensä paikallisen maanpotentiaali. (12, s. 5.)

Standardi SFS 6000 määrää, että jokaisessa rakennuksessa on tehtävä vähintään liitteessä 3 esitetyn mukainen pääpotentiaalintasaus. Pääpotentiaalintasaukseen liitetään rakennukseen tulevat muut johtavat osat kuten metalliset putket, ilmastointikanavat sekä rakennuksen runkorakenteet ja betoniraudoitukset. Lisäksi pääpotentiaalintasaukseen liitetään telekaapeleiden metallivaipat sekä suojajohdin järjestelmästä maadoituselektrodi ja syöttävän johdon maadoitus- tai PEN-johdin. Rakennuksen ulkopuolelta tulevat osat tulee liittää pääpotentiaalintasaukseen mahdollisimman läheltä niiden

rakennukseen sisääntulokohtaa. Pääpotentiaalintasauksen liitännät tehdään yleensä rakennusta syöttävän keskuksen lähelle sijoitettavassa päämaadoituskiskossa. (12, s. 20; 13, s. 7.)

Lisäpotentiaalintasaus tehdään silloin, kun erityisesti halutaan välttää haitallisia potentiaalieroja, tai kun syötön poiskytkennällä ei pystytä toteuttamaan riittävää kosketusjännitesuojausta. Se suoritetaan tarvittaessa paikallisesti verkon ääripäissä sekä erityiskoh-teissa kuten esimerkiksi lääkintätiloissa. (6, s. 40.)

Potentiaalintasausjohtimissa ei yleensä kulje virtaa edes vikatilanteissa. Joissain tilanteissa voi osa vikavirrasta, jakautuen suojajohtimen ja potentiaalintasausjohtimen impedanssien suhteen käänteisarvon mukaisesti, kulkea myös potentiaalintasausjohtimessa. Pienjännitejärjestelmissä pääpotentiaalintasausjohtimen poikkipinta määräytyy suurimman pääkeskukselta lähtevän suojajohtimen poikkipinnan mukaan. Sen täytyy olla poikkipinnaltaan vähintään puolet asennuksen suurimman suoja- tai PEN-johtimen poikkipinnasta. Sen ei kuitenkaan tarvitse milloinkaan olla suurempi kuin 25 mm² kuparia tai johtokyvyltään vastaavaa muuta metallia. Mekaanisen kestoisuuden vaatima minimipoikkipinta potentiaalintasausjohtimille on 6 mm² kuparia. Ohjeet suurjännitejärjestelmän potentiaalintasausjohtimien mitoituksen on annettu tämän työn kappaleessa 4.3.1. (6, s. 39; 8, s. 304.)

5 Pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitusten yhdistäminen

Suomen olosuhteissa pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitukset kannattaa yleensä yhdistää eli käyttää yhteistä maadoitusta. Käytännön kokemus on osoittanut, että erillisiksi tarkoitetut maadoitukset pyrkivät joka tapauksessa yhdistymään verkon maasulkujen vaikutuksesta. Teollisuuden asennuksissa pien- ja suurjännitejärjestelmien läheisyyden takia ei niiden maadoituksia ole mahdollista luotettavasti erottaa toisistaan, joten yhteisen maadoituksen käyttäminen on välttämätöntä. Jotta yhteistä maadoitusta voidaan käyttää, on täytettävä sille annetut vaatimukset. Pienjänniteasennuksiin suurjännitejärjestelmän maasulusta aiheutuvien kosketusjännitteiden ja käyttötaajuisten rasisusjännitteiden suuruudet ja kestoajat eivät saa ylittää taulukossa 5 esitettyjä vaatimuksia. (10, s. 95–96; 7, s. 10.)

Taulukko 5. Maadoitusjänniterajoihin perustuvat vähimmäisvaatimukset suurjännite- ja pienjännitemaadoitusten yhdistämiseksi. Taulukon huomautuksesta e poiketen U_{Tp} saadaan kuvasta 5 (10, 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 nollajohdin 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.

Liitteessä 7 on esitetty havainnollisemmin, kaavion sekä taulukoiden avulla, pienjännitejärjestelmän ylijännitteiden syntymistä suurjännitejärjestelmän vian aikana. Sen taulukossa 2 on annettu ohjeistus käyttötaajuuden rasitusjännitteen sekä vikajännitteen suuruuden määrittämiseen. Taulukosta voidaan havaita että, yhdistetyllä maadoituksella toteutetuissa TN-järjestelmissä ei esiinny suurjännitejärjestelmän maasulun aiheuttamia rasitusjännitteitä. Koska suurin osa Suomen pienjänniteasennuksista on toteutettu TN-järjestelmällä, on yhdistettyä maadoitusta kannattavaa käyttää aina kun se on mahdollista. (7, s. 9.)

Jos maadoitukset on kytketty osaksi tämän työn luvussa 6 kuvattua laajaa maadoitusjärjestelmään, voidaan kosketusjännitteiden vaatimusten katsoa täyttyvän eikä niiden tarkastelua täten tarvitse suorittaa. (7, s. 9; 10, s. 143.)

Suurjännitesähköasemien kohdalla, alkaen 110 kV jännitetasosta, voidaan yhdistämisestä poiketa. Niissä maadoitukset voi olla syytä erottaa aseman ulkopuolisista maadoituksista sekä pien- ja suurjännitejärjestelmien yhteisistä maadoituksista, jotta voidaan välttää suurjännitejärjestelmistä pienjännitejärjestelmiin siirtyvät suuret

kosketusjännitteet. Tällöin pitää ottaa huomioon muuntajan pienjännitepuolella esiintyvät rasiusjännitteet ja muuntajan tähtipisteen eristysten läpilyönnin vaara. (10, s. 142.)

6 Laaja maadoitusjärjestelmä

6.1 Määritelmä

Standardeissa ei ole annettu yksinkertaisia sääntöjä sille kuinka laaja maadoitusjärjestelmä voidaan tunnistaa ja sen toteutuminen todentaa. Laajan maadoitusjärjestelmän määritelmä on avoin ja antaa paljon tulkinnan varaa. Standardissa SFS 6001:2018 annetaan laajalle maadoitusjärjestelmälle seuraava määritelmä:

”Yhtenäinen maadoitusjärjestelmä, joka on toteutettu kytkemällä yhteen paikalliset maadoitusjärjestelmät. Yhteen kytkettyjen paikallisten maadoitusjärjestelmien läheisyys varmistaa sen, ettei vaarallisia kosketusjännitteitä esiinny” (10, s. 20).

Tämä määritelmä perustuu siihen, että yhteen liitettyinä maadoitukset mahdollistavat viikatilanteissa maasulkuvirtojen jakautumisen, ja näin tasaa potentiaalिन nousua paikallisten maadoitusjärjestelmien kesken. Näin ollen laajan maadoitusjärjestelmän alueella ei esiinny lainkaan potentiaalieroja tai esiintyessään ne ovat merkityksettömän pieniä. Laajan maadoitusjärjestelmän voidaankin katsoa muodostavan alueelleen näennäisen tasa-potentiaalipinnan. (10, s. 20, 134.)

Laajan maadoitusjärjestelmän määritelmän avoimuudesta johtuen on se pyrittävä aina tapauskohtaisesti tunnistamaan sekä määrittämään siihen kuuluvat osat. Yleisesti voidaan katsoa, että laajan maadoitusjärjestelmän toteutumista edesauttavia asioita ovat pieni kokonaisresistanssi, pienet vikavirrat, lyhyet vian kestoajat sekä vikavirtojen jakautuminen kaapelivaippojen ja ukkosjohtimien reduktiovaikutuksen johdosta. Nämä kaikki ovat asioita, jotka osaltaan edesauttavat maapotentiaalिन nousun pysymistä hyväksyttävällä tasolla. (10, s. 134.)

Laaja maadoitusjärjestelmä muodostuu yhteen liitettyistä paikallisista maadoitusjärjestelmistä, jotka yhdessä muodostavan galvaanisesti yhtenäisen maadoitusjärjestelmän. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä ja laaja maadoitusjärjestelmä eivät kuitenkaan tarkoita

samaa asiaa ja ne tulee pystyä erottamaan toisistaan. Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä terminä tarkoittaa sitä, että paikallisia maadoitusjärjestelmiä on liitetty yhteen, mutta kaikki laajan maadoitusjärjestelmän ehdot eivät toteudu. Erottavana tekijänä niiden välillä voidaan pitää laajan järjestelmän tiheämpää ja usean eri reitin kautta yhdistynyttä silmukkamaista rakennetta. (10, s. 149; 14.)

Tyypillisimpiä alueita Suomessa, joissa laaja maadoitusjärjestelmä muodostuu, ovat laajat teollisuusalueet, kaupunkien keskustat sekä muut vastaavat tiheästi asutetut alueet. Nämä ovat tyypillisesti alueita, joilla on tiheästi rakennettu sekä pien- että suurjännitejärjestelmien maadoituksia. (10, s. 149.)

6.2 Rakenne

Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituksina toimivat siihen liitetyt sähköasemien, muuntamoiden, pienjänniteverkkojen ja liittymien maadoitukset. Laajaan maadoitusjärjestelmään kuulumisesta huolimatta, jokaiselle muuntopiirille on tehtävä normaalit standardien mukaiset maadoitukset. Näiden paikallisten maadoitusjärjestelmien väliset yhdistymiset voidaan toteuttaa joko pien- tai keskijänniteverkon kautta. Järjestelmien välinen yhdistyminen voidaan toteuttaa erillisellä johtimella, kaapelin keskusköydellä tai riittävän suurella poikki-pinnalla varustetulla kaapelin kosketussuojalla, PEN- tai PE-johtimella tai vastaavalla tavalla. (6, s. 70; 10, s. 149.)

Standardi SFS 6001 määrittää laajan maadoitusjärjestelmän rakenteesta, että sen tulee olla verkkomaisesti silmukoituva ja riittävän tiheä. Jokaisen muuntopiirin maadoitusjärjestelmän tulee muodostaa luotettava yhteys vähintään kahden muun muuntopiirin maadoitusjärjestelmiin. Tämän lisäksi piirejä, joilla on enemmän kuin kaksi yhdistystä, tulee sisältyä järjestelmään riittävän tiheästi. Standardissa ei kuitenkaan anneta useamman kuin kahden yhteyden muodostavien piirien määrälle tai esiintymistiheydelle tarkempaa vaatimusta. Riittävänä määränä voidaankin pitää sitä, kun laajan maadoitusjärjestelmän rakenteelle vaadittu verkkomaisesti silmukoituva rakenne toteutuu. (10, s. 149.)

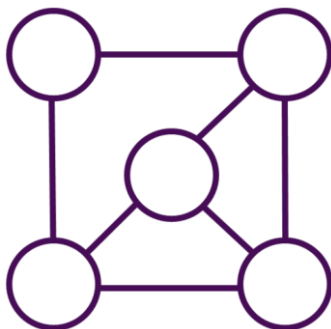
Maadoitusjärjestelmän tiheydelle ei standardeissa anneta tarkkaa vaatimusta. Energia-teollisuuden verkostosuosituksessa ohjeistetaan muuntamoiden välisenä etäisyytenä käytettävän enimmillään 500 metriä. Tarpeen vaatiessa tästä voidaan poiketa ja käyttää

myös pidempiä etäisyyksiä, mutta silloinkin etäisyyden tulisi rajautua maksimissaan kilometriin. Poikkeaminen voidaan tehdä esimerkiksi sähköaseman ja lähdön ensimmäisen muuntamon välisessä etäisyydessä. Poikkeamisen tulee kuitenkin rajautua yksittäistapauksiin ja sitä tulee aina mahdollisuuksien mukaan välttää. (14.)

Suurjännitesähköaseman katsotaan liittyvän osaksi laajaa maadoitusjärjestelmää, kun se liittyy usealla yhteydellä keskijänniteverkon laajaan maadoitusjärjestelmään. Energia-teollisuuden verkostosuositus antaa tähän ohjeistukseksi, että suurjännitesähköaseman ja laajan maadoitusjärjestelmän välisiä yhdistymisiä tulisi olla kuusi kappaletta. (10, s. 149; 14.)

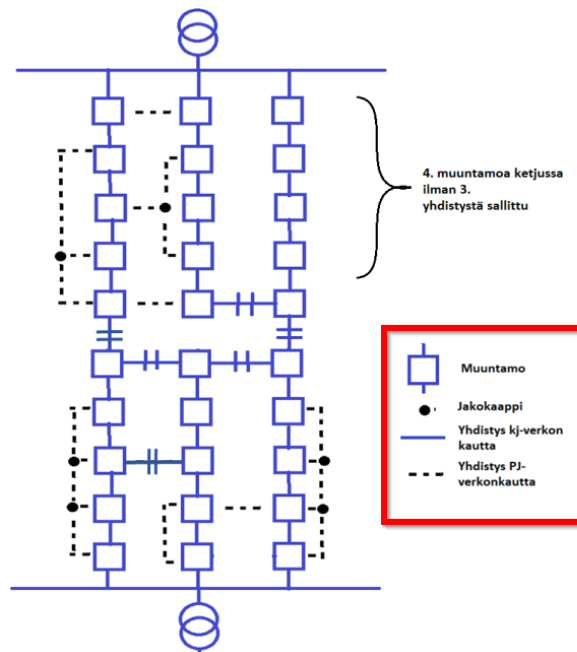
6.3 Suunnittelu

Laajan maadoitusjärjestelmän suunnittelussa keskeistä on maadoitusverkon topologian suunnittelemineen. Se kuinka maadoitusverkon osat kytkeytyvät toisiinsa on ratkaisevassa asemassa siinä voidaanko yhteen liitettyjen paikallisten maadoitusjärjestelmien katsoa muodostavan laajaa maadoitusjärjestelmää. Standardien vaatimuksia tulkittaessa voidaan pienimmillään jo kolmen muuntopiirin yhteen liitettyinä katsoa muodostavan laajan maadoitusjärjestelmän. Muuntopiirien välisten yhdistymisien tarkoituksena on paitsi parantaa vikavirtojen jakautumista myös varmistaa ettei yksittäinen maadoitusjohdin vaurio katkaise piirin yhteyttä laajaan maadoitusjärjestelmään. Yhdistymiset olisikin suositeltavaa suunnitella eri reiteille aina kun sen on mahdollista. Kuvassa 6 on annettu yksinkertaistettu esimerkki laajan maadoitusjärjestelmän muodostavan verkon topologiasta. (10, s. 149; 14.)



Kuva 6. Esimerkki laajan maadoitusverkon topologiasta (14).

Energiäteollisuuden sähköverkostosuosituksessa on annettu ohjeistava esimerkki, jota noudattamalla saadaan toteutumaan toimiva laajaa maadoitusjärjestelmä vaadittuine yhdistymisineen. Siinä vähintään 70 % laajaan maadoitusverkkoon kuuluvista muuntamoista on yhdistetty vähintään kolmeen muuntopiiriin joko pien- tai keskijänniteverkon kautta. Lisäksi siinä vaaditaan, että näistä yhdistymisistä vähintään 20 % tulisi tapahtua keskijänniteverkon kautta. Kuvassa 7 on esitetty tähän sääntöön pohjautuva maadoitusverkon suunnitelma. (14.)



Kuva 7. Energiäteollisuuden sähköverkostosuosituksen esimerkki laajan maadoitusjärjestelmän maadoitusten yhdistämisestä (14).

Laajan maadoitusjärjestelmän alueelle tai sen läheisyyteen lisättävien muuntopiirien kohdalla on aina suoritettava määrittely siitä liitetäänkö niitä osaksi laajaa maadoitusjärjestelmää. Kun laajaan maadoitusjärjestelmään lisätään esimerkiksi uusi muuntopiiri, ei sen maadoitusten maadoitusresistanssia ja maadoitusjännitettä tarvitse mitata ja tai lasquemalla todentaa. Riittää että varmistetaan uuden piirin luotettava liittyminen osaksi laajaa maadoitusjärjestelmää. Varmistaminen voidaan suorittaa yksinkertaisella jatkuvuusmittauksella. Esimerkiksi käytetään yhtä yhdistyksen muodostavaa johdinta mittajohdina, jonka avulla varmistetaan muiden johtimien kautta tapahtuva pieniohminen yhdistyminen. Mittauksesta saadut tulokset on dokumentoitava ja liitettävä osaksi kulloisenkin maadoitusjärjestelmän dokumentaatiota. Lisäyksiä tehdessä on kuitenkin huomioitava,

että laajan maadoitusjärjestelmän vaatimusten mukaisesti, uuden piirin tulee liittyä laajaan maadoitusjärjestelmään vähintään kahdessa eri pisteessä. (10, s. 146; 15, s. 18.)

6.4 Todentaminen ja dokumentointi

Laaja maadoitusjärjestelmä tulee aina tunnistaa ja määritellä siihen kuuluvat alueet. Standardissa SFS 6001 annetaan laajalle maadoitusjärjestelmälle selkeät dokumentointivaatimukset. Dokumentaatiosta on tultava ilmi perusteet laajan maadoituksen käytöstä mukaan lukien järjestelmään liittyvät sähköasemat, muuntopiirit ja niiden väliset maadoitusten yhdistämiset niissä käytettyine poikkipinta-aloineen. Selkeyden vuoksi olisi laajasta maadoitusjärjestelmästä syytä piirtää kaavio, josta käy ilmi maadoitusjärjestelmien kytkeytyminen. (6, s. 70–71; 10, s. 149.)

Laajan maadoitusjärjestelmän toteutuminen ja turvallisuusvaatimusten täytyminen voidaan tarkastaa tyypillisillä menettelytavoilla mittauksin tai laskennallisesti. Laajojen maadoitusjärjestelmien resistanssin mittaaminen normaaleilla menettelyillä esimerkiksi käännepestemenetelmällä on kuitenkin käytännössä hankalaa ja antaa epäluotettavan tuloksen. Tästä syystä sen maadoitusresistanssia ei ole yleensä järkevää lähteä mittaamalla tarkastamaan. (10, s. 20, 145.)

6.5 Saavutettavat hyödyt ja mahdolliset haitat

Laajan maadoitusjärjestelmän avulla saavutettavien turvallisuus- ja taloushyötyjen vuoksi sen saavuttamiseen on suositeltavaa pyrkiä (6, s. 71).

Turvallisuushyödyt

Laajan maadoitusjärjestelmän avulla pystytään saavuttamaan merkittäviä etuja sähköturvallisuuden näkökulmasta. Sen katsotaan aina toteutuessaan muodostavan alueelleen näennäisen tasapotentialipinnan johtuen maasulkuvirtojen jakautumistavasta. Toteutuneen laajan maadoitusjärjestelmän alueella ei siis esiinny henkilöille vaarallisia kosketus- ja askeljännitteitä. Tämän lisäksi tasapotentiali laitteiden ja

maadoitusjärjestelmien välillä poistaa sähkömagneettisten kenttien aiheuttamia häiriöitä sekä vähentää laiterikkoja. (10.)

Taloushyödyt

Laajan maadoitusjärjestelmän tarjoamien turvallisuushyötyjen takia on siihen liittyvien laitteistojen osalta tehty lievennyksiä vaatimuksiin muun muassa mittausten osalta. Näiden lievennysten huomioiminen järjestelmän suunnittelussa ja käytössä tarjoaa mahdollisuuden saavuttaa myös taloudellista hyötyä. (6, s. 71.)

Laajan maadoitusjärjestelmän muodostuessa ei siihen kuuluville paikallisille maadoitusjärjestelmille tarvitse suorittaa maadoitusresistanssin ja -jännitteen laskennallisia määrittäyksiä. Asennusten jälkeistä todentamista mittaamalla ja siirtyvien jännitteiden tarkastelua ei myöskään vaadita suoritettavaksi. Laajan maadoitusjärjestelmän perussuunnitelman katsotaan riittävän todistamaan, että kosketusjännite pysyy annettujen rajojen puitteissa. On kuitenkin vaadittu, että jokaisen yksittäisen maadoituksen luotettava liittymisen laajan maadoitusjärjestelmään on todennettava mittaamalla ja siitä saadut tulokset on dokumentoitava. (10, s. 132.)

Laajaan maadoitusjärjestelmään kuuluvia maadoituksia ei tarvitse mitata määrävälein. Normaalisti mittausten määräaika olisi kuudesta kahteentoista vuoteen riippuen järjestelmän rakenteesta. Laajan maadoitusjärjestelmän maadoituspiirien eheys ja yhteys toisiinsa varmistetaan laitteiston kunnossapitoon liittyvien tarkastusten yhteydessä. Tiedot tarkastuksista on dokumentoitava. (10, s. 146; 14.)

Laajaa maadoitusjärjestelmää laajennettaessa ei sille tarvitse suorittaa uutta kokonais-tarkastelua siihen tapahtuvien yksittäisien lisäysten yhteydessä. Yksinkertainen jatkuvuusmittaus riittää varmistamaan uuden piirin liittymisen osaksi järjestelmään. Piirin liittymässä osaksi laajaa maadoitusjärjestelmää ei sen osalta vaadita maadoitusresistanssin ja -jännitteen laskennallisia määrittäyksiä tai mittauksia. (6, s. 70; 10, s. 146.)

Kaikki sähköisesti erilliset järjestelmät on varustettava automaattisella maasulkusuojauksella. Suojauksen avulla maasulkutilanne havaitaan ja saadaan kytkettyä pois automaattisesti. Laajan maadoitusjärjestelmän piirin kuuluvassa laitteistossa voidaan käyttää

ensimmäisestä maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää. Laitteiston käyttöä voidaan maasulusta huolimatta jatkaa normaalisti ellei ole ilmeistä, että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa ihmisille tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulkutilanteessa voidaan jatkaa enintään kahden tunnin ajan. Jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan ettei siitä aiheudu vaaraa, voidaan käyttöä jatkaa pidempään kuin kaski tuntia. (10, s. 140.)

Haitat

Laaja maadoitusjärjestelmäkään ei ole immuuni vaaratilanteille. Se reuna-alueilla saattaa syntyä vaaratilanteita, jos järjestelmän piiriin kuulumattomalla muuntajalla syötetään sen vaikutusalueelle. Tällöin vikatilanteissa saattaa suuri vikavirta kulkeutua johtavia rakenteita kuten esimerkiksi tietoliikenneverkon kaapelivaippojen kautta aiheuttaen vaaratilanteen. Tästä syystä onkin kiinnitettävä erityistä huomiota määriteltäessä laajaa maadoitusalueutta ja siihen liittyviä muuntopiirejä. Reuna-alueet tulee aina tarkistaa ja tarpeen mukaan joko erottaa syötöt niin, ettei vaaraa esiinny tai sitten rakentaa yhteydet laajaan maadoitusjärjestelmään. (6, s. 71.)

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli luoda AFRY Finland Oy:lle suunnitteluohje, jota soveltamalla voidaan suunnitella teollisuuslaitoksen paikalliset maadoitusjärjestelmät siten, että yhdessä ne muodostavat toimivan laajan maadoitusjärjestelmän. Työ suoritettiin tutkimalla maadoittamista sekä laajaa maadoitusjärjestelmää käyttäen lähdemateriaalina keskeisimpiä voimassaolevia SFS-standardeja, ST-kortistoa, Energiateollisuuden sähköverkostosuosituksia sekä alan kirjallisuutta.

Työn lopputuloksena saatiin kattava ohjeistus laajasta maadoitusjärjestelmästä teollisuuskohteissa sekä yleisohjeet sen muodostavien maadoitusten toteutuksista. Työssä esitellään standardissa SFS 6001 laajalle maadoitusjärjestelmälle annetut vaatimukset, sekä annetaan ohjeita ja esimerkkejä laajan maadoitusjärjestelmän toteuttamisesta. Työssä tuodaan esille laajan maadoitusjärjestelmän avulla saavutettavat hyödyt ja siitä mahdollisesti aiheutuvat haitat. Raportti tarjoaa myös hyvän yleiskuvan maadoittamisen

tarkoituksesta, teollisuuden pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoitusten rakenteesta sekä niiden yhdistämistä koskevista vaatimuksista. Lisäksi raportissa annetaan SFS 6000 ja SFS 6001 mukaiset ohjeet pien- ja suurjännitejärjestelmien maadoituksiin kuuluvien elektrodien sekä maadoitus-, suoja- ja potentiaalintasausjohtimien mitoittamiseen.

Työssä havaittiin, että laajan maadoitusjärjestelmän määrittelytapa on avoin eikä sen tunnistamiseen ole olemassa yksiselitteisiä ohjeita. Laajan maadoitusjärjestelmän toteutuminen tulee aina määritellä tapauskohtaisesti. Sen toteuttavan maadoitusverkon topologia on selkeä, mutta toteutumiseen vaaditulle verkon tiheydelle tai paikallisten maadoitusten välisten yhdistymisien määrälle ei ole annettu tarkkaa määritelmää. Tämä asia korostaa huolellisen dokumentoinnin tärkeyttä laajojen maadoitusjärjestelmien yhteydessä. Kertaalleen todennettu laaja maadoitusjärjestelmä on syytä dokumentoida hyvin, jotta sen toteutuminen ja laajuus on helppo todistaa tulevaisuudessa.

Insinööriyön tuloksena saatua ohjeistusta voidaan käyttää AFRY:n henkilöstön kouluttamiseen sekä tukemaan suunnittelutyötä. Ohjeistusta noudattamalla pystytään toteuttamaan toimiva laaja maadoitusjärjestelmä suunniteltaviin teollisuuskohteisiin sekä laatimaan siitä vaadittu dokumentaatio. Voidaankin työlle annettujen vaatimusten katsoa tältä osin toteutuneen.

Tutkimusta aiheen piirissä voidaan jatkaa suorittamalla teknistaloudellinen tarkastelu teollisuuslaitoksen laajalle maadoitusjärjestelmälle. Tässä suurin mielenkiinto kohdistuu teollisuuslaitoksen satelliittiasemien, kuten vesipumppaamojen, laajaan maadoitusjärjestelmään liittämisen taloudelliseen kannattavuuteen.

Laajasta maadoitusjärjestelmästä ei ole tällä hetkellä saatavilla kattavasti tietoa. On kuitenkin olemassa merkkejä siitä, että mielenkiinto laajaa maadoitusjärjestelmää kohtaan on kasvussa. Onkin olemassa merkkejä siitä, että tulevaisuudessa laajasta maadoitusjärjestelmästä saatavilla olevan luotettavan tiedon määrä kasvaa ja määritelmät tarkentuvat. Esimerkiksi SFS-standardeissa laajan maadoitusjärjestelmän määrittely sekä sille annetut vaatimukset ovat jo tarkentuneet viimeisimpien julkaisujen yhteydessä.

Teollisuuslaitosten sähköjärjestelmien tarkastusten yhteydessä on alettu viime vuosina kiinnittämään enemmän huomiota laajaan maadoitusjärjestelmän toteutumiseen, koska

järjestelmän ulkopuolelle jäävät muuntopiirit voivat aiheuttaa vaaratilanteita. Tämän myötä myös laitosten käytönjohtajat ovat heränneet asian suhteen ja alkaneet vaatimaan käyttöönsä tarkempaa dokumentaatiota. Sähköalalla suunnittelutöitä tekevien tahojen onkin syytä varautua kasvavaan mielenkiintoon laajoja maadoitusjärjestelmiä kohtaan ja päivittää omaa osaamistaan asiasta.

Lähteet

- 1 Yrityksen verkkosivut. 2020. Verkkoaineisto. AFRY. <<https://afry.com/fi-fi/tietoa-meista>>. Luettu 4.12.2020.
- 2 AFRY lyhyesti. 2020. PDF-dokumentti. AFRY-Finland Oy. <https://afry.com/sites/default/files/2020-06/afry_lyhyesti.pdf>. Luettu 4.12.2020.
- 3 SFS 6000-1:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Peruseräatteen, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. 2017. PDF-dokumentti. SFS-Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/533944.html.stx>>. Haettu 1.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 4 Kallio, Raimo; Mäkinen, Markku J. J. 2004. Teollisuuden sähköasennukset. 1. painos. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava.
- 5 Hietalahti, Lauri. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. 1. painos. Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 6 Tiainen, Esa; Nurmi, Tapani; Koivisto, Pekka; Ylinen, Timo & Kauppila, Jenna. 2019. Maadoituskirja. 7., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 7 SFS 6000-4-44:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-44: Suojausmenetelmät. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä. 2017. PDF-dokumentti. SFS-Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/537518.html.stx>>. Haettu 1.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 8 Tiainen, Esa (toim.). 2018. D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 26. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 9 SFS 6000-4-41:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta. 2017. PDF-dokumentti. SFS-Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/537500.html.stx>>. Haettu 1.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 10 SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset. 2018. PDF-dokumentti. SFS Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/679252.html.stx>>. Haettu 1.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 11 Elovaara, Jarmo; Haarla, Liisa. 2011. Sähköverkot : 2, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.
- 12 SFS 6000-5-54:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-54: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojajohtimet. 2017. PDF-dokumentti.

SFS-Online. <<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/533941.html.stx>>. Haettu 1.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.

- 13 ST 53.21 Rakennusten sähköasennusten maadoitukset ja potentiaalintasaukset. 2018. PDF-dokumentti. Sähköinfo Severi.<<https://severi.sahkoinfo.fi/item/582?search=53.21>>. Haettu 1.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 14 Verkostosuositus RJ22:20 Sähkönjakeluverkon maadoitusten suunnittelu, toteutus ja varmistaminen. 2020. Energiateollisuus ry <<https://sahkoverkkoekstra.fi/kirjasto-koulutus/verkostosuositukset>> Haettu 4.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.
- 15 Verkostosuositus TJ1-05 Sähkönjakeluverkkojen maadoitusmittaukset. Energiateollisuus ry <<https://sahkoverkkoekstra.fi/kirjasto-koulutus/verkostosuositukset>> Haettu 4.10.2020. Vaatii käyttöoikeuden.

Liite 1. Sallittujen kosketusjännitteiden laskentamenetelmä

Standardin SFS 6001 mukainen suurin sallittu kosketusjännite voidaan laskea kaavalla (10, s. 101):

Kaava:

$$U_{Tp} = I_B(t_f) \times \frac{1}{HF} \times Z_T(U_T) \times BF$$

Tekijät:

Kosketusjännite	U_T	
Sallittu kosketusjännite	U_{Tp}	
Vian kesto aika	t_f	
Kehon kautta kulkevan virran raja-arvot	$I_B(t_f)$	c_2 julkaisun IEC/TS 60479-1 kuvassa 20 ja taulukossa 11, jolloin sydänkammiovärinän todennäköisyys on pienempi kuin 5 %. I_B riippuu vian kestoajasta
Sydämen virtakerroin	HF	Julkaisun IEC/TS 60479-1 taulukko 12: 1,0 vasemmasta kädestä jalkoihin, 0,8 oikeasta kädestä jalkoihin, 0,4 kädestä käteen
Kehon impedanssi	$Z_T(U_T)$	Julkaisun IEC/TS 60479-1 taulukko 1 ja kuva 3: 50 %:lla väestöstä Z_T on enintään tämän suuruinen Z_T riippuu kosketusjännitteestä. Siksi laskenta tulee aloittaa oletetulta lähtötasolta
Kehon kerroin	BF	Julkaisun IEC/TS 60479-1 kuva 3: 0,75 kädestä jalkoihin, 0,5 käsistä jalkoihin.

HUOM. 1 Erilaiset kosketusjännitetapaukset, vasemmasta kädestä jalkoihin, kädestä käteen jne. johtavat erilaisiin sallittuihin kosketusjännitearvoihin. Tämän standardin [kuva 15](#) perustuu neljän erilaisen kosketusjännitetapauksen painotettuun keskiarvoon: Kosketusjännite vasemmasta kädestä jalkoihin (painotus 1,0), kosketusjännite oikeasta kädestä jalkoihin (painotus 1,0), kosketusjännite molemmista käsistä jalkoihin (painotus 1,0) ja kosketusjännite kädestä käteen (painotus 0,7).

HUOM. 2 Joissain maissa sovelletaan erilaisia arvoja (katso SFS-EN 50522 A-poikkeukset).

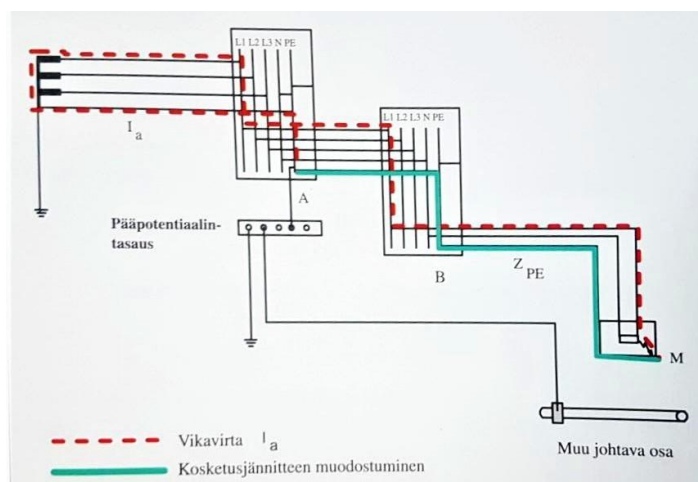
Kun erityistarkastelussa otetaan huomioon lisäresistanssit, sallitun prospektiivisen kosketusjännitteen kaava muuttuu seuraavaksi:

$$U_{vTp} = I_B(t_f) \times \frac{1}{HF} \times (Z_T(U_T) \times BF + R_H + R_F)$$

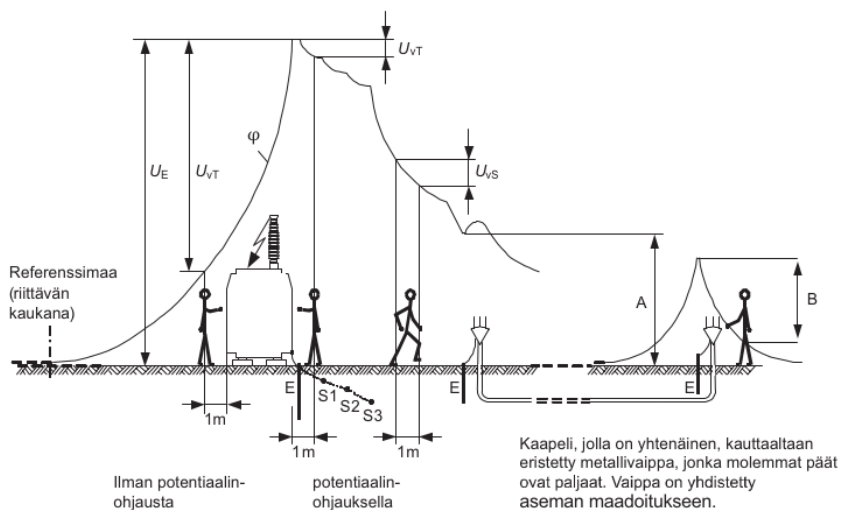
Jossa:

Sallittu prospektiivinen kosketusjännite	U_{vTp}
Käden lisäresistanssi	R_H
Jalan lisäresistanssi	R_F

Liite 2. Esimerkkejä kosketusjännitteen muodostumisesta vikatilanteissa



Kuva 1. Kosketusjännitteen muodostuminen vian aikana pienjännitejärjestelmässä (8 s. 88).

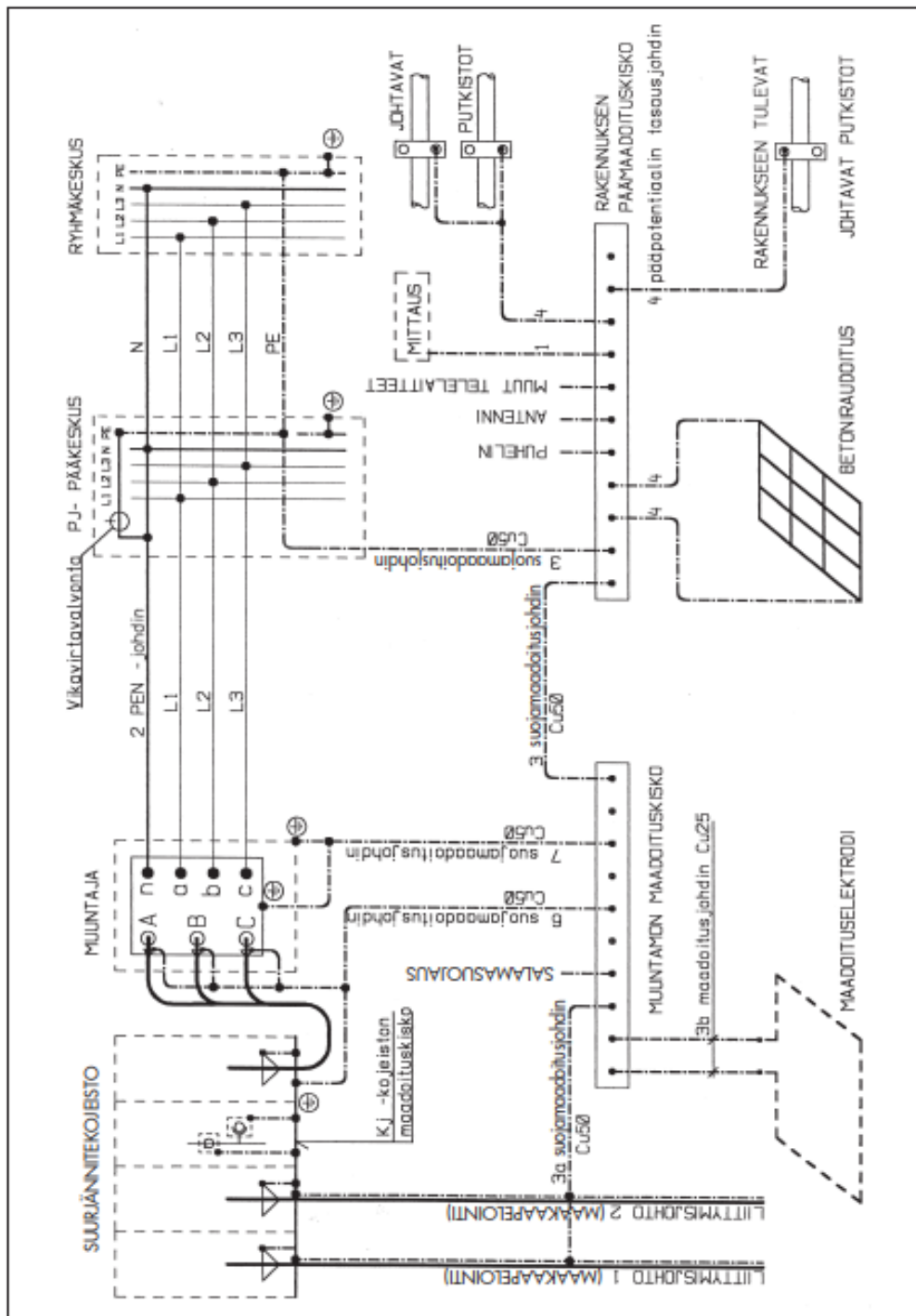


Selite

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

Kuva 2. Esimerkki maan potentiaaliprofilista ja jännitteistä, kun maadoituselektrodissa kulkee virta (10, s. 23).

Liite 3. Maadoitusjärjestelmän periaatepiirros



Kuva 1. Maadoituksen, potentiaalintasauksen ja syötön kytkennät liittymässä, jossa on muuntaja ja pääkeskusta syötetään PEN-johtimella varustetulla kaapelilla (13, s. 20).

Liite 4. Maadoituselektrodien minimimitat mekaanisen ja korroosiokestävyyden mukaan

Taulukko 1. Pienjännitejärjestelmän maadoituselektrodien minimimitat. Jos maadoituselektrodiä käytetään myös salamasuojaukseen, elektrodin poikkipinnan pitää soveltaa suurempia poikkipintoja standardin SFS-EN 62305-3 mukaisesti. (12, 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

Taulukko 2. Suurjännitejärjestelmän maadoituselektrodien tyypit ja minimimitat, jotka takaavat riittävän mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden. Suurempia poikkipinta-aloja voidaan tarvita silloin, kun termisen kestävyuden mukaan vaaditaan suurempaa poikkipinta-alaa tai asennukseen liittyy salamasuojausjärjestelmä. Teollisuusympäristössä tulee käyttää aina vähintään 25 mm² poikkipinta-alaa. (10, s. 108, 146; 6, s. 58.)

Materiaali	Elektrodin tyyppi	Vähimmäismitta					
		Ydinosa			Pinoite/vaippa		
		Halkaisija mm	Poikkipinta mm ²	Paksuus mm	Yksittäinen arvo µm	Keskiarvo µm	
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha ^b		90	3	63	70
		Profili (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 Valsattu tai leikattu nauha pyöristetyin reuinoin.

^c 16 mm² poikkipintaa voidaan käyttää erityisolosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosion ja mekaanisen vaurioitumisen riski on vähäinen.

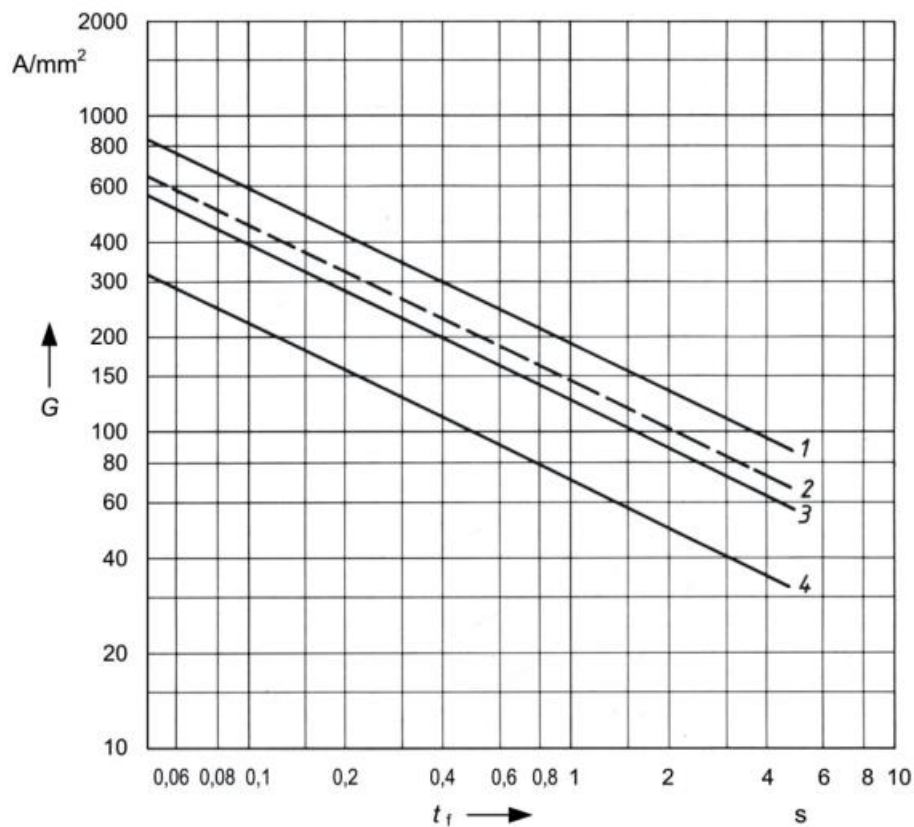
^d Yksittäiselle langalle.

Liite 5. Suurjännitejärjestelmien maadoitusten suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat

Taulukko 3. Suurjännitejärjestelmien maadoitusten suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat (10, 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	$I''_{kEE}{}^i$	$I''_{kEE}{}^{ci}$	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{R_{sc}}^2}{}^b h$
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}	$I_E = r \cdot (I''_{k1} - I_N){}^d$
<p>^a Jos virralla on useita kulkuteitä, virran jakautuminen voidaan ottaa huomioon.</p> <p>^b Jos maasuluille ei ole automaattista poiskytkentää, kaksoismaasulkujen huomioon ottamisen tarve riippuu käyttökokemuksista.</p> <p>^c Petersenin kelan eli maasulkuvirran sammutuskelan maadoitusjohdin pitää mitoittaa kelan maksimivirran mukaan.</p> <p>^d On tarkistettava, voiko aseman ulkopuolinen vika olla määräävä.</p> <p>^e Liitteen C mukaiset vähimmäispoikkipinnat pitää ottaa huomioon.</p> <p>^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.</p> <p>^g Sammutetuissa järjestelmissä oletetaan, että lyhytaikainen maadoittaminen (vastuksen kytkeminen sammutuskelan rinnalle) alkaa automaattisesti 5 s kuluttua maasulun havaitsemisesta.</p> <p>^h Kun vika sattuu sähköasemalla, pitää ottaa huomioon kapasitiivinen vikavirta I_C. Jos sähköaseman ulkopuolisessa verkossa on muita sammutuskeloja, ne pitää ottaa huomioon.</p> <p>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 poiskytkentäaikaan käytetään ekvivalenttista poiskytkentäaikaan. (FI)</p>			
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} maksimiarvon 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 1)		
Jos asemalta lähtevillä ilmajohdoilla ja kaapeleilla on erilaiset reduktiokerroimet, tulee tarvittava rezultoiva virta määrittää liitteen 1 mukaisesti.			

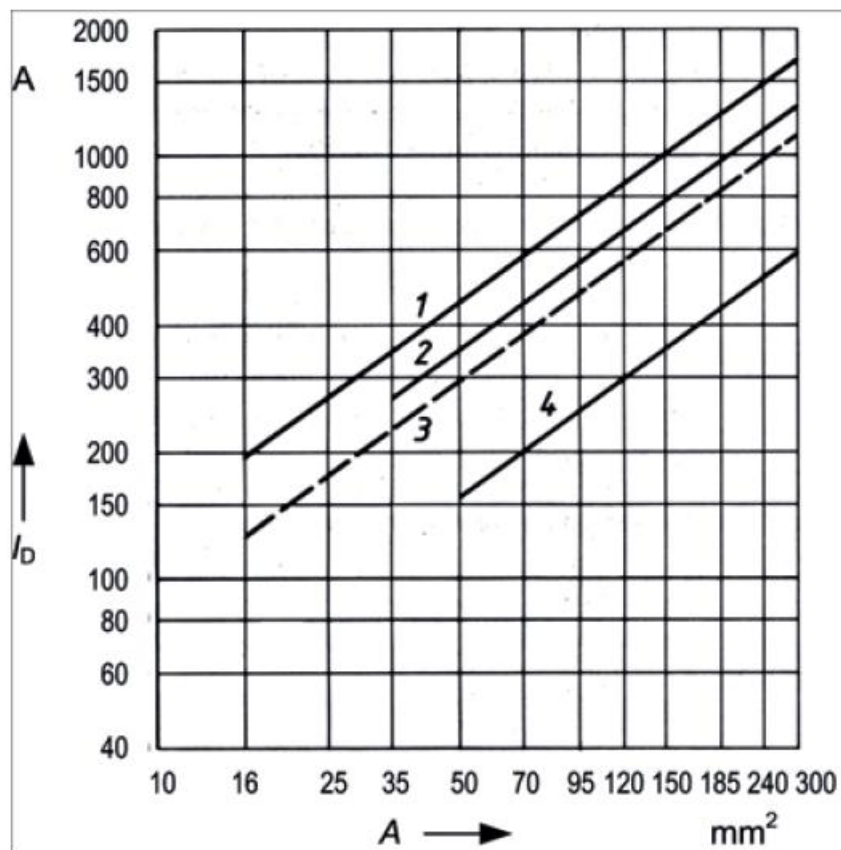
Liite 6. Maadoitusjohdinten ja -elektrodien poikkipinta-alan määrittäminen



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

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 3 Alumiini (vain maadoitusjohtimena)
- 4 Sinkitty teräs

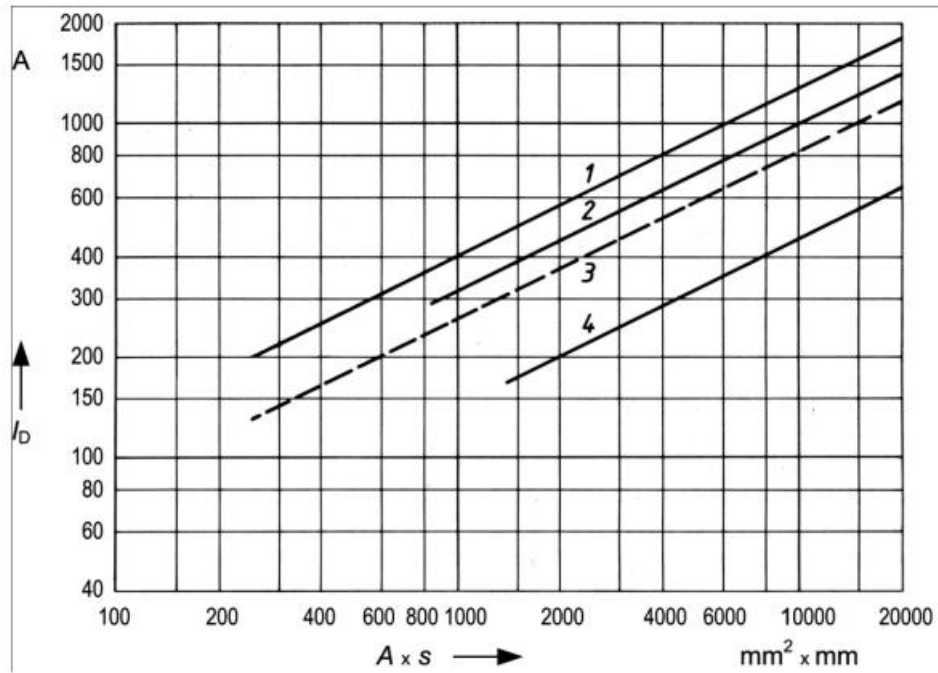
Kuva 1. Maadoitusjohtimen ja maadoituselektrodien sallittu oikosulkuvirran tiheys G vikavirran kestoajan t_f funktiona (10, s. 110).



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

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Alumiini
- 3 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 4 Sinkitty teräs

Kuva 2. Poikki pinnaltaan (A) pyöreän maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D (10, s. 111).



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

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Alumiini
- 3 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 4 Sinkitty teräs

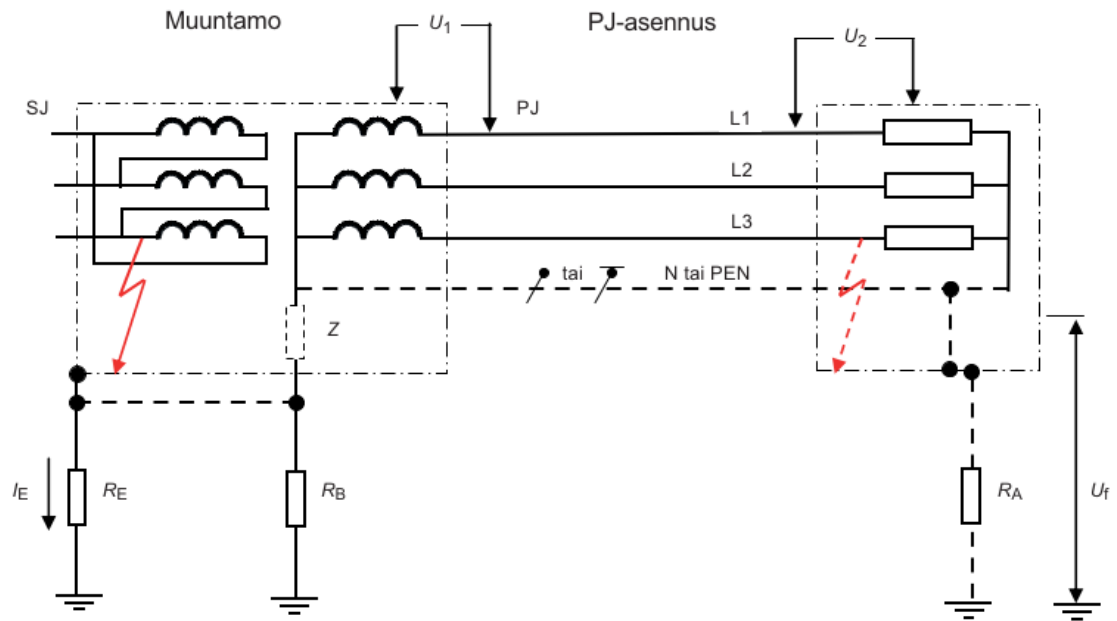
Kuva 3. Poikkipinnaltaan suorakulmaisen maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D poikkipinnan A ja profiilin ympärysmittan s tulon ($A \times s$) funktiona (10, s. 112).

Liite 7. Pienjännitejärjestelmän ylijännitteet suurjännitejärjestelmän vian aikana

Liitteessä käytetään seuraavia taulukon 1 mukaisia tunnuksia:

Taulukko 1. Liitteessä käytettävät tunnuksat selityksineen (7, s. 8).

I_E	suurjännitejärjestelmän maasulkuvirran se osa, joka kulkee muuntamon maadoitusjärjestelmän kautta
R_E	muuntamon maadoitusjärjestelmän resistanssi
R_A	pienjännitejärjestelmän laitteiden jännitteelle alttiiden osien erillisen maadoitusjärjestelmän resistanssi
R_B	pienjännitejärjestelmän nollan maadoituksen resistanssi, jos muuntamon ja pienjännitejärjestelmän maadoitukset ovat erillisiä
U_0	pienjännitejärjestelmän vaihejännite
U_f	käyttötaajuinen vikajännite, joka esiintyy vian aikana pienjännitejärjestelmässä jännitteelle alttiiden osien ja maan välillä
U_1	muuntamon pienjännitelaitteiden äärijohtimen ja jännitteelle alttiiden osien välillä vian aikana esiintyvä käyttötaajuinen rasisusjännite
U_2	pienjänniteasennuksen pienjännitelaitteiden äärijohtimen ja jännitteelle alttiiden osien välillä vian aikana esiintyvä käyttötaajuinen rasisusjännite.
I_d	vikavirta, joka kulkee pienjänniteasennuksen laitteiden jännitteelle alttiiden osien maadoitusten kautta sinä aikana, jolloin on sekä suurjännitevika että ensimmäinen vika pienjänniteasennuksessa
I_h	vikavirta joka kulkee pienjänniteasennuksen jännitteelle alttiiden osien maadoitusten kautta pienjännitejärjestelmän ensimmäisen vian aikana
Z	pienjännitejärjestelmän ja maadoituksen välinen impedanssi (esim. eristystilan valvontalaitteen sisäinen impedanssi, keinotekoisien nollapisteen impedanssi tms.)



Kuva 1. Kaaviomainen esitys liitännöistä muuntamolla ja pienjänniteasennuksessa ja vian aikana esiintyvistä ylijännitteistä (7, s. 8).

Taulukko 2. Pienjännitejärjestelmän käyttötaajuiset rasitusjännitteet ja vikajännitteet (7, s. 9).

Maadoitus-tapa	Maadoitusten kytkentätapa	U_1	U_2	U_f
TT	R_E ja R_B on kytketty yhteen	$U_0^*)$	$R_E \times I_E + U_0$	$0^*)$
	R_E ja R_B ovat erillään	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0^*)$	$0^*)$
TN	R_E ja R_B on kytketty yhteen	$U_0^*)$	$U_0^*)$	$R_E \times I_E$
	R_E ja R_B ovat erillään	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0^*)$	$0^*)$
IT	R_E ja Z on kytketty yhteen	$U_0^*)$	$R_E \times I_E + U_0$	$0^*)$
	R_E ja R_A ovat erillään	$U_0 \times \sqrt{3}$	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}$	$R_A \times I_h$
	R_E ja Z on kytketty yhteen	$U_0^*)$	$U_0^*)$	$R_E \times I_E$
	R_E ja R_A on kytketty yhteen	$U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}$	$R_E \times I_E$
	R_E ja Z ovat erillään	$R_E \times I_E + U_0$	$U_0^*)$	$0^*)$
	R_E ja R_A ovat erillään	$R_E \times I_E + U_0 \times \sqrt{3}$	$U_0 \times \sqrt{3}$	$R_A \times I_d$
*) Vaatimusta ei tarvitse tarkistaa				
IT-järjestelmässä on ensimmäinen vika				

HUOM. 1 Vaatimukset jännitteille U_1 ja U_2 on otettu pienjännitelaitteiden tilapäisen käyttötaajuisen eristystason vaatimuksista.

HUOM. 2 Järjestelmässä, jossa nolla on yhdistetty muuntamon maadoitusjärjestelmään, tällainen tilapäinen käyttötaajuinen ylijännite on odotettavissa myös rakennuksen ulkopuolella olevassa maadoittamattomassa kotelossa olevan laitteen eristyksen yli.

HUOM. 3 TT- ja TN-järjestelmissä nimitykset on kytketty yhteen ja ovat erillään, tarkoittavat sähköistä liitännää maadoitusten R_E ja R_A välillä. IT-järjestelmissä se tarkoittaa sähköistä yhteyttä R_E ja Z :n välillä ja liitännää R_E ja R_A :n välillä.