



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Eemil Viljamaa

110 kV:n sähköverkon vaara- ja häiriöjännitteiden laskenta

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Sähkötekniikan diplomityö
Energia- ja informaatiotekniikka, DI

Vaasa 2022

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Eemil Viljamaa		
Tutkielman nimi:	110 kV:n sähköverkon vaara- ja häiriöjännitteiden laskenta		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Sähkötekniikka		
Työn valvoja:	Kimmo Kauhaniemi		
Työn ohjaaja:	Kimmo Kauhaniemi		
Työn tarkastaja:	Timo Vekara		
Valmistumisvuosi:	2022	Sivumäärä:	101

TIIVISTELMÄ:

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia 110 kV:n sähköverkon vaara- ja häiriöjännitteitä erityisesti laskennan näkökulmasta ja rakentaa olemassa olevaan teoriaan ja määräyksiin perustuva laskentatyökalu, joka keskittää tärkeimmät vaara- ja häiriöjännitelaskelmat yhteen ohjelmaan. Vaara- ja häiriöjännitelaskelmat ovat osa voimajohtojen ja sähköasemien kunnossapitoa koko sähköverkon elinkaaren ajan. Turvallisuuden ja toimitusvarmuuden tärkeyden korostuessa ja sähkön kysynnän kasvun ja uusiutuvan energian käyttöönoton myötä voimajohtoja ja sähköasemia rakennetaan ja saneerataan enenevässä määrin täyttämään tulevaisuuden sähköverkon tarpeet. Tämän myötä tarve erilaisille vaara- ja häiriöjänniteselvityksillekin kasvaa. Tämän työn tavoitteena on rakentaa laskentatyökalu, jonka myötä vaarajännitelaskelmia ja sitä kautta vaarajänniteselvitysten tekoa saataisiin tehostettua.

Vaara- ja häiriöjännitteitä käsitellään usein toistensa yhteydessä, sillä niitä aiheuttavat samat tekijät. Vaara- ja häiriöjännitteet voivat kytkeytyä induktiivisesti, kapasitiivisesti tai induktiivisesti. Induktiivisesti kytkeytyvät jännitteet ovat näistä yleisimpiä ja ne vaikuttavat laajimmalla alueella. Suomen maaperän korkeasta resistiivisyydestä johtuen maasulkuvirta muodostaa hyvin laajan indusoivan virtasilmukan, jonka induktiovaikutukset voivat ulottua jopa 15 kilometrin päähän maasulkukohdasta. Vaara- ja häiriöjännitteitä käsitellään olennaisesti standardeissa SFS-EN 50341 ja SFS 6001 sekä Viestintäviraston määräyksessä 43F/2015M, joka perustuu pitkälti ITU-T:n suosituksiin.

Tämä työ koostuu kirjallisuuteen ja alan julkaisuihin perustuvasta teoriaosuudesta ja empiirisestä osuudesta, jossa rakennetaan taulukkolaskentaohjelmapohjainen laskentatyökalu 110 kV:n sähköverkon vaara- ja häiriöjännitelaskelmiin. Työssä pyritään voimassa olevien standardien ja määräysten sekä olemassa olevien teorioiden pohjalta muodostamaan ajankohtainen käsitys 110 kV:n sähköverkon tärkeimmistä vaara- ja häiriöjännitteistä ja niiden laskennasta, jotta rakennettavalla laskentatyökalulla voitaisiin tehostaa vaarajännitteisiin liittyvää selvitystyötä.

Diplomityössä muodostettu laskentatyökalu keskittää onnistuneesti kaikki tärkeimmät 110 kV:n vaarajännitelaskelmat yhteen ohjelmaan, minkä johdosta esimerkiksi vaarajänniteselvitysten tekoa voidaan nopeuttaa. Laskentatyökaluun sisällytetyt toiminnot ja makro-ominaisuudet mahdollistavat myös sen, että laskentatyökalua voidaan hyödyntää tehokkaasti voimajohtojen maadoitussuunnittelun tukena. Erityisesti induktiovaarajänniteselvityksiin liittyvät rajapituuslaskelmat nopeutuvat merkittävästi laskentatyökaluun rakennettujen makrotoimintojen avulla. Ohjelmaa tullaan hyödyntämään tulevissa sähköasema- ja voimajohtoprojekteissa.

AVAINSANAT: Vaarajännite, häiriöjännite, sähköverkko, 110 kV, voimajohto, sähköasema, maadoitus

Sisällys

1	Johdanto	12
2	110 kV:n sähköverkon maadoitukset	15
2.1	Maadoittamisen tarkoitus	15
2.2	Maaperän resistiivisyys	17
2.3	Maadoitusresistanssi eri elektrodityypeillä	18
2.3.1	Puolipalloelektrodi	20
2.3.2	Vaakaelektrodi	21
2.3.3	Pystyelektrodi	22
2.3.4	Muut elektrodityypit	24
2.4	Ukkosjohtimet	26
2.5	Sähköasemien maadoitukset	27
2.6	Voimajohtojen maadoitukset	30
3	Maasulku 110 kV:n sähköverkossa	34
3.1	Voimajohdon maasulku	34
3.2	Maasulkuvirta yksivaiheisessa maasulussa	36
3.3	Reduktiovaikutus	38
3.3.1	Ukkosjohtimien reduktiovaikutus	38
3.3.2	Suurjännitekaapelin reduktiovaikutus	43
3.3.3	Muut reduktiotekijät	44
4	Vaara- ja häiriöjännitteet 110 kV:n verkossa	46
4.1	Maadoitusjännite ja potentiaalın leviäminen	47
4.1.1	Sähköaseman maadoitusjännite	48
4.1.2	Pylvään maadoitusjännite ja pylväspotentiaalın leviäminen	49
4.2	Kosketus- ja askeljännitteet sekä siirtyvät potentiaalit	52
4.2.1	Kosketusjännite	52
4.2.2	Askeljännite	56
4.2.3	Siirtyvä potentiaali	56
4.3	Kapasitiiviset ja konduktiiviset vaarajännitteet	57

4.3.1	Kapasiiviset vaarajännitteet normaalikäytössä ja maasulussa	58
4.3.2	Konduktiiviset vaarajännitteet	60
4.4	Induktiovaarajännitteet	61
4.4.1	Normaalikäytössä indusoituva sähkömotorinen voima	62
4.4.2	Vikatilanteessa indusoituva sähkömotorinen voima	63
4.5	Häiriöjännitteet	66
4.5.1	Sähköaseman viestiyhteyksin suojaaminen	67
4.5.2	Yliaaltojen aiheuttamat häiriöjännitteet	68
4.5.3	Sähköasemien sähkömagneettinen yhteensopivuus	70
5	Vaarajännitekohteet	73
5.1	Televerkko	73
5.1.1	Televerkon rakenne	73
5.1.2	Televerkkoon indusoituvat jännitteet	74
5.2	Maakaasuputket	77
5.2.1	Maakaasuputkiston rakenne	77
5.2.2	Maakaasuputkiin indusoituvat jännitteet	78
5.3	Muut johtavat rakenteet	79
6	Laskentatyökalu 110 kV:n sähköverkon vaarajännitelaskelmiin	81
6.1	Sähköaseman maadoitusjännite	81
6.2	Maapotentiaalilaskenta	82
6.2.1	Ketjuimpedanssi ja vikavirran jakautuminen	83
6.2.2	Laskennan tulokset	84
6.3	Induktiovaarajännitteiden laskenta	84
6.3.1	Normaalikäytön induktiovaarajännitteet	85
6.3.2	Rajapituuslaskelmat	86
7	Yhteenveto ja johtopäätökset	89
	Lähteet	93
	Liitteet	97
	Liite 1. Maadoitusjännitteen laskenta.	97

Liite 2. Maapotentiaalilaskenta.	98
Liite 3. Potentiaaliprofiili.	99
Liite 4. Normaalikäytön vaarajännitteet.	100
Liite 5. Rajapituuslaskelmat.	101

Kuvat

Kuva 1.	Maadoitusresistanssin muodostuminen yksinkertaistettuna.	20
Kuva 2.	Maadoitusruudukon potentiaalijakauman riippuvuus silmukkatihedestä.	28
Kuva 3.	Voltti-ampeerimittarimenetelmän mittauskytkentä.	30
Kuva 4.	Pylväsmaadoitusten mitoittaminen Suomessa: a) tavoitearvot, b) perusmaadoituksella saatava keskimääräinen arvo ja c) resultoiva aaltovastus ukkosjohtimet mukaan luettuna.	31
Kuva 5.	Pylväsmaadoituselektrodeja: perusmaadoitus (a), säteismaadoitus (b), läpimenevä johdinelektrodi (c).	32
Kuva 6.	Potentiaalinhjauselektrodi harustetulla pylväällä (a) ja vapaasti seisovalla pylväällä (b).	33
Kuva 7.	Erään 110 kV:n johdon epäsymmetriapiirros.	37
Kuva 8.	Maasulkuvirran jakautuminen ukkosjohtimellisella johdolla.	40
Kuva 9.	Yhtälöissä 23–24 tarvittavat etäisyydet.	41
Kuva 10.	Maanpinnan potentiaali V , maadoitusjännite U_e , kosketusjännite U_k ja askeljännite U_{as} sekä siirtyvä jännite U_s ja takaperoinen kosketusjännite U_{tp} .	46
Kuva 11.	Ukkosjohtimellisella johdolla pylväspotentiaalijakauman suuruuteen vaikuttavat impedanssit.	51
Kuva 12.	Kosketusjännitteiden suurimpia sallittuja arvoja eri sijaintipaikoissa. U_{D1} : $R_A = 0 \Omega$; U_{D2} : $R_A = 1750 \Omega$, $R_{A1} = 1000 \Omega$, $\rho = 500 \Omega\text{m}$; U_{D3} : $R_A = 4000 \Omega$, $R_{A1} = 1000 \Omega$, $\rho = 2000 \Omega\text{m}$; U_{D4} : $R_A = 7000 \Omega$, $R_{A1} = 1000 \Omega$, $\rho = 4000 \Omega\text{m}$.	54
Kuva 13.	Kapasitiivisen vaarajännitteen syntyminen.	58
Kuva 14.	Telejohdon kapasitiiviseen vaarajännitteeseen vaikuttavat etäisyydet.	60
Kuva 15.	Maavirran ekvivalenttisyvyys ja sen luoma magneettikentän periaate.	63
Kuva 16.	Erotus- ja yhteismuotoiset häiriöt ja niiden eliminoimiskeinot.	67
Kuva 17.	Puhelinverkon fyysinen rakenne: keskusalue, tilaajajohdot ja keskusalueita yhdistävä kuituverkko.	74

Kuva 18.	Vinon telejohdon osaprojektio (a) ja induktiovaikutus voimajohdon tehdessä mutkan (b).	75
Kuva 19.	Telejohdon jänniteprofiilit eri maadoitus- ja maasulkutilanteissa.	76
Kuva 20.	Telejohdon pituus, jolla indusoitua smv saavuttaa rajajännitteen suurjännitejohdon normaalikäytössä vaihevirralla 1000 A.	86
Kuva 21.	Esimerkki rajapituuslaskelmien aloitussivusta.	87
Kuva 22.	Vuokaavio rajapituuslaskelmien toiminnasta.	88
Kuva 23.	Maadoitusjännitteen laskenta.	97
Kuva 24.	Esimerkki potentiaaliprofiilista.	99
Kuva 25.	Normaalikäytön vaarajännitteet.	100
Kuva 26.	Rajapituuslaskelmat.	101

Taulukot

Taulukko 1.	Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinta-alat eri materiaaleilla .	16
Taulukko 2.	Erilaisten aineiden resistiivisyyksiä.	18
Taulukko 3.	Erityyppisten elektrodien maadoitusresistanssien laskentakaavoja.	25
Taulukko 4.	Erilaisten elektrodien maadoitusresistanssi suhteessa saman pituisen vaakaelektrodin maadoitusresistanssiin.	26
Taulukko 5.	Eri ukkosjohtimien reduktiokertoimia.	42
Taulukko 6.	Erilaisten kaapeleiden reduktiokertoimia.	44
Taulukko 7.	Kuormittamattoman kosketusjännitteen raja-arvoja.	53
Taulukko 8.	Suosituksen ITU-T K.68 kohdan 6.2.2 taulukon 18 mukaiset siirtyvien ja indusoituvien jännitteiden (smv) sallitut raja-arvot.	57
Taulukko 9.	Maapotentiaalilaskenta.	98

Kreikkalaiset symbolit

β	Virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo
ϵ_0	Tyhjiön permittiivisyys
θ_i	Alkulämpötila

θ_f	Loppulämpötila
μ	Ukkos- ja vaihejohtimien välinen kytkentäkerroin
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti
μ_r	Suhteellinen permeabiliteetti
ρ	Maaperän resistiivisyys
ρ_u	Ominaisvastus
ω	Kulmataajuus

Muut symbolit

$3I_0$	Yksivaiheinen maasulkuvirta
$3I_{0eq}$	Ekvivalenttinen yksivaiheinen maasulkuvirta
A	Maadoitusjohtimen poikkipinta
a	Voima- ja telejohdon välinen etäisyys
B_1, B_2, B_3	Telejohdon ja maan välinen etäisyys
b	Ukkosjohtimien geometrinen keskietäisyys vaihejohtimista
b_1, b_2, b_3	Tele- ja vaihejohtimen välinen etäisyys
c	Ukkosjohtimien välinen geometrinen keskietäisyys
c_0	Voimajohdon nollakapasitanssi vaihetta ja pituusyksikköä kohden
C_{11}	Voimajohdon ja maan välinen osakapasitanssi
C_{12}	Voimajohdon ja telejohdon välinen osakapasitanssi
C_{22}	Telejohdon ja maan välinen osakapasitanssi
d	Elektrodin halkaisija
E_R	Vikaantuneen vaiheen vaihejännite
f	Taajuus
H	Maavirran ekvivalenttinen tunkeutumissyvyys
h	Upotussyvyys
I	Virran tehollisarvo
I_0	Nollaverkon virta
I_1	Myötäverkon virta

I_2	Vastaverkon virta
I_a	Virta polariteetilla a
I_b	Virta polariteetilla b
I_e	Mittausvirta tai maasulkuvirta
I_{ei}	Johdon i syöttämä maasulkuvirta
I_{ej}	Vikaantuneelta pylväältä j maahan kulkeva virta
I_F	Maasulun synnyttämä vikavirta
I_p	Psofometrinen virta
I_{si}	Ukkosjohtimiin indusoitunut virta
j	Imaginääriyksikkö
K	Materiaalista riippuva vakio
k	Verkon maadoitustavasta riippuva termi
k_r	Sähköradan reduktiokerroin
k_s	Ukkosjohtimien reduktiokerroin
k_y	Ympäristön reduktiokerroin
L	Elektrodin pituus
l_j	Jänteen pituus
L_m	Keskinäisinduktanssi
n	Lukumäärä
p_f	Taajuuden painotuskerroin
R	Resistanssi
r	Säde
R_{A1}	Jalkineiden resistanssi
R_{A2}	Seisomakohdan maadoitusresistanssi
r_a	Maadoitusverkkoa pinta-alaltaan vastaavan ympyrän säde
r_e	Ekvivalenttisäde
r_i	Reduktiokerroin
R_m	Maadoitusresistanssi
r_m	Paluujohtimena toimivan maan resistanssi
R_{ml}	Pylvään luonnollinen resistanssi

$R_{m,j}$	Pylvään j maadoitusresistanssi
R_t	Maadoitusresistanssin tavoitearvo
r_u	Rinnankytkettyjen ukkosjohtimien resistanssi
s_j	Pylvään j maadoituksen keskipisteen etäisyys tarkastelupisteestä
t	Vikavirran kesto aika
U	Jännite
U_0	Häiriö- tai nollajännite
U_a	Jännite polariteetilla a
U_{as}	Askeljännite
U_b	Jännite polariteetilla b
U_D	Kuormittamaton kosketusjännite
U_e	Maadoitusjännite
U_E	Rasitusjännite
U_f	Jännite taajuudella f
U_k	Kosketusjännite
U_p	Psofometrinen jännite
U_s	Siirtyvä potentiaali
U_{tp}	Takaperoinen kosketusjännite
V	Potentiaali
V_p	Pisteen P potentiaali
V_{20}	Pylvään maapotentiaali 20 metrin etäisyydellä
V_{100}	Pylvään maapotentiaali 100 metrin etäisyydellä
x	Etäisyys
x_m	Ukkosjohtimien ja vaihejohtimien välinen keskinäisreaktanssi
x_u	Ukkosjohtimien ja maan välinen reaktanssi
$Z_{0,mv}$	Muun verkon nollaimpedanssi
Z_1	Myötäverkon impedanssi
Z_2	Vastaverkon impedanssi
$Z_{a,j}$	Vikaantuneelta pylväältä suuntaan a näkyvä ketjuimpedanssi
$Z_{b,j}$	Vikaantuneelta pylväältä suuntaan b näkyvä ketjuimpedanssi

Z_e	Maadoitusimpedanssi
$Z_{e,j}$	Pylvään j maadoitusimpedanssi
Z_f	Vikaimpedanssi
z_m	Keskinäisimpedanssi pituusyksikköä kohti
Z_N	Tähtipisteen impedanssi
z_s	Ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi
Z_{Tj}	Pylvään j resaltoiva maadoitusimpedanssi
z_u	Ukkosjohtimien ketjuimpedanssi pituusyksikköä kohti
Z_u	Ukkosjohtimien ketjuimpedanssi

Lyhenteet

EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
GIS	Gas Insulated Substation, kaasueristeinen sähköasema
ITU-T	International Telecommunication Union Standardization Sector, kansainvälisen tietoliikenneliiton standardisointisektori
smv	Sähkömotorinen voima, joka kuvaa indusoituneen jännitteen voimakkuutta
VHV	Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta

1 Johdanto

Turvallisuus ja toimitusvarmuus korostuvat tulevaisuuden sähköverkossa entistä vahvemmin. Lisäksi sähkön kysynnän kasvun ja uusiutuvan energian käyttöönoton myötä voimajohtoja ja sähköasemia rakennetaan ja saneerataan täyttämään tulevaisuuden sähköverkon tarpeet. Voimajohto- ja sähköasemaprojektit edellyttävät usein myös niiden aiheuttamien vaara- ja häiriöjännitteiden tarkastelua ja laskentaa. Vaara- ja häiriöjännitteitä tarkkaillaan lisäksi määräjain voimajohtojen ja sähköasemien koko elinkaarten ajan.

Sähköverkkojen tuottamat vaara- ja häiriöjännitteet muodostavat keskeisen ongelmakokonaisuuden jakelu- ja siirtoverkkotekniikassa (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 464). Vaara- ja häiriöjännitteitä käsitellään yleensä toistensa yhteydessä, sillä niitä aiheuttavat samat tekijät. Vaara- ja häiriöjännite eroavat toisistaan lähinnä syntyvän virran tai jännitteen suuruuden osalta. Vaarajännitteitä ovat sellaiset voimajohtojen aiheuttamat ylijännitteet, jotka voivat aiheuttaa laitevaurioita tai vaaraa ihmisille, kun taas häiriöjännitteet luokitellaan esimerkiksi sähkömagneettisiksi ilmiöiksi, jotka eivät ole jonkin laitteen hyötykäytössä tarpeellisia.

Vaara- ja häiriöjännitteet voivat kytkeytyä konduktiivisesti, kapasitiivisesti tai induktiivisesti. Konduktiivisessa kytkeytymisessä voimajohdon jännitteinen osa kytkeytyy suoraan tai välillisesti johtumalla toiseen rakenteeseen, kuten telekaapeliin. Maasulussa vaarajännite voi lisäksi siirtyä esimerkiksi telekaapeliin sen maadoitusten kautta. Kapasitiivisessa kytkeytymisessä jännitteet voivat kytkeytyä voimajohdon vierellä kulkevaan johtavaan rakenteeseen näiden välisen kapasitanssin kautta. Kapasitiivisia vaarajännitteitä voi syntyä käytännössä kuitenkin vain teleavojohtoon tai metallisuojuksettomaan ilmakeppeliin. Kapasitiivisten vaarajännitteiden vaikutusalue ulottuu usein vain muutaman kymmenen metrin päähän voimajohdosta.

Induktiivisesti kytkeytyvät vaarajännitteet ovat kolmesta kytkeytymistavasta selvästi yleisimpiä. Ampèren lain mukaan voimajohdossa kulkeva virta synnyttää ympärilleen

magneettikentän. Tämä muuttuva magneettivuo indusoi voimajohdon lähellä oleviin johtaviin rakenteisiin pitkittäisiä sähkömotorisia voimia sekä voimajohdon normaalikäytössä että vikatilanteissa. Suurimmat vaarajännitteet syntyvät voimajohdon yksivaiheisessa maasulussa.

Sähköverkon saneerauksien ja laajentamisten myötä tarve erilaisille vaara- ja häiriöjänniteselvityksille kasvaa vääjäämättä. Tässä diplomityössä tutkitaan 110 kV:n sähköverkon vaara- ja häiriöjännitteitä ja niihin liittyviä tekijöitä teorian, laskelmien ja erilaisten määristysten pohjalta. Työssä korostetaan erityisesti vaarajännitteiden laskentaa standardeihin ja määräyksiin sekä olemassa oleviin teorioihin nojautuen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on rakentaa teoriaan ja määräyksiin perustuva laskentatyökalu, joka yhdistää tärkeimmät 110 kV:n sähköverkon vaarajännitelaskelmat yhteen ohjelmaan. Koska vaara- ja häiriöjännitteet muodostavat hyvin laajan kokonaisuuden, on laskentatyökaluun sisällytetty vain tärkeimmät vaarajännitteet, joita esimerkiksi vaarajänniteselvityksissäkin tarkastellaan. Laskentatyökalu koostuu kolmesta osasta sisältäen sähköaseman maadoitusjännitteen, maapotentiaalien ja induktiovaarajännitteiden laskennan. Harvinaisuutensa vuoksi kapasitiiviset vaarajännitteet rajattu pois.

Tämän työn tutkimuskysymykset, joihin haetaan vastauksia, ovat:

- Miksi vaara- ja häiriöjännitteiden laskenta on tärkeää?
- Mitkä ovat sähköverkon turvallisuuden kannalta keskeisimpiä vaarajännitteitä?
- Voidaanko rakentaa laskentatyökalu, jolla voidaan tehostaa vaarajännitteisiin liittyvää selvitys- ja laskentatyötä?

Työ koostuu kirjallisuuteen ja alan julkaisuihin perustuvasta teoriaosuudesta ja empiirisestä osuudesta, jossa hyödynnetään teoriaosuudessa käsiteltyjä asioita laskentatyökalun rakentamiseksi. Luvussa 2 tarkastellaan yleisesti maadoittamista ja siihen liittyviä asioita sekä luodaan katsaus sähköasemien ja voimajohtojen maadoittamisen

erityispiirteisiin. Luvussa 3 perehdytään vaarajännitteiden kannalta oleelliseen yksivaiheiseen maasulkuun. Luvussa tutkitaan myös erityisesti ukkosjohtimien vaarajännitteitä pienentävää reduktiovaikutusta. Luvussa 4 paneudutaan syvemmin erilaisiin vaara- ja häiriöjännitteisiin sekä niihin liittyviin määräyksiin ja raja-arvoihin. Luvussa esitetään myös suuri osa laskentatyökaluun sisällytettävistä laskentayhtälöistä. Luvussa 5 tutkitaan erilaisia vaarajännitekohteita ja vaarajännitteiden niissä aiheuttamia vaikutuksia. Lopuksi luvuissa 6 ja 7 esitellään työssä rakennettu laskentatyökalu ja vedetään johtopäätökset.

2 110 kV:n sähköverkon maadoitukset

Oikein mitoitettut ja asennetut maadoitukset muodostavat erittäin tärkeän osan häiriötöntä ja turvallista sähkön siirtoa. Sähkön kysynnän kasvun ja uusiutuvan energian käyttöönoton myötä voimajohtoja rakennetaan ja saneerataan täyttämään tulevaisuuden sähköverkon tarpeet, jolloin myös maadoitusten merkitys kasvaa huomattavasti. Tässä luvussa esitellään maadoituksille asetettuja vaatimuksia ja käsitellään sähköasemien ja voimajohtojen maadoittamisen erityispiirteitä.

2.1 Maadoittamisen tarkoitus

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry:n (2018, s. 17–18) standardin SFS 6001 (Suurjänniteasennukset) mukaan maadoitus voidaan käsittää kokonaisuutena, johon kuuluvat kaikki maadoittamiseen liittyvät asiat ja toimenpiteet. Käytännössä maadoituksen tarkoituksena on yhdistää jokin laite tai virtapiirin osa maahan mahdollisimman tehokkaasti metallisen kappaleen eli maadoituselektrodin välityksellä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 427). Maadoituksen toimivuuden mittana käytetään yleensä maadoituselektrodin maadoitusresistanssia R_m .

Maadoitukset voidaan jakaa käyttö- ja suojamaadoituksiin (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 427). Käyttömaadoittamisessa jokin virtapiirin osa yhdistetään maahan suoraan tai pienen impedanssin välityksellä, jotta virtajohtimien jännite maata vasten ei pääse kasvamaan niin suureksi, että siitä aiheutuisi vaurioita tai vaaratilanteita. Käyttömaadoitusten toinen tehtävä on pitää maavirta ja jännite-epäsymmetria niin pieninä, että esimerkiksi televerkon johdoille aiheutuvat häiriöt ovat mahdollisimman vähäisiä. Suojamaadoituksen tarkoituksena taas on estää ihmisille vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen vikatilanteessa yhdistämällä virtapiiriin kuulumattomat jännitteelle alttiit osat maahan. Näille kosketusjännitteille on kansainvälisissä standardeissa ja kansallisissa määräyksissä annettu sallitut enimmäisarvot.

Standardin SFS 6001 mukaan sähköjärjestelmässä on maadoitettava kaikki jännitteelle alttiit osat (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 98). Muitakin johtavia osia suositellaan maadoitettaviksi valokaaren tai induktiivisen tai kapasitiivisen kytkennän takia. Määräyksissä rajoitetaan maadoitusjännitteitä myös eristysrakenteiden suojaamiseksi. Käyttötaajuudella toimivien maadoitusjärjestelmien rakenteen on täytettävä neljä vaatimusta:

- Riittävä mekaaninen lujuus ja korroosionkestävyys
- Suurimman vikavirran terminen kestävyys
- Omaisuuden ja laitteiden vaurioitumisen estäminen
- Henkilöturvallisuuden varmistaminen suurimman maasulkuvirran aikana maadoitusjärjestelmissä esiintyvien jännitteiden suhteen (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2014, s. 156)

Yleensä riittävä mekaaninen lujuus, korroosionkestävyys ja terminen kestävyys saavutetaan käyttämällä maadoituselektrodeja, joiden standardinmukaiset poikkipintojen vähimmäismitat on esitetty taulukossa 1. Myös muiden kuin taulukossa esitettyjen materiaalien käyttö on sallittua sillä edellytyksellä, että ne täyttävät yllä esitetyt vaatimukset.

Taulukko 1. Maadoitusjohtimien vähimmäispoikkipinta-alat eri materiaaleilla (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 88).

Materiaali	Vähimmäispoikkipinta-ala (mm ²)
Kupari	16
Alumiini	35
Teräs	50

Keskeisiä tekijöitä maadoitusjärjestelmän mitoituksessa ovat vikavirtojen arvot, vian kesto aika ja maaperän ominaisuudet (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 87). Mikäli asennuksessa on eri jännitetasoja, on kunkin suurjännitejärjestelmän täytettävä

edellä mainitut neljä vaatimusta. Samanaikaisia vikoja eri jännitetasoilla ei oteta huomioon.

Maadoitusjohtimien termiseen kestävyysvaikutteeseen vaikuttavat vikavirran suuruus ja vian kesto-aika. Vikavirran suuruus määräytyy järjestelmän tähtipisteen maadoitustavan mukaan, kun taas viankesto-aikaan vaikuttavat suojausliittymien toiminta-ajat. Alle 5 sekuntia kestäville vikavirroilla maadoitusjohtimien tai -elektrodien vähimmäispoikkipinta-ala A lasketaan yhtälöllä

$$A = \frac{l}{K} \sqrt{\frac{t}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (1)$$

missä l on johtimen virran tehollisarvo, t vikavirran kesto-aika, K materiaalista riippuva vakio, β virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa $0\text{ }^\circ\text{C}$, θ_i alkulämpötila ja θ_f loppulämpötila (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 109).

2.2 Maaperän resistiivisyys

Maadoitusjärjestelmän maadoitusresistanssi on suoraan verrannollinen maaperän resistiivisyyteen, minkä vuoksi maaperän resistiivisyyttä voidaankin pitää maadoitus suunnittelun perustana (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 432). Maaperän resistiivisyys ρ kertoo, mikä yksikköpinta-alaisen maakuution resistanssi on pituusyksikköä kohden. Maa-alueen resistanssi R voidaan laskea yhtälöstä

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (2)$$

missä A on maa-alueen pinta-ala ja l sen pituus. Maaperän resistiivisyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa maalaji, maalajin tiiveys, raekoko, maan kosteuspitoisuus ja

maan sisältämän veden suolojen kemiallinen koostumus (Seppänen, 2011, s. 5). Taulukossa 2 on esitetty erilaisten maalajien tyypillisiä resistiivisyysarvoja.

Taulukko 2. Erilaisten aineiden resistiivisyyksiä (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 147).

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

Maaperä voi koostua useista eri kerroksista ja on usein melko epähomogeenista. Esimerkiksi Suomessa maaperän resistiivisyys on keskimäärin noin 2300 Ωm , kun taas Keski-Euroopassa se voi olla vain 50 Ωm (Väljä, 2011, s. 4). Suomen maaperä on lähelle maan pintaa ulottuvasta graniittisesta kallioperästä johtuen hyvin huonosti johtavaa (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 432). Lisäksi kallioperän päällä oleva ohut pintakerros on usein huonosti sähköä johtavaa maa-ainesta.

2.3 Maadoitusresistanssi eri elektrodityypeillä

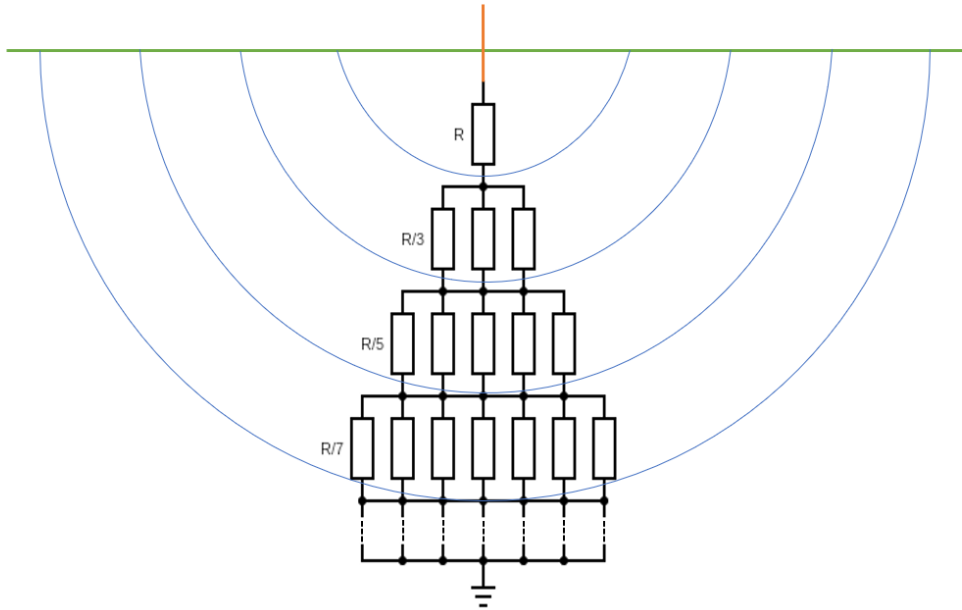
Maadoitusresistanssilla tarkoitetaan maadoitettavan rakenteen ja kaukaisen referenssiin välistä resistanssia, joka kuvaa maadoituksen hyvyyttä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 428). Maadoitusresistanssi on maadoitusimpedanssin reaali osa, vaikka usein pienemmissä maadoitusjärjestelmissä maadoitusresistanssista ja -impedanssista voidaan puhua samana asiana. Yleisesti sähköverkon osalta maadoitusimpedanssi liitetään

sähköasemiin ja maadoitusresistanssi pylväasmaadoituksiin. Maadoitusresistanssi R_m voidaan laskea yhtälöllä

$$R_m = \frac{U}{I}, \quad (3)$$

missä I on maadoituselektrodin kautta maahan johdettu virta ja U on maadoituselektrodin potentiaali. Yleensä maadoitus on sitä parempi, mitä pienempi sen maadoitusresistanssi on. Vaarajännitteiden välttämiseksi voimajohdoilla voidaan kuitenkin joutua asentamaan tarkoituksella huonot maadoitukset maadoitusresistanssin kasvattamiseksi, jotta voidaan rajoittaa maahan tunkeutuvaa virtaa ja potentiaalinnousua pylväällä.

Voidaan ajatella, että maadoituselektrodia ympäröivä maa koostuu keskenään yhtä paksuista kerroksista, joilla jokaisella on oma resistanssinsa (Reeve, 2008, s. 2). Näiden kerrosten muodostama kokonaisresistanssi on siten elektrodin maadoitusresistanssi. Kerroksen pinta-ala suurenee ja resistanssi pienenee mentäessä kauemmas elektrodista. Teoriassa voidaan siis edetä niin kauas elektrodista, että kerrokset eivät enää vaikuta olennaisesti kokonaisresistanssiin. Tätä elektrodin vaikutusalueen ulkopuolella olevaa maata kutsutaan neutraali- tai referenssimaaksi. Elektrodin vaikutusalueen laajuus on riippuvainen ympäröivän maaperän resistiivisyydestä ja maadoituselektrodin rakenteesta. Kuvassa 1 on havainnollistettu elektrodin kokonaisresistanssin jakautumista eri kerrosten sarjaan ja rinnan kytkettyihin vastuksiin. Todellisuudessa eri kerroksien resistiivisyydet ovat usein erisuuria, eikä niitä voida siten tarkasti mallintaa samansuuruisten resistanssien rinnankytkentänä.



Kuva 1. Maadoitusresistanssin muodostuminen yksinkertaistettuna (muokattu lähteestä Reeve, 2008, s. 3).

2.3.1 Puolipalloelektrodi

Puolipalloelektrodiksi kutsutaan puolipallon muotoista elektrodia, jonka tasainen osa on samassa tasossa maan pinnan kanssa. Puolipalloelektrodi on matemaattisesti helppo mallintaa ja ymmärtää, minkä vuoksi sitä käytetään usein hyväksi johdettaessa muiden elektrodimuotojen yhtälöitä. Puolipalloelektrodilla on vain vähän suoraa käytännön sovelluskohteita. Puolipalloelektrodin maadoitusresistanssille R_m voidaan helposti johtaa yhtälö

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi r}, \quad (4)$$

missä ρ on elektrodia ympäröivän maaperän resistiivisyys ja r on puolipalloelektrodin säde (Tan ja muut, 2020).

Erilaisille elektrodityypeille voidaan määrittää niin sanottu ekvivalenttisäde, jonka avulla eri elektrodityyppien maadoitusresistanssit voidaan laskea kuin ne olisivat

puolipalloelektrodeja. Ekvivalenttisäteen määrittäminen on sitä vaikeampaa, mitä monimutkaisempi elektrodin muoto on. Laskennan yksinkertaistamiseksi elektrodin ympäröivä maaperä oletetaan aina homogeeniseksi, vaikka todellisuudessa esimerkiksi Suomen olosuhteissa maaperä on usein hyvin epähomogeenista. Epähomogeenisessa maaperässä olevan elektrodin ekvivalenttisäteen laskenta on todella haastavaa, minkä vuoksi se edellyttää usein laskentaohjelmien käyttämistä (Juhlin ja muut, 2005, s. 16).

2.3.2 Vaakaelektrodi

Sähköasemien ja voimajohtojen lisämaadoituksissa yleisimmin käytetty elektrodityyppi on vaakaelektrodi, jolla tarkoitetaan maahan upotettua vaakasuoraa maadoitusjohdinta. Vaakaelektrodin maadoitusresistanssin laskemiseksi on johdettu erilaisia tapoja, joista tässä alaluvussa vertaillaan kolmea.

Juhlinin ja muiden (2005, s. 16) mukaan homogeeniseen maaperään upotetun vaakaelektrodin ekvivalenttisäde r_e voidaan laskea yhtälöllä

$$r_e = \frac{L}{\ln \frac{4L}{d}}, \quad (5)$$

missä L on vaakaelektrodin pituus ja d on vaakaelektrodin halkaisija. Sijoitettaessa yhtälö 5 puolipalloelektrodin maadoitusresistanssin yhtälöön 4 saadaan vaakaelektrodin maadoitusresistanssin yhtälöksi

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{2\pi \frac{L}{\ln \frac{4L}{d}}}. \quad (6)$$

Dwight (1936) on esittänyt vaakaelektrodin maadoitusresistanssin R_m arvioimiseksi myös sarjaa

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{h} - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{(2h)^2}{(2L)^2} + \frac{(2h)^4}{(2L)^4} + \dots \right), \quad (7)$$

missä h on vaakaelektrodin upotussyvyys. Maadoitusresistanssin laskeminen edellä mainitun sarjan avulla on melko työlästä. Riittävään tarkkuuteen päästään yksinkertaistummillakin yhtälöillä, minkä vuoksi yhtälöä 7 harvoin käytetään.

Standardissa SFS 6001 (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 148) on esitetty maadoitusresistanssin laskentakaavoja erilaisille elektrodityypeille. Standardin mukaan vaakaelektrodin maadoitusresistanssi R_m voidaan riittävällä tarkkuudella laskea yhtälöllä

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85hd}, \quad (8)$$

missä ρ on ympäröivän maaperän resistiivisyys, L elektrodin pituus, h elektrodin upotussyvyys ja d elektrodin halkaisija. Laskettaessa yhtälöllä 8 saadaan hieman suurempia maadoitusresistanssiarvoja kuin yhtälöillä 6 ja 7 (Luukkainen, 2020, s. 13–14). Maaperän epähomogeenisuudesta johtuen maadoitusresistanssin tarkka laskeminen on hankalaa, minkä vuoksi etenkin maadoitusten suunnitteluvaiheessa onkin syytä käyttää standardin määrittämää suurempia arvoja antavaa yhtälöä 8, jotta maadoitukset tulevat varmasti riittäviksi.

2.3.3 Pystyelektrodi

Pystyelektrodit upotetaan maahan pystysuunnassa. Teoriassa pystyelektrodit ovat vaakaelektrodeja parempia, sillä ne

- pienentävät ympäristön potentiaalia enemmän
- vaativat vähemmän materiaalia
- eivät olet alttiita katkeamiselle maankaivuutöissä
- ovat vaikeampia varastaa

- vaativat vähemmän työvoimaa (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 446).

Suomen kalliainen ja kivikkoisen maaperä asettaa kuitenkin usein esteitä pystyelektrodien käytölle voimajohtojen ja sähköasemien maadoittamisessa. Lisäksi Suomessa maadoituksiin joudutaan usein asentamaan niin suuria kuparimääriä, että pystyelektrodien käyttö ei ole kannattavaa. Pystyelektrodien kuntoa ei myöskään voida tarkastaa kaapelitutkan avulla yhtä helposti kuin vaakaelektrodien tapauksessa (Luukkainen, 2020, s. 16). Taajama-alueilla tai paikoissa, joissa vaakaelektrodien käyttö ei ole mahdollista, pystyelektrodi voi kuitenkin joskus olla ainoa vaihtoehto. Pystyelektrodilla pystytään pienentämään potentiaalinnousua todella tehokkaasti maaperässä, jossa huonosti johtavan pintakerroksen alla on hyvin johtavaa maata (Unde & Kushare, 2012).

Pystyelektrodin maadoitusresistanssi R_m voidaan laskea esimerkiksi yhtälöllä

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) - 1 \right], \quad (9)$$

missä ρ on ympäröivän maaperän resistiivisyys, L elektrodin pituus ja d elektrodin halkaisija (IEEE, 2012, s. 15). SFS 6001 -standardin (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 148) mukaan pystyelektrodin maadoitusresistanssi tulisi kuitenkin laskea yhtälöllä

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{1,36d} \right) \left(\frac{2h + L}{4h + L} \right) \right], \quad (10)$$

missä edellä mainittujen suureiden lisäksi h on pystyelektrodin upotussyvyys. Pystyelektrodin maadoitusresistanssi on selvästi pienempi, kuin vastaavalla pituudella vaakaelektrodilla saavutettava maadoitusresistanssi (Luukkainen, 2020, s. 15). Luukkaisen (2020, s. 16) laskujen mukaan esimerkiksi 30 metrin pituisella pystyelektrodilla saavutettava maadoitusresistanssi maaperässä, jonka resistiivisyys on $500 \Omega\text{m}$, on noin 15Ω , kun vastaavalla vaakaelektrodilla saavutettava maadoitusresistanssi on noin 31Ω .

Suomen maaperässä pystyelektrodin upottaminen esimerkiksi 30 metrin syvyyteen on kuitenkin usein liian haastavaa mahdolliseen hyötyyn nähden. Lisäksi todellisuudessa pystyelektrodilla saavutettava maadoitusresistanssi voi olla huomattavasti laskennallista arvoa suurempi syvällä maaperässä sijaitsevan kallion huonon johtavuuden vuoksi. Pystyelektrodeja käytetäänkin nykyään Suomessa todella vähän (Luukkainen, 2020, s. 16). Pystyelektrodeja voitaisiin hyödyntää kuitenkin hyvin johtavissa maaperissä, joille asennettaville pylväille tehdään yleensä paaluperustukset. Tällaisissa paikoissa maadoitusresistanssin tavoitearvo voitaisiin ehkä saavuttaa pelkillä perustuspaalujen mukana asennettavilla pystyelektrodeilla.

2.3.4 Muut elektrodityypit


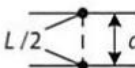






Vaaka- ja pystyelektrodit ovat selvästi käytetyimmät elektrodityypit sähköverkon maadoituksissa. Joissakin sovelluksissa voidaan joutua käyttämään kuitenkin erikoisempiakin elektrodiratkaisuja. Muun muassa sähköasemien maadoittamisessa käytetään käytännössä aina verkkomaista elektrodirakennetta. Niin sanotulla maadoitusruudukolla voidaan pienentää syntyviä kosketus- ja askeljännitteitä tasaamalla potentiaaleja (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 446). Taulukossa 3 on esitetty erityyppisten elektrodien maadoitusresistanssien laskukaavoja. Kuten edellä on todettu, maadoitusresistanssin tarkka laskenta on äärimmäisen haastavaa yksinkertaisimmissakin tapauksissa, minkä vuoksi taulukon 3 kaavat ovat yksinkertaistuksia ja sisältävät oletuksia. Yleisesti ne antavat todellisia arvoja suurempia tuloksia, minkä vuoksi niitä voidaan turvallisesti käyttää käytännön tarpeisiin, kuten maadoitussuunnitteluun.

Taulukko 3. Erityyppisten elektrodien maadoitusresistanssien laskentakaavoja (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 148).

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{\pi d}$	
Levy pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{\pi d}$	$s \ll d$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36d} \frac{2h + L}{4h + L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_m = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_m = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85hd}$	$d \ll 4h$
Verkko	$R_m = \frac{\rho}{2d} + \frac{\rho}{L}$	

Taulukossa 4 on esitetty erilaisilla elektrodeilla saavutettavia maadoitusresistansseja samanpituisen vaakaelektrodin maadoitusresistanssiin suhteutettuna. Arvoja laskettaessa vaakaelektrodien upotussyvyudeksi on oletettu 0,7 m ja maaperän on oletettu olevan homogeenista. Kuvan arvoja tulkitaan siten, että jos esimerkiksi yhdellä 20 metrin pituisella vaakaelektrodilla saavutetaan 100 Ω maadoitusresistanssi, kahdella rinnakkaisella 10 metrin pituisella toisistaan 20 metrin etäisyydellä olevilla vaakaelektrodeilla saavutetaan 92 Ω maadoitusresistanssi. Vaakaelektrodien asentaminen rinnakkain onkin ainut maadoitustapa, joka on yksittäistä vaakaelektrodia tehokkaampi. Edellytyksenä on kuitenkin, että vaakaelektrodien yhteenlaskettu pituus ei ole liian suuri, ja että elektrodit ovat riittävällä etäisyydellä toisistaan. Tästä syystä pylväsmaadoituksissa vaakaelektrodit asennetaan yleensä eri puolille pylvästä tai johtokadun vastakkaisille reunoille.

Taulukko 4. Erialaisten elektrodien maadoitusresistanssi suhteessa saman pituisen vaakaelektrodin maadoitusresistanssiin (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 435).

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

2.4 Ukkojohtimet

Standardin SFS-EN 50341-1 (Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä) (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2014, s. 32) mukaan ukkojohtimilla tarkoitetaan pylvällä maahan yhdistettyjä johtimia, jotka on yleensä sijoitettu vaihejohtimien yläpuolelle suojaamaan vaihejohtimia salamaniskuilta. Salamaniskuilta suojaamisen lisäksi ukkojohtimet pienentävät maasulkutilanteessa maan kautta palaavaa virtaa reduktiovaikutuksen myötä, jolloin myös maasulun aiheuttamat vaara- ja häiriöjännitteet pienenevät (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 32). Ukkojohtimet parantavat lisäksi rinnakkaisten pylväiden resultoivaa maadoitusimpedanssia kytkemällä eri pylväiden maadoitukset rinnakkain. Tällöin maasulkutilanteessa vikavirta jakaantuu useammalle pylvälle yhden pylvään sijaan. Ukkojohtimet mahdollistavat myös herkemmän maasulkusuojauksen suojaareilla.

Suomessa ukkojohtimia käytetään lähes kaikilla 110 kV:n johdoilla (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 32). Ukkojohtimia voidaan käyttää joko koko johdolla tai vain tietyllä vyöhykkeellä sähköaseman läheisyydessä, jolloin pyrkimyksenä on vain välttää sähköasemalle

tulevat jyrkät syöksyaallot. Suoran salamaniskun tai takaiskun aiheuttamat ylijännitteet vaimenevat nimittäin voimakkaasti jo 2–3 km matkalla koronan, virranahdon tai maapiirin vaikutuksen vuoksi. Ukkosjohtimien kannattavuutta puoltaa muun muassa Imatran Voima Oy:n 1980-luvulla tekemä tutkimus, jonka tuloksien mukaan ukkosjohtimettomien 110 kV:n johtojen ukkoshäiriömäärä on jopa 7-kertainen maadoitetuilla ukkosjohtimilla varustettujen johtojen ukkoshäiriömäärään verrattuna.

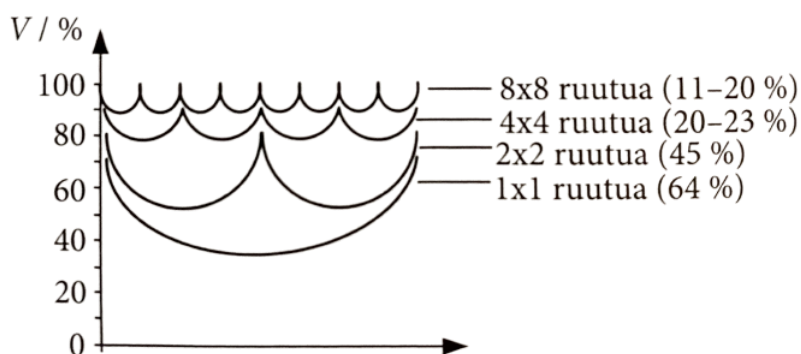
Kantaverkkoyhtiö Fingrid edellyttääkin yleensä, että sen verkkoon liitytään vain ukkosjohtimellisilla johdoilla (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 32–33). Ukkosjohtimet tuottavat kuitenkin toisinaan myös häiriöitä niihin kertyvän lumi- ja jääkuorman vuoksi, koska ukkosjohtimiin kuormitusvirran indusoima virta ei riitä sulattamaan niitä pois. Vaihejohtimiin jääkuormaa ei juurikaan synny kuormitusvirran virtalämpöhäviöiden takia. Siksi ukkosjohtimet voivat talvisin laskeutua vaihejohtimien alapuolelle jopa aiheuttaen mahdollisia maasulkuja. Tämän vuoksi esimerkiksi Lapin sammutetussa verkossa, jossa ukkosta ja sen aiheuttamia maasulkuja esiintyy todella vähän, voidaan harkita ukkosjohtimien jättämistä pois. Tällöin vaara- ja häiriöjännitteiden eliminoimiseksi voidaan käyttää esimerkiksi pylväältä toiselle kulkevaa niin sanottua läpimenevää maadoitusta.

2.5 Sähköasemien maadoitukset

Sähköasemien maadoittamisessa käytetään useimmiten verkkomaista maadoituselektrodia, johon esimerkiksi kojeiden maadoitusjohtimet yhdistetään (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 446). Tämän maadoitusruudukon tarkoituksena on tasata potentiaalia. Maadoituksen kokonaisuuden kannalta on myös äärimmäisen tärkeää, että sähköaseman maadoitusruudukko yhdistetään myös asemalta lähtevien johtojen ukkosjohtimiin. Huonosti johtavilla alueilla maadoittamisessa voidaan käyttää myös asemalta lähteviä vaakamaadoituselektrodeja, jotka vedetään ympäristöön hyvin johtaville alueille. Tavallista on yhdistää vaakamaadoituselektrodit lähimpien pylväiden maadoituksiin. Vaakamaadoituselektrodeja ei vedetä useita kilometrejä, sillä pitkillä elektrodeilla johtimien impedanssi kasvaa liian suureksi. Maadoitusruudukon ja siihen liitettyjen maadoituselektrodien avulla varmistetaan, että vikatapauksissa syntyvät askel- ja kosketusjännitteet eivät

kasva liian suuriksi. Kosketusjännitteiden kannalta erittäin tärkeä merkitys on etenkin aseman aidan ulkopuolella sijaitsevalla uloimmalla johdinelektrodilla, joka asennetaan noin metrin päähän aidasta.

Maadoitusruudukko määräytyy usein laitteiden vaatiman tilan ja laitemaadoitusten perusteella sen sijaan, että se mitoitettaisiin maadoitusjännitteen mukaan (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 450). Ruudukon silmukkakoolla on kuitenkin merkittävä vaikutus askel- ja kosketusjännitteisiin, kuten kuvassa 2 on esitetty. Niin sanottujen silmukkajännitteiden, eli silmukoiden keskipisteiden ja niiden sivuissa olevien elektrodien jännitteiden, vaihtelualueet on esitetty kuvassa prosentteina maasulkupotentiaalista. Kuvasta nähdään, että potentiaalierot pienenevät ruudukkoa tihentämällä. Homogeenisessa maape-rässä suurimmat potentiaalit syntyvät maadoitusruudukon nurkkiin ja alhaisimmat puolestaan ruudukon keskelle.



Kuva 2. Maadoitusruudukon potentiaalijakauman riippuvuus silmukkatihedystä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 450).

Maadoitusverkon maadoitusresistanssia R_m voidaan arvioida yhtälöllä

$$R_m = \rho \left(\frac{1}{4r_a} + \frac{1}{L} \right), \quad (11)$$

missä ρ on maaperän resistiivisyys, r_a maadoitusverkkoa pinta-alaltaan vastaavan ympyrän säde ja L maadoitusverkon elektrodin yhteenlaskettu pituus (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 451). Tätä maadoitusresistanssin arvoa voidaan käyttää sähköaseman suunnitteluvaiheessa, kun todellista maadoitusimpedanssia ei vielä voida mitata. Todellisuudessa sähköaseman maadoitusimpedanssi Z_e määräytyy maadoitusruudukon ja siihen liitettyjen elektrodien ja muiden johtimien resuloivana arvona (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 448). Maadoitusimpedanssin määrittäminen laskennallisesti on käytännössä usein mahdotonta, sillä sähköaseman ja sen lähipylväiden maadoitukset sijaitsevat toistensa potentiaalientissä. Maadoitusimpedanssin suuruus voidaan saada luotettavasti selville ainoastaan mittaamalla.

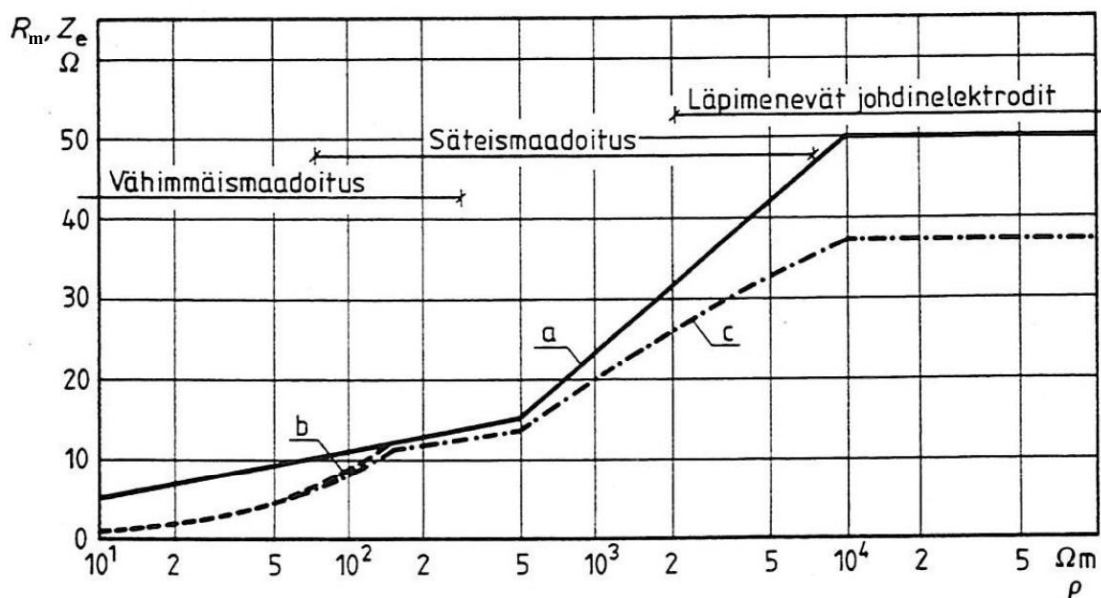
Sähköaseman maadoitusimpedanssin mittaamiseen käytetään käytännössä ainoastaan voltti-ampeerimittarimenetelmää (Ylinen ja muut, 2019, s. 152). Kuvassa 3 on esitetty mittauskytkentä menetelmästä. Menetelmässä maadoituksen läpi pyritään maasulkua simuloiden syöttämään mahdollisimman suuri, yleensä 10–50 A:n, mittausvirta riittävän kaukana sijaitsevan vasta-aseman maadoitusta ja asemien välistä johtoa hyödyntäen (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 456). Jännitteen mittauksessa käytetään mahdollisuuksien mukaan keskijännitekaapeleita, puhelinjohtoja tai maastoon levitettäviä kaapeleita. Tavoitteena on viedä jänniteapuelektrodi neutraalimaahan laajan maadoituksen vaikutusalueen ulkopuolelle. Usein tämä voi vaatia useamman kilometrin pituisen jännitejohdon. Mittauksesta saatavien tulosten perusteella voidaan laskea maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi Z_e yhtälöllä

$$Z_e = \frac{U_e}{rI_e}, \quad (12)$$

missä U_e on maadoituksen ja apuelektrodin välinen jännite, I_e on mittausvirta ja r on mahdollisten ukkosjohtimien reduktiokerroin.

maadoitusresistanssin tavoitearvoon R_t . Pylvään maadoitusresistanssin R_m suuruuteen vaikuttavat luonnollisen resistanssin lisäksi kaikki mahdolliset lisämaadoitukset.

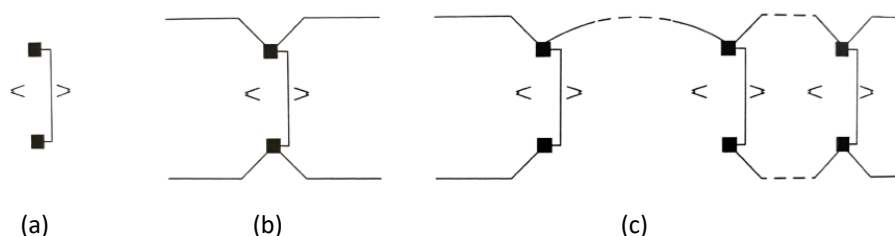
Kuvassa 4 käyrä a) esittää Imatran Voima Oy:n 110–400 kV:n johdoille määrittämiä pylväiden maadoitusresistanssin tavoitearvoja (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 445). Pylvään maadoitusresistanssin tavoitearvo määräytyy pylväällä mitatun maaperän resistiivisyyden mukaan. Hyvin johtavassa maassa pyritään yleensä pienempään maadoitusresistanssiin kuin huonosti johtavassa maassa. Lisäksi tärkeille pylväille tehdään paremmat maadoitukset kuin toisarvoisille pylväille. Esimerkiksi 10:lle sähköasemaa lähimpinä olevalle pylväälle käytetään suunnittelussa tavoitearvona 50 % kuvan 4 esittämältä käyrältä saatavasta arvosta, jotta vältytään takaiskuilta. Samasta syystä yleisenä käytäntönä on myös käyttää 75 % tavoitearvoa pylväille, joiden maadoitukset yhdistetään rinnakkaisen pylvään maadoituksiin.



Kuva 4. Pylväsmaadoitusten mitoittaminen Suomessa: a) tavoitearvot, b) perusmaadoituksella saatava keskimääräinen arvo ja c) resultoiva aaltovastus ukkosjohtimet mukaan luettuna (Elovaara & Laiho, 1988, s. 421).

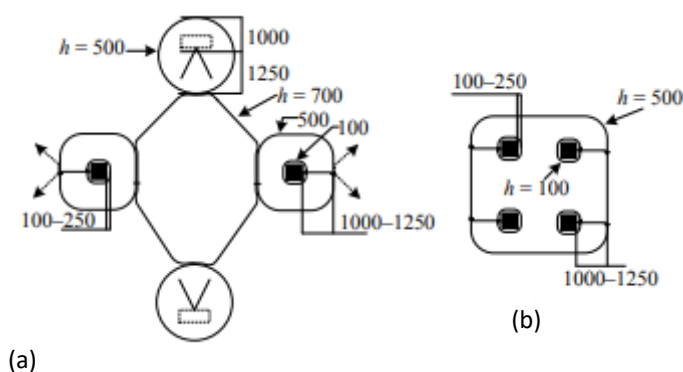
Käytännön syistä lisämaadoitukset ovat yleensä maahan upotettuja säteittäisiä vaakamaadoituselektrodeja (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 435). Huonosti johtavassa

maaperässä voidaan käyttää myös pylväältä toiselle läpimeneviä maadoituselektrodeja tai jopa niin sanottuja ylipitkiä maadoituselektrodeja, jotka vedetään alueelle, jossa maaperä on paremmin johtavaa. Läpimeneviä ja ylipitkiä maadoituksia pyritään kuitenkin välttämään, koska ne ovat huomattavasti alttiimpia rikkoutumisille kuin lyhyet elektrodit. Lisäksi salamasuojausominaisuuksien vuoksi pylväsmaadoituksissa pyritään välttämään yli 40 metrin pituisia lisäsäteitä, ja rinnakkaiset säteet sijoitetaan vähintään 20 metrin etäisyydelle toisistaan (Luukkainen, 2020, s. 24). Pitkät rinnakkaiset säteet yhdistetään tavallisesti päistään paremman maadoitusresistanssin ja luotettavuuden saavuttamiseksi. Kuvassa 5 on esitetty Suomessa yleisesti käytettäviä pylväsmaadoituksen rakenteita.



Kuva 5. Pylväsmaadoituselektrodeja: perusmaadoitus (a), säteismaadoitus (b), läpimenevä johdinelektrodi (c) (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 436).

Potentiaalinhjauselektrodeja käytetään kosketus- ja askeljännitteiden rajoittamiseksi pylvään läheisyydessä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 435). Yleensä potentiaalinhjauselektrodeja asennetaan vain pylväille, joiden pylväspotentiaali on suuri ja joita ihmiset voivat todennäköisesti koskea. Tällaisia pylväspaikkoja ovat esimerkiksi talojen ja rakennusten piha-alueet tai yleiset oleskelupaikat, kuten urheilukentät. Potentiaalinhjauselektrodit koostuvat sisemmistä ja uloimmista potentiaalintasausrenkaista sekä yhdys- ja liittymisjohtimista, kuten kuvassa 6 on esitetty. Potentiaalinhjauselektrodit pienentävät ensisijaisesti pylväällä esiintyviä kosketusjännitteitä, mutta ne osaltaan myös parantavat pylvään maadoitusresistanssia jonkin verran.



Kuva 6. Potentiaalinojauselektrodi harustetulla pylväällä (a) ja vapaasti seisovalla pylväällä (b) (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 436).

Pylväiden maadoitusresistanssimittaukset ovat tärkeässä roolissa voimajohdon vaara- ja häiriöjännitteiden määrittämisessä. Voimajohdoilla suoritetaan maadoitusmittaukset yleensä noin 12 vuoden välein, jolloin tapana on myös päivittää voimajohdon vaarajänniteselvitykset tehtyjen mittauksien perusteella ainakin maapotentiaaliraportin osalta. Pylväsmaadoitusten mittaamiseen on olemassa monia erilaisia menetelmiä, joista jokaiselle on omat käyttökohteensa. Käytännössä Suomessa käytetyimpiä menetelmiä ovat perinteinen käännepistemenetelmä, erilaiset sarjamittausmenetelmät ja suurtaajuusmenetelmä. Suurtaajuusmenetelmä on näistä ainut menetelmä, jota voidaan luotettavasti käyttää galvaanisessa yhteydessä maahan oleviin pylväisiin. Uutena menetelmänä on kehitetty myös niin sanottu selektiivinen mittausmenetelmä, jota voitaisiin hyödyntää kaikenlaisten pylväiden maadoitusresistanssimittauksissa. Selektiivisen menetelmän luotettavuudesta ei kuitenkaan vielä ole kovinkaan paljoa julkista tutkimustietoa, minkä vuoksi se ei vielä lukeudu esimerkiksi Fingridin hyväksymien mittausmenetelmien joukkoon.

3 Maasulku 110 kV:n sähköverkossa

Maasulkuksi kutsutaan vian aiheuttamaa johtavaa yhteyttä vaihejohtimen ja maan tai maadoitetun osan välillä (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 21). Johtava yhteys voi syntyä esimerkiksi johtavien rakenteiden, valokaaren tai vikaantuneen eristyksen kautta. Kahden tai useamman vaihejohtimen maasulkuja saman järjestelmän eri kohdissa kutsutaan kaksois- tai moninkertaisiksi maasuluiksi. Yksivaiheinen maasulku on yleisin vikatilanne 110 kV:n sähköverkossa, mistä johtuen voimajohdot ja sähköasemat suunnitellaan siten, että ne täyttävät standardien asettamat vaatimukset vaara- ja häiriöjännitteiden osalta erityisesti yksivaiheisessa maasulkutilanteessa (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1991a, s. 4). Muiden maasulkutilanteiden katsotaan olevan niin harvinaisia, ettei niitä oteta huomioon vaarajännitetarkasteluissa. Tässä luvussa perehdytään erityisesti vaarajännitteiden kannalta oleelliseen yksivaiheiseen maasulkuun. Luvussa tarkastellaan lisäksi erilaisten rakenteiden reduktiovaikutuksia maasulkutilanteissa.

3.1 Voimajohdon maasulku

Tavallisimpia vikoja voimajohdoilla ovat oiko- ja maasulut, mutta toisinaan voi myös esiintyä katkoksia (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 166). Oikosulut ovat vaiheiden välisiä vikoja ilman maakosketusta, kun taas maasuluissa vikavirtapiiri on aina yhteydessä maahan. Viat voivat aiheutua esimerkiksi salamaniskusta johtuvista ylijännitteistä, laitteiden toimintahäiriöistä tai jonkin verkon komponentin eristyskyvyn alenemisesta. Käytännössä voimajohtojen vikatiheydet ovat suhteellisen pieniä suurien vaiheväliden ja laajojen johtokaturien ansiosta (Luukkainen, 2011, s. 5). Johtokadut suunnitellaan ja tehdään siten, että esimerkiksi puut eivät voi missään tilanteessa kaatuessaan osua vaihejohtimiin.

Vikatapaukset voidaan jakaa symmetrisiin ja epäsymmetrisiin vikoihin (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 166). Symmetrisessä vikatapauksessa vian pääasialliset vaikutukset kohdistuvat samanlaisina kaikkiin vaiheisiin, kun taas epäsymmetriset vikat näyttävät eri lailla eri vaiheissa (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 167). Epäsymmetrisiä poikittaisvikoja ovat muun muassa yksi- tai kaksivaiheiset maasulut, jotka syntyvät voimajohdoilla

tavallisimmin salamaniskujen yhteydessä. Poikkaisvioissa vaiheen ja maan välisessä impedanssissa on viasta johtuva epäsymmetria, kun taas niin sanotut pitkittäisviat ovat erilaisia katkoksia, jotka johtuvat esimerkiksi jonkun vaiheen sulakkeen palamisesta (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 185). Epäsymmetrisen vian aikana eri vaiheiden jännitteet ja virrat eivät ole symmetrisiä, minkä vuoksi niiden laskennassa ei voida käyttää tavallista yksivaiheista sijaiskytkentää. Sen sijaan epäsymmetrisiä vikoja analysoidaan niin sanotuilla symmetrisillä komponenteilla, joita ovat nolla-, myötä- ja vastajärjestelmä. Symmetrisiä komponentteja käsitellään lisää alaluvussa 3.2.

Maasulut ovat selvästi oikosulkuja yleisempiä vikatyyppejä 110 kV:n avojohdoilla (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 168). Yksivaiheinen maasulku syntyy tyypillisesti ukkosen aiheuttamasta valokaaresta vaihejohtimen ja pylvään välillä tai takaiskuna toisinpäin (Väljä, 2011, s. 6). Ukkonen aiheuttaa ylilyönnin yleensä siihen vaiheeseen, jolla on salaman iskuhetkellä polariteetiltaan vastakkainen ja korkein jännite. Maasulussa syntyvän maasulkuvirran suuruus riippuu oleellisesti verkon maadoitustavasta. Tehollisesti maadoitettussa verkossa maasulkuvirta voi lähellä generaattoria olla jopa kolmivaiheista oikosulkuvirtaa suurempi, kun taas sammutetussa verkossa maasulku sammuu normaalisti itsestään tähtipisteen ja maan väliin asennetun sammutuskuristimen avulla (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 210). Maasta erotetussa verkossa voi maasulunaikainen terveiden vaiheiden jännitteenousu puolestaan aiheuttaa muualla verkossa toisen maasulun esimerkiksi ylijännitesuojan kautta (ITU-T, 2008a). Tällöin vikapaikkojen välillä alkaa kiertämään huomattava maavirta, joka voi indusoida vaarajännitteitä esimerkiksi televerkkoon.

Vikavirtojen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä on monia. Yleisesti ottaen vikavirrat ovat sitä pienempiä, mitä kauempana syöttävältä asemalta vika tapahtuu. Vikavirtojen suuruuteen vaikuttavat olennaisesti myös verkon jännite ja oikosulkuteho. Lisäksi, kuten edellä todettiin, verkon maadoitustapa voi vaikuttaa merkittävästi etenkin maasulkuvirtojen suuruuteen. Sähkön kysynnän ja uusiutuvan energian käyttöönoton kasvusta johtuvan siirtoverkkojen laajenemisen myötä maasulkuvirrat tulevat kasvamaan tulevaisuudessa. Vaarajännitetarkasteluissa otetaankin yleensä huomioon myös 10 vuoden päähän

tehty ennuste maasulkuvirran noususta. Tätä ennustetta hyödynnetään esimerkiksi sähköasemien maadoitusjännitetarkasteluissa.

3.2 Maasulkuvirta yksivaiheisessa maasulussa

Yksivaiheinen maasulku on yleisin vika 110 kV:n siirtoverkossa (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 168). Se on epäsymmetrinen vika, joten sen laskennassa joudutaan hyödyntämään symmetrisiä komponentteja, joita ovat nolla-, myötä- ja vastajärjestelmä. Epäsymmetrisissä vioissa symmetrisistä komponenteista muodostuvat komponenttiverkot kytkeytyvät toisiinsa eri tavalla vikatapauksesta riippuen. Yksivaiheisessa maasulussa verkot kytkeytyvät sarjaan, minkä vuoksi jokaisessa komponenttiverkossa kulkee sama virta eli eri virtojen osoitinsuureet ovat yhtä suuret. Maasulun synnyttämä vikavirta I_F voidaan siten laskea osoittimien summana

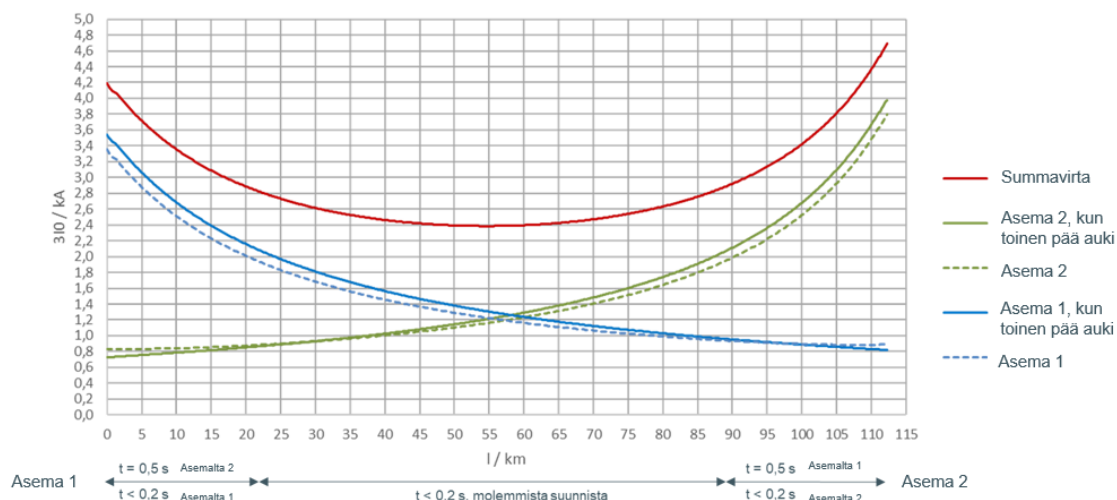
$$\underline{I}_F = \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 3\underline{I}_0, \quad (13)$$

missä I_0 , I_1 ja I_2 tarkoittavat nolla-, myötä- ja vastaverkon virtoja (Elovaara & Haarla, 2011b, s. 186–187). Yksivaiheista maasulkuvirtaa kuvataan tavallisesti $3I_0$ -merkinnällä. Toisaalta yksivaiheiselle maasulkuvirralla voidaan johtaa myös komponenttiverkkojen impedansseista riippuva yhtälö

$$3\underline{I}_0 = \frac{\underline{E}_R}{\underline{Z}_{0,mv} + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 3(\underline{Z}_N + \underline{Z}_f)}, \quad (14)$$

missä E_R on vikaantuneen vaiheen vaihejännite, $Z_{0,mv}$ muun verkon nollaimpedanssi, Z_1 myötäverkon impedanssi, Z_2 vastaverkon impedanssi, Z_N tähtipisteen impedanssi ja Z_f viikaimpedanssi.

Kuvassa 7 on esitetty erään 110 kV:n johdon epäsymmetriapiirros, johon on merkitty johdon molemmista suunnista syötetyt maasulkuvirrat. Vaaka-akselilla on esitetty voimajohdon pituus kilometreinä ja pystyakselilla maasulkuvirran suuruus kiloampeereina.



Kuva 7. Erään 110 kV:n johdon epäsymmetriapiirros.

Kuvaan on piirretty maasulkuvirrat myös tilanteissa, joissa johdon toinen pää on auki. Tällaisessa tilanteessa syöttävän pään maasulkuvirta kasvaa. Kuvassa oleva korkein käyrä kuvaa molemmista suunnista yhteenlaskettua summavirtaa, jota käytetään erityisesti maapotentialien ja kosketusjännitteiden tarkasteluissa. Induktiovaarajännitetarkasteluissa käytetään vain yhdestä suunnasta syötettyä maasulkuvirtaa. Kahdesta suunnasta syötetyn johdon tapauksessa näistä virroista valitaan suurempi. Kuvaan on merkitty myös molempien syöttösuuntien laukaisuajat, jotka vaikuttavat esimerkiksi sallittujen vaara- ja häiriöjännitteiden suuruuteen.

Suoraan tai osittain maadoitettujen 110–400 kV:n johtojen maasulkuvirrat ovat melko suuria ja ne vaihtelevat muun muassa vikakohdan mukaan tavallisesti välillä 0,5–10 kA (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 471–472). Siirtoverkon laukaisuajat ovat toisaalta yleensä hyvin lyhyitä eli 0,05–0,5 s. Standardeissa määrätyt sähköverkon vaarajännitteiden rajarvot ovat sitä suurempia, mitä pienempiä laukaisuajat ovat. Suomessa maavirrat leviävät maan huonon johtavuuden vuoksi todella laajalle alueelle. Suomessa 50 Hz:n maavirran ekvivalenttisyvyys on noin 4,5 km, jolloin näin laaja virtasilmukka aiheuttaa kauas ulottuvan magneettikentän. Maavirran vaikutus voi ulottua käytännössä jopa 10–15 km:iin saakka. Maavirran induktiovaikutuksia käsitellään enemmän alaluvussa 4.4.

3.3 Reduktiovaikutus

Reduktiovaikutuksella tarkoitetaan yleisesti ukkosjohtimien ominaisuutta ottaa osa maasulkuvirrasta itselleen, jolloin pylväs- tai asemamaadoitusten kautta palaava virta ja siitä aiheutuvat vaara- ja häiriöjännitteet pienenevät (Elovaara & Laiho, 1988, s. 193). Reduktion vaikutuksesta virta voi siirtyä ukkosjohtimiin indusoitumalla tai johtumalla. Reduktion vaikutusta kuvataan reduktiokertoimella k , joka liitetään usein nimenomaan vain ukkosjohtimien reduktiovaikutukseen, vaikka todellisuudessa reduktiovaikutusta esiintyy monissa muissakin johtavissa rakenteissa. Etenkin induktiovaarajännitteiden kannalta olennaisia reduktiotekijöitä ovat ukkosjohtimien lisäksi muun muassa suurjännitekaapelit, erilliset reduktiojohtimet, taajamien metalliset verkostot, rautatiekiskot ja telekaapelit.

3.3.1 Ukkosjohtimien reduktiovaikutus

Vaara- ja häiriöjännitteiden kannalta ukkosjohtimien tärkein ominaisuus on niiden reduktiovaikutus. Ukkosjohtimien reduktiovaikutuksen suuruuteen vaikuttaa olennaisesti ukkosjohtimien johdinlaji. Ukkosjohtimiin muodostuu niin sanottua induktiovirtaa niin maasulkutilanteessa kuin normaalissa käyttötilanteessakin (Pesonen, 1989, s. 43). Induktiovirrat voidaan jakaa siten hyödyllisiin ja haitallisiin virtoihin. Haitalliset virrat ovat voimajohdon normaalikäytössä ukkosjohtimiin indusoituvia virtoja, jotka aiheuttavat lähinnä häviöitä ja häiriöitä. Hyödyllisiksi virroiksi katsotaan sen sijaan vikatilanteen induktiovirrat, jotka pienentävät vikatilanteesta aiheutuvia vaara- ja häiriöjännitteitä.

Ukkosjohtimien ollessa maasulkutilanteessa pieniresistanssisessa kontaktissa vaihejohtimeen ja syöttömuuntajan tähtipisteeseen, kulkee vaihejohtimissa maasulkuvirta, jonka induktioilmiön vuoksi ukkosjohtimiin aiheuttama virta I_{si} lasketaan yhtälöllä

$$I_{si} = \mu 3I_0, \quad (15)$$

missä μ on ukkos- ja vaihejohtimien välinen kytkentäkerroin, joka voidaan laskea yhtälöllä

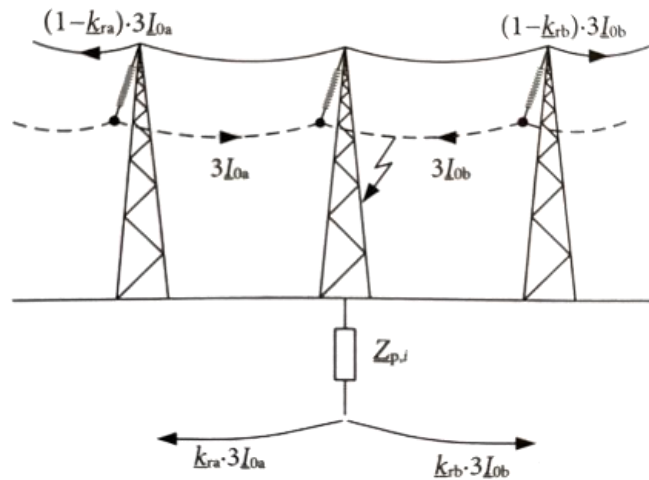
$$\mu = \frac{z_m}{z_s}, \quad (16)$$

missä z_m on ukkosjohdinten nipun ja virtajohtimien nipun välinen keskinäisimpedanssi ja z_s ukkosjohtimien maapaluuimpedanssi – molemmat pituusyksikköä kohti ilmaistuna (Pesonen, 1989, s. 43). Ukkosjohtimiin syntynyt virta I_{si} ei siis aiheuta potentiaalın nousua vikapylväällä. Vaarajännitteitä aiheuttaa maan kautta palaava virta, joka saadaan yhtälöstä

$$I_e = 3I_0 - I_{si} = (1 - \mu)3I_0 = k_s 3I_0, \quad (17)$$

missä k_s on ukkosjohtimien reduktiokerroin.

Maasulkuvirran jakautumista ukkosjohtimellisella johdolla on havainnollistettu kuvassa 8, jossa kirjaimilla a ja b kuvataan vikapylvästä katsottuna eri suuntia. Ukkosjohtimissa kulkeva virta on ensimmäisillä jänneväleillä suurempi kuin kauempana vikapaikasta kulkeva virta. Tämä johtuu siitä, että ukkosjohtimissa kulkeva virta koostuu sekä vikavirran induktioilmiön vuoksi aiheuttamasta induktiivisesta virtakomponentista että vikapylväältä ukkosjohtimiin johtuvasta vikavirran osasta (Tleis, 2008, s. 564). Johtumalla siirtyvä virran osa kulkeutuu maahan lähipylväiden maadoitusten ja ukkosjohdinten muodostaman impedanssiketjun välityksellä. Tietyn etäisyyden jälkeen ukkosjohtimissa kulkee vain vikavirran sinne induktioilmiön myötä synnyttämä virta, koska suurin osa johtuvasta vikavirrasta on siirtynyt kulkemaan maata pitkin. Tällöin vikavirta on jakautunut ukkosjohtimien ja maan välille reduktiokertoimen mukaisesti.



Kuva 8. Maasulkuvirran jakautuminen ukkosjohtimellisellä johdolla (Elovaara & Haarla, 2011, s. 443).

Ukkosjohtimien tai muiden reduktiojohtimien reduktiokerroin voidaan laskea yhtälöllä

$$\underline{k}_s = \frac{r_u + j(x_u - x_m)}{r_u + r_m + jx_u}, \quad (18)$$

missä r_u on rinnankytkettyjen ukkosjohtimien resistanssi, r_m paluujohtimena toimivan maan resistanssi, x_u ukkosjohtimien ja maan välinen reaktanssi ja x_m ukkosjohtimien ja vaihejohtimien välinen keskinäisreaktanssi (Pesonen, 1968, s. 7). Kyseiset arvot ilmoitetaan pituusyksikköä kohden. Suomessa paluujohtimena toimivan maan resistanssi on noin 50 mΩ/km. Yhtälössä 18 esiintyvät suureet voidaan edelleen laskea yhtälöillä

$$r_m = \frac{\omega\mu_0}{8}, \quad (19)$$

$$r_u = \frac{\rho_u}{nA}, \quad (20)$$

$$x_m = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{H}{b}, \quad (21)$$

$$x_u = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{H}{r_e} + \frac{\mu_r}{4n} \right), \quad (22)$$

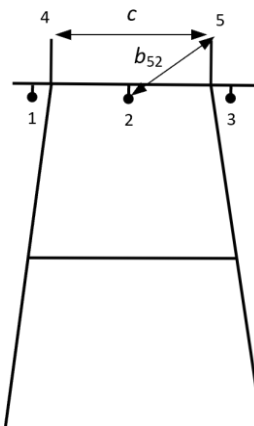
missä ω on kulmataajuus, n on ukkosjohdinten lukumäärä, A ukkosjohdinten poikkipinta-ala, H maavirran ekvivalenttinen tunkeutumissyvyys r_e ukkosjohdinten ekvivalenttisäde, ρ_u ominaisvastus, μ_r suhteellinen permeabiliteetti ja μ_0 tyhjiön permeabiliteetti (Pesonen, 1968, s. 7). Yhtälössä 21 b on ukkosjohtimien geometrinen keskietäisyys vaihejohtimista ja se voidaan laskea yhtälöllä

$$b = \sqrt[3n]{b_{41} \cdot b_{42} \cdot b_{43} \cdot b_{51} \cdot b_{52} \cdot b_{53}}. \quad (23)$$

Ukkosjohtimien ekvivalenttisäde r_e voidaan laskea yhtälöllä

$$r_e = \sqrt{\frac{n}{2} d c^{n-1}}, \quad (24)$$

missä d on ukkosjohtimen halkaisija (Pesonen, 1968, s. 7). Yhtälöissä 23 ja 24 tarvittavat etäisyydet on esitetty kuvassa 9. Jos ukkosjohtimia on useampi kuin kaksi, täytyy yhtälössä 24 esiintyvän c :n tilalla käyttää ukkosjohtimien geometristä keskietäisyyttä toisistaan.



Kuva 9. Yhtälöissä 23–24 tarvittavat etäisyydet.

Ukkosjohtimien reduktiokertoimen suuruus on siis hyvin riippuvainen ukkosjohtimien johtavuudesta, johon taas voidaan vaikuttaa materiaalilla, poikkipinta-alalla ja

lukumäärällä. Toisaalta reduktiokerroin riippuu myös maaperän resistiivisyydestä ja indusoivan virran taajuudesta. Yleensä eri reduktiokertoimen arvot ilmoitetaankin taulukoissa eri taajuuksille ja maan resistiivisyysarvoille. Myös vaihe- ja ukkosjohtimien välinen geometria vaikuttaa reduktiokertoimen suuruuteen – pienen reduktiokertoimen saavuttamiseksi ukkosjohtimien tulisi olla mahdollisimman lähellä vaihejohtimia. Pylväiden rakenteelliset ominaisuudet ja vaadittavat jännitevälit vaikuttavat kuitenkin olennaisesti siihen, kuinka lähelle vaihejohtimia ukkosjohtimet voidaan asentaa. Reduktiokertoimet vaihtelevat siten eri pylväsmalleilla myös jännitetasosta riippuen. Taulukossa 5 on esitetty eri 110 kV:n ukkosjohtimien reduktiokertoimia erilaisilla pylväsrakenteilla maaperän resistiivisyyden ollessa $2300 \Omega\text{m}$, joka on maaperän resistiivisyyden keskiarvo Suomessa.

Taulukko 5. Eri ukkosjohtimien reduktiokertoimia (muokattu lähteestä Pesonen, 1989, s. 41).

Pylväslaji	Ukkosjohtimet		Reduktiokerroin k
	Lukumäärä	Nimitys	
1 tannenbaum	1	Imatra	0,59
1 tannenbaum	2	35 St	0,95
1 portaali	2	35 St	0,95
1 portaali	2	50 St	0,91
1 portaali	2	70 St	0,87
1 tannenbaum	2	Savo	0,56
1 portaali	2	Savo	0,53
1 donau	2	Imatra	0,44
1 tannenbaum	2	Imatra	0,44
1 portaali	2	Imatra	0,39
1 portaali	2	Suursavo	0,38
1 portaali	2	Piper	0,35
1 portaali	2	Hawk	0,33
1 tannenbaum	3	Savo	0,44
1 tannenbaum	3	Imatra	0,31
2 tannenbaumia	4	35 St	0,9
2 portaalia	4	35 St	0,9
2 portaalia	4	50 St	0,82
2 tannenbaumia	4	Savo	0,4
2 portaalia	4	Savo	0,37
2 tannenbaumia	4	Imatra	0,3
2 portaalia	4	Imatra	0,25
2 tannenbaumia	6	Imatra	0,2

Kuten taulukosta 5 nähdään, voidaan reduktiokerrointa pienentää myös ukkosjohtimien lukumäärää lisäämällä. Esimerkiksi vaihejohtimien alapuolelle sijoitettavalla reduktiojohtimella voidaan pienentää ukkosjohtimien reduktiokerrointa noin 20 % (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 442). Toisaalta reduktiokerroin heikkenee kaiken ylimääräisen ukkosjohtimien kanssa sarjaan kytketyn resistanssin vaikutuksesta. Reduktiokerroin heikkenee esimerkiksi silloin, jos ukkosjohtimia ei ole liitetty pylvääseen sähköisesti luotettavalla tavalla.

3.3.2 Suurjännitekaapelin reduktiovaikutus

Suurjännitekaapeleissa reduktiovaikutus syntyy johtavan vaipan ansiosta (Tleis, 2008, s. 571). Myös suurjännitekaapelin vaippaan indusoituu sekä hyödyllisiä että haitallisia virtoja, vaikkakin haitallisia virtoja voidaan helposti eliminoida kaapelirakenteella. Haitalliset virrat syntyvät induktioilmion vaikutuksesta vaippaan normaalista käyttövirrasta pääosin vain yksivaiheisissa kaapeleissa. Kolmivaiheisissa kaapeleissa haitalliset virrat syntyvät epäsymmetrisistä virroista. Maasulkutilanteessa reduktiovaikutuksen ansiosta osa maasulkuvirrasta kulkee kaapelin vaipan ja maan välillä, mikäli kaapelin vaippa on molemmista päistään maadoitettu. Kaapelin reduktiokerroin on riippuvainen kaapelirakenteesta, maadoitustavasta, vaipan materiaalista, vaipan maadoitusresistanssista ja maan resistiivisyydestä.

Reduktiokertoimet ovat yleensä todella pieniä niin suurjännitekaapeleilla kuin keskijännitekaapeleillakin. Siispä kaapeleilla suurin osa maasulkuvirrasta kulkee kaapelin vaipan kautta. Etenkin sähköasemien maadoitusjännitetarkasteluissa suur- ja keskijännitekaapelien reduktiovaikutukset tulee ottaa usein huomioon. Erityisesti keskijänniteverkon kaapelointi parantaa sähköasemien maadoituksia ja vaikuttaa täten alentavasti sähköasemien maadoitusjännitteisiin. Taulukossa 6 on esitetty erilaisten kaapelien reduktiokertoimia (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 107–108).

Taulukko 6. Erilaisten kaapeleiden reduktiokertoimia (muokattu lähteestä Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 107–108).

Kaapeli	Reduktio-kerroin
<i>Paperieristeiset 10–20 kV</i> Cu 95 mm ² /1,2 mm lyijyvaippa Al 95mm ² /1,2 mm alumiinivaippa	0,20–0,60 0,20–0,30
<i>Yksijohtimiset 10–20 kV</i> Cu 95mm ² /16 mm ² kuparisuojalla	0,50–0,60
<i>Yksijohtimiset 110 kV öljykaapelit</i> Cu 300 mm ² /2,2 mm alumiinivaippa	0,37
<i>Teräspankissa oleva 110 kV painekaasukaapeli</i> Cu 300 mm ² /1,7 mm teräs	0,01–0,03
<i>Yksijohtimiset 110 kV PEX-kaapelit</i> Cu 300 mm ² /35 mm ² kuparisella suojavaipalla	0,32

3.3.3 Muut reduktioteijät

Reduktiota aiheuttavia tekijöitä voivat olla monenlaiset johtavat rakenteet, jotka ovat yhteydessä maahan. Induktiovaarajännitteiden kannalta huomattavimpia muita reduktioteijöitä ovat esimerkiksi sijainti taajamassa, rautatiekiskot, reduktiojohtimet ja telekaapelit. Taajamissa on hyvin paljon maahan yhteydessä olevia johtavia rakenteita, kuten vesi- ja viemäriputkia, sähköjohtoja sekä rakennuksia. Induktiovaarajännitetarkasteluissa näiden johtavien rakenteiden reduktiovaikutus esimerkiksi samalla alueella kulkevaan telejohtoon voidaan huomioida ympäristön reduktiokertoimella k_y (Väljä, 2011, s. 27). Suurissa kaupungeissa taajaman reduktiokertoimen arvo voi olla jopa 0,06. VHV-ohjeen 02 mukaan induktiovaarajännitetarkasteluissa käytetään kuitenkin vain arvoja $k_y = 0,5$ tai $k_y = 0,3$ taajaman koosta riippuen (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1995, s. 11). Käytännössä arvoa $k_y = 0,3$ käytetään vain Helsingin kaupungin alueella tai vastaavilla alueilla. Taajamien reduktiovaikutukset tulevat huononemaan tulevaisuudessa, kun taajamien metallisia putkiverkostoja korvataan huonosti johtavilla materiaaleilla, kuten muovilla.

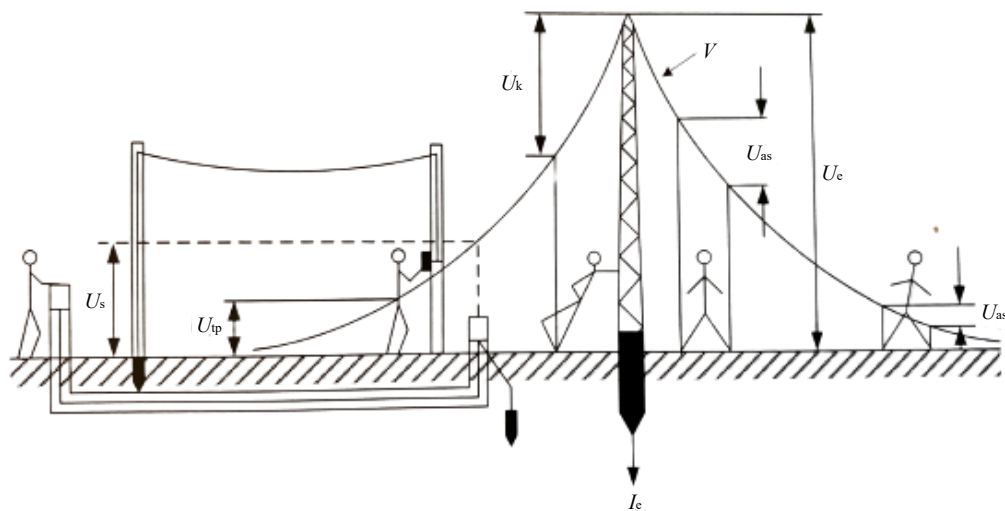
Rautatiekiskojen reduktiovaikutus voidaan huomioida reduktiokertoimella k_r . Jotta kerrointa voidaan hyödyntää, tulee kiskojen olla hyvin maadoitetut, eikä liitoskohdissa saa

olla liikaa ylimenovastusta (Pesonen, 1968, s. 13). Nämä ehdot täyttyvät kuitenkin Suomen sähköradoilla. Sähköradan reduktiokerroin on Suomessa tyypillisesti $k_r = 0,7$, jos voima- ja telejohto kulkevat sähköradan lähetyvillä niin, että telejohto on enintään 100 metrin etäisyydellä sähköradasta (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1995, s. 11).

Reduktiojohtimia voidaan asentaa telekaapeleiden viereen eliminoimaan voimajohdon indusoimia vaarajännitteitä (Väljä, 2011, s. 28). Reduktiojohdin voi olla esimerkiksi paljas kuparijohdin. Voimajohto indusoi reduktiojohtimeen sähkömotorisen voiman, joka puolestaan aiheuttaa reduktiojohtimeen voimajohdon virtaan nähden vastakkaissuuntaisen virran. Tämä vastakkaissuuntainen virta indusoi telekaapeliin sähkömotorisen voiman, joka on vastakkaissuuntainen voimajohdon indusoimaan sähkömotoriseen voimaan nähden, jolloin telekaapeliin indusoituva sähkömotorinen voima pienenee. Myös telekaapeli itse voi toimia reduktiojohtimena. Kun telekaapelin vaippa on maadoitettu hyvin molemmista päistään, indusoi vaipassa kulkeva virta johtimeen vastakkaissuuntaisen sähkömotorisen voiman voimajohtoon nähden. Suurilla kaapeleilla voidaan hyödyntää myös ylijännitesuojien luomaa reduktiovaikutusta (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1995, s. 11). Suojien toimiessa johtimessa kulkeva virta pienentää indusoituvaa sähkömotorista voimaa reduktiojohtimen tavoin. Kaapelin kaikkia pareja ei välttämättä tarvitse varustaa ylijännitesuojilla, sillä osan suojusta toimiessa pienenevät myös ilman ylijännitesuojia varustettujen parien sähkömotoriset voimat.

4 Vaara- ja häiriöjännitteet 110 kV:n verkossa

Sähköverkkojen tuottamat vaara- ja häiriöjännitteet muodostavat keskeisen ongelmakokonaisuuden jakelu- ja siirtoverkkotekniikassa (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 464). Vaara- ja häiriöjännitteitä aiheuttavat samat tekijät, minkä vuoksi niitä käsitellään yleensä toistensa yhteydessä. Siihen, syntykö vaara vai häiriö, vaikuttaa usein vain syntyneen jännitteen tai virran suuruus. Vaarajännitteitä ovat sellaiset vahvavirtajohtojen tuottamat jännitteet, jotka voivat aiheuttaa laitevaurioita tai vaaraa ihmisille tai eläimille (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 464). Vaarajännitteitä voi esiintyä myös voimajohdon normaalikäytössä, mutta useimmiten niillä tarkoitetaan kuitenkin vikatilanteessa syntyviä jännitteitä. Verkkovikojen yhteydessä vaarajännitteitä esiintyy sähköasemilla ja pylväillä sekä niiden läheisyydessä tai sähköverkkojen lähellä kulkevilla telejohtoilla. Erilaisia vaarajännitteitä ovat esimerkiksi maadoitus-, kosketus- ja askeljännitteet (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 428). Usein vaarajännitteiden yhteydessä käsitellään myös takaperoisia kosketusjännitteitä ja siirtyviä jännitteitä. Telejohtojen vaarajännitteillä tarkoitetaan yleensä telejohdon ja maan välistä jännitettä. Kuva 10 havainnollistaa erilaisten vaarajännitteiden syntymistapoja virrallisen maadoituselektrodin ympärillä.



Kuva 10. Maanpinnan potentiaali V , maadoitusjännite U_e , kosketusjännite U_k ja askeljännite U_{as} sekä siirtyvä jännite U_s ja takaperoinen kosketusjännite U_{tp} (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 429).

Vikavirrat voivat vaaran lisäksi aiheuttaa myös häiriöitä, mutta yleisesti ottaen häiriöiden aiheuttajia on huomattavasti enemmän kuin vaaran aiheuttajia (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 464–466). Televerkkojen osalta häiriö määritellään sähkömagneettisena ilmiönä, joka ei ole laitteen hyötykäytössä tarpeellinen. Täsmällisempi nimitys tälle on sähkömagneettinen häiriö. Televerkossa ja kulutuslaitteissa häiriöitä aiheuttavat esimerkiksi yliaallot ja sähkölaitteiden toiminnan aikaansaamat muutosilmiöt eli transientit. Sähkölaitteiden kykyä toimia oikein ja luotettavasti häiriöllisessä ympäristössä kuvataan termillä sähkömagneettinen yhteensopivuus (electromagnetic compability, EMC). EMC on aihealueena erittäin laaja, minkä vuoksi tässä työssä keskitytäänkin vain sähköverkossa tavallisimmin esiintyviin häiriöihin, joita ovat voimajohdosta telejohtoihin siirtyvät häiriöt. Jännite tai virta voi kytkeytyä voimajohdosta telejohtoon kolmella tavalla: kapasitiivisesti, konduktiivisesti ja induktiivisesti. Tässä luvussa perehdytään erilaisiin 110 kV:n sähköverkossa esiintyviin vaara- ja häiriöjännitteisiin sekä niiden syntytapoihin.

4.1 Maadoitusjännite ja potentiaalin leviäminen

Maadoitusjännitteellä U_e tarkoitetaan maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välistä potentiaaliero eli jännitettä (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 19). Toisinaan maadoitusjännitteellä tarkoitetaan myös maapotentiaalin nousua, joka syntyy vikatilanteessa maadoituselektrodin kautta maahan tunkeutuvan virran I_e myötä. Kun maahan tunkeutuvan virran I_e ja maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssin Z_e suuruudet tiedetään, voidaan maadoitusjännite laskea yhtälöllä

$$U_e = Z_e I_e. \quad (25)$$

Standardin SFS-EN 50341-1 (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2014, s. 164) mukaan yli 45 kV avojohdoilla suurin sallittu maadoitusjännite saa olla korkeintaan kaksinkertainen suurimpaan sallittuun kosketusjännitteeseen verrattuna. Kosketusjännitteiden suurimpia sallittuja arvoja käsitellään tarkemmin alaluvussa 4.2.

4.1.1 Sähköaseman maadoitusjännite

Sähköaseman maadoitusjännitteen laskemiseen vaikuttavat muun muassa verkon tähtipisteen käsittelytapa ja ukkosjohtimien käyttö, minkä vuoksi maadoitusjännitteen tarkka määrittäminen voi olla mutkikasta (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 447). Yleisesti ottaen suurimmat maadoitusjännitteet syntyvät sähköasemalla tapahtuvassa maasulussa. Kun sähköasemalle tulevat johdot on varustettu ukkosjohtimilla, palaa osa maasulun virrasta I_f ukkosjohtimia myöten maahan aiheuttamatta vaarallista maadoitusjännitettä. Muuntajan tähtipisteen kautta kulkeva virta oikosulkeutuu maadoitusruudukon kautta, minkä vuoksi sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Maan kautta palaa syöttöpisteisiin reduktiokerroimen r summavirrasta I_e määräämä osa rI_e . Siten usean johdon syöttämän aseman maasulkupotentiaali saadaan yhtälöstä

$$U_e = Z_e \sum_{i=1}^n r_i I_{ei}, \quad (26)$$

missä Z_e on aseman maadoitusimpedanssi lähilylväät mukaan lukien, I_{ei} johdon i syöttämä maasulkuvirta, r_i johdon i ukkosjohtimien reduktiokerroin ja n maasulkuvirtaa syöttävien johtojen lukumäärä.

Mikäli sähköasemalta lähtevien johtojen ukkosjohtimet poikkeavat toisistaan huomattavasti ja sähköasema on varustettu tähtipisteestään maadoitetulla muuntajalla, voi johdon varrella muutaman kilometrin päässä asemalta tapahtuva maasulku aiheuttaa suurimman maadoitusjännitteen vikapaikan sijasta sähköasemalla (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 448). Tilanne pahenee myös, mikäli muuntajan syöttämä maasulkuvirta on selkeästi suurempi kuin johtojen syöttämät virrat. Tällöin osa muuntajan tähtipisteen kautta kulkevasta virrasta kulkeekin aseman maadoituksen kautta nostaen aseman potentiaalia. Tällaisessa tapauksessa maadoitusjännite voidaan laskea yhtälöllä

$$U_e = Z_e \left[\sum_{i=1}^n (r - r_i) I_{ei} + r I_{tp} \right], \quad (27)$$

missä aiemmin mainittujen suureiden lisäksi r on vikaantuvan johdon reduktiokerroin ja l_{tp} on muuntajan tähtipistevirta. Asettamalla tähtipistevirran arvo nolllaksi, voidaan yhtälöllä 27 laskea maadoitusjännite myös tapauksessa, jossa maasulku sattuu johdon varrella ja sähköasemalla ei ole tähtipisteestään maadoitettua muuntajaa.

Sähköaseman maadoitusjännitettä voidaan pienentää parantamalla maadoituksia tai pienentämällä vikavirtoja tai ukkosjohtimien reduktiokertoimia (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 451). Aseman maadoitusimpedanssiin on vaikea vaikuttaa jälkikäteen, ellei aseman maadoitusruudukkoa voida yhdistää esimerkiksi laajaan galvaanisesti yhtenäiseen vesijohto- tai kaapeliverkkoon. Vikavirtoja voidaan pienentää käyttämällä tähtipisteissä maadoituskuristimia tai poistamalla tähtipistemaadoituksia kokonaan. Tehokkain keino pienentää sähköaseman maadoitusjännitettä on kuitenkin teräsalumiinisten ukkosjohtimien käyttö ja yhdistäminen aseman maadoituksiin. Ukkosköysiä voidaan asentaa myös jälkikäteen, mutta se on noin 10 kertaa kalliimpaa ja paljon hankalampaa kuin johdon rakennusvaiheessa.

4.1.2 Pylvään maadoitusjännite ja pylväspotentiaalilin leviäminen

Myös pylvään maadoitusjännite voidaan laskea yhtälöllä 25, kun tiedetään pylvään maadoitusresistanssi (yhtälössä maadoitusimpedanssi) ja pylväältä maahan menevä virta. Kuten alaluvussa 3.3 käsitellään, on ukkosjohtimilla valtava merkitys siihen, kuinka suuri osa maasulkuvirrasta kulkee itse pylvään kautta maahan. Ukkosjohtimien reduktiovaikutuksen ansiosta pylväiden maadoitusjännitteet ovatkin huomattavasti pienempiä ukkosjohtimellisilla johdoilla ukkosjohtimettomiin johtoihin verrattuna. Ukkosjohtimettomalla johdolla pylvään maadoitusjännitteen laskeminen on yksinkertaista, sillä koko maasulkuvirta kulkee pylväsmaadoitusten kautta maahan. Tällaisella johdolla voi olla kuitenkin asennettuna koko johdon mittainen erillinen maajohdin, joka vaikuttaa olennaisesti potentiaalilaskentaan. Muun muassa Seppänen (2011) on käsitellyt diplomityössään tällaisen johdon potentiaalilaskentaan.

Pylväspotentiaali etenee tasaisesti eri suuntiin homogeenisessa maassa, kun tarkastellaan etäällä maasulussa olevasta pylväästä sijaitsevia kohteita (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 441). Maasulussa olevan johdon lähistöllä sijaitsevan pisteen P potentiaali voidaan laskea yhtälöllä

$$V_P = \frac{\rho}{2\pi} \left| \sum_{j=1}^n \frac{I_{ej}}{s_j} \right|, \quad (28)$$

missä ρ on maaperän resistiivisyys, I_{ej} pylväältä j maahan kulkeva virta, s_j pisteen P ja pylvään j maadoituksen keskipisteen välinen etäisyys ja n tarkasteluun sisällytettävien pylväiden lukumäärä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 438). Yhtälöstä voidaan päätellä, että huonosti johtavassa maaperässä potentiaalit voivat kasvaa, mikäli vikaantuneen pylvään maadoituksia parannetaan. Parannettaessa maadoituksia pienenee pylvään maadoitusresistanssi, jolloin pylväältä maahan kulkeutuva virta kasvaa ja sitä kautta pisteen P potentiaali nousee. Yhtälöä 28 voidaan käyttää sekä ukkosjohtimelliselle että ukkosjohtimettomalle johdolle. Ukkosjohtimettomalla johdolla pylväiden lukumäärä n on yksi.

Käytännössä toteutettujen mittausten perusteella potentiaalin leviämistä ei voida laskea pelkästään pylvään ympäristössä tehtyjen pintamaan resistiivisyysmittausten perusteella, sillä potentiaalin leviämiseen vaikuttavat olennaisesti myös maan pohjakerrosten resistiivisyydet (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 441). Suomessa 110 kV:n verkossa tehtyjen mittausten perusteella 90 prosentissa tapauksista potentiaaleille etäisyydellä x ($20 \text{ m} \leq x \leq 200 \text{ m}$) pylväästä pätee yhtälö

$$V_{90}(x) \leq 0,11U_e \ln \frac{13300}{x}, \quad (29)$$

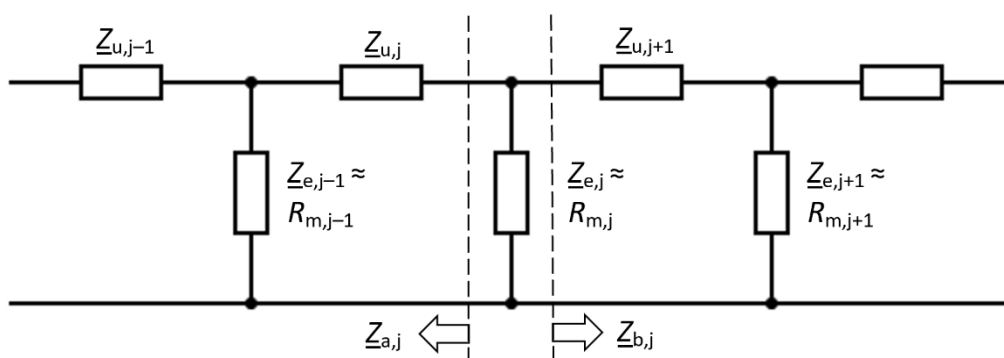
missä U_e on vikapylvään maadoitusjännite. Potentiaalien laskemiseen on esitetty myös muita yhtälöitä, mutta yhtälöllä 29 saadaan pääsääntöisesti aina suurimmat tulokset,

jolloin maadoitussuunnittelussa ollaan niin sanotusti ”turvallisella puolella” (Luukkainen, 2020, s. 28).

Ukkosjohtimellisella johdolla osa maasulkuvirrasta kulkee reduktiovaikutuksen ansiosta ukkosjohtimien kautta, kuten aluvussa 3.3 on esitetty. Pylvään maadoitusjännitteen laskemiseksi täytyy selvittää, kuinka suuri osa maasulkuvirrasta kulkee vikaantuneen pylvään kautta maahan. Tämän virran suuruuteen vaikuttavat rinnakkaisten pylväiden ja ukkosjohtimien muodostamat ketjuimpedanssit. Kuva 11 esittää vikaantuneella pylväällä maahan menevään virtaan vaikuttavia impedansseja. Pylvään j resultoiva maadoitusimpedanssi Z_{Tj} saadaan yhtälöstä

$$\frac{1}{Z_{Tj}} = \frac{1}{R_{m,j}} + \frac{1}{Z_{a,j}} + \frac{1}{Z_{b,j}}, \quad (30)$$

missä $R_{m,j}$ on pylvään j maadoitusresistanssi ja $Z_{a,j}$ sekä $Z_{b,j}$ ovat vikaantuneesta pylvästä katsoen molemmista suunnista näkyvät ketjuimpedanssit (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 443).



Kuva 11. Ukkosjohtimellisella johdolla pylväspotentialin suuruuteen vaikuttavat impedanssit (muokattu lähteestä Elovaara & Haarla, 2011a, s. 443).

Mikäli oletetaan pylväiden maadoitusresistanssit ja ukkosjohtimien maadoitusimpedanssit vakioiksi koko johdon matkalta, voidaan pylvään resultoivaa ketjuimpedanssia arvioida yhtälöllä

$$Z_T \approx \sqrt{R_m z_u l_j}, \quad (31)$$

missä z_u on ukkosjohtimen ketjuimpedanssi pituusyksikköä kohden ja l_j jänteen pituus (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 444). Lisäksi kaukana sähköasemalta sattuvassa maasulussa maasulkuvirta leviää kahteen suuntaan, jolloin kokonaisimpedanssiksi saadaan

$$Z_{T,\infty} = 0,5 \cdot Z_T. \quad (32)$$

Todellisuudessa pylväiden maadoitusresistanssit voivat vaihdella pitkällä johdolla hyvin paljon. Siksi tässäkin työssä kehitetään laskentaohjelma, joka laskee tarkat arvot ketjuimpedansseille $Z_{a,j}$ ja $Z_{b,j}$. Kun tiedetään ketjuimpedanssit ja vikaantuneen pylvään maadoitusresistanssi, voidaan virranjakosäännöllä laskea vikaantuneelta pylväältä j maahan menevä virta I_{ej} yhtälöllä

$$I_{ej} = \frac{\frac{Z_{a,j}Z_{b,j}}{Z_{a,j} + Z_{b,j}}}{R_{m,j} + \frac{Z_{a,j}Z_{b,j}}{Z_{a,j} + Z_{b,j}}} r 3I_0, \quad (33)$$

missä r on ukkosjohtimien reduktiokerroin ja $3I_0$ yksivaiheinen maasulkuvirta pylväällä. Esimerkiksi Seppänen (2011, s. 43) on esittänyt työssään vastaavanlaisen yhtälön vikaantuneelta pylväältä maahan menevälle virralle.

4.2 Kosketus- ja askeljännitteet sekä siirtyvät potentiaalit

4.2.1 Kosketusjännite

Kosketusjännitteellä tarkoitetaan sitä osaa maadoitusjännitteestä, joka vaikuttaa ihmiskehossa kosketuskohdan ja maan välillä (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 19). Kuvassa 10 (sivulla 46) kosketusjännitettä on kuvattu symbolilla U_k . Jos pylvään

läheisyyteen tuodaan jokin kauempana maadoitettu eristetty johde, kuten viestijohto, voi syntyä myös niin sanottu takaperoinen kosketusjännite U_{tp} . Kosketus- ja askeljännitteet ovat suurimmillaan maasulussa olevan kohteen läheisyydessä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 429). Kuormittamattomalla kosketusjännitteellä U_D tarkoitetaan kosketuspiirin lähdejännitettä eli kehon yli vaikuttavaa jännitettä, kun ihminen seisoo kosketuskohdassa paljain jaloin. Kehon yli vaikuttava kosketusjännite on pienempi, mikäli ihmisellä on jalassaan eristävät jalkineet.

Kosketusjännitteille asetetut vaatimukset eivät ole riippuvaisia verkon käyttöjännitteestä. Sen sijaan kosketusjännitteiden raja-arvot riippuvat vikavirran kestoajasta ja siitä, kuinka helposti kosketusjännite voi aiheuttaa vaaraa. Taulukossa 7 on esitetty standardin SFS 6001 mukaisia raja-arvoja kuormittamattomalle kosketusjännitteelle eri vian kestoajoilla.

Taulukko 7. Kuormittamattoman kosketusjännitteen raja-arvoja (Suomen Standardisointiliitto SFS ry., 2018, s. 104).

Vian kesto aika t_F (s)	Sallittu kuormittamaton kosketusjännite U_D (V)
0,05	716
0,1	654
0,2	537
0,5	220
1	117
2	96
5	86
10	85

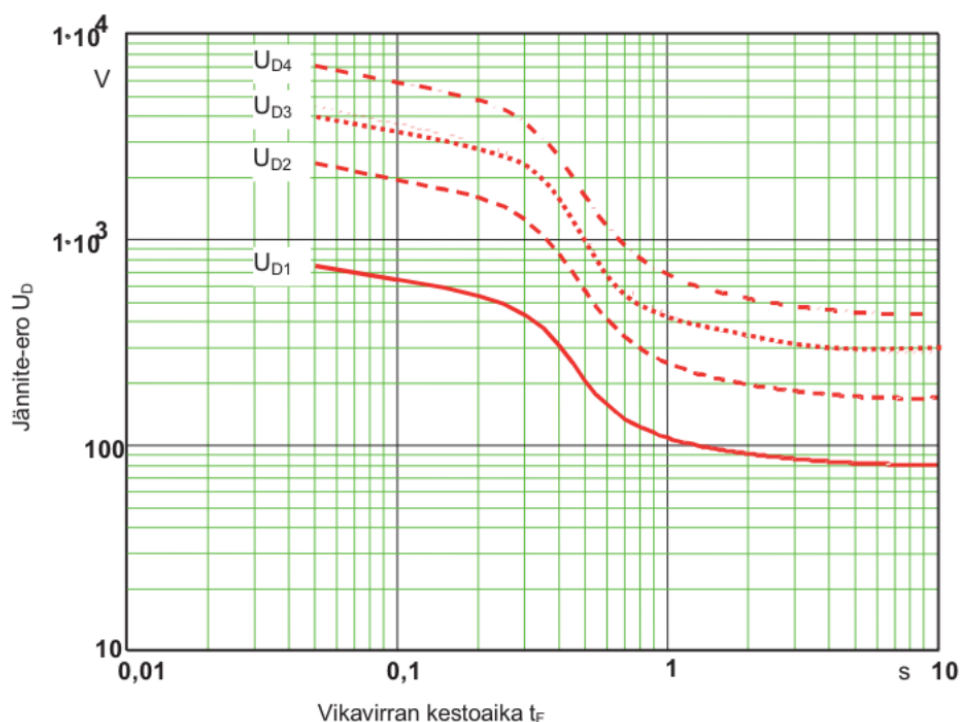
Taulukon 7 raja-arvot pätevät vain paikoissa, joissa ihmisten voidaan olettaa liikkuvan paljain jaloin. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi leikkikentät, leirintäalueet, uima-altaat ja virkistysalueet. Kuormittamattomalle kosketusjännitteelle sallitaan suurempia arvoja paikoissa, joissa ihmisen voidaan olettaa käyttävän jalkineita. Suurimmat sallitut kosketusjännitteet voidaan erilaisille sijaintipaikoille laskea standardin SFS 6001 mukaan yhtälöillä

$$U_D(t_F) = U_{DB}(t_F) \left(1 + \frac{R_A}{Z_B(U_{DB}(t_F))} \right) \quad (34)$$

ja

$$R_A = R_{A1} + R_{A2} = R_{A1} + 1,5 \frac{1}{[m]} \rho, \quad (35)$$

missä $U_D(t_F)$ on kuormittamattoman kosketusjännitteen suurin sallittu arvo vian kestoajalla t_F , $U_{DB}(t_F)$ on ihmiskehon yli vaikuttava kosketusjännite, $Z_B(U_{DB}(t_F))$ on ihmiskehon kokonaisimpedanssi, R_{A1} on jalkineiden resistanssi, R_{A2} on seisomiskohtaan maadoitusresistanssi ja ρ on maaperän resistiivisyys (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 105). Kuvassa 12 on esitetty kyseisillä yhtälöillä laskettuja suurimpia sallittuja kosketusjännitteen arvoja erilaisilla lisäresistanssin ja maaperän resistiivisyyden arvoilla.



Kuva 12. Kosketusjännitteiden suurimpia sallittuja arvoja eri sijaintipaikoissa. U_{D1} : $R_A = 0 \Omega$; U_{D2} : $R_A = 1750 \Omega$, $R_{A1} = 1000 \Omega$, $\rho = 500 \Omega m$; U_{D3} : $R_A = 4000 \Omega$, $R_{A1} = 1000 \Omega$, $\rho = 2000 \Omega m$; U_{D4} : $R_A = 7000 \Omega$, $R_{A1} = 1000 \Omega$, $\rho = 4000 \Omega m$ (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2014, s. 206).

Kuvassa 12 käyrä U_{D1} vastaa taulukossa 5 esitettyjä arvoja eli sijaintipaikkoja, joissa ihmisten voidaan olettaa oleskelevan paljain jaloin. Käyrä U_{D2} vastaa sijaintipaikkoja, joissa voidaan kohtuudella olettaa ihmisten käyttävän kenkiä. Tällaisia alueita ovat muun muassa yleisten teiden jalkakäytävät ja pysäköintialueet. Käyrä U_{D3} vastaa sijaintipaikkoja, joissa ihmisten voidaan olettaa käyttävän kenkiä ja joissa maaperän resistiivisyys on korkea ($2000 \Omega\text{m}$). Vastaavasti käyrä U_{D4} vastaa paikkoja, joissa ihmiset käyttävät kenkiä ja joissa maaperän resistiivisyys on hyvin korkea ($4000 \Omega\text{m}$).

Pylväiden kosketusjännitteiden ehkäiseminen ei vaadi toimenpiteitä, mikäli yksikin seuraavista ehdoista täyttyy:

- Pylväät ovat sähköä johtamattomia eivätkä ne ole yhteydessä maahan.
- Johto on varustettu suojaavalla automaattisella laukaisulla, ja tällaisen pylvään läheisyydessä ei liiku tai oleskele ihmisiä säännöllisesti.
- Pylvään maadoitusjännite täyttää ehdon $U_e < 2U_D$, missä U_D on kuvan 12 käyrästä saatava kosketusjännitteen arvo.
- Pylvään kosketusjännite on kuvan 12 peruskäyrää alhaisempi ($U_k < U_{D1}$) (Elovaara & Haarla, 2011, s. 439).

Mikäli yksikään yllä esitetystä ehdoista ei täyty pylväällä, on ryhdyttävä toimenpiteisiin kosketusjännitteiden pienentämiseksi. Toimenpiteitä ovat esimerkiksi potentiaalinhojauselektrodien asentaminen, pylvään eristäminen eristysaineisella aidalla tai maan pintakerroksen korvaaminen eristävällä aineella, kuten soralla.

Sähköaseman kosketusjännitesuojauksen poikkeaa hieman voimajohtojen tapauksesta (Elovaara & Haarla, 2011, s. 449). Standardin SFS 6001 mukaan sähköasemalla esiintyvien kosketusjännitteiden katsotaan olevan riittävän pieniä, mikäli sähköaseman maadoitusjännite on korkeintaan $U_e = 2U_T$. Toisaalta sähköaseman täyttäessä tietyt standardissa esitetyt erityistoimenpiteet M1–M4, voidaan maadoitusjännitteelle hyväksyä arvo $U_e = 4U_T$. Standardin mukaan kosketusjännitteiden sallitut arvot toteutuvat

automaattisesti myös, mikäli maadoitukset ovat osa niin sanottua laajaa maadoitusjärjestelmää. Myös sähköaseman kosketusjännitetarkasteluissa voidaan huomioida kuvan 12 mukaisia lisäresistansseja.

4.2.2 Askeljännite

Standardin SFS 6001 mukaan askeljännite U_{as} on maadoitusjännitteen osa, jonka ihminen saa yhden metrin askelvälillä virran kulkiessa kehon kautta jalasta toiseen (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 19). Askeljännite on suurin kohdassa, jossa maanpinnan potentiaali muuttuu jyrkimmin. Avojohtoja koskeva standardi SFS-EN 50341-1 ei määrittele suurimpia sallittuja arvoja askeljännitteille (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2014, s. 160). Standardissa kuitenkin todetaan, että askeljännitteiden sallitut arvot ovat suurempia kuin kosketusjännitteiden sallitut arvot. Tämän vuoksi maadoitusten täyttäessä kosketusjännitevaatimukset voidaan useimmissa tapauksissa olettaa, että myöskään vaarallisia askeljännitteitä ei maadoitusjärjestelmässä esiinny.

4.2.3 Siirtyvä potentiaali

Siirtyvä potentiaali U_s määritellään standardissa SFS 6001 jännitteen nousuksi, jonka aiheuttaa johtimen siirtämä virta alueelle, jossa on referenssimaahan nähden alhainen jännite tai ei ole jännitettä lainkaan (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 19). Tämä potentiaali voi siirtyä esimerkiksi metallista kaapelivaippaa, PEN-johdinta tai metalliputkistoa pitkin. Samaa määritelmää sovelletaan myös johtimeen, joka kytketään referenssimaahan ja tuodaan alueelle, jonka jännite referenssimaahan nähden on suuri. Viestintäviraston (2015, s. 25) määräyksessä 43F/2015M määritellyt suurimmat sallitut arvot vähintään 110 kV:n suurjännitelaitteiston yksivaiheisessa maasulussa viestintäverkon laitteisiin ja kosketeltaviin metalliosiin maata vasten siirtyneelle tai indusoituneelle sähkömotoriselle voimalle on esitetty taulukossa 8. Taulukon 8 arvoja sovelletaan siis myös televerkkoon indusoituviin jännitteisiin.

Taulukko 8. Suosituksen ITU-T K.68 kohdan 6.2.2 taulukon 18 mukaiset siirtyvien ja indusoituvien jännitteiden (smv) sallitut raja-arvot (ITU-T, 2008a, s. 20).

Maasulun kesto (s)	Sähkömotorinen voima (V)
$t \leq 0,10$	2000
$0,10 < t \leq 0,20$	1500
$0,20 < t \leq 0,35$	1000
$0,35 < t \leq 0,50$	650
$0,50 < t \leq 1,00$	430
$1,00 < t \leq 3,00$	150
$3,00 < t$	60

Siirtyvät potentiaalit tulee tarkastaa myös tilanteissa, joissa suurjännitejärjestelmän maadoitukset sijaitsevat alle 100 metrin etäisyydellä pienjännitejärjestelmän maadoituksesta tai muusta maahan tai PEN-johtimeen yhdistetystä metalliosasta (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 144). Tällöin kohteessa esiintyvä kosketusjännite saa olla korkeintaan kaksinkertainen sallittuun kosketusjännitearvoon U_D verrattuna. Esimerkiksi vian laukaisuajalla $t = 0,2$ s pienjännitejärjestelmässä saisi esiintyä korkeintaan 1074 V suuruinen kosketusjännite. Koska siirtyvää jännitettä on todella haastavaa arvioida laskennallisesti, käytetään tarkasteluissa yleensä kohteessa esiintyvää maapotentiaalia siirtyvän jännitteen sijaan. Mikäli suur- ja pienjännitejärjestelmien maadoitukset yhdistetään, täytyy tarkasteluissa huomioida myös suurjännitejärjestelmän maasulun aiheuttamien rasitusjännitteiden sallitut arvot (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2018, s. 96). Pienjännitejärjestelmän maadoituksen yhdistämisessä suurjännitelaitteiston maadoitukseen on rasitusjännitevaatimuksena $U_E \leq 1200$ V vian laukaisuajan ollessa alle 5 sekuntia.

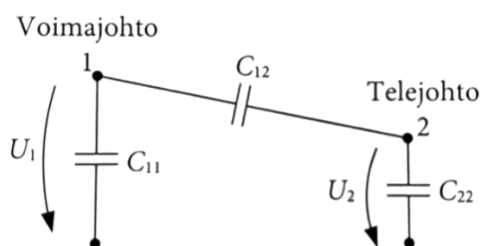
4.3 Kapasitiiviset ja konduktiiviset vaarajännitteet

Tässä alaluvussa tarkastellaan kapasitiivisesti ja konduktiivisesti kytkeytyviä vaarajännitteitä. Kapasitiiviset ja konduktiiviset vaarajännitteet ovat huomattavasti harvinaisempia esiintymistiheyksiltään kuin induktiovaarajännitteet, minkä vuoksi niitä käsitellään vain lyhyesti.

Kapasitiivisia vaarajännitteitä kutsutaan myös influenssijännitteiksi (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 466). Käytännössä kapasitiivisia vaarajännitteitä voi syntyä vain teleajohtoon tai metallisuojuksettomaan ilmaakaapeliin. Kuvassa 13 on esitetty periaatekuva kapasitiivisen vaarajännitteen syntymisestä. Kuvassa suureet C_{11} , C_{12} ja C_{22} tarkoittavat voimajohdon, telejohdinten ja maan muodostaman järjestelmän osakapasitansseja. Osakapasitanssit C_{12} ja C_{22} muodostavat jännitteenjakokytkennän, jolloin telejohdon jännite U_2 saadaan yhtälöstä

$$U_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} U_1, \quad (36)$$

missä U_1 on osakapasitanssin C_{11} yli oleva jännite.



Kuva 13. Kapasitiivisen vaarajännitteen syntyminen (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 467).

Telejohtoa koskettavaan henkilöön kohdistuva jännite ei kuitenkaan ole sama kuin yhtälöstä 36 saatava arvo, sillä jännite pienenee merkittävästi ihmiskehon kuormituksen myötä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 467). Kapasitiivisten vaarajännitteiden vaikutusalue ulottuu vain muutaman kymmenen metrin päähän suurjännitejohdosta.

4.3.1 Kapasitiiviset vaarajännitteet normaalikäytössä ja maasulussa

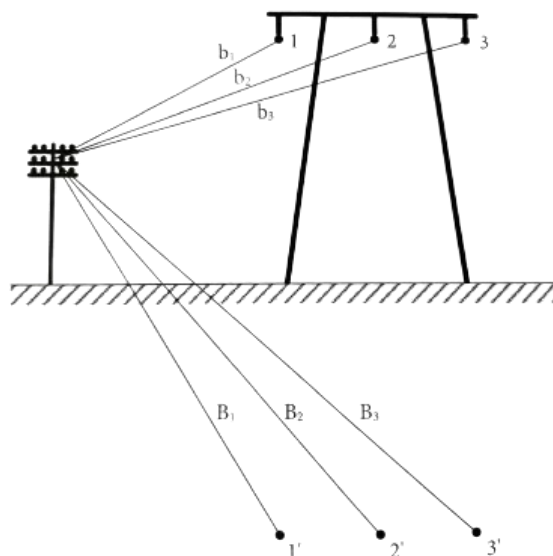
Kolmivaihejohdon tapauksessa kunkin vaihejohtimen ja telejohtimen välille voidaan ajatella kuvan 13 osakapasitanssia C_{12} vastaavat osakapasitanssit (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 467). Voimajohdon normaalikäytössä osakapasitanssien suuruuserot aiheuttavat epäsymmetrian, joka ilmenee jännitteinä. Nämä influenssijännitteet ovat kuitenkin

voimajohdon normaalikäytössä varsin pieniä, korkeintaan satoja voltteja. Korkeimmatkin arvot saavutetaan vain, jos telejohto sijaitsee voimajohdon vieressä ja kokonaan samalla puolella. Äänihäiriöiden lisäksi influenssijännitteiden aiheuttama ainoa haitta on, että telejohtojen ylijännitesuojat saattavat toimia ja siten aiheuttaa käyttöhäiriön telejohdolle. Käytännössä ilmiöstä ei ole haittaa, mikäli vain osa telejohdosta sijaitsee voimajohdon vierellä. Jos telejohto risteää voimajohdon vinosti, kumoavat vastakkaisilla puolilla olevat osat enimmäkseen toistensa vaikutuksen.

Maasulussa telejohtimiin kytkeytyvä kapasitiivinen vaarajännite saadaan yhtälöstä

$$E = U_2 = \frac{k \cdot U \cdot 3c_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt[3]{B_1 B_2 B_3}}{\sqrt[3]{b_1 b_2 b_3}}, \quad (37)$$

missä c_0 on voimajohdon nollakapasitanssi vaihetta ja pituusyksikköä kohden (noin 5,5–6,5 nF/km tavallisilla johdoilla) ja k on verkon maadoitustavasta riippuva termi (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 468). Muut yhtälössä esiintyvät suureet on esitetty kuvassa 14. Sammutetuissa ja maasta erotetuissa verkoissa tähtipistejännite nousee arvoon $U/\sqrt{3}$, jolloin $k = 1/\sqrt{3}$, kun taas tehollisesti maadoitetussa verkossa tähtipistejännitteen nousu jää vähäisemmäksi, jolloin $k \leq 0,4$. Tehollisesti maadoitetussa verkossa vikojen laukaisuajat ovat niin lyhyitä, että kapasitiivisista vaarajännitteistä on harvoin haittaa.



Kuva 14. Telejohdon kapasitiiviseen vaarajännitteeseen vaikuttavat etäisyydet (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 468).

4.3.2 Konduktiiviset vaarajännitteet

Maapotentiaali voi siirtyä maassa oleviin elektrodeihin ja kaapelien vaippoihin myös konduktiivisesti (Pesonen, 1989, s. 109). Konduktiivisesti kytkeytynyt jännite voi vaaran lisäksi esimerkiksi rikkoa kaapelin eristyksen. Suurimmat konduktiiviset vaarajännitteet syntyvät tilanteissa, joissa voimajohto putoaa telejohdon tai kaapelin päälle (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 475). Nykyisten rakennemääräysten ja standardien mukaan risteämäkohdat on rakennettava siten, että voimajohdon putoaminen on käytännössä mahdotonta tai erittäin epätodennäköistä, minkä vuoksi tällaiset tapaukset ovat hyvin harvinaisia. Voimajohdon maasulun lisäksi konduktiivisia vaarajännitteitä voi esiintyä myös sähkötojen normaalikäytössä.

Maasulkutilanteessa maasulkuvirta aiheuttaa vikapaikkaa ympäröivän maan potentiaalinnousun (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 476). Ukkosjohtimettomalla johdolla vain viikapylvään ja sen ympäristön potentiaali nousee, kun taas ukkosjohtimellisella johdolla maasulkuvirta jakautuu kymmenille pylväille, jolloin niidenkin potentiaalit nousevat. Potentiaalinnousut ovat huomattavasti pienempiä ukkosjohtimellisella johdolla. Mikäli

voimajohdon jännteessä on lyhyt maakaapeli, saa tämän vaippa kaapelin sijaintikohdan potentiaalın, ellei vaippaa ole eristetty maasta. Tällöin potentiaali ilmenee vaipan ja johtimien välisenä jännitteenä ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa läpilyönnin tai kaapelin päiden ylijännitesuojien toimimisen. Täten jännite voi päästä takatietä telejohtimiin ja televerkkoon. Vastaava ilmiö voi tapahtua myös, mikäli maadoitettu ilmakaapelipääte on sijoitettu lähelle suurjännitejohtoa. Tilanne siis pahenee, jos maakaapeli ja avojohto risteävät kahden ilmajohdon sijasta. On kuitenkin huomioitava, että johdinpuotoamia tapahtuu äärimmäisen harvoin etenkin varmennetulla johdolla. Sen sijaan valokaarimaasulut ovat melko yleisiä, jolloin potentiaali pääsee maakaapelin tapauksessa telejohtimiin todennäköisemmin kuin avojohto- tai ilmakaapeliristeämässä. Jos maakaapelia käytetään, on sen vaippa eristettävä maasta jännitekestoisesti niin pitkällä matkalla, ettei potentiaali pääse kaapeliin. Lisäksi johtimen ja vaipan väliin on kytkettävä ylijännitesuoja.

Konduktiivisesti kytkeytyvien vaarajännitteiden välttämiseksi on tärkeintä, ettei telejoh-tojen maadoituksia sijoiteta liian lähelle voimajohtoja tai sähköasemia (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 476). Mikäli voimajohdon tai sähköaseman lähellä on televerkon maadoituksia, tulisi niiden olla mahdollisimman huonoja, kun taas kaukana olevien telejoh-tojen maadoitusten tulisi olla mahdollisimman hyviä vaarajännitteen rajoittamiseksi (Pesonen, 1989, s. 113).

4.4 Induktiovaarajännitteet

Virrallisen johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä Maxwellin yhtälöihin kuulu-van Ampèren lain mukaisesti. Mikäli tämän johtimen läheisyydessä on toinen johdin, kuten telejohto, kiertää osa virrallisen johtimen aiheuttamasta magneettivuosta myös telejohtimen (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 469). Vaihtovirralla jännitteen polariteetti muut-tuu jatkuvasti, jolloin Faradayn lain mukaan muuttuva magneettivuo indusoi toiseen joh-timeen pitkittäisen sähkömotorisen voiman eli $smv:n$. Voimajohdoilla pahimmat induk-tiovaarajännitteet syntyvät joko normaalikäytössä vaihejohtimien geometriasta aiheutu-van summamagneettikentän tai maasulussa muodostuvan virtasilmukan vaikutuksesta.

Normaalikäytössä indusoiva silmukka on pieni, mutta maasulkutilanteessa paluujohdina toimii maa jopa 4,5 km syvyydellä, jolloin indusoiva silmukka on huomattavasti suurempi (Pesonen, 1989, s. 114).

4.4.1 Normaalikäytössä induoituva sähkömotorinen voima

Voimajohdon normaalikäytössä vaihejohtimien virrat ovat keskenään yhtä suuria ja niiden välinen vaihe-ero on 120° , jolloin kunkin vaihejohtimen viereiseen telejohtimeen induoimat smv:t kumoavat toisensa miltei kokonaan (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 471). Eri vaiheiden etäisyydet telejohtoon nähden poikkeavat kuitenkin hieman toisistaan, minkä vuoksi eri vaihejohtimien muodostamat magneettikentät eivät kumoa toisiaan täysin, jolloin induktiovaikutukseksi jää pieni smv. Indusoitunut smv E pituutta l kohden voidaan laskea yhtälöllä

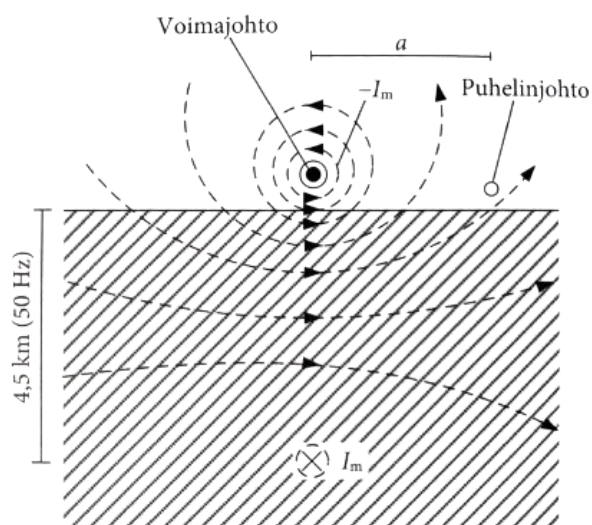
$$\frac{E}{l} = \frac{-j\omega\mu_0 I}{4\pi} \left(\ln \frac{b_1 b_3}{b_2^2} \pm j\sqrt{3} \cdot \ln \frac{b_3}{b_1} \right), \quad (38)$$

missä I on voimajohdossa kulkeva virta, μ_0 tyhjiön permeabiliteetti ja b_1 – b_3 kuvassa 14 esitetyjä etäisyyksiä. Toisen termin etumerkki riippuu siitä, kummalla puolella voimajohtoa telejohto sijaitsee.

Mikäli voimajohdossa on tarkasteltavalla osuudella vuorottelu, on huomioitava, että smv:n vaihekulma muuttuu vuorottelukohdassa 120° (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 471). Käytännössä normaalikäytössä induoituvat smv:t aiheuttavat harvoin vaaraa, sillä muut häiriöjännitteet tai pysyvät maavirrat aiheuttavat suurimman osan häiriötilanteista. Pesonen (1989, s. 119) huomauttaa kuitenkin, että voimajohdon kuormitusvirta voi induoida ukkosjohtimiin virtoja, jotka kulkevat myös maassa, jolloin indusoiva silmukka on suuri. Telejohtoon induoituva smv jää hyvin pieneksi, jos telejohto risteilee vinosti voimajohdon kanssa. Telejohtoihin induoituva pitkittäinen smv saa normaalikäytössä olla korkeintaan 60 V.

4.4.2 Vikatilanteessa indusoituva sähkömotorinen voima

Suurimmat induktiovaarajännitteet syntyvät voimajohdon vikatilanteissa, joista pahin tilanne on yksivaiheinen maasulku. Esimerkiksi kolmivaiheista oikosulkuvirtaa ei huomioida induktiotarkasteluissa, sillä se ei muodosta laajaa virtasilmuksia. Maasulkuvirtojen voimakas induktiovaikutus johtuu siitä, että maavirta leviää maaperän huonon johtavuuden takia hyvin suurelle pinta-alalle (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 471). Esimerkiksi Suomessa maavirran ekvivalenttisyvyys on noin 4,5 km. Näin suuri virtasilmuksia aiheuttaa todella kauas voimajohdosta ulottuvan magneettikentän. Käytännössä kyseisen magneettikentän induktiovaikutus ulottuu jopa 10–15 km:n etäisyydelle. Kuvassa 15 on periaatepiirros magneettikentän muodostumisesta. Periaatteessa kaksoismaasuluissa voi esiintyä jopa yksivaiheista maasulkuvirtaakin suurempia maavirtoja, mutta niitä ei huomioida induktiotarkasteluissa harvinaisuutensa vuoksi (Väljä, 2011, s. 14).



Kuva 15. Maavirran ekvivalenttisyvyys ja sen luoma magneettikentän periaate (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 472).

Voimajohdon maasulussa indusoituva sähkömotorinen voima E voidaan laskea yhtälöllä

$$E = k_r I_e Z_m, \quad (39)$$

missä I_e on voimajohdon maasulkuvirta, Z_m voima- ja viestijohdon välinen keskinäisimpedanssi ja k_r erilaisista smv:tä pienentävistä tekijöistä koostuva reduktiokerroin (Pesonen, 1968 s. 9). Reduktiokertoimeen k_r vaikuttaa esimerkiksi ukkosjohtimien, rataaksojen, kaapeleiden ja taajamien reduktiokertoimet. Suurimmat sallitut arvot vähintään 110 kV:n suurjännitelaitteiston yksivaiheisessa maasulussa viestintäverkon laitteisiin ja kosketeltaviin metalliosiin indusoituneelle sähkömotoriselle voimalle on esitetty alaluvun 4.3.2 taulukossa 8.

Alaluvussa 3.2 on käsitelty maasulkuvirran epäsymmetriapiirrosta (Kuva 7 sivulla 37). Induktio tarkasteluissa indusoivaksi vikavirraksi valitaan 5 kilometrin päässä laskettavasta kohteesta oleva arvo. Kahdesta suunnasta syötetyn johdon tapauksessa vikavirraksi valitaan kahdesta vaihtoehdosta suurempi. Mikäli maasulkuvirta muuttuu maasulun aikana, lasketaan sekä suurinta virtaa vastaava smv että koko vian kestoajaa vastaava smv. Suurimmalle indusoivalle virralle käytetään suurimman virran todellista kestoajaa, mutta koko vian kestoajalle käytetään vian ekvivalenttista virta-arvoa, joka lasketaan yhtälöllä

$$3I_{0eq} = \sqrt{\frac{(3I_{01})^2 t_1 + (3I_{02})^2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots}}, \quad (40)$$

missä t_1 on virran $3I_{01}$ kestoajaa ja niin edelleen (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1995, s. 12).

Yhtälössä (39) esiintyvä keskinäisimpedanssi Z_m riippuu pääosin vain voima- ja telejohdon välisestä etäisyydestä, maaperän resistiivisyydestä ja taajuudesta. Keskinäisimpedanssi koostuu reaalikomponentista R_m ja imaginäärikomponentista ωL_m yhtälön

$$Z_m = R_m + j\omega L_m \quad (41)$$

mukaisesti (Jacquet ja muut, 1995, liite C. 1.). Realikomponentti R_m kuvaa paluujohtimena toimivan maan resistanssia, joka on Suomessa noin $50 \text{ m}\Omega/\text{km}$, ja imaginäärikomponentti ωL_m edustaa virtapiirien välistä keskinäisreaktanssia. Keskinäisimpedanssin laskemiseen on esitetty monia erilaisia yhtälöitä, joista lähes kaikki pyrkivät approksimoimaan Carsonin tai Pollaczekin muodostamia monimutkaisia yhtälöitä. Carsonin yhtälöiden mukaan keskinäisimpedanssi pituutta kohti z_m voidaan laskea yhtälöillä

$$\underline{z}_m = \frac{\omega\mu_0}{\pi\alpha a} \left(\text{ker}'\alpha a + \frac{1}{\alpha a} \right) + j \frac{\omega\mu_0}{\pi\alpha a} \text{kei}'\alpha a, \quad (42)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}, \quad (43)$$

missä ker' ja kei' ovat Kelvinin funktioita ja a on voima- ja telejohdon välinen etäisyys (Pesonen, 1989, s. 30). Yhtälö 42 voidaan sieventää myös muotoon

$$\underline{z}_m = \frac{\omega\mu_0}{8} + j\mu_0 f \ln \frac{1,85}{\alpha a}, \quad (44)$$

missä oletuksena on, että termi $\alpha a < 0,25$ (Jacquet ja muut, 1995, liite C. 1.). Tällöin esimerkiksi Suomessa voimajohdon ja telejohdon väliseksi etäisyydeksi saadaan enintään 603 metriä. Yhtälöä 44 kutsutaan Carson-Clemin yhtälöksi.

Keskinäisimpedanssin laskentaan on esitetty myös likiarvoisyhtälöjä, jotka soveltuvat hyvin esimerkiksi tietokonelaskentaan (ITU-T, 2008b, s. 31). Kun $\alpha a \leq 10$, voidaan keskinäisimpedanssin suuruutta arvioida yhtälöllä

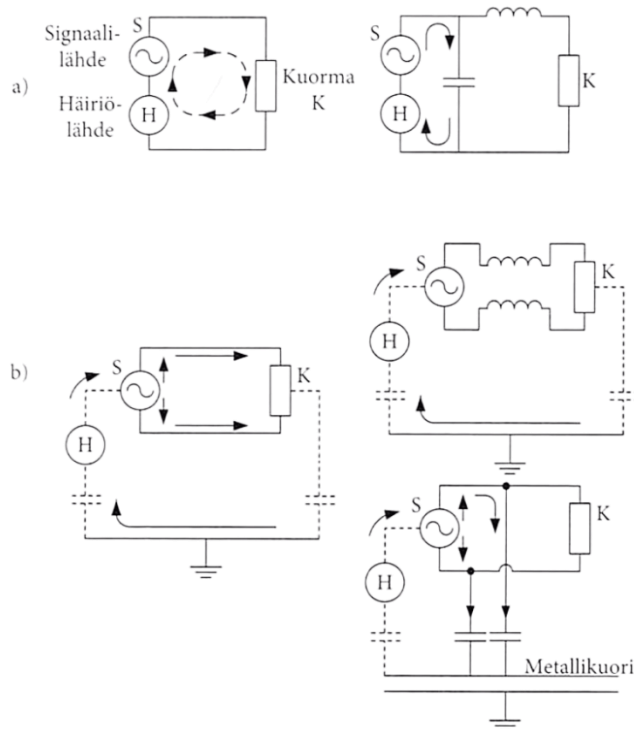
$$|z_m| = 2\pi f \cdot 10^{-3} (142,5 + 45,96x - 1,413x^2 - 198,4 \ln x) \left[\frac{\Omega \cdot m}{km} \right], \quad (45)$$

missä $x = \alpha a$. Kun $\alpha a > 10$, keskinäisimpedanssin suuruus saadaan yhtälöstä

$$|z_m| = 2\pi f \cdot 10^{-3} \frac{400}{x^2} \left[\frac{\Omega \cdot m}{km} \right]. \quad (46)$$

4.5 Häiriöjännitteet

Häiriöt voidaan yleisesti jakaa kahteen pääluokkaan: yhteismuotoisiin ja erotusmuotoisiin häiriöjännitteisiin (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 478). Yhteismuotoiset häiriöjännitteet esiintyvät yhtä suurina ja samanvaiheisina meno- ja paluujohtimissa. Siirtoyhteydellä yhteismuotoinen häiriö etenee sekä meno- että paluujohtimessa samaan suuntaan. Erotusmuotoinen häiriöjännite sen sijaan kiertää meno- ja paluujohtimen muodostamassa silmukassa. Erotusmuotoinen häiriö voidaan helposti eliminoida suodattamalla se pois jo syöttöjohdon alkupäässä. Yhteismuotoisten häiriöiden eliminointi on yleensä haastavampaa. Esimerkiksi parikierretyllä kaapelilla voidaan helposti eliminoida erotusmuotoinen häiriö, mutta yhteismuotoisia häiriöitä vastaan se on tehoton johtimien jakapanssinsa vuoksi. Perustapauksissa yhteismuotoisia häiriöitä voidaan eliminoida esimerkiksi meno- ja paluujohtimiin liitetyillä kuristimilla tai yhdistämällä johtimet ympäröivään metallikuoreen kondensaattoreilla. Kuvassa 16 on havainnollistettu kyseisten häiriöiden perusmuotoja ja niiden vaimennusmenetelmiä.



Kuva 16. Erotus- ja yhteismuotoiset häiriöt ja niiden eliminoimiskeinot (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 479).

4.5.1 Sähköaseman viestiyhteyksin suojaaminen

Sähköasemalta ulos meneviä viestiyhteyksiä ovat muun muassa puhelinyhteydet, kauko-ohjaus- ja kaukomittausyhteydet sekä relesuojauksen viestijohdot (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 480). Muiden paitsi relesuojausvirtapiirien voidaan sallia häiriintyvän maasulun aikana yhteyden pysyvää katkeamista lukuun ottamatta. Suoraan maadoitetussa verkossa maasulkuvirta palaa maadoitettujen muuntajien tähtipisteisiin, jolloin maasulkukohdan lisäksi myös sähköaseman potentiaali nousee maasulussa. Potentiaali pienenee aseman läheisyydessä loivemmin kuin voimajohdoilla sähköaseman laajan maadoituk- sen vuoksi. Viestijohdon ulottuessa neutraalin potentiaalın alueelle, esiintyy sähköase- man potentiaali jännitteenä aseman maadoituksen ja asemalta lähtevän viestijohdon päätepisteen välillä. Tätä ilmiötä voidaan ehkäistä muun muassa viestijärjestelmän eris- tämällä aseman maadoituksesta, pitkittäiskuristimella tai kompensoimalla esimerkiksi neutraloimismuuntajalla. Tässä työssä ei perehdytä tarkemmin viestiyhteyksien suojaus- menetelmiin. Esimerkiksi Pesonen (1989) on käsitellyt julkaisussaan erilaisia

suojausmenetelmiä hyvin kattavasti. Sähköaseman sisäiset viestiyhteydet eivät vaadi suojaustoimenpiteitä potentiaalien kannalta, mikäli sähköaseman maadoitusjärjestelmä on rakennettu asianmukaisesti.

4.5.2 Yliaaltojen aiheuttamat häiriöjännitteet

Häiriöjännitteet ovat telejohdolla johtimien välisiä jännitteitä. Häiriöjännitteitä syntyy myös normaalikäytössä 50 Hz:n taajuudella, koska telejohtimien etäisyydet voimajohdosta vaihtelevat. Johtimien maakapasitanssi- ja vuotokonduktanssieroista johtuen häiriöjännitteiden syntymistä ei voida kokonaan poistaa pelkällä vuorottelulla. Telejohdoilla häiriöjännitteet ilmenevät tavallisimmin äänihäiriöinä, joiden suuruus riippuu suurjännitejohdon yliaalloista (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 482). Äänihäiriöiden tarkastelussa käytetään viestijohdon poikittaista psfometrista jännitettä U_p (tai virtaa I_p), joka saadaan yhtälöstä

$$U_p = \frac{1}{p_{800}} \sqrt{\sum_{f=50}^{\infty} p_f^2 U_f^2}, \quad (47)$$

missä U_f on jännite taajuudella f ja p_f kyseisen taajuuden painotuskerroin. Painotuskerroimissa painotetaan puhekaistaa eli taajuuksia 0,3–3 kHz eniten. Referenssinä laskelmissa pidetään taajuusarvoa $f = 800$ Hz, jonka painotuskerroin on p_{800} . Sallittu yläraja telejohdon kahden johtimen väliselle psfometriselle jännitteelle normaalikäytössä on 0,5 mV (ITU-T, 2008b, s. 21).

Voimajohdon yliaallot ovat epäsymmetriset, mistä johtuen yliaaltojen häiriövaikutus kasvaa oleellisesti (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 483). Myös voimajohdon ja telejohdon välinen keskinäisimpedanssi suurenee taajuuden kasvaessa, jolloin induktiovaikutuskin voimistuu. Taajuuden kasvu vahvistaa myös kapasitiivisesti kytkeytyviä jännitteitä. Taajuusalueella 0,8–3 kHz olevat yliaallot aiheuttavat eniten äänihäiriöitä, sillä ihmisen

korva reagoi näihin herkimmin. Näitä taajuuksia alemmat yliaallot häiritsevät taas merkittävämmiin sähköverkon komponentteja.

Suuri osa yliaalloista on peräisin tehoelektroniikan käytöstä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 483). Esimerkiksi moottorien ohjauksiin käytettävät tyristori- ja diodisillat syöttävät verkkoon yliaaltovirtoja. Eniten häiriövirtoja aiheuttavat diodisuuntaajat, sillä eri suuntaajat johtavat virran samanaikaisesti, minkä seurauksena yliaaltovirrat laskeutuvat suoraan aritmeettisesti yhteen. Tyristorisuuntaajilla sytytyskulmassa esiintyy enemmän hajontaa ja eri suuntaajista tulevat yliaallot kumoavat osaksi toisiaan. Yliaaltojen esiintymistä voidaan periaatteessa rajoittaa jonkun tietyn halutun taajuuden yläpuolelle tehotransistorien ja pulssinleveysmodulaation avulla.

Myös sähkörata voi syöttää yliaaltoja kantaverkkoon (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1991b, s. 13). Ratajohdon yliaaltovirrat koostuvat vetoyksiköiden kehittämien parittomien (150 Hz, 250 Hz, 350 Hz jne.) yliaaltojen summavirroista. Yleisesti ottaen ratajohdon suurin psfometrinen virta on kaksiraiteisilla radoilla harvoin suurempi kuin 10 A. Yksiraiteisilla radoilla vastaava virta on 7 A. Vilkkaasti liikennöidyillä radoilla virta voi kuitenkin hetkellisesti nousta jopa 15 ampeeriin kahdelle tai kolmelle samansuuntaiselle ratajohdolle jakautuneena. Psfometrasta häiriöjännitettä arvioitaessa indusoivana virtana käytetään edellä mainittuja psfometrisen virran arvoja ratajohtotyyppin reduktiokertoimella kerrottuna. Suomessa ratajohdot on varustettu pääosin niin sanotuilla imumuuntajilla ja paluujohtimilla maaperän huonon johtavuuden vuoksi (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 472). Paluujohtin on yhdistetty ratakiskoihin noin 2,5 km:n välein, jotta maavirta ei palaisi syöttöasemalle kiskoja ja maata pitkin aiheuttaen laajoja häiriöitä muun muassa televerkossa. Ajo- ja paluujohtimen väliin kytketyn imumuuntajan avulla varmistetaan, että mahdollisimman suuri osa virrasta todella siirtyy paluujohtimeen. Imumuuntaja on periaatteessa virtamuuntaja, jonka avulla paluujohtimeen synnytetään sen omalle jännitehäviölle vastakkaissuuntainen jännite, jonka ansiosta paluujohtimen reaktanssivaikutus kumoutuu. Imumuuntajalla ja paluujohtimella varustetun ratajohdon

reduktiokertoimen arvioiminen on haastavaa, minkä vuoksi häiriöjännitelaskelmissa pyritään suosimaan kokemusperäistä tietoa (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1991b, s. 18).

Yliaaltojen vaikutukset voivat ilmetä hyvinkin kaukana niiden syöttölähteestä (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 484). Koska virran särö näkyy normaalisti vain hyvin pienenä jännitehäviönä, ei verkon jännitteestä yleensä voida havaita yliaaltoja ilman tarkkaa analyysia. Jännite voi säröytyä huomattavasti esimerkiksi kohdassa, jossa johdon reaktanssi ja kompensoimiskondensaattorin kapasitanssi joutuvat resonanssiin jollakin johdolla kulkevalla yliaallolla. Säröytyneet jännitteet voivat vahingoittaa kulutuskojeita ja kasvattaa viestijohtoihin syntyviä jännitteitä huomattavasti. Helpoiten yliaaltojen häiriövaikutusta voidaan eliminoida estämällä niiden pääsy verkkoon esimerkiksi erilaisilla suodattimilla. Suodattimia voidaan rakentaa tietyille taajuuksille viritetyiksi imupiireiksi tai ylipäästösuodattimiksi.

4.5.3 Sähköasemien sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähköasemien sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvät ongelmat aiheutuvat pääasiassa suurjänniteasennuksista tai -laitteista (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 486). Sähkömagneettista yhteensopivuutta voidaan parantaa emissiota vähentämällä ja immuniteettia kasvattamalla. Vahvavirta-asennusten emissiota on kuitenkin haastava vähentää sähköaseman rakentamisen jälkeen, minkä vuoksi sähkömagneettisen yhteensopivuuden toimenpiteet kohdistetaan yleensä immuniteettiin eli häiriösietoisuuteen. Sähköasemilla näitä toimenpiteitä ovat muun muassa toisilaitteiden, kaapelien sekä asennus- ja maadoitustapojen valinnat. Älykkäiden sähköverkkojen myötä sähköasemilla käytettävien ohjaus- ja mittauslaitteiden on toimittava entistä tarkemmin häiriöllisessä ympäristössä (Tarmizi ja muut, 2019). Siksi sähköasemien sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvät tutkimukset ovatkin ajankohtaisempia kuin koskaan.

Tyypillisimpiä häiriölähteitä sähköasemilla ovat 110–400 kV:n erottimien ja katkaisijoiden ohjaus, laitteiden eristysviat, sähkö- ja magneettikentät, virtojen katkaisun aiheuttamat kipinöinnit, sähköstaattiset purkaukset, muista sähkölaitteista siirtyvät häiriöt

sekä salamaniskut asema-alueelle (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 486–487). Häiriöt voivat siirtyä laitteistoon joko suoraan säteilemällä tai kahden laitteen väliseen kaapeliin kapasitiivisesti tai induktiivisesti kytketyillä. Säteilöhäiriöitä voivat aiheuttaa mitkä tahansa radioaaltoja emittoivat järjestelmät, kuten matkapuhelimet ja radiopuhelimet. Yleensä säteilöhäiriöt eliminoidaan laitteen koteloinnilla.

Induktiivisesti siirtyvät häiriöt ovat useimmiten peräisin erotinohjauksista, mutta toisaan myös katkaisijaohjauksista (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 487). Jopa pienjännitekytkimet voivat aiheuttaa häiriöjännitepiikkejä induktiivista kuormaa katkaistessaan. Erottimet ovat katkaisijoita tyypillisempiä häiriölähteitä, sillä suurin osa erottimista toimii normaalipaineisessa ilmassa esimerkiksi öljyn sijaan. Ilman sähkölujuus on selkeästi huomattavasti muihin kytkinlaitteiden avausvälissä käytettäviin väliaineisiin verrattuna. Induktiivisesti siirtyvien häiriöiden taajuusalue on hyvin laaja ulottuen 0,5 Hz:stä jopa 5 MHz:iin.

Eriyisesti kaasueristeisten laitosten (GIS-laitosten) erotintoiminnoissa syntyy suurtaajuisia transienttijännitteitä, jotka etenevät kauas laitoksen aaltoputkimaisen rakenteen vuoksi (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 487–488). Induktiivisesti syntyviä transienttijännitteitä voidaan vaimentaa yhtenäisellä metallivaipalla, joka maadoitetaan kaapelin molemmista päistä. Transienttijännitteitä voidaan vaimentaa lisäksi erilaisilla välireleillä, erotusmuuntajilla, optisella erotuksella, valokaapeleiden käytöllä, suodattamisella ja yli-jännitesuojilla.

Vaipan kytkentäimpedanssi vaikuttaa siihen, miten suuri jännite-ero kaapelin vaipan ja johtimen välille syntyy (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 488–489). Kytkentäimpedanssin suuruuteen sen sijaan vaikuttaa vaipan tiiviys ja paksuus. Yhtenäisestä metallifoliosta valmistetulla konsentrisella vaipalla varustetulla kaapelilla on pienempi kytkentäimpedanssi kuin harvasta kuparipunoksesta valmistetulla vaipalla varustetulla kaapelilla. Ensimmäisenä mainittuun syntyy siis pienempi häiriöjännite kuin jälkimmäiseen. Eriyisesti suurilla taajuuksilla yhtenäinen metallivaippa on hyvä, sillä suurtaajuinen häiriövirta

pakkautuu virranahdon vaikutuksesta vaipan ulkopinnalle samalla, kun signaalivirta keskittyy sisemmän johtimen ulkopinnalle ja ulomman johtimen sisäpinnalle.

Kapasitiivisesti siirtyviä häiriöjännitteitä ovat pääosin kosketuskipinöinnin yhteydessä syntyvät suurtaajuiset purskeet sekä käyttötaajuiset häiriöt (Elovaara & Haarla, 2011a, s. 489). Häiriintyvän kaapelin vaipan maadoitusvastuksen ollessa pieni, vaippa johtaa kapasitiivisen häiriövirran kaapelin sisemmän johtimen ohi. Suurilla taajuuksilla voi olla tarpeellista maadoittaa vaippa monesta pisteestä, mutta pienillä taajuuksilla riittää yleensä vain yhden pisteen maadoittaminen. Vaipattomassa kaapelissa häiriö siirtyy häiriölähteestä häiriintyvään kohteeseen jännitteenjakajaperiaatteella.

5 Vaarajännitekohteet

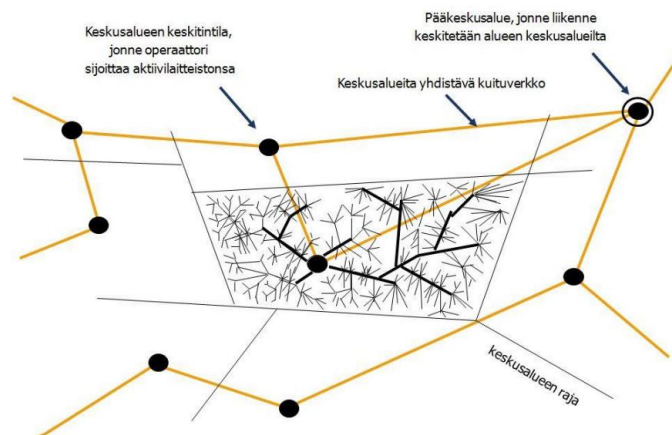
Voimajohdot aiheuttavat vaarajännitteitä johtaviin rakenteisiin, joista tärkeitä esimerkkejä ovat televerkot ja maakaasuputkistot. Jotta vaarajännitteitä voidaan tehokkaasti arvioida, on tärkeää tunnistaa erilaisten vaarajännitekohteiden rakenteet ja niihin syntyvien vaarajännitteiden vaikutukset. Toisaalta on hyvä huomioida myös viimeaikaiset trendit ja tulevaisuuden näkymät, esimerkiksi televerkkojen osalta. Tele- ja maakaasuputkiverkkojen lisäksi voimajohdot voivat aiheuttaa vaarajännitteitä esimerkiksi rinnakkaisiin voimajohtoihin, rautateihin tai muihin johtaviin rakenteisiin, kuten aitoihin. Tässä luvussa perehdytään erilaisiin vaarajännitekohteisiin ja niihin syntyvien vaarajännitteiden vaikutuksiin.

5.1 Televerkko

5.1.1 Televerkon rakenne

Televerkon fyysinen rakenne koostuu keskitinalueista, keskittimistä, tilaajajohdoista ja keskitinalueita yhdistävästä kuituverkosta kuvan 17 mukaisesti. Perinteinen puhelinverkko on säteittäinen, jolloin keskittimeltä lähtee oma johto jokaiselle käyttäjälle eli tilaajalle. Näitä johtoja kutsutaan tilaajajohdoiksi. Tilaajajohdot ovat käytännössä aina oman keskusalueen rajojen sisäpuolella, kun taas eri operaattoreiden valokuituyhteyksiä voi kulkea keskusalueiden rajojen yli.

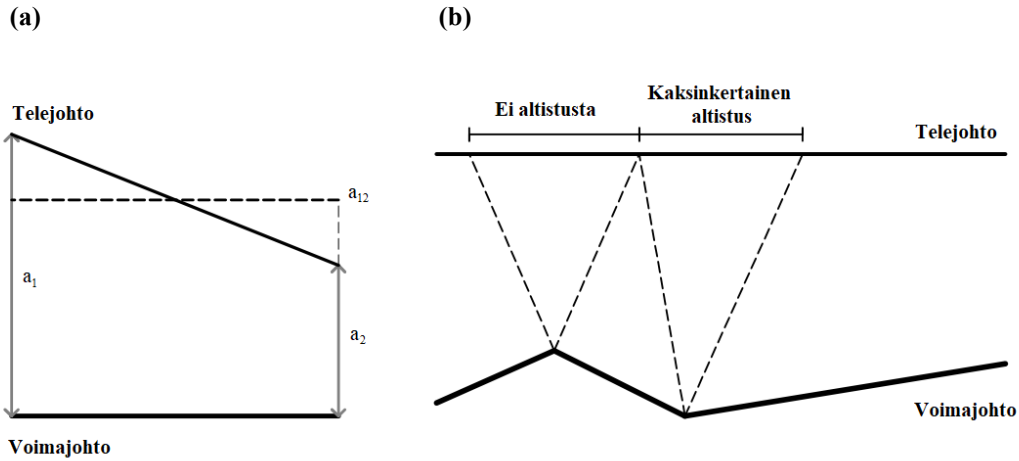
Uutta televerkkoa rakennetaan nykyään useimmiten valokuidulla (Väljä, 2011, s. 33). Nykyään lähes kaikki keskittimien väliset yhdysjohdot ovat valokuitukaapeleita. Tilaajajohdot ovat sen sijaan vielä kuparisia joissain paikoissa. Etenkin maaseudulla kupariset maakaapelit tai ilmajohdot ovat vielä yleisiä. Ilmajohdot ovat vaarajännitteiden kannalta tärkeimpiä tarkastelukohteita. Kupariyhteyksissä vaarajännitteiden lisäksi ongelmaksi muodostuu tiedonsiirron kasvu, johon kuparikaapeleiden kapasiteetti ei riitä. Siksi valokuitua käytetään lähes poikkeuksetta uusissa asennuksissa. Kuparin määrä televerkossa vähennee siis jatkuvasti.



Kuva 17. Puhelinverkon fyysinen rakenne: keskusalue, tilaajajohdot ja keskusalueita yhdistävä kuituverkko (Väljä, 2011, s. 32).

5.1.2 Televerkkoon indusoituvat jännitteet

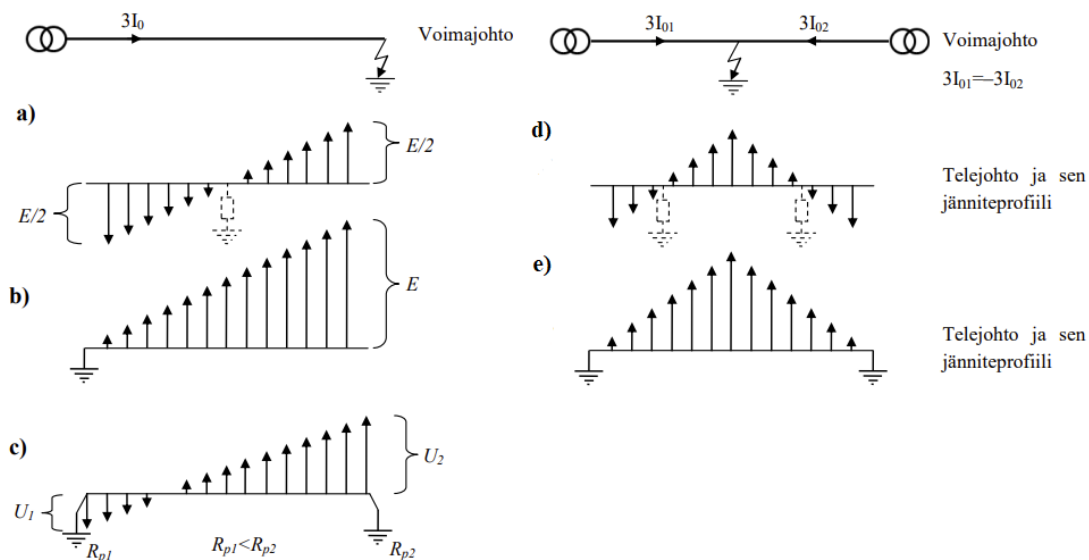
Telejohto voi olla voimajohtoon nähden kohtisuora, yhdensuuntainen tai tietyssä kulmassa näiden väliltä. Mikäli telejohto on kohtisuorassa voimajohtoon nähden, ei kyseiseen telejohtoon synny induktiovaikutusta. Voimajohtoon nähden yhdensuuntaisen telejohdon tapauksessa indusoituneen smv:n määrittäminen on usein yksinkertaista, sillä telejohdon pituus ja etäisyys voimajohdosta on helppo määrittää. Usein telejohdot eivät kuitenkaan ole täysin yhdensuuntaisia voimajohdon kanssa, jolloin indusoituneen smv:n määrittämisessä joudutaan telejohto jakamaan niin sanottuihin osaprojektioihin, kuten kuvassa 18 (Pesonen, 1968, s. 5–6). Osaprojektoiden etäisyys voimajohdosta on niiden päätepisteiden geometrinen keskietäisyys. Esimerkiksi kuvassa 18a osuuden a_1 – a_2 etäisyys voimajohdosta on $a_{12} = \sqrt{a_1 a_2}$. Yhdensuuntaisten osien pituudet valitaan siten, ettei osan maksimietäisyys a_1 ylitä kolminkertaista minimietäisyyttä a_2 voimajohdosta. Mikäli voimajohto tekee mutkia telejohtoon nähden, voidaan joissain tapauksissa induktiovaikutus jättää huomioimatta. Toisaalta joissain tilanteissa se täytyy laskea kahteen kertaan, kuten kuvasta 18b nähdään.



Kuva 18. Vinon telejohdon osaprojektio (a) ja induktiovaikutus voimajohdon tehdessä mutkan (b) (muokattu lähteestä Pesonen, 1968, s. 17).

Telejohtoihin indusoituva pitkittäinen smv ei sellaisenaan edusta jännitettä maahan nähden (Pesonen, 1968, s. 12). Pitkittäinen smv on johdon päiden välinen potentiaaliero pituussuunnassa, jolloin johdon varrella jännite maahan nähden voi vaihdella hyvinkin paljon. Kuvassa 19 on esitetty telejohdon eri kohtien jännite maahan nähden erilaisissa maadoitustilanteissa. Tilanteissa *a–c* maasulku tapahtuu telejohto-osuuden ulkopuolella ja tilanteissa *d–e* telejohdon keskipaikkeilla. Mikäli telejohto on maasta eristetty ja koko pituudeltaan voimajohdon kanssa yhdensuuntainen, voidaan sen maakapasitanssi ja vuotokonduktanssi keskittää keskikohtaan, jolloin telejohdon voidaan ajatella olevan maadoitettu keskeltä, kuten kuvassa 19a. Tällöin jännite johdon päissä on puolet smv:stä ja keskellä johtoa nolla. Johtoa kosketettaessa on saatava jännite itse asiassa vielä pienempi kuin $E/2$, sillä ihmiskehon vastus on usein pieni maakapasitanssin ja vuotojohtokyvyn edustamaan impedanssiin verrattuna.

Kuvassa 19b telejohto on maadoitettu vain toisesta päästä, jolloin jännite avoimessa päässä on smv:n suuruinen. Tilanne vastaa esimerkiksi ylijännitesuojien syttymistä johdon toisessa päässä. Jännitekuvio lähenee tätä tapausta myös silloin, kun telejohto ulottuu voimajohdon vaikutusalueen ulkopuolella niin kauas, että suurin osa maakapasitanssista sijaitsee yhdensuuntaisen osan ulkopuolella. Tämä tapaus on pahin mahdollinen,



Kuva 19. Telejohdon jänniteprofiilit eri maadoitus- ja maasulkutilanteissa (muokattu lähteestä Väljä, 2011, s. 38–40).

minkä vuoksi se on myös induktiotarkastelujen kannalta rajoittavin. Päätelaitteiden suojaamiseksi riittää usein vain johdon päihin asennetut ylijännitesuojat. Kuvassa 19c telejohto on maadoitettu molemmista päistään esimerkiksi ylijännitesuojien kautta. Tällöin smv saa telejohdossa aikaan virran, joka maadoitusten R_{p1} ja R_{p2} kautta maahan kulkiesaan saa aikaan maadoitusresistanssiin verrannollisen jännitteen.

Kuvissa 19d ja 19e on esitetty jännitekuvio tilanteessa, jossa maasulku tapahtuu telejohdon keskipaikkeilla ja molemmista suunnista tulevat epäsymmetriavirrat ovat yhtä suuret (Pesonen, 1968, s. 14). Kuvassa 19d telejohto on eristetty ja kuvassa 19e molemmista päistä maadoitettu. Telejohdon puolivälissä tapahtuva maasulku ei siis aiheuta vaaraa johdon päissä oleville päätelaitteille. Jännite maahan nähden on alle 50 % verrattuna koko telejohdon smv:aan maasulun tapahtuessa osuuden ulkopuolella. Mikäli kyseessä on esimerkiksi kahden välisuojavaikan välinen osuus, naapuriosuuksien aiheuttamat maadoitusjännitteet nostavat jännitettä kyseisissä välisuojavaikoissa. Tällöin kuvassa 19e jänniteprofiili alkaisi nolaa ylempää. Lyhyen osuuden keskipaikkeille sattuva maasulku on kuitenkin epätodennäköinen.

Induktiovaikutukset telelaitteistossa voidaan jaotella vaarallisiin, vahingollisiin ja häiritseviin (ITU-T, 2008c). Tilanne on vaarallinen, kun häiriö voi aiheuttaa telelaitteistoon koskevalle henkilölle vaaratilanteen eli useimmiten sähköiskun. Vahingollinen tilanne määritellään häiriöksi, joka aiheuttaa pysyvää laadun heikkenemistä. Tilanne on vahingollinen silloin, kun vika ei poistu telelaitteistosta indusoivan vaikutuksen poistuessa. Vika voi ilmetä tällöin esimerkiksi suurien virtojen aiheuttamina lämpövaurioina laitteistoissa tai kaapeleissa. Liian suuret jännitteet voivat myös aiheuttaa esimerkiksi läpilyöntejä. Valokuitukaapeleiden metallivaipoissa suuret virrat voivat polttaa valokuituja käyttökelvottomiksi. Tällaisia virtoja ei kuitenkaan synny voimajohdon induktiovaikutuksesta (Väljä, 2011, s. 41).

Telejohdoissa häiriöt ilmenevät esimerkiksi kohinana, signaalien vääristymisenä ja digitaalisen tiedonsiirron virheinä (ITU-T, 2008c). Kupariset tilaajajohdot siirtävät analogista signaalia, minkä vuoksi ne ovat hyvin häiriöherkkiä. Valokuitukaapeleiden tiedonsiirtoon sähkömagneettiset kentät eivät vaikuta. Yleensä häiriöt ovat kuitenkin sellaisia, että ne poistuvat niiden aiheuttajan poistuessa.

5.2 Maakaasuputket

5.2.1 Maakaasuputkiston rakenne

Valtion omistama Gasgrid Finland oy vastaa maakaasun siirtoverkosta Suomessa (Gasgrid, 2022). Suomen maakaasuverkko sijoittuu pääosin Etelä- ja Kaakkois-Suomeen. Korkeapaineinen 1150 km pitkä siirtoputkisto koostuu teräsputkista, joista suurin osa on pinnoitettu polyeteenimuovilla. Siirtoputkistoon kuuluu lisäksi noin 60 km matalapaineista putkistoa. Osana siirtoputkistoa ovat lähelle asiakasrajapintaa sijoitetut paineen vähennysasemat, joiden tehtävänä on säätää kaasun painetaso asiakkaalle sopivaksi. Paineen vähennysasemilta siirretään kaasua eteenpäin jakeluverkossa, jossa painetaso ja putkikoko ovat pienempiä. Suuri osa jakeluverkkojen putkistosta on muovista, mutta myös teräs- ja valurautaputkia käytetään joissain paikoissa. Vuoden 2019 lopussa Suomen jakeluputkiston pituus oli 1997 km (Suomen Kaasuyhdistys, 2019).

Maakaasuputket ovat pitkiä sähköisesti johtavia rakenteita, minkä vuoksi niihin voi syntyä samoja vaarajännitteitä kuin esimerkiksi kuparisiin telejohtoihin (Jacquet ja muut, 1995, s. 2). Myös maakaasuputkilla induktiiviset vaarajännitteet ovat yleisimpiä, sillä niiltä on vaikeampi suojautua. Kapasitiivisilta vaarajännitteiltä suojaudutaan sijoittamalla putket maan alle ja konduktiivisia vaarajännitteitä ehkäistään sijoittamalla voimajohdon pylväs maadoituksineen riittävän kauas maakaasuputkesta. Voimajohdon ja kaasuputken väliset vaadittavat etäisyydet on määritelty standardissa SFS 5717 (Maakaasun siirtoputkiston sijoittaminen suurjännitejohdon tai -kytkinlaitoksen läheisyyteen) (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 1992, s. 4).

5.2.2 Maakaasuputkiin indusoituvat jännitteet

Sähkömotorisen voiman indusoituminen kaasuputkeen on periaatteeltaan sama kuin telejohtojen tapauksessa (Jacquet ja muut, 1995, s. 17–18). Ongelmaksi muodostuvat maasta eristetyt metalliset siirtoputket, joihin pitkittäinen smv pääsee indusoitumaan. Muovisia jakeluverkon putkia induktiovaikutus ei koske. Vaarajännitteitä voi syntyä sekä normaalikäytössä että maasulkutilanteessa, mutta yleensä maasulkutilannetta pidetään vakavimpana. Voimajohdon tilan lisäksi induktiovaikutus riippuu voimajohdon ja putken välisestä etäisyydestä, altistuspituudesta ja voimajohdon tyypistä. Altistuspituudella tarkoitetaan pituutta, jolla voimajohto ja kaasuputki kulkevat induktiovaikutukselle merkittävällä etäisyydellä toisistaan. Induktiovaikutusta pidetään merkittävänä, mikäli indusoituva sähkömotorinen voima ylittää arvon $10 \frac{\text{V}}{\text{km kA}}$. Suomessa tämä vastaa maksimissaan noin 10 kilometrin etäisyydellä toisistaan olevia kaasuputkia ja voimajohtoja (Väljä, 2011, s. 43).

Maasulun aikana kaasuputkiston metallisiin osiin voi siirtyä kosketusjännitteitä tai potentiaaleja, joiden vaikutukset on otettava huomioon kaasuputken turvallisen käytön varmistamiseksi. Standardin SFS 5717 (Suomen Standardisoimisliitto SFS, ry., 1992, s. 3–4) mukaan normaalin käytön aiheuttama kosketusjännite ei saa ylittää 25 V kaasuputkiston paljaissa ja kosketeltavissa osissa. Lisäksi vähintään 110 kV:n yksivaiheisen maasulun

aiheuttama lyhytaikainen kosketusjännite ei saa ylittää arvoa $\frac{1000}{\sqrt{t/s}}$ V, jossa t on maasulun kesto aika sekunteina. Kosketusjännitteelle voidaan sallia myös tähän nähden 1,5-kertainen arvo, mikäli standardissa määrättyt etäisyydet maakaasuputkiston ja 110 kV:n sähkölaitteiston välillä täyttyvät. Raja-arvo on 100 V, mikäli yksivaiheista maasulkua ei kytketä pois itsetoimivasti.

Maakaasuputkistoon indusoituvat jännitteet voivat aiheuttaa vaaraa putken lähistöllä oleskeleville tai työskenteleville ihmisille ja vahingoittaa maakaasuputkea tai sen erityistä (Jacquet ja muut, 1995, s. 3). Kosketeltavia osia kaasuputkessa ovat katodisen suojausjärjestelmän suoja-asemien ja mittauspisteiden, venttiili- ja kaavinasemien, paineenvähenne- ja ulospuhallusputkien maanpäälliset osat (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 1992, s. 3). Yleensä nämä ovat kuitenkin aidatulla alueella, jonne maallikot eivät pääse. Eristemateriaaleja käytetään erityisesti kohdissa, joissa halutaan erottaa tietyt putkiosat toisistaan. Indusoituneen smv:n aiheuttaman potentiaalieron ollessa erotuskohdassa liian suuri voi eristys rikkoutua. Jännitteet voivat lisäksi rikkoa tai häiritä maakaasuputkeen liitetyjä laitteita. Laitteiden suojaamiseen voidaan käyttää esimerkiksi ylijännitesuojia.

5.3 Muut johtavat rakenteet

Muita voimajohtojen vaara- ja häiriöjännitteille alttiita kohteita ovat muun muassa rinnakkaiset voimajohdot, rautatiet ja erilaiset johtavat rakenteet, kuten metalliaidat. Kahden rinnakkaisen voimajohdon kulkeminen vierekkäin samalla johtokadulla on varsinkin nykyään hyvin yleistä tilantarpeesta ja ympäristösyistä johtuen (Dwivedi ja muut, 1992). Voimajohdot voivat kulkea rinnakkain tai samoissa yhteispylväissä. Vaarajännitteet voivat kytkeytyä joko kapasitiivisesti tai induktiivisesti, ja niiden vaikutukset ovat suurimpia esimerkiksi huoltotyön aikana, jolloin vain toinen rinnakkaisista johdoista on käytössä. Sekä induktiiviset että kapasitiiviset vaarajännitteet ovat riippuvaisia voimajohtojen yhdensuuntaisen osan pituudesta, jolloin vaarajännitteet ovat sitä suurempia mitä pidemmän matkan voimajohdot kulkevat rinnakkain. Luonnollisesti myös voimajohtojen ja

pylväiden keskinäinen geometria vaikuttaa syntyvien vaarajännitteiden suuruuteen. Induktiivinen vaarajännite on riippuvainen voimajohdon virrasta, kun taas kapasitiiviseen vaarajännitteeseen vaikuttaa voimajohdon jännite (Horton & Wallace, 2008). Voimajohtojilla työskenneltäessä tulee kiinnittää erityistä huomiota työturvallisuuteen, sillä syntyvät vaarajännitteet ovat pahimmillaan hengenvaarallisia. Esimerkiksi Costean ja muiden (2014) mukaan normaalikäytössä olevasta voimajohdosta sen rinnalla kulkevaan ”kylmänä” olevaan voimajohtoon kapasitiivisesti kytkeytyvä jännite voi olla suuruudeltaan jopa useita kilovoltteja.

Maasulun aikana vaarallisia potentiaaleja ja kosketusjännitteitä voi siirtyä myös rautatien kosketeltaviin osiin. Esimerkiksi laukaisuajalla $t = 0,2$ s saa kiskopotentiaalinen aiheuttama kosketusjännite olla enintään 645 V (Liikennevirasto, 2018, s. 84). Rautateiden ja voimajohtojen suunnitteluvaiheissa pyritään noudattamaan tiettyjä turvaetäisyyksiä pylväiden maadoitusten ja rautatien välillä. Voimajohtojen ja sähköasemien maadoitukset eivät saa olla alle 20 m etäisyydellä rautatien rakenteista tai alle 5 m etäisyydellä Ratahallintokeskuksen kaapeleista (Ratahallintokeskus, 2004, liite 4). Vaikka rautatie pyritään pitämään erillään ulkopuolisista maadoituksista, voi vaarajännite silti päästä järjestelmään jonkin galvaanisen yhteyden kautta. Vaarallisia potentiaalieroja ei kuitenkaan pääse syntymään radan potentiaalintasauksen vuoksi.

Pitkiin metallisiin aitoihin tai muihin johtaviin rakennelmiin, kuten seiniin ja kattoihin, kytkeytyville jännitteille ei ole suoraan määritelty raja-arvoja. Tosin standardin SFS-EN 50341-1 mukaan kaikki vaaralliset ja häiritsevät vaikutukset on estettävä, mikä tarkoittaa usein käytännössä kohteiden riittävää maadoittamista (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., 2014, s. 92). Esimerkiksi aitoihin tai muihin vastaaviin rakenteisiin syntyvät vaarajännitteet ovat hyvin harvinaisia, minkä vuoksi niistä on hyvin vähän edes käytännön esimerkkejä. Esimerkkejä voi lukea esimerkiksi Väljän (2011, s. 44–45) diplomityöstä.

6 Laskentatyökalu 110 kV:n sähköverkon vaarajännitelaskelmiin

Tämän diplomityön eräänä tavoitteena oli luoda laskentatyökalu 110 kV:n sähköverkon vaarajännitelaskelmiin. Laskentatyökalu toteutettiin Microsoftin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Luvussa 4 esitetyistä vaarajännitteistä laskentatyökaluun ei ole sisällytetty kapasitiivisten vaarajännitteiden laskentaa, sillä sitä ei vaadita esimerkiksi voimajohtojen vaarajänniteselvityksissä. Laskentatyökalu on kolmiosainen sisältäen sähköaseman maadoitusjännitteen, voimajohdon maapotentiaalien ja induktiovaarajännitteiden laskennan. Tässä luvussa esitellään lyhyesti laskentatyökalun toimintaa.

6.1 Sähköaseman maadoitusjännite

Sähköaseman maadoitusjännitteen laskentaan laskentatyökalussa sovelletaan sivulla 48 esitettyä yhtälöä 26, jolla voidaan laskea maadoitusjännite tapauksessa, jossa sähköasemaa syöttää useampi johto. Yhtälön 26 mukaisesti lähtötietoina tarvitaan siis kaikkien sähköasemaa syöttävien johtojen yksivaiheiset maasulkuvirrat $3I_0$ ja niiden ukkosjohtimien reduktiokertoimet r_i sekä aseman maadoitusimpedanssi Z_e .

Laskentatyökaluun on myös rakennettu mahdollisuus maadoitusimpedanssin Z_e määrittämiselle maadoitusimpedanssimittauksesta saatavien tulosten perusteella. Mittauksessa sovelletaan yleensä niin sanottua napaisuudenvaihtomenetelmää, jossa virran syöttöön käytetään kahta vastakkaisvaiheista, mutta amplitudiltaan yhtä suurta jännitettä. Tällöin mittaus suoritetaan erikseen molemmilla polariteeteilla, jolloin tuloksina saadaan erinapaiset virrat ja jännitteet (I_a, I_b, U_a, U_b). Mittauksessa esiintyvät mahdolliset häiriöjännitteet ja -virrat (U_0 ja I_0) saadaan oikosulkemalla syöttömuuntajan ensiö. Osoitinlaskennan ja trigonometrian avulla voidaan maadoitusjännitteelle U_e ja mittausvirralle I_e johtaa seuraavat yhtälöt (Pesonen, 1989, s. 58):

$$U_e = \sqrt{\frac{U_a^2 + U_b^2}{2} - U_0^2} \quad (48)$$

ja

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2}{2} - I_0^2}, \quad (49)$$

joista saaduilla arvoilla voidaan edelleen laskea maadoitusimpedanssi sivulla 29 esitetyn yhtälön 12 mukaisesti.

Maadoitusimpedanssin lisäksi laskentatyökaluun syötetään kaikkien sähköasemaa syöttävien johtojen yksivaiheiset maasulkuvirrat ja niiden ukkosjohtimien reduktiokertoimet. Näiden tietojen perusteella ohjelma laskee vaikuttavan kokonaismaasulkuvirran ja sitä kautta sähköaseman maadoitusjännitteen U_e . Laskentatyökalu vertailee lisäksi laskettua maadoitusjännitteen arvoa Standardin SFS 6001 ja Viestintäviraston määräyksen 43F/2015M asettamiin raja-arvoihin ja ilmoittaa, mikäli jokin raja-arvo ylittyy. Liitteessä 1 on esitetty esimerkki laskentatyökalun maadoitusjännitteen laskennasta. Laskentatyökaluun on rakennettu mahdollisuus myös eri laukaisuportaiden aiheuttaman maadoitusjännitteen laskentaan samanaikaisesti, kuten liitteestä nähdään.

6.2 Maapotentiaalilaskenta

Maapotentiaalilaskenta on hyvin tärkeä osa uuden tai saneerattavan voimajohdon vaarajänniteselvityksiä. Maapotentiaalilaskennan tarkoituksena on määrittää pylväiden maadoitusjännitteet ja potentiaalit eri etäisyyksillä ja muodostaa lasketuista arvoista potentiaaliprofiilikäyrät. Laskettuja arvoja verrataan standardeissa ja määräyksissä esitettyihin raja-arvoihin, ja tarpeen vaatiessa tehdään toimenpide-ehdotuksia.

Tässä työssä tehdyn laskentatyökalun lähtötietoina tarvitaan ukkosjohtimien impedanssi ja reduktiokerroin, mahdollisten voimajohtoon liittyvien sähköasemien

maadoitusimpedanssit, pylväiden lukumäärä, maadoitusresistanssit ja jänneiden pituudet sekä voimajohdon yksivaiheiset maasulkuvirrat ja laukaisuajat. Voimajohdon suunnitteluvaiheessa, kun pylväiden maadoitusresistansseja ei vielä voida tarkkaan mitata, voidaan hyödyntää myös laskentatyökaluun rakennettua maadoitusresistanssin laskentaa, joka laskee suunniteltuihin elektrodipituuksiin ja maaperän resistiivisyyteen perustuen pylvään odotettavissa olevan maadoitusresistanssin. Maadoitusresistanssin laskennassa hyödynnetään taulukoissa 3–4 (sivut 25–26) esitettyjä yhtälöitä.

6.2.1 Ketjuimpedanssi ja vikavirran jakautuminen

Jotta yksittäisen pylvään maadoitusjännite ja potentiaalin jakautuminen voidaan laskea mahdollisimman tarkasti, on ukkosjohtimien ja pylväismaadoitusten muodostaman impedanssiketjun jokainen resistanssiarvo otettava huomioon. Taulukkolaskentaohjelmalla ketjuimpedanssien laskeminen onnistuu vaivattomasti. Kuvassa 11 (sivulla 51) vasemmalta päin näkyvä impedanssi $Z_{a,j}$ muodostuu kaikkien vasemmalla olevien pylväismaadoitusten ja ukkosjohtimien muodostamasta tikapuuverkosta. Ensimmäisen pylvään vasemmanpuolinen ketjuimpedanssi $Z_{a,1}$ voidaan siis laskea yhtälöllä

$$Z_{a,1} = Z_{e1} + Z_{u,1}, \quad (50)$$

missä Z_{e1} on sähköaseman maadoitusimpedanssi ja $Z_{u,1}$ ensimmäiselle pylvälle tulevien ukkosjohtimien impedanssi. Loput vasemmanpuoleiset ketjuimpedanssit saadaan yhtälöstä

$$Z_{a,j} = Z_{u,j} + \frac{Z_{a,j-1}Z_{e,j-1}}{Z_{a,j-1} + Z_{e,j-1}}, \quad (51)$$

missä $Z_{u,j}$ on pylvälle j tulevien ukkosjohtimien impedanssi, $Z_{a,j-1}$ edellisen pylvään vasemmanpuolinen ketjuimpedanssi ja $Z_{e,j-1}$ edellisen pylvään maadoitusimpedanssi tai -resistanssi. Oikeanpuoleiset ketjuimpedanssit $Z_{b,j}$ saadaan vastaavasti toisesta suunnasta katsottuna yhtälöillä

$$Z_{b,\text{viim}} = Z_{e2} + Z_{u,\text{viim}}, \quad (52)$$

$$Z_{b,j} = Z_{u,j+1} + \frac{Z_{b,j+1}Z_{e,j+1}}{Z_{b,j+1} + Z_{e,j+1}}, \quad (53)$$

missä $Z_{b,\text{viim}}$ on vasemmalta katsottuna viimeisen pylvään ketjuimpedanssi, Z_{e2} sähköaseman maadoitusimpedanssi ja $Z_{u,\text{viim}}$ viimeiselle pylvälle tulevien ukkosjohtimien impedanssi. Näin jokaiselle pylvälle voidaan laskea tarkat ketjuimpedanssit Z_a ja Z_b , joiden avulla voidaan laskea jokaiselta pylvältä maasulkutilanteessa maahan menevän virran osuus virranjakosäännöllä sivulla 52 esitetyn yhtälön 33 mukaisesti.

6.2.2 Laskennan tulokset

Kun tiedetään pylvältä maahan menevä virta ja pylvään maadoitusresistanssi, voidaan pylvään maadoitusjännite U_e laskea yksinkertaisesti sivulla 47 esitetyllä yhtälöllä 25. Maapotentiaalilaskennassa määritetään myös potentiaalit 20 metrin ja 100 metrin etäisyyksillä pylväistä sivulla 50 esitetyn yhtälön 29 avulla. Laskentataulukkoon määritellään myös laukaisuajoista ja pylväiden ympäristöistä riippuvat standardien ja määräysten asettamat raja-arvot pylväskohtaisesti. Liitteessä 2 on esimerkki ohjelman tekemästä maapotentiaalilaskennasta. Maapotentiaalilaskentataulukkoon voidaan lisätä myös pylväskohtaisia kommentteja ja huomioita, kuten liitteestä nähdään. Laskentatyökalulla voidaan lisäksi muodostaa lasketuista maapotentiaaliarvoista ja raja-arvoista potentiaali-profiili koko johdolle. Liitteessä 3 on esimerkki laskentatyökalun tuottamasta potentiaaliprofiilista. Potentiaaliprofiilin vaaka-akselilla on esitetty pylväsnumerot ja pystyakselilla pylväiden maapotentiaalit voltteina.

6.3 Induktiovaarajännitteiden laskenta

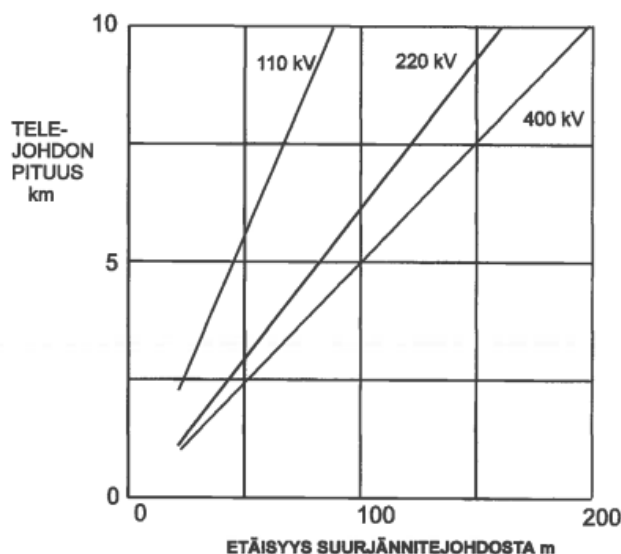
Vaarajänniteselvityksissä huomioidaan sekä normaalikäytössä että maasulkutilanteessa syntyvät induktiovaarajännitteet. Induktiovaarajännitteiden suuruudet riippuvat

monista tekijöistä, minkä vuoksi niiden tarkka laskenta voi olla todella haastavaa. Lisäksi esimerkiksi taajamien lähettyvillä telejohtoja on niin paljon, että jokaiseen telejohtoon indusoituvan smv:n laskenta erikseen veisi liian paljon aikaa. Siksi induktiovaarajännite-tarkasteluissa hyödynnetäänkin usein erilaisia taulukoita, joita tässä työssä tehdyllä laskentatyökalullakin voidaan muodostaa.

6.3.1 Normaalikäytön induktiovaarajännitteet

Voimajohdon normaalikäytössä indusoituvaa sähkömotorista voimaa voidaan arvioida sivulla 62 esitetyllä yhtälöllä 38. Indusoituvan smv:n laskemiseksi tarvitaan lähtötietoina siis tarkasteltavan telejohdon etäisyydet vaihejohtimista b_1 – b_3 sekä voimajohdon vaihevirta I . Etäisyydet b_1 – b_3 voidaan laskea, jos tiedetään tele- ja voimajohdon välinen etäisyys, vaihejohtimien korkeus ja vaihejohtimien väliset etäisyydet. Laskentatyökalu on rakennettu siten, että syöttämällä tiedot vaihejohtimien välisistä etäisyyksistä ja korkeuksista ohjelma laskee etäisyydet b_1 – b_3 eri tele- ja voimajohdon välisillä etäisyyksillä. Samoin eri etäisyyksille voidaan laskea indusoitunut smv pituusyksikköä kohden. Koska normaalikäytössä indusoituvaa smv saa olla korkeintaan 60 V, voidaan eri tele- ja voimajohdon välisille etäisyyksille laskea tele- ja voimajohdon suurin sallittu yhdensuuntainen pituus. Liitteessä 4 on esitetty esimerkkilaskelma normaalikäytön induktiovaarajännitteistä. Liitteen esimerkkilaskelmissa lähtöarvoina on arvioitu erään 110 kV:n voimajohdon ominaisuuksia. Laskelman tulokset vastaavat hyvin esimerkiksi Vaara- ja häiriöjännitevaliokunnan (1995, s. 21) esittämiä tuloksia.

Etäisyydet b_1 – b_3 voivat vaihdella paljonkin eri pylvästyypeillä, minkä vuoksi laskennan tulokset ovat vain suuntaa antavia. Kyseisiin etäisyyksiin vaikuttaa lisäksi olennaisesti se, onko telejohto ilmassa vai maassa. Laskentatyökalu toimii kuitenkin hyvänä apuvälineenä normaalikäytössä indusoituvien vaarajännitteiden tarkastelussa, sillä yleensä normaalikäytön induktiovaarajännitteet on tarkasteltu vain Vaara- ja häiriöjännitevaliokunnan (1995, s. 21) esittämän käyrästä avulla. Kyseinen käyrästä on esitetty kuvassa 20. Laskentatyökalun avulla voidaan tarvittaessa tehdä tarkempia laskelmia induktiovaarajännitteistä voimajohtokohtaisilla lähtötiedoilla.



Kuva 20. Telejohdon pituus, jolla indusoituva smv saavuttaa rajajännitteen suurjännitejohdon normaalikäytössä vaihevirralla 1000 A (Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta, 1995, s. 21).

6.3.2 Rajapituuslaskelmat

Koska yksittäisiin telejohtoihin indusoituvien sähkömotoristen voimien määrittäminen on liian aikaa vievää, perustetaan maasulkutilanteessa syntyvien induktiovaarajännitteiden tarkastelu yleensä niin sanottuihin rajapituuslaskelmiin, jotka muodostetaan sivuilla 63 ja 65–66 esitettyjen yhtälöiden 39, 45 ja 46 avulla. Rajapituuslaskelmissa lasketaan, kuinka pitkä voimajohdon kanssa yhdensuuntainen telejohto saa olla eri voima- ja telejohdon välisillä keskinäisillä etäisyyksillä, jotta Viestintäviraston määräyksen 43F/2015M mukainen jännitteen raja-arvo eli rajajännite ei ylitä. Tässä työssä tehdyn laskentatyökäulun rajapituuslaskelmat koostuvat aloitussivusta ja varsinaisista rajapituuslaskelmista.

Kuvassa 21 on esitetty esimerkki rajapituuslaskelmien aloitussivusta. Aloitussivun taulukkoon syötetään harmaisiin sarakkeisiin tarvittavat tiedot keskusalueen nimestä, maksiprojektiosta, rajajännitteestä ja alueella vaikuttavasta vikavirrasta. Maksiprojektilla tarkoitetaan telejohdon suurinta mahdollista voimajohdon kanssa yhdensuuntaista projektia yhdellä keskitinalueella. Koska telejohdot alkavat aina keskittimeltä ja

Keskusalueen nimi	Maksimiprojektio (km)	Keskinäinen etäisyys (m)	Rajajännite (V)	Vikavirta (A)	Luo rajapituuslaskelmat
Alue 1	4,3	2878	650	7500	
Alue 2	6,5	4127	650	7200	
Alue 3	3,4	396	1500	6900	
Alue 4	4,6	731	1500	6600	
Alue 5	3,8	470	1500	6600	
Alue 6	4,2	598	1500	6600	
Alue 7	5,5	1012	1500	6500	
Alue 8	6,3	1220	1500	6300	
Alue 9	8,6	1745	1500	5800	
Alue 10	4,6	615	1500	6100	
Alue 11	7,6	1683	1500	6400	
Alue 12	6,5	1422	1500	6700	
Alue 13	4,3	718	1500	7000	
Alue 14	2,3	1170	650	7300	
Alue 15	2,6	1528	650	7600	

Kuva 21. Esimerkki rajapituuslaskelmien aloitussivusta.

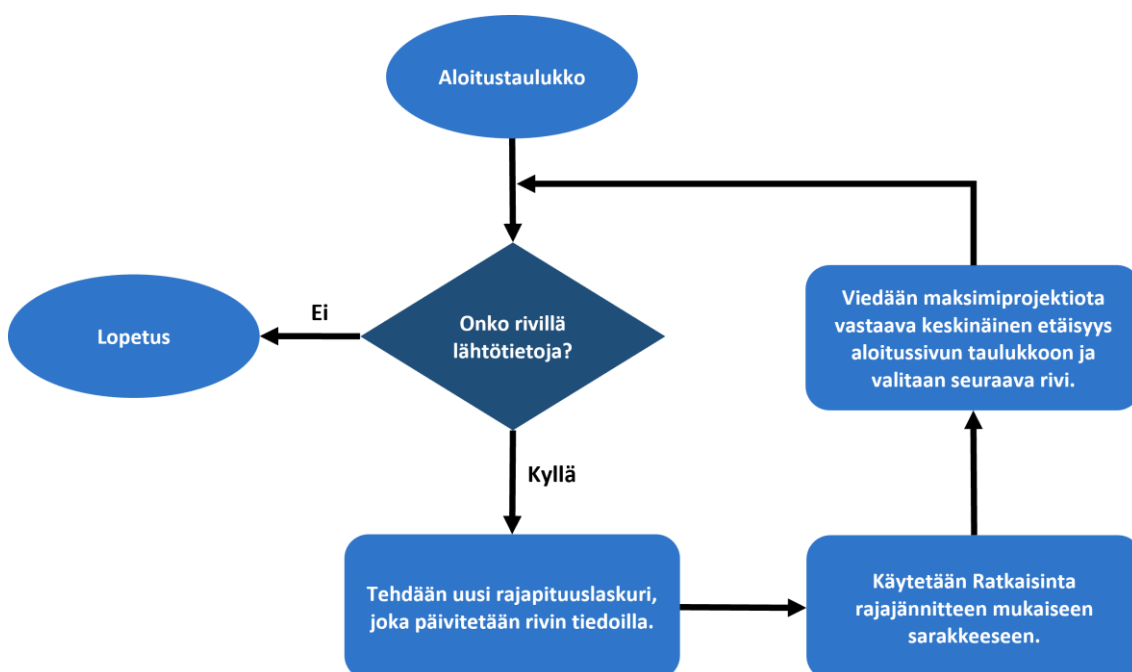
päätyvät keskitinaluerajojen sisäpuolelle, voidaan maksimiprojektio määrittää helposti, jos tiedetään keskittimen sijainti. Mikäli keskittimen sijainnista ei ole varmaa tietoa, voidaan maksimiprojektiona pitää keskitinalueen pituutta. Keskitinalueella vaikuttava vikavirta saadaan sivulla 37 esitetyn kuvan 7 mukaisesta epäsymmetriapiirroksista. Rajajännite on riippuvainen ainoastaan vian laukaisuajasta.

Ohjelma luo taulukon tietojen perusteella jokaiselle keskitinalueelle omat rajapituuslaskelmat liitteen 5 mukaisesti. Taulukon arvojen lisäksi rajapituuslaskelmiin tarvittavia lähtötietoja ovat erilaiset reduktiokertoimet, kuten ukkosjohtimista tai taajamassa sijaitsemista aiheutuvat reduktiokertoimet. Laskelmissa tarvitaan myös maaperän resistiivisyyden arvo, vaikkakin Suomessa tapana on käyttää Suomen maaperän keskiarvoa 2300 Ω m. Annettujen tietojen perusteella ohjelma laskee keskinäisimpedanssin ja indusoituneen sähkömotorisen voiman pituusyksikköä kohden eri voima- ja telejohdon välisillä etäisyyksillä. Ohjelma laskee lisäksi rajajännitteiden perusteella tele- ja voimajohdon yhden-suuntaiset rajapituudet eri etäisyyksillä. Syötetyn maksimiprojektion perusteella ohjelma määrittää automaattisesti maksimiprojektiota vastaavan rajapituuden ja laskee tätä vastaavan keskinäisen etäisyyden ja tuo tämän tiedon aloitussivun taulukkoon

valkoiseen sarakkeeseen. Kuvassa 22 on havainnollistettu rajapituuslaskelmatyökalun toimintaa yksinkertaisella vuokaaviolla.

Koska keskinäisimpedanssin laskentaan käytettäviä yhtälöitä ei voida ratkaista eksplisiit-
tisesti keskinäisen etäisyyden x suhteen, hyödynnetään maksimiprojektiota vastaavan
keskinäisen etäisyyden määrittämisessä Exceliin sisäänrakennettua Ratkaisin-apuohjel-
maa. Ratkaisin on optimointityökalu, joka etsii monimutkaisillekin yhtälöille numeerisen
ratkaisun iteroimalla. Tässä laskentatyökalussa Ratkaisimella iteroidaan ei-negatiivisia
keskinäisen etäisyyden arvoja, kunnes löydetään arvo, jolla maksimiprojektiota vastaava
rajapituus saavutetaan.

Rajapituuden ja sitä vastaavan keskinäisen etäisyyden avulla voidaan teleoperaattoreilta
saaduista kartoista helposti tutkia keskitinaluekohtaisesti, onko rajapituutta vastaavalla
etäisyydellä voimajohdosta telejohtoja, joiden voimajohdon kanssa yhdensuuntainen pi-
tuus ylittää rajapituuden. Tapauksissa, joissa jännite ylittää tai alittaa raja-arvon niukasti,
voidaan suorittaa tarkempia laskelmia telejohtokohtaisesti.



Kuva 22. Vuokaavio rajapituuslaskelmien toiminnasta.

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän diplomityön tarkoituksena oli kirjallisuuteen ja tieteellisiin julkaisuihin perustuen tutkia 110 kV:n sähköverkon vaara- ja häiriöjännitteiden laskentaa ja rakentaa tutkitun teorian pohjalta laskentatyökalu, joka yhdistää tärkeimpien vaarajännitteiden laskennan yhteen ohjelmaan. Aluksi työn luvussa 2 perehdytään yleisesti maadoittamiseen ja maadoituksille asetettuihin vaatimuksiin luvussa 2. Oikein mitoitettut ja asennetut maadoitukset ovat tärkeä osa turvallista ja häiriötöntä sähkönsiirtoa. Luvussa tarkastellaan myös voimajohtojen ja sähköasemien maadoittamisen erityispiirteitä, sillä vaara- ja häiriöjännitteiden laskenta on keskeisesti mukana jo voimajohtojen ja sähköasemien maadoitus-suunnitteluvaiheessa.

Luvussa 3 tutustutaan tarkemmin yksivaiheiseen maasulkuun, joka on 110 kV sähköverkon vikatilanteista yleisin ja siten vaara- ja häiriöjännitteiden kannalta määräävin. Luvussa perehdytään lisäksi erilaisten rakenteiden reduktiovaikutuksiin maasulkutilanteissa. Vaara- ja häiriöjännitteiden kannalta tärkein reduktiovaikutus syntyy voimajohtojen ukkosjohtimista. Ukkosjohtimien materiaalilla, poikkipinta-alalla ja lukumäärällä voidaan vaikuttaa merkittävästi vaara- ja häiriöjännitteiden suuruuteen. Muita reduktiotekijöitä ovat esimerkiksi suurjännitekaapelit, taajamien metalliset putkiverkostot, rautatiekiskot, reduktiojohtimet ja telekaapelit. Erityisesti telejohtoihin indusoituvien vaarajännitteiden laskennassa on tärkeää huomioida esimerkiksi taajaman tai rautatien reduktiovaikutus.

Luvussa 4 perehdytään erilaisten vaara- ja häiriöjännitteiden syntytapoihin, laskentaan ja standardien ja määräysten niille asettamiin raja-arvoihin. Vaara- ja häiriöjännitteet voivat kytkeytyä konduktiivisesti, kapasitiivisesti ja induktiivisesti. Tämän työn pääpaino on vaarajännitteiden osalta erityisesti maadoitusjännitteissä, maapotentiaaleissa ja induktiivaarajännitteissä, sillä ne ovat myös vaarajänniteselvityksissä merkittävimpiä tarkastelun kohteita. Luvussa todetaan myös, että usein vaara- ja häiriöjännitteen ero on vain syntyvän virran tai jännitteen suuruudessa, minkä vuoksi niitä käsitelläänkin yleensä

toistensa yhteydessä. Luvussa esitetään vaarajännitteiden kannalta oleellimmat yhtälöt ja määräykset, joiden pohjalta laskentatyökalu pystyttiin rakentamaan.

Merkittävimpiä vaarajännitekohteita ja niihin syntyvien vaarajännitteiden vaikutuksia käsitellään lyhyesti luvussa 5. Televerkko on pitkään ollut tärkeä tarkastelun kohde vaarajänniteselvityksissä, sillä monilla alueilla on ollut vielä paljon kuparisia tilaajajohtoja. Tulevien vuosikymmenien aikana tämä tulee kuitenkin muuttumaan, kun vanhoja kupariyhteyksiä muutetaan valokuituyhteyksiksi, joihin induktiovaarajännitteet eivät yleisesti aiheuta toimenpiteitä. Muita vaarajännitekohteita ovat esimerkiksi maakaasuputkistot, rinnakkaiset voimajohdot ja erilaiset johtavat rakenteet, kuten pitkät metalliaidat. Toiseksi televerkko on kuitenkin vielä merkittävin yksittäinen vaarajännitekohde.

Luvuissa 2–5 käsitelty kirjallisuuteen, tieteellisiin artikkeleihin ja erilaisiin määräyksiin perustuva teoria luo hyvän ja selkeän pohjan laskentatyökalulle, jota esitellään luvussa 6. Laskentatyökalu luotiin Microsoftin Excel-ohjelmaan ja siihen sisällytettiin kolme osaluuetta: sähköaseman maadoitusjännite, maapotentiaalit ja induktiovaarajännitteet. Laskentatyökalun rakentamisessa hyödynnettiin luvuissa 2–5 käsiteltyä teoriaa sekä aiempaa työkokemusta vaarajännitteiden laskennasta. Sähköaseman maadoitusjännitteen laskentaan sisällytettiin teoriaosuudessa esiteltyjen yhtälöiden lisäksi myös maadoitusimpedanssin laskenta mittaustulosten perusteella, sillä usein sähköaseman maadoitusjännitteen määrittäminen ja maadoitusimpedanssimittaus kuuluvat samaan työhön. Lisäksi maadoitussuunnittelun tueksi laskentatyökaluun sisällytettiin myös pylväiden odotettavissa olevan maadoitusresistanssin laskenta suunniteltujen elektrodipituuksien avulla. Yksi laskentatyökalun tärkeimmistä ominaisuuksista on kuitenkin pylväältä maahan menevän virran määrittäminen maapotentiaalilaskennassa ketjuimpedanssien avulla. Kirjallisuudessa esitetyissä likiarvoyhtälöissä oletetaan muun muassa, että pylväiden maadoitusresistanssit ovat likimain yhtä suuret koko voimajohdon matkalta, mikä harvoin pitää paikkansa etenkin Suomen erityinen maaperä huomioon ottaen. Siksi laskentatyökaluun rakennettiin ketjuimpedanssien tarkka laskenta luvussa 6 esitettyjen yhtälöiden avulla.

Työn alussa esitettiin tutkimuskysymyksiin:

- Miksi vaara- ja häiriöjännitteiden laskenta on tärkeää?
- Mitkä ovat sähköverkon turvallisuuden kannalta keskeisimpiä vaarajännitteitä?
- Voidaanko rakentaa laskentatyökalu, jolla voidaan tehostaa vaarajännitteisiin liittyvää selvitys- ja laskentatyötä?

vastauksena voidaan todeta, että vaara- ja häiriöjännitteiden laskenta on osa voimajohdojen ja sähköasemien kunnossapitoa koko sähköverkon elinkaaren ajan. Sähköverkkojen tuottamat vaara- ja häiriöjännitteet muodostavat keskeisen ongelman jakelu- ja siirtoverkkotekniikassa. Sähköverkkoa rakennetaan ja saneerataan jatkuvasti täyttämään muun muassa turvallisuuteen ja toimitusvarmuuteen liittyvät tarpeet, minkä vuoksi vaara- ja häiriöjännitteisiin liittyvän selvitys- ja laskentatyön tärkeys korostuu yhä enemmän tulevaisuudessa. Sähköverkon turvallisuuden ja siten myös tehtävien vaarajänniteselvitysten kannalta keskeisimpiä vaarajännitteitä ovat maadoitusjännitteet ja maapotentiaalit, kosketusjännitteet sekä induktiovaarajännitteet. Vaarajänniteselvityksissä keskitytään pääasiassa vain näiden vaarajännitteiden tutkimiseen, minkä vuoksi esimerkiksi kapasitiivisesti kytkeytyviä vaarajännitteitä ei sisällytetty työssä muodostettuun laskentatyökaluun.

Diplomityön tavoitteena ollut laskentatyökalun rakentaminen onnistui odotusten mukaisesti. Työssä onnistuttiin rakentamaan laskentatyökalu, joka keskittää tärkeimmät vaarajännitelaskelmat yhteen ohjelmaan, minkä vuoksi se yksinkertaistaa esimerkiksi vaarajänniteselvitysten tekoa. Ketjuimpedanssien, pylvältä maahan menevien virtojen ja pylväiden maadoitusresistanssien laskennan myötä maapotentiaalilaskennasta tulee tarkempaa ja sitä voidaan paremmin hyödyntää muun muassa pylväiden maadoitussuunnittelun tukityökaluna. Lisäksi laskentatyökaluun sisällytetyt makro-ominaisuudet, kuten rajapituuslaskurien ja -taulukon automaattinen täyttö tehostavat selvitystyötä huomattavasti. Varsinkin pitkillä voimajohdoilla, joiden läheisyydessä voi olla jopa kymmeniä eri

keskitinalueita, induktiovaarajänniteselvitysten teko nopeutuu merkittävästi laskentatyökalun käytön myötä.

Tulevaisuudessa laskentatyökalua voidaan vielä jalostaa esimerkiksi luomalla yksityiskohtaisempia laskentaohjelmia muun muassa ukkosjohtimettomille voimajohdoille, joilla on pitkä koko linjan läpimenevä maajohdin. Tällaisia voimajohtoja on esimerkiksi Lapissa, jossa ukkosjohtimia jätetään pois jääkuorman vuoksi. Lisäksi laskentatyökaluun voitaisiin liittää tarkempaa maadoitusresistanssin laskentaa, jossa pyritään huomioimaan maaperän epähomogeenisuus niin sanotulla kaksikerrosmallilla. Kaksikerrosmalliin, jossa maaperän ajatellaan jakautuvan kahteen päällekkäiseen homogeeniseen maakerrokseen, ei tässä työssä oteta kantaa, mutta sen hyödyntämistä laskentatyökalussa tulee harkita tulevaisuudessa.

Lähteet

- Costea, M., Baran, I. & Leonida, T. (2014). Capacitive induced voltages in parallel transmission lines. *The Scientific Bulletin Series C: Electrical Engineering and Computer Science*, 76(4), 199–206. Saatavilla osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/290962374_Capacitive_induced_voltages_in_parallel_transmission_lines
- Dwight, H. B. (1936). Calculation of Resistances to Ground. *IEEE Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 55(12), 1319–1328. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1936.5057209>
- Dwivedi, P. K., Saxena, N. S., Kumar, P., Jain, N. K. & Baba, K. V. S. (1992). Safety Procedures for Working on De-Energized EHV Lines Sharing Common Right of Way. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3), 1371–1378. <https://doi.org/10.1109/61.141854>
- Elovaara, J. & Haarla, L. (2011a). *Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet* (1. painos). Otatieto.
- Elovaara, J. & Haarla, L. (2011b). *Sähköverkot I: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta* (1. painos). Otatieto.
- Elovaara, J. & Laiho, Y. (1988). *Sähkölaitostekniikan perusteet* (4. korjattu painos). Otatieto.
- Gasgrid. (2022). *Kaasun siirtoverkosto*. Noudettu 2.3.2022 osoitteesta <https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/#siirtoputkisto>
- Horton, R. & Wallace, K. (2008). Induced Voltage and Current in Parallel Transmission Lines: Causes and Concerns. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2339–2346. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002658>
- IEEE. (2012). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. *IEEE Std 81-2012*, 1–86. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6392181>
- ITU-T. (2008a). *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – Volume VI: Danger, damage and disturbance*. International Telecommunication Union.

- ITU-T. (2008b). *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electric railway lines – Volume V: Inducing currents and voltages in power transmission and distribution systems*. International Telecommunication Union.
- ITU-T. (2008c). *Recommendation ITU-T K.68: Operator responsibilities in the management of electromagnetic interference by power systems on telecommunication systems*. International Telecommunication Union.
- Jacquet, B., Allen, G., Arkinstall, L. N., Blanchet, L., Britten, A. C., Campones do Brasil, D. O., Della Rocca, A., Dörnemann, C., Kouteynikoff, P., Öhlin, H. G., Palu, C., Paul, H. U., Pilatowicz, A., Poirson, B. Rochereau, H., Solbiati, G. L. & Thorson, J.M. (1995). *Guide on The Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines*. Cigre. Saatavilla osoitteesta <https://e-cigre.org/publication/095-guide-on-the-influence-of-high-voltage-ac-power-systems-on-metallic-pipelines>
- Juhlin, L. E., Halkin, D., Lucca, G., Öhlin, H.-G., Pandini, L., Wattier, O., Solbiati, GL., Dörnemann, C., Nguyen, B., Palu, C., Rochereau, H., Britten, A. C., Campones do Brasil, D. O. Diesendorf, J., Nerhood, H. E., Tibensky, M., Thorson, J. M. & Wilk, J. (2005). *Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped of earth wires*. Cigre. Saatavilla osoitteesta <https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Tech.%20Brochure/275%20Measurement%20of%20earth%20resistance%20of%20OHL%20with%20earthwires%20connected.pdf>
- Liikennevirasto 23/2018. *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 5: Sähköistetty rata*. Doria. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-579-2>
- Luukkainen, J. (2020). *Voimajohtojen maadoitusmittaukset* [sähkötekniikan diplomityö, Tampereen yliopisto]. Trepo. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202005044916>
- Pesonen, A. J. (1968). *Suurjännitejohtojen aiheuttamat induktiovaarajännitteet*. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus, julkaisu 10–68, suojauskysymykset, osa A. Helsinki.
- Pesonen, A. J. (1989). *Maavirtailmiöt*. Sähkölaitostekniikan lisensiaattiseminaari syksy 1988 – kevät 1989. Teknillinen korkeakoulu: sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorio.

- Ratahallintokeskus. (2004). *Yleisohje johdoista ja kaapeleista ratahallintokeskuksen alueella*. Saatavilla osoitteesta https://julkaisut.vayla.fi/pdf4/rhk_b13_yleisohje_johdoista_kaapeleista.pdf
- Reeve, W., D. (2008). *Principles and Practice of Earth Electrode Measurements*. Reeve engineers. Saatavilla osoitteesta https://reeve.com/Documents/Reeve_Ground%20Testing%20R1-1.pdf
- Seppänen, J. (2011). *Ukkosjohtimettoman 110 kV:n avojohdon käyttömahdollisuudet Suomessa* [sähkötekniikan diplomityö, Aalto-yliopisto]. Saatavilla osoitteesta <http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100520.pdf>
- Suomen kaasuyhdistys. (2019). *Kaasutilastot*. Noudettu 2.3.2022 osoitteesta <https://www.kaasuyhdistys.fi/kaasu-suomessa/tilastot/>
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2014). *Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt (SFS-EN 50341-1)*.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. (2018). *Suurjänniteasennukset (SFS 6001)*.
- Tan, K. B., Lu, H. M., Zhang, Y. & Zuo, W. C. (2020). Analysis of the Grounding Resistance of a Hemispheric Electrode Located on a Truncated Cone. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(4), 1361–1363. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2940902>
- Tarmizi, A. I., Ramlee, R. H. & Rotaru, M. D. (2019). Electromagnetic Compatibility Analysis of Substation Environment using Finite Difference Method. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(12S2), 521–527. <https://www.doi.org/10.35940/ijitee.L1097.10812S219>
- Tleis, N. D. 2008. *Power Systems Modelling and Fault Analysis – Theory and Practice*. Newnes (Elsevier).
- Unde, M. G. & Kushare, B. E. (2012). Cost Effective Design of Grounding Grid using Ground Rods – a Case Study. *IEEE Fifth Power India Conference*. <https://doi.org/10.1109/PowerI.2012.6479520>
- Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. (1991a). VHV-ohje 01: *Menettely sähkö- ja televerkkojen vaara- ja häiriöjännitetapauksissa*.

- Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. (1991b). VHV-ohje 03: *Häiriöjännitesuojaus: Äänitaajuushäiriöt*.
- Vaara- ja häiriöjännitevaliokunta. (1995). VHV-ohje 02: *Vaarajännitesuojaus: Induktio*.
- Väljä, J. (2011). *Voimajohtojen induktiovaarajännitteet* [sähkötekniikan diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto]. Trepo. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-2011061714710>
- Viestintävirasto. (2015). *Määräys viestintäverkon sähköisestä suojaamisesta*. Helsinki.
- Ylinen, T., Koivisto, P., Kauppila, J., Tiainen, E., & Nurmi, T. (2019). *Maadoituskirja* (7., uusittu painos). Sähköinfo Oy.

Liitteet

Liite 1. Maadoitusjännitteen laskenta.

Asema: <u>110/20 kV Esimerkki sähköasema</u>										
Mittaustulokset:										
U_0	1,1 V	I_0	0,1 A							
U_1	8 V	I_1	29 A							
U_2	9 V	I_2	28 A							
Reduktiokerroin r : 0,4										
Maadoitusimpedanssi $Z_e = 0,74 \Omega$										
Tilanne vuonna 2022	1. laukaisuporras			2. laukaisuporras			3. laukaisuporras			
Syöttö	r_i	$3I_0$ [kA]	$t = 0,2 s$	r_i	$3I_0$ [kA]	$t = 0,5 s$	r_i	$3I_0$ [kA]	$t = 1,0 s$	
Asema A	0,4	1,25								
Asema B	0,8	0,9								
Asema C	0,4	0,75								
Asema D				0,4	2,6					
$\Sigma (r_i * 3I_0)$		1,52 kA		1,04 kA		0,00 kA				
Maadoitusjännite: $U_e =$		1126 V		$U_e =$		770 V		$U_e =$		0 V
SFS 6001+A1+A2: $2U_D$		1000 V ylitty		420 V ylitty		V ei ylity				
$4U_D$		2000 V ei ylity		840 V ei ylity		V ei ylity				
Viestintävirasto 43F/2015M:		1500 V ei ylity		650 V ylitty		V ei ylity				
Tilanne vuonna 2032	1. laukaisuporras			2. laukaisuporras			3. laukaisuporras			
Syöttö	r_i	$3I_0$ [kA]	$t = 0,2 s$	r_i	$3I_0$ [kA]	$t = 0,5 s$	r_i	$3I_0$ [kA]	$t = 0,7 s$	
Asema A	0,4	1,6								
Asema B	0,8	1,1								
Asema C	0,4	0,9								
Asema D				0,4	4,0					
$\Sigma (r_i * 3I_0)$		1,88 kA		1,60 kA		0,00 kA				
Maadoitusjännite: $U_e =$		1392 V		$U_e =$		1185 V		$U_e =$		0 V
SFS 6001+A1+A2: $2U_D$		1000 V ylitty		420 V ylitty		V ei ylity				
$4U_D$		2000 V ei ylity		840 V ylitty		V ei ylity				
Viestintävirasto 43F/2015M:		1500 V ei ylity		650 V ylitty		V ei ylity				

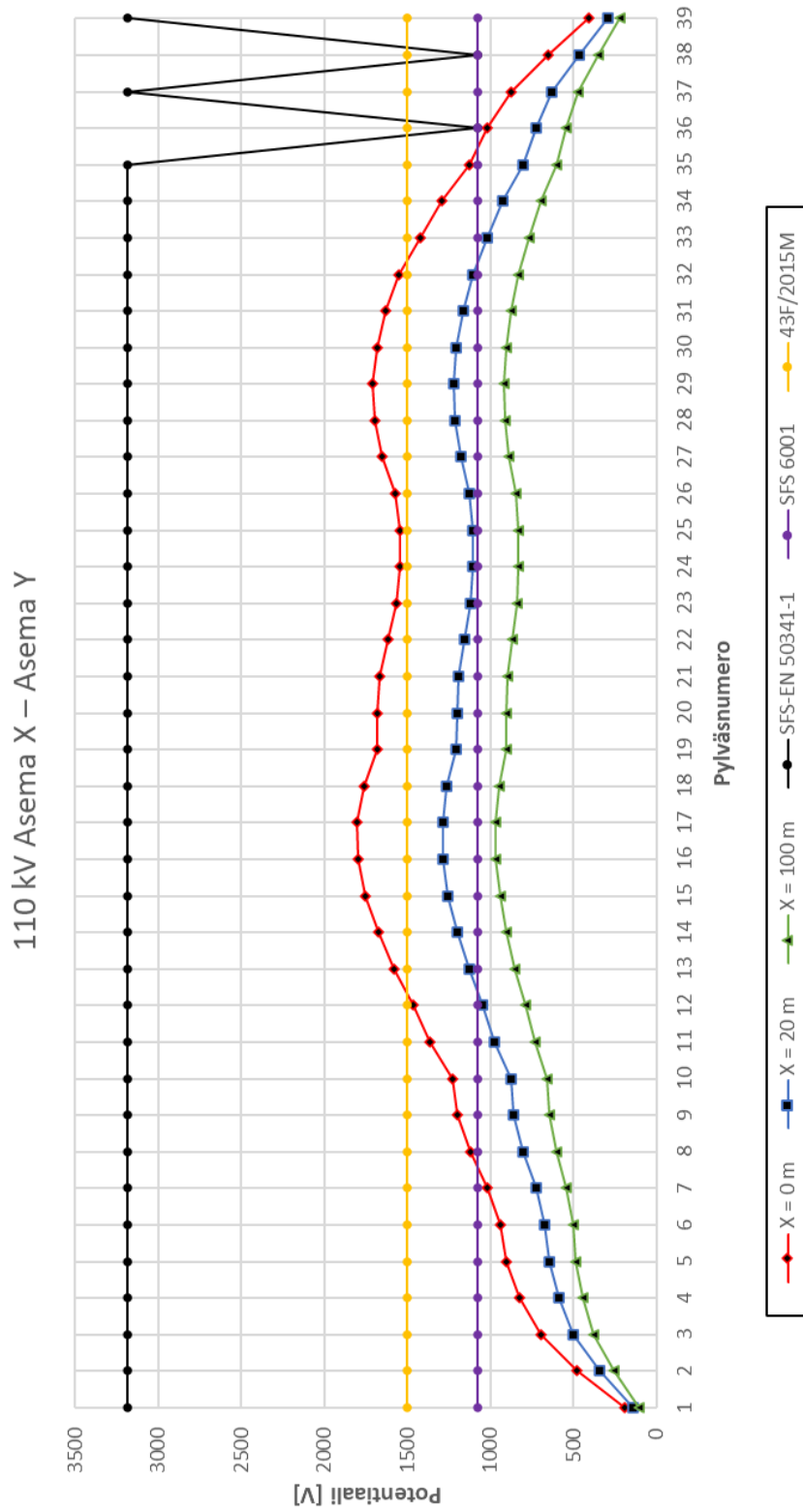
Kuva 23. Maadoitusjännitteen laskenta.

Liite 2. Maapotentiaalilaskenta.

Taulukko 9. Maapotentiaalilaskenta.

Voimajohto: 110 kV Asema X – Asema Y											
Ukkosjohtimet: 2 x "Sustrong"											
Jännevälin keskiarvo: 309,2 m											
Ukkosjohtimien impedanssi: 0,66 Ω/km											
Ukkosjohtimien reduktiokerroin: 0,39											
Aseman X maadoitusimpedanssi: 0,15 Ω											
Aseman Y maadoitusimpedanssi: 0,45 Ω											
Pylväiden lukumäärä: 39											
Pylväspaikkojen tiedot			Vikavirtatiedot		Lasketut potentiaalit			Raja-arvot			Huomioitavat kohteet
Pylväs	R _m [Ω]	Maaperän resistiivisyys [Ωm]	Maasulkuvirta 3I ₀ [A]	Laukaisuaika [s]	U _e [V]	V ₂₀ [V]	V ₁₀₀ [V]	SFS-EN 50341-1 [V]	SFS 6001 [V]	43F/2015M [V]	
1	0,15	3847,0	5100	0,2	192	137	103	3186	1074	1500	
2	7	451,1	5078	0,2	479	343	258	3186	1074	1500	
3	16	1389,9	5056	0,2	698	499	375	3186	1074	1500	
4	19	1981,0	5034	0,2	822	588	442	3186	1074	1500	
5	14	816,3	5012	0,2	903	646	486	3186	1074	1500	
6	3	108,3	4990	0,2	937	670	504	3186	1074	1500	
7	4,5	171,6	4968	0,2	1016	727	547	3186	1074	1500	
8	13	1381,1	4946	0,2	1119	800	602	3186	1074	1500	
9	180	13937,7	4924	0,2	1200	858	646	3186	1074	1500	
10	5	404,0	4902	0,2	1225	876	659	3186	1074	1500	
11	14	574,7	4880	0,2	1362	974	733	3186	1074	1500	
12	8,5	214,7	4858	0,2	1468	1050	790	3186	1074	1500	
13	42	3210,8	4836	0,2	1580	1130	850	3186	1074	1500	
14	25	1287,1	4814	0,2	1674	1197	901	3186	1074	1500	
15	65	3664,0	4792	0,2	1753	1254	943	3186	1074	1500	
16	509	7117,2	4770	0,2	1795	1284	966	3186	1074	1500	
17	243	3401,8	4748	0,2	1800	1287	968	3186	1074	1500	
18	214	2990,7	4726	0,2	1763	1261	948	3186	1074	1500	
19	6	463,5	4704	0,2	1683	1203	905	3186	1074	1500	
20	21	1067,1	4682	0,2	1681	1202	904	3186	1074	1500	
21	250	3485,5	4660	0,2	1668	1192	897	3186	1074	1500	
22	14	612,7	4638	0,2	1615	1155	869	3186	1074	1500	
23	8	123,8	4616	0,2	1563	1118	841	3186	1074	1500	
24	11	269,3	4594	0,2	1548	1107	833	3186	1074	1500	
25	8	206,9	4572	0,2	1544	1104	831	3186	1074	1500	
26	7	318,0	4550	0,2	1576	1127	848	3186	1074	1500	
27	245	10009,1	4528	0,2	1651	1180	888	3186	1074	1500	
28	325	4550,7	4506	0,2	1696	1212	912	3186	1074	1500	
29	176	8991,0	4484	0,2	1706	1220	918	3186	1074	1500	
30	131	10698,8	4462	0,2	1683	1203	905	3186	1074	1500	
31	150	21660,3	4440	0,2	1629	1165	876	3186	1074	1500	
32	330	13559,4	4418	0,2	1548	1107	833	3186	1074	1500	
33	13	1023,1	4412	0,2	1420	1015	764	3186	1074	1500	
34	74	5989,0	4405	0,2	1295	926	697	3186	1074	1500	
35	4	359,1	4399	0,2	1123	803	604	3186	1074	1500	
36	340	16248,1	4392	0,2	1016	726	546	1074	1074	1500	
37	155	13652,7	4386	0,2	877	627	472	3186	1074	1500	
38	650	30845,7	4379	0,2	651	465	350	1074	1074	1500	
39	0,45	1871,5	4373	0,2	408	292	220	3186	1074	1500	

Liite 3. Potentiaaliprofiili.



Kuva 24. Esimerkki potentiaaliprofiilista.

Liite 4. Normaalikäytön vaarajännitteet.

NORMAALIKÄYTÖSSÄ INDUSOITUVA SMV

Voimajohto: 110 kV Asema X – Asema Y

Vaihejohtimien välinen etäisyys:	5	[m]
Vaihejohtimien korkeus (telejohtoon nähden):	10	[m]
Tyhjiön permeabiliteetti:	1,26E-06	[H/m]
Voimajohdon vaihevirta:	1000	[A]
Sallittu indusoituva smv:	60	[V]

Tele- ja voimajohdon välinen etäisyys [m]	b_1 [m]	b_2 [m]	b_3 [m]	smv E [V/km]	Telejohdon sallittu yhdensuuntainen pituus [km]
10	11,2	14,1	18,0	26,0	2,3
20	18,0	22,4	26,9	21,8	2,7
30	26,9	31,6	36,4	16,4	3,7
40	36,4	41,2	46,1	12,9	4,7
50	46,1	51,0	55,9	10,5	5,7
60	55,9	60,8	65,8	8,8	6,8
70	65,8	70,7	75,7	7,6	7,9
80	75,7	80,6	85,6	6,7	8,9
90	85,6	90,6	95,5	6,0	10,0
100	95,5	100,5	105,5	5,4	11,1
110	105,5	110,5	115,4	4,9	12,2
120	115,4	120,4	125,4	4,5	13,3
130	125,4	130,4	135,4	4,2	14,4
140	135,4	140,4	145,3	3,9	15,5
150	145,3	150,3	155,3	3,6	16,6
160	155,3	160,3	165,3	3,4	17,7
170	165,3	170,3	175,3	3,2	18,8
180	175,3	180,3	185,3	3,0	19,9
190	185,3	190,3	195,3	2,9	21,0
200	195,3	200,2	205,2	2,7	22,1

Kuva 25. Normaalikäytön vaarajännitteet.

Liite 5. Rajapituuslaskelmat.

Rajapituuslaskuri

Ukkosjohtimien reduktiokerroin	0,4	
Taajamareduktiokerroin	1	
Maasulkuvirta keskitinalueella	7500	[A]
Indusoiva maasulkuvirta	3000	[A]
Vian laukaisuaika	0,5	[s]
Viestintäviraston määr. raja-arvo	650	[V]
Taajuus	50	[Hz]
Maaperän resistiivisyys	2300	[Ω m]
Tyhjiön permeabiliteetti	0,0000013	[H/m]

Indusoituvan smv:n laskenta

Nimi: **Alue 1**

Maksimiprojektio [km]: 4,3

Etäisyys [m]	Z_m [m Ω /km]	smv E [V/km]	650 V rajapituus [km]	1500 V rajapituus [km]	2000 V rajapituus [km]
20	344	1031	0,6	1,5	1,9
30	318	955	0,7	1,6	2,1
40	301	902	0,7	1,7	2,2
50	287	860	0,8	1,7	2,3
60	275	826	0,8	1,8	2,4
70	266	798	0,8	1,9	2,5
80	258	773	0,8	1,9	2,6
90	250	751	0,9	2,0	2,7
100	244	731	0,9	2,1	2,7
150	219	656	1,0	2,3	3,0
200	201	604	1,1	2,5	3,3
250	188	563	1,2	2,7	3,6
300	177	530	1,2	2,8	3,8
400	159	478	1,4	3,1	4,2
500	146	438	1,5	3,4	4,6
700	126	378	1,7	4,0	5,3
1000	106	317	2,1	4,7	6,3
1500	83	250	2,6	6,0	8,0
2000	68	204	3,2	7,3	9,8
3000	48	145	4,5	10,3	13,8
4000	36	108	6,0	13,9	18,5
5000	27	82	7,9	18,3	24,3
6000	21	63	10,2	23,6	31,5
7000	17	50	13,1	30,2	40,3
2878	50	151	4,3	9,9	13,2

Kuva 26. Rajapituuslaskelmat.