



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MEERI NUOTIO  
SUURJÄNNITTEISEN TASASÄHKÖYHTEYDEN ELEKTRODIIPI-  
RIN VALVONTA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Sami Repo  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty tieto- ja  
sähkötekniikan tiedekunnan dekaa-  
nin päätöksellä 28. helmikuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**MEERI NUOTIO:** Suurjännitteisen tasasähköyhteyden elektrodipiirin valvonta  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 78 sivua  
Elokuu 2018  
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat  
Tarkastaja: professori Sami Repo

Avainsanat: HVDC, elektrodipiiri, valvonta, vaarajännitteet

Fenno-Skan-tasasähköyhteyden elektrodipiirin nykyisen valvontajärjestelmän on havaittu toimivan epäluotettavasti, sillä järjestelmä ei ole aina antanut hälytystä esimerkiksi, kun johdon päälle on ollut puu kaatuneena. Toisaalta järjestelmä on antanut myös turhia hälytyksiä. Epäluotettavan toiminnan vuoksi elektrodipiirin nykyisestä valvontajärjestelmästä ja mahdollisuuksista toteuttaa valvonta jollakin muulla menetelmällä on haluttu tehdä selvitys. Koska nykyisen valvontajärjestelmän kykeneväisyys vikojen havaitsemiseen on osoittautunut epävarmaksi, elektrodipiirin vikaantumista on haluttu tutkia myös vaarajännitteiden näkökulmasta.

Elektrodipiirin vikaantumisen ja valvontamenetelmien tutkimista varten elektrodipiiristä luotiin simulointimalli. Mallinnusta varten selvitettiin elektrodipiirin rakenne ja johtojen parametrit. Valvontamenetelmien soveltuvuutta elektrodipiirin vikojen havaitsemiseen tutkittiin erilaisista valvontamenetelmistä tehtyjen julkaisujen perusteella selvittämällä menetelmien toimintaperiaatteet. Osaa menetelmistä arvioitiin myös simuloimalla erilaisia vikatilanteita. Vaarajänniteselvitystä varten työssä arvioitiin mahdollisia vikatilanteita, selvitettiin vaarajännitteiden ja -virtojen laskentaan liittyvät periaatteet ja oletukset ja laskettiin eri vikatilanteissa mahdollisesti esiintyvät kosketusvirrat. Saatuja tuloksia verrattiin standardien ja eri julkaisujen mukaisiin sallittujen kosketusvirtojen arvoihin.

Erilaisista käytössä olevista elektrodipiirin valvontamenetelmistä tehtiin kirjallisuusselvitys, jonka myötä tuli ilmi, että elektrodipiirin valvontamenetelmiä käsitteleviä julkaisuja on tehty vähän. HVDC-yhteyksiä on maailmalla rajallinen määrä, eivätkä ne ole rakenteiltaan tai toimintaperiaateiltaan samanlaisia: esimerkiksi paluupiiriä ei aina toteuteta elektrodeilla. Elektrodipiiriä ja elektrodien suunnittelua käsitteleviä julkaisuja on tehty useampia, mutta itse elektrodipiirin valvontaan liittyvien raporttien määrä on hyvin rajallinen. Tästä johtuen elektrodipiirin valvontamenetelmiin liittyvää lähdeaineistoa oli huonosti saatavilla.

Työssä tutkittavia vikatilanteita olivat puun kaatuminen elektrodipiirin johdon päälle, työkonene osuminen johtoon sekä ihmisen suorakosketus johtoon. Työn tulosten perusteella elektrodipiirin nykyinen valvontajärjestelmä ei kykene havaitsemaan kyseisiä vikatilanteita. Toisaalta puun kaatuminen johdon päälle ei tässä työssä tehtyjen oletuksien perusteella aiheuta sallittua suurempien kosketusvirtojen kulkemista ihmisen kehon läpi, kun maassa seisova ihminen koskettaa johdolle nojaavaa puuta. Työkoneviassa ja suorassa johdon kosketuksessa sallitun kosketusjännitteen ylittyminen on mahdollista, mutta riski toteutuu vain useampien tekijöiden yhteisvaikutuksesta.

## ABSTRACT

**MEERI NUOTIO:** Supervision of HVDC Electrode Line

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 78 pages

August 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Systems and Market

Examiner: Professor Sami Repo

Keywords: HVDC, electrode line, supervision, hazard voltages

The present supervision system of the electrode line of Fenno-Skan HVDC connection is unreliable. For example, the system has not always given the alarm when there has been a tree leaning against the line. On the other hand, sometimes the system has given the alarm unnecessarily. Because of unreliable operation of the supervision system, possibilities to improve the operation of present supervision system or apply other methods as supervision system of the electrode line is wanted to study. In addition, the hazard voltages of the electrode line is under research in this study.

The simulation model of electrode line was created in order to study failures and supervision methods of the electrode line. The structure and parameters of electrode line were determined in order to create the model. Suitability of supervision methods for fault detection of the electrode line was researched by using different publications concerning about supervision methods and then determining the principles of methods. Some methods were also investigated by simulating different fault situations. For hazard voltage analysis, different fault situations were estimated. Furthermore, calculation principles and methods of hazard voltages were determined and possible touch voltages occurring in different fault situations were calculated. The results of hazard voltage analysis was compared to the values given in standards and in different scientific publications.

The literature survey concerning different supervision methods of electrode line was done in this study. According to that literature survey there are only a few scientific publications concerning about supervision methods of electrode line. The number of HVDC connections in the world are limited and their structures are not same: for example, the neutral line is not always carried out with electrodes. Scientific publications concerning about electrode lines or planning of electrodes are more available than publications concerning about supervision of electrode lines. Thus, the source material concerning supervision of electrode lines was badly obtainable.

Different fault situations researched in this study was a tree falling into the line, excavator or other machine hitting the line and human touching direct the line with hand. According to research results of this thesis, the present supervision method of electrode line cannot detect abovementioned faults. On the other hand, a tree falling into the line does not cause bigger currents than allowable flowing through the body of human when person is touching the tree. Faults caused by excavator or human touching the line can cause touch voltage bigger than allowable but the risk realizes only when many factors interact.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:ssä. Työn ohjaajana toimi Fingridissä Tomi Mantela ja tarkastajana Tampereen teknillisestä yliopistosta professori Sami Repo. Työn ohjausryhmään kuuluivat ohjaajan lisäksi Tuomas Rauhala, Jari Lehtimäki, Sallamaria Iltanen, Jussi Rantanen ja Mikko Jalonen.

Kiitokset työn ohjaajalle Tomi Mantelalle työn aikana käydyistä keskusteluista sekä kannustavasta ohjauksesta. Haluan kiittää myös työn tarkastajaa professori Sami Repoa tälle työlle omistetusta ajasta ja työn kommentoimisesta.

Lisäksi haluan kiittää työn ohjaajaa sekä muita ohjausryhmän jäseniä työn mahdollistamisesta. Haluan kiittää koko ohjausryhmää kaikista saamistani kommenteista sekä työn aikana käydyistä keskusteluista. Erityiskiitokset Jari Lehtimäelle etenkin valvontameneelmiin liittyvistä keskusteluista. Tuomas Rauhalle haluan esittää erityiskiitokset tieteelliseen esittämiseen liittyvistä neuvoista. Lisäksi haluan kiittää Ulla Huhtasta vaarajännitteiden laskentaan liittyvistä neuvoista ja keskusteluista.

Lopuksi haluan esittää kiitokset koko Hämeenlinnan toimipaikan porukalle sekä HVDC-tiimin jäsenille mieluisasta ja kannustavasta työilmapiiristä.

Hämeenlinnassa, 31.7.2018

Meeri Nuotio

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Työn taustat .....	2
1.2	Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset .....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät ja -aineisto .....	3
1.4	Työn rakenne .....	3
2.	SUURJÄNNITTEISET TASASÄHKÖYHTEYDET OSANA VOIMAJÄRJESTELMÄÄ .....	5
2.1	Fingridin suurjännitteiset tasasähköyhteydet .....	5
2.2	Tasasähköyhteyksien toimintaperiaate ja rakenteet .....	7
2.3	Tasasähköyhteyksillä esiintyviä vikoja .....	10
3.	FENNO-SKAN-YHTEYDEN ELEKTRODIPIIRI .....	11
3.1	Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin rakenne .....	11
3.2	Elektrodipiirin toiminta .....	17
3.3	Elektrodipiirin vikatilanteiden havaitsemisen haasteet .....	19
3.4	Elektrodipiirin nykyinen mittaus- ja valvontamenetelmä .....	20
4.	VAARAJÄNNITTEIDEN SYNTYMINEN VIKATILANTEISSA .....	23
4.1	Vaarajännitteet .....	23
4.2	Maadoitusjännite ja maanpinnan potentiaali .....	23
4.3	Sähkövirran vaarallisuus ihmiselle .....	29
4.4	Kosketusjännitteen laskeminen .....	33
4.4.1	Kehon resistanssi .....	33
4.4.2	Sallittujen kosketusjännitteiden laskenta .....	35
4.4.3	Lisäresistanssin huomioon ottaminen .....	35
5.	TYÖSSÄ TUTKITTAVAT VALVONTAMENETELMÄT .....	37
5.1	Differentiaalisuojaus .....	37
5.2	Korkeataajuisen signaalin syöttö .....	39
5.3	Kulkuaaltomittaus .....	41
5.4	Nykyisen valvontamenetelmän herkistäminen .....	43
5.5	Yhteenveto .....	43
6.	VIKATILANTEET JA ELEKTRODIPIIRIN JA VALVONTAMENETELMIEN MALLINTAMINEN .....	45
6.1	Työssä tarkasteltavat vikatilanteet .....	45
6.2	Elektrodipiirin resistanssien, jännitteiden ja virtojen laskenta .....	46
6.3	Vikatilannetarkasteluissa käytettävät arvot .....	49
6.4	Elektrodipiirin simulointimalli .....	54
6.5	Nykyisen valvontajärjestelmän mallintaminen .....	57
6.6	Nykyisen valvontajärjestelmän toiminnan muuttaminen .....	58
7.	TULOKSET .....	59
7.1	Vaarajänniteselvitys .....	59
7.2	Nykyinen valvontajärjestelmä .....	65

7.3	Vaihtoehtoiset valvontamenetelmät .....	68
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	70
9.	YHTEENVETO .....	73
	LÄHTEET .....	76

## LYHENTEET JA SYMBOLIT

AIEE	American Institute of Electrical Engineers
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
CSC	Current Source Converter
ELUS	Electrode Line Unbalance Supervision
HFCB	High Frequency Current Differential System
HFLI	High Frequency Line Impedance Measuring Method
HVDC	High Voltage Direct Current (suurjännitetasavirta)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JJ	Jännitteenjakaja
LTKR	Lautakari (elektrodiasema)
LCC	Line Commutated Converter
PM	Pyhämaa (elektrodipiirin päätepylvään sijainti)
PR	Pyhäranta (elektrodipiirin päätepylvään sijainti)
PRBS	Pseudo Random Binary Sequence
RA	Rauma (suuntaaja-asema)
RN	Rihtniemi (kaapelipääteasema)
SCC	Self-Commutated Converter
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TDR	Time Domain Reflectometry
TRNA	Torna (elektrodipiirin haarautumiskohta)
VM	Virtamuuntaja
VM11	Virtapiirin 1 virtamuuntaja suuntaaja-asemalla
VM12	Virtapiirin 1 virtamuuntaja elektrodiasemalla
VM21	Virtapiirin 2 virtamuuntaja suuntaaja-asemalla
VM22	Virtapiirin 2 virtamuuntaja elektrodiasemalla
VP	Elektrodipiirin virtapiiri
VP1	Elektrodipiirin virtapiiri, jossa on yksi mannervedenkaapeli
VP2	Elektrodipiirin virtapiiri, jossa on kaksi mannervedenkaapelia
VSC	Voltage Source Converter
<i>BF</i>	Kehon kerroin
<i>D</i>	Pallon, levyn tai ruudukon halkaisija
<i>d</i>	Johtimen halkaisija tai puolet nauhan leveydestä
<i>E</i>	Maadoituselektrodi
<i>H</i>	Hälytysjärjestelmän tarkkailema arvo
<i>HF</i>	Sydämen virtakerroin
<i>h</i>	Maadoituselektrodin upotussyvyys
<i>I</i>	Maadoituselektrodin kautta maahan kulkeva virta
<i>I<sub>1</sub></i>	Ehjässä virtapiirissä kulkeva virta
<i>I<sub>11</sub></i>	Suuntaaja-asemalla mitattu, virtapiirissä 1 kulkeva virta
<i>I<sub>12</sub></i>	Elektrodiasemalla mitattu, virtapiirissä 1 kulkeva virta
<i>I<sub>2</sub></i>	Vikaantuneessa virtapiirissä kulkeva virta suuntaaja-aseman ja vika-
	kohdan välillä
<i>I<sub>21</sub></i>	Suuntaaja-asemalla mitattu, virtapiirissä 2 kulkeva virta
<i>I<sub>22</sub></i>	Elektrodiasemalla mitattu, virtapiirissä 2 kulkeva virta

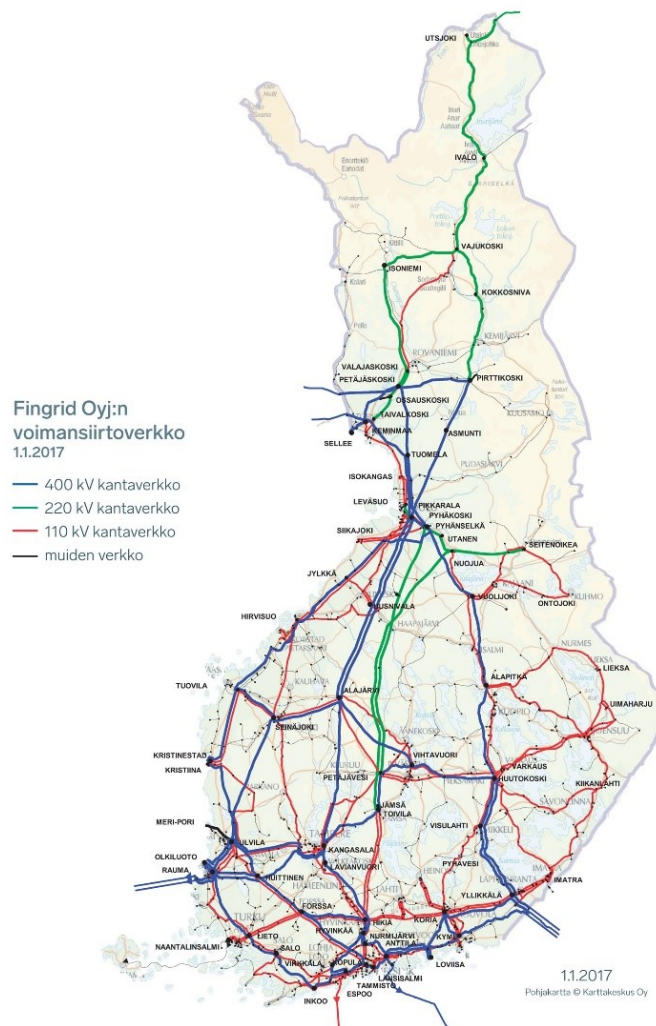
$I_3$	Vikaantuneessa virtapiirissä kulkeva virta vikakohtaan ja elektrodiaseman välillä
$I_{ala}$	Puun alaosan kautta kulkeva virta
$I_d$	Elektrodipiirin virtapiirien erovirta
$I_{dn}$	Elektrodipiirin virtapiirien erovirta normaalitilanteessa
$I_E$	Maavirta
$I_e$	Merielektrodin kautta kulkeva virta
$I_F$	Maasulkuvirta tai vikavirta
$I_K$	Ihmisen kehon kautta kulkeva virta tai kosketusvirta
$I_{Kp}$	Sallittu ihmisen kehon kautta kulkeva virta tai sallittu kosketusvirta
$I_{kok}$	Elektrodipiirin kokonaisvirta
$I_m$	Työkoneen maadoituksen kautta kulkeva virta
$I_{VP1}$	Virtapiirissä 1 kulkeva virta
$I_{VP2}$	Virtapiirissä 2 kulkeva virta
$K$	Sydänkammiovärinärajan määrittämisessä käytetty vakioluku
$k$	Elektrodipiirin erovirran ja kokonaisvirran suhteen ilmaiseva kerroin
$L$	Maadoituselektrodin pituus
$L_{ala}$	Puun alaosan pituus
$L_{puu}$	Puun pituus
$L_{ylä}$	Puun yläosan pituus
$R_1$	Ehjän virtapiirin resistanssi
$R_2$	Vikaantuneen virtapiirin resistanssi suuntaaja-aseman ja vikakohtaan välillä
$R_3$	Vikaantuneen virtapiirin resistanssi vikakohtaan ja elektrodiaseman välillä
$R_a$	Tähtikytkennän resistanssi
$R_{ab}$	Kolmiokytkennässä vikaantuneen virtapiirin resistanssi vikakohtaan ja Lautakarin välillä
$R_{ac}$	Kolmiokytkennässä kokonaisvikaresistanssi
$R_{ala}$	Puun alaosan resistanssi
$R_b$	Tähtikytkennän resistanssi
$R_{bc}$	Kolmiokytkennässä merielektrodin ja elektrodin kaapeleiden resistanssi
$R_c$	Tähtikytkennän resistanssi
$R_E$	Maadoituselektrodin maadoitusresistanssi
$R_e$	Merielektrodin ja elektrodin kaapeleiden resistanssi
$R_F$	Kokonaisvikaresistanssi
$R_j$	Jalkineiden resistanssi
$R_k$	Ihmiskehon resistanssi
$R_L$	Kokonaislisäresistanssi
$R_{L1}$	Lisäresistanssi
$R_{L2}$	Lisäresistanssi
$R_m$	Yhden jalan maakontaktiresistanssi
$R_{mk}$	Kokonaismaakontaktiresistanssi
$R_{mj}$	Työkoneen maadoitusköyden tai -johdon resistanssi
$R_{puu}$	Puun resistanssi
$R_{tk}$	Työkoneen resistanssi
$R_{tot}$	Elektrodipiirin kokonaisresistanssi
$R_{v,ehjä}$	Ehjän virtapiirin kokonaisresistanssi



$R_{v,rinnan}$	Ehjän ja vikaantuneen virtapiirin rinnankytkennän resistanssi
$R_{v,vika}$	Vikaantuneen virtapiirin kokonaisresistanssi
$R_{ylä}$	Puun yläosan resistanssi
$r$	Maadoituselektrodin säde
$r_{v,ehjä}$	Virtapiirien rinnankytkennän resistanssin suhde ehjän virtapiirin resistanssiin
$r_{v,vika}$	Virtapiirien rinnankytkennän resistanssin suhde vikaantuneen virtapiirin resistanssiin
$S_1$	Potentiaalinohjauselektrodi
$S_2$	Potentiaalinohjauselektrodi
$S_3$	Potentiaalinohjauselektrodi
$s$	Levyn tai maakerroksen paksuus
$t$	Virran vaikutusaika
$U_E$	Maadoitusjännite
$U_F$	Elektrodijohdon jännite vikakohdassa
$U_{LTKR}$	Jännite Lautakarissa
$U_{RA}$	Jännite Raumalla
$U_{vS}$	Prospektiivinen askeljännite
$U_T$	Kosketusjännite
$U_{Tp}$	Sallittu kosketusjännite
$U_{vT}$	Prospektiivinen kosketusjännite
$U_{vTp}$	Sallittu prospektiivinen kosketusjännite
$Z_E$	Maadoitusimpedanssi
$Z_K$	Kehon kokonaisimpedanssi
$\rho$	Maan resistiivisyys
$\varphi$	Maanpinnan potentiaali

# 1. JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty Fingrid Oyj:ssä (jatkossa Fingrid). Fingrid on kantaverkkoyhtiö, joka vastaa sähkön siirrosta Suomen kantaverkossa. Kantaverkko on osa Suomen sähköjärjestelmää ja se on Suomen sähkönsiirron runko, jossa sähköä siirretään maanlaajuisesti voimalaitoksilta jakeluverkkoyhtiöille ja suurille teollisuusyrityksille. Kantaverkko koostuu 400 kV:n, 220 kV:n ja sähkön siirron kannalta keskeisimmistä 110 kV:n voimajohdoista sekä yhteensä yli 100 sähköasemasta. Suomen sähköjärjestelmä on osa yhteis-pohjoismaista sähköjärjestelmää, johon kuuluvat myös Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmät. Suomen järjestelmä liittyy pohjoisessa Ruotsin verkkoon kahdella vaihtosähköyhteydellä ja Norjan verkkoon yhdellä vaihtosähköyhteydellä. Etelä-Suomen ja Etelä-Ruotsin välillä on kaksi tasasähköyhteyttä. Lisäksi Suomen järjestelmästä on tasasähköyhteydet Viron ja Venäjän verkkoihin. [1] Fingridin sähkönsiirtoverkko on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Fingrid Oyj:n sähkönsiirtoverkko [2].

Tämän diplomityön tutkimukset keskittyvät Suomen ja Ruotsin kantaverkkojen väliseen Fenno-Skan-tasasähköyhteyteen ja tarkemmin rajattuna yhteyden Suomen puoleiseen elektrodipiiriin. Työn keskeisinä tutkimuksen aiheina ovat elektrodipiirissä vikatilanteissa esiintyvät vaarajännitteet, elektrodipiirin nykyinen valvontajärjestelmä ja sen luotettavuuden tutkiminen sekä muiden valvontamenetelmien käyttömahdollisuuksien selvittäminen.

## 1.1 Työn taustat

Työn teettämistarve on noussut esille Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin valvontajärjestelmän epäluotettavan toiminnan vuoksi. Valvontajärjestelmä on esimerkiksi antanut vääriä hälytyksiä, ja toisaalta joissain vikatilanteissa se ei ole antanut ollenkaan hälytystä, vaikka elektrodipiirin avojohdolle olisi ollut puu kaatuneena. Viime vuosina myös muissa Itämeren alueen tasasähköyhteyksien elektrodipiireissä on esiintynyt vikoja, joita näiden yhteyksien suojaus- ja valvontajärjestelmät eivät ole havainneet. Kyseiset viat on havaittu vasta, kun sivulliset henkilöt ovat tehneet havainnot epänormaaleista ilmiöistä ja ilmoittaneet niistä eteenpäin paikallisille kantaverkkoyhtiöille. Nämä viat, joita suojaus- ja valvontajärjestelmät eivät ole havainneet, ovat tapahtuneet rakenteeltaan Fenno-Skan-tasasähköyhteyden elektrodipiiriä vastaavissa elektrodipiireissä.

Edellä mainituista tilanteista johtuen Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin nykyistä valvontajärjestelmää ei voida pitää täysin luotettavana. Itämeren alueen tasasähköyhteyksien elektrodipiireissä tapahtuneet viat, joita valvontajärjestelmät eivät ole havainneet, edustavat vain osaa elektrodipiirin mahdollisista vikatyypeistä, mutta nykyisen valvontajärjestelmän luotettavuutta tulisi tutkia, jotta sekä henkilöturvallisuus että Fenno-Skan-yhteyden toiminta voitaisiin varmistaa näidenkin vikatyypin osalta.

## 1.2 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työ sisältää kaksi kokonaisuutta, joista ensimmäinen on elektrodipiirin vaarajänniteselvitys ja toinen elektrodipiirin valvontamenetelmien tutkiminen. Työn ensimmäisen osan tavoitteena on selvittää ja arvioida, minkälaisia vikatilanteita elektrodipiirin eri osiin voi mahdollisesti kohdistua. Vikatapausten selvittämisen lisäksi arvioidaan elektrodipiiriin kohdistuvien eri vikatilanteiden aiheuttamia henkilöturvariskejä erilaisissa käyttötilanteissa. Toisen osan tavoitteena on tutkia ja arvioida Fenno-Skan-tasasähköyhteyden elektrodipiirin nykyistä valvontamenetelmää ja sen puutteita sekä mahdollisuuksia menetelmän herkkyyden ja siten luotettavuuden parantamiseen. Nykyisen menetelmän lisäksi työssä selvitetään, mitä muita valvontamenetelmiä vikojen havaitsemiseen olisi käytettävissä.

Työn tavoitteiden pohjalta pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Minkälaiset henkilöturvallisuusvaatimukset elektrodipiiriin tulisi täyttää?
- Minkä suuruisia vaarajännitteitä voi esiintyä maasulkutilanteissa elektrodipiirin eri kohdissa ja eri käyttötilanteissa?
- Minkälaisien vikatilanteiden havaitsemiseen nykyinen valvontamenetelmä soveltuu?
- Miten elektrodipiiriin nykyisen valvontamenetelmän herkkyyttä ja luotettavuutta voidaan parantaa?
- Millaisilla vaihtoehtoisilla menetelmillä elektrodipiiriin valvonta voitaisiin toteuttaa?
- Minkälaista arvoa mahdolliset vaihtoehtoiset valvontamenetelmät tuovat nykyiseen valvontamenetelmään nähden?

### 1.3 Tutkimusmenetelmät ja -aineisto

Sekä vaarajänniteselvitystä että valvontamenetelmien tutkimista varten arvioidaan, minkälaisia vikatilanteita elektrodipiiriin voi mahdollisesti kohdistua. Arviointi suoritetaan selvittämällä elektrodipiirin rakenne ja ympäristön mahdollinen vaikutus vikatilanteiden aiheutumiseen. Eri vikatilanteiden pohjalta arvioidaan karkeiden laskelmien perusteella, minkä suuruisia maasulkuvirtoja ja vaarajännitteitä elektrodipiiriin ympäristössä voi esiintyä. Henkilöturvallisuusmääräysten täyttymistä tutkitaan vertaamalla elektrodipiiriin vikatilanteissa esiintyviä vaarajännitteitä standardeissa annettuihin suurimpiin sallittuihin vaarajännitteiden arvoihin.

Kartoitettujen vikatilanteiden pohjalta arvioidaan nykyisen valvontamenetelmän kykenevyyttä eri vikatilanteiden havaitsemiseen. Arviointi suoritetaan selvittämällä nykyisen valvontamenetelmän toimintaperiaate, ja tarkastelemalla valvontamenetelmän toimivuutta simuloimalla PSCAD-ohjelmalla erilaisia vikatilanteita. Simulointia varten elektrodipiiristä ja valvontamenetelmistä luodaan simulointimallit. Lisäksi nykyisen valvontamenetelmän toimintaperiaatetta arvioimalla tutkitaan, onko menetelmän toimintaa mahdollista kehittää. Työssä tutkittavien muiden valvontamenetelmien toimintaa, luotettavuutta, tarkkuutta ja hyötyjä arvioidaan olemassa olevan kirjallisuuden, laskelmien ja simulointien perusteella. Menetelmiä vertaillaan keskenään niiden tarjoaman arvon ja toteuttamismahdollisuuksien perusteella.

### 1.4 Työn rakenne

Työn toinen luku sisältää yleisen teoreettisen kuvauksen tasasähköyhteyksien rakenteesta ja toiminnasta sekä niihin liittyvistä keskeisistä käsitteistä. Toisessa luvussa kuvataan myös lyhyesti Fingridin tasasähköyhteydet sekä Fingridin ja muiden kantaverkkoyhtiöiden tasasähköyhteyksien elektrodipiireissä tapahtuneita vikoja.

Työn kolmannessa luvussa esitetään tutkimukseen keskeisesti liittyvää taustatietoa Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiiristä ja elektrodipiirin nykyisestä valvontajärjestelmästä. Luvussa käsitellään yksityiskohtaisesti elektrodipiirin rakennetta ja toimintaa sekä luodaan yhteenveto elektrodipiirin vikatilanteiden havaitsemiseen liittyvistä haasteista. Luvun lopussa kuvataan nykyisen valvontajärjestelmän toimintaperiaate. Samalla kuvataan tutkimuksen aiheena oleva, elektrodipiirin valvontamenetelmiin liittyvä ongelma, joka pohjautuu elektrodipiirin ja nykyisen valvontajärjestelmän rakenteista ja toimintaperiaatteista esitettyihin taustatietoihin.

Neljännessä luvussa määritetään vaarajännitteisiin liittyvät käsitteet, ja esitetään sallittujen kosketusjännitteiden laskentateoria. Lukuun on koottu kosketusjännitteiden laskennassa huomioon otettavia asioita, kuten kehon resistanssin riippuvaisuus eri tekijöistä sekä lisäresistanssien vaikutus sallittuun kosketusjännitteeseen. Lisäksi luvussa on esitetty standardien mukaiset sallitut kosketusvirrat ja eri suuruisten kosketusvirtojen vaikutukset ihmisen keholle.

Työn viidennessä luvussa esitetään erilaisia valvontamenetelmiä, joiden soveltuvuuksista HVDC-yhteyksien elektrodipiirin vikatilanteiden havaitsemiseen on jo tehty tutkimuksia, ja joilla Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin vikaantuminen voitaisiin mahdollisesti havaita. Lisäksi viidennessä luvussa on esitetty, miten nykyisen valvontajärjestelmän toimintaperiaatetta voitaisiin kehittää.

Kuudennessa luvussa esitetään tutkimuksessa käytettävät tutkimusmenetelmät. Luvussa on kuvattu, miten elektrodipiirin virtapiireissä kulkevat virrat, elektrodipiirin jännitteet ja eri vikatilanteiden vikaresistanssit määritetään. Luvussa on myös esitetty vikatilanteiden laskennassa tehdyt oletukset, jotka otetaan huomioon tulosten tarkastelussa. Luvun lopussa on esitetty elektrodipiirin ja valvontamenetelmien simulointimallit.

Seitsemännessä luvussa kootaan yhteen ja analysoidaan työn tutkimuksen tulokset. Kahdeksannessa luvussa esitetään työn johtopäätökset. Työn yhteenveto on luvussa yhdeksän.

## 2. SUURJÄNNITTEISET TASASÄHKÖYHTEYDET OSANA VOIMAJÄRJESTELMÄÄ

Tyypillisesti sähkön siirtoon ja jakeluun käytetään vaihtosähköyhteyksiä. Suurjännitteisten tasasähköyhteyksien (HVDC, High Voltage Direct Current) hyödyntäminen sähkön siirrossa on kuitenkin taloudellisesti sekä teknisesti kannattavampaa, kun halutaan siirtää suuria tehoja satojen kilometrien päähän. Mikäli esimerkiksi suuritehoinen voimalaitos sijaitsee kaukana kulutuskohteista, tulee tehon siirtäminen usein häviöiden ja loistehon kompensointitarpeen vuoksi kannattavammaksi tasasähköyhteyksillä. Tietyissä tapauksissa sähkön siirtoa ei ole edes mahdollista toteuttaa vaihtosähköyhteyksillä: esimerkiksi sähkön siirto kahden eri taajuudella toimivan verkon välillä on teknisesti mahdotonta vaihtosähköyhteyksin. [3]

Suurjännitteisillä tasasähköyhteyksillä on kaksi pääasiallista etua verrattuna vaihtosähköyhteyksiin. Ensinnäkin, tasasähköyhteyksillä voidaan siirtää sähköä kahden eri taajuudella toimivan verkon tai kahden eri synkroniverkon välillä. Tällaisissa tilanteissa yhteyttä voidaan käyttää myös vaihtosähköverkon taajuuden säätöön tai häiriötehoreservinä, sillä tasasähköyhteydellä siirtyvää tehoa voidaan säätää nopeasti. Toiseksi, tasasähköyhteyksillä voidaan siirtää suuria tehoja pitkien siirtoetäisyyksien päähän, sillä tasasähköyhteydet eivät suuntaajia lukuun ottamatta kuluta tai tuota loistehoa, eikä niillä ole jännite- tai kulmastabiiliusongelmia. Vaihtosähköjohdon siirtokapasiteetti pienenee siirtomatkan pidentyessä, joten vaihtosähköllä ei voida tasasähkön tavoin toteuttaa pitkiä siirtoyhteyksiä ilman väliasemia, kompensointia tai rinnakkaisia johtoja. Erityisesti pitkien merikaapeleiden tapauksessa loistehon kompensointi olisi hankalaa ja kallista. Täten erittäin pitkät siirtoetäisyydet ja merikaapeliyhteydet, jotka vaatisivat kompensointia vaihtosähköllä toteutettuna, tulevat kokonaiskustannuksiltaan edullisimmiksi tasasähköyhteyksillä. Esimerkiksi tässä työssä tarkasteltava Fenno-Skan-yhteys on toteutettu tasasähköllä, sillä yhteys alittaa Suomen ja Ruotsin välisen Selkämeren kahdella noin 200 kilometrin mittaisella merikaapelilla. [3]

### 2.1 Fingridin suurjännitteiset tasasähköyhteydet

Fingridillä on käytössä kaksi Etelä-Suomen ja Etelä-Ruotsin välistä sekä kaksi Suomen ja Viron välistä HVDC-yhteyttä. Suomen ja Ruotsin verkkojen välinen Fenno-Skan-yhteys koostuu jo vuonna 1989 valmistuneesta Fenno-Skan 1 -yhteydestä sekä vuonna 2011 valmistuneesta Fenno-Skan 2 -yhteydestä [4]. Suomen ja Viron välinen ensimmäisen tasasähköyhteys, EstLink 1, valmistui vuonna 2006 ja toinen yhteys, EstLink 2, vuonna 2014 [5]. EstLink 1 on ollut Fingridin ja Viron kantaverkkoyhtiön Eleringin omistuksessa kuitenkin vasta vuoden 2013 lopulta lähtien. Ennen yhteyden ostamista Fingrid ja Elering

vuokrasivat kaapelin siirtokapasiteetin sen omistajilta As Nordic Energy Linkiltä ja sen tytäryhtiöltä N.E.L Finland Oy:ltä. [6]

Kuvassa 2 on esitetty Fingridin HVDC-yhteyksien ja niiden suuntaaja-asemien sijainnit kartalla. Fenno-Skan 1 ja 2 -yhteyksien Suomen puoleinen suuntaaja-asema sijaitsee Raumalla ja kaapelipäätteasema Rihtniemessä. Rauman suuntaaja-aseman ja Rihtniemen välinen osuus on toteutettu noin 33 km:n pituisella tasasähköavojohdolla. Rihtniemestä yhteys jatkuu kahtena noin 200 kilometrin mittaisena merikaapelina Ruotsin rannikolle Dannebohon, jossa sijaitsee yhteyksien kaapelipäätteet sekä Fenno-Skan 1 -yhteyden Ruotsin puoleinen suuntaaja-asema. Fenno-Skan 2 -yhteyden suuntaaja-asema sijaitsee kauempana rannikosta Finnbölessä. Finnbölen ja Dannebon asemien välinen siirtoyhteys on toteutettu noin 70 kilometrin pituisella tasasähköavojohdolla. [7]



**Kuva 2.** Fenno-Skan 1 & 2 sekä EstLink 1 & 2 -tasasähköyhteydet ja suuntaaja-asemien sijainnit. Perustuu lähteeseen [8].

Kuvan 2 mukaisesti EstLink 1 -yhteyden suuntaaja-asema sijaitsee Suomessa Espoossa ja Virossa Harkussa. Yhteys koostuu kahdesta noin 105 km:n pituisesta kaapelista, joista noin 74 km on merikaapelia ja noin 31 km maakaapelia [6]. Maakaapelista noin 22 km on Suomen puolella ja noin 9 km Viron puolella [9]. EstLink 2 -yhteyden suuntaaja-asema sijaitsee Suomessa Porvoon kunnassa Anttilassa ja Virossa Püssissa. EstLink 2 -yhteyden kokonaispituus on noin 170 kilometriä, josta merikaapelia on noin 145 km. Suomen puolella yhteys on Anttilan asemalta Nikuvikenin kaapelipäätteasemalle tasasähköavojohtoa, jota on yhteensä noin 14 kilometriä. Viron puolella yhteys on toteutettu rannikolta Püssin suuntaaja-asemalle noin 12 kilometrin pituisilla maakaapeleilla. EstLink 1 -yhteydellä voidaan siirtää tehoa 350 MW ja EstLink 2 -yhteydellä 650 MW, joten maiden välistä siirtokapasiteettia on yhteensä 1000 MW. [5]

Kuvassa 2 näkyvän Manner-Suomen ja Ahvenanmaan välisen HVDC-yhteyden omistaa Ahvenanmaan kantaverkkoyhtiö Kraftnät Åland Ab. Yhteyden siirtokapasiteetti on 100 MW, ja se on otettu käyttöön vuoden 2015 lopulla. Yhteyden suuntaaja-asemat sijaitsevat Ahvenanmaalla Ytterbyssa ja Manner-Suomessa Fingridin Naantalinsalmen sähköaseman vieressä. [10]

Taulukkoon 1 on koottu Fenno-Skan 1 ja 2 sekä EstLink 1 ja 2 -tasasähköyhteyksien teknisistä tiedoista käyttöönottovuodet, siirtokapasiteetit, nimellisjännitteet, merikaapelien nimellisvirrat sekä yhteyksien kokonaispituudet. Yhteyksien kokonaispituuksien lisäksi taulukossa on eriteltyä yhteyksien merikaapeli- ja avojohdo-osuuksien pituudet. EstLink 1 -yhteyden sekä Suomen että Viron puoleisen ja EstLink 2 -yhteyden Viron puoleisen suuntaaja-aseman ja merikaapelipääteaseman välinen osuus on toteutettu avojohdon sijasta maakaapelilla.

*Taulukko 1. Fingridin tasasähköyhteyksien tekniset tiedot [4-6, 9, 11].*

Yhteys	Fenno-Skan 1	Fenno-Skan 2	EstLink 1	EstLink 2
Käyttöönottovuosi	1989	2011	2006	2014
Siirtokapasiteetti	500 MW*	800 MW	350 MW	650 MW
Nimellisjännite	400 kV*	500 kV	±150 kV	450 kV
Merikaapelin nimellisvirta	1316 A	1670 A	1235 A	1490 A
Yhteyden kokonaispituus	233 km	299 km	2x105 km	170 km
➤ Merikaapelin pituus	200 km	196 km	2x74 km	145 km
➤ Avojohtoon pituus Suomen puolella	33 km	33 km	22 km**	14 km
➤ Avojohtoon pituus yhteyden toisella puolella	0 km	70 km	9 km**	12 km**

\*Fenno-Skan 1 -yhteyden nykyiset käyttöarvot ovat taulukon nimellisarvoista poiketen 320 kV ja 400 MW.

\*\*Nämä osuudet on toteutettu avojohdon sijasta maakaapelilla.

Taulukon 1 mukaiset Fenno-Skan 1 -yhteyden siirtokapasiteetin ja tasajännitteen arvot ovat yhteyden alkuperäisiä nimellisarvoja. Yhteyden tehoa ja tasajännitettä on kuitenkin alennettu alkuperäisistä nimellisarvoista 80 prosenttiin, eli nykyinen alennetun tasajännitteen arvo on 320 kV ja siirtokapasiteetti 400 MW [12, 13].

## 2.2 Tasasähköyhteyksien toimintaperiaate ja rakenteet

HVDC-yhteyksien molempiin päihin tarvitaan suuntaaja-asemat, joissa vaihtosähkö muutetaan tasasähköksi ja päinvastoin. Suuntaaja-asemia on kahdenlaisia: verkkokommutoivia (LCC, Line Commutated Converter) eli virtalähdesuuntaajalla varustettuja suuntaaja-asemia (CSC, Current Source Converter) sekä itsekommutoivia (SCC, Self-Commutated Converter) eli jännitelähdesuuntaajalla varustettuja suuntaaja-asemia (VSC, Voltage Source Converter). Verkkokommutoivan yhteyden toiminta perustuu suuntaaja-asemien tyristorisiltoihin, joissa virta voi kulkea vain yhteen suuntaan. Siten verkkokommutoivan tasasähköyhteyden virran suuntaa ei voida muuttaa, mutta tehoa

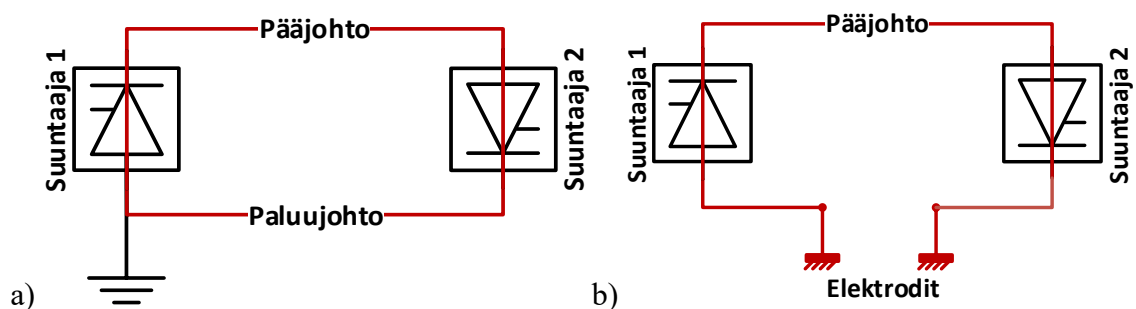


voidaan siirtää kumpaan suuntaan tahansa suuntaaja-asemien jännitenapaisuuksia vaihtamalla. Itsekommutoivan tasasähköyhteyden tasajännitteen napaisuutta ei voida muuttaa, vaan tehon suunta voidaan muuttaa muuttamalla virran suuntaa. Fenno-Skan 1 ja 2 sekä EstLink 2 ovat verkkokommutoivia tasasähköyhteyksiä ja EstLink 1 itsekommutoiva tasasähköyhteys. [3]

Rakenteeltaan tasasähköyhteydet voivat olla monopolaarisia, bipolaarisia tai back-to-back-yhteyksiä. Monopolaarisen ja bipolaarisen yhteyden tapauksessa yhteys koostuu suuntaaja-asemien välisestä pääpiiristä, jonka kautta teho siirretään yhteyden toiseen päähän sekä neutraalipiiristä, tai toisin sanoen paluupiiristä, jonka kautta yhteyden paluuvirta kulkee. Pääpiiri voidaan toteuttaa tasasähköajohdoilla, maa- tai merikaapeleilla tai näiden yhdistelmällä. Virran paluureittinä voidaan metallisen johtimen lisäksi käyttää maata tai merta, jolloin yhteyden molempiin päihin asennetaan elektrodit. HVDC-yhteyden paluupiiristä, joka koostuu elektrodeista, käytetään nimitystä elektrodi-piiri.

Kun siirtoyhteys on pitkä, maan tai meren käyttö virran paluutienä vähentää yhteyden rakentamiskustannuksia, kun paluuvirralla ei tarvitse investoida omaa johdinta. Lisäksi yhteyden kokonaishäviöt pienenevät etenkin monopolaariyhteyksien tapauksessa, sillä maan tai meren muodostaman paluupiirin resistanssi on metallista paluujohdinta pienempi. Nykyään kuitenkin maan ja meren käyttöön virran paluutienä on vaikea saada lupaa, joten monopolaariyhteyksien neutraalipiireissä joudutaan usein käyttämään metallista johdinta. Syyt ovat sekä ympäristöllisiä että infrastruktuurillisia. [3, 14]

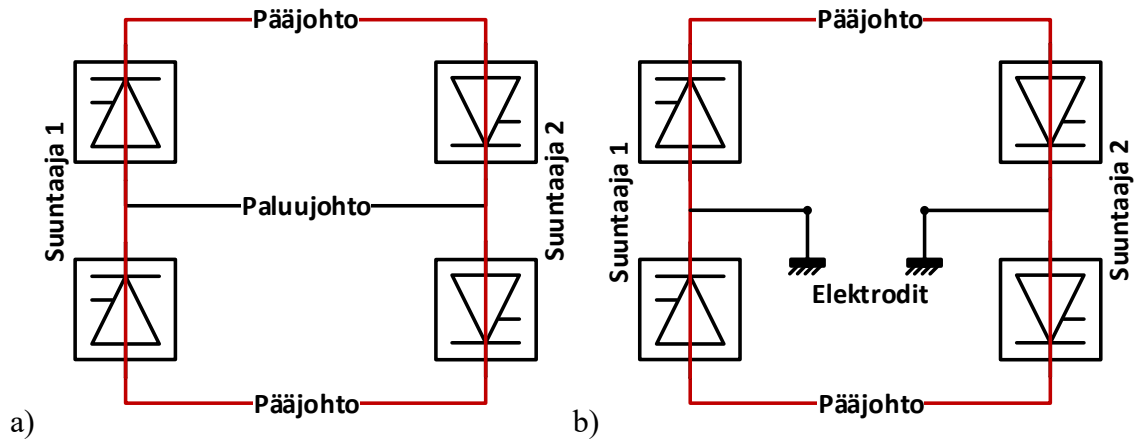
Kuvassa 3 on esitetty monopolaariyhteyden kaaviokuvat, kun yhteyden neutraalipiiri on toteutettu metallisella johtimella (kuva 3a) tai elektrodeilla (kuva 3b). Monopolaariyhteyden kummassakin päässä on suuntaajasillat ja tehoa siirretään pääpiirissä yhdellä tasasähköajohdolla tai -kaapelilla. Yhteyden pääjohdossa kulkeva tasavirta palaa johtoa tai maata tai merta pitkin takaisin.



**Kuva 3.** Monopolaariyhteys. Yhteyden neutraalipiiri voidaan toteuttaa a) metallisella johtimella tai b) elektrodeilla. Perustuu lähteeseen [14].

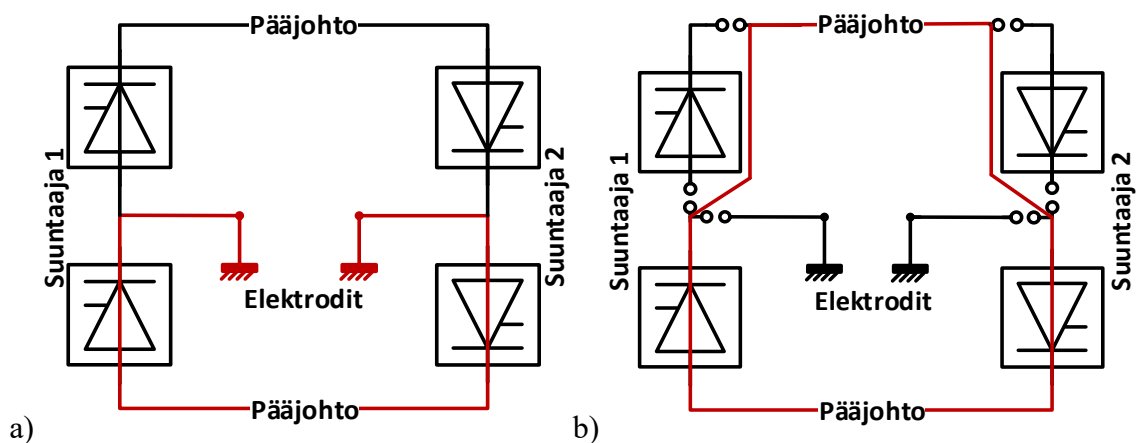
Kuvassa 4 on esitetty bipolaariyhteyden kaaviokuvat, kun virran paluutienä on metallinen johdin (kuva 4a) tai kun paluuvirta kulkee elektrodien kautta (kuva 4b). Bipolaariyhteys koostuu yhteyden kummassakin päässä olevista kahdesta suuntaaja-sillasta, suuntaaja-

asemien välillä olevista kahdesta pääjohtosta sekä rinnakkaisten yhteyksien yhteisestä neutraalipiiristä. Bipolaariyhteyden voidaan siis ajatella koostuvan kahdesta rinnakkaisesta monopolaariyhteydestä, joiden erovirta kulkee neutraalipiirissä. Fenno-Skan 1 ja 2 -yhteydet muodostavat yhdessä bipolaariyhteyden, jossa paluuvirta kulkee elektrodipiiriä pitkin.



**Kuva 4.** Bipolaariyhteys. Yhteyden neutraalipiiri voidaan toteuttaa a) metallisella johtimella tai b) elektrodeilla. Perustuu lähteeseen [14].

Bipolaarisesta yhteyttä voidaan useimmiten käyttää monopolaarisesti esimerkiksi tietyissä vikatapauksissa. Tällöin osa tehosta saadaan siirrettyä, vaikka toinen yhteyden suuntaajasilloista tai pääjohtimista ei olisikaan käytettävissä. Kuvassa 5 on esitetty kaksi erilaista tilannetta bipolaarisen yhteyden käyttämisestä monopolaarisesti. Kuvassa 5a vain toinen rinnakkaisista yhteyksistä on käytössä, jolloin paluuvirta kulkee elektrodien kautta. Kuvassa 5b yhteyden paluupiirinä käytetään vikaantuneen yhteyden pääjohtoa. Tämä edellyttää, ettei monopolaarisen käytön syy ole esimerkiksi toisen pääpiirin vikaantunut johto.

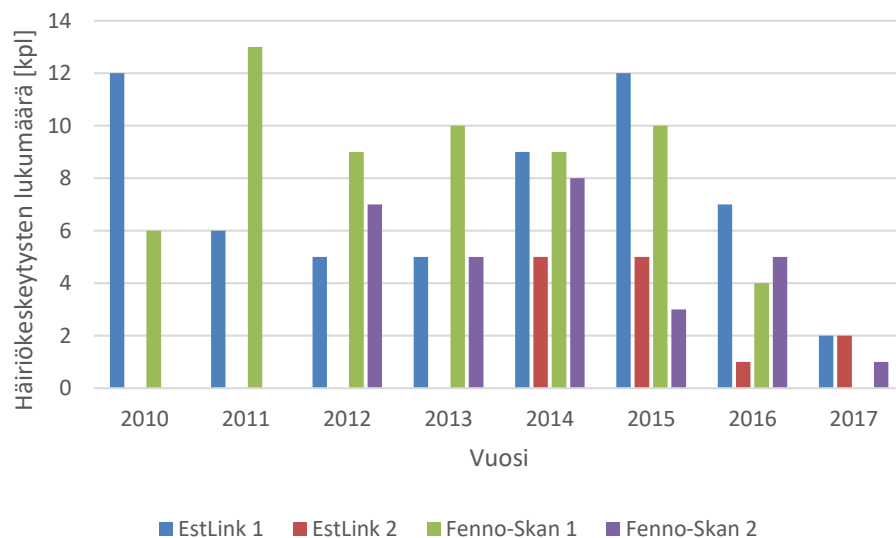


**Kuva 5.** Bipolaarisen yhteyden käyttö monopolaarisesti. Monopolaarisessa käytössä virran paluureittinä voidaan hyödyntää a) neutraalipiiriä, jota hyödynnetään bipolaarisessakin käytössä (tässä kuvassa elektrodipiiriä) tai b) toisen rinnakkaisen yhteyden pääjohtoa, mikäli se ei ole vikaantunut. Perustuu lähteeseen [14].

Suomen ja Venäjän verkkojen välinen tasasähköyhteys, Viipurin linkki, on back-to-back-yhteys [3]. Back-to-back-yhteys tarkoittaa, että vaihtosuuntaus suoritetaan heti tasasuuntauksen jälkeen, eli tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja sijaitsevat samalla sähköasemalla. Back-to-back-yhteyttä käytetään pääosin tehon siirtämiseksi kahden eri synkroniverkon välillä. [14]

### 2.3 Tasasähköyhteyksillä esiintyviä vikoja

Kuvassa 6 on esitetty EstLink 1 ja 2 sekä Fenno-Skan 1 ja 2 -yhteyksien häiriökeskeytysten lukumäärät vuosilta 2010-2017. Fenno-Skan-yhteyksillä toistuvasti esiintyviä häiriöitä ovat aiheuttaneet vuosien 2012–2017 aikana DC-virtapiirin maasulut, tietoliikenneyhteyshäiriöt, loistehon säätö, omakäyttösähköhäiriöt, DC-suodatin ja muuntajan kämmikytin [15].



**Kuva 6.** Fenno-Skan 1 & 2 sekä EstLink 1 & 2 -yhteyksien häiriökeskeytysten määrät vuosina 2010-2017. Perustuu lähteeseen [15].

Fingrid on Fenno-Skan 2 -yhteyttä suunniteltaessa lähettänyt bipolaarivikoja koskevan kyselyn eri yhtiöille, joilla on ollut käytössä HVDC-yhteyksiä. Kyselyssä kysyttiin bipolaariyhteyksien vikaantumiseen liittyviä tekijöitä ja esimerkiksi vikaantumisen syitä. Kyselyssä elektrodivioiksi laskettiin sekä itse elektrodin, että elektrodikaapelin tai -johtimen viat. Kyselyyn vastanneiden yhtiöiden elektrodipiireissä oli aiheutunut vikoja yhteyden käyttövuosien aikana esimerkiksi puun aiheuttamasta maasulusta, ylikuumentuneesta johdinliitoksesta, elektrodikaapelin vioista, johtoeristimen vauriosta ja resistanssin kasvusta. [16] Tässä työssä tehtävät tutkimukset keskittyvät vikaresistanssillisten maasulkujen aiheuttamiin vikatilanteisiin, joten työssä ei käsitellä esimerkiksi eristimien vaurioista johtuvia vikoja.

### 3. FENNO-SKAN-YHTEYDEN ELEKTRODIPIIRI

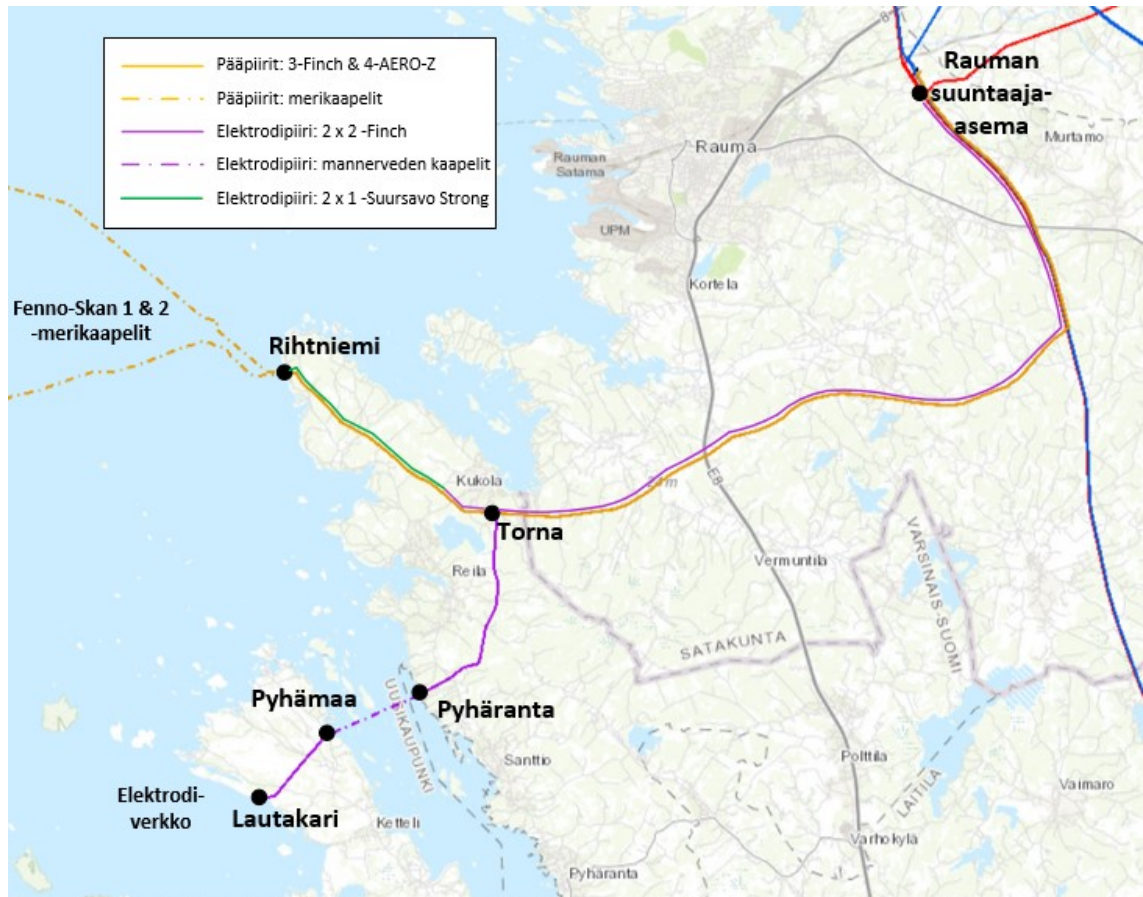
Luvussa 2.1 käsiteltiin yleisesti Fingridin HVDC-yhteyksiä, ja siten Fenno-Skan 1 ja 2 -yhteyksiä. Tässä luvussa perehdytään tarkemmin Fenno-Skan-yhteyksien elektrodipiiriin sekä sen rakenteeseen, toimintaan ja valvontaan. Elektrodipiirin rakenteen ja ympäristön perusteella arvioidaan myöhemmin tässä työssä (luvussa 6) elektrodipiirin mahdollisia vikatilanteita. Elektrodipiirin rakenteen ja toiminnan tunteminen on välttämätöntä myös, jotta voidaan ymmärtää elektrodipiirin vikatilanteiden havaitsemiseen ja siten elektrodipiirin valvontaan liittyvät haasteet.

Elektrodipiirin rakenne esitetään luvussa 3.1, elektrodipiirin toiminta luvussa 3.2 ja elektrodipiirin ominaisuuksista aiheutuvat vikatilanteiden havaitsemisen haasteet luvussa 3.3. Tämän luvun lopuksi, luvussa 3.4, esitetään myös elektrodipiirin nykyinen valvontajärjestelmä ja sen toimintaperiaate.

#### 3.1 Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin rakenne

Kuvassa 7 on Fenno-Skan-yhteyden Suomen puoleinen karttakuva. Kuvan mukaisesti yhteyden pääpiirit sekä elektrodipiiri alkavat Rauman suuntaaja-asemalta. Pääpiirit kulkevat samoissa pylväissä erillisinä virtapiireinä Rauman suuntaaja-asemalta Rihtniemeen, josta merikaapelit lähtevät kohti Ruotsin Dannebota. Fenno-Skan 1 -yhteyden pääpiirin avojohto on tyypiltään 3-Finch ja Fenno-Skan 2 -yhteyden 4-AERO-Z [9].

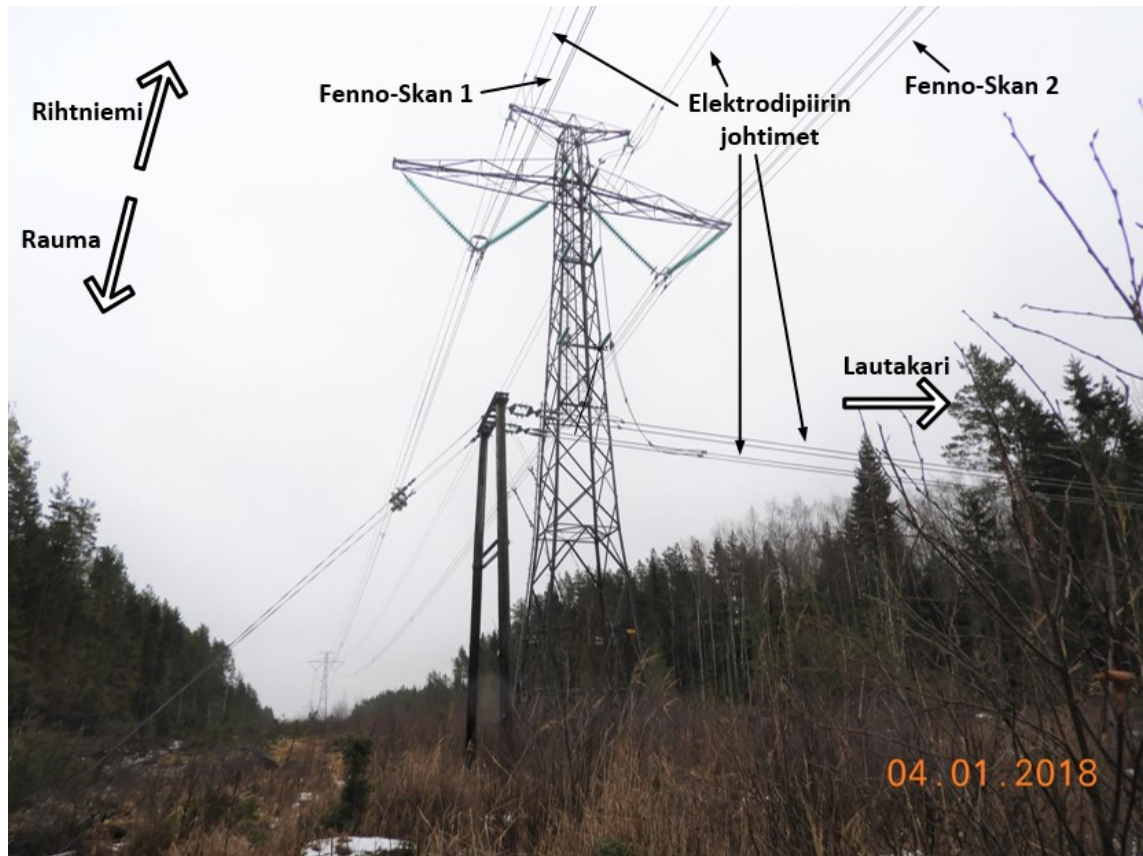
Elektrodipiiri koostuu kahdesta virtapiiristä, jotka kulkevat pääpiirien ukkosjohtimena Rauma-Rihtniemi välillä. Tornassa elektrodipiiri haarautuu pääpiirien linjasta kohti Lautakaria erillisenä avojohtona. Elektrodijohto on tyypiltään 2 x 2-Finch koko matkan Raumalta Lautakariin lukuun ottamatta Pyhärannan ja Pyhämään välistä kaapeliosuutta, jossa elektrodipiiri alittaa Mannerveden. Tornan ja Rihtniemen välisellä osuudella ukkosjohtimena on 2 x 2-Finchin sijasta 2 x 1-Suursavo Strong. Johdintyyppi ei kuitenkaan vaihdu heti elektrodipiirin haarautumiskohdassa, vaan vasta kolmen pylväsvälin jälkeen Rihtniemeen päin mentäessä. Elektrodiverkko sijaitsee Lautakarin elektrodiaseman edustalla meren pohjassa.



**Kuva 7.** Fenno-Skan-yhteyden Suomen puoleinen karttakuva. Pääpiirien avojohdot on esitetty kuvassa oranssilla viivalla (Rauma-Rihtniemi) ja merikaapelit keltaisella katkoviivalla. Elektrodipiirin 2 x 2-Finch-johto on merkitty violetilla viivalla, mannerveden kaapelit violetilla katkoviivalla ja elektrodipiirin avojohto-osuus pylvään 21 ja Rihtniemen välillä vihreällä viivalla. Perustuu lähteeseen [8].

Tasasähköjohto Rauman suuntaaja-asemalta Rihtniemeen on 33,1 kilometrin mittainen. Elektrodipiirin pituus on Raumalta Lautakariin 37,8 km, josta Rauma-Torna välinen osuus on 26,0 km ja Torna-Lautakari välinen osuus on 11,8 km. Tornan ja Lautakarin välinen osuus koostuu Tornan ja Pyhärannan välisestä 6,2 kilometrin avojohto-osuudesta, Pyhärannan ja Pyhämaan välisestä 2,6 kilometrin kaapeliosuudesta (ns. mannerveden kaapelit) sekä Pyhämaan ja Lautakarin välisestä 2,9 kilometrin avojohto-osuudesta. [9]

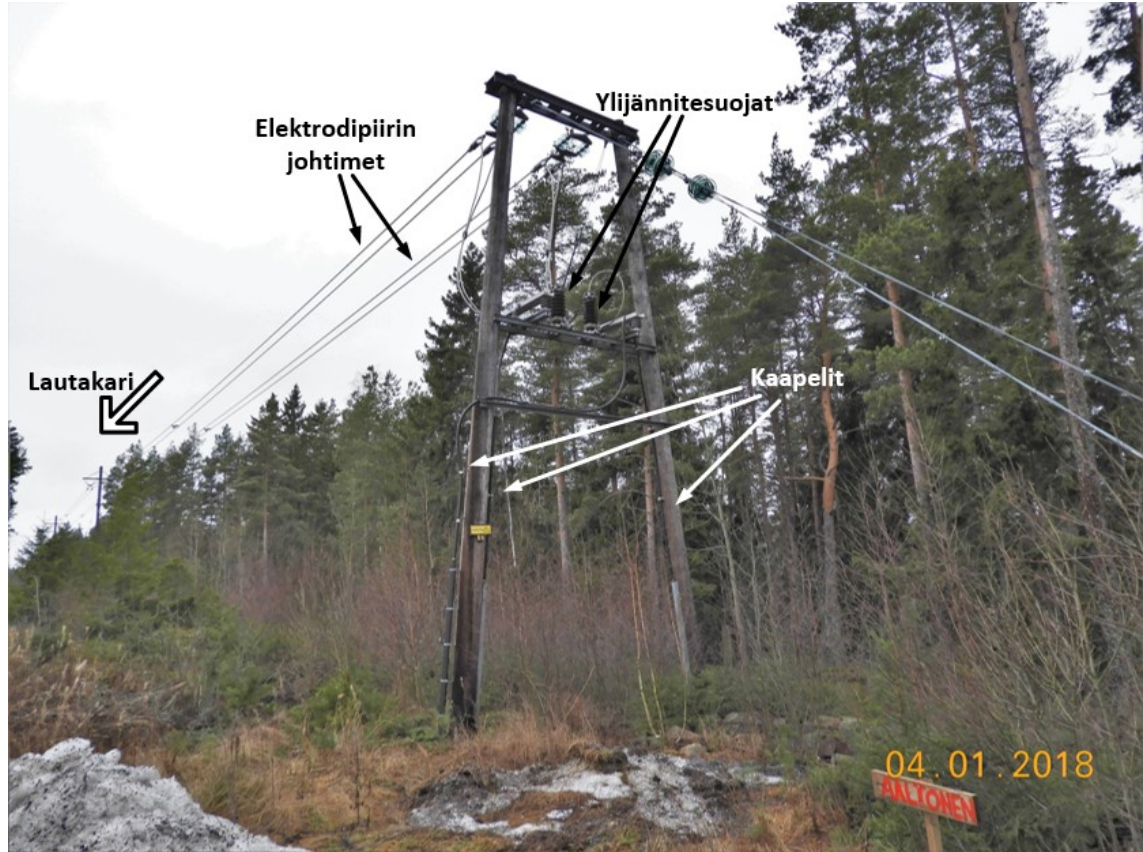
Kuvassa 8 on kuva Tornasta, jossa elektrodijohto haarautuu pääpiirin linjasta Lautakariin ja pääpiiri jatkaa Rihtniemeen kuvassa olevien suuntanuolien mukaisesti. Ennen haarautumista elektrodipiiri kulkee ukkosjohdinten tilalla. Vaikka elektrodipiirin johtimet toimivat myös ukkosjohtiminä, ne poikkeavat normaaleista ukkosjohtimista, koska ne ovat jännitteisiä ja 20 kV:n eristysrakenteella erotettuja pylväistä. Kuvassa 8 teräspylvään vasemmanpuoleinen virtapiiri on Fenno-Skan 1 ja oikeanpuoleinen virtapiiri Fenno-Skan 2.



**Kuva 8.** Kuvassa Torna. Tornassa elektrodipiiri haarautuu pääpiirin linjasta kohti Lautakaria. Kuvan merkintöjen mukaisesti vasemmanpuoleinen virtapiiri on Fenno-Skan 1 ja oikeanpuoleinen Fenno-Skan 2. Lisäksi kuvaan on merkitty Rauman sähköaseman sekä Rihtniemen ja Lautakarin asemien sijaintien suunnat nuolilla.

Tornan ja Lautakarin välisellä osuudella elektrodipiiri kulkee harustetuissa puupylväissä, lukuun ottamatta Pyhärannan ja Pyhämaan välistä 2,6 kilometrin mittaista osuutta, jossa elektrodipiiri alittaa Mannerveden kaapeleina. Pyhärannan ja Pyhämaan välinen kaapeli-osuus koostuu kolmesta kaapelista. Ennen Fenno-Skan 2 -rakennusprojektia kaapeliyhteys koostui kahdesta kaapelista, mutta projektin yhteydessä kaapeliyhteyttä vahvistettiin kolmannella kaapelilla. Siten elektrodipiirin toinen virtapiiri koostuu yhdestä ja toinen virtapiiri kahdesta kaapelista. Kaikki kolme Mannerveden alittavaa kaapelia ovat tyypiltään XMK-HH 630 [17].

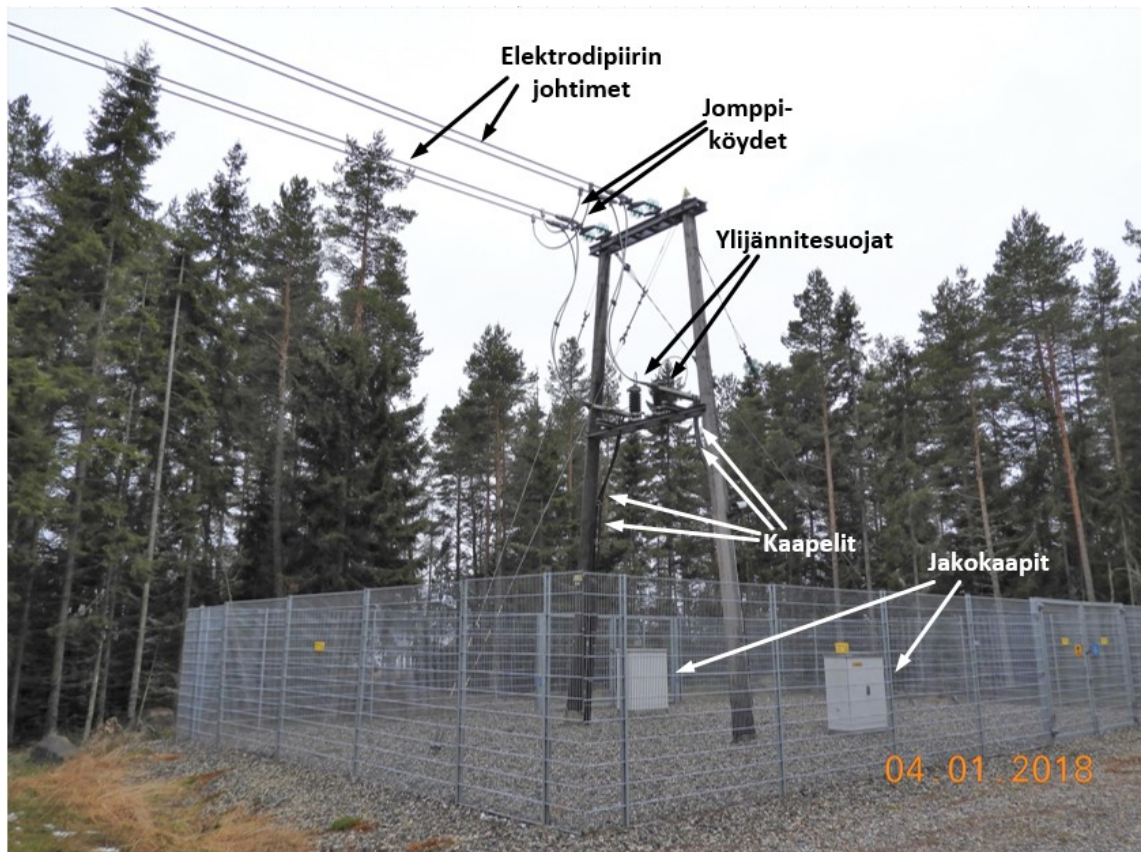
Kuva 9 on otettu Pyhämaan päätepylväästä. Pylvään vasemmanpuoleisessa jalassa näkyy toisen virtapiirin kaksi kaapelia ja oikeanpuoleisessa jalassa toisen virtapiirin ainoa kaapeli. Lisäksi pylväässä on ylijännitesuojat. Pyhärannassa, kaapeliyhteyden toisessa päässä, on vastaavanlainen rakenne.



***Kuva 9.** Pyhämaan päätepylväs, jossa avojohdot muuttuvat kaapeleiksi, jotka jatkavat Mannerveden alitse Pyhärantaan. Kuvaan on merkitty myös Lautakarin pääteaseman sijainnin suunta.*

Kuva 10 on otettu Lautakarin asemalta, josta kaapelit lähtevät merellä sijaitsevalle elektrodille. Kuten kuvasta on nähtävissä, elektrodipiirin virtapiirit on yhdistetty avojohdo- osuuden päässä. Virtapiirit on yhdistetty myös Rauman asemalla, mutta muutoin virtapiirit ovat toisistaan erilliset. Pylväässä on lisäksi ylijännitesuojat. Kumpaankin kuvassa näkyvään jakokaappiin menee pylväästä kaksi kaapelia. Jakokaapeista lähtee yhteensä 40 pienempää kaapelia (20 kaapelia kummastakin jakokaapista) merielektrodille.

Elektrodipiiri vastaa rakenteeltaan 20 kV johtoa. Johtimet eivät normaalitilanteessa ole yhteydessä maahan, sillä niitä ei ole kiinnitetty pylväsmaadoituksiin. Elektrodipiiri on merielektrodin kautta yhteydessä maahan. [18]



**Kuva 10.** Lautakarin päätepylväs. Elektrodipiirin virtapiirit yhdistyvät ja laskeutuvat neljänä kaapelina jakokaapeille. Kumpaankin kuvassa olevaan jakokaappiin menee kaksi kaapelia. Jakokaapeista lähtee yhteensä 40 kaapelia (20 kaapelia kummastakin jakokaapista) merielektrodiin.

Ennen Fenno-Skan 2 -yhteyden rakentamista yhteys oli monopolaarinen, joten paluuvirta kulki vain yhteen suuntaan neutraalipiiriä pitkin siten, että Ruotsin puoleinen elektrodi toimi anodina ja Suomen puoleinen katodina. Yhteyden bipolaarinen käyttö Fenno-Skan 2 -yhteyden valmistumisen myötä edellyttää kuitenkin elektrodivirran kulkemista molempiin suuntiin ja siten elektrodin toimimista sekä anodina että katodina yhteyden molemmissa päissä. Koska Suomen puoleinen elektrodi oli toteutettu anodiksi soveltumattomana kuparijohdinsilmukkana, se korvattiin Fenno-Skan 2 -rakennusprojektin yhteydessä uudella elektrodilla. Jo ennen Fenno-Skan 2 -projektia tutkittiin Ruotsin puoleisen elektrodin rakenteen, titaaniverkkojen, soveltuvuutta bipolaariseen käyttöön. Titaaniverkkojen todettiin soveltuvan Fenno-Skan-yhteyksien elektrodeiksi, joten Suomen puoleinen elektrodi muutettiin Fenno-Skan 2 -rakennusprojektin yhteydessä Ruotsin elektrodia vastaavaksi. [7]

Elektrodi koostuu 40 osaelektrodista. Nämä osaelektrodit ovat titaaniverkkoja, jotka on asetettu meren pohjaan. Lautakarin jakokaapeista lähtee jokaiseen titaaniverkkoon yksi 35 mm<sup>2</sup> MMK-H -kaapeli, joka kiinnittyy titaaniverkon eri kohtiin neljällä pienemmällä 10 mm<sup>2</sup> -kaapelilla. [17]

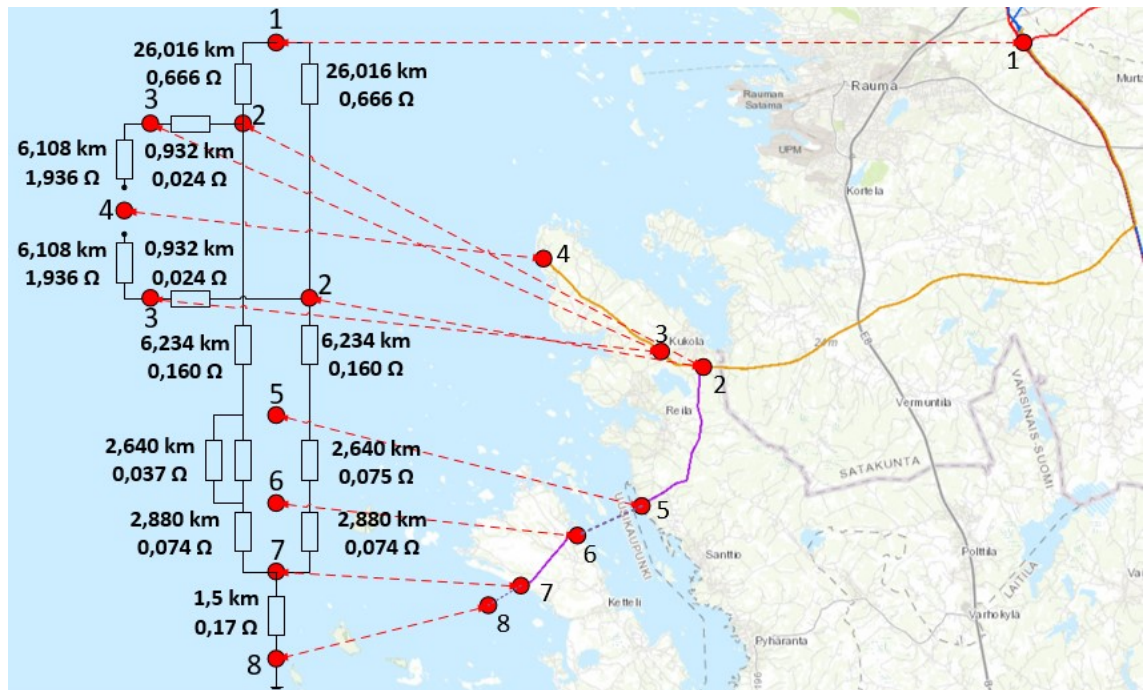


Taulukkoon 2 on koottu tiedot elektrodipiirin johtotyypeistä ja niiden tasavirtaresistansseista sekä elektrodipiirin eri osuuksien pituuksista. Taulukossa merkinnöillä P24 ja P21 tarkoitetaan pylväsnumeroita.

**Taulukko 2.** Elektrodipiirin johtotyypit, elektrodipiirin eri osien pituudet ja resistanssit. Taulukossa merkinnöillä P24 ja P21 tarkoitetaan pylväsnumeroita. Perustuu lähteeseen [9, 17].

Elektrodipiirin osa	Johdin/kaapelityyppi	Osuuden pituus	Tasavirtaresistanssi
Rauma-Torna	2 x 2-Finch	26,016 km	0,0512 $\Omega$ /km
Torna (P24)-P21	2 x 2-Finch	0,932 km	0,0512 $\Omega$ /km
P21-Rihtniemi	2 x 1-Sustrong	6,108 km	0,3170 $\Omega$ /km
Torna-Pyhäranta	2 x 2-Finch	6,234 km	0,0512 $\Omega$ /km
Pyhäranta-Pyhämaa	3 x XMK-HH 630 mm <sup>2</sup>	2,640 km	0,0283 $\Omega$ /km
Pyhämaa-Lautakari	2 x 2-Finch	2,880 km	0,0512 $\Omega$ /km
Lautakari-jakokaapit	4 x XMK-HH 630 mm <sup>2</sup>	< 20 m	0,0283 $\Omega$ /km
Jakokaapit-elektrodi	40 x MMK-H 35 mm <sup>2</sup>	1–2 km	0,5240 $\Omega$ /km

Kuvassa 11 on esitetty yksinkertaistettu kaaviokuva, jossa elektrodipiiri on kuvattu kahdena virtapiirinä. Havainnollisuuden vuoksi kaavio on esitetty karttakuvan vieressä. Kuvaan on merkitty elektrodipiirin jokaisen välin pituus ja taulukon 2 arvoista lasketut tasavirtaresistanssit virtapiirin väliä kohden.



**Kuva 11.** Elektrodipiiri. Kuvassa piste 1) Rauman suuntaaja-asema, 2) Torna, 3) Tor-  
nan lähellä oleva pylväs, jossa johdinlaji muuttuu, 4) Rihtniemi, 5) Pyhäranta, 6) Pyhä-  
maa, 7) Lautakari ja 8) elektrodiverkko. Kuvassa olevaan elektrodipiirin kaaviokuvaan  
on merkitty kunkin välin pituus ja tasavirtaresistanssi virtapiirin väliä kohden.

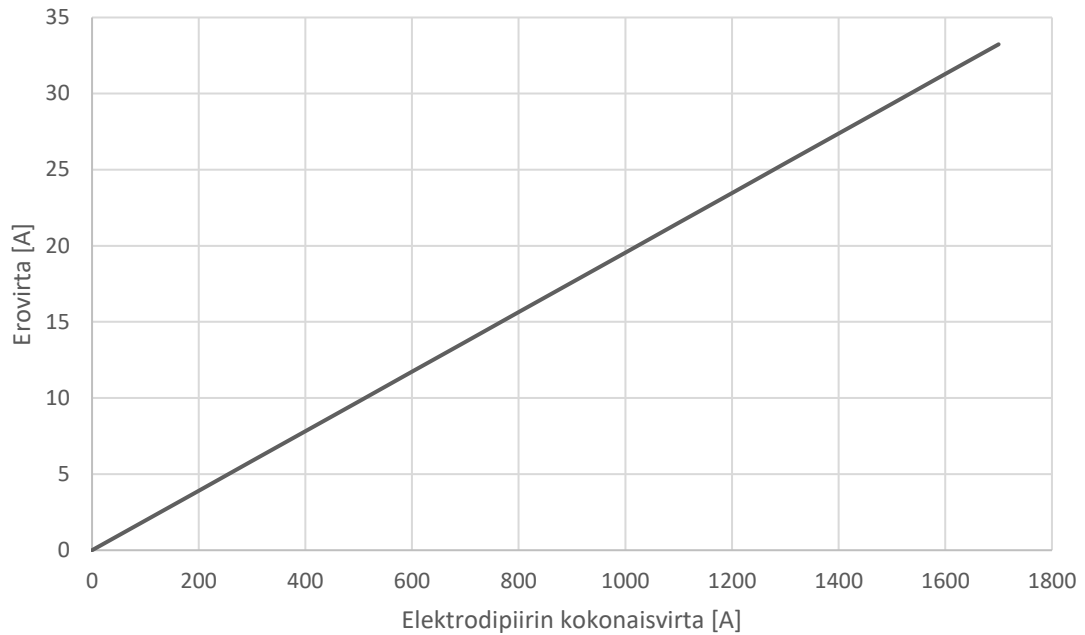
Kuvan 11 mukaisesti elektrodipiirin virtapiirit on yhdistetty Rauman suuntaaja-asemalla pisteessä 1 sekä Lautakarissa avojohto-yhteyden päässä pisteessä 7. Rihtniemessä pisteessä 4 virtapiirit ovat avoimet.

### 3.2 Elektrodipiirin toiminta

Kuten aiemmin luvussa 2.2 todettiin, Fenno-Skan-yhteydet ovat verkkokommutoivia, joten virta kulkee pääpiireissä aina samaan suuntaan riippumatta siirrettävän tehon suunnasta. Fenno-Skan 1 -yhteyden virta kulkee Rauman suuntaaja-asemalta Dannebon suuntaaja-asemalle ja Fenno-Skan 2 -yhteyden virta päinvastoin Ruotsista Suomeen päin. Normaalitylanteessa kumpikin Fenno-Skan-yhteys on käytössä, eli yhteyttä käytetään bipolaarisesti. Tällöin elektrodipiirissä kulkee Fenno-Skan 1 ja 2 -yhteyksien päävirtapiireissä kulkevien virtojen erovirta. Kun Fenno-Skan-yhteyden toinen päävirtapiiri ei ole käytettävissä, esimerkiksi huoltotoimenpiteiden tai vikatilanteiden vuoksi, Fenno-Skan-yhteyttä käytetään monopolaarisesti. Monopolaarisessa käytössä elektrodipiirissä kulkee käytössä olevan yhteyden virta, eli elektrodipiirissä kulkevan paluuvirran suuruus ja suunta ovat riippuvaisia käytössä olevasta yhteydestä ja siirrettävästä tehosta.

Koska yhteyksien nimellisvirrat ovat erisuuret ja Fenno-Skan 1 -yhteydellä nimellisvirta on pienempi kuin Fenno-Skan 2 -yhteydellä, elektrodipiirissä kulkeva virta on suurimmillaan, kun Fenno-Skan 2 -yhteydellä käytetään nimellisvirtaa, eli siirretään esimerkiksi maksimiteho, ja Fenno-Skan 1 -yhteys ei ole käytössä. Mikäli kummassakin päävirtapiirissä kulkisi yhtä suuri virta, elektrodipiirissä ei kulkisi lainkaan virtaa. Käytännössä elektrodipiirissä kuitenkin kulkee aina virtaa, kun yhteys on käytössä, sillä yhteyksien virtoja ei voida esimerkiksi mittausvirheiden vuoksi säätää täysin samoiksi. Lisäksi monopolaarisen käytön aikana elektrodipiirissä kulkee aina paluuvirta.

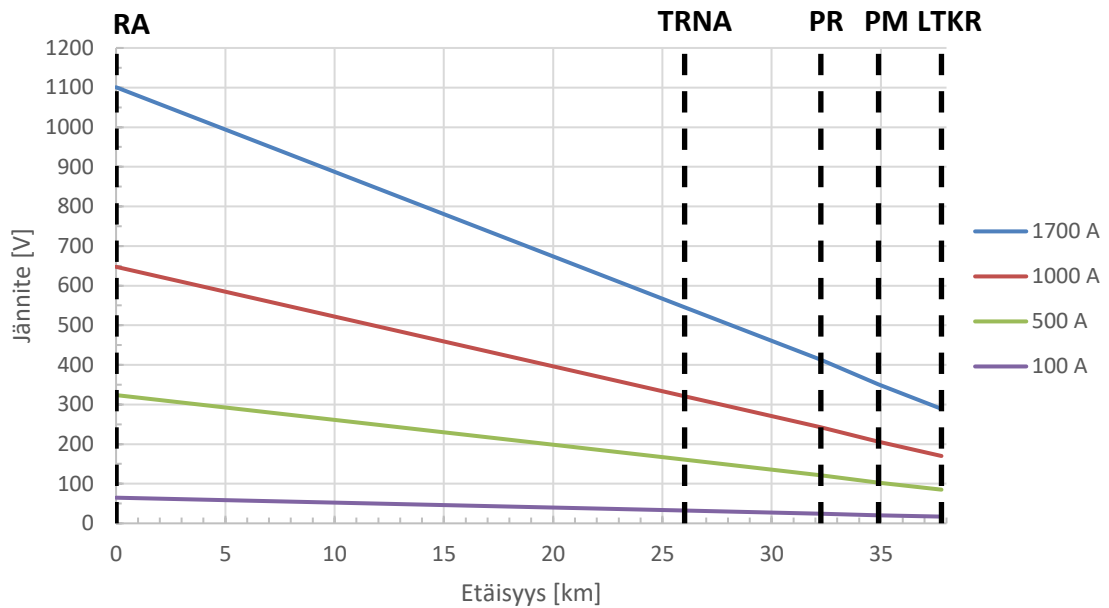
Kuten edellä luvussa 3.1 on kuvattu, elektrodipiiri koostuu kahdesta virtapiiristä, jotka ovat kytketty yhteen Rauman suuntaaja-asemalla sekä Lautakarissa avojohtoyhteyden päässä. Elektrodipiirin virtapiirit eivät ole kuitenkaan täysin symmetrisiä keskenään, joten virtapiireissä kulkevat virrat eivät ole yhtä suuret. Tässä työssä virtapiirillä 1 (VP1) tarkoitetaan elektrodipiirin virtapiiriä, jossa on vain yksi mannerveden kaapeli ja vastavasti virtapiirillä 2 (VP2) virtapiiriä, jossa on kaksi mannerveden kaapelia. Virtapiirin 1 kokonaisresistanssi on virtapiirin 2 kokonaisresistanssia suurempi, joten elektrodipiirin kokonaisvirta jakautuu virtapiirien kesken siten, että virtapiirissä 1 kulkee vähemmän virtaa. Erovirta on sitä suurempi, mitä suurempi on elektrodipiirissä kulkeva kokonaisvirta. Kuvassa 12 on esitetty elektrodipiirin virtapiirien erovirran suuruus elektrodipiirissä kulkevan kokonaisvirran funktiona, kun elektrodipiirissä ei ole vikaa. Erovirran suuruus normaalitylanteessa on saatu määrittämällä virtapiirien resistanssien suhde taulukon 2 arvoista ja laskemalla kokonaisvirran jakautuminen virtapiirien kesken. Vikatilanteissa virtapiirien välisen erovirran suuruus riippuu elektrodipiirin kokonaisvirran lisäksi vikatyypistä, vikaantuneesta virtapiiristä ja vian sijainnista. Elektrodipiirin vikaantumista käsitellään tarkemmin luvussa 6.



**Kuva 12.** Elektrodipiirin virtapiirien erovirran suuruus elektrodipiirissä kulkevan kokonaisvirran funktiona, kun elektrodipiirissä ei ole vikaa.

Elektrodipiirin jännite on riippuvainen elektrodipiirissä kulkevasta virrasta. Jännite on jännitteenaleneman vuoksi erisuuri elektrodipiirin eri kohdissa, eli se riippuu myös tarkastelukohdasta. Suurimmillaan elektrodipiirin jännite on Rauman suuntaaja-asmalla, jossa se on Fenno-Skan 2 -yhteyden nimellisvirran suuruisella elektrodivirralla noin 1100 V. Vastaavasti pienimmillään jännite on elektrodilla, jonka jännite on 0 V.

Kuvassa 13 on esitetty elektrodipiirin virtapiirin 1 jännitteet eri kohdissa neljällä eri elektrodipiirin kokonaisvirran arvolla, kun virta kulkee elektrodipiirissä Suomesta Ruotsiin päin. Elektrodipiirin virran kulkiessa Ruotsista Suomeen päin kuvaajat ovat samanlaiset, mutta jännitteen polariteetti on negatiivinen. Kuvan yläreunaan on merkitty lyhenteillä elektrodipiirin eri kohdat: Rauman suuntaaja-asema (RA), Torna (TRNA), Pyhäranta (PR), Pyhämaa (PM) ja Lautakarin elektrodiasema (LTKR). Virtapiirien epäsymmetriasta johtuen virtapiirien jännitteenalenemat ovat erilaiset ja siten myös virtapiirien jännitteet ovat erisuuruiset samassa elektrodipiirin kohdassa. Kuvassa on esitetty vain virtapiirin 1 jännitteet. Virtapiirillä 1 tarkoitetaan elektrodipiirin sitä virtapiiriä, joka koostuu vain yhdestä mannerveden kaapelista. Vastaavasti virtapiirillä 2 tarkoitetaan virtapiiriä, jossa on kaksi mannerveden kaapelia. Jännitteet on määritetty taulukon 2 resistanssiarvojen sekä johtopituuksien perusteella.



**Kuva 13.** Virtapiirin 1 jännitteet elektrodipiirin eri kohdissa neljällä eri elektrodipiirin kokonaisvirran arvolla, kun virta kulkee elektrodipiirissä Suomesta Ruotsiin päin.

Elektrodipiirin toisen virtapiirin vioittuminen tai katkeaminen ei estä yhteyden käyttöä. Maasulkutilanteissa esiintyvät vaarajännitteet saattavat kuitenkin aiheuttaa vaaraa ihmisille ja eläimille vikakohdan ympäristössä, mikäli niiden suuruus ylittää sallitut rajat. Jotta saataisiin varmuus Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin vikatilanteissa esiintyvistä vaarajännitteiden suuruuksista, tässä työssä tehdään vaarajänniteselvitys. Vaarajännitteisiin liittyvää teoriaa käsitellään tarkemmin luvussa 4.

### 3.3 Elektrodipiirin vikatilanteiden havaitsemisen haasteet

Kuten aiemmin tässä työssä on mainittu, elektrodipiirin vikatilanteiden havaitseminen on vaikeaa monista syistä. Ensinnäkin elektrodipiirissä kulkeva kokonaisvirta on bipolaarisessa käytössä käytännössä hyvin pieni, ja siten myös vikatilanteiden havaitseminen on vaikeaa, koska vikavirratkin ovat pieniä. Monopolaarisessa käytössä elektrodipiirissä kulkee suurempi virta, mutta koska yhteyttä käytetään ensisijaisesti bipolaarisesti, on elektrodipiirissä kulkeva virta todennäköisemmin hyvin pieni. Kun elektrodipiirissä ei kulje virtaa, elektrodipiirin jännite on myös nolla. Tällöin virran tai jännitteen arvot eivät muutu vikatilanteissa, ja vikojen havaitsemista on hankala perustaa virta- ja jännitemittauksiin.

Toiseksi, elektrodipiirin jännite on pieni, ollen suurimmillaan Rauman suuntaaja-aseamalla noin 1,1 kV. Elektrodipiirin jännite pienenee kohti elektrodia, joka on kosketuksessa maahan ja jonka jännitteen voidaan siten olettaa olevan nolla. Näin ollen myös vikavirran suuruus vaihtelee sen mukaan, missä kohtaa elektrodipiiriä vika sijaitsee, ja mitä lähempänä vika sijaitsee elektrodia, sitä pienempi on vikavirta. Vikavirtojen suuruuteen

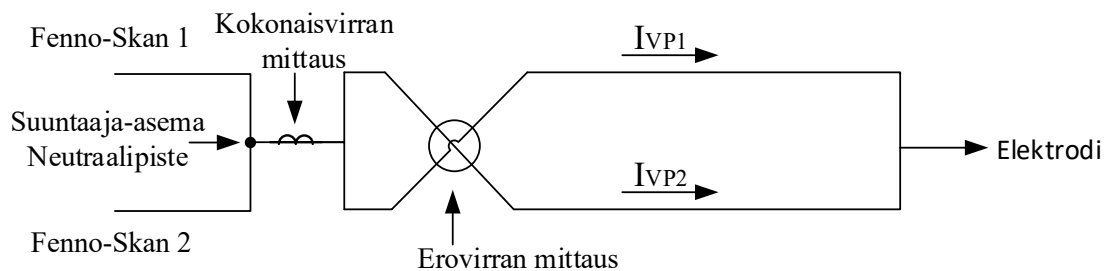
vaikuttaa myös vikaresistanssin ja maaperän resistiivisyyden suuruudet. Suomessa maaperän resistiivisyys on suhteellisen suuri, joten vikavirratkin jäävät siten pienemmiksi.

Maasulussa elektrodipiirin kokonaisvirta pysyy samana. Maasulku ei vaikuta tasasähköyhteyden suuntaajien toimintaan ja siten elektrodipiirissä kulkeva kokonaisvirta on sama kuin ennen vikatilannetta, mikäli tehonsiirtotilanteen oletetaan pysyvän samana. Vikatilanteiden havaitsemista vaikeuttaa myös se, että elektrodipiirin eri kohdissa esiintyvät jännitteet ja elektrodipiirissä kulkeva kokonaisvirta vaihtelevat tehonsiirtotilanteen mukaan. Lisäksi elektrodipiirin valvontamenetelmissä tulee ottaa huomioon elektrodipiirin kahden virtapiirin epäsymmetrisyys, joka aiheuttaa virtapiireihin erisuuruiset virrat.

### 3.4 Elektrodipiirin nykyinen mittaus- ja valvontamenetelmä

Fenno-Skan-yhteyden Suomen puoleisen elektrodipiirin valvontajärjestelmä perustuu suuntaaja-asemalla oleviin virtamuuntajiin, jotka mittaavat elektrodipiirissä kulkevaa kokonaisvirtaa sekä elektrodipiirin virtapiirien erovirtaa (ELUS, Electrode Line Unbalance Supervision). Erovirtamittaus suoritetaan erovirtamuuntajalla, jonka lävitse virtapiirit kulkevat eri suuntiin. Virtapiireissä kulkevat virrat aiheuttavat virtamuuntajan sydämiin eri suuntiin kulkevat magneettivuot, ja mikäli virrat ovat samansuuruiset, vuot kumoavat toisensa. Normaalitylanteessa, ja vikatilanteesta riippuen myös vikatilanteissa, virtapiireissä kulkevat virrat eivät ole kuitenkaan yhtä suuret, jolloin virtamuuntajan sydämissä kulkee tietynsuuruinen nettovuo. Nettovuo kumotaan syöttämällä sydämeen kompensointivirtaa, jonka suuruutta ja suuntaa mitataan. Siten erovirran suuruus saadaan selville mitatusta kompensointivirrasta ottamalla huomioon käämien kierrosten lukumäärät. [19]

Kuvassa 14 on esitetty periaatekaavio Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin nykyisen valvontamenetelmän virranmittauksesta. Elektrodipiirin kokonaisvirtaa mitataan suuntaaja-asemalla neutraalipisteen jälkeen kohdassa, jossa elektrodipiirin virta kulkee yhdessä virtapiirissä ja vastaavasti erovirtaa mitataan kohdassa, jossa elektrodipiiri jakaantuu kahdeksi virtapiiriksi. Virtapiirit kulkevat kuvan mukaisesti eri suuntiin erovirtamuuntajan lävitse. Kuvassa  $I_{VP1}$  ja  $I_{VP2}$  ovat virtapiireissä kulkevat virrat, joiden erotusta erovirtamuuntaja mittaa.



**Kuva 14.** Elektrodipiirin nykyisen valvontamenetelmän virranmittauksen periaatekaavio. Kuvassa  $I_{VP1}$  ja  $I_{VP2}$  ovat virtapiireissä kulkevat virrat.

Kuvassa 15 on elektrodipiirin erovirtamuuntaja kuvattuna Rauman suuntaaja-aseamalla. Kuvasta on nähtävissä, että elektrodipiirin virtapiirit kulkevat erovirtamuuntajan lävitse eri suuntiin.



**Kuva 15.** Elektrodipiirin erovirtamuuntaja kuvattuna Rauman suuntaaja-aseamalla.

Elektrodipiirin nykyinen valvontajärjestelmä tarkkailee mitatun erovirran itseisarvon ja vakioluvulla kerrotun elektrodipiirin kokonaisvirran itseisarvon erotusta. Siten järjestelmän tarkkailema arvo  $H$  on kaavan (1) mukaisesti

$$H = \left| |I_d| - |I_{\text{kok}}| \cdot k \right| \quad (1)$$

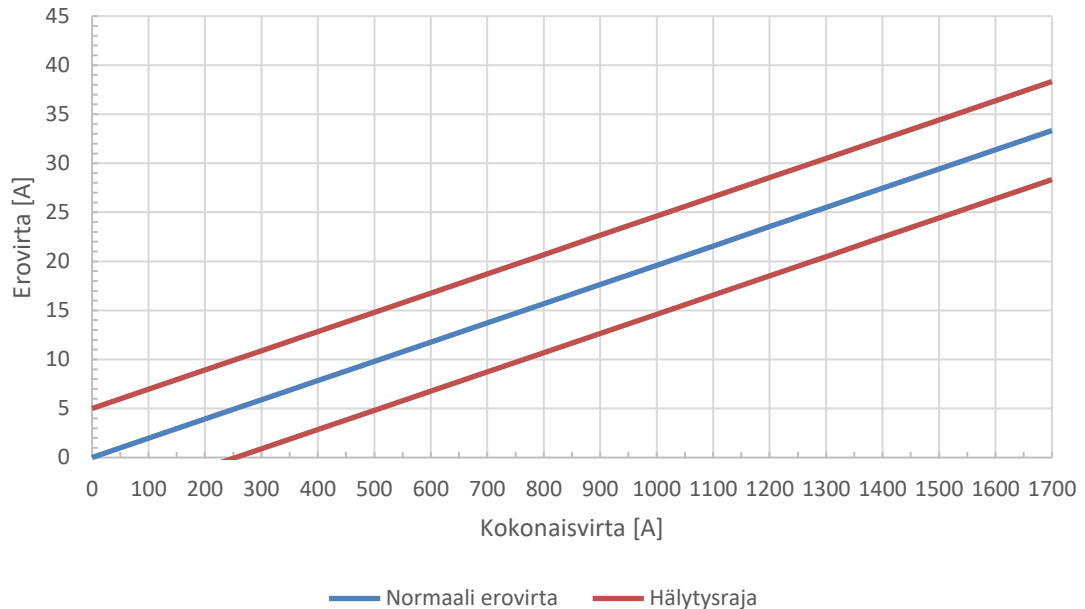
missä  $I_d$  on mitattu erovirta,  $I_{\text{kok}}$  elektrodipiirin kokonaisvirta ja  $k$  vakioluku. Järjestelmä on asetettu antamaan hälytys, kun  $H$  ylittää arvon 5 A 10 sekunnin viiveajalla [19]. Kaavassa (1) erovirran itseisarvo on virtapiirissä 1 kulkevan virran ja virtapiirissä 2 kulkevan virran erotuksen itseisarvo kaavan (2) mukaisesti

$$|I_d| = |I_{VP1} - I_{VP2}| \quad (2)$$

missä  $I_{VP1}$  on virtapiirissä 1 kulkeva virta ja  $I_{VP2}$  virtapiirissä 2 kulkeva virta. Vakioluku  $k$  on normaalitilanteen erovirran ja kokonaisvirran osamäärä, eli kuvan 12 suoran kulma-kerroin kaavan (3) mukaisesti

$$k = \frac{|I_{dn}|}{|I_{\text{kok}}|} \quad (3)$$

missä  $I_{dn}$  on normaalitilanteen erovirta, eli elektrodipiirin virtapiireissä kulkevien virtojen erotus tilanteissa, joissa elektrodipiiri ei ole vikaantunut. Siten järjestelmän tarkkailema arvo  $H$  on normaalitilanteessa nolla. Mikäli erovirta poikkeaa normaalitilanteen erovirrasta,  $H$ :n arvo on erisuuri kuin nolla. Kuvassa 16 on esitetty elektrodipiirin erovirran suuruus normaalitilanteessa sekä nykyisen valvontamenetelmän hälytysrajat elektrodipiirin kokonaisvirran funktiona.



**Kuva 16.** Nykyisen valvontamenetelmän hälytysraja ja elektrodipiirin erovirran suuruus normaalitilanteessa elektrodipiirin kokonaisvirran funktiona. Nykyinen menetelmä antaa hälytyksen, kun erovirran suuruus poikkeaa normaalitilanteen erovirrasta 5 A.

Nykyisen valvontamenetelmän hyvä puoli on menetelmän yksinkertaisuus, sillä se ei vaadi mitään laitteistoa elektrodiasemalle eikä tietoliikenneyhteyksiä suuntaaja-aseman ja elektrodiaseman välille. Valvontamenetelmän toimiminen ilman turhia hälytyksiä vaatii kuitenkin riittävän suuren erovirran suhteessa elektrodipiirin kokonaisvirtaan, sillä mittausepätkä tarkkuuksista ja virtapiirien epäsymmetriasta johtuen hälytysrajaa ei voida asettaa liian pieneksi. ABB:n [20] mukaan erovirtamuuntajan mittausrvirhe on pienempi kuin 0,2 % ja mittaustuloksia vertailevan järjestelmän virhe pienempi kuin 0,1 %.

Valvontajärjestelmän hälytysraja on kuitenkin sama riippumatta elektrodipiirissä kulkevasta kokonaisvirrasta, ja siten hälytykseen vaaditaan suhteellisesti suurempi erovirta mitä pienempi kokonaisvirta on. Koska hälytysraja on suhteellisen suuri etenkin pienemmillä kokonaisvirroilla, ja elektrodipiirissä kulkeva virta saattaa olla hyvinkin pieni tai lähellä nollaa, nykyinen valvontamenetelmä ei oletettavasti kykene havaitsemaan kaikkia vikatilanteita. Siten nykyisen valvontamenetelmän soveltuvuutta Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin vikojen havaitsemiseen on syytä tutkia tarkemmin.

## 4. VAARAJÄNNITTEIDEN SYNTYMINEN VIKATILANTEISSA

Tässä luvussa käydään läpi vikatilanteisiin liittyvien vaarajännitteiden käsitteet ja niihin liittyvää laskentateoriaa. Standardeissa SFS-EN 50341-1, SFS-EN 50341-2-7 ja SFS 6001 on annettu AC-vaarajännitteitä koskevia määräyksiä. Standardi EN 50341-1 Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä (osa 1) [21] sisältää kaikille maille yhteisiä määräyksiä, mutta sitä sovelletaan Suomessa vain yhdessä standardin toisen osan SFS-EN 50341-2-7 [22] kanssa. Tämä toinen osa sisältää Suomen kansalliset velvoittavat määräykset. Standardi SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset [23] sisältää nimensä mukaisesti vaatimukset koskien vaihtojännitteisten suurjännitesähköasennusten (nimellisjännite yli 1 kV ja nimellistaajuus enintään 60 Hz) suunnittelua ja rakentamista.

Koska edellä mainituissa standardeissa annetut määräykset koskevat vaihtosähköä, ei niitä voida suoraan soveltaa tässä työssä. Tasasähköä koskevia virran ja jännitteen raja-arvoja on käsitelty esimerkiksi julkaisussa IEC/TS 60479-1 [24], kirjassa Direct Current Transmission Volume I [25] ja raportissa IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding [26].

### 4.1 Vaarajännitteet

Vaarajännitteitä syntyy vikapaikkaan ja sen ympäristöön maasulun seurauksena. Vaarajännitteitä ovat kosketusjännitteet, askeljännitteet, siirtyvät jännitteet ja takaperoiset kosketusjännitteet. Kosketusjännitteellä tarkoitetaan jännitteisen osan kosketuskohdan ja maan välistä jännitettä ja askeljännitteellä kosketusjännitettä, joka vaikuttaa metrin päässä toisistaan olevien jalkojen välillä. Kosketusjännite vaikuttaa ihmisen käden ja jalkojen tai molempien käsien välillä. [21, 23]

Siirtyvällä potentiaalilla tarkoitetaan siirtyvää jännitettä ja takaperoista kosketusjännitettä. Siirtyvällä jännitteellä tarkoitetaan maasulkupaikan potentiaalinnousun siirtymistä maadoitettua johdinta pitkin kauemmaksi maasulkupaikasta alueelle, jossa on nollopotentiaali ja jossa johdinta voidaan koskettaa. Takaperoinen kosketusjännite voi aiheutua, kun kosketetaan maasulkupaikan lähetyvillä jotakin kaukana maasulkupaikasta maadoitettua eristettyä johdinta. Siirtyviä potentiaaleja voi aiheutua esimerkiksi metalliputkien tai -aitojen tai kaapeleiden kautta. [21, 23]

### 4.2 Maadoitusjännite ja maanpinnan potentiaali

Maadoituksella tarkoitetaan jonkin laitteen tai virtapiirin osan yhdistämistä maadoituselektrodin avulla maahan. Standardien SFS-EN 50341-1 [21] ja SFS 6001 [23] mukaan



maadoituselektrodilla tarkoitetaan maahan johtavassa yhteydessä olevaa, maahan tai muuhun johtavaan ja maahan yhteydessä olevaan väliaineeseen upotettua johdinta. Standardin SFS-EN 50341-1 [21] mukaan maadoitusjärjestelmät koostuvat maadoituselektrodeista sekä maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimista, ja niihin liitetään esimerkiksi myös pylväismaadoitukset, armeeraukset ja metalliset kaapelivaipat. Maadoitusjärjestelmän tehtävänä on pitää vian seurauksena mahdollisesti aiheutuvat askel- ja kosketusjännitteet hyväksyttävänä. Maadoitusjärjestelmän maadoitusimpedanssi on maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan, eli maadoituselektrodista tai maadoitusjärjestelmästä kaukana olevan maan, jonka minkä tahansa kahden pisteen välillä ei ole maavirran aiheuttamaa potentiaaliero, välinen impedanssi. [21]

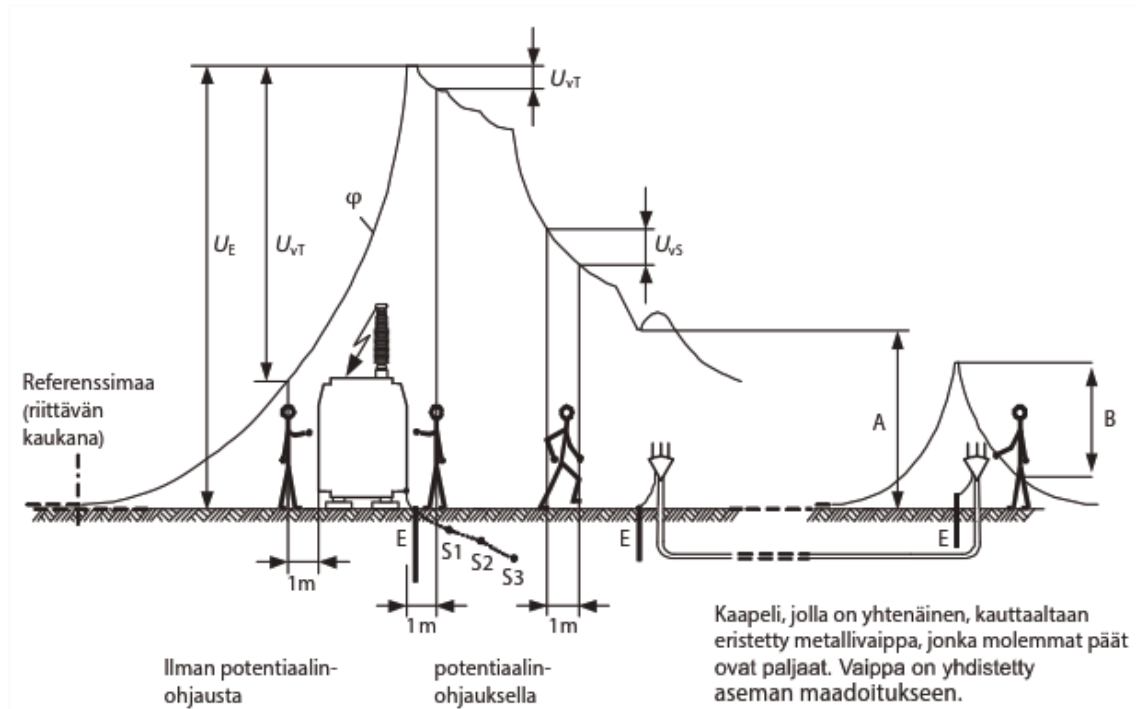
Standardin SFS-EN 50341-1 [21] mukaan maasululla tarkoitetaan johtavan yhteyden muodostumista jännitteisen johtimen ja maan tai maadoitetun osan välille. Maasuluksi voidaan ajatella suojauksen näkökulmasta myös tilanne, jossa esimerkiksi johdin katkeaa ja sen päät putoavat maahan. Maasulkukohdasta maahan kulkeva virta on maasulkuvirta  $I_F$ , jonka suuruus on riippuvainen verkon maadoitustavasta ja vikaresistanssin suuruudesta. Esimerkiksi maasta erotettujen ja sammutettujen verkkojen tapauksessa maasulkuvirta on pieni. Maahan kulkeva virta nostaa maanpinnan potentiaalia, eli maanpinnan tietyn kohdan ja referenssimaan välistä jännitettä. Mitä vähemmän maahan kulkee virtaa, sitä vähemmän maan potentiaali nousee maasulun vaikutuksesta ja sitä pienemmäksi kosketusjännitteet jäävät. [27] Se osa maasulkuvirtaa, joka kulkee maadoitusimpedanssin kautta maahan ja joka aiheuttaa maadoitusjärjestelmän ja referenssimaan välisen maadoitusjännitteen  $U_E$  on maavirta  $I_E$  [21, 23]. Siten maadoitusjännite saadaan laskettua kaavan (4) mukaisesti:

$$U_E = Z_E \cdot I_E \quad (4)$$

jossa  $Z_E$  järjestelmän tietyn kohdan ja referenssimaan välinen impedanssi, eli maadoitusimpedanssi [21].

Kuvassa 17 on esitetty maanpinnan potentiaalilin  $\phi$  ja eri vaarajännitteiden muodostuminen vikapaikan läheisyydessä [23]. Merkinnällä  $E$  tarkoitetaan maadoituselektrodeja ja merkinnöillä  $S_1$ ,  $S_2$  ja  $S_3$  potentiaalinohjauselektrodeja. Kuvan mukaisesti maanpinnan potentiaali on maksimissaan maadoitusjännitteen  $U_E$  suuruinen. Prospektiivinen askeljännite  $U_{VS}$  vaikuttaa metrin päässä toisistaan olevien jalkojen välillä, eli toisin sanoen sen suuruus on sama kuin maapotentiaalilin erotus jalkojen välillä. Prospektiivinen kosketusjännite  $U_{VT}$  on se osa maadoitusjännitteestä, joka vaikuttaa jännitteisen osan kosketuskohdan ja sen maakohdan välillä, jossa ihminen seisoo. Kuvassa 17 on esitetty kosketusjännitteen muodostuminen kahdessa eri tilanteessa: ilman potentiaalinohjausta ja potentiaalinohjauksella. Potentiaalinohjauksella maanpinnan potentiaali ei muutu yhtä nopeasti maasulkukohdasta pois päin mentäessä, jolloin kosketusjännite jää pienemmäksi.

Kuvassa 17 merkinnät *A* ja *B* tarkoittavat siirtyvän potentiaalilin aiheuttamaa prospektiivista kosketusjännitettä, mikäli kaapelin vaippa on maadoitettu vain toisesta päästä (*A*) tai molemmista päistä (*B*). Tapauksessa *A* ihmisen alla olevan maan potentiaali on nolla, jolloin suurin kosketusjännite on johdon toisen pään maanpinnan potentiaalilin suuruinen. Tapauksessa *B* kaapeli on maadoitettu molemmista päistä, jolloin siirtyvä potentiaali aiheuttaa maanpinnan potentiaalilin nousun myös kaapelin siinä päässä, jossa ihminen koskettaa kaapelia. Tällöin kosketusjännite on kosketuskohdan ja jalkojen välisen potentiaalieron suuruinen.



**Kuva 17.** Maanpinnan potentiaalilin  $\phi$  ja eri vaarajännitteiden muodostuminen vikapaikan läheisyydessä. Kuvassa *E* on maadoituselektrodi ja *S*<sub>1</sub>, *S*<sub>2</sub> ja *S*<sub>3</sub> potentiaaliohjaus-elektrodit.  $U_E$  on maadoitusjännite,  $U_{vS}$  suurin askeljännite ja  $U_{vT}$  suurin kosketusjännite. Merkinnät *A* ja *B* tarkoittavat siirtyvän potentiaalilin aiheuttamaa suurinta kosketusjännitettä, kun kaapelin vaippa on maadoitettu vain toisesta päästä (*A*) tai molemmista päistä (*B*). [23]

Maadoitusimpedanssi tai -resistanssi on suoraan verrannollinen maan ominaisresistanssiin  $\rho$ . Suomessa maan ominaisresistanssi on lähelle maan pintaa ulottuvan suuren ominaisresistanssin omaavan kallioperän vuoksi erittäin suuri. Kallion päällä oleva maakerros on lisäksi tyypillisesti hiekkaa tai soraa, jonka ominaisresistanssi on myös suhteellisen suuri. [25] Taulukossa 3 on esitetty yleisempien maalajien, betonin sekä veden resistiivisyyksiä.

**Taulukko 3.** Maan, betonin ja veden resistiivisyyksiä [23].

<b>Aine</b>	<b>Keskimäärin [<math>\Omega\text{m}</math>]</b>	<b>Tavallisimmat vaihteluvälit [<math>\Omega\text{m}</math>]</b>
Savi	40	25-70
Saven sekainen hiekka	100	40-300
Lieju, turve, multa	150	50-250
Hiekka, hieta	2 000	1 000-3 000
Moreenisora	3 000	1 000-10 000
Harjusora	15 000	3 000-30 000
Graniittikallio	20 000	10 000-50 000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50-500
Betoni kuivana	10 000	2 000-100 000
Järvi- ja jokivesi	250	100-400
Pohja-, kaivo- ja lähdevesi	50	10-150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1-5

Maaperän resistiivisyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat maaperän tyyppin lisäksi muun muassa maaperän raekoko, tiheys ja kosteus. Lämpötila vaikuttaa maaperän resistiivisyyteen siten, että lämpötilan nousu pienentää resistiivisyyttä, ja vastaavasti maaperän jäätyminen kasvattaa resistiivisyyttä [25]. Lisäksi resistiivisyys voi vaihdella syvyyden mukaan, johdun maaperän erilaisista kerroksista. [23] Suomessa maaperän resistiivisyys on tyypillisesti hyvin suuri ja aiheuttaa siten vikapaikan lähelle suuret askel- ja kosketusjännitteet. Suuren resistiivisyyden vuoksi maasulun aiheuttama maassa kulkeva virta tunkeutuu syvälle maahan ja leviää johdolta sivulle päin pitkän matkaa. [27] Koska maan resistiivisyys vaihtelee sijainnin ja ympäristön olosuhteiden mukaan, maan resistiivisyyttä on hankalaa mallintaa tarkasti. Suurosen tutkintotyön [28] mukaan Suomen maan keskimääräisenä resistiivisyyden arvona käytetään 2300  $\Omega\text{m}$ .

Maadoituselektrodina voi toimia esimerkiksi maahan upotettu maadoitussauva tai vaaka-maadoituselektrodi, ja se yhdistetään maadoitettavaan osaan maadoitusjohtimella. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssi  $R_E$  on maadoituselektrodin ja referenssimaan välinen resistanssi. [21] Maadoituselektrodin maadoitusresistanssi on riippuvainen elektrodin muodon lisäksi sen asennustavasta sekä maan resistiivisyydestä. [23] Taulukossa 4 on esitetty erilaisten maadoituselektrodien maadoitusresistanssien laskentakaavat.

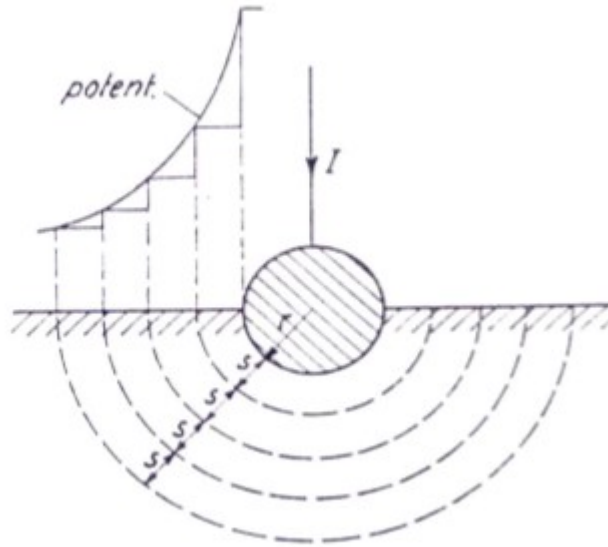
**Taulukko 4.** Erilaisten maadoituselektrodien maadoitusresistanssien  $R_E$  laskentakaavat. Taulukossa  $D$  on pallon, levyn tai ruudukon halkaisija,  $L$  elektrodin pituus,  $d$  johtimen halkaisija tai puolet nauhan leveydestä,  $s$  levyn paksuus,  $h$  elektrodin upotussyvyys ja  $\rho$  maan resistiivisyys. [23]

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

Kuvassa 18 on havainnollistettu puoliksi maahan upotetun palloelektrodin muodostamat potentiaalirenkaat, kun virta kulkee elektrodin kautta maahan. Tässä työssä maan oletetaan olevan homogeeninen, jolloin virta jakautuu tasaisesti joka suuntaan. Virta kohtaa maahan kulkiessaan pinta-alan, joka vastaa puolipallon pinnan suuruista alaa. Siten maassa kulkeva virta kohtaa sitä suuremman pinnan mitä kauemmaksi virta on kulkenut elektrodista, ja siten virran kohtaama resistanssi pienenee elektrodista pois päin kuljettaessa. Puoliksi maahan upotetun palloelektrodin maadoitusresistanssi on taulukon 4 mukaisesti

$$R_E = \frac{\rho}{\pi D} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (5)$$

missä  $\rho$  on maan resistiivisyys,  $D$  maadoituselektrodin halkaisija ja  $r$  maadoituselektrodin säde [23].

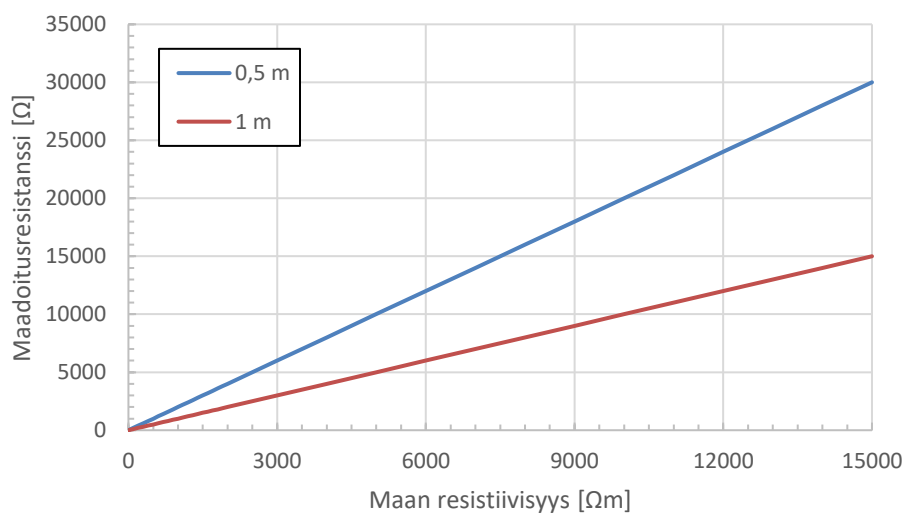


**Kuva 18.** Palloelektrodi. Kuvassa  $I$  on maadoituselektrodin kautta maahan kulkeva virta,  $r$  maadoituselektrodin säde ja  $s$  tarkasteltavan maakerroksen paksuus. [28]

Maadoitussauvan maadoitusresistanssin suuruutta voidaan arvioida yksinkertaisella kaavalla:

$$R_E = \frac{\rho}{h} \quad (6)$$

missä  $\rho$  on maan resistiivisyys ja  $h$  elektrodin syvyys [28, 29]. Kuvassa 19 on esitetty kuvaajat maadoitussauvan maadoitusresistanssista, kun maan resistiivisyys vaihtelee välillä 0–15 000  $\Omega\text{m}$  ja kun maadoitussauva on upotettu pystysuoraan 0,5 tai 1 metrin syvyyteen.



**Kuva 19.** Pystysuoran maadoitussauvan maadoitusresistanssi eri maan resistiivisyyden arvoilla, kun pystysuoran maadoitussauvan upotussyvyys on 0,5 tai 1 m.

Vaarajännitteen suuruus on tapauskohtainen, mutta se on kuitenkin maksimissaan maadoitusjännitteen suuruinen. Vaihtosähköilmajohdoille ja -asennuksille on annettu suurimmat sallitut vaarajännitteiden arvot standardeissa SFS-EN 50341-1 ja SFS 6001. Yli 1 kV:n järjestelmissä sallitut arvot riippuvat kosketusjännitteen vaarallisuudesta sekä maasulun vaikutusajasta. Sallitut arvot on asetettu henkilöturvallisuuden näkökulmasta, eivätkä ole riippuvaisia järjestelmän käyttöjännitteestä. Maadoitusjännitettä ja siten kosketusjännitteitä voidaan pienentää seuraavilla toimenpiteillä:

- pienentämällä maadoitusresistanssia,
- lyhentämällä suoja-ajavälikäytöiden laukaisuaikoja,
- käyttämällä ukkosjohtimia tai
- käyttämällä reduktiojohdinta. [27]

Lisäksi kosketusjännitteitä voidaan rajoittaa, vaikka maadoitusjännite olisikin suuri:

- käyttämällä maapotentiaalinohjauselektrodeita,
- eristämällä kosketettavissa olevat metalliosat,
- eristämällä tai peittämällä alusta tai
- siirtämällä vaaralle alttiit kohteet kokonaan pois alueelta. [27]

### 4.3 Sähkövirran vaarallisuus ihmiselle

Sähkövirran vaarallisuus on ihmisen anatomian ja terveydellisen tilan lisäksi riippuvainen kehon läpi kulkevan virran suuruudesta, vaikutusajasta ja taajuudesta sekä virran kulkureitistä. Sydänkammiovärinä on pääasiallinen syy henkilön menehtymiseen kuolemaan johtavissa sähkötapaturmissa [24]. Mikäli sähköisku on lyhytkestoinen ja virta kulkee kehon läpi sydämen toimintajaksoa lyhyemmän ajan, kehon läpi kulkevan virran arvon tulisi olla suuri ja sen tulisi vaikuttaa sydämen lepovaiheen aikana, jotta se olisi vaarallinen ja aiheuttaisi sydänkammiovärinän. Siksi pidempikestoinen altistus virralle on vaarallisempaa, koska se häiritsee sydänlihaksen toimintaa koko sen toimintajakson ajan, ja aiheuttaa siten lyhyempikestoista altistusta todennäköisemmin sydänkammiovärinän. Sydänkammiovärinän lisäksi kehon läpi kulkeva virta voi aiheuttaa muita sydämen toimintahäiriöitä, lihaskouristuksia, hengitysvaikeuksia, verenpaineen nousua ja palovammoja. [27]

Sähkövirran vaarallisuudesta johtuen kehon kautta kulkevan virran suuruudelle on asetettu raja-arvoja ottaen virran vaikutusaika huomioon. Suomessa noudatettavien vaihtosähköstandardien sallittujen kosketusjännitteiden raja-arvojen laskenta perustuu tilanteeseen, jossa sydänkammiovärinän todennäköisyys on 5 % ja virtatie on vasemmasta kädestä jalkoihin [23]. Näiden standardien arvot pätevät kuitenkin vain 50 Hz:n vaihtovirrälle. Koska myös kehon läpi kulkevan virran taajuudella on vaikutusta siihen, kuinka suuria kosketusjännitteitä tai -virtoja voidaan sallia, kyseisten standardien arvoja ei voida suoraan soveltaa elektrodipiirin vaarajännitetarkasteluun.

Kimbarkin [25] mukaan tasavirta-arvot ovat noin viisi kertaa 60 Hz:n vastaavia vaihtovirta-arvoja suurempia. Taulukossa 5 on esitetty virran eri vaikutuksille raja-arvot 60 Hz:n vaihtovirralla ja tasavirralla. Virran tuntorajalla tarkoitetaan pienintä virran arvoa, jonka ihminen voi aistia virran kulkiessa kehon läpi. Reaktioraja on pienin virran arvo, joka aiheuttaa ihmisessä tahdosta riippumattomia reaktioita. Kouristusraja antaa virralle suurimman arvon, jolla ihminen kykenee vielä irrottautumaan jännitteellisestä kohteesta. Sydänkammiovärinän raja on virran pienin arvo, jolla ihminen voi saada sydänkammiovärinän. AIEE:n raportin *Voltage Gradients Through the Ground Under Fault Conditions* [30] mukaan eri kirjallisuuslähteissä on annettu sydänkammiovärinälle vaihtovirtaraja-arvoksi 100 mA, kun virta kulkee ihmisen kehon läpi korkeintaan 3 sekuntia. Dalzielin [31] mukaan 99,5 % ihmisistä sietää kaavan (7) mukaisen virran saamatta sydänkammiovärinää.

$$I_K = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

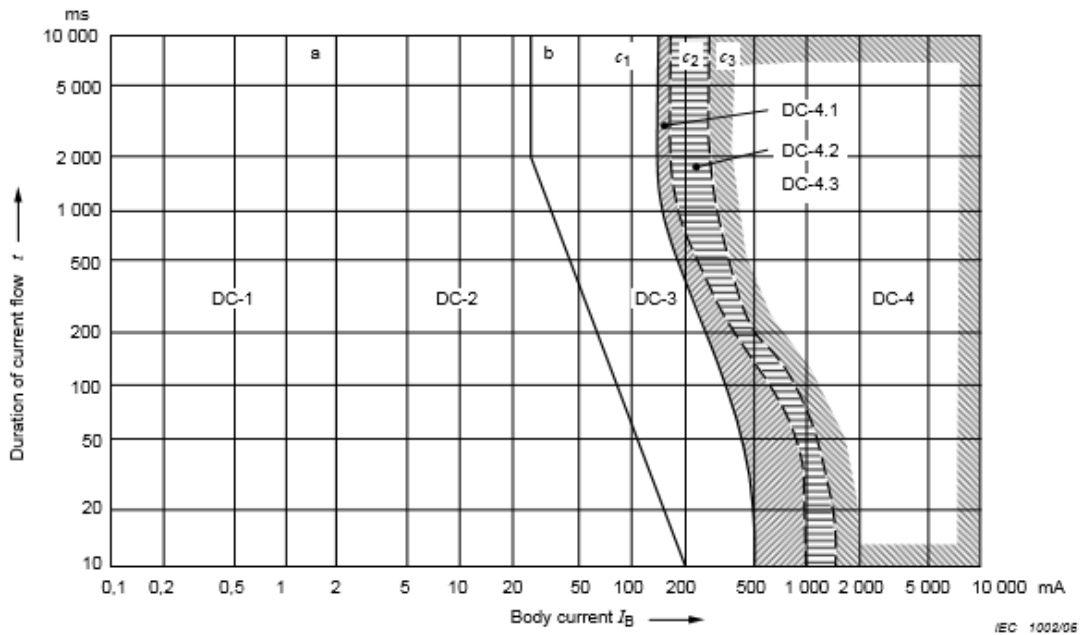
missä  $K$  on tutkimustuloksena saatu vakio, jonka suuruus on riippuvainen virran vaikutukselle alttiina olevan henkilön massasta ja  $t$  virran vaikutusaika. Kertoimen  $K$  arvo on 70 kg:n painoiselle henkilölle 60 Hz:n vaihtovirralla 165 ja tasavirralla arvo on viisi kertaa suurempi, eli 825 [25]. Kerroin on määritetty siten, että 99,5 % terveistä ihmisistä ei saa sydänkammiovärinää, kun kaavan (7) mukainen virta  $I_K$  kulkee ajan  $t$  ihmisen kehon läpi. Yhtälöä voidaan soveltaa tilanteisiin, joissa virta kulkee kehon läpi 0,03–3 sekuntia. [31] Siten sydänkammiovärinän raja-arvo tasavirralla on esimerkiksi 1 sekunnin vaikutusajalla 825 mA ja 3 sekunnin vaikutusajalla 476 mA.

**Taulukko 5.** 60 Hz:n vaihtovirran ja tasavirran tunto-, reaktio-, kouristus- ja sydänkammiovärinäraja-arvot. Tasavirran raja-arvot ovat noin viisi kertaa 60 Hz:n vaihtovirran raja-arvoja suurempia. Sydänkammiovärinän raja-arvo riippuu virran vaikutusajasta  $t$  taulukossa olevan yhtälön mukaisesti, kun vaikutusaika on 0,03–3 sekuntia. Perustuu lähteeseen [25].

	60 Hz vaihtovirta [mA]	Tasavirta [mA]
<b>Tuntoraja</b>	0,1-0,2	0,5-1,0
<b>Reaktioraja</b>	1	5
<b>Kouristusraja</b>	6-9	30-45
<b>Sydänkammiovärinäraja</b>	$165/\sqrt{t}$	$825/\sqrt{t}$

Koska elektrodipiiriä ei kytketä automaattisesti jännitteettömäksi maasulkutilanteissa, ei voida olettaa, että ihminen pystyisi irrottautumaan koskettamastaan jännitteellisestä kohdasta tietyssä ajassa. Siten taulukon 5 arvoja ei voida soveltaa suoraan tämän työn vaarajänniteselvityksessä. Standardeissa [21, 23, 24] sallittu kosketusjännite tai -virta on esitetty 10 sekunnin vaikutusaikaan asti, mutta myös tätä pidemmällä vaikutusajoilla voidaan sallia enintään sama arvo kuin jos virta kulkisi kehon läpi 10 sekunnin ajan.

Standardien SFS 6001 [23] ja SFS-EN 50341-1 [21] sallitut kosketusjänniterajat on johdettu julkaisussa IEC/TS 60479-1 [24] esitetyistä arvoista. Kyseisessä julkaisussa on esitetty myös kuvaaja, jossa ihmisen kehon läpi kulkevan tasavirran vaikutuksille on määritetty alueet, jotka ovat riippuvaisia virran suuruudesta ja vaikutusajasta. Kyseinen kuvaaja on esitetty tämän työn kuvassa 20. Kuvan 20 käyrien rajaamien alueiden selitykset on esitetty taulukossa 6. Vaikutukset ja niiden todennäköisyys ovat sitä suurempia mitä suurempi on virta tai mitä kauemmin virta kulkee kehossa.



**Kuva 20.** Virta-alueet vaikutusajan mukaan. Kuvassa y-akselina virran vaikutusaika millisekunteina ja x-akselina kehon läpi kulkevan virran suuruus milliampeereina. Alueet on määritetty tilanteelle, jossa virta kulkee kehon läpi vasemmasta kädestä jalkoihin. [24]

Koska ei voida olettaa, että ihminen kouristusrajan ylittyessä pystyisi irrottautumaan koskettamastaan jännitteellisestä osasta, tämän työn vaarajänniteselvityksessä tarkastellaan kuvan 20 arvoja 10 sekunnin vaikutusajalla. Standardien SFS 6001 [23] ja SFS-EN 50341-1 [21] sallittuina kosketusjänniterajoina käytetään julkaisussa IEC/TS 60479-1 [24] määritettyjä arvoja, joilla sydänkammiovärinän todennäköisyys on enintään 5 %. Suomalaisissa standardeissa ei ole määritetty sallittujen kosketusjännitteiden tai -virtojen arvoja tasavirralla, mutta mikäli oletetaan, että sallitut kosketusvirrat voidaan määrittää samoilla ehdoilla myös tasavirralla, kosketusvirran arvoksi voidaan sallia kuvan 20 käyrän c2 arvot riippuen vaikutusajasta.



**Taulukko 6.** Kuvan 20 alueiden ja rajakäyrien selitykset. Alueet on määritetty tilanteelle, jossa virta kulkee kehon läpi vasemmasta kädestä jalkoihin. Perustuu lähteeseen [24].

Alue	Rajat	Fysiologiset vaikutukset
DC-1	0–2 mA	Vähäisen pistelyn tunteminen mahdollista esimerkiksi, kun virran kulkua muutetaan nopeasti
DC-2	2 mA ja käyrän b välinen alue	Tahdosta riippumattomat lihassupistukset todennäköisiä erityisesti esimerkiksi, kun virran kulkua muutetaan nopeasti. Useimmiten ei haitallisia fysiologisia vaikutuksia.
DC-3	Käyrän b oikea puoli	Voimakkaita tahdosta riippumattomia lihassupistuksia sekä palautuvia sydämen toimintaan kohdistuvia häiriöitä voi tapahtua. Vaikutukset kasvavat virran ja vaikutusajan kasvaessa. Useimmiten ei orgaanisia vaurioita.
DC-4	Käyrän c1 oikea puoli	Erilaiset elintoimintoihin kohdistuvat vaikutukset, kuten sydämenpysähdys, hengityksen salpaantuminen, palovammat tai muut kudonvauriot ovat mahdollisia. Sydänkammiovärinän todennäköisyys kasvaa vaikutusajan ja virran kasvaessa.
DC-4.1	Käyrien c1-c2 välinen alue	Sydänkammiovärinän todennäköisyys jopa 5 %
DC-4.2	Käyrien c2-c3 välinen alue	Sydänkammiovärinän todennäköisyys jopa 50 %
DC-4.3	Käyrän c3 oikea puoli	Sydänkammiovärinän todennäköisyys yli 50 %

Kuvan 20 alueet on määritetty tilanteelle, jossa virta kulkee vasemmasta kädestä jalkoihin. Siten muissa tilanteissa alueiden rajoissa tulee ottaa huomioon sydämen virtakerroin, joka ottaa huomioon virran kulkureitin kehossa. Virran kulkureitti vaikuttaa vaikutusajan lisäksi virran vaarallisuuteen, sillä kulkureitti vaikuttaa siihen, kuinka suuri osa virrasta kulkee tärkeiden elinten, kuten sydämen kautta. Siten kulkureitillä on vaikutusta esimerkiksi sydänkammiovärinäriskiin. Kun virta kulkee jalasta jalkaan, sydämen läpi ei kulje niin paljon virtaa, kuin jos saman suuruinen kokonaisvirta kulkisi ihmisen kehon läpi kädestä jalkoihin. Siten askeljännitteille voidaan sallia kosketusjännitteitä suuremmat arvot ja voidaan olettaa, että ympäristössä ei esiinny vaarallisia askeljännitteitä, mikäli kosketusjännitevaatimukset täyttyvät. [21, 23]

## 4.4 Kosketusjännitteen laskeminen

Kosketusjännite  $U_T$  on ihmiskehon yli vaikuttava jännite, joka aiheutuu ihmisen koskettaessa jännitteistä osaa. Standardin SFS-EN 50341-1 [21] mukaan kosketusjännite on se osa maadoitusjännitteestä, joka vaikuttaa ihmisen käden ja jalkojen välillä, kun ihmisen vaakasuoraetäisyys kosketuskohdasta on yksi metri. Standardeissa [21, 23] kosketusjännitteille on määritetty suurimmat sallitut arvot, jotka ovat riippuvaisia kosketusjännitteen vaikutusajasta, virran kulkureitistä kehossa ja ympäristöstä. Standardien SFS-EN 50341-1 [21] ja SFS 6001 [23] mukaan sallittujen kosketusjännitteiden laskennassa on tehty neljä oletusta:

- virtatie on toisesta kädestä jalkoihin
- kehon impedanssin  $Z_K$  todennäköisyys on 50 %
- sydänkammiovärinän todennäköisyys on 5 %
- lisäresistansseja ei ole

Standardeissa [21, 23] näiden oletuksien mukaisesti laskettuja kosketusjännitteitä voidaan pitää sallittuina ja niiden aiheuttamia riskejä voidaan pitää hyväksyttävänä. Riskien olemassaolo voidaan hyväksyä, sillä todennäköisyyttä maasulun tapahtumiseen saman aikaisesti, kun ihminen on maasulkukohdan lähetyvillä, voidaan pitää pienenä. Kosketusjännitteen laskemisessa voidaan ottaa huomioon myös esimerkiksi jalkineiden aiheuttama lisäresistanssi, jolloin saadaan sallitut arvot prospektiiviselle kosketusjännitteelle.

### 4.4.1 Kehon resistanssi

Ihmisen kehon läpi kulkevan virran  $I_K$  suuruus on riippuvainen kosketusjännitteestä  $U_T$  sekä kehon kokonaisimpedanssista  $Z_K$  kaavan (8) mukaisesti [24].

$$I_K = \frac{U_T}{Z_K} \quad (8)$$

Kehon kokonaisimpedanssi ei ole vakio, vaan sen suuruus on riippuvainen esimerkiksi kehon yli vaikuttavasta jännitteestä, taajuudesta, kosketuspinta-alasta, virran kulkureitistä ja ihon kosteudesta [27]. Kun kosketustilanne pidetään vakiona (taajuus, kosketuspinta-ala jne. ovat vakioita) kehon resistanssi suurenee kehon yli vaikuttavan jännitteen pienentyessä [24].

Julkaisussa IEC/TS 60479-1 [24] ihmisen kehon kokonaisimpedanssin määritetään koostuvan kehon sisäisen impedanssin sekä ihon impedanssien summasta. Kehon sisäisen impedanssin voidaan olettaa koostuvan vain resistiivisestä komponentista. Kehon sisäinen impedanssi on pääosin riippuvainen virran kulkureitistä, toisin kuin ihon impedanssi, jonka suuruuteen vaikuttaa muun muassa kosketuspinta-ala sekä jännite, taajuus ja vaikutusaika. Ihon impedanssi koostuu resistiivisestä ja kapasitiivisesta komponentista, ja impedanssin taajuusriippuvuudesta johtuen sen suuruus pienenee taajuuden kasvaessa.

Pienemmillä jännitteen arvoilla esimerkiksi kosketuspinta-alalla on suuri vaikutus ihon impedanssin arvoon. Suurilla kosketusjännitteillä ihon impedanssi pienenee huomattavasti jännitteen kasvaessa ja muuttuu lopulta merkityksettömän pieneksi. Siten ihmisen kehon kokonaisimpedanssi muodostuu tarpeeksi suurella kosketusjännitteellä vain kehon sisäisestä impedanssista. Myös kosketushetkellä kehon impedanssi on kehon sisäisen impedanssin suuruinen, sillä silloin ihon impedanssit ovat merkityksettömät. [24]

Koska ihon impedanssi on taajuusriippuvainen, kehon kokonaisimpedanssi on suurempi tasavirralla kuin vaihtovirralla, kun kosketusjännite ei ole suurempi kuin 200 V. Tätä suuremmilla kosketusjännitteen arvoilla ihon impedanssi muuttuu merkityksettömän pieneksi, jolloin kehon kokonaisimpedanssin voidaan olettaa olevan riittävän suurella tarkkuudella yhtä suuret tasavirralla ja vaihtovirralla. Taulukossa 7 on esitetty julkaisun IEC/TS 60479-1 mukaiset kehon kokonaisimpedanssin arvot tasasähkölle eri kosketusjännitteen arvoilla, kun virtatie on kädestä käteen, kosketuspinta-ala on suuri (10 000 mm<sup>2</sup>) ja kosketuspinta on kuiva. Märemmissä olosuhteissa kehon kokonaisimpedanssin arvot ovat pienemmät kuin taulukoissa esitetyt.

**Taulukko 7.** Julkaisun IEC/TS 60479-1 mukaiset ihmiskehon kokonaisimpedanssin  $Z_K$  arvot eri DC kosketusjännitteiden  $U_T$  arvoilla. Virtatie kädestä käteen, kosketuspinta-ala on suuri (10 000 mm<sup>2</sup>) ja kosketuspinta on kuiva. Perustuu lähteeseen [24].

<b>Ihmiskehon</b>	
<b>Kosketusjännite</b>	<b>kokonaisimpedanssi</b>
$U_T$ [V]	$Z_K$ [ $\Omega$ ]
25	3 875
50	2 900
75	2 275
100	1 900
125	1 675
150	1 475
175	1 350
200	1 275
225	1 225
400	950
500	850
700	775
1 000	775

Taulukon 7 mukaiset arvot pätevät lyhyille, noin 0,1 s pituisille, vaikutusajoille. Mikäli kosketusjännite vaikuttaa tätä pidemmän aikaa kehon yli, kehon kokonaisimpedanssi pienenee IEC:n julkaisun [24] mukaan noin 10–20 % ja kun ihon impedanssi muuttuu merkityksettömän pieneksi, kehon kokonaisimpedanssin arvo lähestyy kehon sisäisen resistanssin arvoa. Sisäisen resistanssin arvo on 750  $\Omega$  enintään 50 %:lla ihmisistä, kun kosketuspinta-ala on suuri ja virtatie on kädestä käteen tai kädestä jalkaan. Taulukon 7 arvot

vastaavat kehon resistanssien arvoja, kun virta kulkee kehossa kädestä käteen. Mikäli virtatie on kädestä jalkaan, resistanssin arvo on noin 10–30 % pienempi. Kirjassa [25] ja raportissa [26] ihmisen kehon resistanssin arvona on käytetty vakioarvoa  $1000 \Omega$ .

#### 4.4.2 Sallittujen kosketusjännitteiden laskenta

Standardin SFS 6001 [23] mukaan sallittu kosketusjännite  $U_{Tp}$  saadaan laskettua kaavan (9) mukaisesti:

$$U_{Tp} = I_{Kp}(t) \cdot \frac{1}{HF} \cdot Z_K(U_T) \cdot BF \quad (9)$$

missä  $I_{Kp}(t)$  on suurin sallittu kehon kautta kulkevan virta vian kestoajan  $t$  funktiona,  $Z_K(U_T)$  on kehon impedanssi kosketusjännitteen funktiona,  $HF$  on sydämen virtakerroin ja  $BF$  on kehon kerroin. Sydämen virtakerroin riippuu virran kulkutiestä siten, että kerroin on

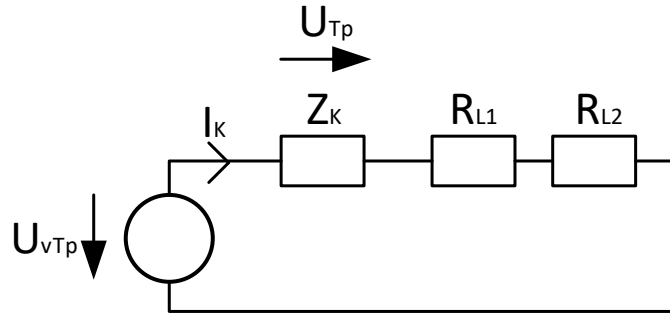
- 1,0 vasemmasta kädestä vasempaan, oikeaan tai molempiin jalkoihin,
- 1,0 molemmista käsistä molempiin jalkoihin,
- 0,8 oikeasta kädestä vasempaan, oikeaan tai molempiin jalkoihin,
- 0,4 kädestä käteen ja
- 0,04 jalasta jalkaan [23, 24].

Kehon kerroin on sydämen virtakertoimen tapaan riippuvainen virran kulkutiestä ja sen arvo on 0,75, kun virta kulkee toisesta kädestä jalkoihin ja 0,5, kun virta kulkee molemmista käsistä jalkoihin. Sallitun kosketusjännitteen suuruus riippuu siis myös esimerkiksi siitä, millä kehon osilla jännitteeseen osaan kosketetaan. [23]

#### 4.4.3 Lisäresistanssin huomioon ottaminen

Standardien [21, 23] mukaiset sallitut kosketusjännitteet voivat vaikuttaa ihmiskehon yli kestoajan mukaisesti aiheuttamatta hyväksymättömiä riskejä henkilöturvallisuudelle. Kuormittamattomalle kosketusjännitteelle voidaan kuitenkin sallia suurempia arvoja, kun tiedetään kosketustilanteessa vaikuttavat lisäresistanssit. Kuvassa 21 on esitetty kosketusvirtapiiri, kun lisäresistanssit otetaan huomioon. Kokonaislisäresistanssi  $R_L$  koostuu eri lisäresistanssien summasta, esimerkiksi jalkineiden resistanssin ja maakontaktin resistanssin summasta, eli  $R_L = R_{L1} + R_{L2} = R_{L1} + 1,5\rho$ , jossa  $\rho$  on maanpinnan ominaisvastus. Maakontaktin resistanssi on yhdelle jalalle  $3\rho$  [25]. Kun kosketusvirta kulkee ihmisen kehon läpi kädestä molempiin jalkoihin, ihmisen jalat kytkeytyvät rinnan, jolloin maakontaktin resistanssi on edellä esitetyn kaavan mukaisesti  $1,5\rho$ . Kun vikavirta kulkee ihmisen kehossa jalasta jalkaan, maakontaktiresistanssit kytkeytyvät sarjaan, eli

$R_{L2} = 6\rho$ . Kuvassa 21  $U_{vTp}$  on sallittu prospektiivinen kosketusjännite, eli kosketuspiirin lähdejännite,  $I_K$  kehon kautta kulkeva virta,  $Z_K$  kehon kokonaisimpedanssi,  $U_{Tp}$  kehon yli vaikuttava jännite ja  $R_{L1}$  sekä  $R_{L2}$  lisäresistanssit. [23]



**Kuva 21.** Lisäresistanssin huomioon ottaminen sallitun prospektiivisen kosketusjännitteen  $U_{vTp}$  laskemisessa. Kuvan merkinnöissä  $U_{Tp}$  on sallittu kosketusjännite,  $I_K$  on ihmiskehon kautta kulkeva virta,  $Z_K$  on kehon kokonaisimpedanssi ja  $R_{L1}$  sekä  $R_{L2}$  lisäresistanssit. Perustuu lähteeseen [23].

Kun lisäresistanssit otetaan huomioon, sallittu prospektiivinen kosketusjännite saadaan standardin SFS 6001 [23] mukaan kaavalla (10):

$$U_{vTp} = I_{Kp}(t) \cdot \frac{1}{HF} \cdot \{Z_K(U_T) \cdot BF + R_{L1} + R_{L2}\} \quad (10)$$

missä  $I_{Kp}(t)$  on suurin sallittu kehon kautta kulkeva virta vian kestoajan funktiona,  $Z_K(U_T)$  kehon impedanssi kosketusjännitteen funktiona,  $HF$  sydämen virtakerroin,  $BF$  kehon kerroin ja  $R_{L1}$  sekä  $R_{L2}$  lisäresistanssit.

## 5. TYÖSSÄ TUTKITTAVAT VALVONTAMENETELMÄT

Tässä työssä tutkitaan elektrodipiirin vikatilanteiden havaitsemiseen soveltuvia valvontaja viantodentamismenetelmiä. Tutkimus suoritetaan tekemällä kirjallisuusselvitys menetelmistä, joiden soveltuvuutta elektrodipiirin vikatilanteiden havaitsemiseen on tutkittu aiemmin, ja tekemällä PSCAD-simuloinneilla tarkempia analyysejä menetelmien toimivuudesta Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin valvontamenetelminä.

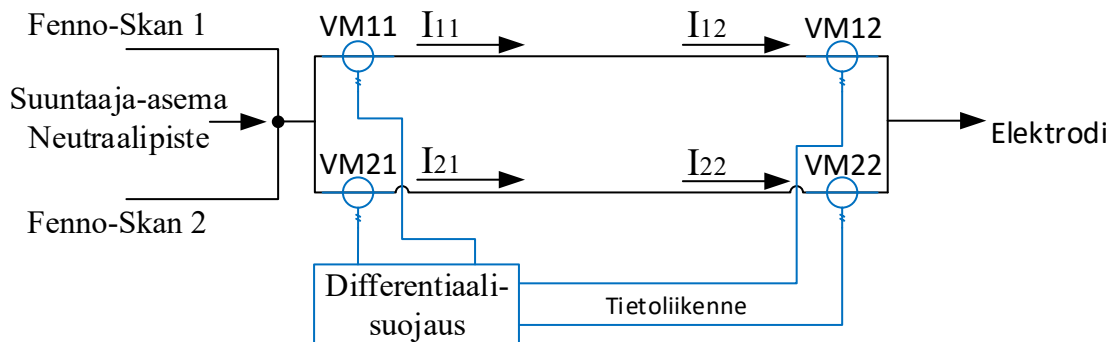
Työssä tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella elektrodipiirin valvontamenetelmiä käsitteleviä julkaisuja on tehty vähän. HVDC-yhteyksiä on maailmalla rajallinen määrä, eikä niitä ole toteutettu rakenteiltaan tai toimintaperiaatteiltaan samanlaisesti, sillä esimerkiksi paluupiiriä ei ole aina toteutettu elektrodeilla. Kuten mainittiin luvussa 2.2, maan tai meren käyttämiseen yhteyden paluureittinä voi olla nykyään vaikeampi saada lupaa ympäristöllisistä sekä infrastruktuurillisista syistä, mikä myös rajoittaa paluupiirien toteuttamista elektrodeilla, ja siten elektrodipiirien valvontaan liittyvien julkaisujen lukumäärää. Elektrodipiiriä ja elektrodien suunnittelua koskevia julkaisuja on tehty useampia, mutta itse elektrodipiirien valvontamenetelmiä käsitteleviä julkaisuja on saatavilla hyvin rajallinen määrä. Lisäksi osa paluupiirien valvontamenetelmiä käsittelevistä julkaisuista käsittelee metallisella johdolla toteutettuja paluupiirejä, joiden toiminta eroaa elektrodeilla toteutetusta paluupiiristä.

Aiheesta tehtyjen tutkimusten ja julkaisujen [32-34] perusteella ainakin kulkuaalto-, erovirta- ja differentiaalimittaukseen sekä korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuvien menetelmien soveltuvuutta elektrodipiirin valvontamenetelmäksi on tutkittu aiemmin. Tässä luvussa esitetään differentiaalisuojaukseen, korkeataajuisen signaalin syöttämiseen ja kulkuaaltomittaukseen perustuvat valvontamenetelmät. Luvussa esitetään myös, miten elektrodipiirin nykyistä valvontamenetelmää voitaisiin kehittää. Lisäksi eri menetelmien soveltuvuutta Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin valvontamenetelmiksi arvioidaan alustavasti aiheesta tehtyjen tutkimusten ja julkaisujen pohjalta.

### 5.1 Differentiaalisuojaus

Differentiaalisuojauksen toiminta perustuu suojattavaan kohteeseen tulevien virtojen ja siitä lähtevien virtojen vertailemiseen. Differentiaalisuojan toimintaperiaatteesta johtuen se havaitsee vain suojausalueella eli virranmittauspaikkojen välisellä alueella tapahtuvat viat. Poikittaisdifferentiaalisuoja vertaa rinnakkaisten johtojen virtoja. [35]

Kuvassa 22 on esitetty differentiaalisuojauksen periaatekaavio, kun menetelmää käytetään Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirissä. Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirissä differentiaalinen mittaaminen voitaisiin kuvan mukaisesti toteuttaa mittaamalla virtapiirien virtoja elektrodipiirin kummassakin päässä Rauman suuntaaja-asemalla sekä Lautakarin elektrodiasemalla. Kuvassa virtamuuntajat on asennettu molempiin virtapiireihin, mutta valvonta voitaisiin toteuttaa myös mittaamalla elektrodipiirin kokonaisvirtaa piirin kummassakin päässä ja vertaamalla näitä kokonaisvirtoja keskenään. Kuvassa virroilla  $I_{11}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{21}$  ja  $I_{22}$  tarkoitetaan virtamuuntajien VM11, VM12, VM21 ja VM22 mittaamia virtoja.



**Kuva 22.** Differentiaalisuojauksen periaatekaavio. Perustuu lähteeseen [32].

Kun virtapiirin päissä olevien virtamuuntajien mittaustulokset eroavat toisistaan enemmän kuin on sallittu, järjestelmä havaitsee vian ja antaa hälytyksen. Turhien hälytysten välttämiseksi hälytysrajan asettamisessa tulee ottaa huomioon virtamuuntajien mittauserot. Virtapiirien välistä epäsymmetriaa ja erovirtaa ei tarvitse ottaa huomioon, mikäli virtaa mitataan elektrodipiirin kummankin virtapiirin päissä ja järjestelmä vertailee erikseen kummankin virtapiirin mittaustuloksia. Mikäli differentiaalisuojausta käytettäisiin poikittaisdifferentiaalisuojan tavoin ja järjestelmä vertailisi kuvan 22 virtoja  $I_{11}$  ja  $I_{21}$  sekä virtoja  $I_{12}$  ja  $I_{22}$  keskenään, vertailussa tulisi ottaa huomioon virtapiirien epäsymmetriasta johtuva erovirta.

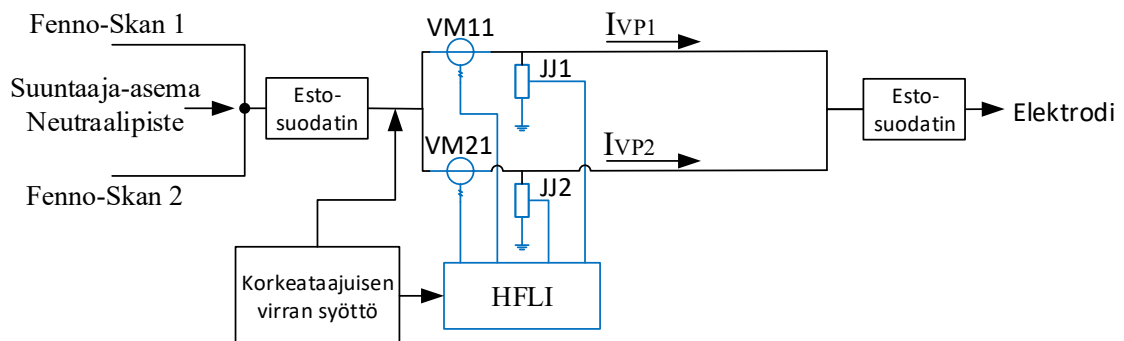
Hatchin raportin [32] mukaan differentiaalisuojauksella voidaan luotettavasti havaita monopolaarisessa käyttötilanteessa viat, jotka aiheutuvat johtimen katkeamisesta. Raportin mukaan differentiaalisuojauksella ei voida kuitenkaan havaita luotettavasti elektrodipiirissä tapahtuvia maasulkuja, etenkin bipolaarisessa käyttötilanteessa. Bipolaarisessa käytössä elektrodipiirissä ei kulje virtaa tai virta on hyvin pieni, jolloin etenkin suurempiresistanssinen maasulku ei oletettavasti aiheuta riittävän suuren maasulkuvirran syntymistä, eikä siten riittävän suurta eroa elektrodipiirin päiden virtojen välille. Monopolaarisessa käytössä differentiaalisuojaus saattaa havaita osan maasuluista [32].

Differentiaalisuojaukseen perustuva valvontamenetelmä vaatii mittalaitteet sekä Rauman suuntaaja-asemalle, että Lautakarin elektrodiasemalle. Lisäksi menetelmä vaatii tietoliik-

kenneyhteyden Lautakarista Rauman suuntaaja-asemalle. Hatchin raportin [32] perusteella differentiaalinen mittaus ei tuo lisäarvoa nykyiseen valvontamenetelmään nähden, mikäli menetelmä ei raportin mukaisesti kykene havaitsemaan maasulkuvikoja. Mikäli differentiaalimittauksella kyettäisiin havaitsemaan osa maasuluista monopolaarisessa käytössä, menetelmästä voitaisiin saada pieni lisäarvo nykyiseen menetelmään nähden olettaen, että nykyinen menetelmä ei kykene havaitsemaan maasulkuvikoja edes monopolaarisessa käytössä. Tässä tapauksessa tulisi arvioida, onko saatava lisäarvo riittävän suuri, jotta virtamuuntajien asentaminen Lautakariin ja Raumalle sekä tietoliikenneyhteyden rakentaminen Lautakarista Raumalle olisi kannattavaa.

## 5.2 Korkeataajuisen signaalin syöttö

Hatchin raportissa [32] on käsitelty kahdenlaisia korkeataajuisen signaalin syöttöön perustuvia valvontamenetelmiä. Impedanssin mittaamiseen perustuvassa menetelmässä (HFLI eli High Frequency Line Impedance Measuring Method) elektrodipiiriin syötetään korkeataajuisia, noin 1 kHz:n, signaalia ja elektrodipiirin päässä, josta signaalia syötetään piiriin, mitataan kummankin virtapiirin virrat ja jännitteet. Mitattujen virta- ja jännitearvojen perusteella määritetään elektrodipiirin impedanssi. [32] Kuvassa 23 on esitetty impedanssin mittaamiseen perustuvan menetelmän kaavio. Kuvassa merkinnällä *VM* tarkoitetaan virtamuuntajaa ja merkinnällä *JJ* jännitteenjakajaa.



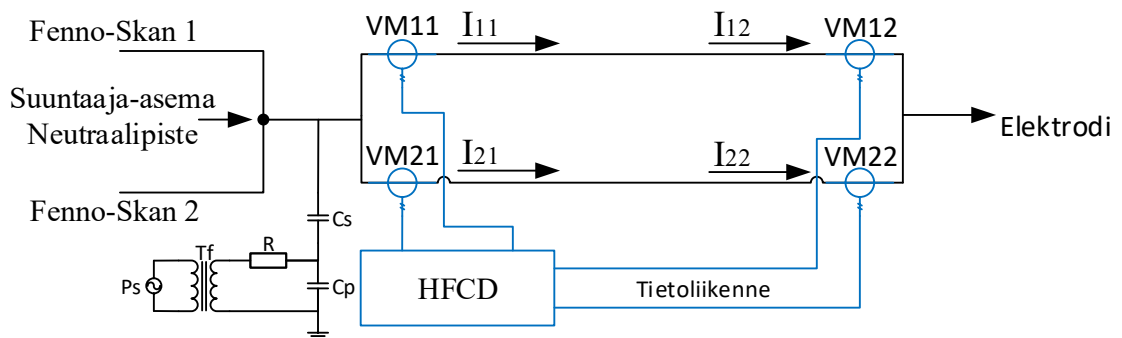
**Kuva 23.** Impedanssin mittaamiseen perustuva valvontamenetelmä, jossa elektrodipiiriin syötetään korkeataajuinen signaali. Kuvassa merkintä HFLI on High Frequency Line Impedance Measuring Method. Perustuu lähteeseen [32].

Virta- ja jännitemittausten avulla määritetyn impedanssin avulla valvontajärjestelmä voi päätellä, onko elektrodipiirissä vikaa. Kun virta- ja jännitemittaukset suoritetaan erikseen molemmissa virtapiireissä, menetelmällä voidaan maasulkuvikojen lisäksi havaita myös johdinkatkeamat. Hatchin raportin [32] mukaan menetelmän toiminta ja tarkkuus eivät riipu HVDC-yhteyden toiminnasta, kuten tehonsiirtotilanteesta. Lisäksi menetelmä kykenee havaitsemaan viat koko elektrodipiirin pituudelta, eikä menetelmä vaadi tietoliikenneyhteyksiä suuntaaja-aseman ja elektrodiaseman välille. [32]



Impedanssin mittaamiseen perustuva menetelmä vaatii estosuodattimet elektrodipiirin molempiin päihin, jotta järjestelmä on kykeneväinen havaitsemaan maasulut koko elektrodipiirin pituudelta. Estosuodattimet mitoitetaan HVDC-yhteyden maksimivirran mukaan, joten ne ovat suhteellisen kalliita ja kasvattavat myös yhteyden kokonaishäviöitä etenkin monopolaarisessa käytössä. Koska menetelmällä syötettävän signaalin taso on alhainen, menetelmällä ei välttämättä kyetä havaitsemaan suuriresistanssisia maasulkuvikoja. [32]

Toisessa korkeataajuisen signaalin syöttämiseen perustuvassa menetelmässä, jota voidaan mahdollisesti hyödyntää elektrodipiirin valvontamenetelmänä, hyödynnetään differentiaalista virranmittausta (HFCD eli High Frequency Current Differential System). Menetelmä perustuu edellisessä luvussa 5.1 tarkastellun differentiaalisuojauksen tavoin virran mittaamiseen molemmissa virtapiireissä elektrodipiirin kummassakin päässä, mutta lisäksi elektrodipiiriin syötetään toisesta päästä korkeataajuista signaalia. Raportin [32] mukaan menetelmä havaitsee viat koko elektrodipiirin matkalta aivan elektrodiaseman läheisyyttä lukuun ottamatta vertaamalla elektrodiasemalla mitattuja virtapiirien virtoja toisiinsa. Elektrodiaseman läheisyydessä tapahtuvat viat menetelmä havaitsee vertaamalla suuntaaja-aseamalla mitattuja virtapiirien virtoja toisiinsa. Kuvassa 24 on esitetty menetelmän periaatekuva.



**Kuva 24.** Kuvassa merkintä HFCD on High Frequency Current Differential System. Virran syöttöpiirissä  $P_s$  tarkoittaa vaihtovirtalähdettä,  $T_f$  eristysmuuntajaa,  $R$  vastusta,  $C_p$  kytkentäkondensaattoria ja  $C_s$  suojakondensaattoria. Perustuu lähteeseen [32].

Hatchin raportin [32] mukaan HFCD-menetelmän pitäisi kyetä havaitsemaan viat sekä monopolaarisessa että bipolaarisessa käyttötilanteessa ja myös koko elektrodipiirissä, kun signaali on tarpeeksi suuri. Menetelmä vaatii kuitenkin differentiaalisuojauksen tavoin tietoliikenneyhteyden suuntaaja-aseman ja elektrodiaseman välille. Lisäksi raportin [32] mukaan menetelmä vaatii myös enemmän tehoa korkeataajuisen signaalin syöttämiseen kuin impedanssin mittaamiseen perustuva menetelmä ja estosuodattimen suuntaaja-asemalle.

Myös IEEE:n raportissa Neutral Line Protection System for HVDC Transmission [36] on käsitelty valvontamenetelmää, joka perustuu vaihtovirran syöttämiseen neutraalipiiriin.

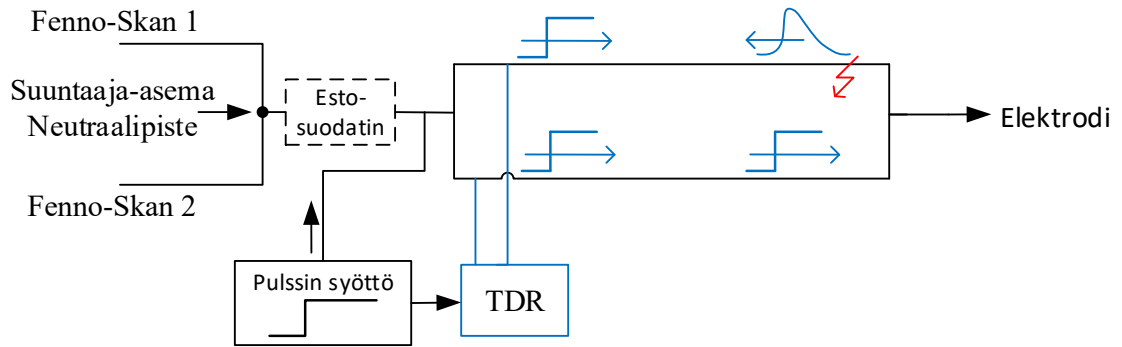
Raportissa tarkasteltavan HVDC-yhteyden neutraalipiiri on toteutettu metallisella johtimella, joka on maadoitettu yhteyden toisessa päässä. Raportin mukaan vikojen havaitsemiseksi neutraalipiirin syötettiin pientä 125 Hz vaihtovirtaa, jonka suuruutta mitattiin piirin molemmissa päässä. Raportin mukaan menetelmällä voidaan havaita sekä maasulkuvikoja että johdon katkeaminen. Kun neutraalipiirissä tapahtuu maasulku, vaihtovirran syöttöpäässä mitatun virran suuruus kasvaa ja kun johto katkeaa, syöttöpäässä mitatun virran suuruus pienenee. Kummassakin vikatapauksessa piirin toisessa päässä mitatun vaihtovirran suuruus pienenee.

### 5.3 Kulkuaaltomittaus

Hatchin raportin [32] mukaan alan kirjallisuudessa on käsitelty kahdenlaisia kulkuaaltojen mittaamiseen perustuvia menetelmiä. Ensimmäinen menetelmä perustuu TDR-mittauksiin (Time Domain Reflectometry) ja toinen PRBS-mittauksiin (Pseudo Random Binary Sequence). Tässä työssä tarkastellaan vain TDR-mittausta.

TDR-mittauksessa johdolle lähetetään pulssi, jonka takaisinheijastumista tarkkaillaan. Lähetetty pulssi heijastuu osittain takaisin kohdissa, joissa johdon aaltoimpedanssi muuttuu. Tällaisia kohtia ovat esimerkiksi kaapelin pää tai mahdollinen jatkos, liitos tai vikapaikka tai jokin muu epäjatkuvuuskohta. Se, kuinka suuri osa pulssista heijastuu takaisin, riippuu heijastuskohdan impedanssin ja avojohdon tai kaapelin aaltoimpedanssin suhteesta. Vertaamalla lähetettyä ja takaisinheijastuneita pulsseja toisiinsa voidaan laskea vikapaikka ja päätellä vikatyyppejä. TDR-mittaus voidaan suorittaa sekä avojohdolle että kaapelille, mutta pulssit etenevät avojohdossa nopeammin kuin kaapelissa. Avojojhoilla pulssi etenee lähes valonnopeudella, eli  $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ . [35]

Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirissä epäjatkuvuuskohtia on Tornassa, jossa elektrodipiiri haarautuu sekä Pyhärannassa, Pyhämaassa ja Lautakarissa, joissa avojohto muuttuu kaapeliksi tai päinvastoin sekä muissa johdinten liitoskohdissa. Lisäksi pulssi heijastuisi takaisin elektrodilta ja vikatapauksissa vikakohdista. Kuvassa 25 on esitetty periaatekuva elektrodipiirin TDR-mittauksesta. TDR-mittaukseen perustuva menetelmä ei vaadi laitteiden tai järjestelmien asennusta elektrodiasemalle, vaan ainoastaan TDR-mittalaitteen sekä estosuodattimen suuntaaja-asemalle.



**Kuva 25.** Periaatekaavio elektrodipiirin TDR-mittauksesta. Perustuu lähteeseen [32].

TDR-mittaus perustuu pulssin kulkuajan mittaamiseen. Siten vika saadaan paikannettua, kun tiedetään pulssin kulkuajan lisäksi pulssin kulkunopeus. Vikapaikan lisäksi takaisin-heijastuneiden pulssien perusteella voidaan niiden suuruuden, polariteetin ja muodon perusteella päätellä vikatyypin. [32] Mittauksessa voi näkyä myös muitakin kuin vian aiheuttamia heijastumisia, kuten liitosten ja jatkosten aiheuttamia heijastumisia. Koska jatkoskohdat näkyvät TDR-mittauksessa myös terveessä tilassa, vikapaikan aiheuttama pulssin heijastuma saadaan selville vertaamalla terveen tilan ja vikatilanteen mittaustuloksia keskenään. [35]

Hatchin raportin [32] ja Hermanssonin kandidaatintyön [34] mukaan TDR-mittauksen avulla voidaan havaita sekä maasulkuvikoja että johdinkatkeamia. Hatchin raportissa tutkimuksen kohteena oleva elektrodipiiri on yli 400 kilometrin pituinen. Raportissa todettiin, että heijastuva pulssi vaimenee johdon pidentyessä ja vikapaikan etäisyyden kasvaessa, jolloin TDR-mittaus ei välttämättä sovellu pitkille elektrodipiireille. [32] Myös Hermanssonin työssä [34] todettiin, että suuriresistanssillisia maasulkuvikoja, jotka tapahtuvat kaukana pulssin syöttöpaikasta, voi olla vaikea havaita heijastuvan pulssin pienen amplitudin vuoksi.

Hermanssonin työssä [34] tarkasteltava elektrodipiiri on suuntaaja-asemalta elektrodille noin 50 kilometrin pituinen. Työssä tutkittiin menetelmän soveltuvuutta suuntaaja- ja elektrodiasemilta irti kytketyn virtapiirin vianpaikantamiseen, jolloin vianpaikannus voidaan suorittaa, vaikka elektrodipiirin toinen virtapiiri olisi jännitteellinen. Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin valvontamenetelmän tulisi kuitenkin havaita elektrodipiirin vikaantumisen, kun yhteys ja elektrodipiiri ovat käytössä.

Pengin ja Jiangin artikkelin [33] mukaan TDR-mittauksella ei voida paikantaa elektrodipiirin vikoja, jotka tapahtuvat mittaustaikana tai mitattavan johdon loppupään lähellä. Näissä tilanteissa vikapaikasta heijastunutta pulssia ei voida erottaa lähetetystä pulssista tai loppupäästä heijastuvasta pulssista. [33] Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin tapauksessa epäjatkuvuuskohtia on useampia, jolloin vikapaikasta heijastuvan pulssin erottaminen muista heijastuneista pulsseista voi olla epävarmaa. Lisäksi elektrodipiiri sisältää sekä avojohto- että kaapeliosuuksia, joissa pulssit etenevät eri nopeuksilla.

## 5.4 Nykyisen valvontamenetelmän herkistäminen

Nykyisen valvontajärjestelmän toiminta perustuu elektrodipiirin kokonaisvirran ja virtapiirien erovirran mittaamiseen Rauman suuntaaja-aseamalla sekä näiden mittaustulosten vertaamiseen. Mittaustulosten vertailu tapahtuu vähentämällä elektrodipiirin erovirrasta elektrodipiirin kokonaisvirta, joka on kerrottu vakioluvulla. Vakioluku  $k$  on normaalitilanteen erovirran suhde kokonaisvirtaan, eli kertomalla kokonaisvirta tällä vakioluvulla, saadaan normaalin käyttötilanteen erovirta. Siten erovirran ja vakioluvulla kerrotun kokonaisvirran erotus on normaalitilanteessa nolla. Nykyisen valvontajärjestelmän toimintaperiaatetta on tarkasteltu tarkemmin luvussa 3.4.

Vikatilanteessa erovirran ja vakioluvulla kerrotun kokonaisvirran erotuksen itseisarvo on suurempi kuin nolla, sillä virtapiirien erovirta muuttuu normaalitilanteesta, kun toisen virtapiirin ja maan välille muodostuu johtava yhteys, mutta kokonaisvirta pysyy samana, mikäli tehonsiirtotilanne Fenno-Skan-yhteyksillä ei muutu. Järjestelmä on asetettu antamaan hälytys, kun tämän erotuksen arvo ylittää arvon 5 A 10 sekunnin viiveajalla. Koska hälytysraja on sama riippumatta siitä, kuinka suuri kokonaisvirta elektrodipiirissä kulkee, on hälytysraja suhteellisesti suurempi pienemmille kuin suurille kokonaisvirroille.

Siten nykyisen valvontamenetelmän erovirran ja kokonaisvirran vertailun muuttaminen suhteelliseksi voisi parantaa menetelmän toimivuutta etenkin, kun elektrodipiirissä kulkee pienempi kokonaisvirta. Toimintaa voitaisiin muuttaa esimerkiksi siten, että erotamuntuunantajasta saatu mittaustuloksen arvo jaettaisiin kokonaisvirran mittaustuloksella, joka on kerrottu samalla vakioluvulla kuin nykyisinkin. Tällöin arvo, jota hälytysjärjestelmä tarkkailisi, olisi normaalitilanteessa yksi. Vikatilanteissa arvo poikkeaisi tästä arvosta, ja hälytysjärjestelmä antaisi hälytyksen asetetun suuruisen prosentuaalisen muutoksen tapahduttua. Kun vertailu muutettaisiin suhteelliseksi, samansuuruinen vikaresistanssi aiheuttaisi yhtä suuren muutoksen hälytysjärjestelmän tarkkailemaan arvoon riippumatta elektrodipiirin kokonaisvirrasta. Kaavassa (11) on esitetty hälytysjärjestelmän tarkkailema arvo  $H$ , kun vertailu muutetaan suhteelliseksi:

$$H = \frac{|I_{VP1} - I_{VP2}|}{|I_{kok}| \cdot k} \cdot 100 \% \quad (11)$$

missä  $I_{VP1}$  ja  $I_{VP2}$  ovat virtapiireissä kulkevat virrat,  $I_{kok}$  elektrodipiirin kokonaisvirta ja  $k$  vakioluku. Simuloimalla voidaan selvittää, minkä suuruisia vikaresistansseja nykyinen valvontamenetelmä kykenisi havaitsemaan, mikäli toimintaperiaatteeseen tehtäisiin edellä kuvatun mukainen muutos. Hälytysrajoina käytetään arvoja 1–10 %.

## 5.5 Yhteenveto

Hatchin raportin *Electrode Review – Confirmation of Type and Site Selection* liitteen F *Electrode Line Fault Detection and Protection* mukaan [32] on epävarmaa, voiko elektrodipiirin erovirran mittaamiseen perustuva valvontamenetelmä havaita luotettavasti

elektrodipiirissä tapahtuvia maasulkuja bipolaarisessa tai monopolaarisessa käyttötilanteessa. Raportin mukaan kyseinen menetelmä ei myöskään kykene havaitsemaan vikatilanteita, joissa kummassakin elektrodipiirin virtapiirissä sattuu maasulku samassa kohtaa tai joissa elektrodipiirin molemmat virtapiirit menevät poikki samanaikaisesti. Raportissa on oletettu, että virtapiirit ovat symmetriset keskenään, jolloin kyseisissä virtapiireissä kulkisi Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiiristä poiketen sama virta ja erovirta olisi siten nolla. Raportin mukaan ainoa vikatilanne, joka menetelmällä voidaan mahdollisesti havaita, on toisen virtapiirin katkeaminen, kun yhteyttä käytetään monopolaarisesti.

Hatchin raportin [32] yhteenvedossa on tehty suositukset raportissa käsiteltävistä suojaus- ja valvontamenetelmistä, joita Lower Churchill -projektissa rakennettavan yhteyden elektrodipiirissä voitaisiin käyttää. Suositukset perustuvat raportissa esitettyjen suojaus- ja valvontamenetelmien hyviin ja huonoihin puoliin sekä menetelmien saatavuuteen. Yhteenvedon perusteella elektrodipiirin ensisijaisena valvontamenetelmänä on suositeltavaa käyttää korkeataajuisen signaalin syöttämiseen perustuvaa impedanssin mittausta tai korkeataajuisen signaalin syöttämiseen perustuvaa virran differentiaalista mittausta. Raportissa Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin nykyiseen valvontamenetelmään verrattavissa olevaa menetelmää, eli erovirran mittausta sekä myös differentiaalisuojausta suositellaan käytettävän toissijaisena valvontamenetelmänä. Raportissa arveltiin, ettei TDR- tai PRBS-mittaukseen perustuva menetelmä sovellu pitkän elektrodipiirin valvontamenetelmäksi, sillä pulssit vaimenevat voimakkaasti pitkässä johdossa. Raportissa mainittiin, että TDR- tai PRBS-mittaukseen perustuvan menetelmän soveltuvuutta kyseisen projektin elektrodipiirin valvontamenetelmäksi tulisi tutkia tarkemmin. [32]

Kulkuaalto-, erovirta- ja differentiaalimittauksesta sekä korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuvasta mittauksesta tehtyjen tutkimusten ja julkaisujen [32-34] perusteella korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuvaa menetelmää voitaisiin pitää luotettavimpana ratkaisuna elektrodipiirin valvontamenetelmäksi. Korkeataajuisen virran syöttäminen elektrodipiiriin voisi ratkaista elektrodipiirin vikojen havaitsemiseen liittyvän ongelman, joka ilmenee etenkin, kun elektrodipiirissä ei kulje virtaa.

## 6. VIKATILANTEET JA ELEKTRODIPIIRIN JA VALVONTAMENETELMIEN MALLINTAMINEN

Vaarajännitteiden ja sekä nykyisen että vaihtoehtoisten valvontamenetelmien tarkasteluita varten on määritettävä vikatilanteet, joiden pohjalta laskelmat ja simuloinnit tehdään. Tarkasteltavia vikatilanteita ovat puun kaatuminen elektrodipiirin avojohdon päälle ja työkoneen osumisesta avojohtoon. Johdon päälle kaatunut puu aiheuttaa suuren vikaresistanssin johdon ja maan välille, kun taas maadoitetun työkoneen aiheuttama vikaresistanssi voi olla maaperän resistiivisyydestä riippuen pieni. Lisäksi työssä tarkastellaan tilannetta, jossa maassa seisova ihminen pääsee koskettamaan elektrodipiirin johtoa suoraan tai hyvin pieniresistanssisen esineen avulla.

Tässä luvussa käsitellään yksityiskohtaisemmin työssä tarkasteltavia vikatilanteita sekä määritetään laskennassa ja simuloinneissa käytettävät arvot. Koska arvojen määrittämisessä joudutaan tekemään useita oletuksia esimerkiksi vikaresistanssiin vaikuttavista tekijöistä, kosketusjännitteiden arvot lasketaan henkilöturvallisuuden kannalta pahimman skenaarion mukaisesti. Valvontamenetelmien osalta on tarkoituksenmukaista simuloida vikatilanteita, joissa vikavirrat ovat pieniä, ja tutkia siten menetelmien kykeneväisyyttä suuriresistanssillisten vikojen havaitsemiseen. On myös oleellista tutkia, kykenevätkö valvontamenetelmät havaitsemaan vikatilanteita, joista voisi aiheutua ihmisille tai eläimille vaaraa vaarajännitteiden vuoksi.

### 6.1 Työssä tarkasteltavat vikatilanteet

Koska elektrodipiirin puupylväsosuus sijaitsee pääosin metsässä ja johtoaueka on yhteensä vain noin 5 metriä leveä, voidaan puun kaatumista avojohtolinjan päälle pitää todennäköisenä. Elektrodipiirin puupylväsosuutta ei ole taloudellisesti järkevää pitää täysin puuvarmana, sillä johto kestää puiden kaatumisen johdon päälle. [18] Mikäli kuitenkin jostain erittäin epätodennäköisestä syystä toinen virtapiiri katkeaisi, voidaan elektrodipiiriä käyttää vain sen toisella virtapiirillä. Siten johdon päälle kaatunut puu ei suurella todennäköisyydellä aiheuta pysyvää häiriötä tai haittaa Fenno-Skan-yhteyksille. Sen sijaan puun kaatuminen päävirtapiirin päälle voisi aiheuttaa suurempaa vahinkoa verrattuna pelkän elektrodijohdon päälle kaatumiseen, joten Rauma-Rihtniemi välillä johtoaueka on leveämpi ja lisäksi reunavyöhykkeen puita ei päästetä kasvamaan yli rajoitusten. Puupylväsosuuteen verrattuna elektrodipiirin johdot sijaitsevat myös korkeammalla Rauma-Rihtniemi välillä. Näistä syistä johtuen voidaan olettaa, että puun kaatuminen elektrodipiirin päälle Rauma-Rihtniemi välillä ei ole todennäköistä. Myöskään Pyhäranta-Pyhämaa välillä puuvika ei ole mahdollinen. Siten puuvikatilanteita tarkastellaan välillä Torna-Pyhäranta sekä välillä Pyhämaa-Lautakari.

Kaatonut puu voi aiheuttaa vaaran ihmisille etenkin tilanteissa, joissa kaatunutta puuta poistetaan linjalta. Vaaratilanne syntyy, kun puuta poistava henkilö koskettaa jännitteelliselle linjalle makaavaa puuta. Silloin puuta poistavan henkilön käden ja jalkojen välille muodostuu kosketusjännite, jonka suuruus on riippuvainen puuta pitkin kulkevasta maasulkuvirrasta, puun resistansseista, ihmisen kehon ja kosketuskohtien resistansseista sekä maan resistiivisyydestä.

Toinen työssä tarkasteltava vikaresistanssillinen vikatilanne on työkoneen osuminen avojohtoon. Työkoneen oletetaan olevan työmaadoitettu. Työkone voi jännitteiseen johtoon osuessaan aiheuttaa vaaran ihmisille, mikäli elektrodijohdon ja maan välille muodostuu pieni vikaresistanssi, jolloin maasulkuvirta voi muodostua suureksi. Vaaratilanne syntyy, kun esimerkiksi työkoneessa työskennellyt henkilö nousee pois koneesta ja koskettaa työkoneetta ja maata samanaikaisesti. Tällöin henkilön käden ja jalkojen välille muodostuu kosketusjännite, jonka suuruus on riippuvainen maasulkuvirrasta, työkoneen aiheuttamasta vikaresistanssista, ihmisen kehon ja kosketuskohtien resistansseista sekä maan resistiivisyydestä.

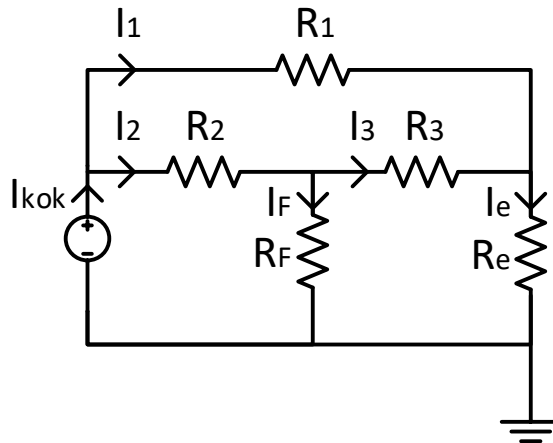
Kolmas työssä tarkasteltava vikatilanne on ihmisen suora koskettaminen elektrodipiirin toisen virtapiirin johtoon, jolloin elektrodipiirissä syntyy maasulku ihmisen kehon kautta. Tilanne voisi olla mahdollinen, mikäli ihminen koskettaisi jonkin pieniresistanssisen esineen avulla johtoa tai mikäli elektrodipiirin pylvää pääsisivät kallistumaan tai kaatumaan siten, että johdot olisivat kosketusetäisyydellä. Koska elektrodipiiri sijaitsee Rauma-Rihtniemi välillä pääpiirejä korkeammalla, sekä työkoneen että suoran kosketuksen tapauksessa vikatilanteen oletetaan olevan mahdollinen vain väleillä Torna-Pyhäranta ja Pyhämaa-Lautakari.

## 6.2 Elektrodipiirin resistanssien, jännitteiden ja virtojen laskenta

Elektrodipiirin resistanssien, jännitteiden ja virtojen laskenta on esitetty yksityiskohtaisesti tässä luvussa, sillä vaarajänniteselvityksen tulokset lasketaan hyödyntämällä Excel-tiedostoa, joka kootaan tässä työssä esitettyjen arvojen ja laskentaperiaatteiden mukaisesti. Vaarajänniteselvityksessä hyödynnetään myös työssä laadittua PSCAD-simulointimallia, jotta voidaan varmistaa tulosten yhdenmukaisuus.

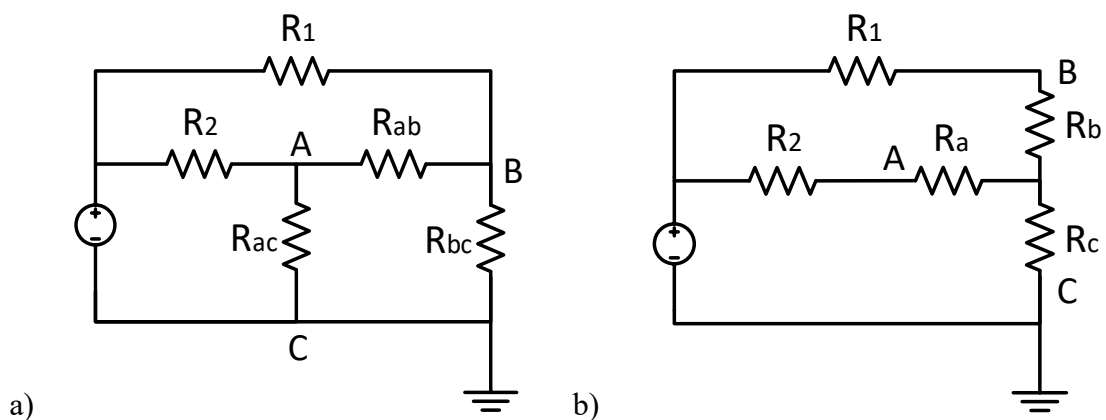
Kuvassa 26 on esitetty kaavio vikatilanteesta, jossa elektrodipiirin toisen virtapiirin avojohtoon ja maan välille on muodostunut yhteys vikaresistanssin  $R_F$  kautta. Tässä työssä tarkasteltavien vikatilanteiden mukaisesti vikaresistanssi voi aiheutua puun kaatumisesta johdon päälle, työkoneen osumisesta johtoon tai ihmisen joutuessa suoraan kosketukseen elektrodijohdon kanssa. Kuvassa resistansseilla  $R_1$  tarkoitetaan elektrodipiirin ehjän virtapiirin kokonaisresistanssia Rauman ja Lautakarin välillä, resistanssilla  $R_2$  vikaantuneen virtapiirin resistanssia Rauman ja vikapaikan välillä ja resistanssilla  $R_3$  vikaantuneen virtapiirin resistanssia vikakohdan ja Lautakarin välillä. Resistanssilla  $R_e$  tarkoitetaan

elektrodiverkon resistanssia. Kuvan merkinnät  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_F$  ja  $I_e$  tarkoittavat kuvan mukaisesti edellä kuvattujen resistanssien kautta kulkevia virtoja. Lisäksi virta  $I_{\text{kok}}$  on elektrodipiirin kokonaisvirta. Kuvassa tasavirtalähde sijaitsee Rauman suuntaaja-asemalla, ja virta kulkee elektrodipiirissä Suomesta Ruotsiin päin. Kun virta kulkee Ruotsista Suomeen päin, tasavirtalähde käännetään toisinpäin.



**Kuva 26.** Vikaresistanssillinen maasulku.  $I_{\text{kok}}$  on elektrodipiirin kokonaisvirta,  $R_1$  ja  $I_1$  elektrodipiirin ehjän virtapiirin kokonaisresistanssi ja virta,  $R_2$  ja  $I_2$  vikaantuneen virtapiirin resistanssi ja virta Rauman suuntaaja-asemalta vikakohtaan,  $R_3$  ja  $I_3$  vikaantuneen virtapiirin resistanssi ja virta vikakohtasta Lautakariin,  $R_e$  ja  $I_e$  resistanssi ja virta Lautakarin ja elektrodin välillä sekä  $R_F$  ja  $I_F$  kokonaisvikaresistanssi ja vikavirta.

Maasulun aikaisten jännitteiden ja vikavirran laskemiseksi resistanssien  $R_3$ ,  $R_F$  ja  $R_e$  muodostama kolmiokytkentä muunnetaan tähtikytkennäksi. Kuvassa 27 a) on esitetty kuvaa 26 vastaava piiri, johon on merkitty solmupisteet A, B ja C. Näiden solmupisteiden mukaisesti kuvan 26 resistansseja  $R_3$ ,  $R_F$  ja  $R_e$  merkitään kuvassa 27 a) resistansseilla  $R_{ab}$ ,  $R_{ac}$  ja  $R_{bc}$ . Kuvassa 27 b) on esitetty kolmiokytkentää vastaava tähtikytkentä. Tähtikytkennän resistansseja merkitään resistansseilla  $R_a$ ,  $R_b$  ja  $R_c$ .



**Kuva 27.** Tähti-kolmio -muunnos. Kuvan a) piirissä oleva resistanssien  $R_{ab}$ ,  $R_{bc}$  ja  $R_{ac}$  muodostama kolmiokytkentä muunnetaan kuvan b) mukaisesti tähtikytkennäksi.



Tähtikytkennän resistanssien arvot voidaan laskea kolmiokytkennän resistansseista seuraavien kaavojen avulla:

$$R_a = \frac{R_{ab} \cdot R_{ac}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}} \quad R_b = \frac{R_{ab} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}} \quad R_c = \frac{R_{bc} \cdot R_{ac}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}} \quad (12)$$

Muunnoksen jälkeen ehjän virtapiirin kokonaisresistanssi on  $R_{v,ehjä} = R_1 + R_b$  ja virtapiiriin, jossa vika sijaitsee, kokonaisresistanssi on  $R_{v,vika} = R_2 + R_a$ . Siten virtapiirien rinnankytkennän resistanssi  $R_{v,rinnan}$  on

$$R_{v,rinnan} = \frac{R_{v,ehjä} \cdot R_{v,vika}}{R_{v,ehjä} + R_{v,vika}} \quad (13)$$

ja siten elektrodipiirin kokonaisresistanssi  $R_{tot}$  on

$$R_{tot} = R_{v,rinnan} + R_c \quad (14)$$

Virtapiirien resistanssien suhteen avulla voidaan laskea elektrodipiirin kokonaisvirran jakautuminen virtapiirien kesken vikatilanteessa. Virtapiirien resistanssien suhde saadaan jakamalla virtapiirien rinnankytkennän resistanssi  $R_{v,rinnan}$  erikseen kummankin virtapiirin kokonaisresistanssilla:

$$r_{v,ehjä} = \frac{R_{v,rinnan}}{R_{v,ehjä}} \quad (15)$$

$$r_{v,vika} = \frac{R_{v,rinnan}}{R_{v,vika}} \quad (16)$$

Kun tiedetään elektrodipiirissä kulkeva kokonaisvirta  $I_{kok}$ , saadaan resistanssien suhteiden avulla laskettua ehjässä ja vikaantuneessa virtapiirissä kulkevat virrat  $I_1$  ja  $I_2$ :

$$I_1 = I_{kok} \cdot r_{v,ehjä} \quad (17)$$

$$I_2 = I_{kok} \cdot r_{v,vika} \quad (18)$$

Maasulkukohdassa osa vikaantuneen virtapiirin virrasta  $I_2$  kulkee vikaresistanssin kautta maahan. Siten vikaantuneen virtapiirin vikakohtan jälkeinen virta  $I_3$  saadaan laskettua Kirchhoffin virtalain mukaisesti vähentämällä virtapiirissä ennen vikakohtaa kulkevasta virrasta  $I_2$  vikavirta  $I_F$ . Vikavirta taas määräytyy vikakohtan jännitteestä  $U_F$  ja vikaresistanssista  $R_F$  Ohmin lain mukaisesti:

$$I_F = \frac{U_F}{R_F} \quad (19)$$

Vikakohdan ja muut elektrodipiirin eri kohdissa esiintyvät jännitteet saadaan laskettua jännitehäviön avulla esimerkiksi laskemalla ensin elektrodipiirin jännite Rauman suuntaaja-asemalla ja vähentämällä siitä Rauman suuntaaja-aseman ja tarkastelukohdan välinen jännitehäviö. Rauman suuntaaja-aseman jännite  $U_{RA}$  on:

$$U_{RA} = I_{kok} \cdot R_{tot} \quad (20)$$

Siten vikakohdan jännite  $U_F$  ja Lautakaran jännite  $U_{LTKR}$  ovat:

$$U_F = U_{RA} - I_2 \cdot R_2 \quad (21)$$

$$U_{LTKR} = U_f - I_3 \cdot R_3 = U_{RA} - I_1 \cdot R_1 \quad (22)$$

### 6.3 Vikatilannetarkasteluissa käytettävät arvot

Ihmisen kehon resistanssi  $R_k$  vaihtelee kosketusjännitteestä riippuen arvojen 600–2900  $\Omega$ :n välillä. Mikäli kosketusjännite vaikuttaa pidempään kuin 0,1 sekunnin ajan, kehon kokonaisimpedanssi pienenee IEC:n julkaisun [24] mukaan noin 10–20 % ja kun ihon impedanssi muuttuu merkityksettömän pieneksi, kehon kokonaisimpedanssin arvo lähestyy kehon sisäisen resistanssin arvoa. Sisäisen resistanssin arvo on enintään 750  $\Omega$  50 %:lla ihmisistä, kun kosketuspinta-ala on suuri ja virtatie on kädestä käteen tai kädestä jalkaan. Lisäksi jalkineiden resistanssina  $R_j$  käytetään arvoa 1000  $\Omega$ . Kun tarkastellaan kosketusjännitettä ihmisen käden ja jalkojen välillä, maakontaktin kokonaisresistanssi  $R_{mk}$  muodostuu jalkojen maakontaktiresistanssien  $R_m$  rinnankytkennästä, eli  $R_{mk} = 1,5\rho$ . Ihmisen kehon ja maakontaktin resistansseja sekä kosketusjännitepiirin lisäresistansseja on käsitelty tarkemmin luvussa 4.4.

Elektrodipiirin resistanssit on esitetty aiemmin luvussa 3.1. Vikaresistanssi on riippuvainen vian aiheuttajasta ja maan resistiivisyydestä sekä ihmisen joutuessa osaksi vikavirtapiiriä esimerkiksi myös ihmisen kehon resistanssista. Puun resistanssin suuruus on Pakosen väitöskirjan [37] mukaan riippuvainen puun kosteudesta, ja siten esimerkiksi myös puun lajista, iästä, laadusta, kasvupaikasta, vuodenajasta ja ympäristön lämpötilasta. Tasasähköllä puun kosteuspitoisuuden muutos vaikuttaa puun resistiivisyyden arvoon enemmän kuin vaihtosähköllä. Toisin kuin esimerkiksi rakentamisessa käytettävä kuiva puutavara, metsässä kasvavat puut ovat kosteita ja johtavat siten sähköä. Metsässä kasvavien puiden resistiivisyys on samaa luokkaa kuin puolijohteeksi luokiteltavan piin, ja lisäksi metsäpuiden resistanssi myös pienenee puolijohteiden tapaan, kun lämpötila nousee. [37]

Puun resistanssi vaihtelee muutamista kilo-ohmeista satoihin kilo-ohmeihin [37]. Puun sähköisiä ominaisuuksia on käsitelty myös raportissa *Moisture Relations and Physical Properties of Wood* [38], jossa on annettu kuivan puun ominaisresistanssin arvoksi  $10^{15}$ –

$10^{16}$   $\Omega\text{m}$  ja määrän puun ominaisresistanssin arvoksi  $10^3$ – $10^4$   $\Omega\text{m}$ . Koska johdolle kaatunut puu aiheuttaa suurimman vaaran ihmiselle silloin, kun puun resistanssi on mahdollisimman pieni, käytetään vaarajännitetarkasteluissa puun resistanssina pienintä mahdollista arvoa. Kirjallisuuslähteiden perusteella tämä arvo on noin 5 k $\Omega$ . Valvontamenetelmien simuloinneissa on syytä käyttää pieniresistanssisen puuvian lisäksi suurempaa puun resistanssin arvoa, jotta otetaan huomioon myös olosuhteet, joissa puun kosteuspitoisuus on pienempi, ja siten vikatilanteen havaitseminen vaikeampaa. Siksi tarkasteluarvona käytetään myös arvoa 10 k $\Omega$ .

Kuvassa 28 on esitetty kosketusjännitteen muodostuminen, kun ihminen koskettaa jännitteelliselle johdolle kaatunutta puuta. Kuvassa merkinnällä  $L_{\text{ylä}}$  tarkoitetaan puun yläosan ja merkinnällä  $L_{\text{ala}}$  puun alaosan pituutta, kun ihminen koskettaa puuta korkeudelta  $L_{\text{ala}}$ . Koska elektrodipiiri on Torna-Lautakari välillä noin 10-12 metrin korkeudessa ja johtoalue on yhteensä vain 5 metriä leveä, voidaan olettaa, että johdolle kaatuva puu koskettaa elektrodijohtoa keskimäärin noin 11 metrin korkeudelta [18]. Oletetaan, että resistanssi jakautuu tasaisesti koko puun pituudelle ja että ihminen koskettaa puuta 1,5 metrin korkeudelta. Siten puun alaosan resistanssi  $R_{\text{ala}}$  on

$$R_{\text{ala}} = \frac{L_{\text{ala}}}{L_{\text{puu}}} R_{\text{puu}} \quad (23)$$

missä  $L_{\text{puu}}$  on puun kokonaispituus ja  $R_{\text{puu}}$  puun kokonaisresistanssi. Vastaavasti puun yläosan resistanssi  $R_{\text{ylä}}$  on

$$R_{\text{ylä}} = \frac{L_{\text{ylä}}}{L_{\text{puu}}} R_{\text{puu}} \quad (24)$$

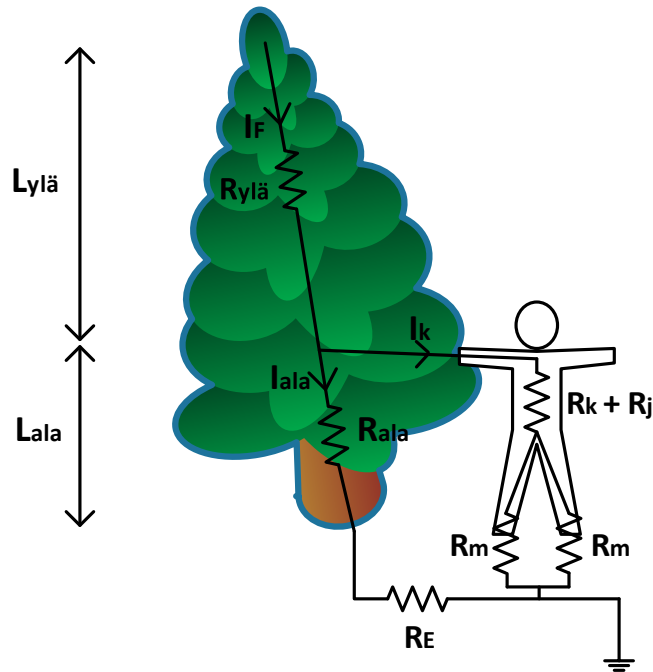
Elektrodijohdolta tuleva kokonaisvikavirta  $I_{\text{F}}$  vastaa kuvan 26 virtaa  $I_{\text{F}}$ . Kokonaisvikavirta jakautuu puun alaosan läpi kulkevaksi virraksi  $I_{\text{ala}}$  ja ihmisen kehon läpi kulkevaksi virraksi  $I_{\text{k}}$  haarojen resistanssien suhteiden mukaisesti. Jotta vikatilanne edustaisi henkilöturvallisuuden kannalta pahinta mahdollista tilannetta oletetaan, että ihminen kytkeytyisi koko maadoitusresistanssin rinnalle. Siten ihminen lisäresistansseineen kytkeytyy puun alaosan resistanssin  $R_{\text{ala}}$  ja maadoitusresistanssin  $R_{\text{E}}$  sarjaankytkennän rinnalle:

$$I_{\text{k}} = \frac{\frac{(R_{\text{k}}+R_{\text{j}}+R_{\text{mk}})(R_{\text{ala}}+R_{\text{E}})}{R_{\text{k}}+R_{\text{j}}+R_{\text{mk}}+R_{\text{ala}}+R_{\text{E}}}}{R_{\text{k}}+R_{\text{j}}+R_{\text{mk}}} I_{\text{F}} \quad (25)$$

$$I_{\text{ala}} = \frac{\frac{(R_{\text{k}}+R_{\text{j}}+R_{\text{mk}})(R_{\text{ala}}+R_{\text{E}})}{R_{\text{k}}+R_{\text{j}}+R_{\text{mk}}+R_{\text{ala}}+R_{\text{E}}}}{R_{\text{ala}}+R_{\text{E}}} I_{\text{F}} \quad (26)$$

missä  $R_{\text{mk}}$  on maakontaktiresistanssien  $R_{\text{m}}$  rinnankytkentä. Maadoituselektrodin maadoitusresistanssi on määritelty luvussa 4.2. Puuvikatilanteessa puun juurien ajatellaan

muodostavan maadoituselektrodin, jonka maadoitusresistanssia arvioidaan karkeasti puolipallon muotoisen elektrodin avulla. Maadoituselektrodin säteen oletetaan olevan 1 m.



**Kuva 28.** Vikavirtapiiri maasulussa, joka on aiheutunut puun kaatumisesta elektrodijohdolle. Ihminen on joutunut osaksi piiriä koskettaessaan puuta. Kuvan merkinnät on selitetty ja merkintöjen arvot on koottu taulukoihin 8 ja 9.

Kuvan 28 merkintöjen selitykset sekä niiden arvot on koottu taulukoihin 8 ja 9. Taulukkoon 8 on koottu puu- ja työkonevioille sekä elektrodijohdon suorassa kosketuksessa käytettävät yhteiset merkinnät ja niiden arvot.

**Taulukko 8.** Vikatilannetarkasteluissa käytettävät arvot.

Selite	Merkintä	Arvo
Maan ominaisvastus	$\rho$	1,5–20 000 $\Omega\text{m}$
Yhden jalan maakontaktin resistanssi	$R_m$	$3\rho \Omega$
Ihmiskehon resistanssi	$R_k$	600–2900 $\Omega$
Jalkineiden resistanssi	$R_j$	1000 $\Omega$

Taulukkoon 9 on koottu puuvikatilanteessa käytettävät arvot. Arvojen valinnassa tehtyjen oletuksien perustelut on esitetty aiemmin tässä luvussa.

**Taulukko 9.** Puuvikatilanteessa käytettävät arvot.

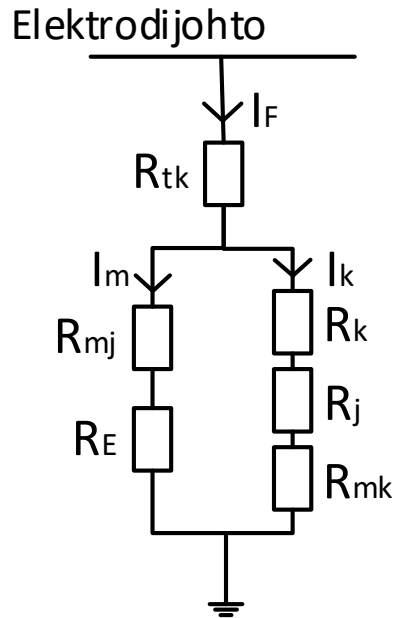
Selite	Merkintä	Arvo
Puun pituus	$L_{\text{puu}}$	11 m
Puun yläosan pituus	$L_{\text{ylä}}$	9,5 m
Puun alaosan pituus	$L_{\text{ala}}$	1,5 m
Puun resistanssi	$R_{\text{puu}}$	5–10 k $\Omega$
Puun yläosan resistanssi	$R_{\text{ylä}}$	$\frac{L_{\text{ylä}}}{L_{\text{puu}}} R_{\text{puu}} \Omega$
Puun alaosan resistanssi	$R_{\text{ala}}$	$\frac{L_{\text{ala}}}{L_{\text{puu}}} R_{\text{puu}} \Omega$
Puun maadoitusresistanssi	$R_{\text{E}}$	$\frac{\rho}{2\pi r}$

Henkilöturvallisuuden kannalta riittää, että tarkastellaan puun kaatumista vain elektrodi-piirin suurempijännitteisen virtapiirin päälle, eli sen virtapiirin, jossa on vain yksi man-nerveden kaapeli. Virtapiirin, jossa on kaksi mannerveden kaapelia, jännitteet ovat pie-nemmät, ja siten vikavirtakin on pienempi samanlaisessa vikatilanteessa.

Koska työkoneen resistanssi on hyvin pieni, maasulkuvirta voi muodostua ihmiselle hen-genvaarallisen suureksi. Työkoneen rungon resistanssina käytetään arvoa 5  $\Omega$ . Koska maan resistiivisyydellä on työkoneen rungon resistanssia suurempi vaikutus maasulku-virran suuruuteen, voidaan 5  $\Omega$ :n arvoa työkoneen rungon resistanssina pitää riittävänä oletuksena. Lisäksi työkoneessa oletetaan olevan kumitelat, jotka eristävät koneen maasta. Mikäli työkoneetta ei ole maadoitettu, koko maasulkuvirran voitaisiin olettaa kul-kevan kosketustilanteessa ihmisen kehon läpi. Siten tilanne vastaisi karkeasti työssä tar-kasteltavaa tilannetta, jossa maassa seisova ihminen koskettaa suoraan elektrodijohtoa, joten työkoneen oletetaan olevan tämän työn vaarajänniteselvityksessä työmaadoitettu. Tässä työssä oletetaan, että maadoitus toteutetaan painamalla maahan pystysuoraan 0,5 metrin syvyyteen maadoitussauva, joka on yhdistetty työkoneeseen yhdellä 25 metriä pitkällä 25 mm<sup>2</sup> kuparijohtimella, jonka tasavirtaresistanssi on noin 0,7–0,8  $\Omega$ /km. Siten 25 m pitkän johdon tapauksessa tasavirtaresistanssi on 0,02  $\Omega$  [39].

Kuvassa 29 on esitetty kosketusjännitteen muodostuminen ihmisen käden ja jalkojen vä-lille, kun työkone on aiheuttanut maasulun osuessaan elektrodijohtoon. Kuvassa  $I_{\text{F}}$  on työkoneen rungossa kulkeva virta,  $I_{\text{m}}$  työkoneen maadoituksen kautta kulkeva virta ja  $I_{\text{k}}$

ihmisen kehon kautta kulkeva virta. Resistanssilla  $R_{tk}$  tarkoitetaan työkoneen rungon resistanssia, resistanssilla  $R_{mj}$  maadoitusköyden resistanssia, resistanssilla  $R_E$  maadoitussauvan maadoitusresistanssia, resistanssilla  $R_k$  ihmisen kehon resistanssia, resistanssilla  $R_j$  jalkineiden resistanssia ja resistanssilla  $R_{mk}$  maakontaktin kokonaisresistanssia.



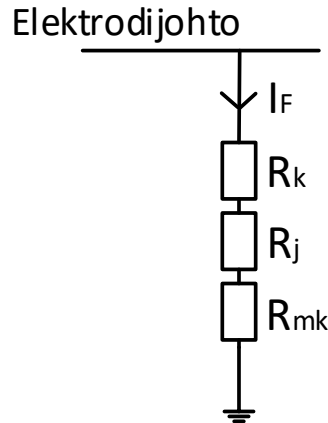
**Kuva 29.** Kaaviokuva vikaresistanssien muodostumisesta, kun maadoitettu työkone osuu elektrodijohtoon ja ihminen koskettaa työkonetta seisten maassa. Merkintöjen selitykset on koottu taulukoihin 8 ja 10.

Taulukkoon 10 on koottu kuvan 29 merkinnät ja niiden arvot. Lisäksi taulukkoon on koottu myös muita arvoja, joita tarvitaan työkonevikatilanteen vaarajänniteselvityksessä. Arvojen valinnassa tehtyjen oletuksien perustelut on esitetty aiemmin tässä luvussa.

**Taulukko 10.** Työkonevikatilanteessa käytettävät arvot

Selite	Merkintä	Arvo
Työkoneen resistanssi	$R_{tk}$	$5 \Omega$
Maadoitusköyden resistanssi	$R_{mj}$	$0,02 \Omega$
Maadoitussauvan maadoitusresistanssi	$R_E$	$\frac{\rho}{h} \Omega$
Maadoitussauvan syvyys	$h$	$0,5 \text{ m}$

Puu- ja työkonevikatilanteiden lisäksi tässä työssä tarkastellaan tilannetta, jossa maassa seisova ihminen ylettyisi koskettamaan elektrodipiirin toista virtapiiriä. Tämänlainen tilanne voisi olla mahdollinen esimerkiksi, mikäli elektrodipiirin pylvää kallistuisivat tai mikäli ihminen koskettaisi virtapiiriä erittäin pieniresistanssisella esineellä. Silloin vikaresistanssi muodostuu ihmisen kehon, jalkineiden ja maakontaktin resistanssien sarjaankytkennästä kuvan 30 mukaisesti.



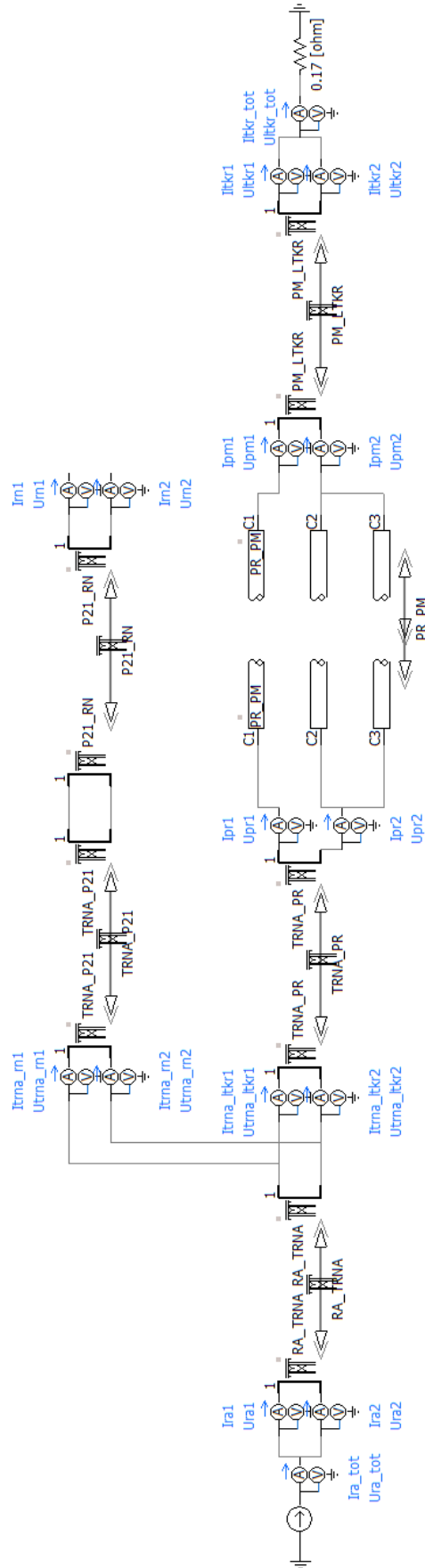
**Kuva 30.** Vikaresistanssin muodostuminen ihmisen koskettaessa elektrodipiiriin toista virtapiiriä suoraan tai erittäin pieniresistanssisen esineen avulla.

Suorassa kosketuksessa koko maasulkuvirta kulkee ihmisen kehon kautta. Kyseisen vikatilanteen vaarajännitetarkastelussa käytettävät arvot on koottu taulukkoon 8.

## 6.4 Elektrodipiirin simulointimalli

Fingridillä on jo aiemmin laadittu simulointimalli Fenno-Skan-yhteydestä [40]. Kyseisessä simulointimallissa elektrodipiiriä ei ole kuitenkaan mallinnettu tämän työn tarkoitukseen riittäväällä tarkkuudella, jonka vuoksi tässä työssä päädyttiin tekemään yksinkertainen simulointimalli elektrodipiiristä. Työssä tehty simulointimalli on esitetty seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 31. Simulointimallissa elektrodipiiriin syötetään tasavirtaa virtalähdekomponentilla. Vastaavanlainen mallinnus virtalähdekomponentilla ilman suuntaajien mallinnusta on tehty myös Hermanssonin kandidaatintyössä [34]. Eri tehonsiirtotilanteita voidaan mallintaa muuttamalla virtalähteen syöttämän virran suuruutta sekä suuntaa. Elektrodi on kuvattu mallissa  $0,17 \Omega$  suuruisena resistanssina, jonka arvo on saatu Fenno-Skan-yhteyden simulointimallista [40]. Virtalähteen taajuudeksi on asetettu 0 Hz.

Elektrodipiiri on mallinnettu taajuusriippuvien mallien (Frequency Dependent (Phase) Model) avulla siten, että jokainen elektrodipiirin osa on mallinnettu erikseen. Elektrodipiirin osilla tarkoitetaan johto-osuuksia, joiden välillä elektrodipiirissä tapahtuu jokin muutos, esimerkiksi avojohto muuttuu Pyhärannassa kaapeliksi. Johtojen parametreina on käytetty aiemmin luvussa 3 esitettyjä johtojen pituuksien ja tasavirtaresistanssien arvoja.



Kuva 31. Elektrodipiirin simulointimalli.



Simulointimallissa elektrodipiirissä kulkevaa virtaa mitataan piirin kummastakin virtapiiristä Raumalla, Tornassa, Pyhärannassa, Pyhämaassa, Lautakarissa ja Rihtniemessä. Tornassa virtaa mitataan sekä Rihtniemeen että Lautakariin päin vievissä haaroissa. Näiden lisäksi simulointimallissa mitataan elektrodipiirin kokonaisvirtaa Raumalla ja Lautakarissa. Virranmittauksen lisäksi simulointimallissa on jännitemittaukset Raumalla ja Lautakarissa sekä elektrodipiirin kummassakin virtapiirissä Tornassa, Pyhärannassa, Pyhämaassa sekä Rihtniemessä. Simulointimallissa käytettävien lyhenteiden selitykset on koottu taulukkoon 11.

*Taulukko 11. Simulointimalleissa käytetyt lyhenteet ja niiden selitykset.*

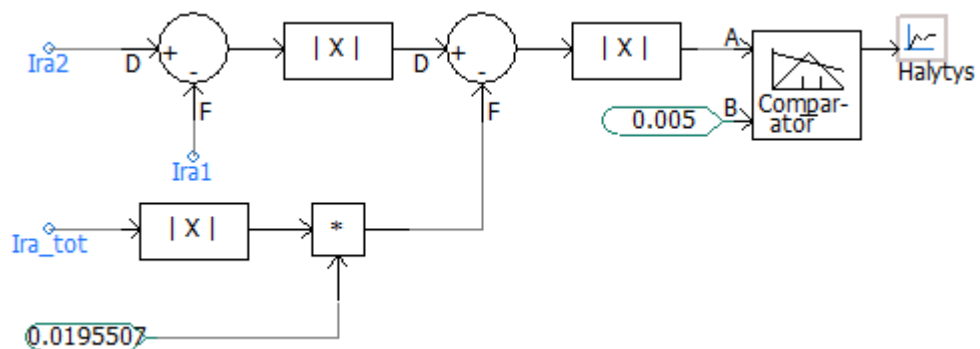
<b>Tyyppi</b>	<b>Lyhenne</b>	<b>Selitys</b>
<b>Johtimet</b>	RA_TRNA	Rauman ja Tornan välinen avojohto-osuus
	TRNA_PR	Tornan ja Pyhärannan välinen avojohto-osuus
	PR_PM	Pyhärannan ja Pyhämaan välinen kaapeliosuus
	PM_LTKR	Pyhämaan ja Lautakarin välinen avojohto-osuus
	TRNA_P21	Tornan ja pylvään nro 21 välinen avojohto-osuus
	P21_RN	Pylvään nro 21 ja Rihtniemen välinen avojohto-osuus
<b>Virran mittaus</b>	Ira_tot	Kokonaisvirta Raumalla
	Ira1	Virtapiirissä 1 kulkeva virta Raumalla
	Ira2	Virtapiirissä 2 kulkeva virta Raumalla
	Itrna_ltkr1	Virtapiirissä 1 kulkeva virta Tornassa Lautakarin suuntaan
	Itrna_ltkr2	Virtapiirissä 2 kulkeva virta Tornassa Lautakarin suuntaan
	Itrna_rn1	Virtapiirissä 1 kulkeva virta Tornassa Rihtniemen suuntaan
	Itrna_rn2	Virtapiirissä 2 kulkeva virta Tornassa Rihtniemen suuntaan
	Irn1	Virtapiirissä 1 kulkeva virta Rihtniemessä
	Irn2	Virtapiirissä 2 kulkeva virta Rihtniemessä
	Ipr1	Virtapiirissä 1 kulkeva virta Pyhärannassa
	Ipr2	Virtapiirissä 2 kulkeva virta Pyhärannassa
	Ipm1	Virtapiirissä 1 kulkeva virta Pyhämaassa
	Ipm2	Virtapiirissä 2 kulkeva virta Pyhämaassa
	Iltk1	Virtapiirissä 1 kulkeva virta Lautakarissa
Iltk2	Virtapiirissä 2 kulkeva virta Lautakarissa	
Iltk_tot	Kokonaisvirta Lautakarissa	
<b>Jännitteen mittaus</b>	Ura	Jännite Raumalla
	Utrna1	Virtapiirin 1 jännite Tornassa
	Utrna2	Virtapiirin 2 jännite Tornassa
	Urn1	Virtapiirin 1 jännite Rihtniemessä
	Urn2	Virtapiirin 2 jännite Rihtniemessä
	Upr1	Virtapiirin 1 jännite Pyhärannassa
	Upr2	Virtapiirin 2 jännite Pyhärannassa
	Upm1	Virtapiirin 1 jännite Pyhämaassa
	Upm2	Virtapiirin 2 jännite Pyhämaassa
	Ultkr	Jännite Lautakarissa

## 6.5 Nykyisen valvontajärjestelmän mallintaminen

Elektrodipiirin nykyisen valvontajärjestelmän sekä työssä tutkittavien muiden mahdollisten valvontamenetelmien toimivuutta erilaisten vikatilanteiden havaitsemiseen tutkitaan simuloimalla. Simulointiin ja elektrodipiirin sekä eri valvontamenetelmien simulointimallien luomiseen käytetään PSCAD-simulointiohjelmaa.

Nykyisen valvontajärjestelmän toimintaa tutkitaan simuloimalla edellisessä luvussa 6.3 esitettyjä vikatilanteita ja mittaamalla Raumalla elektrodipiirin kokonaisvirtaa sekä virtapiirien erovirtaa. Näiden mittausten ja nykyisen valvontajärjestelmän simulointimallin avulla voidaan tutkia, antaisiko valvontajärjestelmä simuloituista vikatilanteista hälytystä. Lisäksi tutkitaan, minkä suuruisia vikaresistansseja nykyinen valvontajärjestelmä kykenee havaitsemaan. Vastaavasti vaihtoehtoisten valvontamenetelmien soveltuvuutta elektrodipiirin vikaantumisen havaitsemiseen tutkitaan mallintamalla nämä vaihtoehtoiset valvontamenetelmät ja simuloimalla edellä luvussa 6.3 esitettyjä vikatilanteita.

Nykyisen valvontajärjestelmän toiminta perustuu elektrodipiirin kokonaisvirran ja virtapiirien erovirran mittaamiseen Rauman suuntaaja-aseamalla sekä näiden mittaustulosten vertaamiseen. Kuvassa 32 on esitetty nykyisen valvontajärjestelmän hälytysjärjestelmän simulointimalli. Mallissa signaalit  $I_{ra1}$  ja  $I_{ra2}$  ovat elektrodipiirin simulointimallissa Rauman suuntaaja-aseamalla mitatut virtapiirien virrat. Näiden virtojen erotuksen itseisarvona saadaan elektrodipiirin virtapiirien erovirta. Signaali  $I_{ra\_tot}$  on suuntaaja-aseamalla mitattu elektrodipiirin kokonaisvirta. Kokonaisvirta kerrotaan vakioluvulla, mikä antaa tuloksena normaalitilanteen erovirran. Tässä työssä käytetyillä resistanssien ja johtopituuksien arvoilla (ks. taulukko 2) kertoimen arvo on 0,0195507.

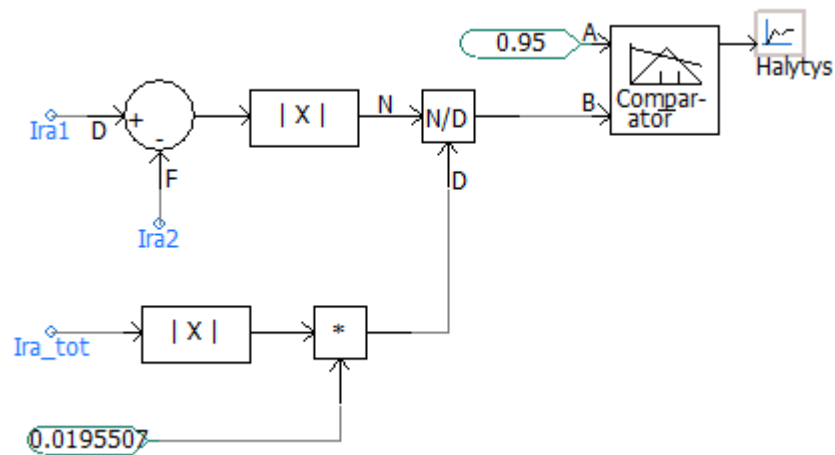


**Kuva 32.** Nykyisen valvontajärjestelmän hälytysjärjestelmän simulointimalli.

Mallin ulostulona saadaan joko arvo 1 tai 0. Arvolla 1 erovirran ja vakioluvulla kerrotun elektrodipiirin kokonaisvirran itseisarvon erotuksen itseisarvo on suurempi kuin 5 A. Mallissa vertailuarvo on 0,005, sillä mallissa virrat ovat kiloampeereja. Mikäli malli antaa arvon 1, nykyisen valvontamenetelmän simulointimalli on havainnut vian. Arvolla 0 malli ei ole havainnut vikaa.

## 6.6 Nykyisen valvontajärjestelmän toiminnan muuttaminen

Kuvassa 33 on esitetty simulointimalli nykyiselle valvontajärjestelmälle, kun sen toimintaperiaatetta on muutettu luvussa 5.4 kuvatun mukaisesti. Mallissa signaalit *Ira1* ja *Ira2* ovat elektrodipiirin simulointimallissa Rauman suuntaaja-aseamalla mitatut virtapiirien virrat ja *Ira\_tot* suuntaaja-aseamalla mitattu elektrodipiirin kokonaisvirta. Hälytysrajana on käytetty 5 % muutosta. Työssä tarkastellaan myös 1 ja 10 % hälytysrajoja.



**Kuva 33.** Nykyisen valvontamenetelmän toiminnan muuttaminen.

Mallin ulostulona saadaan joko arvo 1 tai 0. Arvolla 1 erovirran ja vakioluvulla kerrotun elektrodipiirin kokonaisvirran itseisarvon osamäärän arvo on kuvan 33 mukaisesti pienempi kuin 0,95. Simuloinnissa pitää ottaa huomioon myös tilanne, jossa erovirta kasvaa, jolloin suhde on suurempi kuin 1. Tällöin vertailuarvona käytetään arvoa 1,05. Mikäli malli antaa arvon 1, valvontamenetelmän simulointimalli on havainnut vian. Arvolla 0 malli ei ole havainnut vikaa.

## 7. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään työssä saadut tulokset sekä vaarajänniteselvityksen että valvontamenetelmien osalta. Vaarajänniteselvityksessä määritettiin sallittujen kosketusvirtojen arvot elektrodipiirissä tapahtuville vikatilanteille sekä tutkittiin, minkä suuruisia vaarajännitteitä elektrodipiirin ympäristössä voi esiintyä. Vaarajänniteselvityksessä tehtiin useita oletuksia laskennassa käytettävien arvojen ja laskentatekniikoiden osalta, ja siten työssä saadut tulokset ovat enemmän suuntaa antavia, kuin tarkkoja lukuarvoja. Tulokset antavat kuitenkin riittävän tarkan arvion elektrodipiirin turvallisuudesta, sillä vaarajänniteselvityksen lähtökohtana käytettiin pahinta mahdollista tilannetta. Vaarajänniteselvityksen tulokset on esitetty luvussa 7.1.

Valvontamenetelmien osalta tässä työssä tutkittiin nykyisen valvontamenetelmän ja erilaisten vaihtoehtoisten valvontamenetelmien soveltuvuutta erilaisten vikatilanteiden havaitsemiseen. Lisäksi työssä tutkittiin, miten nykyisen valvontajärjestelmän toimintaperiaatetta voitaisiin muuttaa, jotta menetelmästä saataisiin luotettavampi. Erilaisten mahdollisten valvontamenetelmien selvittämiseksi työssä tehtiin kirjallisuusselvitys, jonka perusteella elektrodipiirin valvontamenetelmiä käsitteleviä julkaisuja on tehty vähän, mutta ainakin kulkuaalto-, erovirta- ja differentiaalimittauksiin sekä korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuvien mittausmenetelmien soveltuvuuksia elektrodipiirin valvontamenetelmiksi on tutkittu aikaisemmin. Tässä työssä erovirran mittauksen lisäksi differentiaalista mittausta tutkittiin tarkemmin PSCAD-simuloinneilla. Nykyisen valvontamenetelmän tulokset on esitetty luvussa 7.2 ja vaihtoehtoisten valvontamenetelmien tutkimusten tulokset sekä differentiaalisen mittauksen simulointitulokset on esitetty luvussa 7.3.

### 7.1 Vaarajänniteselvitys

Koska elektrodipiiriä ei kytketä jännitteettömäksi maasulun seurauksena, on vaarajännitetarkasteluissa otettu huomioon mahdollisuus, että ihminen ei pääse irti koskettamastaan jännitteellisestä osasta, kun ihmisen kehon läpi kulkeva virta on kouristusrajavirtaa suurempi. Tällöin kosketusjännitteelle ei voida sallia niin suurta arvoa kuin tilanteessa, jossa ihmisen voitaisiin olettaa pääsevän irti kosketuspiiristä. Standardeissa [21, 23, 24] sallittu kosketusjännite on esitetty 10 sekunnin vaikutusaikaan asti, jonka jälkeen vaikutusajan pidentyminen ei muuta sallitun kosketusjännitteen arvoa. Siten tämän työn vaarajänniteselvityksessä käytetään standardien kosketusvirta-arvoja, joilla vaikutusaika on 10 sekuntia.

Suomessa noudatettavassa standardissa SFS 6001 [23] sallittuina kosketusvirtarajoina käytetään julkaisussa IEC/TS 60479-1 [24] määritettyjä arvoja, joilla sydänkammiovärinän todennäköisyys on alle 5 %. Suomalaisissa standardeissa ei ole määritetty sallittujen kosketusjännitteiden tai -virtojen arvoja tasavirralla, mutta mikäli oletetaan, että sallitut kosketusvirrat voidaan määrittää samoilla ehdoilla myös tasavirralla, kosketusvirran arvoksi voidaan sallia kuvan 20 käyrän  $c_2$  arvo kohdassa, jossa vaikutusaika on 10 s. Tämä arvo on kuvaajasta arvioituna noin 165 mA.

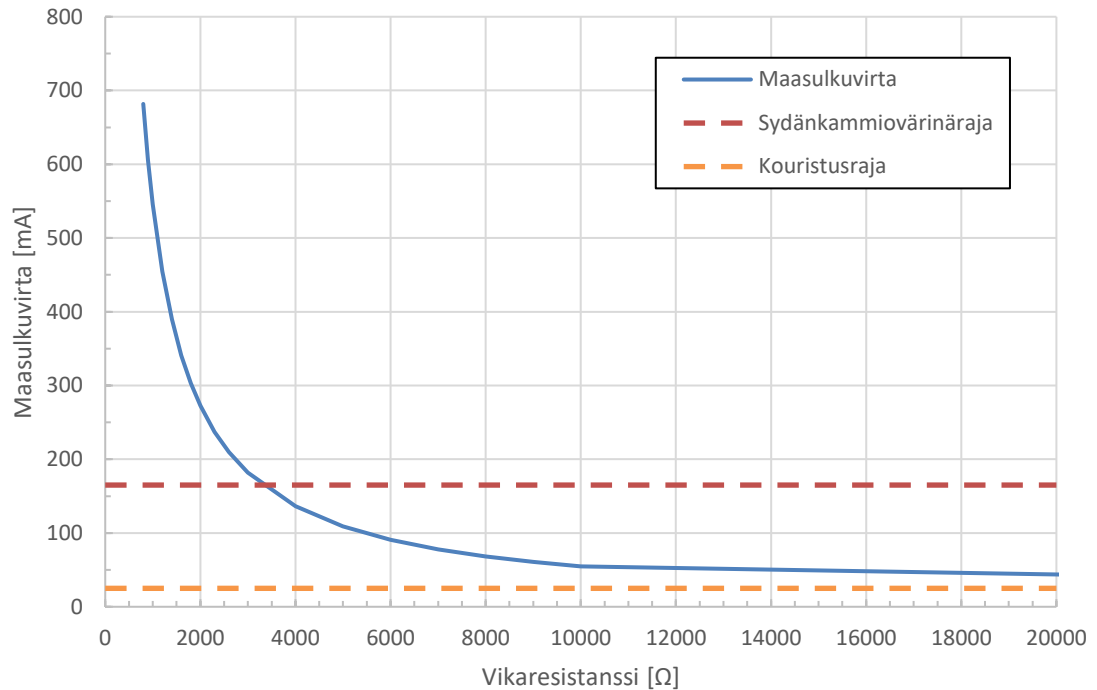
Sydänkammiovärinän lisäksi hengenvaarallisia virran aiheuttamia vaikutuksia ovat esimerkiksi sisäiset palovammat. Myös muiden vaikutusten vakavuus kasvaa virran ja vaikutusajan kasvaessa. Koska elektrodipiiriä ei kytketä automaattisesti jännitteettömäksi maasulkutilanteessa, kouristusrajaa suuremmilla virroilla on mahdollista, ettei ihminen pysty päästämään irti koskettamastaan jännitteellisestä osasta. Tästä johtuen elektrodipiirin vikatilanteiden sallittuna kosketusvirtarajana olisi turvallisempaa käyttää kouristusrajan suuruista tasavirtaa, eli kuvan 20 perusteella arvoa 25 mA.

Vaarajänniteselvityksessä tehtiin useita oletuksia laskennassa käytettävien arvojen ja laske-  
 kentatekniikoiden osalta. Oletukset tehtiin pahimman, mutta silti mahdollisen, tilanteen mukaan. Esimerkiksi puun resistanssina käytettiin 5 ja 10 k $\Omega$ :n arvoja, jotka edustavat noin 11 m korkeiden puiden tapauksessa pieniresistanssisia puita. Lisäksi ihmisen oletettiin kytkeytyvän puu- ja työkonevikatilanteissa koko maadoitusresistanssin rinnalle. Tulokset on laskettu siten, että vika tapahtuu Tornassa virtapiirissä 1 ja elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Tällöin tilanne edustaa myös vikapaikan ja siirtotilanteen kannalta pahinta mahdollista tilannetta, sillä elektrodipiirin jännitteet ovat suurimmillaan maksimipaluvirralla, elektrodipiirin jännite on tarkasteluvälillä suurin Tornassa ja virtapiirin 1 jännite on Tornassa suurempi kuin virtapiirin 2 jännite.

Työn tulokset on esitetty maan eri resistiivisyyksien arvoilla, sillä maan resistiivisyydellä on suuri vaikutus vikaresistanssin, ja siten myös kosketusvirtojen suuruuteen. Työssä ei tehty mittauksia elektrodipiirin ympäristön maan resistiivisyydestä, jonka vuoksi tulokset laskettiin laajemmalla skaalalla, jonka pohjalta voidaan tehdä arvio eri tilanteiden vaarallisuuksista ja myös todennäköisyyksistä. Ihmisen kehon resistanssin suuruutta arvioitiin standardien arvojen perusteella, ja sen arvo vaihtelee tuloksissa riippuen ihmisen kehon yli vaikuttavasta kosketusjännitteestä luvussa 4.4.1 esitetyn mukaisesti, ja siten maan resistiivisyydestä.

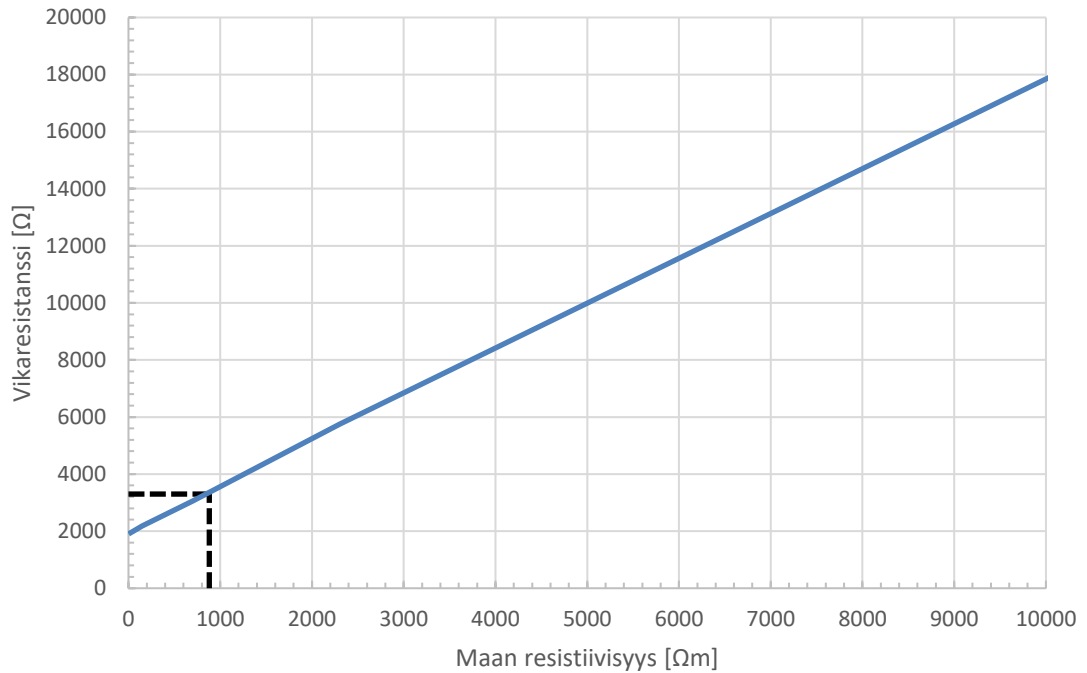
Kuvassa 34 on esitetty maasulkuvirran suuruus sinisellä käyrällä eri vikaresistanssien arvoilla, kun vika tapahtuu Tornassa virtapiirissä 1 ja elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Kuvaan on merkitty myös sydänkammiovärinä- ja kouristusrajat. Sydänkammiovärinärajan suuruinen virta aiheuttaa ihmisen kehon läpi kulkiessaan alle 5 % todennäköisyydellä sydänkammiovärinän, ja sydänkammiovärinän riski on sitä suurempi mitä suurempi on vikavirta. Vastaavasti maasulkuvirta on sitä suurempi, mitä pienempi on elektrodijohdon ja maan välinen vikaresistanssi. Vikaresistanssin suuruuteen vaikuttaa

vian aiheuttaja ja erityisesti maan resistiivisyys vikapaikassa sekä sen ympäristössä. Pieni maan resistiivisyys aiheuttaa pienen maadoitusvastuksen, jolloin kokonaisvikaresistanssi jää pienemmäksi ja elektrodijohdolta kulkee enemmän virtaa maahan, kuin jos maan resistiivisyys olisi suurempi.



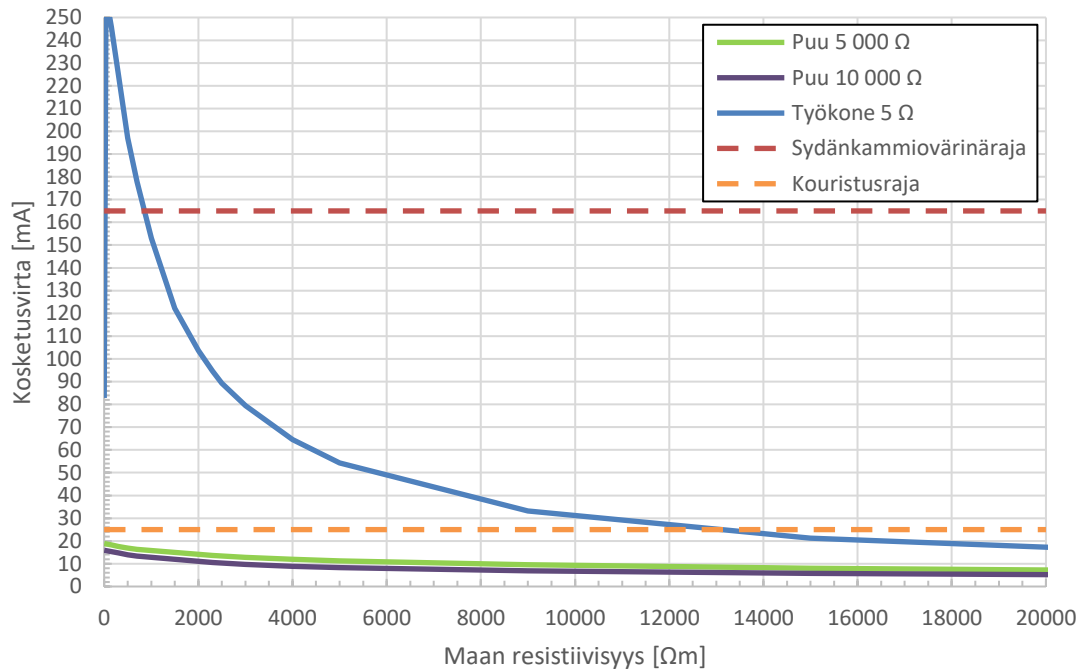
**Kuva 34.** Maasulkuvirran suuruus eri vikaresistanssin arvoilla, kun vika tapahtuu Tornassa virtapiirissä 1 ja elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Kuvassa kouristusraja merkitty oranssilla viivalla ja sydänkammiovärinäraja punaisella katkoviivalla.

Tarkastellaan tilannetta, jossa ihminen muodostaisi yksinään vikaresistanssin. Tällainen vikatilanne voisi syntyä, jos ihminen seisoi maassa ja ylettyisi koskettamaan esimerkiksi kallellaan olevan pylvään toisen virtapiirin johtoa. Tällöin kuvan 34 mukaisesti sydänkammiovärinäraja ei ylity, kun vikaresistanssi on suurempi kuin noin 3,3 kΩ. Jotta ihmisen muodostama kokonaisresistanssi olisi suurempi kuin 3,3 kΩ, on maan resistiivisyyden oltava tarpeeksi suuri, jotta maakontaktin resistanssi muodostuisi suureksi. Kuvassa 35 on esitetty, miten ihmisen muodostaman kokonaisresistanssin arvo muuttuu maan resistiivisyyden muuttuessa. Kokonaisresistanssissa on otettu huomioon ihmisen kehon ja jalkineiden resistanssit sekä ihmisen maadoitusresistanssi. Kuvan mukaisesti vikaresistanssi on suurempi kuin 3,3 kΩ, kun maan resistiivisyyden arvo on suurempi kuin noin 900 Ωm. Tämän suuruinen maan resistiivisyys voisi vastata esimerkiksi jonkinlaista sekoitusta hiekasta ja turpeesta tai mullasta.



**Kuva 35.** Ihmisen muodostaman kokonaisvikaresistanssin suuruus eri maan resistiivisyyden arvoilla. Vikaresistanssi muodostuu ihmisen kehon ja jalkineiden sekä maakon-taktin resistansseista.

Ihmisen joutuessa osaksi vikapiiriä, jonka on aiheuttanut esimerkiksi johdolle kaatunut puu tai johtoon osunut työkone, kuvan 34 mukaisesta vikavirrasta vain osa kulkee ihmisen kehon läpi. Ihmisen kehon läpi kulkevan virran suuruus on riippuvainen ihmisen kehon kokonaisresistanssista sekä sen rinnalla olevan vikaresistanssin suuruudesta, ja siten vian aiheuttajasta ja maan resistiivisyydestä. Kuvassa 36 on esitetty kosketusvirran suuruus, kun ihminen joutuu osaksi vikavirtapiiriä, jonka on aiheuttanut elektrodijohdolle kaatunut puu tai johtoon osunut työkone. Vikaresistanssi on laskettu luvussa 6.3 sekä taulukoissa 8, 9 ja 10 esitettyjen oletuksien, arvojen ja yhtälöiden perusteella.



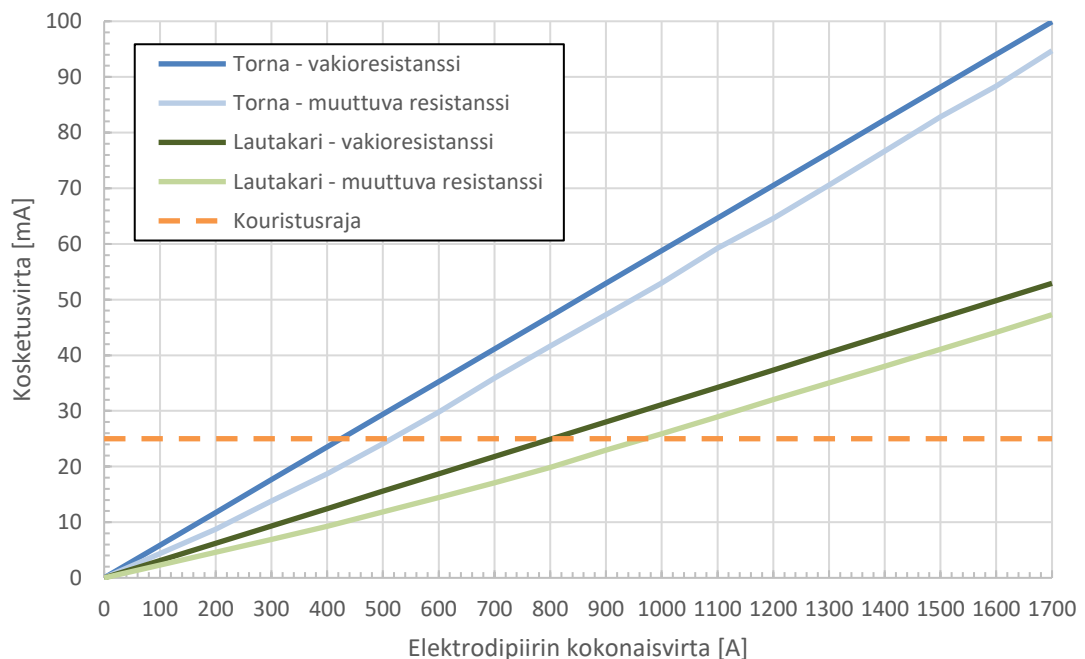
**Kuva 36.** Ihmisen kehon läpi kulkeva virta eri vikatilanteissa eri maan resistiivisyyksien arvoilla, kun vika tapahtuu Tornassa ja kun elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Kuvaan merkitty myös sydänkammiovärinä- ja kouristusrajat.

Kuvan 36 perusteella johdolle kaatunut puu ei aiheuta sallittua suurempia kosketusvirtoja ihmisen koskettaessa puuta, vaikka puun resistanssi olisi pieni (5 k $\Omega$ ), sillä kosketusvirrat eivät ylitä kouristusrajaa. Puuvikatilanteessa kosketusvirrat laskettiin 5 ja 10 k $\Omega$  suuruisilla puun resistanssien arvoilla. Näin suurilla vikaresistanssien arvoilla ei juurikaan ole vaikutusta elektrodijohdon jännitteeseen, joten esimerkiksi 10 k $\Omega$ :n vikaresistanssi aiheuttaa kaksi kertaa pienemmän vikavirran ja 100 k $\Omega$ :n vikaresistanssi 20 kertaa pienemmän vikavirran kuin 5 k $\Omega$ :n vikaresistanssi. Kosketusvirroissa ei ole kuitenkaan huomattavaa eroa puun 5 tai 10 k $\Omega$ :n resistansseilla, sillä suuremmalla puun resistanssilla ihminen kytkeytyy suuremman resistanssin rinnalle, ja siten ihmisen kehon läpi kulkee suhteellisesti enemmän virtaa.

Työkoneen osuminen elektrodijohtoon saattaa kuvan 36 perusteella aiheuttaa vaaratilanteen ihmiselle, kun maan resistiivisyys on alle 800–900  $\Omega\text{m}$ . Tällöin kosketusvirta ylittää sydänkammiovärinärajan. Kun maan resistiivisyys on suurempi kuin noin 13 000  $\Omega\text{m}$ , ihmisen kehon läpi kulkeva virta on kouristusrajavirtaa pienempi. Kouristusrajan alittuminen vaatisi työssä tehdyillä oletuksilla vian tapahtumista sellaisessa ympäristössä, jossa maaperä on harjusoraa tai keskimääräistä paremmin johtavaa graniittikalliota. Kallioisessa maaperässä työmaadoituksen tekeminen on kuitenkin haastavaa, jonka vuoksi maadoitussauvaa ei välttämättä saada painettua työssä oletetun mukaisesti puolen metrin syvyyteen. Pienempi upotussyvyys aiheuttaa suuremman maadoitusvastuksen, jolloin maasulkuvirta pienenee, mutta virrasta kulkee suhteellisesti enemmän ihmisen kehon kuin maadoituksen kautta.



Kuvan 36 arvot on laskettu tilanteilla, joissa vika tapahtuu Tornassa virtapiirissä 1 ja elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Koska työssä määritetyn pahimman skenaarion mukaan työkonen aiheuttama vikatilanne ja ihmisen suora elektrodijohdon koskettaminen aiheuttavat vaaratilanteen, tilanteita on tarkasteltu tarkemmin kuvassa 37. Kuvassa on esitetty kosketusvirran suuruus elektrodipiirin eri kokonaisvirran arvoilla, kun vika tapahtuu Tornassa (siniset suorat) tai Lautakarissa (vihreät suorat) ja maan resistiivisyyden oletetaan olevan  $2300 \Omega\text{m}$ . Kosketusvirran arvot ovat lähes yhtä suuret työkonetikatilanteessa ja suorassa kosketustilanteessa, joten kuvan 37 arvot pätevät riittävällä tarkkuudella molempiin vikatilanteisiin. Tilanteet on laskettu myös muuttamalla ihmisen kehon resistanssia koskevaa oletusta: arvot on laskettu kosketusjännitteen suuruudesta riippumatta pitämällä kehon resistanssin arvoa vakiona. Vakioresistanssina on käytetty  $1000 \Omega$ :n arvoa. Kehon resistanssin määrittämistä koskevan oletuksen muuttaminen muuttaa kosketusvirran arvoa keskimäärin noin 5 mA:n verran, mutta koska työn tulokset ovat laskennassa tehtävien useiden oletuksien vuoksi kuitenkin enemmän suuntaa antavia, laskennan voidaan olettaa olevan riittävän tarkka, kunhan tehdyt oletukset otetaan huomioon tulosten tarkastelussa.



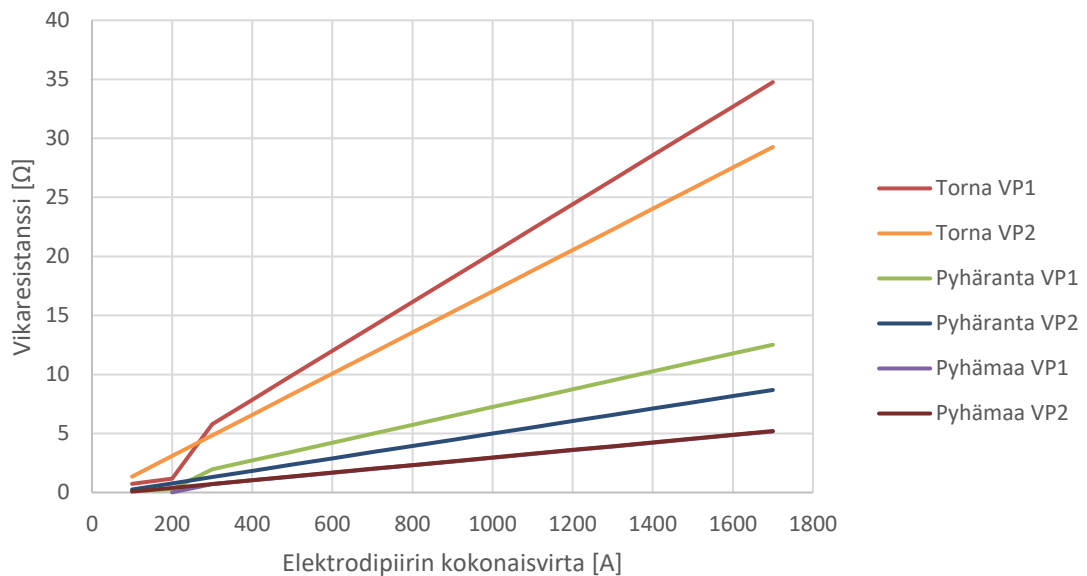
**Kuva 37.** Kosketusvirran suuruus elektrodipiirin eri kokonaisvirran arvoilla, kun vika tapahtuu Tornassa tai Lautakarissa ja kun kehon resistanssi on määritetty kahdella eri tavalla. Maan resistiivisyyden arvona on käytetty  $2300 \Omega\text{m}$ .

Kuvan 37 kosketusvirtojen toteutuminen edellyttää kuvan mukaisen elektrodivirran lisäksi vian tapahtumista Tornassa tai Lautakarissa. Tornassa tapahtuvan vian arvot kuvaavat vikapaikan sijainnin kannalta pahinta tilannetta, ja vastaavasti Lautakarissa tapahtuvilla vioilla saadaan pienimmät kosketusvirran arvot, kun otetaan muut oletukset huomioon. Koska tuloksissa maan resistiivisyyden on oletettu olevan  $2300 \Omega\text{m}$ , kosketusvirta

pienenee kuvan 37 arvoista, mikäli resistiivisyys olisi todellisuudessa suurempi. Kuvan perusteella kouristusraja ylittyy Tornassa tapahtuvassa viassa, kun elektrodipiirin kokonaisvirta on suurempi kuin noin 400–500 A ja Lautakarissa, kun kokonaisvirta on suurempi kuin noin 800–1000 A. Näin ollen vaaratilannetta ei aiheudu työkonene aiheuttamassa vikatilanteessa tai ihmisen koskettaessa elektrodipiirin toista virtapiiriä suoraan tai jonkin pieniresistanssillisen esineen avulla, kun yhteyttä käytetään bipolaarisesti, ja maan resistiivisyys on 2300  $\Omega\text{m}$  tai suurempi.

## 7.2 Nykyinen valvontajärjestelmä

Kuvassa 38 on esitetty nykyisen valvontajärjestelmän kykeneväisyys vikojen havaitsemiseen. Kukin kuvaaja esittää maksimivikaresistanssia, jonka järjestelmä havaitsee, kun vika tapahtuu kuvaajan osoittamassa paikassa elektrodipiirin eri kokonaisvirroilla. Vikaresistanssi, jonka järjestelmä kykenee havaitsemaan, vaihtelee vikapaikan sijainnin mukaan, koska elektrodipiirin jännite pienenee elektrodia kohden. Vikaresistanssi on elektrodipiirin toisen virtapiirin ja maan välillä.



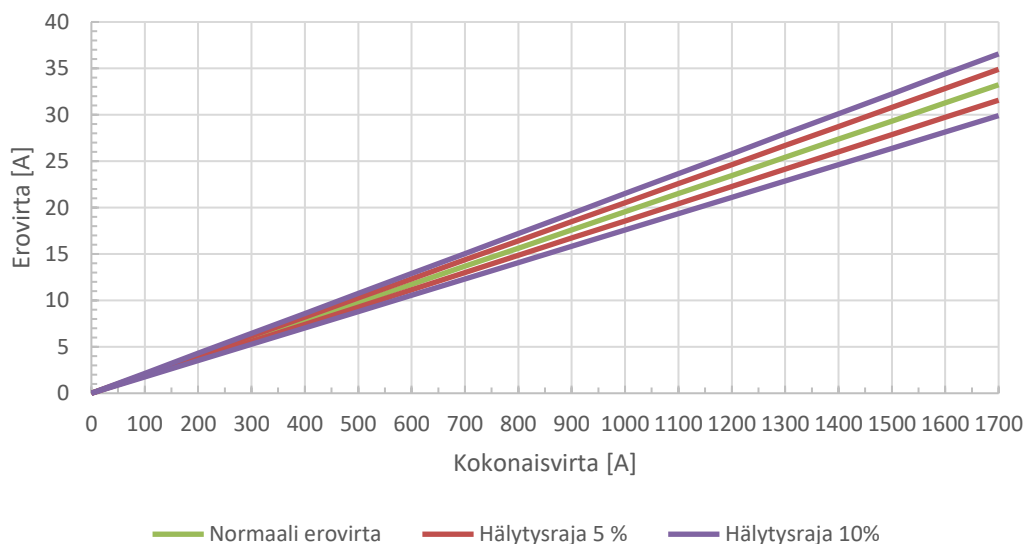
**Kuva 38.** Nykyisen valvontajärjestelmän toiminta. Järjestelmä kykenee havaitsemaan viat, joiden aiheuttamat resistanssit johdon ja maan välillä ovat maksimissaan kuvaajien mukaiset. Maksimiresistanssi on esitetty elektrodipiirin eri kokonaisvirroilla, kun vika tapahtuu kuvaajan osoittamassa paikassa.

Kuvaajissa oleva epälineaarinen kohta virtapiiriin 1 tuloksissa 100–300 A kokonaisvirran välillä johtuu virtapiirien välisen erovirran pienemisestä hyvin pieneksi. Normaalitilanteessa virtapiiriin 1 virta on virtapiiriin 2 virtaa pienempi, mutta kun vika tapahtuu virtapiirissä 1, virtapiiriin 1 virta kasvaa ja virtapiiriin 2 virta pienenee vikaresistanssin pienentyessä. Koska noin 250 A:n kokonaisvirtaa pienemmillä arvoilla erovirta on normaali-

lutilanteessa kuvan 12 mukaisesti pienempi kuin 5 A, nykyinen valvontamenetelmä havaitsee vian vasta, kun virtapiirin 1 virta on kasvanut virtapiirin 2 virtaa 5-10 A suuremmaksi riippuen kokonaisvirrasta, ja siten normaalitilanteen erovirrasta.

Kuvan 38 perusteella nykyinen valvontajärjestelmä kykenee havaitsemaan maksimissaan noin 35  $\Omega$ :n suuruisen vikaresistanssin, kun vika tapahtuu Tornassa virtapiirissä 1 ja elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Koska puun resistanssi on tämän työn mukaisesti vähintään 5 k $\Omega$  ja työkoneneen muodostama kokonaisresistanssi oletetulla maadoitustavalla Suomen maaperän keskimääräiselläkin maan ominaisvastuksen arvolla tuhansien ohmien luokkaa, nykyinen valvontajärjestelmä ei kykene havaitsemaan työkoneneen tai puun aiheuttamia vikoja missään kohdassa elektrodipiiriä, vaikka Fenno-Skan-yhteyttä käytettäisiin monopolaarisesti.

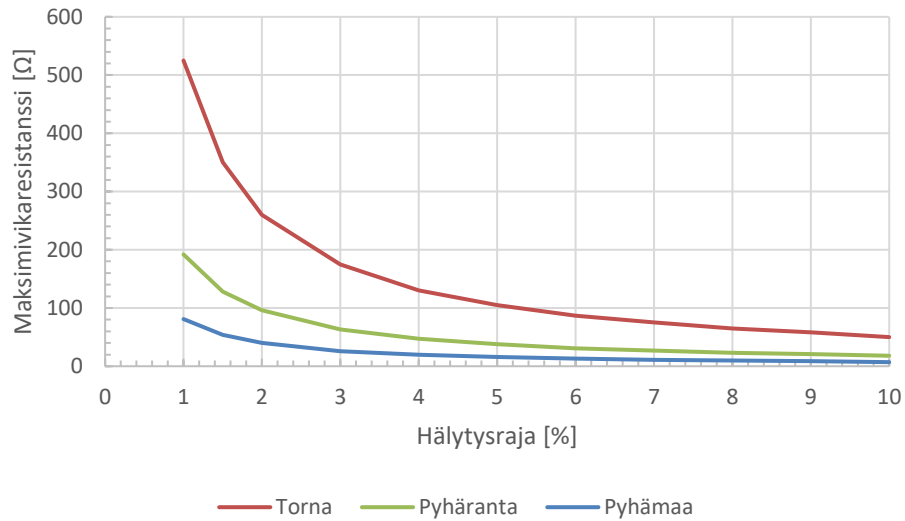
Nykyinen valvontajärjestelmä antaa hälytyksen, kun erovirta on muuttunut noin 15 % 1700 A kokonaisvirralla, ja kokonaisvirran pienentyessä järjestelmä vaatii suhteellisesti tätäkin suurempaa erovirran muutosta. Tästä johtuen nykyisen valvontajärjestelmän toimintaa voitaisiin parantaa muuttamalla erovirran muutoksen vertailu suhteelliseksi ja pienentämällä hälytysrajaa. Kuvassa 39 on esitetty normaalitilanteen erovirta sekä 5 ja 10 %:n hälytysrajat, kun nykyisen valvontajärjestelmän erovirran ja kokonaisvirran vertailu on muutettu suhteelliseksi. Tuloksissa on esitetty suurimpien havaittavien vikaresistanssien suuruudet 1–10 %:n hälytysrajoilla, mutta 1 %:n rajaa ei ole esitetty kuvassa 39, koska arvot ovat hyvin lähellä normaalia erovirtaa.



**Kuva 39.** Nykyisen valvontamenetelmän toiminnan parantaminen muuttamalla erovirran ja kokonaisvirran vertailu suhteelliseksi.

Kuvassa 40 on esitetty eri hälytysrajoilla vikaresistanssien suuruudet, jotka nykyinen valvontajärjestelmä kykenee tämän työn tulosten perusteella havaitsemaan, mikäli erovirran

ja kokonaisvirran vertailu muutettaisiin suhteelliseksi. Torna, Pyhäranta ja Pyhämaa edustavat vikapaikan sijaintia, kun vika tapahtuu virtapiirissä 1.



**Kuva 40.** Maksimivikaresistanssin suuruus eri hälytysrajoilla. Torna, Pyhäranta ja Pyhämaa edustavat vikapaikan sijaintia, kun vika tapahtuu virtapiirissä 1.

Suhteellisella vertailulla valvontajärjestelmä kykenisi havaitsemaan maksimissaan kuvan 40 mukaiset vikaresistanssit riippumatta elektrodipiirin kokonaisvirran suuruudesta. Pienillä kokonaisvirroilla hälytykseen vaadittava erovirran muutos on kuitenkin pieni, sillä esimerkiksi 5 %:n hälytysrajalla noin 0,5 A:n tai 1 %:n hälytysrajalla noin 0,01 A:n muutos erovirrassa 500 A:n kokonaisvirralla aiheuttaisi hälytyksen, mikäli vika tapahtuisi virtapiirissä 1. Kuvasta 40 voidaan kuitenkin myös havaita, että mikäli hälytysrajaa voitaisiin pienentää vielä 1 %:n hälytysrajasta, menetelmällä havaittavan maksimivikaresistanssin arvo kasvaa jyrkästi etenkin Torna läheisyydessä tapahtuvissa vioissa. Siten nykyisen valvontamenetelmän muutoksella saatava hyöty on hyvin riippuvainen hälytysrajan asettelusta.

Tuloksien perusteella vertailun muuttamisella ja hälytysrajan pienentämisellä valvontajärjestelmä kykenisi havaitsemaan nykyistä suurempiresistanssisia vikoja, mutta etenkin lähempänä Lautakaria havaittavissa olevat vikaresistanssin arvot ovat edelleen pieniä. Siten vaikka nykyisen valvontamenetelmän toimintaperiaatetta muutettaisiinkin, se ei kykene havaitsemaan työkonetta tai puiden aiheuttamia vikatilanteita.

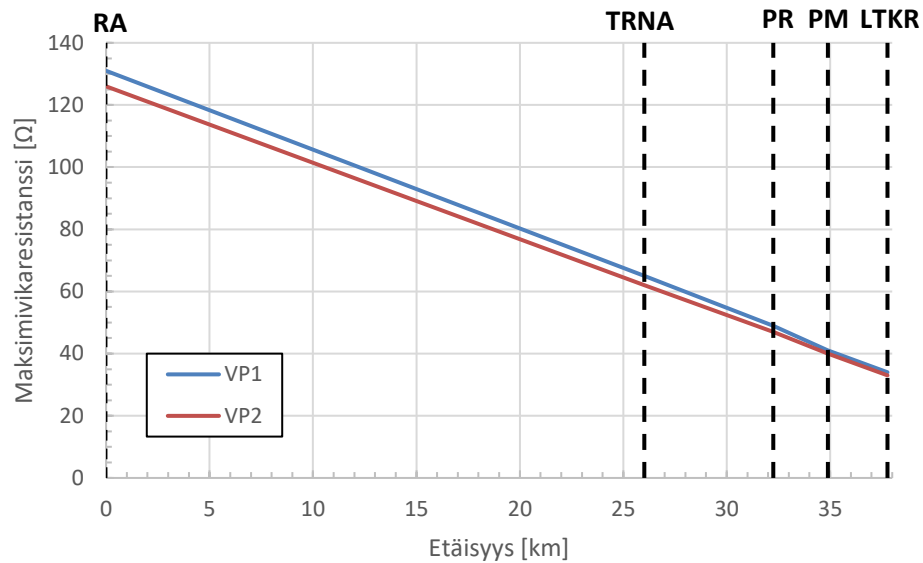
Mikäli elektrodipiirin toinen virtapiiri katkeaisi, elektrodipiirin virta kulkeisi tilanteesta riippuen jopa kokonaan toisen virtapiirin kautta. Tällöin virtapiirien erovirta voi olla elektrodipiirin kokonaisvirran suuruinen, jolloin etenkin monopolaarisessa käytössä nykyinen valvontajärjestelmä kykenee havaitsemaan johdon katkeamisen. Mikäli yhteyttä käytetään bipolaarisesti ja elektrodipiirissä ei kulje lainkaan virtaa, ei johdon katkeamista voida havaita, koska normaalitilanteenkin erovirta on nolla.

### 7.3 Vaihtoehtoiset valvontamenetelmät

Työssä tehdyn kirjallisuusselvityksen perusteella elektrodipiirin valvontamenetelmiä käsitteleviä julkaisuja on tehty vähän. Menetelmiä, joiden soveltuvuutta elektrodipiirin valvontamenetelmiksi on tutkittu aiemmin ovat kulkuaalto-, erovirta- ja differentiaalimittaus sekä korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuva mittaus.

Kulkuaaltomittaukseen ja korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuvista menetelmistä on tehty useampia julkaisuja, mutta näistä suuri osa käsittelee menetelmän soveltuvuutta HVDC-yhteyden pääpiirin vikojen todentamiseen. Lisäksi kulkuaaltomittauksista on tutkittu useassa julkaisussa vain vianpaikantamiseen, kun pääpiiri tai elektrodipiiri on kytketty jännitteettömäksi, mutta tämän työn tarkoituksena oli tutkia menetelmiä, joilla elektrodipiirin vikatilanteet voitaisiin todentaa heti vian tapahduttua. Lähdeaineiston huonon saatavuuden vuoksi kulkuaaltomittauksen ja korkeataajuisen signaalin syöttämiseen perustuvien menetelmien simuloinneissa käytettävien parametrien määrittäminen osoittautui hankalaksi, ja siten näiden menetelmien osalta ei saatu varmuutta menetelmien soveltuvuudesta Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin valvontamenetelmiksi.

Valvontamenetelmien tarkempia, PSCAD-simuloinneilla tehtyjä, tutkimuksia tehtiin tässä työssä nykyisen valvontamenetelmän lisäksi differentiaaliseen mittaukseen perustuvasta menetelmästä. Differentiaalinen mittaus voitaisiin toteuttaa Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirissä mittaamalla virtapiirien virtoja Rauman suuntaaja-asemalla sekä Lautakarissa. Tällä menetelmällä virtapiirien epäsymmetriaa ei tarvitse ottaa huomioon, mikäli järjestelmä vertailee erikseen kummankin virtapiirin mittaustuloksia. Menetelmällä voidaan kuitenkin mitata myös virtapiirien erovirtaa, mikäli menetelmää hyödynnetään poikittaisdifferentiaalisuojan tavoin. Kuvassa 41 on esitetty maksimivikaresistanssit, jotka differentiaalinen valvontamenetelmä kykenee havaitsemaan eri vikapaikoissa, kun hälytysrajana on 1 %:n muutos normaalista virtapiirin virrasta. Resistanssit on laskettu molemmille virtapiireille *VPI* ja *VP2*.



**Kuva 41.** Differentiaalisen mittauksen havaitsemat maksimivikaresistanssit, kun vika tapahtuu eri etäisyyksillä ja kun hälytysrajana on 1 %:n muutos normaalista virtapiirin virrasta.

Kuvan 41 perusteella differentiaalisella mittauksella kyetään havaitsemaan suurempia vikaresistansseja kuin nykyisellä valvontamenetelmällä, kun differentiaalisen mittauksen hälytysrajana käytetään 1%:n muutosta normaalista virtapiirin virrasta. Etenkin elektrodin läheisyydessä tapahtuvat viat voidaan havaita differentiaalisella mittauksella nykyistä menetelmää varmemmin. Tulosten perusteella nykyisellä valvontamenetelmällä kyetään kuitenkin havaitsemaan työssä ehdotetun toimintaperiaatteen muutoksella suurempia vikaresistansseja kuin differentiaalisella mittauksella.

1 %:n muutos virtapiirin normaalitilanteen virrasta vaatii 1700 A:n kokonaisvirralla noin 8,5 A:n muutoksen ja 100 A:n kokonaisvirralla noin 0,5 A muutoksen virtapiirin virrassa riippuen kummassa virtapiirissä vika tapahtuu. Mikäli differentiaalinen mittausmenetelmä koettaisiin toteuttamisen arvoiseksi, myös kyseisen menetelmän osalta tulisi tehdä tarkempi analyysi hälytysrajan asettelusta, jotta viantodentaminen voitaisiin maksimoida ja turhien hälytysten aiheutuminen minimoida.

## 8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä saatujen tulosten perusteella elektrodijohdolle kaatunut puu ei aiheuta sallittua suurempien kosketusvirtojen kulkemista ihmisen kehon läpi, kun ihminen koskettaa johdolle nojaavaa puuta. Kosketusvirrat ovat tulosten perusteella pienempiä kuin 25 mA, joka on kouristusraja tasavirralla, kun virran vaikutusaika on 10 s. Vikatilanteissa puun resistansseina käytettiin 5 ja 10 k $\Omega$ :n arvoja, mutta eri lähteiden perusteella puun resistanssi on kuitenkin todennäköisemmin useiden kymmenien tai jopa sadan kilo-ohmin luokkaa. Siten maasulkuvirta, ja myös kosketusvirta, voi todennäköisemmin olla pienempi kuin mitä tuloksissa on esitetty.

Ihmisen kehon läpi kulkeva virta ylittää sallitun rajan, kun elektrodijohtoon osuneen työkoneneen vieressä seisova ihminen koskettaa työkonetta ympäristössä, jossa maaperä on hiekan ja turpeen tai mullan kaltaista sekoitusta tai jotakin paremmin johtavaa maa-ainesta. Tässä työssä ei tehty mittauksia maan resistiivisyydestä elektrodipiirin ympäristössä, mutta Suomessa maaperä on resistiivisyydeltään keskimäärin 2300  $\Omega$ m, johon saatuja tuloksia voitaneen vertailla. Tämän suuruisella maan resistiivisyydellä ja muilla tässä työssä tehdyillä oletuksilla työkoneneen osuminen elektrodijohtoon ei aiheuta sallittua suurempia kosketusvirtoja, mikäli kosketusvirraksi sallitaan 5 % todennäköisyyden sydänkammiovärinärajan suuruinen kosketusvirta.

Tilanteessa, jossa maassa seisova ihminen ylettyisi koskettamaan esimerkiksi kallellaan olevan pylvään toisen virtapiirin johtoa, sydänkammiovärinän raja ylittyy, kun ihmisen kehon, jalkineiden ja maadoitusresistanssin muodostama kokonaisresistanssi on pienempi kuin noin 3,3 k $\Omega$ . Tätä pienempi kokonaisresistanssi muodostuisi, jos ihminen seisoi paikassa, jossa maan resistiivisyys on pienempi kuin 900  $\Omega$ m, eli maaperä olisi esimerkiksi jonkinlainen sekoitus hiekasta ja turpeesta tai mullasta tai jotakin paremmin johtavaa maa-ainesta. Mikäli maaperän resistiivisyydeksi oletettaisiin Suomen maaperän keskimääräinen arvo 2300  $\Omega$ m, johdon suora koskettaminen ei aiheuttaisi sydänkammiovärinärajaa suurempaa kosketusvirtaa. Tämän suuruisella maan resistiivisyydellä kosketusvirta olisi noin 100 mA, joka voisi kuitenkin aiheuttaa esimerkiksi voimakkaita tahdosta riippumattomia lihassupistuksia ja palautuvia sydämen toimintaan kohdistuvia häiriöitä.

Mikäli kosketusvirraksi sallitaan enintään kouristusrajan suuruinen arvo, sallittu kosketusvirta ylittyy kaikilla maan resistiivisyyksillä, kun maassa seisova ihminen koskee suoraan elektrodipiirin toista virtapiiriä ja kun vika tapahtuu Tornassa virtapiirissä 1 ja elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Myös työkoneneen aiheuttamassa viassa kouristusraja ylittyy samoilla oletuksilla paikoissa, joissa maan resistiivisyys on alle 13 000  $\Omega$ m. Käytännössä elektrodipiirin ympäristön maan resistiivisyyden voidaan olettaa olevan joka puolella alle tämän arvon. Mikäli kouristusrajaa pidetään ehdottomana ylärajana

sallitulle kosketusvirralle, tulisi näiden vikatilanteiden osalta pohtia jatkotoimenpiteitä. Näiltä vikatilanteilta voidaan kuitenkin välttyä huolehtimalla elektrodijohdon ympärillä työskentelevien henkilöiden perehdyttämisestä sekä työturvallisuudesta.

Vaarajännitteiden tulokset -luvussa (luku 7.1) esitettyjen kuvien 34-36 tulokset on laskettu tilanteesta, jossa vika tapahtuu Tornassa ja jossa elektrodipiirin kokonaisvirta on 1700 A. Elektrodipiirin jännite laskee elektrodiverkkoa kohden, joten saman suuruinen vikaresistanssi aiheuttaa lähempänä elektrodiverkkoa pienemmän maasulkuvirran kuin jos vika tapahtuisi Tornassa. Toisaalta Fenno-Skan-yhteyttä käytetään pääpiirien vika- ja huoltotilanteita lukuun ottamatta bipolaarisesti, joten elektrodipiirissä kulkeva virta on todellisuudessa suurimman osan ajasta pienempi kuin 1700 A. Siten kuvien 34-36 tulokset edustavat pahinta mahdollista, mutta eivät kuitenkaan todennäköisintä, tilannetta myös vikapaikan sijainnin ja Fenno-Skan-yhteyksien siirtotilanteiden osalta. Kuvassa 37 esitettyjen tulosten perusteella kouristusraja ei ylity Suomen maaperän keskimääräisellä ominaisvastuksen arvolla bipolaarisessa käyttötilanteessa, kun vikatilanne aiheutuu työkoneneen osumisesta toiseen virtapiiriin tai kun ihminen koskettaa elektrodipiirin toista virtapiiriä suoraan tai jonkin pieniresistanssillisen esineen avulla.

Työssä saatujen tulosten perusteella elektrodipiirin nykyinen valvontajärjestelmä ei kykene havaitsemaan puiden tai työkoneneen aiheuttamia vikatilanteita, eikä myöskään tilanteita, joissa maassa seisova ihminen koskettaa suoraan elektrodijohdon toista virtapiiriä. Tulosten perusteella valvontajärjestelmä kuitenkin kykenee havaitsemaan elektrodipiirin toisen virtapiirin katkeamisen, sillä silloin elektrodipiirin kokonaisvirta kulkee tilanteesta riippuen lähes kokonaan elektrodipiirin ehjän virtapiirin kautta ja aiheuttaa siten suuren erovirran. Virtapiirin katkeamista ei voida kuitenkaan havaita nykyisellä valvontajärjestelmällä silloin, kun elektrodipiirissä ei kulje lainkaan virtaa tai virta on lähellä nollaa. Myös Hatchin raportin [32] mukaan ainoa vikatilanne, joka Fenno-Skan-yhteyden nykyisen valvontamenetelmän kaltaisella menetelmällä voidaan mahdollisesti havaita, on toisen virtapiirin katkeaminen, kun yhteyttä käytetään monopolaarisesti.

Nykyisen valvontajärjestelmän toimintaa voitaisiin parantaa muuttamalla elektrodipiirin erovirran ja kokonaisvirran vertailu suhteelliseksi. Tällä muutoksella järjestelmä kykenisi havaitsemaan nykyistä suurempiresistanssisia vikoja, etenkin elektrodipiirin pienimmillä kokonaisvirroilla. Myös hälytysrajan laskeminen mahdollistaisi hälytyksen antamisen pienemmillä erovirran muutoksilla, jolloin nykyinen valvontajärjestelmä voisi havaita nykyistä suurempiresistanssisia vikoja. Mikäli hälytysraja lasketaan kuitenkin liian pieneksi, järjestelmä saattaa aiheuttaa herkemmin turhia hälytyksiä. Hälytysrajan pienentämisen mahdollisuuksia kannattanee selvittää etenkin, mikäli nykyistä valvontamenetelmää ei tulla tulevaisuudessa vaihtamaan. Järjestelmän toiminnan muuttamisella tai hälytysrajan laskemisella ei kuitenkaan kyetä havaitsemaan tämän työn oletuksien mukaisesti laskettuja puiden tai työkoneneen aiheuttamia vikoja. Myös Hatchin raportin [32] mukaan elektrodipiirin erovirran mittaamiseen perustuva menetelmä ei voi luotettavasti havaita elektrodipiirissä tapahtuvia maasulkuja edes monopolaarisessa käytössä.



Tämän työn tulosten perusteella esimerkiksi puiden tai työkoneiden aiheuttamia maasulkuja ei voida havaita differentiaalisella mittausmenetelmällä. Myös Hatchin raportin [32] mukaan differentiaalisella mittauksella ei voida havaita luotettavasti elektrodipiirissä tapahtuvia maasulkuja, etenkin bipolaarisessa käyttötilanteessa, mutta monopolaarisessa käytössä menetelmän todettiin mahdollisesti kykenevän havaitsemaan osan maasuluista. Koska differentiaalimittaukseen perustuva valvontamenetelmä vaatii mittalaitteet sekä Rauman suuntaaja-asemalle, että Lautakarin elektrodiasemalle, ja näiden välille tietoliikenny yhteyden, mutta menetelmä tuo vain pienen lisäarvon nykyiseen valvontamenetelmään nähden, ei menetelmän toteuttamista voida pitää kannattavana. Lisäksi tämän työn tulosten perusteella nykyisen valvontamenetelmän toimintaperiaatteen muutoksella kyetään havaitsemaan suurempia vikaresistansseja kuin differentiaalisella mittauksella, eikä muutoksen toteuttaminen vaadi yhtä suuria investointeja.

Hatchin raportissa [32] tarkastellun elektrodipiirin ensisijaisena valvontamenetelmänä suositeltiin käytettävän korkeataajuisen signaalin syöttämiseen perustuvaa menetelmää. Korkeataajuisen virran syöttäminen elektrodipiiriin voisi ratkaista elektrodipiirin vikojen havaitsemiseen liittyvän ongelman, joka ilmenee etenkin, kun elektrodipiirissä ei kulje virtaa. Koska tämän työn simuloinneissa käytettävien parametrien määrittäminen osoittautui hankalaksi, ei tässä työssä saatu varmuutta korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuvan menetelmän soveltuvuudesta Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiiriin valvontamenetelmäksi. Siten mikäli elektrodipiiriin nykyisen valvontamenetelmän korvaaminen katsotaan tarpeelliseksi, korkeataajuisen signaalin syöttämiseen perustuvan menetelmän soveltuvuutta tulisi tutkia tarkemmin.

Koska työssä saatujen tulosten perusteella puun kaatuminen elektrodipiiriin toisen virtapiiriin päälle ei aiheuta sallittua suurempien kosketusvirtojen muodostumista ihmisen koskettaessa puuta, ei elektrodipiiriin valvontajärjestelmän ole henkilöturvallisuuden näkökulmasta välttämätöntä havaita johdon päälle kaatuneita puita. Ihmisen suorakosketus tai työkoneen osuminen elektrodijohtoon aiheuttaa työn tulosten perusteella selvän turvallisuusriskin monopolaarisessa käyttötilanteessa, kun vika tapahtuu sellaisessa ympäristössä, jossa maan resistiivisyys on keskimääräistä pienempi. Käytännössä tämä edellyttäisi maaperän pienen resistiivisyyden lisäksi vian tapahtumista yhteyden toisen pääpiiriin huollon tai korjauksen aikana. Mikäli yhteyttä käytetään bipolaarisesti, työkoneen tai suoran kosketuksen aiheuttama vikatilanne ei aiheuta kouristusrajan ylittymistä Suomen maaperän keskimääräisellä ominaisvastuksen arvolla, eikä siten sallittua suurempia kosketusvirtoja. Näin ollen myös näiden vikatilanteiden aiheuttamaa henkilöturvallisuusriskiä voidaan pitää erittäin pienenä. Jotta turvallisuudesta saataisiin suurempi varmuus, tulisi elektrodipiiriin ympäristössä tehdä mittauksia maaperän resistiivisyydestä.

## 9. YHTEENVETO

Työ jaettiin kahteen kokonaisuuteen, joista ensimmäinen oli elektrodipiirin vaarajänniteselvitys ja toinen elektrodipiirin valvontamenetelmien tutkiminen. Vaarajänniteselvityksen tavoitteina oli selvittää, minkälaiset henkilöturvallisuusvaatimukset elektrodipiirin tulee täyttää, minkälaisia vikatilanteita elektrodipiiriin voi kohdistua ja minkä suuruisia vaarajännitteitä näissä vikatilanteissa voi esiintyä. Koska elektrodipiiriä ei kytketä jännitteettömäksi maasulun seurauksena, ihmisen kehon läpi kulkevan virran arvo ei saisi ylittää kouristusrajavirran arvoa, jotta vikavirtapiiriin osaksi joutunut henkilö olisi kykeneväinen irrottautumaan koskettamastaan jännitteellisestä osasta. Mikäli kuitenkin katsotaan, että kosketusvirraksi voitaisiin sallia suurempi virta, on ehdottomana ylärajana pidettävä Suomessa noudatettavien standardien mukaisesti määritettyjä kosketusvirran arvoja, joilla sydänkammiovärinä aiheutuu enintään 5 %:n todennäköisyydellä. Lisäksi, koska elektrodipiiriä ei kytketä automaattisesti jännitteettömäksi maasulkutilanteissa, eikä henkilön pääsemistä irti jännitteellisestä osasta voida siten taata tietyn ajan kuluessa, on turvallisuusvaatimusten määrittämisessä käytetty 10 sekunnin vaikutusajan mukaisia kosketusvirran arvoja.

Työssä tehtyjen selvitysten perusteella elektrodipiirin mahdollisia vikaresistanssillisten maasulkujen aiheuttajia voisivat olla puiden kaatuminen elektrodijohdon päälle tai työkoneneen osuminen johtoon. Lisäksi työssä tutkittiin tilannetta, jossa maassa seisova ihminen koskettaisi suoraan elektrodijohtoa, esimerkiksi tilanteessa, jossa elektrodipiirin pylväitä olisi päässyt kallistumaan tai ihminen koskettaisi johtoa pieniresistanssillisen esineen avulla. Saatujen tulosten perusteella elektrodipiirin johdon päälle kaatunut puu ei aiheuta kouristusrajavirtaa suurempien kosketusvirtojen kulkemista ihmisen kehon läpi, kun ihminen koskettaa johdolle nojaavaa puuta. Ihmisen suora kosketus tai työkoneneen osuminen elektrodijohtoon aiheuttavat Suomen maaperän keskimääräistä resistiivisyyttä pienemmällä maan ominaisvastusten arvoilla 5 %:n todennäköisyyden sydänkammiovärinärajan ylittymisen, kun vika tapahtuu tilanteen kannalta pahimmalla sijainnilla ja elektrodipiirissä kulkee maksimipaluvirta. Toisaalta myös kouristusraja ylittyy näissä vikatilanteissa kaikilla maan resistiivisyyksien arvoilla. Tilannetta on tarkasteltu vikapaikan sijainnin ja siirtotilanteen kannalta pahimman skenaarion mukaisesti, mutta todellisuudessa yhteyttä käytetään pääpiirin vika- ja huoltotilanteita lukuun ottamatta bipolaarisesti, joten todennäköisyyttä pahimman skenaarion toteutumiseen voidaan pitää pienenä. Tulosten perusteella kyseiset vikatilanteet eivät aiheuta kouristusrajan ylittymistä bipolaarisessa käyttötilanteessa.

Työn toisen osan tavoitteina oli tutkia, minkälaisten vikatilanteiden havaitsemiseen nykyinen valvontamenetelmä soveltuu ja minkälaisilla toimenpiteillä nykyisen valvontamenetelmän toimintaa, ja siten luotettavuutta, olisi mahdollista parantaa. Lisäksi tavoitteina

oli tutkia, minkälaisilla vaihtoehtoisilla menetelmillä elektrodipiirin valvonta voitaisiin toteuttaa, ja mitä arvoa nämä menetelmät toisivat nykyiseen valvontamenetelmään nähden. Työn tulosten perusteella nykyinen valvontajärjestelmä ei kykene luotettavasti havaitsemaan suuriresistanssisia maasulkuja, kuten puiden kaatumista elektrodipiirin päälle, mutta elektrodipiirin toisen virtapiirin katkeaminen on mahdollista havaita, mikäli elektrodipiirissä kulkee virtaa.

Elektrodipiirin vikatilanteiden havaitseminen on vaikeaa monista syistä. Ensinnäkin elektrodipiirin jännite pienenee elektrodi kohden, jolloin vikavirrat jäävät sitä pienemmiksi mitä lähempänä vika sijaitsee elektrodi. Koska Fenno-Skan-yhteyttä käytetään normaalisti bipolaarisesti, on elektrodipiirissä kulkeva kokonaisvirta pääpiirien vika- ja huoltotilanteita lukuun ottamatta hyvin pieni. Erityisesti näistä syistä johtuen vikojen havaitsemista on hankala perustaa virta- ja jännitemittauksiin. Elektrodipiirin nykyisen valvontajärjestelmän toiminta perustuu elektrodipiirin kokonaisvirran ja elektrodipiirin virtapiirien erovirran mittaamiseen. Järjestelmä antaa hälytyksen, kun erovirran itseisarvon ja vakioluvulla kerrotun kokonaisvirran itseisarvon erotus ylittää järjestelmään asetetun arvon.

Koska nykyinen valvontajärjestelmä tarkkailee elektrodipiirin kokonaisvirran ja erovirran mittaustulosten erotusta, ja hälytysraja on sama riippumatta elektrodipiirin kokonaisvirrasta, hälytysraja on suhteellisesti suurempi elektrodipiirin pienemmille kokonaisvirroille. Siten nykyisen valvontajärjestelmän toimintaa voitaisiin muuttaa siten, että järjestelmä tarkkailisi elektrodipiirin erovirran ja kokonaisvirran suhdetta. Tällä tavalla järjestelmän tarkkailema arvo muuttuu yhtä paljon saman suuruusella vikaresistanssilla riippumatta elektrodipiirin kokonaisvirrasta. Myös hälytysrajan laskeminen mahdollistaisi hälytyksen antamisen pienemmillä erovirran muutoksilla, jolloin nykyinen valvontajärjestelmä voisi havaita nykyistä suurempiresistanssisia vikoja. Järjestelmän vertailun muuttamisella tai hälytysrajan laskemisella ei kuitenkaan kyetä havaitsemaan tämän työn olettamien mukaisesti laskettuja puiden tai työkoneen aiheuttamia vikoja.

Elektrodipiirin valvontamenetelmistä tehtyjen tutkimusten ja julkaisujen perusteella ainakin kulkuaalto-, erovirta- ja differentiaalimittaukseen sekä korkeataajuisen virran syöttämiseen perustuvien menetelmien soveltuvuutta elektrodipiirin valvontamenetelmäksi on tutkittu aiemmin. Erovirran mittauksen lisäksi differentiaalista mittausta tutkittiin tässä työssä tarkemmin PSCAD-simuloinneilla, ja työn tulosten perusteella esimerkiksi puiden tai työkoneiden aiheuttamia maasulkuja ei voida havaita kyseisellä mittausmenetelmällä. Tulosten perusteella nykyisen valvontamenetelmän toimintaperiaatteen muutoksella kyetään havaitsemaan suurempiresistanssisia maasulkuja kuin differentiaalisella mittauksella, eikä muutoksen toteuttaminen vaadi yhtä suuria investointeja, joten differentiaalisen mittausmenetelmän ei voida katsoa tuovan lisäarvoa nykyiseen menetelmään nähden.

Lähdeaineiston huonon saatavuuden vuoksi kulkuaaltomittauksen ja korkeataajuisen signaalin syöttämiseen perustuvien menetelmien simuloinneissa käytettävien parametrien

määrittäminen osoittautui hankalaksi, ja siten näiden menetelmien osalta ei saatu varmuutta menetelmien soveltuvuuksista Fenno-Skan-yhteyden elektrodipiirin valvontamenetelmiksi. Koska myös nykyisen valvontamenetelmän ja differentiaaliseen suojaukseen perustuvan menetelmän osalta todettiin, ettei kyseisillä menetelmillä kyetä havaitsemaan esimerkiksi puiden tai työkoneiden aiheuttamia vikatilanteita, tulisi elektrodipiirin valvontaan soveltuvien menetelmien tutkimiseen kohdistaa jatkotoimenpiteitä etenkin, mikäli elektrodipiirin valvontajärjestelmälle katsotaan tulevaisuudessa tarpeelliseksi tehdä muutoksia ja mikäli esimerkiksi johdon päälle kaatuneet puut toivottaisiin havaittavan.

Mikäli valvontamenetelmään ei tehdä muutoksia, yhtenä vaihtoehtona etenkin puuvika-tilanteiden välttämiseksi voisi olla elektrodipiirin johtoalueen leventäminen väleillä Torna-Pyhäranta ja Pyhämaa-Lautakari. Näiden johto-osuuksien pituus on yhteensä noin 9 kilometriä. Johtoalueen leventämisellä elektrodipiiri saataisiin Rauma-Rihtniemi-välin tavoin kokonaan puuvarmaksi. Toinen vaihtoehto puuvarmuuden saavuttamiseksi olisi muuttaa elektrodipiirin rakennetta kaivamalla elektrodijohto Torna-Pyhäranta ja Pyhämaa-Lautakari väleillä maan alle tai vaihtoehtoisesti purkamalla Torna-Lautakari välin elektrodipiiri ja asentamalla merikaapeli Rihtniemestä elektrodille. Mikäli elektrodipiirin rakenteen muuttamista tai johtoalueen leventämistä ei voida pitää kokonaistaloudellisesti järkevänä, olisi elektrodipiiri syytä partioida aina etenkin myrskyjen ja runsaan tykkylumen satamisen jälkeen.

Jotta tämän työn tuloksista ja elektrodipiirin turvallisuudesta saataisiin suurempi varmuus, tulisi elektrodipiirin ympäristössä tehdä maaperän resistiivisyyden mittauksia. Maaperän resistiivisyys vaikuttaa merkittävästi maadoitusresistanssin suuruuteen ja siten myös esimerkiksi maasulkuvirran suuruuteen. Kun maaperän resistiivisyys tunnetaan, saadaan suurempi varmuus todellisissa vikatilanteissa esiintyvistä vaarajännitteistä.

## LÄHTEET

- [1] Suomen sähköjärjestelmä, Fingrid Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.2.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/>.
- [2] Fingridin sähkönsiirtoverkko, Fingrid Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.2.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>.
- [3] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot I, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta, Otatieto, Helsinki, 2011, 520 s.
- [4] Fenno-Skan: Fenno-Skan reduces the electrical distance between major generation and load areas in Finland and Sweden from 1,500 km to 200 km, ABB AB, web page. Available (accessed 16.1.2018): <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/fenno-skan>.
- [5] EstLink 2 - toinen tasasähköyhteys Suomen ja Viron välillä, Fingrid Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 15.1.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suunnittelu-ja-rakentaminen/rajayhteydet/estlink-2/>.
- [6] Fingrid ja Elering Estlink 1 -sähkökaapelin uusiksi omistajiksi, Fingrid Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.1.2018): <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2013/fingrid-ja-elering-estlink-1--sahkokaapelin-uusiksi-omistajiksi/>.
- [7] T.D. Ingemansson, T. Kiiveri, H. Nurminen, B.L. Pääjärvi, K. Danielsson, New Fenno-Skan 2 HVDC pole with an upgrade of the existing Fenno-Skan 1 pole, Session Papers & Proceedings B4-105, CIGRE, Paris, 2012, 10 p.
- [8] Fingridin sähköverkko ArcGIS-karttatietojärjestelmässä, Fingrid Oyj, ArcGIS-karttatietojärjestelmä, rajoitettu saatavuus.
- [9] Fingridin tasasähköyhteyksien tekniset tiedot, Fingrid Oyj, Maximo-omaisuustietojärjestelmä, rajoitettu saatavuus.
- [10] Ahvenanmaan ja Manner-Suomen välinen merikaapeliyhteys Ål-Link on käytössä, Fingrid Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.7.2018): <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2015/ahvenanmaan-ja-manner-suomen-valinen-merikaapeliyhteys-al-link-on-kaytossa/>.
- [11] EstLink, ABB AB, web page. Available (accessed 15.1.2018): <http://new.abb.com/systems/hvdc/references/estlink>.
- [12] Energiavirasto, Kertomus sähkön toimitusvarmuudesta 2014, 2014, s. 1-32. Saatavissa (viitattu 6.3.2018): <https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Kertomus+s%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuudesta+2014.pdf/ae2495e4-fd42-4c06-a4f4-f26859a8acda>.

- [13] Fenno-Skan 1 -kaapelin tutkimusten tilanne, Fingrid Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.3.2018): <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2013/fenno-skan-1--kaapelin-tutkimusten-tilanne/>.
- [14] Siemens, High Voltage Direct Current Transmission - Proven Technology for Power Exchange, 2011, pp. 1-48. Available (accessed 28.12.2017): [https://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC\\_Proven\\_Technology.pdf](https://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology.pdf).
- [15] H. Nurminen, T. Rauhala, HVDC-yhteyksien viat ja häiriöt 2017, Fingrid Oyj, PowerPoint-tiedosto, rajoitettu saatavuus, 2018, 13 s.
- [16] Elektrodiviat, Fingrid Oyj, Excel-tiedosto, rajoitettu saatavuus.
- [17] Fenno-Skan 2 -projektin materiaali, Fingrid Oyj, rajoitettu saatavuus.
- [18] Elektrodijohdon projektikansio, Fingrid Oyj, 1989, rajoitettu saatavuus.
- [19] Fenno-Skan HVDC-yhteys: Asemadokumentaatio, elektrodijohdon valvontajärjestelmä, ABB Power Systems, 1989, rajoitettu saatavuus.
- [20] Mach2 Measuring System, ABB AB, PowerPoint-esitys, rajoitettu saatavuus, 19 s.
- [21] SFS-EN 50341-1, Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt = Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV. Part 1: General requirements. Common specifications, Suomen Standardisoimisliitto SFS, SESKO ry, Helsinki, 2014.
- [22] SFS-EN 50341-2-7, Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteillä. Osa 2-7 Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt = Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV. Part - 2-7: National Normative Aspects (NNA) for FINLAND, Suomen Standardisoimisliitto SFS, SESKO ry, Helsinki, 2015.
- [23] SFS 6001, Suurjännitesähköasennukset = High-voltage electrical installation, Suomen Standardisoimisliitto SFS, SESKO ry, Helsinki, 2015.
- [24] IEC/TS 60479-1, Technical Specification, Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects, IEC, Switzerland, 2005.
- [25] E.W. Kimbark, Direct Current Transmission Volume I, Wiley-Interscience, United States of America, 1971.
- [26] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Standards Association, New York, United States of America, 2013, 210 p.
- [27] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot II, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, Otatieto, Helsinki, 2011, 551 s.
- [28] M. Suuronen, Maadoituksen mittaustapojen soveltuvuuden arviointi, tutkintotyö, Tampereen Ammattikorkeakoulu, Tampere, 2006, 69 s.

- [29] Maadoitusresistanssi: Periaatteet, testausmenetelmät ja sovellukset, FLUKE Finland Oy, Vantaa, 2017, 16 s. Saatavissa: [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902801\\_FIN\\_A\\_W.PDF](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902801_FIN_A_W.PDF).
- [30] AIEE Committee Report, Voltage Gradients Through the Ground Under Fault Condition, 1958.
- [31] C.F. Dalziel, Dangerous Electric Currents, Electrical Engineering, Vol. 65, Iss. 8-9, 1946, pp. 579-584.
- [32] Electoride Review, Confirmation of Type and Site Selection, Final Report. Appendix F, Electrode Line Fault Detection and Protection. HATCH, 2010, 1-319 p.
- [33] X. Peng, Y. Jiang, Research on the Fault Location Principle for the Earthing Electrode Line of the UHVDC Transmission System, Scientific Research, Energy and Power Engineering, 2013, pp. 1198-1201.
- [34] A. Hermansson, Simulation of line fault locator on HVDC Light electrode line, Bachelor's Thesis, University West, Department of Engineering Science, Trollhättan, 2010, 34 p. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:344138/FULLTEXT01.pdf>.
- [35] J. Mörsky, Relesuojaustekniikka, Otatieto, 1992, 459 s.
- [36] Y. Kato, A. Watanabe, H. Konishi, T. Kawai, Y. Inoue, H. Irokawa, Neutral Line Protection System for HVDC Transmission, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, Iss. 3, 1986, pp. 326-331.
- [37] P. Pakonen, Detection of Incipient Tree Faults on High Voltage Covered Conductor Lines, dissertation, Tampere University of Technology, Publication 681, 2007, 238 p.
- [38] S.V. Glass, S.L. Zelinka, Moisture Relations and Physical Properties of Wood, Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, United States of America, 2010, 19 p.
- [39] Kuparijohtimien tasavirtaresistanssi, Reka Kaapeli Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.5.2018): <https://www.reka.fi/kaapelitietoa/kaapeleiden-tekniset-tiedot/johtimien-tasavirtaresistanssit/kuparijohtimien>.
- [40] Fenno-Skan-yhteyden PSCAD-simulointimalli, Fingrid Oyj, rajoitettu saatavuus.