

Suurjännitteisen tasasähköyhteyden johtovian paikannus

Sallamaria Iltanen

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 14.3.2016.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:

DI Jussi Rantanen

Tekijä: Sallamaria Iltanen		
Työn nimi: Suurjännitteisen tasasähköyhteyden johtovian paikannus		
Päivämäärä: 14.3.2016	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 8+66
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professuuri: Sähköverkot ja suurjännitetekniikka		
Työn valvoja: Prof. Matti Lehtonen		
Työn ohjaaja: DI Jussi Rantanen		
<p>Tasasähköyhteydet ovat voimajärjestelmän tärkeitä osia, sillä niillä siirretään suuria tehoja yleensä pitkiä välimatkoja. Koska yhteyksien vikaantuminen häiritsee sähkömarkkinoiden toimintaa ja hankaloittaa voimajärjestelmän käyttöä, halutaan vianpaikannusmenetelmiä parantaa korjaamisen nopeuttamiseksi.</p> <p>Nykyisin Fingridissä käytössä olevilla vianpaikannusmenetelmillä vikapaikan toteaminen on aikaavievää, eikä ohimeneviä vikoja onnistuta nykyisin menetelmin yleensä lainkaan paikantamaan. Tällöin vikapaikan etsimiseen hukataan runsaasti aikaa. Pysyvien vikojen paikantamiseen käytettävät menetelmät ovat tarkkoja, mutta vian paikantaminen niiden avulla on aikaavievää.</p> <p>Työssä tutkitaan nykyisten vianpaikannusmenetelmien tarkkuutta referenssimittausten ja toteutuneen vianpaikannuksen avulla ja verrataan sitä uusien online-tyyppisesti yhteyttä tarkkailevien vianpaikannusjärjestelmien tarkkuuteen. Online-järjestelmien vianpaikannuksen soveltuvuutta työssä käsiteltäville tasasähköyhteyksille ja erityyppisten vikojen paikantamiseen arvioidaan. Tärkeänä arvioinnin kohteena on myös vianpaikannuksen nopeutuminen online-järjestelmän käytön avulla.</p> <p>Johtopäätöksenä voidaan todeta online-vianpaikannusjärjestelmän nopeuttavan vianpaikannusta merkittävästi, kun järjestelmä on asennettu ja kalibroitu yhteydelle sopivaksi. Vianpaikannuksen tarkkuus paranee merkittävästi avojohtovikojen tapauksessa ja valmistajilta saatujen tietojen mukaan hyvä tarkkuus saadaan myös kaapelivian tapauksessa.</p>		
Avainsanat: HVDC, tasasähkö, avojohto, kaapeli, vianpaikannus, kulkuaalto, TDR-mittaus, sormenjälkimittaus, online-vianpaikannus		

Author: Sallamaria Iltanen

Title: Fault Location on High Voltage Direct Current Interconnections

Date: 14.3.2016

Language: Finnish

Number of pages: 8+66

Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: Power systems and High Voltage Engineering

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

Advisor: M.Sc. (Tech.) Jussi Rantanen

HVDC interconnections are important part of power transmission in power grids as they are used to transmit large amount of power and usually for long distances. Faults on interconnections disturb the electricity markets and complicate the usage of the power system. In order to minimize these disturbances faster fault location methods are needed.

The currently used fault location methods in Fingrid need a lot of time for discovering the fault location and commonly can not detect temporary faults at all, leading a lot of time to be consumed with no fault location results. For permanent faults, the current methods are accurate but time-consuming.

In the thesis, the accuracy of the currently used fault location methods is studied through fingerprint reference measurements and by comparing the previous fault locating results. The accuracy of the currently used fault location methods is compared with the accuracy given to the new online fault locating systems. Also the online systems' suitability to locate different types of faults on the interconnections is considered. The ability to speed up the fault location process is also estimated. In conclusion it can be said that the online system will speed up the fault locating process significantly, when installed and calibrated for the interconnection. The accuracy of the fault location on overhead lines will improve significantly and according to the manufacturers good accuracy is achieved also in cable fault location with an online system.

Keywords: HVDC, interconnection, overheadline, cable, fault location, travelling wave, TDR-measurement, fingerprint, online fault location

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:ssä opinnäytteeksi Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoululle.

Kiitos ohjaajalleni DI Jussi Rantaselle kannustavasta ohjauksesta ja kommenteista, sekä mielenkiintoisista keskusteluista vianpaikannukseen liittyen. Kiitokset myös työn valvojalle, professori Matti Lehtoselle, kommenteista ja ohjeista.

Työn ohjausryhmään Fingridissä kuuluivat ohjaajan lisäksi Jarmo Elovaara, Liisa Haarla ja Tuomas Rauhala. Suuri kiitos koko ohjausryhmälle kommenteista ja keskusteluista työn edetessä. Ohjausryhmän lisäksi kiitän muita HVDC-tiimin jäseniä, jotka ovat auttaneet erityisesti vianselvityksen toimintamalliin ja häiriötallentimen tietojen käyttöön liittyvissä kysymyksissä. Työn yhteydessä suoritettuihin mittauksiin liittyen haluan kiittää myös Rainer Lummetta.

Melkein kahdeksan vuotta kestänyt uurastus diplomi-insinöörin tutkintoa varten on nyt päättymässä. Olen opintojen aikana saanut hyviä ystäviä, joiden vertaistuen avulla vaikeistakin kurseista on selvitty, vaikei sitä aina olisi uskonut. Erityiskiitos smurffeille, kaveriporukalle, joka lähti muovautumaan jo Varaslähdössä. Ison kiitoksen saa myös perheeni, joka ensin potki minut opiskelemaan ja on sisäänpääsyn jälkeen ollut tukenani ja kannustanut eteenpäin koko opintojeni ajan.

Käpylässä 7.3.2016

Sallamaria Iltanen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	2
1.3 Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj	2
1.4 Diplomityön rakenne	4
2 Rajayhdysjohtojen merkitys voimajärjestelmälle	5
2.1 Voimansiirto kantaverkossa ja rajayhdysjohdoilla	5
2.2 Siirtojen hallinta	5
3 Kantaverkkoon liittyvät suurjännitteiset tasasähköyhteydet	7
3.1 Suurjännitteisten tasasähköyhteyksien esittely	7
3.2 Tasasähköyhteyksien toiminta	11
3.3 Yleiset tasasähköyhteyksillä esiintyvät viat	12
3.4 Vianselvityksen toimintamalli	13
4 Vianpaikannus nykyisin offline-menetelmin	15
4.1 Yleistä	15
4.2 Kulkuaallot ja aaltoimpedanssi	15
4.3 Kulkuaaltojen heijastuminen johdoilla	16
4.4 Vikapaikan laskenta TDR-mittauksen avulla	20
4.5 TDR-mittalaitteiden esittely	23
4.6 Vikapaikan laskenta häiriötallentimen tiedoista	26
4.6.1 Laskennan periaate	26
4.6.2 Laskennan tarkkuus	28
5 Ehjien kaapeleiden referenssimittaukset ja toteutuneet vianpaikannukset	31
5.1 Ehjän kaapelin TDR-mittaukset Fenno-Skan-yhteyksillä	31
5.1.1 Mittausmenettely	31
5.1.2 Mittausten tarkkuuden arviointi	34
5.2 Ehjän kaapelin TDR-mittaus EstLink 1 -yhteydellä	35
5.3 Ehjän kaapelin TDR-mittaus EstLink 2 -yhteydellä	37
5.4 Toteutuneet vianpaikannukset	39

6	Vianpaikannus uusilla online-vianpaikannusjärjestelmillä	41
6.1	Yleistä	41
6.2	Vertailtavien vianpaikannusjärjestelmien esittely	41
6.2.1	ABB	41
6.2.2	Highvolt	43
6.2.3	Manitoba	44
6.3	Vianpaikannus synkronoituun aikaleimaan perustuen	45
6.4	Vianpaikannus ilman synkronoitua aikaleimaa	47
6.5	Vikatietojen tallennus	48
6.6	Esimerkki: vianpaikannusjärjestelmän mittauspisteet Fenno-Skan 2 -yhteydellä	50
6.7	Asennus ja käyttöikä	51
7	Johtopäätökset	53
7.1	Nykyisen vianpaikannuksen tarkkuus	53
7.2	Online-vianpaikannusjärjestelmästä saatavat edut vianpaikannukseen	54
7.3	Online-vianpaikannusjärjestelmän vaatimukset ja soveltuvuus työssä käsitellyille tasasähköyhteyksille	55
8	Yhteenveto	59
	Lähdeluettelo	60
A	Häiriötallentimen tiedoista lasketun vikapaikan yhtälön johto	63
B	Vikapaikan laskeminen erittelyn avulla häiriötallentimen tiedoista	64

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

a_j	johto-osuus: avojohdo
c	valon nopeus tyhjiössä
c	kapasitanssi pituutta kohti
D	vikapaikan etäisyys mittauspisteestä A
h_{johdin}	johtimen korkeus maanpinnasta
i_1	saapuvan aallon virta
i_{1r}	heijastuvan aallon virta
i_2	jatkavan aallon virta
k	johto-osuus: kaapeli
l	induktanssi pituutta kohti
l_A	vikapaikan etäisyys mittauspisteestä A
l_B	vikapaikan etäisyys mittauspisteestä B
$l_{B A, a_j}$	vikapaikan etäisyys mittauspisteestä B mittauspisteen A puoleisella avojohdolla
L	johdon pituus
t_A	kulkuaalitorintaman saapumisaika mittauspisteeseen A
t_{a_j}	signaalilla avojohdon päästä päähän kulkemiseen kuluva aika
t_k	signaalilla kaapelin päästä päähän kulkemiseen kuluva aika
t_B	kulkuaalitorintaman saapumisaika mittauspisteeseen B
Δt_a	aikavirhe mitattuna huipun kohdalta
Δt_b	aikavirhe mitattuna aallon alusta
t_{johto}	signaalilla edestakaiseen matkaan johdolla kuluva aika
u_1	saapuvan aallon jännite
u_{1r}	heijastuvan aallon jännite
u_2	jatkavan aallon jännite
Z_0	häviöttömän johdon aaltoimpedanssi
Z_1	impedanssi johdon alkupuolella
Z_2	impedanssi johdon loppupuolella
Z_{w, a_j}	häviöllisen avojohdon johtimen aaltoimpedanssi
$Z_{w, k}$	häviöllisen kaapelin aaltoimpedanssi
R_f	vikaresistanssi
r_{johdin}	johtimen säde
r_{vaippa}	vaipan sisäsäde
u_{trigger}	mittauksen laukaisujännite
v	kulkuaallon etenemisnopeus
ε	permittiivisyys
ε_0	tyhjiön permittiivisyys
μ	permeabiliteetti
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
ρ_u	jänniteaallon heijastuskerroin

Lyhenteet

AC	<i>alternating current</i> , vaihtosähkö
aj	avojohto
<i>back-to-back</i>	tasasähköyhteys, jossa tasa- ja vaihtosuuntaajat sijaitsevat samalla asemalla ja ne on yhdistetty sähköisellä yhteydellä
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i> , kansainvälinen suuriin sähköjärjestelmiin keskittynyt järjestö
DC	<i>direct current</i> , tasasähkö
dcLFL	<i>direct current line fault locator</i> , Manitoban online-vianpaikannusjärjestelmä
ENTSO-E	<i>European Network of Transmission System Operators of Electricity</i> , eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö
GPS	<i>Global Positioning System</i> , maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä
HV	<i>high voltage</i> , suurjännite
HVDC	<i>high voltage direct current</i> , suurjännitteinen tasasähkö
IGBT	<i>insulated gate bipolar transistor</i> , hilaeristetty bipolaaritransistori
k	kaapeli
LFL/CFL	<i>line/cable fault locator</i> , ABB:n online-vianpaikannusjärjestelmä
LCC	<i>line commutated converter</i> , verkkokommutoiva suuntaaja
MI IRC	<i>mass impregnated, integrated return conductor</i> , massakyllästeinen sisäisen paluujohtimen omaava
MIND	<i>mass impregnated non-draining</i> , massakyllästeinen valumaton
offline-järjestelmä	manuaalisia työvaiheita vaativa vianpaikannusjärjestelmä
online-järjestelmä	automatisoidusti toimiva vianpaikannusjärjestelmä
PE	<i>polyethylene</i> , polyeteeni
PLC	<i>power line carrier</i> , kantoaaltoyhteyttä käyttävä suojausjärjestelmä
PSCAD™	<i>Power Systems Computer Aided Design</i> , elektromagneettisten transienttien simulointiohjelma
PVC	<i>polyvinyl chloride</i> , polyvinyylidikloridi
TDR	<i>time-domain reflectometer</i> , aikatason heijastusmittaus
VSC	<i>voltage source converter</i> , jännitelähdesuuntaaja
XLPE	<i>cross-linked polyethylene</i> , ristisilloitettu polyeteeni

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Rajayhdysjohtojen rajallisesta kapasiteetista johtuen sähkön hinta Suomessa on viime vuosina ollut korkeimpien joukossa muihin pohjoismaisten sähkömarkkinoiden hinta-alueisiin verrattuna. Sähköntuontiriippuvaisuudesta johtuen Suomen rajayhdysjohtojen luotettava toiminta on erittäin tärkeää. Suomen kantaverkon käytöstä, kehittämisestä ja ylläpidosta vastaa Fingrid Oyj (myöhemmin Fingrid). Fingridin strategiaan hankkeisiin on kuulunut vuodesta 2013 asti rajasiirtoyhteyksien eli rajayhdysjohtojen luotettavuuden parantaminen, mikä on myös tämän diplomityön teettämisen taustalla. [1]

Sähkömarkkinoiden toimivuuden varmistamiseksi rajayhdysjohtoihin kuuluvien tasasähkömerikaapeliyhteyksien käytettävyyden tulee olla korkealla tasolla. Sähkön tuontia Ruotsista Suomeen ovat ajoittain rajoittaneet Fenno-Skan-merikaapeliyhteyksien vikaantumiset. Fenno-Skan 1 -yhteyden merikaapelilla on ilmennyt vikoja, joista viimeisin todennäköisesti ikääntymisen seurauksena. Todennäköisestä ikääntymisestä johtuen yhteyden siirtokapasiteettia on rajoitettu. Johtovian ilmetessä tasasähköyhteydellä sähkönsiirto kyseisellä yhteydellä keskeytyy. Keskeytysajan minimoimiseksi vian paikantaminen nopeasti karkealla tasolla yhteyden asemille, avojohto- tai kaapeliosuuksille on tärkeää. Tarkempaa vianpaikannusta ja korjaustoimenpiteitä aletaan suorittaa karkean tason vianmäärityksen perusteella.

Kaikkia Fenno-Skan-yhteyksillä sattuneita vikoja ei ole nykyisillä offline-tyyppisillä menetelmillä onnistuttu paikantamaan eikä vian aiheuttajaa löytämään. Jotta myös itsestään ohimenevät viat saataisiin tulevaisuudessa paikannettua, Fingridin on tarkoitus hankkia online-tyyppisesti toimiva käytönaikainen vianpaikannusjärjestelmä. Tämä järjestelmä nopeuttaa karkean tason vianpaikannusta, oikeiden korjaustoimenpiteiden aloittamista sekä tarkempaa vianpaikannusta kaapeli- ja avojohto-osuuksilla.

Johtovian tapauksessa ensimmäinen karkea vianpaikannus tapahtuu nykyisin avoimen yhteyden jännitekokeiden avulla. Vikapaikan etsintä avojohdoilla jatkuu vianetsintäpartioiden suorittamana silmämääräisenä tarkastuksena. Kaapelivian tapauksessa vianpaikannusta jatketaan kaapelipäätteeltä tutkaamalla kaapeli erillisellä kulkuaaltojen heijastusta analysoivalla kaapelitutkalla. Uudet online-tyyppiset järjestelmät perustuvat vian aiheuttamien kulkuaaltojen analysointiin vikahetkellä, jolloin järjestelmä pystyy nopeasti kertomaan vikapaikan suhteellisen tarkasti. Nykyisellä tavalla näihin karkean tason vianpaikannuksiin kuluva aika mitataan tunneissa. Uuden järjestelmän avulla tieto voitaisiin saada jo ensimmäisten minuuttien aikana, jolloin nykyisinkin tutkitaan asemalaitteiden keräämien häiriötallentimien dataa. [2]

Työssä käsiteltävät uudet vianpaikannusmenetelmät perustuvat pääosin kulkuaaltojen analysointiin. Myös muihin tekniikoihin perustuvia vianpaikannusmenetelmiä on kehitteillä, joita hyödyntämällä voitaisiin saada tasasähköyhteyksillä esiintyvistä vioista tarkempaa tietoa. Esimerkiksi optisella kuidulla tehtävien erilaisten mitausten käyttöön perustuvia vianpaikannusjärjestelmiä on kehitteillä. Tanskalaisessa tutkimuksessa [3] kehitetään kaapelin vieressä olevaa optista kuitua tarkkailevaa järjestelmää, jossa vianpaikannus perustuu äänivärähtelyiden kuunteluun tai

mekaanisen iskun aiheuttamien värähtelyiden aiheuttamien muutosten tulkitsemiseen kuidussa kulkevassa laser-signaalissa. Samalla työryhmällä on kehitteillä myös laivojen paikannetietoja analysoiva ohjelma, jolla voidaan vianpaikannuksesta erillisenä tietona havaita laivojen liikkeitä, jotka voivat viitata kaapeliin kiinni juuttumiseen.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Diplomityön tavoitteena on arvioida vertailemalla eri vianpaikannusjärjestelmien soveltuvuutta suurjännitteisille tasasähköyhteyksille. Työssä arvioidaan vianpaikannusjärjestelmien soveltuvuutta erityisesti merikaapeleina toteutettujen tasasähköyhteyksien johto-osuuksilla. Vertailtavat vianpaikannusjärjestelmät valikoituivat diplomityön ulkopuolisen hankinnan valmistelun perusteella. Tavoitellun järjestelmän tulisi mahdollisimman nopeasti ja tarkasti kertoa vian sijainti, jotta tarvittavat tarkastus- ja korjaustoimenpiteet voidaan aloittaa mahdollisimman pian. Nopean toiminnan saavuttamiseksi järjestelmän tulisi olla jatkuvasti mittausvalmiudessa ja paikantaa vika sen tapahduttua. Järjestelmiä ja niiden soveltuvuutta Fingridin käyttöön verrataan diplomityössä ensisijaisesti teknisten ominaisuuksien kannalta. Näitä tavoitteita tukevat seuraavat tutkimuskysymykset:

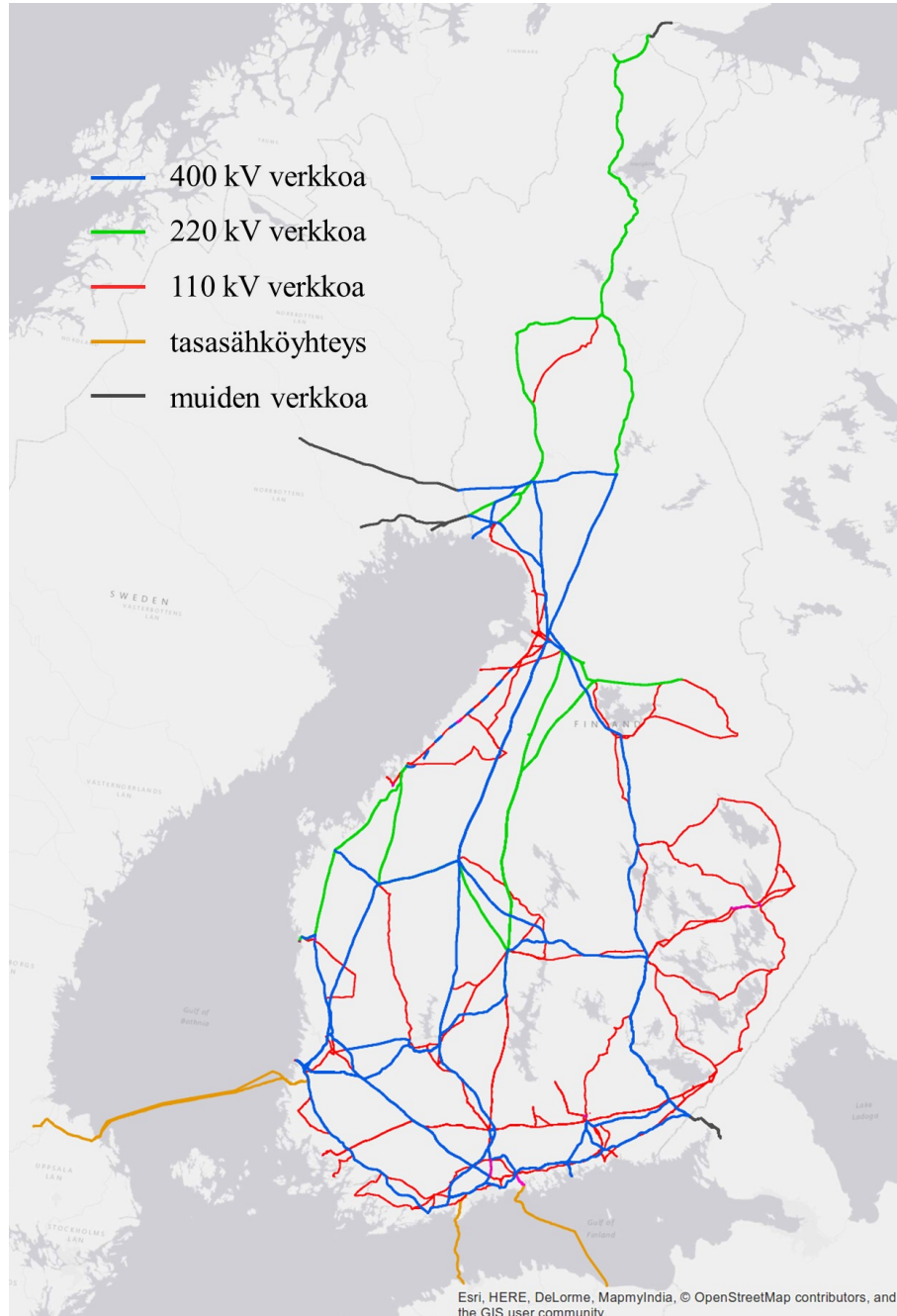
- Kuinka kaapelivika voidaan paikantaa nopeasti?
- Miten perinteiset offline- ja uudet online-vianpaikannusjärjestelmät eroavat tekniseltä suorituskyvyltään?
- Minkä tyyppisiä vikoja online-vianpaikannusjärjestelmillä voidaan paikantaa?
- Miten tarkasteltavien online-vianpaikannusjärjestelmien toiminnot eroavat toisistaan?
- Mikä tarkastelluista järjestelmistä antaa parhaan vianpaikannustuloksen tarkastelluilla tasasähköyhteyksillä?

Tässä työssä offline-vianpaikannusjärjestelmällä tarkoitetaan perinteisesti käytettyjä vianpaikannusmenetelmiä, jotka vaativat manuaalisia työvaiheita joko tietojen analysoimiseksi tai keräämiseksi. Tällöin vian paikantaminen tapahtuu selkeästi vian ilmenemisen jälkeen. Online-vianpaikannusjärjestelmillä tarkoitetaan automatisoitua järjestelmää, joka kerää ja analysoi vikatiedot vian ilmettyä.

1.3 Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj

Fingrid on Suomen sähkönsiirrosta vastaava yhtiö, joka vastaa sähkönsiirron käyttövarmuudesta ja kehittää Suomen sähkönsiirron kantaverkkoa. Kantaverkossa siirretään sähköä suurilta voimalaitoksilta tehtaalle ja alueverkkoihin Suomen sisäisesti. Fingrid vastaa Suomen kantaverkkoon kytkettyjen rajayhdysjohdojen käyttövarmuudesta ja kehittämisestä yhdessä yhteyksien vasta-asetusten omistavien yhtiöiden kanssa. Rajayhdysjohdoilla Suomen kantaverkko on liitetty pohjoismaiseen yhteiskäyttöverkkoon sekä Viron ja Venäjän sähkönsiirtoverkkoihin.

Kuvassa 1 on esitetty Suomen kantaverkko sekä siihen liittyvät rajayhdysjohdot. Kantaverkkoon kuuluu noin 14 000 km voimajohtoa ja yli 110 sähköasemaa. Kanta-verkon lisäksi Fingrid omistaa 18,8 prosenttia pohjoismaisesta Nord Pool Spot Ab -sähköpörssistä sekä yhdessä Svenska Kraftnätin ja norjalaisen Statnettin kanssa tasepalveluyhtiö eSettin. [1]



Kuva 1: Fingrid Oyj:n voimansiirtoverkko ja rajayhdysjohdot. [4]

Fingridin tehtäviin kuuluu huolehtia tuotannon ja kulutuksen liittämisestä verkkoon, suunnitella, ylläpitää ja kehittää kantaverkkoa, suunnitella ja valvoa

kantaverkon käyttöä sekä tukea ja kehittää sähkömarkkinoiden toimintaa. Fingrid osallistuu myös eurooppalaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö ENTSO-E:n toimintaan ja eurooppalaisten verkkosääntöjen laadintaan ja verkkosuunnitteluun. [1]

1.4 Diplomityön rakenne

Työssä esitellään tutkimuskohde ja sen liittyminen sähkövoimajärjestelmän kokonaisuuteen luvuissa 1 ja 2. Tutkimuskohteena ovat tasasähköyhteydet, niihin liittyviä erikoispiirteitä sekä tyypillisiä vikoja ja vianselvityksen toimintamalli on esitetty luvussa 3. Luvussa 4 on esitetty vianpaikannukseen liittyvä teoria ja nykyisin Fingridissä käytössä olevat vianpaikannusmenetelmät ja -laitteet. Luvussa 5 tarkastellaan nykyisen vianpaikannusmenetelmän tarkkuutta mittausten ja toteutuneiden vianpaikannuksien perusteella. Luvussa 6 esitellään online-vianpaikannusjärjestelmät ja niiden soveltaminen Fenno-Skan 2 -tasasähköyhteydelle. Johtopäätökset ja suositukset on esitetty luvussa 7 ja työn yhteenveto on luvussa 8.

2 Rajayhdysjohtojen merkitys voimajärjestelmälle

2.1 Voimansiirto kantaverkossa ja rajayhdysjohdoilla

Kantaverkko on runko Suomen rajojen sisäpuolella tapahtuvalle sähkönsiirrolle. Kantaverkon avulla Suomessa voidaan tehokkaasti siirtää sähköä tuotantolaitoksilta kulutusalueille, jolloin mahdollistetaan tuotannon sijoittaminen sille taloudellisimmalla alueella ja esimerkiksi Pohjois-Suomen vesivoimalla tuotetun sähkön kulutus eteläisemmässä Suomessa. Pienihäviöiset, kapasiteetiltaan riittävän suuret siirtoyhteydet mahdollistavat näin omalta osaltaan halvemman sähkön tarjoamisen asiakkaille.

Vuonna 1959 Suomi liittyi osaksi pohjoismaista Nordel-yhteiskäyttöverkkoa, jonka alueella olevien maiden kantaverkot ovat synkronisesti yhteydessä toisiinsa. Kantaverkkojen välisten vaihtosähköyhteyksien lisäksi yhteiskäyttöverkossa on kantaverkkojen välisiä tasasähköyhteyksiä ja yhteiskäyttöverkko on edelleen liitetty Keski-Euroopan sähköverkkoon tasasähköyhteyksin. [5]. Eri maiden kantaverkkojen väliset yhteydet mahdollistavat sähkönsiirron Etelä-Euroopasta Pohjoismaihin asti.

Suomen kantaverkko on liitetty pohjoismaiseen siirtoverkkoon kolmella vaihtosähköyhteydellä Pohjois-Suomen ja Pohjois-Ruotsin välillä sekä yhden pääosin varayhteytenä toimivan vaihtosähköyhteyden kautta Pohjois-Norjaan [5]. Näiden yhteyksien lisäksi Suomesta on neljä tasasähköyhteyttä, joista kaksi on Keski-Ruotsiin ja kaksi Viroon. Ruotsin ja Viron yhteydet ovat pohjoismaisten sähkömarkkinoiden vapaassa käytössä, tasasähköyhteydet koko tekniseltä kapasiteetiltaan ja vaihtosähköyhteydet 100 MW:n varmuusmarginaalia lukuun ottamatta [6].

Pohjoismaihin ja Viroon suuntautuvien yhteyksien lisäksi Fingridillä on kolme siirtoyhteyttä Venäjän siirtoverkkoon. Yhteyksistä kaksi on vaihtosähköyhteyksiä Suomen Yllikkälästä ja Kymistä Venäjän Viipuriin, jossa maiden vaihtosähköverkot on yhdistetty toisiinsa *back-to-back*-tasasähköyhteydellä. Kolmas yhteys on vaihtosähköyhteys Yllikkälästä suoraan Pietarin luoteispuolella sijaitsevalle maakaasupolttolaitokselle, niin kutsutulle Luoteislaitokselle. [5]. Suomen ja Venäjän välinen voimansiirto tapahtuu pääosin kahdenvälisen sopimusten perusteella ja osittain sähköpörssissä tehtyjen kauppojen perusteella [7]. Aiemmin yhteys on toiminut vain Venäjältä Suomeen päin, mutta joulukuussa 2014 myös sähkön vienti Suomesta Venäjälle tuli mahdolliseksi [8].

2.2 Siirtojen hallinta

Riittävän suurikapasiteettiset rajayhteydet mahdollistavat sähkömarkkinoiden toimimisen ja sitä kautta halvemman sähkön siirtämisen maasta toiseen. Suomessa sähkön tuotanto on ollut alijäämäistä viime vuodet ja tulee olemaan alijäämäinen ainakin vuoden 2018 loppuun, jolloin Olkiluoto 3 -ydinreaktorin arvioidaan valmistuvan [9]. Sähkönkulutuksen ollessa yleensä melko joustamatonta rajayhteyksien tulee olla riittävän suuret halvemman sähkön tuonnin mahdollistamiseksi. Markkinaehtoisesti tuotetun sähkön tuontitarve on suuri, eikä kantaverkon rajayhdysjohdoilla kapasiteetti ole riittänyt kaiken tämän sähkön siirtoon. Siirtorajoitus syntyy, mikäli markkinaehtoiselle sähkön siirrolle ei ole riittävän suurta kapasiteettia tarjolla.

Siirtorajoituksen syntyessä hinta-alueiden välille, näillä alueilla sähkön hinnat eriytyvät. Hintaero syntyy, kun siirtoa rajoittavan yhteyden kulutuspuolella sähköä joudutaan tuottamaan markkinaehtoisesti määräytynyttä sähkön hintaa kalliimman tarjouksen tehneillä tuotantolaitoksilla.

Kantaverkko-operaattorina Fingrid laskee ennusteen sähkön kulutukselle ja antaa kulloisenkin käyttötilanteen pohjalta siirtokapasiteetin markkinoiden käytettäväksi. Siirtokapasiteettiin vaikuttavat mm. siirtokeskeytykset verkossa ja käyttövarmuuden ylläpidon asettamat rajoitteet. Siirtotilannetta seurataan käyttötunnin aikana ja tarvittaessa ryhdytään sopeuttamaan käyttötilannetta. Siirtojen uhatessa ylittää niille annetun kapasiteetin, siirtoja pienennetään vastakauppojen avulla.

Nykyisin esiintyy usein verkon käyttötilanne, jossa sähkön tuonti Ruotsista Suomeen on suurta. Siirtojen ollessa suurimmillaan suurempikapasiteettisella Fennoskan 2 -yhteydellä voi tuonti olla 800 MW. Tällöin yhteyden vikaantuessa tulee Suomen puolella sähköntuotantoa kasvattaa nopeasti vastaamaan yhteydellä tuodun tehon määrää. Sähkön kulutus on suurinta Suomen eteläosissa, jolloin pohjoisesta tulevien siirtoyhteyksien kapasiteetti ei yleensä riitä kompensoimaan yhteyden vikaantumisen takia menetettyä tehoa, vaan voimalaitoksia on käynnistettävä lähempänä kulutusalueita Etelä-Suomessa. Erityisesti sähkönsiirron ollessa suurta rajayhdysjohdolla, sen vikaantumisesta aiheutuu suuria kustannuksia. Kustannukset ovat sekä välittömiä vianpaikannukseen ja -korjaukseen liittyviä, että välillisesti vikaantumisen kompensoinnista seuraavia kustannuksia.

3 Kantaverkkoon liittyvät suurjännitteiset tasasähköyhteydet

3.1 Suurjännitteisten tasasähköyhteyksien esittely

Tässä työssä keskitytään merikaapeleina toteutettujen suurjännitteisten tasasähköyhteyksien (HVDC, high voltage direct current) tarkasteluun ja niiden vianpaikannusjärjestelmiin. Suomen kantaverkossa on kaksi suurjännitteistä HVDC-merikaapeliyhteyttä Keski-Ruotsiin ja kaksi Pohjois-Viroon. Yhteydet on toteutettu tasasähköyhteyksinä, koska pitkällä kaapeliyhteyksillä vaihtosähköyhteys ei ole teknistaloudellisesti kannattava. Pitkillä vaihtosähköyhteyksillä kapasitiivinen varausvirta vie kaapelin kuormitettavuutta, jolloin kaapelin siirtokyvyn säilyttämiseksi tarvittaisiin loisivirran kompensointia tasaisin välein, mitä merikaapeleiden tapauksessa ei voida tehdä kokonaistaloudellisesti kannattavasti [5]. Lisäksi Suomen ja Viron sähköverkot kuuluvat eri synkronijärjestelmiin, jolloin vaihtosähköyhteys ei ole mahdollinen. Toteutustavasta riippuen tasasähköyhteydellä voi olla myös vaihtosähköverkon toimintaa tukevia ominaisuuksia, kuten verkon jännitteen ja taajuuden tukeminen nopean tehonsäädön avulla. Lisäksi Suomen ja Viron sähköverkot kuuluvat eri synkroniverkkoihin, jolloin vaihtosähköyhteys verkkojen välillä ei ole mahdollinen. Taulukossa 1 on esitetty Suomen suurvoimansiirtoon tarkoitettujen merikaapeliyhteyksien perustiedot.

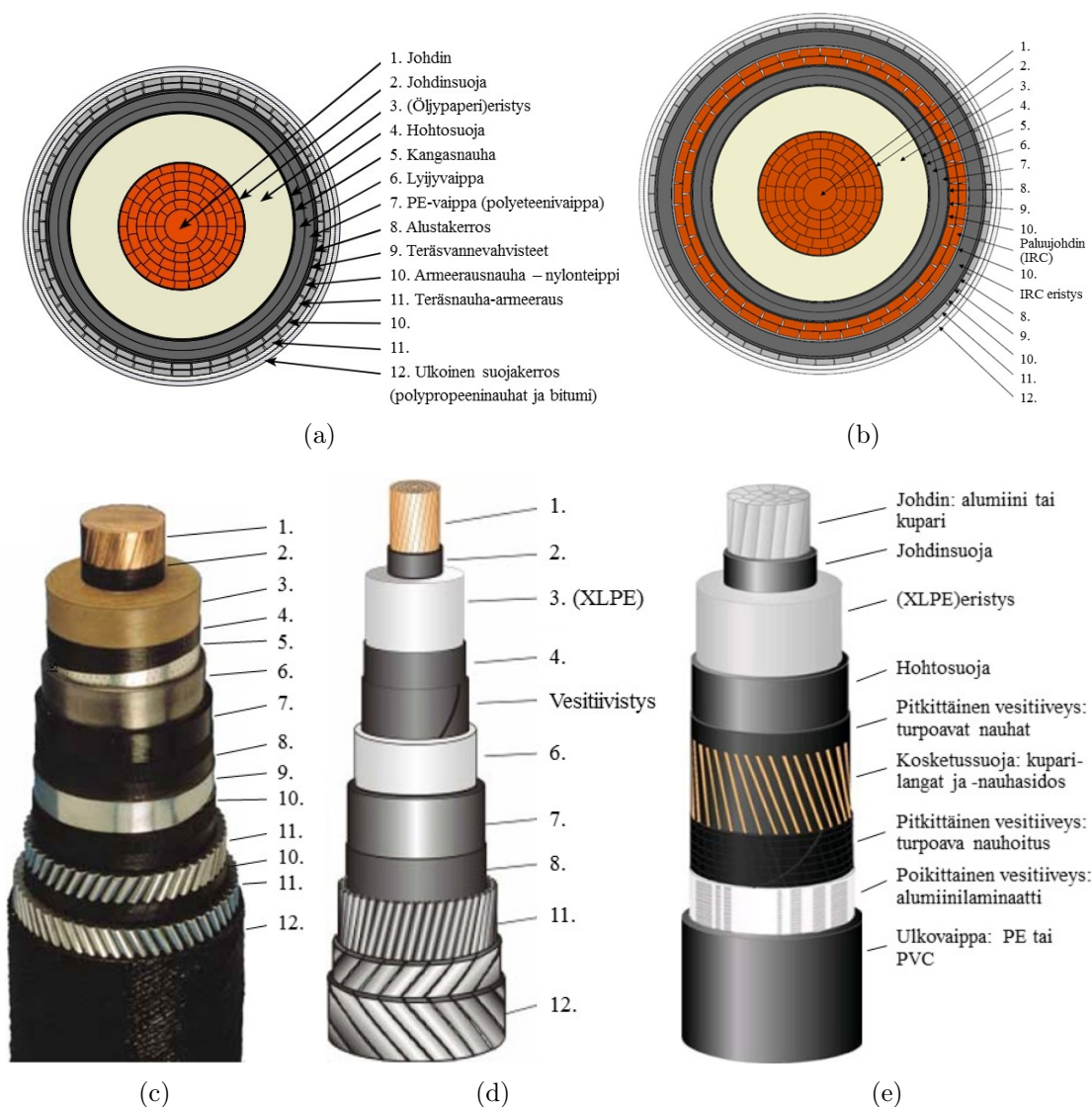
Taulukko 1: Kantaverkkoon liittyvien HVDC-merikaapeliyhteyksien käyttöönotto-
vuodet ja tekniset tiedot. [10, 11, 12, 13] Taulukossa lyhenne aj tarkoittaa avojohtoa
ja k kaapelia.

Yhteys	Käyttöönotto	Jännite	Teho	Johdon pituus	
				meressä (k)	maalla
Fenno-Skan 1*	1989	400 kV	500 MW	200 km	33 km (aj)
Fenno-Skan 2	2011	500 kV	800 MW	196 km	103 km (aj)
EstLink 1	2006	±150 kV	350 MW	2 x 74 km	31 km (k)
EstLink 2	2014	450 kV	650 MW	148 km	25 km (aj+k)

*taulukossa alkuperäiset nimellisarvot, nykyisin käytettävät alennetut nimellisarvot: jännite 320 kV ja teho 400 MW

Kuvassa 2 on esitetty Suomen kantaverkkoon liittyvien suurjännitteisten tasasähköyhteyksien merikaapelien rakenteet sekä tyypillisen vesitiiviin suurjännitteisen vaihtosähkö (HVAC, high voltage alternating current) -maakaapelin rakenne. Kuvassa esitettyjen vesieristettyjen tasa- ja vaihtosähkökaapeleiden rakenne on melko samanlainen. Kaapeleiden erot löytyvät lähinnä kaapelin armeerauksesta, eristeestä, kosketussuojasta sekä vesieristuksen rakenteesta. Kuvassa 2(e) esitetty vaihtosähkökaapeli on yksivaiheinen, jolloin yhden vaihtosähköyhteyden toteuttamiseen tarvitaan kolme erillistä kaapelia, kun taas tasasähköyhteydellä voi riittää yksi päävirtapiirin kaapeli maan tai meren voidessa toimia paluuvirtapiirinä. Nykyisin rakennettavat

yhteydet ovat kuitenkin yleensä kaksijohtimisia, koska lupien saaminen maa- tai merielektrodien rakentamiseksi on hankalaa. Tasasähkökaapelin pää- ja paluuvirtapiirit voidaan valmistaa myös samankeskinä, kuten kuvassa 2(b) esitetty EstLink 2 -merikaapeli, jolloin tarvitaan vain yksi kaapeli. Sekä vaihto- että tasasähkökaapeleita valmistetaan myös useampijohtimisina. Useampijohtimisissa kaapeleissa vaiheet ja paluujohdin on eristetty toisistaan, mutta suojattu yhteisen ulkovaipan ja armeerauksen sisään. Useampijohtimisia vaihtosähkökaapeleita käytetään yleensä keski- ja pienjännitekaapeleissa.



Kuva 2: Kantaverkkoon liittyvien tasasähköyhteyksien merikaapelien rakenteet sekä tyypillisen vesitiiviin vaihtosähkökaapelin rakenne. Kuvissa esiintyvät kerroksia kuvaavien numeroiden selitteet on esitetty kuvan (a) yhteydessä. (a) Fenno-Skan 2-merikaapelin poikkileikkaus [12], (b) EstLink 2-merikaapelin poikkileikkaus [14], (c) Fenno-Skan 1-merikaapeli [15], (d) EstLink 1-merikaapeli [10] ja (e) suurjännitteinen vaihtosähkökaapeli [16, 17].

Merikaapelit valmistetaan kestävämpään kaapelin laskuvaiheen aikaisia kovia ulkoisia rasituksia, mistä johtuen ne suojataan lyijyvaipan lisäksi teräsnauhoista koostuvilla armeerauskerroksilla. Poikittaissuuntaisena vesieristeenä toimii lyijyvaippa tai metallilaminaatti. Vesieristetyissä kaapeleissa kerrokset vesieristuksen sisäpuolella on tehty siten, ettei vesi pääse kulkemaan kerroksissa tai niiden välissä kaapelin vaurioitessa. Vaihtosähkökaapelissa kosketussuojana toimivat yleensä kuparilangat, jolloin pitkittäinen vesieristys varmistetaan ympäröimällä kuparilankakerros kosteudesta turpoavilla nauhoilla [17].

Kuvassa 2 esitetyistä päävirtapiirin kaapeleista kolmessa on eristeenä öljykylästeinen paperi ja kahdessa ristosilloitetusta polyeteenistä (XLPE, cross-linked polyethylene) valmistettu muovieristys. Nämä ovat tyypillisimmät kaapeleissa käytetyt eristemateriaalit. Vaihtojännitteillä muovieristys on ainut käytössä oleva eristysmateriaali kaikilla jännitetasoilla. Tasajännitteenkaapeleissa muovieristeen polarisoituminen ja polarisaation hidaskuuntuminen tehon suunnan vaihtuessa on ollut syynä öljypaperieristuksen käyttöön. [18]. Nykyään on kuitenkin jo saatavissa 525 kV:n jännitteellä toimivia muovikaapeleita sekä vaihto- että tasajännitteelle [19].

Johdinmateriaalina kaapeleissa käytetään alumiinia tai kuparia. Alumiinia suositetaan sen keveyden ja halvemman hinnan takia. Kuparin parempi sähkönjohtokyky ja paremmat mekaaniset ominaisuudet tekevät siitä kuitenkin usein alumiinia paremman johdinmateriaalin merikaapeleissa.

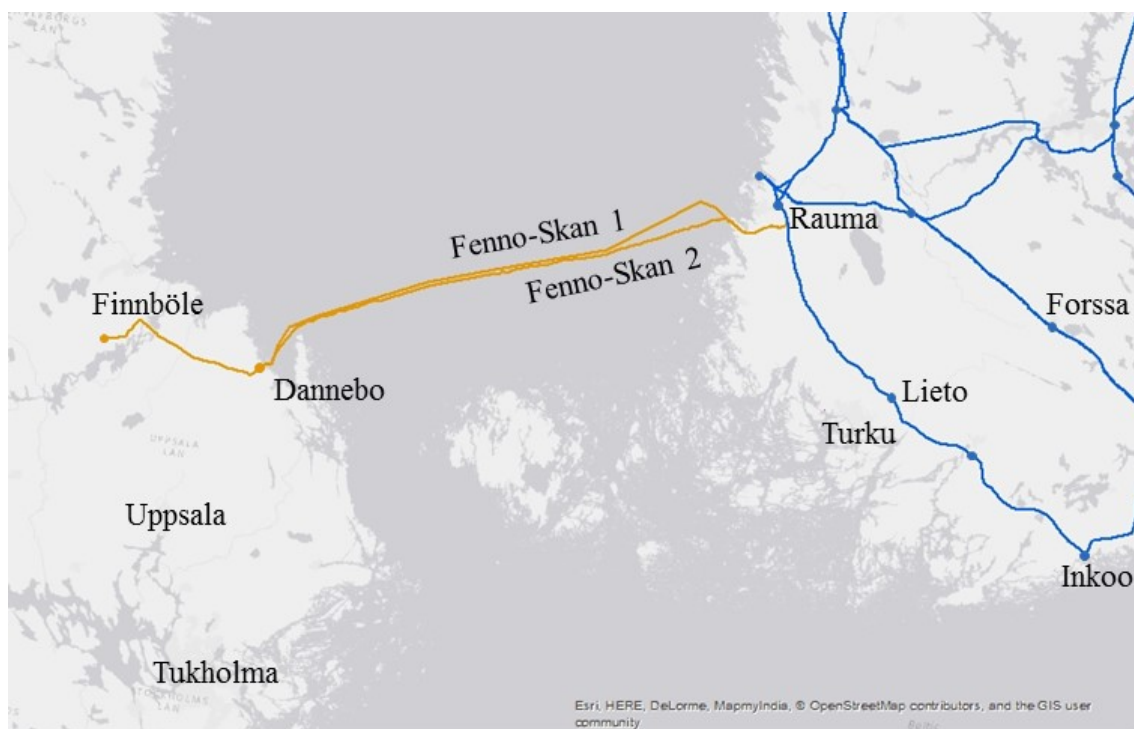
Fenno-Skan 1

Ensimmäinen Suomen ja Ruotsin välinen tasasähköyhteys Fenno-Skan 1 otettiin käyttöön 1989. Pohjanlahden poikki kulkevan yhteyden suuntaaja-asetat sijaitsevat Suomessa Raumalla ja Ruotsissa Dannebossa. Yhteyden merikaapeliosuus on noin 200 km pitkä, lisäksi Suomen puolella on noin 33 km tasasähköajojohtoa. Yhteyden merikaapeli on kaksoisarmeerattu öljypaperieristeinen massakaapeli (MIND, mass impregnated non-draining) kuparijohtimella. Fenno-Skan 1 -yhteys suunniteltiin käytettäväksi 400 kV:n jännitteellä 500 MW:n teholla, jota talviaikaan voitiin nostaa 50 MW ylikuormitukseen. Kaapelilla ilmenneiden vikojen seurauksena kesällä 2014 jännite rajoitettiin 320 kV:in, mikä rajoittaa yhteyden siirtokapasiteetin 400 MW:in. Fenno-Skan 1 on verkkokommutoiva monopolaarinen tasasähköyhteys, jossa maa ja meri toimivat paluupiirinä. Nykyään yhteyttä voidaan käyttää yhdessä Fenno-Skan 2 -yhteyden kanssa bipolaarisen yhteyden tavoin. [11, 5]

Fenno-Skan 2

Fenno-Skan 2 -yhteys otettiin käyttöön 2011. Yhteydellä merikaapelin pituus on 196 km. Lisäksi yhteydellä on tasasähköajojohtoa 33 km Suomessa ja 70 km Ruotsissa. Yhteys kulkee Suomesta Raumalta Ruotsin Dannebon kautta Finnbölen suuntaaja-asetalle. Yhteyden merikaapeli on öljypaperieristeinen (MIND) kaksoisarmeerattu kaapeli kuparijohtimella. Fenno-Skan 2 -yhteyden käyttöjännite on 500 kV ja sillä voidaan siirtää 800 MW tehoa. Fenno-Skan 2 on Fenno-Skan 1 -yhteyden tavoin verkkokommutoiva monopolaarinen tasasähköyhteys, jossa maa ja meri toimivat paluupiirinä. Fenno-Skan-yhteyksiä käytetään yhdessä bipolaariyhteyden tavoin,

jolloin maan ja meren kautta kulkeva paluuvirta on yleensä hyvin pieni. Fenno-Skan-yhteyksien yhteenlaskettu siirtokapasiteetti Suomen ja Ruotsin välillä on tällä hetkellä 1200 MW. Kuvassa 3 on esitetty Fenno-Skan-yhteyksien kulkureitit. [5, 12]



Kuva 3: Fenno-Skan-yhteydet Suomen ja Ruotsin välillä. [4]

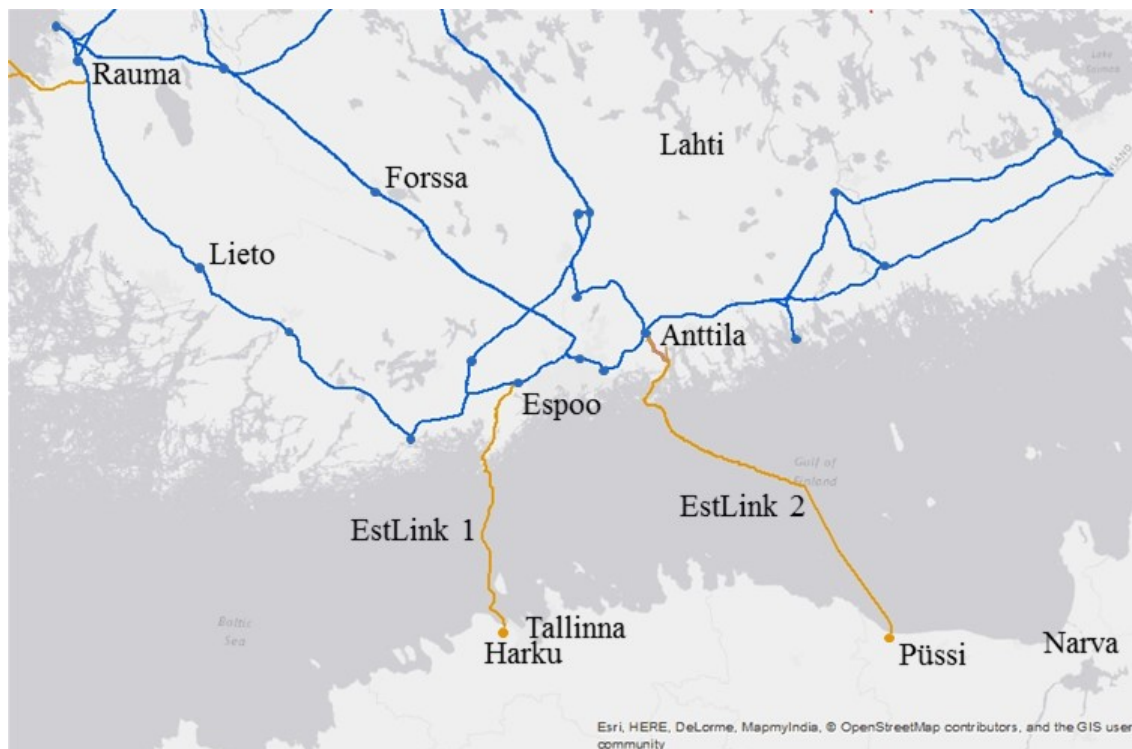
EstLink 1

EstLink 1 -yhteyden rakennutti suomalaisten ja baltialaisten energiayhtiöiden omistama Nordic Energy Link AS -yhtiö ja se valmistui vuonna 2006. Suomen ja Viron kantaverkkoyhtiöiden, Fingrid Oyj:n ja Elering AS:n omistukseen yhteys siirtyi joulukuussa 2013. Suomenlahden poikki kulkevan yhteyden pituus on 105 km, josta 74 km on merikaapelia. Maakaapelia on yhteensä 31 km, josta Suomen puolella 22 km ja Virossa 9 km. Yhteyden suuntaaja-asetat sijaitsevat Suomessa Espoossa ja Virossa Harkussa. EstLink 1 on muista Fingridin merikaapeliyhteyksistä poiketen polyeteenieristeinen muovikaapeli (XLPE) ja toteutettu bipolaarisena yhteytenä kahdella rinnakkaisella kaapelilla. Merikaapelissa johtimen materiaalina on kupari. Yhteyden jännite on ± 150 kV ja siirtokapasiteetti 350 MW. EstLink 1 on jännitelähdesuuntaajilla (VSC, voltage source converter) toteutettu tasasähköyhteys. [5, 10]

EstLink 2

Uusin Suomen kantaverkkoon liittyvä merikaapeliyhteys EstLink 2 otettiin käyttöön 2014. Yhteys kulkee Suomen ja Viron välillä Anttilan suuntaaja-asetalta Püssin suuntaaja-asetalle. Yhteydellä merikaapelin pituus on 148 km, lisäksi yhteyteen

kuuluu 11 km:n maakaapeli Virossa ja 14 km pitkä tasasähköavojohto Suomessa. Merikaapeli on öljypaperieristeinen (MI IRC, mass impregnated, integrated return conductor) armeerattu koaksiaalikaapeli, jossa sekä pääjohdin että paluujohdin ovat kuparia. EstLink 2 -merikaapelissa paluujohdin on samankeskinen pääjohtimen kanssa. EstLink 2 on verkkokommutoiva tasasähköyhteys. Yhteyden jännite on 450 kV ja teho 650 MW. EstLink-yhteyksien yhteenlaskettu siirtokapasiteetti Suomen ja Viron välillä on 1000 MW. [13]. Kuvassa 4 on esitetty EstLink-yhteyksien kulkureitit.



Kuva 4: EstLink-yhteydet Suomen ja Viron välillä. [4]

3.2 Tasasähköyhteyksien toiminta

EstLink 1 on jännitelähdesuuntaajilla (VSC, voltage source converter) toteutettu yhteys. Jännitelähdesuuntaajia käytettäessä yhteyttä ohjataan yleensä IGBT-sillan välityksellä (IGBT: insulated gate bipolar transistor). Jännitelähdesuuntaajilla toteutettu yhteyden ohjauksessa käytetään hyväksi vaihtosähköverkon jännitettä yhteyden jännitteen ja tehon ohjaukseen, mutta tämä ei ole välttämätöntä yhteyden toiminnalle. Jännitelähdesuuntaaja on itsekommutoiva, eikä tarvitse vaihtosähköverkosta loistehoa toimiakseen. Tällaisella yhteydellä on mahdollista toteuttaa myös jännitteenanto kylmään verkkoon, niin kutsuttu "black-start". Työssä käsitellyistä yhteyksistä EstLink 1 -yhteys on toteutettu niin, että jännitteenanto Viron siirtoverkkoon on mahdollinen. Muovieristeiset kaapelit soveltuvat käytettäväksi erityisesti jännitelähdesuuntaajilla toteutetulla yhteydellä, koska jännitteen napaisuutta ei vaihdeta.

Tehon suunta muutetaan virran suuntaa muuttamalla, eikä jännitteen napaisuus muutu. [5]

Kolme muuta työssä esitettyä merikaapeliyhteyttä, Fenno-Skan 1 ja 2 sekä EstLink 2, on toteutettu verkkokommutoivilla suuntaajilla (LCC, line commutated converter), joissa yhteyden ohjaaminen tapahtuu tyristorisiltojen välityksellä. Tyristorit käyttävät vaihtosähköverkon jännitettä yhteyden jännitteen ja napaisuuden muuttamiseen, jolloin jännitteenanto kylmään verkkoon ei ole mahdollinen. Verkkokommutoivalla yhteydellä tehon suunta käännetään jännitteen napaisuutta muuttamalla, mistä johtuen LCC-teknologiaan perustuvilla HVDC-yhteyksillä käytetään yleensä öljypaperieristeistä kaapelia. [5]. Muovieristeisessä kaapelissa eriste polarisoituu tasajännitteen vaikutuksesta. Polarisaatiotila ei purkaudu riittävän nopeasti jännitteen napaisuuden vaihtuessa, jolloin seurauksena on mahdollinen kriittisen sähkökentän voimakkuuden ylittyminen, siitä aiheutuva osittaispurkausprosessi ja lopulta läpilyönti kaapelissa. [18]

3.3 Yleiset tasasähköyhteyksillä esiintyvät viat

Tässä työssä käsiteltävät suurjännitteisten tasasähköyhteyksien johtoviat voidaan jakaa kolmeen osaan:

- kaapeli
- avojohto
- kaapelipäätte

Kaapeleilla esiintyvät viat ovat yleensä pysyviä vikoja, joiden paikannus ja korjaus on vaativaa ja aikaavievää. Kaapeleihin kuuluvat sekä meri- että maakaapelit. Avojohtoilla ja kaapelipäätteillä esiintyvät viat ovat tyypillisesti ohimeneviä vikoja, jotka häviävät itsestään.

Avojohtoilla esiintyvät viat ovat yleensä maasulkuja, jotka aiheutuvat johtimen kytketymisestä maapotentiaaliin. Ohimenevä vika voi aiheutua esimerkiksi johtimen eristinten pinnalla tapahtuvasta ylilyönnistä maadoitettuun pylvääseen. Ylilyöntien estämiseksi eristinten kuntoa tarkkaillaan silmämääräisesti liian ja rikkoutumisen varalta ja tarvittaessa eristimet puhdistetaan tai vaihdetaan. Avojohtoilla eristeenä toimii yleensä ilma, jolloin pysyvän vian voi aiheuttaa esimerkiksi johtimeen osuva puu. Puiden ja muun kasvillisuuden aiheuttamien vikojen estämiseksi avojohtojen johtokaduilta raivataan lähelle virtajohtimia ulottuvat puut tasaisin väliajoin. Johtokadut raivataan tarpeeksi leveiksi, jotta reuna-alueella mahdollisesti kaatuva puu ei osu jännitteisiin johtimiin. Avojohtojen maasulku voi aiheutua myös esimerkiksi johtimen osumisesta maahan, jolloin vika on todennäköisesti pysyvä ja aiheuttaa vaaran vikapaikan lähellä liikkuville ihmisille ja eläimille.

Kaapeleilla esiintyvät viat ovat pysyviä vikoja, koska kaapelin eriste vaurioituu vian seurauksena. Kaapeliviat aiheutuvat sisäisen tai ulkoisen rasituksen takia. Rasituksen aiheuttama läpilyönti rikkoo eristeen ja aiheuttaa maasulun. Merikaapelit ovat suojattuja ulkoisia vianaiheuttajia vastaan, mutta esimerkiksi pistemäisesti

kohdistuva voimakas rasitus voi vaurioittaa kaapelia. Tällainen vianaiheuttaja voi olla esimerkiksi kaapeliin tarttuva laivan ankkuri tai kaapeliin osuva proomun jalka tai troolin leija. Maakaapeleilla ulkoisia vianaiheuttajia ovat tyypillisesti erilaiset maankaivuukoneet. Kaapeleissa esiintyvät sisäiset viat usein saavat alkunsa pienestä poikkeamasta jossain kaapelin sisemmistä kerroksista ja kehittyvät hitaasti esimerkiksi kaapelin sisäisen sähkökentän vaikutuksesta tai lämpölaajenemisen vaikutuksesta. Suurjännitteisten kaapeleiden sisäisten vikojen perimmäistä syytä on usein vaikea selvittää, sillä yleensä vika havaitaan vasta sen aiheutettua läpilyönnin.

Tasasähköyhteyksien kaapelipäätteissä esiintyvät viat ovat tyypillisesti päätteen suunnittelun, valmistuksen tai asennuksen yhteydessä tapahtuneiden virheiden aiheuttamia. Virheet ilmenevät esimerkiksi päätteeseen liittyvien osien rikkoontumisena tai päätteen posliinisen eristeen ulkopinnalla tapahtuvina ylilyönteinä. Ylilyönnin tapahtumista edesauttavat kosteus, huurre sekä epäpuhtaudet. Nämä parantavat eristeen pinnan johtavuutta ja helpottavat johtavan purkauspolun syntymistä eristeen yli. Syntyvät ylilyönnit eivät yleensä riko posliinieristystä, mutta voivat aiheuttaa sen pintaan muutoksia. Koska ylilyönnit tapahtuvat posliinieristeen ulkopinnalla ilman toimiessa eristeenä, ovat viat yleensä ohimeneviä. Samassa kohdassa tapahtuneiden ylilyöntien aiheuttamat muutokset voivat näkyä jälkinä muun muassa posliinin pinnassa, kaapelipäätteen jalassa tai koronarenkaassa, jolloin kaapelipäätteessä voidaan jälkikäteen todeta tapahtuneen ylilyönnejä ja ylilyönnin aiheuttajaa voidaan yrittää selvittää.

3.4 Vianselvityksen toimintamalli

Kun tasasähköyhteydellä ilmenee vika johdolla tai suuntaaja-aseman kytkinkentällä, yhteyden säätöjärjestelmä yrittää automaattisesti jatkaa tehonsiirtoa yhden tai useamman kerran. Mikäli yritykset epäonnistuvat, aloitetaan vianselvitys. Suuntaaja-aseilla sijaitsee monia rikkoutuvia ja vikaantuvia laitteita, minkä johdosta vikaa etsitään ensin suuntaaja-aseman laitteistosta. Vianpaikannusta varten suuntaaja-aseille lähetetään henkilö tarkastamaan tilanne. Jos asemalta ei löydetä vikaa, suoritetaan yleensä seuraavaksi tyhjäkävyn johdon jännitekokeet (open line tests). Jännitekokeilla testataan jännitteen pysymistä koko yhteydellä tai tietyllä yhteyden osalla. Ehjällä yhteyden osalla jännite pysyy, kun taas vikaantuneella osalla se ei pysy. [2]

Jännitekokeiden avulla saadaan selville todennäköisimmin vioittunut yhteyden osa (avojohto tai kaapeli), minkä jälkeen pyritään vikapaikkaa selvittämään tarkemmin. Avojohtoilla vianpaikannus tapahtuu vikapartiointina, jolloin johto tarkastetaan silmämääräisesti päästä päähän. Tarkastus tapahtuu yleensä maasta käsin, mutta sään salliessa voidaan tarkastamisen nopeuttamiseksi tarkastaa johto myös ilmasta käsin helikopterin avulla. Avojohton partiointiin kuuluu myös kaapelipäätteen silmämääräinen tarkastus. Jos vika paikannetaan jännitekokeissa kaapelille, mitataan kaapeli TDR-mittalaitteella vikapaikan selvittämiseksi. TDR-mittaus tulisi suorittaa kaapelin molemmista päistä, jolloin saadaan vikapaikalle tarkempi arvio. [2]

Kuvatussa toimintamallissa ihmisten tekemän työn osuus on suuri, mikä aiheuttaa viivettä vianselvitykseen. Manuaaliseen asematarkastukseen ja avojohtojen

vikapartiointiin kuluva aika on tunteja, minkä lisäksi tarkastusten suorittavien henkilöiden matkustamiseen asemille voi kulua aikaa jopa tunteja. Kun vikapaikka on tiedossa, tehdään tarvittavat korjaustoimenpiteet, jolloin yhteys on vikapaikasta riippuen poissa muutamasta tunnista kuukauteen. Erityisesti merikaapelivian korjauksen nopeuteen vaikuttavat vianpaikannukseen ja korjaukseen tarvittavien alusten saanti sekä sääolosuhteet merellä. [2]

4 Vianpaikannus nykyisin offline-menetelmin

4.1 Yleistä

Työssä käsiteltävillä tasasähkölinkeillä merikaapelit ovat kymmenien kilometrien pituisia, mikä asettaa haasteita vianpaikannukselle. Esimerkiksi vian paikantamiseen yleisesti käytettävissä siltamittauksissa tarvitaan erillinen ehjä virtapiirin paluuyhteys tutkittavan kaapelin päiden välille, minkä asentaminen erikseen satojen kilometrien pituisien kaapeleiden tutkimiseksi ei ole järkevää. Toinen vaihtoehto olisi käyttää paluupiirinä rinnakkaista siirtoyhteyttä, esimerkiksi Fenno-Skan 1 -yhteyden vikaantuessa Fenno-Skan 2 voisi toimia paluujohtimena. Tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan ole otettu käyttöön, koska ensimmäisen tasasähköyhteyden valmistuessa paluupiiriä ei vielä ollut olemassa ja toisaalta sähkönsiirron keskeyttäminen ehjällä kaapeliyhteydellä mittausten ajaksi vaatii enemmän toimenpiteitä ja aiheuttaa suuremmat rahalliset tappiot kuin voittuneen kaapeliyhteyden vianpaikannus muilla menetelmillä. Pitkillä kaapeliyhteyksillä yleistä onkin käyttää erilaisia kulkuaaltojen heijastumista mittaavia menetelmiä, jotka eivät tarvitse erillistä ehjää yhteyttä kaapelin päiden välillä.

Fingridissä on käytössä kaksi erilaista metodia karkeaan vianpaikannukseen, jolla pyritään paikantamaan vika tietylle johto-osuudelle ja määrittää vikapaikka siinä mahdollisimman tarkasti. Toinen Fingridin käyttämistä vianpaikannusmenetelmistä perustuu tasasähköasemalla jännitemuuntajalla sijaitsevan häiriötallentimen tallentamien tietojen tulkintaan. Toinen Fingridissä käytössä oleva vianpaikannusmenetelmä on mitata voittunutta kaapelia erillisen kulkuaaltoihin perustuvan laitteiston avulla. Erityisesti kaapelivikaa epäiltäessä suoritetaan yleensä aina kulkuaaltomittaus, johon liittyy teoriaa ja käytäntöä seuraavissa luvuissa esitellään.

4.2 Kulkuaallot ja aaltoimpedanssi

Tasa- ja vaihtosähköjohdoilla esiintyviä vaihtosähkön käyttötaajuuksista jännitettä ja virtaa oleellisesti nopeampia ilmiöitä kutsutaan kulkuaaltoilmiöiksi. Kulkuaaltoina tarkastellaan esimerkiksi transienttijännitteitä ja syöksyaaltoja. Tietyntyyppinen kulkuaalto käyttäytyy hieman eri tavoin eri johdoilla johdon aaltoimpedanssista riippuen. Edetessään johdolla kulkuaalto näkee äärettömän pitkän johdon, jolla on aaltoimpedanssi Z_0 [20]. Aaltoimpedanssiin vaikuttavat johdon impedanssi, liitos- ja yhdyskohtien impedanssit, johtotyyppin muutoskohdan impedanssi, kaapelipäätteiden impedanssit sekä mahdollisten vikapaikkojen impedanssit [21].

Johdolla etenevään kulkuaaltopulssiin kohdistuu häviöitä, joiden vaikutuksesta aalto vaimenee ja vääristyy. Vaimentuminen näkyy aallolla amplitudin pienene-
misenä eli aallon huipun madaltumisena. Aallon vääristyminen näkyy nousuajan pidentymisenä eli aallon rinnan loivenemisena. Johdoilla vaimeneminen ja vääristyminen riippuvat muun muassa aallon taajuudesta ja johdon eristeestä. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu laskettujen ja mitattujen tulosten välillä olevan iso ero erityisesti aallon loivenemisen suhteen. Luotettavimmat tiedot aallon loivenemisesta saadaan kaapelin valmistajan tekemistä tai itse tehdyistä mittauksista. Esimerkiksi

Fenno-Skan 1 -kaapelilla kulkuaallon vaimeneminen on todettu taajuusriippuvaksi. [18]

Aaltoimpedanssi on riippuvainen kaapelin rakenteesta, mutta ei sen pituudesta, jännitteestä tai virrasta. Häviöttömän johdon aaltoimpedanssi Z_0 määritellään johdolle jakautuneiden johtovakioiden avulla seuraavasti:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (1)$$

jossa l ja c merkitsevät pituutta kohti laskettua induktanssia ja kapasitanssia. Induktanssi ja kapasitanssi riippuvat johdon rakenteen lisäksi eristeaineen permeabiliteetista μ ja permittiivisyydestä ε . [18]

Todellisuudessa johdoilla kuitenkin syntyy häviöitä, eikä kulkuaallon virtapiiri ole symmetrinen johtimen ja paluujohtimenä yleensä toimivan maan tai kaapelin vaipan johtimeen verrattuna erilaisten ominaisuuksien takia. Kun häviöt otetaan huomioon, yksivaiheisen kaapelin aaltoimpedanssi $Z_{w,k}$ voidaan määritellä seuraavasti:

$$Z_{w,k} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \left(\frac{r_{\text{vaippa}}}{r_{\text{johdin}}} \right) \quad (2)$$

jossa r_{vaippa} ja r_{johdin} kuvaavat vastaavasti vaipan sisäsädettä ja johtimen sädettä. Yksinkertaistetussa tilanteessa kun maa oletetaan häviöttömäksi, häviöllisen avojohdon yksittäisen johtimen aaltoimpedanssi $Z_{w,aj}$ voidaan määritellä seuraavasti:

$$Z_{w,aj} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \ln \left(\frac{2h_{\text{johdin}}}{r_{\text{johdin}}} \right) \quad (3)$$

jossa μ_0 ja ε_0 ovat tyhjiön permeabiliteetti ja permittiivisyys ja h_{johdin} on johtimen korkeus maanpinnasta. Kaapelin aaltoimpedanssi on keskimäärin noin kymmenesosa avojohdon aaltoimpedanssista. Avojohtimilla kulkuaallon yhteydessä esiintyvä korona kasvattaa johdon tehollista halkaisijaa ja siten pienentää johdon aaltoimpedanssia. [18]

4.3 Kulkuaaltojen heijastuminen johdoilla

Aaltoimpedanssin muutoskohdassa osa kulkuaallosta heijastuu takaisin alkuun ja osa jatkaa etenemistään johdolla. Kulkuaallon saapuessa epäjatkuvuuskohtaan, jossa johdon aaltoimpedanssi kasvaa, virta muutoskohdan toisella puolella pienenee ja impedanssin muutoskohtaan kasaantuu varausta. Jännitteen noustessa varauksen kasaantumisen takia, kulkuaalto jakautuu heijastuvaan ja jatkavaan aaltoon, jolloin osa saapuneesta aallosta heijastuu johdon alkupäätä kohti ja osa jatkaa impedanssin muutoskohdan yli eteenpäin. [18]


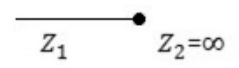
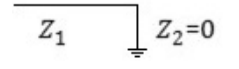
Sekä jännite että virta heijastuvat siten, että aaltoimpedanssin muutoskohdan yli jatkava aalto on yhtä suuri, kuin alkuperäisen ja takaisin heijastuneen aallon summa:

$$u_1 + u_{1r} = u_2 \quad (4a)$$

$$i_1 + i_{1r} = i_2 \quad (4b)$$

jossa alaindeksit 1 ja 2 tarkoittavat vastaavasti alkuperäistä ja jatkavaa aaltoa ja alaindeksi 1r takaisin tulosuuntaan heijastunutta aaltoa. Yhtälöitä (4a) ja (4b) hyödyntämällä voidaan johtaa taulukossa 2 esitetyt heijastuvan ja jatkavan aallon jännitteet ja virrat erilaisissa aaltoimpedanssin epäjatkuvuustapauksissa. [18]

Taulukko 2: Aaltoimpedanssin muutoksen aiheuttamat heijastuvat ja jatkavat aallot eri epäjatkuvuustapauksissa [18].

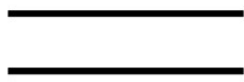







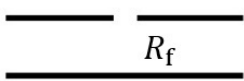

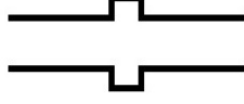

Aaltoimpedanssin muutoskohta	Sijaiskytkentä	Heijastuva aalto	Jatkava aalto
Aaltoimpedanssin muutos		$u_{1r} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_1$ $i_{1r} = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} i_1$	$u_2 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} u_1$ $i_2 = \frac{2}{Z_2 + Z_1} u_1$
Avoin johto		$u_{1r} = u_1$ $i_{1r} = -i_1$	$u_2 = 2u_1$ $i_2 = 0$
Oikosuljettu johto		$u_{1r} = -u_1$ $i_{1r} = i_1$	$u_2 = 0$ $i_2 = \frac{2u_1}{Z_1} = 2i_1$

Aaltoimpedanssin muutoskohdasta heijastuva jänniteaalto on merkiltään positiivinen, mikäli muutoskohdassa impedanssi kasvaa ja negatiivinen, mikäli impedanssi pienenee. Impedanssien suhde määrää heijastuvan aallon amplitudin suuruuden. Mitä suuremman impedanssimuutoksen aalto epäjatkuvuuskohdassa kohtaa, sitä suurempi osa saapuvasta aallosta heijastuu takaisin alkupäähän. Oikosuljetun johdon päässä impedanssi muuttuu nolaksi, jolloin koko jänniteaalto heijastuu negatiivisena takaisin johdon alkupäähän. Vastaavasti tyhjäksi jätetyn johdon päässä impedanssi lähenee ääretöntä, jolloin koko jänniteaalto heijastuu positiivisena takaisin alkupäähän.

Taulukossa 3 on esitetty erityyppisten vikojen aiheuttamien heijastuspulssien esimerkkikuvaajat. Esimerkeissä johdon loppupää on jätetty avoimeksi, jolloin johdon päässä tapahtuu positiivinen heijastus. Katkennutta johdinta havainnollistavan kuvaajan heijastuksissa näkyy lopussa pieni positiivinen heijastus, joka kuvaa katkoksen aiheuttamaa toista heijastusta. Toinen heijastus syntyy ensimmäisen heijastuneen aallon saavuttua johdon alkupäähän ja heijastuttua uudelleen johdolle. Kulkiessaan johdolla aalto vaimenee ja vääristyy, mistä johtuen katkoksen aiheuttama toinen heijastus on selvästi ensimmäistä heikompi ja leveämpi. Kuvaajassa näkyvä korkeampi pulssi on katkoksen aiheuttama ensimmäinen heijastus.

Taulukon 3 vikapaikoissa ja johdon päätteessä impedanssi on oletettu resistiiviseksi, jolloin aiheutuvat heijastukset ovat yksisuuntaisia. Käytännössä sekä vikapaikan että johdon pään impedanssit ovat osittain kapasitiivisia, jolloin aiheutuu pystysuunnassa kaksisuuntainen heijastus (ylös-alas-pulssi tai alas-ylös-pulssi). Kapasitiivisen impedanssin aiheuttamassa heijastuksessa heijastuksen alun suunta kertoo vikatyypin samalla tavalla kuin aiemmin kuvatuissa resistiivisten impedanssien tapauksissa. [22]

Taulukko 3: Erilaisten vikojen aiheuttamat heijastukset jännitepulssiin [22]. Heijastuksia mittaavan laitteen oletetaan olevan johdon vasemmassa päässä kytkettynä johtimien väliin. Heijastuskuvissa alun korkein positiivinen pulssi kuvaa mitattavaan johtoon lähetettävää pulssia, sen jälkeiset pienempiamplitudiset positiiviset ja negatiiviset heijastukset kuvaavat eri vikojen ilmenemistä kulkuaaltomittauskuvassa. Punainen pystyviiva kuvaa johdon loppupään aiheuttaman heijastuksen alkua. Vikatilannetta johdolla havainnollistavissa kuvissa R_f kuvaa vikaresistanssia.

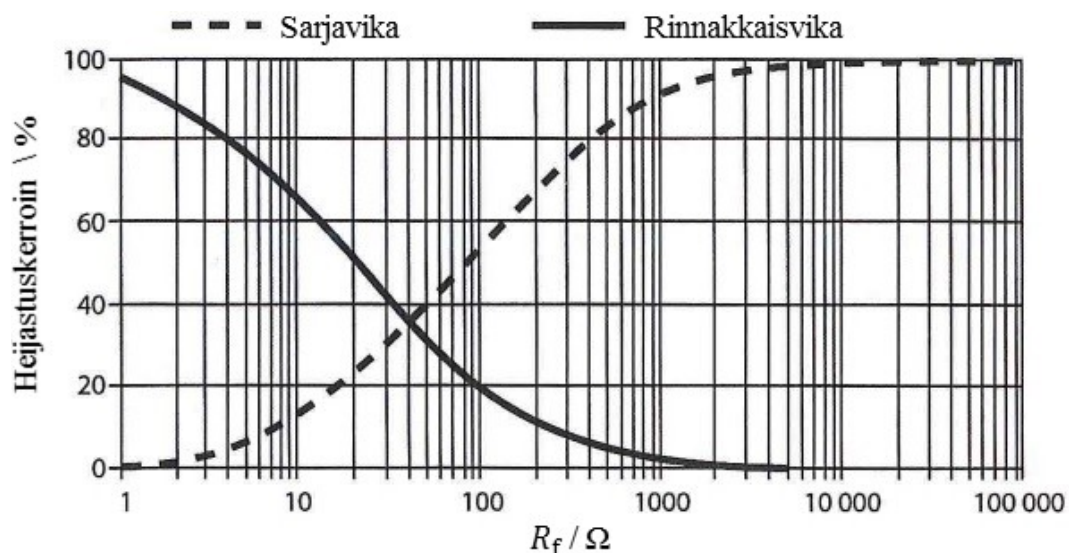
Vikatilanne johdolla	Heijastuskuva	Vian selite
		Ehjä johto (loppupäässä avoin piiri)
		Rinnakkaisvika (negatiivinen heijastus)
		Oikosulku
		Sarjavika (positiivinen heijastus)
		Katkos (1. ja 2. heijastus)
		Jatkos (positiivinen ja negatiivinen heijastus impedanssin muuttuessa liitoksen alku- ja loppupäässä)

Vikojen havaittavuuteen vianpaikannuksen yhteydessä vaikuttaa oleellisesti viasta heijastuvan jänniteaallon suuruus. Aaltoimpedanssin muutoskohdassa tapahtuvan heijastuksen suuruus määräytyy impedanssien erosta, kuten taulukon 2 ensimmäisessä epäjatkuvuustapauksessa on esitetty. Heijastuvan ja saapuneen jänniteaallon välisen

suhteen avulla määritellään muutoskohdalle heijastuskerroin ρ_u :

$$u_{1r} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_1 = \rho_u u_1 \quad (5)$$

Heijastuskerroin on suhdeluku, jonka arvo on -1 , $+1$ tai mikä tahansa reaalityyppinen luku niiden välillä. Ääritapauksissa impedanssin muutoskohtaan tullut jänniteaalto heijastuu kokonaan joko positiivisena (heijastuskerroin on $+1$) tai negatiivisena (heijastuskerroin on -1) takaisin alkupäätä kohti. Vikaimpedanssia kuvaavan vikaresistanssin suuruuden vaikutusta heijastuvan jänniteaallon suuruuteen on havainnollistettu kuvassa 5. Mitä suurempi heijastuskerroin on, sitä helpommin ja kauempaa vika voidaan havaita kulkuaaltomittauksen avulla. Kuten kuvasta 5 nähdään, rinnakkaismuotoisen vian tapauksessa heijastuskerroin kasvaa vikaresistanssin pienentyessä. Vastaavasti sarjamuotoisen vian tapauksessa heijastuskerroin kasvaa vikaresistanssin kasvaessa. Tästä johtuen mitattavien johdinten välinen oikosulku tai johdinkatkos erottuvat TDR-mittauksessa parhaiten ja pieniresistanssinen sarjavika tai suuriresistanssinen rinnakkaisvika erottuvat kulkuaaltomittauksissa heikoimmin.



Kuva 5: Sarja- ja rinnakkaistyyppisten vikojen heijastuskertoimet vikaresistanssin R_f funktiona [20].

Yleisenä sääntönä voidaan pitää, että vikaresistanssiltaan alle 300Ω olevat rinnakkaisviat ja yli 20Ω olevat sarjaviat voidaan havaita kulkuaaltomittauksen avulla. Huonosti erottuvaa suuriresistanssista rinnakkaismuotoista vikaa voidaan niin kutsutusti polttaa paremmin havaittavaksi esimerkiksi syöksyjännitelaitteistolla tuotettavalla riittävän suurella jännitteellä. Tällöin vikapaikassa annetaan tapahtua läpilyönti ja ylläpidetään vikavirtaa niin kauan, että valokaari polttaa purkauskanavan vikapaikassa. Tällöin eristeeseen syntyy purkauskanava ja vikaresistanssi pienenee havaittavan suuruiseksi. [20]. Työssä käsiteltävien voimakapeleiden tapauksessa sarjamuotoiset viat ovat harvinaisia muun muassa johtimen paksuuden ja hyvän suojauksen ansiosta.

4.4 Vikapaikan laskenta TDR-mittauksen avulla

Maahan kaivetulla tai mereen lasketulla kaapelilla vikapaikan etsintää ei ole mielekästä tehdä visuaalisin menetelmin. Tästä johtuen vikapaikan etsinnässä käytetään kulkuaaltojen heijastumiseen perustuvia tutkaustyyppisiä menetelmiä, joiden avulla saadaan tietoa kaapelissa tapahtuneista muutoksista. Kaapelin tutkaaminen erillisen laitteiston avulla perustuu TDR-kulkuaaltomenetelmän (TDR: Time Domain Reflectometry) käyttöön. TDR-menetelmässä impulssigeneraattorin sisältävä mittalaitteisto lähettää kaapeliin jännitepulssin, joka etenee kulkuaaltona kaapelissa. [23]

Kulkuaallon etenemisnopeuteen vaikuttavat kaapelin eristemateriaalin sähkömagneettiset ominaisuudet, suhteellinen permeabiliteetti μ_r ja suhteellinen permittiivisyys ϵ_r , jotka hidastavat kulkuaallon etenemisnopeutta. Kulkuaallon etenemisnopeus voidaan laskea eristeen vakioita hyväksi käyttäen yhtälöstä

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (6)$$

jossa c on valonnopeus tyhjiössä [18]. Vaihtoehtoisesti kulkuaallon etenemisnopeus kaapelissa voidaan laskea TDR-mittaamalla ehjä kaapeli, jonka pituus on tiedossa ja laskea aallon etenemisnopeus v seuraavasti:

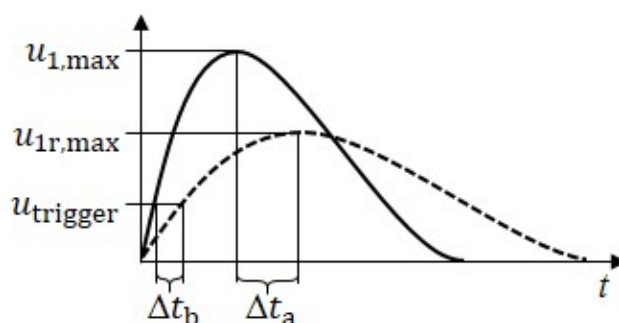
$$v = \frac{2L}{t_{\text{johto}}} \quad (7)$$

jossa L on kaapelin pituus ja t_{johto} mitattu aika, joka signaalilta kuluu edestakaiseen matkaan kaapelilla [23]. Kulkuaallon etenemisnopeuteen vaikuttaa myös kaapelin ikääntyminen [20], mistä johtuen etenemisnopeus on hyvä määrittää uudelleen tasaisin väliajoin.

Käytännössä kulkuaallon etenemisnopeus määritetään haarukoimalla. Tunnetun mittainen johto mitataan TDR-laitteella ja etenemisnopeus haarukoidaan arvoon, jolla johdon pään aiheuttama heijastus näkyy mahdollisimman oikealla etäisyydellä. Näin toimimalla voidaan määrittää etenemisnopeus myös useammasta yhteenliitetystä osasta koostuvalle johdolle. Tällöin on kuitenkin vikapaikan etsinnässä otettava huomioon eri osien kulkuaallon etenemisnopeudet ja niiden ero TDR-mittauksessa käytettävään nopeuteen. Etenemisnopeuksien erosta aiheutuu virhe TDR-mittauksen perusteella saadun vikapaikan ja todellisen vikapaikan etäisyyteen. Kulkuaallon kulku-aika johdolla on suoraan verrannollinen laskettavaan johdon pituuteen. Tällöin kulkuaallon etenemisnopeuden muuttuminen johdolla tai virheellisen etenemisnopeuden arvon käyttäminen mittauksissa aiheuttaa pituusmittauksiin yhtä suuren suhteellisen virheen. Tarkastellaan esimerkkinä 200 km pitkää kaapelia, jolle kulkuaallon etenemisnopeudeksi on määritetty 142,4 m/ μs . Tällöin 0,2 m/ μs (0,14 %) ero määritettyyn etenemisnopeuteen aiheuttaa kaapelin mittauspituuteen noin 280 metrin virheen. Kulkuaaltomittausten yhteydessä käytetään yleensä $v/2$ -arvoa, eli varsinaisen etenemisnopeuden puolikasta. Tällöin 0,1 m/ μs virhe laitteeseen asetetussa arvossa aiheuttaa edellä kuvatun suuruisen virheen pituusmittauksiin.

Aaltoimpedanssin muutoskohdissa, kuten esimerkiksi vikapaikoissa, osa kulkuaallosta heijastuu takaisin kaapelin alkupäähän. Kaapelista takaisin heijastuva kulkuaalto havainnoidaan ja tallennetaan. Signaalin lähettämishetken ja heijastuneen aallon saapumisen välinen aika puolitetaan, jolloin saadaan selville kuinka kauan aallolla kesti kulkea vikapaikkaan. Kun kulkuaallon etenemisnopeus kaapelissa tunnetaan, voidaan heijastuneen signaalin avulla laskea vikapaikan etäisyydelle arvio. [23]

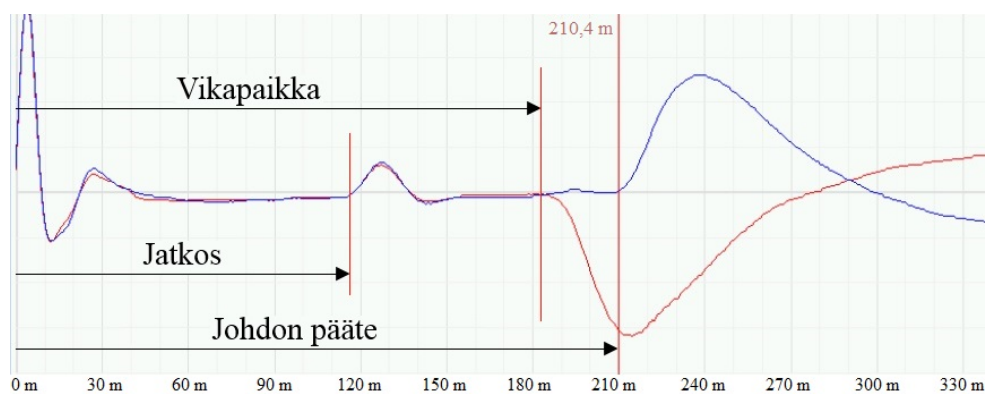
Arvioitaessa heijastuksen aiheuttajan etäisyyttä mittauspisteestä, tarkastellaan heijastuksen alkukohtaa. Työssä käsiteltävien pitkien johtojen tapauksessa etäisyyden mittaaminen lähetetyn ja heijastuvan aallon huipuista olisi erittäin hankalaa alussa aiheutuvien suuriamplitudisten heijastusten takia. Alkukohtaa arvioimalla saadaan tarkemmat mittaustulokset kuin heijastuksen huippukohtaa arvioimalla, koska johdolla kulkevan aallon rinta loivenee siirtäen heijastuksen huippukohtaa. Kuvassa 6 on havainnollistettu aallon rinnan loivenemisen vaikutusta mittauksen aikavirheeseen Δt . Kuvassa yhtenäisellä viivalla on esitetty lähtevä aalto ja katkoviivalla takaisin heijastunut aalto. Kuten kuvasta nähdään, aaltojen huippukohdista mitattaessa aikavirhe Δt_a on suurempi, kuin aaltojen alusta mitattaessa aiheutuva aikavirhe Δt_b . Mittauksen laukaisujännitettä kuvaava u_{trigger} on kuvassa liioitellun suuri verrattuna aaltojen huippujännitteisiin paremman havaittavuuden takia.



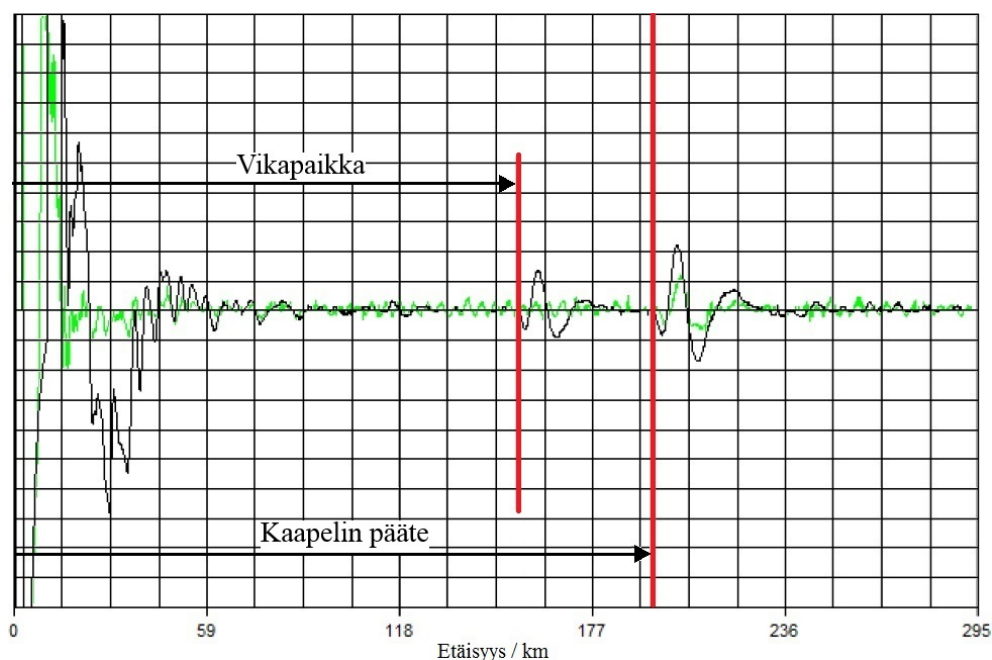
Kuva 6: Havainnekuva mittauskohdan aiheuttamasta aikavirheestä lähtevän ja takaisin heijastuvan aallon välillä. Katkoviivalla piirretyn heijastuneen aallon rinta nousee hitaammin, jolloin huippukohdista mitattaessa mittauksiin aiheutuu suurempi aikavirhe Δt_a , kuin mitattaessa aaltojen alusta laukaisujännitteen u_{trigger} kohdalta. Kuvassa laukaisujännitteen suuruutta suhteessa aaltojen huippuarvoihin on liioiteltu paremman havainnollistamisen takia. Aaltojen alusta mitattaessa aiheutuva aikavirhettä kuvaa Δt_b .

TDR-mittauksen avulla on mahdollista paikantaa myös heikommin heijastuvia vikoja, kuten suuriresistanssisia rinnakkaisvikoja ilman vian polttamista. Mitä suurempi vikaresistanssi mitattavan vaiheen ja maan välillä on, sitä heikompi heijastus siitä TDR-mittauksessa näkyy. Tällöin voidaan vianpaikannuksessa käyttää hyväksi ehjän ja viallisen kaapelin tutkakuvien eroavaisuutta. Kuvat voidaan asettaa päällekkäin kaapelitutkan näytölle tai tietokoneohjelmaan, jolloin ehjän kaapelin aiheuttamiin heijastuksiin voidaan verrata vioittuneen kaapelin heijastuksia ja näin löytää heikommin havaittavissa oleva vika. Tätä tekniikkaa on havainnollistettu

kuvassa 7(a), jossa punaisella kuvattu voittuneen johdon kuvaaja selkeästi eroaa sinisellä kuvatusta ehjän johdon kuvaajasta. Käytännön tilannetta havainnollistetaan kuvassa 7(b), jossa mustalla piirretty voittuneen kaapelin aiheuttama ylimääräinen heijastus melko selkeästi erottuu muuten melko samanlaisesta vihreällä piirrettyä ehjän kaapelin heijastuksesta. Kuvassa esitettyjen käyrien pienet amplitudierot aiheutuvat pääasiassa TDR-mittauksissa käytetystä erisuuruuksista vahvistuksista, ehjän kaapelin mittauksessa on käytetty 40 dB:n ja voittuneen kaapelin mittauksessa 50 dB:n vahvistusta.



(a)



(b)

Kuva 7: Vikapaikan erottaminen ehjän johdon TDR-mittaukseen vertaamalla. (a) Mallitilanne vikapaikan erottamisesta TDR-kuvien vertailun avulla. Sininen käyrä kuvaa ehjän ja punainen voittuneen kaapelin mittauksia. [22]. (b) Esimerkki vikapaikan erottamisesta todellisten TDR-mittauksien avulla Fennoskan 2 -kaapelilla: mustalla viallisen, vihreällä ehjän kaapelin mittaus.

4.5 TDR-mittalaitteiden esittely

Kaapeleiden TDR-mittausta varten Fingridillä on käytössä kaksi Teleflex-mittalaitetta, joiden avulla voidaan paikantaa kaapelivika tai tarkastella ehjää kaapelia. Teleflex-mittalaitteet ovat SebaKMT:n kehittämiä heijastusmittareita voimajärjestelmien kaapeleiden vianpaikannukseen. Työssä käytettävät kannettavat laitemallit ovat Teleflex M ja Teleflex VX-P (myöhemmin Teleflex VX), joista edellinen on hankittu 2005 ja jälkimmäinen 2014. Laitteissa on useampia testausominaisuuksia, mutta vianpaikannukseen on käytetty laitteiden pulssiheijastus-toimintoa (pulse reflection). Laitteet on esitetty kuvissa 8 ja 9.



Kuva 8: Teleflex M -kaapelitutka. [24]



Kuva 9: Teleflex VX-P -kaapelitutka. [25]

Laitteet toimivat verkkovirralla ja niissä on mukana mittauksiin tarvittavat johdot. Teleflex M -laite painaa noin 15 kg kuljetuskotelon kanssa, ilman koteloa noin 9 kg. Teleflex VX on sijoitettu kiinteästi koteloonsa, kokonaispaino on 20 kg. Teleflex M -laitteessa näyttö on monivärinen 10,4", kun taas VX-laitteessa näyttö on huomattavasti kirkkaampi 15" monivärinäyttö. [26, 27]

Laitteet ovat toimintaperiaatteiltaan samanlaiset. TDR-mittauksessa laitteet lähettävät pienjännitteisen mittauspulssin, joka ei vahingoita kaapelia tai polta vikaa. Laitteen lähettämä pulssi on suorakaidepulssi, jolloin pulssin nousuaika on riittävän nopea myös lyhyillä pulssinleveyksillä. Laitteen lähettämää pulssia voidaan säätää laitteen näytöltä amplitudia ja pulssinleveyttä muuttamalla, jolloin suodatuksen jälkeen näytöllä ja mittaustuloksissa näkyvä pulssi on puolikkaan siniaallon kaltainen.

Pulssinleveyttä kasvattamalla kasvatetaan pulssin kantoetäisyyttä. Leveämmällä pulssilla voidaan mitata kerralla pidempi kaapeli, mutta samalla mittauksen tarkkuusalue siirtyy kauemmas pulssin lähtöpisteestä. Mittauksissa saatavan kuvan alussa näkyy yleensä suurimmalla amplitudilla alkuperäisen, kaapeliin lähetetyn, pulssin heijastukset, mistä aiheutuu mitattavan kaapelin alkuun niin kutsuttu sokea alue.

Sokean alueen pituus kasvaa pulssinleveyden kasvaessa. Kaapelitutkat kasvattavat automaattisesti pulssin amplitudia pulssinleveyden kasvaessa, jolloin mittauksen alkupäähän aiheutuu pidemmälle matkalle suurempia pulssin lähetyksestä aiheutuvia heijastuksia ja mahdolliset kaapelista aiheutuvat pieniamplitudisemmat heijastukset peittyvät näiden alle. Lyhyellä pulssinleveydellä pulssin kantama lyhenee.

Tällöin myös sokea alue lyhenee ja mittauksen tarkkuusalue siirtyy lähemmäksi alkupäätä.

Työn yhteydessä tehdyissä mittauksissa todettiin, että impedanssimuutoksen aiheuttama heijastus voidaan havaita noin 50 metrin etäisyydeltä käytettäessä 50 ns-pulssinleveyttä. Impedanssimuutoksen suuruus vaikuttaa heijastuksen voimakkuuteen ja siten muutoskohdan havaittavuuteen tutkakuvassa. Mitä suurempi aaltoimpedanssin muutos kaapelissa tapahtuu, sitä suuremman heijastuksen se aiheuttaa. Suurempi heijastus on myös helpompi erottaa lähetetyn pulssin omista heijastuksista, jolloin aaltoimpedanssin muutoskohta voidaan erottaa jo lähempänä mittauksen alkupäätä.

Kaapelitutkalle annetaan parametrina mitattavan kaapelin kulkuvaallon etenemisnopeuden puolikas, $v/2$ -arvo. Laite mittaa pulssin lähetyksen ja heijastusten saapumisen välistä aikaa, jolloin se pystyy $v/2$ -arvon avulla suoraan muuntamaan tulokset etäisyysasteikolle. Laitteiden antamassa tutkakuvassa vaaka-akselilla on etäisyys kilometreinä tai metreinä, pystyakseli kuvaa pulssin jännitettä. Pystyakselin avulla kuvataan heijastusten voimakkuutta ja kuvasta voidaan arvioida heijastusten keskinäistä voimakkuutta mittauksessa käytetyt vahvistuksen asetukset huomioon ottaen, mutta yksikköä niille ei määritetä.

Fingridillä käytössä oleva Teleflex M -laite on merikaapeleiden mittaukseen tarkoitettu versio, jonka mittausetäisyydeksi on annettu 320 km. Teleflex M -kaapelitutkassa valittavissa olevat pulssinleveydet ovat välillä 50 ns – 5 m/μs. Teleflex VX -kaapelitutkalla mitattavissa oleva alue ulottuu käyttöohjeen mukaan 1280 kilometriin ja valittavat pulssinleveydet ovat välillä 20 ns – 10 μs [27]. Molemmissa laitteissa etenemisnopeuden puolikkaan arvon voi valita väliltä 10–149,9 m/μs 0,1 m/μs tarkkuudella. Luvussa 5.1 esitettyjen tulosten perusteella molempien laitteiden voidaan todeta yltävän ainakin 200 km mittausetäisyydelle. Lisäksi Norjan ja Alankomaiden välisellä NorNed-HVDC-kaapeliyhteydellä tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että Teleflex VX -kaapelitutkalla voidaan lisälaitteiden avulla todistetusti nähdä kaapelin pään aiheuttama heijastus 580 kilometrin etäisyydellä [28].

Laitteet on tarkoitettu käytettäväksi jännitteettömällä kaapelilla tehtäviin mittauksiin, mistä johtuen ne eivät ole verkossa valmiiksi kytkettyinä, vaan ne kytketään aina erikseen mittauksen ajaksi kaapelin päätteeseen. Kaapelitutkilla voidaan tehdä myös kaapelin referenssimittaus, niin kutsuttu sormenjälkimittaus (fingerprint), eli ehjän kaapelin mittaus. Referenssimittauksella saatua kuvaa voidaan käyttää kaapelin kunnon tarkkailuun säännöllisesti sekä käyttää apuna viankorjauksen yhteydessä tehtyjen jatkosten sijaintien määrittämisessä. Ehjän kaapelin heijastuksista kertovaa kuvaa voidaan käyttää myös apuna vianpaikannuksessa kuten luvussa 4.4 on esitetty. Tämän työn yhteydessä tehdyt TDR-mittaukset ovat referenssimittauksia ja niistä kerrotaan tarkemmin luvussa 5.1.

Työn keskittyessä tasasähköyhteyksiin, vianetsintöjen yhteyksissä tehdyt mittaukset sekä työn yhteydessä tehdyt mittaukset suoritettiin vaiheen ja maan (L–N) välille. Käytetyillä laitteilla voidaan suorittaa myös vaiheiden välisiä (L–L) mittauksia.

TDR-mittauksen tulos, tutkakuva, on nähtävissä tutkalaitteen näytöltä heti mittauksen tapahduttua. Mittaustulokset voidaan siirtää laitteista tiedostoina tietokoneelle ja analysoida erillisen Winkis-ohjelman avulla. Winkis on kaapelitutkan kuvien

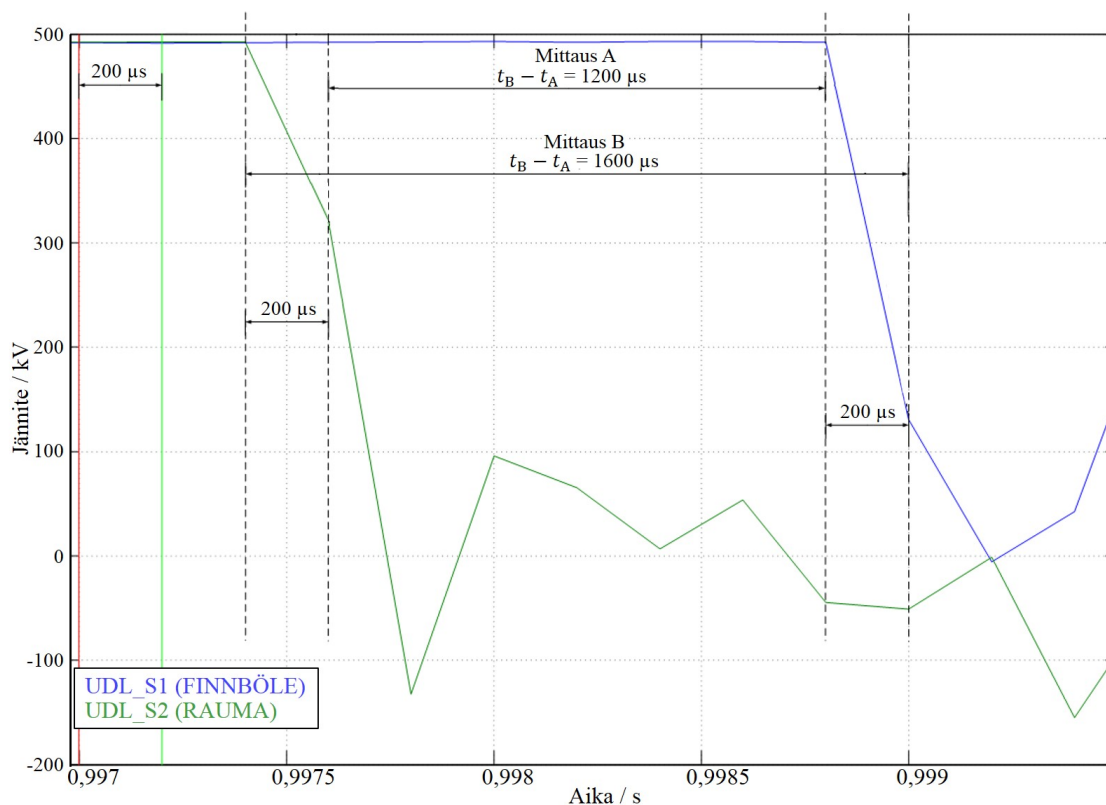
analysointiin tietokoneelle tarkoitettu erityisohjelma. Kummassakin kaapelitutkassa on lisäksi oma sisäinen muisti, johon mittaustulokset voidaan tallentaa tarkasteltaviksi myöhemmin laitteen näytöltä tai odottamaan tallennusta tietokoneelle.

4.6 Vikapaikan laskenta häiriötallentimen tiedoista

4.6.1 Laskennan periaate

Häiriötallennin on laite, joka tallentaa muun muassa häiriötilanteen aikana yhteydellä esiintyvät jännite- ja virtasignaalit. Vikapaikan laskemiseen käytetään häiriötallentimen keräämää jännitetietoa. Jännitemittauksen mittauspisteet sijaitsevat suuntaaja-aseilla resistiivisen jännitteenjakajan maapotentiaalin puolella. Häiriötallennettietojen keräyksessä näytteistystaajuus kuitenkin rajoittaa vikapaikan laskennan tarkkuutta merkittävästi. Jotta tallentimen keräämien tietojen perusteella saataisiin laskettua esimerkiksi TDR-mittauksen vikapaikka-arvion kanssa vertailukelpoinen arvio vikapaikalle, tarvittaisiin huomattavasti suurempi näytteistystaajuus.

Nykyisellä näytteistystaajuudella häiriötallentimen tietoja voidaan käyttää apuna vian aiheuttajan päättelyssä sekä suuntaa antavana arviona vikapaikan sijainnista. Kuvassa 10 on esitetty marraskuussa 2014 Fenno-Skan 2 -yhteydellä olleen vian yhteydessä tallennetut jännitesignaalit. Vihreällä on esitetty Raumalla mitattu jännite ja sinisellä Ruotsin Finnbölessä mitattu jännite. Signaalien tallennus perustuu synkronoidun aikaleiman käyttöön, mikä mahdollistaa eri päistä kerättyjen tietojen vertailun samalla aikaskaalalla. Lähempänä vikapaikkaa olevassa yhteyden päässä jännite laskee ensin, jolloin kuvaajasta voidaan päätellä vian tapahtuneen yhteyden Suomen puolella. Tarkempaa paikkatietoa vialle laskettaessa tulee huomioida näytteistystaajuus ja kellojen synkronivirhe. Vikatietojen näytteistystaajuus on kyseisellä yhteydellä 5 kHz, jolloin näytteidenottoväli on 200 μ s. Kulkuaallot ehtivät tässä ajassa kulkea kymmeniä kilometrejä sekä kaapelissa että avojohdolla. Mittauspisteiden kellojen synkronivirheestä aiheutuvan mittausvirheen voidaan olettaa olevan pieni suhteessa näytteistystaajuuden aiheuttamaan mittausvirheeseen, joten se jätetään tarkastelussa huomiotta.



Kuva 10: Häiriötallentimen tallentamat jännitetiedot Fenno-Skan 2 -yhteydellä olleen vian yhteydessä marraskuussa 2014. Mittaukset A ja B kuvaavat jännitteen alenemisen välistä suurinta ja pienintä aikaeroa.

Jännitetietojen kuvaajaan on merkitty mittaukset A ja B, jotka kuvaavat jännitteen alenemisen välistä aikaeroa, josta voidaan laskea vikapaikalle etäisyys. Jännitteen alenemisen todellinen tapahtumishetki voi teoriassa olla milloin tahansa käyttöjännitteen ja ensimmäisen alentuneen jännitteen mittauksen välisenä aikana. Mittauksessa A on mitattu lyhin mahdollinen aikaero jännitteiden alenemisen välille, jonka perusteella voidaan laskea kauimmainen mahdollinen etäisyys vikapaikalle. Mittauksessa B on mitattu pisin mahdollinen aikaero jännitteiden alenemisen välille, jolloin mittaus tulokseksi saadaan lähin mahdollinen vikapaikan etäisyys. Mittauksessa A aikaero on 1200 μs ja mittauksessa B 1600 μs . Aikaeroa käyttäen voidaan laskea vikapaikan etäisyys l_A etäisyytenä päähän, josta jännite laski ensin:

$$l_A = \frac{L - (t_B - t_A) \cdot v}{2} \quad (8)$$

missä L on johdon pituus, v kulkuaika johdolla ja $t_B - t_A$ jännitteen alenemisen ajankohdan ero johdon päiden välillä. Yhtälön johto on esitetty liitteessä A. Vikapaikan laskemisen on periaate on yksinkertainen, mutta monimutkaisempaa siitä tulee, kun otetaan huomioon tarkasteltavan tasasähköyhteyden koostuminen avojohdosta ja kaapelista. Avojohtolla kulkuaalto etenee huomattavasti nopeammin kuin kaapelissa,

jolloin mitattu jännitteiden laskemisajankohtien välinen erotus tulee erotella kullekin johtotyypille erikseen. [29]

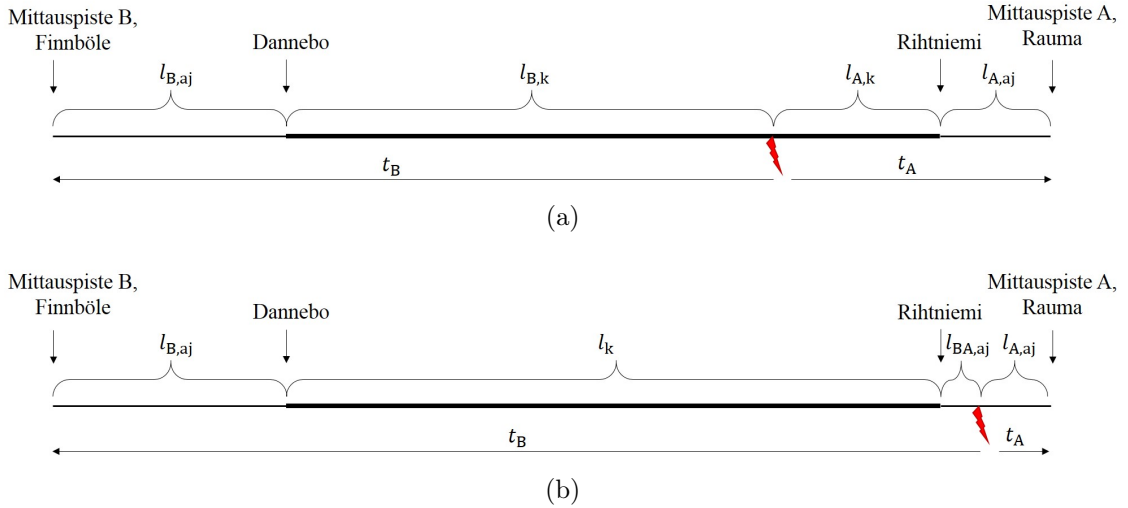
4.6.2 Laskennan tarkkuus

Näytteistysvälin pituuden vaikutusta mittausten perusteella lasketun vikapaikan tarkkuuteen on havainnollistettu taulukossa 4. Kulkuaallon etenemisnopeutena kaapelissa on käytetty valmistajan mittaamaa arvoa $144 \text{ m}/\mu\text{s}$ ja avojohdoilla etenemisnopeutta $265 \text{ m}/\mu\text{s}$ [18]. Taulukossa esitetyistä arvoista nähdään, että kahden näytteen välissä kulkuaalto ehtii kulkea koko Suomen puoleisen avojohdo-osuuden päästä päähän ja Ruotsin puoleisellakin avojohdolla noin 75 % johdon pituudesta. Vikojen paikannustarkkuus menetelmällä onkin lähinnä suuntaa-antava.

Taulukko 4: Häiriötallentimen tallentamien tietojen näytteistystaajuuden vaikutus vikapaikan laskennan tarkkuuteen Fenno-Skan 2 -yhteyden tapauksessa.

	Avojohto Finnböle–Dannebo	Kaapeli Dannebo–Rihtniemi	Avojohto Rihtniemi–Rauma
Johdon pituus	70,0 km	196,0 km	33,0 km
Nopeuserroin (v/c)	0,88394	0,48033	0,88394
Kulkuaika johdon päästä päähän	264,15 μs	1361,12 μs	124,53 μs
Näytteiden välillä kuljettu matka	53,0 km	28,8 km	53,0 km

Vikapaikan laskentaa varten tehtävässä erottelussa verrataan ensin taulukossa 4 esitetyjä johto-osuuksien päästä päähän kulkuaikoja kuvassa 10 on esitettyihin aikaerojen mittaustuloksiin. Mitä lähempänä yhteyden keskikohtaa vikapaikka on, sitä lyhyempi on aikaerojen mittaustulos. Koska molemmat mittaustulokset ovat lähellä aikaa, joka kulkuaallolta kuluu kaapelin päästä päähän kulkemiseen, voidaan olettaa vikapaikan olevan kaapelin pään lähellä. Kun huomioidaan lisäksi jännitteen aleneminen ensin Suomen puoleisessa mittauspisteessä, voidaan vian olettaa olevan lähellä kaapelin päätettä Suomen puolella. Tätä oletusta vastaavat vikatilanteet ja kulkuaallon etenemisajat on havainnollistettu kuvassa 11. Kuvassa 11(a) on esitetty tilanne, jossa punaisella salamalla esitetty vika on kaapelipäätteen Ruotsin puolella, eli kaapelilla ja kuvassa 11(b) kaapelipäätteen Suomen puolella, eli avojohdolla.



Kuva 11: Häiriötallentimen tietojen perusteella tehdyt vikatilanteen alkuoletusta havainnollistavat kuvat. Kuviin on merkitty eri vikatilanteissa tarvittavat pituuserittelyt sekä vian kulkuajat havainnointipisteisiin. Punainen salama kuvaa vikapaikkaa. (a) Havainnekuva vikatilanteesta kaapelilla ja (b) Suomen puoleisella avojohdolla.

Kuvassa 11 esitetyissä symboleissa t ja l kuvaavat aikaa ja pituutta. Alaindeksissä A kuvaa vikapaikan mittauspisteen A puolelle jäävää osuutta, vastaavasti alaindeksi B mittauspisteen B puolelle jäävää osuutta. Lisäksi alaindeksillä aj ja k merkitään avojohdolle ja kaapelille sijoittuvia osuuksia. Kuvassa 11 esitettyjä pituuserittelyjä hyväksi käyttäen saadaan yhtälön (8) avulla laskettua kuvassa 10 esitettyjä mittauksia A ja B vastaavat vikapaikkojen etäisyydet, kun tiedetään kulkuaallon päästä päähän etenemiseen kuluvat ajat $t_{B,aj}$, t_k ja $t_{A,aj}$ kullekin johto-osuudelle. Liitteessä B on esitetty vikapaikkojen etäisyyksien yhtälöiden johto. Taulukossa 5 on esitetty laskelmat vikapaikkojen etäisyyksiksi. Yhtälöissä esiintyvät v_k ja v_{aj} kuvaavat kulkuaaltojen etenemisnopeuksia avojohdolla ja kaapelilla. Yhtälöissä L_k ja $L_{A,aj}$ viittaavat kaapelin ja Suomen puoleisen avojohdon kokonaispituuksiin ja $l_{A,k}$ ja $l_{BA,aj}$ vikapaikan etäisyyteen kaapelipääteestä.

Taulukko 5: Häiriötallentimen tietojen perusteella lasketut vikapaikat oletettaessa vian olevan kaapelilla tai avojohdolla. Sulkuihin merkityt tulokset eivät ole mielekkäitä vian paikannuksen kannalta. Yhtälöissä esiintyvät symbolit vastaavat kuvassa 11 esitettyjen pituuksien mukaisia johto-osuuden päästä päähän kulkuajoja, lisäksi L_k ja $L_{A,aj}$ viittaavat kaapelin ja Suomen puoleisen avojohdon kokonaispituuksiin ja v kulkuaallon etenemisnopeuteen johdolla.

	Yhtälö vikapaikan etäisyydelle	$t_B - t_A$	Vikapaikan etäisyys johdolla
Vika kaapelilla	$l_{A,k} = \frac{L_k - (t_B - t_A - t_{B,aj} + t_{A,aj}) \cdot v_k}{2}$	1200 μ s 1600 μ s	21,7 km (-7,1 km)
Vika avojohdolla	$l_{BA,aj} = \frac{L_{A,aj} - (t_B - t_A - t_{B,aj} - t_k) \cdot v_{aj}}{2}$	1200 μ s 1600 μ s	(-39,8 km) 13,2 km

Saaduista tuloksista voidaan päätellä, että kummallekin mittaukselle A ja B saadaan mielekäs tulos vain toisessa vikatilanteessa. Sulkuihin merkityt tulokset vikapaikan etäisyydelle eivät ole mielekkäitä, koska ne viittaavat vian olevan kaapelipäätteen toisella puolella. Kaapelipäätteen eri puolilla kulkuaallon etenemisnopeus on eri, eikä näin ollen saatu arvo etäisyydelle ole oikea. Oletettaessa vian olevan kaapelilla, etäisyydeksi mittauksen B tilanteessa saadaan negatiivinen pituus, mikä viittaa vian olevan kaapelipäätteen toisella puolella, eli avojohdolla. Vastaavasti, kun oletetaan vian olevan avojohdolla, saadaan mittauksen A tilanteessa negatiivinen pituus, mikä viittaa vian olevan kaapelilla. Vaikka kyseiset tulokset eivät ole lukuarvoina mielekkäitä, antavat ne kuitenkin aiempia oletuksia tukevia viitteitä vian sijainnista. Taulukossa 5 esitetyt mielekkäät tulokset vikapaikan sijainnille ovatkin: mittauksen A mukaan 21,7 km kaapelipäätteestä kaapelille ja mittauksen B mukaan 13,2 km kaapelipäätteestä avojohdolle.

Häiriötallentimen tiedoilla suoritettujen päätelmien ja laskelmien perusteella saadaan haarukoitua vikapaikka yhteyden Suomen puoleisen kaapelipäätteen läheisyydessä olevaksi 34,9 km:n tarkkuudella. Saadut numeeriset arvot kuvaavat mittausten perusteella laskettavia vikapaikan enimmäisetäisyyksiä kaapelipäätteestä. Tällöin voidaankin todeta vian olevan noin 13–20 km etäisyydellä kaapelipäätteestä, mutta johto-osuutta ei voida määrittää.

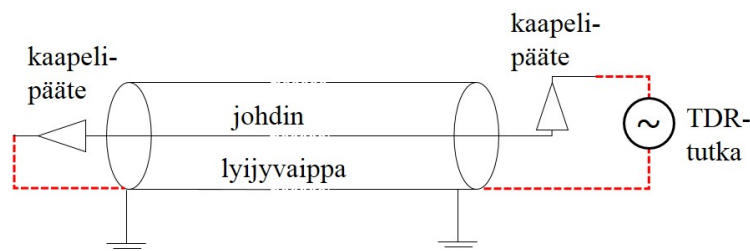
5 Ehjien kaapeleiden referenssimittaukset ja toteutuneet vianpaikannukset

5.1 Ehjän kaapelin TDR-mittaukset Fenno-Skan-yhteyksillä

Kesällä 2015 suoritettiin Fenno-Skan-yhteyksien vuosihuoltojen yhteydessä ehjän kaapelin TDR-mittaukset yhteyksien merikaapeleille. Mittauksien avulla pidetään yllä kaapelitutkien käyttötaitoa sekä saadaan vertailukelpoista historiatietoa kaapeleista. Tutkakuvia vertailemalla voidaan saada tietoa kaapelissa mahdollisesti tapahtuneista muutoksista ja niitä voidaan käyttää apuna vianpaikannuksessa kuten luvussa 4.4 todettiin.

5.1.1 Mittausmenettely

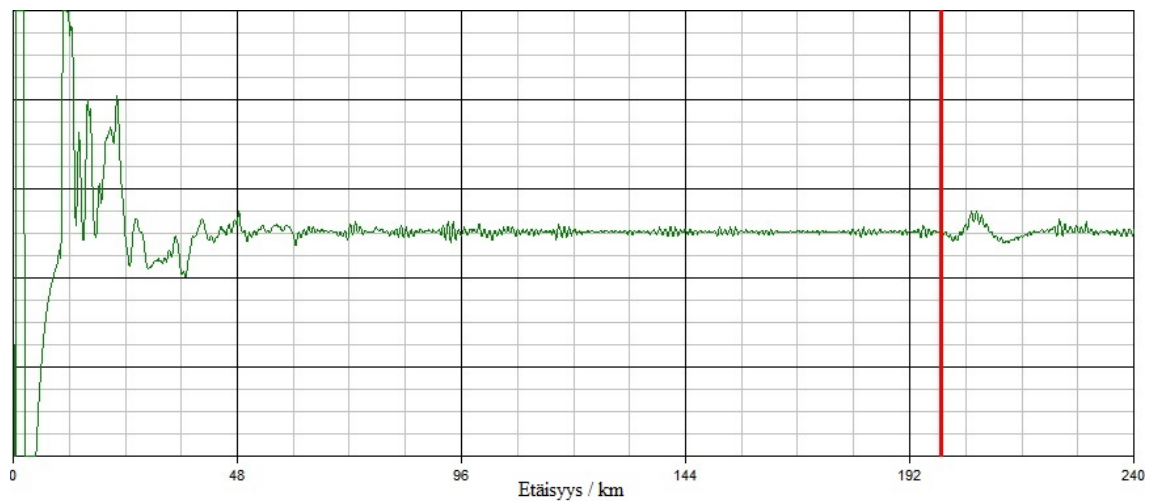
Mittaukset suoritettiin johtimen ja maan ($L-N$) välisenä mittauksena, jonka mitausjärjestelyä on havainnollistettu kuvassa 12. Punaisella katkoviivalla on esitetty mittauksia varten tehdyt kytkennät. Kummassakin mitatussa kaapelissa lyijyvaippa on maadoitettu, joten sitä käytettiin myös mittauksissa päiden välisenä maadoitusreitteinä. Merikaapelin johdin kulkee kaapelipäätteen läpi, josta se on kytketty edelleen kiskolla erottimen kautta avojohtoon. Mittauksissa käytetty kytkentäpiste johtimeen kytkettävälle mittauskaapelille on kiskolla ennen erotinta.



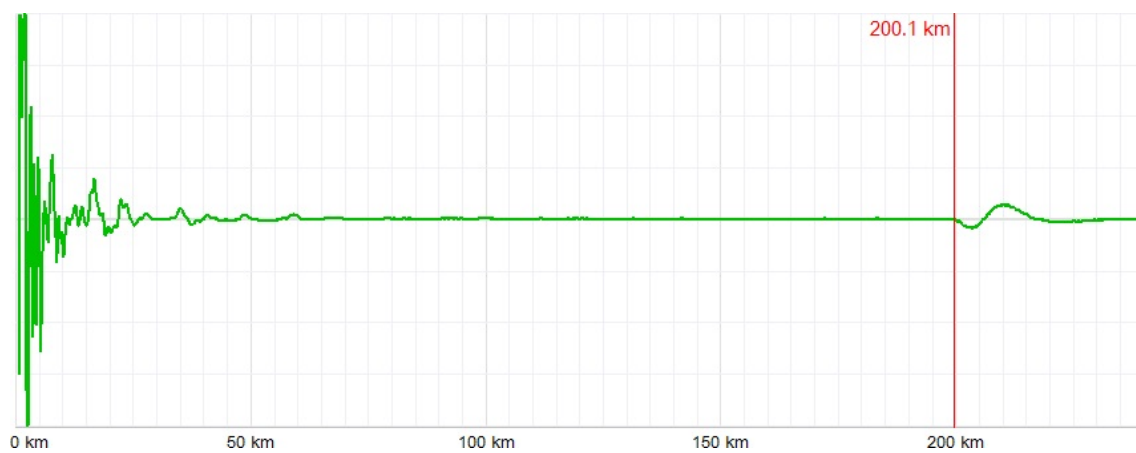
Kuva 12: Fenno-Skan-merikaapeleiden TDR-mittauksissa käytetty mitausjärjestely. Mittauksia varten tehdyt kytkennät on esitetty punaisella katkoviivalla.

Kaapeleiden hankinnan yhteydessä valmistaja on suorittanut tunnetun mittaisille ehjille kaapeleille TDR-mittauksen, jonka perusteella kulkuaallon nopeus kaapeleissa on määritelty. Näitä arvoja käytettiin myös työn yhteydessä tehdyissä Fenno-Skan-yhteyksien mittauksissa. Fenno-Skan 1 -merikaapelille määritetty $v/2$ -arvo on $71,2 \text{ m}/\mu\text{s}$ ja Fenno-Skan 2 -merikaapelille $72,0 \text{ m}/\mu\text{s}$. Mittaukset tehtiin kahdella kaapelitutkalla, jolloin niistä saatuja mittaustuloksia voidaan arvioida tarkemmin.

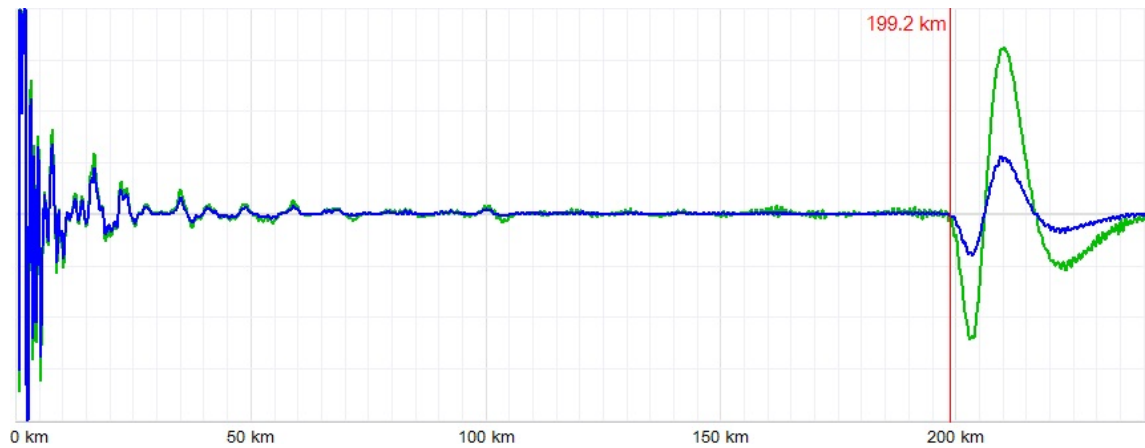
Mittauksien aikana yhteys, jolle ei suoritettu testejä, oli normaalissa tehonsiirrossa. Yhteydet sijaitsevat lähekkäin, mistä johtuen käytössä oleva yhteys aiheutti testattavana olleen kaapelin mittaustuloksiin kohinamaista häiriötä. Ulkoisten häiriötekijöiden vaikutus pyrittiin minimoimaan käyttämällä laitteiden keskiarvoistustointia. Teleflex M -kaapelitutka laski keskiarvon 32 mittauksesta ja Teleflex VX 256 mittauksen keskiarvon. Mittauksista saadut tutkakuvat on esitetty kuvissa 13–17.



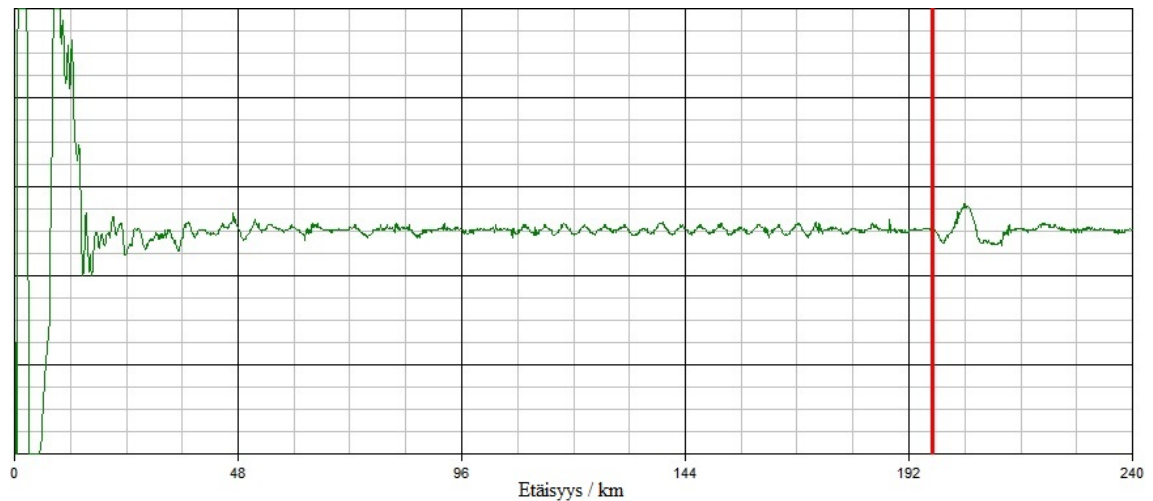
Kuva 13: Fenno-Skan 1 -kaapelin TDR-mittaus Teleflex M -kaapelitutkalla. Kaapelin päätä merkitsevä punainen pystyviiva kohdassa 198,6 km.



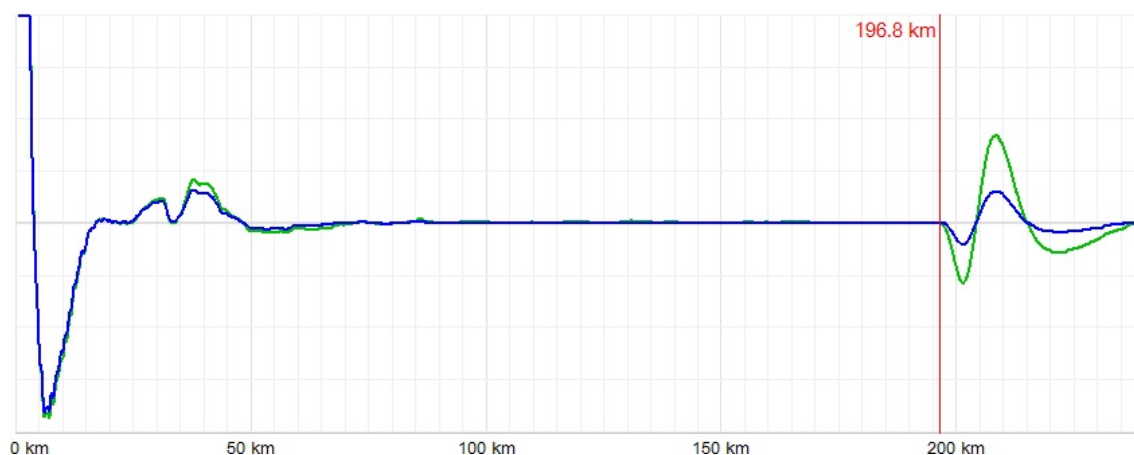
Kuva 14: Fenno-Skan 1 -kaapelin TDR-mittaus Teleflex VX -kaapelitutkalla. Kaapelin päätä osoittava punainen pystyviiva kohdassa 200,1 km.



Kuva 15: Fenno-Skan 1 -kaapelin TDR-mittaus Teleflex VX -kaapelitutkalla. Sininen käyrä käyttäen 55 %:n suhteellista vahvistusta, vihreä 95 %:n suhteellista vahvistusta. Punainen pystyviiva merkitsee kaapelin päätä kohdassa 199,2 km.



Kuva 16: Fenno-Skan 2 -kaapelin TDR-mittaus Teleflex M -kaapelitutkalla. Kaapelin päätä merkitsevä punainen pystyviiva kohdassa 197,0 km.



Kuva 17: Fenno-Skan 2 -kaapelin TDR-mittaus Teleflex VX -kaapelitutkalla. Sininen käyrä käyttäen 50 %:n suhteellista vahvistusta, vihreä 90 %:n suhteellista vahvistusta. Kaapelin päätä merkitsevä pystyviiva kohdassa 196,8 km.

5.1.2 Mittausten tarkkuuden arviointi

Kaapeleiden TDR-mittauksessa käytettiin kahta kaapelitutkaa, jotta niiden antamia tuloksia voitiin verrata keskenään. Taulukossa 6 on esitetty TDR-mittauksissa saadut tulokset kaapelien pituudelle. Laitteiden näytöltä luetut arvot ovat mittausten keskiarvoja. Näytöltä luetujen Teleflex M -tutkalla tehtyjen mittausten keskihajonta on 1,57 km ja Teleflex VX -tutkalla 0,49 km. Mittaukset tallennettiin laitteiden muistiin tietokoneella tehtävää analysointia varten. Tietokoneohjelmalla mittauskuvien tulkinta on mahdollista tehdä hieman tarkemmin kuin suoraan laitteiden näytöltä, koska Winkis-tietokoneohjelmaa käytettäessä kuvan suurentamismahdollisuudet ovat paremmat ja suurennettu kuva tarkempi. Mahdollisen mittaustilanteessa tehtyjen virheiden ja epätarkkuuden arvioimiseksi kaapelien pituudet arvioitiin myös tietokoneohjelmaa käyttäen.

Taulukko 6: Fenno-Skan -kaapeleiden pituudet TDR-mittauksella määritettynä.

Mittaustapa	Fenno-Skan 1 (200,0 km)	Fenno-Skan 2 (197,3 km)
Teleflex M	laitteen näytöltä luettu	199,4 km
	tietokoneen näytöltä luettu	198,6 km
Teleflex VX	laitteen näytöltä luettu	199,5 km
	tietokoneen näytöltä luettu	199,5 km

Mittaustuloksista voidaan huomata, että molemmilla kaapelitutkilla saadaan hyvin samanlaiset tulokset kaapelien pituudeksi. Tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan myös verrattaessa kaapelitutkan näytöltä arvioitua tulosta tietokoneen näytöltä

arvioituun tulokseen. Saatujen tulosten yhdenmukaisuus lukutavasta riippumatta on tärkeää vianpaikannuksen aikana, jolloin ei välttämättä ole mahdollista verrata laitteen näytöltä ja tietokoneohjelmalla arvioituja tuloksia, vaan vikapaikka on arvioitava suoraan laitteen näytöltä.

Asennuspituus ja jatkokset huomioiden Fenno-Skan 1 -kaapelin pituudeksi arvioidaan $200 \text{ km} \pm 2 \text{ km}$. Puutteellisen asennus- ja korjausdokumentoinnin takia kaapelin tarkkaa pituutta ei tiedetä. Fenno-Skan 2 -merikaapelin pituus on $197,3 \text{ km}$ sadan metrin tarkkuudella. Mittauksissa saadut tulokset ovat hyvin lähellä Fenno-Skan 2 -kaapelin laskettua pituutta, Fenno-Skan 1 -kaapelin pituudessa ero arvioidun ja mitatun pituuden välillä on suurempi, mutta kuitenkin melko lähellä pituuden parasta arviota.

Keskiarvoistuksen avulla mittauksista voitiin poistaa erityisesti suuret yksittäiset häiriöt ja kaikissa tutkakuvissa on selkeästi havaittavissa maadoitetun kaapelin pään aiheuttama negatiivinen heijastus. Kuten kuvassa 12 on esitetty, mitattavan kaapelin johdin on loppupäässä maadoitettu kaapelipäätteen jälkeen. Kuvissa näkyvät loppupään heijastukset aiheutuvatkin kaapelijohtimen muuttumisesta kaapelipäätteen jälkeiseksi kiskoksi ja muutoskohdan impedanssimuutoksista kaapelin pääteasemalla.

Mittauksissa esiintyvä pieni kohina aiheuttaa kuitenkin epätarkkuutta tarkempaan mittaustulosten arviointiin. Tarkennettaessa tutkakuvaa kaapelin pään heijastuskohdan tarkemmaksi määrittämiseksi mittauksen tuloksissa esiintyvät pienet häiriöt hankaloittavat heijastuksen alkukohdan määrittämistä. TDR-mitattujen kaapelien pituuteen verrattuna tästä aiheutuva virhe on kuitenkin melko pieni, noin 100 m . Kuten kuvista 13–17 nähdään, Teleflex VX -tutkalla tehdyissä mittauksissa kohinamaista häiriötä on vähemmän isomman keskiarvoistuksen takia, jolloin myös kaapelin pään heijastuksen alun arviointi on mahdollista tehdä tarkemmin.

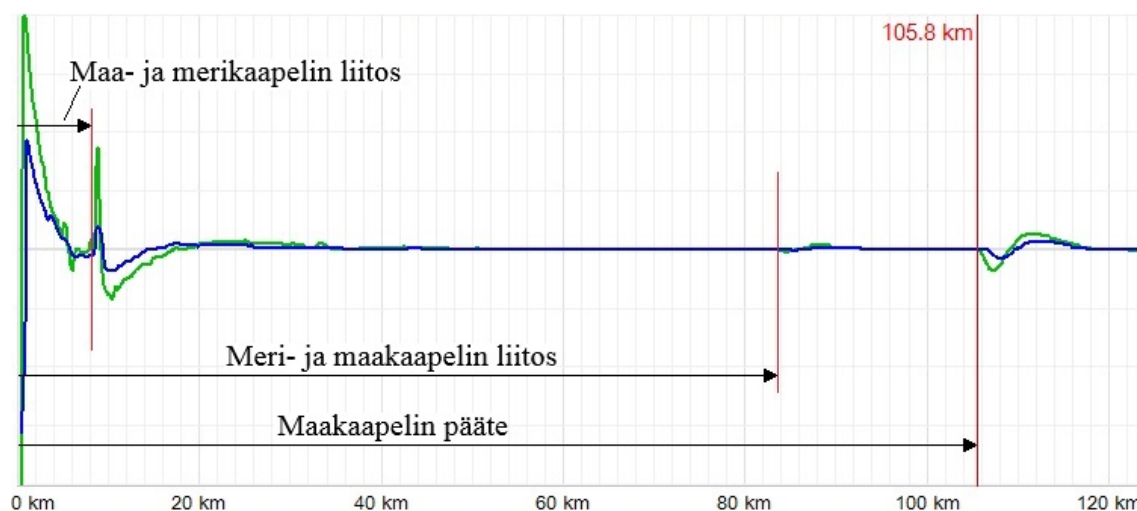
Heijastuksen alun arvioimiseen vaikuttaa myös TDR-mittauksessa käytetty mitatun signaalin vahvistus. Kuvien 13, 14 ja 16 mittauksissa on käytetty vakiovahvistusta, jolloin sekä alku- että loppupään heijastuksia vahvistetaan yhtä paljon. Teleflex VX -tutkalla on mahdollista käyttää myös suhteellista vahvistusta, jolla voidaan kompensoida kaapelin aiheuttamaa vaimennusta. Suhteellista heijastusta käytettäessä TDR-mitattavan kaapelin loppupäästä tulevia heikompia heijastuksia vahvistetaan enemmän kuin alun heijastuksia. Kuvissa 15 ja 17 on havainnollistettu suhteellisen vahvistuksen vaikutusta mittauksen tuloksiin. Suhteellista vahvistusta käyttämällä kaapelin pään aiheuttama heijastus korostuu enemmän, jolloin myös sen alkukohta on helpompi määrittää. Vastaavasti myös kaukana oleva vika erottuu paremmin suhteellisen vahvistuksen avulla.

5.2 Ehjän kaapelin TDR-mittaus EstLink 1 -yhteydellä

EstLink 1 -kaapeliyhteydelle on suoritettu ehjän kaapelin TDR-mittaus Teleflex VX -kaapelitutkalla Viron Harkusta kesällä 2015. Maa- ja merikaapelien yhdistelmälle määritetty $v/2$ -arvo on $83,7 \text{ m}/\mu\text{s}$. Molempien kaapeleiden tutkakuvat on esitetty kuvassa 18. Kuvasta nähdään, että ensimmäinen maa- ja merikaapelin liitoskohta näkyy etäisyydellä $8,5 \text{ km}$ molemmilla kaapeleilla. Kuvassa vihreällä esitetyn kaapelin impedanssimuutosten aiheuttamat heijastukset tutkakuvaan ovat

amplitudiltaan suurempia, kuin sinisellä esitetyn kaapelin heijastukset. Tämä johtuu pääosin mittauksessa käytetyn vahvistuksen voimakkuudesta, joka on ollut vihreällä esitetyn kaapelin mittauksissa -19 dB ja sinisellä esitetyn kaapelin mittauksissa -30 dB. Mittauspulssin leveys on vihreällä esitetyn kaapelin mittauksissa ollut 5 μ s ja sinisellä esitetyn kaapelin mittauksissa 10 μ s, jolloin mittauksen virhemarginaali on hieman suurempi jälkimmäisen mittauksen tapauksessa. Tarkemmin tarkasteltuna kuvasta voidaan erottaa meri- ja maakaapelin liitoskohdan aiheuttama heijastus, joka vihreällä käyrällä alkaa kohdassa $83,9$ km ja sinisellä käyrällä kohdassa $85,1$ km. Vastaavasti kaapelipäätteen aiheuttama heijastus näkyy kohdassa $105,8$ km vihreällä käyrällä ja kohdassa $106,8$ km sinisellä käyrällä.

TDR-mittauksen mukaan maakaapeleiden pituudet ovat $8,5$ km Virossa ja $21,7$ – $21,9$ km Suomessa. Saadut arvot ovat melko lähellä maakaapeliyhteyksille annettuja pituuksien arvoja 9 km Virossa ja 22 km Suomessa. Merikaapelille annettu pituuden arvo on 75 km, joka myös on melko lähellä mittauksista pituudeksi saatua arvoa $75,4$ – $76,6$ km. Yli kilometrin suuruinen pituusero kaapeleiden välillä on suuri kun otetaan huomioon, että kaapelit on laskettu samaan kaapeliojaan. Tällöin kaapeleiden reitin pitäisi olla erittäin lähellä toisiaan ja näin ollen pituuksien tulisi olla lähes yhtä suuret. Saatu pituusero todennäköisimmin aiheutuu mittauksissa käytetyn pulssinleveyden ja vahvistuksen eroista. Leveämmällä pulssinleveydellä laitteen virhemarginaali on suurempi ja pienemmät muutokset eivät kuvaudu yhtä tarkasti kuvaajaan. Lisäksi erittäin pienen vahvistuksen takia heijastuksien alkukohtia on hankalampi arvioida. Heijastuksen alkukohta ei erotu tutkakuvassa yhtä tarkasti heijastuksen ollessa amplitudiltaan pieni ja laitteen tallentaman kuvan tarkkuuden ollessa rajallinen.

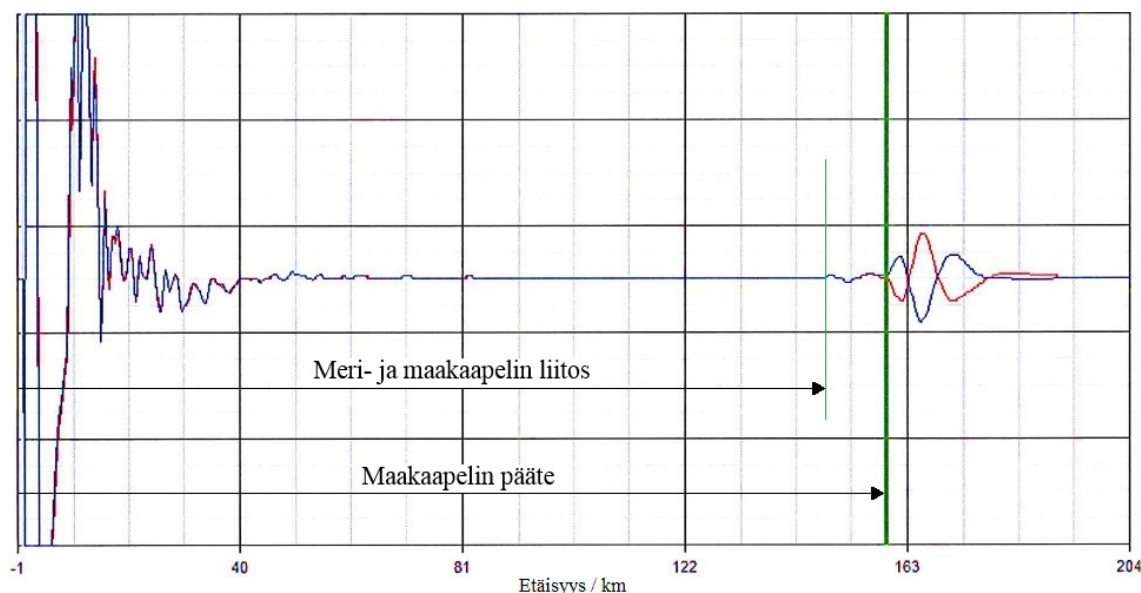


Kuva 18: Ehjän EstLink 1 -kaapelin TDR-mittaus Teleflex VX -kaapelitutkalla vuonna 2015. Mittaus on suoritettu Harkusta kaapelipäätteeltä, loppupäästään oikosuljetun kaapeliyhteyden kummallekin kaapelille.

5.3 Ehjän kaapelin TDR-mittaus EstLink 2 -yhteydellä

EstLink 2 -kaapeliyhteydellä suoritettiin TDR-mittaus yhteyden valmistumisen yhteydessä syksyllä 2013. Kuvassa 19 esitetty mittaus on suoritettu Nikuvikenin kaapelipäätteeltä Teleflex M -kaapelitutkalla. Mittaus on suoritettu sekä loppupäästä avoimelle yhteydelle (sininen käyrä) että loppupäästä oikosuljetulle yhteydelle (punainen käyrä). Tällöin saadaan paremmin näkyviin kaapelin pään aiheuttaman heijastuksen alkukohta, etenkin, kun loppupäässä olevan maakaapelin liitoskohdan aiheuttama heijastus tutkakuvaan on pitkä suhteessa maakaapelin pituuteen. Samalla lisäksi varmistutaan, että havaittu heijastus on kaapelin pään aiheuttama, eikä muusta impedanssimuutoksesta aiheutuva heijastus.

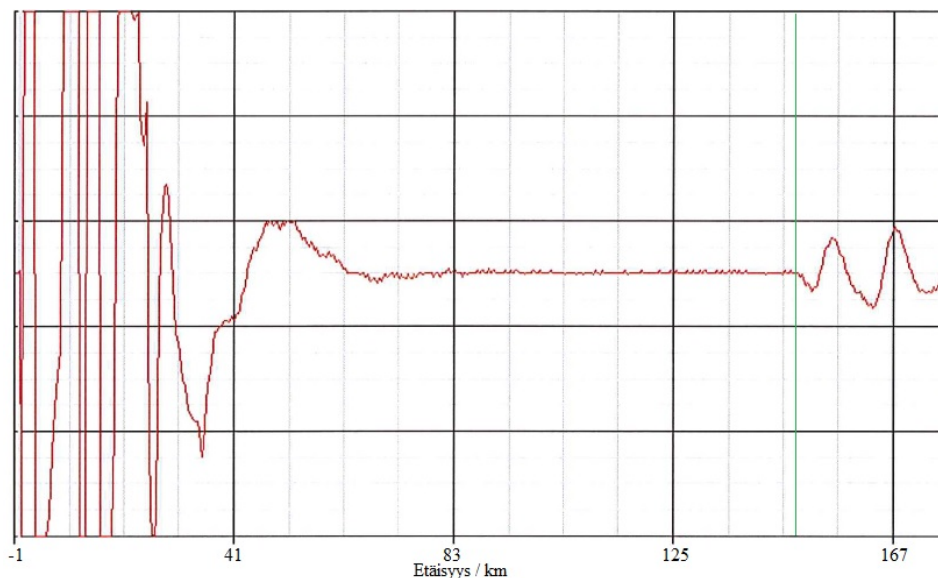
EstLink 2 -yhteyden kaapelikokonaisuuden pääpiirille valmistajan määrittämä kulkuaallon etenemisnopeus on $75,9 \text{ m}/\mu\text{s}$. TDR-mittaus on suoritettu $5 \mu\text{s}$ pulsinleveydellä ja 40 dB vahvistuksella, jolloin myös meri- ja maakaapelin liitoskohta erottuu melko hyvin. Meri- ja maakaapelin liitoskohdan aiheuttama heijastus on kuvasta arvioiden kohdassa $147,9 \text{ km}$ ja maakaapelin päätte kohdassa $159,2 \text{ km}$.



Kuva 19: Ehjän EstLink 2 -kaapelin pääpiirin TDR-mittaus Teleflex M -kaapelitutkalla vuonna 2013. Mittaus on suoritettu Nikuvikenistä kaapelipäätteeltä, punainen käyrä kuvaa loppupäästään oikosuljetun kaapelin mittausta ja sininen käyrä mittausta kaapelin pään ollessa avoin. Maakaapelin liitoskohta kuvasta arvioiden noin 148 km etäisyydellä, kaapelipäätte etäisyydellä 159 km .

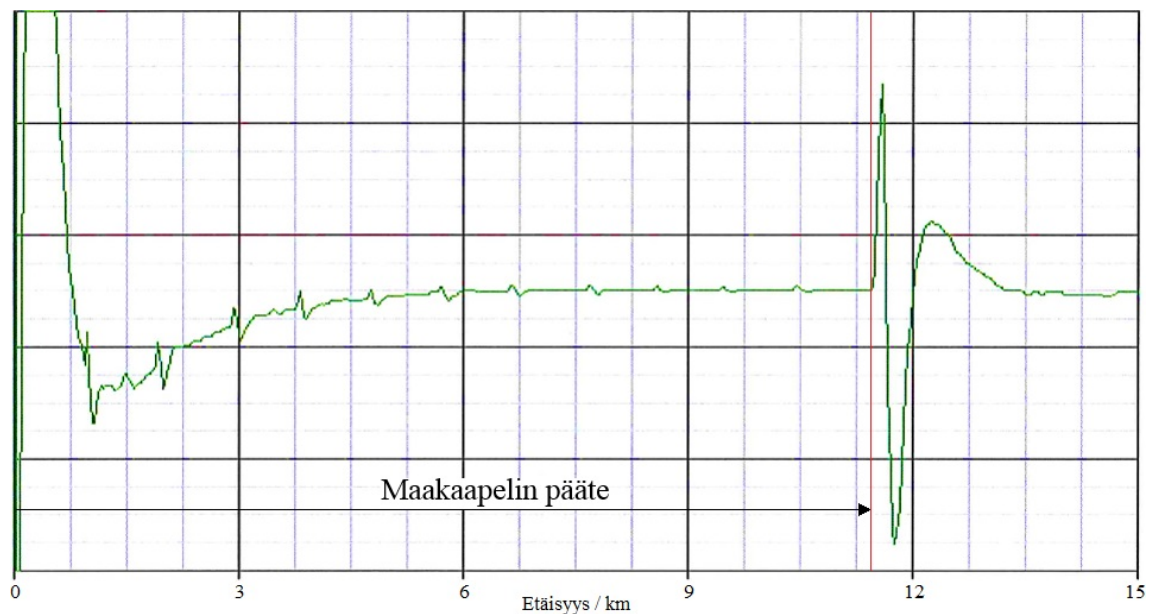
Yhteyden paluupiirille on myös suoritettu TDR-mittauksia, joista parhaimmat tulokset on saatu mittaamalla maakaapeliosuuden paluukaapeli ja merikaapelin paluupiiri erikseen. Mittaukset on suoritettu maa- ja merikaapelin liitokselta Virossa. Kuvassa 20 on esitetty merikaapelin paluupiirin mittausta ja kuvassa 21 maakaapelin paluupiirin mittausta.

Merikaapelin paluupiirin TDR-mittauksessa vahvistus on ollut suuri, 54 dB, mistä johtuen lähes puolet kaapelista jää sokealle alueelle. Kuvaajaan on saatu näkymään kaapelin päätteen heijastukselta vaikuttava heijastus melko oikealle 148,7 km etäisyydelle, mutta heijastusta ei kuitenkaan ole pystytty vahvistamaan kaapelin pään aiheuttamaksi heijastukseksi. Muissa merikaapelin paluupiiristä tehdyissä TDR-mittauksissa loppupään aiheuttamaa heijastusta ei ole pystytty havaitsemaan, joten täyttä varmuutta mittaustekniikan sopivuudesta EstLink 2 -kaapelin merikaapelin paluupiirille ei ole saatu.



Kuva 20: Ehjän EstLink 2 -merikaapelin paluupiirin TDR-mittaus syksyllä 2013. Vihreällä pystyviivalla merkittyä etäisyydellä 148,7 km näkyvää heijastusta ei ole pystytty varmistamaan kaapelin pään aiheuttamaksi heijastukseksi.

Kuvassa 21 esitetyssä maakaapelin paluupiirin tutkakuvassa näkyy selkeästi sekä kaapelin päate etäisyydellä 11,4 km että maakaapelissa olevat asennusliitoskohdat noin kilometrin välein. Mittauksissa käytetty $v/2$ -arvo on 74,1 m/ μ s ja käytetty pulssinleveys 500 ns, jolloin mittauksen virhemarginaali on 32 m \pm 1 m.



Kuva 21: Ehjän EstLink 2 -maakaapelin paluupiirin TDR-mittaus Virossa syksyllä 2014. Maakaapelin pääte etäisyydellä 11,4 km, asennusliitoksista aiheutuvat pienet heijastukset erottuvat kaapelin varrella noin kilometrin välein.

5.4 Toteutuneet vianpaikannukset

Helmikuussa 2012 Fenno-Skan 2 -yhteydellä tapahtui maasulkuna ilmennyt vika. Yhteyden molemmista päistä tehtyjen open-line-testien perusteella vika paikannettiin merikaapelille. Rihtniemen kaapelipäätteeltä tehdyn TDR-mittauksen perusteella vikapaikka paikannettiin noin 40 km etäisyydelle Ruotsin rannikosta. Kuvassa 22 esitetään Teleflex M -kaapelitutkalla otettu tutkakuva vioittuneesta kaapelista. Kuvasta arvioituna vikapaikka on noin 154 km etäisyydellä Suomesta, eli 42 km etäisyydellä Dannebon kaapelipäätteestä. Vianselvityksen yhteydessä tutkakuvan perusteella vikapaikka määritettiin 39 km etäisyydelle Ruotsin rannikosta. Kaapelitutkan virhemarginaali on käyttöohjeen mukaan tutkimuksessa käytetyllä 5 μ s:n pulssinleveydellä 320 m \pm 1 m.



Kuva 22: Vikapaikan TDR-mittaus Teleflex M -kaapelitutkalla helmikuussa 2012 Fenno-Skan 2 -kaapelilla. Vikapaikkaa osoittava punainen pystyviiva on kohdassa 154 km ja kaapelipäätettä osoittava punainen pystyviiva kohdassa 196 km.

Merellä tehdyn kaapelin visuaalisen tarkastuksen yhteydessä ankkurin aiheuttama vikapaikka löytyi yhdeksän metrin päästä tutkakuvan perusteella lasketusta vikapaikasta. Ottaen huomioon vikapaikan etäisyyden mittauspisteestä ja käytetyn pulssinleveyden virhemarginaalin, voidaan TDR-mittauksen perusteella saatua tulosta pitää erittäin tarkkana.

Tammikuussa 2005 Fenno-Skan 1 -yhteydellä tapahtui maasulkuna ilmennyt vika. Tyhjäkäyvän johdon jännitekokeilla vika paikannettiin merikaapelille. Rihtniemen kaapelipäätteeltä tehdyssä TDR-mittauksessa vika paikannettiin Suomen rannikolle, 2733 m etäisyydelle Rihtniemestä. Todellinen vikapaikka löytyi 12 m päästä mittauksella arvioidusta vikapaikasta. Mittauksessa käytetystä pulssinleveydestä ei ole tietoa, mutta saadun tarkkuuden voidaan siitä riippumatta todeta olevan erittäin hyvä.

Fenno-Skan 1 -yhteydellä on tapahtunut lisäksi kaksi kaapelivikaa. Joulukuussa 2006 tapahtui vika, joka Ruotsin päästä paikannettiin merikaapelille Suomen puoleiseen päähän. Rihtniemen kaapelipäätteeltä tehdyn TDR-mittauksen perusteella vika paikannettiin 8,1 km etäisyydelle kaapelipäätteestä. Helmikuussa 2013 tapahtunut kaapelivika paikannettiin Rihtniemen kaapelipäätteeltä tehdyn TDR-mittauksen perusteella 1,7 km etäisyydelle. Merellä tehdyn tarkan vianpaikannuksen yhteydessä saatua tietoa todellisen vikapaikan sijainnista ja etäisyydestä kaapelipäätteeseen ei ole saatavilla. Saatavilla olevista tiedoista voidaan kuitenkin päätellä vikapaikan olleen lähellä TDR-mittauksen perusteella arvioitua vikapaikkaa.

6 Vianpaikannus uusilla online-vianpaikannusjärjestelmillä

6.1 Yleistä

Vianpaikannukseen offline-menetelmin kuuluu yleensä useita tunteja ja itse mittaukset ja laskelmat vaativat manuaalista työtä. TDR-mittaukseen vaaditaan mittalaitteen erillinen kytkentä kaapelipääteasemalle ja laitteen käytön osaava henkilö paikalle. Online-vianpaikannukseen siirtymisellä pyritään pääsemään eroon aikaavievistä mittaajärjestelyistä. Uusi online-vianpaikannusjärjestelmä on tarkoitettu asentaa pysyvästi tarkkailtavalle yhteydelle, jolloin järjestelmä on jatkuvasti mittaustalvaimudessa. Online-järjestelmän avulla vältytään tiettyjen työvaiheiden tekemiseltä ja nopeutetaan vianpaikannusta, kun järjestelmä pystyy nopeasti vian ilmettyä laskemaan vikapaikan.

Tässä työssä esiteltävien jatkuvassa mittaustalvaimudessa olevien vianpaikannusjärjestelmien toiminta perustuu johdolla ilmenevän vian aiheuttamien kulkuaaltojen mittaukseen. Kaksi esiteltävistä järjestelmistä hyödyntää ensimmäisen mittaustalvaimeseen saapuvan kulkuaaltorintaman paikannusta kahdessa mittaustalvaimessa ja näiden tallentamien GPS-aikaleimojen eroa vikapaikan laskennassa. Kolmas esiteltävä järjestelmä perustuu ensimmäisen saapuvan kulkuaallon ja tämän aiheuttaman edestakaisin heijastuneen kulkuaallon välisen ajan mittaukseen.

Järjestelmien yleisempien esittelyjen yhteydessä viitataan myös kunkin järjestelmän soveltuvuuteen Fenno-Skan 2 -yhteydelle. Tämän esimerkkiihteyden avulla on pyritty havainnollistamaan työssä esitettyjen vianpaikannuslaitteistojen sijoittamista, toimintaa ja tarkkuutta.

6.2 Vertailtavien vianpaikannusjärjestelmien esittely

6.2.1 ABB

Ruotsalais-sveitsiläinen ABB Ltd. (myöhemmin ABB) on varustanut toimittamiaan tasasähköyhteyksiä vianpaikannuslaitteistoilla vuodesta 1978. Ensimmäinen GPS-aikaleiman tai muun synkronoidun aikaleiman käyttöön perustuva vianpaikannusjärjestelmä asennettiin 1988 ja on sittemmin asennettu useille tasasähköyhteyksille ympäri maailmaa. ABB:n LFL/CFL -vianpaikannusjärjestelmä (LFL/CFL: Line Fault Locator/Cable Fault Locator) on kehitetty pitkille yhteyksille. Avojohtoilla vianpaikannus toimii jopa 1300 km pitkillä johtojilla. [30]

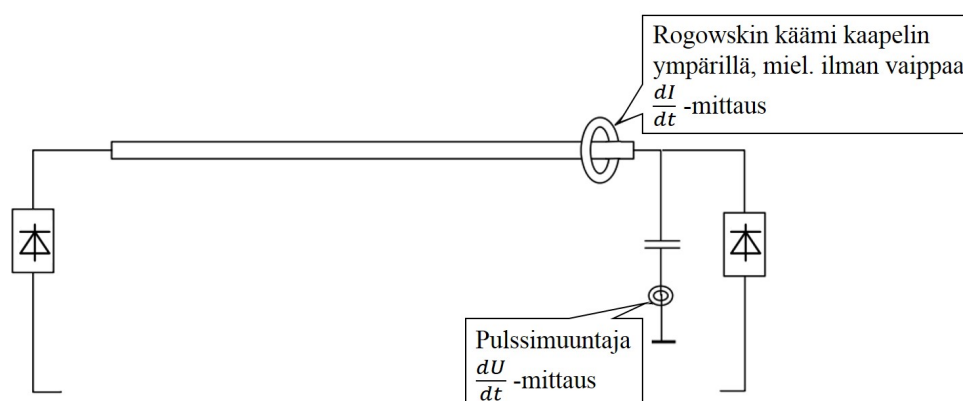
DC-avojohtoilla vianpaikannustarkkuudeksi annetaan noin ± 500 m tai ± 1 pylväs. Kaapeleilla virhe on suurempi kulkuaallon voimakkaamman vaimentumisen takia ja tarkkuudeksi annetaan 250 km pitkällä HVDC-kaapelilla noin ± 1 km. Vianpaikannuksen tarkkuus on riippuvainen tarkkailtavan johdon pituudesta, sillä lyhemmällä johdolla kulkuaaltosignaali vaimenee vähemmän ja sen alkukohta voidaan havainnoida tarkemmin. Kaapelien päätteestä ja pääteasemalla olevista impedanssin muutostalvaimista aiheutuvat ylimääräiset heijastukset hankaloittavat vian aiheuttaman kulkuaaltopulssin havainnointia, mutta tästä ei aiheudu ongelmaa vianpaikannuksen

onnistumiselle. Itse kaapelipääteessä tapahtuvan vian paikannus on myös mahdollista. [30]

Alunperin DC-avojohtojen vianpaikannukseen kehitetty LFL-vianpaikannusjärjestelmää on edelleen kehitetty myös DC-kaapeleilla käytettäväksi CFL-vianpaikannusjärjestelmäksi. Kaapeleita tarkkailevia CFL-vianpaikannusjärjestelmiä on tällä hetkellä asennettuna yhdelle tasasähköyhteydelle, eikä vianpaikannuksen oikeanlaista toimintaa ole vielä käytännön vian yhteydessä päästy toteamaan. Uusia vianpaikannusjärjestelmän asennuksia on suunnitteilla tasasähköyhteyksille joihin kuuluu myös DC-kaapeli. [30]

ABB:n vianpaikannusjärjestelmässä vian havaitsemisen ja vikasignaalin tallentamisen määrittävän laukaisun herkkyyttä on mahdollista säätää kullekin yhteydelle sopivaksi. Testeissä on havaittu, että erityisesti kaapeleita tarkkailtaessa laukaisu on asetettava herkemäksi kuin avojohtojen tapauksessa. Herkästä laukaisusta aiheutuvien mahdollisten väärin vikahavaintojen välttämiseksi järjestelmän on hyvä olla yhteydessä yhteyden suojausjärjestelmään. Tällöin turha vikapaikan laskenta ja siitä tiedottaminen yhteyden operaattorille voidaan välttää. Vianpaikannus tapahtuu tarkkailtavan johdon molemmissa päissä olevien mittauspisteiden avulla. Vianpaikannuksen onnistuminen online-tyyppisesti vian ilmetyä, on riippuvainen mittauspisteiden GPS-kellojen toiminnasta. [30]

Tasasähköyhteydellä, jossa jännitteen mittaamiseen tarvittava galvaaninen yhteys on hankala järjestää mittauspisteillä, erityisesti kaapelipääteasemilla, vianpaikannus voidaan tehdä myös virtamittauksen avulla. Virtamittaukseen käytetään Rogowskin käämiä, joka asennetaan lähelle kaapelin päätettä kaapelin ympärille. Mittalaitteenä käytettävä käämi sijoittuu kaapelin ulkopuolelle, jolloin kaapelin ulkopuolelta tulevat häiriöt yhdistyvät virtamittauksiin jännitemittauksia herkemmin. Tarkemman mittauksen mahdollistamiseksi käämi tulisi asentaa kohtaan, jossa käämin ja johtimen väliin ei jäisi vaippaa. Kuvassa 23 on esitetty havainnekuva erityyppisten mittauspisteiden sijoittumisesta pelkän kaapelin sisältävällä tasasähköyhteydellä. Vianpaikannusjärjestelmän mittauspisteessä voidaan jännitemittauksen kondensaattorina käyttää esimerkiksi yhteydellä olemassaolevaa PLC-kytkentäkondensaattoria tai -suodatinta tai DC-virtamuuntajan kapasitiivista väliottoa. [30]



Kuva 23: Havainnekuva ABB:n vianpaikannusjärjestelmän erityyppisten mittauspisteiden sijoittumisesta kaapeliyhteyden päässä. [30]

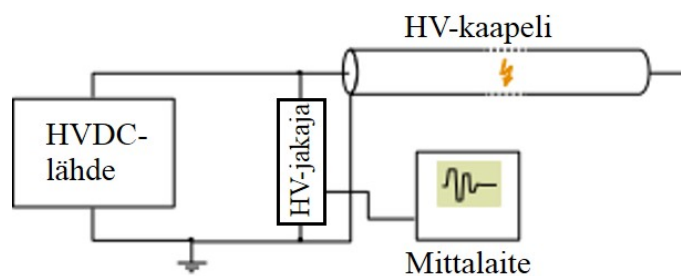
Yksinkertaisella yhteydellä vianpaikannusjärjestelmä koostuu kahdesta mittauspisteestä. Tarkkailtaessa yhteyksiä joilla johdinlaji muuttuu, lisätään mittauspisteitä johdinlajin muutoskohdan läheisyyteen. Riippumatta mittauspisteiden määrästä jokaisessa mittauspisteessä oleva laitteisto sisältää havainnointiyksikön ja kojekaapin. Havainnointiyksikkö koostuu virran tai jännitteen muutosta mittaavasta laitteesta ja kuituoptysesta lähettimestä, joka lähettää mitatun tiedon valokuitua pitkin kojekaapille. Havainnointiyksikkö toimitetaan säältä suojaavassa kotelossa, joka voidaan asentaa ulos. Kojekaapissa sijaitsevat mm. GPS-kello, kuituoptynen vastaanotin ja tietokone muisteineen. Kojekaappi tulee sijoittaa lämmitettyyn tilaan ja se tarvitsee toimiakseen virtalähteen ja tietoliikenneyhteyden. [30]

6.2.2 Highvolt

Saksalainen HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH (myöhemmin Highvolt) on kehittänyt suurjännitteisten vaihto- ja tasasähkökaapeleiden kuntoa tarkkailevan järjestelmän, jota voidaan käyttää kaapelin testauksen yhteydessä ja kaapelien pysyvään online-tarkkailuun. Online-vianpaikannusta varten järjestelmä on asennettu pysyvästi kahdelle tasasähköyhteydelle, joilta ei vielä ole saatu käytännön kokemusta vianpaikannuksen toiminnasta. Vianpaikannusjärjestelmän tarkkuudeksi annetaan 1 % sekä avojohdoille että kaapeleille. Highvoltin järjestelmä on suunniteltu pitkien maa- ja merikaapeleiden vianpaikannukseen, mutta järjestelmän oletetaan toimivan myös avojohdoilla. Vianpaikannuksesta avojohdoilla ei ole kokemusta. [31, 32]

Järjestelmä mittaa vikasignaalin jännitettä kaapelin päähän asennettavan HV-jännitteenjakajan kautta. Jännitteenjakaja tulee asentaa mahdollisimman lähelle kaapelipäätettä avojohdon puolelle, josta jännitetieto viedään mittauskaapelia pitkin vianpaikannuslaitteelle. Vianpaikannustallennin sijoitetaan kuivaan ja lämmitettyyn tilaan, jossa siihen voidaan tarvittaessa yhdistää erillinen tietokone mittausten havainnointia tai ohjelmiston säätöä varten. Jatkuvaan vianpaikannukseen tarkoitettu vianpaikannustallennin on kestävä ja itsenäisesti toimiva laite. Mittauslaitteiston lisäksi tallennin sisältää tietokoneen ja vianpaikannusohjelmiston. Tallentimessa ei ole omaa näyttöä tietokoneelle, joten sen tietokonetta kauko-ohjataan erillisen tietokoneen avulla. Tallentimeen voidaan liittää myös erillinen näyttö, jolloin tallennettuja tietoja voi tarkastella suoraan näytöltä. Tallennin tarvitsee virtalähteen toimiakseen, joten vikapaikan tallentamisen varmistamiseksi myös sähkökatkon yhteydessä tallentimeen on sisäänrakennettu varavirtalähde. Laitteisto voidaan tarvittaessa käynnistää uudelleen etäyhteyden välityksellä. [31, 32]

Vianpaikannusjärjestelmän sijoittumista mittaustilanteessa on havainnollistettu kuvassa 24. Kuvassa on esitetty tilanne mittausjärjestelmän sijoittumisesta kaapelin testien yhteydessä. Jatkuvaan tarkkailuun asennettava järjestelmä sijoitetaan kuvassa esitetysti, mutta yhdistetään jännitelähteen sijasta suuntaaja-aseman sähköverkkoon. Järjestelmää on testattu tietokonesimulointien avulla 100 km pituiselle kaapelille ja käytännön testejä on suoritettu noin 10 km pituiselle kaapelille. Järjestelmän oletetaan pystyvän havaitsemaan ja paikantamaan vika 100 km etäisyydeltä. Simulointien perusteella myös pidemmät paikannusetäisyydet ovat mahdollisia, mutta tätä ei vielä ole varmistettu testeillä. [31, 32]



Kuva 24: Periaatekuva Highvoltin vianpaikannusjärjestelmän mittalaitteen sijoittumisesta testauksen yhteydessä. Pysyvään tarkkailuun asennettaessa laite sijaitsee vastaavasti, mutta yhdistetään jännitelähteen sijasta suuntaaja-aseman sähköverkkoon. [31]

Highvoltin vianpaikannusjärjestelmää voidaan käyttää online-vianpaikannuksen lisäksi referenssimittausten tekemiseen esimerkiksi jännitetestien yhteydessä sekä kaapelin kunnan tarkastamiseen säännöllisin väliajoin. Järjestelmä tarvitsee kuitenkin erillisen jännitelähteen referenssimittauksiin. [31, 32]

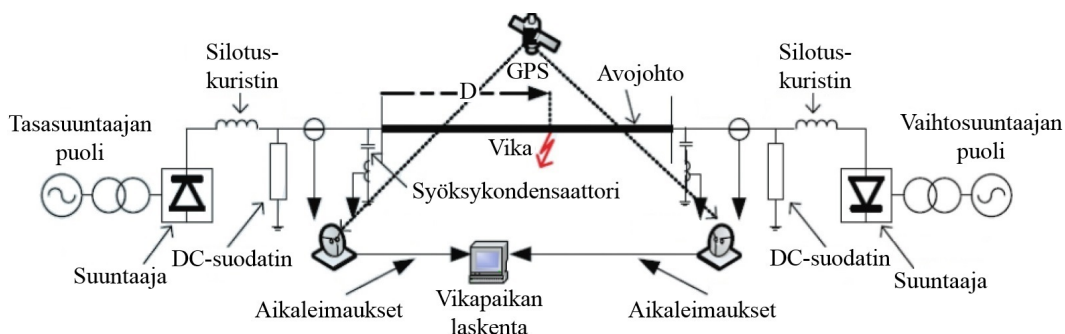
6.2.3 Manitoba

Kanadalainen Manitoba HVDC Research Centre (myöhemmin Manitoba) on kehittänyt DC-avojohtojen vianpaikannusjärjestelmiä 1960-luvulta lähtien ja ensimmäinen GPS-aikaleimaan perustuva järjestelmä asennettiin 1998. Nykyisin Manitoban valmistamia dcLFL (Direct Current Line Fault Locator) -vianpaikannusjärjestelmiä on käytössä useilla tasasähköyhteyksillä maailmanlaajuisesti. Järjestelmä on suunniteltu pitkille yhteyksille ja sille mainittu yleinen paikannustarkkuus enintään 1000 km pitkillä DC-avojohtoilla on ± 500 m tai ± 1 pylväs sen mukaan, kumpi arvo on suurempi. [33]

Manitoban vianpaikannusjärjestelmä on alunperin suunniteltu DC-avojohtoille, mutta myöhemmin soveltuvuutta myös DC-kaapeleille on tutkittu. Järjestelmän soveltuvuutta kaapeleille on tutkittu PSCADTM-simulointien (PSCADTM: Power Systems Computer Aided Design) avulla, joista saadut tulokset ovat lupaavia. Vianpaikannusjärjestelmän paikannuksen tarkkuuden arvioimiseksi erityisesti yhteyksien kaapeliosuuksilla tulisi suorittaa PSCAD-simulointi. [33]

Vianpaikannusjärjestelmä on asennettu yhdelle kaapelin sisältävälle tasasähköyhteydelle ja uusia asennuksia on suunnitteilla, mutta kokemusta vianpaikannuksesta kaapelivian tapauksessa ei vielä ole. Kulkuaallot vaimenevat kaapelissa enemmän kuin avojohdoilla, mistä johtuen rinta loivenee ja vian havaitsemiseen ja tallentamiseen kuluva aika kasvaa. Tästä johtuen vianpaikannuksen epätarkkuus kasvaa ja virhemarginaali on suurempi kuin vastaavan mittaisella avojohdolla. Paikannustarkkuuden parantamiseksi kaapeliosuudella nykyiseen vianpaikannusjärjestelmään tulee todennäköisesti joitain muutoksia, mihin liittyen uusi prototyyppi on kehitteillä. Vianpaikannusjärjestelmävalmistajan tavoitteena on saada vika paikannettua kaapelilla noin 50–60 metrin tarkkuudella. [33]

Kuvassa 25 on havainnollistettu vianpaikannusjärjestelmän ja mittauspisteiden sijoittumista muihin laitteisiin nähden DC-avojohtoyhteydellä. Esimerkissä kaksi mittauspistettä on sijoitettu avojohdon päiden lähettyville konvertteriasemilla. Vianpaikannuksen onnistuminen online-tyyppisesti välittömästi vian ilmettyä on riippuvainen tietoliikenneyhteyksistä sekä GPS-kellojen toiminnasta. Vikapaikka lasketaan ja tiedot viasta lähetetään verkon operaattorille minuutin kuluessa vian ilmenemisestä. [33]



Kuva 25: Esimerkkikuva Manitoban vianpaikannusjärjestelmän sijoittumisesta avojohto-tasasähköyhteydelle. Esimerkissä mittauspisteet avojohdon päiden lähettyvillä konvertteriasemilla. Pituus D kuvaa vikapaikan etäisyyttä tasasuuntaajan puoleisesta mittauspisteestä. [33]

Kuvassa on esitetty yksinkertaisen tasasähköyhteyden vianpaikannusjärjestely, jossa tyypillisesti on kaksi mittauspistettä. Monimutkaisempaa tai erittäin pitkää tasasähköyhteyttä tarkkailtaessa voidaan mittauspisteiden lukumäärää lisätä. Jokaisessa mittauspisteessä oleva laitteisto sisältää havainnointiyksikön ja kojekaapin, jotka on yhdistetty toisiinsa optisella kuidulla. Havainnointiyksikkö on vesitiivis ja ulko-olosuhteet kestävä pieni kaappi, joka tulee kiinnittää syöksykondensaattorin (surge capacitor) lähelle. Havainnointiyksikön muodostavat differentiaalivirtamuuntaaja ja kuituoptinen lähetin, jotka eivät tarvitse virtalähdettä toimintaansa. Tarvittaessa havainnointiyksikköön lisätään myös lämmitin, joka tarvitsee virtalähteen. Vianpaikannuslaitteiston kojekaapissa sijaitsevat kuituoptinen vastaanotin, GPS-kello, tietokone, näyttö ja näppäimistö, tulostin sekä muut laitteiston tarvitsemat laitteet. Kojekaapin laitteet tarvitsevat virtalähteen. Kaappi myös suojaa laitteita mekaanisilta ja sähköisiltä häiriöiltä. [33]

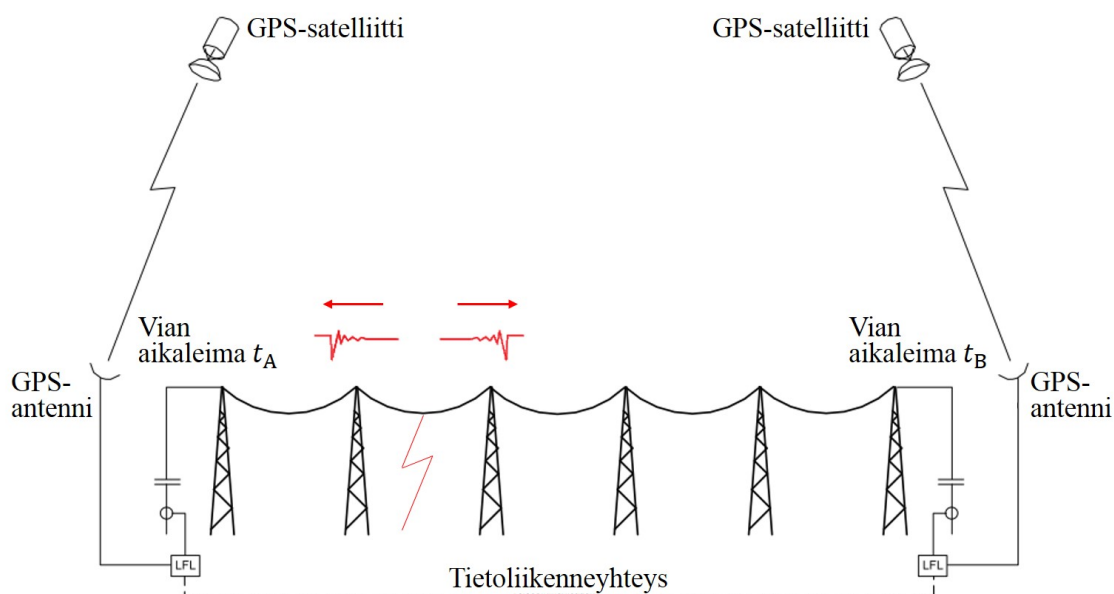
6.3 Vianpaikannus synkronoituun aikaleimaan perustuen

ABB:n ja Manitoban järjestelmissä vianpaikannus perustuu kahdesta kohdasta yhteyttä tehtyjen mittausten tallentamiin aikaleimoihin. Jotta tallennetut kellonajat ovat vertailtavissa, on mittauspisteiden kellojen oltava erittäin tarkasti samassa ajassa. Tähän tarkoitukseen käytetäänkin GPS-synkronoituja kelloja, jotka hyödyntävät satelliittien kautta saatavaa aikaleimaa. [30, 33]

Vian ilmetessä johdolla viasta aiheutuva kulkuaaltorintama liikkuu molempiin suuntiin johtoa. Ensimmäinen havainnointipisteeseen saapuva vian aiheuttama

kulkuaalto on kulkenut lyhimmän matkan johdolla, jolloin se on vaimentunut ja vääristynyt mahdollisimman vähän. Saapuessaan johdon päässä olevalle mittauspisteelle aallon rinta aiheuttaa jännitteen muutoksen mittauksessa käytettävällä kondensaattorilla, minkä seurauksena kondensaattorin läpi kulkee virta maahan. Vianpaikannusjärjestelmän havainnointiyksikön virtamuuntaja havainnoi vian aiheuttaman kondensaattorin läpi kulkevan virran ja kuituoptinen lähetein muuttaa sen valopulssiksi, joka lähetetään valokuitua pitkin kauempana asemalla sijaitsevalle kojekaapille. ABB:n järjestelmällä vikasignaalin mittaus on mahdollista myös suorana virtamittauksena kaapelilta, jolloin mittautustieto lähetetään kuituoptisen lähettimen välityksellä kojekaapille [30]. [30, 33]

Kojekaapilla vastaanotetaan havainnointiyksikön lähettämä signaali ja GPS-kellon avulla määritetään tarkka aikaleima vian havaitsemiselle kyseisessä mittauspisteessä. Mittauspisteellä havaitun aaltorintaman signaali näytteistetään ja tallennetaan mahdollista myöhempää käyttöä varten. Vian havaitsemisen jälkeen eri mittauspisteiden kojekaapit jakavat tietonsa aaltorintaman havaitsemisajasta, minkä jälkeen vikapaikka lasketaan molemmilla mittauspisteillä. Jotta mittautustietojen välitys mittauspisteiden välillä onnistuu, tarvitaan mittauspisteiden välille tiedonsiirtoyhteys. Vikapaikan laskemiseen tarvitaan kahden mittauspisteiden aikaleimat, mutta useamman mittauspisteiden aikaleimoja voidaan hyödyntää vikapaikan laskennassa. Mikäli useamman mittauspisteiden halutaan välittävän tietoa keskenään, tarvitaan näiden kaikkien välille tiedonsiirtoyhteys ja ohjelmistoon todennäköisesti pieniä muutoksia. GPS-aikaleimaa käyttävää vianpaikannusta on havainnollistettu kuvassa 26. [30, 33]



Kuva 26: Vianpaikannus GPS-aikaleiman perusteella. Viasta aiheutuva kulkuaalto havaitaan johdon päässä, joissa vianpaikannuslaitteisto suorittaa signaalin tallennuksen ja vikapaikan laskentaan liittyvät toiminnot. [30]

Vikapaikka lasketaan kahden mittauspisteen tiedoista etäisyytenä määriteltyyn mittauspisteeseen A seuraavasti:

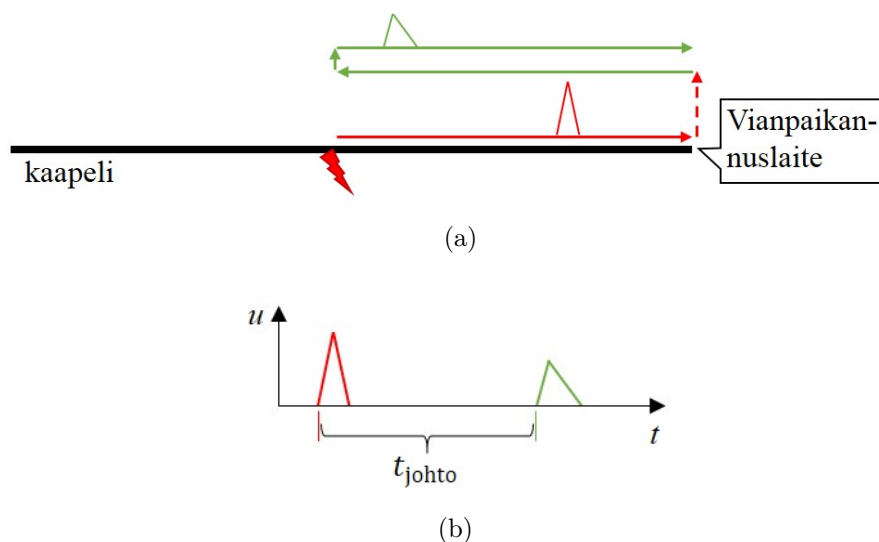
$$D = \frac{L - (t_B - t_A) \cdot v}{2} \quad (9)$$

missä D on vikapaikan etäisyys mittauspisteestä A, L mittauspisteiden välisen johdon pituus, v kulkuaallon etenemisnopeus johdolla ja t_A ja t_B vian havaitsemisajat mittauspisteissä A ja B. [30, 33] Menetelmä on vastaava kuin luvussa 4.6 esitetty vikapaikan laskentaan käytetty menetelmä.

Laskennan tulokset voidaan näyttää kojekaapin tietokoneen näytöllä. Kojekaappi on tyypillisesti kytketty olemassaolevaan tietoliikennejärjestelmään, jonka välityksellä verkossa olevista vioista lähtee ilmoitus verkon operaattorille. Tietoliikenneyhteyttä käyttäen vianpaikannusjärjestelmä lähettää operaattorille vikailmoituksen ja laske-
mansa tiedot viasta tasasähköyhteydellä. [30, 33]

6.4 Vianpaikannus ilman synkronoitua aikaleimaa

Highvoltin vianpaikannusjärjestelmä ei käytä GPS-kellon aikaleimaa vianpaikannukseen, vaan järjestelmä mittaa viasta aiheutuneen kulkuaaltopulssin heijastumiseen kuluvaa aikaa. Kuvissa 27(a) ja (b) on havainnollistettu kulkuaallon kulkua mitattavalla kaapelilla ja mittauspisteessä vianpaikannuslaitteella havaittavia kulkuaaltoja ajan funktiona.



Kuva 27: Kuvassa (a) on esitetty viasta aiheutuva kulkuaaltopulssi punaisella ja ensimmäinen viasta heijastuva pulssi vihreällä. Näiden pulssien havainnointia mittauspisteessä vianpaikannuslaitteella on havainnollistettu kuvassa (b). Ensimmäisen ja toisen havaitun pulssin välinen aika t_{johto} mitataan ja sen perusteella lasketaan vikapaikan etäisyys.

Kuvassa 27(a) on esitetty punaisella vian aiheuttama kulkuaalto, joka havaitaan kaapelin päässä sijaitsevassa mittauspisteessä. Tämä aalto heijastuu kaapelin päästä

takaisin kohti vikaa ja saapuessaan vikapaikkaan, heijastuu uudelleen kohti kaapelin päätä ja mittauspistettä. Jälkimmäinen viasta heijastuva pulssi on kuvassa esitetty vihreällä. Kuvassa 27(b) on havainnollistettu edellä kuvatun aaltojen heijastumisen havainnointia vianpaikannuslaitteella. Vian havainnointi alkaa ajanhetkellä, jolloin punaisella kuvattu kulkuaaltopulssi saapuu mittauspisteeseen ja päättyy ensimmäisen heijastuksen jälkeen. Havaittujen pulssien alkuajankohtien välinen aika t_{johto} mitataan mahdollisimman tarkasti ja sen perusteella lasketaan vikapaikan etäisyys D seuraavasti:

$$D = \frac{v \cdot t_{\text{johto}}}{2} \quad (10)$$

missä v on kulkuaallon etenemisnopeus. [32]

Kuten edellä on esitetty, vianpaikannukseen riittää yhden pään mittaus. Mikäli vianpaikannus tehdään kaapelin molemmista päistä, voidaan mittaustuloksia vertailla ja näin saada parempi mittauservio vikapaikalle. Vianpaikannuksen tapahtuessa kaksipäisen mittauksen avulla vianpaikannuslaitteet voivat toimia myös yhdessä. Tällöin vikapaikan laskennassa käytetään kummastakin mittauspisteestä mitattua kulkuaallon ja sen ensimmäisen heijastuksen saapumisen välistä aikaa vastaavasti kuin yksipistemittauksessa. Mitattujen aikojen perusteella vikapaikka lasketaan etäisyytenä mittauspisteeseen A seuraavasti:

$$D = \frac{t_A}{t_A + t_B} L \quad (11)$$

missä t_A ja t_B kuvaavat kulkuaallon ja kulkuaallon ensimmäisen heijastumisen saapumisen välistä aikaa mittauspisteissä A ja B. L on mittauspisteiden välisen kaapelin pituus. Kun kahden mittauspisteen väliin jää yksi johto-osuus, kulkuaallon etenemisnopeuden tarkkaa arvoa ei tarvita vikapaikan laskentaan, kuten yhtälöstä (11) nähdään. [32]

ABB:n ja Manitoban järjestelmillä vikapaikanlaskenta on mahdollista tehdä myös manuaalisesti järjestelmän tallentamaa mittaustietoa hyväksi käyttäen. Mikäli viasta aiheutuvat ensimmäisen kulkuaallon aiheuttamat heijastukset ovat havaittavissa mittaustiedoissa, voidaan ensimmäisen ja toisen saapuneen aallon etäisyydestä laskea vikapaikan etäisyys kuten edellä on esitetty käyttäen yhtälöä (10). [30, 33]

Näiden lisäksi ABB:n järjestelmällä vianpaikannus on mahdollista tehdä yhtiön patentoiman yhden pään mittaukseen perustuvan referenssimittauksen avulla. Ehjän kaapelin mittaustietojen avulla voidaan tarkemmin paikantaa lähempänä kaapelin päitä tapahtuvat viat, joissa kauempana sijaitsevan pään mittauspisteen keräämä mittaustieto on vääristyneemmän kulkuaaltopulssin takia epätarkempaa. Referenssimittaus perustuu yhteyden eri kohdissa tapahtuvien vikojen aiheuttamien kulkuaaltojen simulointiin esimerkiksi PSCAD-mallin avulla ja näiden tulosten vertailuun todellisen vian ilmettyä. Referenssimittauksen käyttöä varten vianpaikannusjärjestelmän ohjelmistoa pitää todennäköisesti hienosäätää. [30]

6.5 Vikatietojen tallennus

ABB:n vianpaikannusjärjestelmä tallentaa mittaustietoja häiriötallentimen tavoin jatkuvasti. Mittaustietoja tallennetaan välimuistiin tietyn aikavälin ajan, jonka

jälkeen ne ylikirjoitetaan uudella mittausdatalla. Vian ilmetessä ohjelmisto saa tiedon pysyvään muistiin tallentamisen tarpeesta ja pysyvään muistiin tallennetaan mittaustiedot noin 100 μ s ajalta ennen vikaa ja 2–4 ms vian havaitsemisen jälkeen. Pysyvään muistiin kirjoitettu mittausdata on luettavissa esimerkiksi etäyhteyden kautta. Kukin mittauspiste tallentaa itse omat vikadatansa. Myös ohimenevien vikojen tapauksessa vikapaikka lasketaan ja tieto viasta ja sen sijainnista lähetetään operaattorille, mikäli vianpaikannusjärjestelmä ehtii havaitsemaan vian ja tallentaa sen aikaisen datan pysyvään muistiin. Näin järjestelmä toimii myös, vaikka jälleenkytkentä onnistuisi. [30]

Highvoltin ja Manitoban järjestelmät ovat passiivisesti mittausvalmiudessa, eli laitteistot odottavat vikapulssin aiheuttamaa laukaisua. Laukaisun jälkeen kumpikin vianpaikannusjärjestelmä aloittaa mittaustietojen tallennuksen, lopettaa tallennuksen vikapulssien vaimettua ja suorittaa vikapaikan laskennan. [32, 33]

Vikatietojen tallennusta varten vianpaikannustallennin (Highvolt) ja kojekaapin laitteisto (ABB, Manitoba) tarvitsevat virtaa. Mikäli vianpaikannus halutaan varmistaa myös sähkökatkojen aikana, tulee kojekaapin laitteiston virransyöttö varmistaa varavirtalähteen avulla. Highvoltin vianpaikannusjärjestelmään kuuluu sisäänrakennettu varavirtalähde [32], muihin järjestelmiin varavirtalähde on erikseen hankittava. Sähkökatkon jälkeen Manitoban laitteisto ja ohjelmisto käynnistyy automaattisesti uudelleen, muiden järjestelmien vastaavasta ominaisuudesta ei ole tietoa. [30, 32, 33]

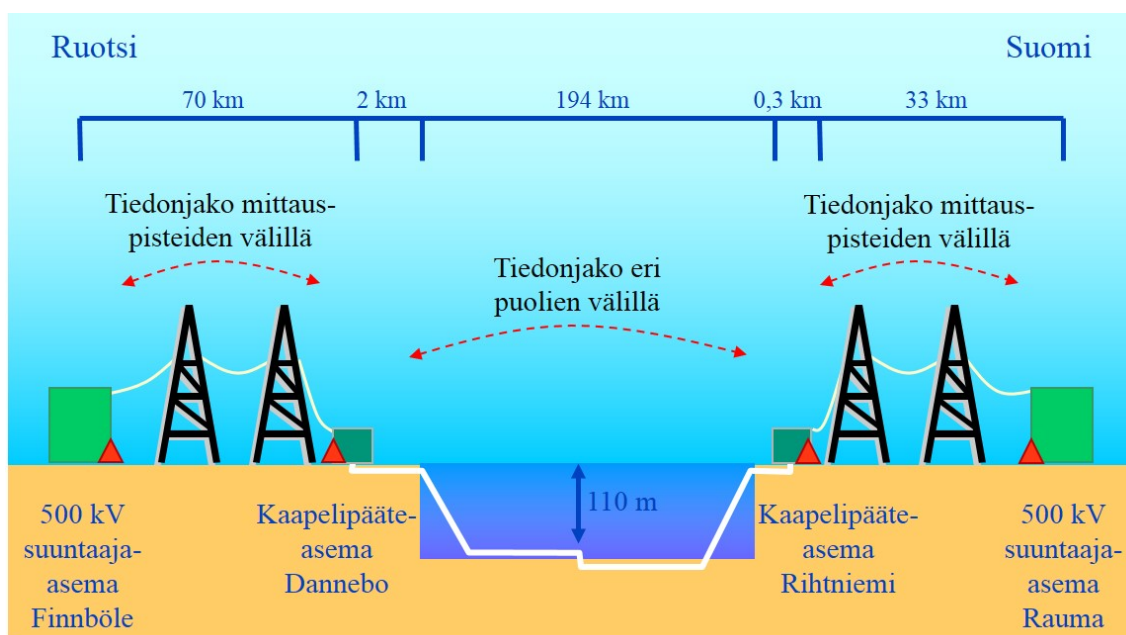
Vian havaittuaan ABB:n ja Manitoban järjestelmät lähettävät virheilmoituksen ja tiedot viasta verkon operaattorille. Highvoltin järjestelmään tämä on suunniteltu ominaisuus, muttei vielä toteutettu [32]. Ilmoituksen lähettämisen lisäksi ABB:n ja Manitoban järjestelmät tallentavat vikasignaalin lisäksi vian ajankohdan ja etäisyyden sekä avojohtojen tapauksessa lasketun vikapaikan myös pylvästarkkuudella. Highvoltin järjestelmä tallentaa mittaamansa vikasignaalin, heijastuksen saapumiseen kuluneen ajan ja tästä lasketun vikapaikan etäisyyden. Manitoban järjestelmä sisältää myös itsediagnostiikan, jonka perusteella se voi lähettää operaattorille virheilmoituksen myös havaitsemastaan viasta tai ongelmasta ohjelmistossaan, laitteistossaan tai tietoliikenneyhteyksissään. Muiden järjestelmien osalta itsediagnostiikasta ei ole tietoa. [30, 32, 33]

Tallennetut mittaustiedot on mahdollista nähdä kuvaajana vianpaikannusjärjestelmien omien tietokoneiden tai erillisen tietokoneen näytöltä. Kuten luvussa 6.4 tuotiin esiin, vikapaikan laskenta on mahdollista tehdä myös manuaalisesti kuvaajalta käyttämällä hyväksi ensimmäisen ja toisen vian aiheuttaman aaltorintaman saapumisen välistä aikaa. [30, 32, 33]

ABB:n ja Manitoban järjestelmät tarvitsevat toimiakseen GPS-satelliittiyhityden lisäksi tietoliikenneyhteyden mittauspisteiden välille. Tämän ansiosta Manitoban järjestelmässä yhden mittauspisteen tietokoneelta voidaan myös lukea kaikkien mittauspisteiden keräämät tiedot viasta. Vianpaikannusjärjestelmät kytketään esimerkiksi mittauspisteen asemalla olemassaolevaan Ethernet-verkkoon. Verkkoyhteyden avulla kaikilla kolmella järjestelmällä on mahdollista tarkastella mittauspisteiden keräämiä tietoja etäyhteyden välityksellä. [30, 32, 33]

6.6 Esimerkki: vianpaikannusjärjestelmän mittauspisteet Fenno-Skan 2 -yhteydellä

Mittauspisteiden sijaintia tarkkailtaessa koko Fenno-Skan 2 -yhteyttä ABB:n tai Manitoban vianpaikannusjärjestelmillä on havainnollistettu kuvassa 28. Punaiset kolmiot kaapelipääte- ja konvertteriasemilla kuvaavat tarvittavia mittauspisteitä. Kummallakin rannikolla sijaitsevat kaksipisteiset mittausjärjestelmät ovat tietoliikenneyhteyden avulla yhteydessä toisiinsa, samoin merikaapelin päissä olevat mittauspisteet.



Kuva 28: Alustava ehdotus ABB:n ja Manitoban vianpaikannuslaitteiston asentamisesta Fenno-Skan 2 -yhteydelle. Kaksipisteiset mittausjärjestelmät kummallakin rannikolla kommunikoivat tarvittaessa keskenään ja muodostavat yhdessä koko yhteyttä tarkkailevan vianpaikannusjärjestelmän. Mittauspisteet on merkitty punaisilla kolmioilla. [34, mukaillen]

ABB:n vianpaikannusjärjestelmää sovellettaessa Fenno-Skan 2 -yhteydellä käytettäväksi suositellaan nelipistemittausta. Tällöin järjestelmältä vaadittava vianpaikantaminen tietylle yhteyden osalle (esim. kaapelille tai avojohdolle) on mahdollista tarkemmin, kuin kaksipisteisellä mittauksella. Mittauspisteet sijoitettaisiin avojohdojen päihin konvertteriasemilla ja johdinlajin muutospisteisiin kaapelipäätteasemilla kuten kuvassa 28 on esitetty. Tyypillisesti vianpaikannuksessa käytetään jännitteen mittausta pulssimuuntajan avulla. Jännitemittausta varten tarvitaan mittauspisteessä yleensä kondensaattori, jonka maapuolelle pulssimuuntaja asennetaan. [30]

Highvoltin järjestelmän havainnointietäisyydestä pitkillä kaapeleilla ei ole kokemusta, joten Fenno-Skan 2 -yhteyden 200 km pitkän kaapelin tarkkailua varten kaapelin molempiin päihin asennettaisiin mittauspiste. Kun mittauspisteet

asennetaan kaapelin päihin, voidaan yhdellä laitteella tarkkailla sekä avojohtoa että kaapelia. Kaapelivian paikantamiseksi molemmissa päissä on mittauspisteet, jolloin varmistutaan vian tulevan havaituksi vähintään yhdestä mittauspisteestä. Jos vika onnistutaan havaitsemaan ja paikantamaan molemmilla mittauspisteillä, saatuja tuloksia voidaan verrata toisiinsa. Useamman mittauksen antaman paikkatiedon vertailu olisi hyödyllistä erityisesti, mikäli kulkuaaltojen etenemisnopeuden tarkkaa arvoa ei tiedetä. Kahden pään mittausta ei kuitenkaan ole vielä testattu käytännössä. [31, 32]

Manitoban vianpaikannuslaitteistoa käytettäessä eri johdinlajeja sisältävän tasa-sähköyhteyden tarkkailuun, on suositeltavaa asentaa mittauspisteet yhteyden päiden lisäksi johdinlajin muutospisteisiin. Tällöin kulkuaallon etenemisnopeuden muuttuminen esimerkiksi kaapelin ja avojohdon liitoskohdassa ei hankaloita vianpaikannusta. Havainnekuva alustavasta mittauspisteiden sijoittamisesta on esitetty kuvassa 28. Kaapelin kummallekin puolen asennettaisiin kaksipisteiset mittausjärjestelmät, jotka yhdessä muodostaisivat koko Fenno-Skan 2 -yhteyttä tarkkailevan vianpaikannusjärjestelmän. Esitetyn mukaisella vianpaikannusjärjestelmällä on mahdollista havaita avojohdoilla, kaapelissa sekä kaapelipäätteessä esiintyvät viat. [33]

Kuvassa esitetyt keskimmäiset mittauspisteet tulisivat sijaitsemaan kaapelipäätteemillä kaapelipäätteen avojohtopuolella, jolloin erityisesti kaapelivian aiheuttaman kulkuaaltorintaman havainnointia hankaloittavat kaapelipäätteestä ja sen jälkeen tulevasta impedanssimuutoskohdista aiheutuvat heijastukset. Kaikki esitellyt vianpaikannuslaitteistot kuitenkin pystyvät jättämään nämä heijastukset huomiotta vianpaikannuksen yhteydessä [30, 32, 33].

6.7 Asennus ja käyttöikä

Tässä yhteydessä käsiteltävillä asennusajoilla tarkoitetaan vianpaikannusjärjestelmän osien asentamiseen kuluva aika. Järjestelmän testaukseen ja kalibrointiin vaadittava aika ei sisälly asennusaikaan. Mittauspisteiden asentamiseksi asemilla tarvittavien valmistelevien töiden kestoa ja määrää ei tässä työssä huomioida. Järjestelmien asentaminen voidaan ajoittaa vuosi- tai muun suunnitellun keskeytyksen yhteyteen, jolloin asennuksen ja käyttöönoton vaatimien sähkönsiirron keskeytysten aiheuttamaa haittaa saadaan minimoitua.

ABB:n vianpaikannusjärjestelmän asennukseen arvioidaan kuluvan noin viikko ja Manitoban järjestelmän asennukseen kahdesta neljään päivää. Työstä suuri osa voidaan tehdä yhteyden ollessa tehonsiirrossa, ainoastaan havainnointilaitteiston yhdistäminen jännitteisiin osiin vaatii käyttökeskeytyksen. ABB:n järjestelmän osalta käyttökeskeytystä vaativiin töihin arvioidaan kuluvan yksi päivä, Manitoban järjestelmästä ei ole vastaavaa tietoa. [30, 33]

Highvoltin järjestelmän asentamisesta ei ole juurikaan käytännön kokemusta, joten vianpaikannusjärjestelmän asentamisen vaatimasta ajasta ei ole tarkkaa tietoa. Erityisesti Fenno-Skanin tarkkailuun tarvittavan vianpaikannusjärjestelmäkokonaisuuden kaltaisia asennuksia ei ole aiemmin tehty. Vianpaikannusjärjestelmän asentamisen arvioidaan kuitenkin onnistuvan 3–4 päivän aikana. [32]

Käyttöönoton yhteydessä ABB:n ja Manitoban järjestelmä kalibroidaan testivikojen avulla. Testivioilla varmistetaan sen oikeanlainen toiminta vikojen satuessa tarkkailtavan yhteyden eri osissa. Avojohtoille testivikojen tekeminen on suhteellisen helppoa ilmaeristyksen ansiosta, eikä itse johdolle aiheudu tästä vauriota. Kaapelivian testaaminen on hankalaa, sillä vian aiheuttaminen kaapeliin vaurioittaisi kaapelia ja vaadittaisiin aikaavievä ja kallis korjaustyö. Kaapelin osuudelta kalibrointi todennäköisesti suoritettaisiin aiheuttamalla testivikojä mahdollisimman lähelle kaapelipäätettä avojohdon puolelle. Highvoltin järjestelmästä ei ole vastaavaa tietoa. ABB:n järjestelmää kalibroitaessa järjestelmälle on mahdollista antaa lähtötietoina joko tarkka pituus tai tarkka kulkuaallon etenemisnopeus. [30, 33]

Manitoban vianpaikannuslaitteiston elinikä muodostuu osista, joiden odotettu elinikä vaihtelee laajasti. Kokonaisuudessaan laitteiston käyttöikä on alle kymmenen vuotta, johtuen tietokoneen lyhyestä käyttöiästä. Virtamuuntajan käyttöajaksi voidaan olettaa 25 vuoden mittaiseksi hyvän kunnossapidon avulla. Kuituoptisen lähettimen ja vastaanottimen käyttöikä on oletetusti 15–25 vuotta ja kaupallisen GPS-kellon käyttöikä noin 15 vuotta. Hyvin suunnitellun huollon ja tietokoneen päivittämisen avulla laitteiston käyttöiäksi voidaan arvioida 15–25 vuotta. [33]

ABB:n vianpaikannuslaitteistossa käytettävä tietokone on yhtiön oma erityisvalmisteen MACH 2 -tietokone [35], jonka käyttöikä on merkittävästi monia kaupallisia tuotteita pidempi, 20–30 vuotta. Vianpaikannuslaitteiston GPS-kellona käytetään kaupallista tuotetta, jonka elinikään ei voida vaikuttaa. Aiemmin asennetuista vianpaikannusjärjestelmistä kertyneen kokemuksen perusteella voidaan olettaa myös GPS-kellon toimivan vähintään 20 vuotta. Tämän perusteella vianpaikannusjärjestelmän kokonaisuuden käyttöiäksi arvioidaan vähintään 20 vuotta. Säännöllistä huoltoa tarvitsevia osia järjestelmässä ei ole. [30]

7 Johtopäätökset

7.1 Nykyisen vianpaikannuksen tarkkuus

Fingridissä nykyisin käytössä olevista vianpaikannusmenetelmistä ainoastaan TDR-mittauksesta voidaan saada riittävän tarkka arvio vikapaikalle, jotta tarkkaa vianpaikannusta on mielekästä lähteä tekemään merellä tai maalla. TDR-mittaus on käytössä vain kaapeleiden vianpaikannukseen ja avojohtojen vianpaikannus tapahtuu silmämääräisenä tarkastuksena. Avojohtoillekin sovellettavissaoleva häiriötallentimen tietoihin perustuvan vianpaikannusmenetelmän tarkkuuden voidaan sanoa olevan lähinnä suuntaa antava. Vianpaikannusmenetelmä, jonka tarkkuutta on mahdollista arvioida tarkemmin on TDR-mittaus kaapelitutkalla.

Kaapelitutkan lähettämä mittauspulssi on suorakaidepulssi, jonka rinnan nousuaikaa, pulssinleveyttä ja käytettyä suodatusta muuttamalla voidaan vaikuttaa lähtevän pulssin ominaisuuksiin. Työssä esitetyissä tutkakuvissa esiintyy suurimmassa osassa alussa useita suuriamplitudisia heijastuspiikkejä, jotka aiheutuvat lähetetyn pulssin heijastumisista alussa olevien mittakaapeleiden, kiskon ja kaapelipäätteen impedanssieroista. Lähellä mittauspistettä tapahtuvat heijastukset eivät juurikaan vaimene ennen saapumistaan mittalaitteelle, jolloin ne ovat jo valmiiksi isompia amplitudiltaan ja erityisesti pitkien kaapeleiden TDR-mittauksessa tarvittavan signaalin vahvistuksen käyttö voimistaa niitä lisää. Lisäksi mittauspisteen läheltä tulevien heijastusten kulkuaika mittausjohdoissa on selvästi lyhempi kuin esimerkiksi mitattavan kaapelin loppupäästä tulevan heijastuksen kulkuaika. Tästä johtuen lähellä mittauspistettä tapahtuvat heijastukset ehtivät heijastumaan useamman kertaa edestakaisin impedanssien muutoskohdista, jolloin ensimmäisiin alkuheijastuksiin summautuu useita saman impedanssimuutoskohdan aiheuttamia heijastuksia. Heijastusten summautumisesta, vahvistuksesta ja usein tarvittavasta leveästä pulssinleveydestä johtuen tutkakuvan alusta tulee sotkuinen.

Alueella, jolle alun suuriamplitudiset summautuneet heijastukset kasautuvat, niin kutsuttu sokea alue, jonka alueella olevan kaapelin aiheuttamia heijastuksia ei voida kyseisillä tutka-asetuksilla nähdä. Lyhentämällä pulssinleveyttä ja pienentämällä vahvistusta voidaan sokeaa aluetta lyhentää ja näin saada mittauksia myös lähempää mittauspistettä. Mikäli vikapaikka on lähellä mittauspistettä, voidaan asetuksia muuttamalla havaita myös sokean alueen sisälle jäävän kohdan heijastuksia, jos vian aiheuttama impedanssimuutos on tarpeeksi suuri. Tällöin heijastukset ovat voimakkaampia ja ne voidaan erottaa muiden normaaleiden alkuheijastusten joukosta.

Merellä tehtävän vianpaikannuksen nopeuttamiseksi on vikapaikan sijainti tositilanteessa kuitenkin hyvä aina varmistaa molemmista päistä tehtävillä TDR-mittauksilla. Erityisesti, mikäli kaapelivika ilmenee tässä työssä tarkastelluista yhteyksistä pisimpään käytössä olleella Fenno-Skan 1 -kaapelilla, on erittäin aiheellista suorittaa TDR-mittaus kaapelin molemmista päistä, koska kaapelin tarkkaa pituutta ole tiedossa. Näin saatuja tuloksia vikapaikan sijainnista voidaan verrata ja todennäköisesti määrittää tarkemmin vikapaikan sijainti merellä. Mitä tarkemmin vika pystytään paikantamaan maalta tehtävillä karkeilla vianpaikannusmenetelmillä, sitä

lyhyemmäksi jää merellä tehtävän vianpaikannuksen alue ja todellinen vikapaikka löydetään nopeammin.

Kahden pään mittausten avulla saadaan myös pienennettyä jatkosten ja varakaapelien mahdollisesti aiheuttamaa muutosta kulkuaallon etenemisnopeudessa ja siitä johtuvaa virhettä mittaustuloksissa. Kaapelijatkokset ovat 1–17 m:n pituisia kaapelista riippuen. Suhteessa kaapelin kokonaispituuteen nämä ovat lyhyitä, jolloin niistä aiheutuva impedanssimuutoksen aiheuttama poikkeama TDR-mittauksen etäisyyden laskentaan voidaan olettaa olevan erittäin pieni. Varakaapelia asennetaan viankorjauksessa tarvittava määrä, joka vaihtelee usein vähintään satojen metrien pätkistä parin kilometrin pituisiin pätkiin. Liitoskohtia suuremman epätarkkuuden TDR-mittauksiin aiheuttaakin mahdollinen varakaapelin impedanssiero alkuperäiseen kaapeliin verrattuna. Yleensä varakaapelia tilataan yhdessä varsinaisen asennettavaksi tulevan kaapelin kanssa, jolloin ne voidaan valmistaa samassa erässä. Samassa erässä valmistetun varakaapelin ja asennetun kaapelin välillä ei yleensä ole merkittäviä eroja.

Eryityisesti merikaapeleiden pituuksista ei ole täsmällisen tarkkaa tietoa, jolloin vian paikantamisen parin sadan metrin tarkkuudella 100–200 km:n pituisella kaapelilla voidaan sanoa olevan erittäin tarkkaa. Luvussa 5 saatujen mittaustulosten yhdenmukaisuuden ja vikatilanteissa todetun TDR-mitatun vikapaikan tarkkuuden perusteella voidaan todeta, että nykyisin käytössä olevat kaapelitutkat antavat erittäin tarkan tuloksen myös pitkillä mittausetäisyyksillä.

7.2 Online-vianpaikannusjärjestelmästä saatavat edut vianpaikannukseen

Nykyisistä vianpaikannusmenetelmistä ainoastaan häiriötallentimen keräämistä tiedoista saadaan tietoa tasasähköyhteyden tapahtumista vian aikana ja näistä tiedoista voidaan myös laskea vikapaikkaa. Käytetyn häiriötallentimen pienen näytteenottotaajuuden takia yhteydellä tapahtuvien vikojen paikantaminen on kuitenkin hankalaa ja aikaavievää. Epätarkkuutta mittaustuloksiin aiheutuu lisäksi todennäköisesti matkalla olevien johtojen impedanssierojen aiheuttamista heijastuksista ja eri kulkuaallon etenemisnopeuksista, joiden huomioiminen ei nykyisen järjestelmän avulla onnistu.

Avojohtoilla ja kaapelipäätteellä ilmenevät ohimenevät viat voidaan avoimen johdon jännitekokeella todeta poistuneiksi, mutta itse vikapaikkaa ei saada selville. Vian syystä tulisi kuitenkin varmistua ennen yhteyden ottamista takaisin käyttöön, sillä on mahdollista, että vioittuneelle yhteydelle kytkettävästä jännitteestä aiheutuu vaara vikapaikan ympäristöön. Tällöin vian selvittämiseen kuluu aikaa vikapartiointiin, häiriötallenteiden tulkintaan ja muuhun vianselvitykseen vian aiheuttajan ja vikapaikan jäädessä kuitenkin usein epäselviksi. Online-vianpaikannusjärjestelmän avulla myös ohimenevistä vioista ja niiden sijainnista saadaan vastaavat vikatiedot kuin pysyvistä vioista. Tällöin voidaan nopeammin varmistua vikapaikasta ja tarvittaessa lähettää vikapartio suoraan oletetulle vikapaikalle. Näin erityisesti ohimenevien vikojen vianselvitykseen käytettävä aika lyhenee. Lisäksi vianselvityksessä ja -paikannuksessa tehtävien ihmisen läsnäoloa vaativien töiden määrä vähenee, jolloin inhimillisten

virheiden todennäköisyys pienenee ja matkustamisesta aiheutuva viive lyhenee osassa vikatapauksia.

Online-vianpaikannusjärjestelmän tallentamat tiedot ovat saatavissa etäyhteyden avulla, jolloin ne ovat nopeammin jaettavissa esimerkiksi tasasähköyhteyden toisen pään omistajan kanssa. Etäluettavuuden avulla vältetään myös turhalta matkustamiselta ja sen aiheuttamalta aikaviiveeltä.

Vianpaikannuksen nopeutumisen lisäksi järjestelmällä saadaan havaittua myös ohimeneviä vikoja, joiden havaitseminen on nykyisin menetelmin erittäin hankalaa. Perinteistä ja online-tyyppistä TDR-mittaukseen perustuvaa vianpaikannusta on vertailtu taulukossa 7.

Taulukko 7: Nykyisen ja online-tyyppisen TDR-vianpaikannuksen eroja. [30, 32, 33]

	Nykyinen TDR	Online TDR
Paikannuksen ajankohta	Vian jälkeen	Vian aikana
Asennustapa	Tilapäinen	Pysyvä
Mittausjärjestely	Asennettava erikseen	Jatkuva mittausvalmius
Mittauspulssin lähetys	Kyllä, heijastuksen mittaukseen	Ei, signaali itse viasta
Heijastukset johdon loppupäästä	Riippuvainen vian tyyppistä	Ei, pelkkä vian aiheuttama heijastus
Havainnoitavissaoleva etäisyys	Riippuvainen vian tyyppistä	Avojohdoilla ≥ 1000 km, kaapeleilla ≥ 200 km

Online-vianpaikannusjärjestelmän asennus vaatii pysyvän asennuksen, jolloin mitauskytkennät tehdään kestäviksi. Perinteinen TDR-mittaus tehdään aina tilapäisellä mittauskytkennällä, jolloin mittakaapeleita kiinnitettäessä inhimillisen virheen ja huonosta kosketuksesta aiheutuvan mittausvirheen todennäköisyys on suurempi. Vian ilmenemishetkestä riippuen vikatilanteen selvittämiseen ja vian paikantamiseen partioinnin tai TDR-mittauksen perusteella kuluu aikaa useista tunneista pariin päivään. Online-vianpaikannusjärjestelmän avulla vikapaikasta voidaan saada suunnilleen yhtä tarkka tieto jo minuutin kuluessa vian ilmenemisestä. Vianpaikannus nopeutuu online-järjestelmää käytettäessä erittäin oleellisesti.

7.3 Online-vianpaikannusjärjestelmän vaatimukset ja soveltuvuus työssä käsitellyille tasasähköyhteyksille

Työssä käsitellyissä online-vianpaikannusjärjestelmissä vianpaikannus perustuu vian aiheuttamien kulkuaaltojen analysointia. Kaikista vioista syntyy johdolla eteneviä kulkuaaltoja, minkä perusteella voidaan olettaa vianpaikannuksen toimivan kaikille vioille. Vianpaikannuksen onnistumiseen tässä mielessä vaikuttaakin enemmän

kulkuaaltojen havaittavuus. Havaittavuuteen vaikuttaa viasta aiheutuvan kulkuaallon muoto ja johdon kulkuaaltoa vaimentavat ominaisuudet. Johdon aiheuttaman vaimennuksen lisäksi kulkuaallon muoto vaikuttaa sen kantamaan, koska jyrkkärin-
 taiset pulssit vaimenevat johdolla nopeammin kuin rinnaltaan loivemmat pulssit. Vian aiheuttamien kulkuaaltopulssien voidaan kuitenkin olettaa olevan havaittavissa esiteltyjen järjestelmien avulla yli 1000 km pitkillä avojohdoilla ja 200 km pitkillä kaapeleilla valmistajilta saatujen tietojen mukaan [30, 33]. Tällöin vianpaikannuksen tulisi onnistua myös työssä käsiteltyjen lyhempien tasasähköyhteyksien tapauksessa.

Esiteltyjen online-vianpaikannusjärjestelmien valmistajista kahdella, ABB:lla ja Manitoballa, on pitkä kokemus vianpaikannuksesta DC-avojohdoilla. ABB:n ja Manitoban järjestelmiä on kehitetty soveltuvaksi myös DC-kaapeleiden vianpaikannukseen, mutta valmistajilta saatujen tietojen mukaan kokemusta vianpaikannuksen toiminnasta kaapelivian tapauksessa ei vielä ole kummallakaan. Valmistajilta saatujen tietojen perusteella Manitoban järjestelmä avojohtoa ja kaapelia tarkkailevalle yhteydelle on jatkokehityksessä ja esimerkiksi Fenno-Skan 2 -yhteydelle asennettava järjestelmä tulisi olemaan prototyyppi.

Sekä ABB että Manitoba haluavat suorittaa PSCAD-simulointeja järjestelmien-
 sä toimimisen varmistamiseksi kullakin asennettavalla yhteydellä. Simuloinneilla saataisiin jo etukäteen tarkempi arvio vikapaikan laskennan tarkkuudesta. Tällöin vianpaikannusjärjestelmän asennuksen vaatimien töiden yhteydessä voisi olla mahdollista tehdä myös pieniä muutoksia, joiden avulla vianpaikannuksesta voitaisiin joko poistaa epävarmuustekijöitä tai parantaa mittausten tarkkuutta. Kummankaan järjestelmän toiminnasta ei ole varmaa tietoa, joten todennäköisesti myös ABB:n ja Manitoban järjestelmien hankinnassa tarvittaisiin jonkin verran sitoutumista järjestelmän kehitykseen ja testaukseen.

Kolmas työssä esitelty online-vianpaikannusjärjestelmä, Highvoltin järjestelmä, on kehitetty DC-kaapeleiden vianpaikannukseen, mutta on kuitenkin melko uusi, eikä siitä näin ollen ole juurikaan testaustietoa tai kokemuksia. Valmistajalta saatujen tietojen mukaan järjestelmän oletetaan soveltuvan myös avojohdojen vianpaikannukseen, mihin liittyen tulisi todennäköisesti suorittaa testejä ennen järjestelmän asennusta esimerkiksi Fenno-Skan 2 -yhteydelle. Mikäli Highvoltin järjestelmä asennettaisiin Fenno-Skan 2 -yhteydelle lähivuotina, tulisi yhteyden omistajien ja järjestelmän tilaajien todennäköisesti olla sitoutuneemmin mukana suunnittelu-, testaus- ja asennusvaiheissa, kuin muiden kahden järjestelmän hankinnan yhteydessä. Tiiviillä yhteistyöllä voitaisiin varmistaa mm. tarpeellisen tiedon vaihtuminen ja kehityksessä olevan järjestelmän testaustulosten saanti.

Kuten luvussa 4.4 on esitetty, kulkuaallon etenemisnopeuteen johdolla vaikuttaa käytetyn eristeen suhteellinen permeabiliteetti ja permittiivisyys. Avojohtojen tapauksessa eristeenä toimii ilma, jolloin kulkuaallon nopeus on lähellä valon nopeutta tyhjiössä. Kaapeleissa suhteellinen permittiivisyys eroaa selkeästi tyhjiön permittiivisyydestä, mistä johtuen kulkuaallon etenemisnopeus kaapeleissa suunnitteen puolet valon nopeudesta. [18]. Etenemisnopeuksien ollessa selkeästi erisuuret avojohdolla ja kaapelissa, vianpaikannuksen onnistumisen kannalta on tärkeää, että etenemisnopeuksien arvot on määritelty koko tasasähköyhteyttä tarkkailevassa vianpaikannusjärjestelmässä oikein.

Erityisen tärkeää etenemisnopeuksien oikea määrittely on, mikäli uutta online vianpaikannusjärjestelmää halutaan käyttää siten, että useampi mittauspiste osallistuu vikapaikan laskentaan. Tällöin suuntaaja-asemilla sijaitsevien mittauspisteiden havaitsemat kulkuaallot ovat edenneet eri nopeuksilla useampia johto-osuuksia pitkin. Samoin etenemisnopeuksien tarkka määrittely on tärkeää mikäli mittauspisteet olisivat pelkästään suuntaaja-asemilla. Online-järjestelmän käyttöönoton yhteydessä tulisikin kalibrointivikojen ja esimerkiksi referenssimittausten perusteella määrittää yhteyksien eri osien kulkuaallon kulkuajat ja tarvittaessa päivittää tiedot myös perinteisessä TDR-mittauksessa käytettäviksi arvoiksi.

Etenemisnopeuden lisäksi tärkeää on tietää johtojen pituudet mahdollisimman tarkasti. Kaapeleiden tapauksessa nykyisen pituuden selvittämiseksi olisi hyvä suorittaa kaapeleiden paikannus, jolloin saataisiin tarkat tiedot jatkoskohtien sijainnista sekä itse kaapelin sijainnista. Sijainnin tietäminen nopeuttaisi myös merellä tehtävää tarkkaa vianpaikannusta. Avojohtojen osalta tarkan pituuden määrittämiseen tarvitaan asemalta-asemalle välisen johdon kulkeman matkan lisäksi tieto johdon riippumasta jänneväleillä, jotta johtimien pituus voidaan laskea. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää johdinten asennuksen yhteydessä mitattuja tietoja johdinten pituuksista, mikäli sellaisia on saatavilla ja mittausten tarkkuus on riittävä. Todellisen vianpaikannuksen yhteydessä on otettava huomioon, että vianpaikannusjärjestelmä näyttää etäisyyden johdinta pitkin. Kun vikapaikkaa määritetään kartalle, on myös tällöin otettava huomioon johdinten riippumasta aiheutuva ero kartalla näkyvään pituuteen verrattuna.

Esitellyistä online-vianpaikannusjärjestelmistä kahden toiminta perustuu synkronoidun aikaleiman saamiseen ja sitä kautta ovat riippuvaisia GPS-kellojen toiminnasta ja satelliittiyhteyksistä. Tämä on selkeä riski vianpaikannuksen onnistumiselle, mutta toisaalta molemmilla valmistajilla on pitkä kokemus GPS-kellojen käyttämisestä online-vianpaikannuksessa. Esitellyn kolmannen järjestelmän toiminta on riippuvainen ainoastaan järjestelmästä itsestään, joka toisaalta on uusi, eikä kokemusta vianpaikannuksesta pitkällä kaapeleilla tai järjestelmän toimimisesta avojohdoilla vielä ole.

ABB:n ja Manitoban järjestelmissä tarkkuudessa vianpaikannukseen avojohdoilla ei ole eroa, kun taas kovinkaan varmaa vianpaikannustarkkuutta ei kaapelivikojen paikantamiseen saatu kuin yhdeltä valmistajalta. ABB:n järjestelmän tarkkuudeksi kaapeleilla annetaan ± 1 km, joka on nykyistä vianpaikannustarkkuutta heikompi. Kahden muun valmistajan järjestelmä taas on vielä kehityksessä kaapelivikojen paikantamisen osalta. Näin ollen järjestelmien välille on hankala saada kunnollisia eroja, joiden perusteella voitaisiin valita nopein ja tarkin vianpaikannusjärjestelmä. Aiemman vianpaikannuskokemuksensa johdosta ABB:n ja Manitoban järjestelmät olisivat todennäköisesti turvallisempia vaihtoehtoja. Tällöin on kuitenkin tutkittava GPS-signaalin kuuluvuus asennuspaikoilla. Highvoltin järjestelmä on vielä kehittymässä, jolloin se ei ole yhtä turvallinen vaihtoehto, mutta toisaalta kyseisen järjestelmän hankinnan yhteydessä voitaisiin päästä vaikuttamaan järjestelmän ominaisuuksiin paremmin Fingridin yhteyksille sopivaksi. Lisäksi Highvoltin järjestelmän eduksi voidaan laskea toiminta ilman GPS-signaalia.

Online-järjestelmien suorittaman vianpaikannuksen avulla saadaan merkittävä etu vianpaikannuksen nopeutumiseen. Avojohtovikojen tapauksessa vianpaikannus myös tarkentuu merkittävästi. Kaapelivikojen tapauksessa online-järjestelmän vianpaikannuksen tarkkuus saattaa olla nykyistä TDR-mittausta heikompi, mutta alustavana vikapaikkana kuitenkin erittäin hyvä. Kaapelivian tapauksessa on joka tapauksessa hyvä määrittää vikapaikka useammalla menetelmällä, jolloin online-järjestelmästä saatua vikapaikkaa voidaan tarkentaa TDR-mittausten avulla. Näin ollen voidaankin todeta, että online-vianpaikannusjärjestelmän käyttö edistää tasasähköyhteyksien käytettävyyttä merkittävästi. Parhaan vianpaikannusjärjestelmän selvittämiseksi tarvitaan kuitenkin jatkotutkimuksia kunkin järjestelmän osalta.

8 Yhteenveto

Tasasähköyhteyksien vikaantumiset ovat rajoittaneet pohjoismaisten sähkömarkkinoiden toimintaa, minkä johdosta yhteyksien luotettavuuden ja käytettävyyden parantaminen on tärkeää. Yhteyksien käytettävyyteen vaikuttaa merkittävästi ilmenneiden vikojen paikantamiseen ja syyn selvittämiseen kuluva aika. Vianselvitys ja -paikannus on tärkeää tehdä mahdollisimman nopeasti ja tarkasti, jotta voidaan arvioida mahdollisen korjauksen kesto ja ilmoittaa arvioitu ajankohta yhteyden palautumisesta markkinoiden käyttöön.

Nykyisin käytössä olevat menetelmät vianpaikannukseen ja vian syyn selvittämiseen ovat hitaita ja vaativat manuaalista työtä. Kaapelien vianpaikannukseen käytettävä TDR-mittaus on mittauksena tarkka ja suhteellisen nopea suorittaa. Mittaus tehdään kuitenkin vasta asematarkastuksen ja avoimen yhteyden jännitekokeiden jälkeen, mikäli arvellaan vian olevan kaapelissa. Tällöin on vianpaikannukseen kulunut aikaa yleensä jo useita tunteja. Vianpaikannuksen nopeuttamisessa erityisenä ongelmana ovatkin yleensä avojohdolla tai kaapelipäätteellä tapahtuvat ohimenevät viat. Ohimenevät viat poistuvat itsestään ja suuressa osassa tapauksia yhteys voitaisiin ottaa takaisin käyttöön vian poistuttua. Jotta yhteys voitaisiin turvallisesti ottaa takaisin tehosiirtoon, tulisi olla varmuus vian syystä ja vikapaikasta. Tällöin usein päädytäänkin partioimaan avojohto-osuudet, mihin kuluu tunteja. Ohimenevän vian tapauksessa partioinnin yhteydessä ei todennäköisesti kuitenkaan löydetä vikapaikkaa, vaan todetaan yhteyden näyttävän olevan kunnossa.

Pysyvien sekä ohimenevien vikojen paikantaminen on mahdollista tehdä online-vianpaikannusjärjestelmällä, joka asennetaan pysyvästi yhteydelle. Online-järjestelmä tarkkailee yhteyttä käytön aikana ja havaitsee viasta aiheutuvien kulkuaaltojen aiheuttamat muutokset jännite- tai virtasignaaleissa. Vian havaittuaan järjestelmä tallentaa vikasignaalin ja tallennuksen päätyttyä laskee vikapaikan. ABB:n ja Manitoban järjestelmät myös lähettävät automaattisesti vikatiedot voimajärjestelmän operaattorille. Myös Highvoltin järjestelmään ominaisuus on suunnitteilla. Vikatiedot ovat myös etäluettavissa tietoliikenneyhteyden kautta, jolloin voittunut johto-osuus ja vikapaikka kyseisellä osalla saadaan selville minuuttien kuluessa vian ilmenemisestä. Koska järjestelmät hyödyntävät vianpaikannuksessa vian aiheuttamien muutosten havainnointia, myös ohimenevien vikojen paikantaminen on mahdollista.

Online-järjestelmän avulla vianpaikannus nopeutuu merkittävästi nykyiseen verrattuna. Esiteltyjen järjestelmien toimimisesta kaapelivian yhteydessä erityisesti pitkillä kaapeleilla ei ole juurikaan kokemusta. Kahden esitellyn järjestelmän käytöstä ja toimimisesta avojohtovikojen yhteydessä on runsaasti kokemusta ja näiltä osin paikannustarkkuus parantuu merkittävästi online-järjestelmän avulla. Kaapelivikojen osalta paikannustarkkuuden hajonta oli suurempaa, mutta kullakin järjestelmällä todennäköisesti riittävä. Kaapelivian tapauksessa vikapaikka on joka tapauksessa hyvä määrittää useamman menetelmän avulla. Tällöin online-vianpaikannuksesta saadaan etu paikantamisen nopeutumisesta ja alustava arvio vikapaikasta, jota voidaan tarkentaa perinteisen TDR-mittauksen avulla.

Lähdeluettelo

- [1] Fingrid Oyj. *Fingrid Oyj:n vuosikertomus 2014*. Verkkodokumentti. Viitattu 17.6.2015. Saatavissa: <http://annualreport.fingrid.fi/fi/2014/Pages/default.aspx>.
- [2] Nurminen, H. Vanhempi asiantuntija, HVDC. Fingrid Oyj. Haastattelu 23.11.2015.
- [3] NKT Cables and Energinet.dk. *Integrity monitoring system*. Järjestelmien esitelykalvot. Rajoitettu saatavuus. Viitattu 19.2.2016.
- [4] Fingrid Oyj. *Verkon kuvaus yhtiön ArcGIS-karttatietojärjestelmässä*. Rajoitettu saatavuus. Viitattu 17.7.2015
- [5] Elovaara, J., Haarla, L. *Sähköverkot I, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta*. 2. painos. Helsinki, Otatiето, 2011.
- [6] Fingrid Oyj. *Siirtokapasiteetin määrittäminen*. Verkkodokumentti. Päivitetty 1.1.2015. Viitattu 23.6.2015. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Rajakapasiteetit%20ja%20siirrot/Siirtokapasiteetin%20määrittäminen%202015.pdf>
- [7] Fingrid Oyj. *Rajakapasiteetit ja -siirrot - Venäjä 400 kV*. Verkkosivu. Viitattu 24.6.2015. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/rajakapasiteetit/Sivut/Venaja400kV.aspx>
- [8] Fingrid Oyj. *Sähkönvienti on mahdollista Suomesta Venäjälle joulukuusta lähtien*. Verkkotiedote. Päivitetty 7.11.2014. Viitattu 24.6.2015. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut%20FSähkönvienti-mahdollista-Suomesta-Venäjälle-joulukuusta-lähtien.aspx>
- [9] Teollisuuden Voima Oyj. *OL3:n käyttöautomaation tehdastestit valmistuneet*. Tiedote. Julkaistu 30.7.2015. Saatavissa: <http://www.tvo.fi/news/1630>
- [10] Ronström, L., Hoffstein, M. L., Pajo, R., Lahtinen, M. *The Estlink HVDC Light® Transmission System*. Cigré Regional Meeting: Security and Reliability of Electric Power Systems, Tallinna, Viro, 2007.
- [11] Embaie, T., Holmberg, D., Jonsson, U., Auranne, E., Hagman, E., Jääskeläinen, K. *Fenno-Skan HVDC Link as Part of Interconnected AC/DC System*. Cigré Session. Pariisi, Ranska, 1988.
- [12] Fingrid Oyj. *Kantaverkko kehittyi: Fenno-Skan 2 -tasasähköyhteys*. Esite. Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Esitteet/Trioton%20osoitteilla/fennoskan_esite_suomi_low.pdf

- [13] Elering AS. *EstLink 2*. Esite. Saatavissa: http://estlink2.elering.ee/public/Dokumendid/EL2_teabeleht_A4_eng.pdf
- [14] Nexans Norway As. *Cross Section Drawing MI Cable with IRC - Public Use*. EstLink 2 -projektidokumentaatio, rajoitettu saatavuus.
- [15] IVO International Ltd. *Fenno-Skan HVDC Link*. Esite. Helsinki, IVO-MAV/Erikoispaino Oy, 1989.
- [16] ABB Ab. *Underground Cable Link: Supplying Europe's largest aluminium works, Norway*. Verkkodokumentti. Viitattu 27.10.2015. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/5ca8947c0425d9acc1256e36004a1494/Project%20Sunndal%20132%20kV%20XLPE%20land-.pdf>
- [17] ABB Ab. *XLPE Land Cable Systems User's Guide*. Verkkodokumentti. Viitattu 23.10.2015. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/ab02245fb5b5ec41c12575c4004a76d0/XLPE%20Land%20Cable%20Systems%202GM5007GB%20rev%205.pdf>
- [18] Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. ja Palva, V. *Suurjännitetechniikka*. 2. painos. Helsinki, Otatieto, 2003.
- [19] Gustafsson, A. et al. *Qualification of an extruded HVDC cable system at 525 kV*. JICABLE'15 - 9th International Conference on Power Insulated Cables. Versailles, Ranska, 2015.
- [20] Adato Energia Oy. *Kaapeleiden vianpaikannus -kurssi*. Kurssimateriaali. Koulutuspaikka: Scandic Rosendahl & Tampereen aikuiskoulutuskeskus, Tampere, 15.-16.4.2014.
- [21] IEEE Std 1234-2007. *IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on shielded Power Cable Systems*. New York, USA, IEEE Power Engineering Society, 2007. 27 s.
- [22] SebaKMT, *Pre location of cable faults: Basics of reflection technology*. Kaapelien vianpaikannuksen koulutusmateriaali. Rajoitettu saatavuus. 2012.
- [23] Heinhold, L. et al. *Power Cables and their Application, Part 1*. 3. painos. Berliini, Saksa, Siemens Aktiengesellschaft, 1990.
- [24] IKM Laboratorium AS. *Seba KMT, Teleflex M*. Verkkosivu. Viitattu 13.11.2015. Saatavissa: <http://www.rental.no/teleflex-m>
- [25] Seba KMT. *Reflectometer, Teleflex VX*. Verkkosivu. Viitattu 13.11.2015. Saatavissa: <http://www.sebakmt.com/en/products/power-networks/cable-fault-location/reflectometer-arm-filter/reflectometer/teleflex-vx.html>
- [26] SebaKMT. *Instruction manual, Teleflex M*. Laitteen käyttöohje. Rajoitettu saatavuus. 2003.

- [27] SebaKMT. *Operating manual, Teleflex VX / Teleflex VX-P*. Laitteen käyttöohje. Rajoitettu saatavuus. 2014.
- [28] Pedersen, L. *Case Study, Theme: Record in long range TDR measurements on submarine power cables*. Verkkodokumentti. Julkaistu: 23.10.2013. Viitattu 8.1.2016. Saatavissa: http://www.sebakmt.com/fileadmin/files/whitepaper/projektbericht-teleflex_Vx_NorNed-en-131023.pdf
- [29] Lehtimäki, J. HVDC-erikoisasiantuntija. Fingrid Oyj. Haastattelu 2.9.2015 ja 19.2.2016.
- [30] Bjorklund, H. Corporate Executive Engineer, Power Systems. HVDC Control and Protection, ABB Ab. Konferenssikeskustelut 22.6.2015 ja 10.2.2016.
- [31] Böhme, F., Pietsch, R. *The principle of online fault location on HVAC and HVDC cables during test and operation*. JICABLE'15 - 9th International Conference on Power Insulated Cables. Versailles, Ranska, 2015.
- [32] Böhme, F. Head of Measuring Devices (R&D) & Calibration Laboratory. HIGH-VOLT Prüftechnik Dresden GmbH. Konferenssikeskustelu 21.9.2015, sähköpostihaastattelu 9.12.2015.
- [33] Mosallat, F. Engineering Research & Development Manager. Manitoba HVDC Research Centre. Vianpaikannuslaitteiston esittelymateriaali, konferenssikeskustelu 17.6.2015, sähköpostihaastattelu 10.12.2015. Esittelymateriaalilla rajoitettu saatavuus.
- [34] Fingrid Oyj. *Fenno-Skan Extension: Joint HVDC-Project between Fingrid Oyj and Svenska Kraftnät*. Fenno-Skan 2 -projektidokumentaatio. Rajoitettu saatavuus.
- [35] Bergoz Instrumentation. *Bergoz Current Transformer: Power line Fault Detection- Keeping the Electricity flowing in South Africa* Verkkodokumentti. Viitattu 17.2.2016. Saatavissa: <http://www.gmw.com/technicalnotes/pdf/CT-07.08.App.note.pdf>

A Häiriötallentimen tiedoista lasketun vikapaikan yhtälön johto

Oletetaan vian ilmenevän ajanhetkellä t_0 . Viasta aiheutuvat kulkuaallot etenevät nopeudella v johdon päitä kohti, jolloin ne saapuvat mittauspisteisiin ajanhetkillä t_A ja t_B . Kulkuaallon saapuminen mittauspisteeseen voidaan havaita häiriötallentimen tiedoista jännitteen alenemisena.

Oletetaan lisäksi vikapaikan etäisyydeksi mittauspisteeseen A l_A ja pisteeseen B l_B . Tarkkailtavan johdon kokonaispituus on L . Johdon kokonaispituus voidaan lausua etäisyyksien summana:

$$L = l_A + l_B \quad (\text{A1})$$

Vian havaitsemisajankohdat mittauspisteissä A ja B voidaan lausua kulkuaallon kulkeman matkan avulla seuraavasti:

$$t_A = t_0 + \frac{l_A}{v} \quad (\text{A2a})$$

$$t_B = t_0 + \frac{l_B}{v} \quad (\text{A2b})$$

Vikapaikan etäisyys on luontevaa ratkaista etäisyytenä lähempänä vikapaikkaa olevaan mittauspisteeseen. Lähempänä vikapaikkaa olevassa mittauspisteessä jännite laskee ensin, jolloin häiriötallentimen tiedoista voidaan valmiiksi päätellä, kummasta päästä yhteyttä vikapaikan etäisyys lasketaan. Oletetaan lähimmäksi mittauspisteeksi piste A. Yhtälön (A1) avulla voidaan t_B lausua seuraavasti:

$$t_B = t_0 + \frac{L - l_A}{v} \quad (\text{A3})$$

Vian ilmenemishetki on tuntematon, joten eliminoidaan se ratkaisemalla yhtälöt (A2a) ja (A3) ajan t_0 suhteen ja merkitään yhtälöiden toiset puolet yhtäsuuriksi:

$$t_A - \frac{l_A}{v} = t_B - \frac{L - l_A}{v} \quad (\text{A4})$$

Tällöin saadaan yhtälö, joka voidaan ratkaista etäisyyden l_A suhteen ja näin ollen vikapaikan etäisyydeksi mittauspisteeseen A saadaan

$$l_A = \frac{L - (t_B - t_A) \cdot v}{2} \quad (\text{A5})$$

[29]

B Vikapaikan laskeminen erittelyn avulla häiriötal- lentimen tiedoista

Seuraavissa vikatilanteissa esiintyvien symbolit tulkitaan seuraavassa esitetyllä tavalla. Lyhenteissä t kuvaa aikaa, l pituutta ja v nopeutta. Alaindeksillä A kuvataan vikapaikan mittauspisteen A puolelle jääviä suureita, vastaavasti alaindeksillä B vikapaikan mittauspisteen B puolelle jääviä suureita. Alaindeksit aj ja k kuvaavat suureen sijoittumista avojohdolle ja kaapelille. Symbolilla L merkitään alaindeksissä ilmoitetun johto-osuuden kokonaispituutta. Näin siis esimerkiksi B,aj-alaindeksillä tarkoitetaan mittauspisteen B puolella sijaitsevan avojohdon pituutta tai kulkuaallon päästä päähän kulkemiseen kuluvaan aikaan kyseisellä johdolla. Vian ilmenemishetkeä johdolla kuvaa t_0 .

Oletus: Vikapaikka sijaitsee kaapelilla

Valitaan vikatilanteeksi luvussa 4.6 esitetty tilanne ja sen mukaiset vikatiedot. Oletetaan lisäksi vikapaikan sijaitsevan yhteyden kaapeliosuudella, kuten kuvassa 11(a) on esitetty. Tällöin liitteessä A esitetyt yhtälöt (A2a) ja (A2b) voidaan kirjoittaa muotoon:

$$t_A = t_0 + \frac{l_{A,k}}{v_k} + \frac{l_{A,aj}}{v_{aj}} \quad (\text{B1a})$$

$$t_B = t_0 + \frac{l_{B,k}}{v_k} + \frac{l_{B,aj}}{v_{aj}} \quad (\text{B1b})$$

Joissa l_A ja l_B kuvaavat vikapaikan etäisyyksiä eri johto-osuuksilla (aj, k) mittauspisteisiin A ja B nähden. Näin saadaan erotettua yhteyden johto-osuudet ja voidaan ottaa huomioon näihin liittyvät kulkuaaltojen etenemisnopeudet. Koska vian oletetaan olevan kaapelilla, yhtälöiden avojohdo-osuuksia kuvaavat termit käsittävät kyseiset avojohdo-osuudet kokonaan. Tällöin voidaan avojohdo-osuuksia kuvaavat termit korvata luvussa 4.6 taulukossa 4 esitetyillä kyseisten avojohdojen päästä päähän kulkuaajoilla. Merkitään näitä kulkuaikoja $t_{A,aj}$ ja $t_{B,aj}$, jolloin yhtälöt (B1a) ja (B1b) saadaan muotoon:

$$t_A = t_0 + \frac{l_{A,k}}{v_k} + t_{A,aj} \quad (\text{B2a})$$

$$t_B = t_0 + \frac{l_{B,k}}{v_k} + t_{B,aj} \quad (\text{B2b})$$

Kuten liitteessä A todettiin, on luontevaa laskea vikapaikan etäisyyttä lähempänä olevaan mittauspisteeseen. Nyt käsiteltävässä vikatilanteessa vian oletetaan sijaitsevan kaapelin Suomen puoleisella osuudella, jolloin lähin mittauksista erotettavissaoleva kiintopiste on kaapelipääte Suomen puolella. Jotta tätä kiintopistettä saadaan hyödynnettyä laskuissa, valitaan aiempien oletusten lisäksi vikapaikan etäisyydeksi kaapelilla mittauspisteen A puolella $l_{A,k}$ ja pisteen B puolella $l_{B,k}$. Kaapelin kokonaispituutta merkitään tunnuksella L_k . Tällöin kaapelin kokonaispituus voidaan

lausua vikapaikan molemmin puolin jäävien kaapelipituuksien summana:

$$L_k = l_{A,k} + l_{B,k} \quad (\text{B3})$$

Yhtälön (B3) avulla voidaan t_B lausua seuraavasti:

$$t_B = t_0 + \frac{L_k - l_{A,k}}{v_k} + t_{B,aj} \quad (\text{B4})$$

Ratkaistaan yhtälöt (B2a) ja (B4) ajan t_0 suhteen ja merkitään yhtälöiden toiset puolet yhtäsuuriksi:

$$t_B - \frac{L_k - l_{A,k}}{v_k} - t_{B,aj} = t_A - \frac{l_{A,k}}{v_k} - t_{A,aj} \quad (\text{B5})$$

Tällöin saadaan yhtälö, joka voidaan ratkaista etäisyyden $l_{A,k}$ suhteen ja vikapaikan etäisyydeksi Suomen puoleisesta kaapelipäätteestä saadaan

$$l_{A,k} = \frac{L_k - (t_B - t_A - t_{B,aj} + t_{A,aj}) \cdot v_k}{2} \quad (\text{B6})$$

Oletus: Vikapaikka sijaitsee Suomen puoleisella avojohdolla

Valitaan vikatilanteeksi luvussa 4.6 esitetty tilanne ja sen mukaiset vikatiedot. Oletetaan lisäksi vikapaikan sijaitsevan yhteyden avojohdo- osuudella Suomen puolella, kuten kuvassa 11(b) on esitetty. Tällöin voidaan liitteessä A esitetyt yhtälöt (A2a) ja (A2b) kirjoittaa muotoon:

$$t_A = t_0 + \frac{l_{A,aj}}{v_{aj}} \quad (\text{B7a})$$

$$t_B = t_0 + \frac{l_{B,aj}}{v_{aj}} + \frac{l_{B,k}}{v_k} + \frac{l_{BA,aj}}{v_{aj}} \quad (\text{B7b})$$

Joissa l_A ja l_B kuvaavat vikapaikan etäisyyksiä eri johto-osuuksilla (aj, k) mittauspisteisiin A ja B nähden. Ruotsin puoleisen avojohdon ja kaapelin lisäksi mittauspisteen B puolelle oletettua vikapaikkaa jää osa Suomen puoleisesta avojohdosta, jota kuvaa $l_{BA,aj}$. Mittauspisteen B puolelle jää tässä vikatilanteessa Ruotsin puoleinen avojohdo sekä kaapeli, jolloin näiden osuuksia kuvaavat termit voidaan yhtälössä (B7b) korvata edellisen vikatilanteen tavoin luvussa 4.6 taulukossa 4 esitetyillä kyseisten johto-osuuksien päästä päähän kulkuajoilla. Merkitään näitä kulkuaikoja $t_{B,aj}$ ja t_k . Tällöin yhtälö saadaan muotoon:

$$t_B = t_0 + t_{B,aj} + t_k + \frac{l_{BA,aj}}{v_{aj}} \quad (\text{B8})$$

Vikapaikan oletetaan olevan Suomen puoleisen kaapelipäätteen lähellä, avojohdon puolella. Tässä tapauksessa vikapaikkaa lähin kiintopiste on edellisen vikatilanteen tavoin Suomen puoleinen kaapelipääte. Valitaan vikapaikan etäisyys laskettavaksi etäisyytenä kaapelipäätteeseen. Merkitään avojohdon mittauspisteen A puolelle, eli

Suomen puolelle, jäävää osuutta $l_{A,aj}$ ja mittauspisteen B puolelle jäävää osuutta $l_{BA,aj}$. Avojohtodon kokonaispituutta merkitään $L_{A,aj}$, jolloin voidaan lausua:

$$L_{A,aj} = l_{BA,aj} + l_{A,aj} \quad (\text{B9})$$

Edellisen vikatilanteen tavoin voidaan nyt yhtälön (B9) avulla lausua t_A seuraavasti:

$$t_A = t_0 + \frac{L_{A,aj} - l_{BA,aj}}{v_{aj}} \quad (\text{B10})$$

Ratkaistaan yhtälöt (B8) ja (B10) tekijän t_0 suhteen ja merkitään toiset puolet yhtäsuuriksi:

$$t_B - t_{B,aj} - t_k - \frac{l_{BA,aj}}{v_{aj}} = t_A - \frac{L_{A,aj} - l_{BA,aj}}{v_{aj}} \quad (\text{B11})$$

Näin saadaan yhtälö, joka voidaan ratkaista etäisyyden kaapelipäätteestä $l_{BA,aj}$ suhteen:

$$l_{BA,aj} = \frac{L_{A,aj} - (t_B - t_A - t_{B,aj} - t_k) \cdot v_{aj}}{2} \quad (\text{B12})$$