



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

INKA TIENARI  
PIENJÄNNITTEISEN MAAKAPELIVERKON ENNAKOIVA  
VIANHAVAINNOINTI

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pekka Verho  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa  
29. elokuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**INKA TIENARI:** Pienjännitteisen maakaapeliverkon ennakoiva vianhavainnointi  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 64 sivua, 9 liitesivua  
Lokakuu 2018  
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat  
Tarkastaja: professori Pekka Verho

**Avainsanat:** vianhavainnointi, pienjänniteverkko, jakeluverkko, kunnonvalvonta

Tässä diplomityössä selvitettiin ennakoivan vianhavainnoinnin mahdollisuuksia Suomen pienjännitteisessä maakaapeliverkossa. Työ tehtiin Elenia Oy:lle, joka on Suomen toiseksi suurin sähköverkkoyhtiö. Elenialla merkittävä osa verkon normaalitilan pitkistä keskeytyksistä aiheutuu pienjänniteverkon maakaapelivioista ja vaikutus kasvaa jatkuvasti kaapeloinnin lisääntyessä. Osa vioista kehittyy pitkän ajan kuluessa ja vaurioiden havaitseminen ennen asiakkaalle aiheutuvaa keskeytystä olisi hyödyllistä.

Diplomityön aiheen taustaksi kuvataan Suomen ja Elenian sähköjakeluverkon toimintaa ja hallintaa. Työn kirjallisuusosuudessa tutustutaan tutkimustietoon pienjännitekaapeleiden hitaasti kehittyvien vikojen synnystä ja vikojen yhteydessä esiintyvistä ilmiöistä. Työssä käsitellään tunnettuja ennakoivan vianhavainnoinnin menetelmiä ja laitteita sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta Elenian pienjänniteverkkoon. Tietoa hankittiin kirjallisuudesta, laitevalmistajilta, jälleenmyyjiltä, verkkoyhtiöiltä ja yliopistoilta. Alkuoletusten vastaisesti pienjänniteverkkoon soveltuvia ratkaisuja ei löydetty, vaikkakin kiinnostus aihetta kohtaan on kasvamassa.

Kirjallisuusselvityksen pohjalta tehtiin virtamittauksia Elenian pienjänniteverkon muuntamolähdöillä, joilla pyrittiin arvioimaan paluuvirran hyödynnettävyyttä vianhavainnoinnissa. Työssä tehtiin osasta mittauskohteista PSCAD-simulointimalli, johon mittaustuloksia verrattiin. Pienjänniteverkon normaalitilasta saatiin lisää tietoa, mutta tiedon hyödyntämiseksi tarvitaan tarkempaa tutkimusta.

Työssä pyrittiin myös arvioimaan pienjänniteverkon ennakoivan vianhavainnoinnin kannattavuutta. Kustannuslaskelmia tehtiin vikatilastojen, KAH-vaikutusten ja työn hintojen perusteella. Ennakolta havaittavien vikojen määrän ja keston arviointi osoittautui hankalaksi, mikä helpottuisi tarkemmalla vikatilastoinnilla. Laskennassa käytetyt hinta-arviot tehtiin useiden epävarmojen muuttujien johdosta varmuudeksi alarajoille. Työssä laskettiin siis karkea ja pessimistinen arvio ennakoinnilla mahdollisesti saatavista säästöistä yhdelle muuntamolle asennettavaa laitteistoa kohden, joka oli muutamien satojen eurojen luokkaa.

Pienjännitekaapeleiden ennakoiva vianhavainnointi ei ole vielä ajankohtaista ja vaatii vielä parempaa ymmärrystä pienjänniteilmiöistä. Työn pohjalta voitaisiin tutkia paluuvirtojen hyödynnettävyyttä tarkemmilla mittauksilla vaurioituneista kaapeleista. Laittevaihtoehtoista seuraavan sukupolven AMR-mittareiden hyödynnettävyys vaatisi tarkempaa selvitystä.

## ABSTRACT

**INKA TIENARI:** Predictive Fault Detection in Low Voltage Underground Network  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 64 pages, 9 Appendix pages  
October 2018  
Master's Degree Programme in Electrical Engineering  
Major: Power Systems and Electricity Market  
Examiner: Professor Pekka Verho

Keywords: fault detection, low voltage network, distribution, condition monitoring

This master's thesis explored the options for predictive fault detection in Finnish low-voltage underground network. Thesis was done for Elenia Oy, which is the second largest electricity distribution company in Finland. In Elenia a significant part of the long-term interruptions during normal operation are caused by faults in the low voltage underground cables. Some of these faults evolve over time and it would be beneficial to detect the damage before the interruption of distribution.

This thesis describes the operation and management of the Finnish and Elenia's electricity grid as a background. The literature section is an introduction to slowly developing faults and related phenomena. Thesis discusses known methods and equipment for predictive fault detection and evaluates their suitability for Elenia's low voltage network. Information was acquired from literature, equipment manufacturers and distributors, network companies and universities. Contrary to initial assumptions, suitable solutions for low voltage network were not found, although the interest in the topic is growing.

Based on the literature, current measurements were made on the transformer outputs of Elenia's low voltage network to assess the usefulness of the neutral current in fault detection. A PSCAD simulation model was made from some of the measured transformer outputs and the measurement results were compared to simulations. More information was obtained from the normal state of the low voltage network, but more research is needed to utilize the information.

Thesis also aimed to evaluate the profitability of predictive fault detection in the low voltage network. Cost calculations were made based on fault statistics, outage cost impacts and labor prices. Estimation of the number and duration of slowly developing faults was difficult, which could be solved with more accurate fault statistics. The prices used in the calculations were intentionally underestimated due to several uncertain variables. A rough and pessimistic estimate of the possible savings of equipment installed to a single transformer was determined and the result was around few hundred euros.

Predictive fault detection in low voltage cables is not yet topical and requires even better understanding of low voltage phenomena. Based on this thesis, the utilization of neutral currents could be studied more with more accurate measurements from damaged cables. The usefulness of the next generation of AMR-meters would also require more thorough research.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereella Elenia Oy:lle Verkon kehitys -tiimissä 2017–2018. Työn tarkastajana toimi professori Pekka Verho Tampereen teknillisestä yliopistosta ja ohjaajana diplomi-insinööri Sami Vehmasvaara Elenialta. Diplomityössä tehdyt mittaukset mahdollisti Elenian urakoitsijakumppani Eltel Networks Oy.

Haluan kiittää erityisesti ohjaajaani Samia neuvoista, avusta tiedonhankinnassa ja ennen kaikkea kärsivällisyydestä. Kiitos Pekka Verholle työn tarkastuksesta, parannusehdotuksista ja joustavuudesta. Verkkopäällikkö Tommi Lähdeaho haluan kiittää mahdollisuudesta työskennellä Elenialla haasteellisen diplomityöaiheen parissa. Kiitos kuuluu myös Ville Syvälälle mittausavusta sekä kaikille muille diplomityössä auttaneille Elenialaisille. Erityiskiitos koko Verkon kehitys -tiimille tuesta ja mukavasta työilmapiiristä.

Tampereella, 24.10.2018

Inka Tienari

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	SÄHKÖNJAKELU SUOMESSA.....	3
2.1	Suomen sähköverkko .....	3
2.2	Sähkömarkkinalaki.....	3
2.3	Elenia Oy:n verkko.....	4
2.4	Pienjännitejakeluverkko .....	5
2.4.1	Maadoitusjärjestelmät .....	6
2.4.2	Jännitteen laatuvaatimukset .....	7
2.4.3	Pienjänniteverkon suojaus.....	8
2.4.4	Pienjänniteverkon maakaapeliviat .....	12
2.5	Verkon käyttö .....	15
2.5.1	Sähkönjakeluautomaatio .....	15
2.5.2	Tiedonsiirto .....	17
2.5.3	Vianhoito.....	18
2.6	Verkon kunnonhallinta .....	18
2.7	Keskeytyskustannukset .....	20
3.	VIANHAVAINNOINTI .....	23
3.1	Hitaasti kehittyvät pienjännitekaapeliviat .....	23
3.2	Kyselyt laitevalmistajille.....	25
3.2.1	Tarjotut ratkaisut .....	25
3.2.2	Asennus ja tiedonsiirto.....	26
3.3	Menetelmiä ja laitteita .....	27
3.3.1	Eristysresistanssi .....	27
3.3.2	Sähkövaste (DR), häviökerroin ( $\tan\delta$ ) .....	28
3.3.3	Osittaispurkaukset (PD) .....	29
3.3.4	Vuotovirta .....	29
3.3.5	AMR.....	30
3.3.6	PJ-katkaisijat ja Smart Fuse .....	31
3.3.7	Valokaarivikasuojat (Arc Fault Detectors, AFDD) .....	32
3.3.8	Väliaikaisesti asennettavat vianpaikannuslaitteet .....	33
4.	PALUUVIRTOJEN ANALYSOINTI .....	34
4.1	Mittaukset Elenian verkossa.....	34
4.1.1	Mittausasettelu .....	34
4.1.2	Tulokset.....	36
4.2	Simulointi .....	40
4.2.1	PSCAD-malli .....	41
4.2.2	Tulokset.....	44
5.	KAH-VAIKUTUKSET .....	52
5.1	Vikamäärät .....	52
5.2	Keskeytysaika ja kustannukset.....	54

6. YHTEENVETO .....	58
LÄHTEET .....	61

LIITE A: VAIHE- JA PALUUVIRTOJEN MITTAUKSET ELENIAN PIENJÄNNITE-  
VERKOSSA 2018

LIITE B: MUUNTAJAN PJ-LÄHDÖN PSCAD-MALLIN ARVOJEN MÄÄRITYS

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

2/3/4G	engl. Second/Third/Fourth Generation matkapuhelintekniikat
AC	engl. Alternating Current, vaihtosähkö
AMR	engl. Automatic Meter Reading, etäluettava sähkömittari
ATJ	asiakastietojärjestelmä
CBM	engl. Condition Based Maintenance, kuntotilaan perustuva kunnossapito
CENS	engl. Cost of Energy Not Supplied, toimittamatta jääneen energian hinta
CID	engl. Cost of the Interrupted Demand, irtikytketyn tehon hinta
CM	engl. Corrective Maintenance, korjaava kunnossapito
DAC	engl. Damped Alternating Current, vaimeneva vaihtojännite
DC	engl. Direct Current, tasasähkö
DLC	engl. Distribution Line Carrier, kantoaaltoyhteys
DMS	engl. Distribution Management System, käytöntukijärjestelmä
DR	engl. Dielectric Response, sähkövaste
EENS	engl. Expected Energy Not Served, toimittamatta jäänyt energia
FLIR	engl. Fault detection, Location, Isolation and supply Restoration
GPRS	engl. General Packet Radio Service, GSM-verkossa toimiva tiedon-siirtopalvelu
GSM	engl. Global System for Mobile communications, matkapuhelinjärjestelmä
ILD	engl. Interrupted Load Demand, irtikytketty teho
IT-järjestelmä	engl. Isolated, lat. Terra, maadoitusjärjestelmä, jossa jännitteelle alttiit osat on eristetty maasta
KAH	keskeytyksen aiheuttama haitta
KJ	keskijännite
KTJ	käytöntukijärjestelmä, ks. DMS
KuHa	kunnonhallinta
LVDC	engl. Low Voltage Direct Current, pienjännitteinen tasasähkö
MMO	muuntamo
NIS	engl. Network Information System, verkkotietojärjestelmä
OCM	engl. Online Condition Monitoring, käytönaikainen kunnonvalvonta
PD	engl. Partial Discharge, osittaispurkaus
PEN	engl. Protective Earth Neutral conductor, yhdistetty nolla- ja suoja-maadoitusjohdin
PJ	pienjännite
PSCAD	engl. Power System Computer-Aided Design, sähköjärjestelmän tietokoneavusteinen suunnittelu
RCM	engl. Reliability Centered Maintenance, luotettavuusperusteinen kunnossapito
RCM	engl. Residual Current Monitoring, vikavirtamonitorointi
SCADA	engl. Supervisory Control And Data Acquisition, käytönvalvontajärjestelmä
TBM	engl. Time Based Maintenance, aikaperusteinen kunnossapito
TN-C-järjestelmä	lat. Terra, engl. Neutral Combined, maadoitusjärjestelmä, jossa yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin (PEN)
TN-S-järjestelmä	lat. Terra, engl. Neutral Separated, maadoitusjärjestelmä, jossa erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet (N ja PE)

TT-järjestelmä	lat. Terra Terra, maadoitusjärjestelmä, jossa jännitteelle alttiin osat on suoraan maadoitettu paikallisesti
VTJ	verkkotietojärjestelmä, ks. NIS



## KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Sähköjärjestelmän rakenne. [5]</i> .....	3
<i>Kuva 2. Elenian kehittämissuunnitelma 2014-2028. [7]</i> .....	4
<i>Kuva 3. a) Haja-asutusalueelle ja b) taajamalle tyypillinen verkkomuoto. [3]</i> .....	5
<i>Kuva 4. Maadoitusjärjestelmät. [12]</i> .....	6
<i>Kuva 5. Tavallinen pienjänniteverkon suojausratkaisu. [3]</i> .....	9
<i>Kuva 6. Yksivaiheinen (vas.) ja kolmivaiheinen (oik.) oikosulku. [15] muokattu</i> .....	9
<i>Kuva 7. Oikosulkuvirran käyrämuoto. [14]</i> .....	9
<i>Kuva 8. Kahvasulakkeiden toiminta-aikoja. [14]</i> .....	11
<i>Kuva 9. Maakaapelivikojen osuus kaikista PJ-keskeytyksistä Elenian PJ-verkossa. [20]</i> .....	12
<i>Kuva 10. Asiakkaan keskeytysajan h/a jakauma vian sijainnin perusteella 2016. [21]</i> .....	13
<i>Kuva 11. Eri verkon osien keskeytyksien aiheuttajat keskeytysajan suhteen 2016. [21]</i> .....	13
<i>Kuva 12. Elenian PJ-keskeytysten yhteenveto 2017 – asiakastunnit aiheuttajan mukaan. [20]</i> .....	14
<i>Kuva 13. Sähkönjakeluautomaation eri tasot. [3]</i> .....	16
<i>Kuva 14. Elenian FieldCom-tietoliikenneverkko. [7]</i> .....	17
<i>Kuva 15. Vikajaksojen välissä vaiheen ja nolajohtimen välillä veden kautta kulkeva virta. [16]</i> .....	24
<i>Kuva 16. Ajoittainen oikosulkuvirta (L-N) ja vaihejännite. [16]</i> .....	24
<i>Kuva 17. Vikavirtamonitorointi, Bender. [36]</i> .....	30
<i>Kuva 18. Visio AMR-mittareita hyödyntävästä kunnonvalvontajärjestelmästä. [40]</i> .....	31
<i>Kuva 19. Bidoyng Smart Fuse periaatekuva. [43]</i> .....	32
<i>Kuva 20. PEN-virran seurannan periaatekuva.</i> .....	34
<i>Kuva 21. Taajaman (vas.) ja haja-asutusalueen (oik.) esimerkkimuuntopiirit, Elenian Trimble NIS</i> .....	35
<i>Kuva 22. Kuvia mittauksista.</i> .....	36
<i>Kuva 23. Mitatut vaihe- ja paluuvirrat (A) esimerkkimuuntamolta 1.</i> .....	37
<i>Kuva 24. Mitatut vaihe- ja paluuvirrat (A) esimerkkimuuntamolta 2.</i> .....	38
<i>Kuva 25. Mitatut PEN-virrat (%) suhteessa sulakekokoon 20–125 A.</i> .....	39
<i>Kuva 26. Mitatut PEN-virrat (%) suhteessa sulakekokoon 160–400 A.</i> .....	39
<i>Kuva 27. Lähdön 1 (vas.) ja lähdön 2 (oik.) muuntopiirit, Elenian Trimble NIS.</i> .....	41
<i>Kuva 28. Yksinkertaistettu muuntajan PJ-lähdön PSCAD-malli.</i> .....	41
<i>Kuva 29. Muuntajan PJ-lähdön PSCAD-malli.</i> .....	42
<i>Kuva 30. PJ-lähtöä syöttävän KJ-verkon ja muuntajan PSCAD-malli.</i> .....	42
<i>Kuva 31. PJ-kaapelin PSCAD-malli.</i> .....	43
<i>Kuva 32. Kuormituksen PSCAD-mallit.</i> .....	44
<i>Kuva 33. Simuloidut vaihe- ja paluuvirrat, epäsymmetrinen kuormitus, ei vikaa.</i> .....	45

<i>Kuva 34. Simuloidut vaihe- ja paluuvirrat, yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 0 \Omega</math>.</i>	45
<i>Kuva 35. Simuloidut vaihe- ja paluuvirrat, yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 0,3 \Omega</math>.</i>	46
<i>Kuva 36. Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 1 \Omega</math>.</i>	46
<i>Kuva 37. Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 2,8 \Omega</math>.</i>	47
<i>Kuva 38. Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa 1 kaapelin puolivälissä, PEN-virta (sini-nen) ja vaihevirta (ruskea) vikaresistanssin funktiona.</i>	48
<i>Kuva 39. Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa 1 kaapelin lopussa, PEN-virta (sininen) ja vaihevirta (ruskea) vikaresistanssin funktiona.</i>	48
<i>Kuva 40. Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 30 \Omega</math>.</i>	49
<i>Kuva 41. Kuorman virrat, oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 1 \Omega</math>.</i>	49
<i>Kuva 42. Pää- ja vaihejännitteet kuormalla, oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 1 \Omega</math>.</i>	50
<i>Kuva 43. Pää- ja vaihejännitteet kuormalla, oikosulku vaiheessa L1, <math>R_f = 0,3 \Omega</math>.</i>	50
<i>Kuva 44. Muuntamo- ja PJ-kaapelimäärien kasvuennuste.</i>	53
<i>Kuva 45. Mahdollisesti hitaasti kehittyvien vikojen määrän kasvuennuste.</i>	54
<i>Kuva 46. Säästöt havaittuja vikoja kohden eri verkon osissa.</i>	56

# 1. JOHDANTO

Diplomityö on tehty Elenia Oy:lle, joka on Suomen toiseksi suurin sähköverkkoyhtiö ja huolehtii sähkönsiirrosta 425 000 asiakkaalle sadan kunnan alueella Kanta- ja Päijät-Hämeessä, Pirkanmaalla, Keski-Suomessa sekä Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla. Elenialla on jo vuodesta 2009 asti rakennettu kaikki uudistettava verkko maakaapeloituna. Kaapelointipäätöksen taustalla oli ikänsä päähän tullut ilmajohtoverkko ja 2000-luvun alun laajoja sähkökatkoja aiheuttaneet myrskyt. Kaapelointipäätös vahvistui entisestään vuonna 2013 uudistetun sähkömarkkinalain myötä, joka tiukensi sähkön toimitusvarmuudelle asetettuja vaatimuksia. Elenialla onkin tavoitteena nostaa verkon kaapelointiaste 75 %:iin vuoden 2028 mennessä, jolloin vaatimukset astuvat voimaan. [1, 2]

Toimintavarmuuden parantamisessa keskeisessä asemassa on myös verkon automaation lisääminen. Tähän mennessä automaattioratkaisut ovat keskittyneet lähinnä suur- ja keskijänniteverkkoihin, joissa toimitusvarmuuden parantamisen asiakasvaikutus on suurin. Kaapeloinnin lisääntyessä on pienjänniteverkon maakaapelivikojen suhteellinen osuus sähkökatkojen aiheuttajana kasvanut, mikä on luonut tarpeen myös pienjänniteverkon automaattioratkaisujen kehittämiseen. Elenialla merkittävä osa normaalitilan pitkistä keskeytyksistä aiheutuukin pienjänniteverkon maakaapelivioista.

Elenia on ollut alan edelläkävijänä aktiivinen etäluettavien AMR-mittarien (engl. Automatic Meter Reading) kehittäjänä. AMR on helpottanut pienjännitevikojen paikallistamista, sillä mittareilta saadaan tieto vioista ja niiden tyypeistä automaattisesti ja vika voidaan rajata tietylle johtolähdölle. Kuitenkin osa maakaapelivioista kehittyy pitkän ajan kuluessa saatuaan alkunsa pienestä vauriosta esimerkiksi huolimattoman kaivuun tai asennuksen seurauksena. Tällaiset viat voivat olla hankalia havaita, tunnistaa ja paikantaa, sillä verkon suojalaitteet saattavat havaita vian vain ajoittain. Olisikin toimitusvarmuuden ja kustannusten näkökulmasta hyödyllistä, jos tällaiset viat voitaisiin havaita ennakoivasti ennen asiakkaalle aiheutuvaa keskeytystä.

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli kartoittaa markkinoilla olevia pienjänniteverkon ennakoivaan vianhavainnointiin soveltuvia laitteita. Lähtöoletuksena oli, että ainakin lähes valmiita ratkaisuja löytyisi ja niistä voitaisiin valita muutamia lähempään tarkasteluun. Tarkoituksena oli siis selvittää laitteiden saatavuus, hintataso, käyttökohteet ja arvioida niiden soveltuvuutta Elenian pienjännitteiseen maakaapeliverkkoon. Lisäksi oli tarkoitus selvittää löydettyjen laitteiden asennettavuutta, tietoliikennetarkaisuja, kehitystarpeita ja taloudellista kannattavuutta.

Työn alussa luvussa 2 käsitellään taustatiedoiksi Suomen ja Elenian sähköverkon, erityisesti pienjänniteverkon, rakennetta sekä joitakin työn kannalta oleellisia sähköverkkotoimintaan liittyviä lakeja ja määräyksiä. Lisäksi esitellään sähköverkon käyttööntoimintaa ja siihen liittyviä järjestelmiä. Luvussa käydään läpi vianhoitoa, keskeytyskustannuksia sekä verkon kunnonhallintaa.

Tavoitteena oli siis selvittää mahdollisuuksia hitaasti kehittyvien maakaapelivikojen havainnointiin hyvissä ajoin ennen keskeytystä. Luvussa 3 alkaa varsinainen tutkimusosuus, jossa tutustutaan ensin kirjallisuuden pienjännitekaapeleiden hitaasti kehittyvistä vioista ja selvitetään niihin liittyviä ilmiöitä. Seuraavaksi käsitellään laitevalmistajille ja jälleenmyyjille tehtyjä kyselyitä, joilla pyrittiin selvittämään laitteiden saatavuutta. Lisäksi kuvataan lyhyesti vaihtoehtoja laitteiden asennukselle ja tietoliikennetkaisuille. Tämän jälkeen käydään läpi muissa ympäristöissä yleisiä vianhavainnointi- ja kunnonvalvontamenetelmiä ja arvioidaan löytyneiden ratkaisujen ja menetelmien soveltuvuutta Suomen pienjännitteiseen maakaapeliverkkoon.

Luvussa 4 pyritään selvittämään verkon paluuvirtojen ja epätasapainon hyödynnettävyyttä ennakoivassa vianhavainnoinnissa. Tätä varten tehdään Elenian pienjänniteverkossa mittauksia, joilla selvitetään paluuvirtojen käyttäytymistä verkon normaalitilassa. Osasta mittauskohteista rakennetaan PSCAD-simulointimalli (engl. Power System Computer-Aided Design), jonka avulla normaalitilan mittaustuloksia verrataan simuloituihin vikatilanteisiin.

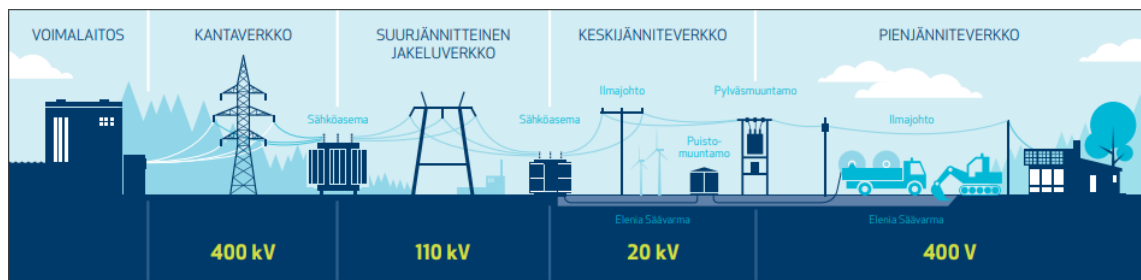
Viimeisenä luvussa 5 arvioidaan vianhavainnointilaitteilla saatavia taloudellisia hyötyjä. Lukuun sisältyy hitaasti kehittyvien vikojen määrien ja keskeytysaikojen arviointia, minkä avulla voidaan arvioida laitteistolla saatavia potentiaalisia säästöjä. Yhteenvedossa käydään vielä läpi eri tutkimusosiot ja koostetaan niiden tärkeimmät tulokset. Lopuksi arvioidaan työn pohjalta syntyneitä jatkotutkimustarpeita.

## 2. SÄHKÖNJAKELU SUOMESSA

### 2.1 Suomen sähköverkko

Suomen sähköntoimitusjärjestelmä (Kuva 1) koostuu sähköntuotannosta, -siirrosta ja -jakelusta. Voimalaitoksilta sähkönsiirto tapahtuu pääosin 220-400 kV kantaverkosta 110 kV suurjännitteisen jakeluverkon (entinen alueverkko) kautta 20 kV keskijännitejakeluverkkoon, josta edelleen 20/0,4 kV jakelumuuntamoiden kautta 400 V pienjänniteverkkoon ja kuluttajille. [3] Koko Suomessa verkkoa on yli 360 000 km, josta keskijänniteverkkoa on noin 138 000 km ja pienjänniteverkkoa noin 217 000 km [2, 3].

Suomen sähköverkosta suurin osa rakennettiin 1950–1970 -luvuilla. Verkon primääri-komponenttien pitoajat ovat tyypillisesti 30–50 vuotta ja elektroniikkaa sisältävien suojalaitteiden, kuten suojareleet ja energiamittarit, pitoajat ovat noin 10–20 vuotta. Haja-asutusalueilla verkko on pääosin ilmajohtoa, jonka käyttöikä on 40–50 vuotta. Kaupunkien verkko on pääosin maakaapeloitu ja kaapeleiden käyttöikä on ilmajohtoa pidempi, jopa 100 vuotta [4]. Koko sähköverkosta on maakaapeloitu noin 25 %. [2, 3]



*Kuva 1. Sähköjärjestelmän rakenne. [5]*

### 2.2 Sähkömarkkinalaki

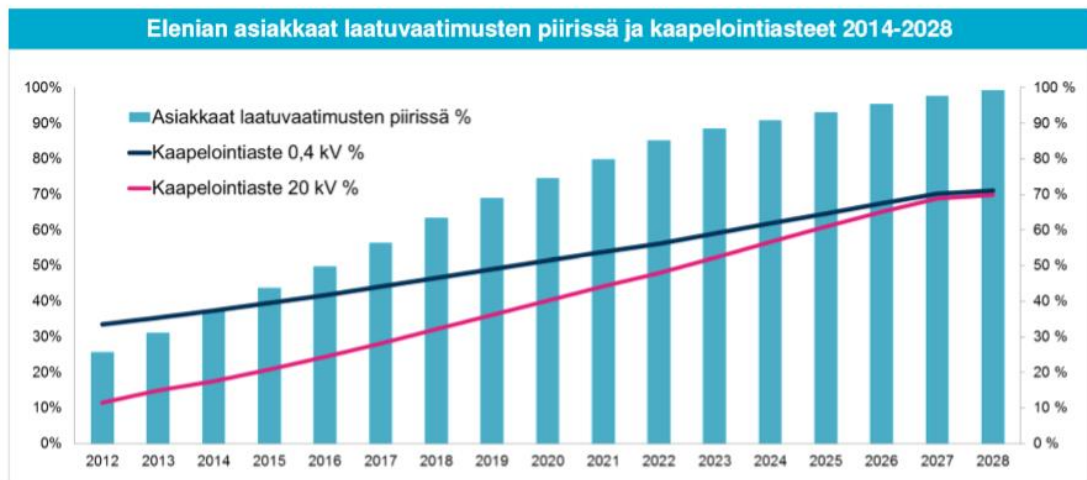
Vuonna 2013 voimaan tullut uusittu sähkömarkkinalaki on laadittu varmistamaan edellytykset sähkön hyvälle toimitusvarmuudelle, kilpailukykyiselle hinnalle ja turvaamaan kohtuulliset palveluperiaatteet loppukäyttäjille. Lakia sovelletaan sähkömarkkinoihin eli sähkön tuotantoon, tuontiin, vientiin, toimitukseen, siirtoon ja jakeluun. Verkonhaltijaa koskevia säännöksiä sovelletaan luvanvaraista sähköverkkotoimintaa harjoittavaan elinkeinonharjoittajaan, jolla on Suomessa sähköverkkoa hallinnassaan. [6]

Verkonhaltijan tulee ylläpitää, käyttää ja kehittää verkkoaan säädettyjen vaatimusten ja verkon käyttäjien kohtuullisten tarpeiden mukaisesti turvatakseen riittävän hyvälaatuisen sähkön saatavuus. Jakeluverkko on toteutettava ja ylläpidettävä siten, että verkko täyttää kantaverkonhaltijan asettamat käyttövarmuutta ja luotettavuutta koskevat vaatimukset. Lisäksi verkon vioittuminen ei saa aiheuttaa asemakaava-alueella verkon käyttäjälle yli

6 tuntia kestävä sähköjakelun keskeytystä, eikä muilla alueilla yli 36 tuntia kestävä keskeytystä. Jakeluverkon haltijan tulee laatia kehittämissuunnitelma, jonka toteuttaminen johtaa säädettyjen vaatimusten täyttämiseen. Jakeluverkonhaltijan on täytettävä säädetty vaatimukset vuoden 2028 loppuun mennessä. [6]

## 2.3 Elenia Oy:n verkko

Elenia Oy palvelee 425 000 asiakasta Kanta- ja Päijät-Hämeessä, Pirkanmaalla, Keski-Suomessa sekä Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla. Eleniällä oli vuoden 2017 lopussa noin 70 170 kilometriä sähköverkkoa, josta keskijänniteverkkoa on 25 210 kilometriä ja pienjänniteverkkoa 43 450 kilometriä. Ilmajohtoverkon ikääntyminen ja 2000-luvun alun laajoja sähkökatkoja aiheuttaneet myrskyt synnyttivät vuonna 2009 Elenia Säävarman, eli päätöksen maakaapeloida kaikki uudistettava verkko. Päätöstä vahvisti vuonna 2013 uudistuneen sähkömarkkinalain kiristyneet toimintavarmuusvaatimukset. Säävarman tavoitteena on nostaa verkon maakaapelointiaste 75 prosenttiin vuoteen 2028 mennessä (Kuva 2), jolloin vaatimukset astuvat voimaan. Säävarmaa sähköverkkoa rakennetaan noin 3 000 kilometriä vuodessa. Vuoden 2017 lopussa koko jakeluverkon kaapelointiaste oli 41 % ja pienjänniteverkon kaapelointiaste 47 %. [1, 2]



**Kuva 2.** Elenian kehittämissuunnitelma 2014-2028. [7]

Kaapelointikohteiden valintaan vaikuttavat verkon asiakas- ja energiatiheys, kriittisyysluokka, verkostomäärä, tilastoidut keskeytykset sekä verkon kunto ja ikärakenne. Kaapelointi onkin painottunut taajamien sisäisiin, taajamia syöttäviin sekä haja-asutusalueen heikkokuntoisiin verkkoihin. Taajamien kaapelointiasteen noustessa lähelle 100 %:a on kaapeloinnin painopiste alkanut siirtyä haja-asutusalueille. [7]

Kaapeloinnin lisäksi toimitusvarmuutta parannetaan kunnossapidolla. Keskijännitteistä avojohtoverkkoa on vuodesta 2008 lähtien lentotarkastettu neljän vuoden kierrolla eli vuosittain noin 5 000 kilometriä. Lisäksi pienjänniteverkkoa tarkastetaan noin 3 000 kilometriä vuodessa. Lentotarkastusten perusteella valitaan kunnossapitoa vaativat verkon

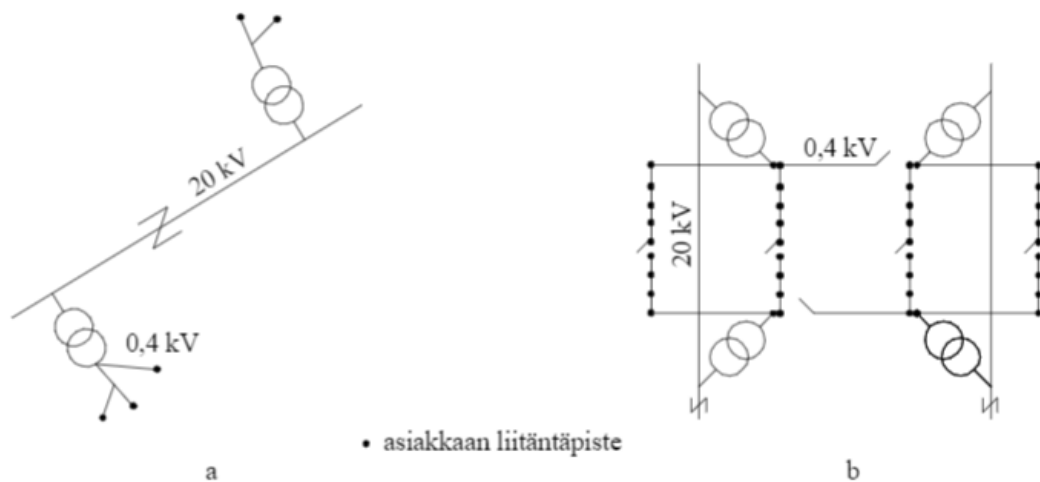
osat. Verkon puustoa raivataan noin 5 000 kilometriä vuodessa, josta keskijänniteverkon raivausten osuus on noin 2 500 kilometriä ja pienjänniteverkon raivausten osuus noin 2000 kilometriä. [2, 7]

Vaikka uusi sähkömarkkinalaki ei tule voimaan vielä kymmeneen vuoteen, on Elenia ai-noana yhtiönä maksanut jo vuodesta 2009 vapaaehtoisia korvauksia yli 6 tunnin sähkökatkoista. Tällä hetkellä lakisääteinen korvaus tulee maksaa vasta yli 12 tunnin katkoista. Elenian maksaman vapaaehtoisen korvauksen suuruus on 3 % vuosittaisesta siirtopalvelumaksusta, ollen enintään kuitenkin 350 €. [2, 8]

## 2.4 Pienjännitejakeluverkko

Pienjänniteverkkoa syötetään keskijänniteverkosta yleisimmin 20/0,4 kV jakelumuunta-moilla, jotka ovat ilmajohtoverkossa pylväsmuuntamoita ja maakaapeliverkossa puisto-muuntamoita. Keskijänniteverkko jakelumuuntamoiden välillä on keskeisiltä osiltaan usein silmukoitu, kun taas pienjänniteverkko rakennetaan yleensä säteittäisenä (Kuva 3a). Taajamissa myös pienjänniteverkko saattaa olla silmukoitu (Kuva 3b). Taajamassa sil-mukoidun verkon rakentaminen on usein kannattavaa, sillä PJ-verkko muodostuu tihe-äksi, jolloin etäisyydet ovat lyhyitä ja kuormitusiheydet suuria. Haja-astutusalueella taas etäisyydet ovat pitkiä ja muuntopiirit ovat asiakasmäärältään pieniä, joten luotettavuuden parantaminen verkkoa silmukoimalla ei olisi järkevää. [3]

KJ- ja PJ-verkkoja käytetään molempia kuitenkin yleensä säteittäisenä, jolloin niissä on yksi syöttöpiste. Tämä helpottaa häiriöiden rajoittamista, suojauksen toteuttamista ja jän-nitteen säätöä. Säteittäisessä verkossa myös oikosulkuvirrat ovat pienempiä. Silmukoin-nin hyöty on vikatilanteissa, joissa viallisen muuntopiirin jakelu voidaan ohjata naapuri-muuntopiiristä. [3]



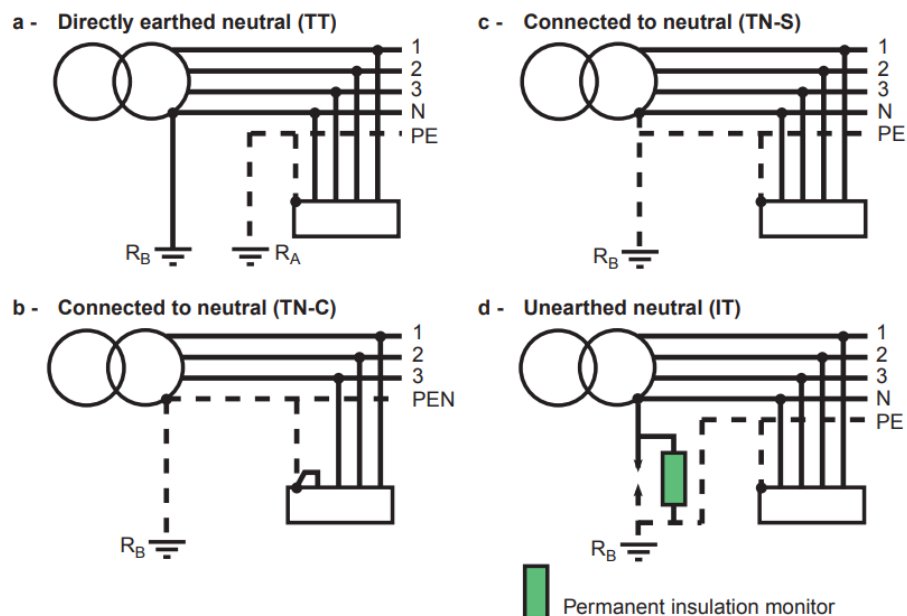
**Kuva 3.** a) Haja-asutusalueelle ja b) taajamalle tyypillinen verkkomuoto. [3]

Jakelumuuntamo koostuu keskijännitekiskostosta, yhdestä tai useammasta muuntajasta, pienjännitelähdöistä ja mahdollisesta apujännitejärjestelmästä. Pienjänniteverkon vikavirta- ja ylikuormitussuojaus hoidetaan jakelumuuntamalla eli jokainen lähtö varustetaan sulakkeilla. Muuntajalta lähtevät PJ-runkokaapelit haarautuvat edelleen kuluttajille jakokaapeilla, joilla voi olla lisää varokkeita suojauksen toiminnan takaamiseksi ja selektiivisyyden parantamiseksi. [3]

### 2.4.1 Maadoitusjärjestelmät

Pienjänniteverkko on yleensä maadoitettu, kun taas keskijänniteverkko on yleensä sammutettu tai maasta erotettu. Maadoituksen tehtävänä on toimia ensisijaisesti ihmisille ja eläimille vaarallisten kosketusjännitteiden tasaajana. Suomen pienjännitejakeluverkko on toteutettu TN-C-järjestelmänä (Kuva 4b), jossa on PEN-johdin eli yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin (PEN). Suomen rakennusten maadoitusjärjestelmä on yleensä TN-S (lat. Terra, engl. Neutral Separated) (Kuva 4c), jossa on erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet (PE) ja joka yhdistettynä jakeluverkon maadoitukseen muodostaa yhdistetyn TN-C-S-järjestelmän. [3, 9]

Muita maadoitusjärjestelmiä ovat TT-järjestelmä (lat. Terra Terra) (Kuva 4a) ja IT-järjestelmä (engl. Isolated, lat. Terra) (Kuva 4d). TT-järjestelmässä ei ole yhteistä maadoituspistettä, vaan jännitteelle alttiit osat on yhdistetty paikallisesti suoraan maan potentiaaliin maadoituselektrodilla. Järjestelmä ei ole Suomessa käytössä. IT-järjestelmässä sähköverkko on maasta erotettu, mutta laitteistojen jännitteelle alttiit osat on maadoitettu. IT-järjestelmää käytetään käyttövarmuutta vaativissa kohteissa, kuten teollisuuden sähkönjakelussa, leikkaussaleissa tai ohjauspiireissä. [10]



*Kuva 4. Maadoitusjärjestelmät. [12]*



## 2.4.2 Jännitteen laatuvaatimukset

Pienjänniteverkon jännitteelle asiakkaan liittymiskohdassa normaaleissa käyttöolosuhteissa on asetettu useita laatuvaatimuksia standardissa SFS-EN 50160. Näihin kuuluvat mm. verkkotaajuus, jännitteen suuruus, jännitetason vaihtelu, nopeat jännitemuutokset, välkynnän häiritsevyyssindeksi, jännitekuopat, jännitteen epäsymmetria ja yliaaltojännitteet. [3, 11]

Annetut raja-arvot vaaditaan usein jollakin tietyllä aikavälillä. Esimerkiksi pienjännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista 95 % tulee olla jokaisen viikon aikana  $230 \text{ V} \pm 10 \%$  sekä kaikkien tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen välillä  $+10 / -15 \%$ . Pääosin kuormituksen muutoksista tai kytkennöistä johtuvat kertaluontoiset nopeat jännitemuutokset saavat olla 5–10 %. [3]

Jakelujännitteen epäsymmetriaa aiheuttaa yksivaiheisista asiakasliitännöistä ja kuormitusten epätasaisesta jakautumisesta vaiheiden välillä. Myös yhden vaiheen katkeaminen tai sulakkeen palaminen aiheuttaa epäsymmetriaa. Kuormituksen epätasaisuudesta syntyvä virtaepäsymmetria aiheuttaa jännite-epäsymmetriaa. Standardin mukaan jokaisen viikon aikana 95 % jännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista tulee olla 0–2 % myötäkomponentista. [3, 11] Epäsymmetrisessä kuormituksessa vaihevirratt summautuvat nollassa. Taulukossa 1 on esitetty jännitteen laatuvaatimuksia.

**Taulukko 1.** Jännitteen laatuvaatimuksia. [11]

Jännitteen laatuvaatimukset	
Hyvä laatu	$U_n \pm 4 \%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5 \%$
Normaalilaatu	$U_n \pm 10 \%$
Standardilaatu	95 % välillä $U_n \pm 10 \%$
Mittaus	10 min jaksoina viikon ajan

Jännitteen epäsymmetrian kriteerit	
Hyvä laatu	Kaikki $u_{nsh}$ -arvot $\leq 2 \%$
Normaalilaatu	Kaikki $u_{nsh}$ -arvot $\leq 2 \%$
Standardilaatu	Mitatuista $u_{nsh}$ -arvot $\leq 2 \%$
Mittaus	95 % vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvoista tulisi olla 0...2 % myötäkomponentista.

Jännitteen epäsymmetria voidaan laskea seuraavasti:

$$u_n = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}}, \text{ missä} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (2)$$

$u_n$  = epäsymmetria

$\beta$  = jännitekerroin

$U_{12}$  = jännite vaiheiden L1–L2 välillä

$U_{23}$  = jännite vaiheiden L2–L3 välillä

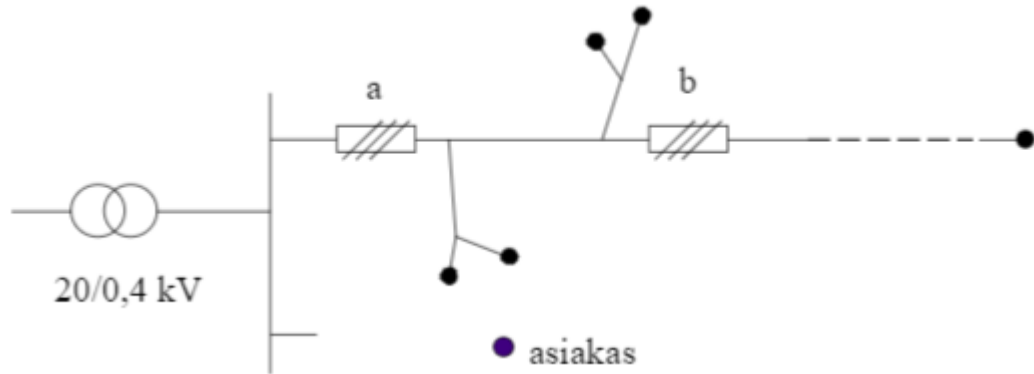
$U_{31}$  = jännite vaiheiden L3–L1 välillä. [11]

### 2.4.3 Pienjänniteverkon suojaus

Sähköverkkojen suunnittelussa mahdollisesti esiintyvät vikatilanteet huomioidaan etukäteen. Viat eivät saa aiheuttaa vaaraa turvallisuudelle ja käyttökeskeytykset pyritään pitämään mahdollisimman pienenä. Vikoja aiheuttavat mm. salaman iskut, ilmajohtoverkossa myrskyt, laitteiden vioittuminen tai toimintahäiriöt sekä inhimilliset erehdykset. [13]

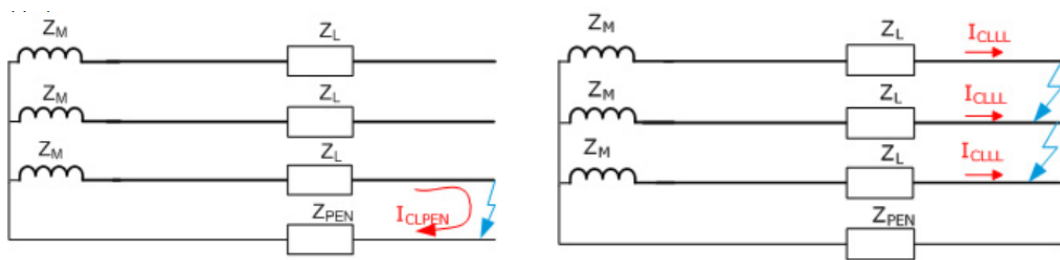
Pienjänniteverkon suojauksessa keskeistä on verkkokomponenttien suojaus ja lisäksi hengen- ja palovaaran tehokas eliminointi. Tämä tarkoittaa varokesuojausta ja riittävän hyvien maadoitusten ylläpitoa. Jakeluverkon PEN-johdin on maadoitettava syöttöpisteessä tai korkeintaan 200 metrin päässä syöttöpisteestä. Lisäksi jokainen johtohaara on maadoitettava enintään 200 metrin päässä johdon loppupäästä. [3]

Pienjänniteverkon oikosulkusuojaukseen käytetään yleensä sulakkeita, jotka on sijoitettu muuntamoille ja jakokaapeille. Syötön nopean poiskytkennän on toimittava verkon loppupäässä tapahtuvan pienimmän yksivaiheisen oikosulkuvirran vaikutuksesta määrättyssä enimmäisajassa, joka on yleisesti 5 sekuntia. Vanhassa ilmajohtoverkossa voidaan sallia myös pidempi suojausaika, joka saa olla enintään 15 sekuntia. [3] Pienjänniteverkon sulakkeet ovat yleensä kahvasulakkeita, joita käytetään niiden edullisuuden, turvallisuuden, selektiivisyyden ja hyvän virranrajoituskyvyn vuoksi [14]. Kuvassa 5 on esitetty tavallinen pienjänniteverkon suojausratkaisu.

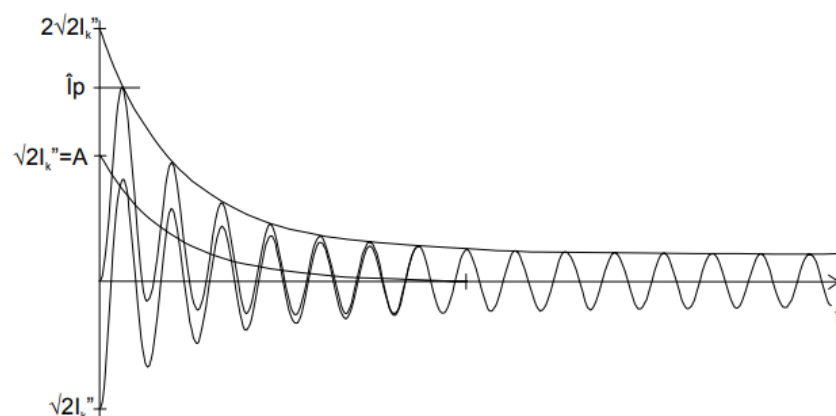


**Kuva 5.** Tavallinen pienjänniteverkon suojausratkaisu. [3]

Oikosululla tarkoitetaan kahden tai useamman piirissä olevan pisteen välistä suoraa tai pieni-impedanssista yhteyttä. Yksivaiheisessa oikosulussa (Kuva 6 vas.) eristysvika syntyy yhden vaihejohtimen ja nolla- tai PEN-johtimen välillä. Kaksi- tai kolmivaiheisessa oikosulussa (Kuva 6 oik.) vika syntyy kahden tai kolmen vaihejohtimen välille. Oikosulun seurauksena syntyy oikosulkuvirta (Kuva 7), joka on yleensä kertaluokkaa suurempi kuin normaali kuormitusvirta. [13]



**Kuva 6.** Yksivaiheinen (vas.) ja kolmivaiheinen (oik.) oikosulku. [15] muokattu



**Kuva 7.** Oikosulkuvirran käyrämuoto. [14]

Kuvassa 7 esitetyssä oikosulkuvirrassa on vaimeneva tasavirtakomponentti sekä vaihtovirtakomponentti, jossa voi myös olla vaimeneva osa. Tasavirtakomponentin suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä ja vaimenemisnopeus piirin resistanssin ja reaktanssin

suhteesta. Alkuoikosulkuvirta  $I_k''$  on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä. Vian aikana piirin reaktanssit kasvavat ja vaimentavat virran jatkuvuustilan oikosulun arvoon  $I_k$ . Sysäyoikosulkuvirta  $i_p$  on tasavirtakomponentin huomioiva oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo. [14]

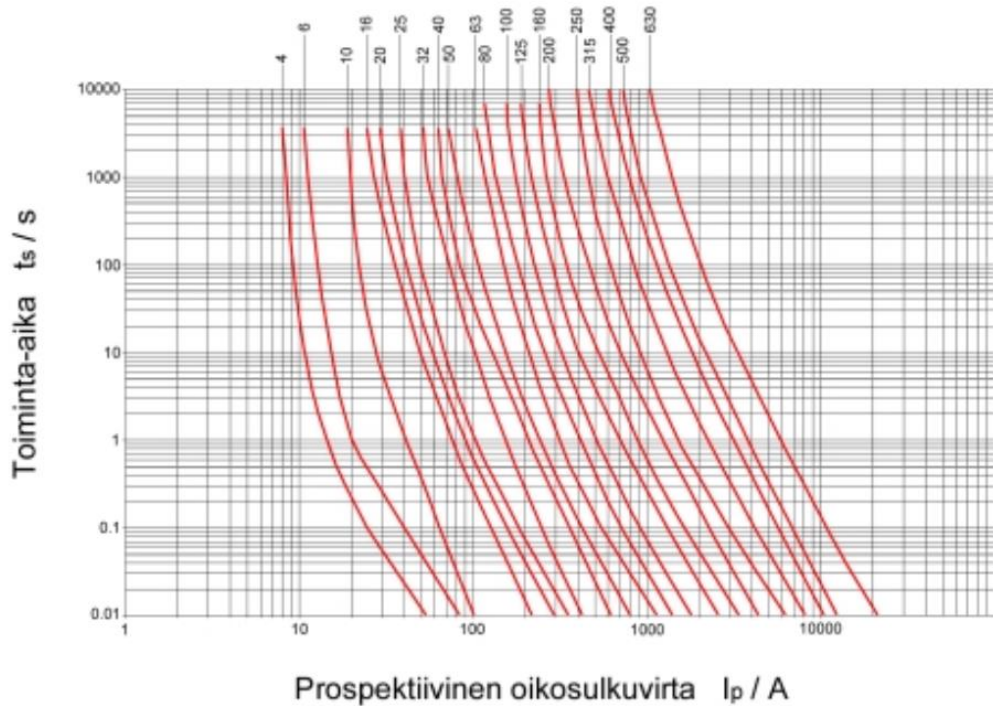
Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä (3).

$$I_{k1v} = \frac{3 \cdot U_v}{\sqrt{(2R_m + R_{m0} + 3l(r_j + r_0))^2 + (2X_m + X_{m0} + l(2x_j + x_{j0} + 3x_0))^2}} \quad (3)$$

missä

- $U_v$  = vaihejännite
- $r_j$  = vaihejohtimen resistanssi
- $R_m$  = muuntajan oikosulkuresistanssi
- $x_j$  = vaihejohtimen reaktanssi
- $X_m$  = muuntajan oikosulkureaktanssi
- $x_{j0}$  = vaihejohtimen nollareaktanssi
- $X_m$  = muuntajan oikosulkureaktanssi
- $r_0$  = nollajohtimen resistanssi
- $R_{m0}$  = muuntajan nollareaktanssi
- $x_0$  = nollajohtimen reaktanssi
- $l$  = johdon pituus. [14]

Sulakkeiden toiminta perustuu sulakkeen sisällä olevaan metallilankaan tai -nauhaan, jota oikosulkuvirta lämmittää yli sen kestokyvyn, jolloin se sulaa ja katkaisee virtapiirin. Kuvassa 8 on esitetty tavallisia kahvasulakkeiden toiminta-aikoja. Esimerkiksi kaapelin vaurioituessa vain osittain ei kunnollista oikosulkua välttämättä tapahdu, vaan oikosulkuvirta saattaa kulkea vain hyvin hetkellisesti. Tällöin sulake ei välttämättä ehdi lämmitä tarpeeksi virtapiirin katkeamiseksi ja ehtii jäähtyä ennen seuraavaa virtapiikkiä, eikä vauriota näin ollen havaita. Joskus tällainen virtapiikki polttaa sulakkeen, mutta vika vaikuttaa korjaantuvan sulakkeen vaihdolla, kunnes tulee seuraava sulakkeen polttava virtapiikki. Tällaiset toistuvat selittämättömät sulakepalot ovatkin PJ-verkossa usein ainoa keino tunnistaa mahdollisesti vaurioituneet kaapelit. [4, 16]



**Kuva 8.** Kahvasulakkeiden toiminta-aikoja. [14]

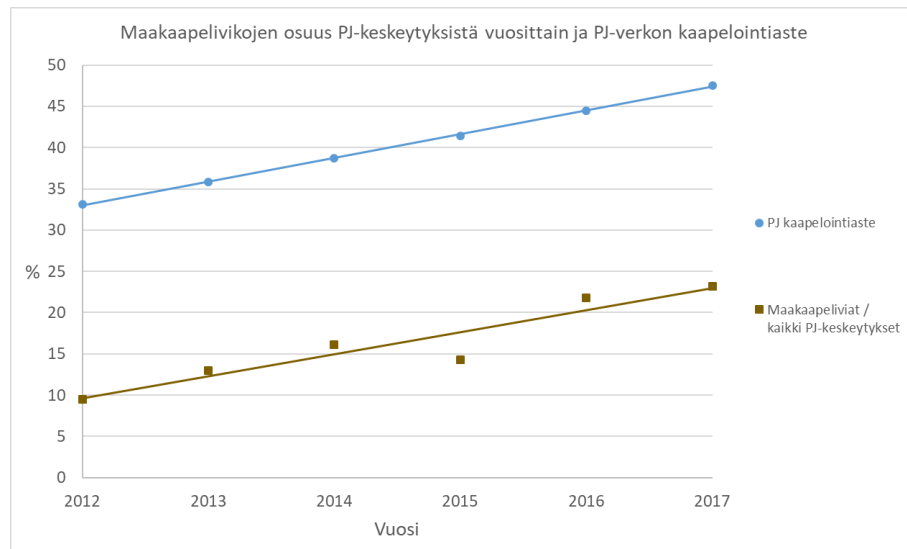
Koska pienjänniteverkon suojaus on toteutettu yksinkertaisilla sulakkeilla, on vianhavainnointi aiemmin perustunut pelkästään asiakkaiden tekemiin vikailmoituksiin. Tilanne on kuitenkin muuttunut etäluettavien sähkömittareiden (AMR, engl. Automatic Meter Reading) myötä. Tyypilliset AMR-mittarin toiminnot ovat tuntienergiamittaus, jännitteen laadun mittaus, keskeytysten rekisteröinti, hälytykset, sähkön kytkentä ja katkaisu sekä kuormanohjaus. Tuntienergiamittauksia käytetään määrittäessä asiakaskohtaisia kuormitusmalleja, joista on hyötyä verkon tehonjaon laskennassa ja suunnittelussa. Jännitteen laadun mittauksilla voidaan kohdentaa investointeja. Keskeytysten rekisteröintiä hyödynnetään asiakaskohtaisissa keskeytystilastoissa, asiakaspalvelussa ja vakiokorvauskäsittelyissä. [3]

AMR pystyy ilmoittamaan mm. sähkönsyötön katkeamisesta. Hälytyksiä käytetään kuitenkin suodattaen, sillä esimerkiksi keskijännitevioissa ei ole tarpeenmukaista saada ilmoitusta katkoksesta jokaiselta vioituneeseen verkkoon kytketyltä AMR-mittarilta. Hälytykset soveltuvat etenkin pienjänniteverkon vioista ilmoittamiseen ja sopivilla algoritmeilla varustettu laite pystyy ilmoittamaan pienjänniteverkon yksi- ja kaksivaiheisesta sulakepalosta, sähkönkäyttäjälle vaarallisesta nolajohdon katkeamisesta sekä keskijänniteverkon johdinkatkeamasta, jota KJ-verkon suojaus ei pysty tunnistamaan. Mittareille voidaan tehdä myös manuaalisia kyselyitä. [3]

## 2.4.4 Pienjänniteverkon maakaapeliviat

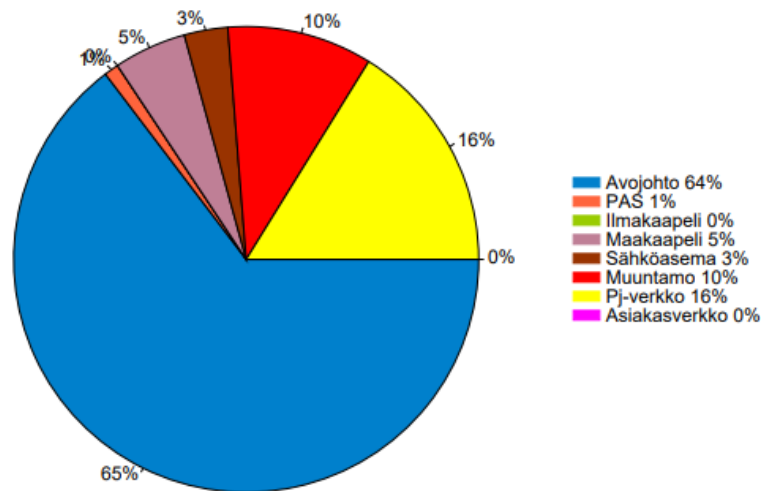
Vaikka maakaapelit ovat suojassa luonnonilmiöiltä toisin kuin ilmajohdot, eivät nekään ole täysin vikavapaita. Maakaapelivikojen aiheuttajia ovat mm. kaivuuvauriot, asennusvaiheen vauriot, heikot liitokset ja kaapeleiden ikääntyminen [17]. Kaapeloinnin lisääntyessä on myös maakaapelivikojen osuus kaikista pienjänniteverkon keskeytyksistä Elenian verkossa kasvanut (Kuva 9). Kuvasta nähdään maakaapelivikojen osuuden kasvaneen samaa tahtia kaapelointiasteen kanssa. Kaivuutyöt ovat etenkin kesällä yksi yleisimpiä sähkökatkojen aiheuttajia [18].

Valtaosa normaalikäyttötoiminta-ajan pitkistä keskeytyksistä aiheutuu pienjänniteverkon maakaapelivioista. Osa vaurioista on lieviä, eivätkä aiheuta heti keskeytystä, mutta kehittyvät pitkän ajan kuluessa keskeytyksen aiheuttavaksi viaksi. Vaurioituneiden kaapeleiden havainnointi ennen varsinaista vikaa ja jakelun keskeytystä olisi asiakaskokemuksen ja liiketoiminnan kannalta hyödyllistä. [19]

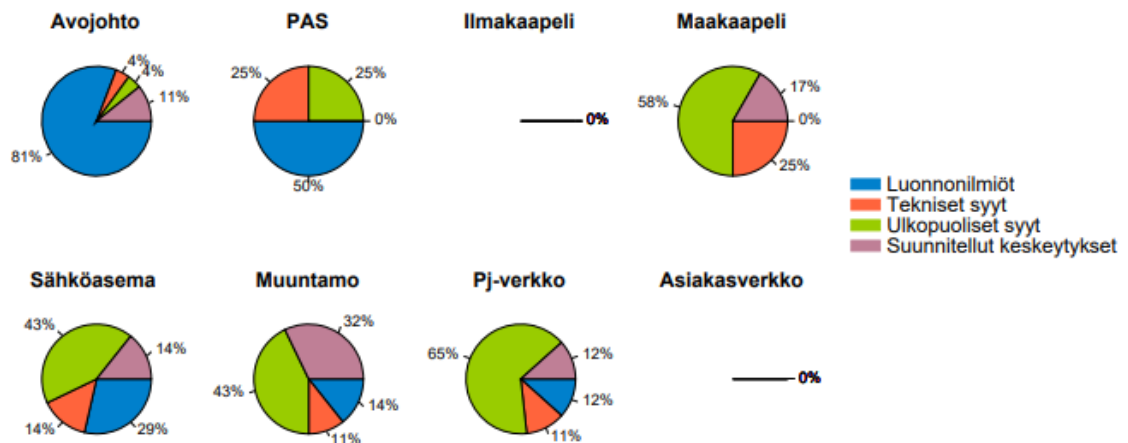


**Kuva 9.** Maakaapelivikojen osuus kaikista PJ-keskeytyksistä Elenian PJ-verkossa. [20]

Energia-alan yrityksiä edustava Energiateollisuus ry kerää vuosittain sähköverkkoyhtiöiltä keskeytystilastoja. Kuva 10 on vuoden 2016 sähkön keskeytystilastosta asiakkaan kokeman keskeytysajan (tuntia vuodessa) jakauma vian sijainnin perusteella. Suurin osuus oli keskijänniteverkon avojohdojen vioilla, mutta toiseksi suurin vaikutus oli pienjänniteverkon vioilla. Verkon maakaapelointiasteen kasvaessa keskijänniteverkon avojohdon suhteellinen osuus pienenee tulevaisuudessa ja muiden osuus kasvaa. Lisäksi keskijänniteverkon automaatiota kehitetään jatkuvasti, mikä vähentää keskijänniteverkon vioista aiheutuvaa keskeytysaikaa, jolloin pienjänniteverkon suhteellinen osuus kasvaa tulevaisuudessa. Maakaapeleilla ja pienjänniteverkolla ulkopuoliset syyt olivat suurin keskeytyksien aiheuttaja keskeytysajan suhteen, kuten nähdään kuvasta 11. Ulkopuoliset syyt tarkoittavat useimmiten huolimattoman kaivuun seurauksena vaurioitunutta kaapelia.



**Kuva 10.** Asiakkaan keskeytysajan h/a jakauma vian sijainnin perusteella 2016. [21]

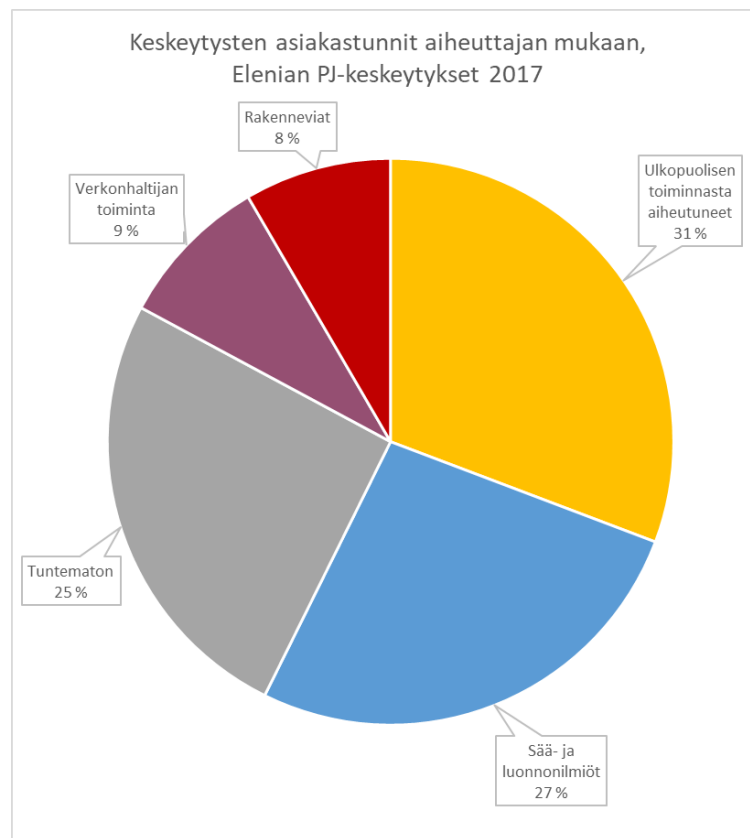


**Kuva 11.** Eri verkon osien keskeytyksien aiheuttajat keskeytysajan suhteen 2016. [21]

Taulukossa 2 on esitetty Elenian vikatilastoinnissa käytöntukijärjestelmässä (DMS) käytettävät aiheuttajat pienjänniteverkon vioille. Aiheuttajiin voi lähes kaikkiin sisältyä maakaapelivikoja. Tuuli ja myrsky koskee lähinnä ilmajohtoverkon vikoja. Kuvassa 12 on Elenian PJ-keskeytysten asiakastunnit aiheuttajien mukaan vuodelta 2017. Kuvassa eri sää- ja luonnonilmiöt on yhdistetty (L1–L5). Kuvasta nähdään, että myös Elenian PJ-keskeytystilastoissa ulkopuolisten toiminta on ollut suurin asiakastuntien aiheuttaja vuonna 2017.

**Taulukko 2.** Pienjännitevikojen aiheuttajat Elenian vikatilastoinnissa. [17]

Ei määritelty
L1: Tuuli ja myrsky
L2: Lumi ja jää
L3: Ukkonen (salamointi)
L4: Muut sää- ja luonnonilmiöt
L5: Eläimet
R1: Rakenneviat
R2: Verkonhaltijan toiminta
T1: Tuntematon
U1 Ulkopuolisten toiminnasta aiheutuneet



**Kuva 12.** Elenian PJ-keskeytysten yhteenveto 2017 – asiakastunnit aiheuttajan mukaan. [20]

Koskemattomina pienjännitekaapelit ovat melko pitkäikäisiä ja kestävät jopa 100 vuotta käytössä. Kaapelit ovat kuitenkin usein sijoitettu niin, että ne ovat alttiina kaivuuvaurioille. Kaapeleiden läheisyyteen voi olla sijoitettu muuta kunnallistekniikkaa tai televerkkoja, joiden huoltotoimenpiteiden yhteydessä tapahtuva kaivu voi vaurioittaa kaapeleita. [4] Kaapeleita on myös asiakkaiden tonteilla ja mailla, jolloin maanomistajat saattavat kaivaessaan vaurioittaa kaapeleita. Kaapeleiden lähellä kaivamisesta seuraaviin vaurioihin on pyritty viime aikoina vaikuttamaan tiedottamisella ja tietoisuuden lisäämisellä.



Joskus kaapeleita vaurioitetaan kaivamalla jo asennusvaiheessa tai osutaan aiemmin asennettuihin kaapeleihin. Muita asennusvaiheen vaurioita ja virheitä voivat olla esimerkiksi viillot kaapeleissa, löysät liitokset, huonot kaapelijatkot, routalengkien puute, asentaminen kivikkoiseen kaapeliojaan tai muu kovakourainen käsittely. Näiden aiheuttajaksi merkitään usein rakennevika tai verkonhaltijan toiminta. [17]

Vaikka maakaapeleista usein puhutaan säävarmoina, voivat ne silti vaurioitua esimerkiksi ukkosesta ylijännitesuojien puuttuessa. Myös lumi ja jää sekä muut sää- ja luonnonilmiöt pitävät sisällään esimerkiksi roudan liikuttamia jakokaappeja ja kaapeleita, mikä voi heikentää liitoksia. Joskus eläimet saattavat pureskella kaapeleita. [17]

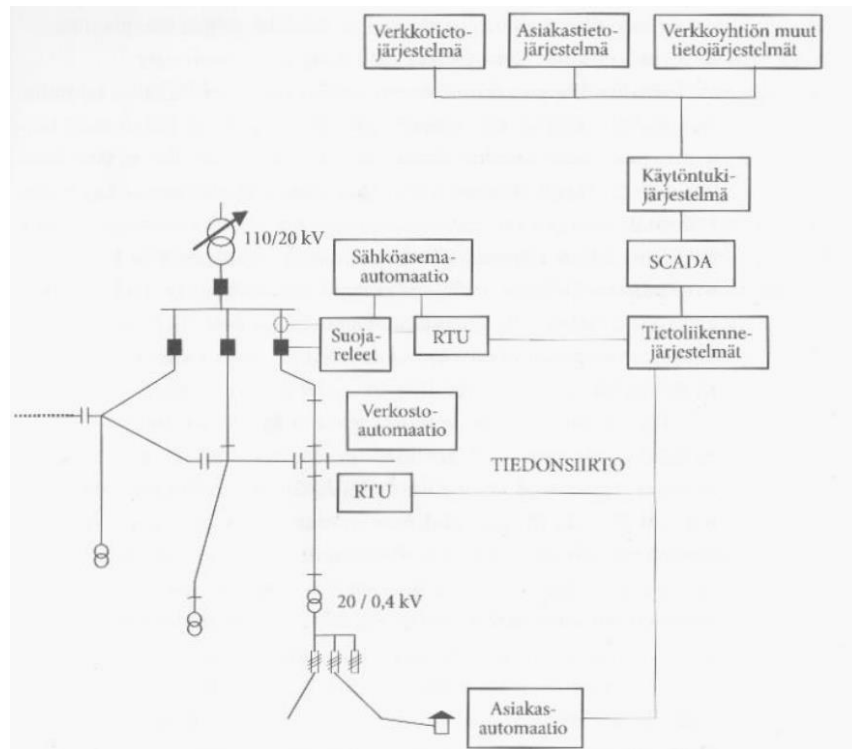
Näihin kaikkiin voi sisältyä myös työn keskiössä olevia hitaasti kehittyviä vikoja. Ulkopuolisen aiheuttamat ovat usein sellaisia vikoja, joissa kaapelia on vaurioitettu kunnolla ja keskeytys on tullut heti joko katkenneesta johtimesta tai sulakepalosta. Ilmoitus viasta voi tulla suoraan kaivajalta heti vaurion tapahduttua. Osa näistä saattaa olla myös hitaasti kehittyviä vikoja, kun kaapeliin on osuttu vain osittain ja se on esimerkiksi kuoriutunut hieman. Kuvailut asennusvaiheen virheet ja vauriot saattavat lievinä jäädä huomaamatta, mutta pahentua ajan kuluessa. Routimisen siirtämät komponentit voivat myös oireilla hitaasti. [17] Hitaasti kehittyvien vikojen määrää on arvioitu luvussa 5.1.

## 2.5 Verkon käyttö

### 2.5.1 Sähkönjakeluautomaatio

Sähköverkon käyttötoiminta tapahtuu valvomosta eli käyttökeskuksesta. Sähköasemien ja keskijänniteverkon käytössä hyödynnetään laajasti automaatiotoimintoja, jotka mahdollistavat verkon seurannan ja ohjauksen kauko-ohjatusti. Pienjänniteverkossa automaatiota hyödynnetään huomattavasti vähemmän ja esimerkiksi verkon vioista tieto on ennen saatu lähinnä sähkönkäyttäjän ilmoituksista. Nykyään AMR-tekniikka mahdollistaa myös tarkemman pienjänniteverkon valvonnan. AMR-mittareiden kaukoluennan avulla saadaan tehonkäytön lisäksi tietoa jännitteen laadusta ja käyttökeskeytyksistä. [3]

Sähkönjakeluautomaatio (Kuva 13) voidaan jakaa yhtiö-, valvomo-, sähköasema, verkosto- ja asiakasautomaatioon. Yhtiötason automaatiotoimintojen perustana on monia eri tietojärjestelmiä. Näitä ovat verkkotietojärjestelmä (VTJ, NIS, engl. Network Information System), asiakastietojärjestelmä (ATJ), käytönvalvontajärjestelmä (SCADA, engl. Supervisory Control And Data Acquisition) sekä käytöntukijärjestelmä (KTJ, DMS, engl. Distribution Management System), joiden keskeisiä toimintoja ovat verkon käytön, suojausten ja kytkentöjen suunnittelu sekä mittaustietojen hallinta. Sähköasema-automaatioon kuuluu suojareleet, virta- ja jännitemittauksia, ohjattavia kytkinlaitteita. Verkostoautomaatio sisältää kauko-ohjattavia erottimia, virta- ja jännitemittauksia sekä vianilmaisimia. Asiakasautomaatio sisältää tariffiohjaukset, tehotietojen kaukoluennan sekä kuormitusten kytkennän ja ohjauksen. [3]



**Kuva 13.** Sähkönjakeluautomaation eri tasot. [3]

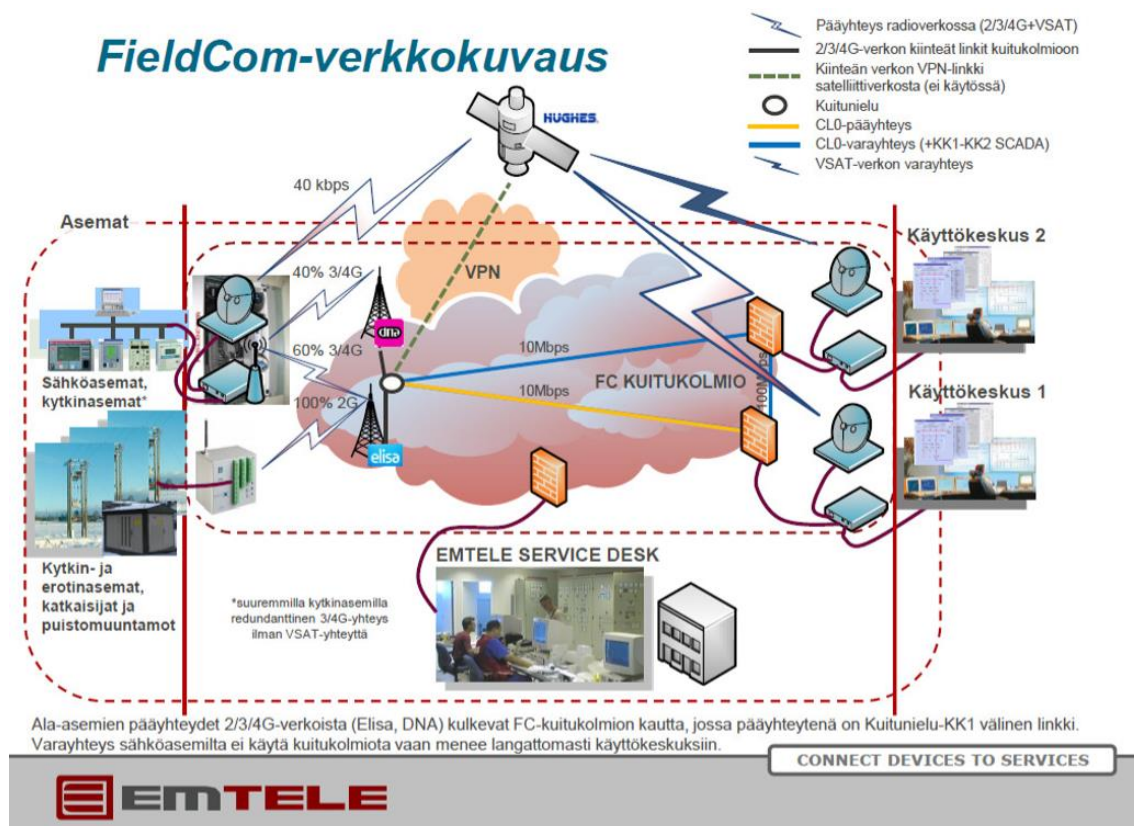
Käytönvalvontajärjestelmällä (SCADA) suoritetaan sähkönjakeluverkon reaaliaikainen valvonta. SCADA:lla hallitaan verkon kytkentätilannetta ja tapahtumatietoja sekä hoidetaan kauko-ohjaukset, -mittaukset ja -asettelut. SCADA:lla saadaan ajantasaista tietoa sähkönjakeluprosessista ja sen kautta toteutetaan monia kriittisiä toimintoja, mikä asettaa järjestelmän toiminnalle erityiset luotettavuusvaatimukset. Tietojärjestelmä sisältää varmennetut tietokoneet, sovellusohjelmat, korkeatasoiset käyttöliittymät ja liittymät tiedonsiirtojärjestelmiin. SCADA:ssa on kuvattu yleisluontoisesti sähköasemat ja niiden laitteistot, mutta tarkkoja tietoja verkon komponenteista ja asiakkaista SCADA ei sisällä. SCADA:ssa on tieto releiden, kytkinlaitteiden, vianilmaisimien ja käämikytkimien toimunnoista. Kauko-ohjattavia laitteita ohjataan SCADA:n kautta ja niiden tilatiedot tulevat järjestelmään automaattisesti. Käsini ohjattavien laitteiden tiedot syötetään järjestelmään manuaalisesti. [3]

Käytöntukijärjestelmä (DMS) sisältää käyttötoiminnan tueksi monipuolisia sovelluksia, jotka sisältävät analyysi- ja päättelytoimintoja. DMS:llä voidaan esimerkiksi paikantaa keskijänniteverkon oikosulkuvikoja. Käytöntukijärjestelmä hyödyntää eri tietojärjestelmiä, kuten valvonta-, verkkotieto-, asiakastieto- ja karttatietojärjestelmiä. Kun yhdistetään SCADA:n kautta saatava reaaliaikainen tieto verkon tilasta yksityiskohtaisiin verkko- ja asiakastietoihin, voidaan kehittää toimintoja verkon normaalitilan seurantaan, käytön suunnitteluun ja häiriötilanteiden hallintaan. Verkon tilaseuranta sisältää kytkentätilanteen eli topologian, tehonjaon, vikavirrat, reaaliaikaisen laskennan ja työryhmien sijaintitiedot. [3]

## 2.5.2 Tiedonsiirto

Sähkönjakeluautomaatio vaatii tiedonsiirtoa valvomon, sähköasemien, ohjaus- ja mitauslaitteiden ja sähkökäyttäjien välillä. Eri tiedonsiirtoyhteyksillä ja toiminnoilla on erilaiset luotettavuus-, kapasiteetti ja aikakriittisyysvaatimukset. Tiedonsiirto valvomon ja sähköasemien välillä on jatkuvaa, tietoa on paljon ja tiedonsiirron luotettavuus ja nopeus on erittäin kriittistä. Muiden verkkokomponenttien ja valvomon välinen tiedonsiirto on lähes yhtä tärkeää. Vähiten kriittistä on asiakasautomaation toiminnot, kuten energiamittaukset. Verkkoyhtiöissä käytettäviä tiedonsiirtomenetelmiä ovat radiolinkkiyhteys, valokuitu, kiinteä kaapeli, radiopuhelinverkko, lankapuhelin, matkapuhelin, GSM, GPRS, 3/4G, sähköverkkotiedonsiirto (DLC, engl. Distribution Line Carrier) ja paketti-radioverkko. [3]

Elenialla tietoliikenneverkko on tunnettu FieldCom-verkkona (Kuva 14), jonka toiminnasta on vastannut Emtele Oy, mutta järjestelmää ollaan parhaillaan korvaamassa uudella. FieldComissa tiedonsiirto tapahtuu sähköasemilta ja joiltakin kytkinasemilta 3/4G-mobiiliverkon ja kuituverkon välityksellä käyttökeskuksiin, minkä lisäksi näiden välillä on satelliittivarayhteys matkapuhelinverkon kaatumisen varalta. Kaukokäyttöisiltä kytkin- ja erotinasemilta, verkkokatkaisijoilta, puistomuuntamoilta ja AMR-mittareilta tiedonsiirto tapahtuu 2/3/4G-verkon välityksellä. [7, 22, 23]



Kuva 14. Elenian FieldCom-tietoliikenneverkko. [7]

### 2.5.3 Vianhoito

Käytöntukijärjestelmällä voidaan määrittää keskijänniteverkon laskennalliset vikapaikat. Suojareleiden mittaustietoja, verkkomallia ja mittaustietoja hyödyntämällä voidaan laskea oikosulkuvian etäisyys. Trimble DMS laskee oikosulkuvirran jokaiselle solmuvälille ja vertaa laskettuja arvoja releen mittaamaan oikosulkuvirtaan. Todennäköinen vikapaikka on siellä, missä arvot vastaavat toisiaan. Verkon haarojen vuoksi laskennallinen vikapaikka voi olla useammalla johtohaaralla. Laskennallisen paikannuksen tarkkuus on muutamia satoja metrejä. Vikapaikan määrittämiseen voidaan käyttää myös vianilmaisimia, säätietoja ja verkko- ja maastotietoja. Vian tarkemmaksi paikantamiseksi ja erottamiseksi todennäköinen vikapaikka koitetaan rajata kauko-ohjattavilla kytkinlaitteilla. Kokeilu-kytkennöillä voidaan määrittää laskennalla saaduista vikapaikoista oikea. DMS laskee myös mahdolliset varasyöttöyhteydet ja suorittaa niiden käyttöön tarvittavat kytkennät. Kaikki tämä voidaan tehdä automaattisella vianrajauksella (FLIR engl. Fault detection, Location, Isolation and supply Restoration). Lopuksi vikapaikkaa rajataan vielä maastossa käsin ohjattavilla erottimilla käytönvalvojan ohjeistuksella. [3, 24]

Pienjänniteverkon käytöntukitoiminnot avustavat pienjänniteverkon tilaseurannassa, kytkentätilan ylläpidossa, häiriötilanteiden hallinnassa ja asiakaspalvelutehtävissä. Vikatilanteissa viallinen johto-osa paikannetaan asiakkaiden ilmoitusten tai AMR-mittareilta saatavien katkotietojen perusteella. [3]

Elenialla pienjänniteverkon vianhoidossa ensimmäinen vaihe on päätellä todennäköinen vikapaikka asiakasilmoituksen tai etäluettavien sähkömittareiden perusteella. Tämän jälkeen vikailmoitus kirjataan ja käytöntukijärjestelmään perustetaan keskeytys. Paikalle lähetetään asentaja paikantamaan vikaa kyseisestä muuntopiiristä tai suoraan vikailmoituksen antaneelta käyttöpaikalta. Vianpaikannus perustuu etäluettavien mittareiden antamiin tietoihin sekä maastossa tehtäviin partiointiin ja mittauksiin. Asiakkaita tiedotetaan vian syystä ja arvioidusta kestosta automaattisten tekstiviesti- ja puhelinvastaajajärjestelmien avulla. Lisäksi tietoa saa perinteisesti vikapuhelinpalvelusta, internetistä sähkökatkokartalta ja Elenian web- ja mobiilisovelluksista. [25]

Viat raportoidaan ja tilastoidaan yksityiskohtaisesti käytöntukijärjestelmässä. Vikatiedot sisältävät tehdyt kytkennät, vian keston, asiakkaan kokeman keskeytyksen keston ja asiakkaalle aiheutuneet keskeytyskustannukset. Lisäksi kuvaukseen voidaan liittää tarkempaa tietoa vian aiheuttajasta, vikapaikasta, vikaantuneista komponenteista ja viankorjauksesta. [3, 17]

## 2.6 Verkon kunnonhallinta

Sähkön saatavuus ja toimitusvarmuus, turvallisuus, taloudellisuus sekä ympäristön suojeleu asettavat vaatimuksia verkon komponenttien kunnossapidolle. Verkon kunnossapidon tavoitteena on pitää verkon komponentit toimivina siten, että kokonaiskustannukset

pysyvät mahdollisimman pieninä. Sähkön laatuvaatimusten tiukentuessa ennakoimattomien käyttökeskeytysten määrä halutaan minimoida. Sähkökaupan vapauttaminen kilpailulle nosti myös taloudelliset kysymykset tärkeämmiksi. Sähköverkon komponenttien on toimittava luotettavasti, mutta toisaalta kustannussyistä halutaan kunnossapito kohdistaa suurimman hyödyn kohteisiin ja karsia tarpeettomia määräaikaishuoltoja. [3, 26]

Sähkölaitteiden kunnonhallinnan (KuHa) strategiat ovat kehittyneet erityisesti viime vuosikymmeninä. Sähkön käytön alkuaikoina ainoa strategia oli korjata viat niiden ilmetessä eli ns. käyttö vioittumiseen ja korjaava kunnossapito (CM, engl. Corrective Maintenance). Strategia on edelleen käytössä, kun viat ovat merkitykseltään pieniä. [3, 26]

Myöhemmin korjaavan kunnossapidon rinnalle tuli ehkäisevä kunnossapito, jolla ylläpidetään laitteen toimintaa. Tähän kuuluu aikaperusteinen kunnossapito (TBM, engl. Time Based Maintenance), jossa komponentteja huolletaan määräväleihin. Tästä kehittyneempi strategia on nykyään pääosin käytettävä kuntoperusteinen kunnossapito (CBM, engl. Condition Based Maintenance), jossa huollot tehdään esim. tarkastuksissa saatujen kunnottietojen perusteella. Luotettavuusperusteisessa (RCM, engl. Reliability Centered Maintenance) kunnossapidossa arvioidaan laitteen kriittisyys ja vioittumisen kustannusseuraukset ja mitoitetaan kunnossapitotoimet sen pohjalta. Ennakoivassa kunnossapidossa suunnitellaan vaadittavia kunnossapitotoimia. Parantavalla kunnossapidolla pyritään parantamaan laitteen ominaisuuksia, huollettavuutta tai vähentämään huollon tarvetta. [3, 26]

Osana kuntoperusteista kunnossapitoa on kunnonvalvonta (engl. Condition Monitoring), joka voidaan jakaa käytönaikaiseen (online) ja käytön keskeyttävään (offline). Online-valvonta voi olla jatkuvaa tai jaksottaista. Kehittyneimmillään kunnonvalvonta on jatkuvatoimista diagnostista mittausta, jossa vian analysointi tapahtuu automaattisesti ja poikkeavista tuloksista voidaan saada ilmoitus esimerkiksi valvomoon. [26]

Online-kunnonvalvonta edellyttää, että seurattavan laitteen vaurioitumismekanismit tunnetaan hyvin ja että laitteen kunto voidaan määrittää yksinkertaisesti ja luotettavasti jonkun suureen mittaamisella. Mittauksen yhteydessä on tunnettava laitteen käyttöhistoria ja mitatun suureen kehityssuunta, jotta voidaan tehdä johtopäätökset tarvittavista toimenpiteistä. Myös vian kehittymisnopeuden tunteminen on tärkeää, sillä kunnonvalvonnasta ei ole hyötyä vian kehittyessä niin nopeasti, ettei siihen ehditä reagoida. [26]

Kunnonvalvonnan taloudellisuutta arvioidaan vertaamalla laitteen kustannuksia ilman valvontaa ja sen kanssa. Sekä valvottavan laitteen että valvontalaitteen huolto-, korjaus- ja vikaantumiskustannukset tulee ottaa huomioon. Kunnonvalvonnan tuotot näkyvät viikataajuuden ja huoltokustannusten pienentymisenä. Valvontamenetelmiä ja mittalaitteita suunniteltaessa on huomioitava, ettei mittauksiin ja niiden tulkintaan ole käytettävissä paljoakaan aikaa. Mittalaitteiden on varsinkin kenttäolosuhteissa oltava mahdollisimman helppokäyttöisiä ja tulosten tulkinnan mahdollisimman yksiselitteistä. [26]

Investointi jatkuvaan tilanseurantaan kannattaa yleensä laitteilla, jotka ovat kalliita tai joiden odottamaton vaurioituminen voi aiheuttaa suuria taloudellisia menetyksiä. Kehittyvän vian havainnoinnilla on siis huomattava taloudellinen merkitys. Tehokkaammat ja edullisemmat laitteet tulevat lisäämään jatkuvatoimista kunnonvalvontaa. Toimenpiteisiin johtavien kriittisten raja-arvojen valintaan on kuitenkin kiinnitettävä erityisen suurta huomiota, sillä kunnonvalvonta ei saa aiheuttaa tarpeettomia komponenttivaihtoja tai keskeytyksiä väärillä hälytyksillä. [26]

Tähän asti pienjänniteverkon kunnonvalvonta onkin jäänyt vähemmälle huomiolle kuin suur- ja keskijänniteverkoissa, joissa vikojen vaikutukset ovat suuremmat. Online-valvonta on vasta yleistymässä keskijänniteverkossa. Pienjännitekaapeleiden kunnossapito on yleensä korjaavaa kunnossapitoa. Kaapeleita uusitaan vasta kun kaapeliosuudella on esiintynyt useita katkoksia, jotka ovat korjaantuneet sulakkeen vaihdolla. [3, 4]

Pienjänniteverkon vikojen vaikutus voi kuitenkin olla suhteellisen suuri. Kaapeleita ja myös vikoja on huomattavasti enemmän kuin keskijänniteverkossa. Usein koko johtolähdön asiakkaat täytyy kytkeä irti vian korjaamiseksi. Pienjänniteverkko on yleensä säteittäinen, kun taas keskijänniteverkko voi olla rengastettu, jolloin sähkö voidaan syöttää korvaavaa reittiä. Kaapeloinnin lisääntyessä kiinnostus myös pienjänniteverkon vikojen ennaltaehkäisyyn lisääntyy. [4]

## 2.7 Keskeytyskustannukset

Verkostosuunnittelussa tulee rakentamis- ja häviökustannusten lisäksi voida mitata rahassa myös keskeytyskustannukset. Toimitusvarmuutta parantavien laitteiden, kuten kaapeloinnin, varayhteyksien ja kauko-ohjattavien kytkinlaitteiden kannattavuudelle on keskeytyskustannusten odotusarvolla suuri merkitys. Tähän liittyviä tunnuslukuja ovat toimittamatta jäänyt sähkö (TJS) ja asiakkaalle keskeytyksestä aiheutuneen haitan (KAH). [3]

Näistä KAH:n merkitys on suurempi, sillä lyhyestäkin keskeytyksestä saattaa aiheutua suuria tuotantohäiriöitä asiakkaille. Kotitalousasiakkailta taas pitkät keskeytykset lisäävät kustannuksia mm. pakasteiden sulamisriskin vuoksi. Lisäksi erilaiset häiriöt voivat rikkoa asiakkaan laitteita. Kustannusten arviointia varten on tehty eri asiakasryhmille laajoja kyselyitä, joissa on selvitetty sekä yllättävien, että ennalta ilmoitettujen keskeytysten kustannuksia asiakkaalle. Nämä ovat yleensä suuruudeltaan monikymmenkertaiset verrattuna toimitetun sähkön kokonaishintoihin. [3]

Käyttövarmuudella tarkoitetaan kohteen kykyä suorittaa vaadittu toiminto tietyissä olosuhteissa ja vika tarkoittaa laitteen tilaa, jossa se ei kykene suorittamaan vaadittua toimintaa oikein. Kytkentäaika on aika, jossa vioittunut komponentti erotetaan järjestel-

mästä vian syntymisen jälkeen. Korjausaika on aika, jossa vikaantunut komponentti otetaan takaisin käyttöön vioittumisen jälkeen. Vikataajuus ilmaisee tietyn ajanjakson aikana keskimäärin esiintyvät viat. [3]

Pysyvä vika aiheuttaa kytkentäajan pituisen keskeytyksen, mikäli on käytettävissä rengasyhteys tai varavoimaa. Kytkeäntäaikaa voidaan lyhentää verkon automaatiolla kuten kauko-ohjattavilla erottimilla. Tämä pätee lähinnä keskijänniteverkkoon. Pienjänniteverkossa keskeytys on yleensä korjausajan pituinen, sillä verkko on usein säteittäinen, jolloin varasyöttöyhteyksiä ei ole käytettävissä. Kaapeliverkossa vikojen paikantaminen on haastavampaa ja hitaampaa kuin avojohtoverkossa. [3]

Keskeytykskustannusten lisäksi sähköntoimitusvarmuutta kuvataan kansainvälisillä tunnusluvuilla, jotka ovat vikojen keskimääräinen määrä asiakasta kohti vuodessa (SAIFI engl. System Average Interruption Frequency Index), vikojen keskimääräinen kesto asiakasta ja vikaa kohti (CAIDI engl. Customer Average Interruption Duration Index), vikojen kokonaiskesto asiakasta kohti vuodessa (SAIDI engl. System Average Interruption Duration Index) sekä jälleenkytkentöjen keskimääräinen määrä asiakasta kohti vuodessa (MAIFI engl. Momentary Average Interruption Frequency Index). [3, 11]

Pitkät keskeytykset jaetaan yleensä vielä vioista ja suunnitelluista työkeskeytyksistä aiheutuneisiin keskeytyksiin. Suurin osa sähkönkäyttäjän kokemista keskeytyksistä aiheutuu keskijänniteverkosta. Pienjänniteverkon vikojen kokonaismäärä on kuitenkin huomattava ja ne aiheuttavat verkkoyhtiölle paljon suoria korjauskustannuksia. Keskijänniteverkon vioista suurin osa on lyhytkestoisia vikoja, jotka menevät ohi pikajälleenkytkennällä (PJK) tai aikajälleenkytkennällä (AJK). [3]

Keskeytykskustannukset voidaan laskea seuraavien yhtälöiden avulla.

$$\text{Keskeytystaajuus} \quad f_j = \sum_{i \in I} f_i \quad (4)$$

$$\text{Vuotuinen keskeytysaika} \quad U_j = \sum_{i \in I} f_i \cdot t_{ij} \quad (5)$$

$$\text{Keskeytyksen keskipituus} \quad t_j = \frac{U_j}{f_j} \quad (6)$$

$$\text{Toimittamatta jäänyt energia} \quad E_j = f_j \cdot t_j \cdot \Delta P_j \quad (7)$$

$$\text{Keskeytykskustannukset} \quad K_j = \sum_{i \in I} f_i (a_j + b_j(t_{ij})t_{ij})\Delta P_j \quad (8)$$

Alaindeksi  $j$  kuvaa sähkönkäyttäjää ja alaindeksi  $i$  verkkokomponenttia.

$f$  = vikataajuus

$t$  = vian aiheuttama keskeytysaika

$\Delta P$  = keskimääräinen keskeytysteho

$a$  = keskeytystehon haitta-arvo

$b$  = keskeytysenergian haitta-arvo. [3]

Yksittäisen keskeytyksen KAH-laskenta voidaan tehdä seuraavalla kaavalla.

$$KAH = CID \cdot ILD + CENS \cdot EENS \quad (9)$$

jossa

CID = irtikytketyn tehon hinta (€ / kW)

ILD = irtikytketty teho (kW)

CENS = toimittamatta jääneen energian hinta (€ / kWh)

EENS = toimittamatta jäänyt energia (kWh). [27]

Irtikytketyn tehon hinnalle (CID, engl. Cost of the Interrupted Demand) ja toimittamatta jääneen energian hinnalle (CENS, engl. Cost of Energy Not Supplied) on määritelty sähkökäyttäjiltä kerätyn tiedon perusteella Suomessa käytettävät keskimääräiset ja asiakaskohtaiset kustannusparametrit, jotka on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** KAH-kustannusparametrit. [3, 28]

	Vikakeskeytykset		Suunniteltu keskeytykset	
	CID €/kW	CENS €/kWh	CID €/kW	CENS €/kWh
<b>Keskimääräinen</b>	1,10	11,00	0,50	6,80
<b>Kotitalous</b>	0,36	4,29	0,19	2,21
<b>Maatalous</b>	0,45	9,38	0,23	4,80
<b>Teollisuus</b>	3,52	24,45	1,38	11,47
<b>Julkinen</b>	1,89	15,08	1,33	7,35
<b>Palvelu</b>	2,65	29,89	0,22	22,82



## 3. VIANHAVAINNOINTI

### 3.1 Hitaasti kehittyvät pienjännitekaapeliviat

Koska pienjännitekaapeleiden kunnossapitostrategia on ollut lähinnä korjaavaa kunnossapitoa, kaapeleiden vaurioitumismekanismeja ja vaurioitumisesta seuraavia ilmiöitä ei ole ollut tarvetta tutkia kovin tarkkaan [4]. Oman haasteensa lisää eri maissa käytössä olevat erilaiset maadoitusjärjestelmät, jolloin tutkitut ilmiöt eivät välttämättä ole suoraan verrattavissa Suomen TN-C-järjestelmään. Vauriot kaapeleissa ovat aiheuttaneet joissakin maissa vaarallisia räjähdyksiä kaapeliputkissa, mikä on motivoinut aiemmin tutkimaan vaurioiden aikaista havaitsemista [16]. Kiinnostus keskeytyskustannusten näkökulmasta on myös lisääntynyt viime vuosina ja aihetta on tutkittu lähivuosina esimerkiksi Alankomaissa [4].

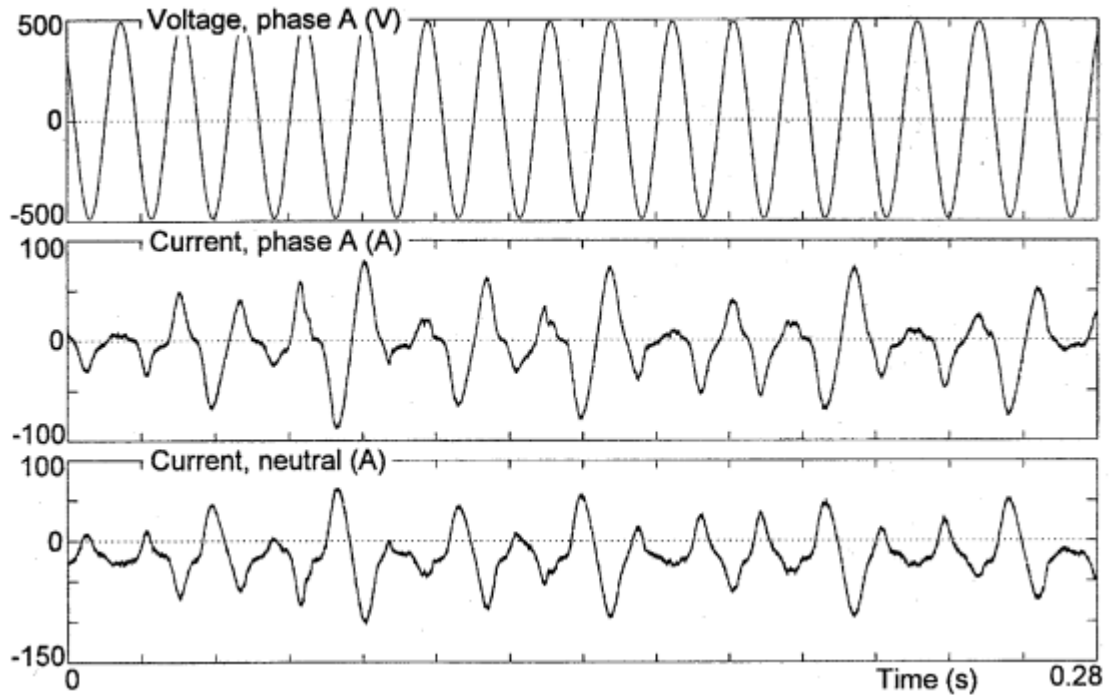
Hitaasti kehittyvät viat voivat saada alkunsa jo asennusvaiheessa. Kaapeliin on esimerkiksi voinut tulla viilto tai se on voitu asentaa liian kivikkoiseen kaapeliojaan, jossa eristeeseen kohdistuu rasitusta. Liitokset ja jatkokset on voitu tehdä huolimattomasti tai routa saattaa löystyttää niitä, jos asennuksessa ei ole tähän varauduttu esim. routalენkein. Asennettavia tai aikaisemmin asennettuja kaapeleita saatetaan vaurioittaa kaivuutöissä. Usein ulkopuoliset vaurioittavat kaapeleita kaivaessaan. [17]

Laboratoriotutkimuksissa on selvitetty vaurioiden kehittymismekanismeja. Jos lievästi vaurioitunut kaapeli pysyy täysin kuivana, kestää se luultavasti normaalisti käytössä. Mikäli vaurioituneeseen kaapeliin pääsee kosteutta, alkaa vaurio pahentua [16, 29, 30]. Vaurion kehittymisnopeus on riippuvainen mm. lämpötilasta, jännitteestä, maaperästä, eristemateriaalista sekä erityisesti kosteudesta ja veden johtavuudesta [29, 30]. Erityisen otolliset olosuhteet synnyttää sulava lumi, johon on sekoittunut suolaa [31].

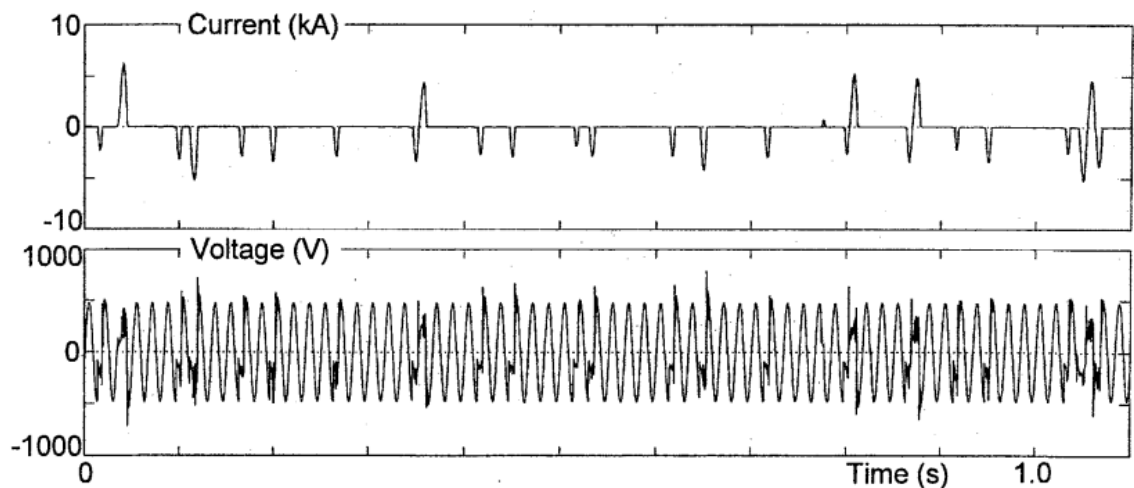
Jos kaapeli on täysin vedessä, alkaa vaiheiden tai vaiheen ja nollajohtimen välillä virrata muutamien ampeereiden virta, joka kiihdyttää kaapelin vaurioitumista ja kasvaa jopa kymmenien ampeereiden suuruiseksi (Kuva 15). Tämä alkavan vian vaihe saattaa kestää minuuteista päiviin. Mikäli kaapeli pääsee välillä kuivumaan, vaurioituminen pysähtyy ja kaapeli todennäköisesti toimii normaalisti, kunnes se altistuu uudestaan kosteudelle. [16, 30]

Vedessä kulkeva virta lämmittää ja kuivattaa kaapelia, joka luo olosuhteet kipinöinnille, eli pienien valokaarien syntymiseen. Purkaukset syntyvät kuivissa ilmakehissä, eli kaapelin tulee olla vain osittain kostunut niiden syntymiseen [29]. Valokaaret näkyvät virtapiikkeinä ja ne voivat vastata suuruudeltaan kunnan oikosulkuvirtoja (Kuva 16). Vika on tässä vaiheessa luonteeltaan ajoittainen (engl. intermittent) ja vikajaksot ovat kestoltaan vain noin 5-20 ms, joten ne eivät suuresta virrasta huolimatta usein kestä riittävän kauan

polttaakseen kaapelia suojaavan sulakkeen. Jaksot ilman oikosulkuvirtaa ovat noin 90 % ajasta ja vaihtelevat millisekunneista minuutteihin, jolloin sulake pääsee jäähtymään. Vikajaksojen välissä saattaa vedessä kuitenkin kulkea jatkuvasti muutamien ampeerien virta. [16] Valokaarien vikaimpedanssiksi mitattiin lähteen [29] tutkimuksissa noin 0,3–2,5  $\Omega$ .



*Kuva 15. Vikajaksojen välissä vaiheen ja nollajohtimen välillä veden kautta kulkeva virta. [16]*



*Kuva 16. Ajoittainen oikosulkuvirta (L-N) ja vaihejännite. [16]*

Kipinöinti on pääsyy kaapelin vaurioiden pahentumiseen. Vikajaksojen lyhyiden vuoksi niiden aiheuttama häiriö on hyvin pientä ja jää usein huomaamatta. Vaurion edetessä valokaarten välit tihenevät, eikä sulake enää ehdi jäähtymään, jolloin se katkaisee virran.

Tähän saattaa olosuhteista riippuen mennä jopa kuukausia. Vaurio saattaa vaikuttaa korjaantuvan sulakkeen vaihdolla, mutta vika jatkaa kehittymistään ja saattaa kehittyä pysyväksi vaurioksi, joskus usean sulakepalon jälkeen. [29, 30, 32] Vaiheen ja nollajohtimen välinen vaurio on useammin luonteeltaan ajoittainen, kun taas vaiheiden välinen vaurio kehittyä helpommin pysyväksi, mikä johtuu suuremmasta jännitteestä [16].

New Yorkissa tutkittiin todellisessa pienjänniteverkossa keinotekoisia ajoittaisia vikoja. Tutkimuksessa havaittiin, että vian aikana virroissa esiintyy huomattavia virtapiikkejä, mutta jännitteeseen vialla ei ollut suurta vaikutusta. Lisäksi todettiin, että vian aikana vaihevirroissa esiintyviä virtapiikkejä muistuttavia piikkejä ilmeni myös normaaliolosuhteissa. Normaalitilan transienttitapahtumat olivat kuitenkin symmetrisiä, eivätkä näkyneet paluuvirrassa, kun taas vikapiikit voitiin havaita paluuvirrasta selvästi. Tutkimuksen mukaan nämä paluuvirran virtapiikit olivatkin selkein indikaattori ajoittaiselle vialle. Lisäksi ajoittaiselle vialle tyypilliseksi todettiin vaihe- ja paluuvirroissa esiintyvä tasavirtakomponentti sekä kasvu toisessa harmonisessa yliaallossa. Tässä kuvattujen virtapiikkien havaitsemiseksi tulisi valvoa virtoja ja jännitteitä muuntajilla ja joissakin verkon solmupisteissä. Nopeiden virtapiikkien ja valokaari-ilmiöiden havaitsemiseksi näytteenottotaajuuden tulisi olla korkea eli useita kertoja jaksossa. [31]

## **3.2 Kyselyt laitevalmistajille**

### **3.2.1 Tarjotut ratkaisut**

Työn alkuperäisenä tarkoituksena oli selvittää markkinoilla olevia pienjänniteverkon vianhavainnointiin soveltuvia laitteita. Työn alussa lähestyttiin sähköpostitse ja puhelimitse laitevalmistajia ja jälleenmyyjiä, joilta tiedusteltiin laitteiden saatavuutta ja kokemuksia pienjänniteverkon vianhavainnoinnista.

Valmiita pienjännitejakeluverkkoon tarkoitettuja ratkaisuja ei markkinoilla ollut, mutta kiinnostusta aiheeseen löytyi kyllä. Tällä hetkellä olisi tarjolla lähinnä erilaisia analysointilaitteita, joilla saataisiin kyllä monipuolista mittaustietoa, mutta ei ole tiedossa, miten mittauksia voitaisiin hyödyntää ennakoivassa vianhavainnoinnissa. Valmiita algoritmeja sisältäviä laitteita ei ole tarjolla.

Keskijännitekaapeleiden valvontaan tarkoitettuja laitteita on markkinoilla useampia ja niitä tarjottiin myös pienjänniteverkon ratkaisuksi. Osalla Elenian muuntamoista onkin ABB:n keskijänniteverkon RIO600-indikaattorit [33], joihin voitaisiin mahdollisesti lisätä myös pienjänniteverkon mittaus. Myös Kriesin IKI-50-indikaattoreita [34] käytetään valmistajan mukaan joskus pienjänniteverkon mittauksiin ja ne toimisivat myös vianhavainnoinnissa, vaikka niitä ei olekaan siihen tarkoitukseen tähän mennessä käytetty.

Keskijänniteverkkoon tarkoitettujen laitteiden algoritmit siis toimisivat myös pienjänniteverkon vianindikoinnissa, mutta ratkaisut ovat monimutkaisia ja vaativat paljon mitaus- ja laskentatehoa. Pienjänniteverkon laajuudessa asiakasmäärät yhden suojattavan johdon perässä ovat paljon pienemmät ja laitteita tarvittaisiin todella paljon, joten pienjänniteverkon ratkaisuksi laitteet olisivat liian hintavia. Samasta syystä yksinkertaisempiäkin pienjänniteverkkoon tarkoitettuja laitteitakin asennettaisiin todennäköisesti lähinnä muuntamolähdöille, eikä niinkään jakokaapeille, sillä muuten laitteiden määrä muodostuisi valtavaksi.

Ratkaisuksi tarjottiin myös pienjännitekatkaisijoita, jotka auttaisivat osittain vaurioituneiden kaapeleiden aiheuttamiin satunnaisiin sulakepaloihin. Vaurioituneet kaapelit voitaisiin tunnistaa kuten nykyäänkin perinteisellä sulakesuojauksella. Mikäli lähdön suojaus laukeaa, mutta vika menee ohi sulakkeenvaihdolla tai katkaisijan sulkemisella, mutta vika uusiutuu useamman kerran, voidaan epäillä kaapelin olevan vaurioitunut. Katkaisijoiden avulla työmäärä olisi pienempi ja keskeytysaika jäisi lyhyemmäksi, kun sulakkeenvaihdon sijaan katkaisija voitaisiin ohjata kiinni. Ratkaisu ei kuitenkaan täysin vastaa tarpeisiin, eikä Elenialla muuten ole tarvetta katkaisijoille, joten ne eivät ainakaan toistaiseksi ole vaihtoehto.

Yleisesti kiinnostusta pienjänniteverkon vianhavainnoin kehittämiseen oli, joten tulevaisuudessa voi olla tarjolla parempia ratkaisuja. Mahdollista kehitystyötä ajatellen valmistajia kiinnosti erityisesti haluttujen vianhavainnointilaitteiden hintaluokka, jonka arviointia käsitellään luvussa 5.

### 3.2.2 Asennus ja tiedonsiirto

Tiedonkäsittelyyn on visioitu erilaisia älykkään sähköverkon (engl. Smart Grid) pilvialustoja, mikä voisi mahdollistaa mittaustiedon monipuolisempaa hyödyntämistä. Asennettavilta laitteilta ei vaadittaisi älykkäitä algoritmeja tai laskentatehoa, jos niiltä vain siirrettäisiin mittaustieto pilveen, jossa tiedon analysointi tapahtuisi. Jos mittaustiedosta voitaisiin algoritmeilla tunnistaa kaapeleiden alkavat vauriot, voisi pilvestä tulla tieto esimerkiksi kunnonhallinnan tietoon vain, kun jotain poikkeavaa havaitaan. Perinteisempi vaihtoehto on kehittyneet laitteet, jotka sisältävät algoritmit, tallennus- ja laskentakykyä alkavien vikojen tunnistamiseksi ja käsittelevät mittaustiedon paikallisesti. Laitteet saataisivat olla hintavia, mutta tiedonsiirroilta ei vaadittaisi paljoa, sillä tässäkin ratkaisussa laite lähettäisi tiedon eteenpäin KuHaan vain havaitessaan alkavan vian.

Varsinaisten laitteiden ei siis välttämättä tarvitsisi olla monimutkaisia, vaan niiden tulisi pilviratkaisussa kyetä pelkkään mittaukseen ja tiedonsiirtoon, jolloin niiden hinta olisi esimerkiksi monimutkaisia keskijänniteverkon laitteita kohtuullisempi. Pelkkä mitaus ja tiedonsiirto ei myöskään asettaisi laitteelle suuria toimintavarmuusvaatimuksia, kuten esimerkiksi SCADAan yhteydessä olevat suojausratkaisut vaativat, sillä yhden laitteen rikkoutuminen tai yhteyden katkeaminen ei aiheuttaisi haittaa verkon toiminnalle.

Laitevalmistajilta saatiin tällaisten yksinkertaisten mittalaitteiden iän arvioksi noin 5–10 vuotta. Mahdollisella laitteistolla valvottaisiin todennäköisesti muuntamoiden PJ-lähtöjä, sillä jakokaappitasolla laitteiden määrä muodostuisi valtavaksi ja vaatisi myös tiedonsiirrolta paljon. Laitteita voitaisiin asentaa ainakin aluksi vain tärkeämmille lähdöille esimerkiksi taajamiin, suuria asiakasryhmiä syöttäville runkokaapeleille sekä teollisuutta, palveluita ja maataloutta syöttäviin kohteisiin, joissa KAH-vaikutuksetkin olisivat suurimmat. Laitteiden asennus voitaisiin hoitaa muun työn yhteydessä asentamiskustannusten minimoimiseksi. Tämä tarkoittaisi asennusta uusiin kohteisiin sekä jo käytössä oleviin muun korjaus- tai tarkastuskäynnin yhteydessä. Laitteen asennettavuus vanhoihin kohteisiin tulisi siis myös huomioida. Ihanteellisesti asennus ei vaatisi jakelun keskeytystä ja olisi muutenkin nopeaa ja vaivatonta.

### 3.3 Menetelmiä ja laitteita

Kun kyselyt laitevalmistajille eivät tuottaneet toivottua tulosta, eikä valmiita laitteita löytynyt, tutustuttiin kirjallisuuteen erilaisista kaapeleiden kunnonvalvontamenetelmistä ja -laitteista, joita esitellään tässä luvussa. Lisäksi arvioidaan menetelmien soveltuvuutta pienjänniteverkkoon. Pienjännitekaapeleiden kunnonvalvonta varsinkin käytönaikaisesti on vielä uutta, eikä luotettavaksi todettuja menetelmiä ole vielä vakiintunut käyttöön [4].

Eristysrakenteen sähkölujuuden ja mekaanisen lujuuden mittaaminen käytönaikaisesti on mahdotonta. Kunnonseurantaan onkin käytettävä eristysrakenteen kunnosta kertovia epäsuoria suureita, jotka voidaan mitata mahdollisimman yksinkertaisesti ja luotettavasti. Tällaisia epäsuoria suureita voivat olla esimerkiksi häviökerroin ( $\tan\delta$ ), sähkövaste (DR engl. Dielectric Responce), eristysresistanssi, vuotovirta tai osittaispurkaukset (PD, engl. Partial Discharge). [26]

Mitattavien epäsuorien suureiden yhteys kriittiseen ominaisuuteen ei kuitenkaan yleensä ole yksiselitteinen. Mittaustulosten tulkintaa varten tarvitaan tutkimus- ja kokemusperäistä tietoa siitä, miten mitattavan suureen muuttuminen on yhteydessä eristyksen tilaan. Tiedon perusteella valitaan toimenpiteisiin johtavat kriittiset arvot mitatuille suureille. [26]

#### 3.3.1 Eristysresistanssi

Eristysresistanssin mittauksella voidaan havaita vakavat eristysvauriot ja kostuminen. Kaapeleilla mittausta suoritetaan vaiheiden välillä tai vaiheen ja suojamaan välillä muutamien kilovoltin tasajännitteellä. Mittaus on nopea suorittaa, eikä vaadi kalliita apuvälineitä. Eristysimpedanssin tulisi ehjällä kaapelilla olla megaohmien luokkaa. Matala impedanssiarvo taas viittaa oikosulkuun eli eristeen vaurioitumiseen. Mittauksella ei voida tehdä pitkälle meneviä johtopäätöksiä eristeen kunnosta, eikä mittauksella voida havaita esimerkiksi osittaispurkauksia. Mittausta käytetään lähinnä pyörivien sähkökoneiden kunnonvalvonnassa. [26]

Lappeenrannan teknillisen yliopiston tasajännitejakelun tutkimukseen rakennetussa LVDC-verkossa (engl. Low Voltage Direct Current) havaittiin, että DC-verkkoon kytkeytyvät eristysresistanssin mittaukseen perustuvat eristysvalvontalaitteet pystyivät havaitsemaan myös sähkönkäyttäjien AC-verkossa tapahtuneet eristysviat [35]. Valitettavasti menetelmää ei voida hyödyntää tavallisessa jakeluverkossa, sillä menetelmä soveltuu käytönaikaisesti vain maasta erotettuun IT-järjestelmään, jossa voidaan mitata vaiheiden ja maan välistä eristystä [36]. Tämä varmistettiin suoraan laitevalmistajalta. LVDC-testiverkossa on käytössä IT-järjestelmä [35]. Normaalin pienjännitejakeluverkon TN-C-järjestelmässä kaapeleiden tulee olla kytketty irti eristysresistanssia mitattaessa [4, 26].

### 3.3.2 Sähkövaste (DR), häviökerroin ( $\tan\delta$ )

Suurjännitelaitteiden eristysrakenteiden kunnonvalvonnassa yleisesti käytössä oleva menetelmä on monimutkainen sähkövasteen (DR) mittaaminen. Kyseessä on voltin- ja ampeerimittaukseen ja näytteistekniikkaan perustuva dielektrinen spektroskopia, jossa mitataan eristyksen häviökerrointa  $\tan\delta$  (engl. dielectric dissipation factor) taajuuden ja jännitteen funktiona. [4, 26]

Dielektrisiä ominaisuuksia voidaan arvioida yksinkertaisemmin eristyksen häviökertoimen  $\tan\delta$  mittaamisella vaihtojännitteellä yhdellä taajuudella. Menetelmä on yleisesti käytetty esimerkiksi läpivientieristimillä, mittamuuntajilla, kondensaattoreilla ja suurjännitekaapeleilla. Häviökerrointa on perinteisesti mitattu joko Scheringin sillalla tai virtavertailijasillalla. Mittausten tuloksia verrataan tunnettuun referenssiin. [26]

Scheringin silta on rakenteeltaan yksinkertainen ja sillalla voidaan häviökertoimen lisäksi mitata eristysrakenteen resistanssi ja kapasitanssi. Virtavertailijasilta soveltuu Scheringin siltaa paremmin suurikapasitanssisten koekappaleiden mittaukseen. Sillalla mitattavan eristysrakenteen tulee olla maasta erotettu, mikä saattaa olla vaikeaa toteuttaa käyttöpäikällä suoritettavissa mittauksissa. [26]

Voltin- ja ampeerimittauksella häviökerroin  $\tan\delta$  voidaan määrittää laskennallisesti jännitteen ja laitteen läpi kulkevan virran hetkellisarvoista. Jos virta on puhtaasti kapasitiivista, on vaihtojännitteen jakson yli laskettujen jännitteen ja virran tulojen hetkellisarvojen summa nolla. Summa poikkeaa nolasta, jos virrassa on resistiivinen komponentti. Tämä kertoo kuluvastä pätehostä eli dielektrisestä häviöstä, josta voidaan laskea häviökerroin. Tätä mittauseriaatetta käytetään mm. öljypaperieristeisten virtamuuntajien onlinevalvonnassa. [26]

Häviökertoimen mittaaminen suoritetaan yleensä jännitteen funktiona ja jännite nostetaan ainakin laitteen käyttöjännitteeseen asti, joskus jopa lähelle koejännitettä. Mittauksissa kiinnitetään huomiota  $\tan\delta$ -arvon suuruuteen ja kasvuun jännitettä nostaessa. Terveellä eristyksellä  $\tan\delta$  on lähes vakio jännitteen funktiona. Häviökerroin on erilainen eri eristysrakenteilla, eri valmistajien laitteilla ja eri ikäisillä laitteilla. Lisäksi epäpuhtaudet ja

kosteus suurentavat kondensaattorityyppisten eristysrakenteiden  $\tan\delta$ -arvoa. Pienikin muutos arvossa saattaa kertoa eristyksessä tapahtuneesta muutoksesta ja säännöllisillä mittauksilla voidaan mahdollinen kostuminen tai rappeutuminen havaita hyvissä ajoin. [26] Menetelmiä varten kaapelit eivät saa olla kuormitettuja, joten ne eivät sovellu käytönaikaiseen kunnonvalvontaan [4].

### 3.3.3 Osittaispurkaukset (PD)

Eristysrakenteiden vaurioihin ja kehittyviin vikoihin liittyy usein osittaispurkauksia (PD). PD-mittauksia käytetäänkin eristysten kunnonvalvonnassa ja elinikä tutkimuksessa. Osittaispurkaukset ilmenevät eristysrakenteen liittimissä virtapulsseina, joita mitataan erillisinä tai integroituina suureina. Virtapulssien aikajakaumaa käytetään purkausten tunnistamiseen ja haitallisuuden arviointiin. Osittaispurkausten mittaus on tehokas menetelmä eristysrakenteiden diagnosointiin. [26]

Tavallisesti osittaispurkausmittaukset tehdään suoralla sähköisellä mittauksella, mutta purkausten lähettämään ääneen tai sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvat ilmaisu-, paikantamis-, tunnistamis- ja mittausmenetelmät ovat yhä yleisempiä. Testaus käyttöpaikalla tehdään käyttötaajuisella tai muutaman sadan hertsin vaihtojännitteellä, pienellä taajuudella (VLF, 0,1 Hz) tai vaimenevalla vaihtojännitteellä (DAC engl. Damped AC). Usein voidaan mitata myös  $\tan\delta$ . Eristyksen kuntoa seurataan vertaamalla mittauksen tuloksia terveen eristyksen mittauksiin. Eristysrakenne, vikatyypit ja lämpötila vaikuttavat eristyksen PD-käyttäytymiseen. [26]

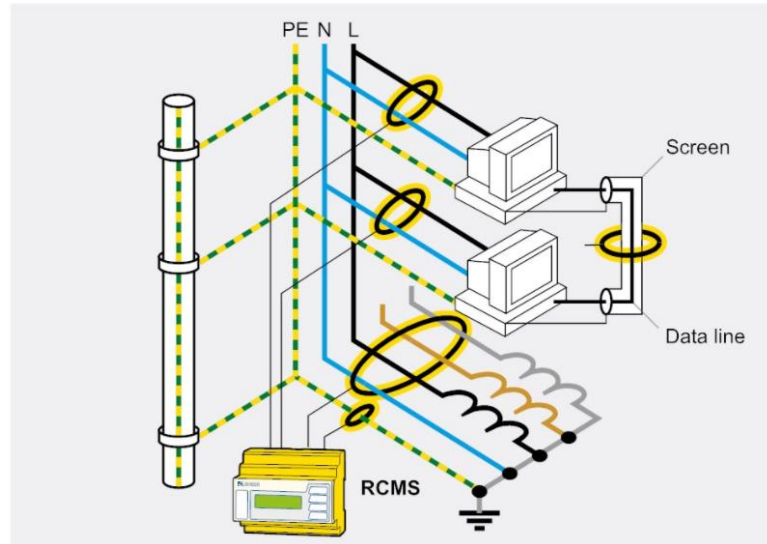
Osittaispurkausmittauksilla on mahdollista myös paikantaa vikapaikka, toisin kuin häviökerroinmittauksissa. Paikannus perustuu kulkuajamittaukseen (TDR, engl. Time Domain Reflectometry), jossa purkauspaikasta etenevän virta- ja jännitepulssi kulkuajasta voidaan laskea purkauspaikan etäisyys. [37] Kulkuajamittaukseen perustuvia kaapelitutkia käytetään pienjänniteverkon kaapelivikojen paikantamisessa.

Osittaispurkauksien esiintymiseen vaaditaan kilovolttien suuruinen testijännite, joten niitä ei pienjänniteverkon 400 V:n nimellisjännitteellä esiinny. Pienjännitekaapeleiden rakenne on myös erilainen kuin keskijännitekaapeleilla, jolloin testijännitteellä mitattaessa saattaa ehjilläkin kaapeleilla esiintyä osittaispurkauksia, mikä vaikeuttaa vikojen tunnistamista mittaustuloksista. Menetelmää voidaan kuitenkin käyttää offline-mittauksina, mutta pienjänniteverkon online-valvontaan se ei sovellu vaaditun testijännitteen vuoksi. [4, 38, 39]

### 3.3.4 Vuotovirta

Vikavirtamonitorointia (RCM, engl. Residual Current Monitoring) (Kuva 17) voidaan käyttää TT- ja TN-S-verkoissa, joissa on erillinen PE-johdin. Vikavirtamonitori toimii kuten vikavirtasuojaja ja mittaa tulo- ja paluuvirtojen summaa, joka on normaalitilassa

nolla. Mikäli virtaa kulkee PE-johdinta tai muita reittejä, varoittaa RCM vuotovirran ylittäessä määritellyn arvon. TN-C-verkossa on yhdistetty PEN-johdin, jota pitkin sekä pa-  
luu- että vuotovirta kulkevat, eikä näin ollen vuotovirran reittiä voida jättää mittauksen ulkopuolelle, kuten erillisen PE:n tapauksessa. [36]



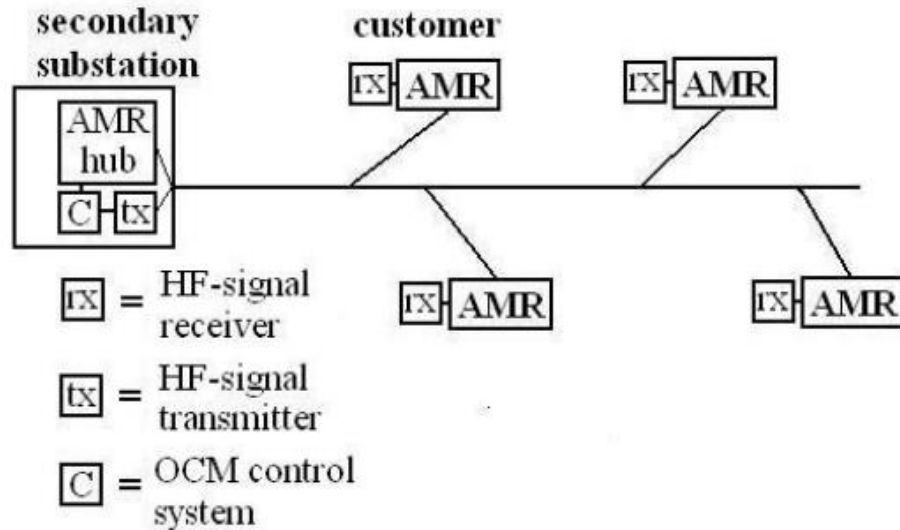
*Kuva 17. Vikavirtamonitorointi, Bender. [36]*

### 3.3.5 AMR

Etäluettavat sähkömittarit (AMR) voisivat olla hyödynnettävissä PJ-verkon vianhavainnoinnissa. Tällä hetkellä niiden sähkönlaatuominaisuuksilla voidaan jo havaita joitain vaurioituneita kaapeleita. Kuitenkin luvussa 3.1 käsiteltyjen tutkimusten mukaan alkavien vaurioiden aiheuttamat häiriöt saattavat olla pieniä ja erittäin vaikeita havaita, sillä ne sekoittuvat tavanomaisiin sähkönlaatuhäiriöihin.

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa 2012 tehdyissä diplomitoissa [40, 41] on ehdotettu yhtä AMR-mittareita hyödyntävää online-kunnonvalvontamenetelmää, jossa hyödynnettäisiin esimerkiksi kulku-aika- eli TDR-mittauksia (Kuva 18). Muuntamolle asennettaisiin lähetin ja AMR-mittareihin integroitaisiin vastaanottimet. Lähetin lähettäisi signaalin esimerkiksi kerran päivässä ja vastaanottimet lähettäisivät vastaanottamansa signaalit takaisin lähettimelle. Signaaleja verrattaisiin terveen verkon signaaleihin ja mikäli signaali eroaisi tästä toistuvasti, hälyttäisi AMR mahdollisesta viallisesta kaapelista.





*Kuva 18. Visio AMR-mittareita hyödyntävästä kunnonvalvontajärjestelmästä. [40]*

Ehdotetussa menetelmässä on kuitenkin vielä useita avoimia kysymyksiä. Menetelmää varten tulisi tuntea terveiden kaapeleiden antamat signaalit, jolloin menetelmää voitaisiin hyödyntää vain uusissa kaapeleissa. Koska useat vauriot syntyvät jo asennusvaiheessa, saattaisivat nämä vauriot jäädä huomaamatta. Jää myös avoimeksi, kuinka aikaisin vauriot voitaisiin havaita ennen vian muuttumista pysyväksi. Lisäksi ei ole varmuutta, voitaisiinko viat erottaa muista verkon häiriöistä. [40]

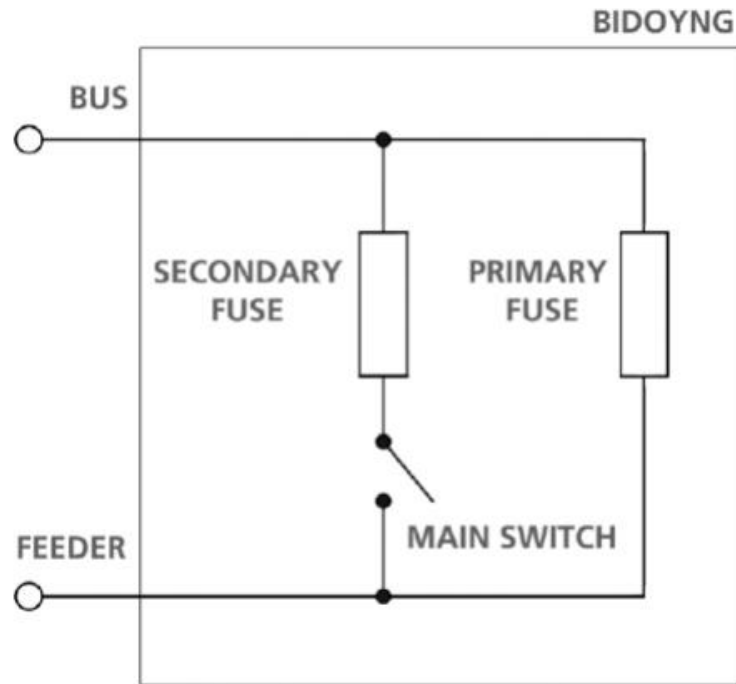
Elenialla suunnitellaan jo seuraavan sukupolven mittareihin siirtymistä, joiden uudet ominaisuudet voivat tarjota vielä lisää mahdollisuuksia. Pienjänniteverkon ilmiöt, havainnoinnin menetelmät ja niiden tehokkuus on kuitenkin vielä niin epävarmaa, että mahdollisuuksien selvittäminen vaatisi vielä paljon lisätutkimusta, joten se jouduttiin jättämään tämän työn ulkopuolelle.

### 3.3.6 PJ-katkaisijat ja Smart Fuse

Pienjännitekatkaisijat eivät sinänsä toimi ennakoivina vianhavainnointilaitteina, mutta niiden jälleenkytkentäominaisuudella voitaisiin lyhentää ajoittaisista vioista aiheutunutta keskeytysaikaa ja työmäärää. Vaurioituneet kaapelit voitaisiin tunnistaa toistuvista suojausten toiminnoista, jotka kuitenkin menevät ohi, kuten perinteisellä sulakesuojauksella.

Kelvatekillä on pienjänniteverkon ajoittaisten vikojen poistoon suunniteltu Bidoyng Smart Fuse, joka toimii ikään kuin kertakäyttöinen katkaisija. Bidoyngissa on kaksi rinnakkaista sulaketta (Kuva 19), joista primäärinen toimii normaalina kuorman sulakkeena ja on tarkoitettu perinteisten sulakkeiden korvaajaksi. Jos primäärisulake palaa, kytkeytyy kuorma sekundäärisulakkeen perään käyttäjän määrittelemän ajan (30 s – 10 min) jälkeen.

Bidoyngeen sisältyy jännitteiden ja kuormitusten mittaukset sekä niihin perustuva vianpaikannus primäärisulakkeen palaessa. Tiedonsiirto ja etäluenta onnistuvat Kelvatekin omalla Gateway-rajapinnalla. [42, 43]



*Kuva 19. Bidoyng Smart Fuse periaatekuva.[43]*

### 3.3.7 Valokaarivikasuojat (Arc Fault Detectors, AFDD)

Yhdysvalloissa on vuodesta 2008 vaadittu makuuhuonetilojen sähköasennuksiin valokaarivikasuojia (engl. Arc Fault Detection Device, ADFD), jotka on tarkoitettu suojaamaan tulipaloilta, jotka saavat alkunsa vaurioituneiden sähköjohtojen tai huonojen liitosten kipinöinnin seurauksena. Valokaarivikasuojat ovat yleistymässä myös Euroopassa ja ne on huomioitu Suomessakin vuonna 2017 uudistuneessa pienjännitesähköasennusten SFS-6000 standardissa. [44, 45]

Valokaarivikasuojien toiminta perustuu virran epätavallisten vaihteluiden ja korkeataajuisien komponenttien havaitsemiseen. Vaurioituneen piirin jännitteissä vauriot eivät ole havaittavissa, vaan ne hukkuvat muihin häiriöihin. Valokaarivikasuojat havaitsevat kaikki erilaiset valokaaritulanteet, eli vaiheiden, vaiheen ja nollajohtimen, vaiheen ja suojaajohtimen väliset sekä pelkästään yhdessä vaiheessa ilmenevät viat. [44]

Koska myös maakaapeleissa on todettu esiintyvän samankaltaista kipinöintiä eli valokaari-ilmiöitä, voisi valokaarivikasuojien toimintaperiaatteet olla hyödynnettävissä myös maakaapeleiden kunnonvalvonnassa. Suoraan maakaapeliverkkoon tarkoitettuja laitteita ei kuitenkaan löydetty, eikä aiheeseen perehdytty syvemmin.

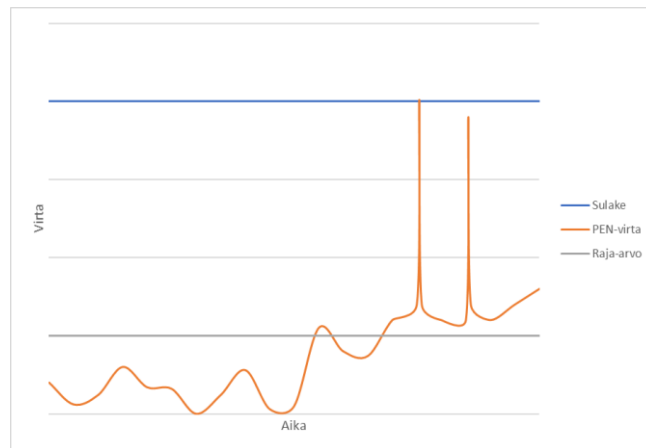
### 3.3.8 Väliaikaisesti asennettavat vianpaikannuslaitteet

Iso-Britanniassa on käytössä laitteita, jotka asennetaan väliaikaisesti jakelumuuntamoille mittamaan vaurioituneiksi epäiltyjä kaapeleita. Vauriota voidaan epäillä useiden sulakepalojen tai jännitteenlaatuongelmien seurauksena. Laitteilla voidaan paikantaa vika- paikka ja arvioida vian vakavuutta. Laitteesta riippuen toiminta voi perustua vikaimpe- danssin laskentaan, jännitteen ja virran aaltomuotojen ja suuruuden analysointiin tai kaa- pelin tutkaamiseen (TDR). Laitteet eivät kuitenkaan ole tarkoitettu pysyviin asennuksiin, joten ne eivät vastaa tässä työssä toivottuihin tarpeisiin. [32, 46, 47] Tämä tuskin olisikaan kannattavaa, sillä laitteet voivat maksaa tuhansia euroja.

## 4. PALUUVIRTOJEN ANALYSOINTI

### 4.1 Mittaukset Elenian verkossa

Kun suoraan pienjänniteverkon vianhavainnointiin sopivia laitteita ei löydetty, heräsi vikavirtamonitoroinnin (RCM) pohjalta ajatus, että voisiko alkavat viat olla havaittavissa PEN-johtimen paluuvirran muutoksina esimerkiksi virtapiikkeinä tai kasvavana arvona, jotka eivät kuitenkaan riittäisi laukaisemaan sulaketta. Luvussa 3.1 käsitellyt tutkimukset antoivat myös tukea ajatukselle. Mikäli PEN-johtimen virralle voidaan määrittää normaalitilan raja-arvot, voitaisiin kaapelivauriot mahdollisesti havaita yksinkertaisella virtamittauksella (Kuva 20). PEN-johtimien virtoja ei seurata, eikä niiden suuruus ole kovin tunnettu, joten päädyttiin tekemään mittauksia normaalin suuruusluokan ja vaihtelun selvittämiseksi.



*Kuva 20. PEN-virran seurannan periaatekuva.*

#### 4.1.1 Mittausasettelu

Mittauskohteiksi valittiin Kangasalan ja Lempäälän urakointialueilta mahdollisimman erilaisia kulutusryhmiä, jotka sisälsivät omakotitaloja sähkölämmityksellä ja ilman, kerros- ja rivitaloja, yksityisiä ja julkisia palveluita kuten ravintolat, päiväkodit, liikerakennukset sekä erilaisia maatalous- ja teollisuuskohteita. Mittaukset tehtiin kolmena eri päivänä helmi-, maalisi- ja huhtikuussa, jolloin saatiin mittauksia eri säätiloilla. Kangasalan kohteet mitattiin aamulla ja Lempäälän kohteet iltapäivällä sekä illalla, jolloin saatiin tietoa mahdollisesta vaihtelusta vuorokaudenajan mukaan.

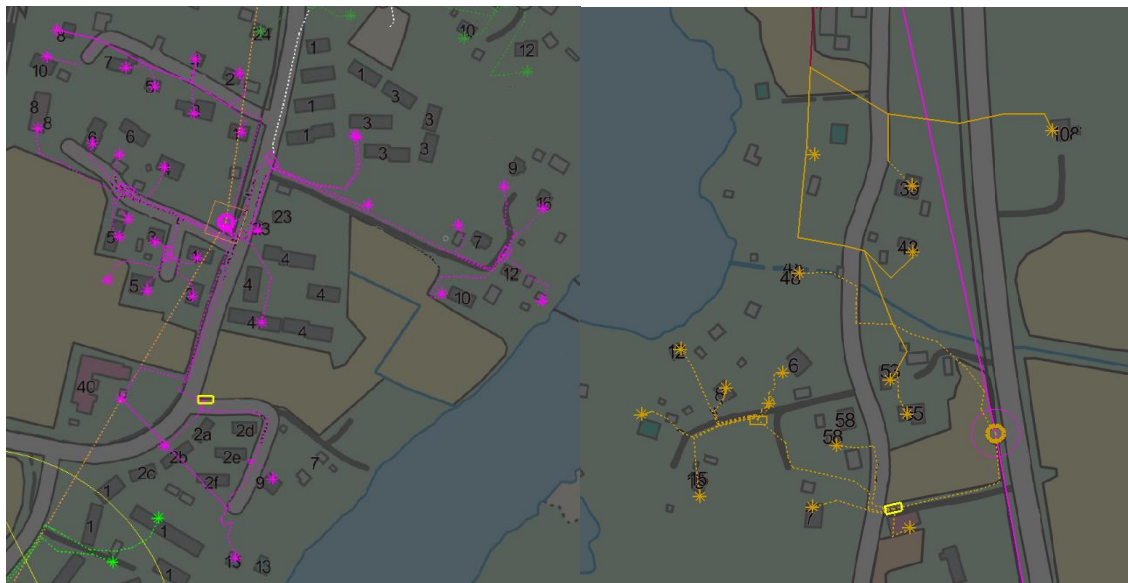
Kohteiksi valittiin kuusi puistomuuntamoaa taajamasta sekä kolme puistomuuntamoaa ja neljä pylväsmuuntamoaa haja-asutusalueelta. Mitattavat kohteet olivat enimmäkseen kaapeloituja, mutta kohteisiin valittiin myös ilmajohtoverkkoa. Mittaukset suoritettiin pää-

osin muuntamoiden PJ-lähdöistä, joista mitattiin vaihe- ja PEN-johtimien virran tehollisarvot pihtivirtamittarilla (Chauvin Arnoux F01). Kolmessa kohteessa samat mittaukset suoritettiin myös jakokaapilta. Mitattujen lähtöjen sulakekoot vaihtelivat 50–315 A:n välillä. Mittauskohteet on esitetty taulukossa 4. Kuvassa 21 on esitetty NIS-esimerkkikuvat mittauskohteista taajaman puistomuuntamosta (vas.) ja haja-asutusalueen pylväsmuuntamosta (oik.). Kuvia mittauksen suorittamisesta on esitetty kuvassa 22.

**Taulukko 4. Mittauskohteet.**

Kangasala	MMO	Mitatut lähdöt (kpl)	Sulakekoot (A)	Kuorma
<b>Ma 19.02.2018</b> klo 7:30 - 9:15	Puisto taajama	3	200-400	okt, kerros-/rivitalo, päiväkot
	Puisto taajama	4	160-200	liikeyrakennus, okt, ravintola, metalliteollisuus
	Puisto taajama	5	100-160	okt
	Puisto maaseutu	3	50-100	okt, navetta
Mittauksia 24 kpl	Pylväs maaseutu	2	63	AMKA okt
	Pylväs maaseutu	2	80	AMKA okt

Lempäälä	MMO	Mitatut lähdöt (kpl)	Sulakekoot (A)	Kuorma
<b>Ma 05.03.2018</b> klo 12:00-14:15	Puisto taajama	7	80-315	okt, vesihuolto, päiväkot, kerros-/rivitalo
	Jakokaappi	3	63-250	okt sl, kerros-/rivitalo
	Puisto taajama	5	200-315	okt sl, kerros-/rivitalo, metalliteollisuus
	Puisto maaseutu	3	80-200	okt, kanala
<b>Ke 04.04.2018</b> klo 16:00-18:00	Puisto maaseutu	5	50-160	AMKA okt, kanala
	Puisto taajama	4	200-250	kerros-/rivitalo, okt, liikkeitä, metalliteollisuus
	Pylväs maaseutu	2	63-160	okt, yks. palvelu
Mittauksia 78 kpl	Jakokaappi	5	63-160	okt, yks. palvelu
	Pylväs maaseutu	2	63-80	AMKA okt, vesihuolto
	Jakokaappi	3	50-80	okt



**Kuva 21. Taajaman (vas.) ja haja-asutusalueen (oik.) esimerkkimuuntopiirit, Elenian Trimble NIS**



*Kuva 22. Kuvia mittauksista.*

#### 4.1.2 Tulokset

Mittauksia suoritettiin yhteensä noin 100 kappaletta, joissa mitattiin vaihe- ja PEN-johtimien virrat. Mittausten jälkeen otettiin ylös mittaushetken säätiedot (lämpötila  $T$ , suhteellinen kosteus  $RH$  ja ilmanpaine  $p$ ) ilmatieteenlaitokselta. Mittausten aikainen kuormitus-tilanne eli näennäisteho  $S$ , pätöteho  $P$  ja loisteho  $Q$  otettiin myös jälkikäteen ylös verkkotietojärjestelmän tuntitehoista. Tehotiedot ovat siis tunnin tarkkuudella ja vain suuntaa-

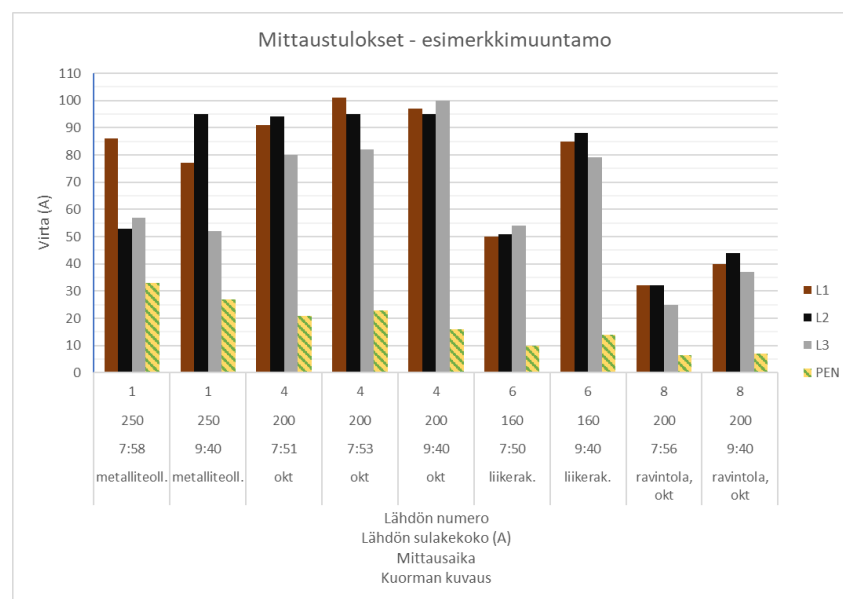
antavia, eivätkä vastaa suoraan mitattuja virtoja. Tehotiedoista laskettiin tehokerroin  $\cos\varphi = P / S$ .

Kaikki mittaustulokset löytyvät liitteestä A. Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty tulokset esimerkkimuuntamoilta. Lähdön tiedoissa on lähdön numero, lähtöä suojaavan sulakkeen koko (A), lähtevä johdin ja lyhyt kuormitustyyppin kuvaus. Itse mittaustuloksissa on mitauspäivä ja -aika sekä mitatut vaihe- ja PEN-virrat (A). Kuvissa 23 ja 24 on esitetty esimerkkimuuntamoilta mitatut virrat lähdöittäin. Mahdollisesta virran heilahtelusta on kuviin otettu keskiarvo.

Mittaustuloksista havaittiin, että osassa kohteissa esiintyy huomattavaa epäsymmetriaa, mikä näkyy myös suurehkoina PEN-virtoina. Lisäksi erityisesti omakotitalojen sähkölämmitystä syöttävien lähtöjen paluuvirrat saattoivat heilahtella runsaasti, jolloin selkeää mittaustulosta ei saatu. Tämä on nähtävissä taulukon 5 esimerkkituloksissa lähdön 4 paluuvirroissa, jotka heilahtelivat jopa 16–30 A:n välillä. Joissain kohteissa heilahtelu näkyi myös vaihevirroissa. Pelkässä PEN-johtimessa esiintynyt heilahtelu vaikutti mielenkiintoiselta, joten kyseisellä muuntamolla suoritettiin useampia mittauksia, jolloin samalla havaittiin PEN-virran vaihtelevan päivän aikana.

**Taulukko 5. Mittaukset esimerkkimuuntamolta 1.**

Lähdön tiedot				Mittaukset		Virta (A)				Tuntitehot NIS				Sää	
Nro	Sulake (A)	Johto	Kuorman kuvaus	pvm	klo	L1	L2	L3	PEN	S (kVA)	P (kW)	Q (kVar)	cosφ	T (°C)	RH (%)
1	250	AP240	metalliteollisuus	19.02.2018	7:58	86	53	57	33	42,28	38,30	17,90	0,91	-14,2	86
1	250	AP240	metalliteollisuus	19.02.2018	9:40	77	95	52	27	49,81	43,70	23,90	0,88	-13,8	86
4	200	AP120	okt	19.02.2018	7:51	91	94	80	18...24	56,31	55,24	56,31	0,98	-14,2	86
4	200	AP120	okt	19.02.2018	7:53	101	95	82	16...30	56,31	55,24	56,31	0,98	-14,2	86
4	200	AP120	okt	19.02.2018	9:40	97	95	95...105	15...17	57,62	56,76	9,90	0,99	-13,8	86
6	160	AX120	liikerakennus	19.02.2018	7:50	50	51	54	10	33,91	29,65	16,45	0,87	-14,2	86
6	160	AX120	liikerakennus	19.02.2018	9:40	85	88	79	14	54,07	51,75	15,66	0,96	-13,8	86
8	200	AX150	ravintola, okt	19.02.2018	7:56	32	32	25	7	25,11	23,84	7,87	0,95	-14,2	86
8	200	AX150	ravintola, okt	19.02.2018	9:40	40	44	37	7	36,05	35,36	7,01	0,98	-13,8	86

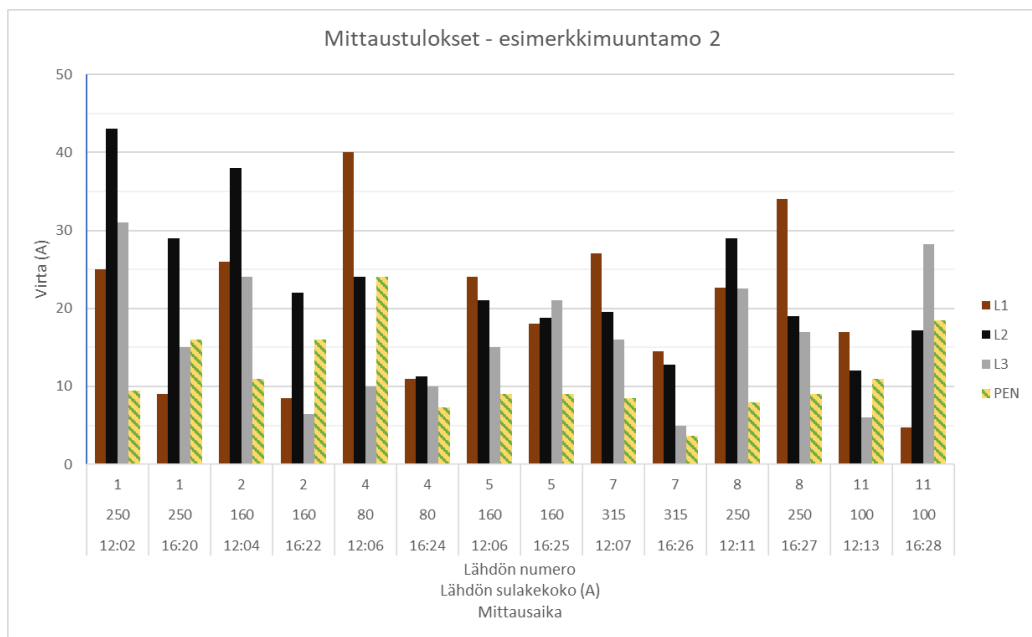


**Kuva 23. Mitatut vaihe- ja paluuvirrat (A) esimerkkimuuntamolta 1.**

Esimerkkimuuntamolla 2 suoritettiin mittauksia kahtena eri päivänä, joista toisena oli pakkasta ja toisena lämpötila oli nollan yläpuolella. Taulukon 6 ja kuvan 24 tuloksista voidaankin päätellä säätilan vaikuttavan kuormituksen epäsymmetriaan ja PEN-johtimen virtaan, kun mahdollisen sähkölämmityksen vaikutus on pienempi. Mittaukset on myös tehty eri aikaan päivästä iltapäivällä ja illalla, jolloin myös kuormitukset ovat erilaiset, joten säätilan ja vuorokaudenajan vaikutuksia on vaikea arvioida erikseen. Voidaan kuitenkin todeta PEN-virran vaihtelevan moninkertaisesti samalla lähdöllä eri ajankohtina.

**Taulukko 6. Mittaustulokset esimerkkimuuntamolta 2.**

Lähdön tiedot				Mittaukset		Virta (A)				Tuntitehot NIS				Sää		
Nro	Sulake (A)	Johto	Kuorman kuvaus	pvm	klo	L1	L2	L3	PEN	S / kVA	P / kW	Q / kVar	cosφ	T / °C	RH / %	p / hPa
1	250	AX150	okt, vesihuolto	05.03.2018	12:02	25	43	31	6...13	18,99	18,86	2,21	0,99	-7,8	76	1012,8
1	250	AX150	okt, vesihuolto	04.04.2018	16:20	9	29	15	16	13,41	13,31	1,62	0,99	5,6	56	1006,8
2	160	AX95	okt	05.03.2018	12:04	26	38	24	11	18,04	17,92	2,04	0,99	-7,8	76	1012,8
2	160	AX95	okt	04.04.2018	16:22	9	22	7	16	9,29	9,23	1,06	0,99	5,6	56	1006,8
4	80	AX95	AMKA okt	05.03.2018	12:06	40	24	10	24	14,40	14,29	1,78	0,99	-7,5	74	1012,9
4	80	AX95	AMKA okt	04.04.2018	16:24	11	11	10	7	12,40	12,26	1,83	0,99	5,6	56	1006,8
5	160	AX95	päiväkoti	05.03.2018	12:06	24	21	15	9	22,08	21,90	2,80	0,99	-7,5	74	1012,9
5	160	AX95	päiväkoti	04.04.2018	16:25	18	19	21	9	12,96	12,70	2,60	0,98	5,6	56	1006,8
7	315	AX185	kerrostalo, okt	05.03.2018	12:07	27	20	16	9	13,91	13,07	4,76	0,94	-7,5	74	1012,9
7	315	AX185	kerrostalo, okt	04.04.2018	16:26	15	13	5	4	12,08	11,09	4,79	0,92	5,4	58	1006,7
8	250	AX240	kerrostalo	05.03.2018	12:11	23	29	20...25	8	20,29	17,51	10,25	0,86	-7,5	74	1012,9
8	250	AX240	kerrostalo	04.04.2018	16:27	34	19	17	9	27,23	23,50	13,76	0,86	5,4	58	1006,7
11	100	AX95	okt	05.03.2018	12:13	17	12	6	11	14,15	14,07	1,54	0,99	-7,5	74	1012,9
11	100	AX95	okt	04.04.2018	16:28	5	17	28	19	6,92	6,88	0,78	0,99	5,4	58	1006,7

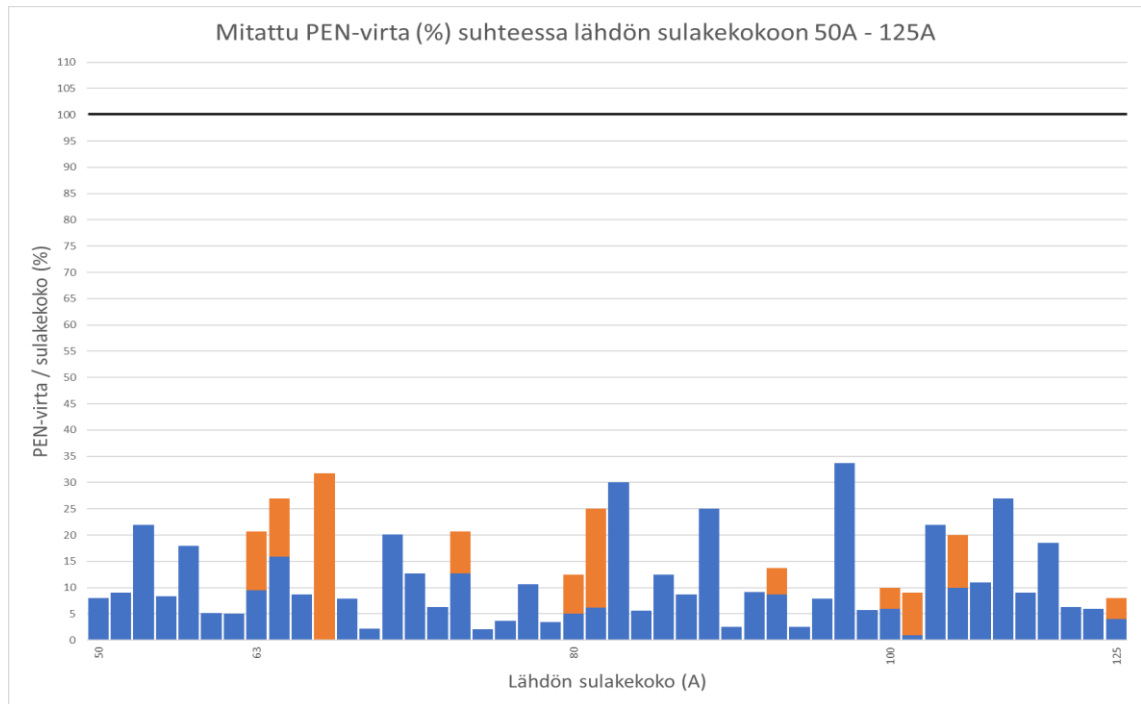


**Kuva 24. Mitatut vaihe- ja paluuvirrat (A) esimerkkimuuntamolta 2.**

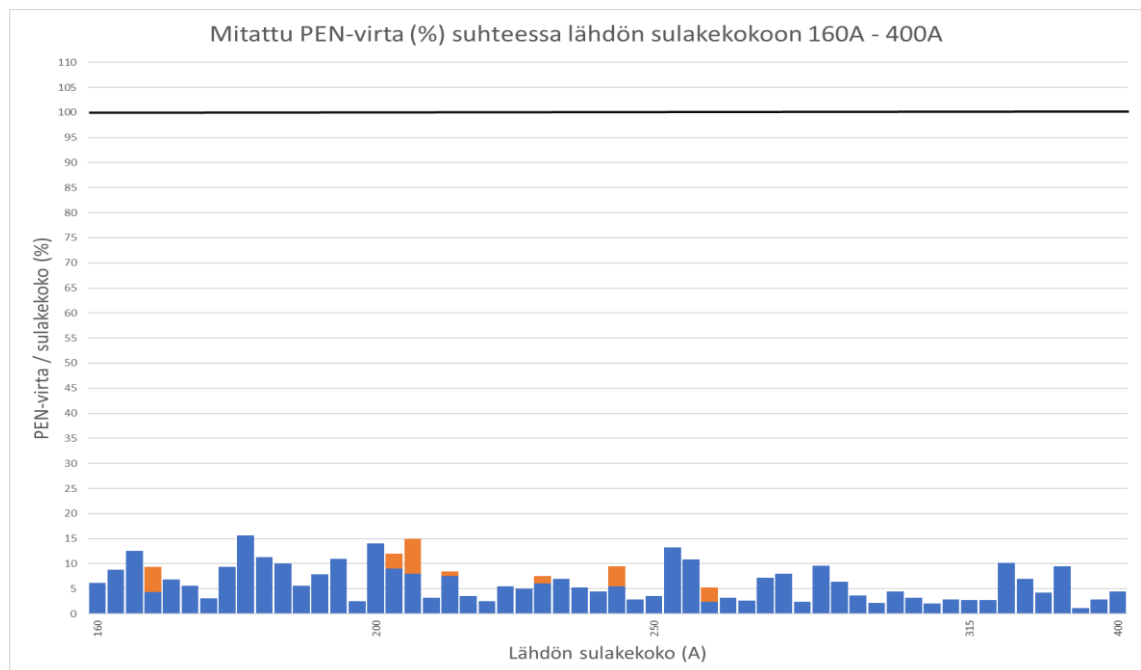
Kuvissa 25 ja 26 on esitetty mitatut PEN-johtimen paluuvirrat (%) suhteessa johtoa suojaavan sulakkeen nimellisvirtaan (100 %). Näkyvässä on mahdollinen virran heilahtelu oranssilla. Paluuvirtojen voidaan havaita olevan pääosin alle 20 %:n luokkaa sulakkeen koosta ja suurimmillaankin noin 30 %. Mikäli oletus vaurioituneen kaapelin paluuvirran kasvusta pitäisi paikkansa, jäisi mittausten perusteella normaalitilan PEN-virran ja sulakkeen toimintavirran väliin noin 70 %:n vara PEN-virran kasvun havaitsemiseen suhteessa



sulakekokoon. Suhteellinen PEN-virta oli pienempi (< 15 %) suurempisulakkeisilla lähdoillä, joissa on suurempi kuormitus eli enemmän asiakkaita tai esimerkiksi suuria teollisuusliittymiä.



**Kuva 25.** Mitatut PEN-virrat (%) suhteessa sulakekokoon 20–125 A.



**Kuva 26.** Mitatut PEN-virrat (%) suhteessa sulakekokoon 160–400 A.

Tuloksista voitiin siis heti päätellä, etteivät kovin pienet muutokset ainakaan ole havaittavissa, sillä PEN-virran vaihtelu oli suurta. Kuitenkin kaikkien mitattujen PEN-virtojen ja suojaavien sulakkeiden välillä on reilu marginaali, josta vauriot voisi havaita, mikäli

ne ilmenevät PEN-virran kasvuna. Jos virta kasvaisi tasaisesti, riittäisi mittalaitteeksi yksinkertainen virranmittaus ja mittausdatan analysointi paikallisesti tai pilvessä kuten kuvattiin luvussa 3.2.2. Tasaisen kasvun tapauksessa näytteenottotaajuuden ei tarvitsisi olla kovin suuri. Mikäli vauriot näkyisivät piikkeinä vaihe- tai PEN-virroissa, tarvittaisiin tarkempia mittauksia ja näytteenottotaajuuden tulisi olla suuri, mikä saattaisi nostaa laitteiden ja tiedonkäsittelyn hintaa.

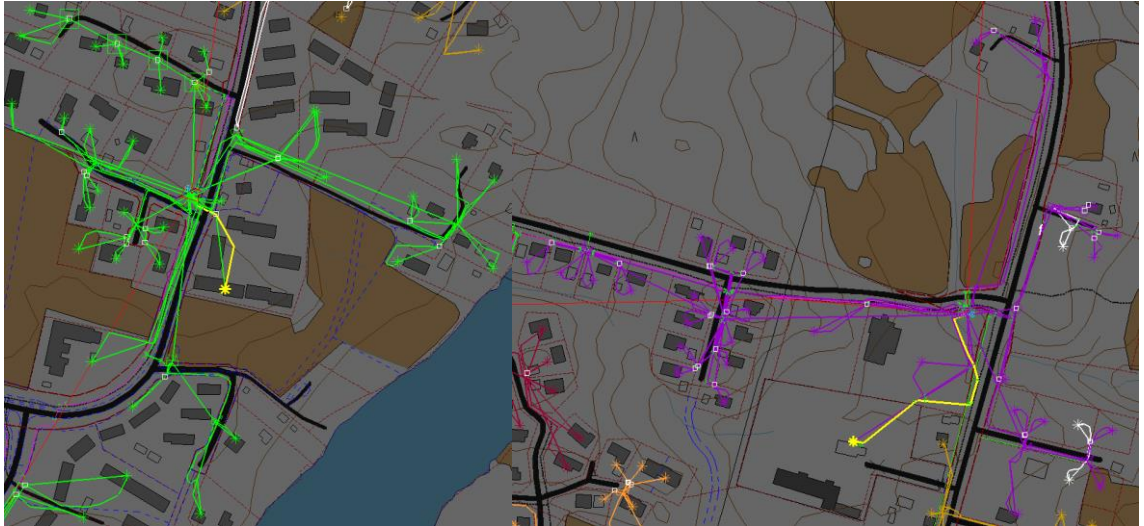
Mittauksissa saatiin tietoa PEN-virrasta normaalitilassa, mutta sen hyödynnettävyyden selvittämiseksi tarvittaisiin vielä lisää tutkimusta ja mittauksia vaurioituneista kohteista. Tämä voitaisiin tehdä joko keinotekoisesti vaurioitetuilla kaapeleilla testiolosuhteissa tai mittauksilla todellisesta verkosta viankorjauksen yhteydessä, jos epäillään osittain vaurioitunutta kaapelia. Varsinkin jälkimmäisen organisointi ja suorittaminen kestäisivät pitkään, joten vaurioituneita kaapeleita voitu tässä työssä tutkia. Paluuvirran käyttäytymistä erilaisissa vikatilanteissa pyrittiin selvittämään simulointien avulla, josta kerrotaan seuraavassa luvussa.

## 4.2 Simulointi

Mahdollista PEN-virran kasvua vikaantuneilla kaapeleilla pyrittiin arvioimaan myös PSCAD-simuloinneilla. Simulointeja varten valittiin mitatuista muuntamoista kaksi yksinkertaista lähtöä, joissa oli vain yksi syöttökaapeli ja kuorma. Lähtöjen tarkemmat tiedot ja mittaustulokset on esitetty taulukossa 7 ja NIS-muuntopiirit kuvassa 27. Lähdöistä tehtiin PSCAD-mallit, joiden rakentaminen on esitetty luvussa 4.2.1. Malleilla simuloitiin erilaisia oikosulkuilanteita ja havainnointiin PEN-virran käyttäytymistä, mistä kerrotaan luvussa 4.2.2.

**Taulukko 7.** Simuloitujen lähtöjen tiedot sekä mitatut vaihe- ja PEN-virrat.

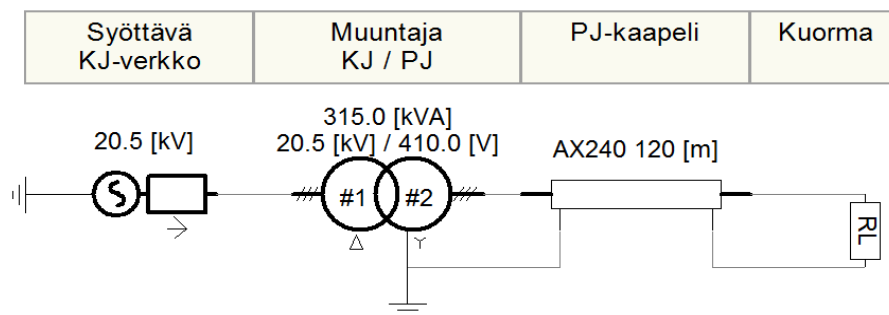
	MMO	Sulake	Kaapeli	Kuormitus	$I_{L1}$ (A)	$I_{L2}$ (A)	$I_{L3}$ (A)	$I_{PEN}$ (A)
<b>Lähtö 1</b>	315kVA 20,5kV/410V	250A	AX240 120m	kerrostalo	23	29	20...25	8
<b>Lähtö 2</b>	315kVA 20,5kV/410V	315A	AX185 270m	metalliteollisuus	78	61	58	32



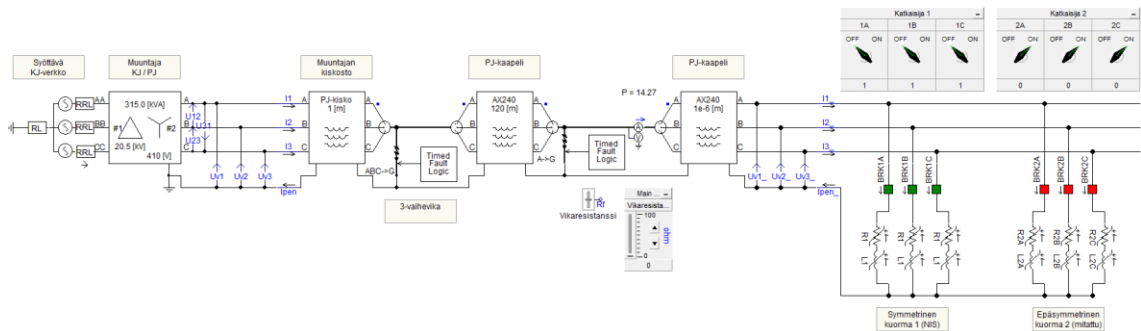
*Kuva 27. Lähdön 1 (vas.) ja lähdön 2 (oik.) muuntopiirit, Elenian Trimble NIS.*

#### 4.2.1 PSCAD-malli

Lähdön 1 PSCAD-malli on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 28 sekä tarkemmin kuvissa 29–32. Malli koostuu syöttävästä keskijänniteverkosta, muuntajasta, muuntajan kiskostosta (Kuva 30), kahdesta pienjännitekaapelin johto-osasta (Kuva 31) sekä vaihdeltavista symmetrisestä kuormituksesta ja epäsymmetrisestä kuormituksesta (Kuva 32). Lisäksi mallissa on kaksi vikapaikkaa, joista toinen on muuntajan kiskostolla (Kuva 30) ja toinen PJ-kaapelilla (Kuva 31). Mallin arvot on määritetty verkkotietojärjestelmän perusteella. Arvojen määrittäminen on esitetty tarkemmin liitteessä B.

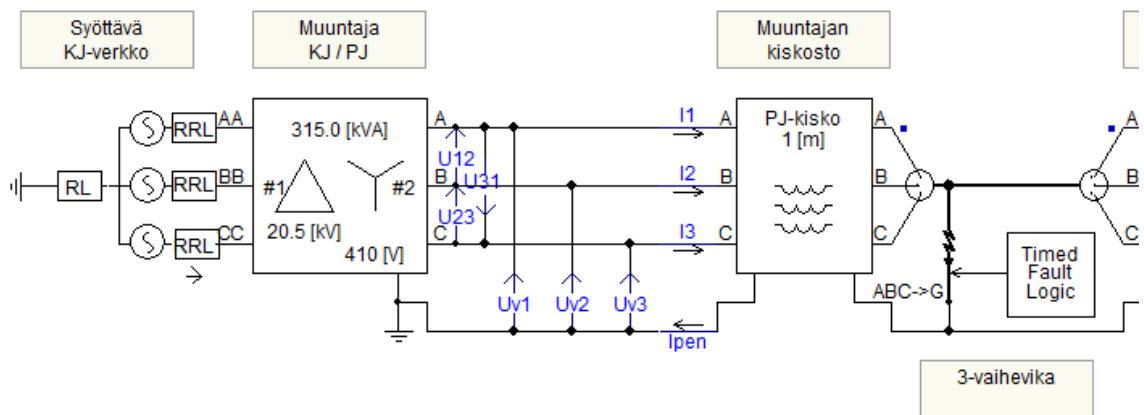


*Kuva 28. Yksinkertaistettu muuntajan PJ-lähdön PSCAD-malli.*



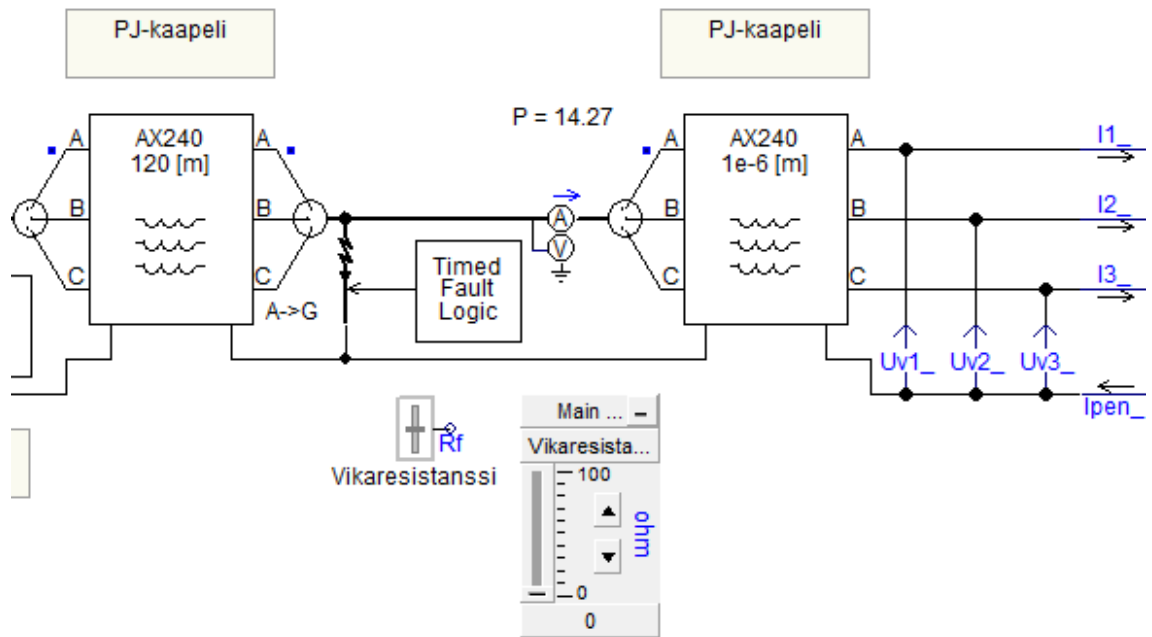
**Kuva 29.** Muuntajan PJ-lähdön PSCAD-malli.

Kuvassa 30 on ensin syöttävä verkko, jonka oikosulkuimpedanssin arvot on saatu NIS oikosulkulaskennan parametreista. Jännite on säädetty kiinteästi 20,5 kV muuntajan ensiön nimellijännitteen mukaisesti. Muuntajan nimellisarvot ovat verkkotietojärjestelmän tietojen mukaiset. Muuntajan jälkeen on pääjännitteiden ( $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$ ), vaihejännitteiden ( $U_{v1}$ ,  $U_{v2}$ ,  $U_{v3}$ ), vaihevirtojen ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) sekä paluuvirran ( $I_{pen}$ ) mittaukset. Nominal PI-section kuvaa muuntajan PJ-kiskostoa, jonka impedanssiarvot ovat myös verkkotietojärjestelmästä. Malli saatiin vastaamaan todellista lähtöä määrittämällä NIS-tehonjakolaskennan perusteella symmetrinen kuorma 1 ja vertaamalla laskennan tuloksia mallin mittaustuloksiin. Muuntajan kiskostolla on kolmivaiheinen oikosulku, jonka avulla voitiin tarkistaa mallin toimivuus vertaamalla NIS:n oikosulkulaskennan suurinta kolmivaiheista oikosulkuvirtaa (8842 A) mallin vikavirtaan (8840 A). Arvot olivat erittäin lähellä toisiaan, joten malli voitiin todeta toimivaksi.



**Kuva 30.** PJ-lähtöä syöttävän KJ-verkon ja muuntajan PSCAD-malli.

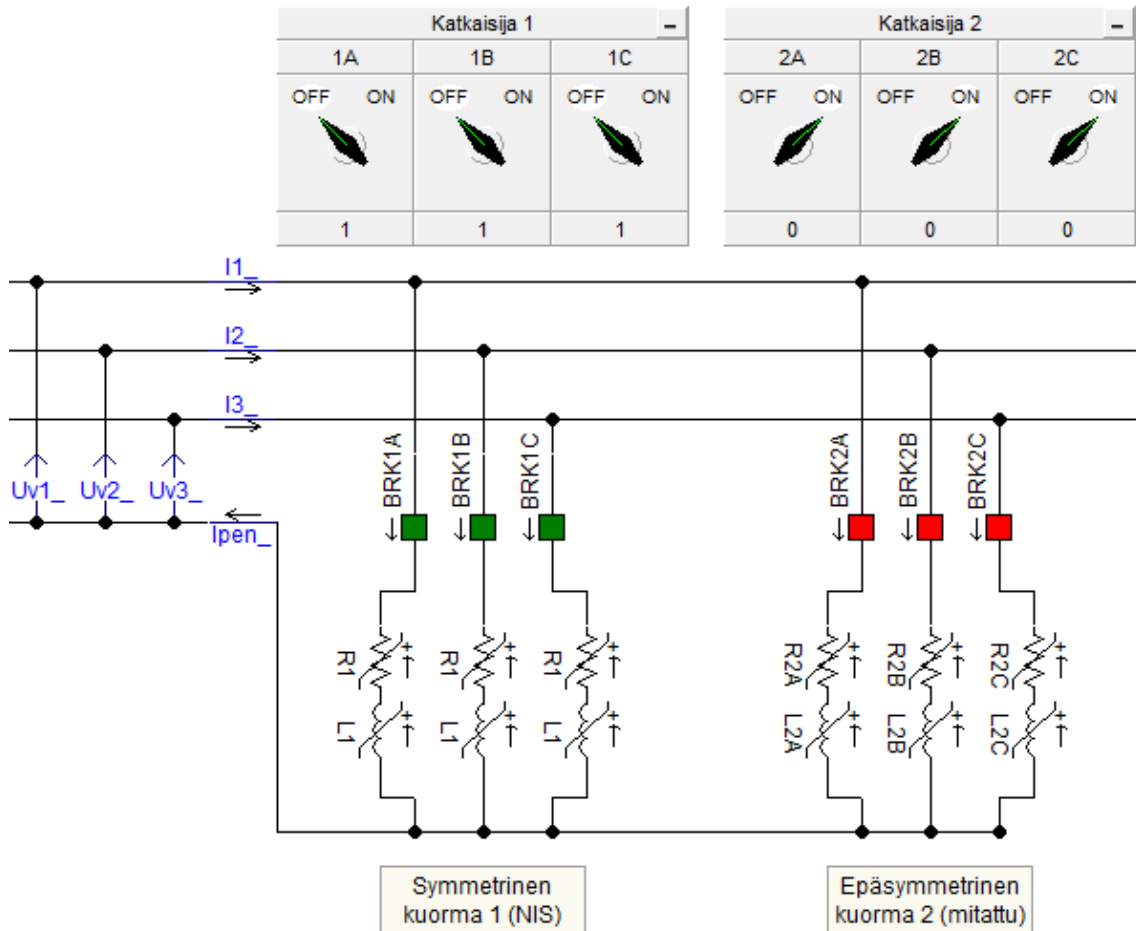
Kuvan 31 PJ-kaapelin malli koostuu kahdesta johto-osasta, joiden välissä on vikapaikka. Johto-osien pituuksia muuttamalla voidaan näin vaihtaa vian sijaintia kaapelilla. Johto on esimerkiksi AX240-maakaapeli ja sen impedanssiarvot ovat NIS:iin määritettyjä johdintietoja vastaavat. Vian tyyppi on vaihdettavissa 3-, 2- tai 1-vaiheiseksi, vikaresistanssi  $R_f$  on säädettävissä sekä vian ajoitus ja kesto ovat määritettävissä. Mallissa on myös kuormalle menevän pätötehon mittaus. Ennen kuormaa on vaihejännitteiden ja -virtojen sekä PEN-virran mittaukset.



**Kuva 31.** PJ-kaapelin PSCAD-malli.

Mallissa on valittavissa kaksi erilaista vakioimpedanssikuormitusta, joiden mallit on esitetty kuvassa 32. Kuormien kytkeytymistä säädetään katkaisijoilla 1 ja 2. Vasemmalla on symmetrinen kuormitus, jonka impedanssiarvot on laskettu NIS tehonjakolaskennan perusteella ja jonka avulla voitiin tarkistaa mallin toimivuutta. Malliin voidaan syöttää pätöteho, kuormitusvirta ja vaihejännite kuormituksen impedanssien määrittämiseksi.

Oikealla on tehtyjen mittausten perusteella määritetty epäsymmetrinen kuormitus. Malliin voidaan syöttää mitatut vaihevirratt sekä mittausajankohdan tuntitehoista saatu teho kerroin, jonka perusteella malli laskee kuormituksen impedanssiarvot. Mallin PEN-johtimen paluuvirtaa voidaan verrata mitattuihin paluuvirran arvoihin. Kuormitusten arvojen määrittäminen on esitetty tarkemmin liitteessä .

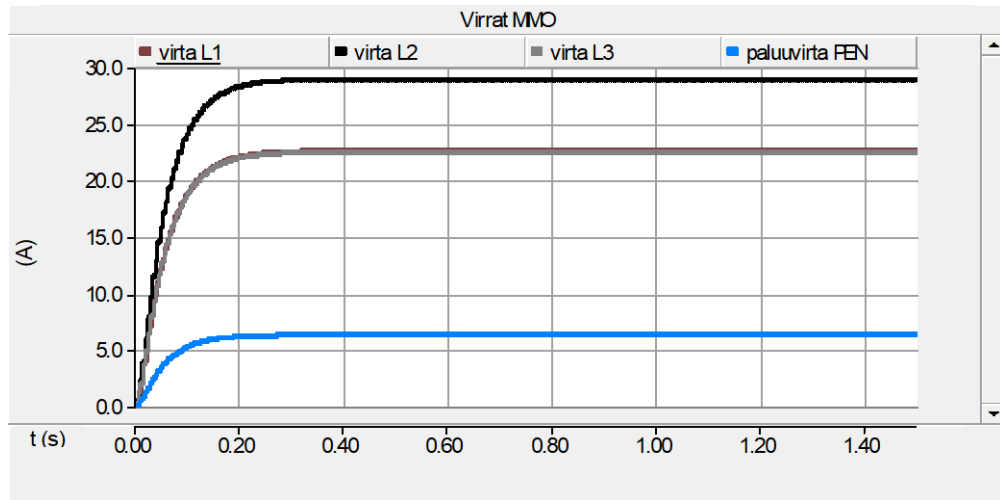


*Kuva 32. Kuormituksen PSCAD-mallit.*

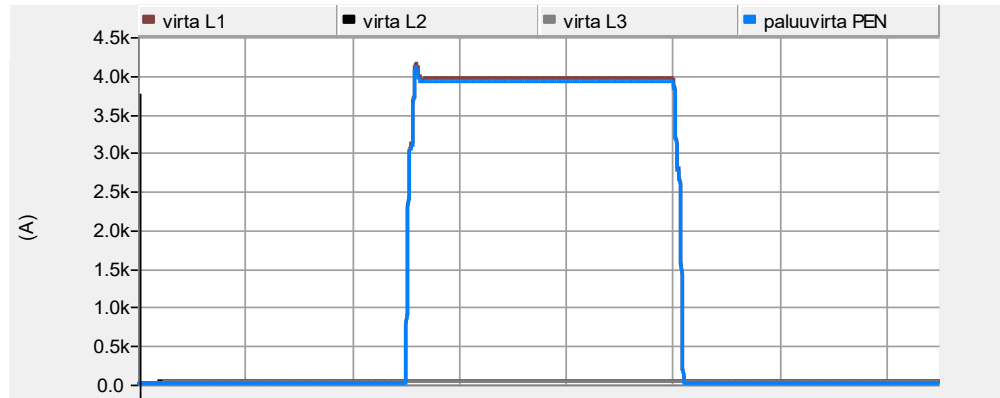
#### 4.2.2 Tulokset

Valittuja kahta lähtöä simuloitiin siis erilaisilla oikosulkutilanteilla, eli kolme-, kaksi- ja yksivaiheisella oikosululla eri vikaresistanssin  $R_f$  arvoilla. Vikapaikka oli simuloinneissa johdon keskellä, alku- ja loppupäässä. Esimerkkikuvaajissa käsitellään lähinnä yksivaiheista vikaa, sillä se on yleisin hitaasti kehittyvistä vioista, eivätkä vaiheiden väliset viat näkyneet simuloinneissa paluuvirrassa. Kuvaajat on otettu lähdön 1 simuloinneista vian ollessa kaapelin loppupäässä.

Aluksi verrattiin mittausten perusteella määritetyn epäsymmetrisen kuormituksen PEN-virtaa mitattuun PEN-virtaan normaalitilanteessa (Kuva 33). Simuloinnin vaihevirit vastasivat mitattuja vaiheviritä, joskin vaiheen L3 virta heilahteli mittaustuloksissa ja simuloinnissa käytettiin keskiarvoa. Simuloitu PEN-virta oli 6,4 A, joka oli melko lähellä mitattua 8 A. Seuraavaksi simuloitiin yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1 vikaresistanssin ollessa 0  $\Omega$  (Kuva 34). Oikosulkuvirraksi saatiin noin 4 kA, joka vastasi suuruusluokaltaan NIS:n oikosulkulaskennan oikosulkuvirtaa johdon päässä.

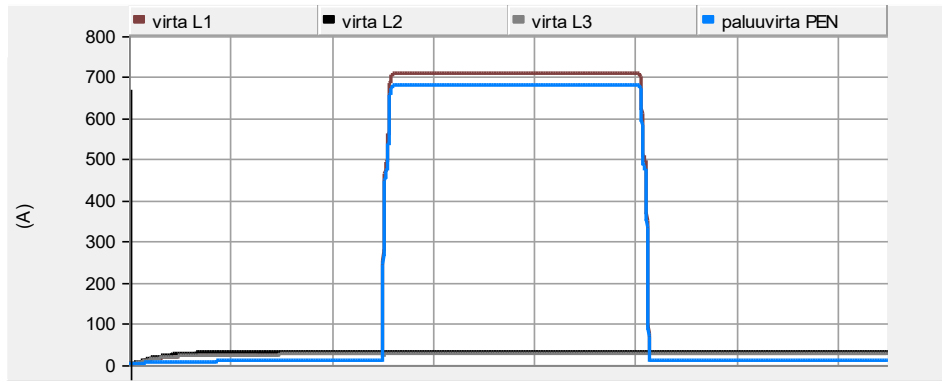


**Kuva 33.** Simuloidut vaihe- ja paluuvirrat, epäsymmetrinen kuormitus, ei vikaa.



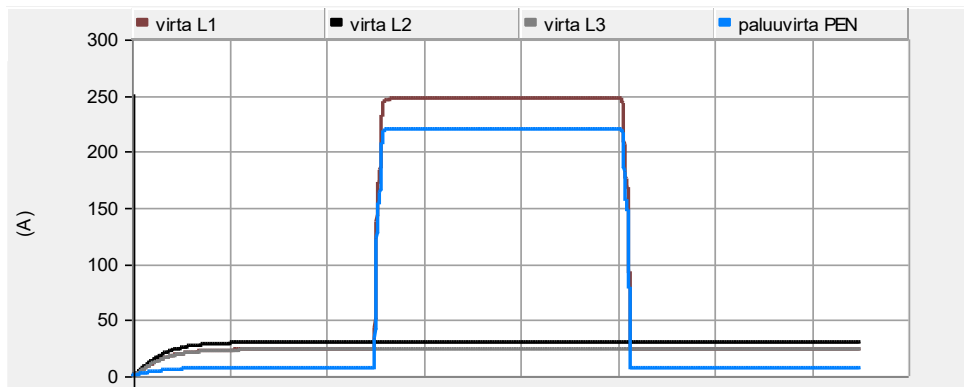
**Kuva 34.** Simuloidut vaihe- ja paluuvirrat, yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 0 \Omega$ .

Luvussa 3.1 käsitellyssä tutkimuksessa [29] oli mitattu vaurioituneissa kaapeleissa syntyvien valokaarien pienimmäksi vikaimpedanssiksi 0,3 ohmia. Sulakkeen toimintakyvyn arvioimiseksi simuloitiin mallissa vastaava yksivaiheinen oikosulkuvirta (Kuva 35), jonka suuruudeksi saatiin noin 700 A. Kyseisen lähdön 250 A sulakkeen palamiskäyrältä (Kuva 8) saadaan 700 A oikosulkuvirralla toiminta-ajaksi 13 s. Valokaaren kesto oli tutkimuksen mukaan vain noin 5-20 ms, joten on selvää, ettei sulake ehdi toimia. Kun valokaaria tulee harvakseltaan, ehtii sulake jäähtyä virtapiikkien välissä, mutta jos vian pahentuessa valokaaret tulevat tarpeeksi tiheästi, voivat ne polttaa sulakkeen. Tällöin vika saattaa vaikuttaa korjaantuvan sulakkeen vaihdolla, mutta uusii ennen pitkää.



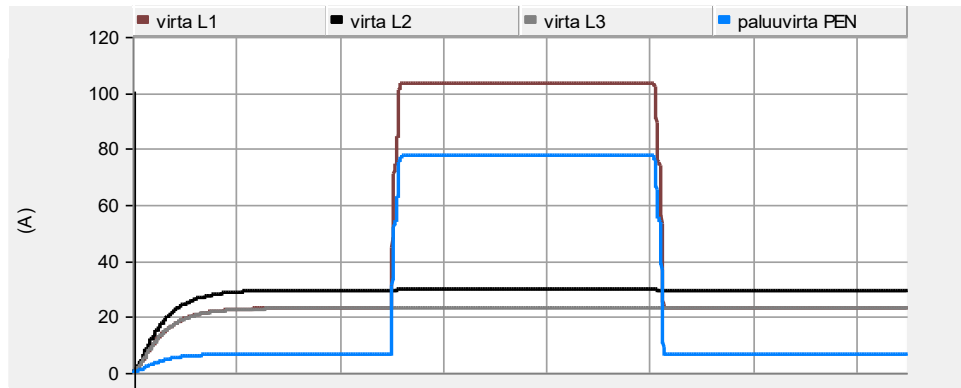
**Kuva 35.** Simuloidut vaihe- ja paluuvirrat, yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 0,3 \Omega$ .

Muita järkeviä kirjallisuuslähteitä vikaresistanssin arvoille pienjänniteteaapeleiden vi-oissa ei löytynyt, joten simuloiteja kokeiltiin erilaisilla vikaresistansseilla. Vikaresis-tanssille pyrittiin määrittämään raja-arvot, joilla oikosulkuvirta olisi alle sulakkeen ni-mellisvirran, mutta suurempi kuin 30 % nimellisvirrasta, mikä määritettiin mittauksissa olevan mahdollinen raja-arvo normaalitilan PEN-virralle (Kuvat 25 ja 26). Vaiheen L1 virta (246 A) oli juuri alle lähdön sulakkeen nimellisvirran 250 A vikaresistanssin ollessa  $1 \Omega$  (Kuva 36). Kuvaajasta näkyy PEN-virran (219 A) olevan vaihevirtaa pienempi, sillä vaihejohtimissa kulkee edelleen myös kuorman ottama virta. Lisäksi muiden vaiheiden virrat vaikuttavat edelleen paluuvirtaan. PEN-virta (77 A) ylitti 30% sulakkeen nimellis-virrasta vikaresistanssin ollessa  $2,8 \Omega$  (Kuva 37).



**Kuva 36.** Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 1 \Omega$ .

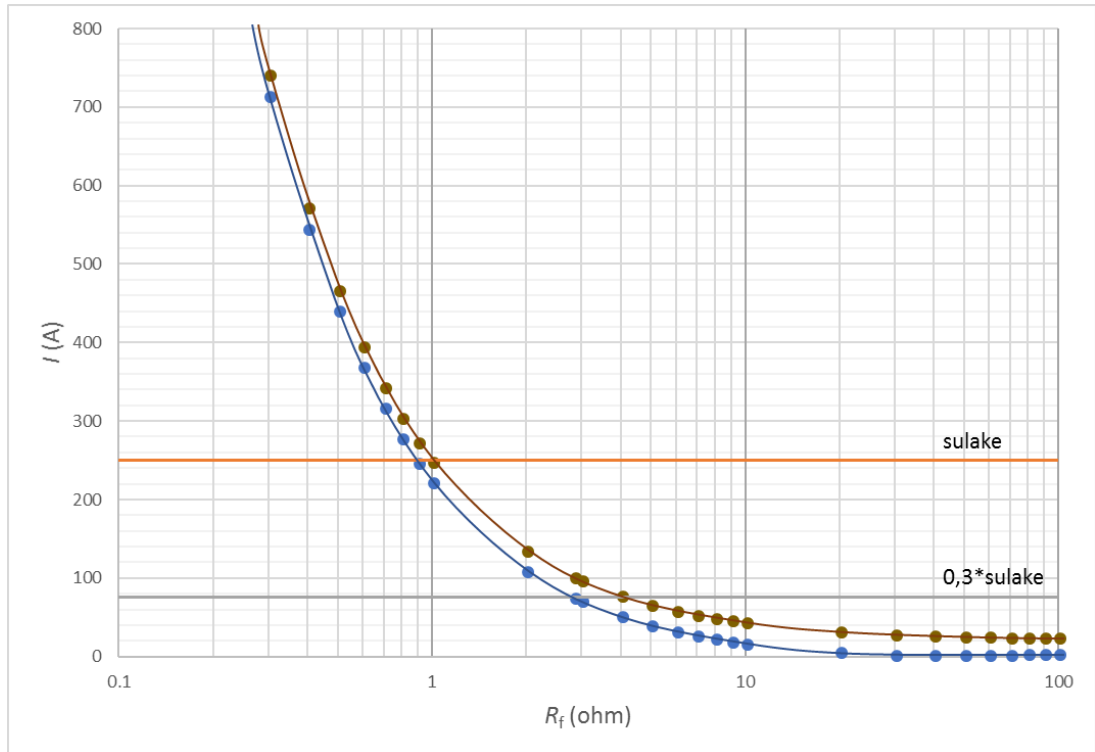




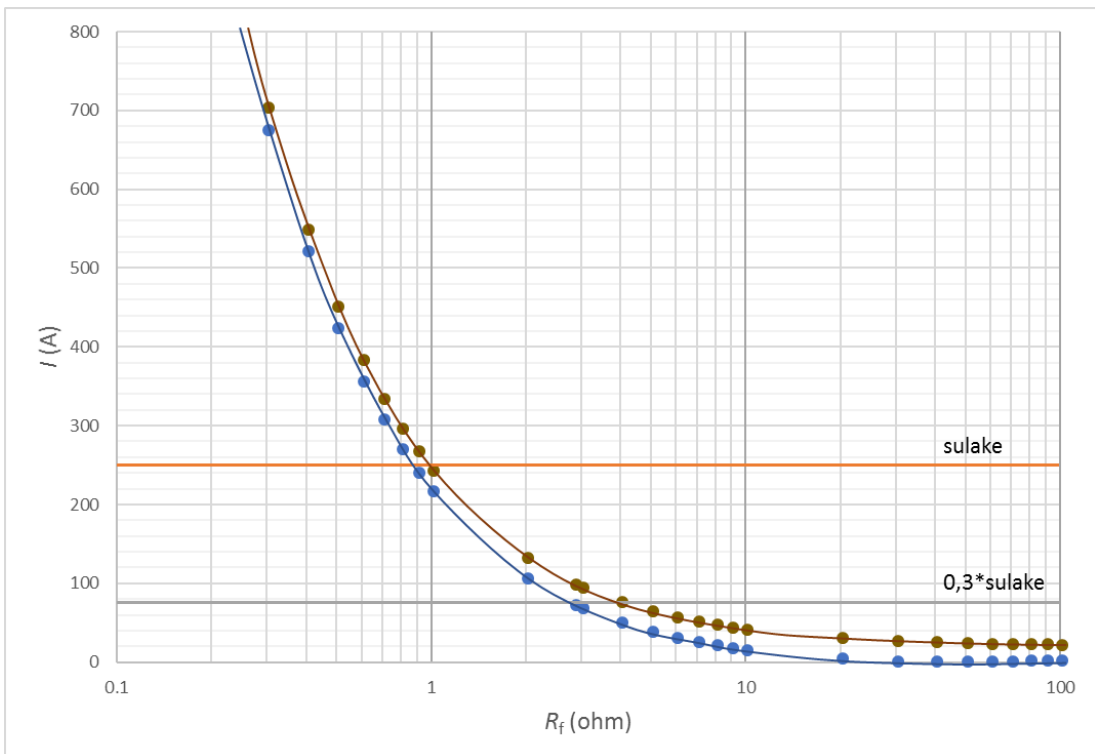
**Kuva 37.** Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 2,8 \Omega$ .

Kuvissa 38 ja 39 on esitetty tarkemmin viallisen vaiheen ja PEN-johtimen virrat eri oikosulkuresistansseilla. Kuvassa 38 vika on kaapelin puolivälissä ja kuvassa 39 kaapelin lopussa. Näkyvissä on myös simuloidun lähdön sulakkeen nimellisvirta 250 A (oranssi viiva) ja 30 % nimellisvirrasta 75 A (harmaa viiva). Kuvaajista nähdään, että vikaresistanssin tulisi siis simuloiduissa tapauksissa olla noin 1–3  $\Omega$ , jotta PEN-virrasta voitaisiin mahdollisesti havaita epänormaali kasvu ilman sulakkeen palamista. Vikaresistanssin raja-arvot olivat melko samat kaikissa simuloinneissa kummassakin simuloidussa lähdössä myös symmetrisellä kuormitusmallilla, eikä niihin vaikuttanut juurikaan vikapaikan etäisyys muuntamosta. Vaatisi kuitenkin paljon useampien lähtöjen simulointia, jotta voitaisiin arvioida arvojen yleistettävyyttä.

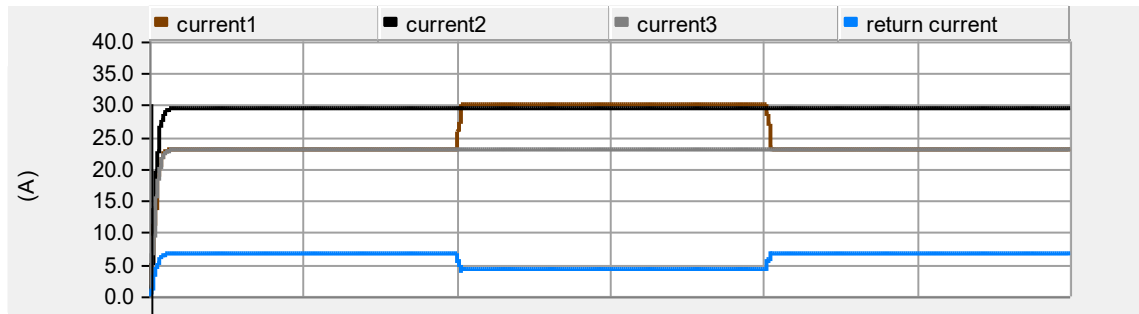
Huomattavaa on myös, että vikaresistanssin vaikutus virtaan oli suurin hyvin pienillä (< 1  $\Omega$ ) vikaresistanssin arvoilla. Yli 10  $\Omega$  vikaresistansseilla virroissa ei ole enää juurikaan muutosta, vaan ne vastaavat lähes normaalitilan virtoja. Kuvassa 40 on esitetty esimerkkinä simuloidut virrat 30  $\Omega$  vikaresistanssilla. Kuvasta nähdään myös, että oikosulku voi ainakin teoriassa myös tasapainottaa vaihevirtojen epäsymmetriaa pienentäen samalla PEN-johtimen virtaa.



**Kuva 38.** Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa 1 kaapelin puolivälissä, PEN-virta (sininen) ja vaihevirta (ruskea) vikaresistanssin funktiona.

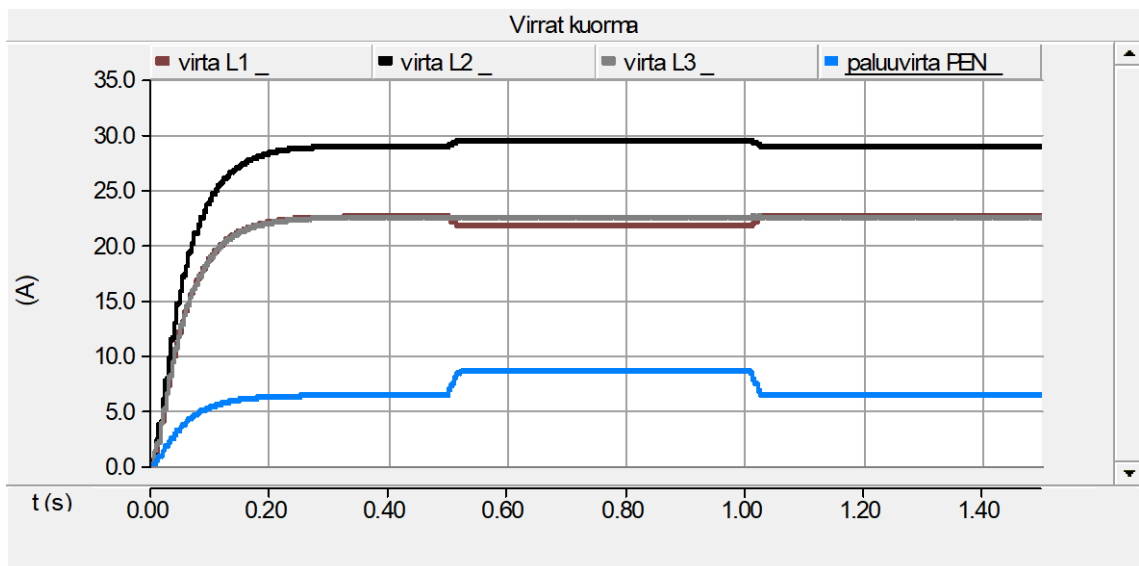


**Kuva 39.** Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa 1 kaapelin lopussa, PEN-virta (sininen) ja vaihevirta (ruskea) vikaresistanssin funktiona.

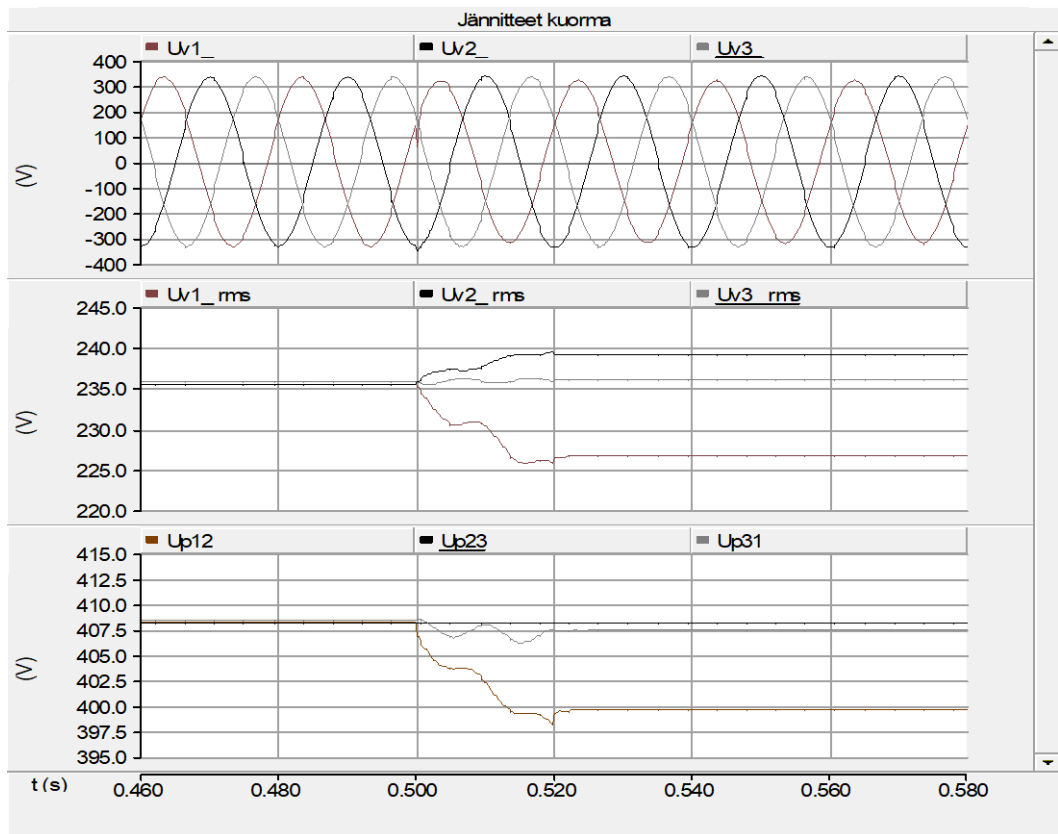


**Kuva 40.** Yksivaiheinen oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 30 \Omega$ .

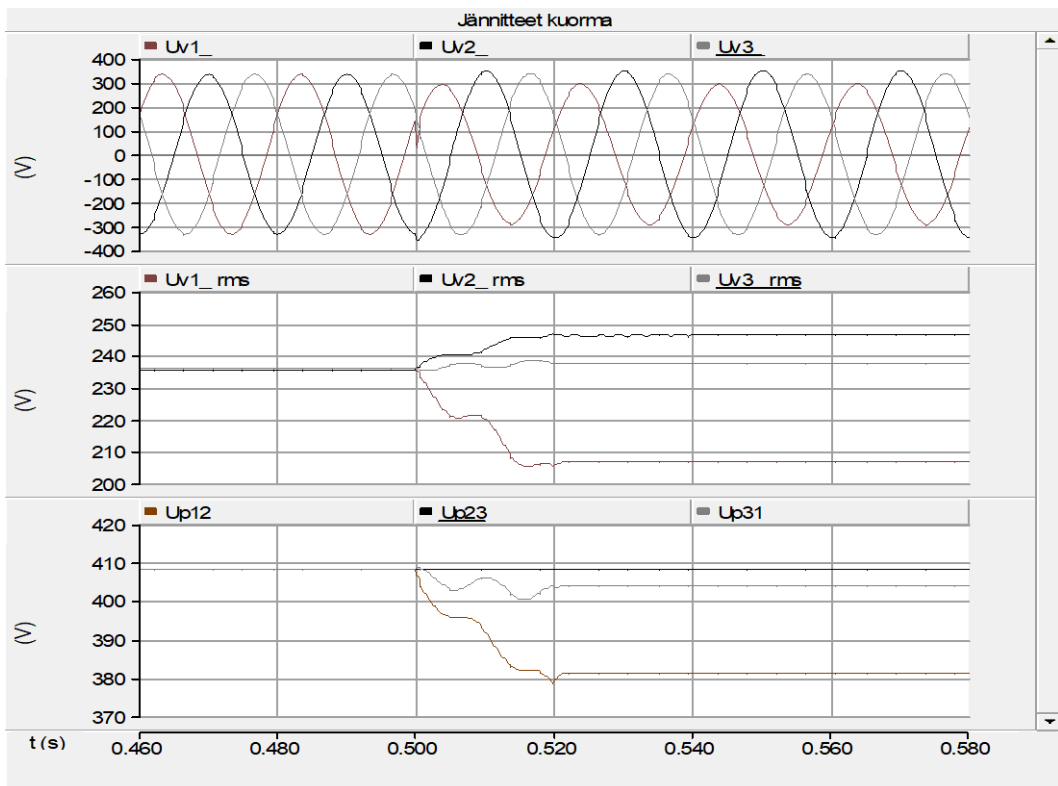
Määritetyillä vikaresistanssin 1–3  $\Omega$  raja-arvoilla oikosulku ei vaikuta juurikaan kuorman virtoihin, mikä voidaan nähdä kuvasta 41. Myöskään jännitteestä ei voida havaita merkittävää epäsymmetriaa (Kuva 42). Tämä tarkoittaa, ettei mahdollista kasvavaa epäsymmetriaa ja PEN-virtaa voitaisi havaita mittauksesta kuormalla esimerkiksi AMR-mittareilla. Sen sijaan valokaarelle määritetyllä pienimmällä vikaresistanssilla 0,3  $\Omega$  on jännite-epäsymmetria jo huomattavampi (Kuva 43) ja voisi olla havaittavissa.



**Kuva 41.** Kuorman virrat, oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 1 \Omega$ .



**Kuva 42.** Pää- ja vaihejännitteet kuormalla, oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 1 \Omega$ .



**Kuva 43.** Pää- ja vaihejännitteet kuormalla, oikosulku vaiheessa L1,  $R_f = 0,3 \Omega$ .

Taulukon 1 jännitteen laatuksiteereistä saadaan 230 V:n nimellisarvolla hyvän laadun rajoiksi 220,8–239,2 V ( $\pm 4\%$ ) ja normaalilaadun rajoiksi 207–253 V ( $\pm 10\%$ ). Vikaresistanssilla 1  $\Omega$  ovat vaiheiden jännitteet noin 227 V, 239 V ja 235 V. Siispä yksittäisten vaiheiden jännite pysyy vikatilanteessakin hyvän laadun rajoissa. Pääjännitteistä voidaan vielä laskea kaavalla (1) jännitteen epäsymmetria  $u_n$  seuraavasti.

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} = \frac{(399,6V)^4 + (408,1V)^4 + (407,5V)^4}{((399,6V)^2 + (408,1V)^2 + (407,5V)^2)^2} = 0,333\dots$$

$$u_n = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot 0,333\dots}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot 0,333\dots}}} = 0,01347\dots \approx 1,3\%$$

Jännite-epäsymmetria on siis hyvän laadun  $\leq 2\%$  vaatimuksen mukainen.

Vastaavasti 0,3  $\Omega$  vikaresistanssilla vaihejännitteet ovat noin 207 V, 246 V ja 238 V. Vaikutus on jo merkittävämpi, mutta arvot olivat edelleen jännitteen vaihtelun normaalin laadun rajoissa. Jännite-epäsymmetriaksi pääjännitteistä saatiin 0,04198... eli 4,2 %, mikä ylittää jo jännite-epäsymmetrialle asetetut laatuksiteerit.

## 5. KAH-VAIKUTUKSET

### 5.1 Vikamäärät

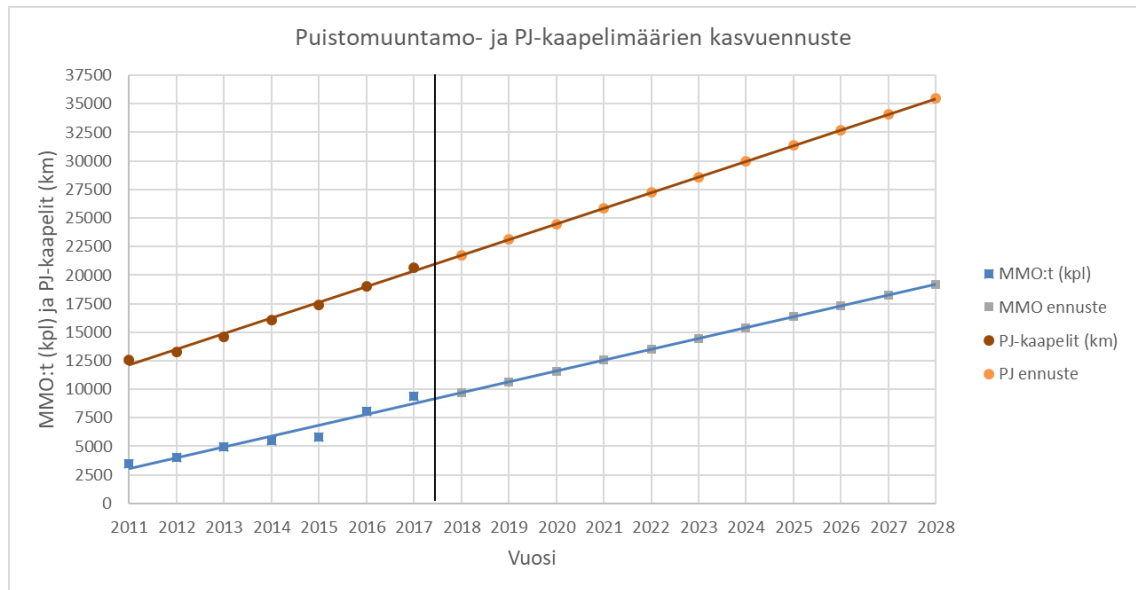
Hankittavien indikointilaitteiden tulisi olla taloudellisesti kannattavia. Valmiita ratkaisuja ei löytynyt, joten niiden kannattavuutta ei voitu suoraan arvioida. Sen sijaan pyrittiin arvioimaan mahdollisesti saatavia säästöjä, mikäli sopivia laitteita olisi. Näin voitiin arvioida, paljonko laitteet saisivat maksaa ja kuinka paljon vikoja niiden tulisi havaita.

Tätä varten pyrittiin selvittämään alkavien vikojen määrää, niiden aiheuttamia kustannuksia verkonhaltijalle ja asiakkaalle keskeytyksestä aiheutuvaa haittaa. Vikojen määrän arvioimiseksi käytiin läpi vuosilta 2011–2017 tilastoituja pienjänniteverkon maakaapelivikoja [17]. Kovin tarkkaa arviota määristä ja vaikutuksista on haastavaa tehdä, sillä PJ-verkon vikojen syiden selvittäminen ja tilastointi ei ole yhtä tarkkaa kuin vaikka keskijänniteverkossa. Vikoja käsiteltäessä ei esimerkiksi joskus kirjata johtimen tyyppiä, jolloin ei aina tiedetä, onko kyseessä kaapeli- vai ilmajohtoverkon vika. Dokumentointipuutteiden syynä voi olla esimerkiksi kiire suurhäiriö- tai muussa ruuhkatilanteessa.

Vikojen kirjaamisessa ei Elenialla ole erillistä syykoodia työn keskiössä oleville hitaasti kehittyvälle vioille, eikä vian hidaskasvu ole välttämättä edes tiedossa. Vika havaitaan vasta kun tulee keskeytys, eikä syytä välttämättä tutkita sen tarkemmin. Siispä hitaasti kehittyneiden vikojen määrää arvioitiin karsimalla tilastoista kaikki viat, joissa oli selkeä syy ja jotka eivät olleet hitaasti kehittyneitä.

Luvussa 2.4.4 todettiin lähes kaikkien taulukon 2 aiheuttajien voivan sisältää hitaasti kehittyviä vikoja. Näistä ulkopuolisen aiheuttamat todettiin useimmiten kunnon vaurioiksi. Osa saattaa olla myös hitaasti kehittyneitä vikoja, mutta niiden tunnistaminen ja erottelu suuresta vikamäärästä ei ole järkevää, joten kaikki ulkopuolisen aiheuttamat viat karsittiin pois. Lopuista vikatyypeistä pyrittiin karsimaan pois kaikki, joissa oli vian kuvauksessa kerrottu kaapelin olleen poikki tai muuten kunnolla vaurioitettu esimerkiksi kaapelointityömaan yhteydessä, jolloin kyseessä ei varmuudella ollut hitaasti kehittynyt vika. Jäljellejääneistä vioista ei pystynyt järkevästi arvioimaan, mitkä voisivat olla hitaasti kehittyviä, joten ne oletettiin kaikki mahdollisesti sellaisiksi.

Saadut vikamäärät vuosittain 2011–2017 on esitetty taulukossa 8 sinisellä pohjalla. Näkyvissä on myös muuntamo- ja kaapelimäärät sekä vikataajuus suhteessa puistomuuntamoiden määrään ja 100 kilometriin PJ-kaapelia. Myös kaapeloinnin määrän kasvun vaikutuksia pyrittiin ennustamaan vuoteen 2028, jolloin uuden sähkömarkkinalain toimitusvarmuusvaatimukset astuvat voimaan. Kasvu puistomuuntamoiden ja PJ-kaapelien määrässä on oletettu jatkuvan lineaarisena, mikä on esitetty kuvassa 44.



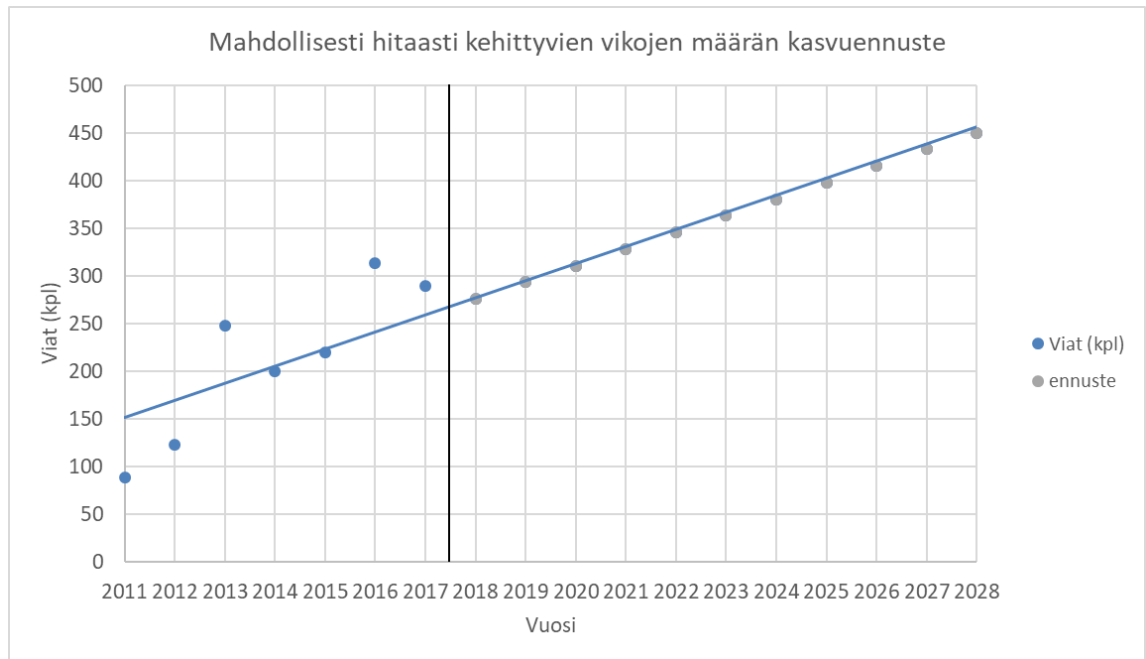
*Kuva 44. Muuntamo- ja PJ-kaapelimäärien kasvuennuste.*

*Taulukko 8. Mahdollisesti hitaasti kehittyneiden vikojen määräennuste.*

	Vuosi	Viat (kpl)	MMO:t (kpl)	PJ-kaapelit (km)	Vikoja / MMO	Vikoja / 100km PJ
<b>Vikatilastot</b>	2011	89	3461	12594	0,026	0,71
	2012	123	4063	13305	0,030	0,92
	2013	248	4946	14623	0,050	1,70
	2014	200	5519	16075	0,036	1,24
	2015	220	5826	17412	0,038	1,26
	2016	314	8071	19031	0,039	1,65
	2017	290	9364	20654	0,031	1,40
<b>Ennuste</b>	2018	276	9694	21731	0,028	1,27
	2019	293	10644	23104	0,028	1,27
	2020	311	11594	24476	0,027	1,27
	2021	328	12544	25848	0,026	1,27
	2022	346	13494	27220	0,026	1,27
	2023	363	14445	28592	0,025	1,27
	2024	380	15395	29965	0,025	1,27
	2025	398	16345	31337	0,024	1,27
	2026	415	17295	32709	0,024	1,27
	2027	433	18245	34081	0,024	1,27
	2028	450	19195	35453	0,023	1,27

Puistomuuntamoiden ja PJ-kaapelin eri vuosien todellisista vikataajuuksista (taulukossa 8 sinisellä pohjalla) laskettiin keskiarvoiksi 0,036 vikaa / muuntamo / vuosi sekä 1,27 vikaa / 100km kaapelia / vuosi. Muuntamoiden keskimääräisellä vikataajuudella arvioituna vikamäärät olisivat olleet korkeampi, jolloin vuonna 2028 vikojen määrä olisi 686 vikaa ja kaapelin vikataajuudella taas 450 vikaa. Näistä päätettiin arvioida vikamäärää pienemmän mukaan eli kaapelin vikataajuudella 1,27 / 100km. Pienempi arvo on perusteltua todellisten vikamäärien epävarmuuden vuoksi. Myös kaivuuseen ja kaapeleiden

varomiseen liittyvän tietoisuuden odotetaan lisääntyvän kaapeloinnin yleistyessä ja lisääntyvän valistuksen ansiosta, joka voi pienentää suhteellista vikamäärää tulevaisuudessa. Kaapelin vikataajuuden perusteella määritettiin siis vikamäärän kasvuennuste (Kuva 45). Ennustetun vikamäärän perusteella määritettiin muuntamoille uusi vikataajuus (vikoja / MMO, Taulukossa 8 harmaalla), joka vastaa siis valittua kaapelin vikataajuutta ja joka on noin 0,025 vikaa / MMO / vuosi.



*Kuva 45. Mahdollisesti hitaasti kehittyvien vikojen määrän kasvuennuste.*

## 5.2 Keskeytysaika ja kustannukset

Edellisessä kohdassa käsiteltyjen mahdollisesti hitaasti kehittyneiden vikojen keskeytysajan keskiarvo oli 3 tuntia 19 minuuttia. Ennakoivalla vianhavainnoinnilla keskeytysaika voitaisiin lyhentää. Keskeytysajasta jäisi ainakin pois aika, joka käyttökeskuksesta kuluu vikaan reagointiin ja viankorjaajien kutsumiseen sekä korjaajien ja tarvittavien välineiden vikapaikalle siirtymiseen kuluva aika. Tämä voidaan olettaa Elenian käyttökeskuksen antaman pessimistisen arvion mukaan olevan tilanteesta riippuen noin tunnin luokkaa. Todellisuudessa säästyvä aika olisi luultavasti suurempi, mutta laskennassa aika haluttiin arvioida varmuuden vuoksi alhaisemmaksi. Vauriopaikan selvitykseen ja korjaukseen kuluva aika pysyisi luultavasti samana. Mikäli havainnointilaitteet kykenisivät myös vianpaikannukseen, lyhenisi keskeytysaika vielä enemmän.

KAH-säästöjen arvioimiseksi tuli määrittää keskimääräisen kaapelilähdön keskimääräinen teho Elenian verkossa. Keskitheho laskettiin Elenian puisto- ja kiinteistömuuntamoiden lähtöjen vuosienenergiasta laskettujen tehojen perusteella (lähdön vuosienenergia [kWh] / 8760 [h]). Taajamalähtöjen keskittehoksi saatiin 15,987 kW, haja-asutuslähtöjen



keskitehoksi 4,559 kW ja kaikkien lähtöjen keskitehoksi 10,880 kW. Keskimääräisten tehojen perusteella voitiin laskea keskeytuskustannukset eri pituisille keskeytyksille.

Taulukossa 9 on esitetty kaavalla (9) lasketut KAH-arvot eri kulutusryhmille määritetyillä keskeytysajoilla vikakeskeytykselle ja suunnitellulle työkeskeytykselle. Vikakeskeytyksen kestonä on vikatilastoista määritelty keskimääräinen kesto 3 tuntia 19 minuuttia. Suunnitellun keskeytyksen kesto on arvioidun tunnin lyhyempi. Taulukkoon on laskettu myös erotuksesta syntyvä KAH-säästö.

Saatavaan KAH-säästöön on taulukkoon 9 vielä lisätty 100 €, joka on arvioitu saatavaksi säästökäsi, jos työ voidaan tehdä suunnitellusti viankorjauksen sijaan. Viankorjaukselle on sovittu urakoitsijoiden kanssa tietyt yksikköhinnat, kun taas suunnitellut työt laskutetaan tehdyn työn mukaisesti esimerkiksi asennetun metrimäärän mukaan. Tarkkoja hintatietoja ei voida julkaista. Arvioitu säästö on saatu vertaamalla viankorjaukseen keskihintaa tavanomaisen kaapelijatkon tekemisen hintaan. Materiaalikustannukset on oletettu samoiksi molemmissa tapauksissa. Tosin suunniteltu työ tulee tilata vähintään kuukautta etukäteen tai muuten korjaus tapahtuu viankorjauksena.

Työssä saatava säästö on myös pessimistinen arvio, sillä viankorjauksen yksikköhinta nousee tulevaisuudessa. Ilmajohdoverkon viankorjaus on maakaapeliverkkoa helpompaa. Esimerkiksi vianpaikannus on nopeampaa, eikä ilmajohdoverkon viankorjauksessa tarvitse suorittaa hankalia kaivuutöitä esim. talvisin. Suuri osa viankorjauksista on vielä ilmajohdoverkon vikoja. Kaapelointiasteen kasvaessa ilmajohdovikojen osuus pienenee, jolloin viankorjauksen keskihinta kasvaa.

Lisäksi laskennassa ei huomioitu pitkien yli 6 h keskeytysten korvauksista saatavia potentiaalisia säästöjä. Mikäli pitkien keskeytysten asiakkaalle aiheutuvaa keskeytysaikaa saataisiin oleellisesti lyhennettyä ennakoivalla vianhavainnoilla, olisivat säästöt näiden vikojen kohdalla jopa tuhansia euroja. Tällaisten vikojen määrää on kuitenkin erittäin hankalaa arvioida vikatilastoista, joten ne jätettiin laskennan ulkopuolelle.

**Taulukko 9.** Lasketut KAH-arvot ja säästöt yhtä vikaa kohden.

	Keskim.	Taajama	Haja-asutus	Kotitalous	Maatalous	Teollisuus	Julkinen	Palvelu
Vikakeskeytyks 3:19	408.91 €	600.85 €	171.34 €	158.73 €	343.38 €	920.60 €	564.74 €	1,107.44 €
Suunniteltu keskeytyks 2:19	176.84 €	259.85 €	74.10 €	57.77 €	123.49 €	304.13 €	199.73 €	577.59 €
KAH-säästö	232.07 €	341.01 €	97.24 €	100.95 €	219.89 €	616.48 €	365.01 €	529.85 €
+ säästö työn hinnassa	<b>332.07 €</b>	<b>441.01 €</b>	<b>197.24 €</b>	<b>200.95 €</b>	<b>319.89 €</b>	<b>716.48 €</b>	<b>465.01 €</b>	<b>629.85 €</b>

Alla esimerkkilasku 3 h 19 min vikakeskeytyksen KAH keskimääräisillä keskeytysparametreilla (Taulukko 3) laskettuna.

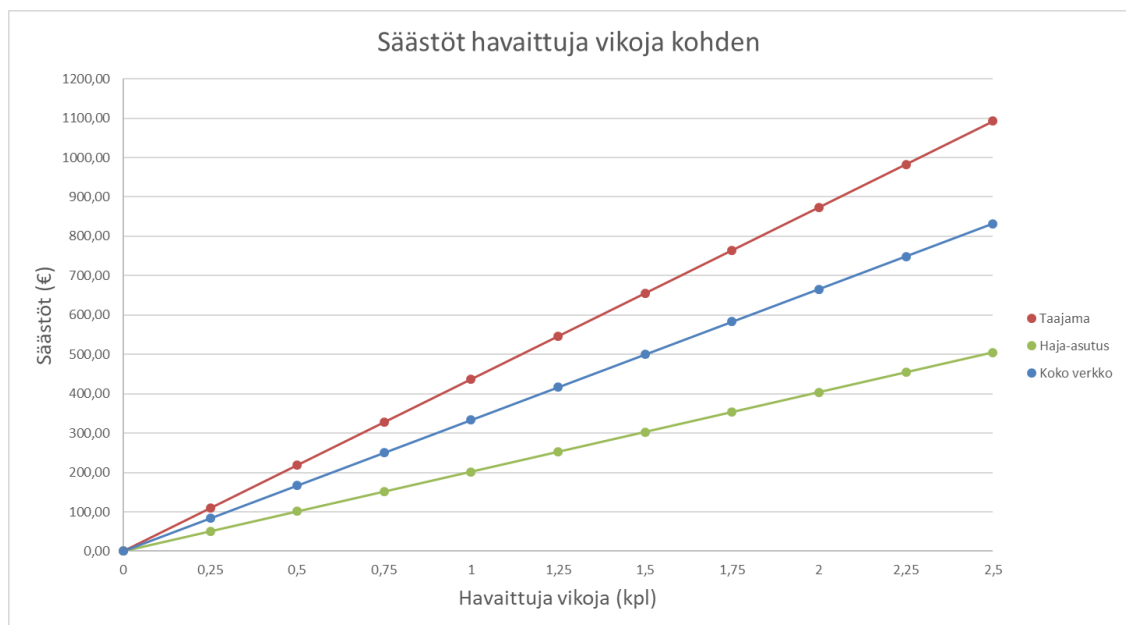
$$KAH = CID \cdot ILD + CENS \cdot EENS$$

$$KAH = 1,10\text{€/kW} \cdot 10,880\text{kW} + 11,00\text{€/kWh} \cdot 10,880\text{kW} \cdot 3,316\dots\text{h}$$

$$KAH = 408,91\text{€}$$

Laskelmien mukaan keskimääräinen kokonaissäästö / vika olisi siis noin 330 €. Oletuksena laitteita asennettaisiin muuntamoille. Muuntamoiden vikataajuus tulevaisuudessa on taulukon 8 arvioilla noin 0,25 vikaa muuntamo kohden vuodessa. Laitevalmistajien arvioiden mukaan mittalaitteiden ikä voisi olla noin 5–10 vuotta. Keskimäärin yhdellä muuntamolla olisi  $0,25 \cdot 5 = 1,25$  vikaa 5 vuodessa ja siis 2,5 vikaa 10 vuodessa.

Kuvassa 46 on esitetty saatavat säästöt havaittuja vikoja kohden eri tyyppisissä verkoissa. Kuvasta nähdään, että yhden muuntamon 5 vuodessa keskimäärin tulevan 1,25 vian havainnoinnilla saatava säästö olisi taajamaverkossa noin 550 €, maaseutuverkossa noin 250 € ja keskimäärin koko verkossa noin 400 €. Käytännössä tuskin voitaisiin kuitenkaan kaikkia vikoja havaita. Taulukossa 10 on esitetty laskettuja mahdollisia säästöjä muuntamo kohden eri ikäisille laitteille eri havainnointiprosenteilla.



**Kuva 46.** Säästöt havaittuja vikoja kohden eri verkon osissa.

**Taulukko 10.** Säästöt muuntamo kohden laitteiden iän ja havainnoidun vikamäärän mukaan.

Havaittuja vikoja %	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Havaittuja vikoja kpl/5 vuotta	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875	1	1.125	1.25
<b>Säästö/MMO/5 vuotta</b>	<b>41.63 €</b>	<b>83.25 €</b>	<b>124.88 €</b>	<b>166.50 €</b>	<b>208.13 €</b>	<b>249.75 €</b>	<b>291.38 €</b>	<b>333.00 €</b>	<b>374.63 €</b>	<b>416.25 €</b>
Havaittuja vikoja kpl/7,5 vuotta	0.188	0.375	0.563	0.75	0.938	1.125	1.313	1.5	1.688	1.875
<b>Säästö/MMO/7,5 vuotta</b>	<b>62.44 €</b>	<b>124.88 €</b>	<b>187.31 €</b>	<b>249.75 €</b>	<b>312.19 €</b>	<b>374.63 €</b>	<b>437.06 €</b>	<b>499.50 €</b>	<b>561.94 €</b>	<b>624.38 €</b>
Havaittuja vikoja kpl/10 vuotta	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5
<b>Säästö/MMO/10 vuotta</b>	<b>83.25 €</b>	<b>166.50 €</b>	<b>249.75 €</b>	<b>333.00 €</b>	<b>416.25 €</b>	<b>499.50 €</b>	<b>582.75 €</b>	<b>666.00 €</b>	<b>749.25 €</b>	<b>832.50 €</b>

Jos laitteiden ikä olisi laitevalmistajien arvion puolivälistä eli 7,5 vuotta, olisi yhden muuntamon keskimääräinen alkavien vikojen määrä tänä aikana. Jos vioista voitaisiin havaita puolet, tarkoittaisi se 0,938 havaittua vikaa muuntamo kohden, jolloin säästö olisi keskimäärin 312 € / muuntamo. Keskimäärin Elenian kaikilla puistomuuntamoilla on 3,7 lähtöä, jolloin yhtä lähtöä eli laitetta kohden saatava säästö olisi keskimäärin

$312\text{€} / 3,7 = 84\text{€}$ . Tästä voi saada karkean arvion yhdelle muuntamolle sijoitettavien havainnointilaitteiden hinnalle. Laitteiston tulisi asennuksineen ja tiedonsiirtoineen olla halvempi kuin potentiaaliset säästöt.

Saatu säästöarvio on todella epävarma useiden muuttujien takia. Ennakolta havaittavien hitaasti kehittyvien vikojen määrää tai kestoja ei tunneta, sillä niitä ei erikseen tilastoida, eikä niitä voida varmuudella tunnistaa vikatilastoista, minkä lisäksi tulevien havainnointilaitteiden havainnointiprosenttia ei voida ennakkoon tietää. Lisäksi pitkistä keskeytyksistä maksettavien vakiokorvausten vaikutus voi olla huomattava, mutta näidenkin määrää olisi hyvin hankalaa arvioida tilastoista. Tulevaisuudessa säästöön vaikuttaa myös viankorjauksen yksikköhinnan kasvu.

## 6. YHTEENVETO

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli kartoittaa markkinoilla saatavilla olevia vianhavainnointilaitteita ja arvioida niiden soveltuvuutta ja kannattavuutta Elenian pienjänniteverkossa. Lisäksi tarkoituksena oli tehdä alustava kuvaus laitteiden asennuksesta ja liittämisestä Elenian ICT-ympäristöön. Kartoitus aloitettiin lähestymällä laitevalmistajia, jälleenmyyjä, yliopistoja ja muita verkkoyhtiöitä, joilta tiedusteltiin kokemuksia pienjänniteverkon vianhavainnoinnista sekä mahdollisia laitevaihtoehtoja. Samalla tutustuttiin kirjallisuuden tunnetuista kunnonvalvonta- ja vianhavainnointimenetelmistä.

Pienjänniteverkon vianhavainnointi osoittautui vielä melko vieraaksi. Kokemuksia ei juuri ollut, eikä valmiita ratkaisuja pienjänniteverkkoon ollut tarjota. Suur- ja keskijännitekomponenttien kunnonvalvonta ja vianindikointi ovat paljon tutkittuja ja laitteet ovat yleistymässä myös keskijännitejakeluverkossa. Pienjänniteverkon kunnossapito taas on tähän asti ollut lähinnä korjaavaa, eikä vikoja tutkita kovin tarkkaan. Pienjännitekomponenttien kunnonvalvontaa esiintyy kuitenkin esimerkiksi teollisuudessa.

Jotkut laitevalmistajat ja jälleenmyyjät tarjosivat keskijänniteverkon ratkaisuja myös pienjänniteverkkoon. Laitteet olisivat todennäköisesti toimineet halutussa tarkoituksessa, mutta ne todettiin liian monimutkaisiksi ja hintaviksi pienjänniteverkkoon. Ratkaisuksi tarjottiin myös pienjännitekatkaisijoita, joilla vikoja ei havaittaisi ennen keskeytystä, mutta joiden jälleenkytkennällä saataisiin vaurioista aiheutuvien satunnaisten keskeytysten kesto minimoitua. Tarjolla oli myös erilaisia laatuanalysointilaitteita, joilla voitaisiin saada monipuolisia mittauksia jännitteistä ja virroista, mutta epäselvää oli, mistä alkavat viat voitaisiin havaita. Työssä käsiteltiin lyhyesti myös asennus- ja tiedonsiirtovaihtoehtoja.

Yleinen menetelmä suur- ja keskijännitekomponenttien kunnonvalvonnassa on osittaispurkausten mittaus, mutta purkausten esiintymiseen ja havaitsemiseen vaaditaan kilovolttien testijännite, joten menetelmä ei sovellu pienjänniteverkon käytönaikaiseen valvontaan. Muissa ympäristöissä kuten teollisuudessa on käytössä eristysresistanssin mittaukseen ja vikavirtamonitointiin perustuvia eristysensivalvontalaitteita. Ne on kuitenkin tarkoitettu erilaisiin maadoitusjärjestelmiin, eivätkä sovellu käytönaikaisesti pienjännitejakeluverkon TN-C-maadoitusjärjestelmään. Muita vähemmän tutkittuja vaihtoehtoja olivat Smart Fuse, AMR-mittareiden hyödynnettävyys, valokaarivikasuojat ja väliaikaisesti asennettavat vianpaikannuslaitteet.

Vastoin alkuperäisiä odotuksia tarjolla ei siis ollut kunnolla vartenotettavia vaihtoehtoja. Lisäksi pienjännitekaapeleiden ilmiöt olivat epäselviä, eikä ollut varmuutta, miten alkavat viat voitaisiin ylipäättään havaita. Työssä tutustuttiinkin aiempiin tutkimuksiin pienjännitekaapeleiden vaurioiden kehittymisestä. Vauriot eivät oireile välttämättä ollenkaan, vaan

vaurion kehittyminen vaatii tietyt olosuhteet, joista tärkeimpänä on kosteus. Kosteus saa virran kulkemaan johtimien välillä ja saattaa aiheuttaa jopa oikosulkuvirtoja vastaavia, mutta kestoaltaan lyhyitä purkauksia, jotka eivät välttämättä ehdi polttamaan sulaketta. Purkauksia voi olla vaikea erottaa kuormituksen vaihtelun aiheuttamista virtapiikeistä. Olosuhteista riippuen saattaa kestää jopa kuukausia ennen vaurion kehittymistä keskeytyksen aiheuttavaksi ja tällöinkin vika saattaa korjaantua sulakkeen vaihdolla. Tähän asti vaurioita on osattu epäillä juurikin toistuvien selittämättömien sulakepalojen perusteella. Tällaiset ajoittaiset viat ovat yleisimpiä yksivaiheisena, kun taas kaksi- ja kolmivaiheiset viat kehittyvät nopeammin pysyviksi vioiksi.

Johtimien välisen vuotovirran ja vikavirtamonitoionnin pohjalta heräsi ajatus, voisiko alkavat viat havaita kasvavana paluuvirtana. Tätä varten tulisi voida määrittää raja-arvo normaalitilan paluuvirralla. Paluuvirran suuruus tai vaihtelu ei ollut tunnettua, joten sitä selvitettiin Elenian verkossa tehdyillä vaihe- ja paluuvirtojen hetkellisarvojen mittauksilla. Mittauskohteena oli muuntamoiden pienjännitelähtöjä erilaisilla kuormituksilla. Mittausten perusteella ainakaan kovin pieniä muutoksia ei voida havaita. Kaikkien lähtöjen paluuvirrat olivat kuitenkin alle 30 % lähtöä suojaavan sulakkeen nimellisvirrasta, mikä voisi toimia normaalitilan raja-arvona. Menetelmän hyödynnettävyyden arviointi vaatisi kuitenkin vielä vaurioituneiden kaapeleiden paluuvirtojen mittausta sekä mahdollisesti tarkempia mittauksia aikatasossa.

Työssä rakennettiin myös yksinkertaisen muuntajalähdön PSCAD-malli, jolla simuloitiin muutamia mitattuja lähtöjä. Lähdöille simuloitiin erilaisia vikatilanteita ja tarkasteltiin niiden vaikutusta virtoihin ja jännitteisiin. Mallilla voitiin simuloida yksi- kaksi- ja kolmivaiheisia vikoja eri kohdissa kaapelia eri vikaresistansseilla. Mallilla voitiin määrittää vikaresistanssille raja-arvot (1–3  $\Omega$ ), joilla yksivaiheinen oikosulkuvirta olisi sulakkeen nimellisvirran ja mittauksilla määritetyn normaalitilan paluuvirran rajoissa. Simulointien perusteella vikaresistanssillisten oikosulkujen vaikutukset kuormalta mitattuihin virtoihin ja jännitteisiin olivat melko pieniä, eivätkä poikenneet normaalista kuormituksen epätasapainosta, jolloin vikoja ei luultavasti voitaisi havaita kuorman päästä tehtävillä mittauksilla. Malli olisi paremmin hyödynnettävissä, jos oikeiden kaapelivaurioiden vikaresistansseista olisi enemmän tietoa saatavilla.

Työn tavoitteena oli myös arvioida saatavilla olevien laitteiden kannattavuutta, mutta kun laitteita ei löytynyt, pyrittiin arvioimaan havainnoinnin potentiaalisia taloudellisia hyötyjä. Tätä varten arvioitiin hitaasti kehittyneiden vikojen määrää vikatilastojen perusteella, mistä saatiin karkea arvio vikataajuudelle (0,25 vikaa / MMO / vuosi) ja keskimääräiselle keskeytyksen kestolle (3 h 19 min). Näistä laskettiin saatava säästö keskeytyksen aiheuttamassa haitassa ja työn hinnassa, jos vika olisi tiedossa ennakolta ja korjaus voitaisiin tehdä suunnitellusti viankorjauksen sijaan. Kaikki hinta-arviot tehtiin varmuudeksi alarajoille useiden epävarmojen muuttujien vuoksi. Tästä saatiin pessimistinen arvio tulevaisuudessa kehitettävien laitteiden hintatasolle, joka oli muutamia satoja euroja yhtä

havaittua vikaa kohden ja joka arvioitujen vikataajuuksien perusteella vastasi yhdelle muuntamolle asennettavasta laitteistolla saatavia säästöjä.

Pienjännitekaapeleiden ennakoiva vianhavainnointi ei ole vielä ajankohtaista ja vaatii vielä parempaa ymmärrystä pienjänniteilmiöistä. Yleisesti kiinnostus aihetta kohtaan on kuitenkin kasvamassa. Laittevalmistajat ovat kiinnostuneita uusista aluevaltauksista pienjänniteverkon markkinoilla, joten kehitystä on lähivuosina odotettavissa.

Tämän työn pohjalta jatkotutkimuksena voisi olla vaurioituneiden kaapeleiden paluuvirtojen mittausta joko keinotekoisissa olosuhteissa tai oikean verkon kaapeleilla viankorjauksen yhteydessä. Myös etäluettavien AMR-mittareiden hyödynnettävyys vaatisi tarkempaa selvitystä, varsinkin kun nyt kehitteillä on seuraavan sukupolven mittarit. Lisäksi pienjännitekaapeleiden vikojen tilastointia voitaisiin kehittää. Vikoja olisi hyvä tutkia tarkemmin korjauksen yhteydessä ja tilastoida hitaasti kehittyneet viat erikseen, jolloin niiden vaikutukset tunnettaisiin tarkemmin. Laitteiden kehittyessä on myös pilotointi aiheellista.

## LÄHTEET

- [1] Tietoa Eleniasta, Elenia Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.8.2018): [http://www.elenia.fi/yritys/elenia\\_info](http://www.elenia.fi/yritys/elenia_info).
- [2] Elenia Säävarman tarina, Elenia Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.08.2018): [http://www.elenia.fi/sahko/saavarma\\_tarina](http://www.elenia.fi/sahko/saavarma_tarina).
- [3] E. Lakervi, J. Partanen, Sähköjälkelutekniikka, 3. painos, Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto, Helsinki, 2012.
- [4] B. Kruizinga, Low voltage underground power cable systems: degradation mechanisms and the path to diagnostics, Eindhoven University of Technology, 2017.
- [5] Sähköjärjestelmä, Elenia Oy, Elenian sisäiset materiaalit.
- [6] Sähkömarkkinalaki, 9.8.2013/588, 2013. Saatavissa (viitattu 21.10.2018): <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>.
- [7] T. Lähdeaho, Verkko-omaisuuden hallinta Elenia Oy:ssä, Verkko-omaisuuden hallinta -kurssimateriaali, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [8] Hyvitykset ja korvaukset, Elenia Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.9.2018): <http://www.elenia.fi/sahko/korvaukset>.
- [9] ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Luku 3: Yleistä sähkötekniikkaa, ABB Oy, 2000.
- [10] B. Lacroix, R. Calvas, Earthing systems worldwide and evolutions, Cahier Technique n° 173, Schneider Electric, 1995.
- [11] ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Luku 4: Sähkön laatu, ABB Oy, 2000.
- [12] J. Schonek, The neutral: A live and unique conductor, Cahier technique no. 212, Schneider Electric, 2004.
- [13] S. Silvennoinen, R. Lehtelä, I. Havunen, S. Kaartinen, L. Korpinen, Sähkövoimatekniikkaopus, 5. Sähköverkon automaatio ja suojaus, 2. painos, Leena Korpinen, 1998.
- [14] ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Luku 7: Oikosulkusuojaus, ABB Oy, 2000.
- [15] Oikosulkuvirran laskenta, Ensto Pro, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.5.2018): <http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojaksot/0705016/1204792797383/1210598828380/1211200962452/1211200997922.html>.

- [16] A. Hamel, A. Gaudreau, M. Côté, Intermittent arcing fault on underground low-voltage cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, Iss. 4, 2004, pp. 1862-1868.
- [17] Maakaapelivikatilastot 2006-2018, Elenia Oy, Elenian sisäiset materiaalit.
- [18] Sähköverkon turvallisuus, Kaivutyöt, Elenia Oy, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 17.9.2018): <http://www.elenia.fi/sahko/turvallisuus#1457>.
- [19] T. Lähdeaho, Projektisuunnitelma: Pienjännitteisen maakaapeliverkon vianindikointi, Elenia Oy, Elenian sisäiset materiaalit, Tampere, 2017.
- [20] DMS-raportit ja häiriötilastointi 2013-2017, Elenia Oy, Elenian sisäiset materiaalit.
- [21] Sähkön keskeytystilasto 2016, Energiateollisuus ry ET, Helsinki, 2017.
- [22] M. Kauppi, Muuntamoautomaation hyödyntämismahdollisuudet Elenian jakeluverkossa, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014.
- [23] T. Luukko, Seuraavan sukupolven AMR-järjestelmän asiakas- ja markkinaintegraatioiden kehittäminen, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018.
- [24] Sähkökatkot lyhyemmiksi, Trimble, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.05.2018): <https://utilities.trimble.fi/sahkokatkot-lyhyemmiksi.html>.
- [25] T. Suvela, Sähköverkkoyhtiön käyttökeskustoiminnan kehittäminen, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [26] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen, V. Palva, *Suurjännitetekniikka*, 4. painos ed. Otatieto, Helsinki, 2015.
- [27] M. Levo, Käyttötoiminnan raportoinnin kehittäminen, opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2015.
- [28] Sähkön jakeluverkkotoiminta ja sähkön suurjännitteinen jakeluverkkotoiminta – Liite 2 Valvontamenetelmät, 2015. Saatavissa (viitattu 23.8.2018): [https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Liite\\_2\\_Valvontamenetelmät\\_Sähkönjakelu.pdf/c48d64d7-4364-4aa1-a91b-9e1cf1167936](https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Liite_2_Valvontamenetelmät_Sähkönjakelu.pdf/c48d64d7-4364-4aa1-a91b-9e1cf1167936).
- [29] B. Kruizinga, P. Wouters, F. Steennis, Fault development upon water ingress in damaged low voltage underground power cables with polymer insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 24, Iss. 2, 2017, pp. 808-816.
- [30] B. Kruizinga, P. Wouters, F. Steennis, T. Broersma, Characterisation of Intermittent Faults in Low-Voltage Underground Cable Systems, *CIREN 23rd International Conference on Electricity Distribution*, Lyon, 2015.



- [31] W. Charytoniuk, W. Lee, M. Chen, J. Cultrera, T. Maffetone, Arcing fault detection in underground distribution networks - feasibility study, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, Iss. 6, 2000, pp. 1756-1761.
- [32] J. Livie, P. Gale, A. Wang, Experience With On-Line Low Voltage Cable Fault Location Techniques in Scottish Power, CIGRE 19th International Conference on Electricity Distribution, Wien, 2007.
- [33] RIO600 Product Guide, ABB Oy, 2016. Saatavissa (viitattu 23.8.2018): [https://library.e.abb.com/public/04e97768d0ea4f1f883d48123c040ee4/RIO600\\_pg\\_757487\\_ENf.pdf](https://library.e.abb.com/public/04e97768d0ea4f1f883d48123c040ee4/RIO600_pg_757487_ENf.pdf).
- [34] Grid-Inspector IKI-50, Finn Electric Oy. Saatavissa (viitattu 23.8.2018): [http://media.finnelectric.fi/catalogue/content/data\\_fe/Kries/KRIES\\_IKI\\_en\\_0914.pdf](http://media.finnelectric.fi/catalogue/content/data_fe/Kries/KRIES_IKI_en_0914.pdf).
- [35] J. Partanen, J. Pyrhönen, P. Silvennoinen, M. Niemelä, J. Lassila, T. Kaipia, P. Salonen, P. Peltoniemi, P. Nuutinen, L. Andrey, J. Haakana, A. Pinomaa, H. Makkonen, V. Voutilainen, P. Järventausta, H. Tuusa, T. Suntio, K. Kannus, K. Lahti, A. Nikander, A. Mäkinen, J. Alahuhtala, T. Sunttila, L. Nousiainen, J. Rekola, T. Vornanen, Tehoelektroniikka sähköjälkälussa – Pienjännitteinen tasasähköjälkälus, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto, 2010. Saatavissa (viitattu 22.10.2018) <https://www.lut.fi/documents/10633/138922/Tehoelektroniikka+sahkonjälkälussa+Loppuraportti+2010>.
- [36] The Power in Electrical Safety, Main Catalogue Edition 2016/2017, Bender. Saatavissa (viitattu 22.5.2018): [https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/c/Bender-Main-Catalogue\\_HK\\_en.pdf](https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/c/Bender-Main-Catalogue_HK_en.pdf).
- [37] P. Pakonen, P. Verho, J. Keränen, S. Muranen, Keskiänniteteaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla, Sähköenergiatekniikan laboratorio, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018. Saatavissa (viitattu 22.5.2018): [http://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Keskijänniteteaapeleiden%20kunnan%20arviointi%20häviökerroin-%20ja%20osittaispurkausmittauksilla\\_Loppuraportti.pdf](http://www.elenia.fi/sites/www.elenia.fi/files/Keskijänniteteaapeleiden%20kunnan%20arviointi%20häviökerroin-%20ja%20osittaispurkausmittauksilla_Loppuraportti.pdf).
- [38] R. Cselkó, I. Berta, Comparison of failure detection capability of available low-voltage cable diagnostic methods, 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Montreal, Canada, 2016.
- [39] R. Cselkó, I. Berta, Challenges of partial discharge diagnostics of low-voltage cables, Journal of Electrostatics, Vol. 71, Iss. 3, 2013, pp. 558-563.
- [40] A. Ylä-Outinen, Techno-Economic Feasibility of Novel On-Line Condition Monitoring Methods in Low Voltage Distribution Networks, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2012.

- [41] C. Hernández, Channel estimation and on-line diagnosis of LV distribution cabling, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2012.
- [42] Bidoyng Smart Fuse, Kelvatek, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.10.2018): <http://www.kelvatek.com.cn/bidoynng.php>.
- [43] The Smart Fuse Closedown Report, Low Carbon Network Fund Project ENWT1001 Electricity North West, 2014. Saatavissa (viitattu 21.10.2018): <https://www.enwl.co.uk/globalassets/innovation/bidoynng/smart-fuse-closedown-report.pdf>.
- [44] AFDD Technical Guide, Arc fault phenomena and functioning of AFDDs, ABB Oy, 2018. Saatavissa (viitattu 23.8.2018): <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A8938&LanguageCode=en&DocumentPartId=PDF&Action=Launch>.
- [45] Valokaarivikasuojaus: Turvallisuutta rakennuksiin helposti asennettuna, ABB Oy, 2018. Saatavissa (viitattu 23.8.2018): [https://library.e.abb.com/public/24cc9f6896354ace91f4a810b3bd535c/Tuotetiedote\\_valokaarivikasuojaus\\_LR.pdf](https://library.e.abb.com/public/24cc9f6896354ace91f4a810b3bd535c/Tuotetiedote_valokaarivikasuojaus_LR.pdf).
- [46] Low Voltage Fault Detection and Localisation Using the Topas 1000 Disturbance Recorder, Electrical Power Quality and Utilisation, Magazine Vol. II, No. 1, 2006, pp. 27-32.
- [47] N. Löf, Pienjänniteverkon automaattoratkaisuiden kehitysnäkymät, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2009.

## LIITE A: VAIHE- JA PALUUVIRTOJEN MITTAUKSET ELENIAN PIENJÄNNITEVERKOSSA 2018

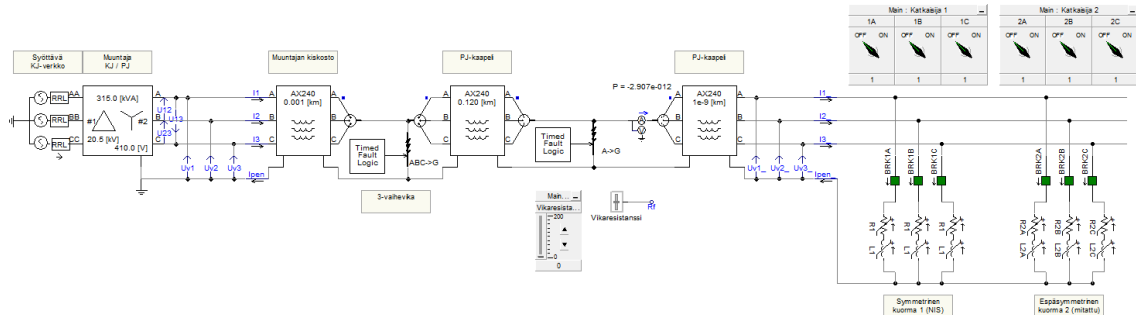
Mittaukset Kangasala 19.02.2018																	
Lähdön tiedot		Käyttöön-				Virta (A)				NIS teho				Sää			
MMO/JK	L	Sulake (A)	Johto	ottovuosi	Kuorman kuvaus	klo	L1	L2	L3	PEN	S (kVA)	P (kW)	Q (kVar)	cosφ	T (°C)	RH (%)	p (hPa)
103179	1	400	AMC300	2005	okt, kerros-/rivitalot	7:40	120	123	154	18	106.25	103.2	25.27	0.971	-14.1	86	
103179	4	200	AX150	2005	okt	7:40	40	16.5	11.8	28	16.56	16.45	1.93	0.993	-14.1	86	
103179	11	250	AX185	2008	päiväkoti	7:40	22	38	24	8.8	17.88	17.3	4.5	0.968	-14.1	86	
103170	6	160	AX120	2003	liikerakennus	7:50	50	51	54	9.9	33.91	29.65	16.45	0.874	-14.2	86	
103170	4	200	AP120	1981	okt	7:52	91	94	80	18...24	56.31	55.24	56.31	0.981	-14.2	86	
103170	4	200	AP120	1981	okt	7:55	101	95	82	16...30	56.31	55.24	56.31	0.981	-14.2	86	
103170	8	200	AX150	2002	ravintola, okt	7:57	32	32	25	6.5	25.11	23.84	7.87	0.949	-14.2	86	
103170	1	250	AP240	1981	metalliteollisuus	7:58	86	53	57	33	42.28	38.3	17.9	0.906	-14.2	86	
103170	6	160	AX120	2003	liikerakennus	9:40	85	88	79	14	54.07	51.75	15.66	0.957	-13.8	86	
103170	4	200	AP120	1981	okt	9:40	97	95	95...105	15...17	57.62	56.76	9.9	0.985	-13.8	86	
103170	8	200	AX150	2002	ravintola, okt	9:40	40	44	37	7	36.05	35.36	7.01	0.981	-13.8	86	
103170	1	250	AP240	1981	metalliteollisuus	9:40	77	95	52	27	49.81	43.7	23.9	0.877	-13.8	86	
103300	5	100	AP185	1974	okt	8:15	25	13	14	6...10	15.52	15.37	2.17	0.990	-14.3	86	
103300	8	160	AP120	1974	okt	8:21	37	18	43	20	23.08	22.56	4.86	0.977	-14.3	86	
103300	7	160	AP120	1974	okt	8:19	53	28	48	7...15	28.78	28.22	5.64	0.981	-14.3	86	
103300	6	125	AP185	1974	okt	8:18	24	36	23	5...10	19.98	19.79	2.76	0.990	-14.3	86	
103300	2	100	AX240	2014	okt	8:13	8	12	8...18	1...9	8.43	8.37	1.01	0.993	-14.3	86	
154181	1	100	AX150	2013	okt	8:35	11.3	2.4	27.2	22	8.58	8.48	1.27	0.988	-14.3	86	
154181	4	100	AX95	2013	navetta	8:37	20...26	34	17...25	10...20	12.94	12.4	3.7	0.958	-14.3	86	
154181	5	50	AX25	2013	okt	8:40	0	4.2	4	4	1.06	0.99	0.38	0.934	-14.3	86	
103671	2	63	AM50	1969	AMKA okt	8:56	30.5	6.8	24	6...13	17.98	17.88	1.92	0.994	-14.0	86	
103671	3	63	AM70	1969	AMKA okt	9:00	20	14.4	25	10...17	12.01	11.81	2.19	0.983	-14.0	86	
103695	1	80	AM50+70	1987	AMKA okt	9:10	30	22	16	4...10	17.85	17.59	3.06	0.985	-14.0	86	
103695	2	80	AM50+70	1987	AMKA okt	9:10	31	13...20	25	5...20	17.72	17.6	2.09	0.993	-14.0	86	

Mittaukset Lempäälä 05.03.2018																	
Lähdön tiedot		Käyttöön-				Virta (A)				NIS teho				Sää			
MMO/JK	L	Sulake (A)	Johto	ottovuosi	Kuorman kuvaus	klo	L1	L2	L3	PEN	S (kVA)	P (kW)	Q (kVar)	cosφ	T (°C)	RH (%)	p (hPa)
151957	1	250	AX150	2009	okt, vesihuolto	12:02	25	43	31	6...13	18.99	18.86	2.21	0.993	-7.8	76	1012.8
151957	2	160	AX95	2009	okt	12:04	26	38	24	11	18.04	17.92	2.04	0.993	-7.8	76	1012.8
151957	4	80	AX95	2009	AMKA okt	12:06	40	24	10	24	14.4	14.29	1.78	0.992	-7.5	74	1012.9
151957	5	160	AX95	2009	päiväkoti	12:06	24	21	15	9	22.08	21.9	2.8	0.992	-7.5	74	1012.9
151957	7	315	AX185	2009	kerros-/rivitalo, okt + JK555895	12:07	27	19.5	16	8.5	13.91	13.07	4.76	0.940	-7.5	74	1012.9
151957	8	250	AX240	2010	kerros-/rivitalo	12:11	22.64	29	20...25	8	20.29	17.51	10.25	0.863	-7.5	74	1012.9
151957	11	100	AX95	2012	okt	12:13	17	12	6	11	14.15	14.07	1.54	0.994	-7.5	74	1012.9
555895	1	315	AX185	2009	syöttö MMO151957	12:26	19.5	20	6	8.5	13.91	13.07	4.76	0.940	-7.0	72	1013.0
555895	2	63	AX50	2009	2 okt sl	12:27	10	3.5	4	5.5	6.22	6.18	0.73	0.994	-7.0	72	1013.0
555895	3	250	AX185	2009	kerros-/rivitalo	12:25	11	14	2.5	6.5	7.98	6.89	4.02	0.863	-7.0	72	1013.0
151903	1	200	AX185	2007	okt sl	12:38	6.3	8	9.5	5	6.25	6.22	0.63	0.995	-7.2	72	1013.0
151903	2	315	AX185	2009	metalliteollisuus	12:39	78	61	58	32	44.2	41.2	16	0.932	-7.2	72	1013.0
151903	5	250	AX185	2009	okt sl	12:40	60	52	57	18	31.56	31.4	3.13	0.995	-7.2	72	1013.0
151903	6	200	AX150	2014	okt sl	12:40	24	27	23	11	11.46	11.39	1.29	0.994	-7.2	72	1013.0
151903	6	200	AX150	2014	okt sl	12:41	23	26	22	10	11.46	11.39	1.29	0.994	-7.2	72	1013.0
151903	7	315	AX240	2015	kerros-/rivitalo	12:42	30	22	30	22	19.77	16.88	10.29	0.854	-7.2	72	1013.0
152054	2	200	AX150	2010	okt	12:58	24	41	37	12...15	25.74	25.59	2.79	0.994	-7.3	72	1013.0
152054	3	160	AX95	2010	okt	12:59	19	12	14	5	11.23	10.9	2.69	0.971	-7.3	72	1013.0
152054	6	80	AX95	2010	kanala	13:00	23	21	22	4.5	17.33	16.86	4	0.973	-7.3	72	1013.0
152522	1	50	AX50	2012	1 okt sl	13:11	8	4	6	4.5	2.74	2.72	0.32	0.993	-7.2	72	1013.1
152522	2	100	AX50	2012	kanala	13:08	24	50	25	27	19.88	19.6	3.3	0.986	-7.2	72	1013.1
152522	3	80	AX150	2012	AMKA okt	13:09	0.7	1.3	15	10	4.68	4.59	0.91	0.981	-7.2	72	1013.1
152522	4	80	AX185	2009	AMKA okt	13:12	10	7	14	7	11.31	10.96	2.78	0.969	-7.2	72	1013.1
152522	5	160	AX150	2012	AMKA okt	13:10	76	64	52	15	46.19	45.52	7.85	0.985	-7.2	72	1013.1
102921	2	250	AX185	2003	kerros-/rivitalot, okt	13:25	41	52	50	20	33.87	31.56	12.3	0.932	-6.9	71	1013.2
102921	3	250	AX185	2006	kerros-/rivitalot, metalliteoll., yks.palv.	13:26	21	13	15	6	12.9	11.21	6.39	0.869	-6.9	71	1013.2
102921	6	200	AX150	2014	kerros-/rivitalo, liikkeitä	13:27	42	37	28	14	25.38	21.29	13.82	0.839	-6.9	71	1013.2
105162	1	160	AX150	2001	okt, yks. palv. JK502430	13:38	12	31	40	25	20.74	19.49	7.09	0.940	-6.6	70	1013.1
105162	2	63	AX95	2001	AMKA okt	13:40	25	23	35	0...20	15.79	15.58	2.59	0.987	-6.6	70	1013.1
502430	1	160	AX150	2001	syöttö MMO105162	13:51	14.9	27	40	18	15.79	15.58	2.59	0.987	-6.5	68	1013.2
502430	2.1	63	AX25	2001	1 okt sl	13:46	0	7	5	5	2.09	2.05	0.39	0.981	-6.5	68	1013.2
502430	2.2	63	AX25	2009	1 okt ei sl	13:45	1.7	0.8	0.9	1.4	1.03	0.84	0.6	0.816	-6.5	68	1013.2
502430	3	63	AX25	2001	yks palv	13:47	2.7	11.6	17.7	12.7	8.42	7.57	3.69	0.899	-6.5	68	1013.2
502430	4	100	AX95	2001	okt	13:50	12	9.5	20.5	9	9.35	9.03	2.41	0.966	-6.5	68	1013.2
105131	1	80	AM70+95	1974	AMKA okt, vesihuolto	14:05	42	18.5	41	20	17.84	17.57	3.07	0.985	-6.7	69	1013.2
105131	2	63	AM70+96	1998	AMKA okt	14:07	1	12	17	8	5.63	5.4	1.59	0.959	-6.7	69	1013.2
558426	1	50	AX50	2011	1 okt sl	14:14	2.4	7.7	0.7	11	2.13	2.12	0.25	0.995	-6.7	70	1013.1
558426	2	80	AX95	2011	syöttö	14:15	5.7	7.7	4.7	2	4.21	3.92	1.53	0.931	-6.7	70	1013.1
558426	3	50	AX50	2011	AMKA okt ei sl	14:15	3	0	5.3	4.2	2.21	1.8	1.28	0.814	-6.7	70	1013.1

Mittaukset Lempäälä 04.04.2018																	
Lähdön tiedot		Käyttöön-				Virta (A)					NIS teho				Sää		
MMO/JK	L	Sulake (A)	Johto	ottovuosi	Kuorman kuvaus	klo	L1	L2	L3	PEN	S (kVA)	P (kW)	Q (kVar)	cosφ	T (°C)	RH (%)	p (hPa)
151903	1	200	AX185	2007	okt sl	15:55	11.2	0.2	4.4	10.4	3.42	3.4	0.34	0.994	5.5	56	1006.9
151903	2	315	AX185	2009	metalliteollisuus	15:57	28.5	14.4	15.2	13.4	13.5	13.3	2.3	0.985	5.5	56	1006.9
151903	5	250	AX185	2009	okt sl	15:58	27	16	44	24	27.83	27.68	2.88	0.995	5.5	56	1006.9
151903	6	200	AX150	2014	okt sl	15:59	10	12	5	9	4.8	4.77	0.55	0.994	5.5	56	1006.9
151903	7	315	AX240	2015	kerros-/rivitalo	16:00	12.5	7.7	33	30	15.74	14.58	5.92	0.926	5.5	56	1006.9
151957	1	250	AX150	2009	okt, vesihuolto	16:20	9	29	15	16	13.41	13.31	1.62	0.993	5.6	56	1006.8
151957	2	160	AX95	2009	okt	16:22	8.5	22	6.5	16	9.29	9.23	1.06	0.994	5.6	56	1006.8
151957	4	80	AX95	2009	AMKA okt	16:24	11	11.3	10	7.3	12.4	12.26	1.83	0.989	5.6	56	1006.8
151957	5	160	AX95	2009	päiväkoti	16:25	18	18.8	21	9	12.96	12.7	2.6	0.980	5.6	56	1006.8
151957	7	315	AX185	2009	kerros-/rivitalo, okt + JK:555895	16:26	14.5	12.8	4.9	3.7	12.08	11.09	4.79	0.918	5.4	58	1006.7
151957	8	250	AX240	2010	kerros-/rivitalo	16:27	34	19	17	9	27.23	23.5	13.76	0.863	5.4	58	1006.7
151957	11	100	AX95	2012	okt	16:28	4.7	17.2	28.2	18.5	6.92	6.88	0.78	0.994	5.4	58	1006.7
555895	1	315	AX185	2009	syöttö MMO151957	16:32	18.9	12	5	9.1	12.08	11.09	4.79	0.918	5.4	58	1006.7
555895	2	63	AX50	2009	2 okt sl	16:33	3.9	2	2.4	4	3.65	3.62	0.43	0.992	5.4	58	1006.7
555895	3	250	AX185	2009	kerros-/rivitalo	16:35	19	12	2	5.5	8.65	7.47	4.36	0.864	5.4	58	1006.7
152054	2	200	AX150	2010	okt	16:45	28	20...25	43	11...19	20.88	20.76	2.25	0.994	5.4	62	1006.5
152054	6	80	AX95	2010	kanala	16:48	13.2	16	19.7	7...11	7.9	7.69	1.82	0.973	5.4	62	1006.5
152522	1	50	AX50	2012	1 okt sl	16:55	14.8	15.4	22.2	9	9.14	9.08	1.08	0.993	5.3	64	1006.4
152522	2	100	AX50	2012	kanala	16:55	9.1	11	7	6.3	11.91	11.7	2.2	0.982	5.3	64	1006.4
152522	3	80	AX150	2012	AMKA okt	16:56	0.8	1.2	2.3	2	4.51	4.47	0.6	0.991	5.3	64	1006.4
152522	4	80	AX185	2009	AMKA pari okt	16:57	17.3	13.1	20	6.3	10.44	10.2	2.23	0.977	5.3	64	1006.4
152522	5	160	AX150	2012	AMKA okt	16:57	40.2	39	48.5	12.6	38.16	37.56	6.76	0.984	5.3	64	1006.4
102921	2	250	AX185	2003	kerros-/rivitalot, okt	17:10	37.5	37	25	11	26.16	24.59	8.92	0.940	5.1	65	1006.4
102921	3	250	AX185	2006	kerros-/rivitalot, metalliteoll., yks.palv.	17:11	27	19.5	22.3	8	14.37	12.44	7.19	0.866	5.1	65	1006.4
102921	4	250	AX240	2006	4&5: kerrostalot, liikerakennus	17:13	35.5	41	42.5	5	46.93	41.89	21.16	0.893	5.1	65	1006.4
102921	5	250	AX240	2006	4&5: kerrostalot, liikerakennus	17:14	25.5	32.2	27.6	7.2	46.93	41.89	21.16	0.893	5.1	65	1006.4
102921	6	200	AX150	2014	kerrostalo, liikkeitä	17:15	17.7	5.7	6.7	5.7	12.73	11.21	6.04	0.881	5.1	65	1006.4
105162	1	160	AX150	2001	okt, yks. palv. JK502430	17:20	10.5	13.3	19.6	17.5	14.69	14.08	4.2	0.958	5.0	66	1006.3
105162	2	63	AX95	2001	AMKA okt	17:20	10.3	8.2	15.9	8...13	6.52	6.45	0.98	0.989	5.0	66	1006.3
502430	1	160	AX150	2001	syöttö MMO105162	17:28	8.4	10.1	21.5	4.1	14.69	14.08	4.2	0.958	4.8	66	1006.1
502430	2.1	63	AX25	2001	1 okt sl	17:30	0	0.6	1	1.3	1.84	1.81	0.35	0.984	4.8	66	1006.1
502430	2.2	63	AX25	2009	1 okt ei sl	17:30	2.2	0.35	0.6	2.3	0.87	0.71	0.51	0.816	4.8	66	1006.1
502430	3	63	AX25	2001	yks. palv.	17:31	1.5	9.3	7	6.7	5.03	4.52	2.2	0.899	4.8	66	1006.1
502430	4	100	AX95	2001	okt	17:31	3.8	5.4	2.6	6	7.13	7.04	1.15	0.987	4.8	66	1006.1
105131	1	80	AM70+95	1974	AMKA okt, vesihuolto	17:43	42	8.2	44	27	14.16	13.85	2.98	0.978	4.7	66	1005.9
105131	2	63	AM70+96	1998	AMKA okt	17:45	10.6	12.2	8.4	2.2	7.19	6.99	1.68	0.972	4.7	66	1005.9
558426	1	50	AX50	2011	1 okt sl	17:50	2.4	0.7	0.8	2.6	0.76	0.75	0.09	0.987	4.7	66	1005.9
558426	2	80	AX95	2011	syöttö	17:50	5.5	1.9	0.6	4.6	3.53	3.07	1.74	0.870	4.7	66	1005.9
558426	3	50	AX50	2011	AMKA okt ei sl	17:51	2.8	1.6	0	2.5	2.85	2.32	1.65	0.814	4.7	66	1005.9

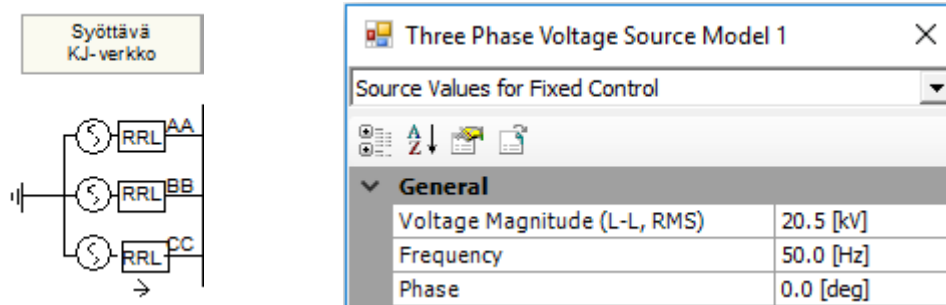
## LIITE B: MUUNTAJAN PJ-LÄHDÖN PSCAD-MALLIN ARVOJEN MÄÄRITYS

### Koko lähtö:



### Syöttävä KJ-verkko:

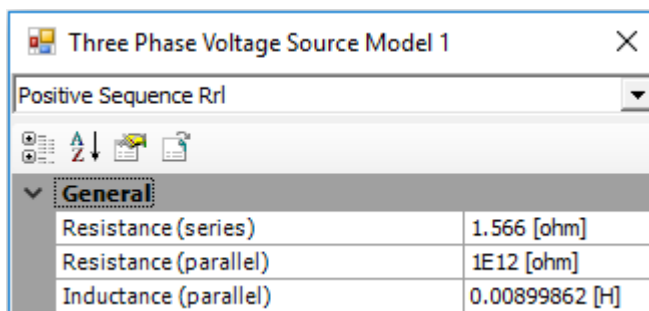
KJ-verkon jännite asetetaan vastaamaan NIS:n muuntajan nimellistä ensijännitettä:



Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssit saadaan suoraan NIS-tehonjakolaskennasta:

```
KJ-OIKOSULKURESISTANSSI (OHM)      : 1.566
KJ-OIKOSULKUREAKTANSSI (OHM)     : 2.827
```

PSCAD:ssa ei ole saatavilla pelkkää R-L-sarjaimpedanssia syöttäville verkolle, joten valitaan R-R/L, jossa on siis resistanssin kanssa sarjassa resistanssin ja induktanssin rinnankytkentä. Asetetaan induktanssin rinnalla oleva resistanssi mahdollisimman suureen arvoon, jolloin se ei vaikuta virtapiiriin.



Induktanssi saadaan laskettua reaktanssista seuraavasti:

$$L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{2,827... \Omega}{2\pi \cdot 50\text{Hz}} = 8,998... \text{mH}$$

### Muuntaja:

Muuntajan tiedot NIS:

Vapaat attribuutit -lista +	Liitteet	Huomautus	Kohdehierarkia	Kunnossapitotiedot	Mittauseriä
Yleistiedot	Tekniset tiedot	Sähköiset tiedot	Sijainti	Vapaat attribuutit	
Mitoitusteho (kVA)	315.000		Väliottokytkin	Asento	5-asentoinen keskellä
Ensiöpuolen mitoitusjännite (V)	20500		Asentojen lukumäärä	Portaan koko (%)	5
Toisiopuolen mitoitusjännite (V)	410		Kytkenryhmä		Dyn11
Laskentajännite (V)					
Kuormitushäviöt (W)	3532				
Oikosulkuresistanssi (%)	1.121				
Oikosulkuimpedanssi (%)	4.550				
Tyhjäkäyntihäviöt P0 (W)	498				
Tyhjäkäyntihäviöt Q0 (var)	0				

Buttons: OK, Hyväksy, Peruuta, Ohje

Muuntajan konfigurointi PSCAD:

Muuntaja  
KJ / PJ

3 Phase 2 Winding Transformer

Configuration

**General**

Transformer Name	T1
3 Phase Transformer MVA	315.0 [kVA]
Base operation frequency	50.0 [Hz]
Winding #1 Type	Delta
Winding #2 Type	Y
Delta Lags or Leads Y	Lags
Positive sequence leakage reactance	0.044096773 [pu]
Ideal Transformer Model	No
No load losses	0.001580952 [pu]
Copper losses	0.011212698 [pu]
Tap changer on winding	None
Graphics Display	3 phase view

Tyhjäkäyntihäviöt (No load losses):

$$p_0 = \frac{P_0}{S_N} = \frac{498\text{W}}{315\text{kVA}} = 0,00158\text{...pu}$$

Kuormitushäviöt (Copper losses):

$$p_k = \frac{P_k}{S_N} = \frac{3532\text{W}}{315\text{kVA}} = 0,01121\text{...pu}$$

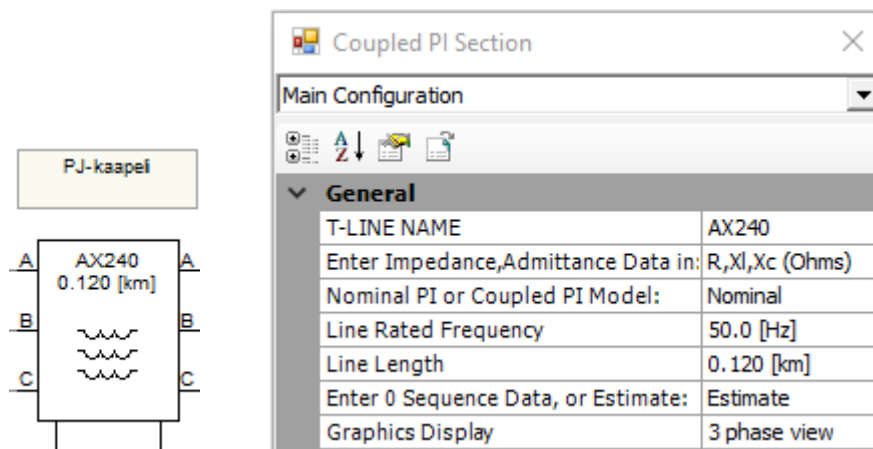
Oikosulkureaktanssi (Positive sequence leakage reactance):

$$z_k^2 = r_k^2 + x_k^2 \rightarrow x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

$$x_k = \sqrt{(0,0455\text{pu})^2 - (0,01121\text{...pu})^2} = 0,04409\text{...pu}$$

### Kaapelit:

Kaapelit mallinnettiin Nominal PI-Sectionilla, jonka konfigurointi osoittautui haasteelliseksi. Paluujohtimelle ei voinut suoraan syöttää impedanssiarvoja, vaan impedanssi saatiin ominaisuudella, jolla arvioitiin nollaverkon arvot (Estimate 0 Sequence Data). PSCAD ei ohjeistanut ominaisuuden käyttöä, eikä pienjänniteverkon nollaverkosta löydetty riittävän selkeää tietoa. Parametri määritettiin kokeilemalla eri arvoja ja mittaamalla milloin paluujohtimen impedanssi on sama kuin vaihejohtimilla, jolloin parametrin arvoksi saatiin 4.



Johdintiedot NIS:

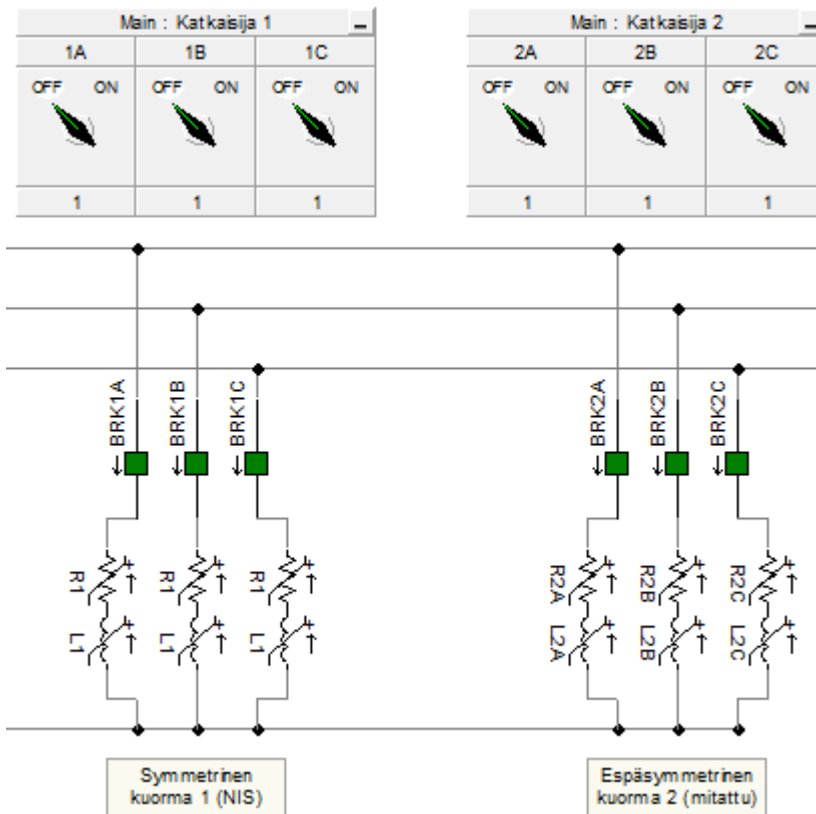
Kuvaus /	V..	Ala ...	Ala0...	Massa ...	A - Johd...	R - Johtora...	E - Eristysa...	r - Vai...	x - Va...	r0 - Vai...	x0 - V...	rn - N...	xn - ...	Bk - K...	I - Suu...
AX240 alkio	3	240	240	2560	alumiini	maakaapeli	PEX(XLPE)	0.130	0.079	0.130	0.079	0.130	0.079	0.000	375

Johdintiedot PSCAD (kapasitanssilla ei vaikutusta):

R, Xl, Xc Data (Ohms)	
<b>Positive Sequence</b>	
+ve Sequence Resistance	0.129999995 [ohm/km]
+ve Sequence Inductive Reactance	0.079000004 [ohm/km]
+ve Sequence Capacitive Reactance	10 [Mohm*km]

### Kuormat:

Kuormitus mallinnettiin kahdella vakioimpedanssikuormalla:



### Symmetrinen kuorma 1 (NIS):

Toinen kuormista on symmetrinen kuormitus, jonka impedanssiarvot saatiin laskettua syöttämällä malliin kolmivaiheteho, vaihevirta ja -jännite. Kun arvot asetettiin vastaamaan NIS-tehonjakolaskennan tuloksia, voitiin tarkistaa mallin vastaavuus NIS:n kanssa.



NIS-tehonjakolaskennan arvot:

$$P_{\max} = 54000\text{kW} \qquad P_v = \frac{P_{\max}}{3} = \frac{54000\text{kW}}{3} = 18000\text{kW}$$

$$I_{\max} = 90\text{A}$$

$$U_v = 237\text{V}$$

Tehokertoimen laskenta:

$$P_v = U_v \cdot I_{\max} \cdot \cos \varphi \rightarrow \cos \varphi = \frac{P_v}{U_v \cdot I_{\max}}$$

$$\cos \varphi = \frac{18000\text{kW}}{237\text{V} \cdot 90\text{A}} = 0,843\dots$$

Resistanssin laskenta:

$$P_v = R I_{\max}^2 \rightarrow R = \frac{P_v}{I_{\max}^2}$$

$$R = \frac{P_v}{I_{\max}^2} = \frac{18000\text{kW}}{(90\text{A})^2} = 2,222\dots\Omega$$

Reaktanssin laskenta:

$$X = \tan \varphi \cdot R = \tan(\cos^{-1} 0,843\dots) \cdot 2,222\dots\Omega = 1,412\dots\Omega$$

Induktanssin laskenta:

$$L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{1,412\dots\Omega}{2\pi \cdot 50\text{Hz}} = 4,497\dots\text{mH}$$

### Epäsymmetrinen kuorma 2 (mitattu):

Toisella kuormalla mallinnettiin epäsymmetristä kuormaa. Kuorman impedanssiarvot laskettiin vaihevirtojen, -jännitteen ja tehokertoimen avulla. Malliin syötettiin mittauksista saadut vaihevirrat ja NIS-tuntitehoista saatu tehokerroin, jolloin voitiin vertailla mitaus- ja simulointituloksia sekä simuloida erilaisia vikatilanteita todellisuutta vastaavissa epäsymmetriatilanteissa.

Mitatut vaihevirrat (L3 heilahtelun keskiarvo):

$$I_{L1} = 22,6\text{A}$$

$$I_{L2} = 29,0\text{A}$$

$$I_{L3} = 20 \dots 25 \text{ A} = \frac{20 + 25}{2} \text{ A} = 22,5\text{A}$$

Tehokerroin NIS-tuntitehoista:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{17,51\text{kW}}{20,29\text{kVA}} = 0,8629 \dots \approx 0,863$$

Resistanssi vaihe 1 *R2A*:

$$R = \frac{P_v}{I_{L1}^2}$$

$$P_v = U_v \cdot I_{L1} \cdot \cos \varphi$$

$$R = \frac{U_v \cdot I_{L1} \cdot \cos \varphi}{I_{L1}^2} = \frac{U_v \cdot \cos \varphi}{I_{L1}} = \frac{237\text{V} \cdot 0,863}{22,6\text{A}} = 9,050 \dots \Omega$$

Induktanssi vaihe 1 *L2A*:

$$X = \tan \varphi \cdot R = \tan(\cos^{-1} 0,863) \cdot 9,050 \dots \Omega = 5,297 \dots \Omega$$

$$L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{5,297 \dots \Omega}{2\pi \cdot 50\text{Hz}} = 16,863 \dots \text{mH}$$

**Koko verkkomalli laskenta- ja mittauskomponentteineen seuraavalla sivulla.**

