

# Protect-DG

## Loppuraportti

Kimmo Kauhaniemi, Lauri Kumpulainen, Amir Farughian, Mike Mekkanen, Aushiq Memon, Omid Palizban, Sampo Voima  
 Vaasan yliopisto

Antti Pinomaa, Anton Poluektov, Aleksei Romanenko, Antti Kosonen, Jero Ahola  
 Lappeenrannan teknillinen yliopisto



Vipuvoimaa  
 EU:lta  
 2014–2020

Tekes

## Tiivistelmä

Hankkeen tavoitteena oli kehittää menetelmiä keskijänniteverkon vianpaikannukseen, tahattoman saarekekäytön estämiseen ja pientuotannon ohjaukseen, erityisesti verkkoon syötettävää signaalia hyödyntäen tai IEC 61850 -standardia soveltaen.

Hanke toteutettiin organisoimalla työ kolmeen työpakettiin. Työpakettissa 1, *Uudet menetelmät ja toiminnot*, kehitettiin uusia menetelmiä keskijänniteverkon vianilmaisuun ja vianpaikannukseen sekä saarekekäytön havaitsemiseen ja LoM-suojaukseen (Loss-of-Mains). Työpakettissa tutkittiin myös pienimuotoisen tuotannon liittämistä sähköverkon hallintajärjestelmiin sekä erilliskysymyksenä IEC 61850 -standardin soveltamista valokaarisuojauksessa. Työpakettissa 2, *Sähköverkkopohjainen tietoliikenne*, tutkittiin ja kehitettiin lähetin- ja vastaanotintekniikoita jatkuvuussignaalille ja vianpaikannussignaalille. Työpakettissa 3 demonstroitiin aiemmissa työpaketeissa kehitettyjä menetelmiä.

Hankkeessa selvitettiin yksivaiheisten maasulkujen paikannuksen tekniikoita, joista lupaavimmat perustuvat hajautettuihin, verkon varrella tapahtuviin mittauksiin perustuviin ratkaisuihin. Erityisesti tutkittiin simulointien avulla menetelmää, jossa vika pystytään indikoimaan kustannustehokkaasti, ainoastaan virtamittauksiin perustuen. Tätä virran vastakomponentin analysointiin perustuvaa menetelmää kehitettiin hankkeessa eteenpäin herkkyuden parantamiseksi ja virheellisten indikointien eliminoimiseksi. Uudesta menetelmästä jätettiin keksintöilmoitus.

Signaalin lähettämiseen ja havaitsemiseen perustuvien menetelmien tutkimus tuotti myös mielenkiintoisia tuloksia, joiden kehittämisessä tuotteiksi on toki vielä matkaa. Uraauurtava tutkimus keskijänniteverkosta signaalintikanavana ohjelmistoradioita signaalintilaitteina hyödyntäen tuotti tietoa, jonka perustalle on hyvä rakentaa jatkotutkimuksia.

Katkeilevan maasulun paikannusta tutkittiin kirjallisuustutkimuksen ja simulointien avulla. Verkon varrella tapahtuviin mittauksiin perustuvat menetelmät näyttävät lupaavimmilta. Alustavasti näyttää siltä, että paikannus onnistuu tukeutuen ainoastaan virtamittauksiin, kunhan näytteenottotaajuus on riittävä.

Hajautetun tuotannon ohjaustekniikan kehittäminen painottui mikrosähköverkkojen ohjaus- ja suojaustekniikan kehittämiseen IEC 61850 -standardia soveltaen. IEC 61850:aa sovellettiin myös valokaarisuojauksessa osoittamalla GOOSE-pohjaisen kommunikaation riittävä suorituskyky valokaarisuojausjärjestelmässä.

LoM-menetelmistä tehtiin kirjallisuusselvitys ja kehitettiin kahta tietoliikenteeseen perustuvaa tekniikkaa: jatkuvuussignaaliin perustuvaa menetelmää sekä IEC 61850 -pohjaiseen siirtolaukaisun perustuvaa menetelmää. 61850-pohjaisesta ratkaisusta toteutettiin demonstraatio, jonka avulla osoitettiin menetelmän periaatteellinen toimivuus. Käytännön toteutus edellyttää kuitenkin vielä huomattavaa kehitystyötä ja tietoturvaan sekä luotettavuuteen liittyviä selvityksiä. Signaalipohjaista ratkaisua lähdettiin kehittämään ohjelmistoradiopohjaisella tekniikalla. Teoreettisten tarkastelujen ja mallinnusten jälkeen toteutettiin myös demonstraatio käytännön jakeluverkossa, minkä avulla osoitettiin kehitetyn signaalintimenetelmän konseptin potentiaali.

## Alkusanat

Tutkimushanke toteutettiin Vaasan yliopiston (VY) ja Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT) rinnakkaisena. Vastuullisina johtajina toimivat Kimmo Kauhaniemi (VY) ja Jero Ahola (LUT). Pääosa rahoituksesta saatiin Tekesin INKA-ohjelmalle (Innovatiiviset kaupungit) tarkoitetusta EAKR-rahoituksesta (Euroopan aluekehitysrahasto). Yritysrahoitus koostui Sähkötutkimuspoolin ja yritysten rahoituksesta. Rahoituksen lisäksi poolin ja yritysten edustajat toivat merkittävän kontribuution projektin ohjaukseen jakamalla asiantuntemustaan ohjausryhmässä ja sen ulkopuolella. Projektin rahoittajat ja rahoittajien edustajat ohjausryhmässä on esitetty alla olevassa taulukossa.

Rahoittaja	Edustaja ohjausryhmässä
Tekes	Juha Lindén → Jarkko Piirto
Adato Energia Oy / Sähkötutkimuspooli	Antero Martimo (ohjausryhmän pj)
Adato Energia Oy / Sähkötutkimuspooli	Jani Valtari
ABB Oy	Petri Hovila
Arcteq Relays Oy	Tero Virtala
Elenia Oy	Markku Viholainen
Emtele Oy	Ville Sallinen
Helen Sähköverkko Oy	Mika Loukkalahti
Vamp Oy	Pekka Hämäläinen → Juha Hirsimäki
LUT	Jero Ahola
Vaasan yliopisto	Kimmo Kauhaniemi

Projektia rahoittivat myös seuraavat yritykset ilman edustajaa ohjausryhmässä: Vaspec Oy, Maviko Oy ja Tekla Oy.

Kiitämme kaikkia projektiin osallistuneita!

Kirjoittajat



Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020

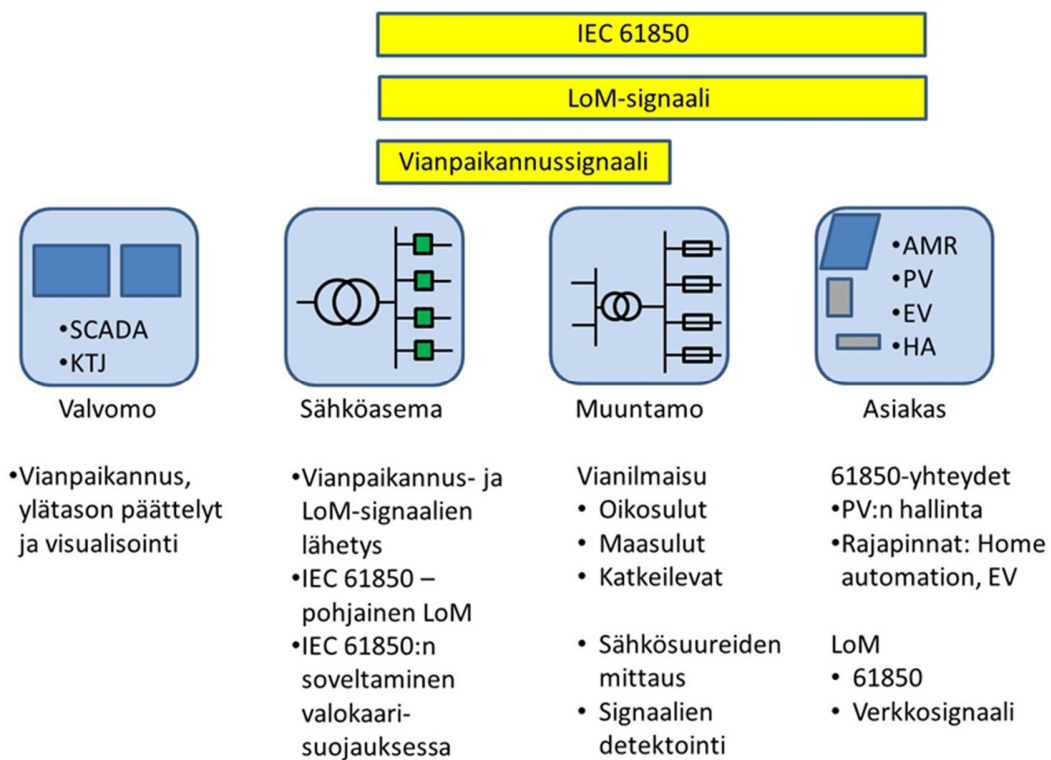
Tekes

## Sisälllys

1	Hankkeen tavoitteet .....	1
2	Hankkeen toteutus.....	3
2.1	Työpaketti 1.....	3
2.2	Työpaketti 2.....	4
2.3	Työpaketti 3.....	4
3	Tulokset.....	5
3.1	Kirjallisuusselvitys maasulun paikannuksen tekniikoista.....	5
3.2	Sensorimittauksiin ja virran vastakomponenttiin perustuva vianpaikannus .....	7
3.3	Signaaliin perustuva vianpaikannus .....	7
3.4	Katkeilevan maasulun paikannus .....	8
3.5	LoM-menetelmien kartoitus ja vertailu .....	8
3.6	Jatkuvuussignaaliin perustuva LoM-suojaus.....	9
3.7	IEC 61850 GOOSE:n avulla toteutettu LoM-suojaus .....	10
3.8	IEC 61850 -standardin mukaisen tietoliikenneyhteyden soveltaminen pientuotannolle .....	10
3.9	Microgrid-verkon säätö ja ohjaus IEC-standardeja soveltaen .....	11
3.10	Selvitys IEC 61850 -tietoliikenteen soveltamisesta valokaarisuojauksessa.....	12
3.11	PLC-tekniikkaan perustuva kommunikaatio LoM-suojauksessa.....	12
3.11.1	Kattava kirjallisuusselvitys olemassa olevista menetelmistä (LoM, jatkuvuussignaali) .....	13
3.11.2	Taajuuskaistat ja lähetystehot sekä jatkuvuussignaalin modulointi.....	13
3.11.3	Lähetintekniikan ja vastaanotintekniikan konseptit .....	15
3.11.4	Jatkuvuussignaalin injektoinnin pilotointi laboratorion sähköverkossa.....	15
3.11.5	Demonstraatio: Sähköverkkosignaalin syöttäminen verkkoon ja sen havaitseminen .....	16
3.12	Yhteenveto tuloksista.....	19
4	Jatkotutkimustarpeet.....	20
5	Raportit ja julkaisut .....	21
6	Lähteitä .....	23

## 1 Hankkeen tavoitteet

Tutkimuksen kohteina olivat sähköverkkoon syötettävän signaalin hyödyntäminen sekä vianpaikannuksessa että LoM-suojauksessa, sekä IEC 61850 -standardin mukaisen tietoliikenteen hyödyntäminen LoM-suojauksessa, pientuotannon ohjauksessa ja valokaarisuojauksessa. Projektin tutkimusalue on havainnollistettu kuvassa 1 ja tutkimuskysymykset kuvassa 2.

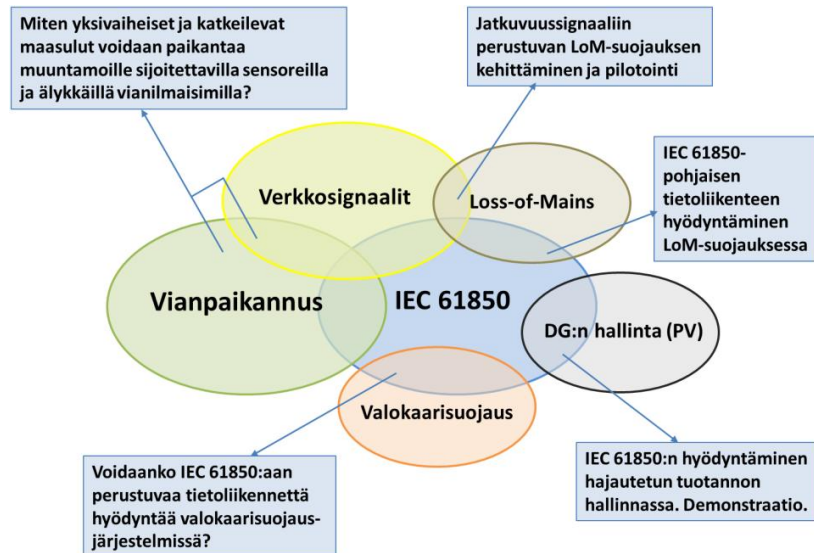


Kuva 1. Tutkimuksen kohdealue.

Projektin konkreettisenä tavoitteena oli kehittää uusia ratkaisuja keskijänniteverkon vikatilanteiden hallintaan, erityisesti maasulkuvikojen paikannukseen ja LoM-suojaukseen, ja verkossa olevien pienten tuotantolaitosten ohjaukseen.

Erityisiä tavoitteita olivat seuraavat:

- Selvittää jatkuvuussignaalin luotettavuudelle asetettavat vaatimukset, esim. jatkuvuussignaalin havaitsemisaika.
- Selvittää mahdollisuus sisällyttää jatkuvuussignaaliin informaatiota esim. jännitteen säätöä, tehon säätöä, loistehon säätöä varten.
- Selvittää aihealuetta koskevat standardit, määräykset ja patentit.
- Selvittää jatkuvuussignaalin käyttäytyminen verkkohäiriöiden aikana ja kehittää ratkaisuvaihtoehtoja mahdollisesti esille nouseviin ongelmiin.
- Selvittää, onko signaalin kulkeutuminen siirtoverkkoon mahdollista ja haitallista.
- Kokonaisjärjestelmän pilotointi todellisessa jakeluverkossa.
- Kehittää uusia vianilmaisun ja vianpaikannuksen tekniikoita, erityisesti verkkosignaaliin perustuvia.
- Vertailla eri tapoja toteuttaa saarekekäytön estosuojaus (LoM-suojaus) jatkokehitystarpeiden määrittämiseksi, mm. jatkuvuussignaaliin perustuva menetelmä ja IEC 61850-kommunikaatioon perustuva menetelmä.
- Kehittää toimivat tekniset ratkaisut jatkuvuussignaaliin perustuvalle LoM-suojaukselle.
- Demonstroida IEC 61850 -standardin käyttöä pientuotannon ohjauksessa.
- Määritellä mikrosähköverkon ja muun verkon välisten suojaus-, ohjaus- ja säätöjärjestelmien liitynnät soveltaen IEC 61850 standardia.
- Tutkia ja kehittää IEC 61850 -standardin hyödyntämistä valokaarisuojauksessa.



Kuva 2. Tutkimuksen alueista nousevat tutkimuskysymykset.

## 2 Hankkeen toteutus

Hanke jaettiin kolmeen työpakettiin, jotka puolestaan jakautuivat useisiin tehtäviin. VY:n tutkimusosuus painottui vikatilanteiden hallintaan, IEC 61850 -pohjaisen tietoliikenteen soveltamiseen ja hajautetun tuotannon hallintaan, kun taas LUT keskittyi kehittämään uutta tekniikkaa sähköverkkoa tiedonsiirtomediaan hyödyntävissä eroonkytkentäsuojus- ja vianpaikannusratkaisuissa. Työpaketeissa 1 ja 2 simuloinnit olivat keskeinen tutkimusmenetelmä, ja työpaketissa 3 päästiin teoreettisilla tarkasteluilla, mallinnuksella ja demonstraatioilla lähemmäs käytäntöön soveltamista.

### 2.1 Työpaketti 1

Työpakettin 1 otsikko oli "Uudet menetelmät ja ratkaisut". Siitä vastuun kantoi VY, ja se painottui seuraaviin kokonaisuuksiin:

- Keskijänniteverkon vianilmaisu ja vianpaikannus
- Saareketilanteen havaitseminen ja tahattoman saarekekäytön estäminen (LoM-suojaus)
- Pienimuotoisen hajautetun tuotannon liittäminen sähköverkon hallintajärjestelmiin erityisesti IEC 61850 -standardia hyödyntäen
- IEC 61850 -standardin soveltaminen valokaarisuojauksessa

Työpaketti jaettiin seuraaviin tehtäviin:

- 1.1 Kirjallisuusselvitys uusimmista maasulun paikannuksen tekniikoista
- 1.2 Sensorimittauksiin perustuvan erityyppisiin keskijänniteverkkoihin soveltuvan paikannusalgoritmin kehitys simulointien avulla
- 1.3 Vikatilanteiden vaikutus verkkoon syötettävässä signaalissa ja sen hyödyntäminen vian paikannuksessa
- 1.4 Katkeilevan maasulun paikannus
- 1.5 Käytössä olevien LoM-menetelmien kartoitus ja suorituskyvyn vertailu
- 1.6 Jatkuvuussignaaliin perustuvan LoM-suojauksen simulointimallin kehittäminen
- 1.7 IEC 61850:aan perustuvan LoM-suojauksen (siirtolaukaisu) tutkiminen
- 1.8 IEC 61850 -standardin mukaisen tietoliikenneyhteyden soveltaminen pientuotannolle – käyttökohteet ja rajoitteet
- 1.9 Microgrid-verkon säätö ja ohjaus IEC standardeja soveltaen
- 1.10 Selvitys IEC 61850 -tietoliikenteen soveltamisesta valokaarisuojauksessa



## 2.2 Työpaketti 2

Työpaketin 2 otsikko oli "Sähköverkkopohjainen tietoliikenne", ja sen toteutti LUT. Työpaketissa tutkittiin ja kehitettiin lähetin- ja vastaanotintekniikoita sähköverkkoon syötettävälle jatkuvuussignaalille ja vianpaikannussignaalille.

Työpaketti jaettiin seuraaviin tehtäviin:

- 2.1 Kattava kirjallisuusselvitys tutkituista olemassa olevista menetelmistä
- 2.2 Taajuuskaistat ja lähetystehot
- 2.3 Jatkuvuussignaalin modulointi
- 2.4 Lähetintekniikan ja vastaanotintekniikan konseptit, sekä jatkuvuussignaali että vianpaikannussignaali

## 2.3 Työpaketti 3

Työpaketti 3 keskittyi demonstraatioihin, ja siihen kuuluivat seuraavat tehtävät:

- 3.1 IEC 61850 tietoliikenneyhteyttä hyödyntävien uusien toimintojen ja toteutettavien demonstraatioiden suunnittelu sekä järjestelmien konfigurointi laboratorioon
- 3.2 Jatkuvuussignaalin injektoinnin pilotointi laboratorion sähköverkossa
- 3.3 Demonstraatio - sähköverkkosignaalin syöttäminen verkkoon ja signaalin havaitseminen
- 3.4 Pientuotantolaitoksen ohjauksen ja siirtolaukaisun demonstrointi IEC 61850 -pohjaisella tietoliikenneyhteydellä
- 3.5 IEC 61850 -standardin mukaisen tietoliikenteen soveltaminen valokaarisuojauksessa ja sen demonstrointi laboratorioympäristössä



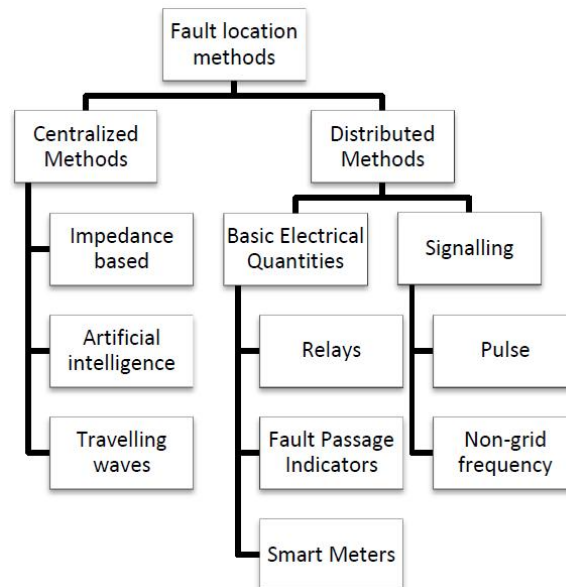
### 3 Tulokset

#### 3.1 Kirjallisuusselvitys maasulun paikannuksen tekniikoista

Maasulun paikannuksen tekniikan nykytila selvitettiin kahdessa kirjallisuustutkimuksessa, Ilmari Mäntysalon kandidaatintutkielmassa sekä Amir Farughianin tutkimuksessa, joka on toimitettu julkaistavaksi tieteellisessä julkaisussa. Mäntysalon selvityksen päätulos on käytössä olevien menetelmien esittelyn ohella tiivistetysti se, että maasulun paikannus on edelleenkin hankalaa. Universaalia, kaikissa maasulku-tilanteissa toimivaa menetelmää ei ole vielä saatu kehitetyksi. Tietoliikenne tulee olemaan suuressa roolissa tulevaisuuden sähköverkoissa ja sitä voidaan hyödyntää myös maasulkujen paikannuksessa.

Keskijänniteverkon vianpaikannusmenetelmät voidaan luokitella kuvan 3 mukaisesti ja käytännön toteutuksen kannalta voidaan menetelmien vertailussa keskittyä neljään eri menetelmään, jotka ovat:

- impedanssin mittaukseen perustuvat menetelmät (Impedance based)
- kulkuaaltomenetelmät (Travelling waves)
- virran injektointiin perustuvat menetelmät (Injection)
- kommunikoivia vianpaikannuslaitteita hyödyntävät menetelmät (IED/FPI)



Kuva 3. Keskijänniteverkon vianpaikannusmenetelmien luokittelu.

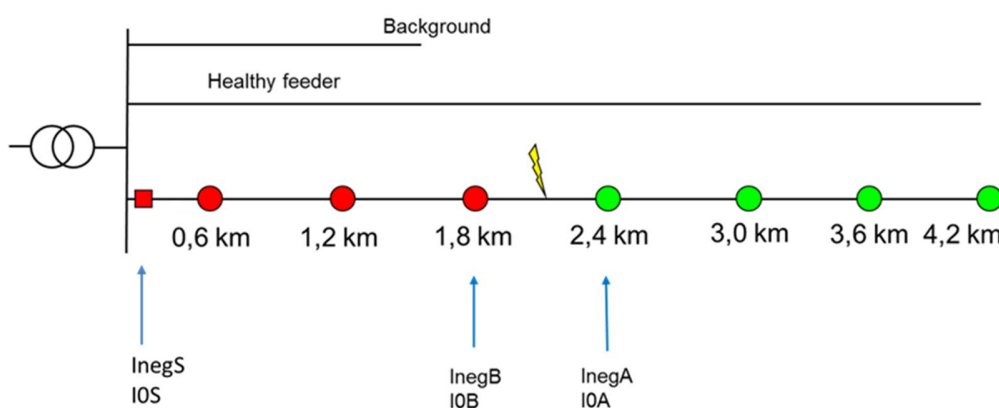
Näitä koskevan analyysin yhteenveto on esitetty taulukossa 1. Kun otetaan huomioon älyverkkoteknologian kehitys, lupaavimmalta tekniikalta yksivaiheisen maasulun paikannukseen näyttää tällä hetkellä hajautettu, kommunikoiviin vianpaikannuslaitteisiin perustuva ratkaisu.

Taulukko 1. Vianpaikannusmenetelmien vertailu.

Method	Impedance based	Travelling wave	Injection	IED/FPI
Main advantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple implementation</li> <li>• Cost effective</li> </ul>	Theoretical accuracy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verified in practice</li> <li>• Only current measurements required along the feeders</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verified functionality</li> <li>• High sensitivity</li> <li>• Supported by smart grid development</li> </ul>
Main drawbacks	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No convincing verification in compensated networks</li> <li>• Limited sensitivity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Branches</li> <li>• Very limited experience in distribution networks</li> <li>• Questionable sensitivity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requires a transmitter</li> <li>• Requires IEDs along the feeders</li> <li>• A number of practical limitations</li> <li>• Accurate fault location must be found out by other means</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requires IEDs along the feeders</li> <li>• Accurate fault location must be found out by other means</li> <li>• At least most implementations require costly measurements</li> </ul>
Applicable in compensated networks	No	Yes	Yes	Yes
Applicable in isolated neutral networks	Yes	Yes	No	Yes
Verified by field tests	Partly	Not in distribution networks	Yes	Yes
Highlighted requirements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requires measurement accuracy</li> <li>• Network data</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costly injection devices</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Injection device at the primary substation</li> <li>• Current sensors</li> <li>• Communication</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEDs along the feeder</li> <li>• At least current sensors</li> <li>• Communication</li> </ul>
Outlook	After a number of unsatisfactory approaches the prospect is not good	Worth further investigations	Applicable in compensated networks	Along with the development of smart grids, these type of methods will be more common

### 3.2 Sensorimittauksiin ja virran vastakomponenttiin perustuva vianpaikannus

Tutkimuksessa selvitettiin kirjallisuuslähteisiin ja sijaiskytkennän tarkasteluun perustuen teoreettinen perusta virran vastakomponenttiin perustuvalla maasulun paikannukselle. Menetelmän pääperiaate on yksinkertaistetusti seuraava: Vian aikana virran vastakomponentti on huomattavasti suurempi sähköaseman ja vikapaikan välillä kuin vikapaikan takana (kuva 4). Vastakomponentti voidaan määrittää vaihevirtojen mittauksen avulla.



Kuva 4. Virran vastakomponentin määrittämiseen perustuvan vianpaikannuksen periaate.

Menetelmän toimintaa tarkasteltiin simulointien avulla. Havaittiin, että perusmenetelmä toimii varsin hyvin. Rajoituksena on kuitenkin haastavuus kynnsarvon valinnassa. Jos valitaan korkeahko kynnsarvo, suuriresistanssisia vikoja ei pystytä indikoimaan. Matala kynnsarvo voi puolestaan johtaa virheelliseen indikointiin. Tutkimuksessa kehitettiin yllä mainittuun ongelmaan ratkaisu, josta tehtiin keksintöilmoitus.

Perusmenetelmän toiminnasta on saatu erittäin lupaavia tuloksia projektin rahoittajien järjestämissä kenttäkokeissa. Hajautettujen menetelmien soveltaminen edellyttää luonnollisesti kehittyneitä tietoliikennetyökaluja, älykkäitä laitteita ja tarkoituksenmukaisia sensoreita.

### 3.3 Signaaliin perustuva vianpaikannus

Sähköverkkosignaaliin perustuvaa signaalia on sovellettu maasulun paikannuksessa mm. Eberlen vanhassa pulssimenetelmässä [Druml et al. 2012]. Tämä menetelmä sisältää kuitenkin useita rajoitteita, joista merkittävimpiä ovat toimivuuden rajoittuminen pieniresistanssisiin vikoihin sekä se, että vian tu-

lee kestää vähintään 25 s. Uudempi, suurivirtainen menetelmä on kuitenkin kehitetty ja testattu kenttäolosuhteissa, ja sillä on päästy 400  $\Omega$  vikoihin asti [Druml et al. 2013].

Tutkimuksessa tarkasteltiin simulointien avulla mahdollisuutta hyödyntää verkkoon syötettävää matalataajuisia signaalia, joka voidaan havaita sähköaseman ja vikapaikan välillä vaihevirrasta. Tutkitut taajuuDET olivat 168, 336, 672 ja 1008 Hz. Menetelmä ei osoittautunut yleispäteväksi ratkaisuksi, koska se näyttää soveltuvan vain pieniresistanssisille vioille. Lisäksi tarvittava suodatus aiheuttaa viivettä luotettavalle indikoinnille. Kaupunkien suppeat kaapeliverkot, joissa vikaresistanssit ovat pääsääntöisesti pieniä, ovat kuitenkin mahdollinen menetelmän soveltamisalue.

Toisena signalointitekniikkana vianpaikannuksessa tutkittiin korkeamman taajuuskaistan hyödyntämistä ohjelmistoradioita käyttäen signaloinnin generoinnissa, lähettämisessä sekä vastaanottamisessa. Signalointia arvioitiin BER (bit-error ratio) ja SNR (signal-to-noise ratio) analysointien avulla. Menetelmä edellyttää sähköasemalla olevan lähettimen lisäksi toistimien lisäämistä verkkoon jokaiselle muuntamolle. Tällöin vianpaikannuksessa saavutettava tarkkuus on muuntamoiden väli. Menetelmää tutkittiin sekä teoreettisen mallinnukseen, laboratorioskokeiden että alustavien kenttäkokeiden avulla. Vaikka kenttäkokeissa kohdattiin ongelmia, jatkotutkimukset ovat perusteltuja mm. siksi, että samaa signalointia voitaisiin ehkä hyödyntää sekä vianpaikannuksessa että LoM-suojauksessa.

### 3.4 Katkeilevan maasulun paikannus

Kaapeloinnin ja maasulkuvirran kompensoinnin yleistyessä katkeilevasta maasulusta on tullut keskijänniteverkkojen merkittävä ongelma. Ratkaisut johtolähtökohtaiseen selektiiviseen suojaukseen ovat olemassa. Sen sijaan katkeilevan maasulun paikannukseen ei näytä olevan tarjolla kustannustehokasta ratkaisua.

Tutkimuksessa simuloitiin katkeilevia maasulkuja ja tarkasteltiin mahdollisuuksia paikallistaa ne verkon varrella toteutettavien virtamittausten perusteella, samankaltaisella ratkaisulla kuin edellä kuvatussa pysyvän maasulun paikannuksessa. Tämä näyttää mahdolliselta mutta edellyttää kuitenkin suurta näytteenottotaajuutta ja varsinaisen paikannusalgoritmin kehittämistä, mikä jää jatkotutkimuksiin.

### 3.5 LoM-menetelmien kartoitus ja vertailu

Rinta-Luoman tutkimuksen [2015] tarkoituksena oli vertailla eri menetelmien ominaisuuksia ja arvioida, millä menetelmällä olisi potentiaalia kehittyä yleispäteväksi tekniikaksi. Menetelmien vertailua vaikeutti se, että vain harvoja niistä oli kenttätestattu todellisessa sähköverkossa. Suurin osa tutkimuksista perustuu vain tyyppillisen saareketilanteen simulointeihin, joissa ei käsitelty menetelmien toimintaa vikatilanteiden aikana.

Käyttökelpoisiksi vaihtoehtoisiksi arvioitiin kehittyneet passiiviset menetelmät, PLC-tekniikkaan perustuvat menetelmät sekä erilliseen tietoliikenneyhteyteen perustuvat menetelmät, joista erityisesti IEC 61850 -standardiin perustuva tekniikka lienee mielenkiintoinen tulevaisuuden vaihtoehto. Menetelmien kehitystarpeet on arvioitu taulukossa 2.

Taulukko 2. Arvio LoM-menetelmien kehitystarpeista

Menetelmä	Kehitystarpeet
Kehittynyt passiivinen menetelmä	Algoritmien toimintavarmuuden varmistaminen eri tilanteissa kenttäkokeiden avulla
PLC-tekniikkaan perustuva menetelmä	Laajamittaiseen käyttöön soveltuvan lähetystaajuuden ja -tekniikan löytäminen
Erilliseen tietoliikenneyhteyteen perustuva menetelmä	Tietoliikennestandardien ja -yhteyksien kehittyminen

### 3.6 Jatkuvuussignaaliin perustuva LoM-suojaus

PLC-pohjaista jatkuvuussignaalia hyödyntävää LoM-menetelmää tutkittiin simulointien avulla [Voima 2016]. Simulointien perusteella voidaan arvioida, että tarvittava syöttöteho matalataajuisessa (168 – 1008 Hz) signaalissa ei muodosta estettä menetelmän soveltamiselle. Analyysi resonanssitaajuuksista on suositeltava ennen taajuuden valintaa. Normaali-tilanteessa signaali etenee verkossa hyvin, mutta vikatilanteissa erityisesti matalien taajuuksien amplitudi putoaa selvästi ainakin silloin, jos signaalia ei vahvisteta jännitekuoppien aikana.

Tutkimuksen perusteella on arvioitavissa, että PLC-pohjainen LoM-ratkaisu voi ehkäistä tarpeettomia laukaisuja (nuisance tripping) mutta toimia myös vikojen aikana. Hyvin toteutettuna se tarjoaa selektiivisen suojauksen ja täyttää fault-ride-through -vaatimukset erottaen jännitekuoppatilanteet saareketilanteista. Simulointitutkimusten jatkoksi tarvitaan kuitenkin vielä lähetin- ja vastaanotintekniikan kehittäminen sekä kenttäkokeet menetelmän toiminnan osoittamiseksi.

Ohjelmistoradiotekniikka saattaa tulevaisuudessa tarjota tietoliikennetarkaisun jatkuvuussignaaliin perustuvan LoM-järjestelmään. Tämän teknologian soveltaminen edellyttää kuitenkin jatkotutkimuksia.

### 3.7 IEC 61850 GOOSE:n avulla toteutettu LoM-suojaus

Hajautetun tuotannon suojausta on käsitelty laajasti CIRED:n ja CIGRE:n yhteistyöryhmän raportissa [2015], jossa tietoliikenteeseen perustuvan suojauksen rooli tulevaisuuden älykkäissä sähköverkoissa on noussut vahvasti esille. Tärkeässä osassa on myös LoM-suojaus. Raportin mukaan tulevaisuuden trendi on tavalla tai toisella tietoliikenteen hyödyntäminen luotettavan LoM-suojauksen toteutuksessa.

Hajautetun tuotannon mallinnukseen kehitetty IEC 61850-7-420 -laajennus kuvaa tuotantolaitosten ominaisuuksia alkuperäistä standardia tarkemmin. Lisäosa tarjoaa joukon uusia loogisia solmuja mallintamaan moottorivoimalaitosten, polttokennojen, aurinkosähköjärjestelmien ja CHP-laitosten toimintaa. IEC 61850:aan perustuva tietoliikenne voinee mahdollistaa kehittyneen LoM-suojauksen toteuttamisen. Menetelmien käyttöönotto vaatii kuitenkin tarvittavat tietoliikenneyhteydet ja sopivan rajapinnan tuotantoyksiköiden laitteiden kanssa. Rinta-Luoman raportti [2015] esittelee lyhyesti muutamia jo toteutettuja demonstraatioita.

Tutkimuksessa demonstroitettiin mikrokontrolleriin (BeagleBone) perustuva kevyt (light-weight) IEC 61850 -pohjainen LoM-ratkaisu (siirtolaukaisu) laboratorioympäristössä käyttäen kahta eri tietoliikennetoteutusta. Demonstraatioissa hyödynnettiin loogisia solmuja hyödyntävää standardin laajennusta IEC 61850-7-420. Ensimmäisessä demonstraatioissa käytettiin GOOSE-viestejä ja kiinteää Ethernet-yhteyttä. Toinen demonstraatio kehitettiin langatonta tietoliikennettä ja MMS-protokollaa hyödyntäväksi, mutta käytöllä tekniikalla (GSM yhteyksillä toimiva yksityinen ns. APN verkko) kiertoviiveet (round-trip-time) venyivät varsin pitkiksi. Voidaan kuitenkin arvioida, että laukaisuajat olisivat lopullisessa toteutuksessa verkkoonliityntästandardin rajoissa, etenkin kun sitä on juuri huomattavasti väljennetty (0,15 s → 5 s). Tässä yhteydessä on huomattava, että näin pitkät laukaisuajat eivät ole pikajälleenkytkennän (PJK) kanssa yhteensopivia.

### 3.8 IEC 61850 -standardin mukaisen tietoliikenneyhteyden soveltaminen pientuotannolle

Siirtolaukaisun lisäksi tietoliikenteen kehittyminen sähköverkoissa mahdollistaa joukon uusia toimintoja verkon stabiiliuden ja toimitusvarmuuden parantamiseksi. Näihin voidaan lukea mm. adaptiivinen suojaus, verkon itsekorjautuvuus, päto- ja loistehon säätö sekä verkon tukeminen jännitekuoppien (LVRT: Low Voltage Ride-Through) aikana. Uusien ominaisuuksien synergiaetujen vuoksi niiden kehittämisessä olisi tärkeä pystyä tarkastelemaan toimintoja kokonaisuutena niin hallinnan kuin vastuun ja kustannustenkin osalta. Lähitulevaisuudessa näihin verkon vakautta parantaviin toimintoihin liittyvä standardointi nousee myös erittäin ajankohtaiseksi [Yang et al. 2015].

Suuren osan hajautetusta tuotannosta ollessa invertteriliitettyjä kommunikaation järjestäminen tuotantolaitokselle juuri inverttereiden välityksellä voisi olla varteenotettava vaihtoehto. Tällaisen menetelmän



hyödyntäminen esim. LoM-suojaukseen ei Suomessa ole kuitenkaan nyky säädösten puitteissa mahdollista, koska pientuotantolaitoksilta vaaditaan fyysinen erotus vikatilanteissa (SFS-EN 50438).

Yhdysvalloista löytyy jo kaupallisia tuotteita inverttereistä, jotka pystyvät tuottamaan lisäpalveluita tietoliikenne yhteyttä hyödyntäen. Saksassa LVRT-ominaisuus vaaditaan suur- ja keskijänniteverkkoihin liitetyiltä tuotantolaitoksilta ja Italiassa kaikilta yli 6 kW laitoksilta. Lisäpalveluiden tuottamisen ja adaptiivisen suojauksen lisäksi tietoliikenne mahdollistaa uusien vianpaikannusmenetelmien sekä itsekorjautuvien (self-healing) verkkojen kehittämisen.

Hankkeen puitteissa ei ollut mahdollista toteuttaa hajautetun tuotannon ohjaukseen liittyvää demonstraatiota, mutta kehitettyyn kevyeen IED-alustaan toteutettiin joukko tarvittavia loogisia solmuja (LN). Nämä perustuvat standardin laajennukseen IEC 61850-7-420 ja mahdollistavat jatkossa erilaisten säätö- ja ohjaustoimintojen kokeilemisen laboratorioympäristössä. Kenttäkokeet todellisissa tuotantolaitoksissa edellyttävät kuitenkin vielä jatkokehitystä mm. sopivien rajapintojen toteuttamiseksi.

### 3.9 Microgrid-verkon säätö ja ohjaus IEC-standardeja soveltaen

Microgrid-verkko eli mikrosähköverkko on erilaisten säätö ja ohjausfunktioiden osalta monimutkainen kokonaisuus. Lisähaastetta tuo se että mikrosähköverkolla on kaksi eri toimintatilaa. Se voi toimia sekä kantaverkkoon kytkeytyneenä että itsenäisenä saarekkeena. Sähkön tuotanto mikrosähköverkossa toteutetaan pääosin invertteriliitännäisillä hajautetun tuotannon yksiköillä. Keskeisessä roolissa ovat myös akkupohjaiset energiavarastot, jotka ovat niinkään invertteriliitännäisiä.

Hankkeessa selvitettiin mahdollisuuksia IEC 61850:n hyödyntämiseen erityisesti mikrosähköverkon tehon hallintaan. Mikrosähköverkon toimiessa verkkoon liittyneenä, toimivat tuotantoyksiköt säätäen päto- ja loistehoa siten että tavoitteena on haluttu tehonsiirto kantaverkon suuntaan. Saarekkeena toimittuessa tavoitteena on jännitteen ja taajuuden ylläpitäminen. Onnistuneen säätöratkaisun toteutus edellyttää laajamittaista tiedonsiirtoa mikrosähköverkon eri tuotantoyksiköiden ja energiavarastojen sekä kantaverkon liityntäpisteen välillä. Säätöä voidaan tarkastella hierarkkisenä mallina, jota on aiemmin tutkittu VY:llä eri hankkeissa. Siinä säätö on jaettavissa eri tasoihin, joilla on selkeästi määritellyt tavoitteet. Alimman tason muodostaa primäärisäätö, joka on käytännössä esim. invertteriliitännäisen tuotantoyksikön yhteydessä. Primäärisäätö voisi hyödyntää IEC 61850 prosessiväylää jännitteiden ja virtojen mittaukseen. Laajamittaisemmin IEC 61850 tietoliikenne on kuitenkin hyödynnettävissä sekundaari- ja tertiäärisäädöissä, joissa tietoa mittauksista ja mm. katkaisijoiden tiloista on vaihdettava mikrosähköverkon eri osien välillä. Lisäksi eräs haasteellinen tilanne on mikrosähköverkon synkronointi taikaisin muuhun verkkoon, jossa kaikkia mikrosähköverkon tuotantoyksiköitä on ohjattava niin että kytkentä liityntäpisteessä on mahdollinen.



### 3.10 Selvitys IEC 61850 -tietoliikenteen soveltamisesta valokaarisuojauksessa

Selvityksessä todettiin IEC 61850 GOOSE -pohjaisen tietoliikenne ratkaisun eduiksi seuraavat

- Järjestelmän kommunikaatio perustuu standardiin
- Kuten 61850-sovelluksissa yleisesti, tarvitaan vain vähän kaapelointia
- GOOSE-viestejä voidaan priorisoida ja valvoa, mikä helpottaa järjestelmän itsevalvontaa
- Fyysisesti laajat järjestelmät ovat mahdollisia, koska I/O-yksiköt toimivat signaalia toistavina Ethernet-kytkiminä
- Keskusyksikkö ei ole välttämätön
- Järjestelmä mahdollistaa selektiivisen suojauksen

Kehitetystä demonstraatiosta todellisilla laitteilla suoritetut mittaukset osoittivat, että fyysisesti erilliseen verkkoon pohjautuvalla järjestelmällä on mahdollista saavuttaa valokaarisuojajärjestelmästä vaadittava suorituskyky. Fyysinen erotus edistää myös kyberturvallisuutta.

### 3.11 PLC-tekniikkaan perustuva kommunikaatio LoM-suojauksessa

LUT:lla tutkittiin PLC-pohjaista jatkuvuus signaalointiin pohjautuvaa LoM-suojauskonseptia korkeammilla taajuuksilla (100 – 500 kHz). Tavoitteena oli määrittää signaalointikonsepti sähköasemalta keskijänniteverkkoon ja sen muuntajien läpi pienjänniteverkkoon asiakkaille. Signaalin lähettämisen ja vastaanottamisen tutkimisessa ja toteutuksessa fyysisenä laitteistona käytettiin ohjelmistoradioita. Ohjelmistoradio on joustava ja skaalautuva alusta, se koostuu FPGA-pohjaisesta piiristä, jota ohjataan radioon kytketyllä PC:llä, missä itse ohjelmistoradion toiminnallisuutta ajetaan ja ohjataan. Järjestelmällä voidaan ohjelmallisesti asettaa radion signaalointitaajuus ja modulaatiotekniikka sekä algoritmit, joilla haluttu toiminnallisuus toteutetaan. Samalla voidaan määrittää testattavien parametrien soveltuvuutta jatkuvuus signaaliin pohjautuvaa LoM-suojaukselle. LoM-suojaukselle asetettu viivevaatimus; <300-400 ms [Ropp et. al., 2000] toimi yhtenä reunaehtona määritettäessä parametreja PLC-pohjaiselle LoM-suojauskonseptille. Tutkimuksessa mallinnettiin sähköverkkokanavaa, määritettiin fyysisten reunaehtojen rajoissa signaaloinnille soveltuva taajuuskaista, ja testattiin sekä laboratorioissa että kenttäkokeissa jatkuvuus signaalointia eri parametreilla. Kenttäkokeita varten rakennettiin tarvittavat suodatinkomponentit signaaloinnin parantamiseksi ja itse ohjelmistoradioiden suojaamiseksi. Lisäksi vastaanottimen vahvistin rakennettiin. Eichhoff Kondensatoren -yritykseltä Saksasta hankittiin kaupalliset induktiiviset kytkentärajapinnat. Lähettimen vahvistimena käytettiin kaupallista laajakaistaista vahvistinta. Kenttätestejä ehditään aloitella, mutta tutkittavaa jäi myös hankkeen jälkeen.

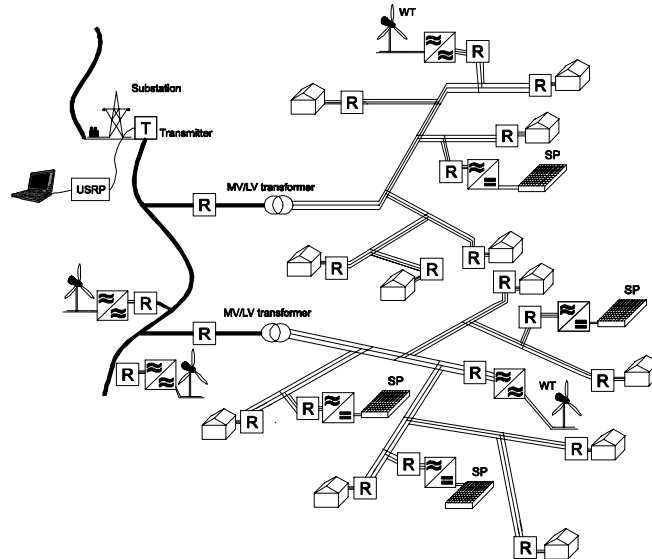
### 3.11.1 Kattava kirjallisuusselvitys olemassa olevista menetelmistä (LoM, jatkuvuussignaali)

Olemassa olevista LoM- ja jatkuvuussignaalin menetelmistä tehtiin kattava kirjallisuusselvitys [Poluektov, 2016a, 2016b., 2017]. Selvityksessä luokiteltiin passiiviset, aktiiviset ja tiedonsiirtoon pohjautuvat suojausmenetelmät etuineen ja heikkouksineen. Tiedonsiirtopohjaiset menetelmät, nimensä mukaisesti käyttävät tietoliikennettä LoM-suojaukseen, ja ne voidaan implementoida käyttäen mm. langattomia (operaattorin hallitsemaa 3/4G-mobiiliverkkoa, Wifiä, Bluetooth, jne.) tai sähköverkkotiedonsiirtoa. Tiedonsiirtoon ja PLC-tekniikkaan pohjautuvissa menetelmissä etuina verrattuna passiivisiin ja aktiivisiin ovat pienempi non-detection zone (NDZ) eli korkeampi tarkkuus LoM-tilanteiden tunnistamiseen ja pienempi viive, sekä sähköverkon hyödyntäminen kanavana; ei tarvita dedikoitua erillistä tiedonsiirtokanavaa. Huonoina puolina verrattuna passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin ovat kompleksisempi toteutus ja sen tuomana LoM-suojausjärjestelmän investointikustannukset ovat korkeammat.

LUT:n osuudessa keskityttiin tiedonsiirto- ja PLC-pohjaisiin menetelmiin ja määriteltiin, mitä uutuusarvoa esitelty ohjelmistoradio- ja PLC-pohjainen konsepti tuo näihin. Ohjelmistoradio on skaalautuva ja joustava alusta eri tiedonsiirtotekniikoiden implementointiin ja testaamiseen samalla alustalla. Samalla se tarjoaa mahdollisuuden kehittää LoM-suojausmenetelmän algoritmeja eri toiminnallisuuksien toteutukseen.

### 3.11.2 Taajuuskaistat ja lähetystehot sekä jatkuvuussignaalin modulointi

Kirjallisuusselvitysten kautta tutkittiin soveltuvat taajuuskaistat ja sallitut lähetystehot, sekä otettiin huomioon ympäristö; sähköverkko signaloinnin kanavana (sekä KJ- että PJ-verkot) [Poluektov, 2016; Pinomaa, 2016]. Osatehtävässä suunniteltiin ja määritettiin ensin sähköverkon tyypillisten topologioiden ja ominaisuuksien perusteella konsepti sähköverkkotiedonsiirtopohjaiselle LoM-suojaukselle. Jatkuvuussignaalin konseptissa sähköasemalle asennetaan lähetin, ja vastaanottimet asiakkaille ja hajautetun tuotannon laitoksille PJ-verkossa. Signaalin taajuusalue valittiin siten, että se läpäisisi 20/0.4 kV muuntajat. Myös sallitut lähetystehot eri taajuuskaistoilla otettiin huomioon konseptin määrittämisessä. Laboratoriossa testattiin eri taajuuksia ja kyseisten signaalien kyky mennä muuntajasta läpi mahdollisimman pienellä vaimennuksella [Poluektov, 2016; Pinomaa, 2016]. Havainnekuva konseptista on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Sähköverkkotiedonsiirtopohjainen LoM-konsepti sähköasemalta, KJ- ja PJ-verkkojen kautta suojattaville kohteille; asiakkaille ja hajautetun tuotannon laitoksille [Poluektov, 2016].

Näiden ja ohjelmistoradioiden fyysisten reunaehtojen ja skaalautuvuuden rajoitteiden sekä laboratorion testialustan sähköverkkokanavan ominaisuuksien perusteella valittiin tutkittavaksi taajuuskaistaksi 100-500 kHz. Kyseisellä taajuuskaistalla signaalin vaimennus muuntajan läpi on matalin [Poluektov 2016; Pinomaa, 2016]. PLC-pohjainen LoM-konsepti perustui hypoteesiin, että signaali läpäisee muuntajan ja pystytään sen jälkeen vielä havaitsemaan pienjännitepuolella olevalla vastaanottimella ilman välissä tapahtuvaa signaalin vahvistamista.

Taajuusalueen valinnan jälkeen määritettiin sähköverkkokanavan ominaisuuksien (kohina kanavassa, KJ-verkon rakenne; pitkät etäisyydet ja haarat) perusteella soveltuvat signaalin modulointitavat. Tehtyjen tutkimusten ja testien, sekä kirjallisuusselvitysten perusteella päädyttiin laajakaistaiseen ja monikantaaliseen Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) -modulaatiotekniikkaan, sekä Direct sequence spread spectrum (DSSS) -hajasppektritekniikkaan.

OFDM:n etuna on hyvä häiriöiden sieto. Vastaavasti DSSS:n etuna on robustneisuus; signaali, jonka signaali-kohina -suhde (signal-to-noise ratio (SNR)) on negatiivinen, voidaan vielä havaita vastaanottimella. Eli DSSS tarjoaa paremman herkkyuden signaloinnin detektointiin.

Ohjelmistoradio tarjoaa hyvän alustan tutkia useita modulaatiotekniikoita ja niissä eri parametrien vaikutusta signaloinnin suorituskykyyn. Ohjelmistoalustana käytettiin LabVIEW-ohjelmaa asennettuna PC:ille, ja näiden kautta ohjattiin ohjelmistoradioita 1 Gbps Ethernet-yhteyden yli.

### 3.11.3 Lähetintekniikan ja vastaanotintekniikan konseptit

Edellisessä osatehtävässä tehtyjen määritysten ja valintojen pohjalta määritettiin kolme lähetin-vastaanotin-LoM-suojaus -konseptia. Jokaisen toiminta verifioitiin ja testattiin LUT:n laboratoriossa:

1. Signalointi yhdellä kantoaaltotaajuudella ilman tiedonsiirtoa ja vastaanottopäässä signaloititason detektointi samalla taajuudella. Tämän menetelmän etuna on yksinkertainen toteutus, mutta heikkoutena virhetulkinnat ja verkossa mahdollisesti esiintyvä kapeakaistainen ja impulsiivinen kohina samalla kantoaaltosignaallilla. Lisäksi signaali on oltava eroteltavissa, eli sen amplitudin on oltava kohinaa korkeampi vastaanottopäässä.
2. Signalointi tiedonsiirrolla; OFDM-modulaatio- ja DSSS-hajaspektritekniikan lähetin-vastaanottoparit, jossa lähetin koodaa dataa signaaliin, ja jonka vastaanotin purkaa vastaanotetusta signaalista. LoM-suojaus vastaanotetun datan perusteella. Antaa myös mahdollisuuden lähettää grid-dataa suojattaville hajautetun tuotannon laitoksille ja asiakkaiden päätelaitteille.
3. Vianpaikkannustoiminnallisuus lisättyä edelliseen; Datan mukaan lisätty paikkatieto, mistä signaali on lähetetty, ja näiden perusteella päättylyt verkon tilasta sekä vianpaikannus (muuntamoiden välisellä tarkkuudella) dedikoitujen algoritmien perusteella; mitä lähetintä ei kuulu ja mitkä kuuluvat. Vaatii signaloitilaitteet; lähetin-vastaanottimen verkon jokaiselle muuntamolle, jossa myös signaalin toistaminen.

### 3.11.4 Jatkuvuussignaalin injektoinnin pilotointi laboratorion sähköverkossa

LUT:n laboratoriossa tutkittiin jatkuvuussignaalin injektointia sekä detektointia laboratorioon rakennetussa sähköverkossa. LUT sai Lappeenrannan Energialta käyttöön 20/0,4 kV jakelumuuntajan, jonka läpi ja yli testattiin signaaliin kulkeutumista ja vastaanottoa. Ensimmäinen tutkittava asia oli, voidaanko konseptissa signaloida muuntajan läpi siten, että signaali on vielä havaittavissa muuntajan toisiosion jälkeen vastaanottimella. Samalla tutkittiin ja määritettiin sopiva taajuusalue, jolla muuntajan aiheuttaman vaimennus signaaliin on mahdollisimman alhainen. Tutkittavaksi taajuusalueeksi vahvistui konseptin määrittämisessä valikoitu 100-500 kHz. Muuntajalle tehtiin myös tuloimpedanssimittausten pohjalta simulointimalli taajuuden funktiona [Pinomaa, 2016].

Saksalaiselta valmistajalta hankittiin kaupalliset induktiiviset kytkentärajapinnat ja saatiin tietoa kyseiselle taajuusalueelle sopivista oheiskomponenteista; suodattimista ja vastaanottimen vahvistimesta. Lähetin vahvistimena käytettiin LUT:lla olevaa laajakaistaista vahvistinta. Alla päätulokset:

- Muuntajan läpi voidaan signaloida laboratorioverkossa kyseisellä taajuusalueella. Vastaanotin kykenee vastaanottamaan vaimennetun signaalin muuntajan toisista. Toimii molempiin suuntiin, vaikkakin konseptissa signaloinnin suunta on KJ- → PJ-verkko.
- Muuntajan omalla vaimennuksella ja hankituilla vaimentimilla demonstroitiin signaalin kulkua ja kantamaa sähköverkossa.
- Laboratoriosetupissa tutkittiin ja määritettiin sopivat parametrit DSSS-hajaspektritekniikalle; konseptin toiminnallisuuksien ja suorituskyvyn; tiedonsiirron kaistan ja herkkyiden funktiona [Poluektov, 2017]. Lisäksi testattiin, miten DSSS-hajaspektritekniikalla toteutettu signaali sie-tää kohinaa kanavassa. Kohina generoitiin laboratorioympäristössä testisetuppiin signaali-generaattorilla. Eri parametrien suorituskykyä testattiin laboratorioverkon lisäksi myös KJ-verkossa Työpaketissa 3.

### 3.11.5 Demonstraatio: Sähköverkkosignaalin syöttäminen verkkoon ja sen havaitseminen

Kenttätestit toteutettiin Järvi-Suomen Energian (JSE) verkossa. JSE on ollut LUT:n yhteistyökumppani aikaisemmissa hankkeissa, ja se antoi testipaikan verkostaan myös tämän hankkeen kenttätesteihin, vaikka ei ollut kyseisessä hankkeessa yrittösosapuolena mukana.

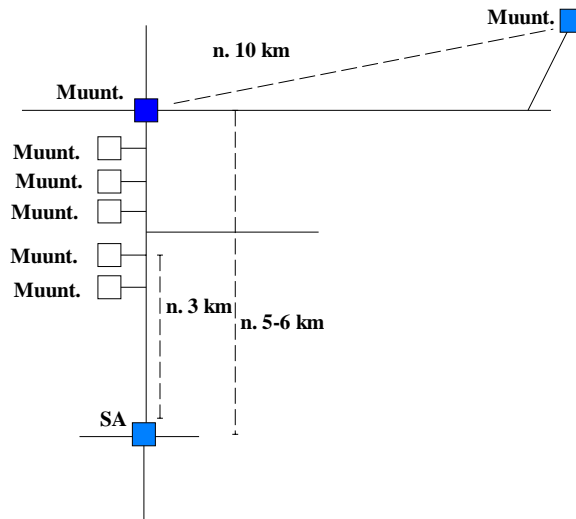
Kenttätestien aloitus viivästyi suunnitellusta kytkentärajapintojen valmistajan toimitusongelmista johtu-en. Testit päästiin aloittamaan vasta toukokuussa 2017. Tiedonsiirtoa testattiin haja-asutusalueen sähköasemalta muuntamolle, sekä jakelumuuntajan yli KJ-verkon puolelta PJ-puolelle. Induktiiviset rajapin-nat kytkettiin verkkoon sähköasemalla ja jakelumuuntamoilla. Niihin kytkettiin sovittimet, vahvistimet, suodattimet ja ohjelmistoradiot sekä PC:t ja suoritettiin signalointia radioiden välillä. Alla päätulokset testeistä (kohdeverkko kuvassa 6):

- Sähköasemalta kauimmaiselle muuntamolle oli matkaa yhteensä noin 15 km, ja johtolähdöllä oli useita haaroja ja muuntamoita. Tällä välillä signaali ei onnistunut. Tämän jälkeen asennettiin toinen radio muuntamolle KJ-verkon haaraan n. 5-6 km sähköasemasta. Muuntamolta muunta-molle, n. 10 km matkalla haarallisessa verkossa tiedonsiirto ei onnistunut. Verkon haarat ja lähe-tystehon jakautuminen näihin KJ-verkon haaroihin vaikuttavat merkittävästi signaloinnin kanta-vuuteen. Riippuen verkon haarojen impedansseista, teho jakautuu jokaiseen haaraan, ja vain osa lähetyksestä etenee haluttuun haaraan, jossa vastaanotin. Signaali sähköasemalta muuntamolle verkon haarassa, n. 5-6 km päässä ei kuulunut vastaanottimella.
- Testejä on jatkettu kytkemällä vastaanotin muuntamolle n. 3 km päässä sähköasemalta. Sig-nalointi ei alustavien testien perusteella onnistunut. Tähän voi syynä olla, että tehdyissä testeis-sä oltiin kytkeydyttynä väriin vaiheisiin (kaikkia kytkentävaihtoehtoja kaikkien vaihejohtimien välillä ei hankkeen puitteissa ehditty käydä läpi). Myös se, että KJ-avojohdon yläpuolella samois-

sa tolmissa menevä suurjännitelinjasyöttö sähköasemalle voi vaikuttaa signaalointiin. Suurjännitelinja voi häiritä signaalointia tai osa signaloinnista kytkeytyä RF-teitse suurjännitelinjaan. Signaaliin kytkeytymistä avojohdosta suurjännitelinjaan, sekä suurjänniteverkon aiheuttamia häiriöitä signaalointiin ei ehditty tutkimaan tämän hankkeen puitteissa. Näiden selvittämiseen tarvitaan lisätutkimuksia.

- Signalointi muuntajan läpi KJ-verkon puolelta PJ-puolelle ei onnistunut kenttäolosuhteissa. Mutta toiseen suuntaan, PJ-puolelta KJ-verkkoon signalointi kuului luotettavasti. Syitä näihin tuloksiin löytyy verkon topologiasta sekä muuntajan impedansseista. Testattavalla muuntajalla keski-jänniteverkon puolella oli 4 lähtöä, ja johtolähdön (sähkökaapelin/avojohdon) tuloimpedanssi on pienempi kuin muuntajan terminaalien. Täten pääosa signaaliteho eteni johtolähtöihin ja vain pieni osa muuntajan terminaaleihin. Pienjännitepuolella verkko on lyhyempi ja vain yksi johtolähtö. Tällöin käytännössä suurempi osuus signaalitehosta etenee muuntajan terminaaleihin ja läpi, ja signaali pystyttiin detektoimaan KJ-puolelta. Näiden perusteella konseptia muokataan siten, että jokaiselle muuntamolle tulee sijoittaa signaalitoistin; lähetin-vastaanotin, jolloin muuntaja ohitetaan, ja signalointi suoraan KJ- ja PJ verkkoon. Toistin saa käyttönsä muuntamon PJ-puolelta (230 VAC) [Poluektov, 2017].
- Ensimmäisten testitulosten analysointien jälkeen ohjelmistoradioihin tehdyistä ohjelmista löydettiin laboratoriosetupissa tehokkaammat parametrit DSSS-hajaspektritekniikkaan. Näillä parametreilla tiedonsiirron luotettavuus ja laatu paranivat merkittävästi ensimmäisissä kenttätesteissä käytössä oleviin verrattuna. Suunnitelmana on jatkaa kenttätestejä hankkeen päätyttyä näillä parametreilla, ja tarvittaessa lyhyemmällä muuntajaväleillä.
- Yhtenä syynä kenttätestien epäonnistumiseen lienee induktiivisten kytkentärajapintojen huono laatu ja ominaisuudet, jotka vaimentavat signaalia merkittävästi. Lähettimellä tilanteen voi paikata vahvistimella, jolla saadaan suurin sallittu teho kyseisellä taajuuskaistalla sähköverkkoon, mutta vastaanottimella jo vaimentunut signaali kulkiessaan rajapinnan läpi vaimenee vielä merkittävästi, eikä vastaanottovahvistin tai ohjelmistoradio pysty signaalia siitä enää erottamaan. Rajapintojen ominaisuudet jäävät kauas siitä, mitä valmistaja on datalehdessään luvannut (0.5-1 dB vaimennus per rajapinta on todellisuudessa 4-5 dB). Kapasitiivinen rajapinta voisi olla ratkaisu (se on tosin haasteellisempi asentaa KJ-verkkoon). Kapasitiivisten rajapintojen ominaisuudet ja soveltuvuus tutkitaan mahdollisesti tulevaisuudessa. Signaalin vahvistaminen lähetyksessä voi myös säröyttää signaalia, joka voi vaikuttaa suorituskykyyn negatiivisesti. Laboratoriossa vahvistamisella ei ollut nähtävissä vaikutusta signaalin vastaanottoon. Lisäksi lähetystehon jakaantuminen muihin verkon haaroihin jokaisessa verkon haarointipisteessä vaikuttaa negatiivisesti signalointitasoon vastaanottimella.
- Testit jatkuvat hankkeen päättymisen jälkeen samoilla komponenteilla, mutta uusilla parametreilla.

- Kaikista saaduista tuloksista kirjoitetaan vielä julkaisuja (konferenssipapereita ja lehtiartikkeleita) hankkeen päättymisen jälkeen.



Kuva 6. Kohdeverkko, jossa kenttätестit suoritettiin.



### 3.12 Yhteenveto tuloksista

Tutkimuksen vianpaikannusta käsittelevä osuus keskittyi pitkälti yksivaiheisten pysyvien maasulkujen paikallistamiseen. Pääpaino oli verkon varrelta tapahtuviin mittauksiin perustuvissa menetelmissä, joita tutkittiin simulointien avulla. Verkkosignaaliin perustuvissa menetelmissä lupaavimmalta näyttää matalataajuisen signaalin hyödyntäminen kaapeliverkkojen pieniresistanssisissa maasuluissa. Tätä olennaisesti parempi tekniikka lienee kuitenkin virran vastakomponenttiin perustuva paikannus, joka alustavien tarkastelujen perusteella näyttää tarjoavan yleispätevän ratkaisun niin kompensoituihin kuin maasta erotettuihin verkkoihin. Menetelmällä pystytään paikantamaan myös varsin suuriresistanssiset viat, eikä se edellytä jännitemittausta. Verkon varrella tehtyihin mittauksiin perustuvat vianpaikannusmenetelmät edellyttävät kehittyneitä tietoliikenneyhteyksiä, älykkäitä laitteita ja tarkoituksenmukaisia sensoreita, esim. Rogowski-keloja. Vikapaikan päättely voidaan toteuttaa paikallisesti, esim. muuntamolle asennetun IED:n avulla, mutta ylempien tason järjestelmissä toteutettu päättely tuo lisää varmuutta.

Katkeilevan maasulun tunnistus on tähän asti onnistunut tyypillisesti johtolähdön tarkkuudella, virta- ja jännitemittauksiin perustuen. Tavoitteena on kuitenkin myös tälle vikatyypille tarkempi paikannus. Simulointitutkimuksen perusteella näyttää siltä, että myös katkeileva maasulku on paikallistettavissa pelkkään virtamittaukseen perustuen, kunhan näytteenottotaajuus on riittävä. Menetelmä edellyttää kuitenkin varsinaisen paikannusalgoritmin kehittämistä jatkotutkimuksissa.

LoM-suojaukseen käsittelevässä tutkimusosiossa tutkittiin jatkuvuussignaaliin perustuvaa tekniikkaa ja IEC 61850 -pohjaista siirtolaukaisua. Molemmista tekniikoista edettiin kokeelliseen vaiheeseen asti. Ohjelmistoradiopohjaisen jatkuvuussignaalin soveltaminen edellyttää vielä jatkotutkimuksia ja lisää kenttäkokeita. IEC 61850:aan perustuva siirtolaukaisu demonstroitui laboratorio-olosuhteissa. Vaikka demonstraatioissa todettu toiminta-aika on varsin pitkä ja vaikka siirtolaukaisu ei ole kaiken kattava ratkaisu LoM-suojaukseen, peruserä saattaa pitämällä aikavälillä tarjota riittävän LoM-ratkaisun. Näin voi tapahtua erityisesti, koska sekä standardi että tietoliikenneyhteydet kehittyvät.

Pientuotannon ohjausta koskevassa työpaketissa todettiin, että IEC 61850:n kehittyminen, erityisesti sen koskeva laajennus IEC 61850-7-420, tarjoaa jo nyt joukon uusia loogisia solmuja mallintamaan moottorivoimalaitosten, polttokennojen, aurinkosähköjärjestelmien ja CHP-laitosten toimintaa, mikä osoitettiin tutkimuksen demonstraatioympäristön kehitystyössä. Tutkimuksessa sovellettiin IEC 61850:aa myös valokaarisuojauksessa, johon liittyen demonstroituihin GOOSE-viesteihin perustuvan järjestelmän suorituskyvyn riittävyys.

Tutkimuksessa selvitettiin ohjelmistoradiopohjaisen verkkosignaalin hyödyntämismahdollisuuksia sekä LoM-suojauksessa että vianpaikannuksessa. Lupaavasti onnistuneiden mallinnusten ja laboratoriotestien jälkeen päästiin kenttäkokeisiin, joissa törmättiin kuitenkin ongelmiin. Tämän mielenkiintoisen teknologian kehittäminen lähemmäs käytännön sovelluksia jää jatkotutkimuksiin. Kenttäkokeista saatiin kuitenkin uutta ja arvokasta tietoa keskijänniteverkosta tiedonsiirtokanavana, josta on hyvä jatkaa tutkimuksia.



## 4 Jatkotutkimustarpeet

Pysyvän yksivaiheisen maasulun paikannus edellyttää verkon varrella tehtäviin mittauksiin perustuvien menetelmien implementointia ja niiden toiminnan varmistamista kenttäkokeiden avulla. Katkeilevan maasulun paikannus voinee vastaavasti perustua virtamittauksiin verkon varrelta, mutta se vaatii sekä algoritmin kehittämistä että laitetta, jossa on suuri näytteenottotaajuus. Nämä vianpaikannusmenetelmät edellyttävät kommunikaatiota ja laitteiden integroimista osaksi tulevaisuuden muuntamoautomaatiota, jonka laajempi tutkiminen on luonteva jatkotutkimuskohde.

Hankkeen aikana nousi esille tarve yleiskäyttöiselle tallennekirjastolle, jonne voitaisiin koota tallenteita sekä verkon todellisista tilanteista että kenttäkokeista. Kirjastoa voitaisiin hyödyntää mm. laitteiden tuotekehityksessä, toimivien suojausasettelujen selvittämisessä sekä koulutuksen tukena.

Ohjelmistoradioon perustuvat verkkosignaaliin pohjaiset tekniikat ovat uusi mielenkiintoinen mahdollisuus verkostoautomaation kehittämisessä. Tekniikan soveltaminen LoM-suojauksessa ja vianpaikannuksessa vaatii vielä tutkimustyötä. Tarvitaan lähetin- ja vastaanotintekniikan kehittämistä, tarkempaa keskijänniteverkon mallinnusta tutkitulla taajuuskaistalla, sekä järjestelmien toiminnan selvittämistä erilaisten vikatilanteiden ja jännitekuoppien aikana, sekä kenttäkokeita.

IEC 61850 -pohjainen kommunikaatio kehittyy, ja standardi on jo laajentunut pientuotannon suuntaan. Hankkeessa toteutetut demonstraatiot indikoivat, että IEC 61850-kommunikaation avulla on mahdollista toteuttaa pientuotannon monitorointi ja ohjaus, sekä siirtolaukaisuperiaatteella toteutettu eroonkytkentäsuojaus. Etenkin viimeksi mainittu lienee pienellä panostuksella tuoteistettävissä, mutta laajamittaisemmat kokonaisratkaisut ja integrointi muuhun automaatiojärjestelmään vaativat vielä tutkimustyötä. Myös mikrosähköverkkojen IEC 61850-pohjaiseen hallintaan ja suojaukseen liittyy edelleen tutkimushaasteita. Oman lisänsä tutkimukseen tuo standardin jatkuva kehitys, joka avaa mahdollisuuksia uusille toteutustavoille. Jatkossa tulisi selvittää mm. XMPP-protokollan (Extensible Messaging and Presence Protocol) tuomat mahdollisuudet sekä reititettyä yhteyttä hyödyntävät ns. WAMPAC-ratkaisut (Wide Area Monitoring, Protection, and Control). Myös tietoturva on otettava jatkoselvityksissä tarkastelun kohteeksi.

## 5 Raportit ja julkaisut

Hankkeessa tuotettiin seuraavat raportit ja julkaisut:

Farughian, A., Kumpulainen, L., Kauhaniemi, K., *A Review of State of the Art Methodologies for Earth Fault Indication and Location in Compensated and Unearthed MV Distribution Networks*, Electric Power Systems Research (accepted)

Farughian, A., Kumpulainen, L., Kauhaniemi, K., *Fault location using symmetrical (sequence) components*, Protect-DG project report, 2017

Farughian, A., Poluektov, A. et al., *Earth fault location based on powerline signaling*. Submitted to DPSP 2018 conference (Developments in Power System Protection)

Kumpulainen, L., Jäntti, A., Rintala, J., Kauhaniemi, K., *Benefits and performance of IEC 61850 Generic Object Oriented Substation Event based communication in arc protection*, IET Generation, Transmission & Distribution, Volume: 11, Issue: 2, Pages: 456- 463

Kumpulainen, L., *Näkökohtia IEC 61850 -standardin soveltamiseen valokaarisuojauksessa*, Projektiraportti, 2017.

Mekkanen, M., Kauhaniemi, K., Kumpulainen, L., Memon, A., *Light-Weight IEC 61850 GOOSE Based Loss of Mains Protection for Smart Grid*, (To be published later on)

Mekkanen, M., Kauhaniemi, K., *Wireless Light-Weight IEC 61850 Based Loss of Mains Protection for Smart Grid*, Conference paper, Automaatiopäivät 23.-24.3.2017, Vaasa. (Submitted to Open Engineering Journal)

Memon, A., Voima, S., Kauhaniemi, K., *An adaptive protection for radial AC Microgrid using IEC 61850 standard*. (To be published later on)

Mäntysalo, I., *Maasulun paikannustekniikat – Katsaus menetelmiin ja käytännön ratkaisuihin*, Kandidaatintutkielma, Vaasan yliopisto, 2016.

Palizban, O., Kauhaniemi, K., *Principles of Power Management in a Smart Microgrid Based on Std. IEC 61850*, IEEE International Conference on Innovative Smart Grid Technologies - ISGT Europe 2017



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020

Tekes

Pinomaa, A., Poluektov, A., Ahola, J., Kosonen, A., *Analysis of Channel Characteristics and Modeling of a Transformer for PLC-Based Loss-of-Mains Concept*, IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2016.

Pinomaa, A., et al., *Channel modeling of narrow band power line communication in MV distribution grids*. (To be published later on)

Poluektov, A., Pinomaa, A., Ahola, J., Kosonen, A., *Designing a power-line-communication-based LoM protection concept with application of software-defined radios*, IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC) 2016.

Poluektov, A., Pinomaa, A., Ahola, J., Kosonen, A., *PLC-based anti-islanding and fault locating system concept*, 10<sup>th</sup> Workshop on Power Line Communications (WSPLC) 2016.

Poluektov, A., Romanenko, A., Pinomaa, A., Ahola, J., Kosonen, A., *Sensitivity analysis of a PLC-based anti-islanding solution using DSSS*, IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC) 2017.

Poluektov, A., Romanenko, A., Pinomaa, A., Ahola, J., Kosonen, A., *Sensitivity analysis of a PLC-based anti-islanding concept in power distribution grids*, IEEE Transactions on Smart Grid, 2017/2018. Submitted.

Poluektov, A., Pinomaa, A., Kosonen, A., Romanenko, A., Ahola, J., *PLC for Monitoring and Control of Distributed Generators in Smart Grids*, Book chapter in Power Line Communication Systems for Smart Grids book, by IET Press, to be published in 2018.

Poluektov et. al., *Channel modelling and concept evaluation of an OFDM/DSSS-based power line communication system*, planned, to be published later (J/N)

Poluektov et. al., *Performance evaluation of continuous signaling based LoM protection concepts – Simulations and Demonstrations*, planned

Poluektov et. al., *Feasibility study – IEC61850 on communication-based signaling implemented with SDRs*, Joint-publication, planned (J/N).

Rinta-Luoma, J., *Saarekekäytön estosuojausmenetelmät*, Seminaarityö, Vaasan yliopisto, 2015.

Rinta-Luoma, J., *Selvitys IEC 61850 -standardin soveltamismahdollisuuksista LoM-suojaukseen*, Protect-DG -hankkeen raportti, 2016.

Voima, S., Farughian, A., *Intermittent Earth Faults*, Review. Project report, 2017

## 6 Lähteitä

CIREN & CIGRÉ, Joint Working Group B5/C6.26/CIREN (2015). *Protection of Distribution Systems with Distributed Energy Resources*. Final Report

Druml, G, Raunig, C., Schegner, P., Fickert, L., "Earth Fault Localization with the Help of the Fast-Pulse-Detection-Method Using the New High-Power-Current-Injection (Hpcl)," in IEEE Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2012

Druml, G, Raunig, C., Schegner, P., Fickert, L., "Fast Selective Earth Fault Localization Using the New Fast Pulse Detection Method," in 22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, 2013

Ropp, M. E., Aeker, K., Haigh, J., Sabbah, N., "Using power line carrier communications to prevent islanding [of PV power systems]," in Conference record of the 28<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2000, Anchorage, AK, USA, September 2000.

Voima, S., Välisuo, P., Kauhaniemi, K., *Power Line Carrier Based Loss of Mains Protection in Medium Voltage Distribution Networks*, 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), IET Conference Publications.

Yang, Y., Enjeti, P., Blaabjerg F., Wang, H., *Wide-Scale Adoption of Photovoltaic Energy – Grid code modifications are explored in the distribution grid*, IEEE Industry Applications Magazine, 29 June 2015.



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020

Tekes