



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIIA MIETTINEN
SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS SÄHKÖVERKKO-
TIEDONSIIRROSSA

Diplomityö

Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 6. kesä-
kuuta 2016

TIIVISTELMÄ

MIIA MIETTINEN: Sähkömagneettinen yhteensopivuus sähköverkkotiedonsiirrossa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 80 sivua

Marraskuu 2016

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: Tutkijatohtori Pertti Pakonen

Avainsanat: sähkömagneettinen yhteensopivuus, sähköverkkotiedonsiirto, etäluettava sähköenergiamittari, sähkömagneettinen häiriö

Suomessa lähes jokaisessa sähköverkkoon liitetystä käyttöpaikasta on etäluettava sähköenergiamittari. Etäluettavien sähköenergiamittareiden mittaustiedon siirtoon voidaan käyttää sähköverkkotiedonsiirtoa. Tämän tiedon siirtoon on taajuusalueeksi määritetty 3...95 kHz, jolle ei ole määritetty häiriöpäästöille rajoitteita (lukuun ottamatta induktiokuumentimia).

Mikäli mittaustulos estyy jostakin syystä, eikä mittaustieto saada mittarilta, on sähkönkulutus arvioitava ja jos myöhemmin mittaustieto on saatavilla, on kulutustiedot korjattava. Sähköverkossa on sähkölaitteita, jotka aiheuttavat häiriöitä sähköverkkoon. Sähköverkkoyhtiön huomattavissa yhteyden katkenneen sähköenergiamittariin, on heidän selvittävää mistä katko johtuu. Kun muut vaihtoehdot on suljettu pois ja ainoana vaihtoehtona on sähköverkkotiedonsiirron estyminen sähkömagneettisen häiriösignaalin seurauksena, selvitetään häiriön lähde sähköverkosta. Verkkoyhtiön on arvioitava mahdolliset korjaustoimenpiteet, jotta yhteys saadaan palautettua. Verkkopalveluehdoissa (VPE 2014) on maininta, että sähkökäyttäjän sähkölaitteet eivät saa estää sähköverkossa tapahtuvaa tiedonsiirtoa, vaikka tiedonsiirtoa hyödyntävälle taajuuskaistalle ei ole asetettu määräyksiä häiriöpäästöille.

Carunalla tehty tutkimus käsittelee sähkömagneettisen yhteensopivuuden (EMC) vaikutuksia sähköverkkotiedonsiirtoon. Tutkimuksessa selvitettiin miten häiriöt jakaantuvat sähköverkossa eri alueille ja asiakassegmenteissä. Suomen suurimmalla sähkönsiirtoyhtiöllä, Carunalla on käyttöpaikkoja useassa maakunnassa. Eniten häiriöitä oli Häme & Uusimaa -alueella, jossa sijaitsee eniten asiakkaita. Carunan suurin asiakassegmentti on kotitaloudet, joista suurin osa häiriöistä löytyi. Yleisimmät häiriölähteet olivat ATK-työkoneet, taajuusmuuttajat ja teholahteet. Häiriöiden poistamiseksi korjaustoimenpiteistä yleisimpinä olivat EMC-suotimen asennus, laitteen uusiminen ja lisäkeskittimen asennus. Suuren EMC-suotimien asennusmäärän perusteella voidaan päätellä, että sähkölaitteilla ei ole ollut riittävää suojausta sähkömagneettisia häiriöitä varten taajuusalueella, jossa tiedonsiirto tapahtuu. Aiemmissa tutkimuksissa havaittiin, että häiriöt johtuivat puutteellisesta sähkömagneettisten häiriöiden suodattamisesta ja asennusvirheistä.

ABSTRACT

MIIA MIETTINEN: Electromagnetic compatibility in Power Line Communication

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 80 pages

November 2016

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Systems and Market

Examiner: Postdoctoral Researcher Pertti Pakonen

Keywords: electromagnetic compatibility, power line communication, automated meter reading, electromagnetic interference

In Finland almost every grid connected customer is connected with automated meter reading. The automated meter reading can use power line communication to transfer measurement data and is allowed to use frequency band 3...95 kHz, for this frequency band has no limits for disturbance emission (except for induction heating).

If for some reason power line communication is prevented and connection to the meter is blocked, the measurement data should be estimated and corrected later if measured data is available. There are electrical devices which are interference sources and these problems are visible in the grid. If connection to the meter is blocked the electricity distribution system operator has to find out the reason for that. After every other alternative is excluded and the last option is electromagnetic interference, the operator can find the interference source from the grid. When it's found, the electricity transmission system operator estimates the corrective action. Network Service Agreement (VPE 2014) states that electricity users' electrical device should not prevent the measurement data power line communication. The frequency band used by power line communication has no set limits for interference signals.

In this work a study was made about the effects of electromagnetic compatibility (EMC) to the power line communication with Caruna. The study shows how the interference cases are distributed in Carunas grid. Caruna is the biggest electricity distribution system operator in Finland and the operation area is in several provinces. Most of the interference sources are found from Häme & Uusimaa area where also most of the customers are. Common interference sources were network switches, frequency converters and power supplies. Corrective actions to remove the interference were installation of EMC-filters, renewal of electrical devices and extra concentrator installation. The number of installed EMC-filters is an indication of the inadequate limits for electromagnetic emissions in the frequency band used for power line communication. In the previous studies electromagnetic interference came from inadequate EMC filtering and faulty installation.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty sähköverkkoyhtiö Carunan asiakkuuspäällikkö Tommi Pyhähuhdan alaisuudessa. Tutkimusmateriaali ja materiaaliin liittyvät tekniset neuvot sain mittauspalveluasiantuntija Lars Blomkvistilta. Kiitokset kuuluvat työn aikana saaduista neuvoista ja tarpeista myös lähellä työskenteleville kollegoille, koko Mittauspalvelu-tiimille sekä aiheen löytämisen taustalla olleille verkkopalveluasiantuntijoille Tytti Paanaselle, Juha-Pekka Kaartiselle sekä palvelupäällikkö Jaana Varikselle.

Diplomityön tarkastajana toimi tutkijatohtori Pertti Pakonen Tampereen teknillisestä yliopistosta. Pertti Pakosen kanssa käydyt keskustelut ja saadut kommentit työstä selkeyttivät työn suuntaa ja lisäsivät työn syvempää pohdintaa.

Kiitokset kuuluvat myös isälleni Matti Miettiselle, jonka kanssa käydyt keskustelut työn alussa antoivat kriittistä pohdintaa työn sisällöstä ja suuntaamisesta. Kannustuksesta kiitos kuuluu myös muulle perheelleni ja erityisesti avomiehelleni Toni Viitaniemelle.

Espoossa, 21.11.2016

Miia Miettinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖMAGNEETTISET ILMIÖT JA AALTOLIIKE	3
2.1	Sähkömagneettiset ilmiöt	3
2.1.1	Sähkövirta	3
2.1.2	Magneettikenttä.....	5
2.1.3	Sähkömagneettinen induktio.....	6
2.2	Aaltoliike.....	8
2.2.1	Aaltoliikkeen energia	10
2.2.2	Aallon eteneminen	11
2.2.3	Sähkömagneettiset aallot.....	12
2.3	Yliaallot.....	13
2.4	Virranahto.....	15
3.	SÄHKÖLAITTEIDEN JA -VERKON SÄHKÖMAGNEETTISILLE OMINAISUUKSILLE ASETETUT VAATIMUKSET	16
3.1	Säköturvallisuuslaki	16
3.2	EMC-direktiivi	16
3.3	Mittauslaitedirektiivi	18
3.4	Standardit	20
3.4.1	EMC, SFS 6000-1	20
3.4.2	PLC, SFS-EN 50065-1.....	21
3.4.3	Suojausmenetelmät, SFS 6000-4-44	22
3.5	Määräykset häiriöpäästöille.....	25
3.6	Verkkopalveluehdot	25
3.7	Säkölaitteiden käyttöönotto ja käyttö.....	27
4.	SÄHKÖVERKKOTIEDONSIIRTO JA SIINÄ ESIINTYVÄT HÄIRIÖT	30
4.1	Taseselvitys	30
4.2	Tuntimittaus	31
4.3	Mittausjärjestelmä ja -tiedot.....	33
4.4	Säköverkkotiedonsiirto.....	34
4.5	Etäluettava sähköenergiamittari, Echelon	36
4.6	PLC-häiriöiden ilmeneminen	39
4.6.1	Säkömittarin selektiivisyys	39
4.6.2	Muulla havaittuja PLC-häiriöitä.....	40
4.6.3	Kuormien aiheuttamat yliaallot sähköverkossa	43
4.6.4	Signaalin ylikuuluminen ja vaimentuminen	43
4.7	Esimerkkejä PLC-häiriöitä aiheuttavista säkölaitteista.....	45
4.7.1	Pienloistelamput.....	45
4.7.2	Hakkuriteholähteet	45
4.7.3	Taajuusmuuttajat	46
4.7.4	PLC-tekniikan aiheuttamat häiriöt	48

5.	AIEMPIEN TUTKIMUKSIEN TULOKSIA JA TUTKIMUSONGELMA	50
5.1	Aiempien tutkimuksien tuloksia.....	50
5.1.1	Sähkömagneettisten häiriöiden vaikutukset, CENELEC	50
5.1.2	Häiriöiden vähentäminen - TTY, Vaihe I.....	52
5.1.3	Häiriöiden vähentäminen - TTY, Vaihe II.....	52
5.2	Tutkimusongelma.....	53
5.3	Tutkimusmenetelmä ja -materiaali.....	54
5.4	Tulosten luotettavuus, yleistettävyyys ja virhelähteitä	54
6.	PLC-HÄIRIÖT CARUNAN SÄHKÖVERKKOALUEELLA	55
6.1	Häiriötapauksien jakaantuminen sähköverkkoalueella	55
6.1.1	Jakauma Caruna Oy/Caruna Espoo Oy:n verkkoalueiden kesken ..	56
6.1.2	Jakauma maakunnittain	57
6.1.3	Jakauma asiakassegmenteittäin.....	58
6.1.4	Jakauma kiinteistömuodoittain	61
6.2	PLC-häiriön vaikutukset muuntopiirin sähköenergiamittareihin	62
6.2.1	Vaikutukset muuntopiirien sähköenergiamittareihin verkkoalueittain	63
6.2.2	Vaikutukset muuntopiirien sähköenergiamittareihin asiakassegmenteittäin	65
6.2.3	Vaikutukset muuntopiirien sähköenergiamittareihin kiinteistömuodoittain.....	66
6.3	PLC-häiriötä aiheuttavat sähkölaitteet	68
6.3.1	Sähkölaitteiden vaikutukset asiakassegmenteittäin ja PLC-häiriöiden laajuus	71
6.3.2	Esiselvitystä vaativat sähkölaitteet.....	72
6.4	PLC-häiriön poistaminen	72
7.	YHTEENVETO	75
	LÄHTEET.....	78

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1.</i>	<i>Jaksollinen siniaalto. Kuvassa ϕ_0 kuvaa nollavaihekulmaa, joka kuvaa signaalin vaihesiirtoa, \hat{u} on jännitteen huippuarvo ja T on jaksonpituus. [23].....</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 2.</i>	<i>Piste a kuvaa xy-koordinaatistossa olevaa värähtelevää pistettä aallossa. Perustuu lähteeseen [1, s. 15].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 3.</i>	<i>Levein käyrä kuvaa perusaallon ja viidennen yliaallon resultanttiaalto. [31, s. 7].....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 4.</i>	<i>Kaapelihyllyn suojauksen vaikutusalue on merkitty vihreällä ja alempaan kuvaan on kuvattu kaapeleiden suositeltu asennustapa. Perustuu lähteeseen [21, s. 39].....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 5.</i>	<i>Sähkötaseselvityksen portaittainen selvityshierarkia. Perustuu lähteeseen [27].....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 6.</i>	<i>Mallissa nähdään mittarin mittaustiedon tiedonsiirtoketju. [29, s. 14].....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 7.</i>	<i>PLC-järjestelmä. Perustuu lähteeseen [17, s. 73].....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 8.</i>	<i>Carunalla käytössä oleva etäluettava sähköenergiamittari. [24].....</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 9.</i>	<i>Taajuusmuuttajan yleiskaavio. [14, s. 27].....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 10.</i>	<i>Moottorikaapelin rakenne. [14, s. 42].....</i>	<i>47</i>
<i>Kuva 11.</i>	<i>Carunan asiakasmäärät alueittain. Perustuu lähteeseen [3].....</i>	<i>55</i>
<i>Kuva 12.</i>	<i>PLC-häiriötapaukset yhtiöittäin vuosina 2012–2015.</i>	<i>56</i>
<i>Kuva 13.</i>	<i>Häiriötapausten kehittyminen alueittain vuosina 2012–2015.....</i>	<i>58</i>
<i>Kuva 14.</i>	<i>Häiriötapaukset asiakassegmenteittäin vuosina 2012–2015. Palvelu kuvaa asiakassegmenttiä Palvelut ja rakentaminen.....</i>	<i>59</i>
<i>Kuva 15.</i>	<i>Häiriötapausten PLC-häiriöiden vaikutuksen alaisena olevien sähköenergiamittareiden lukumäärä vuosina 2012–2015. Palvelu kuvaa Palvelut ja rakentaminen asiakassegmenttiä.....</i>	<i>60</i>
<i>Kuva 16.</i>	<i>Häiriötapausten jakautuminen eri kiinteistömuodoille, vuosina 2012–2015.</i>	<i>61</i>
<i>Kuva 17.</i>	<i>Häiriytyneiden sähköenergiamittareiden osuus muuntopiirin kaikista sähköenergiamittareista vuosina 2012–2015.</i>	<i>63</i>
<i>Kuva 18.</i>	<i>Muuntopiirien sähköenergiamittareiden ja häiriön vaikutuksen alaisena olevien sähköenergiamittareiden keskimääräiset lukumäärät vuosina 2012–2015.</i>	<i>64</i>
<i>Kuva 19.</i>	<i>Häiriötapausten PLC-häiriön keskimääräinen laajuus asiakassegmenteittäin muuntopiirissä vuosina 2012–2015. Palvelu kuvaa asiakassegmenttiä Palvelut ja rakentaminen.....</i>	<i>65</i>
<i>Kuva 20.</i>	<i>Häiriöitä aiheuttavat sähkölaitteet vuosina 2012–2015.</i>	<i>69</i>
<i>Kuva 21.</i>	<i>Häiriöitä aiheuttavat sähkölaitteet, vuosina 2012–2015.</i>	<i>70</i>
<i>Kuva 22.</i>	<i>Häiriöitä aiheuttavien sähkölaitteiden lukumäärien kehitys vuosina 2012–2015.</i>	<i>71</i>

<i>Kuva 23.</i>	<i>Häiriölähteet asiakassegmenteittäin vuosina 2012–2015. Palvelu</i>	
	<i>kuvaa asiakassegmenttiä Palvelut ja rakentaminen.....</i>	<i>72</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMR	Automated Meter Reading, energiamittareiden etäluenta
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization, eurooppalainen standardointijärjestö, joka laatii Eurooppaan soveltuvat sähköalan EN-standardit
CRC	Cyclic Redundancy Checking, syklinen ylimäärävarmistus on matemaattinen menetelmä, jolla paljastetaan virheitä
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö
GSM	Global System for Mobile communication, matkapuhelinverkko, matkapuhelinstandardi
ICT	Information and Communication Technologies, tieto- ja viestintäteknikka
MCS	Mains Communicating System, sähköverkkotiedonsiirto-järjestelmä
MID	Measuring Instrument Directive, mittauslainedirektiivi
PC	Personal Computer, kotitietokone
PLC	Power Line Communication, sähköverkkotiedonsiirto
TDL	Touch Dimmer Lamp, hipaisuhimmentimellä varustettu lamppu
UPS	Uninterruptible Power Source, katkoton teholähde
VSD	Variable Speed Drive, nopeussäädetty sähkökäyttö

1. JOHDANTO

Tämä diplomityö käsittelee sähkömagneettisesta yhteensopimattomuudesta aiheutuneita häiriöitä sähköverkkotiedonsiirrossa. Tällä hetkellä yleistyvät etäluettavien sähköenergiamittareiden käyttö on luonut haasteita sähkölaitteiden häiriöpäästöistä johtuen. Etäluettavat sähköenergiamittarit, jotka hyödyntävät sähköverkkoa tiedonsiirrossa ovat alttiita sähköverkossa esiintyville häiriöille, sillä alun perin sähköverkkoa ei ole suunniteltu tiedonsiirtoa varten. Aiemmissa tutkimuksissa [5][16][17] on noussut esille useita laiteryhmä, jotka aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä toisille laitteille, ylittäen nykyiset häiriöpäästöille asetet raja-arvot. Huhtikuussa 2016 voimaan tullut uusi EMC-direktiivi [10] määrittelee aiempaa tarkemmin valmistajan, edustajan, maahantuojan ja jakelijan vastuuta markkinoille saatetuista sähkölaitteista ja niiden vaatimustenmukaisuuden täyttämistä ja asianmukaisten asiakirjojen olemassa olosta.

Sähköverkkotiedonsiirrossa käytetty taajuuskaista on määritetty 3..95 kHz [22], kun sähkölaitteiden nykyiset häiriöpäästövaatimukset ovat yli 150 kHz taajuuksille häiriösignaaleille. Häiriöpäästöjen vähentämiseksi taajuusalueelle 3...148.5 kHz tarvitaan raja-arvoja, jolloin laitteiden valmistajien olisi huomioitava vaatimukset ennen laitteen markkinoille laskemista. Tällä hetkellä sähköverkkoyhtiö puuttuu laitteiden sähkömagneettisiin häiriöpäästöihin, kun ne rikkovat Verkkopalveluehtoja (VPE 2014) [32]. VPE 2014 mukaan asiakkaan sähkölaitteet eivät saa häiritä sähköverkkoyhtiön tai muiden asiakkaiden sähkölaitteiden toimintaa. Lisäksi sähkölaitteet eivät saa estää mittaustietojen sähköverkkotiedonsiirtoa.

Sähkömagneettisiin häiriöihin pystytään puuttumaan, kun niiden aiheuttamat häiriöt on todettu ja lähde löydetty. Aiemmissa tutkimuksissa on noussut esille laiteryhmä, joiden virheellinen asentaminen ja ikääntyminen aiheuttavat paljon ongelmia.

Työn luku 2 avaa syvemmin ilmiöitä sähkömagneettisten häiriöiden taustalla. Sähkömagneettinen häiriö voi kulkeutua ilmassa tai johteessa. Sähköverkossa kulkeva sähköenergia ja tieto kulkevat aaltolina johdossa ja ovat herkkiä sähköverkossa ilmentyville häiriöaloille. Sähkömagneettiset häiriöt aiheuttavat muutoksia tiedonsiirtosignaalin ja voivat häiritä signaalia niin, että se estää tiedonsiirtymisen kokonaan. Johteessa tapahtuviin häviöihin vaikuttaa myös johdon ominaisuudet.

Luvussa 3 käsitellään määräykset ja ehdot, jotka liittyvät sähkölaitteiden sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen, sähköverkkotiedonsiirtoon, sähkön mittaukseen, sekä asiakkaan ja sähköverkon haltijan väliseen verkkopalveluun. Näiden tavoitteena on taata tur-

vallinen ympäristö ja taata, että sähkölaitteet eivät häiritse muita sähkölaitteita. Tällä hetkellä olevat standardeissa olevat rajoitteet sähkömagneettisille häiriöpäästöille eivät kata taajuusaluetta (lukuun ottamatta induktiokuumentimia), jossa sähköverkkotiedonsiirto tapahtuu.

Luvussa 4 käsitellään sähköverkkotiedonsiirtoa, johon kuuluu järjestelmä, jolla mittaus-tiedot saadaan kerättyä sähköverkonhaltijalle ja mitä velvoitteita mittaustiedolle on asetettu. Sähköverkkotiedonsiirtoon vaikuttavia häiriöitä on tutkittu jonkin verran ja on löydetty useita sähkölaitteita, jotka häiritsevät sähköverkkotiedonsiirtoa. Luvun häiriötiedot on koottu aiemmista tutkimuksista. Määräyksien ja aiempien tutkimuksien tarkastelussa on noussut esille taajuusmuuttajien aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt ja lukuun on kirjattu mitä kyseisen laitteen asennuksessa tulisi huomioida, jotta se ei aiheuttaisi niin paljon häiriöitä.

Luku 5 käsittelee aiempien tutkimuksien tuloksia, jonka jälkeen tarkastellaan tässä työssä Carunalla tehdyn tutkimuksen asetelmia, materiaalia sekä tutkimuksen luotettavuutta, yleistettävyyttä ja virhelähteitä. Aiempiin tutkimuksiin verraten, tavoitteena oli selvittää, missä tiedonsiirtohäiriöt ilmenivät sähköverkossa ja millä toimenpiteillä eri sähkölaitteiden häiriösignaalit saatiin riittävän alhaisiksi. Tutkimusmateriaalina oli Carunan sähköverkkoalueella tehdyt sähköverkkotiedonsiirron häiriöraportit vuosilta 2012–2015. Caruna on Suomen suurin sähkönsiirtoyhtiö ja asiakkaita on pienjänniteverkossa noin 655 000. Verkkoaluetta on useissa eri maakunnassa eri puolilla Suomea, jolloin tutkimuksessa saadaan vertailevaa aineistoa eri alueilta. Tutkimuksessa saadut tulokset on koottuna lukuun 6.

2. SÄHKÖMAGNEETTISET ILMIÖT JA AALTO-LIIKE

Työssä käsitellään sähkömagneettisia häiriöpäästöjä ja niiden vaikutuksia etäluettavien sähköenergiamittareiden käyttämään sähköverkkotiedonsiirtoon. Näiden ymmärtämiseksi on tiedettävä ilmiöt, sekä syy-seuraussuhteet, jotka vaikuttavat näiden ilmiöiden taustalla. Tarkastelu aloitetaan sähkövirrasta ja sen yhteydestä sähkömagneettisuuteen. Sähköjohdoissa tapahtuvaa energian ja tiedon siirtymistä voidaan mallintaa etenevällä siniaallolla. Aaltojen etenemiseen vaikuttaa häiritsevästi sähköverkossa ilmenevät yliaallot, jotka ovat lähtöisin kuormista, jotka käyttävät epäsinimuotoista sähkövirtaa. Vaihtovirtakäytöissä ilmenevä virranajo, lisää resistiivisyyttä johteessa.

2.1 Sähkömagneettiset ilmiöt

Tarkastelussa lähdetään liikkeelle sähkövirrasta, jolla saadaan sähköverkossa siirrettyä energiaa varausten avulla. Kuinka sähkövirta aiheuttaa suljetussa silmukassa magneettikentän silmukan läpi. Kolmantena kuvataan sähkömagneettista induktiota, kun muuttuva sähkökenttä aiheuttaa suljettuun silmukkaan sähkövirran.

2.1.1 Sähkövirta

Sähkövirta kulkee aineessa, kun varaukset järjestyvät kappaleen pinnalla. Sähkövirta on

$$I = dQ/dt, \quad (1)$$

jossa Q on varausten nettovaraus. Pintaelementin dS läpi kulkeva virta on

$$dI = \frac{nq\bar{v} dt \cdot \bar{n}dS}{dt} = \rho\bar{v} \cdot \bar{n} dS = \bar{J} \cdot dS, \quad (2)$$

jossa n on lukumäärätiheys, q sähkövaraus, \bar{v} on nopeus ja \bar{J} on sähkövirran tiheys. Kun tilavuuteen V tulee sähkövirta pinnan S läpi, voidaan kirjoittaa

$$I = - \oint_S \bar{J} \cdot \bar{n}dS = - \int_V \nabla \cdot \bar{J}dV. \quad (3)$$

Tämä on sama kuin varausten tuoma sähkövirta tilavuuteen V

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV. \quad (4)$$

Kun aikaderivaatta viedään integraalin sisään, saadaan tilavuuden jokaiselle pisteelle laskettua osittaisderivaataksi

$$I = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV . \quad (5)$$

Tällöin voidaan sähkövirran lausekkeet (3) ja (5) yhdistää ja saadaan

$$\int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} \right) dV = 0. \quad (6)$$

Tämän ollessa voimassa kaikille tilavuuksille, saadaan sähkövirralle jatkuvuusyhtälö

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = 0 . \quad (7)$$

Mikäli varaustiheys on riippumaton ajasta $\nabla \cdot \vec{J} = 0$, niin virralla ei ole lähdettä tai nielua, vaan se on sulkeutumaton virtaviiva, jolloin se on stationaarinen.

Sähkökentän vaikutukset sähkövirtaan voidaan nähdä virrantiheydelle

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} , \quad (8)$$

kirjoitetusta Ohmin laista vakio-lämpötilassa, jossa σ on johtavuus (verrannollisuuskerroin). Johtavuus on aineen ominaisvastuksen eli resistiivisyyden käänteisluku. Ohmin laki on voimassa tavallisille aineille, kun sähkökenttä ei ole suuri.

Johdossa kulkevalle sähkövirralle, jonka poikkipinta-ala on A , voidaan kirjoittaa

$$I = \int_A \vec{J} \cdot \vec{n} dS = JA = \frac{\sigma A}{l} \Delta\varphi , \quad (9)$$

jossa l on johdon pituus ja $\Delta\varphi$ on potentiaaliero eli jännite U . Virran suuruus on suoraan verrannollinen pinta-alan suuruuteen. Sähkökentän tekemä työ

$$W = QU , \quad (10)$$

on se työ, joka tehdään varauksen siirtämiseksi.

Kun lausekkeen (9) $(\sigma A/l)^{-1}$ on resistanssi R , saadaan työtä vastaavaksi teholausekkeeksi

$$P = UI = RI^2 = U^2/R , \quad (11)$$

jota kutsutaan materiaalin ohmiseksi - tai Joulen lämmitykseksi. [13, s. 59–61] Lämpeneminen kuuluu häviöihin. Toimiakseen sähkölaitteen läpi on kuljettava sähkövirta ja sähköverkkoon kytkettynä sähkövirta saadaan sähköverkosta ja muutetaan laitteessa sille sopivan suuruiseksi.

2.1.2 Magneettikenttä

Sähkövirta aiheuttaa magneettikentän. Kun kahdessa virtasilmukassa C_1 ja C_2 kulkee virrat I_1 ja I_2 niiden välillä vaikuttaa voima

$$\bar{F}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\bar{I}_2 \times [d\bar{I}_1 \times (r_2 - r_1)]}{|r_2 - r_1|^3}, \quad (12)$$

joka on vaikuttaa silmukkaan C_2 . Lausekkeessa huomioidaan voiman ja vastavoiman vaikutukset ja μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti. Voima voidaan kirjoittaa muotoon

$$\bar{F}_M = I_2 \oint_{C_2} d\bar{I}_2 \times \bar{B}(r_2), \quad (13)$$

jossa

$$\bar{B}(r_2) = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \oint_{C_1} \frac{d\bar{I}_1 \times (r_2 - r_1)}{|r_2 - r_1|^3} \quad (14)$$

on silmukan C_1 synnyttämä magneettivuon tiheys eli magneettikenttä silmukassa C_2 sijaitsevassa pisteessä \bar{r}_2 . Lauseketta (14) kutsutaan Biot'n ja Savartin laiksi.

Magneettikentällä \bar{B} ei ole lähteitä tai nieluja eli magneettisia varauksia, vaan magneettikentän kenttäviivat ovat sulkeutuvia silmukoita. Tällöin voidaan kirjoittaa magneettikentälle

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0. \quad (15)$$

Magneettikenttä eli magneettivuon tiheys koostuu magneettivuoista tietyn pinnan S läpi

$$\Phi = \int_S \bar{B} \cdot d\bar{S}. \quad (16)$$

[13, s. 63–64] Kun varaustiheys on riippumaton ajasta $\nabla \cdot \bar{J} = 0$ ja Biot'n ja Savartin laissa (14) esiintyvä virtajakauman ollessa pinnasta riippumaton, voidaan se kirjoittaa pintaintegraalin ulkopuolelle. Tällöin pintaintegraalista tulee nolla ja lauseke supistuu Ampèren laiksi differentiaalimuodossa

$$\nabla \times \bar{B} = \mu_0 \bar{J}. \quad (17)$$

Stokesin lausetta

$$\int_S \nabla \times \bar{F} \cdot \bar{n} dS = \oint_C \bar{F} \cdot d\bar{l} \quad (18)$$

käyttäen, saadaan lauseke (17) muotoon

$$\int \nabla \times \bar{B} \cdot \bar{n} dS = \oint_C \bar{B} \cdot d\bar{l}. \quad (19)$$

Suljettua silmukkaa C pitkin integroitu magneettivuon tiheys on

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS = \mu_0 I , \quad (20)$$

eli μ_0 kertaa silmukan läpi kulkeva kokonaisvirta.. Lausekkeessa \vec{n} on normaalivektori ja $d\vec{l}$ on käyräalkio. Kyseinen lauseke (20) on nimetty Ampèren kiertosäännöksi. [13, s. 67–68] Silmukkaan vaikuttava voima on

$$\vec{F} = \oint_C I d\vec{l} \times \vec{B} . \quad (21)$$

Tilanteessa, jossa magneettikenttä on vakio ja kun virta ei riipu paikasta, on virtasilmukkaan vaikuttava voima nolla. Silmukkaan kuitenkin vaikuttaa vääntömomentti, joka pyrkii kääntämään silmukan pinnan kohtisuoraan magneettikenttään nähden. [13, s. 68–69]

Kolmiulotteisessa avaruudessa tarvitsee ottaa huomioon varaukseen vaikuttavat sähköinen - ja magneettinen voima

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) . \quad (22)$$

Vaikka aineeseen vaikuttava sähköinen voima on huomattavasti voimakkaampi kuin magneettinen voima, voi aineessa kulkea suuria virtoja ja aine voi olla voimakkaasti magnetoitunut. [13, s. 73–74]

2.1.3 Sähkömagneettinen induktio

Tarkastellaan ajasta riippuvia kenttiä. Sähköstaattiselle kentälle $\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$, mutta jos sähkökenttä ei ole staattinen, silmukkaan C indusoituu sähkömotorinen voima (smv)

$$E_{smv} = \oint_C \vec{E}' \cdot d\vec{l} , \quad (23)$$

jossa $\vec{E}'(\vec{r})$ kuvaa sähkökenttää silmukka-alkion $d\vec{l}(\vec{r})$ kohdalla. Lauseke (23) voidaan kirjoittaa myös silmukan läpäisevän magneettivuon muutoksen mukaan muotoon

$$E_{smv} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS , \quad (24)$$

jota kutsutaan Faradayn induktiolaiksi. Laki pätee reittiä C pitkin lasketulle integraalille. Mikäli silmukka on todellinen virtapiiri, sähkökenttä \vec{E}' aiheuttaa piiriin induktiovirran. Faradayn laki differentiaalimuodossa saadaan Stokesin kaavan (18) avulla muotoon

$$\int_S \nabla \times \vec{E} \cdot \vec{n} dS = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} dS , \quad (25)$$

kun kentät \vec{E} ja \vec{B} ovat määritetty samassa koordinaatistossa ja silmukka C on levossa. Silmukan ollessa muuten mielivaltainen, voidaan merkitä, että

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (26)$$

ja tämä on usein muoto, jona Faradayn laki esitetään. Kyseisessä laissa miinus-merkintä kuvaa Lenzin lakia: muutoksen aiheuttama induktiovirta vastustaa muutosta. Eli induktiovirtaan tarvittava energia otetaan systeemistä ja mikäli induktiovirran vaikutukset halutaan kumota, joudutaan tekemään työtä. [13, s. 89–91]

Eristetyssä silmukassa magneettikenttä on riippuvainen siinä kulkevasta sähkövirrasta I ja muuttumattomassa kiinteässä silmukassa vuon muutos $d\Phi$ johtuu virran muutoksesta. Näiden välistä muutosta

$$L = \frac{d\Phi}{dI} \quad (27)$$

kutsutaan induktanssiksi tai itseinduktanssiksi. Nyt voidaan sähkömotorinen voima kirjoittaa virtasilmukassa muodossa

$$E_{smv} = -L \frac{dI}{dt} . \quad (28)$$

Tarkasteltaessa m silmukkaa, joissa kulkee vuot, niiden yhteisvaikutuksessa saadaan summattua

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^m \Phi_{ij} . \quad (29)$$

Mikäli vuot ovat riippuvaisia ajasta, silmukkaan indusoituu sähkömotorinen voima

$$E_{smv_i} = -\sum_{j=1}^m \frac{d\Phi_{ij}}{dt} . \quad (30)$$

Kun silmukat ovat kiinteitä ja niiden vuot riippuvat silmukan virran muutoksesta, kyseistä suhdetta kutsutaan keskinäisinduktanssiksi

$$M_{ij} = \frac{\Phi_{ij}}{dI_j} , i \neq j . \quad (31)$$

[13, s.93–94] Kun otetaan huomioon virtasilmukan vastus R , jännite saadaan muotoon

$$RI = V + E_{smv} , \quad (32)$$

jossa V on jännitelähde. Jännitteen tekemä työ siirtää varauksia ja varausten liike on virtaa ajan muuttuessa ($dq = Idt$). Differentiaalisen varauksen tekemä työ saadaan jännitelähteen avulla kirjoitettuna

$$Vdq = VIdt = -E_{smv}Idt + I^2Rdt = Id\Phi + I^2Rdt , \quad (33)$$

jossa termi $I^2 R dt$ kuvaa resistiivisen energian häviöitä ja $I d\Phi$ kuvaa työtä, joka tarvitaan magneettikentän muuttamiseen. Tämä vastaa indusoitunutta sähkömotorista voimaa vastaanavaa työtä

$$dW_V = I d\Phi . \quad (34)$$

Mikäli systeemi koostuu useammasta virtapiiristä, saadaan

$$dW_V = \sum_{i=1}^m I_i d\Phi_i \quad (35)$$

ja $d\Phi_i$ kuvaa vuon muutosta, joka tapahtuu silmukoissa

$$d\Phi_i = \sum_{j=1}^m \frac{d\Phi_{ij}}{dI_j} dI_j . \quad (36)$$

Magneettinen energia silmukalle on

$$U = \int dW_V . \quad (37)$$

[13, s. 99–100] Esimerkiksi kondensaattorin toiminnassa havaitaan siirrosvirta, joka havaitaan kondensaattorin levyissä, kun sähkövirta tuo varauksia levyille, mutta levyiltä ei poistu saman nopeudella varauksia. Siirrosvirta mahdollistaa myös tyhjiössä kulkevien aaltojen etenemisen. [13, s. 110, 116]

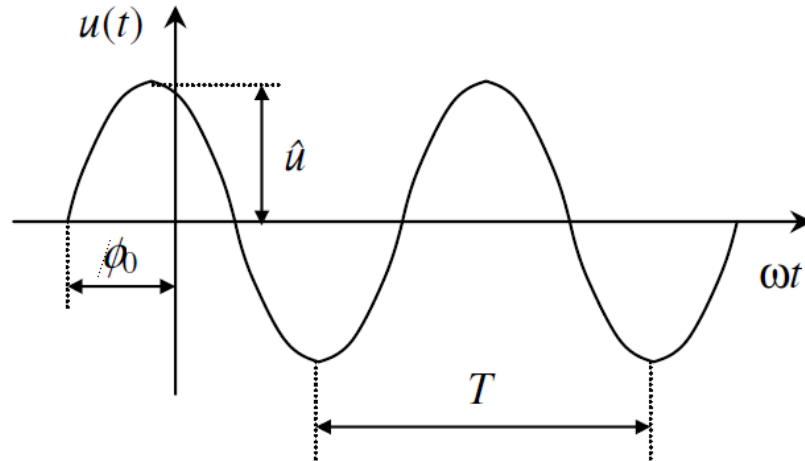
2.2 Aaltoliike

Aaltoja on löydettävissä ympäriltämme useassa muodossa: valo, vedenpinnan aaltoilu, radio- ja tv-lähettykset, äänet, maanjäristykset, sekä sähkömagneettiset aallot ja hiukkasten aineaallot. Mekaaninen aalto tarvitsee edetäkseen väliaineen. Ei-mekaanisista aalloista, esimerkiksi sähkömagneettinen aalto voi edetä tyhjiössä. Aalto etenee aallon etenemisnopeudella v , ja väliaineen värähdellessään tasapainotilansa ympärillä. Tämä kuitenkin tarkoittaa, ettei väliaine etene. Koska tasapainoisessa systeemissä liikkuva aalto horjuttaa tasapainotilaa se kuljettaa energiaa. [1, s. 3–5]

Aallon poikkeaman suunnan perusteella ne voidaan jakaa poikittaisiksi - ja pitkittäiseksi aalloksi. Poikittaisena aaltona voidaan pitää köydessä etenevää aaltopulssia, jonka poikkeama on kohtisuorasti etenemissuuntaan nähden. Poikittaisen aallon etenemisnopeuteen vaikuttaa massa pituusyksikköä kohti (lineaarinen massatiheys) ja jännitys, joka vaikuttaa palautuvaan voimaan [1, s.12–13]. Massa hidastaa ja jännitys kasvattaa nopeutta. [1, s. 4]

Kun sylinterissä olevaan nesteeseen aiheutetaan männän edestakaisliikkeellä aaltoliike, jolloin väliaineen hiukkasten poikkeaminen tasapainotilastaan tapahtuu etenemissuunnan mukaisesti. Tässä tapahtuva ilmiö on nimeltään pitkittäinen aalto. [1, s. 4]

Jaksollinen aalto koostuu peräkkäisistä aaltopulsseista. Esimerkiksi köydessä etenevä jaksollinen aalto aiheuttaa sen, että värähtely näkyy koko köydessä. Kun aaltoliike köydessä on harmoninen, se on sinimuotoinen, niin kuin kuvassa 1. [1, s. 5–6] Ideaalitilanteessa sähköverkossa vaikuttava vaihtosähköjännite $u(t)$ on sinimuotoinen.



Kuva 1. Jaksollinen siniaalto. Kuvassa ϕ_0 kuvaa nollavaihekulmaa, joka kuvaa signaalin vaihesiirtoa, \hat{u} on jännitteen huippuarvo ja T on jaksonpituus. [23]

Aallosta voidaan määrittellä sen korkeus eli amplitudi A (kuvassa 1 jännitteen huippuarvo \hat{u}) ja jakson pituus T , jonka avulla saadaan aallon taajuus $f = 1/T$. Sähköverkossa jännitteen taajuus on 50 Hz. Kulmanopeus eli kulmataajuus on $\omega = 2\pi f$. Aallonpituus λ kuvaa aallonpituutta, kun se alkaa toistaa itseään. Nopeus $v = \lambda f$ kuvaa aaltomuodon etenemistä yhden aallonpituuden verran. [1, s. 6]

Merkitään aaltofunktio xy -koordinaatistossa

$$y = y(x, t), \quad (38)$$

jossa funktio kertoo poikkeaman y pisteessä x ajanhetkellä t . Siniaallolle, joka lähtee liikkeelle origosta, aaltofunktioksi saadaan

$$y(x, t) = A \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right]. \quad (39)$$

Kun merkitään aaltolukua $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ja taajuutta $f = \omega/(2\pi)$ saadaan

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t). \quad (40)$$

Toisinaan aaltoluvulla tarkoitetaan $1/\lambda$ ja edellä merkittyä $2\pi/\lambda$ kutsutaan kulma-aaltoluvuksi (huomaa yhtäläisyys taajuuden ja kulmataajuuden kanssa). [1, s. 8–10]

Tarkemmassa tarkastelussa hyödynnetään aaltoyhtälöä, jossa voidaan tarkastella pulsseja, aaltoja, häiriöitä, niiden sinimuodosta tai jaksoista riippumatta. Aaltoyhtälöön päästään aaltofunktion avulla. Tarkastellaan aallon pisteen nopeutta y -akselin suuntaisesti. Kun x pidetään vakiona ja y derivoidaan ajan t suhteen aaltofunktiosta (40) saadaan nopeudeksi

$$v_y(x, t) = \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \omega A \sin(kx - \omega t) \quad (41)$$

ja kiihtyvyydeksi

$$a_y(x, t) = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = -\omega^2 A \cos(kx - \omega t) = -\omega^2 y(x, t) . \quad (42)$$

Derivaatat x :n suhteen saadaan, kun pidetään t vakiona. Nämä kuvaavat aallon muotoa; ensimmäinen derivaatta antaa aallon kulmakertoimen kyseisenä ajanhetkenä ja toinen derivaatta

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = -k^2 A \cos(kx - \omega t) = -k^2 y(x, t) \quad (43)$$

kuvaa aallon kaareutumista. Kun merkitään $\omega = vk$ yhtälöistä (42) ja (43) saadaan

$$\frac{\partial^2 y(x, t)/\partial t^2}{\partial^2 y(x, t)/\partial x^2} = \frac{\omega^2}{k^2} = v^2 , \quad (44)$$

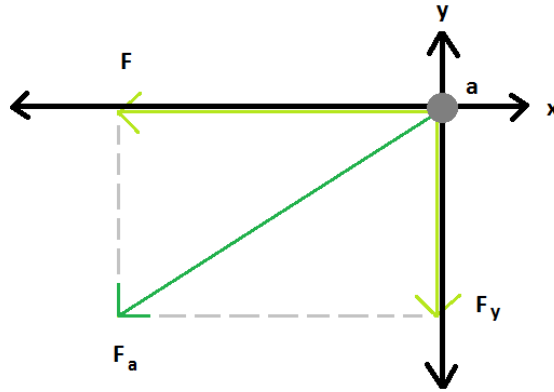
joka saadaan muotoon

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} , \quad (45)$$

jota kutsutaan aaltoyhtälöksi.[1, s. 11–12]

2.2.1 Aaltoliikkeen energia

Tarkastellaan kuvan 2 mukaista tilannetta, jossa a on aallon piste, johon vaikuttaa aallon suuntainen voima F_a (tummanvihreä nuoli).



Kuva 2. Piste *a* kuvaa *xy*-koordinaatistossa olevaa värähtelevää pistettä aallossa. Perustuu lähteeseen [1, s. 15]

Kuvassa voima on jaettu kahteen komponenttiin F ja F_y . Kuvan perusteella voidaan kirjoittaa

$$F_y(x, t) = -F \frac{\partial y(x, t)}{\partial x}. \quad (46)$$

Voimien F_y/F suhteesta saadaan kulmakerroin. Piste *a* liikkuessa *y*-akselin suhteen voima F_y tekee työtä, jonka hetkellinen teho on

$$P(x, t) = F_y(x, t)v_y(x, t) = -F \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \frac{\partial y(x, t)}{\partial t}. \quad (47)$$

Kun tarkastellaan sinimuotoisen aallon energiaa, käytetään aaltofunktiota (40) ja saadaan

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial x} = -kA \sin(kx - \omega t) \quad (48)$$

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \omega A \sin(kx - \omega t). \quad (49)$$

Näiden (48) ja (49) perusteella aallon pisteen tehoksi tulee

$$P(x, t) = Fk\omega A^2 \sin^2(kx - \omega t). \quad (50)$$

Seuraavaksi tarkastellaan peruskäsitteitä aallon etenemisestä.

2.2.2 Aallon eteneminen

Kun aalto etenee väliaineessa ja kohdatessaan sen reunan, aalto heijastuu. Mikäli heijastunut aalto ja alkuperäinen aalto kohtaavat samassa tilassa, kutsutaan ilmiötä interferenssiksi. Heijastuvat aallot toisinaan vahvistavat tai heikentävät toisiaan riippuen aaltojen vaihe-erosta. Aaltojen summautuessa toisiinsa puhutaan resultanttiaallosta. Äärimmäisessä tilanteessa, jossa aallot ovat vastakkaisissa vaiheissa, niiden yhteisvaikutuksena syntyvän resultanttiaallon korkeus on nolla. [1, s. 21]

Sähköjohdossa etenevä aalto on heijastuva aalto, joka kulkee johdon alkupäästä loppupäähän. Aalto on jokaisessa johdon kohdassa etenevän ja heijastuvan jännite-/virta-aallon summa. Johdossa ilmenevät häviöt pienentävät aallon amplitudia eksponentiaalisesti johdolla edetessä alkupäästä loppupäähän. [2, s. 62] Sähköverkossa esiintyviä resultanttiaaltoja ja ilmiöitä tarkastellaan tarkemmin luvussa yliaalto.

2.2.3 Sähkömagneettiset aallot

Muuttuva sähkökenttä toimii magneettikentän lähteenä ja muuttuva magneettikenttä sähkökentän lähteenä. Sähkömagneettiset aallot eivät tarvitse edetäkseen väliainetta. Maxwellin yhtälöinä tunnetaan Gaussin, Amperen ja Faradayn laki. Gaussin laki sähkökentälle selittää sähkövarauksien toimivan sähkökentän lähteinä:

$$\oint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad (51)$$

jossa pinnan sisällä olevasta varauksesta Q syntyy suljetun pinnan A läpi kulkeva sähkövuo (\mathbf{E} on sähkökentän voimakkuus). Gaussin laki magneettikentälle

$$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (52)$$

kertoo, että ei ole olemassa magneettisia varauksia, jotka voisivat toimia magneettikentän lähteinä. Magneettivuo on aina nolla suljetun pinnan A läpi ja yhtälön \mathbf{B} on magneettivuon tiheys. Amperen laki kuvaa magneettikentän syntyä

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(i_c + \epsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} \right), \quad (53)$$

jossa nähdään sidokset suljetun silmukan C virran ja silmukan kohdalla vaikuttavan magneettivuon tiheyden välillä. Termi $\epsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$ kuvaa siirtymävirtaa, jossa ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys ja Φ_E kuvaa magneettivuota. Sähkökentän voimakkuuden \mathbf{E} ja magneettivuon muutoksen sidoksisuus määritellään Faradayn laissa

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_E}{\partial t}, \quad (54)$$

joka kuvaa muuttuvan magneettikentän synnyttävän sähkökentän. [1, s. 52–54]

Tarkastellaan sinimuotisia sähkömagneettisia aaltoja tyhjiössä, joille voidaan kirjoittaa poikittaisen aallon aaltofunktioiksi

$$E_y(x, t) = E_{max} \cos(kx - \omega t) \quad (55)$$

$$B_z(x, t) = B_{max} \cos(kx - \omega t), \quad (56)$$

joissa E_{max} ja B_{max} kuvaavat kenttien maksimiarvoja, $k = 2\pi/\lambda$ on aaltoluku ja $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus. Aaltofunktion liikesuunta on xyz-koordinaatistossa x-akselin suuntainen ja sähkökentänvoimakkuus ja magneettivuon tiheys ovat kohtisuorassa tähän ja toisiinsa nähden (yksittäiset komponentit ovat esimerkiksi y- ja z-akselin suuntaiset). [1, s. 58]

Tyhjiössä maksimiarvojen relaatio on

$$E_{max} = cB_{max} . \quad (57)$$

Tyhjiössä etenevä sähkömagneettinen aalto kuljettaa energiaa ja aallon energiatiheys on

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 , \quad (58)$$

jossa μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti. [1, s. 60]

Kun tarkastelu tehdään väliaineessa, tarvitsee ottaa huomioon väliaineen ominaisuudet, jotka näkyvät seuraavissa suureissa: permittiivisyys

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 , \quad (59)$$

jossa ε_r on suhteellinen permittiivisyys. Permeabiliteetti

$$\mu = \mu_r \mu_0 , \quad (60)$$

jossa μ_r on suhteellinen permeabiliteetti. Valon nopeuden c tilalle merkitään nopeus

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} \quad (61)$$

ja taitekertoimeksi

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\varepsilon_r\mu_r} . \quad (62)$$

[1, s. 58–59] Tarkastellaan esimerkiksi pistettä tyhjiössä, jonka sähkö- ja magneettikenttien arvot ovat nollat tasapainotilassa. Kun sähkömagneettinen aalto kohtaa pisteen sähkö- ja magneettikentissä on havaittavissa muutoksia. Tilanteen jälkeen pisteessä oleva tasapainotila palautuu ja arvot palautuvat nolnaan. [1, s. 52] Sama ilmiö tapahtuu myös sähköverkossa, kun sähkömagneettinen aalto etenee sähköverkossa.

2.3 Yliaallot

Sähköverkossa on useita tekijöitä, jotka vaikuttavat verkkojännitteen sinimuotoon häiritsevästi, mikä voi aiheuttaa toimintahäiriöitä sähkölaitteissa, jotka vaativat lähes puhdasta siniaaltoa. Sähkön laatuun vaikuttaa taajuus, jännitepiikit, yliaallot, jännitteen nopeat ja

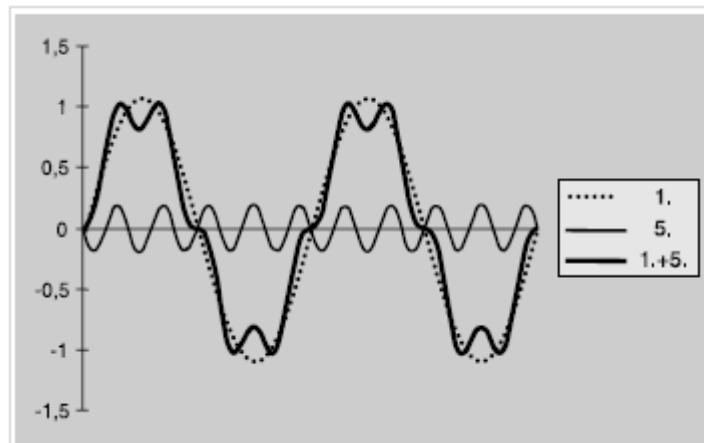
hitaat vaihtelut, jännitetaso, epäsymmetria kolmivaihejärjestelmässä, tasajännitekomponentit, keskeytykset, sekä käyttöoikeudelliset rajoitukset. [12, s. 3]

Yliaallot numeroidaan perusaallon taajuuden monikerran mukaisesti. Esimerkiksi viiden yliaallon taajuus on 250 Hz, kun perustaajuutena on, Suomen sähköverkossakin käytössä oleva, 50 Hz. Taulukkoon 1 on koottu yliaallot yhdeksänteen yliaaltoon asti.

Taulukko 1. 50 Hz taajuisen siniaallon yliaaltojen numerointi. Perustuu lähteeseen [12, s. 6]

Nro	perus	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450

Esimerkki yliaallon vaikutuksesta nähdään kuvassa 3, jossa viides yliaalto summautuu perusaallon kanssa resultanttiaalloksi.



Kuva 3. Levein käyrä kuvaa perusaallon ja viidennen yliaallon resultanttiaaltoa. [31, s. 7]

Kuvan resultanttiaallolla on kaksi amplitudin huippuarvoa. Yliaaltoja voidaan mallintaa Fourier-analyysin avulla. Fourier-analyysissä epäsinimuotoinen aaltomuoto voidaan ajatella koostuvan useista eri taajuuksista siniaalloista. Analyysin avulla aaltomuoto saadaan eroteltua osa-aalloiksi. [12, s. 3]

Sähköverkossa osa kuormista toimii epälinearisesti virran ja jännitteen suhteen, aiheuttaen sähköverkkoon yliaaltoja. Niiden verkosta ottama sähkövirta on epäsinimuotoinen, jolloin aallon muoto ei ole sinimuotoinen. [12, s. 3] Epälineaarisia kuormia ovat moottorin käynnistimet, tietokoneet, nopeussäädetyt käytöt, elektroniikkalaitteet, hitsauslaitteet, ja UPS-laitteet (sisältää katkottoman tehollähteen).

Yliaallot aiheuttavat ylimääräistä lämpenemää kaapeleissa, muuntajissa, moottoreissa, generaattoreissa ja kondensaattoreissa. Näiden lisäksi toimintahäiriöitä voi ilmetä tietokoneissa, elektronisissa näytöissä ja valoissa, sekä mittalaitteiden tuloksissa. [31, s. 8]

Yliaaltolähteeksi tiedetään suuntaajat ja usein muut yliaaltolähteet ovat jänniteydiaaltojen lähteitä [12, s. 4]. Yliaallot voidaan poistaa sähkölaitteen rakenteellisilla muutoksilla tai ulkoisella suodatuksella. Rakenteellisia muutoksia ovat esimerkiksi 12- tai useampi pulssisemmän käytön käyttäminen, säädön tai sisäisen suodatuksen parantaminen. [31, s. 17]

2.4 Virranahto

Pätötehohäviöiden P_h minimointi johdolla onnistuu johdon resistanssin vähentämisellä, sillä ne ovat suoraan verrannollisia toisiinsa. Kolmivaihejohdolla pätötehohäviöksi saadaan $P_h = 3RI^2$. Resistanssin suuruuteen vaikuttaa johdinaineen resistiivisyys ρ ja johtimen pinta-ala. Johdinaineen valinnassa on syytä huomioida myös sen mekaaninen kestävyys ja hinta. [2, s. 46]

Tasa- ja vaihtovirralla johtimen resistanssit ovat erisuuret. Vaihtovirtaresistanssi on suurempi ja aiheuttaa vaihtovirrassa esiintyvän virranahdon. Virranahdolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa taajuuden kasvaessa osa virrasta pakkautuu johtimen pintaan, jolloin virran kokema johtimen pinta-ala on pienentynyt ja resistanssi hieman kasvanut. [2, s. 46]

3. SÄHKÖLAITTEIDEN JA -VERKON SÄHKÖMAGNEETTISILLE OMINAISUUKSILLE ASETETUT VAATIMUKSET

Sähkölaitteiden ja -laitteistojen käytössä on huomioitava niiden turvallisuus käyttäjälle ja ympäristölle. Laitteiden tulisi toimia muiden laitteiden kanssa, niin etteivät ne aiheuta muille laitteille häiriötä. Tässä luvussa käsitellään Suomessa vallitsevia vaatimuksia, jotka määrittävät sähköturvallisuuslaissa, EMC-direktiivissä, sekä sähkömagneettisiin ominaisuuksiin liittyvissä standardeissa. Vaatimukset tulisi huomioida jo sähkölaitteiden suunnittelussa ja ne konkretisoituvat siinä vaiheessa, kun sähkölaitteet kytketään sähköverkkoon ja otetaan käyttöön. Ilmiöt sähköverkossa koskettavat verkkoyhtiötä, sekä kaikkia sähkökäyttäjiä ja -tuottajia jotka ovat kytkettynä sähköverkkoon. Verkkopalveluehtoja sovelletaan sähköverkkopalvelussa ja ne ovat osa sähköverkkoon kytketyn sähkökäyttäjän ja verkonhaltijan välistä sähköverkkosopimusta.

3.1 Sähköturvallisuuslaki

Sähköturvallisuuslaissa asetetaan vaatimuksia sähkölaitteille ja -laitteistoille, jottei niiden käytöstä aiheudu ympäristölle, muille laitteille, tai ihmisille vahinkoa tai häiriötä. Laissa myös määrittetään laitteen haltijan vahingonkorvausvelvollisuus. Laitteet eivät saa aiheuttaa häiriötä sähkövirran tai magneettikentän välityksellä. Näitä häiriöitä voivat aiheuttaa sähköntuottamisessa, siirtämisessä, jakelussa, tai käytössä olevat laitteet. [26] Sähkömagneettisten aaltojen aiheuttamat häiriöt voivat siirtyä ilman kautta lähellä oleviin sähkölaitteisiin tai johtimien kautta, jolloin vaikutukset voivat näkyä hyvinkin kaukana, esimerkiksi muuntopiirin toisessa käyttöpaikassa.

Sähköturvallisuuslain luku 5 a (21.12.2007) tarkentaa ohjeita sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyen. Luvun ohjeita ei sovelleta, jos sähkölaite tai -laitteisto kuuluu ilmailulain (1242/2005) piiriin, tai sen aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt eivät voi vaikuttaa muun laitteen toimintaan, tai sen toiminta ei häiriinny muiden aiheuttamista sähkömagneettisistä häiriöistä, tai sähkömagneettinen yhteensopivuus säädetään muussa laissa. [26] Yleiset ohjeet sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta määritetään EMC-direktiivissä, joka esitellään seuraavassa luvussa.

3.2 EMC-direktiivi

Sähkölaitteiden yhteensopivuuden (electromagnetic compatibility, EMC) ja häiriöiden vähentämiseksi, sekä vapaan liikkuvuuden varmistamiseksi on laadittu EMC-direktiivi 2004/108/EY. Tukesin verkkosivuilla mainitaan, että direktiivillä pyritään suojaamaan

radioliikenteen, sähkö- ja tietoliikenneverkkojen toiminta, jotka ovat tärkeässä roolissa nyky-yhteiskunnan normaalin toiminnan ylläpitämisessä. Direktiivin piiriin kuuluvat loppukäyttäjien sähkölaitteet ja kiinteät asennukset. EMC-direktiivi on huomioitu sähköturvallisuuslaissa (410/1996), sekä valtioneuvoston asetuksessa (1466/2007) sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. [8]

EMC-direktiivissä 2004/108/EY vapaa liikkuvuus ei koske kiinteitä asennuksia, jotka ovat määritetty pysyvään käyttöön. Direktiivin piiriin eivät kuulu radio- ja telepäätelaitteet, joille on määritelty omat sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen asetetut asetukset direktiivissä 1999/5/EY, jolla päästään samaan lopputulokseen kuin EMC-direktiivillä. [8] EMC-direktiivi ei koske myöskään ilma-aluksia tai ilma-alukseen asennettavia laitteistoja, koska niille käytetään unionin ja kansainvälisen tason erityissääntöjä. [10, s. 2]

Direktiivissä mainitaan, että laitteiden ja laitteistojen on täytettävä standardeissa asetetut vaatimukset. Sähkölaitteiden valmistajien on huomioitava, etteivät sähköverkkoon liitetyt laitteet saa kohtuuttomasti heikentää verkkopalvelutoimintaa normaaleissa olosuhteissa. Verkonhaltija on myös valmistettava verkkonsa niin, ettei laitteiden valmistajille synny liian suuria rasitteita. [9, s. 2]

Markkinoille ei saa laskea laitteita, jotka eivät täytä vaadittavia vaatimuksia ja joita ei ole merkitty CE-merkinnällä. Direktiivissä korostetaan, että laitevalmistajalla on vastuu laitteen vaatimustenmukaisuudesta. Ja muistutetaan, että tarvittaessa valmistaja voi käyttää tähän arviointiin ulkopuolista arviointilaitosta. Sähkömagneettinen yhteensopivuus tulee todentaa tähän vaikuttavilla ilmiöillä ja laitteen on täytettävä asetetut vaatimukset. [9, s. 2]

Kiinteät asennukset mukaan lukien suuret koneet ja verkot, jotka eivät saa yhdessä tai erikseen aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä. Niihin ei kuitenkaan erikseen vaadita CE-merkintää tai vaatimustenmukaisuusvakuutusta. Tämä koskee myös laitteita, jotka on tarkoitettu osaksi kiinteää asennusta ja joita ei ole mahdollista markkinoilta erikseen hankkia. Huomioitavaa kuitenkin on, ettei kyseinen laite saa heikentää kiinteän asennuksen vaatimustenmukaisuutta. [9, s. 2]

20.4.2016 tuli käyttöön uusittu EMC-direktiivi (2014/30/EU), joka julkaistiin maaliskuussa 2014 [8]. Uusi direktiivi tarkentaa aiempaa direktiiviä ja sen pyrkimyksenä on, että eurooppalaiset standardit olisivat yhdenmukaisempia sekä tukea tervettä kilpailua talouden toimijoille. Direktiivissä korostuu taloudentoimijoiden velvollisuudet ja vastuunkantaminen markkinoille päästetyistä tuotteista. Tähän ryhmään kuuluvat tuotteen valmistaja, valmistajan valtuuttama edustaja, maahantuoja, sekä jakelija. Laitteen vaatimustenmukaisuudesta vastuu pysyy valmistajalla. [10]

Laitteet voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan eri kokonaisuuksiin, joiden vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt riippuvat laitteiden riskitasosta. Mikäli laite voidaan luokitella useampaan kokonaisuuteen, käytetään sitä vaatimustenmukaisuusarviointia,

joka todennäköisimmin aiheuttaa suurimmat häiriöt ja on kaikkein herkin häiriöille. Vakuudeksi laitevalmistajien on laadittava EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus, josta voidaan todentaa laitteen täyttävän direktiivin vaatimukset, sekä unionin muun asiaankuuluvan yhdenmukaistamislainsäädännön. [10, s. 3]

Uudistetussa direktiivissä tarkennetaan, että valmistajien on säilytettävä laitteen tekniset asiakirjat ja EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus kymmenen vuoden ajan, laskettuna laitteen markkinoille saattamisesta. Laitteessa tai laitteen mukana tulee olla myös asiakirja, jossa ilmoitetaan valmistajan nimi, rekisteröity tuotenimi tai rekisteröity tavaramerkki, sekä postiosoite. [10]

Muiden taloudentoimijoiden on huolehdittava, että heillä on laitteelle direktiivissä vaaditut asiakirjat ja ne ovat pyydettyä mahdollista esittää viranomaisille. Laitteiden kuljetus on tapahduttava niin, ettei se heikennä laitteen vaatimustenmukaisuutta. [10]

3.3 Mittauslaitedirektiivi

Mittauslaitedirektiivi 2004/22/EY eli MID (Measuring Instrument Directive) julkaistiin 31. Maaliskuuta 2004. Direktiivi asettaa vaatimuksia mittauslaitteille ja -järjestelmille, jotka ovat listattu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Mittauslaitteet, ja -järjestelmät, joihin mittauslaitedirektiiviä sovelletaan. [11, s. 4–5]

Mittauslaite, -järjestelmä	Tunnus
vesimittari	MI-001
kaasumittari ja tilavuuden muunnoslaite	MI-002
sähköenergiamittari	MI-003
lämpöenergiamittari	MI-004
nesteiden (ei veden) määrän jatkuvaan dynaamiseen mittaukseen tarkoitettu mittausjärjestelmä	MI-005
automaattinen vaaka	MI-006
taksimittari	MI-007
kiintomittari	MI-008
dimensiomittauslaite	MI-009
pakokaasuanalysaattori	MI-010

Direktiivissä on maininta, että mittalaitteiden sähkömagneettinen yhteensopivuus kuuluu olennaisesti tämän direktiivin piiriin. Direktiivi asettaa toimintavaatimuksia, kuitenkin niin ettei se estä tekniikan kehittymistä. Jotta vaatimustenmukaisuuden todistaminen ja arviointi olisi helpompaa, suositellaan käyttämään yhdenmukaisia standardeja, tai ohjeellisia asiakirjoja, jotka perustuvat Mittauslaitedirektiiviin. Kuitenkin niin, että standardien ja asiakirjojen noudattaminen on vapaaehtoista. [11, s. 3]

Jatkuvan mittalaitteiden kehityksen takaamiseksi, vaatimustenmukaisuuden arviointiperusteet on mahdollista päivittää. CE-merkintä voidaan kiinnittää valmistusprosessin aikana, kun direktiivissä asetetut arviointimenettelyt on suoritettu. Käytössä on myös täydentävä metrologinen merkintä. [11, s. 3–4]

Direktiivin mittalaittekohtaiset vaatimukset ovat direktiivin liitteessä 1. Ensimmäisenä vaatimuksena on mittalaitteelle **sallitut mittausvirheet**, jotka riippuvat käyttöympäristöstä. Esimerkiksi jos mittari on pysyvässä tai jatkuvassa sähkömagneettisessa kentässä, jolloin testissä suorituskyvyn on oltava suurimman sallitun virheen rajoissa. Valmistajan on määriteltävä missä mittaria käytetään, ottaen huomioon ilmastollinen -, mekaaninen - ja sähkömagneettinen ympäristö. [11, s. 17–18]

Sallittujen mittausvirheiden lisäksi mittalaitteille on asetettu myös muita toiminnollisuuden liittyviä vaatimuksia, joita ovat:

- **Uusittavuus**, mittaustuloksien oltava samat, kun olosuhteet pysyvät samoina
- **Toistettavuus**, olosuhteiden pysyessä samoina on peräkkäisten tulosten oltava yhtäpitäviä
- **Erottelukyky ja herkkyys**
- **Kestävyys**, metrologiset (mittaussuoritus) ominaisuudet säilyvät valmistajan arviomukaisen ajan
- **Luotettavuus**, poistettava epätarkkuutta aiheuttavat tekijät
- **Soveltuvuus**, suunniteltu käyttötarkoitukseensa ilman vilpin mahdollisuutta
- **Suojaus tietojen turmeltumista vastaan**, kun mittari liitetään muuhun laitteeseen
- **Laitteen tiedot**, oltava laitteessa tai sen mukana
- **Tuloksen näyttäminen** näytöllä tai tulosteena
- **Tiedon jatkokäsittely**, niin että mittauslaite tallentaa tiedon kaupan yksilöintiin, mittausta ei voida toistaa ja mittauksen päätyttyä siitä jää pysyvä todiste
- **Vaatimustenmukaisuuden arviointi** on oltava helposti todennettavissa. [11, s. 19–22]

Toiminnallisten ominaisuuksien lisäksi sähköenergiamittareilta vaaditaan ominaisuuksia sietää siihen kohdistuvia häiriöitä, niin että sen mittausominaisuudet eivät siitä häiriinny. Tässä tarkastelussa otetaan huomioon sähköenergiamittareille asetetut vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt, joita sovelletaan asuinympäristössä, liiketiloissa ja kevyen teollisuuden tiloissa käytössä oleville sähkömittareille. Mittarin kanssa voidaan käyttää mittamuuntajaa, joita kyseiset vaatimukset eivät koske. Standardissa SFS 3381 (Vaihtosähköenergian mittaaminen. Mittauslaitteistot) kerrotaan, että mittamuuntajan on täytettävät standardeissa SFS-EN 61869-1, -2, -3 ja -5 asetetut vaatimukset.

Mittarin suojauksen suunnittelussa on otettava huomioon pitkä- ja lyhytkestoiset häiriöt, joiden ei sallita vaikuttaa tarkkuuteen yli kriittisten raja-arvojen, koska mittarin metrologiset ominaisuudet eivät saa kärsiä. Kohtuullisessa ajassa häiriön jälkeen on mittari toimittava sallittujen raja-arvojen puitteissa, mittaustoimintojen suojauksen on toimittava,

mittaustiedot ennen häiriötä on pystyttävä palauttamaan, eikä se rekisteröi energiaa muutosarvon ylittyessä häiriön aikana. Mikäli käyttöjännite on nimellisen alapuolella, mittarin virhe saa olla enintään +10 %. [11, s. 61]

Vaatimuksilla varmistetaan, että sähkömittari toimii oikein ja sen on siedettävä sähköverkossa esiintyviä jännitteellisiä ja virrallisia ilmiöitä, ilman että se menettää kyvyn tuottaa oikeellista mittaustietoa. Mittaustietojen oikeellisuus on tärkeää kaikkien osapuolien kannalta.

3.4 Standardit

Luvun standardit koskevat sähkölaitteiden yhteensopivuutta, sähköverkkotiedonsiirtoa ja suojausmenetelmiä. Sähkölaitteiden yhteensopivuudella varmistetaan kaikkien sähkölaitteiden oikeanlainen toimiminen muiden laitteiden kanssa. Sähköverkkotiedonsiirtoon liittyvässä standardissa käsitellään siihen tarkoitettu taajuuskaista ja signaalin käyttö.

Kolmantena aiheena ovat sähkömagneettisten häiriöiden suojausmenetelmät. Kyseisestä standardista selviää tiedetyt sähkömagnettisten häiriöiden lähteet, kaapeleiden vaikutukset sekä toimenpiteet, joilla saadaan vähennettyä sähkömagneettisten häiriöiden vaikutuksia.

3.4.1 EMC, SFS 6000-1

Standardissa SFS 6000-1 määritellään sähkölaitteille ominaisuuksia, jotka vaikuttavat laitteiden yhteensopivuuteen, ja näin ollen voivat aiheuttaa toisille laitteille ja sähkösyötölle häiriöitä. Nämä ominaisuudet liittyvät laitteen virtoihin, jännitteisiin, kuormitukseen, suuritaajuiseen värähtelyyn, sekä lisämaadoituksen tarpeeseen. Haitallisia virtoja ovat käynnistys-, yliaalto- ja vuovirrat, sekä suojajohtimen liian suuret virrat. Jännitteeseen vaikuttavat lyhytaikaiset ylijännitteet, sekä alijännitteet. [20, s. 58]

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä (1694/1993) on asetettu Suomessa käytettäville sähkölaitteille vaatimukset sähkölaitteiden turvallisuudesta. Lisäksi sähkölaitteiden ja -laitteistojen on täytettävä sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen asetettu valtioneuvoston asetuksen (1466/2007) vaatimukset. [20 s. 11] Kaikilta sähkölaitteilta vaaditaan sähkömagneettinen yhteensopivuus asetettujen EMC-standardien mukaisesti. Standardissa mainitaan myös, että sähköasennuksen suunnittelijan on huomioitava vaihtoehdot, joilla saadaan vähennettyä indusoituvien ylijännitteiden ja sähkömagneettisten häiriöiden (EMI) vaikutuksia. [20, s. 58]

3.4.2 PLC, SFS-EN 50065-1

Standardi SFS-EN 50065-1 käsittelee sähköverkkotiedonsiirtoa (PLC) taajuusalueella 3...148,5 kHz, joka on jaettu kahdeksi osataajuusalueeksi. Taulukkoon 3 on kirjattu kyseisten taajuusalueiden eri käyttötarkoitukset.

Taulukko 3. Taajuusalueelle 3...148,5 kHz määritetyt käyttötarkoitukset.

Taajuusalue [kHz]	Käyttö
3...95	Pienjännitejakeluverkon valvonta ja ohjaus sovellukset, sekä käyttöpaikan energiakulutuksen mittaaminen
95...148,5	Sähkökäyttäjän analogiset ja digitaaliset sovellukset tai laitteiden ohjaus ja valvonta sovellus, kun asennettu laite on pienjänniteverkossa tai asuintilan ulkopuolella.

Taajuusalueella 125..140 kHz on mahdollista käyttää useampaa järjestelmää samanaikaisesti (myös sähköisesti yhdistetyssä) piensähköverkossa, koska käytössä on Carrier-sense multiple-access (CSMA) protokolla. Järjestelmien on käytettävä standardissa mainittua lähetyskäytäntöä, mutta ne voivat käyttää eri tiedonsiirtoprotokollia. [22, s. 10]

Laitteen käyttämälle signaaleille on määritetty spektrijakauma ja maksimikesto, niin että muut laitteet voivat kantoaallot havaita. Ominaisignaalin avulla voidaan merkitä taajuusosakaista, jolloin muut laitteet eivät tätä kaistaa käytä. Jotta useampien eri signaalien lähettäminen onnistuisi, lähettävät laitteet signaalin tietyllä ajanjaksolla satunnaisesti, ja odottavat tämän ajanjakson ajan, ennen kuin lähettävät uutta signaalia. Tällöin voidaan välttyä signaalien törmäyksiltä ja mikään laite ei varaa kaistaa turhaan. [22, s. 10]

Laitteessa on signaali-ilmaisimien avulla voidaan mitata milloin taajuuskaista on käytössä. Taajuus on käytössä, kun ollaan taajuusalueella 131,5...133,5 kHz ja signaalien tehollisarvo on vähintään 86dB(μV) ja sen kesto on vähintään 4 ms. Jos jakson pituus on 1,1 s ja signaalin lähetys on kestänyt enemmän kuin 80 ms, tulkitaan se virheelliseksi ja signaali nollataan, jotta toisten signaalien lähetys mahdollistuu. Signaalien lähettimet eivät voi toimia yhtäjaksoisesti yli 1 s ja seuraavan lähetyksen voi lähettää 125 ms kuluttua. [22, s. 10–12] Tiedonsiirtosignaalin lähetys tapahtuu digitaalimuodossa. Käytettyjä signaalien modulaatiotekniikoita on useita, ja niitä esitellään tarkemmin luvussa 4.4.

3.4.3 Suojausmenetelmät, SFS 6000-4-44

Standardissa SFS 6000-4-44 luvussa 444 käsitellään vaatimuksia ja suosituksia sähkölaitteiden sähkömagneettisten häiriöiden pienentämiseksi. Luku ei koske jakeluverkkoja. Standardissa esitettyjä asioita voidaan pitää osana EMC-direktiiviä ja valtioneuvoston asetuksen (1466/2007) edellyttämiä käytäntöjä. Sähkömagneettiset häiriöt vaikuttavat ohjaus- ja valvontajärjestelmiin, tietotekniikan laitteistoihin, yhteisantenniverkkoihin sekä prosessiautomaatiojärjestelmiin. Sähkömagneettisia häiriöitä voi ilmetä salamoiden, kytkentätoimenpiteiden, oikosulkujen ja sähkömagneettisen ilmiöiden aiheuttamista virroista. Suuria vaikutuksia aiheuttavat suuret metallisilmukat ja erilaiset sähköiset johtojärjestelmät, joissa voi samassa verkossa kulkea tehon- ja tiedonsiirto. [21, s. 11]

Sähköasennusten suunnittelijan ja -tekijän on huomioitava ja käytettäviä menetelmiä, joiden avulla voidaan pienentää sähkölaitteiden aiheuttamia sähkömagneettisia vaikutuksia. Sähkölaite, joka on herkkä sähkömagneettisille häiriöille, on suositeltavaa asentaa niin, ettei sen lähellä ole laitetta, jonka tiedetään olevan sähkömagneettisten häiriöiden lähde. Taulukkoon 4 on listattu tiedettyjä sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä. [21, s. 11]

Taulukko 4. Sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä. Perustuu lähteeseen [21, s.11–12]

Sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä
sähkömoottorit
induktiivisten kuormien kytkinlaitteet
loistelamppuvalaisimet
hitsauskoneet
tietokoneet
tasasuuntaajat
hakkurilaitteet
taajuusmuuttajat
hissit
muuntajat
keskukset
jakelukiskot

Useilla toimenpiteillä voidaan vaikuttaa sähkömagneettisten häiriöiden määrään. Seuraavaksi on listattu standardissa mainittuja toimenpiteitä, joilla voidaan pienentää sähkömagneettisten häiriöiden vaikutuksia:

1. Ylijännitesuoja ja/tai suodattimen asentaminen sähkömagneettisille häiriöille herkille laitteille
2. Kaapeleiden metallivaippojen yhdistäminen yhteiseen potentiaalintasausverkkoon, joka muodostaa sähkömagneettisen suojan elektronisille laitteille tasavirran taajuudesta pieniin radiotaajuuksiin
3. Induktiivisten silmukoiden välttäminen, käyttäen voima- ja tietoliikennekaapeleilla samaa reittiä
4. Voima- ja tietoliikennekaapelien erillään pitäminen, ja risteymien tekeminen on pyrittävä tekemään suorakulmaisesti
5. Konsentrisella johtimella varustettujen kaapeleiden käyttäminen. Johdin vähentää suojajohtimeen indusoituvia virtoja
6. Valmistajien ohjeiden mukaisten kaapeleiden ja suodattimien käyttö taajuusmuuttajien ja moottorien välillä
7. EMC-vaatimusten mukaisten tietoliikennekaapeleiden käyttö ja asennus valmistajan ohjeiden mukaisesti
8. Käytettäessä salamasuojajärjestelmää: voima- ja tietoliikennekaapelien erottaminen ukkosuojajärjestelmästä riittävällä etäisyydellä tai suojauksella
9. Käytettäessä vaipallisia tietoliikennekaapeleita: maadoitetun vaipan ja keskiosan kautta kulkevia vikavirtoja on rajoitettava
10. TT-järjestelmällä syötettyjen rakennuksien yhteisiä vaipallisia tietoliikennekaapeleita käytettäessä suositellaan käyttämään potentiaalintasauksen rinnakkaisjohdinta
11. Potentiaalintasauksen liitoksen impedanssin minimoiminen, käyttäen mahdollisimman lyhyitä johtimia, johtimen poikkipinnan muodon valinnalla
12. Maadoituskisko voidaan asentaa suljettuna renkaana käytettäessä sitä huomattavan tietotekniikan asennuksen potentiaalintasauksessa [21, s. 13–14]

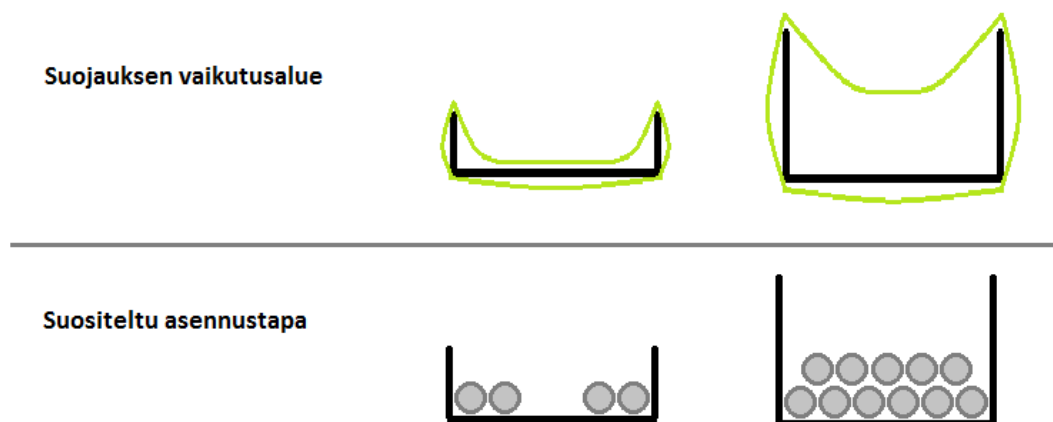
Suosituksena on, että rakennuksen metalliputket (mm. vesi, kaasu ja kaukolämpö), tehonsyöttö- ja tietoliikennekaapelit tuodaan samasta kohdasta rakennukseen. Kyseisten putkien ja kaapelien metallivaipat pitää liittää rakennuksen pääpotentiaalitasaukseen. Mikäli rakennuksessa on sähkömagneettisia häiriöitä aiheuttavia laitteita, voidaan niistä aiheuttuvia häiriöitä vähentää tietoliikennepiireissä käyttäen metallittomia kuituoptyisiä linkkejä, luokan II laitteita (joissa on kaksoiseristys tai vahvistettu eristys), tai kaksikämmi-muuntajien käytöllä. Suojalaitteiden valinnassa suositellaan laitteita, jotka huomioivat EMC:n, niin ettei synny tahattomia suojauksen laukeamisia suurien transienttivirtojen takia. Tietoliikennekaapeleina suositellaan suojattuja kaapeleita tai/ja kierretyillä pareilla varustettuja kaapeleita. [21, s. 26–28]

Tietoliikennekaapelit ja sähkönsyöttökaapelit eivät tarvitse olla erikseen, kun tietoliikennekaapeli on ympäristöluokiteltu luokkaan E1 standardin SFS-EN 50173-1 mukaisesti. E1 vaatimuksia ovat: yksivaihepiirit, jännitteisten sähkönsyöttöjohtimet ovat lähellä toisiaan, piirin virta on suurimmillaan 20 A ja kokonaisvirta suurimmillaan 100 A. Toisena

ehtona on, että tietoliikennekaapelit ovat siirtolaite- ja päätelaitevalmistajien ohjeiden mukaisia. [21, s. 38–39]

Johtotien materiaalin ja muodon valinta vaikuttavat johtotien sähkömagneettisten häiriöiden (EMI) sietokykyyn. Valintoja tehdessä tulisi huomioida: johtotien varrella ilmenevät sähkömagneettisten häiriöiden tasot, mitkä ovat johtuvien ja säteilevien häiriöpäästöjen tasot, mitä kaapelia johtotielle asennetaan, millainen on tietoliikennekaapelointiin liittyvien laitteiden EMI sietokyky, muut ympäristössä vaikuttavat rajoitteet, kuinka valmistaudutaan tuleviin tietoliikennekaapeleiden laajennuksiin. [21, s. 38]

Sähkömagneettinen suojaus pitää toteuttaa johtotiellä, mikäli kyse ei ole laitteesta, joka ei täytä EN 61000-6 standardin altistustason vaatimuksia, optisesta kaapelista tai sähkömagneettisesta ympäristöstä. Kaapeleiden metallisten tukirakenteiden muoto vaikuttaa enemmän kuin poikkipinta-ala johtotien ominaisimpedanssiin. Suljetut muodot pienentävät yhteiskytkentöjä parhaiten. Kaapelihyllyn käytössä tulisi huomioida suunniteltujen lisäkaapelien asennukset ja kaapelit tulisi asentaa niin, että kaapeliniiput eivät ylitä kaapelihyllyn seinän korkeutta. Sähkömagneettisten ilmiöiden vaikutuksia voidaan vähentää käyttämällä kantta hyllyn päällä. U-mallisissa hyllyissä sähkömagneettisten ilmiöiden vaikutus heikkenee kulmiin päin mentäessä. Kyseinen ilmiö on kuvattu kuvassa 4, jonka lisäksi kuvaan on mallinnettu suositeltu kaapelien asennustapa. [21, s. 38–39]



Kuva 4. Kaapelihyllyn suojauksen vaikutusalue on merkitty vihreällä ja alempaan kuvaan on kuvattu kaapeleiden suositeltu asennustapa. Perustuu lähteeseen [21, s. 39]

Reunojen korkeus tarvitsee olla vähintään kaksikertainen suurimman käytetyn kaapelin halkaisijasta. EMC-tarkoitukseen tarkoitettu johtotien metalliset ja yhdistelmä rakenteet tulisi yhdistää potentiaalintasausjärjestelmään. Jos johtotie on tehty osista, tulisi ne liittää niin, että osat ovat mieluiten hitsattuna kiinni. Tällä taataan järjestelmän sähköinen jatkuvuus. Mikäli käytetään pultteja, niittejä tai ruuveja liitoksissa ovat niiden kosketuspinnat oltava johtavia. [21, s. 38–39]

Esitetyn perusteella kaapeleiden asennus vaikuttaa olevan isossa roolissa sähkömagneettisen häiriöiden etenemisessä, jolloin huolellisella asennusten suunnittelulla ja toteutuksella voidaan vaikuttaa huomattavasti sähkömagneettisten häiriöiden vaikutuksiin. Työssä tarkastelussa olleissa tutkimuksissa on useasti maininta virheellisestä asennuksesta johtuvista sähkömagneettisista häiriöistä. Laitteenvalmistajan asettamia asennusvaatimuksia tulisi noudattaa, jotta sähkömagneettinen yhteensopivuus ei olisi riippuvainen asennuksesta johtuvasta virheestä.

3.5 Määräykset häiriöpäästöille

Standardit, jotka koskevat asiakkaiden sähkölaitteita, määrittelevät häiriöpäästöille raja-arvot taajuusalueelle 150 kHz...30 MHz. Standardissa CISPR 11 on määritetty häiriöpäästöt taajuusalueelle 9...150 kHz, mutta ne koskevat vain induktiokuumentimia. Sähköverkkotiedonsiirrossa käytetyille taajuusalueelle 2...150 kHz ei ole julkaistu häiriöpäästöjä rajoittavaa standardia, mutta sen standardointi on käsittelyssä kansainvälisissä standardointiorganisaatioissa: International Organization for Standardization (ISO) ja European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). Vuonna 2014 julkaistiin testausstandardi IEC 61000-4-19:2014, joka käsittelee häiriönsietovaatimuksia ja testimenetelmiä taajuusalueella 2...150 kHz. [16, s.11–12]

Standardien lisäksi julkaistaan teknisiä raportteja ja -määrittelyjä, koska niiden julkaiseminen on yksinkertaisempaa kuin standardien. Tällaisia julkaisuja ovat esimerkiksi CLC/TR 50579 ja IEC/TS 62578 Ed. 2. Näistä ensimmäinen määrittelee taajuusalueella 2...150 kHz wattituntimittarin häiriövirtojen sietovaatimukset ja testausmenetelmät. Jälkimmäinen määrittelee muun muassa hajautetun tuotannon verkkoliityntälaitteiden häiriöpäästöille raja-arvot. [16, s.12]

3.6 Verkkopalveluehdot

Energiateollisuus ry:n suosittelemia verkkopalveluehtoja (VPE 2014) [32] käytetään sähköverkon haltijan ja sähköverkkoon liitetyn sähkönkäyttäjän välisessä sähköverkkosopimuksessa. Tässä luvussa käsitellään verkkopalveluehtojen luvussa 4 asetettuja ehtoja, jotka koskevat sähkölaitteita. [32]

Molempien osapuolien sähkölaitteistot ja -asennukset ovat oltava säännösten ja määräysten mukaiset, eivätkä ne saa aiheuttaa vahinkoa tai häiriötä jakeluverkolle tai muille käyttäjille. Ehdoissa on määritetty joitakin laitteita, joista käyttäjän on ilmoitettava verkonhaltijalle ennen käyttöönottoa. Myös siinä tapauksessa jos käyttäjän laite tarvitsee laadultaan parempaa tai keskeytyksetöntä sähköä. Käyttöönotossa ja käytössä on huomioitava Sähköturvallisuuslaki ja laitteille asetetut määräykset ja standardit. Mikäli standardia ei ole asennettavalle sähkölaitteelle, voi verkonhaltija antaa ohjeita laitteen liittämiseen säh-

köverkkoon. Pyydettyessä verkonhaltija antaa tarvittavia tietoja verkkoon liittyvistä ominaisuuksista. Käyttäjän on huolehdittava, että laite täyttää kaikki vaatimukset asennusajanhetkenä, sekä käytön aikana. [32, s. 6]

Mikäli sähkölaitteen aiheuttamille verkkohäiriöille ei ole käytettävissä standardia, niin verkonhaltijalta voidaan pyytää selvitystä voidaanko laite liittää verkkoon. Verkkopalveluehtojen luvussa 4.5. listataan tapauksia, joiden kohdalla etenkin selvityspyyntö kannattaa tehdä. Tällaisia laitteen ja laitteiston ominaisuuksia ovat:

- suuri kytkentävirta (verrattuna käytettyyn pääsulake kokoon),
- usein tapahtuva sähköverkkoon kytkeytyminen,
- käyttö vaatii erityistoimenpiteitä verkonhaltijalta, ja
- aiheuttaa merkittäviä yliaaltovirtoja.

Sähkölaitteita ja -laitteistoja, jotka vaativat esiselvitystä ennen kuin ne voidaan kytkeä sähköverkkoon, ovat:

- generaattorit, jännitettä -, energiaa -, ja oikosulkutehoa syöttävät laitteet (muun muassa tuuli-, aurinko-, vesi- ja bioenergiailaitokset)
- maalämpöpumput
- loissähkön kompensointilaitteet
- hitsauslaitteet
- kompressorit
- suurehkot elektroniikkaohjatut laitteet sekä
- suurehkot suuntaajat ja taajuusmuuttajat.

Kyseisistä sähkölaitteista osa tiedetään olevan myös sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä (luku 3.4.3 taulukko 4, SFS 6000-4-44). Tästä syystä esiselvityksessä tulisi huomioida myös kyseisten sähkölaitteiden sähkömagneettiset häiriöpäästöt taajuusalueella 3...148,5 kHz, jossa tiedonsiirto on määritetty tapahtuvan. Näin ollen tarvittavat korjaustoimenpiteet olisi mahdollista tehdä ennen laitteen kytkemistä sähköverkkoon.

Käyttäjän korvausvelvollisuusvastuu koskee laitteiston asennuksia ja laitteidensa käytöstä aiheutuvia häiriötä sähköverkkoon ja muille käyttäjille. Korvausvelvollisuus huomioi, että tiesikö tai olisiko käyttäjän pitänyt tietää laitteesta aiheutuvat ongelmat. Tai jos käyttäjä ei ole voinut havaita laitteesta tai sen asennuksesta aiheutuvaa häiriötä. Käyttäjän korvausvelvollisuus on voimassa, mikäli laitteen käyttö jatkuu verkonhaltijan huomautuksesta huolimatta. [32]

Jos osapuolet huomaavat toisen asennuksessa ja sähkölaitteissa vian tai häiriön on heidän ilmoitettava toisilleen asiasta. Verkonhaltijan havaitessa käyttäjän sähkölaitteen aiheuttaman häiriön, joka aiheuttaa ongelmia verkonhaltijan mittaus- tai muiden järjestelmien toimintaan tai muille käyttäjille, verkonhaltijan on määriteltävä keinot, joilla häiriö saadaan poistettua. Verkonhaltija voi kieltää laitteen käytön kokonaan, vain jos laitteen

käyttö ei ole mitenkään mahdollista ilman haittaa. Muuten verkonhaltija voi esimerkiksi rajoittaa käyttöä. [32]

Jotta verkonhaltija voi ylläpitää toimivaa sähköverkkoa, verkonhaltijalla on oikeus päästä sopijapuolten sopimalla tavalla hallitsemiensa sähkölaitteiden luokse tekemään tarvittavia huolto-, tarkastus-, vianselvitys- tai korjaustöitä ympärivuorokauden, vaikka ne olisivat käyttäjän tiloissa tai alueella.

Verkonhaltijalla on vastuu sähkön mittauksesta, mittaustietojen lukemisesta, välittämisestä, sekä raportoinnista. Verkonhaltijalla on myös vastuu mittaustiedon oikeellisuudesta ja käyttäjän on velvollisuus maksaa aiheuttamansa kohtuulliset kustannukset. Tuntimittauslaitteistoon kuuluvan laitteen tiedonsiirto tapahtuu voimassa olevien määräysten mukaisesti. [32]

Verkkopalveluehtojen luku 6 käsittelee mittarin luentaa ja mittaustiedonsiirtoa. Käyttäjä ei voi estää mittalaitteella tapahtuvaa tiedonsiirtoa sähköverkossa ja tarvittaessa verkonhaltijan on päästävä mittalaitteelle kirjaamaan sähkönkulutustiedot. Mikäli tuntimittauslaitteelta ei saada tietoja sähkönkäytöstä, johtuen tiedonsiirto- tai laitteistohäiriöstä, niin verkonhaltijalla on oikeus arvioida mittaustiedot käyttöpaikan aiemman sähkön käytön perusteella. [32]

3.7 Sähkölaitteiden käyttöönotto ja käyttö

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) on laatinut täydentävät ohjeet, jotka koskevat sähkölaitteistojen käyttöönottoa, käyttöä ja tarkastuksia. Nämä ohjeet täydentävät Sähköturvallisuuslain, Sähköturvallisuusasetuksen, Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksen sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä, sekä Kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksen sähköalan töistä. Täydennetyt ohjeet löytyvät kootusti myös Carunan verkkosivujen urakoitsijat-sivustolta. Käyttöönottotarkastus tehdään ennen sähkölaitteiston käyttöönottoa ja tarkastuspöytäkirja on laadittava sähkölaitteiston haltijalle, lukuun ottamatta vähäisiä töitä. Pöytäkirjasta tulee ilmetä kohteen yksilöintitiedot, sähkölaitteiston säännösten ja määräysten mukaisuuden selvitys, yleiskuvaus tarkastusmenetelmästä ja siitä saadut tulokset. Tarkastuspöytäkirjan allekirjoittaa tarkastuksen tekijä. [4] Carunan yleis-tietolomakkeella on kohta, jossa sähköurakoitsija vakuuttaa, että sähkölaitteistolle on käyttöönottotarkastus tehty.

Varmennustarkastus tulee tehdä uusille sähkölaitteistoille, joiden laitteistoluokka on 1, 2 tai 3. Tarkempi sähkölaitteiden luokittelu on esitetty taulukossa 5. Varmennustarkastus koskee myös muutostöitä, joiden työalue on yli 35 A.

Taulukko 5. Sähkölaitteisto luokat. [19]

Sähkölaitteisto luokka	Luokituspe- ruste, sähkölait- teen sijainti	Selite
1a	asuinrakennuk- sessa	rakennuksessa enemmän kuin kaksi asuinhuoneis- toa, myös asumista palvelevat tilat (esim. liiketila). Asuinrakennuksessa voi olla myös 1d, 2b ja 3b lait- teistoja
1b	sähkölaitteistoko- konaisuus	suojauksessa ylivirtasuojan nimellisvirta on yli 35 A, pl. asuinrakennukset. Teollisuus-, liike-, majoi- tusrakennusten kiinteistöt, yleiset alueet, maatalou- den tuotantorakennukset, ym. Laitteisto kuuluu halt- tijalle koko liittymässä/kiinteistössä, ei rakennuk- seen
1d	erityistiloissa	räjähdysvaarallisessa tilassa, jossa vaarallisesta ke- mikaalista on ilmoitettu pelastusviranomaisille
2b	erityistiloissa	lääkintätila, jossa ei tehdä yleisanestesiaa tai laaja- puudutusta vaativia kirurgisia toimenpiteitä
2c	sähkölaitteistoko- konaisuus	laitteisto sisältää yli 1000 V osia
2d	sähkölaitteistoko- konaisuus	liittymisteho yli 1600 kVA ja 1000 V laitteisto
3a	erityistiloissa	räjähdysvaarallisessa tilassa, jossa vaarallinen ke- mikaali edellyttää Tukesin kemikaalilupaa
3b	erityistiloissa	lääkintätila (sairaala, terveyskeskus, lääkäriasema), jossa tehdään yleisanestesiaa tai laajapuudutusta vaativia toimenpiteitä
3c	sähkölaitteistoko- konaisuus	sähkönjakeluverkko, joka vaatii sähköverkkolupaa

Luokan 3 sähkölaitteille tehdään aina varmennustarkastus, kun muutostyö edellyttää käyttöönototarkastuspöytäkirjan. Varmennustarkastukseen vaaditaan, että sen suorittaa valtuutettu tarkastaja tai laitos. Tarkastus voidaan tehdä luokkien 1 ja 2 laitteille kolmen kuukauden kuluessa käyttöönotosta. 3a ja 3b luokkien sähkölaitteistoilla varmennustarkastus tehdään ennen laitteiston käyttöönottoa ja luokan 3c varmennustarkastus voidaan tehdä kalenterivuoden aikana käyttöönotosta. Tehdystä tarkastuksesta laaditaan todistus, joka toimitetaan sähkölaitteiston haltijalle ja urakoitsijalle. Mikäli urakoitsijalla on oman työn varmennusoikeus, ei ulkopuolista tarkastajaa tarvita, kuin kemikaalilupaa edellyttä-
vissä tiloissa. [4]

Sähkölaitteiston haltijan on huolehdittava sähkölaitteestaan, niin ettei siitä koidu vaaraa kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle. Tarkkailu tulisi olla säännöllistä ja sen tiimoilta havaitut viat ja puutteet tulisi poistaa mahdollisimman nopeasti. Kunnan valvontaa voi tehdä sähköalan ammattilainen ja joiltakin osin maallikko. Sähköturvallisuutta ylläpitävä kunnossapito-ohjelma tulee laatia luokkien 2 ja 3 laitteistoille. [19]

Sähkölaitteen haltijan on huolehdittava sähkölaitteen toiminallisuudesta ja on vastuussa tilata sähkölaitteelle määräaikaistarkastukset. Määräaikaistarkastusten välit ovat luokalle 1: 15 vuotta, luokalle 2: 10 vuotta ja luokalle 3: 5 vuotta. [4] Asuinrakennuksille ei tarvitse tehdä määräaikaistarkastusta. Tarkastusvelvoite koskee kuitenkin muita kuin asuintilasta palvelevia tiloja mm. liiketiloja, joiden määräaikaistarkastus tulee tehdä 15 vuoden välein, mikäli suojalaitteena on käytössä yli 35 A nimellistehollinen ylivirtasuoja. Sama koskee myös asuinrakennuksessa sijaitsevia 2b ja 3b luokan sähkölaitteistoja. [19]

Rekisteripitoilmoitus tehdään sähköturvallisuusviranomaisille ja/tai jakeluverkonhaltijalle riippuen tapauksesta. Luokkien 1a-1b ilmoitukset tehdään sähköverkonhaltijalle ja luokkien 2c-3 ilmoitukset tehdään Tukesille. Esimerkiksi uudesta sähköliittymästä ilmoituksen tekee sähkölaitteiston rakentaja. Ilmoituksesta tulee ilmetä laitteiston tyyppi, haltija, rakentaja sekä tarkastaja. [4] Sähköverkonhaltijalle tehdään ilmoitus (Carunalla yleistietolomakkeella) verkkoon kytkennästä, mittaroinnista, pääsulakkeen muutoksesta ja silloin kun erotettu käyttöpaikka liitetään uudelleen sähköverkkoon. [4] Verkkopalveluehdoissa (luku 3.5) on listattu sähkölaitteita ja -laitteistoja, jotka tarvitsevat esiselvitystä ennen sähköverkkoon kytkemistä. Tällä hetkellä tarkempaa esiselvitystä Carunalla pyydetään pumppaamoista (ei koske maa-/ilmalämpöpumppuja) ja tuotantolaitteistoista.

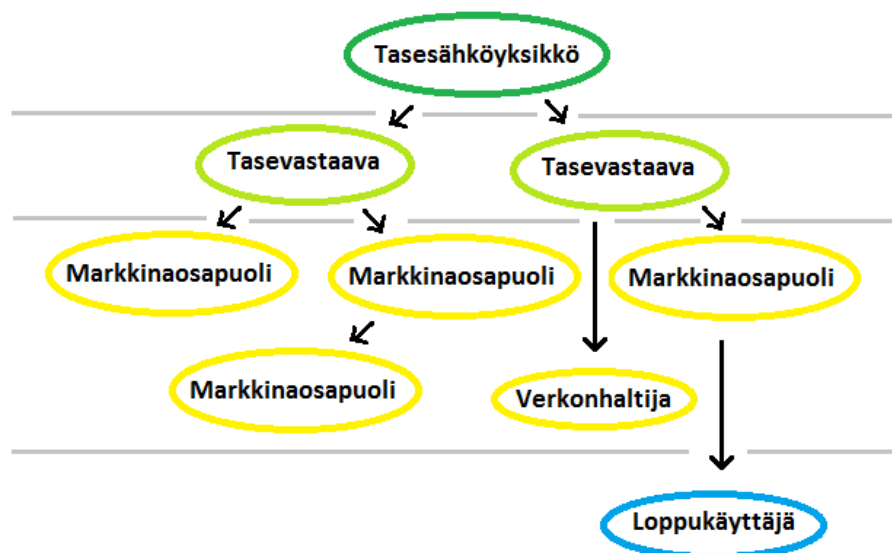
Yleisesti sähkölaitteiden säännöllisillä tarkastuksilla pystytään huomaamaan sähkölaitteiden komponenteissa tapahtuvat ikääntymiseen liittyvät muutokset, jotka ilmenevät lisääntyvinä sähkömagneettisina häiriöinä. Muutoksia, ei silmämääräisesti tai laitteen toiminnassa välttämättä ole havaittavissa, jolloin maallikolle kunnon seuranta voi olla haasteellista.

4. SÄHKÖVERKKOTIEDONSIIRTO JA SIINÄ ESIINTYVÄT HÄIRIÖT

Sähkömarkkina-alueissa sähköverkonhaltija on velvoitettu toteuttamaan sähkönkulutustietojen mittaus ja kulutustietojen toimittaminen määrättyssä ajassa sähkökäyttäjälle ja tasesähköyksikölle. Mittaustietojen siirtämiseen voidaan hyödyntää nykyistä sähköverkkoa. Luvussa käydään läpi sähköverkkotiedonsiirtoon liittyvä toimintaketju. Tarkastelu aloitetaan verkonhaltijaa velvoittavista määräyksistä sähkötaseessa, jonka jälkeen siirrytään käytössä olevaan tuntimittaukseen ja mittausjärjestelmään. Näiden jälkeen tarkastellaan tiedonsiirtojärjestelmää, esitellään Carunalla käytössä oleva sähköenergiamittari ja Carunan huomiot sähköverkkotiedonsiirron toimimisesta. Viimeiseksi tarkastellaan PLC-häiriöiden lähteitä ja sähköenergiamittarin selektiivisyyttä eri taajuisilla häiriösignaaleilla.

4.1 Taseselvitys

Taseselvityksen tarkoituksena on selvittää sähkömarkkinoilla toimivien toimijoiden välillä tapahtuvat sähkötoimitukset. Taseselvitykset perustuvat tuntienergioihin, jotka saadaan tuntienergiamittauksista, tyyppikuormituskäyristä, tuotantosuunnitelmista tai kiinteistä toimituksista. Toimitukset voivat olla mitattuja tai ennustettuja. Taseselvitys tapahtuu hierarkkisesti, jota mallinnetaan seuraavassa kuvassa 5. [27]



Kuva 5. Sähkötaseselvityksen portaittainen selvityshierarkia. Perustuu lähteeseen [27]

Suomessa tasesähköyksikkönä toimii Fingrid. Tasevastaavana voi olla sähköverkonhaltija tai markkinaosapuoli. [27] Sähkömarkkina- laissa (588/2013) pykälässä 22 ilmoitetaan, että verkonhaltijan on järjestettävä sähköverkossaan taseselvitys ja mittaus, jonka perusteella laskutus suoritetaan. Mittaustiedot on rekisteröitävä ja tiedot toimitettava sähkömarkkinoiden osapuolille. Mittauspalvelujen ohessa verkonhaltijan on pyrittävä edistämään ja ohjaamaan verkon käyttäjien tehokasta ja säästäväistä sähkönkäyttöä. [30, s. 7]

Tällä hetkellä ollaan siirtymässä yhteis pohjoismaiseen taseselvitykseen (Nordic Balance Settlement, NBS), jossa on mukana Suomen, Norjan ja Ruotsin kantaverkkoyhtiöt (Fingrid, Statnett ja Svenska Knaftnät). Käyttöön otetaan yhteinen taseselvityspalvelu, johon on kehitetty harmonisoitua taseselvitysmallia ja toteutuksesta vastaa eSett Oy, joka perustettiin yhdessä hanketta varten. Käyttöönotto oli tarkoitus tehdä 3.10.2016, mutta uuden ajankohdan on arvioitu siirtyvän vuoteen 2017. Viivästys johtuu tietojärjestelmätoimittajan viivästyneestä toimituksesta. [18]

4.2 Tuntimittaus

Valtioneuvoston asetuksessa (66/2009) ilmoitetaan, että verkonhaltijan käyttöpaikoista 80 % tuli olla tuntimittauksen piirissä vuoteen 2013 mennessä. Vuoden 2010 loppuun mennessä, tuli siirtää kaikki yli 3x63 A käyttöpaikat, sekä tuotantokohteet tuntimittauksen piiriin. Vuoden 2014 alusta lähtien tuntimittauslaitteiston keräämä tieto tuli tarjota sähkön käyttäjille. [29, s.7–8] Työ- ja elinkeinoministeriön asetuksessa (809/2008) ilmoitettiin, että vuoden 2011 alusta lähtien verkonhaltijan on toimitettava sähköntoimitustiedot sähköntoimittajalle seuraavana arkipäivänä ja lopulliset tasetiedot 14 päivän kuluessa toimituspäivästä. [29, s. 8]

Tähän on tulossa muutos vuonna 2017, sillä 1.5.2017 on tarkoituksena siirtyä pohjoismaisen taseselvitys järjestelmän käyttöön. 31.3.2016 julkaistiin muutos Valtioneuvoston asetukseen ”sähkötoimituksen selvityksestä ja mittamisesta” (66/2009), jossa tuntimittauslaitteiston keräämä tieto on toimitettava sähkönkäyttäjälle samanaikaisesti kuin se on toimitettu sähköntoimittajalle tai viimeistään seuraavana toisena päivänä kello 11. Eli esimerkiksi maanantaina mitatut tiedot on toimitettava sähkökäyttäjälle viimeistään keskiviikkona kello 11. [30, s. 8]

13.4.2016 julkaistiin muutos Työ- ja elinkeinoministeriön asetukseen ”Sähkökaupassa ja sähköntoimituksen selvityksessä noudatettavasta tiedonvaihdosta”, että verkonhaltijan on toimitettava taseselvityksyksikölle, että sähkömarkkinoiden osapuolille, viimeistään seuraavana toisena päivänä kello 11 sähköverkkoalueensa alustavat sähkötaseet. Lopulliset sähkötaseet on ilmoitettava 11 päivän kuluessa toimituspäivästä. [30, s. 8]

Mittaustiedonhallintajärjestelmässä lasketaan mittalaitteelta saaduista kumulatiivisesta tuntilukemista tuntitehot, joita käytetään taselaskennassa ja välitetään sähkönmyyjille.

Tärkeää on, että tuntitietojen aikaleimat kirjautuvat oikein. Kumulatiivisten tuntilukemien aikaleimaksi kirjautuu rekisteröintihetken ajanhetki ja tuntitehot leimautuvat mittarilla kyseisen tunnin alkamishetkenä. [30, s. 29]

Mittaustiedonhallintajärjestelmään tallennetaan tuntitiedoista alkuperäiset ja muutetut tiedot, jolloin kyseiset tiedot ovat myöhemminkin saatavilla. Mittaustiedonhallintajärjestelmään tallennetaan erikseen sähkön otto - ja anto (kulutus-tuotanto) sähköverkosta. [30, s. 29]

Mikäli tuntimittauksen alaisena olevasta kohteesta tuntitietoja ei ole saatavilla, on verkonhaltijan tehtävä arviointi puuttuvista tiedoista. Arviointimenettely riippuu tietojen puuttumissyystä. Tämä tieto on tarvittaessa kerrottava mittaustiedon hallinnalle. Puuttuvat tuntitiedot tulee arvioida viimeistään 5 vuorokauden kuluttua toimituspäivästä. Mikäli tiedot saadaan tämän ajan puitteissa, ei arvioita tarvitse tehdä. Mikäli aika ylittyy, mutta voidaan arvioida että tiedot ovat mittarilta saatavilla myöhemmin, ovat tuntimittaustiedot arvioitava (statuksena epävarma). Tilanne jossa tiedetään, ettei tuntitietoja tulla myöhemmin saamaan, ovat tuntitiedot arvioitava (statuksena arvioitu). [30, s. 29-30]

Arvioinnissa käytetään kumulatiivisia lukemia niiden ollessa käytettävissä. Arvioinnissa otetaan huomioon käyttöprofiilin aiempi käyttö ja huomioidaan arki- ja pyhäpäivät. Tehopiikit poistetaan ja mahdollisuuksien mukaan huomioidaan lämpötila. Mikäli tuntitiedoista puuttuu tunti tai kaksi, eikä kumulatiivisia lukemia ole käytettävissä, arviointi tehdään niiden ympärillä olevien tuntien tuntitietojen perusteella, erityistä huolellisuutta käyttäen. Pidemmän katkon aikana voidaan käyttää arvioinnissa kuormituskäyrämenettelyä, mikäli ei aiemmasta kulutusikäytymisestä ole tietoa. [30, s. 30]

Tilanteissa, joissa asiakas kytkee sähkönsyötön pois pääkytkimestä, ja kun sähköenergiamittari on asennettu pääkytkimen jälkeen, niin yhteys mittariin katkeaa. Yhteyden katketessa mittariin on verkonhaltijan selvítettävä syy tähän, sillä pidempi aikainen sähkökatko vaatii toimenpiteitä verkkoyhtiöltä. [30, s. 30] Virheellisen tulkinnan välttämiseksi osaan sähköenergiamittareista on asennettu kytkin, jolla saadaan sähkön syöttö katkaistua kohteesta, niin että verkkoyhtiöllä säilyy yhteys sähköenergiamittariin ja mittarilta saadaan nolla tuntitiedot rekisteröityä oikein.

Kohteissa joissa tuntimittarin luennassa on jatkuvia/pysyviä ongelmia, voidaan siirtää kuormituskäyrämenettelyyn, jos lainsäädäntö sen sallii. Rajoitteena on, että kaikki yli 3x25 A liittymät, joiden sähkönkulutus on yli 5000 kWh, ovat oltava tuntimittauksessa. Lisäksi verkonhaltijan alueella olevista käyttöpaikoista 80 % tulee olla tuntimittauksen alaisuudessa. Mikäli siirto tehdään, on muutoksesta ilmoitettava sähkönmyyjälle. [30, s. 31]

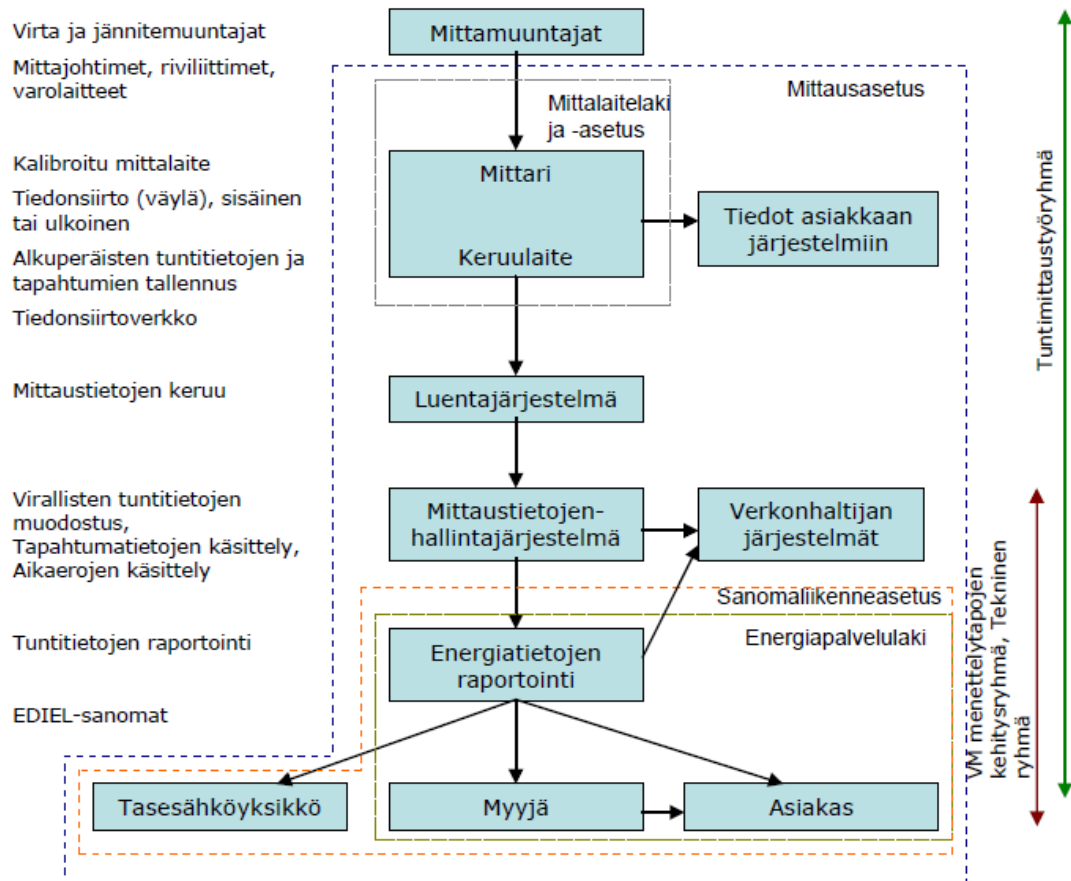
Verkonhaltijalla on vastuu mittaustietojen oikeellisuudesta, ja jos sähkönmyyjä havaitsee tiedoissa virheitä, on se veloitettu ilmoittamaan asiasta verkonhaltijalle. Kokonaisvir-

heen määrittelyssä otetaan huomioon energiamittarin virhe, mittamuuntajien suhdevirheet (jännite- ja virtavirhe) ja kulmavirheet, jännitemuuntajien toisiojohdoksen aiheuttamat jännitteenalenemat (kaapelointi ja ylimenoresistanssit liittimillä, suoja-automaateilla, kippireleillä, sekä erottimilla) sekä kulmavirheet jännitekaapeloinnissa. [30, liite 1 s. 1] Mittaustietojen oikeellisuus hyödyttää myös sähkökäyttäjää.

4.3 Mittausjärjestelmä ja -tiedot

Mittauslaitteen ominaisuuksille on asetettu vaatimuksia: mittauslaitteiston rekisteröimä tieto on tallennettava laitteelle ja tieto on pystyttävä siirtämään tiedonsiirtoverkon kautta. Verkonhaltijan on säilytettävä tuntikohtaiset tiedot 6 vuotta. Mittarin on myös tallennettava yli kolmen minuutin jännitteettömän tilan alku- ja loppuajankohdat, sekä säilyttää kyseinen tieto kaksi vuotta. Verkonhaltijan on myös huolehdittava, että tiedonsiirto tapahtuu asianmukaisesti tietosuojattuna.[29, s. 13]

Keskeytystilanteessa mittauslaitteiston tulisi tallentaa pitkät ja lyhyet keskeytykset, sekä keskeytyksen asetteluarvot (jännösjännite). Näytteenottotaajuudesta riippuu tallentuuko kaikki jännitekuopat ja lyhyet keskeytykset. Pitkistä keskeytyksistä pitää tallentua alkamis- ja päättymisajankohta tai keskeytyksen pituus ja päättymisajankohta. Mikäli lyhyiden keskeytyksien tallentuminen onnistuu, on niistä tallennuttava lukumäärä ja ajoittuminen. [29, s. 23] Mittalaitteen tulisi pystyä ohjelmoimaan havaitsemaan ja hälyttämään keskeytykset ja jännitevaihtelut aseteluilla raja-arvoilla. Onnistuneella ali- ja ylijännite raja-arvojen asettelulla voidaan havaita myös nollaviat, keskijänniteverkon vaihekatkot, sekä pienjänniteverkossa olevat yhden tai kahden vaiheen puuttumiset. Myös näistä saatu tieto on tallennettava. Etäluennan epäonnistuessa mittarin tulisi pystyä tallentamaan keskeytys- ja merkitykselliset jännitearvotiedot vähintään viikon ajalta.[29] Mittaustiedon kulkuketju kuvattu kuvassa 6.



Kuva 6. Mallissa nähdään mittarin mittaustiedon tiedonsiirtoketju. [29, s. 14]

Kuvassa 6 on järjestelmäkaavio energiamittaukseen kuuluvista osista ja kuinka tiedonsiirto etenee ketjussa mittamuuntajalta kohti tasesähköyksikköä, myyjää sekä asiakasta. Kuvan vasempaan reunaan on koottu mitä kukin järjestelmän osa sisältää ja rajatut alueet kuvaavat mihin asetuksen ja lain piiriin kukin järjestelmä kuuluu.

Mittaustietojen säilyttäminen ja katkojen tallentaminen auttaa tilanteissa, joissa joudutaan palaamaan aiempiin tietoihin. Esimerkiksi mittaustietojen viivästyessä ja kulutustietojen saaminen myöhemmän laskutusjakson aikana, niin laskuun korjataan aiemmat arviot todellisilla kulutustiedoilla ja laskutetaan sen mukaisesti. Tällaisissa tilanteissa on tärkeää, että tarvittaessa verkonhaltija voi osoittaa mihin mittaustulokset perustuvat. Sähkökatkojen rekisteröiminen liittyy sähkönlaatuun ja niiden määrille on asetettu vaatimuksia, jotka takaavat sähkönkäyttäjille riittävän laadukkaan sähkön. Sähkökatkotietojen perusteella pystytään myös laskemaan sähkönkäyttäjälle sähkökatkoista aiheutuvat vakiokorvaukset.

4.4 Sähköverkkotiedonsiirto

Etäluettavien sähköenergiamittarien (AMR) tiedonsiirtoon voidaan käyttää nykyistä olemassa olevaa sähköverkkoa. Sähköverkkoa ei ole alun perin suunniteltu tiedonsiirtoon,

vaan sen avulla on siirretty vain sähköä. Kuitenkin valmiin sähköverkon toivotaan toimivan tiedonsiirrossa signaaleiden siirtoon ja kestämaan mahdolliset häiriöt. [1, s. 70] Sähköverkkotiedonsiirtotekniikkaa hyödynnetään Carunan sähköverkkoalueella valtaosassa käytetyissä etäluettavissa sähköenergiamittareissa.

PLC eli sähköverkkotiedonsiirto (Power Line Communication), hyödyntää sähköverkon johtoja tiedonsiirtoon, esimerkiksi sähköverkkoyhtiön etäluettavat sähköenergiamittarit. Tekniikkaa voidaan käyttää myös pienverkoissa, esimerkiksi laajakaistayhteyden jakamiseen ja kotiautomaatiojärjestelmissä. [17, s. 72] Mittalaitteiden tiedonsiirtoon suositellaan käytettävän useampaa kuin yhtä tiedonsiirtotekniikkaa, huomioiden esimerkiksi hälytystilanteet [29, s. 22].

PLC-luentajärjestelmä koostuu sähköenergiamittarista, keskittimestä ja keskusjärjestelmästä. Keskusjärjestelmällä toteutetaan ohjaus ja lopullinen mittaustiedon käsittely. Keskusjärjestelmä on yhteydessä keskittimeen GSM-verkon kautta. Ja keskitin on yhteydessä sähkömittariin PLC-tekniikan avulla. Sähköenergiamittari lähettää keskittimelle tietoja vain pyydettyä. Keskusjärjestelmään voidaan liittää useita keskittämiä ja keskittimeen useita sähköenergiamittareita. PLC-luentajärjestelmä on kuvattu kuvassa 7. [17, s. 72]



Kuva 7. PLC-järjestelmä. Perustuu lähteeseen [17, s. 73]

Sähköenergiamittarin lähettämää kantaalto-dataa siirretään digitaalisessa muodossa, sillä sähköverkossa olevan korkean kohinatason takia esimerkiksi amplitudimodulaatio ei onnistu. Standardissa 50065-1 on määritelty verkonhaltijan tiedonsiirron käyttöön taajuusalueen 3...95 kHz, jossa mittaustiedonsiirto tapahtuu. Samassa standardissa määritellään myös sallitut lähetysjännitteet ja -tehot. [17, s. 73]

Sähköverkossa käytetään tiedonsiirrossa useita modulointitekniikoita, lähdeviitteen [17] tutkimuksessa esiteltiin niistä kolme. Ensimmäinen on taajuusvaihto modulointi (FSK), jossa käytetään kahta eri taajuutta kuvaamaan loogista nollaa ja ykköstä. Lähetettävä signaali vaihtelee näiden taajuuksien välillä. Toisena on vaihemodulointi (PSK), jossa looginen nolla ja ykkönen erotetaan 180 tai 90 asteen vaihesiirrolla. 90 asteen kulmaero lisää

siirrettävän datan määrää, mutta on alttiimpi häiriöille. Kolmannessa moduloinnissa OFDM, hyödynnetään signaalin muuttaminen diskreetillä Fourier-käänteismuunnoksella, joka mahdollistaa käyttämään useita eri taajuuksia samanaikaisesti. [17, s. 73]

Sähköverkko on suunniteltu 50 Hz taajuiselle vaihtojännitteelle, jolloin yli kilohertsin taajuudet käyttäytyvät sähköverkossa suunnitellusta poikkeavasti. PLC-signaalin etenemiseen vaikuttavat resistiiviset häviöt (virranahto) ja johtojen läheisyys toisiinsa nähden aiheuttaa keskinäisreaktanssia ja läheisyysvaikutuksia. Resistiiivisiin häviöihin vaikuttaa johtojen materiaali (lämpeneminen). Vaihtosähkössä tapahtuu virranahtoa, joka lisää resistiivisyyttä johteessa. PLC-signaaliin vaikuttava kuormituksesta riippuva impedanssi on aika- ja paikkariippuvainen suure. Tähän impedanssiin vaikuttaa verkko, jakelumuuntaja, syöttökaapeli, rakennuksen johdot ja kuormat. [17, s. 77]

Sähköverkkotiedonsiirtoon vaikuttaa sähköverkossa tapahtuvat ilmiöt. Seuraavaksi tarkastellaan Carunan sähköverkkoalueella käytössä olevan sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntävän sähköenergiamittarin ominaisuuksia.

4.5 Etäluettava sähköenergiamittari, Echelon

Carunan sähköverkkoalueella on käytössä sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntävä Echelonin etäluettava sähköenergiamittari. Echelonin sähköenergiamittarilla mitataan pätö- ja loistehoja. Sähkömittarilla voidaan käyttää eri tariffeja eli siirtotuotteita. Carunalla on käytössä siirtotuotteina yleis-, yö-, kausi- ja tehosiirto, joiden perusteella määräytyy sähkönsiirtomaksut [25]. Mittaustekniikka on suunniteltu kestämään magneettikenttiä. Päivittäisessä mittauksessa mittaustietojen luvataan toimitettavan 99,7-100 %. [15] Taulukoon 6 on koottu Echelonin kahden mallin ominaisarvoja.

Taulukko 6. Echelonin sähköenergiamittarien 83332-31XXXX ja 83332-21XXX ominaistietoja.[15]

Suure	Mittarin malli	
	83332-31XXXX	83332-21XXX
Nimellisjännitteet (-20 %...+15 %)		
Pääjännite	380...415 V	
Vaihejännite	220...240 V	220...240 V
Nimellistaajuus (-/+5 %)	50 Hz	50 Hz
Näennäisteho	< 5 VA	< 5 VA
Lämpötilat		
Määritetty toiminta-alue	-40°C...+70°C	-40°C...+70°C
Täystoiminta	-25°C...+60°C	-25°C...+60°C
Rajoitettu toiminta-alue	-40°C...+70°C	-40°C...+70°C
Kuljetus ja säilytys	-40°C...+70°C	-40°C...+70°C
Virta		
Perusvirta	5 A	5 A
Maksimivirta	100 A	100 A
Käynnistysvirta	20 mA	20 mA

Taulukosta 6 selviää sähköenergiamittarin suureiden arvot, joiden rajoissa kunkin suureen tulisi pysyä, jotta mittari toimisi vaaditulla tasolla. Sähköenergiamittarilla olevat kanavat 4x16 mahdollistavat tietojen profiloinnin. Muut kuin mittaukseen liittyvät ominaisuudet määritetään mittarin valmistuksen aikana. Sähkömittarin toimintaa ohjataan releillä. Sähkömittarilta seurataan sisään- ja ulostulo pulsseja. [15] Kuvassa 8 on Carunan käyttämä etäluettava sähköenergiamittari.



Kuva 8. Carunalla käytössä oleva etäluettava sähköenergiamittari. [24]

Kuvassa 8 kohdassa A näkyy tunnus T1 tai T2, joka kertoo laskurin olevan käynnissä. Mittariin merkityllä painikkeella B voidaan vaihtaa näkymää näytön B kohdassa, jossa

nähdään kohteen kulutuslukemat, kellonaika, päivämäärä sekä valittu tariffi. Kohdassa C on kuvattu onko kuormanohjausrele päällä vai ei ja kohdassa D punaiset valot vilkkuvat kulutuksen mukaan. Mittarin keskellä olevat I ja O painikkeiden avulla voidaan kohteesta kytkeä tai katkaista sähkönsyöttö ilman, että yhteys sähkömittariin katkeaa.. [24]

Caruna asentaa etäluettavia sähköenergiamittareita, jotka ovat suoria tai epäsuoria mittareita. Epäsuoria CT-mittareita (Current Transformer = virtamuuntaja) käytetään suurimassa osassa yli 63 A pääsulakkeisissa kohteissa. CT-mittarissa hyödynnetään virtamuuntajaa, jolla saadaan sähkövirta muutettua sähköenergiamittarille sopivaksi (5 A). CT-mittarissa ei ole sähkösyöttökytkintä [24]. [6]

Carunassa on empiirisesti havaittu, etteivät sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntävät etäluettavat sähköenergiamittarit ole taloudellisesti järkeviä kaikissa kohteissa (mittarien toimimattomuudesta johtuvat useat asentajakäynnit kohteissa). Tästä johtuen laadittiin tarkemmat kriteerit kyseisten etäluettavien sähköenergiamittareiden asennuksista vuonna 2015 ja sen käyttöönotto pyrittiin aloittamaan saman vuoden elo-syyskuun aikana. Kriteeristössä on muun muassa listattu kohteita, joihin ei enää asenneta sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntäviä sähköenergiamittareita Carunan sähköverkkoalueella:

- keskijännitekohteet
- pumppaamot
- operaattorin tukiasemat
- sähköasemat
- puutarhat
- lämmön- ja sähkötuotantolaitokset
- verstaat ja koneistamot (kun laitoksessa useita kolmivaihemootoreita)
- kohteessa hitsauslaitteita tai merkittävä määrä taajuusmuuttajia
- kohteen suuri etäisyys keskittimestä
- kohteen ja keskittimen välillä on pitkä ilmanlinja
- kohteen lähellä ei ole muita etäluettavia sähkömittareita. [7]

Tarkempaa määrittystä kohteen etäisyydelle sähköverkossa ei ole määritetty, koska PLC-häiriöt eivät ole yksiselitteisesti selitettävissä. Näihin häiriöihin vaikuttavat sähköverkossa sijaitsevat kuormat, johtojen risteävyydet ja muut ominaisuudet, jotka poikkeavat eri sähköverkon kohdissa toisistaan, jolloin kohteen tarkastelu on tehtävä tapauskohtaisesti. Sähköverkkotiedonsiirron sijasta kohteissa käytetään etäluettavia sähköenergiamittareita, jotka hyödyntävät tiedonsiirrossa PTP-tekniikkaa (point to point -tekniikka), jossa tiedonsiirto tapahtuu ilmateitse. Kyseinen kriteeristö ja ohjeet perustuvat saatuihin havaintoihin, mutta asiasta ei ole tehty tarkempaa tutkimusta. Yllä listatuista kohteista osa nousi kuitenkin esille tämän työn yhteydessä tehdyssä tutkimuksessa PLC-häiriölähteinä.

Yksittäisenä sähkölaitteena listalta nousee esiin taajuusmuuttajat, joiden tiedetään olevan sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä ja verkkopalveluehdoissa on maininta, että suurehkot taajuusmuuttajat tarvitsevat esiselvitystä ennen sähköverkkoon kytkemistä. Seuraavassa luvussa tarkastellaan tarkemmin häiriönlähteitä, joiden joukossa on myös taajuusmuuttajat.

4.6 PLC-häiriöiden ilmeneminen

Sähkömagneettiset häiriöt alle 150 kHz taajuusalueella havaitaan, kun sähköverkon käyttäjä havaitsee verkosta tulevan sähkön olevan häiriintynyt tai kun sähkömagneettinen häiriö raportoidaan sähkön toimittajan tai -tuottajan toimesta. Sähkönkäyttäjien havaitsemat häiriöhavainnot eivät aina saavuta sähkötoimittajia tai -tuottajia, jolloin todellinen häiriöiden määrä voi olla raportoituja määriä suurempi.

Häiriötapauksista tehtyjen, riittävän yksityiskohtaisten, raporttien avulla pystytään kerättyä tietoa hyödyntämään muun muassa arvioidessa laitteiden oikeutta CE-merkintään, suunniteltaessa standardeihin asetettavia häiriösaateilyn raja-arvoja tarkasteltaessa häiriöiden virta-/jännitekomponenttien suuruuksia, sekä komponenttien ikääntymisen vaikutuksia. Lisäksi raporteissa voi ilmetä muita syitä, jotka aiheuttavat häiriöitä tai laitteen alhaisen häiriönsietokyvyn. [5, s. 31] Tärkeää olisi pystyä tunnistamaan sähkömagneettiset häiriöt ja mitkä ovat siitä johtuvia seurauksia. Seuraavassa luvussa tarkastellaan aiemmassa tutkimuksessa saatuja havaintoja häiriösignaalien taajuuksista.

4.6.1 Sähkömittarin selektiivisyys

Tutkimuksessa [16] tutkittiin mittausjärjestelmän selektiivisyyttä, tutkimus toteutettiin Forssan Verkkopalvelut Oy:n sähköverkossa. Häiriösignaali toteutettiin signaaligeneraattorilla ja se kytkettiin kytkentäkondensaattorin välityksellä keskittimeen. Signaaligeneraattorilla tuotettiin eri taajuisia häiriösignaaleja verkkoon ja seurattiin sen vaikutuksia PLC-signaalien lukemiseen sähkömittarilla. Saadut tulokset ovat koottuna taulukkoon 7. [16, s. 50]

Taulukko 7. Häiriösignaalin vaikutus luentasignaalin lukemiseen. Perustuu lähteeseen [16, s. 53]

PLC-luentasignaalien taajuudet [kHz]	75	86	75	86	75	86	75	86
Häiriösignaalin taajuus [kHz]	80,5		95		105		124	
Taajuusero PLC-signaalien ja häiriön välillä [kHz]	5	5	20	9	30	19	49	38
Häiriöjännite, jolla luenta estyi [dB μ V]	99,3		108					
Arvioitu signaali-häiriösuhde [dB]	-22	-18	-31	-27				
Häiriöjännite, jolla luenta toimi [dB μ V]	93,4				110		110	
Arvioitu signaali-häiriösuhde [dB]	-16	-12			-33	-29	-33	-29

Taulukosta 7 nähdään, että kun häiriösignaalin taajuuden ollessa lähellä PLC-signaalia, estää se signaalin lukemisen. Kun häiriösignaalin taajuus on 105 kHz ja 124 kHz ei häiriö enää vaikuta PLC-signaalin etenemiseen. Lisätutkimuksien avulla olisi mahdollista selvittää laajemmin mitkä ovat sähköverkossa ilmenevien häiriösignaalien taajuudet, kun PLC-signaalin lähetys estyy. Tämän avulla saataisiin lisätietoa mahdollisten häiriöpäästöjen raja-arvojen arvioimista varten.

4.6.2 Muualla havaittuja PLC-häiriöitä

CENELECin julkaisema tutkimusraportti [5] julkaistiin 2013 huhtikuussa ja siihen liittyvä tutkimus kohdistui alle 150 kHz taajuuksille. Tutkimuksessa nousi esille sähkölaitteita, joilla oli herkkyyttä sähkömagneettisiin häiriöihin tuottaen häiriöitä tai häiriintyen. Huomiota herätti sähkölaitteiden asennuksesta ja komponenttien ikääntymisestä aiheutuvat sähkömagneettiset häiriöt.

Euroopassa suurimmassa osassa sähköenergiamittareissa on käytössä PLC-tekniikka. Arvioiden mukaan vuoden 2016 loppuun mennessä Euroopassa etäluettaviamittareita olisi noin 130 miljoonaa, kun vuonna 2013 niitä oli noin 45 miljoonaa. Sähkönsiirrossa on huomioitava missä energia tuotetaan, jaetaan ja käytetään. Sähköverkon suunnittelussa tulisi huomioida, että käytetty tekniikka on tulevaisuudenkestävää. Tässä tulisi huomioida myös tehokas sähköenergian käyttö, uusiutuvien energialähteiden lisääntyvä käyttö, energiatietojen tarjoaminen sähkön käyttäjälle, älykkään sähköverkon mahdollisuudet, sekä tiedonsiirto järjestelmän suunnittelu. [5, s. 9]

Häiriöt taajuusalueella 2...150 kHz vaikuttavat jännitteen muotoon ja näin ollen vaikuttavat sähköverkon käyttäjien energian saantiin, häiritsevät tiedonsiirtoa ja aiheuttavat mittareille virheellisiä tuloksia. Seuraavaksi listataan tutkimuksessa [5] saatuja havaintoja sähkömagneettisten häiriöiden vaikutuksista:

- kun sähkökäyttäjän sähkölaitteen aiheuttama häiriösäteily on lähellä PLC-signaalin taajuutta, voi häiriö häiritä tai hävittää PLC-signaalin kokonaan
- kun sähkökäyttäjän sähkölaitteen aiheuttamat yliaallot ovat lähellä PLC-signaalin taajuutta, voi häiriö aiheuttaa PLC-signaalin vastaanottamisen epäonnistumisen
- vääristymä syöttöjännitteessä aiheuttaa laitteen tai verkkotiedonsiirtojärjestelmän jännitteeseen/virtaan epäjatkuvuutta, joka näkyy PLC-signaalin lähetyksen epäonnistumisena tai asiakaslaitteen virhetoimintana
- kun sähkökäyttäjän sähkölaitte edustaa matalaa impedanssista reittiä, niin PLC-signaali etenee virheelliseen suuntaan ja näin ollen lähetyssignaalin siirtyminen epäonnistuu ja keskeyttää kommunikoinnin
- sähkökäyttäjän sähkölaitteen häiriösäteilyn tai verkkotiedonsiirtojärjestelmän jännitteen seurauksena virta kasvaa, jolloin syntyy yllämpenemistä. Tämä voi nopeuttaa sähkökäyttäjän sähkölaitteiden ikääntymistä. [5, s. 10]

CENELECin tutkimuksessa [5] koottiin tietoa 12 valtiossa (Itävalta, Belgia, Suomi, Ranska, Saksa, Iso-Britannia, Unkari, Italia, Japani, Alankomaat, Norja ja Ruotsi) tehtyjen havaintojen perusteella lista sähkölaitteista, jotka aiheuttavat tai häiriintyvät sähkömagneettisista häiriöistä 2...150 kHz taajuusalueella. Kyseinen lista on koottu seuraavaan taulukkoon 8.

Taulukko 8. Sähkölaitteet ja -laitteistot, jotka ovat aiheuttaneet sähkömagneettisia häiriöitä ja häiriintyneet kyseisistä häiriöistä taajuusalueella 2...150 kHz. Lyhenne PC on kotitietokone, UPS on katkoton teholähde, ICT on tieto- ja viestintätekniikka. Perustuu lähteeseen [5, s. 11]

Sähkölaitteet ja -laitteistot	EMI:n aiheuttajat	EMI:stä häiriintyvät
Vaihtosuuntajat	X	
Nopeussäätöiset moottorikäytöt	X	
Hakkuriteholähteen sisältävä laite (valaisin, PC, UPS, ICT, kuormain)	X	
Valaistuslaitteet (loistevalaisimet, pienloistelamput)	X	
Kotitalouslaitteet (induktiokeräimöt, pesukoneet, parranajokoneet)	X	
Kannettavat sähkötyökalut	X	
Etäluettavat sähkömittarit PLC-tekniikalla	X	X
Elektronisella ohjauksella toimivat laitteet (hipaisuhimmenninlamput, hälytysjärjestelmät, liikennevalvontajärjestelmä, liikennevalot, lämmitysjärjestelmät, katuvalot, pisoarit, keittiölaitteet (höyrystilysrauta, kahvinkeitin, keraamiset tasot)		X
Kommunikointijärjestelmät		X
Puhelinverkko		X
Vikavirtasuojat		X
Muistion kursorin paikka		X
Vakio aikasignaalin lähetysjärjestelmä		X
Ajoneuvon älyavaimet		X
TV- ja radiovastaanottimet		X
Matkaviestintä		X
Radioamatööri		X

Vuonna 2011 tehdyssä kyselytutkimuksessa [17] (osallistujina 18 sähköverkkoyhtiötä) selvisi, että suurimmat PLC-häiriöitä aiheuttavat sähkölaitteet olivat taajuusmuuttajat, elektronisella liitännällä varustetut lamput ja kodielektroniikka laitteet [17, s. 100]. Tutkimuksessa mainittiin, että sähkönkäyttäjien sähkölaitteiden aiheuttamat PLC-häiriöt olivat melko yleisiä [17, s. 4]. Yksi tutkimuksessa mukana olleista verkkoyhtiöistä huomioi, että taajuusmuuttajien aiheuttamat häiriöt johtuivat usein asennusvirheistä.

4.6.3 Kuormien aiheuttamat yliaallot sähköverkossa

Elektronisten kuormien käyttö on kasvussa, sillä ne mahdollistavat laitteelle paremmat säätöominaisuudet ilman, että hyötysuhde heikkenee. Elektronisten kuormien haittapuolena on, että ne synnyttävät usein yliaaltoja ja suuritaajuisia häiriöitä enemmän kuin passiivikuormat [17, s. 3]. Elektronisia kuormia ovat esimerkiksi energiasäästölamput, UPS-laitteet, taajuusmuuttajat ja hakkuriteholähteet [17, s.10].

Tehoelektroniikan ominaisuuksista epälineaarinen käyttäytyminen johtuu siitä, että komponentit eivät käytä sinimuotoista virtaa. Tämä aiheuttaa sähköverkon virtaan ja jännitteeseen vääristymää, joka näkyy yliaaltolina. Kyseiset yliaallot osuvat PLC-tekniikkaa hyödyntävälle taajuusalueelle ja heikentävät näin signaalien kuuluvuutta. [17, s. 79]

Yliaaltojen suodattamiseen voidaan käyttää kahta menetelmää: passiivimenetelmässä tasasuuntaussillan eteen asennetaan kela, jolloin suuremmilla taajuuksilla impedanssi kasvaa ja verkosta otettujen yliaaltojen määrä pienenee. Kelaan varastoituu energiaa niin, että tasasuuntaaja pysyy johtavana kauemmin. Aktiivisessa menetelmässä käytetään ohjauksessa kytkinkomponentteja ennen tasasuuntaussiltaa tai sen välipiirissä. Tällä menetelmällä voidaan säätää sähköverkosta otettavaa virran käyrämuotoa. [17, s. 43–44]

Resonanssiipiiri, joka muodostuu EMC-suotimen kondensaattorin ja verkon välillä, voi aiheuttaa virran kasvun moninkertaiseksi. Tämä ilmenee kondensaattorin kuumenemisenä ja mahdollisena vaurioitumisena. Laitteen sammuttaminen ei takaa sitä, että EMC-suodin irtoaa verkosta, vaan se on PLC-signaalin vaikutuksen alaisena. [17, s. 90]

4.6.4 Signaalin ylikuuluminen ja vaimentuminen

Johtimien välistä kapasitanssia ja induktanssia kutsutaan keskinäisreaktanssiksi, jonka seurauksena suuritaajuinen signaali voi siirtyä toiseen vaiheeseen eli ylikuulua. Toisaalta tämä heikentää signaalin tehoa. Toisaalta jos vaiheessa, jota PLC-tekniikka käyttää, on vaihejohde poikki tai vaihe puuttuu, voi signaali päätyä keskittimelle asti muita vaiheita pitkin. Ylikuulumisen takia häiriötä aiheuttavan laitteen ja PLC-signaalin lähettämisen siirtäminen eri vaiheille, ei välttämättä estä häiriösignaalin kuulumista PLC-signaalin kanssa samassa vaiheessa. [16, s. 48] Lähdeviitteen [16] tutkimuksessa vertailtiin kaapelin ja rinnan kytkettyjen kaapelien vaikutusta PLC-signaalin vaimenemiseen ja tästä saadut tiedot on koottu seuraavaan taulukkoon 9.

Taulukko 9. Yksittäisen kaapelin ja rinnankytketyn kaapelin vaikutukset signaalin vaimentumiseen. Perustuu lähteeseen [16, s. 46]

Taajuus	yksi kaapeli			kaksi kaapelia rinnan		
	Lähetys, U [dB μ V]	Vastaanotto, U [dB μ V]	Vaimennus [dB]	Lähetys, U [dB μ V]	Vastaanotto, U [dB μ V]	Vaimennus [dB]
80	131	56	75	131	59	72
90	131	58	73	131	61	70
100	132	63	69	132		
110	132	66	66	132	67	65
120	132	70	62	132	71	61
130	132	71	61	132	73	59
140	132	72	60	132	74	58

Tutkimuksessa huomattiin, että rinnakkaiset kaapelit aiheuttivat pienemmän vaimenemisen, kuin yksittäinen kaapeli. Signaalin vaimenemisessa PLC-signaali vaimenee niin, ettei sen kuljettama teho välttämättä riitä keskittimelle asti ja signaalin sisältämä tieto jää saamatta. Kaapelien lisäksi vaimenemiseen vaikuttavat sähköverkossa olevat kuormat. Kun kuormien induktiiviset ja kapasitiiviset osat ovat lähellä toisiaan, synnyttävät nämä tietylle taajuudelle resonanssipiirin ja reaktiivinen impedanssi kumoutuu. Tällöin signaaliin vaikuttaa vain resistiiviset häviöt, mikä kasvattaa virtaa. PLC-tekniikan lähetysteho on rajoitettu, jolloin virtaa ei voida kasvattaa ja yliaallot vaimentavat pienitehoisemman signaalin. Sähköverkossa syntyy resonanssiipiirejä, sillä verkon impedanssi on yleensä induktiivinen ja kuormana on kapasitiivinen laite (pienloistelamput ja LCD-televisiot). Mikäli signaalin kokema impedanssi laitteeseen nähden on pienempi kuin keskittimen impedanssi, signaali vaimenee. Samanlainen resonanssiipiiri voi syntyä sähkölaitteiden EMC-suotimen kondensaattorin ja verkon välille. [17, s. 87]

Resonanssipiirien aiheuttama signaalin vaimentuminen on haastavampi tilanne kuin tehoelektroniikkakuormien aiheuttamat häiriöt. Vaimentunut signaali on alttiimpi elektronisten kuormien aiheuttamille yliaalloille ja kohonnut kohina estää signaalin vastaanottamisen. [17, s. 88]

Johdon ominaisimpedanssi riippuu johdon rakenteesta, käytetystä taajuudesta, ominaisresistanssista, -induktanssista, -kapasitanssista ja -konduktanssista. Mikäli yhteen liitetyt johtimet omaavat eri ominaisimpedanssit, vaikuttaa se signaalin etenemiseen. Signaalin edetessä toisesta johtimesta toiseen, signaali heijastuu osittain takaisinpäin ja näin ollen läpi pääsevä signaali vaimentuu. [17, s. 76] Johtimen eristemateriaalista tai pituudesta johtuva signaalin heikkenemisen vaikutukset näkyvät vasta useamman megahertsin taajuuksilla, joka on yli sähkömittareiden käyttämästä taajuusalueesta [17, s. 76-77].

Sähköenergiamittarilta lähtevä sähköverkossa etenevä PLC-signaali etenee taajuusalueella, jolle ei ole asetettu häiriösignaaleille raja-arvoja, jolloin sähköverkkoon kytketyt laitteet voivat tuottaa tällä taajuusalueella sähkömagneettisia aalloja. Kun nämä aallot etenevät sähköverkossa ja niiden taajuus on lähellä PLC-signaalin taajuutta, ne vaikuttavat tämän etenemiseen ja eteneminen saattaa vaimentua niin, ettei se saavuta määränpäättään eli keskitintä.

4.7 Esimerkkejä PLC-häiriöitä aiheuttavista sähkölaitteista

Luvussa esitellään joitakin esimerkkitapauksia PLC-häiriölaitteista, jotka ovat nousseet esille aiemmissa tutkimuksissa. Suurimpana yksittäisenä laitteena on noussut esille taajuusmuuttaja ja tässä luvussa esitellään sen asennuksessa huomioon otettavia seikkoja, sillä aiemmissa tutkimuksissa ja sähkömagneettisten ominaisuuksien selvityksessä on huomattu asennuksen tärkeys. Lopuksi tarkastellaan sähkölaitteita, jotka häiriintyvät PLC-tekniikkaa hyödyntävistä sähköenergiamittareista.

4.7.1 Pienloistelamput

Pienloistelamppu koostuu tavallisesti EMC-suotimesta, tasasuuntaajasta, välipiirin kondensaattorista, aktiivisesta tehokertoimen korjaajasta (APFC) sekä vaihtosuuntaajasta. Pienloistelamppu toimii suuremmalla taajuudella kuin sähköverkon taajuus ja verkosta otettava virta on pulssimaista ja vääristynyttä. [17, s. 79-80]

4.7.2 Hakkuriteholähteet

Hakkuriteholähteellä voidaan muuttaa jännitteen taajuutta ja amplitudia. Hakkuriteholähde ei ota puhdasta siniaaltoista virtaa verkosta, koska se toimii transistoreiden avulla virran katkomisella. Hakkuriteholähteen aiheuttamat alle 2 kHz yliaallot saadaan suodatettua APFC:llä ja yli 150 kHz yliaaltojen poistamiseen käytetään EMC-suodinta, jolloin taajuusalueen 2...150 kHz yliaaltoja ei suodateta. [17, s. 82]

Hakkuriteholähde nousi lähdeviitteen [16] verkkoyhtiöille tehdyssä kyselytutkimuksessa yhdeksi PLC-häiriöitä aiheuttavaksi sähkölaitteeksi. Hakkuriteholaitteiden aiheuttamien häiriöiden taustalla oli laitteen komponenttien ikääntymisestä ja vikaantumisesta aiheutuvat ilmiöt. Hakkuriteholähteisiin kuuluvia häiritseviä laitteita olivat satelliittikeskustennijärjestelmän vastaanotinta syöttävä teholähde, kaapeli-TV-verkon antennivahvistin, Ethernet-reitittimen teholähde, pöytätietokoneen teholähde ja matkapuhelintukiaseman teholähde. Korjaustoimenpiteenä oli vanhentuneiden ja vikaantuneiden laitteiden uusiminen. Ethernet-reitittimen teholähde, pöytätietokoneen teholähde, sekä matkapuhelintukiaseman teholähde olivat EMC-vaatimustenmukaiset. PLC-tekniikassa havaitut häiriöt johtuivat siitä, että laitteiden aiheuttamat häiriösignaalit ilmenivät lähellä PLC-signaalin lähetystaajuutta. [16, s. 57–64]

4.7.3 Taajuusmuuttajat

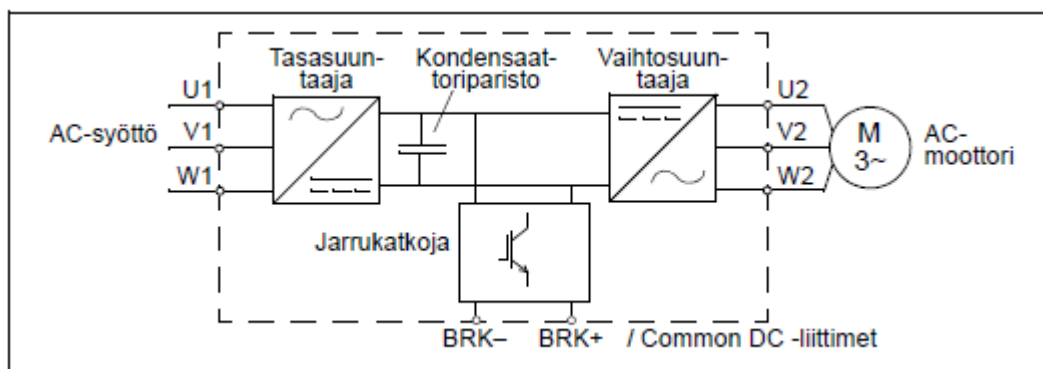
Moottorikäyttöjen energiatehokkuutta parannetaan taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttajia käytetään myös melko suuritehoisissa kohteissa, jolloin laitteen aiheuttamat häiriöt voivat vaikuttaa suureen osaan muuntopiirissä, vaikka laitteisto ei ole muuntamon tai mittareiden läheisyydessä. Taajuusmuuttajien aiheuttamat häiriöt näkyvät sähköverkon jännitteessä. Taajuusmuuttajien aiheuttamat häiriöt johtuivat:

- liian pitkistä moottorikaapelin pituudesta
- laitteen maadoittamattomuudesta tai moottorikaapelin huonosta maadoituksesta
- ettei laite ollut valmistajan esittämien vaatimuksien mukainen (ennen/jälkeen käyttöönoton)
- laitteen (komponentti) ikääntymisessä tapahtuvista muutoksista tai
- laitteen vaurioitumisesta. [16, s. 64–65]

Koska usea häiriö johtui asennukseen liittyvästä puutteesta, niin seuraavaksi tarkastellaan laitteen valmistajan antamia ohjeita taajuusmuuttajan asennuksesta.

Taajuusmuuttajan asennus

Kuvassa 9 on taajuusmuuttajan yleiskaavio, jossa nähdään osat joista taajuusmuuttaja koostuu. Kolmivaiheinen vaihtosähkö muutetaan tasasuuntaajalla tasasähköksi, kondensaattoriparistolla vakautetaan jännitettä ja ennen moottoria muutetaan jännite kolmivaiheiseksi vaihtosähköksi vaihtosuuntaajalla. Mikäli jännite ylittyy sallitun rajan, jarrukatkoja kytkee jarruvastuksen tasajännitevälipiiriin. [14, s. 27]



Kuva 9. Taajuusmuuttajan yleiskaavio. [14, s. 27]

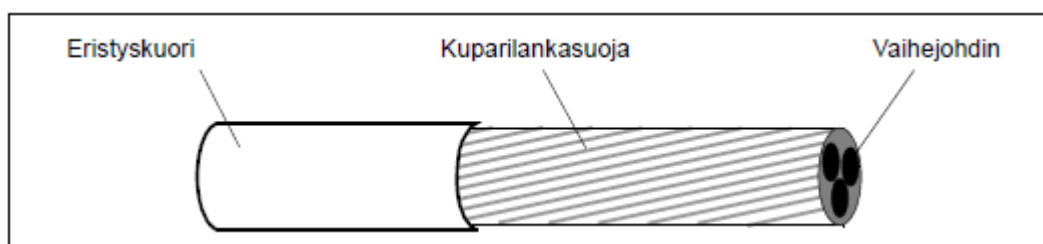
Valmistajan ohjeissa mainitaan, että laitteen valmistajan asennusohjeita tulee noudattaa, mutta asennus on suunniteltava ja tehtävä paikallisten lakien ja määräysten mukaisesti. [14, s. 39] Taajuusmuuttajassa on sisäinen EMC-suodin, joka tulee huomioida asennuksessa. Mikäli se ei ole käytettävissä, on käytettävä ulkoista EMC-suodinta. Kun taajuusmuuttaja liitetään IT-verkkoon, on sisäinen EMC-suodin kytkettävä irti. Muuten verkko kytkeytyy maapotentiaaliin taajuusmuuttajan EMC-suotimen kondensaattorin kautta. Taajuusmuuttaja vaurioituu, mikäli EMC-suodinta ei kytketä irti kun taajuusmuuttaja

asennetaan TN-verkkoon. Taajuusmuuttajaa käytetään AC-epätahtimoottoreiden ja kes-
tomagneettiservomoottoreiden ohjauksessa. [14, s.18]

Kolmivaiheisen epätahtimoottorin ja taajuusmuuttajan yhteensopivuus on tarkistettava. Usein löytyy valintaa helpottavia valintataulukoita, joihin on koottu taajuusmuuttajien tyypillisimmät moottoritehot. [14, s. 40] Muita tarvittavia tietoja ovat: käytettävä syöttöjännite; maksimimomentti, johon vaikuttaa muun muassa järjestelmän muuntajat; kuristimet sekä kaapelit [28, s. 24]. Pumppujen ja puhallinsovelluksissa tulee huomioida kierrosalueet, teho, käynnistysmomentti, moottorin napaluku, moottorin teho maksimikierrosluvulla [28, s. 24–25]. Jos pumppu- ja puhallinarvoja ei ole, on käytettävä mitoitus-
sessa taajuusmuuttajan moottorivirtaa [28, s. 24–25].

Tehokaapelien valinnassa on huomioitava paikalliset määräykset. Kaapelien on ke-
stettävä kuormitusvirrat, ja kestävä vähintään 70 °C lämpötila jatkuvassa käytössä. PE-
johtimen (suoja-johdin) ja vaihejohtimen johtokyvyn on oltava sama. Jotta saadaan EMC-
vaatimukset, CE- ja C-tick-merkinnät täytettyä, on moottorikaapelin oltava suojattu ja
symmetrinen. Nelijohdinjärjestelmään verrattuna suojattu ja symmetrinen kaapeli on suos-
iteltavampi, koska se vähentää koko taajuusmuuttajajärjestelmässä sähkömagneettisia
häiriöitä sekä moottorin laakerivirtoja ja kulumista. [14, s. 41]

Moottorikaapelin suojavaippa vähentää huomattavasti säteileviä ja johtuvia radiotaajuisia
häiriöitä, kun sen johtokyky 1/10 vaihejohtimen johtokyvystä. Tähän päästään esimer-
kiksi kun käytetään kuparista tai alumiinista suojavaippaa. Kuvassa 10 nähdään suojavai-
pan vähimmäisvaatimus: hyvällä ja tiukalla suojavaipalla saadaan poistettua tehokkaam-
min häiriösäteilyt ja laakerivirrat. [14, s. 42]



Kuva 10. Moottorikaapelin rakenne. [14, s. 42]

Jos käytössä on useampi moottorikaapeli, voidaan ne asentaa vierekkäin, mutta ne on
pidettävä erillään muista kaapeleista. Suositeltavaa on, että moottorikaapeli, verkkoka-
peli ja ohjasukaapelit asennettaisiin eri kaapelihyllyille. Sähkömagneettisia häiriöitä ai-
heutuu taajuusmuuttajan lähtöjännitteen nopeista vaihteluista, joiden vaikutuksia voidaan
vähentää kun ei tehdä pitkiä samansuuntaisia kaapelivetoja. [14, s. 45] Carunan tutkimuk-
sessa esille nousseet huomiot taajuusmuuttajien asennuksista ovat luvussa 6.4.

4.7.4 PLC-tekniikan aiheuttamat häiriöt

PLC-tekniikan etäluettavien sähköenergiamittareiden aiheuttamia häiriöitä on havaittu muun muassa pesukoneissa, pisuaarien vedensäätöjärjestelmässä, keittölaitteiden kelloissa, kahvinkeitimissä, sekä hipaisuhimmentimellä varustetuissa lampuissa (TDL, touch dimmer lamp). Tarkemmassa tutkimuksessa lamppu syttyi ja sammui, sekä valoteho muuttui PLC-signaalin ohjaamana. Häiriöt ilmenivät epäjatkuvilla, pulssimaisilla jännitteillä niiden nousevalla reunalla eikä tähän vaikuttanut mittarin kaistanleveys, signaalin taso tai modulaatio. [5, s.12]

Seuraavaan taulukkoon 10 on koottu sähkömagneettisista häiriöistä aiheutuvat ilmiöt sähkölaitteissa 2...150 kHz taajuusalueella. Havaitut ilmiöt ovat koottu 12 valtiosta sekä Suomessa, Saksassa, Iso-Britanniassa ja Ruotsissa sijaitsevien yliopistojen tutkimustuloksista.

Taulukko 10. Häiriintyvä laite ja häiriöstä aiheutuvat ilmiöt. CRC on syklinen ylimäärävarmistus. Perustuu lähteeseen [5, s. 12]

Häiriintyvä laite	Häiriöstä aiheutuvat ilmiöt
Hipaisuhimmenninlamput	tahaton kytkeytyminen (ON, OFF, eri valaistusasteet)
Katuvalot	tahaton ON-, OFF-kytkentä
Liikennevalot	toimintahäiriö
Liikennevalvontajärjestelmä julkisille linja-autoille	toimintahäiriö
Puolijohdemittari	mittauservojen virheellinen ilmoittaminen
MCS (sähköverkkotiedonsiirto-järjestelmä)	hetkelliset tai pysyvät häviöt tiedonsiirrossa
Lämmönsäätö, joka toimii aikaperusteiseen DCF77 signaaliin	toimintahäiriö
Lämmitysjärjestelmä	virheellinen hälytys häiriöstä anturissa
Katkeamaton magneettikortin lukija	toimintahäiriö luentatoiminnossa
ADSL modeemi	yhteyden katkeaminen, CRC virhe
Reititin	häviöt tahdistamisessa verkkoon (40, 50 ja 70 kHz)
Muistio	Häiritsee kursorin paikkaa (37 kHz)
Induktiivijunan radiojärjestelmä	kuuluva ääni
Keraaminen taso	virheellinen releen kytkeytyminen
Kahvinkeitin	virheellinen merkkivalon toiminta
Höyrysilitysrauta	riittämätön lämpö, vesihäviöt, virheellinen merkkivalon välkyntä
Pesukone	itsestään käynnistyminen (muutama tunti) käytön jälkeen
Pisoarin automaattinen vedensäätö	käynnistää pysyvän toiminnan
Aikasignaalin lähetysjärjestelmä (broadcast standard)	sähköinen kello: edistää 15 minuuttia päivässä, toimintahäiriö säätöpiirin aikasignaalisissa
TV ja radio vastaanottimet	kuuluva ääni (yli 20 kHz)
Radioamatöörit	häiriö etälähettimen vastaanottamisessa

Häiriintyviä sähkölaitteita on useita, mutta vuonna 2011 lähdeviitteen tehdyssä kyselyssä etäluettavien sähköenergiamittareiden aiheuttamat häiriöt olivat melko harvinaisia [17, s. 101]. Tällä hetkellä etäluettavien PLC-tekniikkaa hyödyntävien sähköenergiamittareiden määrät ovat kasvaneet huomattavasti Suomen sähköverkossa vuodesta 2011, jolloin ei voida varmuudella sanoa millaiset vaikutukset mittareilla on tällä hetkellä sähkölaitteisiin.

5. AIEMPIEN TUTKIMUKSIEN TULOKSIA JA TUTKIMUSONGELMA

Luvussa käsitellään aiempien tutkimuksien tuloksia ja päätelmiä, joista selviää mitä havaintoja on tehty tähän mennessä sähkömagneettisista häiriöistä sähköverkkotiedonsiirrossa. Näiden jälkeen tarkastellaan Carunalla tehdyn tutkimuksen tutkimusongelma, -asetelma, -menetelmä ja -materiaali. Lopuksi arvioidaan mitkä seikat mahdollisesti vaikuttivat tutkimuksen luotettavuuteen, yleistettävyyteen sekä tutkimustulosten oikeellisuuteen.

5.1 Aiempien tutkimuksien tuloksia

Sähköverkkotiedonsiirrossa tapahtuvia häiriöitä on tutkittu jonkin verran. Tehdyissä tutkimuksissa havaittiin, että ongelmia on syntynyt sähkölaitteiden sähkömagneettisista häiriöpäästöistä taajuusalueella 3..148 kHz. Sähköverkkotiedonsiirto tapahtuu taajuusalueella, jolle ei ole määritelty häiriöpäästöille raja-arvoja (lukuun ottamatta induktiokuumentimia) ja tällä taajuusalueella laitteiden sähkömagneettiset häiriöt häiritsevät ja voivat jopa estää sähköverkkotiedonsiirron. Tähän lukuun on koottu tuloksia kolmesta tutkimuksesta. Ensimmäisenä käsitellään CENELECin vuonna 2013 tekemää tutkimusta [5] EMI ongelmista taajuusalueella 2...150 kHz, jonka jälkeen tarkastellaan Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY) tehtyjä tutkimuksia. Tutkimukset käsittelevät energiasäästölamppujen verkostovaikutuksia ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välistä yhteensopivuutta. Tutkimukseen kuuluvat Vaihe I [17] vuodelta 2011 ja Vaihe II [16] vuodelta 2013.

5.1.1 Sähkömagneettisten häiriöiden vaikutukset, CENELEC

Seuraavaksi on koottu CENELEC:in tutkimuksessa [5] saatuja havaintoja taajuusalueella 2...150 kHz:

- 1) Sähkölaitteessa CE-merkintä ei taannut, että laite täyttäisi asetetut standardit.
- 2) Laiteryhmästä riippumatta sähkölaitteet häiritsivät ja häiriintyivät sähkömagneettisista häiriösignaaleista, mikä oikeuttaisi EMC-standardien tarkastuksen
- 3) Kaikki häiriötapaukset, jotka ilmenivät tutkimuksissa taajuusalueella 2...150 kHz, eivät aiheutuneet sähkömagneettisista häiriöistä.
- 4) Radiolähetyksen aika-signaalijärjestelmät (muun muassa DCF77) Euroopassa toimivat taajuusalueella, jolle ei ole määritetty tarkkaa standardointia. Häiriöt aiheuttivat normaalilla signaali-kohina-suhteella vaikeuksia, sekä minimi vastaanottotasolla. MCS (sähköverkkotiedonsiirto-järjestelmä) toimii lähellä samoja taajuuksia kuin DCF77 ja näin ollen syntyi toimintahäiriöitä.

- 5) On pystyttävä varmistamaan, että sähköverkkotiedonsiirtojärjestelmä ja ei-kommunikoivat laitteet toimivat yhdessä, jolloin on oltava riittävät raja-arvot häiriö- ja hyötysignaaleille.
- 6) Verkonkäyttäjien laitteista aiheutuvat EMI-ongelmat näkyvät muutamassa prosentissa asennetuissa mittareissa.
- 7) Verkonkäyttäjien laitteiden aiheuttamat EMI-ongelmat näkyvät enemmän PLC:ssä, kuin PLC:n aiheuttamat häiriöt verkkokäyttäjien laitteissa.
- 8) Energiamittareiden kommunikointi ongelmia aiheuttaa usein nopeussäädetyt sähkökäytöt (VSD), lamput elektronisella liitäntälaitteella, sekä hakkuriteholähteiset yksivaiheiset laitteet.
- 9) Puutteet määräyksissä ja standardeissa, jotka takaisivat onnistuneen MCS toiminnan.

Tutkimuksen EMI-tapauksissa nousee esille sähkömagneettisista häiriöistä aiheutuvat ongelmat:

- 1) Virhetoiminnot eri sähkölaitteissa aiheuttavat epäjatkuvia tahattomia häiriöitä sähkölaitteissa ja MCS:ssä
- 2) Sähkölaitteen häiriöpäästöt aiheuttavat tahattomasti virheellistä mittausdataa sähköenergiamittarilla
- 3) MCS:n virhetoiminta, johtuen puutteellista raja-arvoista tahattomille PLC-signaali päästöille
- 4) MCS:n virhetoiminta, johtuen tahattomien häiriöpäästöjen ja kuormien yhteisvaikutuksesta
- 5) Virhetoiminta aikasignaalin lähetyksjärjestelmässä tai elektroniikkapiirin säädön aikasignaalin, jotka johtuvat MCS-signaalin jännitteen/virran tai magneettikentän voimakkuuden häiriöpäästöistä

Potentiaalisiksi sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttajiksi tutkimuksessa nousi:

- sähkölaitteiden komponenttien ikääntyminen
- asennus, etenkin nopeussäätöisissä sähkökäytöissä
- laitteet, jotka eivät ole EMC-direktiivin mukaisia
- puuttuva standardi, joka rajoittaisi alle 150 kHz taajuisia häiriösignaaleja. [5, s. 54–55]

Tutkimuksessa nousi esille, että mikäli taajuusalueelta 2...150 kHz halutaan vähentää sähkömagneettisia häiriöitä, on sähkölaitteiden suunnittelussa huomioitava tämä taajuusalue paremmin (yhteensopivuus ja häiriösietokyky). Tämän lisäksi tulisi pystyä tunnistamaan sähkömagneettiset häiriöt 2...150 kHz taajuusalueella. Standardoinnissa tulisi huomioida suunnitteilla olevat teknologiat sekä viestintään tarkoitetut laitteet. [5, s. 55] Tutkimuksessa oli useita sähkölaitteita, joilla oli CE-merkintä, mutta eivät täyttäneet nykyisiä EMC-standardin vaatimuksia. [5, s. 59]

5.1.2 Häiriöiden vähentäminen - TTY, Vaihe I

Vaiheen I [17] tutkimuksessa kerrotaan kaksi vaihtoehtoa, joilla voitaisiin välttyä tiedonsiirron häiriintymisiltä: 1) häiriötä aiheuttavan elektronisen kuorman poiskytkentä tietyn ajaksi, jonka aikana suoritetaan tiedonsiirtosignaalin lähettäminen tai 2) suodattimen asentaminen mittarin jälkeen, jolloin käyttäjän sähkölaitteen häiriöt suodattuisivat ennen mittaria.

Tutkimuksessa havaittiin, että resonanssiin aiheuttamien häiriöiden lähettä on vaikea kohdentaa ja korjata, jolloin tutkimuksen mukaan olisi helpompaa vaihtaa sähkölaitteen tiedonsiirtotekniikka toiseen, esimerkiksi GSM-verkkoa hyödyntävään vaihtoehtoon. [17, s. 88–89] Tiedonsiirtotekniikan vaihtaminen tarkoittaa mittareiden vaihtamista, joka ei välttämättä ole kustannustehokkain vaihtoehto. Seuraavaksi tarkastellaan vaiheen II tutkimustuloksia, jossa löydettiin keino, jolla häiriölähte saadaan helposti paikallistettua.

5.1.3 Häiriöiden vähentäminen - TTY, Vaihe II

Vaiheen II aikana kehitettiin tarkempia keinoja, joilla paikannettiin onnistuneesti häiriölähte suuritaajuisilla jännite- ja virtamittauksilla sähköverkosta muuntamolta häiriölaitteeseen asti [16, s. 72]. Kun häiriölähte oli paikallistettu, voitiin aloittaa korjaustoimenpiteet, joilla häiriö saatiin sähköverkosta poistettua. Häiriöongelmien korjaukseen ja poistamiseen vaikutti häiritsevä laite.

Ensimmäisenä selvittiin onko laite hajonnut ja onko se oikein asennettu (erityisesti jos kyseessä oli taajuusmuuttaja). Kun nämä olivat korjattu/kunnossa, voitiin miettiä muita toimenpiteitä: EMC-suotimen asennus laitteen ja verkon väliin, kolmivaihejärjestelmässä laite voidaan siirtää eri vaiheeseen, tai laite siirretään eri kohtaan verkossa. Muina vaihtoehtoina esitettiin keskittimen siirtäminen toiseen kohtaan verkossa, tai lisätoistimen/keskittimen lisääminen sähköverkkoon. [16, s. 69]

Tutkimuksen aikana havaittiin, että suurin osa tällä hetkellä markkinoilla olevista EMC-suotimista oli suunniteltu yli 150 kHz häiriöiden suodattamiseen. Samoja EMC-suotimia käytetään kuitenkin myös taajuusalueella 60...95 kHz ilmenneiden häiriöiden poistamiseen kohtuullisella menestyksellä. [16, s. 70]

Tutkimuksessa havaittiin myös, että häiriötä tuottavan tai häiriytyvän laitteen siirtäminen toiselle vaiheelle ei ole kannattavaa, sillä vaiheiden välinen vaimennus oli vain noin 5...10 dB, jolloin häiriö ei vaihetta vaihtamalla hävinnyt. [16, s. 71]

Näiden kolmen tutkimuksen perusteella sähkömagneettiset häiriöt tulisi tunnistaa ja häiriön paikallistamisen avulla voidaan häiriö poistaa sähköverkosta. Tutkimuksissa löytyi sähkölaitteita, jotka aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä ja jotka olivat niille herkkiä.

Tämän lisäksi CE-merkintä oli virheellisesti joissakin sähkölaitteissa, sillä ne eivät täytäneet vaadittuja nykyisiä vaatimuksia sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. Taajuusmuuttajien osalta asennusvirheet todettiin yhdeksi PLC-häiriöiden syyksi. Tällä hetkellä on suunnitteilla standardeja sähköverkkotiedonsiirron toiminnan takaamiseksi, mutta niiden vaikutukset on nähtävissä vasta 5...10 vuoden kuluttua.

5.2 Tutkimusongelma

Tutkimusongelmana on sähkömagneettinen yhteensopivuus sähköverkkotiedonsiirrossa. Sähkömagneettinen yhteensopivuus tarkoittaa sitä, että sähkövirralla toimivien sähkölaitteiden sähkömagneettiset ilmiöt eivät saa vaikuttaa toisten laitteiden toimintaan häiritsevästi. Sähkömagneettiset ilmiöt synnyttävät häiriöaalloja ympärilleen ja sähköverkkoon. Näille häiriöille on asetettu raja-arvoja yli 150 kHz taajuuksille. Tämän taajuusalueen alapuolella ilmeneville häiriösignaaleille ei ole raja-arvoja, lukuun ottamatta induktiokuumentimia. Ongelmia syntyy sähköverkkotiedonsiirrossa, jonka taajuusalue on 3...95 kHz, kun Carunan sähköverkkoalueella sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntävien sähköenergiamittareiden mittaustietojen lähettäminen estyy.

Sähköverkkoyhtiöllä on velvollisuus mitata sähkönenergian kulutus ja toimittaa tiedot vaaditussa ajassa sähkönkäyttäjälle ja tasesähköyksikölle (Fingrid), viimeisin päivitys julkaistiin 13.4.2016 (Työ- ja elinkeinoministeriön hyväksymä asetus). Kun mittausdatan tiedonsiirto estyy, eikä mittarilta saada vaaditussa aikaikkunassa dataa toimitettua eteenpäin, niin sähkönkulutus arvioidaan ja korjataan myöhemmin, mikäli mittausdata on saatavilla.

Sähköverkkotiedonsiirrolle on määritetty (SFS-EN 50065-1) taajuusalueeksi 3...148,5 kHz ja tästä taajuusalueesta 3..95 kHz on tarkoitettu pienjännitejakeluverkossa tapahtuvalle valvonta-, ohjaus- ja sähköenergian mittaustietojen siirtoon. Kyseiselle taajuusalueelle ei ole asetettu sähkömagneettisille häiriöpäästöille raja-arvoja (lukuun ottamatta induktiokuumentimia). Standardissa SFS 6000-4-44 (Suojausmenetelmät, luku 3.3.3) ja aiemmissa tutkimuksissa on listattu useita sähkölaitteita, jotka tiedetään aiheuttavan sähkömagneettisia häiriöitä taajuusalueella 3...148,5 kHz.

Verkkopalveluehdoissa on maininta, että sähkönkäyttäjän sähkölaitteet eivät saa aiheuttaa häiriöitä sähköverkkoon tai muille käyttäjille tai estää mittaustietojen sähköverkkotiedonsiirtoa. Mikäli verkonhaltija havaitsee sähkönkäyttäjän sähkölaitteen aiheuttavan häiriöitä sähköverkkoon, on häiriöihin puututtava ja arvioitava tarvittavat korjaustoimenpiteet. Mikäli häiriöt koskevat mittaustiedonsiirron estymistä on häiriöiden poistamiseksi verkonhaltija määriteltävä keinot, joilla häiriö saadaan poistettua. Laitteen poistaminen sähköverkosta on viimeinen vaihtoehto, mikäli häiriötä ei muilla keinoin saada poistettua.

5.3 Tutkimusmenetelmä ja -materiaali

Tutkimusmenetelmä perustuu empiiriseen tutkimusmenetelmään, jossa häiriötapaukset yksilöidään ja saatuja tapaustietoja vertaillaan toisiinsa. Pyrkimyksenä on saada tilastollista vertailevaa tietoa tapauksista. Haluttuja tietoja ovat häiriönlähteen sijainti Carunan sähköverkkoalueella, häiriölähte ja korjaustoimenpide.

Tutkimusmateriaalina käytettiin Carunassa kirjattuja raportteja PLC-häiriötapauksista vuosilta 2012–2015. Raporteista selvisi muun muassa vian paikannus, häiriöiden aiheuttamien ilmiöiden kuvaus, kenttämittausten tiedot, korjausehdotus/-toimenpiteet sekä häiriön alaisena olevien sähköenergiamittareiden lukumäärä. Häiriöiden raportointi tapahtuu mittauspalvelujen tarjoajan ja sähköverkonhaltijan (Carunan) välillä.

5.4 Tulosten luotettavuus, yleistettävyys ja virhelähteitä

Tutkimus perustuu raportoituihin PLC-häiriötapauksiin. Häiriön aiheuttajista on poissuljettu muut häiriön aiheuttajat eli mittauksessa tai järjestelmässä tapahtuvat virheet/häiriöt. Häiriönlähde on paikallistettu kentällä tehdyillä mittauksilla ja raporttiin on kirjattu kentällä tehdyt havainnot. Kaikissa häiriötapauksissa häiriölähdettä ei saatu paikallistettua tiettyyn laitteeseen tai laitteistoon, jolloin häiriönlähde jäi tuntemattomaksi.

Tutkimusmateriaali sisältää kaikki raportoidut tarkasteluajanjakson aikana tapahtuneet tapaukset Carunan verkkoalueelta. Carunan sähköverkkoon kuuluu Suomen sähkönjakeluverkosta 20 % ja verkkoaluetta on useassa eri maakunnassa eri puolilla Suomea. Carunalla on asiakkaita pienjänniteverkkossa 655 000 useassa asiakassegmentissä.

Tutkimuksessa haettiin käyttöpaikkatunnuksella tiedot asiakassegmentistä, asumismuodosta ja muuntopiirin sähköenergiamittareiden lukumäärästä, jolloin virheellinen käyttöpaikkatunnus antoi virheelliset lisätiedot. Virhe havaittiin, kun häiriötapauksen vaikutuksen alaisena oli enemmän sähköenergiamittareita kuin muuntopiirissä oli. Ristiriitaiset tapaukset poistettiin kyseisessä tarkastelussa, mutta näitä ei huomioitu muissa tarkasteleissa virheellisten tietojen vähäisyyden vuoksi.

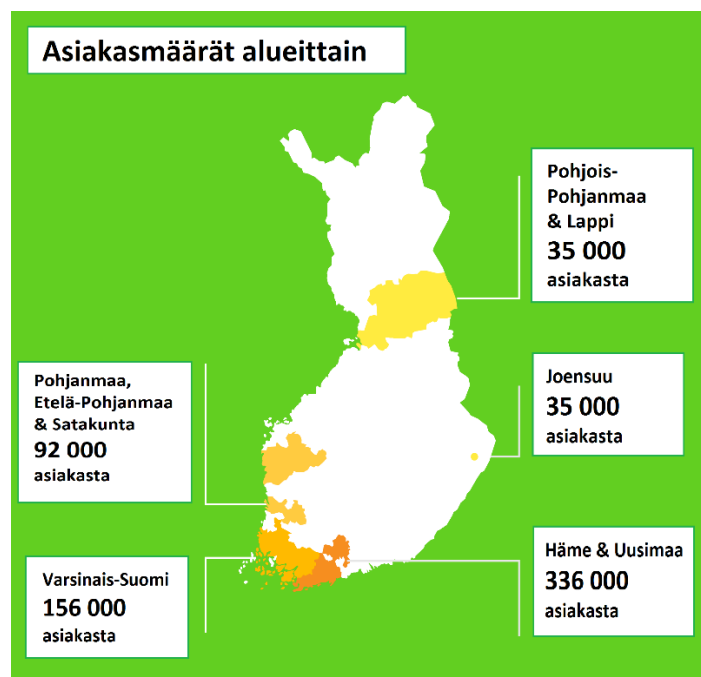
Joissakin raporteissa jäi epäselväksi häiriönlähteiden ja asennettujen suotimien lukumäärät. Häiriötapauksissa haluttu ratkaisu saavutettiin, kun sähköenergiamittareiden tiedonsiirto tapahtui onnistuneesti, jolloin osassa tapauksista jäi epäselväksi millä keinoin ratkaisu saavutettiin. Tutkimustuloksien esittelyssä on pyritty esittämään seikat, jotka tuloksista puuttuvat tai on otettu huomioon.

6. PLC-HÄIRIÖT CARUNAN SÄHKÖVERKKO-ALUEELLA

Luvussa tarkastellaan Carunalla tehdyn tutkimuksen tutkimustuloksia sähkömagneettisten häiriöiden vaikutuksista sähköverkkotiedonsiirtoon. Tutkimusmateriaalina olivat PLC-häiriöraportit vuosilta 2012–2015, joissa sähkölaitteen sähkömagneettinen häiriösignaali estää sähköenergiamittarin tiedonsiirron sähköverkossa. Häiriöraportti eli häiriötapaus on yhdistetty kiinteistön tai kiinteistön mittauksen alla olevaan käyttöpaikkaan, esimerkiksi kerrostaloon tai kerrostaloasuntoon, johon häiriönlähde eli häiriöitä aiheuttava laite/laitteet on paikannettu. Käyttöpaikassa on asiakas, jolla on voimassa oleva sähkönsiirtosopimus. Tarkasteltavista raporteista poistettiin häiriöraportit, jotka eivät liittyneet PLC-häiriöihin. Tutkimuksessa tarkastellaan yksittäisiä häiriötapauksia ja mikäli käyttöpaikasta on kirjattu useampi häiriötapaus (häiriöraportti), ne pidetään erillisinä tapauksina. Tutkimuksessa haluttiin selvittää häiriön sijainti sähköverkossa, häiriön vaikutukset muuntopiirissä, häiritsevät sähkölaitteet sekä kuinka häiriö saatiin poistettua.

6.1 Häiriötapausten jakaantuminen sähköverkkoalueella

Caruna on Suomen suurin sähkönsiirtoyhtiö, jolla oli vuonna 2015 pienjänniteverkossa asiakkaita noin 655 000 yksityistä henkilöä ja yritystä. Sähköverkon koko pituus on noin 79 000 kilometriä. Carunan sähköverkkoalueet ovat nähtävissä seuraavassa kuvassa 11. [3]



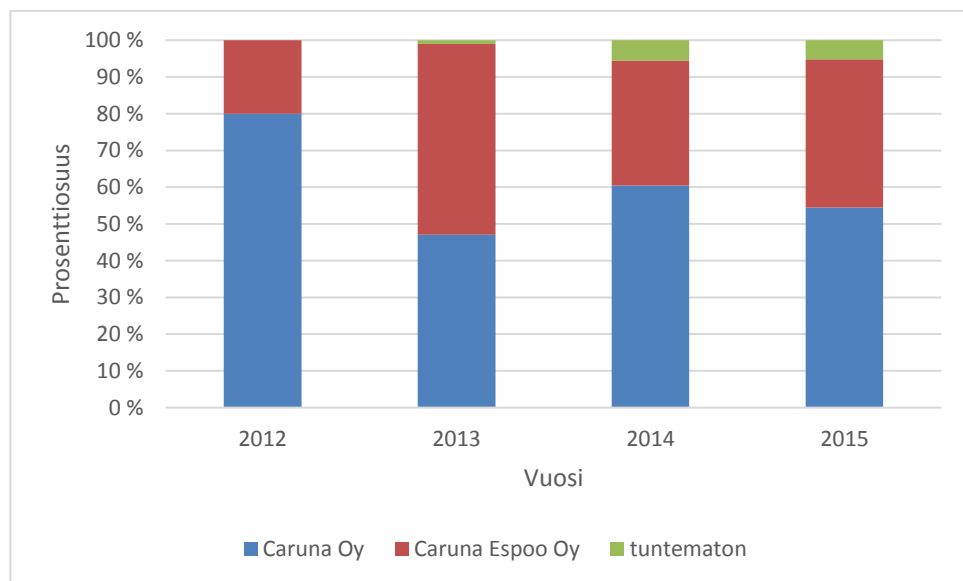
Kuva 11. Carunan asiakasmäärät alueittain. Perustuu lähteeseen [3]

Caruna-konsernin emoyhtiönä toimii Caruna Networks Oy. Caruna Oy ja Caruna Espoo Oy harjoittavat sähkön alue- ja jakeluverkkotoimintaa omilla maantieteellisillä alueillaan Suomessa. [3] Carunalla aloitettiin laaja etäluettavien sähköenergiamittareiden vaihto vuonna 2011 ja tavoitteena oli, että vuoden 2013 lopussa etäluettavia sähköenergiamittareita olisi asennettuna 600 000 kappaletta. Etäluettavat sähköenergiamittarit muutettiin tuntiluennan piiriin vuoden 2012 kesäkuun jälkeen (aiemmin kuukausiluennassa). [33] Tuntiluennan käyttöönotto on nähtävissä PLC-häiriöiden määrissä, sillä vuonna 2012 raportoituja häiriötä oli huomattavan paljon vähemmän kuin seuraavina vuosina, jolloin tuntiluennan käyttö on otettu laajemmin käyttöön.

6.1.1 Jakauma Caruna Oy/Caruna Espoo Oy:n verkkoalueiden kesken

Caruna Oy vastuualueisiin kuuluvat sähkösiirto Etelä-, Lounais- ja Pohjois-Suomessa sekä Satakunnassa, että Pohjanmaalla. Caruna Espoo Oy alueisiin kuuluu Espoo, Joensuu, Kirkkonummi ja Kauniainen. Vuonna 2015 Caruna Oy asiakasmäärä oli 459 000 ja Caruna Espoo Oy oli 196 000. [3]

Häiriötapausta vuosina 2012–2015 oli: 5; 102; 162; 134 kappaletta eli yhteensä 403 tapausta. Kuvassa 12 on kuvattu häiriötapausten jakautuminen yhtiöiden välillä eri vuosina.



Kuva 12. PLC-häiriötapaukset yhtiöittäin vuosina 2012–2015.

Neljän vuoden aikana raportoiduista tapauksista 58 % on tapahtunut Caruna Oy:n sähköverkkoalueella, jossa asiakkaista sijaitsee 70 %. Tämän neljän vuoden tarkastelujakson aikana häiriötapaukset koskettivat Caruna Oy:n alueen asiakkaista 0,05 % ja Caruna Espoo Oy:n alueella 0,08 %.

6.1.2 Jakauma maakunnittain

Carunan sähköverkkoa on useissa eri maakunnissa. Sitä löytyy Hämeestä, Uudeltamaalta, Varsinais-Suomesta, Pohjanmaalta, Etelä-Pohjanmaalta, Pohjois-Pohjanmaalta, Satakunnasta sekä Lapista. Suurina kaupunkeina alueeseen kuuluvat Espoo ja Joensuu. Seuraavaan taulukkoon 11 on koottu alueiden pien- ja keskijännitteisen sähköverkon pituuksia. [3]

Taulukko 11. Pien- ja keskijännitteisen sähköverkon pituudet alueittain. [3]

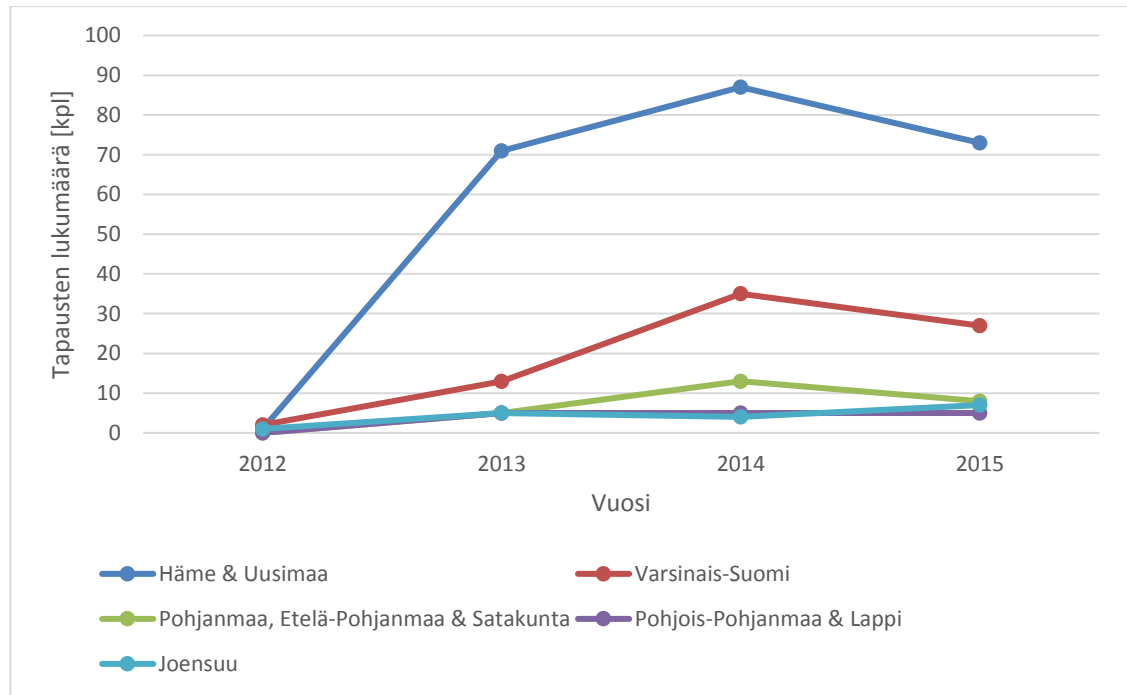
Alue	Johtopituus [km]
Varsinais-Suomi	25 800
Häme & Uusimaa	24 000
Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta	16 000
Pohjois-Pohjanmaa & Lappi	9 600
Joensuu	1 400

Suurimmat sähköverkot ovat Varsinais-Suomessa ja Häme & Uusimaa -alueella. Alueellisesti asiakasmäärissä on myös eroja ja alueiden asiakasmäärät ovat koottu seuraavaan taulukkoon 12, jonka tiedot ovat vuodelta 2015. [3]

Taulukko 12. Asiakasmäärät alueittain vuonna 2015. [3]

Alue	Asiakasmäärä [kpl]
Häme & Uusimaa	336 000
Varsinais-Suomi	156 000
Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta	92 000
Pohjois-Pohjanmaa & Lappi	35 000
Joensuu	35 000

Häme & Uusimaa -alueella sijaitsee asiakkaista 51 % ja Varsinais-Suomessa 24 %. Samaa aluejakoa käytetään seuraavassa kuvassa 13, jossa nähdään aluekohtaiset häiriöta-pausmäärien kehitykset vuosien 2012–2015 aikana.



Kuva 13. Häiriötapausten kehittyminen alueittain vuosina 2012–2015.

Neljän vuoden aikana Häme & Uusimaa -alueella tapauksista ilmeni 63,2 % ja nämä tapaukset koskettivat asiakkaista 0,07 %. Varsinais-Suomessa häiriötapauksista ilmeni 21,0 % ja alueen asiakkaista ne koskettivat 0,05 %. Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta -alueella häiriötapaukset koskettivat 0,03 %, Pohjois-Pohjanmaa & Lappi -alueella 0,04 % ja Joensuussa 0,05 % alueiden asiakkaista. Vaikka alueellisesti häiriöiden määrät poikkeavat huomattavasti toisistaan, ovat tapausten lukumäärät asiakasmääriin nähden samaa suuruusluokkaa.

Kuntakohtaisesti eniten häiriöitä esiintyi Häme & Uusimaa -alueella Espoossa, jossa ilmeni häiriötapauksista 37 %, Hyvinkäällä 7 %, Riihimäellä 4 %. Varsinais-Suomessa suurimmaksi nousi Salo 5 % ja viidentenä alueena oli Joensuu 5 %.

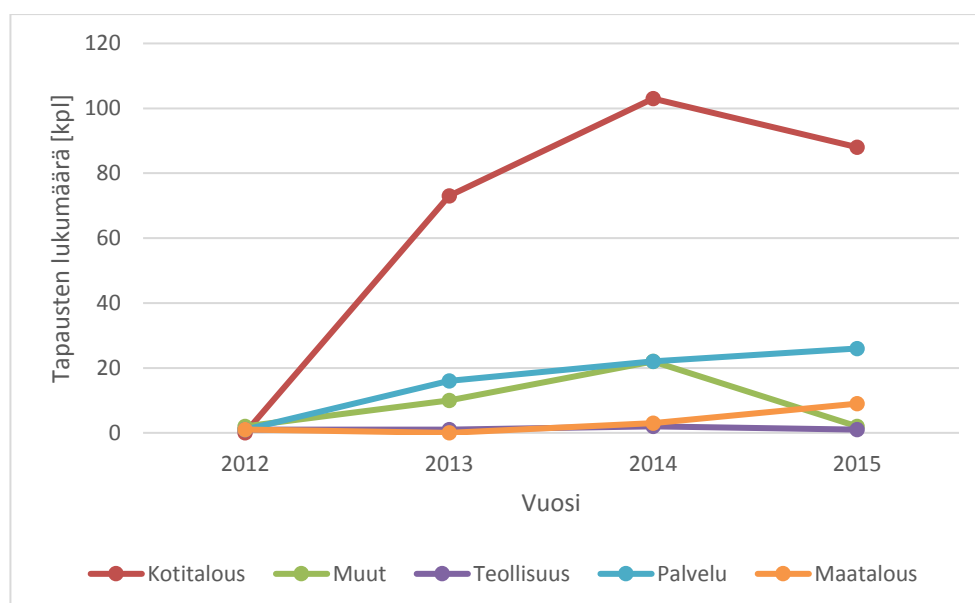
6.1.3 Jakauma asiakassegmenteittäin

Carunan asiakkaat voidaan jakaa viiteen eri asiakassegmenttiin. Seuraavaan taulukkoon 13 on merkitty asiakassegmentti-osuudet yhtiöittäin Caruna Oy:lle ja Caruna Espoo Oy:lle.

Taulukko 13. Caruna Oy:n ja Caruna Espoo Oy:n asiakassegmentit vuodelta 2014. [3]

Asiakassegmentti	Caruna Oy	Caruna Espoo Oy
Kotitaloudet	31 %	48 %
Muut	27 %	3 %
Teollisuus	18 %	10 %
Palvelut ja rakentaminen	17 %	39 %
Maatalous	7 %	0 %

Molempien yhtiöiden suurimpina asiakasryhminä ovat kotitaloudet. Caruna Oy:llä lähes yhtä suurena ryhmänä on muut-segmentti (yhdyskuntahuolto) ja Caruna Espoo Oy alueella Palvelut ja rakentaminen -segmentti nousee huomattavan suureksi. Koko Carunan suurin asiakassegmentti on selkeästi Kotitaloudet (36 %) ja toiseksi isoimpana on Palvelut ja rakentaminen (24 %). Muut (20 %) ja Teollisuus (16 %) asiakassegmenttien osuudet ovat lähes yhtä suuret ja Maatalous-asiakassegmentin osuudeksi jää 5 %. Seuraavaan kuvaan 14 on kuvattu eri asiakassegmenteillä ilmenneiden häiriötapausmäärien kehitys vuosien 2012–2015 aikana koko Carunan alueella. Tarkastelusta puuttuu häiriötapauksista 4 %, joissa jäi epäselväksi käyttöpaikan asiakassegmentti.

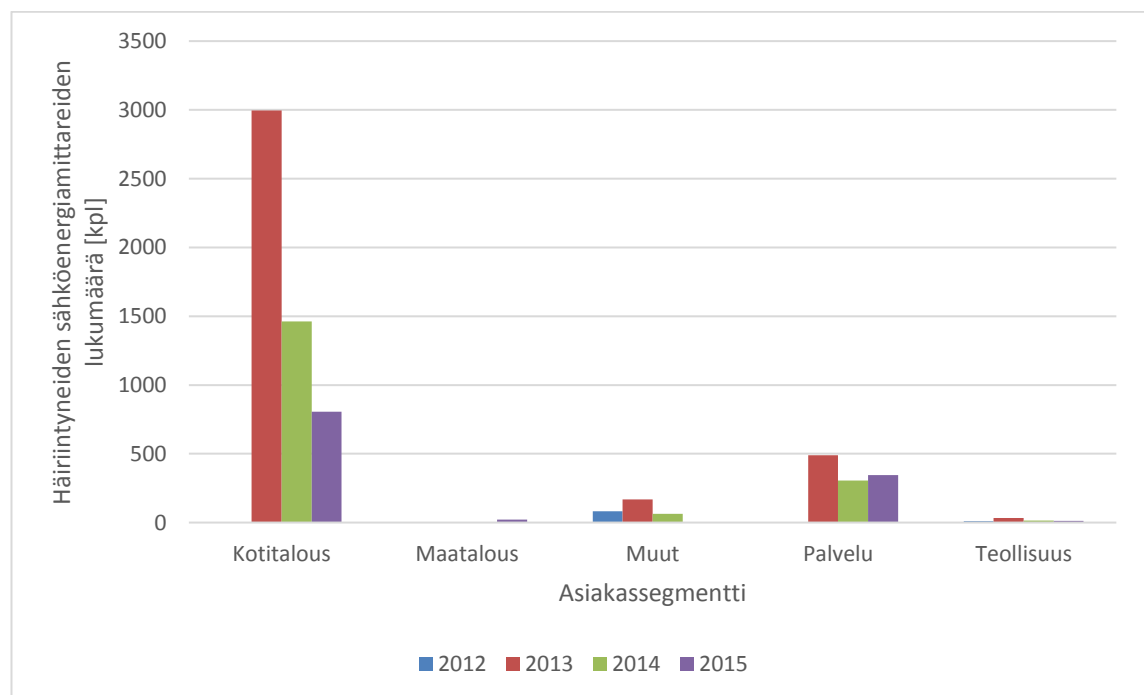


Kuva 14. Häiriötapaukset asiakassegmenteittäin vuosina 2012–2015. Palvelu kuvaa asiakassegmenttiä Palvelut ja rakentaminen.

Huomattava määrä häiriötapauksista on paikannettu Kotitalous-segmenttiin, jonka häiriötapausten lukumäärä on vuoden 2012 jälkeen ollut huomattavasti korkeammalla kuin muissa asiakassegmenteissä. Toiseksi suurimpana segmenttinä on Palvelut ja rakentaminen. Palvelut ja rakentaminen -segmentin häiriötapausten lukumäärä on vuosien aikana ollut maltillisessa kasvussa neljän vuoden aikana. Maatalous-segmentissä

häiriötapausten määrä on kolminkertaistunut vuonna 2015 edellisvuoteen nähden. Alhaisimmat häiriötapausmäärät ovat Teollisuus-segmentissä, joka mahdollisesti johtuu siitä, että Teollisuus-segmentissä käytetään muuta tiedonsiirtotekniikkaa. Muut-segmentissä ilmeneen häiriötapausten lukumäärä on ollut kasvussa vuoteen 2014 asti, mutta vuonna 2015 tapahtui huomattava häiriötapausten vähentyminen. Muut-segmenttiin kuuluvat vesi-, jäte- ja energiahuoltolaitokset, joista pumppaamot sekä lämmön- ja sähköntuotantolaitokset kuuluvat Carunan ohjeistuksen piiriin kohteista, joihin ei asenneta sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntäviä etäluettavia sähköenergiamittareita vuoden 2015 loppupuolen jälkeen. Mahdollisesti mittari muutokset aloitettiin jo aiemmin samana vuonna, mikä selittäisi häiriötapausten määrän romahtamisen Muut-asiakassegmentissä. Määrien romahdus on nähtävissä myös yhdyskuntahuollon kiinteistöissä havaituissa määrissä kuvassa 19.

Kokonaisuudessaan häiriötapausten PLC-häiriöt ovat vuosien aikana vaikuttaneet tuhansiin sähköenergiamittareihin Carunan sähköverkkoalueella, joka on nähtävissä kuvassa 15.



Kuva 15. Häiriötapausten PLC-häiriöiden vaikutuksen alaisena olevien sähköenergiamittareiden lukumäärä vuosina 2012–2015. Palvelu kuvaa Palvelut ja rakentaminen asiakassegmenttiä.

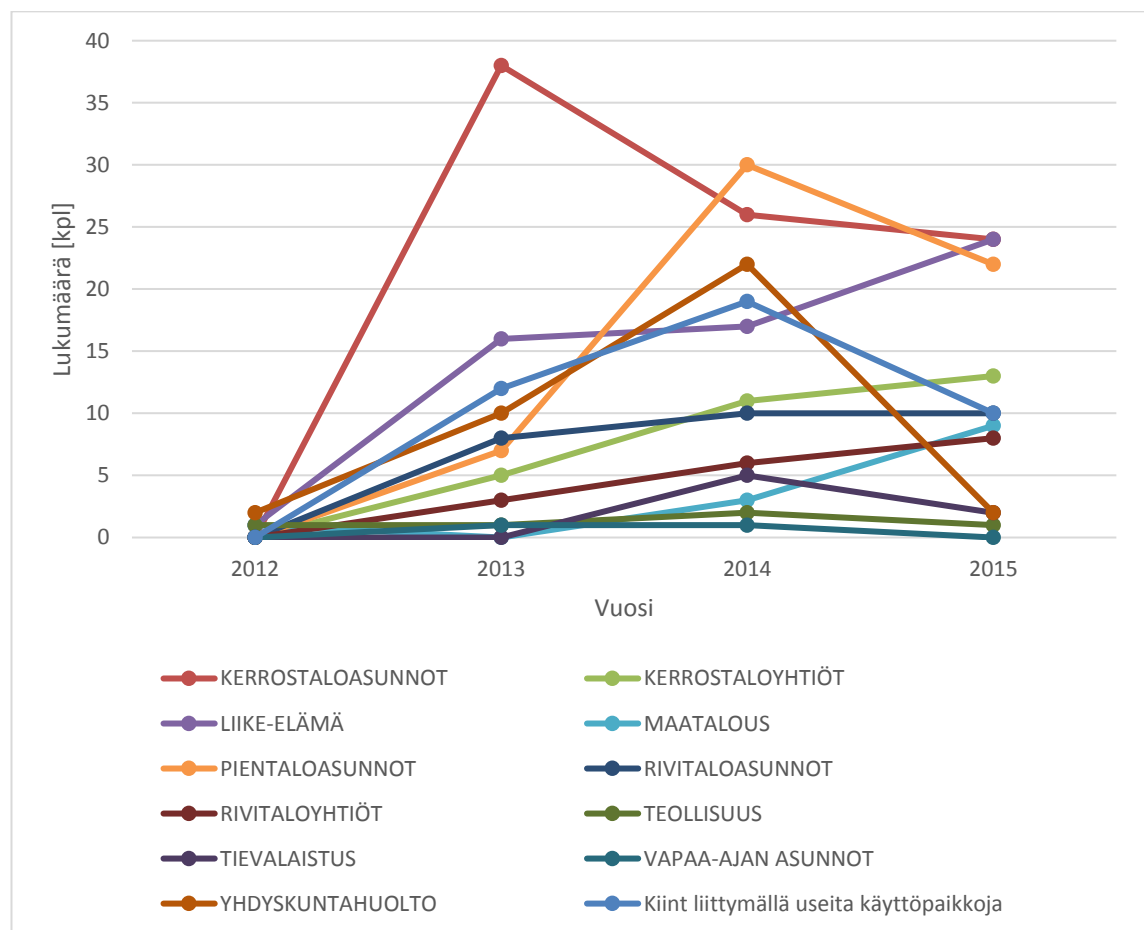
Kuvaan 15 on eroteltu sähköenergiamittareiden lukumäärät asiakassegmenteittäin. Kotitalous-segmentissä ilmenneiden PLC-häiriöiden vaikutukset ovat olleet suurimmat, mutta vuosien aikainen kehitys on ollut laskusuuntainen. PLC-häiriöiden vaikutuksen alaisena oli vuonna 2015 alle kolmannes 2013 määriin nähden, 806 kappaleeseen 2996 kappaleesta. Palvelut ja rakentaminen -asiakassegmentin PLC-häiriön alaisena olevien

sähköenergiamittareiden määrä on laskenut vuodesta 2013 (489 kappaleesta), jonka jälkeen sähköenergiamittareiden on määrä on pysynyt samalla tasolla.

6.1.4 Jakauma kiinteistömuodoittain

Häiriötapausten PLC-häiriö paikannettiin käyttöpaikkaan, joka voidaan jaotella asiakassegmentin lisäksi kiinteistömuodon perusteella. Tiedetyt kiinteistömuodot ovat tiettyjen asiakassegmenttien alla ja tässä tutkimuksessa nousseet kiinteistömuodot olivat jaoteltu seuraavasti: kotitalous-segmenttiin kuuluivat kerrostaloasunnot, kerrostaloyhtiöt, pientaloasunnot, rivitaloasunnot, rivitaloyhtiöt, vapaa-ajan asunnot sekä kiinteistöt, joissa on useita käyttöpaikkoja. Palvelut ja rakentaminen -segmenttiin kuuluivat liike-elämä ja tievalaistus. Muut-segmenttiin kuului yhdyskuntahuolto. Teollisuus- ja maatalous-segmentit eivät sisältäneet muita kiinteistöjä.

Häiriötapaukset paikannettiin kiinteistön käyttöpaikkaan, esimerkiksi kerrostaloon, tai kiinteistön alla olevaan käyttöpaikkaan, esimerkiksi kerrostaloasuntoon. Näiden tietojen perusteella saatiin selvitettyä käyttöpaikan kiinteistömuoto. Kuvassa 19 on tarkasteltu häiriötapausten kehittymistä eri kiinteistömuodoilla vuosien 2012–2015 aikana. Tarkastelussa ei ole huomioitu tapauksia, joissa käyttöpaikan kiinteistömuoto jäi epäselväksi.



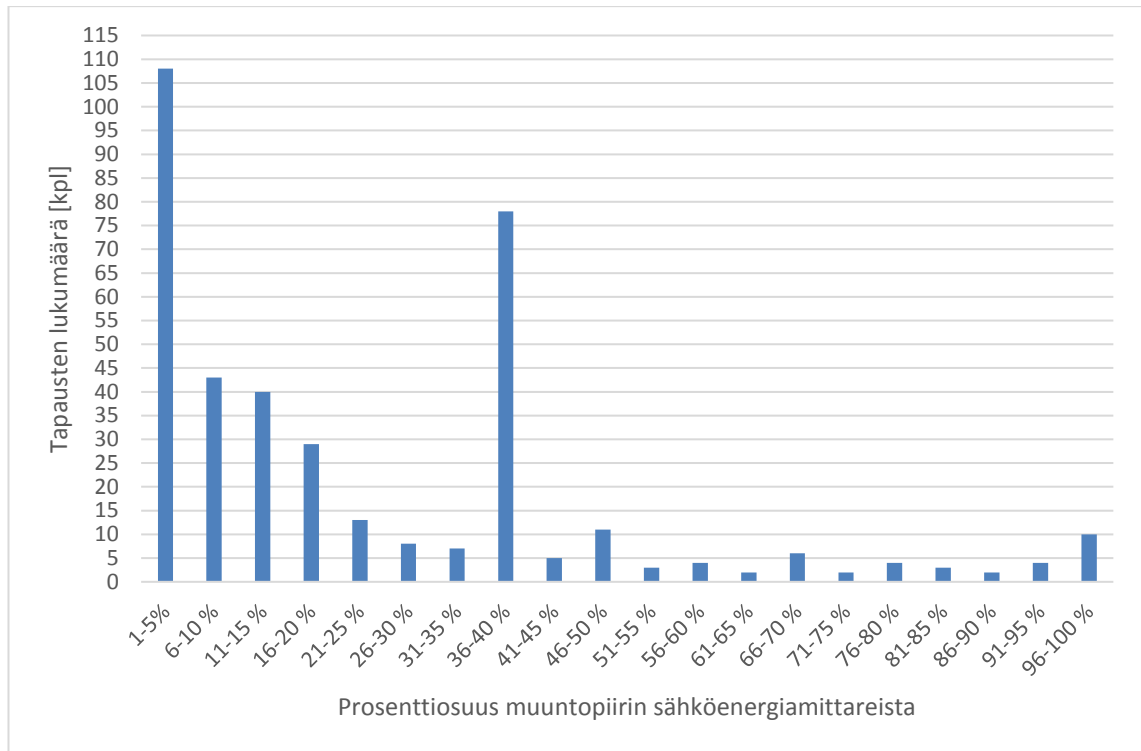
Kuva 16. Häiriötapausten jakautuminen eri kiinteistömuodoille, vuosina 2012–2015.

Vuoteen 2014 mennessä häiriötapausten lukumäärät eri kiinteistömuodoilla ovat olleet tasaisesti kasvussa, mutta suurempia alaspäin suuntaavia muutoksia on havaittavissa kerrostaloasuntojen (punainen), pientaloasuntojen (oranssi) ja yhdyskuntahuolto -kiinteistöjen (ruskea) tapausten määrissä vuosien 2014 ja 2015 välillä. Jatkuvaa kasvua on tapahtunut liike-elämän (violetti), kerrostaloyhtiöiden (vaaleanvihreä), maatalouden (vaaleansininen) sekä rivitaloyhtiöiden (tumman ruskea) kiinteistöissä. Vuosien aikana on havaittavissa muutoksia, jotka näkyvät voimakkaammin osassa kiinteistöryhmissä, mutta toisissa kiinteistöissä ei ole havaittavissa minkäänlaisia muutoksia, jotka voisivat liittyä sähkölaitteiden käytön tai mittauksen muutokseen näissä kiinteistöissä.

Lähemmässä tarkastelussa suurimpana joukkona ovat kerrostalot, joissa häiriötapauksia löydetään asunnoista ja yhtiön teknisistä tiloista. Liike-elämän piiriin kuuluvat esimerkiksi teleoperaattoreiden tukiasemat, joiden häiriömäärät ovat vuosien aikana olleet kasvussa. Yhdyskuntahuolto sisältää vesi-, energia- ja jätehuollon, joista häiriötapauksia havaittiin eniten pumppaamoissa. Yhdyskuntahuolto-kiinteistöillä oli voimakasta kasvua vuosien 2012–2014 aikana, joka kuitenkin romahti huomattavasti vuonna 2015. Kyseinen ilmiö mahdollisesti johtui vuonna 2015 Carunalla asetetun ohjeistuksen (luvussa 4.5) käyttönotosta, jossa siirrytään käyttämään PTP-sähköenergiamittareita muun muassa pumppaamo-kiinteistöissä.

6.2 PLC-häiriön vaikutukset muuntopiirin sähköenergiamittareihin

Häiriötapaus on sidoksissa käyttöpaikkaan, ja käyttöpaikassa sijaitsevan häiriölähteen aiheuttamat PLC-häiriöt vaikuttavat käyttöpaikan sähköenergiamittariin estäen sähköverkotiedonsiirron. PLC-häiriöt voivat edetä sähköverkkoa pitkin muuntopiirin muihin käyttöpaikkoihin ja tässä tutkimuksessa tarkastellaan käyttöpaikkojen sähköenergiamittareihin vaikuttavia PLC-häiriöitä. Seuraavaan kuvaan 17 on kuvattu prosenttiosuuksia, kuinka moneen sähköenergiamittariin yhteys katkesi muuntopiirissä, jossa häiriötapausten PLC-häiriö ilmeni. Kuvaan ei ole merkitty tapauksia, joissa ei selvinnyt vaikutusalueen laajuutta.

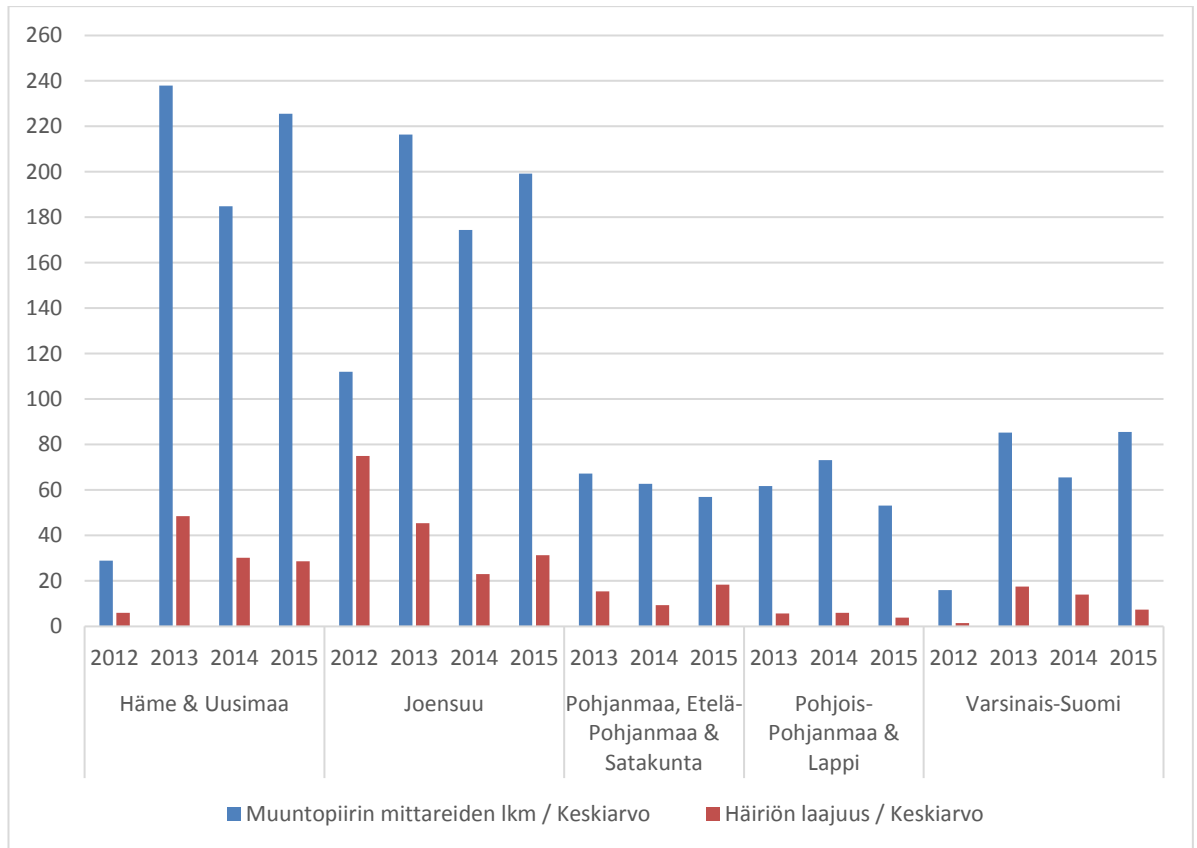


Kuva 17. Häiriytyneiden sähköenergiamittareiden osuus muuntopiirin kaikista sähköenergiamittareista vuosina 2012–2015.

Suurimmassa osassa häiriötapauksista PLC-häiriö vaikutti vain 1 %...5 % muuntopiirin sähköenergiamittareista. Huomattava poikkeama on sellaisten häiriötapausten lukumäärissä, joissa häiriölaajuus oli 36 %...40 % muuntopiirin sähköenergiamittareista. Kyseessä on mahdollisesti samanlainen häiriölähte, jonka häiriösignaalit vaikuttavat usein yhtä laajasti muuntopiirissä.

6.2.1 Vaikutukset muuntopiirien sähköenergiamittareihin verkkoalueittain

Seuraavassa kuvassa 18 on eritelty alueittain keskimääräiset sähköenergiamittareiden lukumäärät muuntopiireissä ja häiriötapauksissa PLC-häiriön vaikutuksen alaisena olevien sähköenergiamittareiden lukumäärät. Tarkastelussa on mukana kaikki tapaukset, joissa laajuus on saatu selvitettyä.



Kuva 18. Muuntopiirien sähköenergiamittareiden ja häiriön vaikutuksen alaisena olevien sähköenergiamittareiden keskimääräiset lukumäärät vuosina 2012–2015.

Edellä olevasta kuvasta nähdään, että Häme & Uusimaa -alueen sekä Joensuun muuntopiirien keskimääräinen sähköenergiamittareiden lukumäärä muuntopiireissä on huomattavasti suurempi, kuin muilla alueilla. Muuntopiirien sähköenergiamittareiden lukumäärässä on huomattava vaihtelu, sillä suurimmissa muuntopiireissä on lähes 600 sähköenergiamittaria, kun taas pienemmissä muuntopiireissä on vain yksi sähköenergiamittari. Suurin osa yli 400 sähköenergiamittarin muuntopiireistä löytyvät Häme & Uusimaa -alueelta.

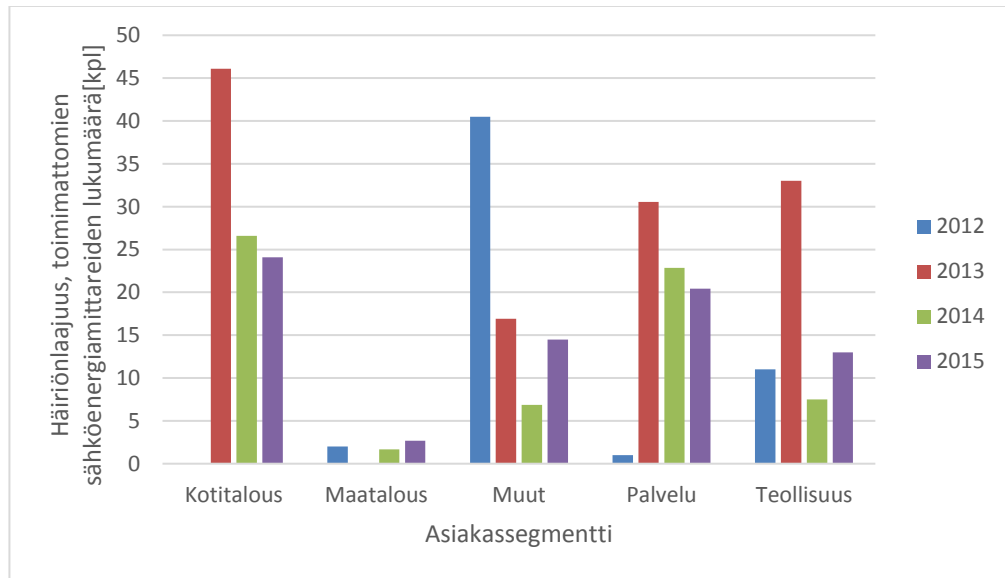
Neljän vuoden aikana häiriön vaikutuksen alaisena olevien sähköenergiamittareiden määrät muuntopiireissä keskimäärin eri alueilla olivat:

- Häme & Uusimaa: 16,4 %
- Joensuu: 18,7 %
- Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta: 21,5 %
- Pohjois-Pohjanmaa & Lappi: 8,1 %
- Varsinais-Suomi: 15,8 %

Suurimmat vaikutukset ovat Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta -alueella. Selkeästi pienimmät vaikutukset ovat Pohjois-Pohjanmaa & Lappi -alueella. Keskimäärin Varsinais-Suomen - ja Häme & Uusimaa -alueilla häiriölaajuudet olivat saman suuruiset, vaikka Häme & Uusimaa -alueella muuntopiirit ovat yli kaksinkertaiset verrattuna Varsinais-Suomen muuntopiirien keskimääräiseen kokoon nähden.

6.2.2 Vaikutukset muuntopiirien sähköenergiamittareihin asiakassegmenteittäin

Seuraavaksi tarkastellaan eri asiakassegmenteissä ilmenneiden häiriötapausten PLC-häiriöiden keskimääräisiä laajuuksia muuntopiiritasolla. Kuvassa 16 on tarkastelussa asiakassegmenttikohittaiset häiriötapausten PLC-häiriöiden keskimääräiset laajuudet muuntopiireissä vuosina 2012–2015.



Kuva 19. Häiriötapausten PLC-häiriön keskimääräinen laajuus asiakassegmenteittäin muuntopiirissä vuosina 2012–2015. Palvelu kuvaa asiakassegmenttiä Palvelut ja rakentaminen.

Kuvasta 16 on nähtävissä, että häiriötapausten PLC-häiriöiden keskimääräiset laajuudet Kotitalous-segmentissä on vuosien aikana olleet laskussa. Maatalous-segmentin häiriötapausten PLC-häiriöiden laajuudet muuntopiireissä pysyvät alle viidessä sähköenergiamittarissa ja yhtenä syynä voidaan pitää muuntopiirien sähköenergiamittareiden vähäistä lukumäärää, joka oli keskimäärin 11 mittaria. Muut-segmentissä vuonna 2012 ilmeni tapauksia kaksi, joiden laajuudet oli keskimäärin 41. Vaikka seuraavina vuosina häiriötapausta oli 10 ja 22, ei häiriöiden laajuudet enää nousseet yhtä korkeiksi. Vuonna 2015 Muut-segmentin häiriötapausten määrän laskiessa kahteen, PLC-häiriöiden vaikutukset näkyivät keskimäärin muuntopiiriin 15 sähköenergiamittarissa.

Palvelut ja rakentaminen -segmentissä havaittujen häiriötapausten lukumäärät nousivat vuosittain, mutta niiden laajuudet muuntopiireissä ovat näinä vuosina pienentyneet. Teollisuus-segmentissä häiriötapausten PLC-häiriöiden keskimääräiset laajuudet ovat olleet alle 15 vuosina 2012, 2014 ja 2015, kun häiriötapausta oli kunakin vuonna vain yksi. Vuonna 2013 häiriötapausta oli kaksi ja näiden laajuudet olivat reilusti yli kaksinkertaiset muihin vuosiin nähden.

6.2.3 Vaikutukset muuntopiirien sähköenergiamittareihin kiinteistömuodoittain

Seuraavaan taulukkoon 14 on koottu häiriötapausten keskimääräiset laajuudet, kun tarkastellaan mihin kiinteistöön häiriötapaus on paikannettu vuosina 2012–2015. Prosenttiluvut kuvaavat häiriötapausten keskimääräistä laajuutta muuntopiirin kaikista sähköenergiamittareista eri alueilla. Tarkastelusta puuttuu tapaukset, joiden kiinteistötietoja ei ollut saatavilla. Aluekohtaisissa arvoissa on käytössä muuntopiirien sähköenergiamittareiden keskimääräinen lukumäärä ja häiriötapausten PLC-häiriön vaikutuksenalaisena olevien sähköenergiamittareiden keskimääräinen lukumäärä.

Taulukko 14. Alueiden häiriötapausten laajuudet keskimäärin muuntopiireissä eri kiinteistömuodoilla, vuosina 2012–2015. Lyhenne Kiint tarkoittaa kiinteistöä, Vap aj vapaa-ajan asuntoa ja merkintä N/A kuvaa ryhmää, jonka kiinteistömuotoa ei ole tiedossa.

Alue / Kiinteistömuoto	Häiriötapausten laajuus muuntopiirissä / Keskiarvo
Häme & Uusimaa	16,4 %
KERROSTALOASUNNOT	15,6 %
KERROSTALOYHTIÖT	19,7 %
Kiint liittymällä useita käyttöpaikkoja	15,0 %
Kiinteistöyhtiöt	8,8 %
LIIKE-ELÄMÄ	29,3 %
MAATALOUS	14,5 %
PIENTALOASUNNOT	9,6 %
RIVITALOASUNNOT	14,0 %
RIVITALOYHTIÖT	7,0 %
TIEVALAISTUS	3,2 %
YHDYSKUNTAHUOLTO	18,2 %
Joensuu	18,7 %
KERROSTALOASUNNOT	17,0 %
Kiint liittymällä useita käyttöpaikkoja	36,5 %
LIIKE-ELÄMÄ	18,6 %
PIENTALOASUNNOT	0,5 %
TEOLLISUUS	12,3 %
TIEVALAISTUS	16,7 %
YHDYSKUNTAHUOLTO	52,3 %
Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta	21,5 %
KERROSTALOYHTIÖT	85,5 %
LIIKE-ELÄMÄ	100,0 %
MAATALOUS	58,8 %
PIENTALOASUNNOT	7,5 %

RIVITALOASUNNOT	8,8 %
RIVITALOYHTIÖT	10,8 %
TEOLLISUUS	63,6 %
TIEVALAISTUS	71,4 %
YHDYSKUNTAHUOLTO	55,5 %
Pohjois-Pohjanmaa & Lappi	8,1 %
KERROSTALOASUNNOT	9,9 %
KERROSTALOYHTIÖT	9,9 %
LIIKE-ELÄMÄ	1,9 %
PIENTALOASUNNOT	6,5 %
RIVITALOASUNNOT	7,1 %
Vap aj liittymällä useita käyttöpaikkoja	4,8 %
VAPAA-AJAN ASUNNOT	9,5 %
YHDYSKUNTAHUOLTO	7,7 %
Varsinais-Suomi	15,8 %
KERROSTALOASUNNOT	11,8 %
KERROSTALOYHTIÖT	15,2 %
Kiint liittymällä useita käyttöpaikkoja	11,1 %
LIIKE-ELÄMÄ	26,0 %
MAATALOUS	17,0 %
N/A	0,9 %
PIENTALOASUNNOT	16,4 %
RIVITALOASUNNOT	13,1 %
RIVITALOYHTIÖT	8,7 %
TEOLLISUUS	35,7 %
TIEVALAISTUS	100,0 %
YHDYSKUNTAHUOLTO	41,3 %

Häme & Uusimaa -alueella häiriötapausten PLC-häiriön vaikutuksenalaisena oli muuntopiirien sähköenergiamittareista 16 %, kun alueen muuntopiirien keskimääräinen sähköenergiamittareiden lukumäärä oli 213 kappaletta. Kun häiriötapausten PLC-häiriö ilmeni liike-elämä-kiinteistössä, vaikutti se muuntopiirissä keskimäärin 29 % sähköenergiamittareista. Kerrostalosta paikallistettu häiriötapausten PLC-häiriö häiritsee sähköenergiamittareista keskimäärin 16,5 % muuntopiirin sähköenergiamittareista.

Joensuun alueella häiriötapausten PLC-häiriö vaikutti keskimäärin 19 % muuntopiirien sähköenergiamittareista, joita oli keskimäärin 193 kappaletta muuntopiirissä. Häiriötapausten PLC-häiriön ilmetessä yhdyskuntahuolto-kiinteistössä, häiriö näkyy keskimäärin yli puolessa muuntopiirin sähköenergiamittareista. Kun PLC-häiriö oli liittymässä, jossa oli useita käyttöpaikkoja, häiriönlaajuus näkyy keskimäärin yli kolmanneksessa

muuntopiirin sähköenergiamittareista. Kerrostalo-kiinteistöissä PLC-häiriön vaikutukset olivat samaa suuruusluokkaa kuin Häme & Uusimaa -alueella eli 17 %.

Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta -alueella häiriötapausten PLC-häiriön keskimääräinen laajuus oli muuntopiirissä 22 %, kun muuntopiirin sähköenergiamittareita oli keskimäärin 62 kappaletta. Lukumääräisesti häiriöt pysyvät maltillisina, kun liike-elämän, maatalouden, teollisuuden, tievalaistuksen ja yhdyskuntahuollon kiinteistöjen muuntopiireissä on keskimäärin 7...28 sähköenergiamittaria, vaikka prosentit olivat korkeita. Kerrostaloyhtiön kiinteistöissä ilmenevän häiriötapausten PLC-häiriön vaikutukset olivat korkeat keskimäärin 86 %, kun muuntopiirin sähköenergiamittareista, joita oli 110 kappaletta.

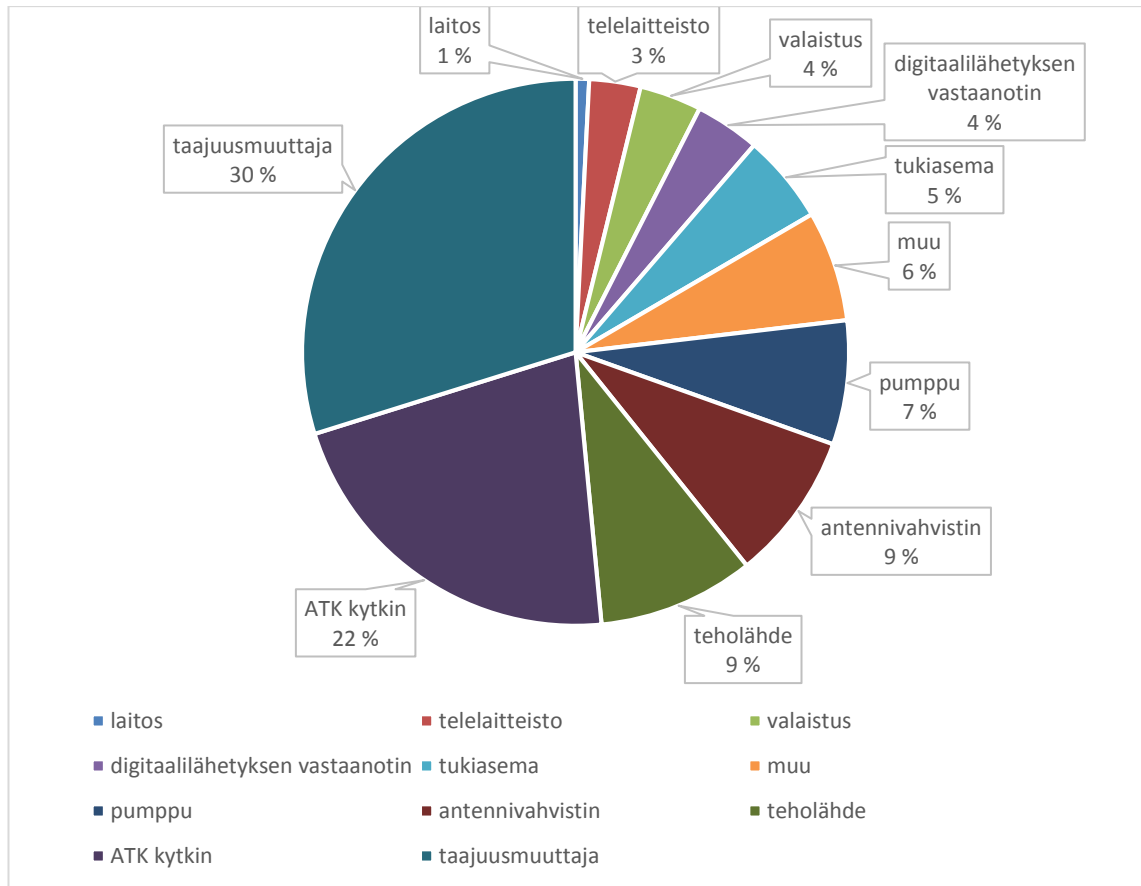
Pohjois-Pohjanmaa & Lappi -alueella häiriötapausten PLC-häiriön laajuus oli keskimäärin vain 7 %, kun keskimääräinen sähköenergiamittareiden lukumäärä oli 63 kappaletta. PLC-häiriön laajuus muuntopiireissä pysyy matalana myös kussakin kiinteistömuodossa. Varsinais-Suomen alueella häiriötapausten laajuus oli keskimäärin 15 %, kun muuntopiirissä oli keskimäärin 75 kappaletta sähköenergiamittareita. Tievalaistus-kiinteistöissä ilmennyt häiriötapausten PLC-häiriö vaikutti muuntopiirin kaikkiin 34 sähköenergiamittariin. Koko Carunan sähköverkkoaluetta tarkasteltaessa häiriötapausten PLC-häiriön vaikutukset olivat laajimmat muuntopiireissä, joissa PLC-häiriö löytyi yhdyskuntahuollon kiinteistöissä 31 %, joissa oli keskimäärin 39 sähköenergiamittaria. Seuraavaksi suurimmat vaikutukset olivat muuntopiireissä, joissa PLC-häiriö paikannettiin tievalaistuksen ja liike-elämän kiinteistöissä 27 %. Näissä muuntopiireissä oli keskimäärin 32 (tievalaistus) ja 95 (liike-elämä) kappaletta sähköenergiamittaria.

6.3 PLC-häiriöitä aiheuttavat sähkölaitteet

Suurimmassa osassa häiriötapauksissa häiriönlähde pystyttiin paikantamaan niin, että saatiin selville käyttöpaikan häiritsevä laite tai laitteet. Häiriötapauksista 16,7 % jäi häiriönlähde tuntemattomaksi. Jaottelun tavoitteena oli spesifioida häiriölähteet mahdollisimman tarkasti tiedettyyn laitteeseen tai sen osaan, mutta osassa tapauksissa tarkastelu jäi suurpiirteisemmäksi. Neljän vuoden tarkastelujakson aikana, häiriölähteenä oli:

- yksittäinen sähkölaite 55,6 % häiriötapauksista
- kaksi sähkölaitetta 14,6 % häiriötapauksista
- 3...5 sähkölaitetta 10,3 % häiriötapauksista ja
- 6...30 sähkölaitetta oli 2,9 % häiriötapauksista.

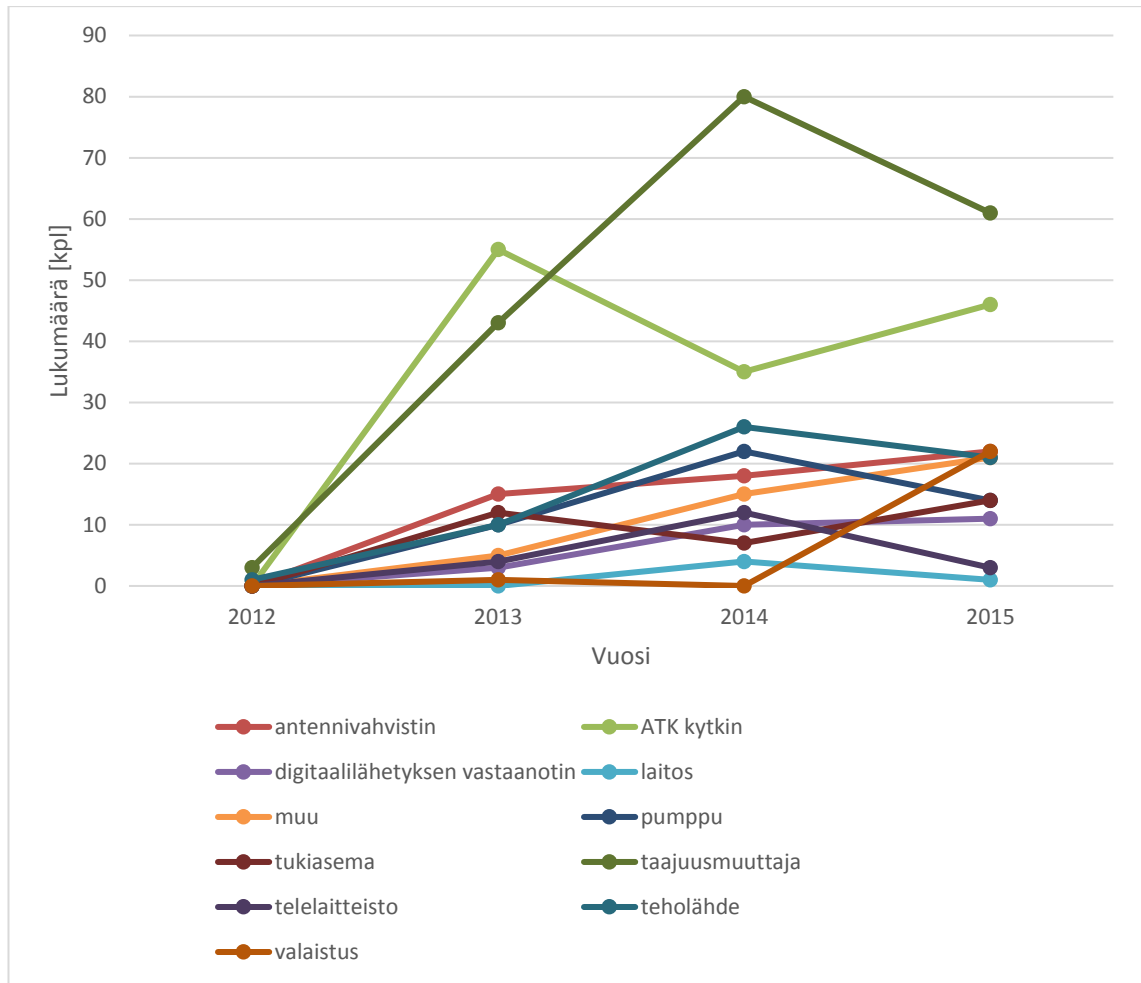
PLC-häiriöitä aiheuttavat sähkölaitteet ovat jaettu kymmeneen ryhmään, jotka ovat koottu kuvaan 20. Tarkastelussa huomioidaan häiritsevien sähkölaitteiden lukumäärät, joka on eri kuin häiriötapausten lukumäärä.



Kuva 20. Häiriöitä aiheuttavat sähkölaitteet vuosina 2012–2015.

Kuvasta nähdään, että suurimpana ryhmänä ovat taajuusmuuttajat 30 %, jotka paikannettiin muun muassa pumppaamoon, pumpulle ja lämmönjakojärjestelmään. Toiseksi isompana ryhmänä ovat ATK kytkimet 22 % ja näiden jälkeen teholähteet ja antennivahvistimet 9 %. Teholähde-ryhmään kuuluvat muun muassa tasasuuntaajat, pumppaamojen teholähteet, internet-laitteet sekä useat tietokoneen -, tulostimen -, modeemin virtalähteet. Tukiasema-ryhmään kuuluvat tukiasemalle paikannetut sekä niiden tasasuuntaajiin paikannetut häiriölähteet. Valaistus-ryhmän häiriölaitteet olivat loisteputki- ja LED-valaisimia. Kyseiset valaisimet kuuluvat elektronisiin kuormiin, johon kuuluvat myös taajuusmuuttajat ja hakkuriteholähteet. Elektroniset kuormat synnyttävät usein yliaaltoja ja suuritaajuisia häiriöitä. Hakkuriteholähteitä löytyy antennivahvistimista, ATK kytkimen teholähteistä, pöytätietokoneista sekä tukiasemien teholähteistä.

Digitaalilähetyksen vastaanottimet (digiboxit) olivat kotitalousasunnoissa yksittäisenä laiteryhmänä yllättävän yleinen häiriönlähde ja kokonaisuus häiriölaitteista oli 4 %. Osassa häiriötapauksissa PLC-häiriölähteen paikannus jäi kiinteistötasolle, esimerkiksi pumppaamoissa, jolloin ne jaoteltiin laitos-laiteryhmän alle. Eri sähkölaitteiden määrät ovat vaihdelleet vuosien aikana ja näiden vuosittainen vaihtelu on nähtävissä seuraavassa kuvassa 21.

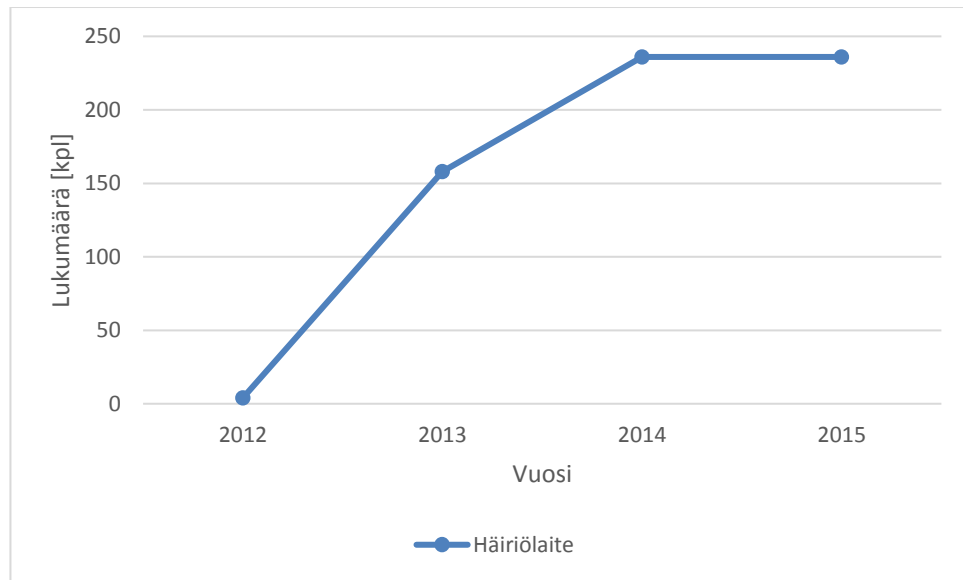


Kuva 21. Häiriöitä aiheuttavat sähkölaitteet, vuosina 2012–2015.

Taajuusmuuttajien, teholähteiden, pumppujen, telelaitteistojen ja laitoksien lukumäärät kääntyivät laskuun vuonna 2015. Osa näistä laiteryhmistä sijaitsee käyttöpaikoissa, joissa vuoden 2015 lopun jälkeen ei enää asenneta PLC-tekniikkaa hyödyntäviä sähköenergiamittareita (luku 4.5), jolloin PLC-häiriöiden määrät pitäisi vähentyä, sitä mukaan kun kohteissa vaihdetaan sähköenergiamittarit uusiin mittareihin. Näitä käyttöpaikkoja ovat muunmuassa sellaiset, joissa on merkittävä määrä taajuusmuuttajia, pumppaamot, lämmöntuotantolaitokset sekä operaattoreiden tukiasemat. Huomattava muutos on tapahtunut häiriöitä aiheuttaneiden taajuusmuuttajien lukumäärissä, mutta todelliset vaikutukset on mahdollisesti nähtävissä vasta seuraavina vuosina. Tiedonsiirtotekniikan muutos ei ole vaikuttanut esimerkiksi tukiasemille paikannettujen häiriölaitteiden määriin laskevasti, vaan niiden määrä on kasvanut vuonna 2015 edellisvuosiin nähden.

Raporteista selvisi, että osa sähköverkkoon kytketyistä PLC-häiriöitä aiheuttavista telelaitteista ja -laitteistoista oli sellaisia, jotka eivät olleet enää käytössä. Kyseisiä laitteita on poistettu PLC-häiriöihin liittyvien kenttätöiden yhteydessä, joka on mahdollisesti yksi syy häiriöitä aiheuttaneiden telelaitteistojen lukumäärän vähenemiseen.

Jatkuvaa kasvua on tapahtunut antennivahvistimien ja digitaalilähetyksen vastaanottimien sekä huomattavaa kasvua on tapahtunut valaistus-ryhmän häiriölaitteiden lukumäärissä. Määrien kasvulle voi olla monia syitä, esimerkiksi laitteiden ikääntyminen ja uusien laitteiden käyttöönoton kasvu. Kun tarkastellaan kaikkien häiriöitä aiheuttavia sähkölaitteita, nähdään vuosien aikana tapahtuva kehitys, joka on kuvattu seuraavassa kuvassa 22.

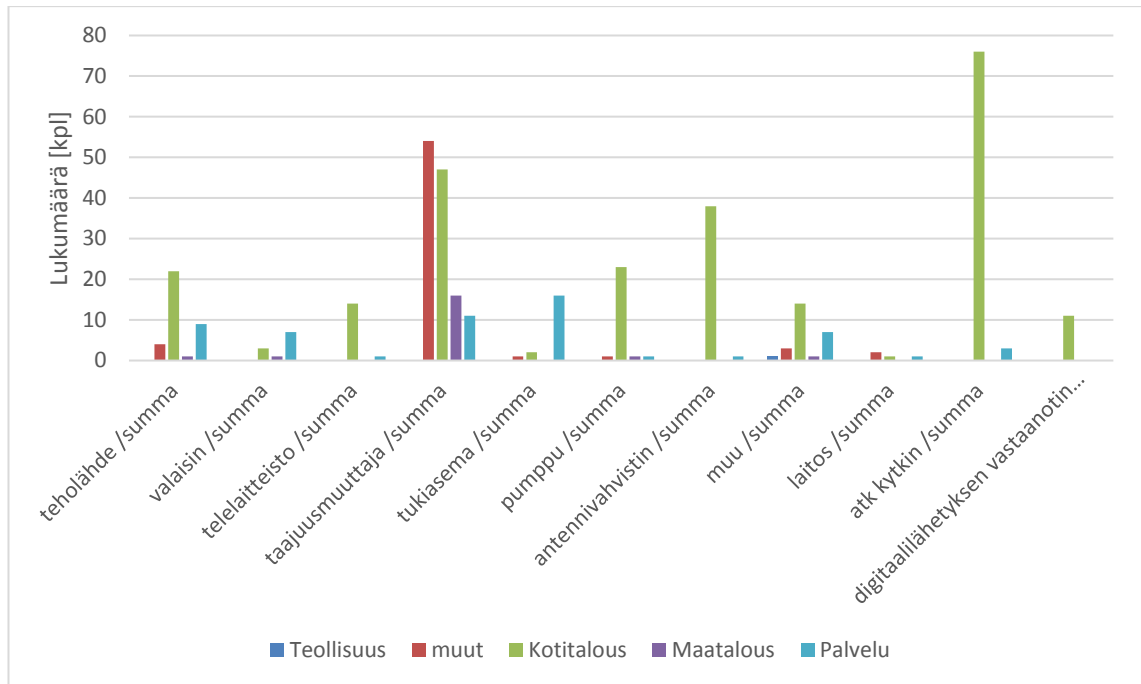


Kuva 22. Häiriöitä aiheuttavien sähkölaitteiden lukumäärien kehitys vuosina 2012–2015.

Kuvasta nähdään selkeästi, että vuonna 2013 häiriölaitteiden lukumäärä on kasvanut edellisvuoteen nähden voimakkaasti, kuten häiriötapausten lukumääräkin (viidestä 102 kappaleeseen), jonka jälkeen häiriölaitteiden lukumäärät ovat pysyneet korkeammalla tasolla. Vuonna 2015 häiriölaitteiden lukumäärän kasvu pysähtyi kokonaan, kun ilmenneiden tapausten lukumäärä laski edellisvuodesta (162 kappaleesta 134 kappaleeseen), jolloin häiriötapauksissa olleiden häiriölähteiden lukumäärät ovat sinä vuonna kasvaneet.

6.3.1 Sähkölaitteiden vaikutukset asiakassegmenteittäin ja PLC-häiriöiden laajuus

Asiakassegmenttikohtaisessa tarkastelussa nähdään kuinka eri häiriölähteet jakautuvat eri asiakassegmenteissä. Häiriölähteet ovat koottuna seuraavaan kuvaan 23 ja asiakassegmentit on merkitty kuvaan eri värikoodein.



Kuva 23. Häiriölähteet asiakassegmenteittäin vuosina 2012–2015. Palvelu kuvaa asiakassegmenttiä Palvelut ja rakentaminen.

Laajin skaala eri häiriölaitteita on Kotitalous-segmentissä (vihreä), myös Palvelu-segmentissä (vaaleansininen) on useita häiritseviä sähkölaitteita. Yleisin häiriölähde on taajuusmuuttaja ja nämä häiritsevät yleisimmin Muut- ja Kotitalous-segmenteissä, myös Maatalous- ja Palvelut ja rakentaminen-segmenteillä se on usein häiriölähteenä. Suurin osa ATK kytkimistä, antennivahvistimista, teholähteistä ja pumpuista ilmeni Kotitalous-segmentissä. Palvelut ja rakentaminen -segmentissä yleisin häiriölähde oli tukiasema. Teollisuus-segmentissä häiriölähde jäi useimmiten (4/5) tuntemattomaksi häiriötapauksissa, koska kohteissa häiritsevän laitteen löytäminen ei ollut taloudellisesti kannattavaa laajan laitemäärän ja sähköjen katkomisen vaikutuksien takia. Laitos-ryhmän laitteet havaittiin Muut-segmentissä eli yhdyskuntahuollon laitoksissa.

6.3.2 Esiselvitystä vaativat sähkölaitteet

Tiedettyjä sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä löytyi tutkimuksessa useita. Suurimpina ryhminä olivat taajuusmuuttajat ja huomattavasti pienempänä ryhmänä tasasuuntaajat. Kyseiset sähkölaitteet vaativat esiselvitystä (VPE 2014) ennen sähköverkkoon kytkemistä, kun kyseessä on suurehko laitteet. Tällä hetkellä Carunan sähköverkossa esiselvitys tehdään uusille pumppamoille ja sähkön tuotantolaitoksille.

6.4 PLC-häiriön poistaminen

Kun sähköverkossa ilmennyt häiriö on todettu PLC-häiriöksi, aloitetaan tarkempi häiriölähteen paikallistaminen kenttätutkimuksin sähköverkossa mittauksiin perustuen. Jossain

tapauksissa PLC-häiriö hävisi ennen sen tarkempaa paikannusta, jolloin häiritsevä sähkölaite jäi tuntemattomaksi. Osa PLC-häiriöitä aiheuttavista sähkölaitteista hajosi mitausten aikana, jolloin häiriö hävisi sähköverkosta. Kun häiritsevä laite löydettiin, tarvittavat korjaustoimenpiteet suoritettiin heti tai asiakkaalle lähetettiin kirje, jossa kerrottiin häiriönlähteestä ja ehdotettiin ratkaisutoimenpidettä, jolla häiriö saataisiin poistettua sähköverkosta. Korjaustoimenpiteiden selvittämisessä käytettiin luvussa 5.1.2 ja lähdeviitteessä [16] esitettyä toimintaketjua (selvitetään ensin laitteen kunto ja asianmukainen asennus).

Päätarkoituksena on, että häiriösignaali saadaan riittävän alhaiseksi, jotta sähköenergiamittareiden sähköverkkotiedonsiirto toimisi. Joissakin tapauksissa häiriön aiheutti useampi häiriölähte, jolloin häiriön poistoon tarvittiin useampaa korjaustoimenpidettä. Seuraavaan taulukkoon 15 on koottu eri toimenpiteet, joilla saatiin PLC-häiriöt riittävän alhaisiksi sähköverkkotiedonsiirron onnistumiseksi.

Taulukko 15. Korjaustoimenpiteiden lukumäärät [kpl] laiteryhmittäin ja prosenttiosuudet toimenpiteiden lukumääristä. PTP-mittari (point to point) hyödyntää ilmaitse tapahtuvaa tiedonsiirtoa.

Toimenpide	antennivahvistin	atk kytkin	digitaalilähetyksen vastaanotin	laitos	muu	pumppu	tukiasema	taajuusmuuttaja	telelaitteisto	teholähde	valaisin	%-osuus
asiakas tekee muutoksia	9	1	0	0	2	6	1	8	2	4	0	6,2 %
ei toimenpidettä	0	0	0	1	2	1	0	1	0	0	0	0,9 %
häiriö hävisi	1	2	0	0	0	0	1	1	2	1	0	1,5 %
korjaus	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,6 %
kytkennän korjaus	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	1,1 %
kytkentä käytettäessä	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	1	1,1 %
käyttökielto	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,6 %
lisäkeskitimen asennus	1	7	2	1	5	10	6	15	2	2	4	10,4 %
mittarin vaihto PTP-mittariin	0	0	0	2	2	0	17	3	1	2	1	5,3 %
muu toimenpide	1	1	0	0	4	0	1	4	1	1	2	2,8 %
poisto	0	1	16	0	9	0	0	3	4	10	6	9,2 %
poisto/korjaus	1	1	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1,5 %
riikkoontuminen	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2,1 %
suodin	6	100	0	0	8	17	3	58	1	7	1	37,9 %
uusiminen	27	12	1	0	0	6	2	20	1	30	0	18,7 %

Taulukkoon 15 on merkitty punaisella laiteryhmiä yleisimmät toimenpiteet. Toimenpide ”asiakas tekee muutokset” kuvaa tilanteita, joissa asiakas on tehnyt tarvittavat muutokset niin, että mittarien tiedonsiirto alkoi toimimaan. Samoin ”poisto/korjaus” kuuluu asiakkaan tekemiin toimenpiteisiin ilman tarkempaa selvitystä. ”käyttökielto” koski LED-valaisimia, jotka olivat määräyksien vastaisia ja näin ollen käyttökiellossa.

Sähköverkossa tehdyistä korjaustoimenpiteistä yleisimpänä toimenpiteenä oli suotimen asennus 37,9 %, joka asennettiin useimmiten ATK kytkimille, taajuusmuuttajille ja pumpuille. Toiseksi yleisin toimenpide oli laitteen uusiminen 18,7 %, joka suoritettiin yleisimmin tehölähteille ja antennivahvistimille. PLC-häiriön vaikutuksia muuntopiirissä saatiin vähennettyä tehokkaasti asentamalla lisäkeskitin muuntopiiriin, jolloin sähköverkossa siirtyvän tiedonsiirto-signaalin teho pysyi riittävällä tasolla saapuessaan keskittimille. Yleisintä lisäkeskitimen asennus oli kun häiriönlähteenä oli taajuusmuuttaja. Laitteen poisto oli yleisintä digitaalilähetyksen vastaanottimille. Sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntävien sähköenergiamittareiden vaihtaminen PTP (point to point) -tekniikkaa hyödyntäviin sähköenergiamittareihin suoritettiin yleisimmin tukiasemilla. Tällä toimenpiteellä sähköverkossa etenevät PLC-häiriöt eivät estä PTP-mittareiden mittaustiedonsiirtoa, joka tapahtuu ilmateitse.

PLC-häiriöiden vaikutuksien vähentämiseksi Carunalla on listattu käyttöpaikkoja, jonne ei ole taloudellisesti kannattavaa asentaa PLC-tekniikkaa hyödyntäviä sähköenergiamittareita, vaan kohteisiin asennetaan PTP-tekniikkaa hyödyntäviä sähköenergiamittareita. Listan kohteista tämän työn aikana esiin tulleita PLC-häiriölähteitä ovat olleet käyttöpaikat, joissa on merkittävä määrä taajuusmuuttajia, tukiasemat, pumppaamot sekä lämmöntuotantolaitokset. Korjaustoimenpiteenä mittaustekniikan vaihto PTP-tekniikkaan on ollut neljän vuoden aikana 5,3 % korjaustoimenpiteistä

Huomioita asennuksista

Häiriötapausten PLC-häiriölähteiden paikannuksessa tehdyissä havainnoissa vain harvassa oli korjauksia vaativia puutteita asennuksissa. Tapauksissa, joissa asennuksessa oli puutteita, ne eivät vastanneet laitteen valmistajan antamia ohjeita. Yhdessä tapauksessa maadoitus oli rikkoontunut ja muutamassa tapauksessa moottorikaapeli oli väärän pituinen tai se oli katkottu. Korjaustoimenpiteitä tehtiin taajuusmuuttajien asennuksiin. Aiemmin esitetyissä määräyksissä ja tutkimuksissa on kiinnitetty huomiota etenkin taajuusmuuttajien kohdalla esiintyviin asennusvirheisiin ja siihen että niiden asennuksessa on käytettävä huolellisuutta, jotta EMC-vaatimukset saadaan täytettyä.

7. YHTEENVETO

Sähkölaitteiden toimivuuden ja turvallisuuden takaamiseksi on Suomessa laadittu sähköturvallisuuslaki. Julkaistut direktiivit, standardit ja asetukset antavat määräyksiä eri laitteille. Direktiivien tarkoituksena on suojata radioliikenteen, sähkö- ja tietoliikenneverkkojen toiminta. Sähkölaitteille asetetut vaatimukset on täytettävä ennen kuin ne voidaan laskea markkinoille ja laitevalmistajien on laadittava asiakirja, joka ilmaisee laitteen olevan vaatimusten mukainen. Laitteessa oleva CE-merkintä osoittaa, että valmistaja vakuuttaa laitteen olevan vaatimustenmukainen.

Suurin osa Suomen sähköverkossa olevista sähköenergiamittareista on etäluettavia mittareita, sillä vuoteen 2013 mennessä kunkin sähköverkkoyhtiön sähkömittareista 80 % oli oltava tuntimittauksen piirissä. 1.5.2017 otetaan käyttöön Pohjoismainen taseselvitysjärjestelmä, jossa sähköverkkoyhtiöllä on velvollisuus suorittaa sähkönkulutuksen mittaus ja toimittaa mittaustiedot asiakkaalle ja tasesähköyksikölle (Fingrid) viimeistään seuraavana toisena päivänä, kun tällä hetkellä on käytössä viimeistään 14 päivää myöhemmin. Mikäli mittaustietoa ei ole saatavilla, on se arvioitava ja korjattava myöhemmin mitatulla tiedolla sen ollessa saatavilla.

Mittauslaitteelle vaatimuksia on asetettu muun muassa mittausvirheelle, uusittavuudelle, tulosten turmeltumiselta suojaamiselle, tulosten näyttämiseksi ja laitteen kestävyydelle. Mittauslaitteiden vaatimukset on täytettävä ja oltava helposti todennettavissa. Vaatimuksilla myös pyritään siihen, että mittaustulokset samoissa olosuhteissa eivät ole riippuvaisia mittauskerasta tai mitaajasta.

Suurin osa Carunalla käytössä olevista etäluettavista sähköenergiamittareista hyödyntää mittaustiedonsiirrossa sähköverkkotiedonsiirtoa, jonka taajuusalueeksi on määritetty 3...95 kHz. Kyseinen taajuuskaista kuuluu taajuusalueeseen (3...150 kHz), jolle ei ole määritetty häiriöpäästöille raja-arvoja (lukuun ottamatta induktiokuumentimia). Tällä hetkellä sähköverkossa valtaosa sähkölaitteista on CE-merkittyjä ja vaatimustenmukaisia, mutta aiemmissa tutkimuksissa nousi esille sähkölaitteita, jotka merkistä huolimatta eivät täytä nykyisiä EMC-standardin asettamia vaatimuksia.

Verkkopalveluehdoissa on maininta, että sähkökäyttäjän sähkölaite ei saa estää mittaukseen liittyvää tiedonsiirtoa sähköverkossa, jolloin sähkölaitteiden aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt on saatava riittävän alhaisiksi tällä taajuusalueella. Jos häiriölähteesi paikallistetaan sähkökäyttäjän sähkölaite, on sähköverkonhaltijan kerrottava sähkökäyttäjälle keinot, joilla häiriöt saadaan korjattua.

Caruna on Suomen suurin sähkönsiirtoyhtiö ja sillä on asiakkaita pienjänniteverkossa 655 000. Carunalla tehdyssä tutkimuksessa tutkimusmateriaalina oli käytössä vuosien 2012–2015 PLC-häiriöraportit. Häiriötapauksia ilmeni neljän vuoden aikana 403, joka jakautui vuosille 2012: 5 kpl; 2013: 102 kpl; 2014: 162 kpl; 2015: 134 kpl. Vuoden 2012 vähäinen määrä mahdollisesti johtuu siitä, että suuri määrä etäluettavista sähköenergiamittareista ohjelmoitiin tuntimittauksen piiriin vasta vuoden 2012 loppupuolella. Neljän vuoden tarkastelujakson aikana yli puolessa tapauksista häiriölähteenä oli yksittäinen sähkölaite ja kuudesosa tapauksista jäi tuntemattomiksi.

Tarkastelujakson aikana Carunan pienjänniteverkon asiakkaista PLC-häiriötapaukset koskettivat keskimäärin viittä asiakasta 10 000 asiakkaasta. Yli 60 % häiriötapauksista paikallistettiin Häme & Uusimaa alueelle, jossa häiriötapausten määrä kosketti seitsemää asiakasta 10 000 asiakkaasta. Kunnista nousi esille huomattavan suurella osuudella Espoo, jossa ilmeni tapauksista yli kolmasosa. Häiriöiden määrät kuitenkin pysyivät kunnissa maltillisina asiakasmääriin nähden.

Häiriötapausten PLC-häiriöiden laajuus rajoittuu muuntopiiriin, jossa ne ilmenevät. Häiriötapaus usein näkyy myös muuntopiirin muissa käyttöpaikoissa, kuin mistä se on paikannettu. Keskimäärin Häme & Uusimaa -alueella häiriötapaus vaikutti muuntopiirin sähköenergiamittareista 16 %:iin. Muuntopiiritasolla suurimmat vaikutukset olivat Pohjanmaa, Etelä-Pohjanmaa & Satakunta -alueella, jossa määrä oli keskimäärin 22 %. Joensuu -alueella häiriötapaukset vaikuttivat keskimäärin 19 %:iin muuntopiirin sähköenergiamittareista.

Häiriötapaukset paikannettiin useimmiten kerrostaloasuntoihin, mutta vuonna 2015 häiriötapausten määrät pientaloasunnoissa ja liike-elämä-kiinteistöissä olivat nousseet samalle tasolle yli 20 kappaleeseen. Kerrostaloyhtiöissä ilmenneet häiriötapausten määrät ovat neljän vuoden aikana olleet jatkuvassa kasvussa, samoin kuin liike-elämä-kiinteistöissä. Kerrostaloasunnoissa paikallistettu häiriötapaus vaikutti muuntopiirissä keskimäärin eri alueilla 10...17 % muuntopiirin sähköenergiamittareista. Pientaloasunnoilla se oli 0,5...16 %, liike-elämän-kiinteistöissä 2...100 % ja kerrostaloyhtiöillä 10...86 %.

Carunalla on jaotteluna viisi asiakassegmenttiä ja niiden osuudet ovat: Kotitaloudet 36 %, Muut 20 %, Teollisuus 16 %, Palvelut ja rakentaminen 24 %, ja Maatalous 5 %. Huomattava määrä häiriötapauksista ilmeni Kotitalous-segmentissä (vuonna 2015 70 %). Palvelu ja rakentaminen -segmentti ja Muut-segmentti olivat samalla tasolla (vuonna 2014 14 %), mutta vuonna 2015 Muut-segmentin häiriötapausten määrä romahti 2 %. Kyseiseen segmenttiin kuuluvat pumppaamot sekä lämmön- ja sähköntuotantolaitokset kuuluvat vesi-, jäte- ja energialaitoksiin, jotka kuuluvat listaan käyttöpaikoista, joihin ei Carunan verkkoalueella enää asenneta vuoden 2015 loppupuolen jälkeen sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntäviä etäluettavia sähköenergiamittareita. Carunassa on listattu myös muita kohteita, joissa sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntävien sähköenergiamittareiden asentaminen ei ole ollut taloudellisesti kannattavaa (luku 4.5), jolloin tiedonsiirtoon käytetään

muuta (ilmateitse tapahtuvaa) tekniikkaa. Listassa on myös esimerkiksi kohteet, joissa on merkittävä määrä taajuusmuuttajia ja tukiasemat. Taajuusmuuttajien häiriölaitemäärä on laskenut vuonna 2015 edellisvuoteen nähden, mutta samaa muutosta ei ole nähtävissä tukiasemien aiheuttamien PLC-häiriöiden määrissä. Kokonaisuudessaan häiriölaitteiden määrät eivät ole laskeneet vuonna 2015, vaikka häiriötapausten määrät olivat vähentyneet. Tämä tarkoittaa sitä, että häiriötapauksissa oli häiriölähteenä useampia häiriölaitteita kuin aiemmin.

Aiemmissä tutkimuksissa PLC-häiriöiden lähteenä olivat taajuusmuuttajat, elektronisella liitännällä varustetut lamput ja kodin elektroniikkalaitteet. Häiriön taustalla oli usein sähkölaitteen ikääntynyt komponentti, laite joka oli virheellisesti asennettu tai laite, jonka EMC-suojauksessa oli puutteita. Carunan tutkimuksen häiriötapauksissa suurimpana häiriölaiteryhmänä olivat taajuusmuuttajat 30 %, ATK kytkimet 22 % sekä teholähteet ja antennivahvistimet 9 %.

Kotitalous-segmentissä suurimpina häiriölaiteryhminä olivat ATK kytkimet, taajuusmuuttajat sekä antennivahvistimet. Muut-segmentissä huomattavasti muita sähkölaitteita yleisempänä olivat taajuusmuuttajat. Maatalous-segmentissä häiriölähteenä ovat taajuusmuuttajat. Palvelu ja rakentaminen -segmentissä on useita häiriölähteitä, mutta yleisimpänä olivat tukiasemat. Teollisuus-segmentissä häiriönlähde jäi yleensä (4/5) tuntemattomaksi.

Aiemmissä tutkimuksissa käytettyjä korjaustoimenpiteitä olivat: rikkoontuneen sähkölaitteen vaihtaminen uuteen, asennuksen korjaus ja EMC-suotimen asentaminen. Carunan tutkimuksessa yleisimmät korjaustavat olivat suotimen asennus (38 %), laitteen uusiminen (19 %) ja lisäkeskitimen asennus (10 %). Riippuen häiriötapausten PLC-häiriön lähteestä ja sen lukumäärästä, häiriön poistamiseksi voitiin käyttää useampaa korjaustoimenpidettä. ATK kytkimien ja taajuusmuuttajien korjaus tehtiin yleisimmin suotimella, laitteen uusiminen korjasi teholähteet ja antennivahvistimet. Lisäkeskitimen asennus suoritettiin yleisimmin, kun PLC-häiriön lähteenä oli taajuusmuuttaja tai pumppu. Carunalla tehdyssä tutkimuksessa asennukseen liittyviä korjauksia oli muutamia ja tarvittavat muutokset tehtiin taajuusmuuttajille, joiden asennusvirheet nousivat esille myös aiemmissä tutkimuksissa.

Carunalla tehty tutkimus keskittyi häiriön paikallistamiseen ja tapausten profilointiin, jolloin tutkimustarkastelun ulkopuolelle jäivät muun muassa häiriösignaalien taajuuksien analysointi ja syyt häiriölaitteiden aiheuttamiin häiriöihin. Tutkimuksessa ei tarkasteltu korjausjaksojen pituuksia eri sähkölaiteryhmille. Tutkimuksen aikana nousi kuitenkin esille, että osa korjaustoimenpiteistä pystyttiin suorittamaan heti paikannuksen aikana ja osassa tapauksissa korjaustoimenpiteiden suorittamiseen kului useita kuukausia. Tähän liittyen myös kiinnostavana jatkotutkimuksen aiheena on, kuinka laajoista häiriöistä näissä tapauksissa on ollut kysymys.

LÄHTEET

- [1] S. Alanko, 761104P Yleinen aaltoliikeoppi -luentomoniste, Oulun yliopisto, Oulu 2004 pp. 3–27, 52–67. Saatavissa (viitattu 1.6.2016): <https://noppa.oulu.fi/noppa/kurssi/761104p/materiaali>.
- [2] J. Bastman, DEE-24000 Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi -opetusmoniste, Tampere, 2015.
- [3] Caruna, Vuosiraportti 2015 verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.5.2016): <http://vuosiraportti2015.caruna.fi/raportti/caruna-luotettava-toimija/>.
- [4] Carunan yleisohjeet sähköurakoitsijoille ja -suunnittelijoille, Caruna Oy, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 8.6.2016): <http://www.caruna.fi/urakoitsijat/urakoitsijantietopankki/urakoitsijaohjeet>.
- [5] CENELEC, Electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz, Study report, CENELEC, 2013.
- [6] Echelon mittarin näyttö, symbolit ja toiminnot, Caruna Oy, Espoo, unpublished report, 2016.
- [7] Echelon asennukset, Caruna Oy, Espoo, unpublished report, 2015.
- [8] EMC - Sähkömagneettinen yhteensopivuus, Tukes, Verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 5.2.2016): <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/EMC---sahkomagneettinen-yhteensopivuus/>.
- [9] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/108/EY, Euroopan unionin virallinen lehti, 2004. Saatavissa (viitattu 5.2.2016): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:390:0024:0037:fi:PDF>.
- [10] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/30/EU, Euroopan unionin virallinen lehti, 2014. Saatavissa (viitattu 5.2.2016): http://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2014_096_R_0079_01&from=EN.
- [11] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2004/22/EY, Euroopan unionin virallinen lehti, 2004. Saatavissa (viitattu 14.4.2016): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2004L0022:20091201:FI:PDF>.
- [12] L. Korpinen, M. Mikkola, T. Keikko, E. Falck, Yliaalto-opus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.6.2016): <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>.

- [13] H. Koskinen, Elektrodynamiikka-luentomoniste, Helsingin yliopiston fysiikan laitos, Helsinki, 2016.
- [14] Käyttöopas ACS355-taajuusmuuttajat, ABB, 2015 verkkosivu. Saatavilla (viitattu 14.6.2016): https://library.e.abb.com/public/a567dc72c6054370b6d7b776223f7923/FI_ACS355_UM_C_A5.pdf.
- [15] MTR 3000 Key Features, Echelon, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2016): <http://www.echelon.com/assets/bltc1e4347bb1a04c1c/Smart-Meter-MTR-3000-IEC-Poly-Phase-datasheet.pdf>.
- [16] P. Pakonen, M. Pikkarainen, B. Siddiqui, P. Verho, Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen yhteensopivuus - Vaihe 2 Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2013. Saatavissa (viitattu 11.2.2016): http://energia.fi/sites/default/files/energiansaastolamppujen_verkostovaikutukset_loppuraportti_2013-05-22.pdf.
- [17] M. Pikkarainen, B. Siddiqui, S. Vehmasvaara, P. Pakonen, P. Verho, Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen yhteensopivuus - Vaihe 1 Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2011. Saatavissa (viitattu 11.2.2016): http://energia.fi/sites/default/files/energiansaastolamppujen_verkostovaikutukset_ja_plc-projekti_loppuraportti_2011.pdf.
- [18] Pohjoismaiden yhteisen taseselvityksen käyttöönotto siirtyy, Fingrid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.6.2016): <http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut/Pohjoismaiden-yhteisen-taseselvityksen-k%C3%A4ytt%C3%B6n%C3%B6notto-siirtyy.aspx>.
- [19] S4-11 Sähkölaitteistot ja käytönjohtajat, Tukes, 2011 verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.6.2016): <http://www.tukes.fi/fi/Palvelut/Tukes-ohjeet/1Sahko-ja-hissit/S4-11-Sahkolaitteistot-ja-kaytonjohtajat/>.
- [20] SFS 6000-1, Pienjännitesähköasennukset. Osa 1:00 Peruseräaateet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2012.
- [21] SFS 6000-4-44, Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-44: Suojausmenetelmät. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2012.
- [22] SFS-EN 50065-1, Viestinsiirto pienjänniteverkossa taajuusalueella 3...148,5 kHz. Osa 1:00 yleiset vaatimukset, taajuusalueet ja sähkömagneettiset häiriöt, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2011.

- [23] SMG-1100 Piirianalyysi I -luentomoniste, 5. versio, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, s. 77. (viitattu 8.11.2016)
- [24] Sähkömittarin lukeminen, Caruna Oy, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 14.6.2016): <http://www.caruna.fi/sahkomittari>.
- [25] Sähkönsiirtotuotteen muutos, Caruna Oy, verkkosivu. Saatavissa (13.6.2016): <http://www.caruna.fi/siirtotuotteenmuutos>.
- [26] Sähköturvallisuuslaki, 14.6.1996/410, 1996. Saatavissa (viitattu 1.2.2016): <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19960410#L2P5>.
- [27] Taseselvitys, Fingrid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.6.2016): <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/tasepalvelut/taseselvitys/Sivut/default.aspx>.
- [28] Tekninen opas nro 7 Sähkökäytön mitoitus, ABB, 2001 verkkosivu. Saatavilla (viitattu 15.6.2016): https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf.
- [29] Tuntimittauksen periaatteita 2010 Energiateollisuus ry, 2014. Saatavissa (viitattu 2.2.2016): <http://energia.fi/julkaisut/tuntimittaussuositus-2010-paivitetty-2462013>.
- [30] Tuntimittauksen periaatteita 2016 Energiateollisuus, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 14.10.2016): http://energia.fi/sites/default/files/tuntimittaussuositus_-_paivitetty_20160531.pdf.
- [31] Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, ABB, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 1.6.2016): https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf.
- [32] Verkkopalveluehdot VPE 2014 Energiateollisuus ry, 2014. Saatavissa (viitattu 2.2.2016): http://energia.fi/sites/default/files/verkkopalveluehdot_vpe_2014_20160118.pdf.
- [33] Älykkäät sähkömittarit - hankkeen koulutus Elokuu 2010 Caruna Oy, Espoo, unpublished report, 2010.