



**Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja
elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen
yhteensopivuus - Vaihe 2**

Loppuraportti

Pertti Pakonen

Marko Pikkarainen

Bashir Siddiqui

Pekka Verho

Tampereen teknillinen yliopisto

22.5.2013

Alkusanat

Tämä on projektin ” Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen yhteensopivuus - Vaihe 2” loppuraportti. Projekti toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähköenergiatekniikan (nyk. Sähkötekniikan) laitoksella. Projektin rahoittivat ST-Pooli, Sähköturvallisuuden edistämiskeskus ry STEK, Fortum Sähkönsiirto Oy, Forssan Verkkopalvelut Oy, Turku Energia Sähköverkot Oy ja Tampereen Sähköverkko Oy.

Projektin ohjausryhmään kuuluivat:

Antti Rokka, Fortum Sähkönsiirto Oy

Jyrki Tulander, Forssan Verkkopalvelut Oy

Harri Salminen, Turku Energia Sähköverkot Oy

Marko Lundström, Tampereen Sähköverkko Oy

Santtu Vähäkuopus, Elenia Oy (ST-Poolin edustajana)

Projektin johtajana toimi prof. Pekka Verho TTY:n Sähköenergiatekniikan laitokselta. Tutkijoina projektissa toimivat DI Marko Pikkarainen, DI Bashir Siddiqui ja TkT Pertti Pakonen.

Kiitämme kaikkia projektiin osallistuneita hyvästä yhteistyöstä ja välittömästä ja innostavasta työilmapiiristä.

Tampereella 22.5.2013

Pertti Pakonen, TkT

Marko Pikkarainen, DI

Bashir Siddiqui, DI

Pekka Verho, Prof.

Tiivistelmä

Elektroniset kuormat yleistyvät mm. lampputeknologioiden muuttumisen ja erilaisten nopeussäädettyjen moottorikäyttöjen ja hakkuriteholähteiden yleistymisen myötä. Toisaalta etäluettavien mittareiden käyttöönoton myötä sähköverkossa siirretään sähköä lisäksi kasvavassa määrin myös tietoa. Mm. näistä tekijöistä johtuen sähköverkossa kulkee suuritaajuisia virtoja ja laitteiden käyttöjännite muodostuu perustaaajuuden lisäksi entistä suuremmassa määrin yliaalloista ja suuritaajuisista jännitteistä, joista useimmat ovat laitteiden näkökulmasta häiriöitä. Tässä tutkimusprojektissa tutkittiin projektiin osallistuneiden sähköverkkoyhtiöiden verkoissa erilaisia häiriötapauksia, joissa energiamittareiden PLC-luenta ei toiminut asiakaslaitteen aiheuttamien suuritaajuisien häiriöiden vuoksi. Lisäksi tutkittiin uusien lampputeknologioiden verkostovaikutuksia uudehkossa kylpyläkiinteistössä ja mm. hakkuriteholähteen aiheuttamia johtuvia häiriöpäästöjä ja hipaisuhimmenninlamppujen häiriintymistä sähköverkkoon syötettyjen PLC-signaalia muistuttavien suuritaajuisien signaalien vaikutuksesta laboratoriossa.

Uusien lampputeknologioiden verkostovaikutuksia tutkittiin uudehkossa kylpyläkiinteistössä, jossa valaistus oli pääosin toteutettu elektronisella liitäntälaitteella varustetuilla lampuilla ja myös muita elektronisia kuormia oli runsaasti. Tehtyjen mittausten valossa energiansäästölamppujen aiheuttamat yliaallot eivät muodostuneet ongelmaksi. Vaikka lamppujen virran harmoninen kokonaissärö on tyypillisesti suuri, lamppujen teho on niin pieni, että yliaallot eivät aiheuta merkittävää jännitesäröä. Lamppujen ja muiden elektronisten kuormien aiheuttamat suuritaajuiset häiriöt olisivat saattaneet aiheuttaa häiriöitä sähköverkkotiedonsiirrolle (PLC), jos sellaista olisi kohteessa käytetty. Lamppujen kytkentävirtasysäykset olivat mitatuissa kohteissa varsin suuria. Vaikka kytkentävirtasysäys on varsin lyhytaikainen se aiheuttaa kuitenkin verkossa lyhytaikaisen, mutta amplitudiltaan pahimmillaan lähes verkkojännitteen huippuarvon suuruisen nopean jännitemuutoksen, joka ainakin teoriassa saattaa ryhmäjohdon induktanssin ja lamppujen kapasitanssin muodostamassa sarjaresonanssipiirissä vahvistua hyvinkin suureksi. Ilmiön ja sen käytännön merkityksen selvittäminen edellyttäisi lisätutkimuksia.

Projektin tulosten perusteella yleisimpiä PLC-luentaongelmien aiheuttajia ovat taajuusmuuttajat ja erilaiset hakkuriteholähteillä varustetut yksivaihelaitteet. Projektin kuluessa tutkittujen häiriötapausten ja tehtyjen kirjallisuustutkimusten perusteella häiriöiden perussyyt voidaan jakaa neljään ryhmään:

- laitteiden ikääntyminen,
- asennusvirheet (erityisesti taajuusmuuttajien tapauksessa),
- se, että valmistajan vaatimuksenmukaisuusvakuutuksesta huolimatta laite ei ole uutenakaan täyttänyt EMC-vaatimuksia ja
- laitteiden häiriöpäästöjä koskevien raja-arvojen puuttuminen taajuusalueella 3...150 kHz.

Tutkittujen tapausten perusteella näyttää siltä, että selvästi olemassa olevia ja suunniteltuja raja-arvoja pienemmätkin häiriöjännitteet aiheuttavat luentaongelmia nykyisissä energiamittareiden PLC-luentajärjestelmissä. Esimerkiksi standardissa CISPR 11 induktiokuumentimien johtuville häiriöille on määritelty raja-arvoksi taajuusalueella 50...148,5 kHz 80...90 dB μ V. Pienimmät mitatuista luentaongelmia aiheuttaneista häiriöjännitteistä olivat kuitenkin vain noin 60 dB μ V huippuarvoilmaisijalla mitattuna. Standardointia taajuusalueella 3...150 kHz ollaan parhaillaan kehittämässä ja PLC:n tarpeet tulisi ottaa siinä huomioon. Jos energiamittareiden PLC:n luotettavan toiminnan mahdollistavien riittävän pienien häiriöpäästörajojen asettaminen koko taajuusalueelle ei ole mahdollista tai teknisesti mielekäästä, yhtenä vaihtoehtona voisi olla esimerkiksi suurempien häiriöpäästöjen salliminen joillain PLC:n kannalta vähemmän tärkeillä taajuuksilla tai pienempien häiriöpäästörajojen asettaminen ainoastaan taajuusalueelle 50...95 (tai 148,5) kHz, jolla valtaosa nykyaikaisista energiamittareiden luentaan tarkoitetuista PLC-järjestelmistä toimii. Em. taajuusalueen standardointiin liittyen CENELEC SC 205A TF EMI II-työryhmä julkaisi tutkimusraporttinsa sähkölaitteiden ja -järjestelmien välisistä häiriöistä alle 150 kHz taajuuksilla huhtikuussa 2013 [Ano13a]. TTY toimitti tutkimusprojektin ”Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen yhteensopivuus - Vaihe 2” tuloksia työryhmälle ja osallistui osaan työryhmän kokouksista ja CENELEC-raportin kommentointiin. Projektin tuloksia on julkaistu myös kansainvälisissä konferensseissa [Pik12a, Pak12a, Pak13a].

Projektissa tutkittiin myös häiriöselvityksiin soveltuvia mittalaitteita ja kehitettiin suuritaajuiseen virtamittaukseen perustuva menetelmä häiriölähteen systemaattiseen paikantamiseen. Menetelmä on käyttökelpoinen erityisesti tapauksissa, joissa suuri joukko mittareita on häiriöiden vuoksi luennan ulkopuolella ja häiriölähteen paikantaminen muilla keinoin on vaikeaa. Kun häiriölähde on paikannettu, tulisi ensin varmistaa että sekä häiriöitä aiheuttava että häiriintyvä laite ovat kunnossa ja oikein asennettu. Jos ongelma ei johdu laitteen ikääntymisestä tai viallisuudesta eikä asennusvirheistä voidaan häiriöiden vaikutusta vähentää asentamalla häiriöitä aiheuttavan (tai häiriintyvän) laitteen ja verkon väliin EMC-suodin. Vaikka nykyisin markkinoilla olevat suotimet on suunniteltu lähinnä vaimentamaan yli 150 kHz johtuvia häiriöitä, niiden vaimennus on kuitenkin melko suuri vielä taajuuksilla 60...95 kHz, jossa esimerkiksi useimmat Suomessa käytössä olevat PLC-järjestelmät toimivat.

Abstract

The share of electronic loads in power networks is increasing due to the change in lamp technologies (compact fluorescent lamps and LED lamps) and the fact that variable speed drives (VSDs) and switch-mode power supplies (SMPSs) are becoming the mainstream in motor drives and power supplies. On the other hand, due to the introduction of remotely readable energy meters (“Smart meters”) power network is used increasingly as a communication medium in addition to power distribution. Due to these things, among others, increasing amounts of high frequency currents are flowing in the power network and in addition to the power frequency component the supply voltage of power apparatus includes in increasing amounts also harmonics and high frequency (HF) voltages. From the viewpoint of the power apparatus these additional voltage components are disturbances. In this research project various disturbance cases, where the PLC (power line communication) between the smart meters and data concentrator did not work due to disturbances caused by a customer apparatus, were studied in the low voltage networks of the distribution system operators (DSOs) participating the project. Additionally, the network effects of new lamp technologies were studied in a new spa and conducted HF disturbances caused by a SMPS and the sensitivity (lack of immunity) of touch dimmer lamps to HF signals emulating PLC signal were studied in laboratory.

The network effects of new lamp technologies were studied in a new spa where the lighting was mainly implemented using new lamp technologies (compact fluorescent lamps and LED lamps) and there were also lots of other electronic loads. Based on the measurements it was concluded that the harmonics generated by the new lamp technologies were not a problem. Although the total harmonic distortion of the lamp current is typically high, the power of the lamps is so small that the resulting voltage distortion remains small. The high frequency disturbances caused by the lamps and other electronic loads could have been a problem for PLC if it was used in the spa. The inrush currents of the lamps were quite high, which could be regarded as a potential problem. Although the current transient is relatively short, it causes a high amplitude rapid voltage change. The voltage transient together with the series resonance circuit formed by the inductance of the conductor(s) and the capacitances of the lamp power supply may lead to higher voltages occurring across a single component in the lamp circuitry than what can be measured e.g. at the distribution board. To find out the significance of this phenomenon from the practical point of view would require further studies in the future.

Based on the results of the project the most common causes for communication problems in PLC systems were frequency converters (variable speed drives) and single phase devices with switch mode power supplies. Based on the interference cases studied by on-site measurements and literature studies four different root causes for PLC problems may be distinguished:

- aging of customer apparatus (or their components)
- installation flaws (especially in case of VSDs)
- in spite of the manufacturer's declaration of conformity to EMC standards the apparatus does not fulfill the EMC requirements
- lack of emission limits between 3...150 kHz

Based on the cases studied it seems that disturbance voltages clearly lower than the existing and planned limits for conducted disturbances cause communication problems in the existing smart meter PLC systems. For example, according to CISPR 11 the conducted disturbances of induction cooking appliances in frequency range 50...148,5 kHz should be 80...90 dB μ V. However, the lowest measured conducted disturbance voltages causing communication problems were only approximately 60 dB μ V measured with peak detector. Standardisation on the frequency range 3...150 kHz is currently under development and in that work the needs of smart meter PLC should be taken into account. If it is not possible or technically feasible to define conducted disturbance limits low enough to guarantee the operation of smart meter PLC systems on the whole frequency range, another possibility might be to allow higher disturbance emissions at some frequencies not so relevant to PLC or to define lower limits only for the frequency range of e.g. 50...95 (or 148.5) kHz, at which most of the modern smart meter PLC systems operate. For the basis of the standardisation at the frequency range 3...150 kHz CENELEC SC 205A TF EMI II working group published a study report on electromagnetic interference between electrical equipment and systems in the frequency range below 150 kHz in April 2013 [Ano13a]. TUT (Tampere University of Technology) submitted results of this Finnish research project to the working group and participated in part of the working group meetings and the commenting of the study report draft. The results of the project have been published also in international conferences [Pik12a, Pak12a, Pak13a].

As a part of the project also the measurement equipment suitable for studying and clearing the communication problems were studied and a systematic method for locating the disturbance source was developed. The method is suitable especially in cases where a large amount of meters suffer from communication problems and the location of the disturbance source using other methods is difficult. After locating the disturbance source, one should verify that both the disturbing and disturbed apparatus/system is intact and correctly installed. If the problem is not the aging or defect of the devices(s) or installation flaws the effect of disturbances can be reduced by installing an EMC filter between the device causing the disturbances (or getting disturbed) and the network. Although the commercially available EMC filters are mainly designed to attenuate conducted disturbances at frequencies above 150 kHz their attenuation is still relatively high at frequencies 60...95 kHz where, for example, most of the smart meter PLC systems used in Finland operate.

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
Tiivistelmä.....	3
Abstract	5
1 Johdanto.....	9
2 Asiakaslaitteiden häiriöpäästöjä ja häiriönsietoa koskeva standardointi.....	11
2.1 Olemassa olevista standardeista ja raja-arvoista	11
2.2 Valmisteilla olevat standardit 2...150 kHz taajuuksilla	12
3 Uusien lampputeknologioiden verkostovaikutukset	13
3.1 Uusien lampputeknologioiden ominaisuuksista.....	13
3.2 Uuden kylpyläkiinteistön mittaukset.....	14
3.2.1 Mittausjärjestelyt	15
3.2.2 Harmoniset yliaallot pääkeskuksilla	15
3.2.3 Suuritaajuiset häiriöt pääkeskuksilla ja ryhmäkeskuksilla.....	26
3.2.4 Lamppujen ja valaistusryhmien kytkentävirtasysäykset.....	29
4 PLC-signaalin vaimenemien ja siihen vaikuttavat tekijät	37
4.1 PLC-signaalin vaimenemiseen vaikuttavia tekijöitä	38
4.2 Mittausjärjestelyt vaimennusmittauksissa	43
4.3 Vaimennusmittausten tuloksia	44
4.4 Rinnakkaisten kaapeleiden vaikutus vaimennukseen.....	46
4.5 Asiakaslaitteiden vaikutus vaimennukseen.....	47
4.6 Vaiheiden välinen ylikuuluminen.....	48
5 Sähköverkkotiedonsiirtolaitteiden selektiivisyys.....	50
5.1 Mittausjärjestely	50
5.2 Sähköverkkotiedonsiirron häiriintyminen PLC-taajuuksien ulkopuolisista signaaleista ..	51
6 Asiakaslaitteiden aiheuttamat PLC-luentaongelmat ja niiden korjaaminen.....	54
6.1 Mittausmenetelmä	54
6.2 Hakkuriteholähteiden aiheuttamat häiriöt.....	57
6.2.1 Laitteen ikääntymisestä johtuvat häiriöt	57

6.2.2	Standardoinnin puutteellisuudesta johtuvat häiriöt	60
6.3	Taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamat häiriöt	64
6.4	Asiakaslaitteiden aiheuttamat häiriöjännitteet suhteessa standardien raja-arvoihin	68
6.5	Häiriöongelmien korjaaminen.....	69
7	Häiriölähteen paikannus	72
7.1	Paikannuksessa käytetty menetelmä.....	72
7.2	Häiriötä aiheuttaneiden taajuusmuuttajien paikannus	74
7.3	Kerrostalon viallisen antennivahvistimen paikannus	75
8	Asiakaslaitteiden häiriintyminen PLC-signaalista	78
8.1	Hipaisuhimmenninlamppujen laboratoriomittaukset	78
8.1.1	Tuloksia.....	81
8.1.2	PLC:n aiheuttaman hipaisuhimmenninvalaisimien toimintahäiriön poistaminen plug-in suotimella.....	85
9	Häiriöselvityksiin soveltuvista mittalaitteista ja varusteista.....	88
9.1	Mittapäät	88
9.1.1	Jännitemittaus	88
9.1.2	Virtamittaus	89
9.2	Mittalaitteet	89
9.2.1	Suurtaajuusspektrianalysointilaitteet.....	89
9.2.2	PLC-analysointilaitteet	91
9.2.3	Oskilloskoopit ja mittakortit.....	92
9.3	Laitteet PLC-signaalien etenemisvaimennuksen määrittämiseen.....	93
10	Sähköverkkotiedonsiirron tulevaisuudennäkymät	94
11	Yhteenveto	96
	Lähdeluettelo	99

1 Johdanto

Energian kulutuksen vähentäminen on tällä hetkellä yksi polttavimmista kysymyksistä ilmaston lämpenemisen vuoksi. Energian kulutusta pyritään osaltaan vähentämään mm. uusien valaistus- ja lämmitysteknologioiden avulla ja lisäämällä kuluttajien tietoisuutta omasta sähkönkulutuksestaan. Viimeksi mainittuun pyritään mm. vaihtamalla perinteiset tyypillisesti kerran vuodessa luettavat energiamittarit tuntikulutusta mittaaviin etäluettaviin energiamittareihin. Valaistuksessa on jo suurelta osin siirrytty perinteisistä hehkulamputta energiansäästölamppuihin tai LED-lamppuihin ja lämmityksessä mm. lämpöpumput ovat yleistyneet voimakkaasti. Muutenkin elektroniset kuormat yleistyvät, koska ne mahdollistavat yleensä mm. kuormien paremmat säätöominaisuudet hyötysuhteen kärsimättä.

EU-direktiivin johdosta kaikki yli 7 W hehkulamput poistuivat markkinoilta syyskuuhun 2012 mennessä ja ovat korvautuneet uusilla lampputeknologioilla, jotka voivat perustua esimerkiksi pienloistelamppu- tai LED-tekniikkaan. Molemmilla uusilla lampputyypeillä on hehkulamppuihin verrattuna monia sähköverkon kannalta uusia ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet voivat vaikuttaa sähköverkon suunnitteluun ja käyttöön tulevaisuudessa. Toisaalta etäluettavat energiamittarit yleistyvät ja sellainen on oltava käytössä 80 %:ssa sähkönkäyttöpaikoista vuoteen 2014 mennessä ja esimerkiksi monissa kaupunkiverkkoyhtiöissä etäluenta tapahtuu pääosin PLC:llä (Power line communication) sähköverkon kautta, jolloin sähköverkon suurtaajuusominaisuudet ja mahdolliset suuritaajuiset häiriöt saattavat vaikuttaa myös luentajärjestelmään.

Sähköverkkotiedonsiirtoa on käytetty laajamittaisesti mm. Ruotsissa, jossa etäluettavien energiamittareiden käyttöönotto tapahtui jo kesäkuun 2009 loppuun mennessä. Ruotsissa lainsäädäntö kuitenkin edellyttää mittareiden luenta vain kerran kuukaudessa, kun taas Suomessa valtioneuvoston asetuksessa 66/2009 [Ano09b] edellytetään mittauslaitteiston luenta vähintään kerran vuorokaudessa. Käytännössä valvottava raja tulee Suomessa taseselvityksen vaatimuksista, jotka velvoittavat jakeluverkonhaltijat toimittamaan tiedot sähkön toimituksista 14 vuorokauden kuluessa toimituspäivästä. Kovin pitkiä katkoksia luennan toimivuudessa ei siis voida sallia. AMM-järjestelmää voidaan käyttää myös kuormanohjauksiin ja tällöin luotettavuus- ja

vasteaikavaatimukset riippuvat sovelluksesta, mutta esimerkiksi tunnin virhettä voidaan useimpien sovellusten näkökulmasta pitää jo suurena.

Tässä raportissa kuvatun tutkimuksen tavoitteena on selvittää energiansäästölamppujen vaikutuksia sähköverkon kannalta ja tutkia tyypillisimpiä luentaongelmien aiheuttajia sähköverkkotiedonsiirtoa (PLC) hyödyntävissä AMR-mittareiden etäluentajärjestelmissä. Raportin luvussa 2 on käsitelty asiakaslaitteiden häiriöpäästöjä ja häiriönsietoa koskevaa standardointia. Luku 3 käsittelee uusien lampputeknologioiden ja muiden elektronisten kuormien verkostovaikutuksia. Luvussa 4 on käsitelty PLC-signaalin etenemistä ja kytkeytymistä pienjänniteverkossa ja luvussa 5 on tarkasteltu erään sähköverkkotiedonsiirtolaitteiston (PLC:llä etäluettava energiamittari ja keskitin) selektiivisyyttä eli sitä, kuinka immuuni järjestelmä on signaalointitajuuksien ulkopuolisille häiriöille. Luvussa 6 on esitetty muutamia yleisimpiä sähköverkkotiedonsiirron häiriölähteitä, kartoitettu häiriöongelma käytännön esimerkitapauksissa tehdyillä mittauksilla ja pyritty selvittämään häiriöiden perussy. Luvussa 7 on esitetty suuritajuisiin virtamittauksiin perustuva menetelmä häiriölähteen paikannukseen. Luvussa 8 on tutkittu hipaisuhimmenninlamppujen häiriintymistä PLC-signaalia muistuttavilla epäjatkuvilla häiriösignaaleilla. Luvussa 9 on tarkasteltu PLC-häiriöongelmien selvittelyyn soveltuvia mittalaitteita ja luvussa 10 luodaan katsaus sähköverkkotiedonsiirron tulevaisuudennäkymiin.

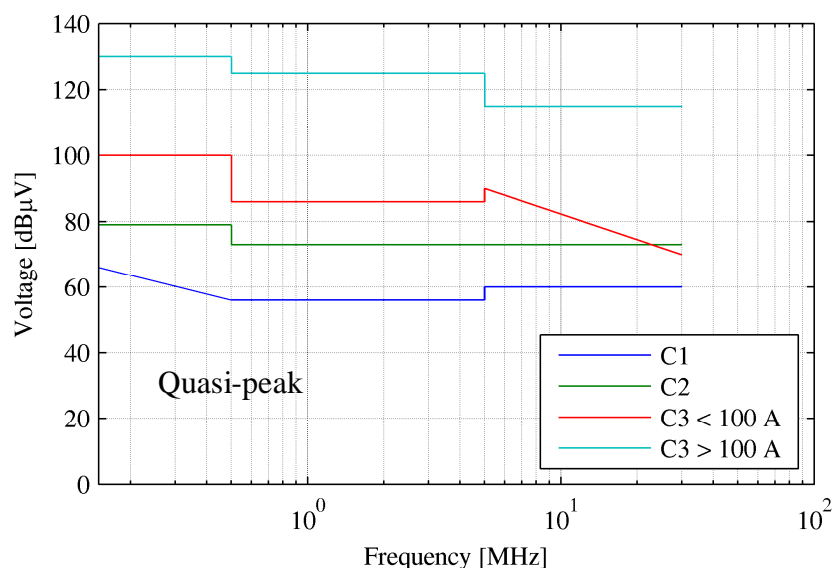
2 Asiakslaitteiden häiriöpäästöjä ja häiriönsietoa koskeva standardointi

2.1 Olemassa olevista standardeista ja raja-arvoista

Asiakslaitteiden häiriöpäästöjä ja häiriönsietoa koskevissa standardeissa on tällä hetkellä annettu raja-arvoja lähinnä johtuville häiriöille taajuusalueella 150 kHz...30 MHz ja säteileville häiriöille yli 30 MHz taajuuksilla. Häiriöpäästöt mitataan esimerkiksi johtuvien häiriöiden osalta laboratoriossa standardoitua keinoverkkoa apuna käyttäen niin, että laitteen näkemä verkkoimpedanssi on mittauksissa vakioitu. Mittaukset tehdään yleensä joko kvasihuippuarvo- (quasi-peak) tai keskiarvoilmaisijalla.

Häiriöpäästöjen ja –siedon raja-arvot on määritelty yleensä laitestandardeissa, jollainen esimerkiksi taajuusmuuttajien osalta on IEC (ja vastaava EN) 61800-3 [Ano04a]. Yleisempään taajuusmuuttajien koskeneeseen standardiin EN 55011 [Ano07a] verrattuna tämä uusi laitestandardi antaa häiriöpäästöjen näkökulmasta käyttäjälle enemmän vapauksia (ja samalla vastuuta) EMC-suotimen valinnassa. Aiemmin sovelletun EN 55011-standardin mukaan asuinalueilla oli käytettävä luokan B (joka vastaa IEC 61800-3 luokkaa C1) raja-arvot täyttäviä EMC-suotimia. Standardin IEC 61800-3 mukaan kiinteästi asennettavissa taajuusmuuttajissa voidaan käyttää asuinalueilla luokan C1 sijasta myös luokan C2 suotimia. Omalla jakelumuuntajalla syötetyissä asiakkaan omissa verkoissa voidaan käyttää myös luokan C3 <100A tai C3 >100A suotimia. Johtuvien häiriöpäästöjen raja-arvot eri luokkien osalta on esitetty kuvassa 2.1.

Luokan C1 raja-arvot ovat yhteneväiset esimerkiksi standardissa EN 55022 [Ano10a] informaatioteknologian laitteille ja generisessä standardissa EN 61000-6-3 kotitalouden, kaupallisen sektorin ja kevyen teollisuuden käyttöympäristöihin annettujen johtuvien häiriöpäästöjen raja-arvojen kanssa. Mm. hakkuriteholähteiden valmistajat ilmoittavat yleensä tuotteidensa täyttävän häiriöpäästöjen osalta standardin EN 61000-6-3 vaatimukset.



Kuva 2.1. Johtuvien häiriöpäästöjen raja-arvot standardissa IEC 61800-3.

Taajuusalueen 2...150 kHz johtuville häiriöpäästöille ei standardeissa toistaiseksi ole juurikaan annettu raja-arvoja. Standardin CISPR 11 uusimassa painoksessa [Ano09a] on määritelty raja-arvot taajuusalueen 9...150 kHz johtuville häiriöpäästöille, mutta nekin koskevat ainoastaan induktiokuumentimia.

2.2 Valmisteilla olevat standardit 2...150 kHz taajuuksilla

Sähköverkkotiedonsiirtoa hyödyntävien energiamittareiden käyttöönoton myötä on käynyt ilmeiseksi tarve laitteiden häiriöpäästöjen ja häiriönsiedon standardoinnille taajuusalueella 2...150 kHz. Työ on parhaillaan käynnissä kansainvälisissä standardointiorganisaatioissa (ISO ja CENELEC). Ensimmäisenä valmistuvat testausmenetelmästandardit, joiden käyttämisestä tuotekomiteat päättävät omissa laitestandardeissaan. Yksi esimerkki testausmenetelmästandardeista on IEC 61000-4-19, jonka pitäisi valmistua keväällä 2013. Siinä määritellään sietotestausmenetelmät asiakaslaitteiden häiriönsiedolle eromuotoisilla epäjatkuvilla (kuten PLC) häiriöillä, jotka ovat olleet ongelma mm. hipaisuhimmenninlampujen tapauksessa.

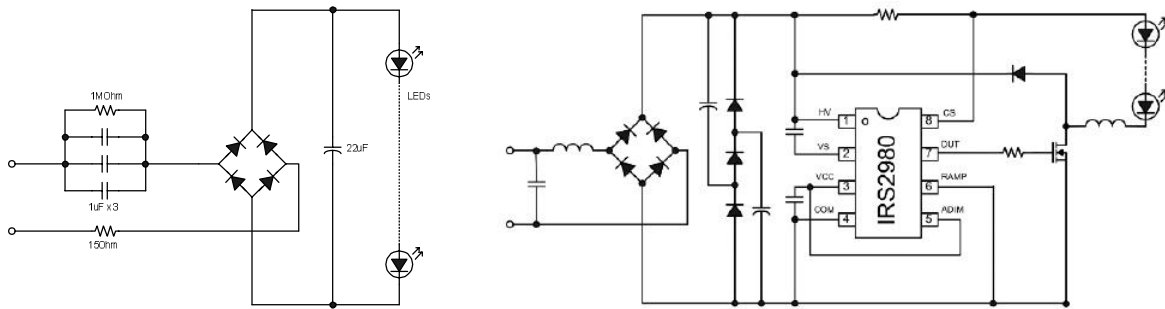
Varsinaisten standardien lisäksi valmisteilla on teknisiä raportteja ja teknisiä määrittelyjä. Nämä poikkeavat standardeista mm. siinä, että niiden julkaisua edeltävä hyväksymismenettely ei vaadi yhtä laajaa konsensusta kuin standardeissa vaaditaan. Tällaisia ovat esimerkiksi CLC/TR 50579 [Ano12b] ja IEC/TS 62578 Ed. 2 [Ano12c], joista edellinen määrittelee wattituntimittareiden sietotestausmenetelmät ja -vaatimukset 2...150 kHz häiriövirroilla ja jälkimmäinen määrittelee mm. raja-arvot hajautetun tuotannon verkkoliityntälaitteiden häiriöpäästöille.

3 Uusien lampputeknologioiden verkostovaikutukset

EU-direktiivin johdosta kaikki yli 7 W hehkulamput poistuivat markkinoilta syyskuuhun 2012 mennessä. Hehkulamppuja korvaamaan tulleita uusia lampputeknologioita ovat mm. pienloistelampit (CFL, compact fluorescent lamp) ja LED (Light emitting diode)-lamput, jotka molemmat liittyvät verkkoon elektronisen liitäntälaitteen välityksellä. Myös erityisesti julkisissa tiloissa, kaupallisella sektorilla ja teollisuudessa yleisesti käytetyt perinteiset magneettisella kuristimella varustetut T8-loistelampit tulevat vähitellen korvautumaan elektronisella liitäntälaitteella varustetuilla T5-loisteputkilla tai LED-putkilla. Perinteistä resistiivistä valaistuskuormaa jäävät edustamaan verkkojännitteiset halogeenilamput. Kaikki elektronisella liitäntälaitteella varustetut lamput poikkeavat sähköisiltä ominaisuuksiltaan hehkulampuista. Tässä luvussa tarkastellaan näitä uusia ominaisuuksia sähköverkkojen näkökulmasta.

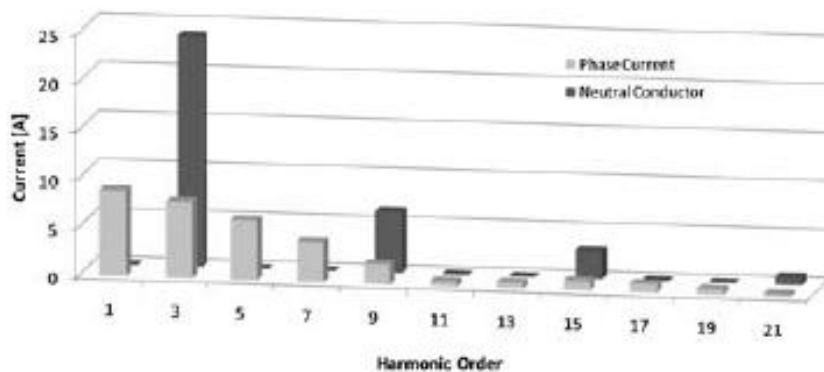
3.1 Uusien lampputeknologioiden ominaisuuksista

Uusille lampputeknologioille (pienloistelampit, LED-lamput, T5-loistelampit) on tyypillistä se, että ne liittyvät sähköverkkoon elektronisella liitäntälaitteella. Yksinkertaisimmillaan tämä voi olla pelkkä resistiivisellä virranrajoituksella varustettu kokoaaltotasasuuntaaja, joka muuttaa verkon vaihtojännitteen LEDeille sopivaksi tasajännitteeksi (kuva 3.1). Kehittyneemmissä LED-lampuissa on tasasuuntaajan ja energiavarastona toimivan välipiirin kondensaattorin lisäksi DC/DC-muunnin, jolla jännite säädetään sopivaksi LEDeille ja saadaan toteutettua aktiivinen virran rajoitus. Lisäksi tasasuuntaaja saattaa sisältää tehokertoimen korjauskytkennän. Pienloistelamppujen tapauksessa tasasuuntaajan ja välipiirin kondensaattorin jälkeen tarvitaan lisäksi vaihtosuuntaaja ja muuntaja, joilla välipiirin tasajännite vaihtosuunnataan ja korotetaan pienloisteputkelle sopivaksi suuritaajuiseksi (kymmeniä kHz) ja -jännitteiseksi noin (useita satoja voltteja) vaihtosähköksi.



Kuva 3.1. Esimerkki a) halvan moniLEDisen kohdevalon kytkentäkaaviosta, b) tehokertoimen korjauksella varustetun LED-putken (tai kohdevalon) kytkentäkaaviosta.

Yksinkertaiselle kokoaaltotasasuuntaajalle ilman tehokertoimen korjausta on ominaista, että se aiheuttaa verkkoon runsaasti parittomia yliaaltovirtoja. Yliaaltovirrat ovat siinä mielessä ongelmallisia että kolmivaihejärjestelmän eri vaiheiden kolmella jaolliset parittomat yliaaltovirrat summautuvat nollajohtimeen samenvaiheisina ja saattavat näin ollen aiheuttaa nollajohtimen ylikuormittumisen, varsinkin jos nollajohtimen poikkipinta on pienempi kuin vaihejohtimien. Kuvassa 3.2. on esitetty esimerkki vaihejohtimien ja nollajohtimen yliaaltovirtojen jakaumasta, kun kuormana on pienloistelamppuja, jotka on tasaisesti jaettu kaikille kolmelle vaiheelle.



Kuva 3.2. Vaihejohtimien ja nollajohtimen virtojen yliaaltospektrit, kun kolmivaihejärjestelmän kuormana on yhtä monta pienloistelamppua kussakin vaiheessa [Des10a].

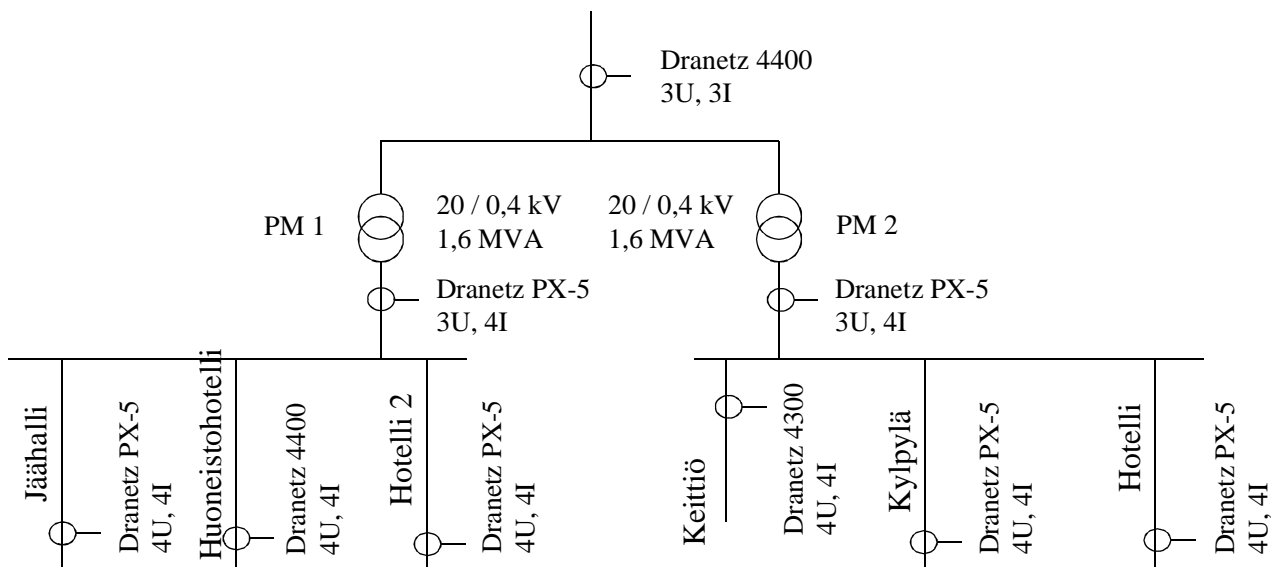
3.2 Uuden kylpyläkiinteistön mittaukset

Energiansäästölamppujen verkostovaikutuksia tutkittiin yksittäisten lamppujen mittausten lisäksi myös uudessa kylpyläkiinteistössä, jossa valaistus oli toteutettu pääasiassa energiansäästölampuilla ja kiinteistössä oli lisäksi runsaasti muita elektronisia kuormia (taulutelevisioita, tietokoneita, nykyaikaista kiinteistöautomaatiota ja KNX-valaistuksenohjausjärjestelmiä). Kahdessa kohteen rakennuksista (jäähalli ja kylpylä) oli lisäksi runsaasti taajuusmuuttajia, joten kohteessa oli sekä yksi- että kolmivaiheisia elektronisia kuormia. Rakennukset olivat pääosin uusia ja ainoassa vanhassa rakennuksessa (Hotelli 2) oli tehty sähkösaneraus, jonka yhteydessä oli siirretty 5-

johdinjärjestelmään. Henkilökunnan mukaan energiansäästölamppujen kestoikä ei kohteessa yltenyt lähellekään valmistajien lupauksia.

3.2.1 Mittausjärjestelyt

Kohteessa tehtiin sähkölaatumittauksia ja suuritaajuisten häiriöiden mittauksia kiinteistön muuntamalla sekä 20 kV että 400 V puolella ja lisäksi rakennusten pääkeskuksilla yhteensä yhdeksällä Dranetz-sähkölaatuanalysointilaitteella (6 kpl PX-5, 2 kpl 4400 ja 1 kpl 4300). Lisäksi tehtiin energiansäästölamppujen ja lamppuryhmien kytkentävirtasysäysten mittauksia Hotellin 2 yhdessä huoneessa ja Hotellin yhdellä ryhmäkeskuksella. Mittausjärjestelyt pääkeskuksilla tehdyissä mittauksissa on esitetty kuvassa 3.3. Suuritaajuisten häiriöiden ja lamppujen kytkentävirtasysäysten mittausjärjestelyt on esitetty luvuissa 3.2.3 ja 3.2.4.



Kuva 3.3. Mittausjärjestelyt kylpyläkiinteistössä.

3.2.2 Harmoniset yliaallot pääkeskuksilla

Mittausten aikana muuntamon 20 kV puolelta mitattu pätöteho oli suurimmillaan noin $P = 800 \text{ kW}$ ja loisteho $Q = 120 \text{ kvar ind.}$ Kokonaistehokerroin (PF power factor) mittausjakson aikana vaihteli välillä 0,966 - 0,98. Perustaajuinen tehokerroin (DPF displacement power factor) vaihteli induktiivisella puolella välillä 0,983 - 0,992. Perustaajuisen loistehon ilmaisosuus vaihtelee jakeluverkkoyhtiöittäin. Hyvin yleisiä arvoja loistehon ilmaisosuudelle on -4% (kap.) - +16% (ind.) tai -5% (kap.) - +20% (ind.) suhteessa johonkin erikseen määriteltyyn pätötehoon. Tässä yhteydessä, jos pätötehoon käytetään suurinta 20 kV puolelta mitattua pätötehoa ja loistehona vastaavaa maksimiloistehoa havaitaan, että loistehomaksu määräytyisi osamäärästä $120/800 = 15 \%$. Tämä on loistehon ilmaisosuuden sisällä vaikkakin sen yläpäässä. Riippuen kohteesta käytetystä loistehomaksun määritelmästä on mahdollista, että tulevaisuudessa ilmaisosuuden ylityksiä voi tapahtua. Tämän takia tulevaisuudessa mahdollisesti kannattaneen kiinnittää huomiota perustaajuisen loistehon kompensointiin.

Sähköenergiailiiton suositus Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen määrittelee suositeltavat virtayliaaltoajat sähkökäyttäjän ja yleisen jakeluverkon välisessä liittämiskohdassa. Keskiänniteverkkoon liittyneelle sähkökäyttäjälle rajat on annettu suhteessa referenssivirtaan. Referenssivirta määritellään kaavan 3.1 avulla. Suositetut raja-arvot on esitetty taulukossa 3.1. Liittymisteho ei ollut tästä liittymästä tiedossa. Käytettäessä liittymissopimuksen päätötehoana 75 % muuntajien yhteenlasketusta nimellistehosta ei taulukossa 3-1 esitettyjä arvoja ylitetä. Taulukon rajat ylittyvät 5. yliaallon osalta yhdessä kohdassa mittausajanjaksoa, kun liittymissopimuksen päätötehoana käytetään 105 % yhden muuntajan nimellistehosta. Oletettavasti liittymän liittymissopimuksen päätöteho on tätä suurempi eli suosituksen määrittelemät ehdot täyttyvät liittymän osalta.

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3}U_N} \quad (3.1)$$

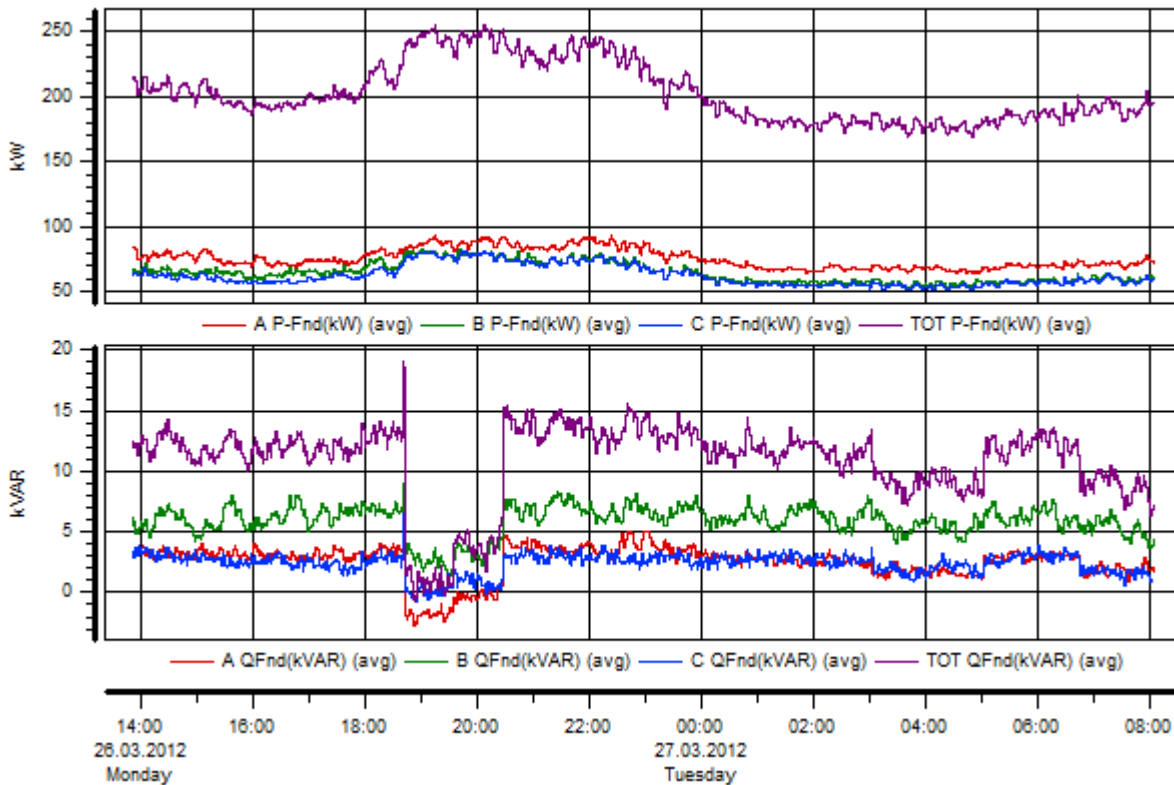
jossa P = liittymissopimuksen päätöteho (tilausteho)
 U_N = on verkon nimellisjännite

Taulukko 3-1. Loistehojen kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen - julkaisun suosittelemat virtayliaaltoajat suhteessa referenssivirtaan.

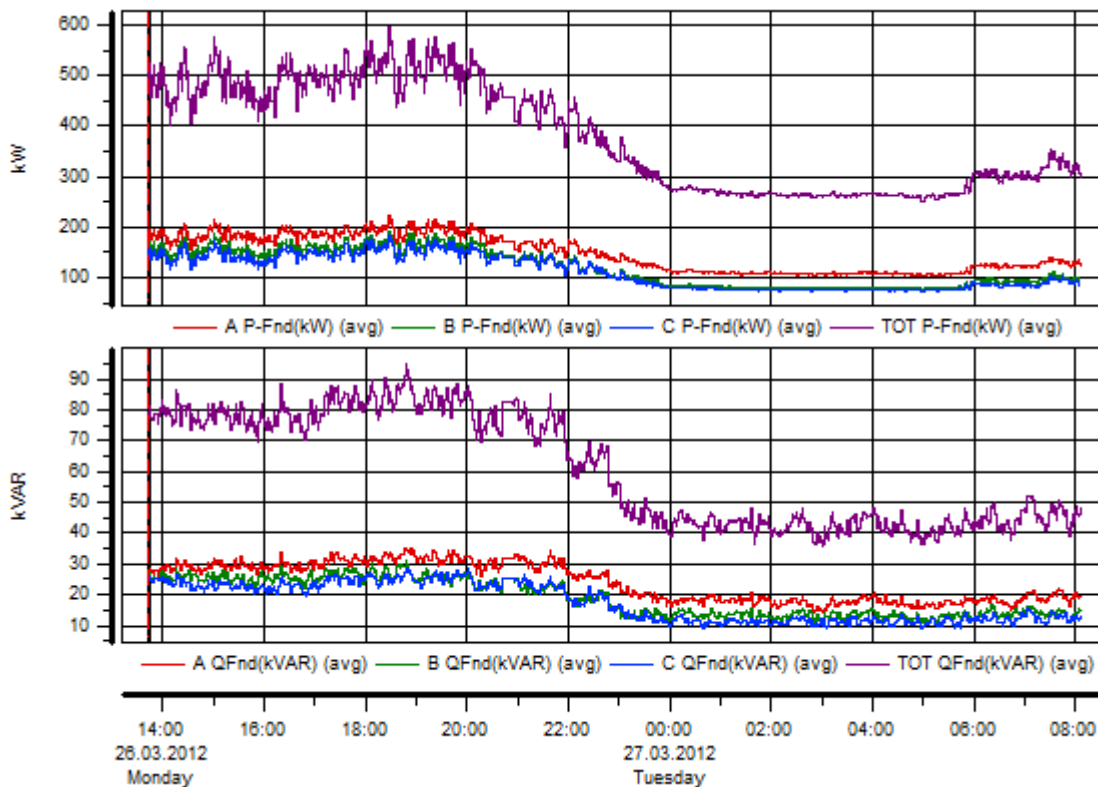
Referenssi- virta	Suositeltava raja	
kaikki	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta. Lisäksi eri yliaaltojen osalta:	
	järjestysluku n	sallittu arvo referenssivirrasta
	<11	7,0 %
	11-16	3,5 %
	17-22	2,5 %
	23-34	1,0 %
>34	0,5 %	

Mittausten aikana muuntajan PM1 kokonaispätöteho oli suurimmillaan noin $P = 255$ kW ja kokonaisloisteho $Q = 19$ kvar. Vaihekohtaisesti muuntajalla PM1 suurin pätöteho oli noin $P = 93$ kW vaiheessa L1 ja suurin loisteho noin $Q = 9$ kvar vaiheessa L2. Yöllä muuntajan PM1 kokonaispätöteho oli välillä $P = 170$ kW... 195 kW ja kokonaisloisteho oli välillä $Q = 7,5$ kvar... 12,5 kvar. Vastaavasti muuntajalla PM2 kokonaispätöteho oli suurimmillaan noin $P = 597$ kW ja kokonaisloisteho $Q = 95$ kvar. Vaihekohtaisesti muuntajalla PM2 suurin pätöteho oli noin $P = 223$ kW ja suurin loisteho oli noin $Q = 35$ kvar. Yöllä muuntajan PM2 kokonaispätöteho oli välillä $P = 250$ kW...280 kW ja kokonaisloisteho oli välillä $Q = 35$ kvar...50 kvar. Kuvissa 3.4 ja 3.5 on esitetty muuntajien PM1 ja PM2 perustajuiset pätö- ja loistehot mittausajanjaksolta. Kuvan 3.4 loistehoissa näkyy selvästi ja pätötehoissa on havaittavissa jäähallin jäävuoron alkaminen. Jäähallin kuormien loistehokompensointi kompensoi myös muuntajan PM1 muiden kuormien aiheuttamaa

loistehoa jopa niin voimakkaasti, että jollain hetkellä kokonaisloisteho on kapasitiivinen. Yleisesti ottaen näennäistehoissa ollaan selvästi alle muuntajien nimellisten näennäistehojen.

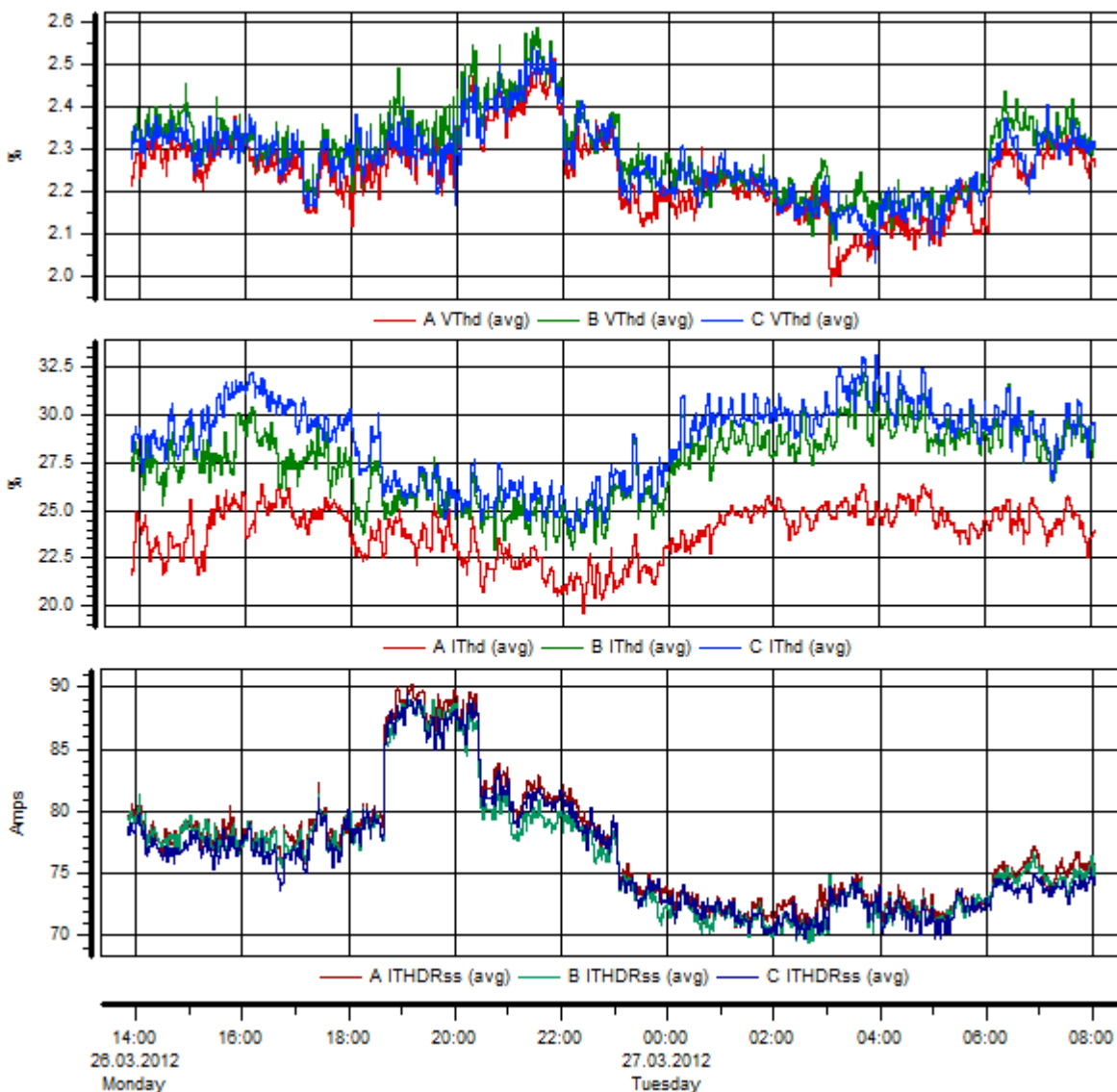


Kuva 3.4. Muuntajan PM1 perustaajuiset pätö- ja loistehot mittausjakson ajalta.

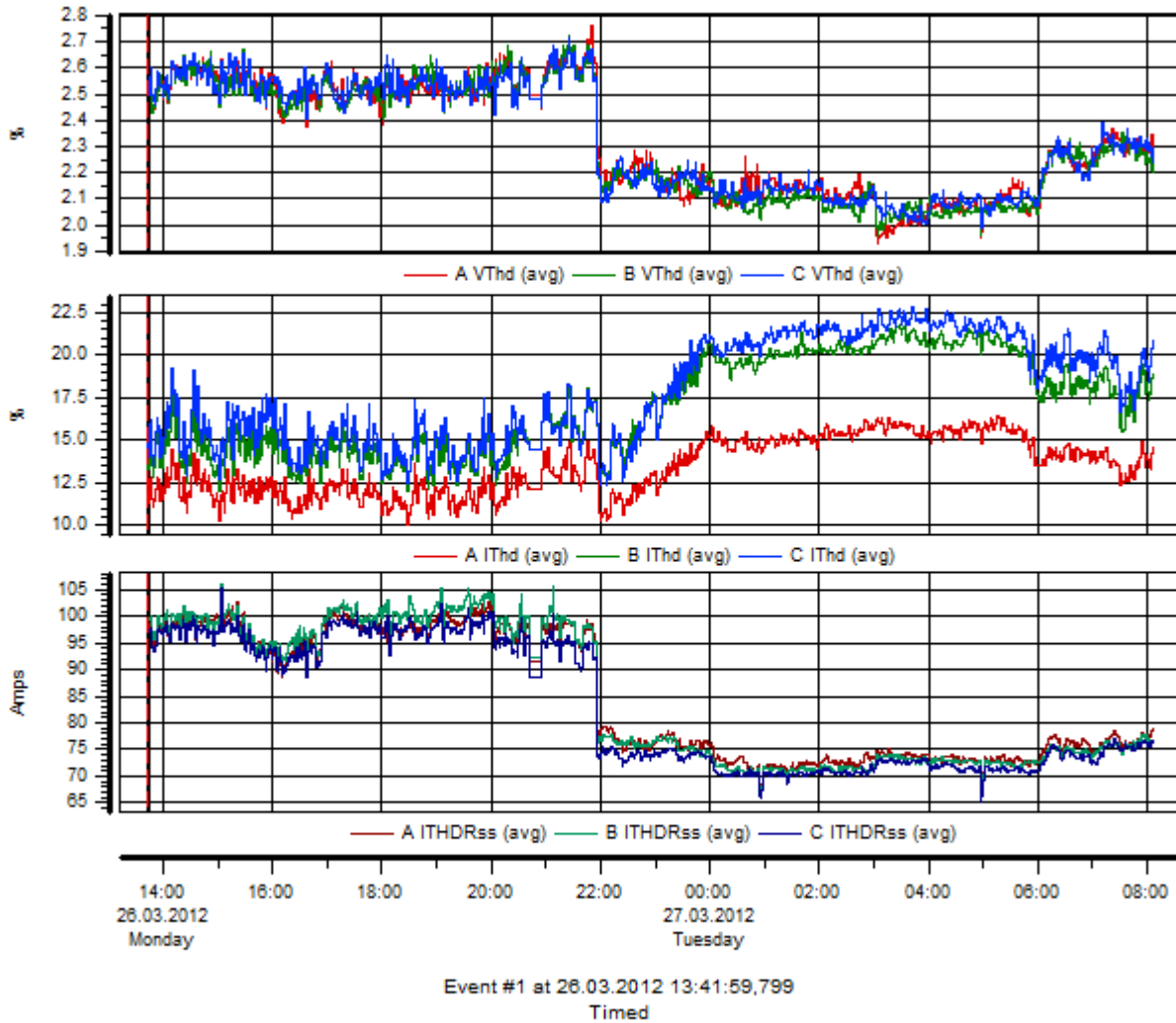


Kuva 3.5. Muuntajan PM2 perustaajuiset pätö- ja loistehot mittausjakson ajalta.

Jännitteen harmoninen kokonaissärö mittausajanjakson aikana oli suurimmillaan muuntajalla PM1 noin $THD_U = 2,6 \%$ ja muuntajalla PM2 noin $THD_U = 2,8 \%$. Virran harmoninen kokonaissärö mittausajanjakson aikana oli suurimmillaan muuntajalla PM1 noin $THD_I = 32,5 \%$ ja muuntajalla PM2 $THD_I = 22,5 \%$. Särövirta oli suurimmillaan muuntajalla PM1 $I_H = 90 \text{ A}$ ja muuntajalla PM2 $I_H = 106 \text{ A}$. Kuvissa 3.6 ja 3.7 on esitetty muuntajien PM1 ja PM2 säröjännitteet suhteessa perustaajuiseen komponenttiin sekä särövirrat suhteessa perustaajuiseen komponenttiin ja absoluuttiarvona mittausajanjaksolta. Merkittävimmät virtojen yliaaltokomponentit muuntajalla PM1 ja PM2 olivat järjestyksessä 5., 7., 3. ja 11.. Kuvan 3.6 muuntajan PM1 särövirroissa näkyy myös selvästi jäähallin käyttövuoro. Kuvan 3.7 muuntajan PM2 absoluuttisissa särövirroissa näkyy myös selvästi pudotus noin klo 22.00 jälkeen jolloin kylpylä suljettiin.



Kuva 3.6. Muuntajan PM1 säröjännitteet suhteessa perustaajuiseen komponenttiin sekä särövirrat suhteessa perustaajuiseen komponenttiin ja absoluuttiarvona.



Kuva 3.7. Muuntajan PM2 säröjännitteet suhteessa perustaajuiseen komponenttiin sekä särövirrat suhteessa perustaajuiseen komponenttiin ja absoluuttiarvona.

Virran yliaallot kasvattavat muuntajan kuormitushäviöitä, koska taajuudesta riippuva pyörrevirtojen ja virranahdon aiheuttama osuus kuormitushäviöistä kasvaa. Jotta muuntaja ei ylikuormittuisi, kuormitushäviöt yliaaltovirroilla eivät saa ylittää kuormitushäviöitä muuntajan sinimuotoisella nimellisvirralla I_N . Kirjassa ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita annetaan ehto, joka takaa sen että kyseistä ylitystä ei tapahdu. Kyseinen ehto on esitetty kaavassa 3.2.

$$\frac{I}{I_N} \leq \sqrt{\frac{1+a}{1 + \frac{a}{\sum_{n=1} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \cdot \sum_{n=1} n^q \left(\frac{I_N}{I_1}\right)^2}} \quad (3.2)$$

- jossa
- I = kuormitusvirran tehollisarvo
 - I_1 = virran perusaalto
 - n = yliaallon järjestysluku
 - I_n = n:s yliaaltovirta
 - a = virranahtauman aiheuttaman käämiresistanssin lisäys perusaallolla

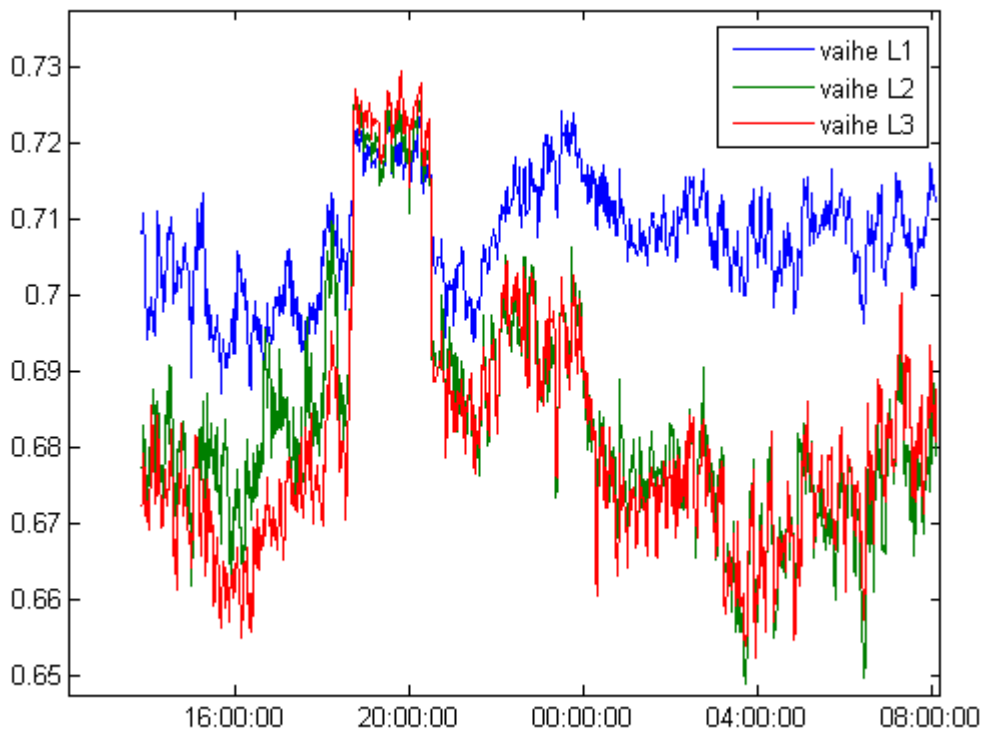
q = virranahdon aiheuttama kämmiresistanssin lisäyksen taajuusriippuvuus
 I_1 = muuntajan nimellinen virta

Kertoimen a arvoa voidaan arvioida kaavan 3.3 avulla.

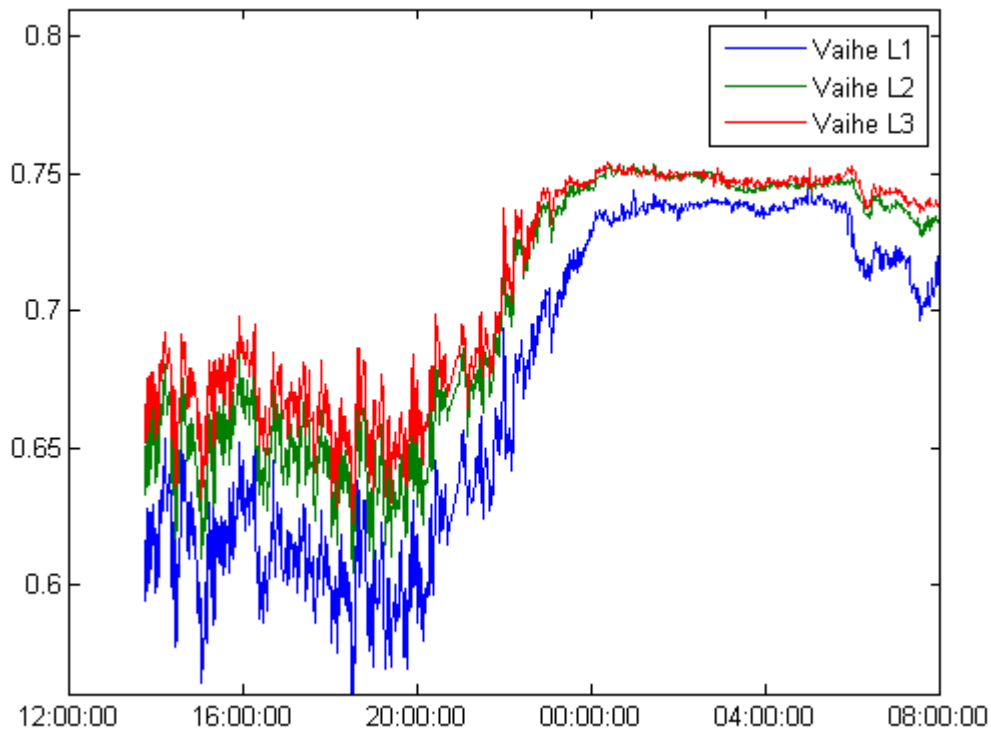
$$a = 0,04 \frac{S_N}{U} \quad (3.3)$$

jossa S_N = muuntajan nimellisteho MVA (≤ 4 MVA)
 U = muuntajan toisiojännite kV ($\leq 1,1$ kV)

Muuntajissa PM1 ja PM2 oli havaittu jossain tilanteissa lämpöongelmia . Käyttäen kaavoja 3.2 ja 3.3 voidaan molemmille laskea täyttyykö kaavan 3.2 ehto ja samalla voidaan arvioida voisiko kyseinen muuntajien lämpeneminen olla aiheutunut yliaaltovirroista. Kuvassa 3.8 muuntajalle PM1 ja kuvassa 3.9 muuntajalle PM2 on esitetty kaavan 3.2 oikea puoli vähennettynä kaavan vasemmalla puolella ajan funktiona vaiheittain. Laskettujen arvojen ollessa positiivisia kyseinen ehto täyttyy. Laskennassa on käytetty yliaaltovirtojen 1 min keskiarvoja aina 49. yliaaltovirtaan asti. Kuvista 3.8 ja 3.9 nähdään, että muuntajat täyttävät kaavassa 3.1 esitetyn ehdon selvästi ja mittausajankohdan aikana yliaaltovirrat eivät aiheuttaneet muuntajan ylikuormittumista. Tämä oli myös oletettavaa, koska muuntajien kuormitus on selvästi alle nimellisen kuormituksen

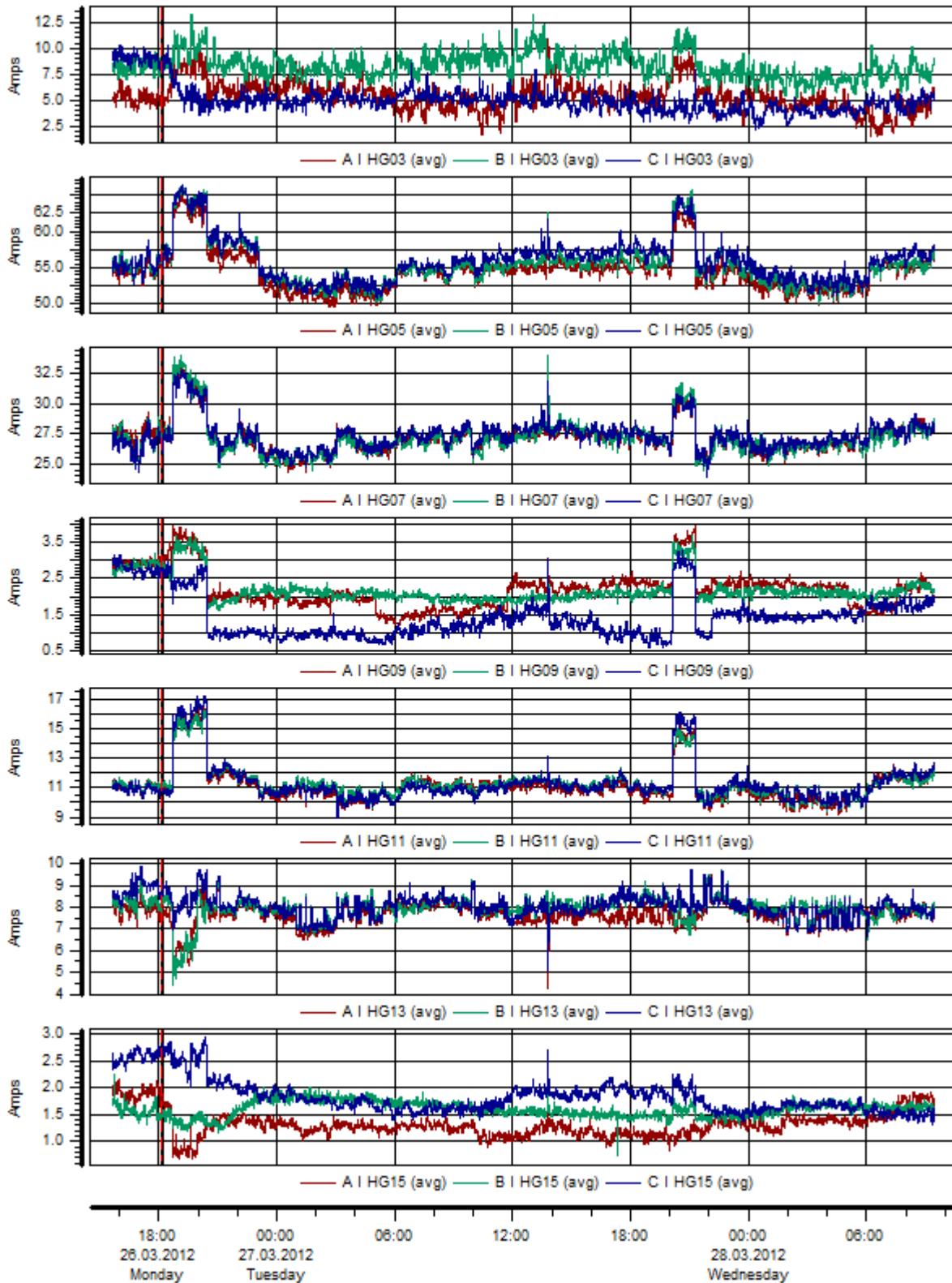


Kuva 3.8. Särövirroista aiheutuvan muuntajan PM1 kuormittumisen tarkastelu käyttäen kaavaa 3.1. Kuvassa vaiheittain ajan funktiona on kaavan 3.1 oikeasta puolesta vähennetty kaavan 3.1 vasen puoli.



Kuva 3.9. Särövirroista aiheutuvan muuntajan PM2 kuormittumisen tarkastelu käyttäen kaavaa 3.1. Kuvassa vaiheittain ajan funktiona on kaavan 3.1 oikeasta puolesta vähennetty kaavan 3.1 vasen puoli.

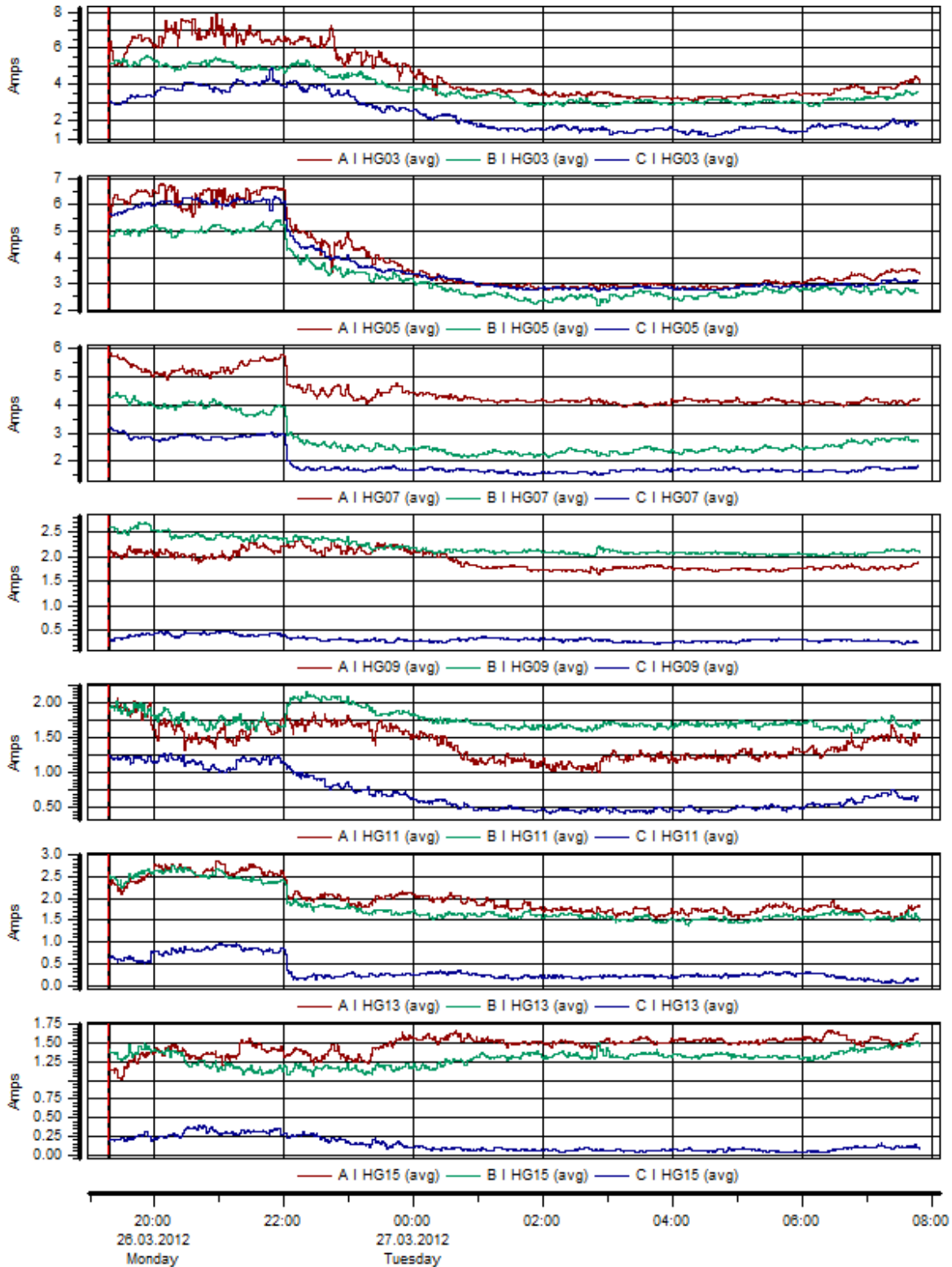
Kuten kuvasta 3.3 nähdään, muuntajan PM1 alla olivat jäähallin, huoneistohotellin sekä hotelli 2 pääkeskukset. Jäähallin pääkeskuksen mittaus osoitti, että kuormitusvirta oli melko tasaista lukuun ottamatta jäähallin käyttövuoroa, jolloin kuormitusvirrat nousivat. Suurin kokonaispätöteho oli $P = 149$ kW ja suurin kokonaisloisteho oli $Q = 26$ kvar kapasitiivisella puolella. Kuormituksissa näkyi ero eri vaiheiden välillä. Vähiten kuormitetun vaiheen tehot olivat noin neljänneksen pienemmät kuin eniten kuormitetun vaiheen tehot lähes koko mittausjakson ajan, lukuun ottamatta jäähallikäyttövuoroa. Tällöin vähiten kuormitettu vaihe oli noin 15 % pienempi kuin eniten kuormitettu vaihe. Jäähallin kuormitus sisälsi pääasiassa 6-pulssitasasuuntaussilloilla verkkoon liitettyjä kuormia. Tämä näkyy kuormien aiheuttamista yliaaltovirroista. Näistä merkittävimmät olivat 5., 7., 11. ja 13. yliaalto ennen 3. ja 9. yliaaltoa kuten kuvasta 3.10 nähdään. Harmoninen jännitesärö jäähallin pääkeskuksella oli selvästi alle 3 %. Merkittävimmät jännitteen yliaaltokomponentit olivat 5. ja 7. yliaalto. Suhteellinen virtasärö vaihteli noin 30 % - 47 % välillä ja särövirta vaihteli 58 A - 78 A välillä.



Kuva 3.10. Jäähallin pääkeskuksen virtalyliaaltospektri.

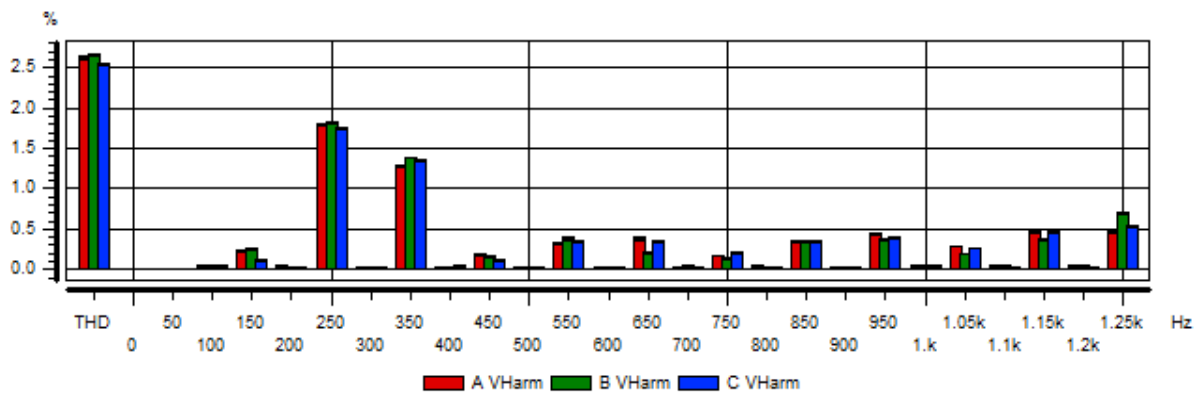
Huoneistohotellin pääkeskuksen mittaus osoitti, että pätötehon kulutus vaihteli selvästi päivän ja yön aikana. Suurin kokonaispätöteho oli $P = 86 \text{ kW}$ ja suurin kokonaisloisteho oli $Q = 4,5 \text{ kvar}$ kapasitiivisella puolella. Pätötehon kulutus oli hyvin tasapainossa eri vaiheiden välillä. Huoneistohotellin kuormitus sisälsi yksivaiheisia hakkuriteholähteitä. Tämä näkyy kuormien

aiheuttamista yliaaltovirroista, joista 3. yliaalto on samaa suuruusluokkaa kuin 5. yliaalto . 3. yliaalto on vaiheessa L1 pääosan ajasta ja vaiheessa L2 varsinkin yöaikana suurempi kuin 5. yliaalto Huoneistohotellin virtayliaaltospektri on esitetty kuvassa 3.11. Jännitesäro huoneistohotellin pääkeskuksella oli alle 2,8 %. Merkittävimmät jännitteen yliaaltokomponentit olivat 5. ja 7. yliaalto. Suhteellinen virtasäro vaihteli noin 6 % - 30 % välillä ja särövirta vaihteli 3,9 A - 14 A välillä.

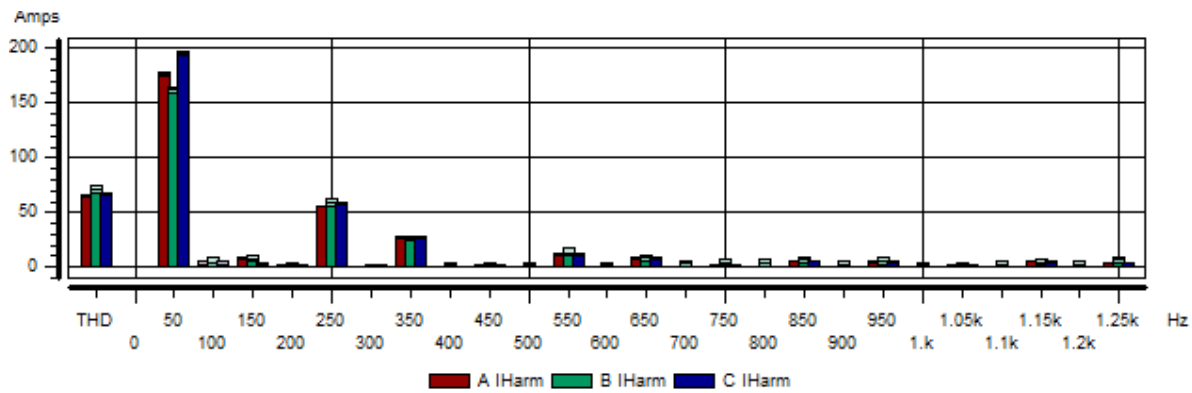


Kuva 3.11. Huoneistohotellin pääkeskuksen virtayliaaltospektri.

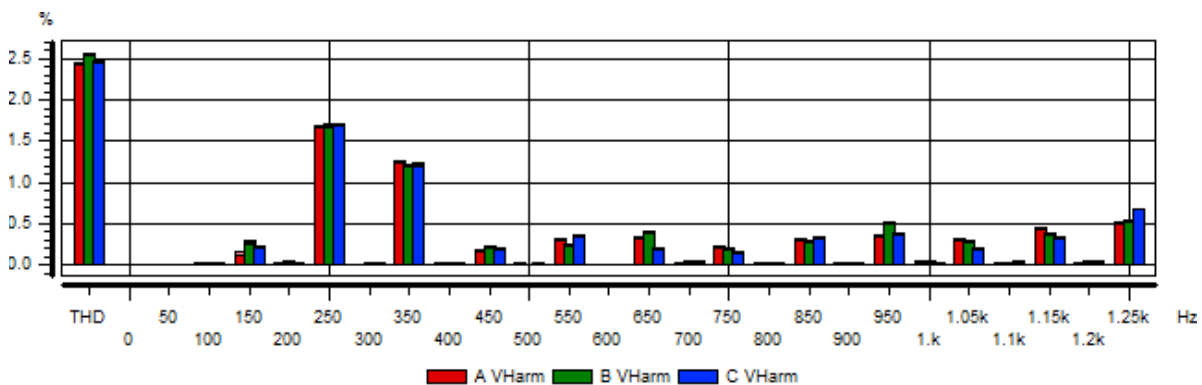
Vertailtaessa kuvien 3.11 - 3.14 jäähallin ja huoneistohotellin jännite- ja virtayliaaltospektrejä eräällä ajanhetkellä havaitaan edellä mainitut merkittävimmät yliaaltovirrat ja -jännitteet. Ajanhetkeksi on valittu klo 22.00 jolloin huoneistohotellin kuormitus oli suurimmillaan. Jännitespektreistä nähdään myös, että yksivaiheisista tasasuuntaajakäytöistä aiheutuneet yliaaltovirrat eivät nosta 3. yliaaltojännitettä läheskään samalle tasolle 5. ja 7. yliaallon kanssa. Tämä osoittaa että yksivaiheisten laitteiden merkitys yliaaltojen lähteinä ei kokonaisuuden kannalta ole merkittävä verrattuna sitä 6-pulssitasasuuntaussilloilla verkkoon liitettyihin kuormiin. Tämä on nähtävissä myös virtayliaaltospektreistä, joissa jäähallin 5. ja 7. yliaalto ovat selvästi suurempia kuin jäähallin ja huoneistohotellin yhteenlaskettu 3. yliaalto.



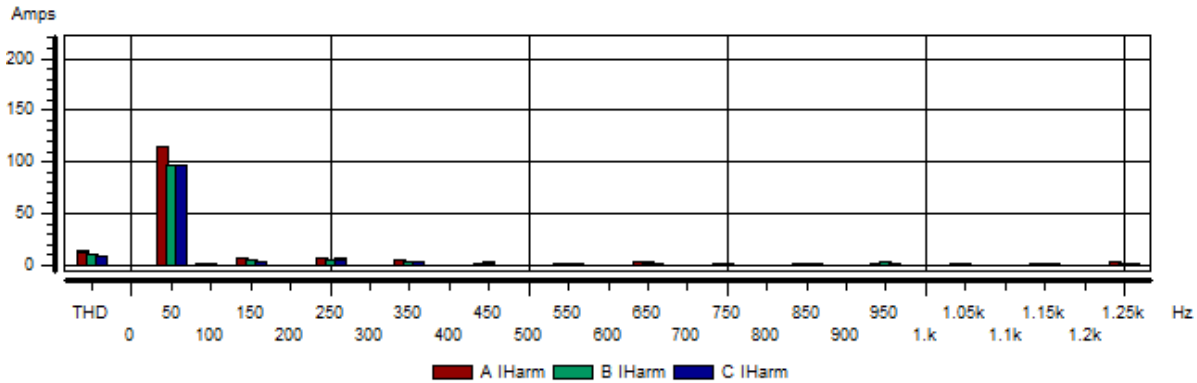
Kuva 3.12. Jäähallin pääkeskuksen jänniteyliaaltospektri eräältä ajanhetkeltä.



Kuva 3.13. Jäähallin pääkeskuksen virtayliaaltospektri eräältä ajanhetkeltä.



Kuva 3.14. Huoneistohotellin pääkeskuksen jänniteyliaaltospektri eräältä ajanhetkeltä.



Kuva 3.15. Huoneistohotellin pääkeskuksen virtayliaaltospektri eräältä ajanhetkeltä.

Hotellin 2 pääkeskuksen mittaus osoitti, että pätötehon kulutus laski hivenen päivän ja yön välillä. Suurin kokonaispätöteho oli $P = 50$ kW ja suurin kokonaisloisteho oli $Q = 7,1$ kvar induktiivisella puolella. Pätötehon kulutus oli yhdessä vaiheessa jonkin verran korkeampaa kuin kahdessa muussa vaiheessa. Merkittävimmät yliaaltovirrat olit 5. ja 7 yliaaltovirta. Yhdessä vaiheessa myös 3. yliaaltovirtaa, joka kuvastaa hakkuriteholähteitä. Jännitesärö hotellin 2 pääkeskuksella oli alle 2,8 %. Merkittävimmät jännitteen yliaaltokomponentit olivat 5. ja 7. yliaalto. Suhteellinen virtasärö vaihteli noin 9,9 % - 30 % välillä ja särövirta vaihteli 8,7 A - 12 A välillä.

Kuten kuvasta 3.3 nähdään, muuntajat PM2 alla olivat kylpylän, hotellin sekä keittiön pääkeskukset. Kylpylän pääkeskuksen mittaus osoitti, että kuormitusvirta vaihteli selvästi kylpylän auki ja kiinniolon välillä. Kuormitusvirta oli jakautunut tasaisesti eri vaiheiden välillä. Suurin kokonaispätöteho oli $P = 403$ kW ja suurin kokonaisloisteho oli $Q = 23$ kvar kapasitiivisella puolella. Kylpylän ollessa suljettu, kylpylän pääkeskuksella mitattiin noin 150 kW pohjakuorma. Aaltomuodon perusteella kylpylän hallitsevat kuormat ovat 6-pulssitasasuuntaussilloilla verkkoon liitettyjä laitteita. Yliaaltovirroissa 5., 7. ja 11. ovat hallitsevia yliaaltoja. Jännitesärö kylpylän pääkeskuksella oli pääsääntöisesti alle 3,5 %. Merkittävimmät jännitteen yliaaltokomponentit olivat 5. ja 7. yliaalto. Suhteellinen virtasärö vaihteli noin 12 % - 32 % välillä ja särövirta vaihteli 46 A - 97 A välillä.

Hotellin pääkeskuksen mittaus osoitti, että kuormitusvirta vaihteli jonkin verran päivän ja yön välillä. Yhdessä vaiheessa kuormitusvirta oli selvästi suurempaa (lähes kaksinkertainen) kuin kahdessa muussa vaiheessa. Suurin kokonaispätöteho oli $P = 205$ kW ja suurin kokonaisloisteho oli $Q = 15$ kvar induktiivisella puolella. Yö aikaan hotellilla oli noin 90 kW pohjakuorma. Yliaaltovirtojen perusteella hotellin kuorma on samanlaista kuin huoneistohotellin ja hotelli 2 kuormat. Yliaaltovirroissa 3., 5., 7. ja 11. ovat hallitsevia yliaaltoja. Jännitesärö kylpylän pääkeskuksella oli alle 3,3 %. Merkittävimmät jännitteen yliaaltokomponentit olivat 5. ja 7. yliaalto. Suhteellinen virtasärö vaihteli noin 7,5 % - 23 % välillä ja särövirta vaihteli 16 A - 33 A välillä.

Keittiön pääkeskuksen mittaus osoitti, että kuormitusvirta vaihteli selvästi päivän ja yön välillä. Kuormavirta on yöllä noin puolet päivän kuormavirrasta. Yhdessä vaiheessa kuormitusvirta oli hivenen isompi kuin muissa vaiheissa. Suurin kokonaispäteho oli $P = 64$ kW ja suurin kokonaisloisteho oli $Q = 16$ kvar induktiivisella puolella. Yliaaltovirroissa 5., 3. ja 7. olivat hallitsevia yliaaltoja. Jännitesärö kylpylän pääkeskuksella oli alle 2,7 %. Merkittävimmät jännitteen yliaaltokomponentit olivat 5. ja 7. yliaalto. Suhteellinen virtasärö vaihteli päiväkuormituksen aikaan noin 2 % - 6 % välillä ja yöaikaan pääsääntöisesti alle 10 % sekä särövirta vaihteli 0,42 A - 4,8 A välillä. Virtasärön pienuus johtuu passiivisista kuormista tai hyvin kompensoiduista elektronisista kuormista.

Yleisesti ottaen tilanne yliaaltojen osalta on hyvä. Keskijännitepuolen yliaaltovirrat eivät ylittäneet julkaisussa Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen esitettyjä virtayliaaltorajoja. Jännitesärö on alle 3,5 % kaikilla pääkeskuksilla. Muuntajat eivät ylikuormittuneet kuormitusvirrasta, joka sisälsi yliaaltokomponentteja. Johtimissa tapahtuvaa yliaaltovirtojen aiheuttamia lisähäviöitä ei tässä yhteydessä tarkasteltu puutteellisten johdintietojen takia. Oletettavaa kuitenkin on, että tämän asian merkitys johdinten häviöistä on suhteellisen pieni tässä tapauksessa. Valaistuksen ja yksivaiheisten hakkuriteholähteiden osuus kokonaiskuormasta havaittiin pieneksi. Tämä oli havaittavissa harmonisista jänniteyliaalloista, joista 5. ja 7. yliaalto olivat kaikilla pääkeskuksilla suurempia kuin 3. yliaalto. Perustajuksen loistehon osalta, jos määritelmässä käytetään mittausajanjakson suurinta päto- ja loistehoa 20 kV puolelta, kohde oli kokoajan yleisesti käytettyjen loistehon ilmaisosuuksien sisäpuolella. Perustajuinen loisteho oli kuitenkin ilmaisosuuksien ylärajalla. Tulevaisuudessa on mahdollista, että ilmaisosuusrajat loistehon osalta ylittynevät ajoittain ja mahdollista kompensointia tulee harkita

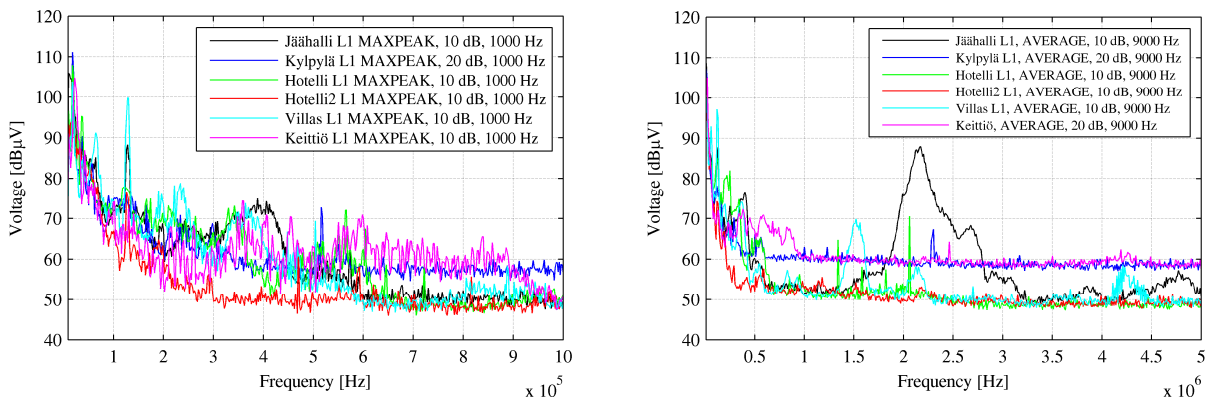
3.2.3 Suuritaajuiset häiriöt pääkeskuksilla ja ryhmäkeskuksilla

Suuritaajuisia häiriöitä mitattiin kuvassa 3.3 mainituista pääkeskusten mittauspisteistä rinnakkaisesti Dranetz-mittausten kanssa. Kuvissa 3.16...3.18 on esitetty pääkeskuksilta mitatut johtuvien häiriöjännitteiden taajuusspektrit eri vaiheissa taajuusalueilla 9 kHz...1 MHz ja 9 kHz...5 MHz. Kuten kuvista nähdään, vaiheiden välillä on jonkin verran eroja, mutta ne ovat pääsääntöisesti pienempiä kuin 10 dB (vastaa 3-kertaista eroa). Suuritaajuisia laajakaistaisia häiriöitä on taajuusalueella 9 kHz...1 MHz eniten keittiön pääkeskuksella, häiriöttömin on Hotelli 2 (vanha hotellirakennus). Huoneistohotellissa (Villas) on kapeakaistainen todennäköisesti yksivaiheisen hakkuriteholähteen aiheuttama häiriö noin 126...130 kHz taajuudella. Yli 1 MHz taajuuksilla huomattavaa on jäähallin keskuksella 1,5...3 MHz taajuuksilla esiintyvä voimakas ja melko leveä häiriöpiikki. Ilmiö näkyy kaikissa vaiheissa suunnilleen samanlaisena. Myös huoneistohotellin ja keittiön keskuksilla näkyy muita keskuksia enemmän häiriöitä yli 1 MHz taajuuksilla.

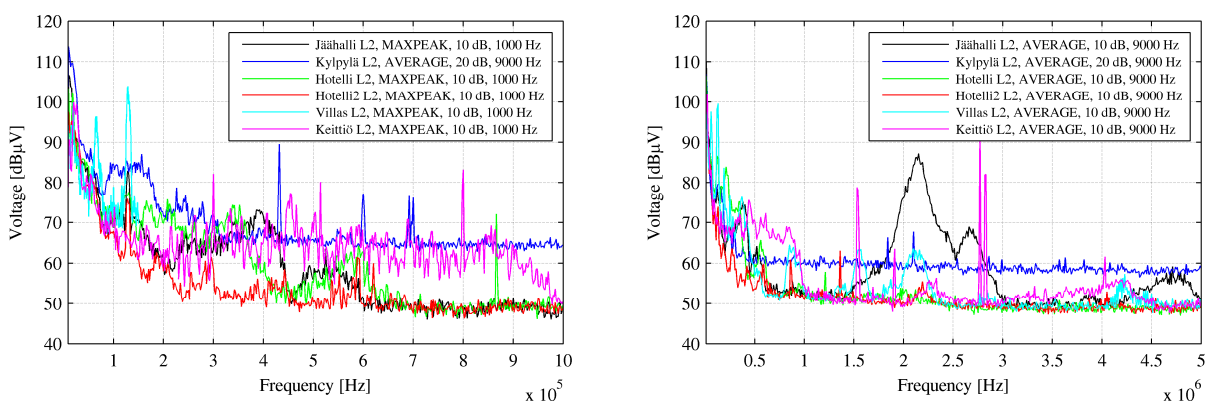
Standardeissa johtuville häiriöpäästöille asetettuja raja-arvoja lähinnä yli 150 kHz taajuuksilla, ja niitä on käsitelty tarkemmin luvussa 2. Tässä tapauksessa kylpylän pj-verkko liittyy yleiseen

jakeluverkkoon omilla 20/0,4 kV jakelumuuntajilla ja näin ollen laitteiden häiriöpäästöjen ei tarvitse kylpylän pj-verkossa täyttää luokan C1/C2 vaatimuksia. Pääkeskuksilta mitattujen häiriöjännitteiden ei muutenkaan tarvitse täyttää standardien raja-arvoja, koska raja-arvot pätevät yksittäisen laitteen päästöille. Raja-arvoja voidaan kuitenkin käyttää mittapuuna arvioitaessa häiriöjännitteiden suuruuksia. Alle 1 MHz taajuuksilla häiriöjännitteet ylittävät paikoin luokan C2 raja-arvot, mutta luokan C3 < 100 A vaatimukset näyttävät täyttyvän muutoin paitsi huoneistohotellin hakkuriteholähteen aiheuttaman piikin ja aivan taajuuskaistan alapään häiriöiden osalta. Yli 1 MHz taajuuksilla luokan C2 raja-arvot näyttävät täyttyvän muutoin paitsi jäähallin keskuksella 1,5...3 MHz taajuuksilla esiintyvän häiriön osalta, joka ylittää myös luokan C3 < 100A vaatimukset. Kaikilla keskuksilla päästöt täyttävät taajuusalueella 9 kHz...5 MHz kuitenkin luokan C3 > 100A vaatimukset.

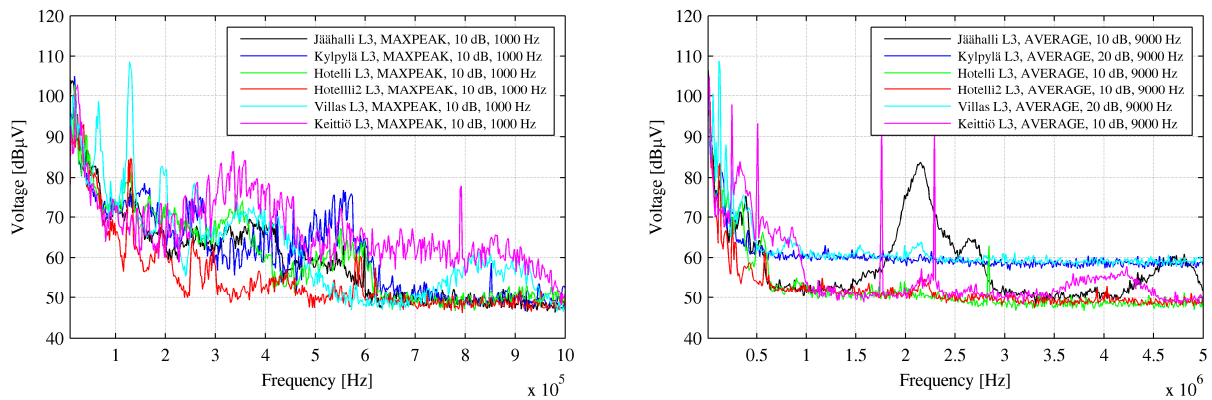
Yhteenvedo mitatuista häiriöistä eri taajuuskaistoilla on esitetty kuvassa 3.19. Kuvassa on vertailun vuoksi esitetty myös kaksi taajuusspektriä, jotka on mitattu etäluettavien energiamittareiden liitäntäterminaaleista tai läheltä niitä tapauksissa, joissa yksittäinen suuritaajuisia häiriöitä aiheuttanut laite on häirinnyt mittarin sähköverkkotiedonsiirtoon perustuvaa etäluentaa. Häiriötapaukset on käsitelty tarkemmin tämän raportin luvussa 6. Kuten kuvasta nähdään, mitatut häiriötasot kylpyläkiinteistön pääkeskuksilla ovat selvästi pienempiä kuin em. häiriötapauksissa.



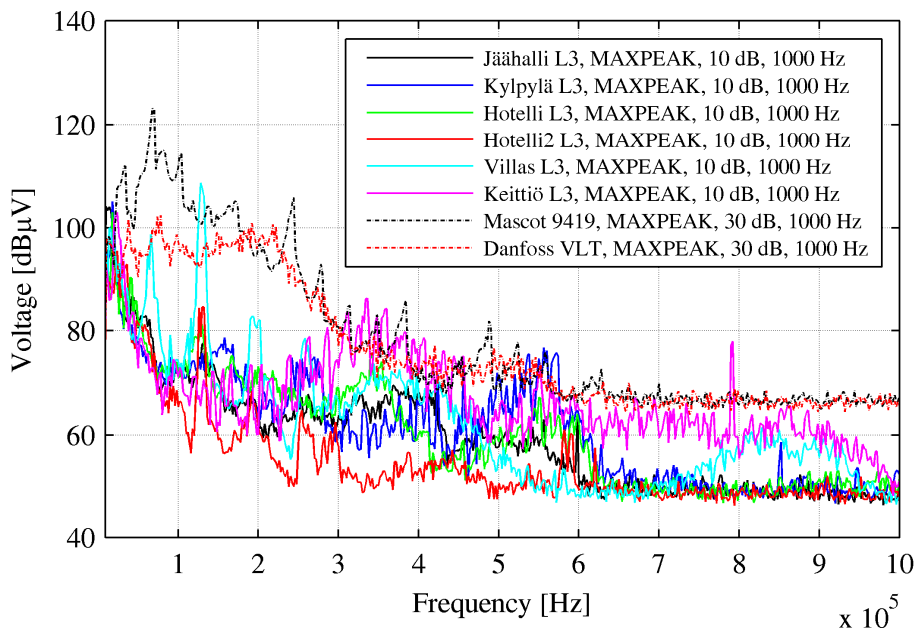
Kuva 3.16. Johtuvat häiriöjännitteet vaiheessa L1 eri pääkeskuksilla taajuuskaistoilla 9 kHz...1 MHz ja 9 kHz...5 MHz.



Kuva 3.17. Johtuvat häiriöjännitteet vaiheessa L1 eri pääkeskuksilla taajuuskaistoilla 9 kHz...1 MHz ja 9 kHz...5 MHz.

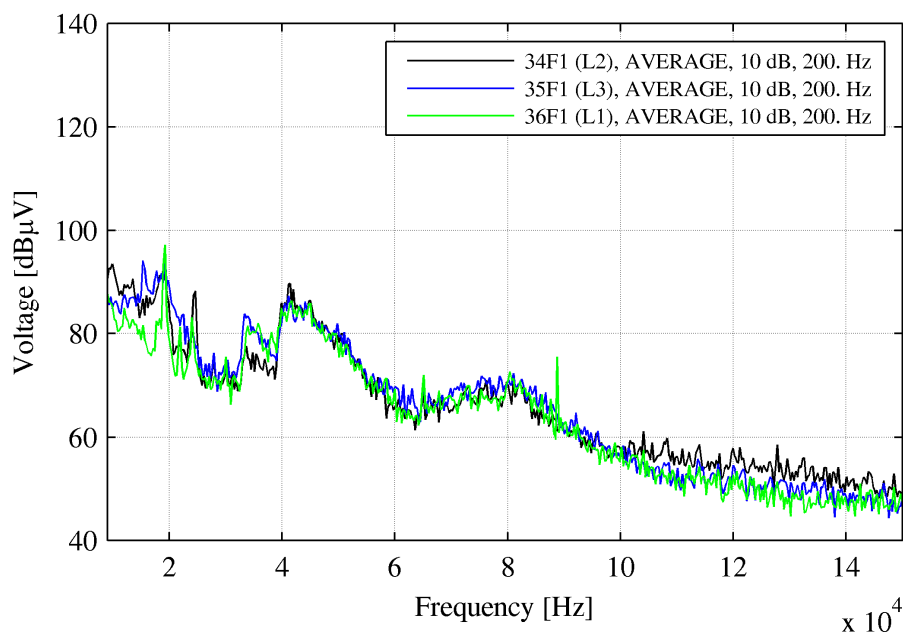


Kuva 3.18. Johtuvat häiriöjännitteet vaiheessa L1 eri pääkeskuksilla taajuuskaistoilla 9 kHz...1 MHz ja 9 kHz...5 MHz.



Kuva 3.19. Pääkeskuksilta taajuusalueella 9 kHz...1 MHz mitatut häiriöjännitteet verrattuna erään sähköyhtiön energiamittareiden etäluentaan häiriötä aiheuttaneiden ikääntyneen (viallisen) hakkuriteholähteen ja taajuusmuuttajan häiriöihin.

Esimerkki hotellin yleisten tilojen eräällä ryhmäkeskuksella mitatuista häiriöjännitteiden taajuusspektreistä on esitetty kuvassa 3.20. Häiriöjännitteet on mitattu keskiarvoilmaisijalla ja 200 Hz kaistanleveydellä, joten lukemiin on lisättävä 13...20 dB, jos niitä halutaan verrata kuvien 3.16...3.19 mittauksiin. Kuten kuvista nähdään, häiriöjännitteet ovat ryhmäkeskuksella noin 10...20 dB suuremmat kuin esimerkiksi hotellin pääkeskuksella. Tämä selittyy sillä, että häiriölähteet ovat pääsääntöisesti lähempänä ryhmäkeskuksia kuin pääkeskuksia. Jos kiinteistössä käytettäisiin PLC-tiedonsiirtoa esimerkiksi energiamittareiden luentaan, saattaisivat suuritaajuiset häiriöt muodostua ongelmaksi.



Kuva 3.20. Häiriöjännitteiden taajuusspektri taajuusalueella 9...150 kHz hotellin eräällä yleisten tilojen ryhmäkeskuksella.

3.2.4 Lamppujen ja valaistusryhmien kytkentävirtasysäykset

Lamppujen ja valaistusryhmien kytkentävirtasysäyksiä mitattiin yhden hotellihuoneen ryhmäkeskuksella ja lisäksi kahdella hotellin yleisten tilojen ryhmäkeskuksella. Hotellihuoneen mittauksilla pyrittiin selvittämään erityisesti, millaisen kytkentävirtasysäyksen hotellihuoneen avainkortilla toteutetun pääkytkimen käyttö aiheuttaa. Yleisten tilojen mittauksilla tutkittiin, millaisia kytkentävirtasysäyksiä yksittäisen lamppuryhmän kytkentä aiheuttaa ja miten kytkentävirtasysäys näkyy vierekkäisessä lamppuryhmässä.

3.2.4.1 Hotellihuoneen mittaukset

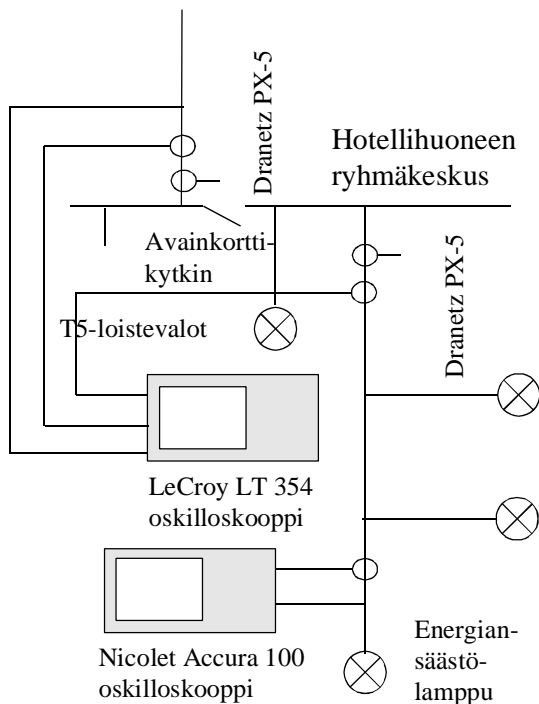
Hotellihuoneen mittauksilla tutkittiin huoneen avainkortilla toteutetun pääkytkintoiminnon aiheuttamaa kytkentävirtasysäystä. Avainkortti-pääkytkin ohjasi huoneen muita kuormia paitsi wc:n valaistusta, taulutelevisiota ja laitteiden lataukseen varattuja pistorasioita. Mittauksissa pääkytkintoiminto kytki jännitteiseksi seuraavat lamput:

- 3 kpl Airam 9 W E27 pienloistelamppu
- 2 kpl LED-lukuvalo
- 1 kpl Airam 11 W E27 pienloistelamppu-lattiavalaisin
- 5 kpl 28 W T5-loistelamppu elektronisella liitäntälaitteella ja himmennystoiminnolla (Glamox)

Pääkytkimen ohi suoraan ryhmäkeskukselle oli kytketty seuraavat lamput, jotka olivat mittausten ajan jännitteisinä:

- 8 kpl 25 W halogeeni
- 1 kpl Osram Dulux 13 W pienloistelamppu

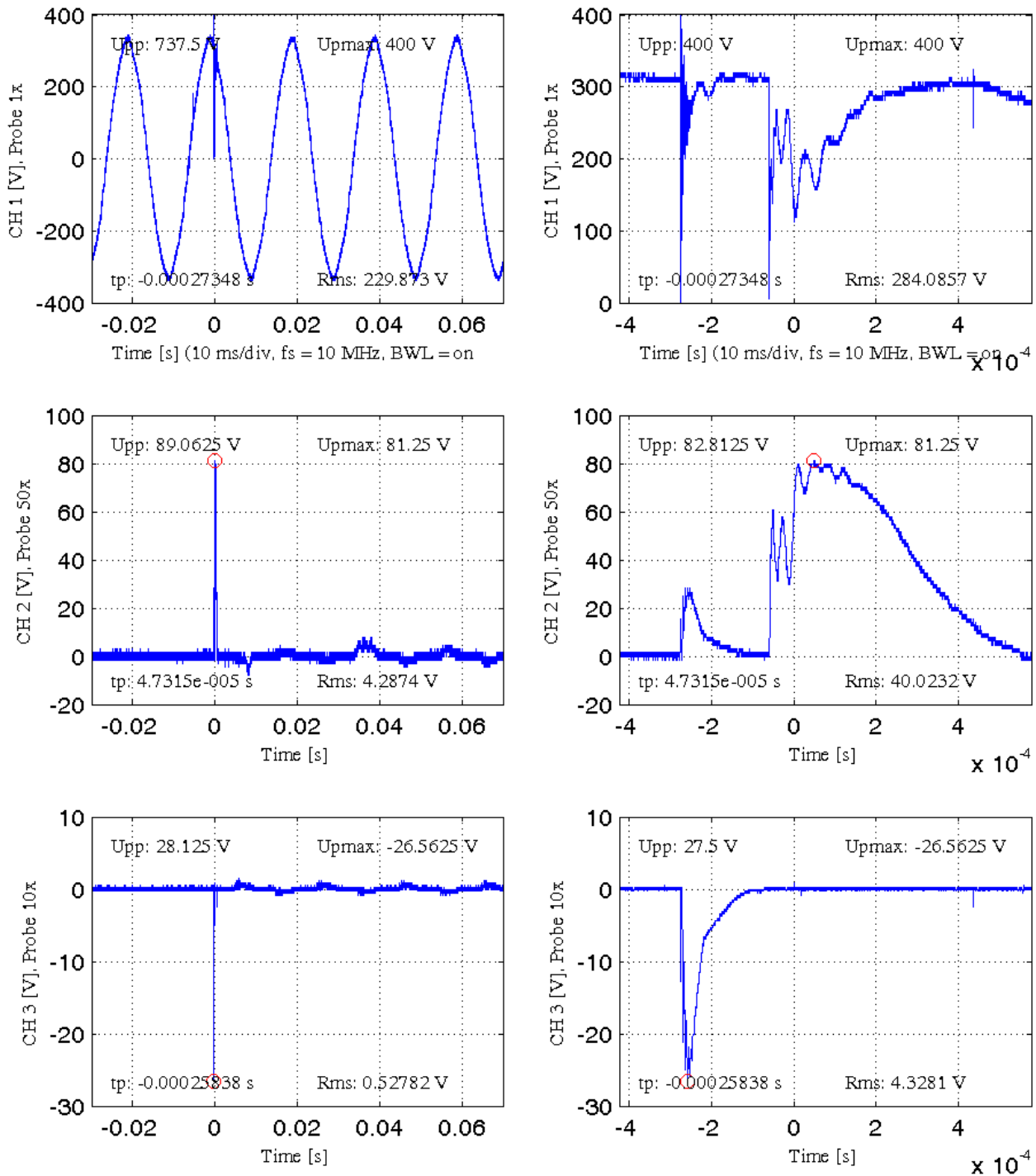
Mittaukset tehtiin kahdella oskilloskoopilla ja kahdella Dranetz PX-5 sähkönlaatuanalysoitsijalla. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 3.21.



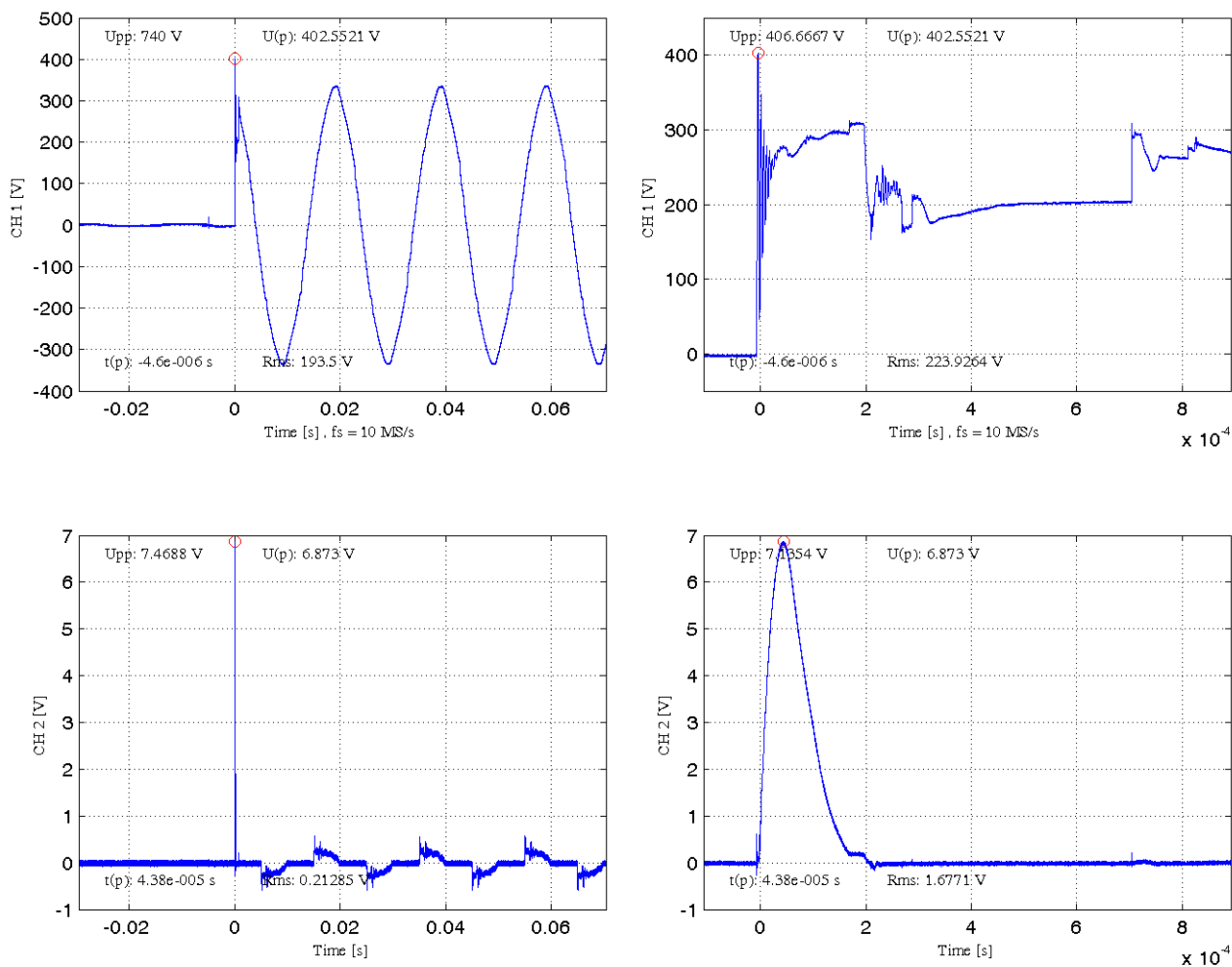
Kuva 3.21. Mittausjärjestelyt hotellihuoneen mittauksissa.

Kuvissa 3.22...3.23 on esitetty esimerkki mitatuista kytkentävirtasysäyksistä. Suurin kytkentävirrän huippuarvo saavutetaan, jos kytkentä tapahtuu vaihejännitteen huipun kohdalla. Kuvien 3.22...3.23 tapauksissa kytkentä on tapahtunut hieman huipun jälkeen, mutta kytkentähetkellä vaihejännitteen hetkellisarvo on kuitenkin vielä noin 94 % vaihejännitteen huippuarvosta. Kuvassa 3.22 on esitetty ryhmäkeskuksen syötöstä mitattu vaihejännite ja -virta ja pienloistelampulla varustetun lattiavalaisimen pistorasiaa syöttävän ryhmäjohtoon virta. Kuvassa 3.23 on esitetty lattiavalaisimen pistorasialta mitattu vaihe- ja nollajohtimen välinen jännite ja valaisimen liitäntäjohtosta mitattu virta. Kuvassa 3.22 ryhmäkeskuksen syötöstä mitatun virran aaltomuodossa näkyy ensin pienloistelamppujen kytkentävirtasysäys (huippuarvo noin 26 A) ja hieman sen jälkeen elektronisilla liitäntälaitteilla varustettujen T5-loistelamppujen kytkentävirtasysäys jonka huippuarvo on yli 80 A. Kuvan 2.8 virtamittauksessa näkyy myös pienloistelampun kannassa olevan kokoaaltoasasuuntaajalla toteutetun liitäntälaitteen ottaman virran aaltomuoto.

Kuten kuvien 3.22 ja 3.23 jännitemittauksista näkyy, käy jännite pienloistelamppujen kytkentävirtasysäyksen aikana hetkellisesti nollassa ja T5-loistelamppujen kytkentävirtasysäyksen yhteydessäkin lähellä nollassa.



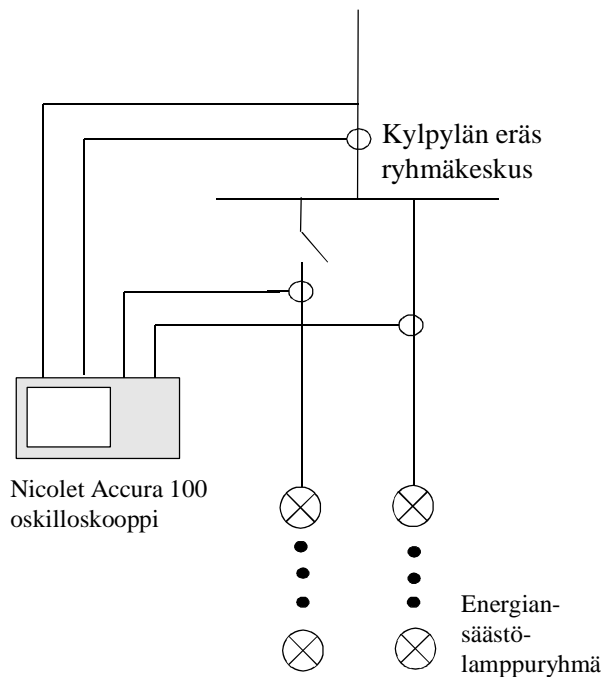
Kuva 3.22. Hotellihuoneen avainkorttipääkytkimellä kytkeytyvien valaistusten aiheuttama kytkentävirtasysäys hotellihuoneen ryhmäkeskuksella. CH1: Vaihejännite hotellihuoneen ryhmäkeskuksen syötössä, CH2: Virta ryhmäkeskuksen syötössä, CH3: virta lampun (Airam 11 W pienloistelamppu) pistorasiaa syöttävässä ryhmäjohdossa. Virtamittauksissa 1 V vastaa 1 A.



Kuva 3.23. Hotellihuoneen avainkorttipääkytkimellä kytkeytyvän lattiavalaisimen aiheuttama kytkentävirtasysäys valaisimen pistorasiassa mitattuna. CH1: Vaihejännite pistorasiassa, CH2: Virta valaisimen liitännäjohtossa. Virtamittauksissa 1 V vastaa 1 A.

3.2.4.2 Yleisten tilojen mittaukset

Yleisten tilojen mittauksilla tutkittiin, millaisia kytkentävirtasysäyksiä yksittäisen lamppuryhmän kytkentä aiheuttaa ja miten kytkentävirtasysäys näkyy vierekkäisessä lamppuryhmässä. Mittaukset tehtiin Nicolet Accura 100-oskilloskoopilla, 1:100 jännitemittapäällä, laajakaistaisilla Tektronix TCP 305 ja TCP 303 virtapihdeillä ja TCPA 300-vahvistimilla. Oskilloskoopin sähkönsyötössä käytettiin erotusmuuntajaa. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvissa 3.24 ja 3.25.

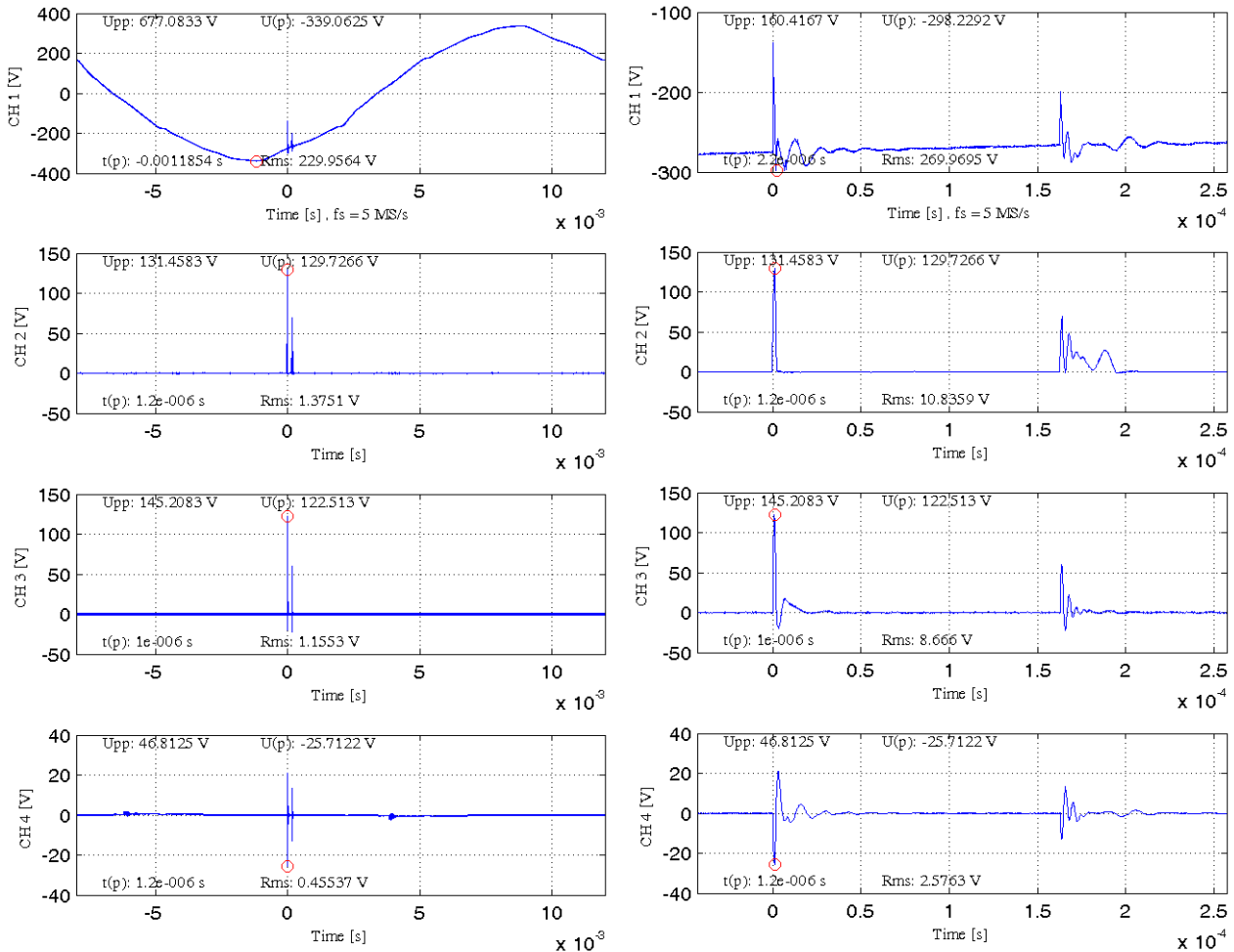


Kuva 3.24. Mittauskytkentä yleisten tilojen lamppuryhmien kytkentävirtasysästen mittauksissa.



Kuva 3.25. Johdonsuojakytinrivit, joilta mittaukset tehtiin a) pubia ja b) ravintolaa syöttävillä ryhmäkeskuksilla.

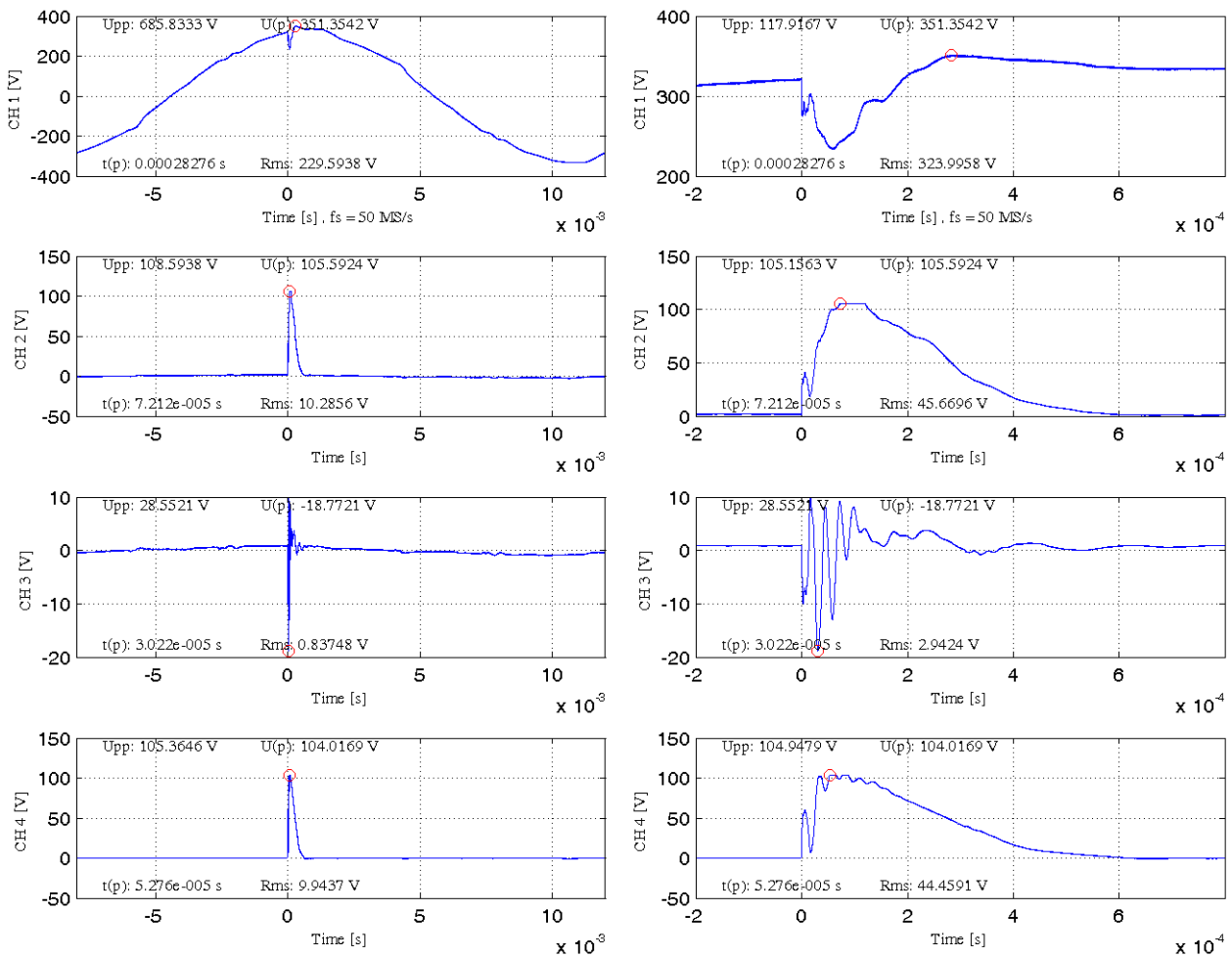
Kuvassa 3.26 on esitetty eräs pubin valoryhmän kytkentävirtasysäys. Kytkentähetki on tässä tapauksessa hieman jännitteen huipun jälkeen ja kytkentähetkellä vaihejännite on noin 81 % vaihejännitteen huippuarvosta. Kuten kuvasta nähdään, kytkentävirtasysäys on suurin lamppuryhmän syötössä, jossa kytkentävirran huippuarvo on noin +145 A. Johdonsuojakytkinrivin syötössä kytkentävirran huippuarvo on vain noin +131 A, mutta toisaalta viereisessä ryhmäjohdossa näkyy vastakkaismerkkinen huippuarvoltaan noin -26 A kytkentävirtasysäys eli kytkettävä lamppuryhmä ottaa osan nopeasti tarvitsemastaan energiasta viereisten ryhmäjohtolähtöjen ja niihin kytkettyjen laitteiden kapasitansseista.



Kuva 3.26. Pubin mm. LED-valaistusta syöttävän valoryhmän kytkentävirtasysäys. CH1: Jännitteen aaltomuoto johdonsuojakytkinrivin syötössä, CH2: Virta johdonsuojakytkinrivin syötössä, CH3: Virta lamppuryhmän ryhmäjohdossa, CH4: Virta viereisessä ryhmäjohdossa (jossa valot päällä). Virtamittauksissa 1 V vastaa 1 A.

Sama ilmiö näkyy myös ravintolan valoryhmän kytkennässä, josta yksi esimerkki on esitetty kuvassa 3.27. Tässä tapauksessa kytkentävirtasysäys on huippuarvoltaan hieman pienempi, mutta kestoltaan pidempi. Kuten kuvasta nähdään, kytkentävirtasysäys on tässäkin tapauksessa suurin lamppuryhmän syötössä, jossa kytkentävirran huippuarvo on noin +106 A. Johdonsuojakytkinrivin syötössä kytkentävirran huippuarvo on vain hieman pienempi, noin +104 A, mikä saattaa selittyä osin sillä, että kytkentäilmiö on tässä tapauksessa hitaampi. Myös viereisten ryhmäjohtojen määrä ja kapasitanssit vaikuttavat virtojen jakautumiseen. Tässä tapauksessa viereisessä ryhmäjohdossa näkyy vastakkaismerkkinen huippuarvoltaan noin -19 A kytkentävirtasysäys, jossa on voimakas

noin 35...40 kHz taajuinen ja melko nopeasti vaimeneva resonanssivärähtely. Ravintolan valoryhmän valaisimet olivat erillisellä liitälaitteella varustettuja pienloistelamppuvalaisimia, joissa oli 2 lampua sarjaan kytkettynä (kuva 3.28). Ryhmäjohdon sarjainduktanssi ja lampun liitälaitteen kapasitanssit muodostavat sarjaresonanssipiirin, jonka resonanssitaajuus riippuu johdon ja laitteen ominaisuuksista. Sarjaresonanssissa esimerkiksi laitteen verkkoliitännässä tai laitteen sisäisten kapasitanssien yli saattaa esiintyä kytkentätransientin yhteydessä huomattavasti suurempia jännitteitä kuin esimerkiksi ryhmäkeskukselta pystytään mittaamaan, kuten jäljempänä luvussa 4.1 on todettu. Tämä saattaisi olla yksi mahdollinen selitys lamppujen ennenaikaisille vaurioitumisille, mutta hypoteesin osoittaminen oikeaksi tai vääräksi edellyttäisi lisätutkimuksia.



Kuva 3.27. Ravintolan valoryhmän (9 valaisinta, yhteensä 18 pienloistelamppua) kytkentävirtasysäys. CH1: Jännitteen aaltomuoto johdonsuojakytkinrivin syötössä, CH2: Virta lamppuryhmän ryhmäjohtossa, CH3: Virta viereisessä ryhmäjohtossa (jossa valot päällä), CH4: Virta johdonsuojakytkinrivin syötössä. Virtamittauksissa 1 V vastaa 1 A.



Kuva 3.28. Yksi ravintolan valoryhmän valaisimista ja valaisimen erillinen elektroninen liitäntälaitte. Valaisimessa on kaksi sarjaan kytkettyä pienloisteputkea.

4 PLC-signaalin vaimenemien ja siihen vaikuttavat tekijät

Sähköverkkotiedonsiirron häiriintyvyyteen vaikuttaa mm. PLC-signaalin vaimeneminen sähköverkossa. Suurilla taajuuksilla sähköverkko käyttäytyy eri tavalla kuin 50 Hz taajuudella. Sekä kuormien impedanssit että johtimien ominaisuudet ovat taajuusriippuvia. Em. tekijät vaikuttavat PLC-signaalin vaimenemiseen sähköverkossa lähettimen ja vastaanottimen välillä. Koska lähettimen verkkoon syöttämä signaalijännite on standardeissa rajoitettu, vaihtelee vastaanotettavan signaalin taso sähköverkon aiheuttaman vaimennuksen mukaan. Mitä pienempi vastaanotettavan signaalin taso on, sitä helpommin verkossa esiintyvät häiriöjännitteet voivat häiritä tiedonsiirtoa. Varsinkin uudemmissa PLC-järjestelmissä mittarit voivat toimia tarpeen mukaan myös toistimina, mikä osaltaan parantaa kuuluvuutta, mutta jos vaimennus on yhdessäkin yhteysketjun lenkissä liian suuri, estyy tiedonsiirto ko. yhteysvälillä.

Se aiheuttaako tietyn häiriöjännitteen verkkoon aiheuttava laite häiriöitä sähköverkkotiedonsiirtoon, riippuu myös siitä onko häiriölähde kytketty samaan vaiheeseen kuin PLC-signaali ja jos häiriölähde on eri vaiheella kuin signaali niin häiriövaikutus riippuu siitä kuinka voimakasta on vaiheiden välinen ylikuuluminen. Energiamittareiden sähköverkkotiedonsiirto mittarista keskittimelle päin tapahtuu yleensä yhdellä vaiheella. Keskitin lähettää kaikilla kolmella vaiheella, jotta myös eri vaiheille kytketyt 1-vaihemittarit pystyvät kommunikoimaan keskittimen kanssa. Pelkästään 3-vaiheisia liittymiä sisältävässä muuntopiirissä kommunikaatiota on siis vain yhdellä vaiheella, jos kaikissa liittymissä vaihejärjestys on sama (vaihejohtimet on samoin kytketty).

Kolmas häiriintyvyyteen vaikuttava tekijä on PLC-vastaanottimen selektiivisyys eli se kuinka herkästi vastaanotin häiriintyy signaalintaajuuksien ulkopuolisista häiriöistä. Tähän vaikuttavat monet tekijät kuten vastaanottimessa tehtävä signaalinkäsittely ja suodatus sekä tiedon koodaus ja virheenkorjaus. Myös modulointimenetelmällä on vaikutusta asiaan. PLC-vastaanottimen selektiivisyyttä on käsitelty tarkemmin luvussa 5. Tässä luvussa tarkastellaan signaalin vaimenemista ja vaiheiden välistä ylikuulumista teoreettisten tarkasteluiden ja mittausten valossa.

4.1 PLC-signaalin vaimenemiseen vaikuttavia tekijöitä

Suurilla taajuuksilla signaalin vaimenemista lisäävät mm. virranahdo, johtimien välisen eristeaineen häviöt ja aaltoimpedanssin muutoskohtien aiheuttamat heijastukset. Taajuudesta ja tarkasteltavien johtojen pituudesta riippuen sähköverkko voidaan mallintaa joko keskitetyillä tai jakautuneilla vakioilla. Jos johdon pituus on suurempi kuin aallonpituuden λ neljäsosa on yleensä syytä käyttää jakautuneita vakioita. Aallonpituus saadaan yhtälöstä:

$$\lambda = \frac{v_0}{f}$$

, missä v_0 on aallon etenemisnopeus ja f on taajuus.

Standardissa EN 50065-1 sähköyhtiöiden käyttöön on varattu taajuuskaista 3...95 kHz. Jos oletetaan aallon etenemisnopeudeksi PVC-eristeisessä kaapelissa $v_0=134$ m/ μ s, saadaan taajuudella 3 kHz aallonpituuden neljännekseksi $\lambda/4 \approx 11\ 180$ m ja taajuudella 95 kHz vastaavasti $\lambda/4 \approx 353$ m. PE(X)-eristeisissä kaapeleissa ja avojohdoilla etenemisnopeudet ja aallonpituuden neljännekset ovat vastaavasti suuruusluokaltaan noin 1,5- ja 2-kertaisia. Näin ollen pj-verkkoja voidaan PLC-taajuuksilla useimmiten mallintaa keskitetyillä vakioilla. Koska vaimennus on PLC-taajuuksilla kuitenkin pieni, ei aallon kulkuaaltoluonnetta ja heijastusten vaikutusta voi jättää täysin huomiotta. Sen sijaan eristeaineen aiheuttamat häviöt ovat esimerkiksi virranahdon aiheuttamiin häviöihin verrattuna taajuuskaistalla 3...95 kHz niin pienet, että niillä ei ole käytännön merkitystä.

Virranahdo pienentää johtimen tehollista poikkipintaa ja suurentaa resistanssia suurilla taajuuksilla. Virran tunkeutumissyvyys δ metreinä saadaan kaavasta [Ott88a, Mar88a]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4-1)$$

missä

σ on johtimen johtavuus (mho/m)

μ on johtimen permeabiliteetti (H/m)

f on taajuus hertseinä (Hz).

Pyöreän johtimen vaihtovirtaresistanssille voidaan kirjoittaa kaava

$$R_{ac} = \frac{\pi r^2}{\left(\pi r^2 - \pi(r - \delta)^2\right)} \cdot R_{dc} \quad (4-2)$$

missä r on johtimen halkaisija ja δ on tunkeutumissyvyys.

Johtimen DC-resistanssi saadaan kaavasta

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \quad (4-3)$$

missä ρ on johdinmateriaalin ominaisresistanssi (sähkönjohtavuuden käänteisluku), l on johtimen pituus ja A on johtimen poikkipinta-ala.

Taulukkoon 4-1 on laskettu esimerkiksi muutamien tyypillisten pj-verkon kaapeleiden johtimien teoreettisia vaihtovirtaresistansseja muutamilla eri taajuuksilla taajuusalueella 3...150 kHz. Esimerkkikaapelit ovat 1,5 mm² pyöreällä kuparijohtimella varustettu MMJ-asennuskaapeli (tai vastaava asennusjohdin), jota käytetään yleisesti talojen sisäasennuksissa ja kaksi alumiinikaapelia poikkipinnoiltaan 25 mm² (vastaa pientalon ja jakokaapin välistä liittymisjohtoa) ja 185 mm² (esimerkki jakokaapin ja muuntamon välisestä johdosta). Taulukossa myös 185 mm² alumiinikaapelin johdin on laskennan yksinkertaistamiseksi oletettu pyöreäksi, kun se tyypillisessä maakaapelissa on sektorimuotoinen. Alumiinijohtimien kerrattujen johtimien säikeitä ei myöskään ole laskennassa huomioitu, vaan johtimet on oletettu sileiksi. Säikeisyys jonkin verran kasvattaa suurilla taajuuksilla käytettävissä olevaa poikkipintaa ja pienentää näin ollen resistanssia. Tasavirtaresistansseina laskennassa on käytetty MMJ 3 x 1,5-, AXMK 4 x 25S- ja AMCMK 4 x 185/57AN-kaapeleiden datalehdissä ilmoitettuja tasavirtaresistansseja [Ano09c].

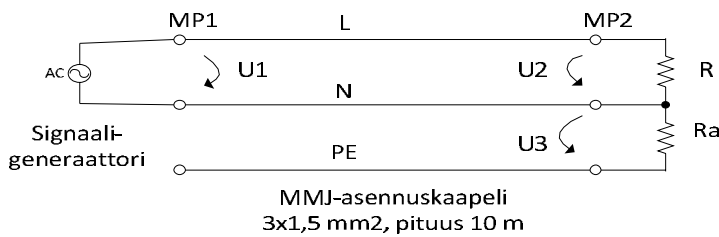
Kuten taulukosta nähdään ovat eri kaapelityyppien väliset resistanssierot suurilla taajuuksilla virranahdosta johtuen pienempiä kuin tasavirralla, mutta erot ovat kuitenkin PLC-taajuuksillakin huomattavia. Muuntamon ja jakokaapin välisen kaapelin laskennallinen vaihtovirtaresistanssi 80 kHz taajuudella on noin 2 mΩ/m, kun tyypillisellä talokaapelilla se on noin 6 mΩ/m ja vastaavasti 1,5 mm² MMJ:llä noin 21 mΩ/m. 10 m MMJ:n vaihtovirtaresistanssi 80 kHz taajuudella olisi siis noin 0,2 ohmia. Vaihtovirtaresistanssin lisäksi johtimilla on sarjainduktanssia ja rinnakkaiskapasitanssia, jotka yhdessä kuorman kapasitanssien ja induktanssien kanssa voivat aiheuttaa erilaisia resonanssi-ilmiöitä. Pienjännitejohtojen sarjainduktanssi vaihetta kohden on johdon rakenteesta ja poikkipinnasta riippuen tyypillisesti suuruusluokkaa 0,23...0,34 mH/km (0,23...0,34 μH/m) vaihetta kohden [Ano09c], mikä 80 kHz taajuudella vastaa 116...171 mΩ/m reaktanssia/vaihe. Esimerkiksi MCMK 4 x 1,5/1,5 RE-johdon reaktanssi vaihetta kohden on 80 kHz taajuudella 171 mΩ/m eli 10 m johdolla noin 1,7 ohmia. PLC-taajuuksilla johtimen sarjainduktanssin merkitys on siis jännitehäviön kannalta melko hallitseva.

Taulukko 4-1. Muutamien yleisten pj-verkon kaapeleiden johdinresistansseja eri taajuuksilla.

					MMJ 1.5	AL 25	AL 185	
Johtimen johtavuus					5.82E+07	3.55E+07	3.55E+07	mho/m
Johtimen permeabiliteetti					1.26E-06	1.26E-06	1.26E-06	H/m
Johtimen tasavirtaresistanssi					1.21E-02	1.20E-03	1.64E-04	ohm/m
Johtimen poikkipinta					1.50	25	185	mm ²
Johtimen säde					0.69	2.82	7.68	mm

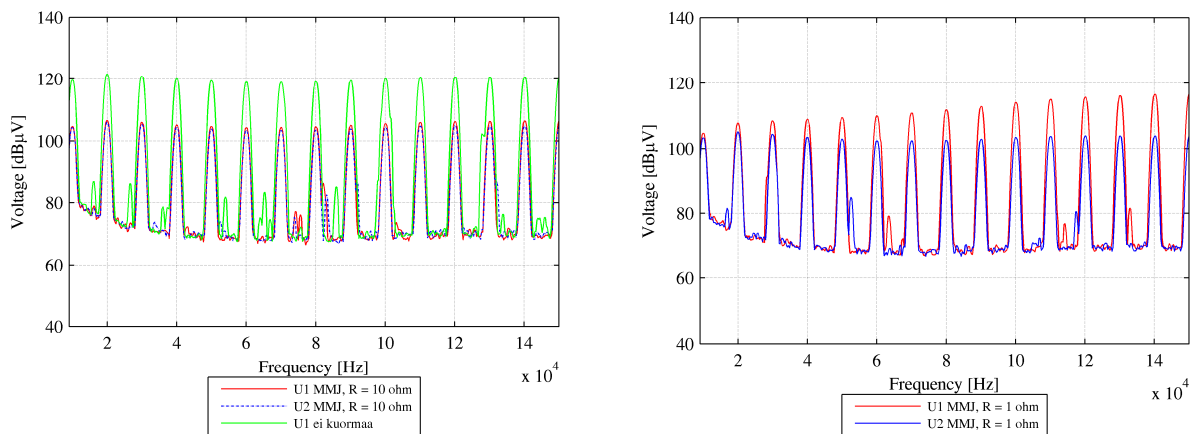
	Cu	MMJ 3 x 1.5		Al	Al 25 mm ²		Al 185 mm ²	
Taajuus [kHz]	Tunkeutumis- syvyys [mm]	AC-resistanssi [ohm/m]	AC-resistanssi/ DC-resistanssi	Tunkeutumis- syvyys [mm]	AC-resistanssi [ohm/m]	AC-resistanssi/ DC-resistanssi	AC-resistanssi [ohm/m]	AC-resistanssi/ DC-resistanssi
3	1.204			1.542	0.00151	1.259	0.000453	2.764
10	0.660	0.0121	1.00	0.845	0.00236	1.963	0.000787	4.799
30	0.381	0.0152	1.25	0.488	0.00380	3.163	0.001328	8.099
50	0.295	0.0180	1.49	0.378	0.00480	3.997	0.001700	10.367
64	0.261	0.0198	1.63	0.334	0.00538	4.483	0.001917	11.686
70	0.249	0.0205	1.69	0.319	0.00561	4.675	0.002002	12.207
75	0.241	0.0210	1.74	0.308	0.00580	4.829	0.002070	12.623
80	0.233	0.0216	1.78	0.299	0.00597	4.978	0.002136	13.026
83	0.229	0.0219	1.81	0.293	0.00608	5.065	0.002175	13.262
86	0.225	0.0222	1.83	0.288	0.00618	5.151	0.002213	13.493
90	0.220	0.0226	1.87	0.282	0.00631	5.262	0.002262	13.795
94	0.215	0.0230	1.90	0.276	0.00645	5.372	0.002311	14.091
100	0.209	0.0236	1.95	0.267	0.00664	5.531	0.002382	14.522
120	0.190	0.0255	2.10	0.244	0.00724	6.032	0.002603	15.873
150	0.170	0.0280	2.31	0.218	0.00805	6.709	0.002903	17.700

Johtimien ja kuorman käyttäytymistä suurilla taajuuksilla tutkittiin myös kokeellisesti kuvan 4.1 mukaisella yksinkertaisella koejärjestelyllä. Mittauspisteiden MP1 ja MP2 välissä on 10 m MMJ-asennusjohtoa (3 x 1,5 mm²) johon syötetään signaaligeneraattorilla (LeCroy LW120) eritaajuisia sinimuotoisia jännitteitä MMJ:n L- ja N-johtimien välille ja MMJ:n toisessa päässä L-N-väli on vaihtoehtoisesti joko avoin tai päätetty R=1 ohm tai R=10 ohm metallikalvovastuksilla tai myöhemmin kuvassa 6.6 esitetyllä kentällä ja laboratoriossa mitatulla Mascot 9419 hakkuriteholähteellä. N-PE-väli oli näissä mittauksissa molemmista päistä avoin. Lisäksi tehtiin yksikertainen ylikuulumismittaus syöttämällä signaaligeneraattorilla sinimuotoinen jännite L-N-välille ja tekemällä mittaus johdon toisesta päästä N-PE-väliltä, kun MMJ:n päät olivat avoinna (resistanssit R, R_a = inf).



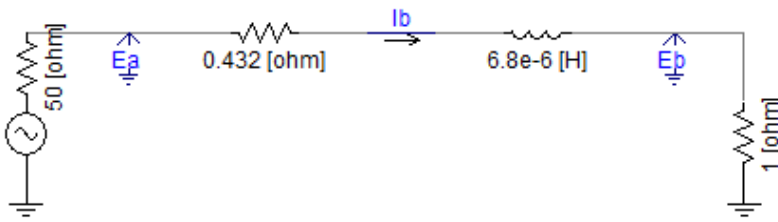
Kuva 4.1. Mittauskytkentä MMJ-asennuskaapelin mittaauksissa.

Kuten kuvasta 4.2 nähdään 10 ohmin kuormalla jännitteet johdon alku- ja loppupäässä ovat lähes samat (140 kHz taajuudellakin ero on vain noin 1,6 dB), eli johdon sarjaresistanssin ja –induktanssin muodostama impedanssi on merkityksettömän pieni suhteessa 10 ohmin vastuksen impedanssiin. 1 ohmin kuormalla jännite johdon loppupäässä on sen sijaan esimerkiksi 80 kHz taajuudella jo selvästi (9,3 dB eli 0,34-kertainen) pienempi kuin johdon alkupäässä ja vaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa. Taajuudella 20 kHz ero on vain vajaa 3 dB ja 140 kHz taajuudella 12,7 dB.



Kuva 4.2. Signaalijännitteet MMJ:n alku- ja loppupäässä, kun kuormana on a) R = 10 ohm vastus b) R = 1 ohm vastus.

Mittauskytkennässä käytetyn johdon ja kuorman käyttäytymistä simuloitiin myös PSCAD-simulointiohjelmistossa kuvan 4.3 mukaisella sijaiskytkennällä. Virranahdosta johtuen johtimien resistanssi riippuu taajuudesta, ja simulointimallissa resistanssin arvo valittiin simuloitavan taajuuden (30, 50, 80 ja 120 kHz) mukaan taulukon 4-1 mukaiseksi. Resistanssi- ja induktanssiarvot sisältävät sekä vaihejohtimen että nollajohtimen resistanssin ja induktanssin (yhteensä 20 m johdinta). Kuten taulukosta 4-2 nähdään mittaus- ja simulointitulokset vastaavat kohtuullisen hyvin toisiaan, mitattu vaimennus on noin 20 % pienempi kuin simuloitu vaimennus. Tämä selittyy osittain mittalaitteen, mittapään ja kuormaresistanssin epätarkkuuksilla ja sillä, että nollajohtimen reaktanssia saattaa hieman pienentää sen rinnalle kapasitiivisesti kytkeytyvä mittalaitteen sähkönsyöttö (spektrianalysaattorin sähkönsyöttö tapahtui erotusmuuntajan kautta eri pistorasiasta kuin signaaligeneraattorin syöttö, mutta kuitenkin samasta sähköverkosta).

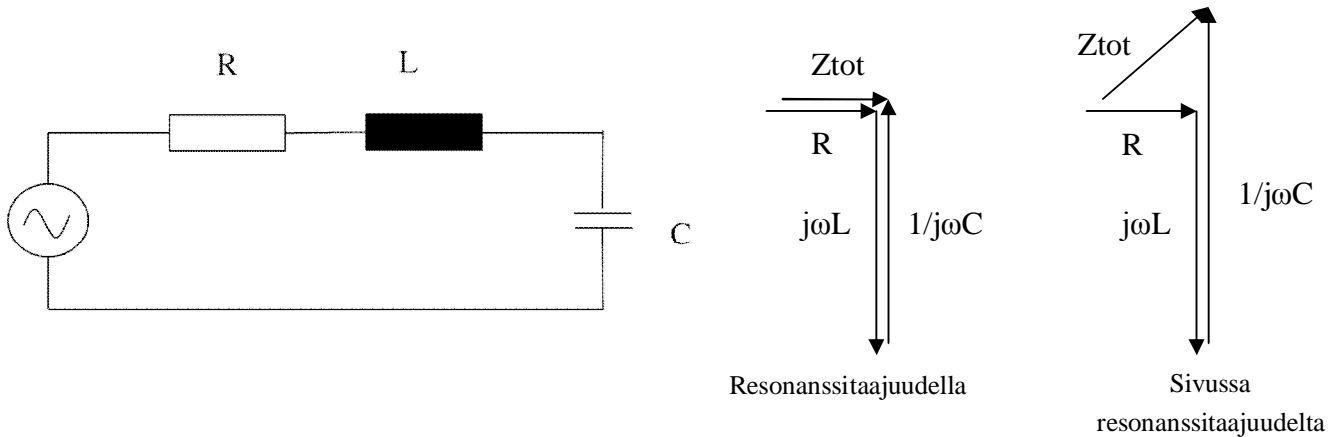


Kuva 4.3. PSCAD simuloinnissa käytetty malli. Virranahdosta johtuen johtimien resistanssi riippuu taajuudesta, kuvassa taajuudella 80 kHz käytetty resistanssi.

Taulukko 4-2. PSCAD mallilla lasketut jännitteet johdon alku- ja loppupäässä sekä niistä laskettu (simuloitu) vaimennus ja spektrianalysaattorimittauksista laskettu (mitattu) vaimennus.

	Jännitteet		Vaimennus		
			Simuloitu	Mitattu	
Taajuus [kHz]	Ea [V]	Eb [V]	As [dB]	Am [dB]	Ero [%]
30	0.5039	0.2756	-5.2	-4.1	-21.8
50	0.6965	0.2751	-8.1	-6.6	-18.2
80	1.0155	0.2738	-11.4	-9.3	-18.3
120	1.4599	0.2726	-14.6	-11.9	-18.4

Kuvassa 4.5 a) on esitetty jännitteet johdon alku- ja loppupäässä, kun kuormana on Mascot 9419 hakkuriteholähde, joka on kuormana melko kompleksinen. Kuten kuvasta ilmenee, jännite johdon loppupäässä on joillakin taajuuksilla selvästi suurempi kuin johdon alkupäässä. Näyttäisi siltä, että johdon induktanssi ja kuorman kapasitanssi muodostavat sarjaresonanssipiirin, jossa jännite kuorman yli muodostuu suuremmaksi kuin jännite johdon alkupäässä. Samanlainen ilmiö havaittiin myös käytännön sähköverkkomittauksissa luvussa 4.5 kuvatussa omakotitalokohteen tapauksessa. Ensimmäinen resonanssitaajuus näyttäisi olevan välillä 40...60 kHz, koska jännite syöttöpäässä on 50 kHz taajuudella selvästi pienempi kuin 40 kHz ja 60 kHz taajuuksilla. Sarjaresonanssipiirin impedanssi on pienimmillään resonanssitaajuudella, jossa se muodostuu ainoastaan piirin resistanssista kuvan 4.4 mukaisesti (jännitteet eri komponenttien yli käyttäytyvät samalla tavoin). Johdon reaktanssin ja EMC-suotimen 100 nF kapasitanssin muodostaman sarjaresonanssipiirin teoreettinen resonanssitaajuus on noin 270 kHz (kaava 4-4). Käytännössä piirin käyttäytymistä monimutkaistaa teholähteen EMC-suotimen 2 x 18 mH common mode-kuristin ja sen jälkeiset komponentit, jotka kytkeytyvät EMC-suotimen ensimmäisen 100 nF kapasitanssin rinnalle. Kuvassa 4.5 a) näkyvä 40...60 kHz taajuuksille osuva resonanssi muodostuu ilmeisesti näiden vaikutuksesta.

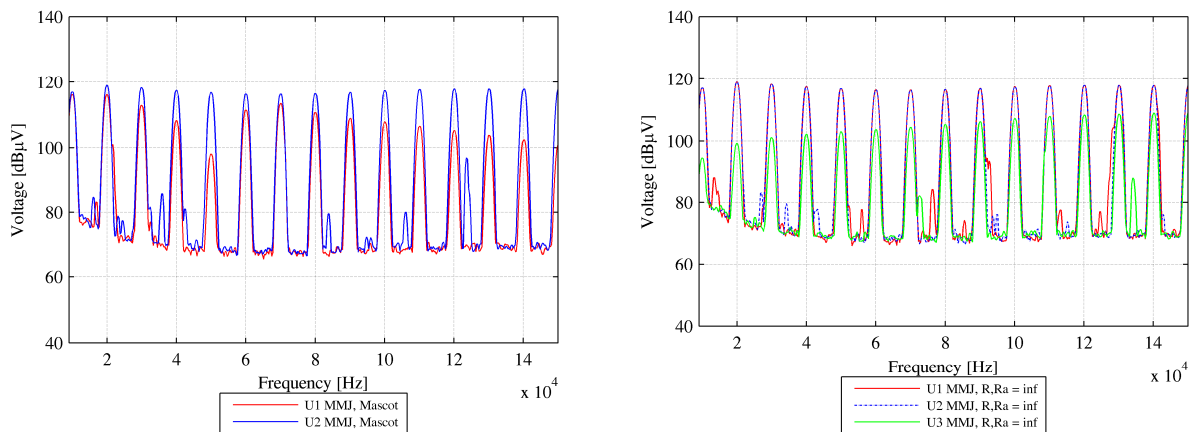


Kuva 4.4. Sarjaresonanssiin impedanssit.

Sarjaresonanssiin resonanssitaajuus f_0 saadaan kaavasta

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (4-4)$$

Kuvassa 4.5 b) on lisäksi esitetty yksinkertainen ylikuulumismittaus, jossa signaali syötetään L-N-välille ja mitataan johdon toisesta päästä PE-N-väliltä niin, että johdolla ei ole kuormia. Esimerkiksi 80 kHz taajuudella ylikuulumisvaimennus on vain hieman yli 10 dB eli signaali kytkeytyy melko hyvin johtimesta toiseen. Sähköverkoissa tehdyissä mittauksissa ylikuulumisvaimennus oli käytännössä vielä pienempi, noin 5...10 dB kuten luvusta 4.6 ilmenee.

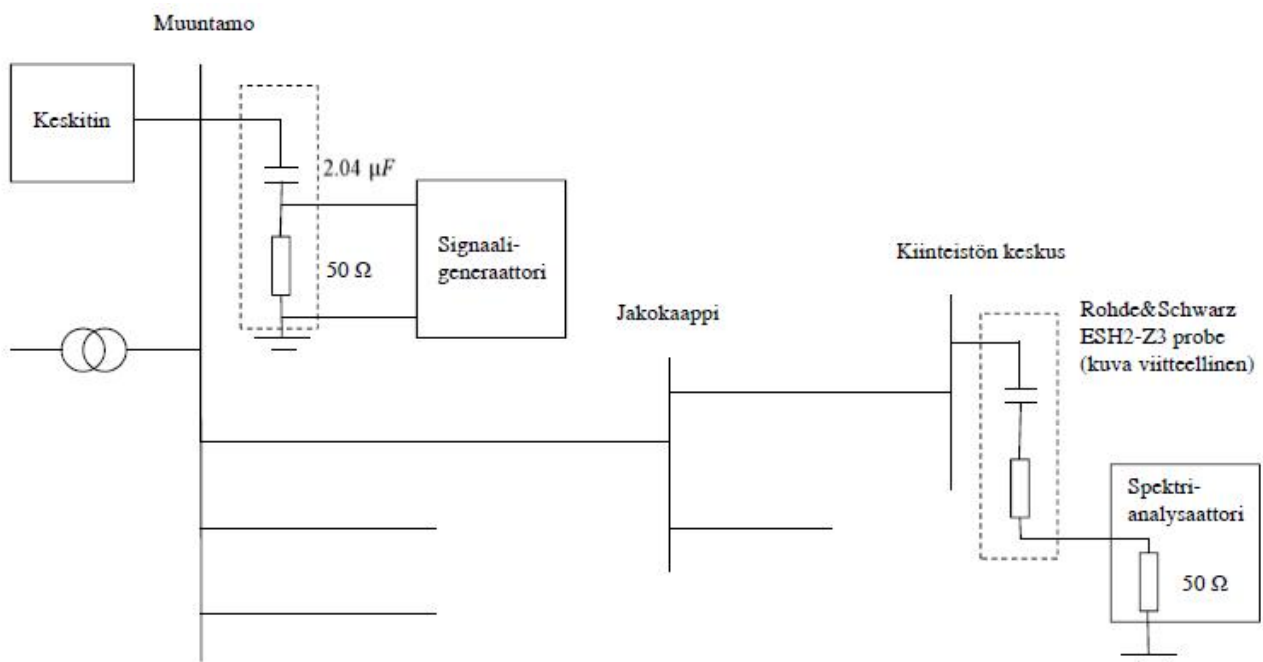


Kuva 4.5. A) signaalijännitteet MMJ:n alku- ja loppupäässä, kun kuormana on Mascot 9419 teholaähde b) L-N välille syötetyn signaalin ylikuuluminen PE-N-välille.

4.2 Mittausjärjestelyt vaimennusmittauksissa

Muutamissa sähköverkkoyhtiöiden mittauskohteissa tehdyissä vaimennusmittauksissa käytettiin signaalilähteenä LeCroy LW120 ohjelmoitavaa signaaligeneraattoria (100 MS/s Arbitrary

Waveform Generator) ja kuvan 4.6 mukaista itse tehtyä kapasitiivista kytkentäelintä, joka koostui yhteensä $2,04 \mu\text{F}$:n kytkentäkondensaattorista ja 50Ω ohmin päätevastuksesta. Aaltomuotona käytettiin siniaaltoa. Signaaligeneraattorin suurin mahdollinen ulostulojännitteen huippuarvo 50Ω ohmin kuormaan on 10 V . Koska kytkentäelimessä ei ole varsinaista impedanssisovitusta, sähköverkkoon kytkeytyvä jännite riippuu syöttöpisteen impedanssista ja jäi mitatuissa kohteissa noin $0,1 \dots 0,3 \text{ V}$:iin. Tämä oli tutkituissa kohteissa kuitenkin riittävä jännitetaso. Mittavastaanottimena käytettiin Rohde&Schwarz ESPI-3 spektrianalysattoria ja passiivista jännitemittapäätä ESH2-Z3, joilla mitattiin signaalitaso PLC-yhteysvälin molemmissa päissä (signaaligeneraattorin syöttöpisteessä keskittimellä ja vastaanottopisteessä mittarilla). Mittausjärjestely soveltuu myös PLC-luentaongelmien selvittelyyn tapauksissa, joissa luentaongelmien syyksi epäillään verkon liian suurta vaimennusta. Signaalilähteeksi käytettiin periaatteessa mikä tahansa muukin siniaaltogeneraattori, jolla päästään halutuille PLC-signalointitaajuuksille (tai lähelle niitä) ja jonka ulostulojännite on riittävä. Kytkentäelin ja jännitemittapää ovat mittauksissa välttämättömät, jotta mittaus voidaan tehdä jännitteisessä verkossa.



Kuva 4.6. Mittausjärjestelyt signaalin etenemisvaimennusmittauksissa.

4.3 Vaimennusmittausten tuloksia

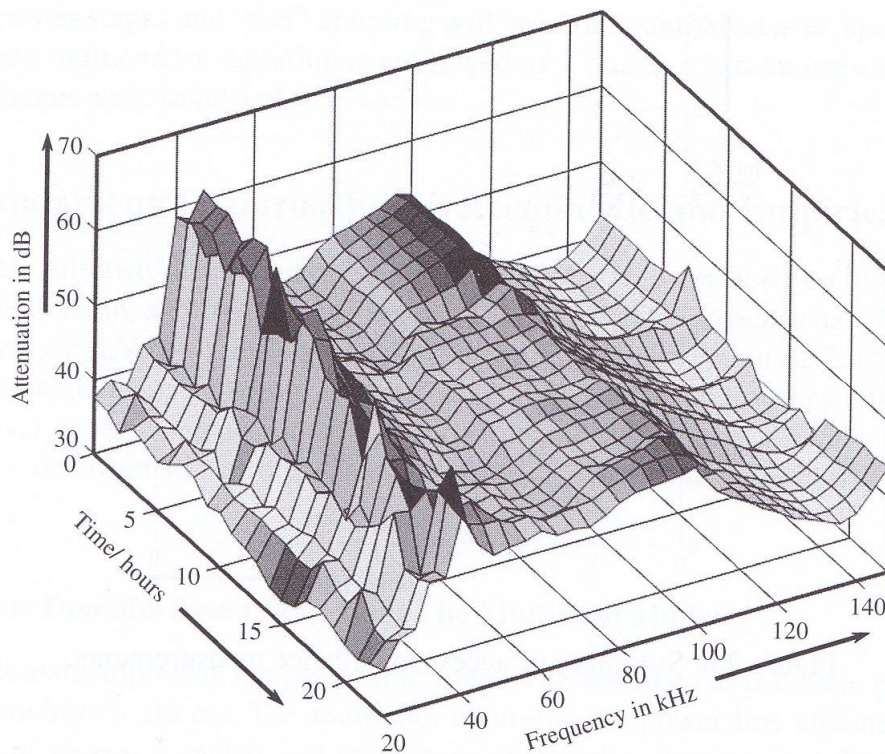
Etenemisvaimennuksia tutkittiin kahdessa kohteessa, joista molemmissa asiakaslaitteen aiheuttamat häiriöt estivät PLC-luennan. Kohteessa 1 häiriölähteeksi osoittautui ikääntynyt hakkuriteholähde, joka on raportoitu tarkemmin luvussa 6.2.1 ja kohteessa 2 ilmanvaihdon taajuusmuuttajat, jotka on raportoitu luvussa 6.3. Molemmissa kohteissa PLC-yhteysvälin vaimennus oli mittausajankohtana noin 30 dB (taulukko 4-3), mitä voidaan pitää kohtuullisen pienenä vaimennuksena. Vaimennus on

kuitenkin taajuuden lisäksi myös aikariippuva, koska verkkoon kytkettyjen kuormien impedanssit vaikuttavat osaltaan vaimennukseen.

Kuvassa 4.7 on esitetty kirjallisuudesta poimittu kolmiulotteinen kuva pienjänniteverkon vaimennuksesta ajan ja taajuuden funktiona vajaan vuorokauden aikana taajuusalueella 20...150 kHz. Suurimmat vaimennukset ovat noin 60 dB. Vaimennus vaihtelee taajuuden funktiona noin 30 dB ja ajan funktiona noin 10 dB. Taajuuksilla 50...60 kHz on havaittavissa selvä vaimennuspiikki, joka aallonpituus huomioiden tuskin johtuu heijastuksista vaan on todennäköisimmin verkkoon kytketyn tai kytkettyjen laitteiden ja verkon muodostaman resonanssin aiheuttama.

Taulukko 4-3. Vaimennusmittausten tuloksia häiriömittausten yhteydessä tutkituista kohteista.

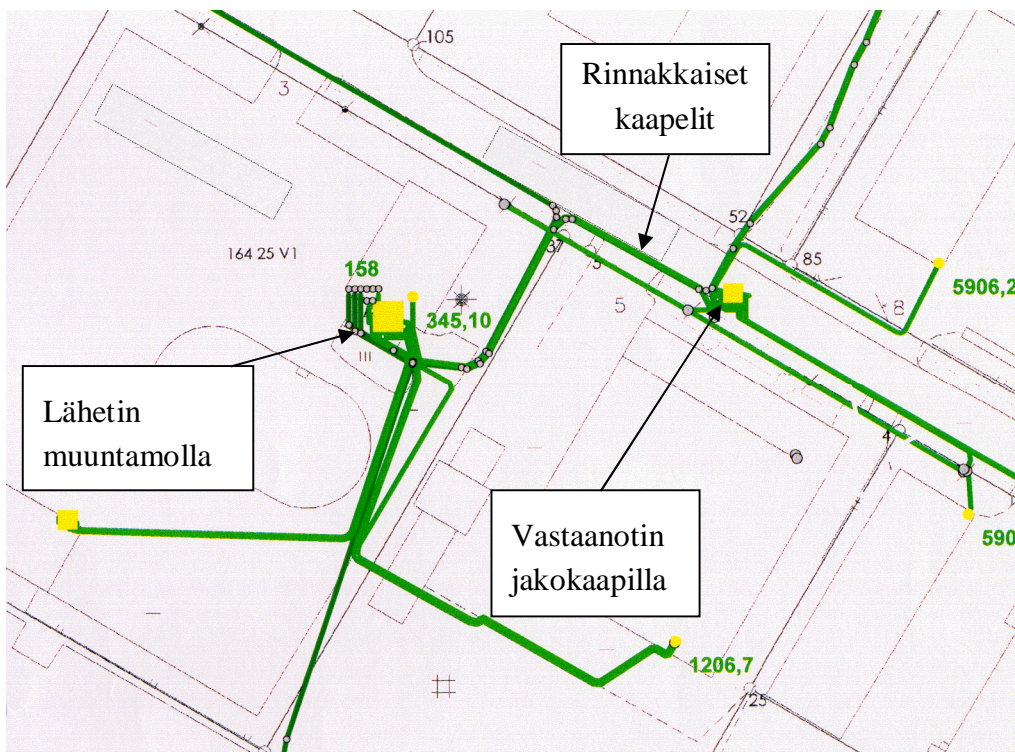
	Kohde 1	Kohde 2
Signaalin syöttöpiste	Keskittimen riviliittimen vaihe L1 syöttävällä kiinteistömuuntamolla	Kiinteistön keskuksen vaiheen L1 sulake
Signalin vastaanottopiste	Kiinteistön energiamittarin vaiheen L1 liitin	Keskittimen riviliittimen vaihe L1 syöttävällä puistomuuntamolla
Kaapelointi	87 m AMC 185 x 2 30 m AX 185	87 m AMC 185 x 2 30 m AX 185
Haarautuvia kaapeleita yhteysväliillä	1	3
Yhteysvälivaimennus taajuudella 70 kHz	31 dB	28 dB
Yhteysvälivaimennus taajuudella 80 kHz	31 dB	32 dB
Yhteysvälivaimennus taajuudella 90 kHz	36 dB	30 dB



Kuva 4.7. PLC-yhteyden vaimennus ajan ja taajuuden funktiona [Fer10a].

4.4 Rinnakkaisten kaapeleiden vaikutus vaimennukseen

Rinnakkaisten kaapeleiden vaikutusta vaimennukseen tutkittiin Kuvan 4.8 mukaisessa kohteessa muuntamon ja jakokaapin välisellä osuudella (kaapelin pituus noin 80 m). Mittaukset tehtiin ensin molemmat kaapelit rinnankytkettynä ja sen jälkeen toinen kaapeli kytkettiin irti molemmista päistään ja mittaukset toistettiin. Mittauksia tehtiin 10 kHz välein taajuusalueella 80...140 kHz. Kuten taulukossa 4-4 esitetyistä tuloksista ilmenee vaimennus oli mittauksissa kahdella rinnankytketyllä kaapelilla taajuudesta riippuen 1...3 dB pienempi kuin yhdellä kaapelilla eli kaapeleiden rinnankytkentä näyttäisi hieman pienentävän PLC-signaalin vaimenemista.



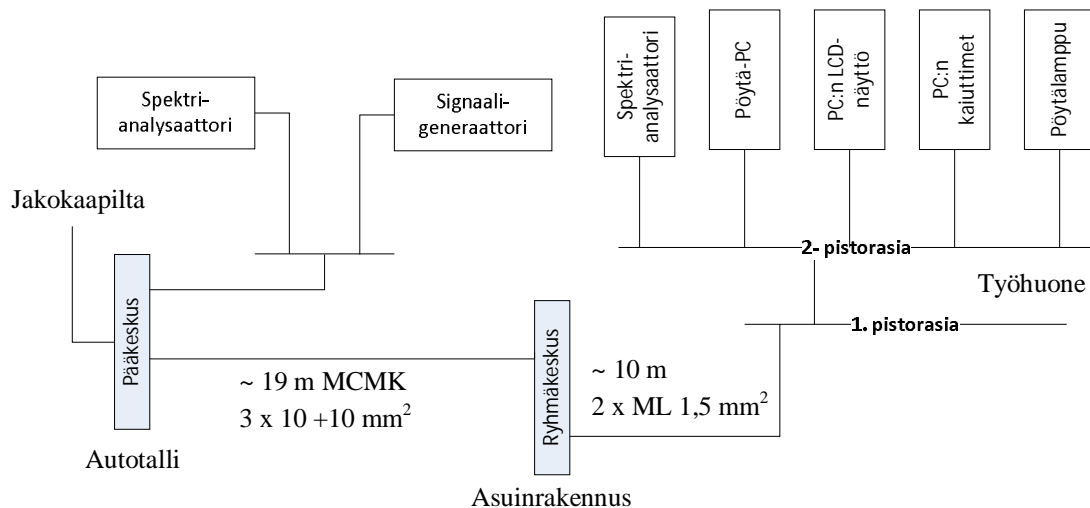
Kuva 4.8. Mittauskohde, jossa tutkittiin yksittäisen ja kahden rinnankytketyn kaapelin vaimennusta.

Taulukko 4-4. Yksittäisen kaapelin ja kahden rinnankytketyn kaapelin vaimennus.

Taajuus [kHz]	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

4.5 Asiakslaitteiden vaikutus vaimennukseen

Asiakslaitteiden vaikutusta vaimennukseen tutkittiin kaapeloidussa kaupunkiverkossa sijaitsevassa omakotitalossa kuvan 4.9 mukaisella mittausjärjestelyllä. Signaaligeneraattorilla syötettiin verkkoon suuritajuista sinimuotoista jännitettä taajuuksilla 30, 60, 90 ja 120 kHz autotallirakennuksessa sijaitsevaan pääkeskukseen vaiheelle L2 kytkettyyn ryhmäjohtoon ja tutkittiin miten ryhmäkeskuksen ja sen mukana talon kuormien irtikytkeminen pääkeskuksesta ryhmäkeskukselle menevästä johdosta vaikuttaa signaaligeneraattorin verkkoon syöttämään jännitteeseen. Jännite riippuu kokonaisimpedanssista pisteessä, johon signaali syötetään. Kokonaisimpedanssiin syöttöpisteessä puolestaan vaikuttavat jossain määrin kaikki syöttöpisteen lähistöllä verkkoon kytketyt laitteet. Toisessa kokeessa mitattiin jännitettä omakotitalon työhuoneen pistorasiassa samalla kun pistorasiaan kytkettyjen laitteiden määrää vaihdeltiin. Ryhmäkeskukselle oli mittausten aikana kytkettynä talon normaalit muutkin kuormat.

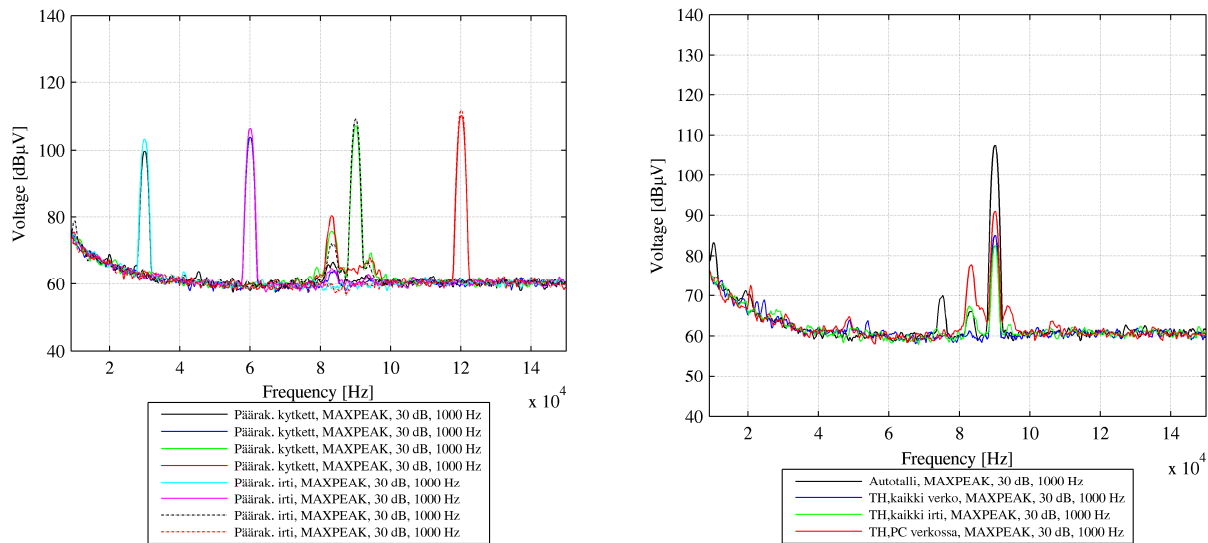


Kuva 4.9. Mittausjärjestely tutkittaessa asiakslaitteiden vaikutusta vaimennukseen.

Kuvassa 4.10 a) on esitetty signaalivoimakkuudet eri taajuuksilla, kun omakotitalon ryhmäkeskus ja sen kuormat olivat kytkettyinä pääkeskuksesta tulevaan johtoon ja kun ne olivat irtikytkettyinä johdosta. Kuten kuvasta nähdään kuormien kytkentä pienentää signaalijännitteitä syöttöpisteessä taajuudesta riippuen vain noin 2...4 dB. Tästä voidaan päätellä, että syöttöpisteen impedanssi on verkon muista kuormista (autotalli ja samalle jakokaapille kytketyt naapuritalot) ja kapasitansseista johtuen jo muutenkin niin pieni, että tarkastellun omakotitalon kuormien vaikutus syöttöpisteimpedanssiin jää melko pieneksi.

Kuvassa 4.9 b) on tarkasteltu signaalin vaimenemista autotallissa sijaitsevan syöttöpisteen ja työhuoneen pistorasian välillä ja pistorasiaan kytkettyjen laitteiden vaikutusta signaalijännitteeseen pistorasiassa. Kuten kuvasta nähdään, signaali vaimenee autotallin syöttöpisteen ja työhuoneen pistorasian välillä noin 22 dB, kun kaikki laitteet ovat kytkettynä pistorasiaan. Kaikkien laitteiden

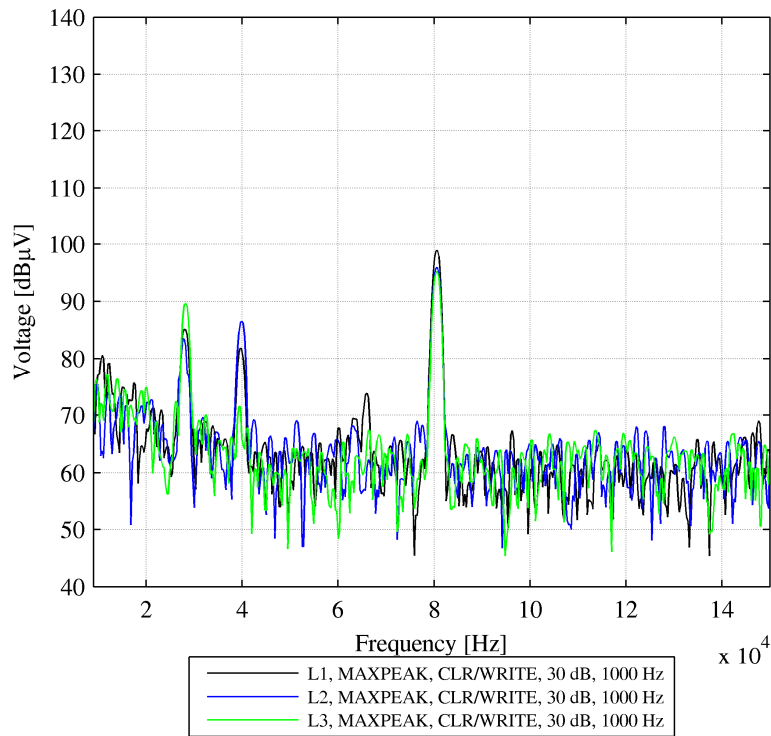
irtikytkeminen pienentää signaalijännitettä pistorasialla noin 2-3 dB ja kaikkien muiden laitteiden paitsi PC:n irtikytkeminen toisaalta nostaa signaalijännitettä noin 6 dB (kaksinkertaiseksi).



Kuva 4.10. a) Signaalijännitteet autotalissa sijaitsevassa syöttöpisteessä mitattuna eri taajuuksilla, kun omakotitalon ryhmäkeskus ja sen kuormat olivat kytkettyinä pääkeskukselta lähtevään johtoon ja kun ne olivat irtikytkettyinä johdosta, b) signaalijännitteet autotalissa sijaitsevassa syöttöpisteessä ja työhuoneen pistorasialla, kun rasiaan on kytkettyinä eri määrä laitteita.

4.6 Vaiheiden välinen ylikuuluminen

Suuritaajuiset signaalit kytkeytyvät 3-vaihejärjestelmässä vaiheesta toiseen johtimien välisen kapasitiivisen ja induktiivisen kytkennän vuoksi ja lisäksi esimerkiksi kolmivaiheisesti verkkoon kytketyissä laitteissa saattaa olla melko pieniäkin impedansseja (suuria kapasitansseja tai pieniä resistansseja/induktansseja) vaiheiden välillä. Kuvassa 4.11 on esitetty esimerkki vaiheiden välisestä ylikuulumisesta. Kuvassa on syötetty signaaligeneraattorilla taajuudeltaan 80 kHz siniaaltoja muuntamalla sijaitsevan PLC-keskittimen liitäntäterminaaliin L1 ja mitattu signaalin taajuusspektrit noin 100 m päässä olevan kerrostalon keskukselta vaiheista L1, L2 ja L3 (kerrostalon huoneistoissa oli 1-vaihemittarit). Kuten kuvasta nähdään signaalitaso naapurivaiheissa on alle 5 dB pienempi kuin vaiheessa L1, johon signaali keskittimellä syötettiin. Muissa tutkituissa tapauksissa esimerkiksi yksivaiheisen asiakaslaitteen aiheuttamat häiriöt olivat tyypillisesti noin 5...10 dB pienempiä naapurivaiheissa kuin vaiheessa johon laite oli kytketty, joten vaiheiden välinen ylikuuluminen on melko voimakasta. Tästä on etua, jos esimerkiksi PLC-tiedonsiirtoon käytettävä vaihejohdin on poikki tai sulake palanut, jolloin tiedonsiirto saattaa vielä toimia ylikuulumisen ansiosta toisella vaiheella pienestä lisävaimennuksesta huolimatta. Toisaalta häiriötapauksissa ylikuulumisesta voi olla haittaa, kun PLC-tiedonsiirron tai häiritsevän/häiriintyvän asiakaslaitteen kytkeminen toiselle vaiheelle ei poista häiriöongelmaa.



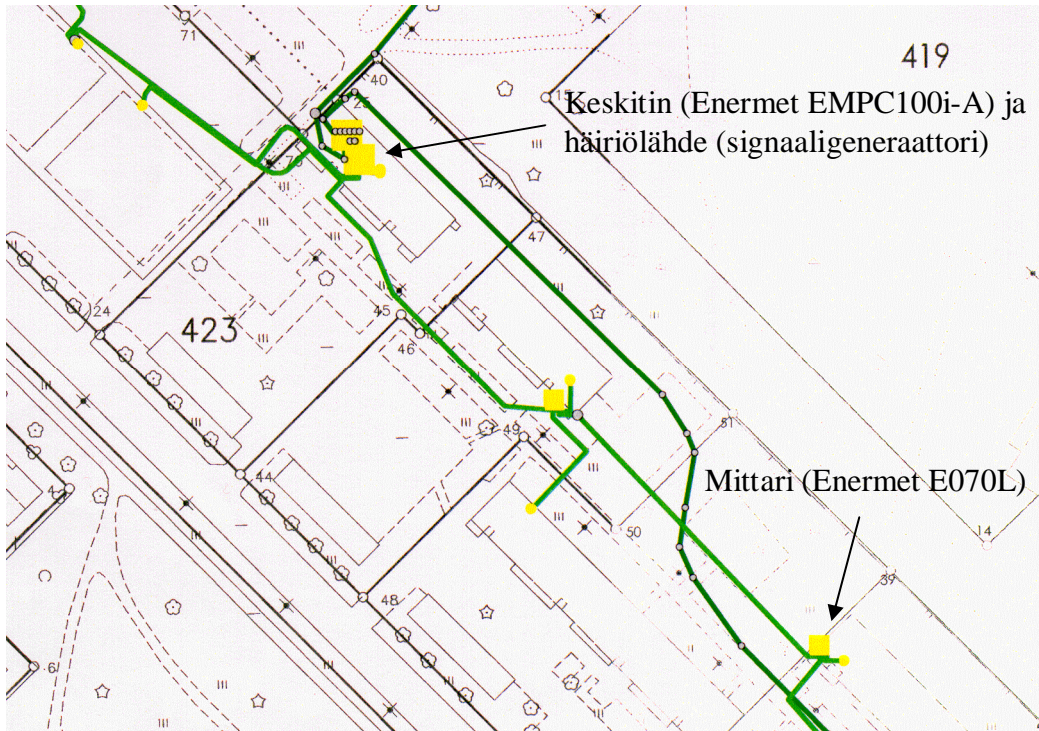
Kuva 4.11. Signaalijännitteet kerrostalon keskuksen eri vaiheissa, kun signaaligeneraattorilla on syötetty 80 kHz sinisignaali noin 100 m päässä olevan keskittimen vaiheen L1 liitäntäterminaaliin.

5 Sähköverkkotiedonsiirtolaitteiden selektiivisyys

Sähköverkkotiedonsiirtolaitteiden selektiivisyydestä on vaikea löytää julkaistua tutkimustietoa ja tämän vuoksi projektissa päätettiin tutkia asiaa yksinkertaisella käytännön kokeella. Kokeiden toteutuspaikaksi valittiin Forssan Verkkopalvelut Oy, jossa verkkoyhtiö hoitaa mittareiden luentajärjestelmää itse ja näin ollen selektiivisyydestä tarvittava mittarin manuaalinen luenta ja sen tulosten tarkastelu oli joustavasti toteutettavissa.

5.1 *Mittausjärjestely*

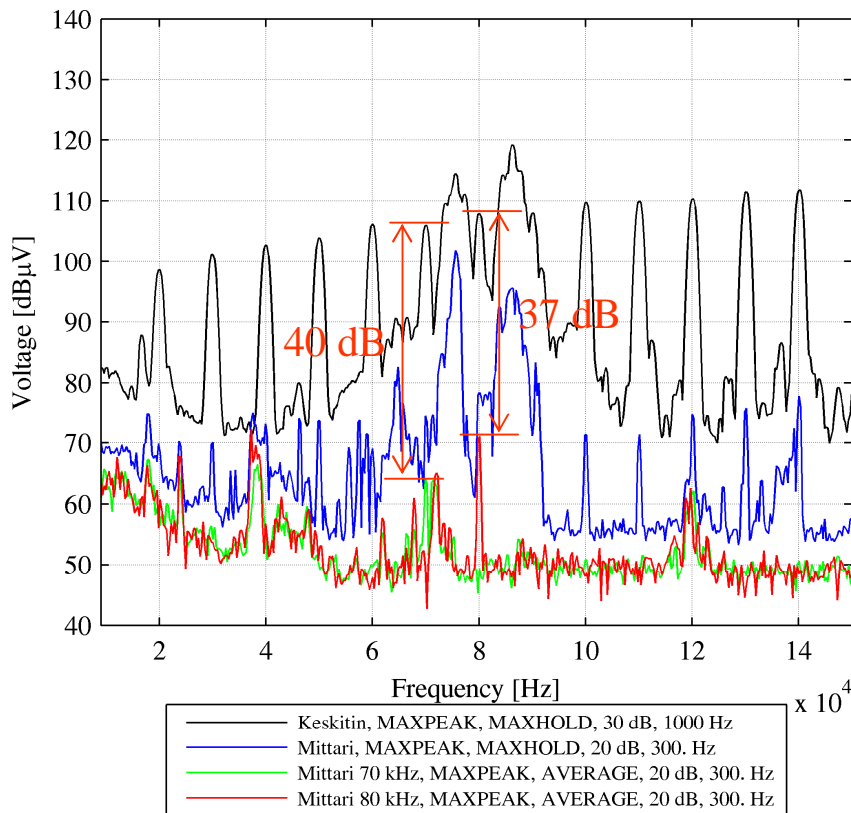
Mittauksissa käytettiin häiriölähteenä signaaligeneraattoria (LeCroy LW120 Arbitrary Waveform Generator), joka kytkettiin kytkentäkondensaattorin välityksellä PLC-yhteyden keskittimen puoleiseen päähän. Signaaligeneraattorilla syötettiin verkkoon sinimuotoista (kapeakaistaista) häiriöjännitettä eri taajuuksilla ja jännitetasoilla ja samanaikaisesti testattiin, pystytäänkö mittari lukemaan käsiohjatusti PLC-yhteyden välityksellä. Mittausjärjestely oli aiemmin etenemisvaimennusmittausten yhteydessä kuvassa 4.1 esitetyn kaltainen. Pj-verkko, jossa testaus toteutettiin, on esitetty kuvassa 5.1. Testaukseen valittiin yksivaiheinen kerrostaloasunnon mittari, jossa luenta oli toiminut luotettavasti. Mittari (Enermet E070L) sijaitsee kerrostalon alakerrassa olevassa mittauskeskuksessa ja keskitin (Landis+Gyr/Enermet EMPC100i-A) toisen kerrostalon alakerrassa olevassa muuntamossa.



Kuva 5.1. Pj-verkko, jossa PLC-järjestelmän selektiivisyyttä tutkittiin.

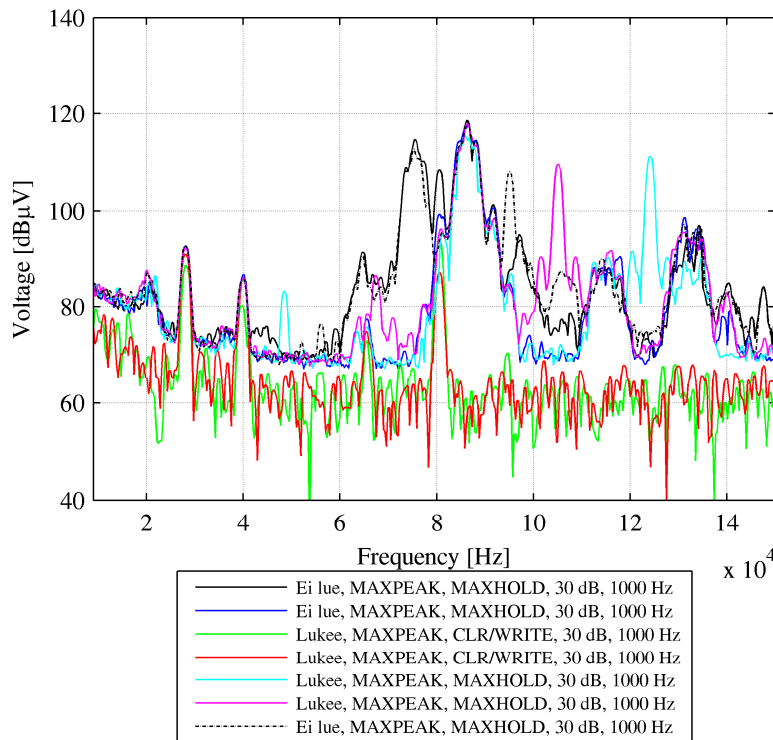
5.2 Sähköverkkotiedonsiirron häiriintyminen PLC-taajuuksien ulkopuolisista signaaleista

Sähköverkkotiedonsiirron häiriintymiseen PLC-signaalintajuuksien ulkopuolisista signaaleista todennäköisesti vaikuttaa osaltaan se, kuinka suuri on PLC-yhteysvälin vaimennus ja mikä on vastaanotettavan PLC-hyötysignaalin taso. Heikolla hyötysignaalilla kommunikaatio todennäköisesti estyy jo pienemmällä häiriösignaalilla kuin voimakkaalla hyötysignaalilla. Toiminnassa olevassa verkossa keskitin ja kukin mittari lähettävät vuorotellen ja ilman liikenteen demoduloivaa ja dekodaaavaa laitetta on vaikea määrittää, mistä mitatut PLC-signaalit kulloinkin tulevat eli yhteysvälivaimennuksen määrittäminen pelkästään spektrianalysointilla mittaamalla on vaikeaa. Mittausympäristön dokumentoimiseksi ja vastaanotettavan PLC-signaalin tason arvioimiseksi tutkittavan PLC-yhteyden vaimennus määritettiin ensin signaaligeneraattorin ja spektrianalysointilaitteen avulla. Eri taajuuksilla keskitimen liitäntäterminaaleihin syötetty signaalijännite ja mittarin liitäntäterminaaleista mitattu vastaanotettu signaalijännite on esitetty kuvassa 5.2. Taajuuksilla 70 kHz ja 80 kHz tehtiin lisäksi lyhytaikaisempi erillismittaus PLC-lähetyspurskeiden välissä, koska pitempiaikaisessa mittauksessa signaaligeneraattorin signaali peittyi PLC-lähetyspurskeiden alle. Kuten kuvasta ilmenee, yhteysvälin vaimennus oli 70 kHz taajuudella 40 dB ja 80 kHz taajuudella 37 dB. Signaalintajuuksilla 86 kHz ja 75 kHz yhteysvälivaimennuksen voidaan siis arvioida olevan noin 40 dB luokkaa.



Kuva 5.2. Keskittimen terminaaleihin lähetyspisteessä eri taajuuksilla syötetyt signaalijännitteet ja mittarin terminaaleista vastaanottopisteessä mitatut jännitteet.

Selektiivisyyskokeissa käytetyt häiriösignaalien jännitteet ja taajuudet ilmenevät kuvasta 5.3 ja taulukosta 5-1. Kun häiriösignaali oli PLC-signalointitaajuuksien puolivälissä, riitti luennan estämiseen noin 99 dBµV:n signaali eli noin 20 dB vastaanotettavaa PLC-signaalia voimakkaampi signaali. Kun häiriösignaali oli 9 kHz ylemmän ja 20 kHz alemman PLC-signalointitaajuuden yläpuolella, tarvittiin luennan estämiseen noin 9 dB suurempi (noin kolminkertainen) häiriösignaali. Mitatut häiriösignaalien jännitteet ja niitä vastaavat signaali-häiriösuhteet ovat sellaisia, että PLC-yhteyksien häiriintyminen 5...20 kHz päässä PLC-signalointitaajuudesta olevilla hakkuriteholähteiden aiheuttamilla kapeakaistaisilla häiriösignaaleillakin on ainakin tutkitun järjestelmän tapauksessa mahdollista. PLC-järjestelmien signaalinkäsittely on vuosien saatossa kehittynyt ja järjestelmien välillä on todennäköisesti eroja myös selektiivisydessä. Kuten luvussa 6 käsitellyt häiriötapaukset (mm. matkapuhelintukisaseman ja LAN-reitittimen tehollähteen aiheuttamat häiriöt) osoittavat, myös uudet PLC-järjestelmät voivat häiriintyä muutaman kilohertsin päässä signalointitaajuuksista olevista häiriösignaaleista.



Kuva 5.3. Keskittimen terminaaleihin syötettyjen häiriöjännitteiden ja keskittimen PLC-signaalin taajuusspektrit.

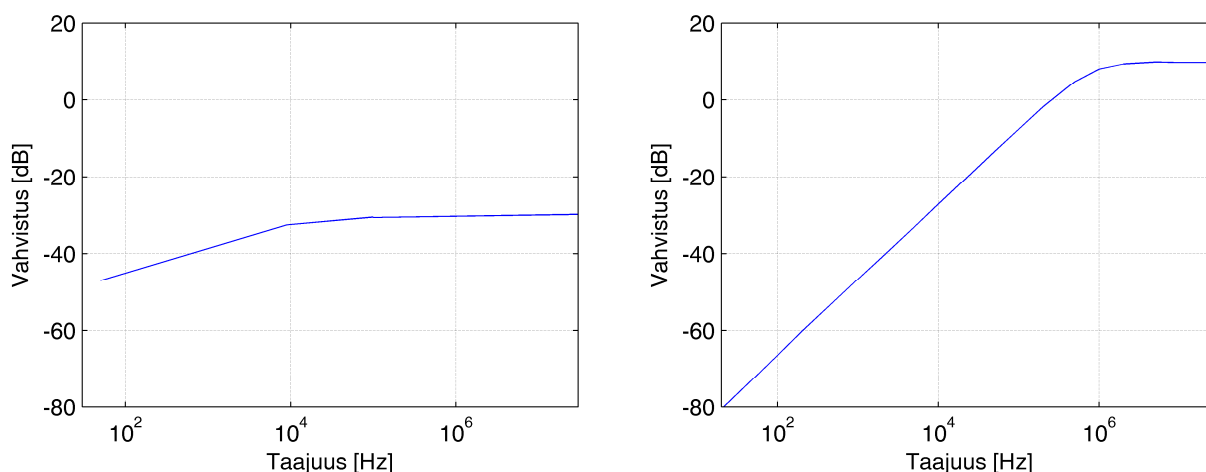
Taulukko 5-1. Yhteenveto taajuudeltaan ja jännitteeltään erilaisten häiriösignaalien vaikutuksesta PLC-luennan toimivuuteen.

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

6 Asiakslaitteiden aiheuttamat PLC-luentaongelmat ja niiden korjaaminen

6.1 Mittausmenetelmä

Asiakslaitteiden aiheuttamien häiriöiden karakterisoinnissa käytettiin mittalaitteena Rohde & Schwarz ESPI-3 mittavastaanotin/spektrianalysointia ja ESH2-Z3 passiivista jännitemittapäätä, joilla mitattiin sähköverkossa vallitsevan häiriöjännitteen taajuusspektri ja suurtaajuusvirtamuuntajaa EZ-17, jolla mitattiin häiriövirtoja. Mittapäiden taajuusvasteet on esitetty kuvissa 6.1...6.2. Taajuusvasteet on huomioitu kaikissa esitetyissä mittaustuloksissa eli tulokset ovat todellisia jännitteitä ja virtoja.



Kuva 6.1. a) ESH2-Z3 jännitemittapään taajuusvaste, b) EZ-17 suurtaajuusvirtamuuntajan taajuusvaste.

Mittaukset on tehty pääosin huippuarvoilmaisijalla ja 1 kHz kaistanleveydellä. Yhdistelmä on osoittautunut käytännössä hyväksi kompromissiksi taajuusresoluution ja pyyhkäisynopeuden välillä sekä 9...150 kHz että 9 kHz...1 MHz taajuuskaistoilla. Sekä huippuarvoilmaisija että 1 kHz mittaускаistanleveys löytyvät useimmista spektrianalysointoreista. Laitteiden häiriöpäästöjen raja-arvot on EMC-standardeissa annettu yleensä kvasihuippuarvo (quasi peak)- tai keskiarvo(average)

ilmaisijalla mitattuna ja mittausjärjestelyjen osalta viitataan yleensä CISPR-standardeihin, joissa häiriöjännite on määritelty mitattavaksi 150 kHz taajuuteen saakka kaistanleveydellä 200 Hz ja taajuusalueella 150 kHz...30 MHz kaistanleveydellä 9 kHz. Käytännössä 200 Hz mittauskaistan käyttäminen hidastaa spektriptyyhkäisyn monissa spektrianalysaattoreissa niin hitaaksi (noin 20 sekuntia), että edes yksittäisen spektriptyyhkäisyn mittaaminen PLC-lähetyspurskeiden välissä ei ole mahdollista ja muutenkin mittauksen reaaliaikaisuus kärsii. CISPR-standardien mukaiset kaistanleveydet ja ilmaisijat ovat lisäksi monissa spektrianalysaattoreissa lisävarusteita ja varsinkaan kädessä pidettäviin analysointilaitteisiin (jotka ovat häiriöselvityksissä kaikkein kätevimpiä) niitä ei aina ole edes saatavissa. Kuten kuvasta 6.2 ilmenee, suurilla pulssimuotoisten häiriöiden toistotaajuuksilla (> 10 kHz) huippuarvoilmaisijan näyttämä on korkeintaan muutaman desibelin suurempi kuin kvasihuippuarvoilmaisijan näyttämä, joten ilmaisijasta aiheutuva virhe jää melko pieneksi. Nykyaikaisilla taajuusmuuttajilla ja UPSeilla kytkentätaajuuksudet ovat tyypillisesti vähintään noin kymmenen kilohertsiä ja hakkuriteholähteillä kymmeniä kilohertsejä.

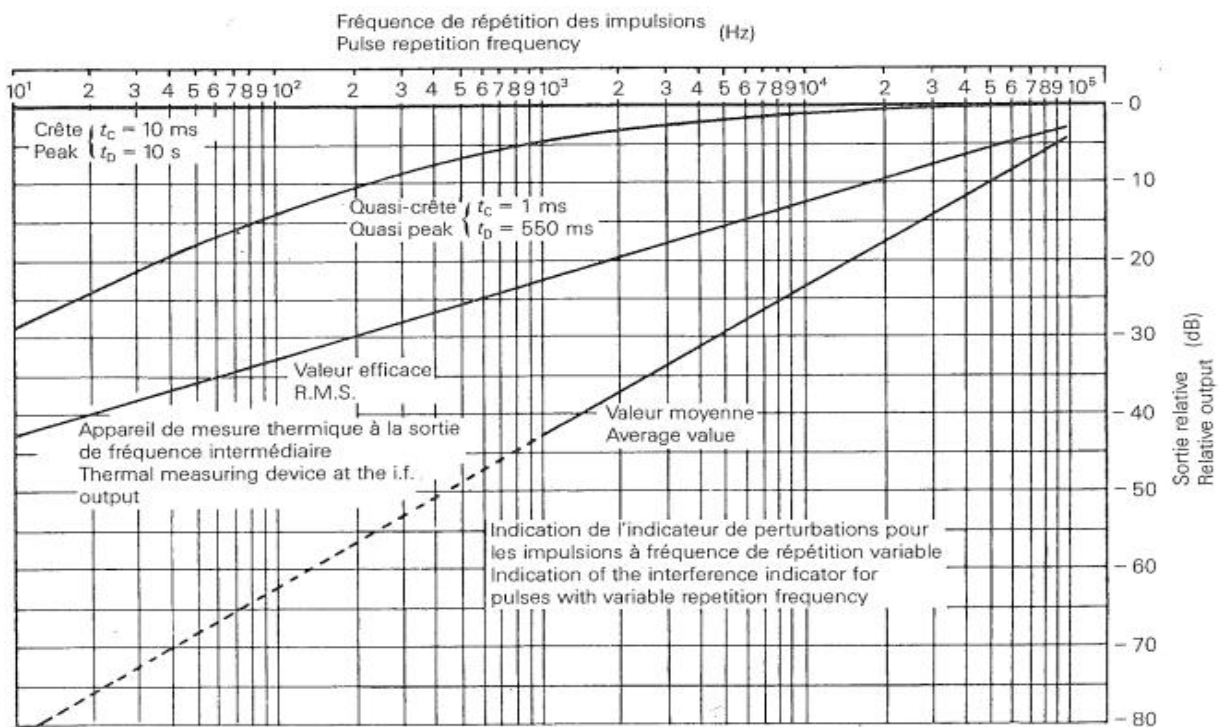


FIG. 38. – (Annexe M, paragraphe M2.2.) (Appendix M, Sub-clause M2.2.)

522/86

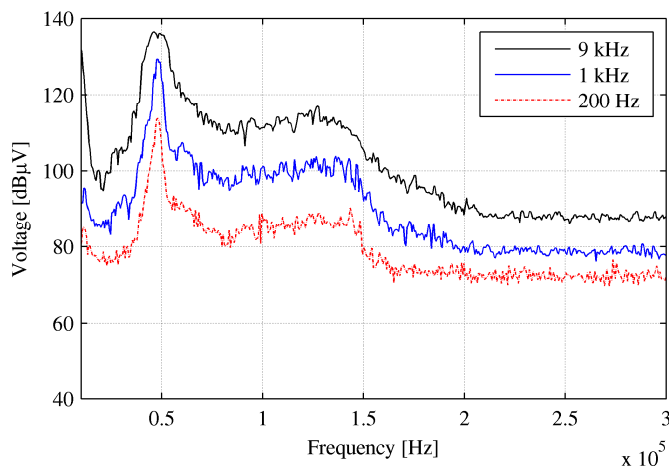
Kuva 6.2. Kvasihuippuarvo-, tehollisarvo- ja keskiarvoilmaisijoiden näyttämät suhteessa huippuarvoilmaisijaan toistotaajuudeltaan erilaisilla pulssimuotoisilla häiriöillä [Ano87a].

Mittauskaistanleveys vaikuttaa kuitenkin laajakaistaisten häiriöiden tapauksessa mitatun häiriöjännitteen suuruuteen, mikä on huomioitava mittaustuloksia tulkittaessa. Teoriassa epäkoherenttien häiriöiden jännite kasvaa kaavan 6-1 mukaisesti ja koherenttien häiriöiden kaavan 6-2 mukaisesti [Duf88a]. Näin ollen, kaistanleveyksillä 200 Hz ja 1 kHz mitatuissa häiriöjännitteissä tulisi olla 7...14 dB ero häiriön luonteesta riippuen ja kaistanleveyksien 1 kHz ja 9 kHz välillä 9,5...19 dB ero. Kuvassa 6.3 on esitetty vertailun vuoksi luvussa 6.2 tarkemmin käsitellystä ikääntyneestä hakkuriteholähteestä eri kaistanleveyksillä mitatut häiriöjännitteet. Jos

lasketaan häiriöjännitteiden keskimääräiset erot taajuusväliltä 35...150 kHz, jossa taustakohinan vaikutus on pienin, saadaan kaistanleveyksien 200 Hz ja 1 kHz välille 14.5 dB ero ja kaistanleveyksien 1 kHz ja 9 kHz välille 14 dB ero. Poikkeama kaavojen 6-1 ja 6-2 antamista tuloksista johtunee pääosin siitä, että spektrianalysoitsijan 200 Hz ja 9 kHz kaistanleveydet on määritelty CISPR-standardien mukaisesti suotimen läpäisykäyrän - 6 dB pisteistä, kun 1 kHz kaistanleveys on määritelty - 3 dB pisteistä (- 6 dB pisteissä kaistanleveys olisi suurempi kuin 1 kHz).

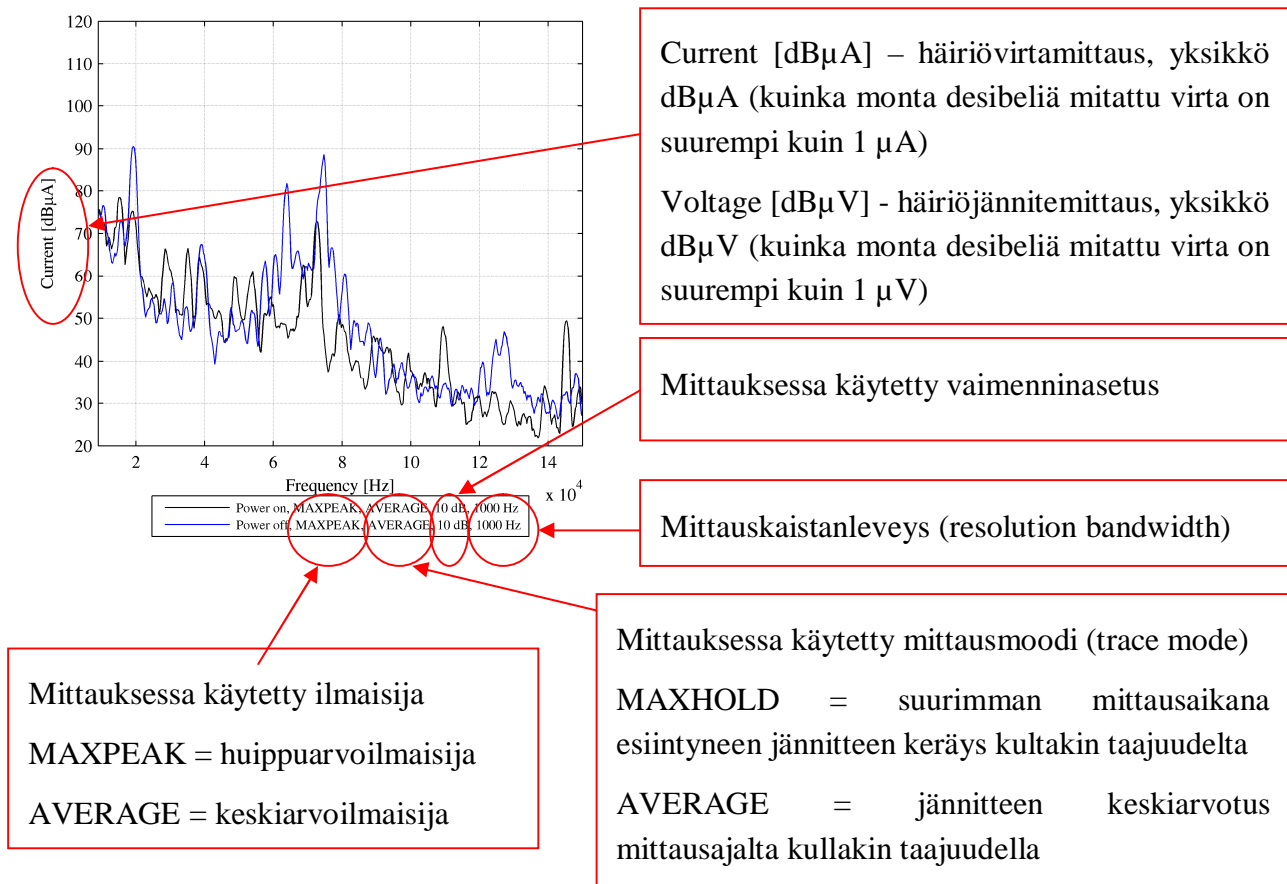
$$\Delta E_{ic} = 10 \cdot \log \frac{bw_1}{bw_2} \quad (6-1)$$

$$\Delta E_c = 20 \cdot \log \frac{bw_1}{bw_2} \quad (6-2)$$



Kuva 6.3. Ikääntyneestä hakkuriteholähteestä eri kaistanleveyksillä mitatut häiriöjännitteiden taajuusspektrit.

Kuvasta 6.4 ilmenee spektrikuvissa käytettyjen merkintöjen merkitys. Vaimenninasetus vaikuttaa lähinnä taustakohinatasoon ja näin ollen sillä on eniten merkitystä heikkoja häiriöitä mitattaessa.



Kuva 6.4. Spektrikuivissa käytetyt merkinnät..

6.2 Hakkuriteholähteiden aiheuttamat häiriöt

Yksi yleisistä PLC-luentaongelmien aiheuttajista on sekä kyselytutkimuksen että tässä raportissa raportoituun tutkimukseen osallistuneiden verkkoyhtiöiden kokemusten mukaan erilaiset hakkuriteholähteet. Ongelmien perussyiden selvittämiseksi tutkimusprojektin kuluessa tutkittiin käytännön mittauksilla muutamia häiriötapauksia, joista tässä raportoidaan tarkemmin kaksi erityyppistä tapausta. Toisessa häiriöiden perussy on laitteen ikääntyminen tai vikaantuminen ja toisessa se, että asiakaslaitteille ei ole juurikaan olemassa häiriöpäästöjen raja-arvoja taajuusalueelle 3...150 kHz. Ensin mainitusta on tässä luvussa tarkasteltu kahta ja jälkimmäisestä kolmea eri tapausta.

6.2.1 Laitteen ikääntymisestä johtuvat häiriöt

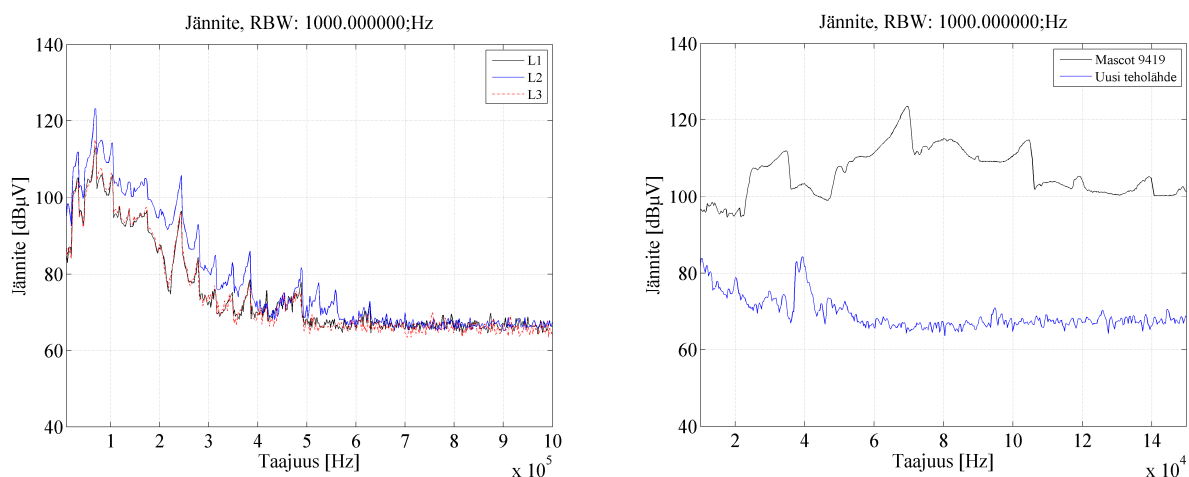
Ainakin kahden verkkoyhtiön alueella on esiintynyt yhteensä kymmeniä tapauksia, joissa pieni plug-in hakkuriteholähde on aiheuttanut PLC-luentaongelmia. Luentaongelma on yleensä korjaantunut vaihtamalla tehrolähde uuteen.

Tutkitussa tapauksessa kyseessä oli rivitalon satelliittikeskusantennijärjestelmän vastaanotinta syöttävä tehollähde. Rivitalon sähköpääkeskustilassa oli kaksi samanlaista, mutta eri kanavia vastaanottavaa satelliittikeskusantennijärjestelmän vastaanotinta, joista toisen tehollähde ei toiminut lainkaan (ei DC-ulostulojännitettä) ja toinen häiritsi tehollähteiden kanssa samassa tilassa olevan monimittarikeskuksen energiamittareiden luenta. Vastaanottimet (SAM 5 Satellite TV system, valmistaja RF Tuote Oy) ja tehollähteet (Mascot Type 9419) on esitetty kuvassa 6.5. Etäisyys pääkeskuksesta muuntamalla sijaitsevalle keskittimelle oli tässä tapauksessa noin 220 m.



Kuva 6.5. Satelliittikeskusantennijärjestelmän vastaanottimet ja tehollähteet.

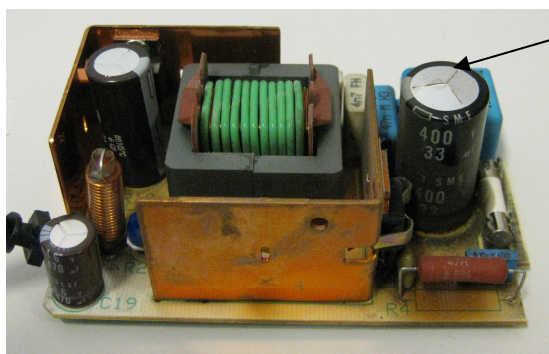
Kuvassa 6.6 a) on esitetty ikääntyneen hakkuritehollähteen aiheuttamien johtuvien häiriöiden taajuusspektri eri vaiheissa. Kuten kuvasta nähdään häiriöt ovat voimakkaimmat vaiheessa L2, johon tehollähde oli kytketty. Häiriöjännite oli sähköverkkotiedonsiirtoon käytetyillä taajuuksilla 75 kHz ja 86 kHz yli 110 dB μ V (mitattuna huippuarvoilmaisijalla ja 1 kHz kaistanleveydellä). Naapurivaiheissa L1 ja L3 häiriötaso oli vain noin 10 dB pienempi (noin 1/3 vaiheen L2 häiriöjännitteestä). Energiamittareiden tiedonsiirto tapahtuu tutkitussa järjestelmässä vaiheella L1.



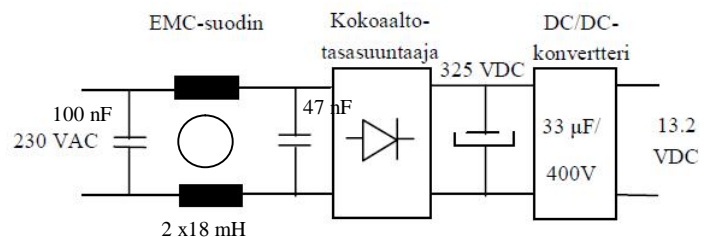
Kuva 6.6. a) Ikääntyneen hakkuritehollähteen aiheuttaman häiriöjännitteen taajuusspektri 9 kHz...1 MHz eri vaiheissa. b) Uuden korvaavan tehollähteen ja ikääntyneen tehollähteen häiriöjännitteet vaiheessa L2 taajuuksilla 9...150 kHz.

Häiriöitä aiheuttanut tehollähde tutkittiin laboratoriossa ja häiriöiden syyksi paljastui kuivunut välipiirin elektrolyyttikondensaattori. Kuten kuvasta 6.7 ilmenee elektrolyyttikondensaattori on

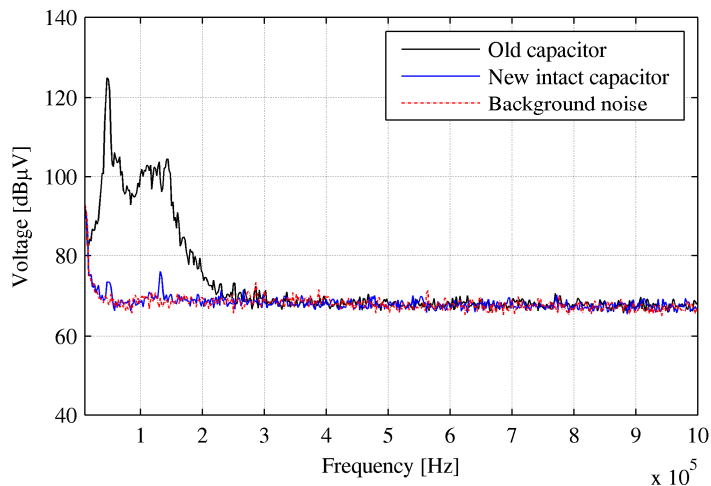
sijoitettu piirilevyllä varsin lähelle toisen tehotransistorin jäähdytyslevyä, joten ympäristön lämpötila on suuritaajuisten rippelivirtojen aiheuttamien tehohäviöiden ohella saattanut nopeuttaa kondensaattorin vanhenemista. Kondensaattorin kapasitanssi oli vain 4,7 nF kun kondensaattorin kyljessä olevien merkintöjen mukaan sen olisi pitänyt olla 33 μ F. Kun kondensaattori vaihdettiin uuteen, häiriöt hävisivät, kuten kuvasta 6.8 ilmenee. Kuvan mittaukset on tehty häiriösuojatussa huoneessa ilman kuormaa. Perussyö häiriöihin oli tässä tapauksessa laitteen yhden komponentin ikääntyminen, jota ilmeisesti olivat edesauttaneet puutteet laitteen jäähdytyksen ja komponenttisijoittelun suunnittelussa. Ongelman ilmi tulemista ja korjaamista vaikeutti se, että laite toimi vielä peruskäyttötarkoituksessaan, eli se tuotti syöttämänsä laitteen tarvitseman käyttöjännitteen, mutta aiheutti verkkoon päin huomattavan suuret häiriöt ja esti PLC-luennan toiminnan.



Kuivunut välipiirin elektrolyyttikondensaattori



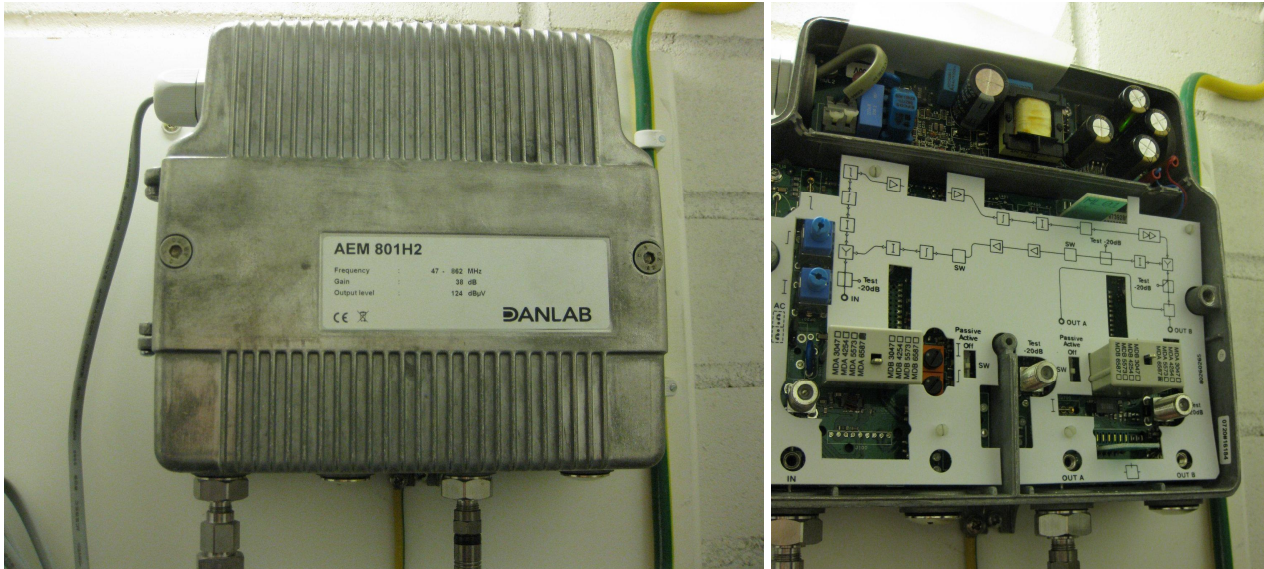
Kuva 6.7. Hakkuriteholähteen piirikortti ja siinä oleva kuivunut välipiirin elektrolyyttikondensaattori.



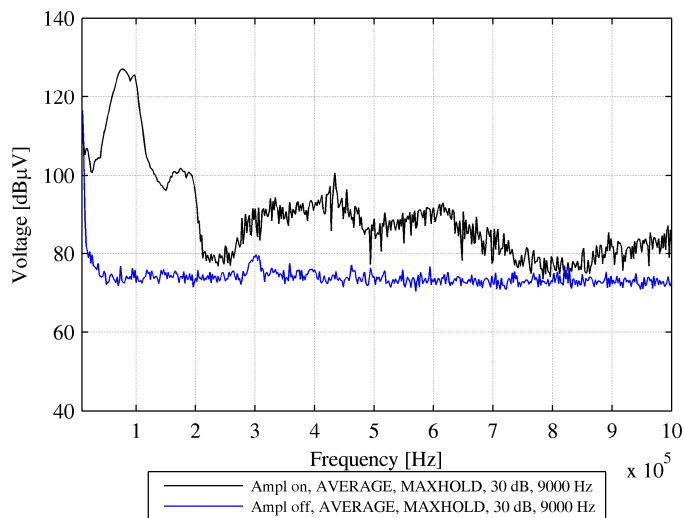
Kuva 6.8. Laboratoriossa mitattu taustahäiriöjännite ja hakkuriteholähteen aiheuttama häiriöjännite vanhalla kuivuneella välipiirin kondensaattorilla ja uudella kondensaattorilla.

Toisessa tutkimuksessa ikääntyneen tai viallisen laitteen aiheuttamassa häiriötapauksessa kyseessä oli kerrostalon kaapeli-TV-verkon antennivahvistin (kuva 6.9), jonka sähkönsyöttö oli otettu kerrostalon yhdessä rappukäytävässä sijaitsevan siivouskomeron valaistuksen ryhmäjohtosta.

Laitteen paikantamiseksi tehdyt mittaukset on käsitelty luvussa 7. Laitteen aiheuttamien häiriöiden taajuusspektri mitattuna kerrostalon pääkeskukselta on esitetty kuvassa 6.10. Häiriö on varsin voimakas ja laajaspektrinen ja se esti PLC-luennan valtaosassa muuntopiiriä (yli 330 mittaria oli luennan ulkopuolella).



Kuva 6.9. Ikääntynyt tai viallinen antennivahvistin.



Kuva 6.10. Ikääntyneen tai viallisen antennivahvistimen aiheuttamien häiriöiden taajuusspektri.

6.2.2 Standardoinnin puutteellisuudesta johtuvat häiriöt

Myös uudet ehjät hakkuriteholähteet voivat aiheuttaa häiriöitä sähköverkkotiedonsiirtoon 2...150 kHz taajuuksilla, koska tällä hetkellä ko. taajuusalueelle ei ole olemassa raja-arvoja laitteiden häiriöpäästöille. Esimerkkeinä tällaisista tapauksista tutkittiin projektin kuluessa kerrostalon

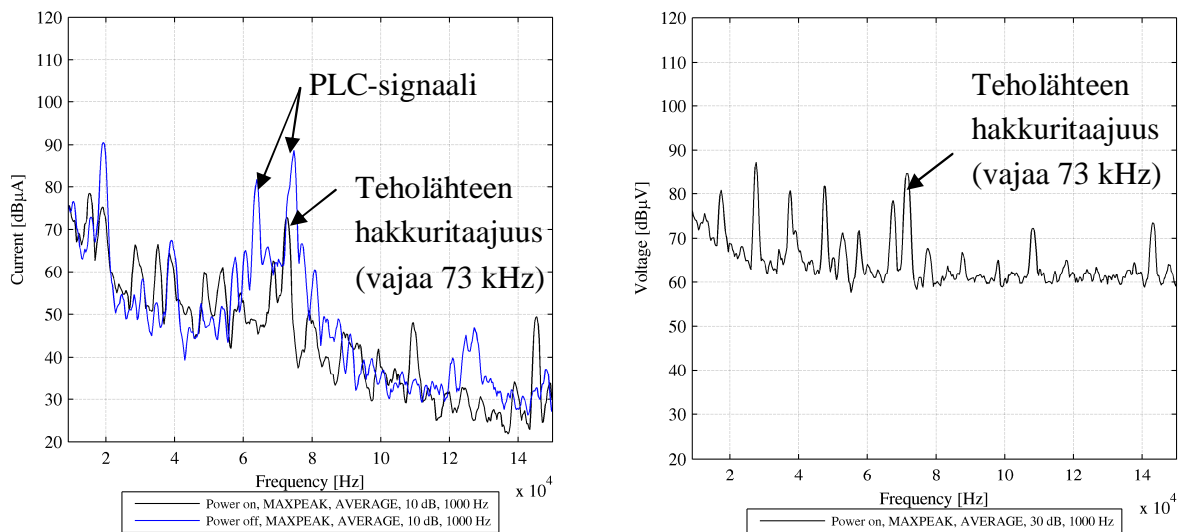
Ethernet-reitittimen teholähdettä, pöytätietokoneen teholähdettä ja matkapuhelintukiaseman teholähdettä.

Ethernet-reitittimen teholähde paikannettiin luvussa 7 esitetyllä menetelmällä muuntamolta aloitetuilla mittauksilla. Muuntamon 8:sta lähdöstä määritettiin ensin virtamittauksilla lähtö, jossa häiriövirta oli suurin ja sen jälkeen vastaavanlaiset mittaukset tehtiin ko. lähdöllä olevalla jakokaapilla, josta haarautui johdot neljään kerrostaloon. Talon pääkeskukselle tulevassa syötössä tehtiin virta- ja jännitemittaukset, joiden perusteella näytti siltä, että häiriölähde on todennäköisesti hakkuriteholähde (esimerkiksi taajuusmuuttajille tyypillisiä laajakaistaisia häiriöitä ei ollut havaittavissa). Kerrostalon sähköpääkeskustilan viereisessä huoneessa oli ethernet- ja televerkon laitteita, joiden teholähteitä kytkettiin vuorotellen pois päältä ja näin häiriö saatiin paikannettua yhteen Ethernet-reitittimen teholähteeseen joka on esitetty kuvassa 6.11.



Kuva 6.11. PLC-luentaan häiriöitä aiheuttanut Ethernet-reitittimen teholähde.

Kuten kuvasta 6.12 b) nähdään hakkuriteholähteen häiriöjännite on 1 kHz kaistalla huippuarvoilmaisijalla mitattuna noin 85 dB μ V, mutta häiriön taajuus (vajaa 73 kHz) osuu hyvin lähelle ylempää PLC-taajuutta (noin 75 kHz). Tässä tapauksessa muuntopiirin mittarit edustivat ns. PLAN teknologiaa, jossa mittarit lähettävät tietoa keskittimelle spontaanisti. Ilmeisesti mittarit tulkitsivat, että taajuudella on liikennettä, kun hakkuriteholähde oli päällä, eivätkä sen vuoksi lähettäneet mitään. Heti kun teholähde kytkettiin jännitteettömäksi, PLC-liikenne alkoi (kuva 6.12 a). Melko pienikin häiriöjännite riittää siis estämään PLC-luennan, kun häiriöjännitteen taajuus on sopiva. Tässä tapauksessa teholähde oli kunnossa, mutta ongelmana on häiriöpäästöjen raja-arvojen puuttuminen PLC-taajuuksilla.

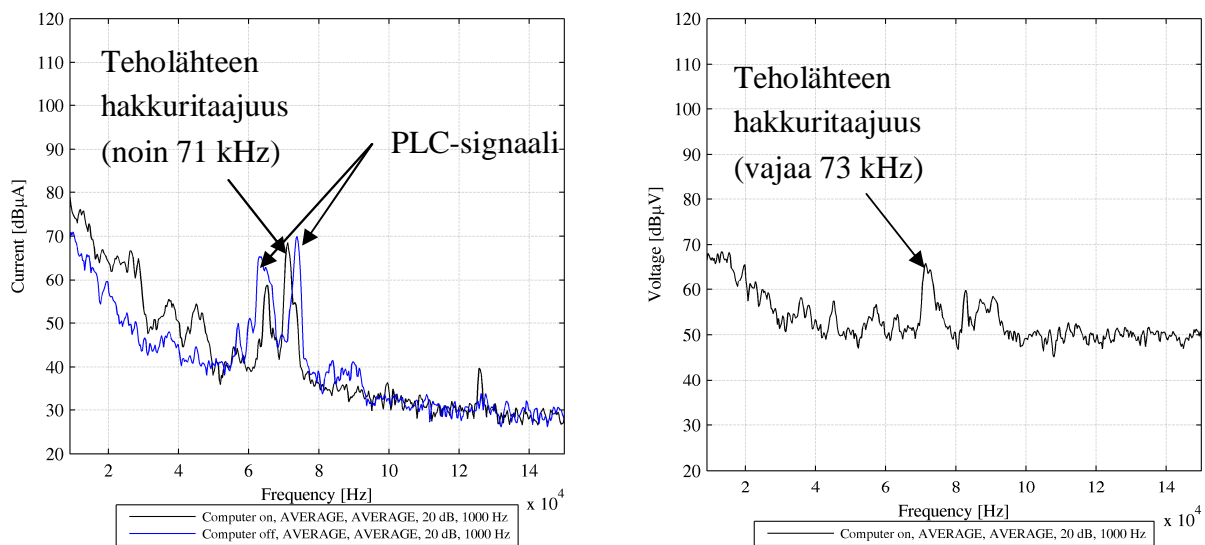


Kuva 6.12. Ethernet reitittimen tehonlähteen aiheuttama a) häiriövirta b) häiriöjännite kerrostalon pääkeskuksen syötössä.

Häiriötä aiheuttaneen pöytätietokoneen (kuva 6.13) tehonlähte paikannettiin myös luvussa 7 esitetyllä menetelmällä. Tässä tapauksessa häiriöjännite oli 1 kHz kaistanleveydellä mitattuna vain noin 66 dBµV (kuva 6.14 b) keskiarvoilmajaisijalla mitattuna. Häiriön taajuus (noin 71 kHz) osui tässäkin tapauksessa varsin lähelle PLC signaalin noin 75 kHz taajuutta. Tässäkin tapauksessa ns. PLAN-tekniikkaan perustuva mittari aloitti kommunikoinnin välittömästi, kun tietokone kytkettiin pois päältä (kuva 6.14 a).



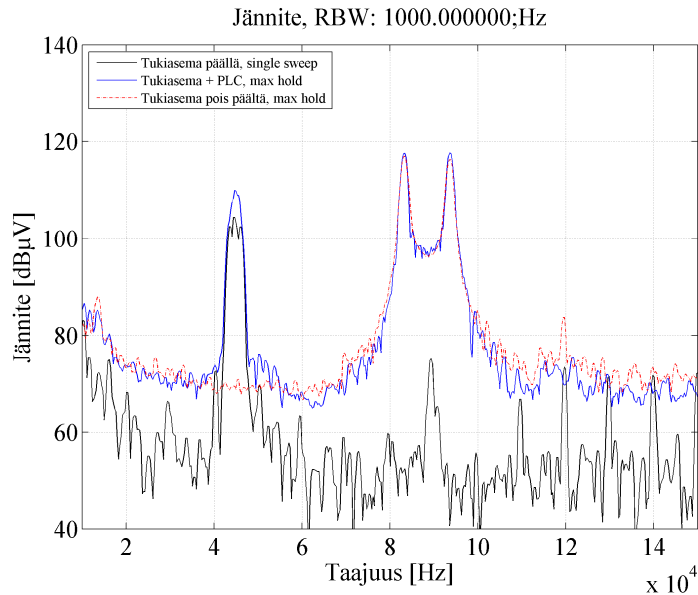
Kuva 6.13. Pöytätietokone, jonka tehonlähte häiritsi PLC-luenta.



Kuva 6.14. Pöytätietokoneen teholähteen aiheuttama a) häiriövirta b) häiriöjännite liikehuoneiston pääkeskuksen syötössä.

Häiriöitä aiheuttaneen matkapuhelintukiaseman hakkuriteholähteen tapauksessa kyse näyttäisi myös olevan standardoinnin puutteellisuudesta. Tutkitussa tapauksessa hakkuriteholähde esti käytännössä koko muuntopiirin mittareiden luennan. Matkapuhelintukiasema sijaitsi muuntamon yläkerrassa ja PLC-keskitin muuntamotilassa. Kuvassa 6.15 b) on esitetty huippuarvoilmaisijalla tehdyt max hold-mittaukset, kun tukiasema oli päällä ja pois päältä (molemmissa kuvissa näkyy myös keskittimen PLC-signaali) ja lisäksi kertapyyhkäisyllä (single sweep) tehty mittaus hetkeltä, jolloin keskitin ei lähettänyt PLC-signaalia. Teholähteen hakkurin perustaajuudella noin 44,5 kHz häiriöjännite on 1 kHz kaistalla mitattuna noin 104 dBµV ja toisen harmonisen häiriöjännite taajuudella noin 89 kHz on noin 75 dBµV. Ongelmana näyttäisi olevan se, että toinen harmoninen osuu juuri PLC-taajuuksien väliin ja vaikka häiriöjännite ei ole kovin suuri, niin se riittää häiritsemään keskittimen vastaanotinta niin, että se ei kuule mittareita.

Häiriöitä aiheuttavia matkapuhelintukiaseman teholähteitä on esiintynyt yhden verkkoyhtiön alueella useita ja toisen saman valmistajan mittareita käyttävän yhtiön alueella ainakin yksi. Kyseisissä tapauksissa verkkoyhtiö on omalla kustannuksellaan lisännyt hakkuriteholähteen syöttöön EMC-suotimet, joilla ongelma on useimmissa tapauksissa poistunut. Verkkoyhtiö on ollut yhteydessä ongelmasta tukiasemien operaattoriin, mutta tämä on ainakin toistaiseksi vedonnut siihen, että teholähde täyttää olemassa olevat EMC-vaatimukset ja katsoo, että verkkoyhtiön tulee vastata ongelman korjaamisesta.



Kuva 6.15. a) Häiriötä aiheuttaneen matkapuhelintukiaseman antennit muuntamokopin katolla, b) matkapuhelintukiaseman teholähteen häiriöjännitteiden taajuusspektrit.

Molemmissa ikääntyneen tai viallisen hakkuriteholähteen tapauksessa häiriöjännitteen taajuusspektri oli hyvin laajakaistainen, kuten kuvista 6.6 ja 6.10 ilmenee. Kunnossa olevien teholähteiden tapauksessa häiriöjännite oli vastaavasti kapeakaistainen, vaikkakin kytkentätaajuuden 2. harmoninen yliaalto oli Ethernet-reitittimen ja matkapuhelintukiaseman tapauksessa melko voimakas.

6.3 Taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamat häiriöt

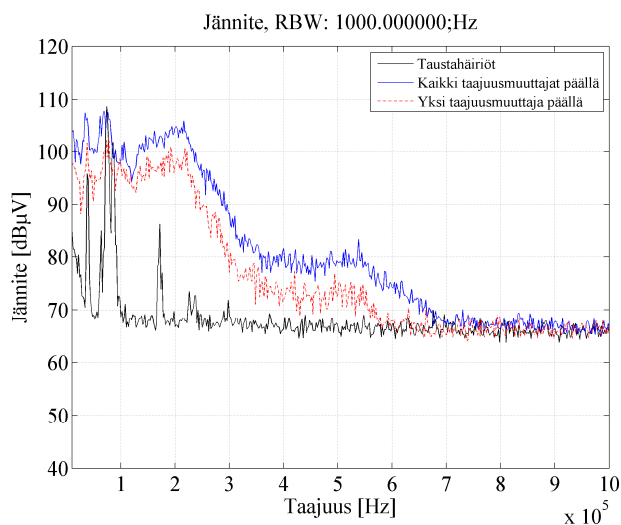
Taajuusmuuttajilla voidaan parantaa moottorikäyttöjen energiatehokkuutta ja niitä on yleisesti käytössä myös kerrostaloissa, joissa on runsaasti sähköverkon kautta luettavia energiamittareita. Esimerkiksi ilmanvaihdon puhaltimissa on yleisesti taajuusmuuttajakäytöt ja niitä saattaa olla myös (kiertovesi)pumpuissa. Myös vesi- ja jätevesipumppaamoilla on tyypillisesti melko suuritehoisiakin taajuusmuuttajakäyttöjä, jotka saattavat aiheuttaa PLC-luentaongelmia jopa suureen osaan muuntopiiristä, vaikka ne sijaitisivat hieman kauempanakin mittareista tai muuntamalla sijaitsevasta keskittimestä.

Projektin kuluessa tutkittiin yhtä häiriötapausta, jossa alle 10 vuotta vanhan kerrostalon ilmanvaihdon taajuusmuuttajat häiritsivät energiamittareiden PLC-luenta. Kerrostalon kellarikerroksessa sijaitsevassa sähköpääkeskustilassa oli 5 kpl Danfoss VLT MicroDrive-taajuusmuuttajia teholtaan 0,75 kW/kpl (kuva 6.16). Ilmanvaihdon puhaltimet olivat 5-kerroksisen kerrostalon yläkerrassa.



Kuva 6.16. Kerrostalon ilmanvaihdon taajuusmuuttajat ja yhden taajuusmuuttajan tyyppikilpi.

Kuvassa 6. 17on esitetty kohteessa mitattu taustahäiriöjännitteen taajuusspektri, kun taajuusmuuttajat olivat poissa päältä, ja häiriöjännitteiden taajuusspektrit, kun yksi taajuusmuuttaja ja kaikki 5 taajuusmuuttajaa olivat päällä. Yksittäisten taajuusmuuttajien häiriöjännitteiden spektreissä ei ollut tässä tapauksessa merkittäviä eroja. Kuten kuvasta nähdään yksittäisen taajuusmuuttajan aiheuttama häiriöjännite ylittää reilusti luvussa 2 mainitut raja-arvot yli 150 kHz taajuuksilla.

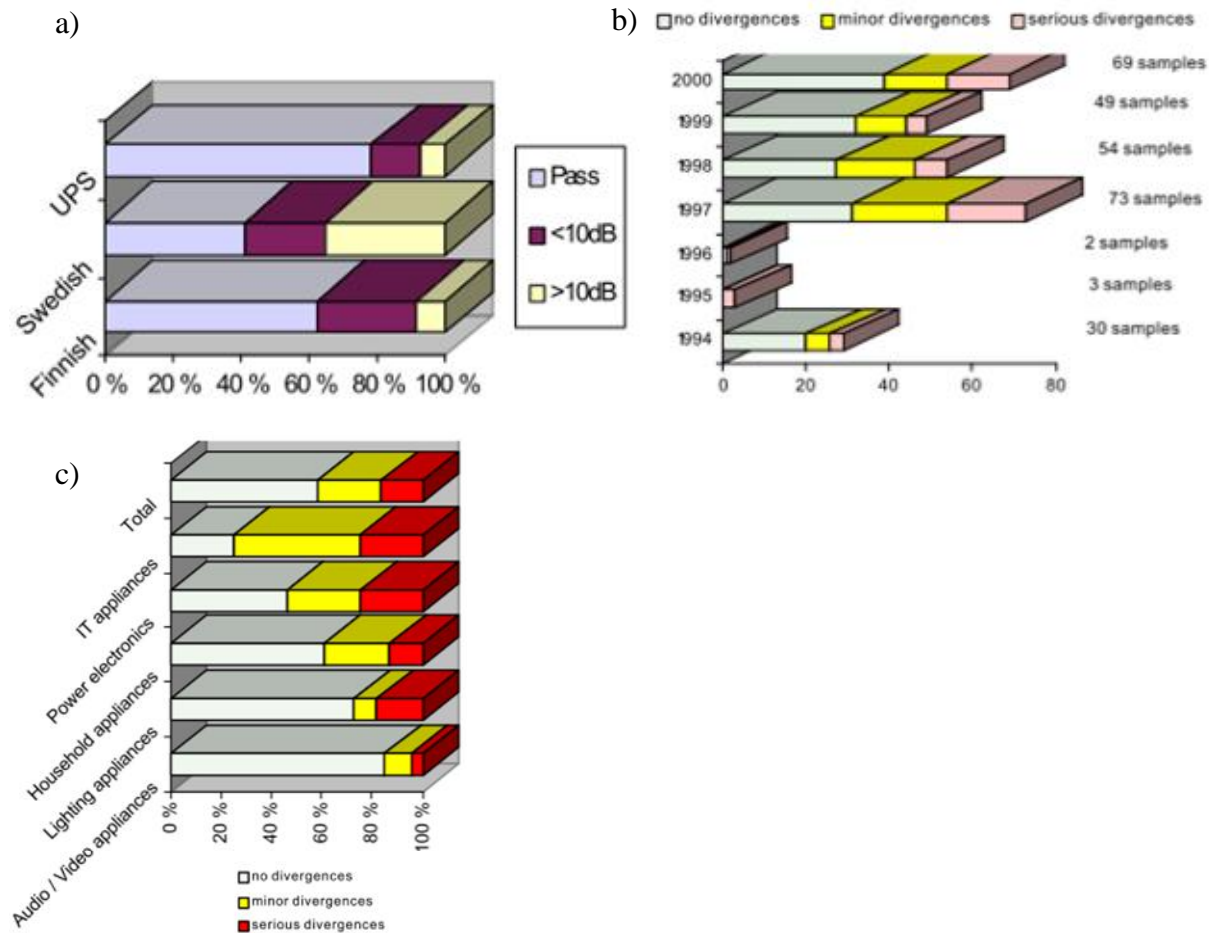


Kuva 6.17. Kerrostalon yhden ja kaikkien viiden taajuusmuuttajan aiheuttama häiriöjännite ja taustahäiriöjännite taajuusmuuttajien ollessa poiskytettyinä.

Mahdollisia syitä suureen häiriöjännitteeseen voivat olla [Ano04b, Ano12e, Raj03a]:

1. Liian pitkät moottorikaapelit (talossa 5 kerrosta + kellarikerros, jossa taajuusmuuttajat)
2. Moottorikaapelin suojavaipan huono maadoitus tai maadoittamatta jättäminen (vaikutus riippuu paljon siitä kuinka lähellä muita sähköverkon kaapeleita moottorikaapelit kulkevat)
3. Laite ei alun perinkään ole täyttänyt vaatimuksia, vaikka valmistaja niin lupaa
4. Laitteiden tai EMC-suotimien ikääntyminen tai jonkin komponentin rikkoutuminen

Esimerkiksi Turvallisuus- ja kemikaalivirasto TUKESin vuonna 2003 julkaisemassa markkinatutkimuksessa [Raj03a] ilmeni, että tutkituista 24 taajuusmuuttajasta 9 ei täyttänyt EMC-vaatimuksia johtuvien häiriöiden osalta ja 14 ei täyttänyt niitä säteilevien häiriöiden osalta. Julkaisu sisälsi myös tuloksia hieman aiemmin Ruotsissa tehdystä vastaavasta tutkimuksesta ja Suomessa tehdystä UPSeja koskevasta tutkimuksesta sekä Tukesin teettämien EMC testausten tuloksista yleensä (kuva 6.18). Tehoelektroniikkalaitteet eivät tuohon aikaan olleet ongelmallisin laiteryhmä vaan eniten häiriöpäästöarvojen ylityksiä esiintyi informaatioteknologian laitteissa (esimerkiksi PC:t) [Raj02a, Raj03a].



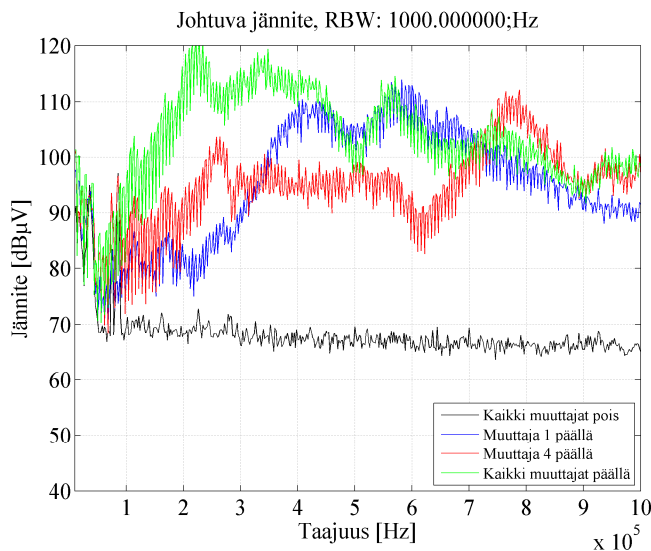
Kuva 6.18. a) Taajuusmuuttajien ja UPSien johtuvien häiriöpäästövaatimusten täytyminen Ruotsissa ja Suomessa tehdyissä markkinatutkimuksissa (UPSeja koskeva tutkimus tehtiin Suomessa) b) EMC-vaatimustenmukaisuuden toteutuminen kaikkien Tukesin markkinatutkimuksissa tutkittujen laitteiden osalta eri vuosina 1990-luvun lopulla c) EMC-vaatimustenmukaisuuden toteutuminen laiteryhmittäin.

Toinen projektin kuluessa tutkittu häiriötapaus oli myös kerrostaloalueella (toisen verkkoyhtiön alueella), jossa uudehkon 2000-luvulla rakennetun kerrostalon pysäköintihallissa ilmanvaihdon taajuusmuuttajat (6 kpl Vacon NXL taajuusmuuttajia, 5,5 kW/kpl, kuva 6.19 a) estivät PLC-luennan suuressa osassa muuntopiirin mittareista. Taajuusmuuttajien tyyppikilpien (kuva 6.19 b) mukaan ne on varustettu luokan C2-suotimilla [Ano11a], jotka vastaavat standardin EN 55011 luokkaa A1: teollisuusverkot.



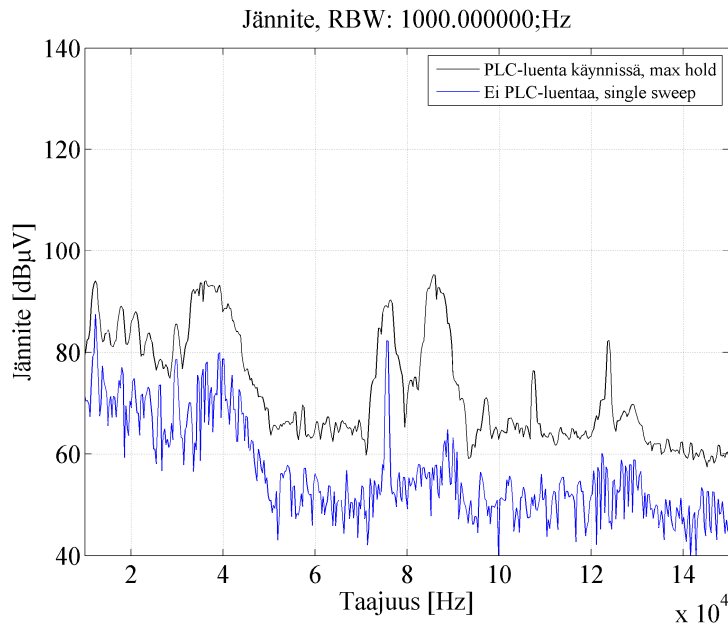
Kuva 6.19. a) Häiriöitä aiheuttaneet Vacon NXL taajuusmuuttajat b) taajuusmuuttajan tyypikilpi.

Kuten kuvasta 6.20 nähdään häiriöpäästöt ylittävät luokan C2 raja-arvot reilusti yli 150 kHz taajuuksilla. Energiamittareiden etäluennassa käytettävillä taajuuksilla häiriöjännite on hieman pienempi, mutta kuitenkin riittävä estämään PLC-luennan. Kuten kuvasta 6.20 ilmenee, yksittäisten taajuusmuuttajien häiriöjännitteiden taajuusspektreissä oli selviä eroja. Mahdollisia syitä eroihin voivat olla esimerkiksi erot kaapeloinnissa tai komponenttiviaat.



Kuva 6.20. Vacon NXL-taajuusmuuttajien aiheuttamien häiriöjännitteiden taajuusspektrit.

Taajuusmuuttajien poiskytkennän jälkeen kohteeseen jäi edelleen todennäköisesti hakkuriteholähteen aiheuttama häiriö alle 1 kHz päähän alemmasta PLC-luentaajuudesta 75 kHz (kuva 7.21). Se aiheutti edelleen luentaongelmia, vaikka ensisijainen PLC-taajuus 86 kHz oli häiriötön.



Kuva 6.21. Taajuusmuuttajien poiskytkennän jälkeen jäljelle jäänyt ilmeisesti hakkuriteholähteen aiheuttama kapeakaistainen häiriö noin 74-75 kHz taajuudella ja PLC-luentasignaalit.

6.4 Asiakaslaitteiden aiheuttamat häiriöjännitteet suhteessa standardien raja-arvoihin

Tutkittujen tapausten perusteella näyttää siltä, että selvästi olemassa olevia ja suunniteltuja raja-arvoja pienemmätkin häiriöjännitteet aiheuttavat luentaongelmia nykyisissä energiamittareiden PLC-luentajärjestelmissä. Standardissa CISPR 11 induktiokuumentimien johtuville häiriöille määritelty raja-arvo taajuusalueella 50...148,5 kHz on 90...80 dBµV (pienenee lineaarisesti taajuuden logaritmin funktiona). Mittauskaistanleveys huomioon ottaen raja-arvo on selvästi suurempi kuin 150 kHz ja sitä suuremmilla taajuuksilla vallitseva raja-arvo. Alle 150 kHz taajuuksilla mittaukset tehdään 200 Hz mittauskaistanleveydellä kun taajuusalueella 150 kHz...30 MHz mittauskaistanleveys on 9 kHz. Esimerkiksi standardin CISPR 11 häiriöjännitteiden raja-arvot alle 150 kHz taajuuksilla ovat mittauskaistanleveydestä johtuva korjaus (kts. luku 6.1) huomioiden taajuudella 148,5 kHz jopa 31...47 dB suurempia kuin taajuudella 150 kHz. Radioliikenteen häiriintymisen näkökulmasta tämä voi olla perusteltua ja riittävä vaatimus, mutta sähköverkkotiedonsiirron häiriintymisen näkökulmasta nykyiset ja esimerkiksi IEC/TS 62578 Ed. 2:ssa ehdotetut raja-arvot (kts. luku 2) tuntuvat liian suurilta. Pienimmät mitatuista luentaongelmia aiheuttaneista häiriöjännitteistä olivat vain noin 60 dBµV huippuarvoilmaisijalla mitattuna. Tässä mielessä esimerkiksi CISPR 11 raja-arvoja sopivampi lähtökohta taajuusalueella 2...150 kHz sallittaville häiriöjännitteille voisi PLC:n näkökulmasta olla ainakin taajuusalueen yläpäässä useimmissa nykyisissä EMC standardeissa sovellettava taajuuden 150 kHz raja-arvo 66 dBµV quasi-peak-ilmaisijalla mitattuna, mahdollisesti korjattuna hieman alaspäin kapeammasta mittauskaistanleveydestä johtuen. Jos näin pienen häiriöjännitteen raja-arvon määrittely koko PLC-taajuusalueelle on tehoelektronikkalaitteiden näkökulmasta ongelmallista, olisi ehkä mahdollista

sallia osalla PLC taajuusalueesta (tai tietyillä taajuuksilla, joilla PLC-järjestelmiä ei ole yleisesti käytössä) suurempia häiriötasoja.

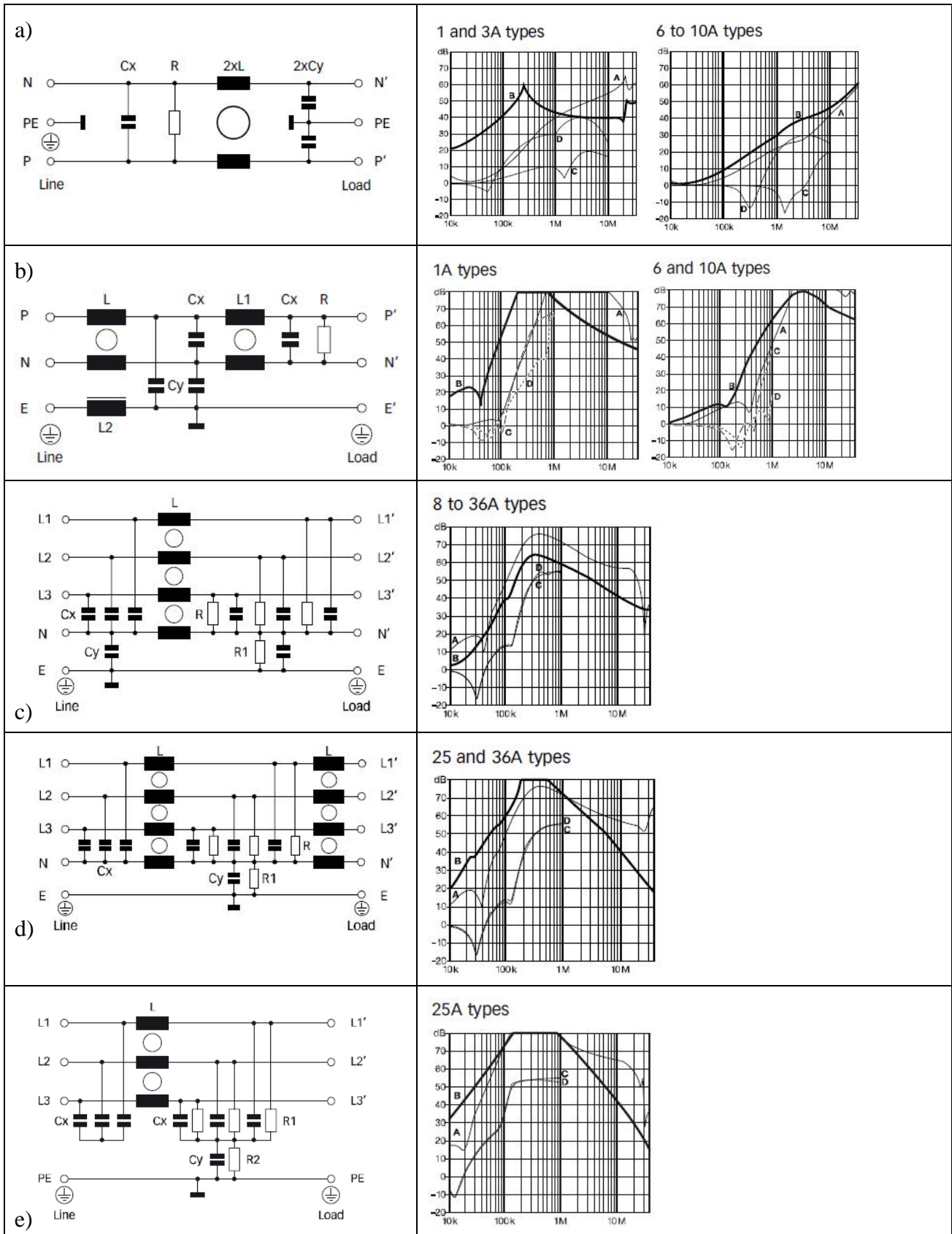
6.5 Häiriöongelmien korjaaminen

Havaitun häiriöongelman (PLC-luennan häiriintyminen asiakaslaitteen vaikutuksesta tai asiakaslaitteen häiriintyminen PLC-luennan vaikutuksesta) korjaamiseen parhaiten soveltuvat keinot riippuvat häiriöongelman aiheuttajasta. Häiriölähteen paikantamiseen soveltuvaa systemaattista menetelmää on käsitelty luvussa 7. Häiriötapaüksissa olisi aina hyvä selvittää, ovatko häiritsevä ja häiriintyvä laite kunnossa ja oikein asennettu. Asennusvirheet ovat potentiaalinen ongelmien syy erityisesti taajuusmuuttajien tapauksessa. Jos asennus on esimerkiksi taajuusmuuttajan tapauksessa tehty virheellisesti, tai hakkuriteholähde on viallinen, EMC-suotimen asennuskaan ei välttämättä aina poista häiriöongelmaa. Jos sekä PLC-laitteisto että häiritsevä (tai häiriintyvä) asiakaslaite ovat kunnossa, häiriöongelman ratkaisuun on käytettävissä esimerkiksi seuraavia keinoja:

- EMC-suotimen asentaminen häiritsevän (tai häiriintyvän) laitteen ja verkon väliin
- 3-vaihejärjestelmissä häiritsevän (tai häiriintyvän) laitteen siirtäminen eri vaiheelle
- Keskittimen siirtäminen eri kohtaan verkossa
- Häiritsevän (tai häiriintyvän) laitteen siirtäminen eri kohtaan verkossa
- Toistimien tai toisen keskittimen lisääminen verkkoon

Aiemmin esimerkiksi EMC-suotimia valmistavalla Schaffnerilla oli erityisesti PLC-sovelluksia varten suunniteltuja suotimia, mutta niitä ei enää nykyisin valmisteta. Nykyisin saatavilla olevat EMC-suotimet on suunniteltu lähinnä yli 150 kHz taajuuksille, mikä ilmenee myös suotimien vaimennuskuvaajista. Niiden vaimennus on kuitenkin vielä kohtuullisen suuri myös CENELC A-bandin yläpäässä (taajuuksilla 60...95 kHz), jossa useimmat nykyisin markkinoilla olevat energiamittareiden luentaan käytettävät PLC-järjestelmät toimivat. Kuvassa 6.22 on esitetty muutamia esimerkkejä yksi- ja kolmivaiheisista EMC-suotimista ja niiden vaimennuksista taajuuden funktiona.

Vaimennuskuvaajat mitataan yleensä standardin CISPR 17 mukaisesti niin, että suodin on päätetty sekä verkon että laitteen puolella 50 ohmin impedanssiin. Verkkoon asennetun EMC-suotimen todellinen vaimennus riippuu syöttävän verkon impedanssista ja impedanssista suotimeen liitetyn laitteen puolella. Tästä johtuen suodinvalmistajat yleensä ilmoittavat vaimennukset lisäksi parilla muullakin impedanssiyhdistelmällä, jotta suotimen käyttäytymistä erilaisissa ympäristöissä on mahdollista arvioida.



Kuva 6.22. Yksi- ja kolmivaiheisten EMC suotimien kytkentäkaavioita ja CISPR 17 mukaisesti mitatut vaimennuskäyriä. A = 50Ω/50Ω symmetrinen, B = 50Ω/50Ω epäsymmetrinen, C = 0.1Ω/100Ω symmetrinen, D = 100Ω/0.1Ω symmetrinen. Tyyppejä c) ja d) on käytetty yleisesti kolmivaiheisten tehoelektronikkalaitteiden PLC-luennalle aiheuttamien häiriöiden vaimentamiseen.

Häiritsevän tai häiriintyvän laitteen siirtäminen eri vaiheelle saattaa joissain tapauksissa olla myös käyttökelpoinen keino häiriöongelman ratkaisemiseksi. Projektin kuluessa kertyneiden kokemusten perusteella vaiheiden välinen vaimennus on kuitenkin yleensä vain noin 5...10 dB luokkaa, joten jos häiriöt ovat voimakkaita, niin laitteen siirtämisestä toiselle vaiheelle ei välttämättä ole apua.

Joissain tapauksissa myös keskittimen siirtäminen verkossa eri kohtaan saattaa parantaa luentojen onnistumisprosenttia. Samoin häiritsevän laitteen siirtäminen (jos mahdollista) verkossa niin, että häiritsevän ja häiriintyvän laitteen välille tulee enemmän häiriösignaalia vaimentavaa verkkoa saattaa parantaa tilannetta riittävästi niin, että luenta alkaa toimia. Uusimmissa PLC-järjestelmissä mittarit yleensä toimivat haluttaessa (tai automaattisesti) myös toistimina, mutta jos näin ei ole tai mittareita on verkossa jossain kohtaa liian harvassa, toistimia lisäämällä PLC-luenta usein saadaan toimimaan, erityisesti jos ongelmana on signaalin liiallinen vaimeneminen eikä häiriötaso ole yhteysvälillä liian suuri. Toistimen avulla signaalitaso (ja signaali-kohinasuhde, edellyttäen että häiriötaso ei ole liian suuri) saadaan pysymään riittävän suurena kokoyhteysvälin.

Myös PLC-järjestelmien välillä on todennäköisesti eroja häiriönsiedossa mm. modulaatio- ja signaalinkäsittelymenetelmien eroista johtuen. Esimerkiksi Fortum Sähkönsiirto on ainakin toistaiseksi raportoinut varsin vähän häiriötapauksia asennettuun mittarimäärään nähden. Vuoden 2012 loppuun mennessä käyttöön otettuja mittareita oli noin 400 000 ja raportoituja häiriötapauksia alle 100 [Pyh13a]. Vaikka käyttökokemuksia on kertynyt vasta melko lyhyeltä ajalta (ensimmäisenä asennetuista mittareista reilu 2 vuotta), ovat luvut kuitenkin varsin lupaavia.

Hipaisuhimmenninlamppujen tapauksessa on käytetty suotimien ohella myös ratkaisumallia, jossa asiakas voi valita haluamansa ratkaisutavan häiriöongelmaan

- a) kaupan purku, myyjä hyvittää ostohinnan
- b) valaisimen muutostyö, jossa hipaisukytkin ohitetaan ja korvataan kytkimellisellä virtajohdolla, lasku muutostyöstä verkkoyhtiölle
- c) muutostyön hintaa vastaava rahallinen korvaus asiakkaalle.

Korjaus ja hyvitys ovat mahdollisia ainoastaan ennen PLC-luennan asennusta hankittujen valaisinten tapauksessa [Sal12a].

Pitkällä tähtäimellä tulisi kuitenkin pyrkiä siihen, että standardoinnilla saataisiin elektronisten kuormien ja PLC:n väliset häiriöongelmat hallintaan niin, että molempia pystyttäisiin käyttämään sähköverkossa ilman suurempia ongelmia.

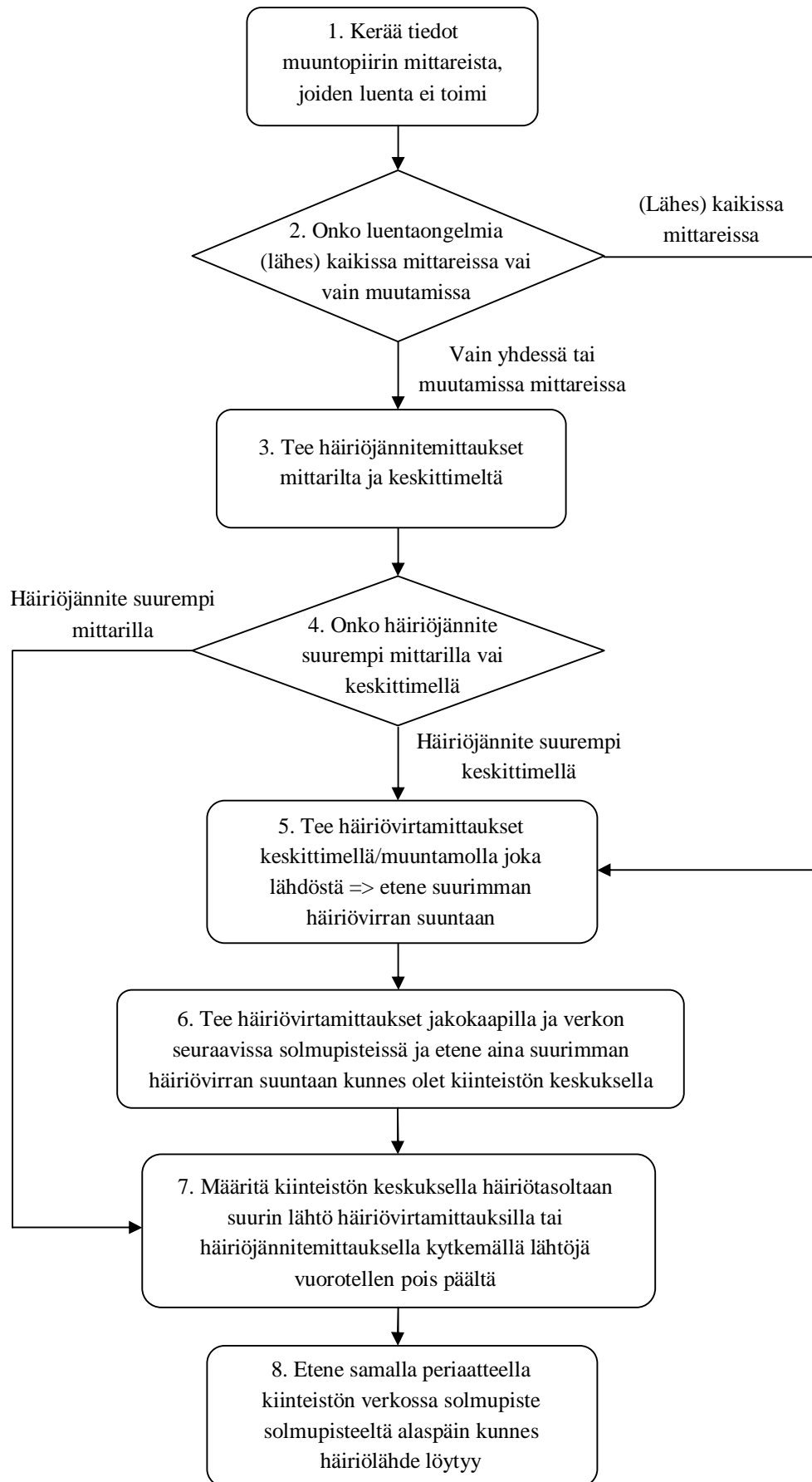
7 Häiriölähteen paikannus

Sähköverkkotiedonsiirtoa käyttävien etäluettavien energiamittareiden etäluentaongelma voi koskea yksittäistä mittaria tai useampia mittareita samanaikaisesti (jopa koko muuntopiiriä). Molemmissa tapauksissa luentaongelman korjaaminen edellyttää häiriölähteen paikantamista. Joissain tapauksissa häiriölähde saattaa selvitä esimerkiksi häiriön esiintymisajankohdan perusteella tai se voi olla helposti paikannettavissa kytkemällä esimerkiksi ryhmäjohtoja tai laitteita vuorotellen pois päältä ja katsomalla milloin häiriö poistuu. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, esimerkiksi tilanteissa, joissa kymmeniä mittareita tai jopa koko muuntopiiri on luennan ulkopuolella, on mahdollisia häiriölähteen sijaintipaikkoja niin paljon, että esimerkiksi muuntamon kaikkien lähtöjen ja niitä seuraavien jakokaappien lähtöjen kytkeminen vuorotellen jännitteettömäksi esimerkiksi kaupungin ydinkeskustan alueella on käytännössä vaikea toteuttaa. Tällöin tarvitaan menetelmä, jolla häiriölähde pystytään paikantamaan käytönaikaisilla mittauksilla ilman jännitekatkoja.

7.1 Paikannuksessa käytetty menetelmä

Projektin kuluessa kehitettiin suuritaajuisiin jännite- ja virtamittauksiin perustuvaa menetelmä, jolla häiriölähde voidaan paikantaa muuntamolta lähtien aina häiriöitä tuottavaan asiakaslaitteeseen asti. Jotain päätelmiä häiriölähteen sijainnista voidaan tehdä jo sen perusteella kuinka suuressa osassa mittareista luenta ei toimi ja missä kyseiset mittarit sijaitsevat. Häiriönpaikannusmenetelmässä edetään systemaattisesti vaiheittain kuvassa 7.1 esitetyn vuokaavion mukaan.

Menetelmää testattiin projektin kuluessa useissa kohteissa eri verkkoyhtiöiden verkoissa ja se todettiin varsin toimivaksi. Jaksottaisesti esiintyvissä häiriöissä häiriölähteen tunnistamisessa voi käyttää apuna myös perustaaajuista virtamittausta, jolla nähdään kuinka suuri kuorma kytkeytyy päälle ja pois häiriötason vaihtelun tahdissa. Virran suuruuden (ja mahdollisesti aaltomuodon) perusteella saattaa olla mahdollista tunnistaa tai rajata kytkeytyvä kuorma.



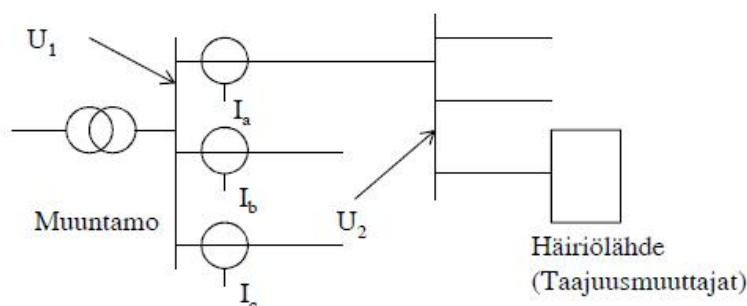
Kuva 7.1. Vuokaavio PLC-luentaongelmia aiheuttavan häiriölähteen systemaattisesta paikantamisesta.

Mittalaitteiksi menetelmään soveltuvat esimerkiksi suurtaajuusspektrianalysoitsija ja suurtaajuusvirtamuuntaja ja suurtaajuusjännitemittapää, joita on käsitelty tarkemmin luvussa 8. Oleellista on, että virtamuuntaja ja jännitemittapää vaimentavat 50 Hz ja yliaaltotaajuuksia riittävästi niin, että ne eivät ylikuormita mittalaitetta ja mittalaitteen dynamiikka voidaan hyödyntää suuritaajuisien signaalien mittaamiseen.

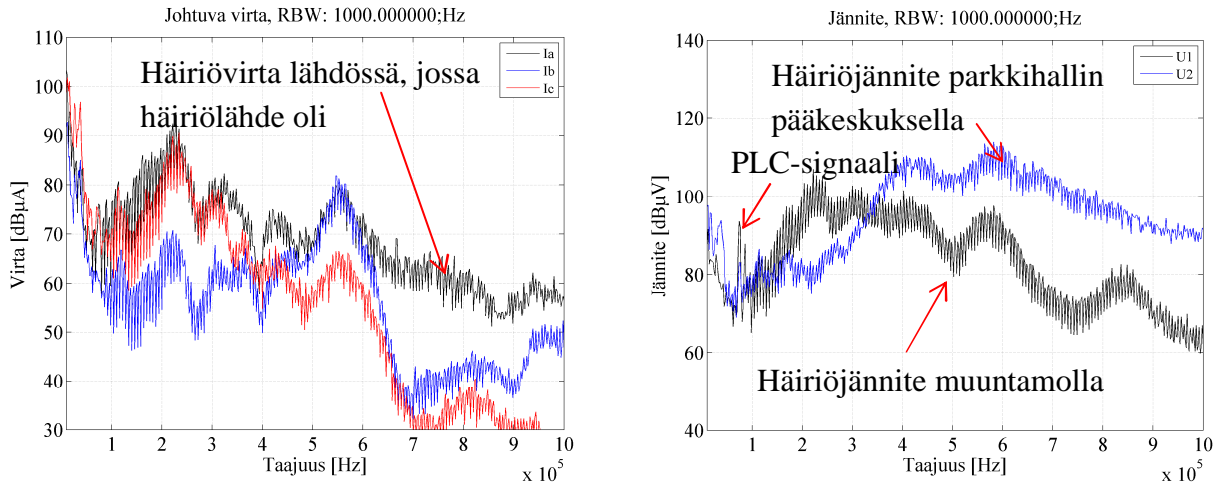
7.2 Häiriöitä aiheuttaneiden taajuusmuuttajien paikannus

Tarkastellaan ensimmäisenä esimerkkinä tapausta, jossa kerrostaloalueella valtaosaa muuntopiirin mittareista ei saatu luettua asiakaslaitteiden aiheuttamien häiriöiden vuoksi. Yksinkertaistettu verkkokaavio kohteesta on esitetty kuvassa 7.2. Kohteessa tehtiin ensin häiriöjännitemittaukset yhden kerrostalon pääkeskuksella, jossa mittareita ei saatu luettua ja muuntamolla, jossa keskitin sijaitsi. Mittausten perusteella häiriö oli voimakkaampi muuntamolla, joten paikannusmittaukset aloitettiin sieltä tekemällä häiriövirtamittaukset muuntamon eri lähdöistä (joka lähdössä samasta vaiheesta).

Häiriövirroiltaan suurimpien lähtöjen mittaustulokset on esitetty kuvassa 7.3 a). Yhdessä lähdöistä häiriövirta on suurempi kuin muissa. Ero häiriövirraltaan toiseksi suurimpaan lähtöön on suurin suurilla taajuuksilla, jossa verkon aiheuttama vaimennus on suurin. Häiriövirraltaan suurin lähtö syöti kerrostalon parkkihallia, jonka pääkeskuksessa oli myös parkkihallin ilmanvaihdon taajuusmuuttajat. Pääkeskuksella tehtiin häiriöjännitemittaus, ja kuten kuvasta 7.3 b) ilmenee häiriöjännite on parkkihallin pääkeskuksella pääsääntöisesti suurempi kuin muuntamolla. Ero on jännitemittauksessakin suurin suurilla taajuuksilla. Pääkeskuksessa oli näkyvillä 6 kpl taajuusmuuttajia, joten lukuisten ryhmäjohtojen häiriövirtoja ei lähdetty mittaamaan erikseen vaan ensin kokeiltiin kytkeä taajuusmuuttajat pois päältä jotta nähtiin ovatko häiriöt peräisin niistä. Taajuusmuuttajien poiskytkennän jälkeen häiriötaso putosi oleellisesti (kuten luvun 6 kuvasta 6.19 ilmenee), joten lisämittauksiin ei tältä osin ollut tarvetta.



Kuva 7.2. Verkkokaavio PLC-luentaongelmia aiheuttaneen taajuusmuuttajan paikantamisesta.

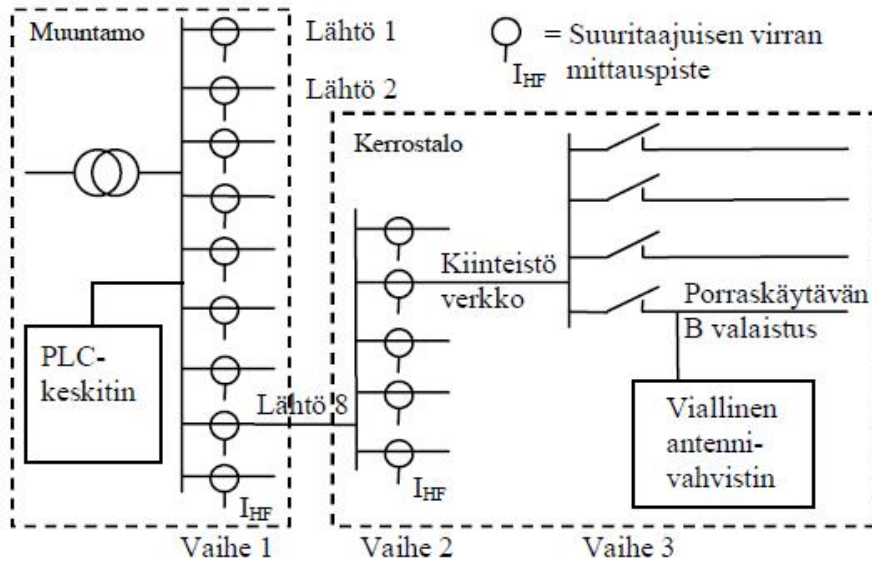


Kuva 7.3. a) Häiriövirtamittaukset muuntamon häiriövirroiltaan suurimmista lähdöistä, b) häiriöjännitemittaukset muuntamolla ja parkkihallin pääkeskuksella.

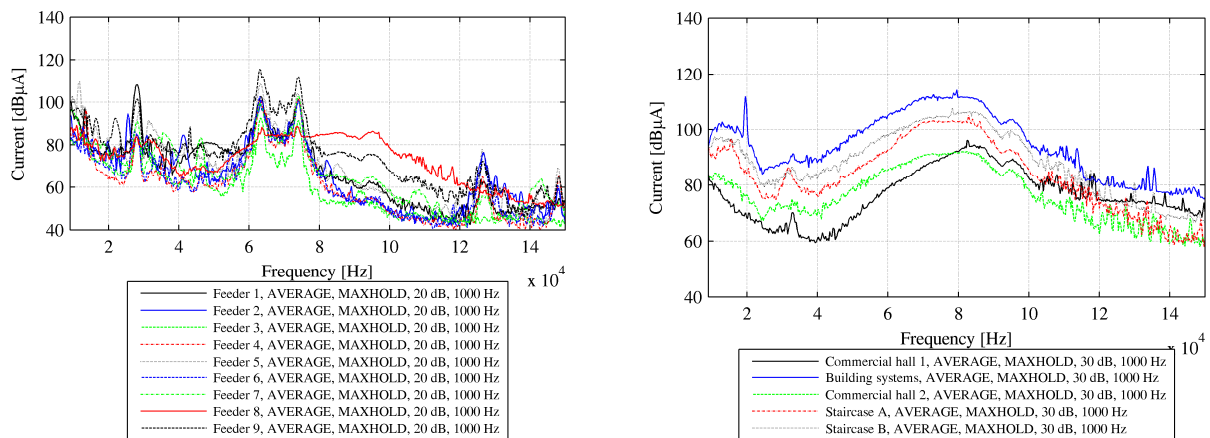
7.3 Kerrostalon viallisen antennivahvistimen paikannus

Tarkastellaan toisena esimerkkinä tapausta, jossa kerrostalon ikääntynyt tai viallinen antennivahvistin aiheutti häiritä energiamittareiden PLC-luontaa. Tässä tapauksessa noin 330 mittaria oli poissa luennasta häiriön vuoksi.

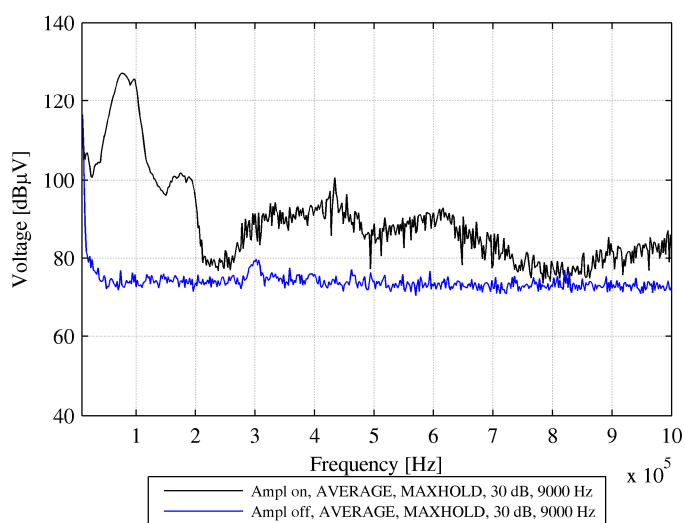
Yksinkertaistettu verkkokaavio kohteesta on esitetty kuvassa 7.4. Paikannusmittaukset aloitettiin muuntamolta (vaihe 1) kaikkien lähtöjen virtamittauksilla. Suurin häiriövirta oli lähdössä 8, joka syötti kerrostaloa (kuva 7.5 a). Tällä lähdöllä seuraava solmupiste oli kerrostalon pääkeskus, joten seuraavat häiriövirtamittaukset (vaihe 2) tehtiin siellä. Pääkeskukselle tuleva syöttö haarautui liiketiloille, kiinteistöverkkoon ja rappukäytävien A ja B monimittarikeskuksille. Näistä suurin häiriövirta oli kiinteistöverkon haarassa (kuva 7.5 b). Kiinteistöverkon ryhmäjohtojen johdonsuojakytkimet olivat samassa pääkeskustilassa, ja suurin osa kuormista oli sellaisia, joiden lyhytaikainen poiskytkentä ei aiheuttanut suurta haittaa, joten kuormia päätettiin kytkeä yksi kerrallaan pois päältä johdonsuojakytkimien avulla ja samalla seurattiin häiriöjännitemittauksella milloin häiriötaso oleellisesti pienenee. Sama seuranta olisi voitu tehdä häiriövirtamittauksellakin, mutta tässä tapauksessa haluttiin selvittää häiriöjännitteen suuruus, koska EMC-standardeissa laitteiden häiriöpäästöille asetetut raja-arvot annetaan tyypillisesti jännitteinä. Häiriötaso pieneni oleellisesti (lähes mittalaitteen taustakohinatasolle) kun toisen rappukäytävän valaistuksen ryhmäjohto kytkettiin jännitteettömäksi (kuva 7.6). Rappukäytävän valaistuksen päälle- ja poiskytkennällä ei näyttänyt olevan vaikutusta häiriötasoon, joten häiriölähdettä alettiin etsiä muista ko. ryhmäjohtoon kytketyistä kuormista. Häiriön aiheuttajaksi paljastui siivouskomeroon asennettu antennivahvistin (käsitelty tarkemmin luvussa 6.2.1), jonka käyttösähkö oli otettu valaistuksen ryhmäjohtosta. Kun antennivahvistin otettiin jännitteettömäksi, häiriöt poistuivat.



Kuva 7.4. Yksinkertaistettu verkkokaavio viallisen antennivahvistimen paikannusmittauksista.



Kuva 7.5. Häiriövirtamittaukset a) muuntamon eri lähdöistä, b) kerrostalon pääkeskuksen eri haaroista.



Kuva 7.6. Häiriöjännitemittaus kerrostalon pääkeskuksella, kun valaistuksen ryhmäjohto ja antennivahvistin olivat jännitteisenä (ampl on) ja jännitteettöminä (ampl off).

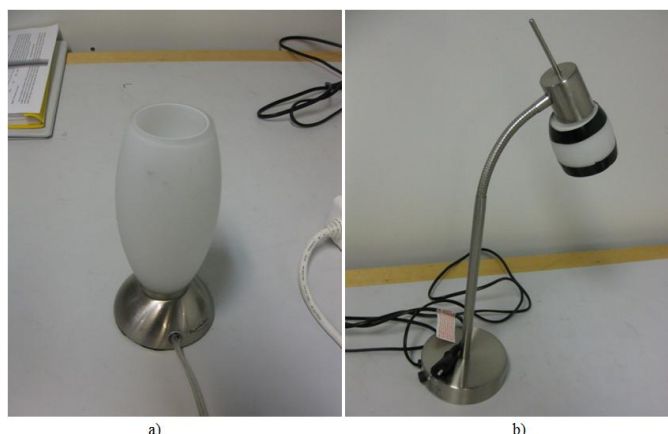
Samanaikaisesti esimerkiksi oskilloskoopilla ja sopivilla antureilla tehtävillä jännite- ja virtamittauksilla olisi teoriassa mahdollista määrittää yhdellä mittauksella myös häiriötehon suunta, jolloin olisi mahdollista päätellä kummalla puolen mittauspistettä häiriölähde sijaitsee. Tällaista mittausta ei projektin puitteissa kuitenkaan tarkemmin tutkittu ja käytännössä edellä esitetty pelkkään virtamittaukseen perustuva menetelmä on helppokäyttöisempi ainakin nykyisin kaupallisesti saatavissa olevilla mittalaitteilla ja toimi projektin kuluessa tutkituissa tapauksissa (6 kpl) luotettavasti ja riittävän nopeasti.

8 Asiakaslaitteiden häiriintyminen PLC-signaalista

8.1 *Hipaisuhimmenninlampujen laboratoriomittaukset*

Projektin osana tehtiin tieteellinen julkaisu, jossa tutkittiin sähköverkon tiedonsiirron aiheuttamaa hipaisuhimmennin valaisinten toimintahäiriöitä. Kyseinen julkaisu esitettiin Viron Tartossa järjestetyssä Power Quality and Supply Reliability -konferenssissa otsikolla ”Interference of touch dimmer lamps due to PLC and other high frequency signals”. Tässä luvussa käsitellään kyseisen paperiin liittyviä laboratoriomittauksia sekä paperin keskeisimpiä tuloksia.

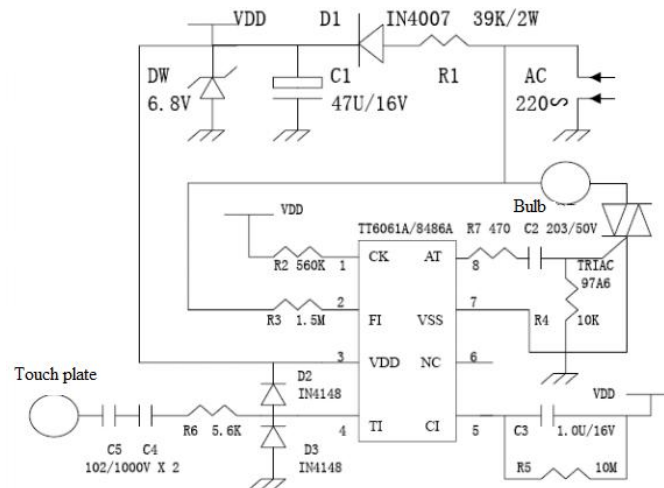
Laboratoriomittauksiin valittiin kaksi erilaista tavallisesta rautakaupasta/yleistavatakaupasta saatavaa hipaisuhimmennin valaisinta. Nämä lamput on esitetty kuvassa 8.1. Molempien valaisinten toimintaperiaate oli seuraava: kun valaisimen metallirunkoon koskettiin, valaisin vaihtoi valaisutilaansa. Molemmilla lampuilla oli neljä valaisutilaa: poissa päältä, tila 1, tila 2 ja tila 3. Tila 3 on valaisuasteeltaan kirkkaampi kuin tila 2 jne. Toimintahäiriö, jonka PLC tiedonsiirto saa aikaan, aiheuttaa lampuissa valaisutilan muutoksia itsestään ilman, että kukaan koskee lampun metalliseen runkoon.



Kuva 8.1. Laboratoriomittauksiin valitut valaisimet a) valaisin 1 ja b) valaisin 2 [Pik12].

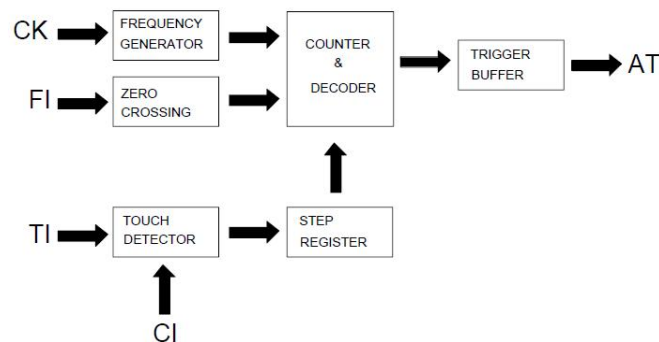
Molemmat valaisimet kytkettiin verkkojännitteeseen pistorasian kautta. Molemmissa valaisimissa lampuna oli halogeenilamppu. Valaisimessa 1 valaisutilan säädön suoritti HYTEC HY-80CM moduuli. Moduulin sisällä oli merkitymätön 8 pinninen mikropiiri, joka ohjasi triakkia. Triakin

avulla säädettiin halogeenilampun valaisuastetta. Valaisimessa 2 sama säätö suoritettiin Heat Lighting Model A-2 moduulissa. Moduulin sisällä oli 8 pinninen TT6061A mikropiiri, joka ohjasi triakkia samalla tavoin kuin valaisimessa 1. Molempien valaisimien piirikaaviot olivat kuvan 8.2 kaltaiset, sillä poikkeuksella, että lampun kanssa sarjaan oli kytketty kela sekä 0,1...0,15 μF kondensaattori oli kytketty rinnan valaisimen verkkosyötön kanssa. Kuvan 8.2 mikropiirin malli viittaa valaisimeen 2.



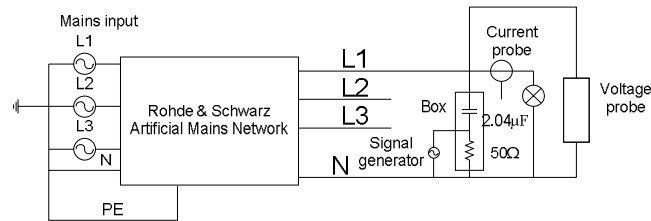
Kuva 8.2. Laboratoriomittauksissa käytettyjen hipaisuhimmennin lampujen piirikaavio [Ton12].

Valaisinten toimintaperiaatteen lohkokaavio on esitetty kuvassa 8.3. Kosketuksen havainnointi tapahtuu pinneissä TI ja CI.

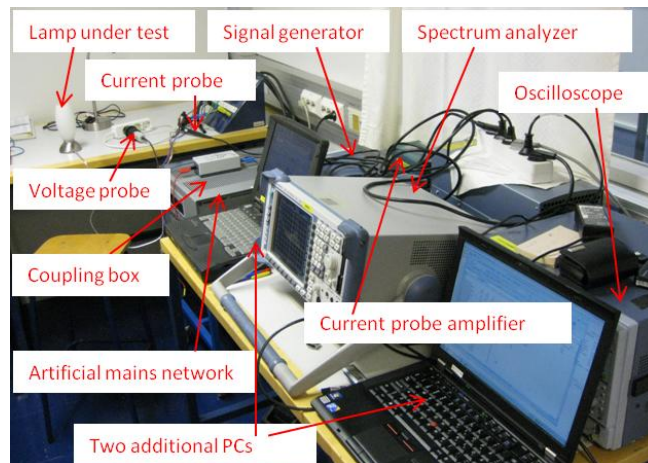


Kuva 8.3. Lamppujen toimintaperiaatteen lohkokaavio [TT12].

Laboratoriomittaukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston Sähköenergiatekniikan laitoksella. Yleiskuva laboratorion kytkennöistä on esitetty kuvassa 8.4 sekä yleiskuva mittausjärjestelyistä laboratoriossa on esitetty kuvassa 8.5. Perusajatuksena laboratoriomittauksissa oli selvittää kahden mittauksiin valitun hipaisuhimmennin valaisimen toiminnan häiriintyvyyden herkkyyttä, kun verkkoon syötettiin PLC-signaalia muistuttavaa kontrolloitua epäjatkovaa sinisignaalia. Tämän lisäksi tarkoitus oli mitata erään suotimen toimintaa. Kyseistä suodinta käytetään yhdessä jakeluverkkoyhtiössä korjaamaan hipaisuhimmennin valaisimien toimintahäiriöitä.



Kuva 8.4. Yleiskuva laboratoriomittausten kytkennöistä [Pik12].



Kuva 8.5. Yleiskuva laboratoriomittausten mittausjärjestelyistä [Pik12].

Verkon suunnasta tulevia korkeataajuisia johtuvia häiriöitä pienennettiin käyttämällä Rhode & Schwarz keinoverkkoa verkon ja mitattavan valaisimen välillä. Kontrolloitu epäjatkuva sinisignaali tuotettiin LeCroy LW 120 signaaligeneraattorilla. Valaisimelle syötetyn verkkojännitteeseen summatun signaalin rakenne oli seuraava: ensiksi 500 ms ei signaalisyyttöä, jonka jälkeen 100 ms sinisignaaliapurske tietyllä amplitudilla ja taajuudella, jonka jälkeen taas 500 ms ei signaalisyyttöä jne. Syötetyn sinisignaalin taajuutta ja amplitudia vaihdeltiin eri mittausten välillä. Mittauksissa käytetyt taajuudet valittiin taajuusalueelta 50 kHz - 200 kHz 10 kHz:n taajuuden välein. Kyseinen taajuusväli kattaa tyypillisesti jakeluverkkoyhtiöissä PLC tiedonsiirtoon käytetyt taajuudet sekä niiden toiset monikerrat. Signaaligeneraattori kytkettiin verkkojännitteeseen käyttäen passiivista ylipäästösuodinta, joka vaimensi 50 Hz jännitesignaalia signaaligeneraattorille sopivaan tasoon.

Valaisimelle menevää virtaa mitattiin virtapihdeillä ja virtapihtien tulosta tarkasteltiin oskilloskoopilla. Virtapihteinä olivat Tektronix TCP305A, jonka lisäksi tarvittiin virtapihdeille tarkoitettu Tektronix TCPA300 vahvistin. Oskilloskoopina mittauksissa oli LeCroy Waverunner LT345ML. Virtamittauksen lisäksi oskilloskoopilla mitattiin signaaligeneraattorilta tulevaa herätesignaalia, jolla indikoitiin purskesignaalin alkuketkeä. Virtamittauksen tarkoituksena oli havainnoida, mikä valaisutila valaisimella kullakin hetkellä oli. Herätesignaalin ja virtamittauksen avulla pystyttiin havainnoimaan kuinka usein syötetty purskesignaali sai valaisimen vaihtamaan valaisutilaa.

Syötetyn signaalin amplitudi mitattiin Rohde & Schwarz ESPI-3 spektrianalyysaattorilla käyttäen Rohde & Schwarz ESH2-Z3 passiivista jännitemittapäätä. Amplitudiarvo saatiin käyttäen spektrianalyysaattorin max hold -toimintaa.

Edellä mainittujen laitteiden lisäksi mittauksissa käytettiin kahta tietokonetta. Toisella näistä koneista ohjelmoitiin syötetyn purskesignaalin muoto ja toisella käsiteltiin mittaustuloksia.

8.1.1 Tuloksia

Molempien valaisinten jokaiselle syötetylle purskesignaalin taajuudelle suoritettiin viisi mittausta. Mittauksen yksi tarkoitus oli selvittää millä purskesignaalin amplitudilla testattava valaisin vaihtoi ensimmäisen kerran valaisutilaansa. Mittaus kaksi selvitti, millä purkesignaalin amplitudilla testattava valaisin vaihtoi läpi kaikki valaisutilansa. Mittauksen kolme tuloksena saatiin kuinka monta kertaa valaisin vaihtoi valaisutilaansa, kun mittauksen kaksi amplitudilla olevia puresignaaleja syötettiin verkkoon 200 kappaletta. Mittauksen neljä tarkoitus oli selvittää kuinka monta kertaa testattava valaisin vaihtoi valaisutilaansa, kun valaisimelle 1 syötettiin $\frac{3}{4}$ ja valaisimelle 2 syötettiin $\frac{1}{2}$ signaaligeneraattorin maksimi ulostulosta. Mittauksessa viisi laskettiin kuinka monta kertaa testattava valaisin muutti valaisutilaansa, kun valaisimelle syötettiin signaaligeneraattorin suurinta mahdollista ulostulojännitettä.

Mittausten tulokset on esitetty valaisimelle 1 taulukossa 8-1 ja valaisimelle 2 taulukossa 8-2. Taulukoissa 8-1 ja 8-2 mitatut jännitearvot on ilmoitettu dB μ V ja valaisutilamuutosten määrät kappalemäärinä. Taulukoissa 8-1 ja 8-2 merkintä NaN tarkoittaa, että kyseisellä taajuudella testattavaa valaisinta ei saatu muuttamaan valaisutilaansa laboratoriolaitteistolla. Merkintä ”-” tarkoittaa, että valaisimelle 1 ei tehty mittausta neljä, koska mittauksen kaksi amplitudi oli enemmän kuin $\frac{3}{4}$ signaaligeneraattorin suurimmasta ulostulojännitteestä.

Taulukko 8-1. Laboratoriomittausten tulokset valaisimelle 1 [Pik12].

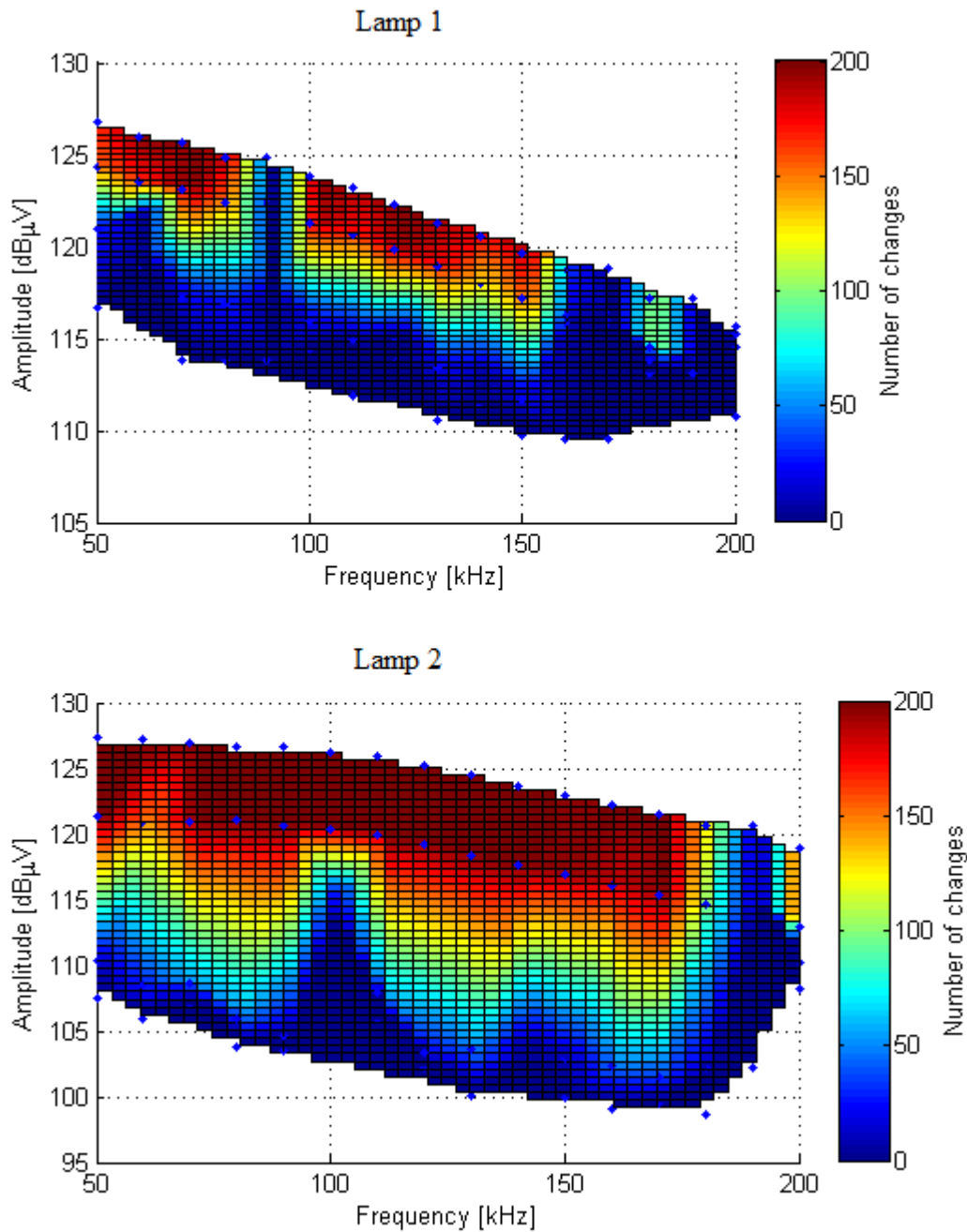
Frequency (kHz)	Level for the first lightning state change (dB μ V)	Stepping level (dB μ V)	Number of state changes with 200 stepping level burst	Voltage level for meas. 4 (dB μ V)	Number of state changes with meas 4. level 200 burst	Voltage level for meas. 5 (dB μ V)	Number of state changes with 200 meas. 5 level burst
50	116,7	121	27	124,29	157	126,82	172
60	118,9	121,7	5	123,5	172	126	199
70	113,8	117,2	23	123,1	196	125,7	198
80	113,8	116,9	28	122,4	146	124,86	180
90	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
100	114,4	116	24	121,3	189	123,8	198
110	111,9	114,9	4	120,7	171	123,2	186
120	114	115,1	2	119,8	191	122,3	200
130	110,6	113,4	21	118,9	174	121,3	188
140	111,4	113,2	8	118	131	120,6	174
150	109,7	111,7	20	117,2	161	119,6	190
160	109,5	115,9	8	116,3	16	118,8	32
170	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
180	113,1	113,8	41	114,5	110	117,2	113
190	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
200	110,8	115,7	15	-	-	115,3	9

Taulukko 8-2. Laboratoriomittausten tulokset valaisimelle 2[Pik12].

Frequency (kHz)	Level for the first lightning state change (dBuV)	Stepping level (dBuV)	Number of state changes with 200 stepping level burst	Voltage level for meas. 4 (dBuV)	Number of state changes with meas. 4 level 200 burst	Voltage level for meas. 5 (dBuV)	Number of state changes with 200 meas. 5 level burst
50	107,5	110,4	18	121,4	200	127,4	200
60	106	108,5	36	120,9	148	127,2	200
70	107,1	108,6	60	121	200	126,9	200
80	103,8	106	52	121,1	200	126,7	200
90	103,5	104,7	4	120,6	198	126,6	200
100	113,6	114,7	8	120,4	200	126,2	200
110	106	108	64	119,9	200	126	200
120	102,2	103,4	28	119,2	199	125,2	200
130	100,1	103,6	52	118,4	200	124,5	200
140	102,8	103,8	4	117,7	200	123,7	200
150	99,9	103	16	116,9	193	122,9	194
160	99,1	102,3	50	116,1	184	122,2	200
170	99,5	101,5	39	115,4	197	121,5	200
180	98,6	102,2	4	114,6	88	120,6	112
190	119,2	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
200	108,2	110,2	8	113	200	119	200

Taulukosta 8-1 nähdään, että valaisin 1 ei muuttanut valaisutilaansa ollenkaan kun syötetyn purskesignaalin taajuus oli 90 kHz, 170 kHz ja 190 kHz. Valaisimen 1 tila voi muuttua myös näillä taajuuksilla, mutta johtuen laboratoriolaitteiston rajoitteista, riittävän suuriamplitudisia jännitesignaaleja ei voitu luoda kyseisille taajuuksille. Taulukosta 8-2 nähdään, että signaalipurskeen taajuudella 190 kHz valaisin 2 vaihtoi ainoastaan kerran valaisutilaansa. Laboratoriolaitteiston rajallisuudesta johtuen myös valaisin 2 saattaisi kyseiselle signaalipurskeella muuttaa valaisutilaansa, mutta laboratoriolaitteisto ei kyennyt tuottamaan riittävän suurta amplitudia purskesignaalille.

Vertailtaessa taulukoita 8-1 ja 8-2 nähdään selvästi, että valaisin 2 häiriintyy huomattavasti herkemmin PLC-tyyppisistä signaaleista kuin valaisin 1. Amplituditasot sekä yhdelle muutokselle että kaikkien valaisutilojen läpikäymiselle ovat selvästi alemmat valaisimella 2. Valaisin 2 teki myös valaisutilan muutoksia enemmän kuin valaisin 1 lukuun ottamatta tilannetta, jolloin signaalipurskeen taajuus oli 180 kHz. Tällöin valaisin 1 teki enemmän valaisutilan muutoksia pienemmällä purskesignaalin amplitudilla. Valaisutilan muutosten lukumäärät jokaisen 200 signaalipurskeen ajon jälkeen taajuuden ja amplitudin funktiona valaisimille 1 ja 2 on esitetty kuvassa 8.6. Kuvassa 8.6 siniset pisteet merkitsevät oikeita mitattuja pisteitä. Pisteiden välinen pinta on tehty MATLAB ohjelmistolla käyttäen lineaarista interpolaatiota. Kuva 8.6 esittää taulukoiden 8-1 ja 8-2 tulokset toisessa muodossa.



Kuva 8.6. Valaisutilojen muutosten lukumäärät jokaisen 200 signaalipurskeen ajon jälkeen molemmille valaisimille.

Valaisimen 1 toiminta alkoi häiriintyä, kun signaalipurskeen amplitudi oli yli 110 dBµV . Valaisin 1 kävi läpi kaikki valaisutilansa, kun signaalipurskeen amplitudi oli yli 112 dBµV . Valaisin 1 vaihtoi valaisutilaansa usein kun signaalipurskeen amplitudi oli yli 120 dBµV paitsi taajuuksilla 90 kHz, 160 kHz, 170 kHz, 190 kHz ja 200 kHz. Kuvasta 8.6 nähdään, että herkimvät alueet valaisimelle 1 ovat taajuusvälillä 50 kHz - 80 kHz sekä 100 kHz- 150 kHz. Valaisimen 1 häiriintyvyyssrajat ovat alemmat kuin mitä standardi EN 50065-1 sallii yksivaiheiselle tiedonsiirrolle. Käyttäen lähteessä [Cop02] esitettyä talojen välisen PLC-kanavan vaimenemisarvoa

25dB/100 m, voidaan kaavan 8.1 avulla laskea kuinka pitkä PLC:tä tuottavan laitteen ja valaisimen välinen etäisyys voi vielä aiheuttaa ongelmia valaisimen 1 toiminnassa. Tämä etäisyys on voimakkaasti riippuvainen taajuudesta, käytetystä lähetystehosta sekä PLC-kanavan ominaisuuksista ja voi olla huomattavasti pienempi kuin mitä kaava 8.1 antaa. Valaisimelle 1 signaalipurskeen taajuudella 140 kHz tämä etäisyys on pienempi kuin 90,4 m, kun laskennassa käytetään standardin EN 50065-1 suurinta sallittua lähetystehoa 134 dB μ V .

$$l < \frac{a-b}{c} = \frac{134-111.4}{0.25} m = 90.4m \quad (8.1)$$

where l = etäisyys PLC:tä tuottavan laitteen ja lampun välillä jolloin ongelmia saattaa alkaa ilmenemään

a = lähetysamplitudi [dB μ V]

b = amplitudi ensimmäiselle muutokselle [dB μ V]

c = PLC kanavan vaimenemisarvo [dB/m]

Valaisimen 2 toiminta alkoi häiriintyä, kun signaalipurskeen amplitudi oli yli 100 dB μ V . Valaisin 2 kävi läpi kaikki valaisutilansa, kun signaalipurskeen amplitudi oli yli 102 dB μ V . Valaisin 2 vaihtoi valaisutilaansa melkein joka kerta kun signaalipurskeen amplitudi oli yli 120 dB μ V paitsi taajuuksilla 60 kHz, 180 kHz ja 190 kHz. Kuvasta 8.6 nähdään, että valaisin 2 on herkkä häiriintymään taajuusalueella 50 kHz - 190 kHz. Valaisimen 2 häiriintyvyyssrajat ovat alemmat kuin mitä standardi EN 50065-1 sallii yksivaiheiselle tiedonsiirrolle. Käyttäen samoja oletuksia kuin valaisimelle 1 sekä kaavaa 8.1 saadaan PLC:tä tuottavan laitteen ja valaisimen väliseksi etäisyydeksi, jonka sisällä ongelmia voi aiheutua, taajuudella 130 kHz 135,6 m. Yhtäläillä kuin valaisimen 1 tapauksessa tämä etäisyys on voimakkaasti riippuvainen taajuudesta, käytetystä lähetystehosta sekä PLC-kanavan ominaisuuksista.

Testit osoittivat, että molemmat testattavat valaisimet saattavat häiriintyä EN 50065-1 standardin täyttävistä PLC signaaleista. Häiriintyvyyden herkkyys on riippuvainen purksesignaalin taajuudesta. Joillakin taajuuksilla laboratorioympäristössä ei saatu aikaan lamppujen valaisutilojen muutoksia. Joissain tapauksissa PLC kommunikaatiotaajuuden toinen moniketa voi myös aiheuttaa hipaisuhimmenninvalaisimien toimintahäiriöitä. Näissä tapauksissa toisen monikerran vaimeneminen suhteessa PLC-kommunikaation perustaajuuteen tulee olla pienempää kuin 20 dB. Laskennallisena tuloksena saatiin, että hipaisuhimmenninvalaisimien toimintahäiriöitä saattaa ilmentyä, vaikka lampun ja PLC:tä tuottavan laitteen välinen etäisyys on yli 100 m.

8.1.2 PLC:n aiheuttaman hipaisuhimmenninvalaisimien toimintahäiriön poistaminen plug-in suotimella

Edellisessä luvussa kuvatussa laboratorioympäristössä mitattiin myös erään pistorasiaan asennettavan plug-in tyyppisen suotimen toimintaa. Suodin on Marmitek FM10 ja se on esitetty kuvassa 8.7. Kyseinen suodin on suunniteltu kodin sisäisiin PLC-järjestelmiin pienentämään kuormien aiheuttamaa PLC signaalin vaimentumista ja se on viritetty 120 kHz taajuudelle [FM12]. Kyseistä suodinta käytetään eräässä jakeluverkkoyhtiössä poistamaan PLC:n aiheuttamia hipaisuhimmenninlamppujen toimintahäiriöitä. Karkeasti hintaa suotimelle kertyy 33 €- 55 € ilman rahtimaksuja. Laboratorioympäristössä suodin kytkettiin valaisimen ja signaaligeneraattorin väliin.



Kuva 8.7. Marmitek FM10 plug-in suodin [FM12].

Suotimen vaimennus mitattiin syöttämällä suurinta ulostulojännitettä signaaligeneraattorista ja mittaamalla signaalipurskeen amplitudi ennen ja jälkeen suotimen. Tämän lisäksi suodinta ennen mitattiin millä purskesignaalin amplitudilla testattava valaisin vaihtoi ensimmäisen kerran valaisutilaansa sekä millä purkesignaalin amplitudilla testattava valaisin vaihtoi läpi kaikki valaisutilansa. Tulokset näistä mittauksista on esitetty taulukossa 8-3 valaisimelle 1 ja taulukossa 8-4 valaisimelle 2.

Taulukko 8-3. Laboratoriomittausten tulokset valaisimelle 1 suotimen ollessa asennettu [Pik12].

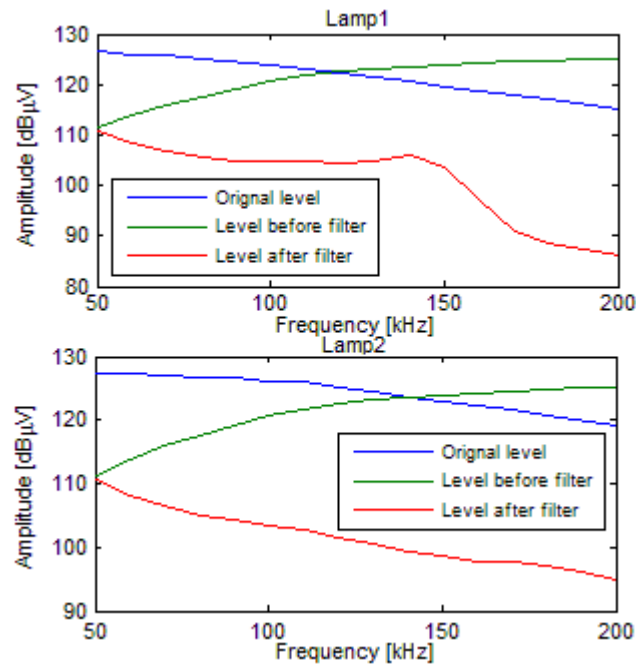
Frequency (kHz)	Level for the first lightning state change (dBuV)	Stepping level (dBuV)	Maximum output level before filter (dBuV)	Maximum output level after filter (dBuV)	Attenuation (dB)
50	NaN	NaN	111,5	110,7	0,8
60	NaN	NaN	114	108,3	5,7
70	NaN	NaN	115,9	106,6	9,3
80	NaN	NaN	117,5	105,6	11,9
90	NaN	NaN	119,1	105	14,1
100	NaN	NaN	120,7	104,8	15,9
110	NaN	NaN	121,8	104,7	17,1
120	NaN	NaN	122,5	104,5	18
130	NaN	NaN	123,1	105	18,1
140	NaN	NaN	123,6	105,8	17,8
150	NaN	NaN	124	103,6	20,4
160	NaN	NaN	124,3	97,1	27,2
170	NaN	NaN	124,6	91,1	33,5
180	NaN	NaN	124,8	88,6	36,2
190	NaN	NaN	125	87,2	37,8
200	NaN	NaN	125,2	86,3	38,9

Taulukko 8-4. Laboratoriomittausten tulokset valaisimelle 2 suotimen ollessa asennettu [Pik12].

Frequency (kHz)	Level for the first lightning state change before filter (dBuV)	Stepping level before filter (dBuV)	Maximum output level before filter (dBuV)	Maximum output level after filter (dBuV)	Number of state changes with 200 maximum output burst	Attenuation (dB)
50	107,3	109,5	111,3	110,7	177	0,6
60	109,11	112,7	113,9	108,2	45	5,7
70	113,4	116,6	115,9	106,4	65	9,5
80	112,5	114,8	117,5	105,1	180	12,4
90	114,3	116,6	119,1	104,2	161	14,9
100	NaN	NaN	120,7	103,5	NaN	17,2
110	119,8	121,5	121,8	102,6	83	19,2
120	116,4	118,3	122,5	101,6	197	20,9
130	116,5	119,2	123,1	100,5	155	22,6
140	119,4	121,6	123,6	99,3	178	24,3
150	117,5	119,1	124	98,6	158	25,4
160	118,3	120,4	124,3	97,8	148	26,5
170	118	119,4	124,6	97,6	172	27
180	118,2	120,2	124,8	97,2	52	27,6
190	NaN	NaN	125	96	NaN	29
200	NaN	NaN	125,2	94,9	NaN	30,3

Suotimen vaikutuksesta laboratoriolaitteisto ei kyennyt häiritsemään valaisimen 1 toimintaa. Valaisimen 2 toiminta edelleen häiriintyi. Suodin nosti valaisimelle 2 amplituditasoja noin 0-20 dB ensimmäiselle valaisutilan muutokselle ja kaikkien valaisutilojen läpi käymiselle. Tämä tasojen muutos oli riippuvainen purskesignaalin taajuudesta. Tämä on nähtävissä vertailtaessa taulukoita 8-2 ja 8-4. Taulukoista 8-3 ja 8-4 nähdään purskesignaalin vaimeneminen suotimessa. Vaimeneminen vaihteli valaisimelle 1 0,8 dB - 38,9 dB välillä ja valaisimelle 2 0,6 dB - 30,3 dB riippuen purskesignaalin taajuudesta.

Vaikka suodin vaimensi valaisimelle tulevaa jännitepurskesignaalia ja siten pienensi toimintahäiriöiden todennäköisyyttä, se myös vaikutti jännitepurskesignaalin amplitudiin ennen suodinta. Tämä on nähtävissä kuvasta 8.8, jossa on esitetty molemmille valaisimille mitatut signaalipurskeen amplitudit signaaligeneraattorin maksimi ulostulolla ilman suodinta sekä suotimen kanssa ennen ja jälkeen suotimen. Kuvasta 8.8 nähdään, että pienemmillä taajuuksilla suodin vaimensi verkon puolella olevaa signaalipursketta ja suuremmilla taajuuksilla se vahvisti signaalipursketta. Suurin vaimeneminen oli 16,1 dB ja suurin vahvistuminen 9,9 dB. Valaisimelle 1 vahvistumisen rajataajuus oli noin 120 kHz ja valaisimelle 2 se oli noin 140 kHz.



Kuva 8.8. Mitatut signaalipurskeen tasot molemmille lampuille signaaligeneraattorin maksimi ulostulolla. Sininen viiva kuvaa tilannetta ilman suodinta. Vihreä viiva on mitattu arvo verkon puolelta suotimen ollessa paikoillaan. Punainen viiva on mitattu lampun puolelta suotimen ollessa paikoillaan [Pik12].

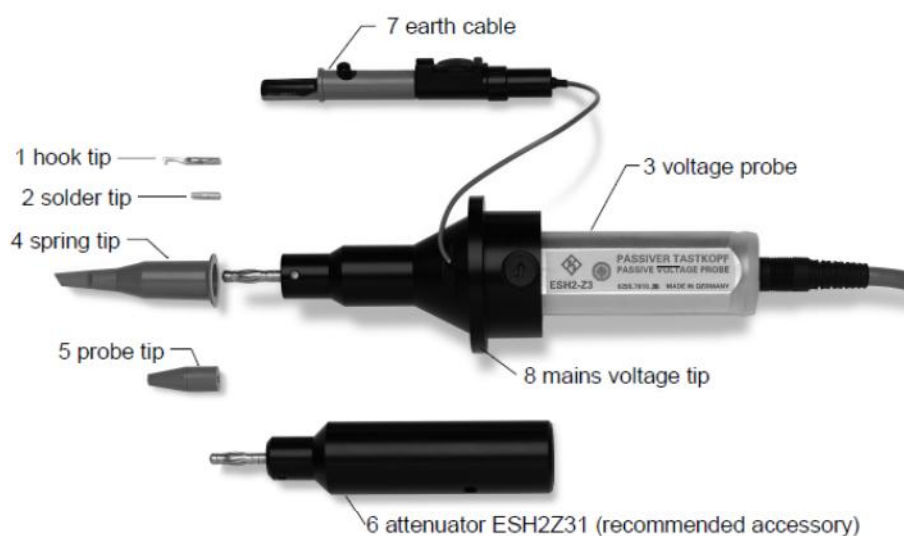
Suotimelle suoritetut laboratoriomittaukset osoittivat, että testattu suodin pienensi PLC signaalista aiheutuvaa hipaisuhimmenninvalaisimien toimintahäiriöiden todennäköisyyttä. Samalla suodin kuitenkin vaikutti purskesignaalin amplitudiin vaimentaen sitä pienemmillä taajuuksilla ja voimistaen sitä suuremmilla taajuuksilla. Tämä oikeassa verkkoympäristössä voi aiheuttaa sen, että suodin vaimentaa etäluettavien energiamittareiden luennassa käytettyä PLC-signaalia ja voi osaltaan edesauttaa PLC:n kuuluvuusongelmia.

9 Häiriöselvityksiin soveltuvista mittalaitteista ja varusteista

9.1 Mittapäät

9.1.1 Jännitemittaus

Jännitemittaus on tarpeen kun halutaan arvioida täyttääkö häiriötä aiheuttava laite EMC-vaatimukset tai jos halutaan arvioida esimerkiksi, mikä on PLC-signaalin signaali/häiriösuhde tai kuinka paljon signaali vaimenee matkalla keskittimeltä mittarille tai päinvastoin. Viimeksi mainittu mittaus vaatii käytännössä lisäksi sopivalla kytkentäkondensaattorilla varustetun signaaligeneraattorin signaalilähteeksi. Jännitemittauksen tulee olla taajuusvasteeltaan sellainen, että se vaimentaa 50 Hz jännitettä ja yliaaltojännitteitä riittävästi, jotta mittalaitteen dynamiikka riittää melko heikkojen PLC- ja häiriösignaalien mittaamiseen. Lisäksi jännitemittapään ulostulojännitteen tulee olla PLC-taajuuksilla mittalaitteelle sopiva. Esimerkki jännitemittapästä on esitetty kuvassa 9.1.



Kuva 9.1. Esimerkki PLC- ja häiriösignaalien mittaamiseen taajuusalueella 9 kHz...30 MHz soveltuvasta jännitemittapästä (Rohde&Schwarz ESH2-Z3).

9.1.2 Virtamittaus

Virtamittaus on tarpeen mm. häiriölähdettä paikannettaessa. Kuten luvussa 7 todettiin, häiriölähte voidaan paikantaa varsin luotettavasti muuntamolta lähtien aina asiakaslaitteeseen asti mittaamalla häiriövirtojen suuruudet verkon solmupisteissä ja etenemällä suurimman häiriön suuntaan. Virtamittauksissa voidaan käyttää anturina esimerkiksi suurtaajuusvirtamuuntajaa. Oleellista on, että muuntaja vaimentaa riittävän voimakkaasti 50 Hz ja perinteisiä yliaaltotaajuuksia ja PLC-taajuuksilla muuntajan ulostulojännite on mittalaitteelle sopiva. Muutoin käyttötaajuinen virta ja yliaallot kuormittavat tarpeettomasti mittalaitetta ja vaikeuttavat verrattain heikkojen PLC- ja häiriösignaalien mittaamista. Käytön kannalta on tärkeää, että muuntaja on avattavissa, jotta se voidaan helposti asentaa mitattavien johtimien ympärille ilman sähkökatkoa ja että muuntajan mekaaniset mitat ovat sopivat. Muuntamoilla virtamuuntajan kidan tulee olla riittävän suuri, jotta sen saa suljettua poikkipinnaltaan suurimmankin vaihejohtimen ympärille. Toisaalta jos halutaan mitata esimerkiksi keskuksilla huoneistojen lähtöjä tai yksittäisiä ryhmäjohtoja, muuntajan tulisi olla riittävän pieni, jotta se mahtuu tarvittaessa ahtaampiinkin tiloihin keskusotelon sisällä. Esimerkki suurtaajuusvirtamuuntajasta on esitetty kuvassa 9.2.



Kuva 9.2. Esimerkkejä suurtaajuusvirtamuuntajista (Rohde&Schwarz EZ-17, ETS-Lindgren eri malleja, Solar EMC eri malleja).

9.2 Mittalaitteet

9.2.1 Suurtaajuusspektrianalysaattorit

Suurtaajuusspektrianalysaattoreissa taajuusalue alkaa tyypillisesti joko 9 kHz:sta tai 100 kHz:sta ja päättyy yleensä muutamiin GHz:eihin. Jotta laite soveltuisi PLC-mittauksiin, tulisi kalibroidun taajuusalueen alkaa 9 kHz:stä. Alarajataajuudeltaan 100 kHz laitteiden usein ilmoitetaan virittyvän 9 kHz asti, mutta niiden etuaste on mitoitukseltaan sellainen että laitteen amplitudivirhe alkaa kasvaa melko nopeasti alle 100 kHz taajuuksille mentäessä, jotka ovat PLC:n kannalta olennaisimmat. Alle 50 kHz taajuuksilla virhe saattaa olla jopa kymmeniä desibelejä. Toinen tekijä johon kannattaa PLC-mittauksia ajatellen kiinnittää huomioita on laitteen herkkyys tai pohjakohinataso erityisesti 9...95 kHz (tai 9...150 kHz) taajuuksilla. Vaikka pohjakohinataso olisi pieni kymmenien MHz tai GHz taajuuksilla, se saattaa nousta esim. alle MHz taajuuksilla, jolloin

pienempiä häiriö- ja PLC-signaaleja ei välttämättä pystytä mittaamaan. Toimintaperiaatteeltaan spektrianalysaattori voi olla digitaalinen FFT-analysaattori, analoginen pyyhkäisevä spektrianalysaattori tai näiden yhdistelmä. Pääosa markkinoilla olevista suurtaajuusspektrianalysaattoreista on analogisia pyyhkäiseviä spektrianalysaattoreita tai yhdistelmäanalysaattoreita, joissa pientä osaa taajuuskaistasta mitattaessa tutkittava osa spektristä sekoitetaan ensin alemmalle taajuudelle, jossa se pystytään digitoimaan ja voidaan hyödyntää FFT-analyysiiä, kun taas laajempaa kaistaa mitattaessa käytetään taajuuspyyhkäisyä. Häiriöselvityskäyttöön soveltuu parhaiten ns. kädessäpidettävä analysaattori (kuva9.3), jotka ovat suhteellisen kevyitä ja akkukäyttöisiä ja niistä löytyy useilta valmistajilta 9 kHz alarajataajuudella varustettuja malleja. Pöytämallisista analysaattoreista (kuva 9.4) osaan on saatavissa akkukäyttöoptio, mutta kokonsa ja painonsa puolesta ne eivät ole yhtä käteviä kenttäkäytössä.

Sopivilla mittapäillä varustettuna spektrianalysaattorilla voidaan tehdä sekä jännite- että virtamittauksia. Suurtaajuusspektrianalysaattoreiden etuna on lisäksi se, että sopivalla antennilla varustettuna niitä voidaan käyttää myös matkapuhelinverkkoja käyttävien ja radioteitse toimivien (esim. meshnet) energiamittareiden luentajärjestelmien mittauksiin ja häiriöselvityksiin.



Kuva 9.3. Esimerkkejä kädessä pidettävistä spektrianalysaattoreista (Anritsu MS-2720T, Rohde & Schwarz FSH-4, Agilent N9340B).



Kuva 9.4. Esimerkkejä kannettavista spektrianalysaattoreista, joissa on akkukäyttömahdollisuus (Rohde&Schwarz ESPI-3, Agilent E4411B-BAS).

9.2.2 PLC-analysaattorit

Markkinoilla on jonkin verran PLC-luentaisia energiamittareita valmistavien yritysten merkkikohtaisia PLC-analysaattoreita ja yleiskäyttöisiä PLC-järjestelmien häiriöselvitykseen tarkoitettuja laitteita (kuva 9.5). Molemmat laitteet perustuvat yleensä jännitemittauksiin; laite kytketään suoraan esim. banaanjohdoilla mitattavaan sähköverkkoon.

PLC-luentaisia energiamittareita valmistavien yritysten merkkikohtaiset PLC-analysaattorit näyttävät tyypillisesti signaalitason, häiriötason ja/tai signaali-kohinasuhteen ko. valmistajan käyttämällä PLC-signalointitaajuuksilla, mutta pelkästään näiden tietojen perusteella häiriölähteen tunnistaminen ja paikantaminen on yleensä vaikeaa. Käytännössä se täytyy tehdä kytkemällä laitteita tai lähtöjä vuorotellen jännitteettömäksi ja katsoa, milloin signaali-kohinasuhde paranee oleellisesti eli häiriö poistuu. Jotkut analysaattorit lisäksi vaativat, että ne saavat vastaanotettua keskittimen signaalin, jolloin ne eivät välttämättä toimi, jos häiriötaso on hyvin korkea.

Yleiskäyttöisiä PLC/häiriö-analysaattoreita on toistaiseksi markkinoilla melko vähän. Yksi esimerkki tällaisista laitteista on ruotsalaisen Swemet AB:n yksivaiheinen kannettavaan tietokoneeseen USB-liittimen kautta liitettävä MFA400-analysaattori. Laitteella on mahdollista mitata signaali- tai häiriötasoja tietyillä esivalituilla taajuuksilla tai USB-liitännän kautta tietokoneeseen liitettynä myös taajuusspektrejä taajuusalueella 3...150 kHz. Laitteesta on olemassa myös kolmivaiheinen versio, jolla on mahdollista tehdä myös pitempiaikaisia mittauksia ajan funktiona tietokantaan. Molemmat laitteet on suunniteltu kytkettäväksi suoraan banaanjohdoilla verkkojännitteeseen, eli ne eivät tarvitse erillisiä mittapäitä, mutta niillä ei toisaalta myöskään pysty tekemään häiriövirtamittauksia.



Kuva 9.5. Esimerkki PLC/häiriöanalysaattorista (Swemet MFA 400).

9.2.3 Oskilloskoopit ja mittakortit

Periaatteessa myös oskilloskooppeja (kuva 9.6) ja mittauskortteja on mahdollista käyttää häiriöselvityksiin, mutta näissä ongelmaksi saattaa muodostua riittämätön dynamiikka. Lisäksi laitteessa tulisi olla joko itsessään FFT-toiminto tai vaihtoehtoisesti se voidaan toteuttaa PC:ssä oskilloskoopista luettua aaltomuotodataa käsittelemällä. FFT (Fast Fourier Transform) eli taajuusspektrilaskenta on tarpeen, jotta mitatusta häiriöjänniteaaltomuodosta pystytään erottelamaan eri taajuuskomponentit, koska lähellä PLC-taajuuksilla tai niiden läheisyydessä olevat häiriöt ovat luennan onnistumisen kannalta oleellisesti haitallisempia kuin kauempana niistä olevat häiriöt. Oskilloskoopin tai mittakortin etuna on se, että esimerkiksi 4-kanavaisella oskilloskoopilla on mahdollista mitata samanaikaisesti esimerkiksi kaikkia kolmea vaihetta ja taajuusspektrin lyhytaikaisiakin vaihteluita (esimerkiksi verkkojännitteen puolijakson aikana) on mahdollista tutkia.

Oskilloskooppien ja mittakorttien dynamiikkaan vaikuttaa mm. A/D-muuntimen resoluutio ja vahvistinasteiden kohina. Teoreettinen maksimi A/D-muuntimella mitatun signaalin signaali-kohinasuhteelle desibeleinä saadaan kaavasta

$$SNR_{\max} = 6.02 \cdot N + 1.76$$

, missä N on A/D-muuntimen resoluutio bitteinä.

Esimerkiksi 8-bittisellä A/D-muuntimella maksimi signaali-kohinasuhde jää noin 50 dB:iin eli jos mitattava signaali sisältää esimerkiksi energiamittarin PLC-lähetettä, jonka jännite on suurimmillaan noin 134 dB μ V ja ko. signaali on skaalattu käyttämään A/D-muuntimen koko jännitealue on laitteen taustakohinataso teoriassa 84 dB μ V, mikä ei useinkaan riitä PLC-luentaa häiritsevien signaalien havaitsemiseen. Käytännössä käyttökelpoinen dynamiikka jää monestakin syystä teoreettista pienemmäksi (laitteen taustakohinatasoon vaikuttavat muutkin tekijät kuin kvantisointikohina ja mitattava signaali on käytännössä vaikea skaalata kattamaan täsmälleen A/D-muuntimen koko jännitealue). Käytännössä mittalaitteessa olisi hyvä olla vähintään 12- tai mielellään 16-bittinen A/D-muunnin. Sopivilla mittausantureilla oskilloskoopeilla on mahdollista tehdä sekä jännite- että virtamittauksia. Jos mittauksissa käytetään suurtaajuusspektrianalysointoreihin tarkoitettuja mittapäitä, on muistettava, että ne on suunniteltu liitettäväksi sisäänmenoimpedanssiltaan 50 ohmin laitteeseen, eli oskilloskoopissa tai mittakortissa on käytettävä joko ulkoista tai sisäistä 50 ohmin päätevastusta, ja mittapäiden taajuusvasteet on huomioitava mittauksissa.



Kuva 9.6. Esimerkki 12-bittisestä oskilloskoopista (LeCroy HRO64Zi)

9.3 *Laitteet PLC-signaalin etenemisvaimennuksen määrittämiseen*

Sähköverkon aiheuttaman vaimennuksen mittaaminen esimerkiksi PLC-taajuuksilla onnistuu aiemmin luvussa 4 esitetyllä mittausjärjestelyllä. Signaalilähteeksi tarvitaan signaaligeneraattori, jolla saadaan tuotettua riittävän suuri sinimuotoinen jännitesignaali sopivan kytkentäelimen (coupler) kautta sähköverkkoon. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyssä yksinkertaista kytkentäelintä käytettäessä sähköverkon pieni impedanssi kuormittaa signaaligeneraattoria siinä määrin, että vaikka se pystyisi syöttämään 10 V jännitteen nimelliseen 50 ohmin kuormaan, niin sähköverkon selvästi pienempään impedanssiin se pystyy kytkentäelimen kautta syöttämään yleensä vain alle voltin signaalin.

Hieman monimutkaisemmalla kytkentäelimellä on mahdollista tehdä impedanssisovitus signaalilähteen ja sähköverkon välillä, jolloin tavallisella signaaligeneraattorillakin saadaan syötettyä verkkoon hieman suurempi signaalijännite. Esimerkkejä optimoiduista kytkentäelimistä löytyy esimerkiksi lähteistä [Fer10a, Ste06a].

10 Sähköverkkotiedonsiirron tulevaisuudennäkymät

Tällä hetkellä voimassa olevia PLC-järjestelmästandardeja ovat IEC 61334, joka koskee ns. kapeakaistaista alle 150 kHz taajuuksilla tapahtuvaa sähköverkkotiedonsiirtoa (narrowband PLC) ja IEEE P1901, joka koskee laajakaistaista taajuusalueella 2...68 MHz tapahtuvaa tiedonsiirtoa. Tällä hetkellä markkinoilla olevista IEC 61334-standardin mukaisista järjestelmistä esimerkkinä voidaan mainita mm. Landis+Gyrin PLAN-teknologiaan perustuvat järjestelmät [Ano12d]. Pienjänniteverkon ns. kapeakaistaisessa sähköverkkotiedonsiirrossa sallittavat taajuudet ja signaalintijännitteet on määritelty standardissa EN 50065-1.

Kapeakaistaisessa PLC:ssa tulevaisuuden teknologiat näyttävät olevan PRIME ja G3 [Lu12a]. PRIME (PowerLine Intelligent Metering Evolution) on espanjalaisen Iberdolan ja useiden laite- ja siruvalmistajien alun perin aloittama yhteistyöprojekti, jossa pyritään standardoimaan AMM arkkitehtuurin keskeiset rajapinnat niin, että eri valmistajien laitteet voisivat toimia osana yhtä ja samaa järjestelmää. Espanjassa PRIME-järjestelmään pohjautuvia mittareita pitäisi olla asennettuna noin 1 miljoona maaliskuuhun 2013 mennessä. G3 taas on ranskalaisen jakeluverkko-operaattorin ERDF:n ja siruvalmistaja Maximin alun perin käynnistämä yhteistyöprojekti.

Sekä PRIME että G3 teknologioissa käytetään OFDM-modulaatiota, joka on moniin kantaaltoihiin perustuva ns. hajaspektritekniikka. Sen etuna on parempi häiriönsietoisuus ja suuremmat siirtonopeudet verrattuna kahteen kantaaltoon perustuviin FSK- ja PSK-modulointimenetelmiä käyttäviin tekniikoihin. Vertailu G3- ja PRIME-teknologioiden tärkeimmistä ominaisuuksista on esitetty taulukossa 10-1.

Taulukko 10-1. G3- ja PRIME-tekniologioiden tärkeimmät ominaisuudet [Hoc11a].

PARAMETERS OF PLC G3 AND PRIME

	PLC G3	PRIME
frequency range	35–91 kHz	42–89 kHz
sampling frequency f_s	400 kHz	250 kHz
OFDM		
FFT size M	256	512
length of cyclic prefix L_{CP}	30	48
windowing	yes	no
subcarrier spacing Δf	1.5625 kHz	488 Hz
No. of carriers used (one-sided)	36	97
max. data rate	33.4 kbps	128.6 kbps
Forward Error Correction	Reed Solomon code, convolutional code, repetition code	convolutional code
interleaving	per data packet	per OFDM symbol
modulation differential encoding	DBPSK, DQPSK in time	DBPSK, DQPSK, D8PSK in frequency

Lähinnä häiriöongelmien vuoksi Euroopassa on käyty keskustelua myös PLC-taajuusalueen laajentamisesta nykyisen 148,5 kHz sijasta lähemmäksi yleisradiolähetyskäyttöön käytettävän keskiaaltoalueen alapäätä. Esimerkiksi Yhdysvalloissa PLC-taajuusalue on 10...490 kHz ja Japanissa 10...450 kHz [Gui11a, Oks11a]. Euroopassa taajuusalue 150 kHz ...450 kHz on kuitenkin allokoitu mm. pitkäaaltoyleisradiotoiminnan ja useiden muiden radiotaajuussovellusten käyttöön, joten PLC-taajuusalueen laajentaminen ei ole helposti toteutettavissa.

11 Yhteenveto

Elektroniset kuormat yleistyvät mm. lampputeknologioiden muuttumisen ja erilaisten nopeussäädettyjen moottorikäyttöjen yleistymisen myötä. Sähkön pientuotannon ja sähköautojen yleistyminen osaltaan myös lisää sähköverkkoon liitettyjen tehoelektronisten laitteiden määrää. Toisaalta etäluettavien mittareiden käyttöönotto lisää sähköverkon käyttöä sähkön siirron lisäksi myös tiedon siirtoon. Mm. näistä tekijöistä johtuen sähköverkossa kulkee entistä suuremmassa määrin suuritaajuisia virtoja ja laitteiden käyttöjännitteisiin on summutuneena suuritaajuisia jännitteitä, joista useimmat ovat laitteiden näkökulmasta häiriöitä. Tässä tutkimusprojektissa tutkittiin projektiin osallistuneiden sähköverkkoyhtiöiden verkoissa erilaisia häiriötapauksia, joissa energiamittareiden PLC-luenta ei toiminut asiakaslaitteen aiheuttamien suuritaajuisien häiriöiden vuoksi. Lisäksi tutkittiin laboratorioissa mm. hakkuriteholähteen aiheuttamia häiriöitä ja hipaisuhimmenninlamppujen häiriintymistä eritaajuisen sähköverkkoon syötettyjen häiriöiden vaikutuksesta. Hipaisuhimmenninlamppujen häiriintyminen on yleisimpiä PLC-signaalin asiakaslaitteille aiheuttamia häiriöongelmia.

Uusien lampputeknologioiden verkostovaikutuksia tutkittiin uudehkossa kylpyläkiinteistössä, jossa valaistus oli pääosin toteutettu elektronisella liitäntälaitteella varustetuilla lampuilla ja myös muita elektronisia kuormia oli runsaasti. Tehtyjen mittausten valossa energiansäästölamppujen aiheuttamat yliaallot eivät muodostu ko. kohteessa ongelmaksi. Muutenkin lamput ovat kuormana niin pieniä että niiden verkostovaikutukset jäävät todennäköisesti useimmissa kohteissa marginaalisiksi. Lamppujen ja taajuusmuuttajien aiheuttamat suuritaajuiset häiriöt olisivat saattaneet aiheuttaa häiriöitä sähköverkkotiedonsiirrolle (PLC), jos sellaista olisi kohteessa käytetty. Lamppujen kytkentävirtasysäykset olivat mitatuissa kohteissa varsin suuria. Vaikka kytkentävirtasysäys on varsin lyhytaikainen se aiheuttaa kuitenkin verkossa lyhytaikaisen, mutta amplitudiltaan pahimmillaan lähes verkkojännitteen huippuarvon suuruisen nopean jännitemuutoksen, joka ainakin teoriassa saattaa ryhmäjohdon induktanssin ja lamppujen kapasitanssin muodostamassa sarjaresonanssiipiirissä vahvistua hyvinkin suureksi. Ilmiön ja sen käytännön merkityksen selvittäminen edellyttäisi lisätutkimuksia.

Sähköverkon käyttäytymistä suurilla taajuuksilla tutkittiin tässä projektissa muutamilla käytännön mittauksilla ja simuloinneilla. Mittausten ja simulointien perusteella sopivan asiakaslaitteen kytkeminen pistorasiaan saattaa resonanssi-ilmiöiden vaikutuksesta suurentaa PLC-signaalin jännitettä pistorasiassa, mikä on hyvä pitää mielessä esimerkiksi häiriöongelmia selviteltäessä. Asiakaslaitteiden ja verkon rakenteen vaikutusta signaalin vaimenemiseen ja toisaalta resonanssien merkitystä yhtäältä PLC:n kannalta, mutta myös elektronisten kuormien ja erityisesti elektronisella liitäntälaitteella varustettujen lamppujen kytkentäilmiöiden näkökulmasta olisi aiheellista tutkia lisää.

Projektin 1. vaiheessa tehdyn kyselytutkimuksen ja projektin 2. vaiheeseen osallistuneiden verkkoyhtiöiden kokemusten mukaan yleisimpiä PLC-luentaongelmien aiheuttajia ovat olleet taajuusmuuttajat ja erilaiset hakkuriteholähteillä varustetut yksivaihelaitteet. Projektin kuluessa tutkittujen häiriötapausten ja tehtyjen kirjallisuustutkimusten perusteella häiriöiden perussyyt voidaan jakaa neljään ryhmään:

1. laitteiden (tai niiden jonkin komponentin) ikääntyminen
2. asennusvirheet (erityisesti taajuusmuuttajien tapauksessa)
3. valmistajan vaatimuksenmukaisuusvakuutuksesta huolimatta laite ei ole uutenakaan täyttänyt EMC-vaatimuksia
4. laitteiden häiriöpäästöjä koskevien raja-arvojen puuttuminen taajuusalueella 3...150 kHz

Ryhmään 1 ja 3 liittyviä häiriötapauksia on vaikea kokonaan välttää, mutta laitevalmistajiin vaikuttamalla niitäkin todennäköisesti voitaisiin vähentää. Laitteet tulisi suunnitella niin, että niiden EMC-ominaisuuksien kannalta kriittiset komponentit olisi mitoitettu kestävämpään kuin muut komponentit. Ryhmään 2 liittyviä ongelmia todennäköisesti voitaisiin uusien asennusten osalta vähentää lisäämällä tiedottamista esimerkiksi sähköurakoitsijoiden suuntaan. Vanhoissa jo pitempään käytössä olleissa asennuksissa maksajan löytäminen korjauksille saattaa sen sijaan olla vaikeaa. Pitkällä tähtäimellä erityisesti ryhmästä 4 johtuvia ongelmia voidaan vähentää standardointia kehittämällä ja markkinavalvonnasta huolehtimalla.

Tutkittujen tapausten perusteella näyttää siltä, että selvästi olemassa olevia ja suunniteltuja raja-arvoja pienemmätkin häiriöjännitteet aiheuttavat luentaongelmia nykyisissä energiamittareiden PLC-luentajärjestelmissä. Standardissa CISPR 11 induktiokuumentimien johtuville häiriöille on määritelty raja-arvoksi taajuusalueella 50...148,5 kHz 90...80 dB μ V (pienenee lineaarisesti taajuuden logaritmin funktiona) ja IEC/TS 62578 Ed. 2:ssa on ehdotettu esimerkiksi hajautetun tuotannon verkkoinverttereille selvästi suurempia raja-arvoja. Radioliikenteen häiriintymisen näkökulmasta nämä voivat olla perusteltuja ja riittäviä vaatimuksia, mutta sähköverkkotiedonsiirron suojaamiseen ne eivät tunnu riittävilä. Pienimmät mitatuista luentaongelmia aiheuttaneista häiriöjännitteistä olivat vain noin 60 dB μ V huippuarvoilmaisijalla mitattuna. Tässä mielessä

esimerkiksi nykyisiä CISPR 11 raja-arvoja sopivampi lähtökohta taajuusalueella 2...150 kHz sallittaville häiriöjännitteille voisi PLC:n näkökulmasta olla ainakin taajuusalueen yläpäässä useimmissa nykyisissä EMC standardeissa sovellettava taajuuden 150 kHz raja-arvo 66 dB μ V (quasi-peak-ilmaisijalla mitattuna) korjattuna hieman alaspäin kapeammasta mittaustaikanleveydestä johtuen. Jos näin pienen häiriöjännitteen raja-arvon määrittely koko PLC-taajuusalueelle on tehoelektronikkalaitteiden näkökulmasta ongelmallista, voitaisiin ehkä sallia osalla PLC taajuusalueesta (tai tietyillä taajuuksilla, joilla PLC-järjestelmiä ei ole yleisesti käytössä) suurempia häiriötasoja. Nykyaikaiset energiamittareiden luetaan tarkoitettut PLC-järjestelmät toimivat pääosin taajuusalueella 50...95 kHz, joten ainakin tällä taajuusalueella tulisi soveltaa pienempiä raja-arvoja, joilla PLC-järjestelmien riittävän häiriötön toiminta voitaisiin varmistaa.

Käytännössä häiriöitä ei ole mahdollista täysin välttää, aina on tilanteita, joissa riittävä PLC-signaali/kohinasuhde ei toteudu ja tällöin oleellisinta olisi pystyä tunnistamaan, paikantamaan ja korjaamaan häiriölähde mahdollisimman nopeasti. Projektissa kehitettiin suuritaajuiseen virtamittaukseen perustuva menetelmä häiriölähteen systemaattiseen paikantamiseen. Menetelmä on käyttökelpoinen erityisesti tapauksissa, joissa suuri joukko mittareita on häiriöiden vuoksi luennan ulkopuolella ja häiriölähdettä ei esimerkiksi muuntamolta lähtien ole mahdollista paikantaa lähtöjä vuorotellen pois kytkemällä. Menetelmässä edetään systemaattisesti muuntamolta (tai pääkeskukselta) solmupiste solmupisteeltä suurimman häiriövirran suuntaan verkossa alaspäin kunnes häiriölähde on löytynyt. Esimerkiksi kiinteistön tai huoneiston ryhmäkeskustasolla saattaa olla jo helpompaa kytkeä yksittäisiä ryhmäjohtoja vuorotellen jännitteettömäksi ja suuritaajuisella jännite- tai virtamittauksella seurata milloin häiriötaso oleellisesti laskee. Joissain tapauksissa häiriölähteen tunnistamisessa saattaa olla apua myös perustaajuisen virran suuruuden mittauksesta tai virran aaltomuodon mittauksesta.

Kun häiriölähde on paikannettu, tulisi ensin varmistaa että sekä häiriöitä aiheuttava että häiriintyvä laite ovat kunnossa ja oikein asennettu. Jos ongelma ei johdu laitteen ikääntymisestä tai viallisuudesta eikä asennusvirheistä voidaan häiriöitä aiheuttavan (tai häiriintyvän) laitteen ja verkon väliin asentaa EMC-suodin. Vaikka nykyisin markkinoilla olevat suotimet on suunniteltu lähinnä vaimentamaan yli 150 kHz johtuvia häiriöitä, niiden vaimennus on kuitenkin melko suuri vielä taajuuksilla 60...95 kHz, jossa esimerkiksi useimmat Suomessa käytössä olevat PLC-järjestelmät toimivat. Muita käyttökelpoisia keinoja PLC-luentaongelmien korjaamiseen ovat keskittimen tai häiriöitä aiheuttavan laitteen (jos mahdollista) siirtäminen eri kohtaan verkossa sekä kolmivaihejärjestelmissä häiriöitä aiheuttavan tai häiriintyvän laitteen siirtäminen eri vaiheelle.

Lähdeluettelo

- [Ano04a] IEC 61800-3: Adjustable speed electrical power drive systems - Part 3: EMC requirements and specific test methods. International Electrotechnical Commission, 2004.
- [Ano04b] Radio frequency interference, Application note, Danfoss, Inc, 2004.
- [Ano07a] EN 55011:2007, Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment - Electromagnetic disturbance characteristics - Limits and methods of measurement, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2007.
- [Ano09a] CISPR 11 ed 5.0: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement. International Electrotechnical Commission, 2009.
- [Ano09b] Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta, Helsinki 2009.
- [Ano09c] Energiakaapelit 2009, Prysmian Cables and Systems, Kirkkonummi, 2009.
- [Ano09d] Basics in EMC and Power Quality, Schaffner, 2009. 159 p.
- [Ano10a] EN 55022:2010, Information technology equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.
- [Ano11a] Vacon NXL helppokäyttöinen ja tehokas ac-käyttö, Esite, Vacon Oyj, 2011.
- [Ano12a] IEC 61000-4-19: Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-19 - Testing and measurement techniques - Test for immunity to conducted, differential mode disturbances in the frequency range from 2 kHz to 150 kHz, at a.c. ports (valmistuu keväällä 2013)
- [Ano12b] CLC/TR 50579: Electricity metering equipment (a.c.) - Severity levels, immunity requirements and test methods for conducted disturbances in the frequency range 2 kHz - 150 kHz

- [Ano12c] IEC/TS 62578 Ed. 2: Power electronics systems and equipment - Technical Specification: Operation conditions and characteristics of active infeed converter applications including recommendations for emission limits below 150 kHz.
- [Ano12d] Introducing the power of PLC, Landis+Gyr, 2012.
- [Ano12e] IVS102 Design Guide, Armstrong Ltd, 2012.
- [Ano13a] Cenelec SC 205A Mains Communicating Systems TF EMI Study report on Electromagnetic Interference Between Electrical Equipment / Systems in the Frequency Range Below 150 kHz Ed. 2, CENELEC SC205A/Sec0339/R:April 2013. 80 p.
- [Ano87a] C.I.S.P.R. specification for radio interference measuring apparatus and measurement methods, C.I.S.P.R. 16 Second edition, International Special Committee on Radio Interference, 1987. p.221.
- [Des10a] J. Desmet, G. Vanalme, C. Debruyne, L. Vandeveld, Influence of Harmonic Currents on Cable Losses for Different Grid Configurations, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010.
- [Duf88a] W. G. Duff, Fundamentals of Electromagnetic Compatibility, A handbook series on Electromagnetic Interference and Compatibility, Vol. 1, Gainesville: Interference Control Technologies, 1988.
- [Fer10a] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, T. G. Swart, "Power Line Communications, Theory and Applications for narrow and Broadband Communications over Power Lines", John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [Gui11a] Guillermo Laspra Guisasola, 3rd Generation PLC modems operating at the CENELEC band for smart grids – performance study and data transmission test, MSc Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2011.
- [Hoc11a] M. Hoch, Comparison of PLC G3 and PRIME, 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications.
- [Lu12a] X. Lu, O. Monnier, Developing robust powerline communications (PLC) with G3, White Paper, Texas Instruments, 2012.
- [Mar88a] Mardiguian M., A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility, Volume 5: Electromagnetic Control in Components and Devices. Interference Control Technologies, Inc. Gainesville Virginia, USA 1988.
- [Oks11a] V. Oksman, New ITU-T Recommendations for Smart Grid in-home and access communications, Presentation at ETSI Smart Grid Workshops Sophia Antipolis, France April 2011.
- [Ott88a] H.W. Ott, Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1988. 426 p.

- [Pik12a] M. Pikkarainen, S. Vehmasvaara, B. A. Siddiqui, P. Pakonen, P. Verho, "Interference of touch dimmer lamps due to PLC and other high frequency signals", presented at 8th International Conference on Power Quality and Supply Reliability, Tartu, Estonia, 2012.
- [Pak12a] P. Pakonen, S. Vehmasvaara, M. Pikkarainen, B. A. Siddiqui and P. Verho, "Experiences on Narrowband Powerline Communication of Automated Meter Reading Systems in Finland", presented at 8th International Conference on Power Quality and Supply Reliability, Tartu, Estonia, 2012.
- [Pak13a] P. Pakonen, M. Pikkarainen, B. A. Siddiqui and P. Verho, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BETWEEN ELECTRONIC LOADS AND AUTOMATED METER READING SYSTEMS USING PLC, 22nd International Conference on Electricity Distribution CIRED, Stockholm, Sweden, 2013 (draft).
- [Pyh13a] T. Pyhähuhta, Älykkäät sähkömittarit hanke ja rollout-kokemukset, Esitys Sähkön laadun hallinta-asiantuntijaseminaarissa Luostolla 12.2.2013.
- [Raj02a] J. Rajamäki, "Market Surveillance of Electrical Equipment in Finland – Analysis and Development", Dissertation, Tukes Publication 9/2002. Helsinki 2002. 106 p.
- [Raj03a] J. Rajamäki, V.-P. Nurmi, "Lessons to be learned from Finnish EMC market surveillance projects", Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003.
- [Sal12a] H. Salminen, Asiakaslaitteiden häiriintyminen PLCetäluennasta, toimintatavat ja ratkaisumallit häiriötapauksissa, Esitys Energiamittareiden sähköverkkotiedonsiirto-seminaarissa, Fortum Sähkönsiirto Oy:ssä 26.9.2012.
- [Ste06a] Ulrich Stein, Jan Carlsson, Jan Welinder, Signalöverföring på lågspänningsnätet, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Elforsk, 2006.