



**Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja  
elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen  
yhteensopivuus - Vaihe 1  
Loppuraportti**

**Marko Pikkarainen**

**Bashir Siddiqui**

**Sami Vehmasvaara**

**Pertti Pakonen**

**Pekka Verho**

**Tampereen teknillinen yliopisto**

**31.8.2011**

## Alkusanat

Tämä on projektin ” Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen yhteensopivuus - Vaihe 1” loppuraportti. Projekti toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Sähköenergiatekniikan laitoksella. Projektin rahoittivat ST-Pooli ja Sähköturvallisuuden edistämiskeskus ry STEK.

Projekti alkoi 1. lokakuuta 2010 ja päättyi 31. toukokuuta 2011.

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

Projektin puitteissa toteutetun kyselytutkimuksen osalta haluamme kiittää kaikkia kyselyyn vastanneita verkkoyhtiöitä ja Kenneth Hännistä Energiateollisuus ry:stä avusta kyselyn jakelussa. Kiitämme kaikkia projektiin osallistuneita jouhevasta yhteistyöstä ja välittömästä ja innostavasta työilmapiiristä.

Tampereella 31.8.2011

Marko Pikkarainen, DI

Bashir Siddiqui, DI

Sami Vehmasvaara, tekn. yo

Pertti Pakonen, TkT

Pekka Verho, Prof.

## Tiivistelmä

Energian kulutuksen vähentäminen on tällä hetkellä yksi polttavimmista kysymyksistä ilmaston lämpenemisen vuoksi. Siihen pyritään mm. uusien valaistus- ja lämmitysteknologioiden avulla ja lisäämällä kuluttajien tietoisuutta omasta sähkönkulutuksestaan. Suomessa perinteiset tyypillisesti kerran vuodessa luettavat energiamittarit vaihdetaan tuntikulutusta mittaaviin etäluettaviin energiamittareihin vuoden 2013 loppuun mennessä. Huomattava osa uusista energiamittareista tulee käyttämään tiedonsiirtokanavana sähköverkkoa. Valaistuksessa kaikki yli 7 W hehkulamput poistuvat EU-direktiivin johdosta markkinoilta syyskuuhun 2012 mennessä ja korvautuvat energiansäästölamppuilla, jotka voivat perustua esimerkiksi pienloistelamppu- tai LED-tekniikkaan. Molemmilla uusilla lampputyypeillä on monia sähköverkon kannalta uusia ominaisuuksia, joita hehkulamput ei ole. Myös muut elektroniset kuormat yleistyvät, koska ne mahdollistavat mm. kuormien paremmat säätöominaisuudet hyötysuhteen kärsimättä. Elektroniset kuormat aiheuttavat yleensä enemmän yliaaltoja ja suuritaajuisia häiriöitä kuin perinteiset passiiviset kuormat, mikä saattaa häiritä mm. sähköverkon kautta tapahtuvaa tiedonsiirtoa kuten energiamittareiden etälukua.

Tässä esiselvitysprojektissa tarkasteltiin uusien lampputeknologioiden merkitystä sähköverkon kannalta perustuen kirjallisuusselvityksiin mm. lamppujen teknisistä ominaisuuksista ja sähkönkäytöstä Suomessa ja muualla maailmassa sekä skenaarioihin uusien lampputeknologioiden yleistymisestä. Erityisesti on tarkasteltu kotitalouksien ja palvelusektorin valaistusta ja niissä EU-säännösten vuoksi tapahtuneita ja tulossa olevia muutoksia, standardointia ja lamppujen ominaisuuksien muutoksia erityisesti sähköverkon kannalta, mutta myös asiakkaan näkökulmasta (lamppujen välkyntäherkkyys). Kotitalouksissa käytettävät pienloiste- ja LED-lamput ovat tyypillisesti niin pienitehoisia (alle 25 W), että standardi EN 61000-3-2 sallii niille suhteellisesti selvästi suuremmat yliaaltopäästöt kuin suuritehoisemmille lamputille tai muille elektronisille kuormille. Asuntojen valaistukseen käytettävä vuotuinen sähköenergiämäärä oli vuonna 2007 Suomessa kuitenkin vain 2,7 % vuotuisesta sähköenergian kokonaiskulutuksesta ja siitäkin uudet lampputeknologiat edustavat energiatehokkuudestaan johtuen vain pientä osaa. Kuormana ne eivät siten ole sähköverkon kannalta kovin merkittäviä. Joissain tapauksissa uudet lampputeknologiat saattavat kuitenkin häiritä sähköverkon kautta tapahtuvaa tiedonsiirtoa (PLC, power line communication) esimerkiksi vaimentamalla PLC-signaalia.

Energiansäästölamppujen verkostovaikutusten lisäksi työn toisena tarkoituksena oli tehdä kirjallisuusselvitys elektronisten kuormien ja energiamittareiden PLC-luentajärjestelmien välisestä yhteensopivuudesta ja keskinäisistä vaikutusmekanismeista. Vuorovaikutusta voi tapahtua molempiin suuntiin: asiakkaan sähkölaitteet saattavat häiriintyä PLC-signaalin vaikutuksesta ja toisaalta ne saattavat aiheuttaa ongelmia PLC-tiedonsiirrolle kahdella eri tavalla. Ne voivat vaimentaa PLC-signaalia tai aiheuttaa suuritaajuisia häiriöitä PLC-taajuuksille. Elektronisten kuormien tapauksessa molemmat mekanismit ovat mahdollisia, mutta mm. Ruotsissa on arvioitu, että laitteiden pieni impedanssi suurilla taajuuksilla ja sen aiheuttama vaimennus olisi yleisin syy PLC-tiedonsiirron ongelmiin. Projektin kuluessa tehtiin sähköverkkoyhtiöihin etäluettavia energiamittareita koskeva kysely, johon vastasi yhteensä 18 verkkoyhtiötä, joilla on yhteensä 1 935 275 energiamittaria. Tutkimuksen perusteella vuoden 2013 lopussa 1 696 532 etäluettavasta mittarista 855 906 kpl (noin 50 %) tulisi olemaan PLC-tekniikkaan perustuvia (noin 3,6-kertainen määrä nykyiseen verrattuna). Kyselyyn vastanneilla yhtiöillä asiakaslaitteiden häiriintyminen PLC-signaalista on ollut melko harvinaista, mutta asiakaslaitteiden aiheuttamia luentaongelmia näyttäisi esiintyvän melko yleisesti. Osa ongelmista tulee ilmi heti käyttöönottovaiheessa, mutta niitä voi ilmetä myös myöhemmin. Esiselvitysprojektin perusteella jatkotutkimustarvetta on erityisesti asiakaslaitteiden karakterisoinnissa (impedanssi ja suuritaajuiset häiriöt) ja laitteiden välisten ja laitteiden ja verkon välisten keskinäisvaikutuksien selvittämisessä taajuusalueella 2...150 kHz.

## Abstract

The reduction of energy consumption is one of the most topical questions at the moment because of the global warming. It is pursued, among others, by new lighting and heating technologies and by increasing the consumers' consciousness of their own electricity consumption. In Finland the traditional energy meters, which were typically read yearly will be changed into new remotely read energy meters which measure hourly consumption by the end of the year 2013. A considerable part of the new energy meters will use the power network as a communications channel. Due to the EU directive all incandescent lamps with a rated power above 7 W will disappear from the market by September 2012 and they will be replaced by the energy saving lamps which may be based on, for example, compact fluorescent lamp (CFL) or LED (light emitting diode) technology. From the point of view of the mains supply, both new lamp types have many new properties which the incandescent lamps do not have. Also other electronic loads becoming more common because, among others, they enable better load adjustment properties without scarifying the efficiency. The electronic loads usually cause more harmonics and high frequency disturbances than traditional passive loads which may disturb the data communications through the mains supply, for example, in remotely read energy meters.

In this preliminary research the significance of new lamp technologies from the point of view of the mains supply was examined on the basis of literature reports dealing with technical properties of the lamps, the electricity use in Finland and in other parts of the world and the scenarios about the increase of the share of new lamp technologies. Especially, the lighting of households and service sector was considered in terms of the changes caused by EU legal provisions, standardisation, characteristics of the lamps from the angle of distribution networks, but also from the viewpoint of the customer (flicker sensitivity of new lamp technologies). The power rating of CFLs and LED lamps used in households is typically so low (less than 25 W) that in relation much higher harmonic emissions are allowed in standard EN 61000-3-2 for them than for the lamps with higher power rating or generally other electronic loads. However, in 2007 the annual electrical energy used for lighting of apartments was only 2.7 % of the annual total electrical energy consumption in Finland and due to their energy efficiency, the new lamp technologies only stand for a small portion of these. Therefore, as a load they are not very significant for the viewpoint of power network.

However, in some cases new lamp technologies may disturb power line communication (PLC) by, for example, attenuating the PLC signal.

In addition to studying the network effects of energy saving lamps, the project aimed at making a literature study of the compatibility and interaction mechanisms between PLC (power line communication) based remote reading systems of energy meters and electronic loads. Interaction may occur in both ways: PLC signal may disturb customer's electrical apparatus or customer's apparatus may cause the PLC to malfunction in two different ways. They may attenuate the PLC signal or they may cause high frequency disturbances to the PLC frequencies. In the case of electronic loads both mechanisms are possible but, for example, in Sweden it has been estimated that the attenuation caused by the small impedance of the devices on high frequencies would be the most common reason for the PLC communication problems. During the project a questionnaire on remotely readable energy meters was made to Finnish distribution network companies. 18 companies having a total of 1 935 275 energy meters answered the questionnaire. Based on the questionnaire, at the end of 2013 a total of 855 906 out of 1 696 532 remotely readable meters (approximately 50 %) will use PLC as a communication technology. Thus, compared to the present time, the number of PLC meters will increase 3.6 times. According to the results of the questionnaire, customer devices are rarely disturbed by the PLC signal, but meter reading problems caused by customer devices seem to be rather common. A part of the problems exist already at commissioning, but they may also appear later. Based on the project, there is clearly a need for further research in characterisation of customer devices (impedance and the high frequency disturbances) and in the area of interaction between the devices and between the devices and the network, especially, in the frequency range 2...150 kHz.

## Sisällysluettelo

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Alkusanat .....                                                                                                                           | 2  |
| Tiivistelmä .....                                                                                                                         | 3  |
| Abstract.....                                                                                                                             | 5  |
| 1 Johdanto .....                                                                                                                          | 9  |
| 2 Yleistä valaistuksesta .....                                                                                                            | 11 |
| 2.1 Valaistuksen sähköenergia kulutus .....                                                                                               | 11 |
| 2.2 Muutoksia valaistuksessa.....                                                                                                         | 12 |
| 2.2.1 EU:n asettamat muutokset valaistuksessa.....                                                                                        | 12 |
| 2.2.2 Muutokset kotitalousvalaistuksessa .....                                                                                            | 15 |
| 2.2.3 Muutokset palvelusektorin valaistuksessa .....                                                                                      | 31 |
| 3 Valaistukseen liittyvä standardointi .....                                                                                              | 35 |
| 4 Yliaaltojen vaikutus näennäis-, pätö-, lois- ja särötehoon sekä esimerkkejä teknisistä toteutuksista tehokertoimen parantamiseksi ..... | 39 |
| 5 Energiansäästölamppujen välkyntä.....                                                                                                   | 54 |
| 6 Etäluettavat energiamittarit .....                                                                                                      | 70 |
| 7 PLC-luentajärjestelmä.....                                                                                                              | 72 |
| 7.1 Rakenne.....                                                                                                                          | 72 |
| 7.2 Modulointitekniikka.....                                                                                                              | 73 |
| 7.3 AMR-mittareiden ominaisuudet .....                                                                                                    | 73 |
| 8 Sähköverkon suurtaajuusominaisuudet.....                                                                                                | 75 |
| 8.1 Signaalin etenemiseen vaikuttavat ilmiöt .....                                                                                        | 75 |
| 8.2 Impedanssisovitus .....                                                                                                               | 76 |
| 8.3 Johdon eristemateriaalin vaikutus .....                                                                                               | 76 |
| 8.4 Johdon pituuden vaikutus .....                                                                                                        | 77 |
| 8.5 Kuormitustilanteen vaikutus .....                                                                                                     | 77 |
| 9 Elektronisten kuormien PLC-luennalle aiheuttamat häiriöt.....                                                                           | 79 |
| 9.1 Elektronisten kuormien aiheuttamat häiriöt.....                                                                                       | 79 |

|       |                                                                    |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1.1 | Elektronisella liitäntälaitteella varustetut lamput.....           | 79  |
| 9.1.2 | Hakkuriteholähteet.....                                            | 82  |
| 9.1.3 | Laitteet ilman aktiivista tehokertoimen korjausta.....             | 84  |
| 9.1.4 | Yliaaltojen kulkusuunta .....                                      | 85  |
| 9.2   | Signaalin vaimeneminen.....                                        | 87  |
| 9.3   | Ongelmien välttäminen.....                                         | 88  |
| 10    | PLC-luennan muille laitteille aiheuttamat häiriöt.....             | 90  |
| 10.1  | Kondensaattoreiden ennenaikainen vanheneminen .....                | 90  |
| 10.2  | Sähkölaitteiden toimintahäiriöt .....                              | 90  |
| 10.3  | Säteilyhäiriöt .....                                               | 91  |
| 11    | Kyselytutkimus etäluettavista energiamittareista .....             | 92  |
| 12    | Yhteenveto .....                                                   | 104 |
|       | Lähdeluettelo.....                                                 | 108 |
|       | Liite 1: Electronic loads and power line communication (PLC) ..... | 113 |

## 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 osittain siirrytty perinteisistä hehkulamputta energiansäästölamppuihin tai LED-lamppuihin ja lämmityksessä mm. lämpöpumput ovat yleistymässä voimakkaasti. Muutenkin elektroniset kuormat yleistyvät, koska ne mahdollistavat yleensä mm. kuormien paremmat säätöominaisuudet hyötysuhteen kärsimättä.

EU-direktiivin johdosta kaikki yli 7 W hehkulamput poistuvat markkinoilta syyskuuhun 2012 mennessä ja korvautuvat energiansäästölamputta, jotka voivat perustua esimerkiksi pienloistelamppu- tai LED-tekniikkaan. Molemmilla uusilla lamputyypeillä on monia sähköverkon kannalta uusia ominaisuuksia, joita hehkulamputta ei ole. 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.

Energiansäästölamputta esimerkiksi pätöteho on valotehoon nähden selvästi pienempi kuin hehkulamputta ja loisteho vastaavasti yleensä huomattavasti suurempi. Energiansäästölamput aiheuttavat verkkoon yliaaltoja ja suuritaajuisia (jopa radiotaajuisia) häiriöitä. Nämä johtuvat lamppujen sisältämistä tasa- ja vaihtosuuntaajista. Suurilla taajuuksilla niiden impedanssi on myös erilainen kuin hehkulamputta. Kaksi viimeksi mainittua ominaisuutta saattavat aiheuttaa häiriöitä uusien etäluettavien energiamittareiden tiedonsiirtoon niin, että energialukemia ei saada tai mittareiden ohjaukset eivät mene perille. Valojen välkyntäongelmat ovat sähköverkoissa lisääntymään päin ja tässä suhteessa energiansäästölamput ilmeisesti ovat omiaan jonkin verran parantamaan tilannetta, koska niissä jännitevaihtelut eivät aiheuta niin suurta

valaistusvoimakkuuden vaihtelua kuin hehkulamppuissa. Alustavissa mittauksissa on todettu, että edellä mainituissa energiansäästölamppujen uusissa ominaisuuksissa on lamppumallien välillä hyvinkin suuria eroja. AMR-mittareiden etäluentaongelmien vuoksi on tullut esiin myös tarve saada uutta tietoa sähköverkon suuritaajuisista ominaisuuksista ja häiriöistä ja kehittää ratkaisumalleja havaittuihin ongelmiin.

Jotta uusien tekniikoiden (energiansäästölamppujen ja AMR-mittareiden) käyttöönotto ja yleistyminen sähköverkoissa tapahtuisi hallitusti ja laite- ja järjestelmäkehitystä pystyttäisiin ohjaamaan oikeaan suuntaan mm. sähkömagneettisen yhteensopivuuden takaamiseksi ja ongelmien välttämiseksi olisi tärkeää selvittää energiansäästölamppujen lisääntymisen ja hehkulamppujen poistumisen vaikutusta sähköverkkojen jännitteen (tai sähköön) laatuun, toimintaan ja suunnitteluun sekä sähköverkoissa tapahtuvaan tiedonsiirtoon.

Tässä raportissa kuvatun tutkimuksen tavoitteena on selvittää elektronisten kuormien kuten energiansäästölamppujen, UPSien, taajuusmuuttajien ja hakkuriteholähteiden sähköverkkoon aiheuttamia häiriöitä ja impedanssia suurilla taajuuksilla (erityisesti taajuusalueella 2...150 kHz, jota käytetään mm. AMR-mittareiden etäluentaan). Uusien lampputekniikoiden osalta (energiansäästölamput ja LED-lamput) tutkitaan myös niiden aiheuttamia aiheuttamia yliaaltoja, pätö- ja loistehoja ja luminanssin jänniteriippuvuutta (välkyntäherkkyyttä). Lisäksi tutkimuksen tavoitteena on kartoittaa sähköverkkotiedonsiirtoa (PLC) hyödyntävissä AMR-mittareiden etäluentajärjestelmissä esiintyviä luentaongelmia ja häiriöitä.

Raportin luvut 2...4 käsittelevät valaistuksen muutoksia mm. kotitalouksissa ja palvelusektorilla ja uusien lampputeknologioiden ja erityisesti energiansäästölamppujen verkostovaikutuksia. Luvussa 5 tarkastellaan energiansäästölamppujen välkyntäherkkyyttä suhteessa perinteisiin hehkulamppuihin. Luvut 6...10 sisältävät suomenkielisen yhteenvedon liitteen 1 englanninkielisestä PLC:tä ja elektronisia kuormia käsittelevästä kirjallisuustutkimusraportista ja lisäksi täydentävää materiaalia mm. PLC:n asiakaslaitteille aiheuttamista häiriöistä. Luvussa 11 on käsitelty projektin puitteissa sähköverkkoyhtiöihin tehdyn etäluettavia energiamittareita käsittelevän kyselytutkimuksen päätuloksia. Luvussa 12 on yhteenveto kirjallisuustutkimuksen päätuloksista ja jatkotutkimustarpeista.

## 2 Yleistä valaistuksesta

### 2.1 Valaistuksen sähköenergia kulutus

Sähköverkkoon kytkeytyneeseen valaistukseen käytettiin maailmalla sähköenergiaa vuonna 2005 yhteensä 2652 TWh, joka on noin 18 % sähköenergian kokonaiskulutuksesta. Sektorittain tarkasteltuna asuntojen valaistus käytti 811 TWh, kaupallinen sektori 1133 TWh, teollisuusvalaistus 490 TWh, tievalaistus 114 TWh ja muu ulkovalaistus 104 TWh. Edellisten prosentuaaliset osuudet sähköenergian kokonaiskulutuksesta ovat: 5,8 % asuntojen valaistukselle, 8,1 % kaupalliselle sektorille, 3,5 % teollisuusvalaistukselle, 0,8 % tievalaistukselle ja 0,7 % muulle ulkovalaistukselle. Suomessa vuonna 2007 käytettiin sähköverkkoon kytkettyyn valaistukseen noin 8,8 TWh sähköenergiaa, joka on noin 10 % kokonaissähköenergiankulutuksesta. Sektoreittain tarkasteltuna asuntojen valaistus käytti 2,4 TWh, kaupallinen sektori 4,1 TWh, teollisuusvalaistus 1,5 TWh ja tievalaistus 0,8 TWh. Edellisten prosentuaaliset osuudet sähköenergian kokonaiskulutuksesta ovat: 2,7 % asuntojen valaistukselle, 4,5 % kaupalliselle sektorille, 1,7 % teollisuusvalaistukselle ja 0,9 % tievalaistukselle. Suomen osalta on myös arvioitu kuinka suuren osan valaistus vie sähköenergiasta verrattuna sektorin energiankulutukseen. Kotitalouksien sähköenergiankulutuksesta noin 22 % kuluu valaistukseen [Adt06] ja palvelusektorilla vastaava luku on noin 25 % [Hon09]. Valaistuksen sähköenergiankäyttö sektoreittain sekä sähköenergian kokonaiskäyttö Suomessa ja maailmalla on esitetty taulukossa 2-1

Taulukko 2-1. Valaistukseen käytettävä vuotuinen sähköenergiamäärä Suomessa ja maailmalla sekä sähköenergian kokonaiskulutus vuodessa. [Sip10]

|                        | Maailma | Suomi |
|------------------------|---------|-------|
|                        | TWh     | TWh   |
| Asuntojen valaistus    | 811     | 2,4   |
| Kaupallinen sektori    | 1133    | 4,1   |
| Teollisuusvalaistus    | 490     | 1,5   |
| Tievalaistus           | 114     | 0,8   |
| Muu ulkovalaistus      | 104     | -     |
| Yhteensä               | 2652    | 8,8   |
| Sähkön kokonaiskulutus | 14000   | 90,4  |

Sähköenergian kulutuksen tiedot perustuvat maailman osalta IEA:n julkaisuun Light's Labours's Lost [IEA06] ja Suomen osalta Vesa Sippolan tekemään diplomityöhön, joka perustuu Suomen sähkötukkuiliikkeiden raporttiin [SSTL08], lukuun ottamatta ulkovalaistusta, joka perustuu TKK:n valaistussyksikön kyselytutkimukseen. IEA:n tilastoimaa muuta ulkovalaistusta ei Suomen osalta ole erikseen lukuja saatavilla. Tämä kategoria sisältyy kuitenkin muihin valaistuskategorioihin. [Sip10]

## **2.2 Muutoksia valaistuksessa**

### **2.2.1 EU:n asettamat muutokset valaistuksessa**

Koko energia-ala on parhaillaan kokemassa voimakkaita muutoksia maailmalla, mutta erityisesti EU:n alueella. Kaiken takana on EU tason tuleva direktiivi 2009/125/EY, joka asettaa puitteita energiaan liittyvien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle. Tähän direktiiviin ja se edeltäjään niin sanottuun eco-design direktiiviin 2005/32/EY perustuen valaistukselle on asetettu kaksi asetusta 244/2009 (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöönpanemisesta ympäristöilevien kotitalouslamppujen ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta) sekä 245/2009 (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöönpanemisesta loistelamppujen, joissa ei ole sisäistä virranrajoitinta, suurpaineipurkauslamppujen sekä virranrajoittimien ja valaisimien, joissa voidaan käyttää tällaisia lamppeja, ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta ja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2000/55/EY kumoamisesta). Ensimmäinen asetus koskee kotitalousvalaistusta ja jälkimmäinen pääsääntöisesti palvelusektorin valaistusta. Näiden asetusten tarkoituksena on pyrkiä vähentämään valaistustuotteiden ympäristövaikutuksia. Ympäristövaikutuksista merkittävimmät aiheutuvat valaistuksen energiankulutuksesta ja lamppujen sisältämästä elohopeasta. Asetukset ovat voimassa jokaisessa EU-jäsenvaltiossa ilman erillistä lainsäädäntöä. Molempiin asetuksiin on tullut muutoksia. Asetus 859/2009 koskee asetuksen 244/2009 muuttamista ja asetus 347/2010 koskee asetuksen 245/2009 muuttamista. [Täh10]

Tavalliselle kotitalouskuluttajalle tämä näkyy siten, että hehkulamput tulevat asteittain häviämään markkinoilta. Asetusten vaikutukset on nähtävissä taulukossa 2-2. Ensimmäinen vaihe tapahtui vuonna syyskuussa 2009, jolloin markkinoille ei enää saanut saattaa himmennettyjä hehkulamppuja sekä teholtaan 100 W:sia tai suurempia kirkkaita hehkulamppuja. Himmennettyjen lamppujen osalta edellä mainitun päivämäärän jälkeen sallitaan ainoastaan energialuokan A lamppuja. Tämä energialuokka voidaan saavuttaa pienloiste- ja LED-lampuilla. Syyskuussa 2010 markkinoille ei enää saanut saattaa 75 W tai sitä suurempia hehkulamppuja. Syyskuun alusta vuonna 2011 markkinoille saattamiskielto koskee 60 W:n ja sitä suurempia hehkulamppuja sekä syyskuun 2012 alun jälkeen markkinoille saattamiskielto koskee kaikkia hehkulamppuja. 1.9.2016 jälkeen perinteisiä pienjännitteisiä ja xenon täytteisiä halogeenilamppuja ei saa enää saattaa markkinoille. Tämän jälkeen kaikilta lampputyypeiltä vaaditaan energialuokan B tasoa paitsi erikoiskannallisilta (G9, R7s) halogeenilampuilta, joissa energialuokka C sallitaan. [Täh10]

Taulukko 2-2. Asetuksen 244/2009 asettamat energialuokkarajat eri lampuille [Täh10].

| Himmeät lamput   |          |                                              |                        |                                                                                   |
|------------------|----------|----------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Pvm              |          |                                              | Sallitut energialuokat | Käytännön vaikutus                                                                |
| 31.8.2009 asti   |          |                                              | A B C D E F G          |                                                                                   |
| 1.9.2009 lähtien |          |                                              | A B C D E F G          | Hehku- ja halogeenilamput poistuvat                                               |
| Kirkkaat lamput  |          |                                              |                        |                                                                                   |
| vaihe            | pvm      | Soveltamisala                                | Sallitut energialuokat | Käytännön vaikutus                                                                |
| 1                | 1.9.2009 | yli 950 lm                                   | A B C D E F G          | 100 W hehkulamput poistuvat                                                       |
|                  |          | muut                                         | A B C D E F G          |                                                                                   |
| 2                | 1.9.2010 | yli 725 lm                                   | A B C D E F G          | 75 W hehkulamput poistuvat                                                        |
|                  |          | muut                                         | A B C D E F G          |                                                                                   |
| 3                | 1.9.2011 | yli 450 lm                                   | A B C D E F G          | 60 W hehkulamput poistuvat                                                        |
|                  |          | muut                                         | A B C D E F G          |                                                                                   |
| 4                | 1.9.2012 | yli 60 lm                                    | A B C D E F G          | 15 W, 25 W ja 40 W hehkulamput poistuvat                                          |
| 5                | 1.9.2013 | tiukemmat toiminnalliset vaatimukset         | A B C D E F G          |                                                                                   |
| 6                | 1.9.2016 | erikoiskannalliset halogeenilamput (G9, R7s) | A B C D E F G          | Perinteiset pienjännitteiset (12 V) ja xenon-täytteiset halogeenilamput poistuvat |
|                  |          | muut                                         | A B C D E F G          |                                                                                   |

Energiatohokkuusvaatimuksien lisäksi asetus kotitaloislampuille sisältää toimintavaatimuksia, joiden avulla lamppujen laatua pyritään parantamaan. Syyskuun alussa 2009 toimintavaatimukset asetettiin kaikille muille paitsi LED-lampuille. Toiminta vaatimuksia esitetään mm. toiminta-ajalle, vikaantumisasteelle, syttymisajalle ja tehokertoimelle. Tehokertoimen yhteydessä ei erikseen mainita onko sallittu loisteho kapasitiivista vai induktiivista. Näitä toimintavaatimuksia tullaan tiukentamaan syyskuussa 2013. Toimintavaatimukset pienloistelampuille on nähtävissä taulukossa 2-3 ja muille kuin pienloistelampuille ja LED-lampuille on nähtävissä taulukossa 2-4. Taulukoissa 2-3 ja 2-4 vaihe 5 tarkoittaa ajankohtaa joka alkaa 1.9.2013. LED-lampuille ei näillä näkymin ole tulossa toimintavaatimuksia. [Täh10, 244/2009, 859/2009]

Kotitalouksien kannalta huomion arvoista on myös se, että asetus 244/2009 ei koske suunnattuja valaisimia, jotka määritellään asetuksessa seuraavasti: ”suunnatulla lampulla tarkoitetaan lamppua, jossa vähintään 80 prosenttia säteilevästä valosta on  $\pi$  steradianin avaruuskulman sisällä (vastaa kartiota, jonka kulma on 120°)”. Käytännössä tämä tarkoittaa, että esimerkiksi spottivalaistukseen käytettävät lamput eivät kuulu vielä asetusten piiriin, joten näissä lampuissa. Asetus 859/2009 katsoo, että erikoiskannallisia (G9 ja R7s) lamppujen käytöstäpoistoa myöhemmin. Syynä tähän on se, että kyseisiä erikoiskannallisia lampuja käytetään laajalti eikä niille ole olemassa tällä hetkellä korvaavia tuotteita.

Taulukko 2-3. Toimintavaatimukset pienloistelampuille. [244/2009]

| Toimintaparametri                                 | Vaihe 1                                                                                              | Vaihe 5                                                                                             |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lampun eloonjäämiskerroin 6 000 h:ssa             | $\geq 0,50$                                                                                          | $\geq 0,70$                                                                                         |
| Valovirran alenemakerroin                         | 2 000 h:ssa $\geq 85\%$ ( $\geq 80\%$ lampuille, joissa on ulkovaippa)                               | 2 000 h:ssa: $\geq 88\%$ ( $\geq 83\%$ lampuille, joissa on ulkovaippa)<br>6 000 h:ssa: $\geq 70\%$ |
| Kytkeäntäjäjaksojen lukumäärä ennen vikaantumista | $\geq$ puolet lampun eliniästä tunteina<br>$\geq 10\,000$ , jos lampun syttymisaika $> 0,3\text{ s}$ | $\geq$ lampun elinikä tunteina<br>$\geq 30\,000$ , jos lampun syttymisaika $> 0,3\text{ s}$         |
| Syttymisaika                                      | $< 2,0\text{ s}$                                                                                     | $< 1,5\text{ s}$ , jos $P < 10\text{ W}$<br>$< 1,0\text{ s}$ , jos $P \geq 10\text{ W}$             |
| Lampun lämpenemisaika 60 %:iin $\Phi$ :sta        | $< 60\text{ s}$<br>tai $< 120\text{ s}$ lampuilla, jotka sisältävät elohopeaa amalgaamimuodossa      | $< 40\text{ s}$<br>tai $< 100\text{ s}$ lampuilla, jotka sisältävät elohopeaa amalgaamimuodossa     |
| Ennenaikainen vikaantumisasaste                   | $\leq 2,0\%$ 200 h:ssa                                                                               | $\leq 2,0\%$ 400 h:ssa                                                                              |
| UVA + UVB-säteily                                 | $\leq 2,0\text{ mW/km}$                                                                              | $\leq 2,0\text{ mW/km}$                                                                             |
| UVC-säteily                                       | $\leq 0,01\text{ mW/km}$                                                                             | $\leq 0,01\text{ mW/km}$                                                                            |
| Lampun tehokerroin                                | $\geq 0,50$ , jos $P < 25\text{ W}$<br>$\geq 0,90$ , jos $P \geq 25\text{ W}$                        | $\geq 0,55$ , jos $P < 25\text{ W}$<br>$\geq 0,90$ , jos $P \geq 25\text{ W}$                       |
| Värintoistoindeksi (Ra)                           | $\geq 80$                                                                                            | $\geq 80$                                                                                           |

Taulukko 2-4. Toimintavaatimukset muille kuin pienloiste- ja LED-lampuille. [859/2009]

| Toimintaparametri                          | Vaihe 1                                                              | Vaihe 5                                                              |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Lampun eliniän mitoitusarvo                | $\geq 1\,000\text{ h}$                                               | $\geq 2\,000\text{ h}$                                               |
| Valovirran alenemakerroin                  | $\geq 85\%$ 75 %:ssa lampun eliniän keskimääräisestä mitoitusarvosta | $\geq 85\%$ 75 %:ssa lampun eliniän keskimääräisestä mitoitusarvosta |
| Kytkeäntäjäjaksojen lukumäärä              | $\geq$ neljä kertaa lampun eliniän mitoitusarvo tunteina             | $\geq$ neljä kertaa lampun eliniän mitoitusarvo tunteina             |
| Syttymisaika                               | $< 0,2\text{ s}$                                                     | $< 0,2\text{ s}$                                                     |
| Lampun lämpenemisaika 60 %:iin $\Phi$ :sta | $\leq 1,0\text{ s}$                                                  | $\leq 1,0\text{ s}$                                                  |
| Ennenaikainen vikaantumisasaste            | $\leq 5,0\%$ 100 h:ssa                                               | $\leq 5,0\%$ 200 h:ssa                                               |
| Lampun tehokerroin                         | $\geq 0,95$                                                          | $\geq 0,95$                                                          |

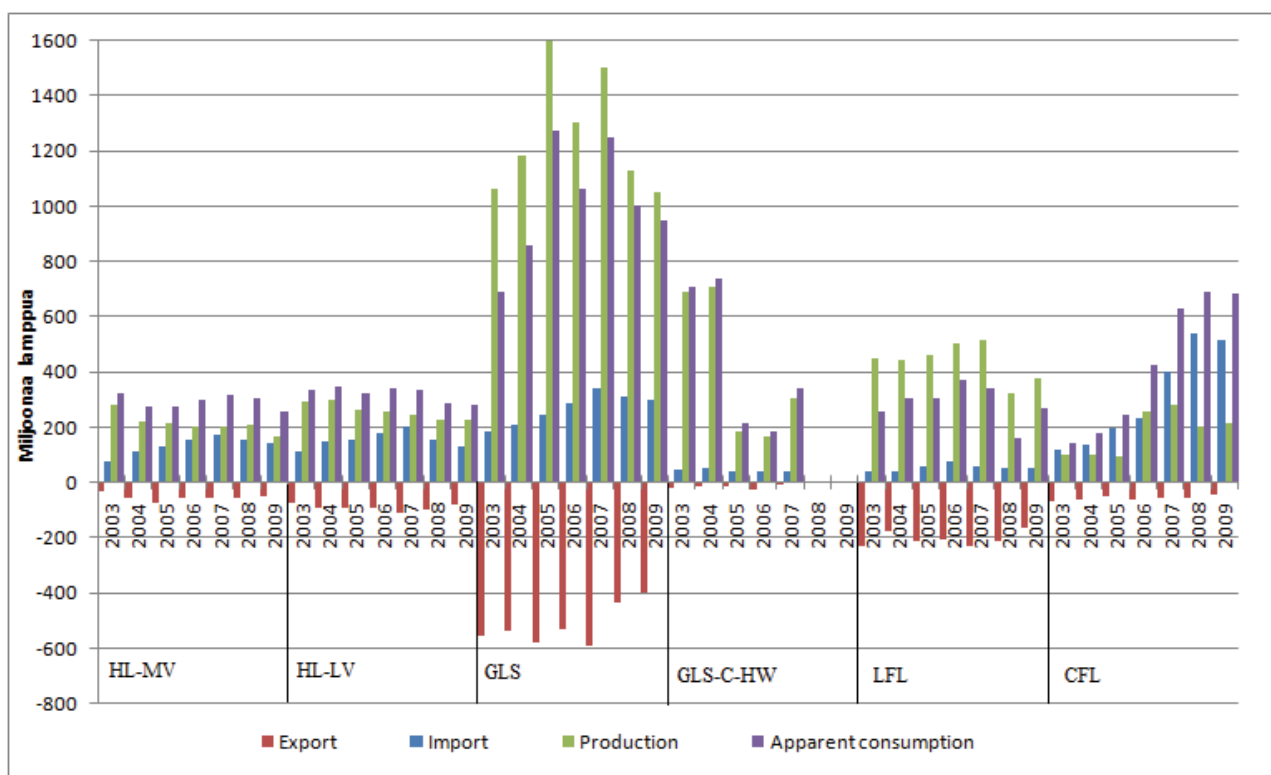
Toinen edellä mainittu asetus 245/2009 koskee pääsääntöisesti palvelusektorin valaisimia, mutta joitakin tämän asetuksen piiriin kuuluvia lamppeja on käytössä myös kotitalouksissa. Tämän asetuksen merkittävimmät palvelusektoriin kohdistuvat vaikutukset aiheutuvat elohopealamput poistumisesta markkinoilta 13. huhtikuuta 2015. Erityinen vaikutus tällä on katuvalaistukseen, josta noin 50 % tulee korvata muilla lampputyypeillä. Suurpainenatriumlamput, jotka voidaan suoraan asentaa elohopealamppujen tilalle, kielletään samaan aikaan. Muita pienempiä vaikutuksia palvelusektorille aiheutuu siitä, että huhtikuun 2012 jälkeen valotehokkaimmat suurpainenatrium- ja monimetallilamput jäivät markkinoille, joille asetetaan eliniälle ja valovirran alenemalle vaihteittain vaatimuksia. Markkinoilta poistuivat myös halofosfaattiloisteaineella toimivat T8-loistelamput 2010 ja 2012 poistuvat T12-loistelamput. Kaksinastainen kompaktiloistelamppu, jossa on sisäinen sytytin tulee poistumaan markkinoilta 13.4.2017. Yleisimmät lampputyypit ovat 9 W ja 11 W kaksoissormilamput, ja käyttökohteina koululaispöytävalaisimet ja käytävien alasvalot. Näille suunnitellut valaisimet tulee vaihtaa, koska korvaavia lampputyyppejä ei ole. Muissa tapauksissa korvaavia lamppeja löytyy markkinoilta. [Täh10, STK09, 245/2009, 347/2010]

### **2.2.2 Muutokset kotitalousvalaistuksessa**

Suomen tasolta ei selkeitä lähteitä erityyppisten lamppeujen yleistymisestä ollut saatavilla. Suomen osalta historiatietoa kuitenkin oli saatavilla. EU:n tasolta eräs tällainen tutkimus kuitenkin oli saatavilla. Euroopan komission teettämässä tutkimuksessa tarkasteltiin kestävän kehityksen suunnittelu direktiivin vaikutuksia kotitalousvalaistukseen. Tutkimus jaettiin kahteen osaan, josta ensimmäinen osa käsitteli ympärisäteileviä kotitalousvalaistusta ja jälkimmäinen suunnattua kotitalousvalaistusta. Ensimmäinen osa valmistui vuonna 2008 ja toinen osa vuonna 2009 ja näitä tutkimuksia on käytetty hyväksi määriteltäessä valaistukselle asetettavia asetuksia. Täten tutkimuksen tuloksiin ei ole vaikuttanut valaistuksen asetukset. Tutkimus tehtiin selvittelemällä jo aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia sekä käyttämällä asiantuntija lausuntoja. Tutkimuksen rakenne seurasi Methodology Study Eco-design of Energy-using Products raportin rakennetta. Tutkimuksessa käytiin mm. läpi tuotteiden määritelmät, markkina- ja taloudelliset analyysit, tekniset analyysit markkinoilla olevista tuotteista ja tulevaisuuden tuotteista, erilaisten lampputyyppeiden ympäristövaikutukset, erilaisten lamppeujen korvausmahdollisuudet sekä tulevaisuuden skenaariot lamppeujen määrästä ja ympäristövaikutuksista. Tämän kappaleen yhteydessä tulevaisuuden lamppeujen yleistymisasteita tarkasteltaessa viitataan koko ajan kyseiseen tutkimukseen. [VITO09]

Kuvassa 2.1 on esitetty EU-27 alueella tuotettujen, alueelle tuotujen, alueelta vietyjen ja alueen näennäisen kulutuksen kappalemäärät miljoonissa kappaleissa vuosina 2003-2009. Näennäiskulutus on laskettu siten, että EU-27 alueella tuotettuihin lamppeihin on lisätty alueen ulkopuolelta tuodut lamput ja siitä summasta on vähennetty alueen ulkopuolelle viedyt lamput. Tiedot perustuvat Eurostat tietokantaan ja ne on kerätty 4.3.2011, jotta uusin tieto olisi saatavilla. Lamppeujen kategoriat on valittu Domestic lighting tutkimuksen mukaisesti. Tarkasteltavia lamppeja ovat halogeeni lamput, jotka kytketään suoraan verkkojännitteeseen HL-MV, halogeenilamput, joka kytketään pienjännitteeseen HL-LV, kaikki tavalliset hehkulamput GLS, suurtehoiset  $\geq 200W$

kirkkaat hehkulamput GLS-C-HW, loisteputkilamput LFL (pääsääntöinen käyttö palvelusektorilla) ja pienloistelamput CFL. Lamppukategoriat käsittävät kaikkien sektoreiden lamput. Tarkasteltaessa kuvaa 2.1 on syytä huomioda, että lamput, jotka on myyty useamman lampun pakkauksissa, saattavat olla merkitty Eurostat tietokantaan yhtenä sekä lamput, jotka myydään valaisimien kanssa, eivät välttämättä ole näissä tilastoissa. Tästä syystä todelliset luvut joidenkin lamppujen osalta saattavat olla todellisuudessa suurempia. Lamppujen, joiden osalta ei tietoa ole ollut saatavilla, luvut on merkitty arvoksi 0. Vertailun vuoksi mainittakoon Euroopan lamppuvalmistajien liiton (European Lamp Companies Federation) vuoden 2007 tilasto taulukossa 2-5. Vertaillen vuotta 2007 kuvan 2.1 ja taulukon 2-5 kesken huomataan, että kulutusmäärissä on eroja edellä mainituista syistä. Tutkimuksen Domestic lighting:n mukaan suuritehoisten kirkkaiden hehkulamppujen tuotantomäärät vuosilta 2003 ja 2004 ovat luultavasti liian suuria, sillä ne eivät vastaa tutkimuksen valmistajilta saamia tietoja.



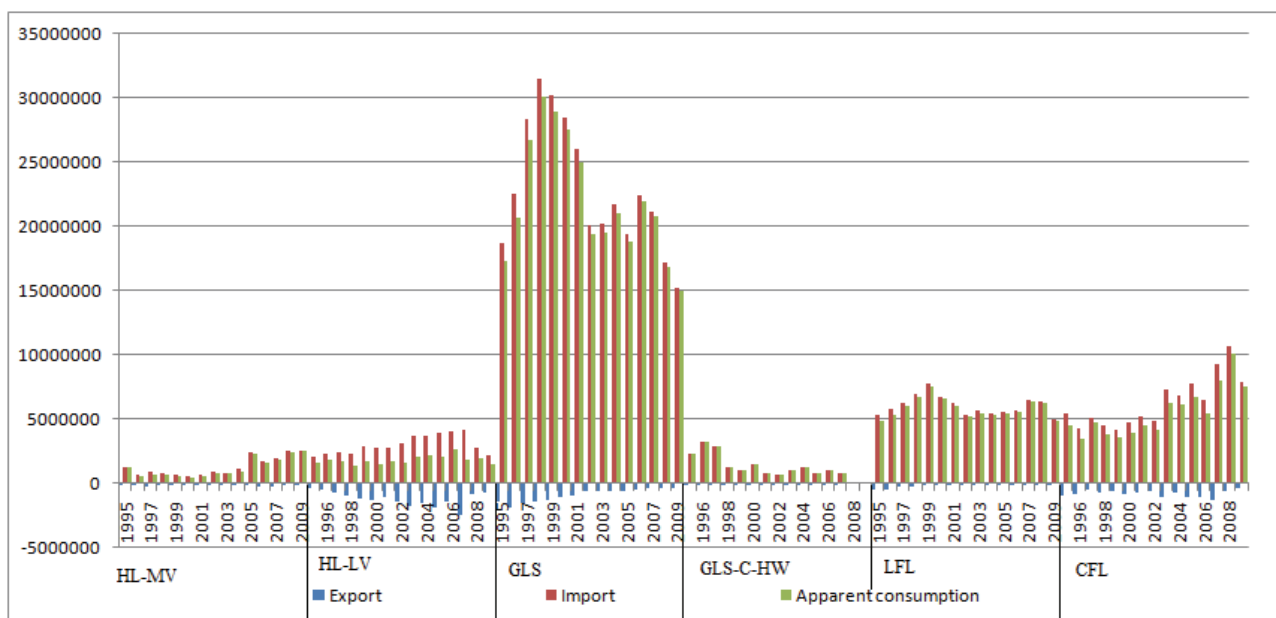
Kuva 2.1. Eurostat tietokannan mukaiset lamppujen tuonti, vienti, tuotanto ja näiden pohjalta arvioitu näennäiskulutus EU-27 alueella vuosina 2003-2009. [EUS]

Taulukko 2-5. European Lamp Companies Federation:n vuoden 2007 lamppujen myyntimäärät. [ELC07]

|                   | milj. Kpl |
|-------------------|-----------|
| Hehkulamput       | 1900      |
| Halogeenilamput   | 480       |
| Loisteputkilamput | 470       |
| Pienloistelamput  | 450       |

Kuvasta 2.1 nähdään miten hehkulamppujen näennäinen kulutus on laskenut selvästi vuodesta 2007 vuoteen 2009. Hehkulamppujen osalta havaitaan myös, että hehkulampuista suurin osa tuotettiin EU-27 alueen sisällä. Hehkulamppujen vienti EU-27 alueen ulkopuolelle on ollut huomattavaa. Halogeeni valaisimien osalta havaitaan, että vuosina 2007-2009 kulutus on hivenen laskenut. Arviolta puolet halogeenilampuista tuodaan EU-27 alueen ulkopuolelta. Pienloistelamppujen osalta havaitaan erittäin voimakas jatkuva kulutuksen kasvu vuosina 2003-2009. Pienloistelampuista valtaosa tuodaan EU-27 alueen ulkopuolelta. Oletettavaa on että suurin osa näistä tuodaan Kiinasta, sillä Kiina on maailman suurin pienloistelamppujen valmistaja [IEA06]. Loisteputkilamppujen kulutuksessa nähdään kasvua 2000-luvun alkupuolella ja voimakasta vaihtelua vuoden 2007 jälkeen. Suurin osa loisteputkista valmistetaan EU-27 alueen sisällä. Loisteputkilamppujen vienti EU-27 alueen ulkopuolelle on varsin huomattavaa suhteessa valmistusmääriin.

Kuvassa 2.2 Eurostat:n tietokannan mukainen lamppujen tuonti, vienti ja näennäinen kulutus Suomen osalta vuosina 1995-2009. Kuten todettiin jo EU-27 alueen osalta, myös tässä Eurostat tietokannan tilastointi ei välttämättä ole huomionut useamman lampun myyntipakkauksia eikä lamppuja, jotka on myyty valaisimien kanssa. Tietokannan mukaan Suomessa ei valmisteta lamppuja tai tuotannosta ei ole tietoa. Suomen osalta nähdään samat kehitystrendit kuin muun Euroopan osalta. Hehkulamppujen kulutus on selvästi pudonnut 2007-2009 aikana. Halogeenilamppujen suosio on kasvanut vuodesta 1995, mutta vuosina 2007-2009 kulutus on kääntynyt laskuun. Loisteputkien osalta nähdään vuosien 1995-2009 välillä pienoista aaltoilua. Pienloistelamput ovat kasvattaneet merkittävästi suosiotaan vuosina 1995-2009.



Kuva 2.2. Eurostat tietokannan mukaiset lamppujen tuonti, vienti, tuotanto ja näiden pohjalta arvioitu näennäiskulutus Suomessa vuosina 2003-2009. [EUS]

Kuvissa 2.1 ja 2.2 esitetyt tulokset koskevat kaikkia mahdollisia kulutussektoreita. Tutkimuksessa Domestic lighting tarkoituksena oli selvittää miten tietyn tyyppiset vaatimukset vaikuttavat

tyypillisesti kotitalouksien käyttämien lamppujen myyntimääriin ja yleistymiseen. Näitä lamppeja on käytössä muillakin sektoreilla kuin kotitalouksissa. Tarkempaan sektorijakoon ei tutkimuksessa pyritty, koska suurin osa edellä mainituista lampeista on käytössä kotitalouksilla ja koska on erittäin vaikeata selvittää tarkasti miten lamput jakautuvat eri sektoreiden kesken. Tutkimuksen kotitalous tarkasteluista jätettiin täten pois loisteputkilamput, koska niiden pääsääntöinen käyttö tapahtuu palvelusektorilla.

Tutkimuksellisista syistä kotitalouksien lamput määriteltiin kahdeksi eri ryhmäksi ympärisäteileviin (non directional lighting source-NDLS) ja suunnattuihin lamppeihin (directional lighting source-DSL). Määritelmä on yhtenevä aiemmin mainitun määritelmän kanssa.

Tutkimus Domestic lighting esitteli lamppeja koskevia erilaisia teknisiä parannuksia. Osa näistä on jo markkinoilla ja osa on vasta tulossa. Käsitellään ensiksi jo markkinoilla olevia teknisiä parannuksia. Halogeenilampuille, joka voidaan nähdä eräänlaisena parannuksena hehkulamputa, tutkimus esitteli kolme erilaista teknistä parannusta. Ensimmäinen tekninen parannus on, että käyttöjännitteellä toimivien halogeenilamppujen täytekaasu korvataan Xenonilla. Näin halogeenilamppujen valotehokkuutta (lm/W) voidaan nostaa jopa 20 %. Näiden halogeenilamppujen värintoistoindeksi on korkea 100 ja tehokerroin 1. Näillä lampeilla voidaan toteuttaa suoraan vanhan hehkulampun korvaus, koska ne ovat myös himmennettäviä. Käyttöikä näillä lampeilla on noin kaksinkertaiseksi hehkulamppuihin verrattuna.

Toinen tekninen parannus koskee pienisjännitteellä toimivia halogeenilamppeja, joissa täytekaasuna on Xenon ja joissa halogeenilampun lasikupu päällystetään kerroksella, joka läpäisee näkyvää valoa ja heijastaa infrapunavaloa takaisin nostaen samalla halogeenilampun hehkulangan lämpötilaa. Tällä tavoin valotehokkuus (lm/W) voi nousta jopa 40 %. Värintoistoindeksi on näillä lampeilla korkea 100. Itse lampun tehokerroin on 1, mutta riippuen siitä millä tekniikalla jännitteen lasku on tehty, valaisinjärjestelmän tehokerroin voi olla muuta. Tällä parannuksella voidaan korvata suoraan ainoastaan pienisjännitteellä toimivat halogeenilamput.

Kolmas halogeenilamppujen tekninen parannus on tuoda infrapunavaloa heijastava lasikupupinnoite, myös lampeille, jotka toimivat käyttöjännitteellä. Käyttöjännitteellä toimittaessa hehkulanka on tyypillisesti liian pitkä, jotta tehokasta infrapunavalon takaisinheijastusta voitaisiin toteuttaa. Ratkaisuna tähän halogeenilampun jännitettä lasketaan lamppeun integroidulla elektronisella muuntajalla. Värintoistoindeksi on tälläkin parannuksella korkea 100. Riippuen siitä millä tekniikalla jännitteen lasku on tehty, voi lampun tehokerroin olla muuta kuin 1. Tällä parannuksella voidaan toteuttaa suoraan hehkulamppujen korvaus, koska ne ovat himmennettäviä. Käyttöikä näillä lampeilla on noin kolminkertainen hehkulamppuihin verrattuna. Toinen tapa tehdä jännitteen lasku on suorittaa se valaisimessa. Tällöin hehkulampun tilalle joudutaan vaihtamaan uusi valaisin.

Pienloistelampuille tutkimus Domestic lighting esittää 16 erilaista jo markkinoilla olevaa teknistä parannusta. Pääpiirteissään ne koskevat elektronisen säätöjärjestelmän mahdollisuutta parantaa valotehokkuutta noin 10%, käyttöiän kasvattamista huomattavasti, elohopeapitoisuuksien pienentämistä sekä edellisten yhdistelmiä. Näillä parannuksilla värintoistoindeksit ovat välillä 80-90. Käyttöikä on noin 6-15 kertainen tavalliseen hehkulamppuun. Tämän lisäksi markkinoilta löytyy himmennettäviä pienloistelamppuja. Muista parannuksista mainitaan amalgaami tekniikkaan perustuva parannus, jonka avulla pienloistelampun käyttölämpötilaa voidaan nostaa. Amalgaamitekniikan haittapuoli on normaalia pitempi syttymisaika. Multifosforoivat lamput parantavat värintoistoindeksiä. Markkinoilla on myös värilämpötilaltaan erilaisia pienloistelamppuja. Parannuksia syttymisajoissa mainitaan kolme, joista eräässä käytetään pienloistelampun lisänä syttymishetkellä halogeenilamppua. Tätä kutsutaan hybridilampuksi. Pääsääntönä on, että mitä nopeampi syttymisaika sitä lyhyempi on elinikä. Tehokertoimen parantamiselle mainitaan, että parannusmahdollisuuksia on elektronisessa säätöjärjestelmässä. Näiden lisäksi teknisinä parannuksina mainitaan kylmäkatodilamput, pinniliitännäiset lamput ja suunnatut pienloistelamput.

Muiden lampputyyppeiden tämän hetken markkinoilla olevista tuotteista tutkimuksessa mainitaan suunnatut LED-lamput, ympärisäteilevät ja suunnatut suurtehoiset purkauslamput. Näiden lisäksi valotehokkuutta tutkimuksen mukaan voidaan parantaa valaisin suunnittelulla.

Tutkimus esitteli tulevista ei vielä markkinoilla olevista tekniikoista orgaaniset LED-lamput ja elohopea vapaa purkauslamppu, joka perustuu dielektrisen kuilun hyötykäyttöön.

Suunnatuille lampuille markkinoilla olevista teknisistä parannuksista mainitaan pääsääntöisesti erilaisten parempien heijastusmateriaalien käyttö, halogeeni valaisimien täytekkaasuna Xenon, optimoitu hehkulangan suunnittelu, paraboloidiset heijastusmuodot, suunnatut LED-lamput, joiden kanta on samanlainen kuin hehkulampuissa, suunnatut pienloistelamput, kylmäkatodi pienloistelamput, suunnatut suurtehoiset purkauslamput ja LED-lamput, jotka eivät sovi tämän hetkisiin katoihin ja joissa on integroitu ”valaisin”. Muista teknisistä parannuksista suunnatuille lampuille mainitaan valaisimen suunnittelun kehittäminen materiaalivalintojen kautta. Tulevaisuuden ei vielä markkinoilla olevista tekniikoista tutkimus mainitsee orgaaniset LED-lamput ja valkoisen LED:n käyttö.

Kuten jo aiemmin todettiin, asetus 244/2009 koskee ainoastaan ympärisäteileviä lamppeja. Tutkimuksessa Domestic lighting kuitenkin asetettiin vaatimuksia myös suunnatuille valaisimille. Tutkimus teki erilaisia skenaarioita siitä, minkälaisia asetuksia voitaisiin asettaa lampuille ja mikä olisi näiden asetusten vaikutus mm. valaisimien myyntiin ja yleistymiseen vuosina 2007-2020. Ensiksi tutkimus määritteli valaisinpisteiden määrän kotitalouksissa eri maissa ja EU-27 alueella sekä kuinka monta tietyn tyyppistä lamppua kotitalouksissa on vuonna 2007. Tämä on esitetty

taulukossa 2-6. Tutkimus myös selvitti miten lamput jakautuvat suunnattuihin ja suuntaamattomiin lamppeihin. Tämä tieto on esitetty taulukossa 2-7.

Taulukko 2-6. Valaisinpisteiden ja erityyppisten lamppujen määrät eräissä EU-27 alueen jäsenmaissa, sekä keskiarvoistettu EU-27 alueen vastaavat arvot. [VITO09]

|                     |             |                       | REMODECE survey |            |            |       |        |                 | JRC questionnaire                       |                                    |                                    |
|---------------------|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------|-------|--------|-----------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| EU region           | Country     | Number of house holds | GLS             | Halogen LV | Halogen MV | LFL   | CFLi   | Lamp per HH     | Lighting points                         | % of HH with CFLi's                | CFLs/HH incl. HH without CFLi      |
|                     |             | millions              | no/HH           | no/HH      | no/HH      | no/HH | no/H H | No/HH           | no/HH                                   | %                                  | no/HH                              |
| Central and Eastern | BG          | 3,7                   | 9,10            | 4,11       | 0,24       | 0,55  | 1,73   | 15,7            | 10,0                                    | 7                                  | 0,20                               |
|                     | CZ          | 4,40                  | 8,85            | 3,50       | 0,38       | 1,60  | 4,80   | 19,1            | 10,0                                    | 70                                 | 2,90                               |
|                     | CY          | 0,32                  |                 |            |            |       |        |                 | 16,0                                    | 79                                 | 2,00                               |
|                     | EE          | 0,60                  |                 |            |            |       |        |                 | 6,0                                     | 20                                 | 0,25                               |
|                     | HU          | 4,10                  | 8,30            | 1,40       | 0,00       | 0,30  | 3,20   | 13,2            | 18,0                                    | 60                                 | 1,00                               |
|                     | LV          | 0,97                  |                 |            |            |       |        |                 | 20,0                                    | 19                                 | 0,42                               |
|                     | LT          | 1,30                  |                 |            |            |       |        |                 | 6,0                                     | 20                                 | 0,25                               |
|                     | MT          | 0,13                  |                 |            |            |       |        |                 | 15,0                                    | 50                                 | 1,00                               |
|                     | PL          | 13,3                  |                 |            |            |       |        |                 | 20,0                                    | 50                                 | 0,50                               |
|                     | RO          | 8,13                  | 8,37            | 0,80       | 0,27       | 0,75  | 1,05   | 11,2            | 10,0                                    | 20                                 | 0,20                               |
|                     | SK          | 2,1                   |                 |            |            |       |        |                 | 15,0                                    | 60                                 | 1,00                               |
|                     | SI          | 0,69                  |                 |            |            |       |        |                 | 19,0                                    | 50                                 | 1,00                               |
| Middle              | AT          | 3,3                   |                 |            |            |       |        |                 | 26,0                                    | 70                                 | 4,00                               |
|                     | BE1         | 4,3                   | 9,3             | 10,0       | 1,10       | 3,0   | 7,2    | 30,7            | 26,0                                    | 71                                 | 2,50                               |
|                     | FR          | 32,2                  | 12,80           | 2,10       | 0,80       | 1,50  | 3,20   | 20,4            | 18,9                                    | 52                                 | 2,26                               |
|                     | DE          | 39,1                  | 12,50           | 7,10       | 0,70       | 1,90  | 3,10   | 25,3            | 32,0                                    | 70                                 | 6,50                               |
|                     | EL          | 1,44                  |                 |            |            |       |        |                 | 18,0                                    | 38                                 | 1,50                               |
|                     | LU          | 0,20                  |                 |            |            |       |        |                 | 20,0                                    | 70                                 | 2,00                               |
|                     | NL          | 7,0                   |                 |            |            |       |        |                 | 40,0                                    | 60                                 | 4,00                               |
|                     | UK          | 26,20                 | 15,6            | 2          | 3,80       | 1     | 2,3    | 25,0            | 20,0                                    | 50                                 | 2,00                               |
| Northern            | DK          | 2,5                   | 14,10           | 9,10       | 1,70       | 2,40  | 5,40   | 32,7            | 25,4                                    | 65                                 | 4,90                               |
|                     | FIN         | 2,5                   |                 |            |            |       |        |                 | 23,5                                    | 50                                 | 1,00                               |
|                     | SE          | 4,5                   | 21,0            | 4,0        | 1,0        | 4,8   | 4,0    | 34,8            | 22,0                                    | 55                                 | 2,20                               |
| Southern            | GR          | 3,7                   | 11,3            | 2,6        | 0,5        | 1,4   | 3,0    | 18,8            | 7,0                                     | 50                                 | 1,00                               |
|                     | IT          | 22,5                  | 15,4            | 7,0        | 2,0        | 3,2   | 5,8    | 33,4            | 18,0                                    | 60                                 | 0,80                               |
|                     | PT          | 4,2                   | 11,84           | 3,51       | 0,79       | 1,80  | 3,39   | 21,3            | 11,4                                    | 54                                 | 1,70                               |
|                     | ES          | 17,2                  |                 |            |            |       |        |                 | 25,0                                    | 15                                 | 2,00                               |
| EU region           | House-holds |                       | GLS             | Halogen LV | Halogen MV | LFL   | CFLi   | Lamps in survey | Lighting points by Remodece +JRC (rest) | Percentage of HH with CFLi's (JRC) | CFLs/HH incl. HH without CFLi, JRC |
|                     | millions    |                       | millions        | millions   | millions   | mio.  | mio.   | mio.            | millions                                | %                                  | No/HH                              |
| Central+Eastern     | 39,73       |                       | 386             | 95         | 10         | 36    | 109    | 288             | 636                                     | 42                                 | 0,8                                |
| Middle              | 113,74      |                       | 1569            | 525        | 183        | 185   | 367    | 2433            | 2829                                    | 59                                 | 3,8                                |
| Northern            | 9,50        |                       | 162             | 51         | 11         | 34    | 39     | 238             | 297                                     | 56                                 | 2,6                                |
| Southern            | 47,60       |                       | 653             | 269        | 73         | 130   | 239    | 934             | 1364                                    | 42                                 | 1,3                                |
| EU-27               | 210,57      |                       | 2770            | 939        | 277        | 385   | 753    | 3893            | 5125                                    | 52                                 | 2,6                                |
|                     | No/hh       |                       | 13,15           | 4,46       | 1,32       | 1,83  | 3,58   |                 | 24,34                                   |                                    |                                    |

Taulukon 2-6 tiedot perustuvat kolmeen eri kyselyyn. Näiden pohjalta on esitetty arvio koko EU:n alueella olevista erityyppisistä valaisimista yksittäisessä kotitaloudessa. Arvion mukaan vuonna 2007 kotitalouksissa oli 24,3 valaisinpistettä, joista 54 % oli hehkulamppuja, 23 % halogeenilamppuja, 8 % loisteputkia ja 15 % pienloistelamppuja. Taulukosta 2-7 näkyy, että 89 % hehkulampuista, 45 % pienoisjännitteellä toimivista halogeenilampuista, 58 % verkkojännitteellä toimivista halogeenilampuista, kaikki loisteputket ja 99 % pienloistelampuista on ympärisäteileviä. Lamppujen lukumäärää kotitaloutta kohtaan pidetään niin sanottuna alimpana rajana, sillä on mahdollista, että kotitalouden valaisimen, jossa on useampi lamppu, lamppujen lukumäärä lasketaan yhdeksi.

Taulukko 2-7. Erityyppisten lamppujen jakautuminen ympärisäteileviin ja suunnattuihin lamppuihin. R tarkoittaa suunnattua lamppua. GLS = hehkulamppu. HL =halogeenilamppu. MV = verkkojännite. LV = pienoisjännite. LW = pienitehoinen. HW = suuritehoinen. LFL = loisteputki. CFLi = pienloistelamppu integroidulla ”liitäntälaitteella/sytyttimellä”. CFLni = pienloistelamppu ilman integroitua ”liitäntälaitetta/sytyttintä”. [VITO09]

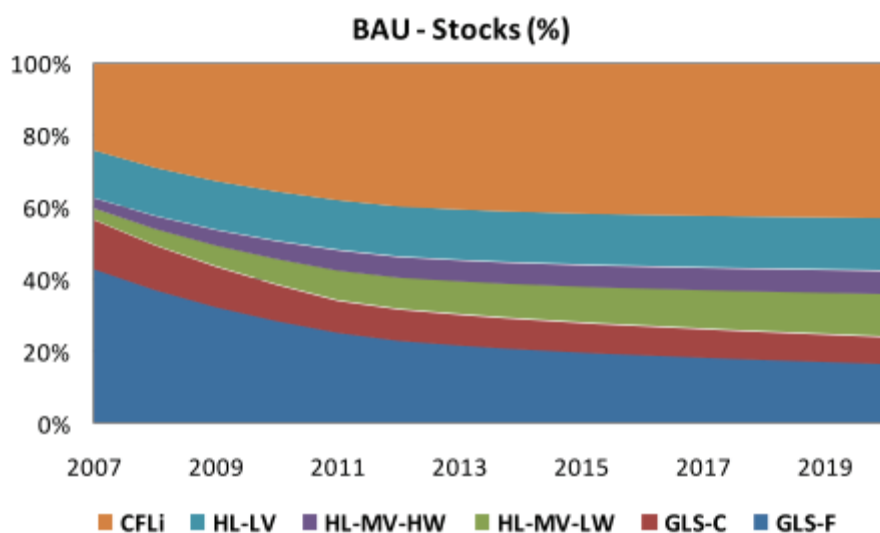
| Lamp type  | Total (Eurostat) | ELC Sales        | 2 major European lamp retailers Sales | Other Sales (residual) | Non Direct and Direct Lamp Sources % |
|------------|------------------|------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| GLS        | 1.350            | 1.096            | 62                                    | 44                     | NDLS 89%                             |
| GLS-R      |                  | 138              | 10                                    |                        | DLS 11%                              |
| HL-LV      | 300              | 60               | 26                                    | 120                    | NDLS 45%                             |
| HL-R-LV    |                  | 73               | 21                                    |                        | DLS 55%                              |
| HL-MV-LW   | 330              | 20 <sup>21</sup> | 10                                    | 193                    | NDLS 58%                             |
| HL-MV-HW   |                  | 24               | 1                                     |                        | DLS 42%                              |
| HL-R-MV-LW |                  | 25               | 46                                    |                        |                                      |
| HL-R-MV-HW |                  | 7                | 4                                     |                        |                                      |
| LFL        | 390              | 386              | 0                                     | 4                      | NDLS 100%                            |
| CFLi       | 426              | 97               | 60 (3% DLS)                           | 159                    | NDLS 99%                             |
| CFLni      |                  | 90 <sup>□</sup>  | 0                                     | 20                     | -                                    |

□ Value estimated from EuP lot 8 information and informal data about ELC CFLni sales in 2007

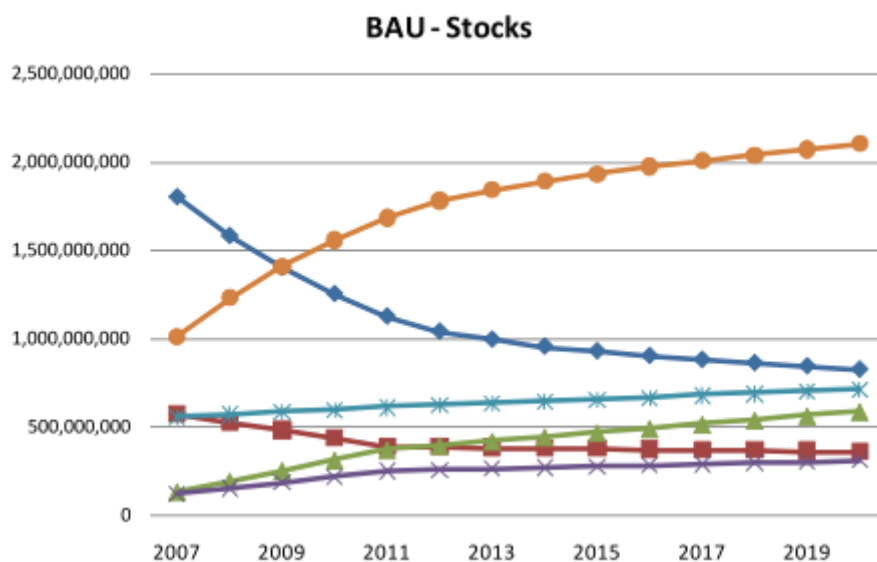
Perustuen edellä mainittuihin tietoihin sekä oletuksiin lamppuille asetettavista vaatimuksista, lamppujen keskimääräisistä toiminta-ajoista, elini’istä, erilaisten lamppujen soveltuvuudesta toisten lamppujen korvauksiin ja siihen, että lumen kokonaismäärä pysyy vakiona vuodesta toiseen, tutkimus tekee erilaisia skenaarioita, joiden avulla estimoidaan miten erilaiset ympärisäteilevät ja suunnatut lamput tulevat yleistymään tulevaisuudessa. Tämän lisäksi perustuen keskimääräisiin lampputehoihin ja elohopeapitoisuuksiin erilaisia ympäristö vaikutuksia arvioidaan. Tutkimuksen Domestic lighting eräksi puutteeksi täytyy mainita, että se ei ole ottanut kantaa ympärisäteilevien tai suunnattujen LED-lamppujen yleistymiseen.

Perustapauksessa, jota tutkimus kutsuu Business as Usual (BAU) skenaarioksi, ympärisäteileville lamppuille oletuksena on, että minkään sortin asetuksia lamppuille ei tule. Kuvissa 2.3-2.6 on esitetty ympärisäteilevien lamppujen BAU skenaarion prosentuaaliset jakaumat sekä arvioidut määrät asennetuista lamppuista ja lamppujen myynneistä kaikille sektoreille.

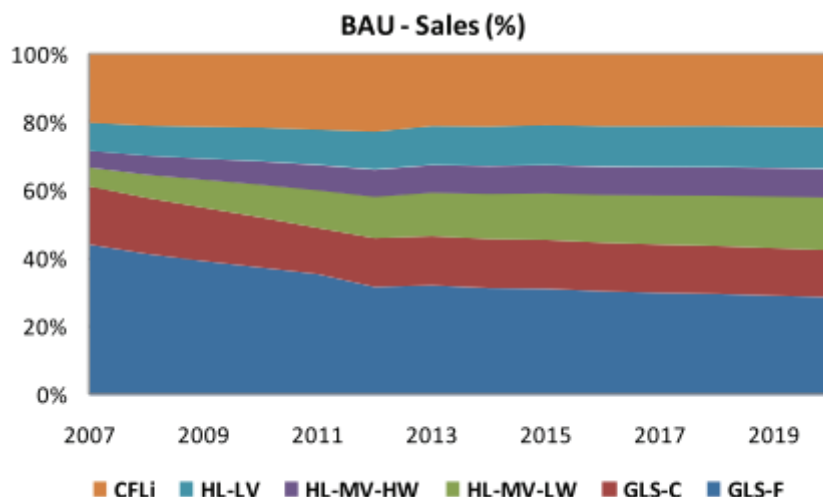
Kuvista 2.3-2.6 nähdään tutkimuksen Domestic lighting oletus siitä, että hehkulamppujen määrät olisivat pudonneet ilman mitään lamppuille asetettavia asetuksia. Myyntimäärät putoavat vuotta 2020 kohden, koska hehkulamppuja korvataan pitempi ikäisillä halogeeni- ja pienloistelampuilla.



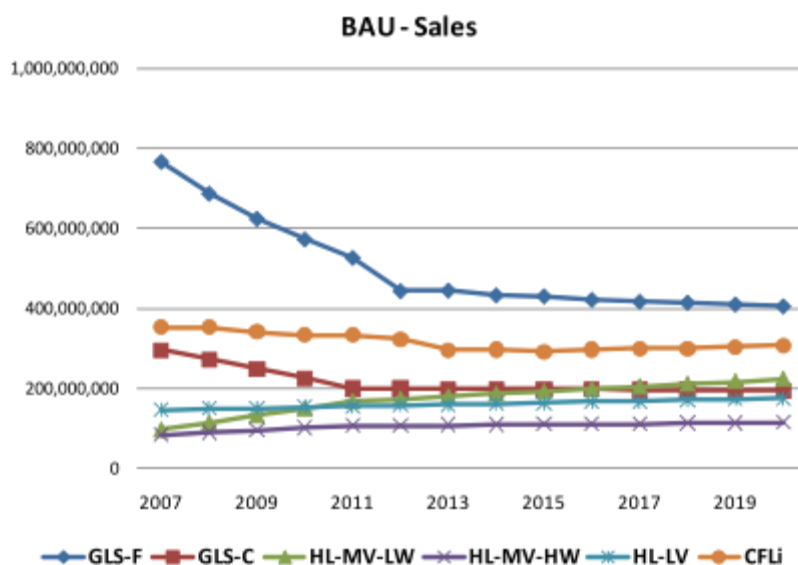
Kuva 2.3. Asennettujen ympärisäteilevien lamppujen prosentuaalinen jakauma BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]



Kuva 2.4. Asennettujen ympärisäteilevien lamppujen määrät BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]



Kuva 2.5. Ympärisäteilevien lamppujen myyntimäärien prosentuaalinen jakauma BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]



Kuva 2.6. Ympärisäteilevien lamppujen myyntimäärät BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]

Täysin EU:n tämän hetken asetusten mukaisia skenaarioita ei tutkimus ympärisäteileville lampuille esittänyt. Osissa skenaarioista lamppujen vaihto edellyttää valaisimen vaihtoa. Näitä skenaarioita ei tässä yhteydessä tarkastella. Lähimmäksi tämän hetken EU:n asetuksia pääsi skenaario ("Option 2 Clear B Fast"), jossa vuonna 2009 annetaan asetus, jonka mukaan kaikkien alle 450 lumenin (vastaa käytännössä 60 W hehkulamppua) lamppujen tulee olla energialuokassa C. Vuonna 2011 kirkkaille lampuille sallitaan energialuokka C ja himmeille lampuille sallitaan energialuokka A. Vuodesta 2013 kirkkaiden lamppujen energialuokkavaatimus nousee luokkaan B. Verrattuna skenaariota nykyisin olevaan asetukseen vuoden 2009 osalta havaitaan, että skenaario ei aseta yhtä kovia vaatimuksia himmeille lampuille, sillä himmeät sallitaan vielä vuoden 2009 jälkeen, mutta asettaa kovemmat vaatimukset kirkkaille lampuille, sillä vuodesta 2009 jälkeen sallitaan C energialuokka

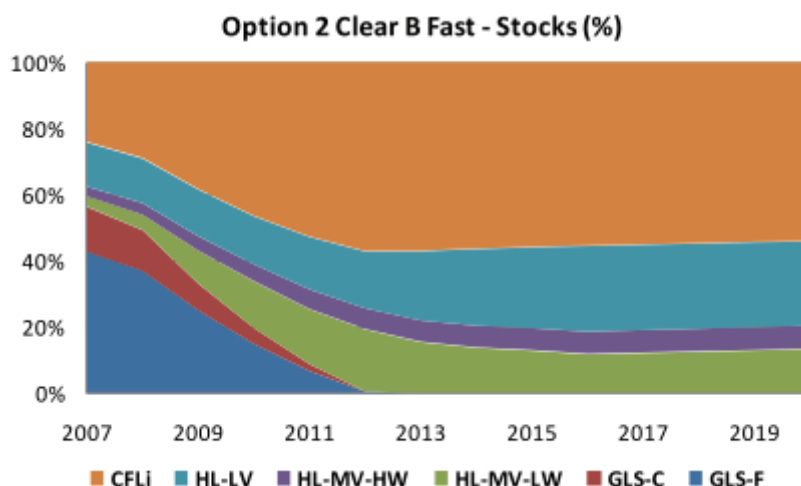
ainoastaan alle 450 lumenin lamppuille. Vuoden 2011 vaatimus on EU:n asetuksen mukainen. Vuoden 2013 asetus on jyrkempi kuin tämän hetkinen asetus, sillä sen jälkeen kaikilta lamputta vaaditaan vähintään energialuokkaa B. Tätä energialuokkaa vaaditaan vasta vuoden 2016 jälkeen EU:n asetuksissa. Skenaarion Option 2 Clear B Fast asettamat vaatimukset ja lamppujen korvaukset on esitetty taulukossa 2-8.

Taulukko 2-8. Skenaarion Option 2 Clear B Fast lamput eri vuosina asetettavat vaatimukset sekä eri lamppujen korvaukset. [VITO09]

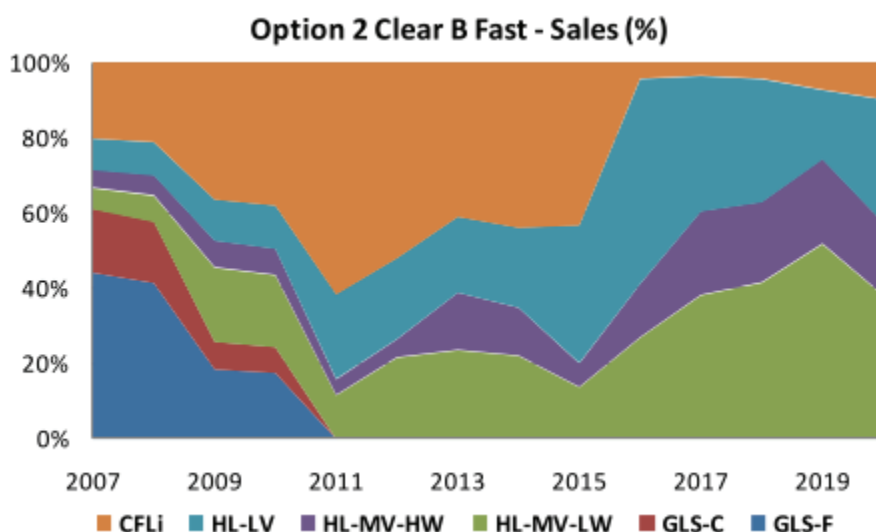
| present              | 2009                                 | 2011                                    | 2013                                             |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <i>requirements:</i> | C except below 450lm                 | clear: C; frosted: A (CFL combination1) | clear: B; frosted: A (CFL combination1)          |
| Base case            | Assumed replacing base-case          | Assumed replacing base-case             | Assumed replacing base-case                      |
| GLS-C                | Xenon HL-MV-LW (except below 450 lm) | Xenon HL-MV-LW                          | HL-MV IRC with integrated electronic transformer |
| GLS-F                | CFLi (except below 450 lm)           | CFLi (combination 1)                    | CFLi (combination 1)                             |
| HL-MV-LW (G9)        | Xenon HL-MV-LW                       | Xenon HL-MV-LW                          | Xenon HL-MV-LW                                   |
| HL-MV-HW (R7s)       | Xenon HL-MV-HW                       | Xenon HL-MV-HW                          | Xenon HL-MV-HW                                   |
| HL-LV                | HL-LV IRC                            | HL-LV IRC                               | HL-LV IRC                                        |
| CFLi                 | CFLi                                 | CFLi (combination 1)                    | CFLi (combination 1)                             |

*Note: in yellow = change from previous phase*

Kuvissa 2.7 ja 2.8 on esitetty ympärisäteilevien lamppujen skenaarion Option 2 Clear B Fast prosentuaaliset jakaumat asennetuista lamputta ja lamppujen myynneistä kaikille sektoreille. Tässä yhteydessä tyydytään tarkastelemaan pelkästään prosentuaalisia jakaumia, sillä ne ovat suhteellisesti oikeammat kuin absoluuttiset arvot ja niiden avulla on helpompi arvioida tilannetta Suomessa. Kuvista 2.7 ja 2.8 nähdään pienloistelamppujen nopea yleistyminen jo vuoden 2008 jälkeen. Pienloistelamput tulevat korvaamaan himmeitä hehkulamputta. Myös halogeenilamppujen määrä ja myynti kasvavat selvästi, koska niillä korvataan kirkkaita hehkulamputta. Kuvan 2.8 myyntijakaumassa on voimakkaita vuosittaisia vaihteluita. Todellisuudessa vaihtelut eri vuosien välillä tulevat olemaan maltillisempia. Pienloistelamppujen myynti putoaa huomattavasti vuoden 2015 jälkeen, koska muiden lamppujen korvauksesta aiheutuva myynti pienenee ja pienloistelamputta on korkea elinikä, joten niiden uusimisesta aiheutuva myynti on pientä. Pienloistelamppujen myynnin pienoinen kasvu arviointikauden lopulla johtuu ajanjakson alkupäässä vaihdettujen pienloistelamppujen uusimisesta. Tämä skenario antaa tällä hetkellä tarkasteltuna hyvin mahdollisen kuvan tulevaisuuden asennettujen lamppujen prosentuaalisesta jakaumasta. Tosin, kuten jo edellä todettiin, LED-lamppujen yleistymistä ei tässä yhteydessä ole käsitelty ollenkaan, mikä luultavimmin tulee vaikuttamaan asennettujen lamppujen määrään. Tosin himmeiden hehkulamppujen markkinoille saattaminen estettiin jo vuonna 2009, joten niiden osuus on alla kuvattuja pienempi.

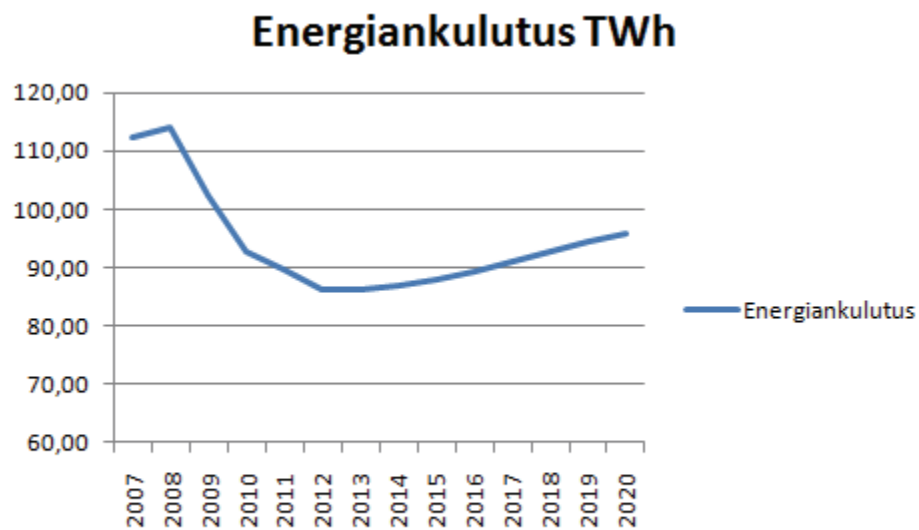


Kuva 2.7. Asennettujen ympärisäteilevien lamppujen prosentuaalinen jakauma Option 2 Clear B Fast skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]

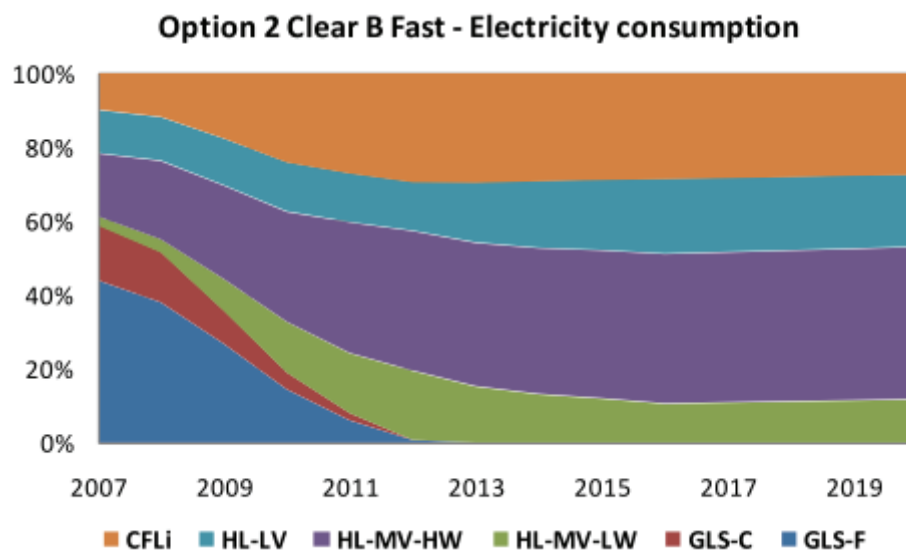


Kuva 2.8. Ympärisäteilevien lamppujen myyntimäärien prosentuaalinen jakauma Option 2 Clear B Fast skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]

Kuvissa 2.9 ja 2.10 on esitetty tutkimuksen arvioimat skenaarion Option 2 Clear B Fast mukaiset ympärisäteilevien lamppujen sähköenergiankulutukset EU-alueella vuosina 2007-2020 sekä energiankulutuksen jakautuminen kyseisinä vuosina eri lamputyypeille. Kuvasta 2.9 nähdään, että ympärisäteilevien lamppujen kokonaissähköenergian kulutuksen lasku vuoteen 2011 ja 2012 saakka, jonka jälkeen sähköenergian kulutus lähtee kasvamaan, koska asennettujen pienloistelamppujen prosentuaalinen jakauma pienenee. Kuvasta 1.2.2\_10 nähdään, että vuonna 2020 noin 25 % ympärisäteilevien lamppujen sähköenergian kulutuksesta aiheutuu pienloistelampuista. Halogeenilamput kuluttavat loput 75 %.

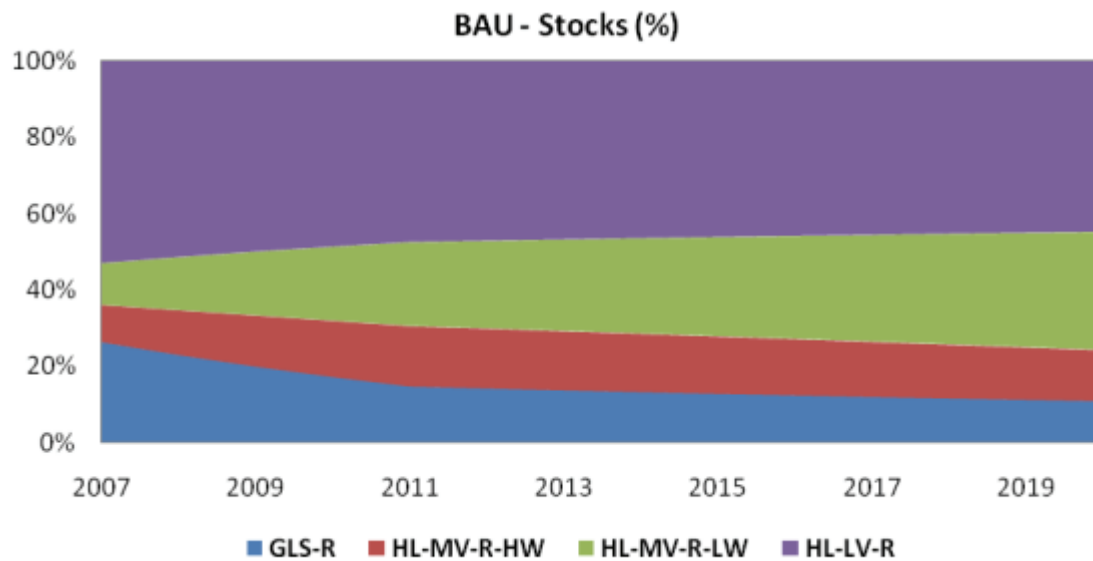


Kuva 2.9. Ympärisäteilevien lamppujen skenaarion Option 2 Clear B Fast mukainen sähköenergiankulutus vuosina 2007-2020. [VITO09]

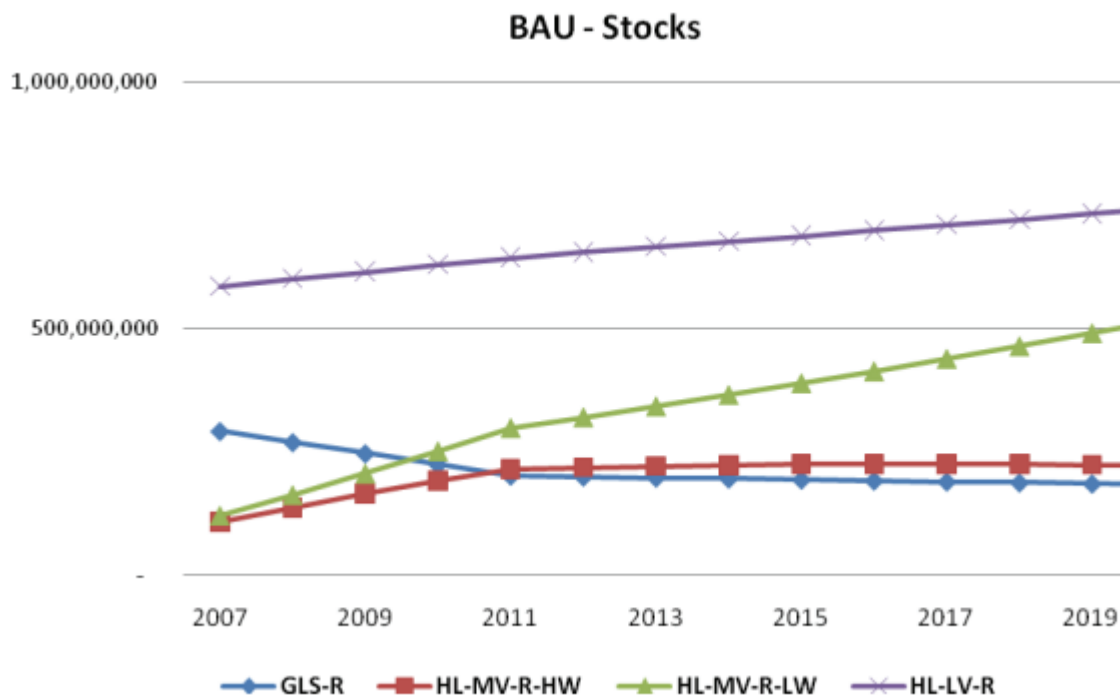


Kuva 2.10. Ympärisäteilevien lamppujen skenaarion Option 2 Clear B Fast mukainen sähköenergiankulutuksen prosentuaalinen jakauma vuosina 2007-2020. [VITO09]

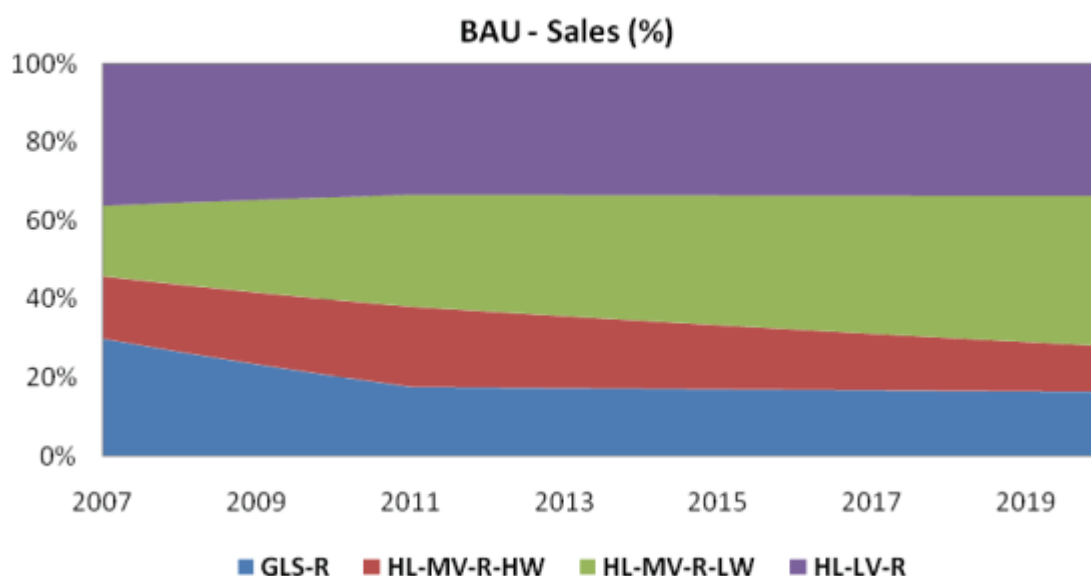
Tutkimus määrittää myös suunnatuille lampuille perusskenaarion Business as Usual (BAU), jonka oletuksena on, että minkään sortin asetuksia suunnatuille lampuille ei tule. Kuvissa 2.11-2.14 on esitetty ympärisäteilevien lamppujen BAU skenaarion prosentuaaliset jakaumat sekä arvioitua määrät asennetuista lampuista ja lamppujen myynneistä kaikille sektoreille.



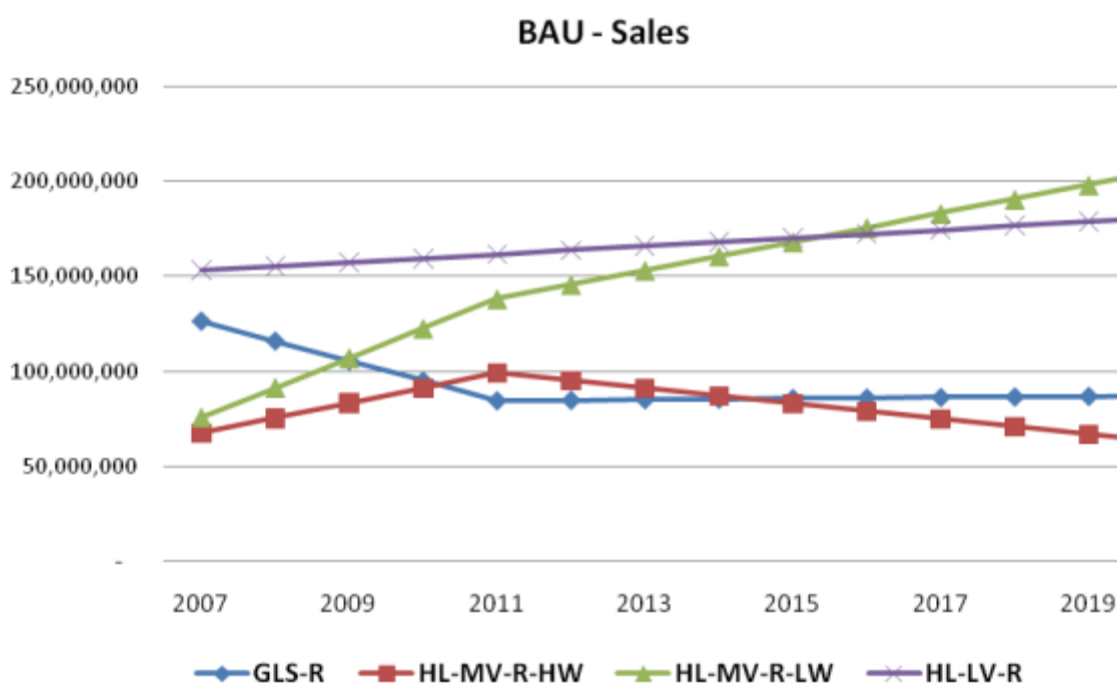
Kuva 2.11. Asennettujen suunnattujen lamppujen prosentuaalinen jakauma BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]



Kuva 2.12. Asennettujen suunnattujen lamppujen määrät BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]



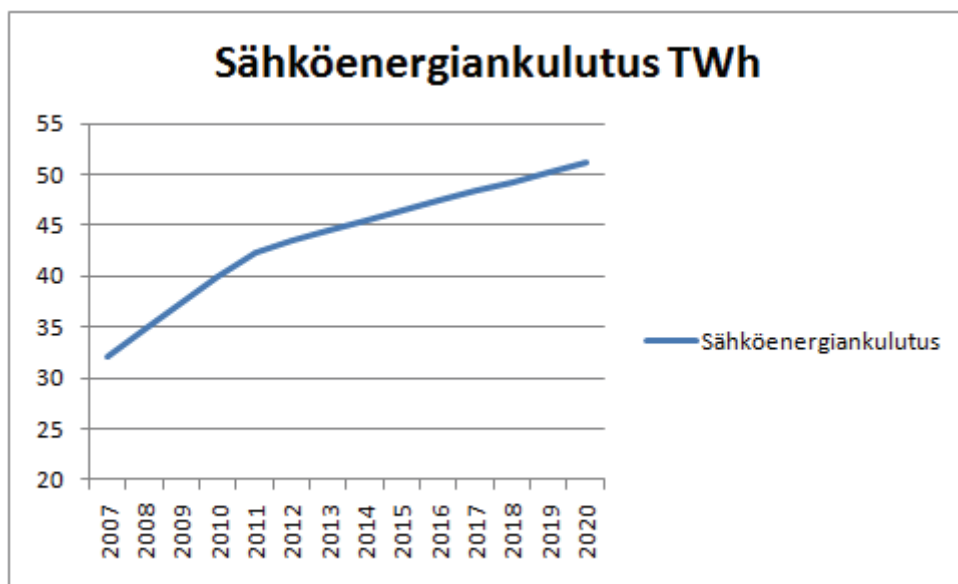
Kuva 2.13. Suunnattujen lamppujen myyntimäärien prosentuaalinen jakauma BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]



Kuva 2.14. Suunnattujen lamppujen myyntimäärät BAU skenaariossa vuosina 2007-2020. [VITO09]

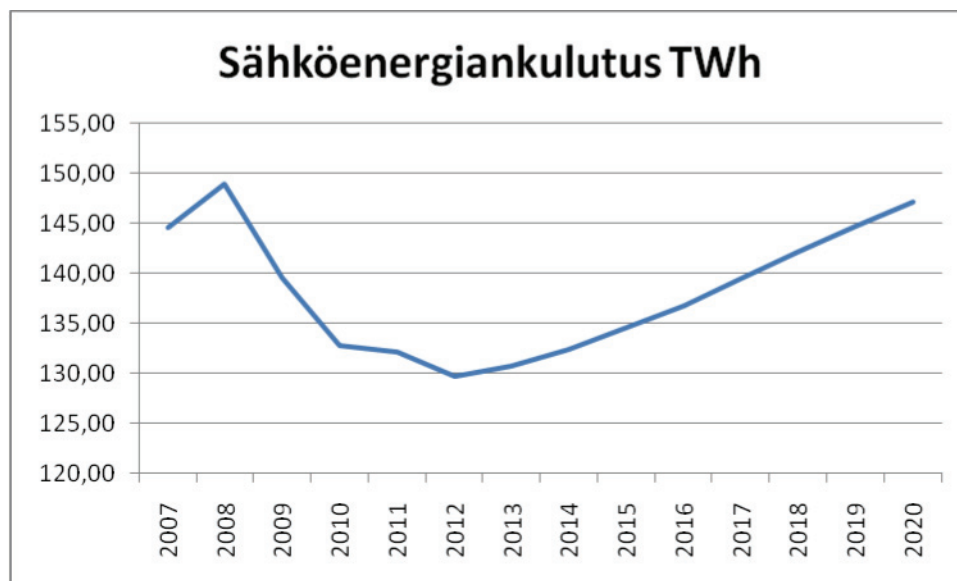
Kuvista 2.11-2.14 nähdään, että jos mitään asetuksia ei tule hehkulamppujen osuus tulee pienentymään. Halogeenilamppujen osuus taas kasvaa selvästi. Merkittävimmän kasvavat käyttöjännitteellä toimivat suunnatut halogeenilamput, joilla voidaan korvata hehkulamppuja. Tässä skenaariossa tutkimus ei ota kantaa siihen miten tekninen sekä taloudellinen kehittyminen

suuritehoisten purkaus- (HID), LED- ja pienloistelamppujen osalta voisi vaikuttaa niiden yleistymiseen. Toisissa skenaarioissa tutkimus määrittelee erilaisia vaatimuksia suunnatuille lamppuille ja joissakin näissä mukana ovat LED-lamput ja suuritehoiset purkauslamput. Tässä yhteydessä niitä ei käydä läpi, koska lamppuille asetetut vaatimukset eivät ole EU:n asetusten mukaisia. Tutkimus myös määritteli suunnattujen kotitalous lamppujen sähköenergiankulutuksen BAU skenaarion mukaisesti vuosien 2007-2020 välillä. Tämä sähköenergian kulutus on esitetty kuvassa 2.15.



Kuva 2.15. Suunnattujen lamppujen skenaarion BAU mukainen sähköenergiankulutus vuosina 2007-2020. [VITO09]

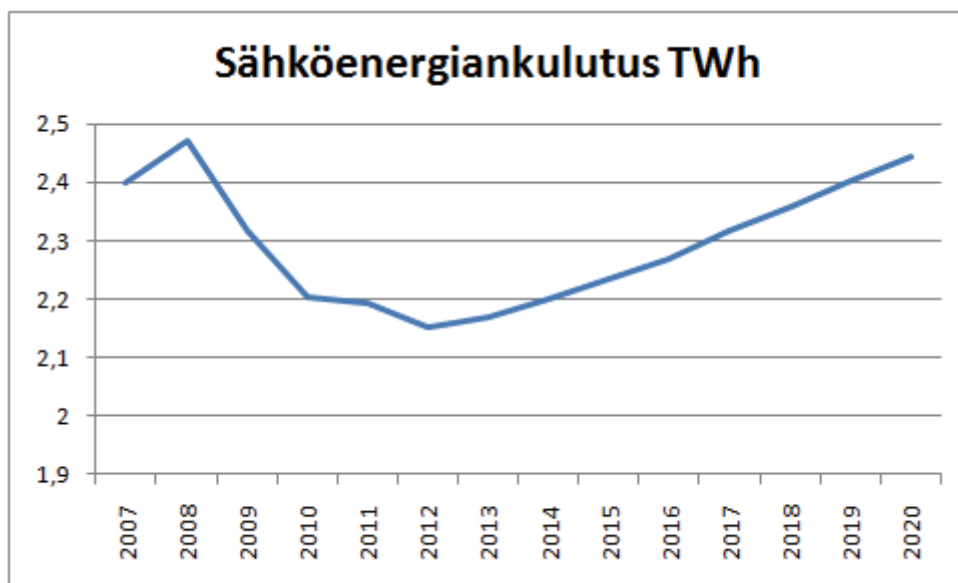
Kuvasta 2.15 nähdään, miten suunnattujen lamppujen sähköenergiankulutus kasvaa vuodesta 2007-2020. Tämä johtuu siitä, että suunnattujen lamppujen määrän odotetaan nousevan kotitalouksissa ja suunnatuille lamppuille ei aseteta minkäänlaisia toiminta-asetuksia. Yhdistetty ympärisäteilevien ja suunnattujen lamppujen EU-alueen vuosittainen energiankulutus on esitetty kuvassa 2.16 perustuen skenaarioon Option 2 Clear B Fast ympärisäteilevien lamppujen osalta ja skenaarioon BAU suunnattujen lamppujen osalta. Kuvasta nähdään, että aluksi sähköenergiankulutus laskee, mutta vuoden 2012 jälkeen se kääntyy nousuun.



Kuva 2.16. Ympärisäteilevien ja suunnattujen lamppujen arvioitu vuotuinen yhteissähkönkulutus vuosina 2007-2020.

Tutkimuksen Domestic lighting valossa tarkasteltuna ympärisäteilevien lamppujen osalta hyvin mahdollisena skenaariona tulevaisuudesta voidaan pitää yllä esitettyä skenaariota Option 2 Clear B Fast. Tämän mukaan arviolta yli puolet ympärisäteilevistä lamputa tulee olemaan pienloistelamppuja. LED-lamppujen halpeneminen ja tekniikan paraneminen tullee muuttamaan kuitenkin kuvassa 2.7 esitettyä jakaumaa. Suunnattujen lamppujen osalta tämän hetken EU:n asetukset puhuisivat BAU skenaarion puolesta, mutta pienloistelamppujen, suuritehoisten purkaus- ja LED-lamppujen teknisen ja taloudellisen kehityksen myötä näillä lamputa tullee olemaan oma osuutensa kuvien 2.11 ja 2.13 jakaumista.

Olettaen, että Suomen kotitalouksien lamppukanta on samanlainen kuin mitä EU-alueella sekä että vaikutukset Suomen kotitalouksien valaistukseen ovat samanlaiset kuin ympärisäteilevillä ja suunnatuilla lamputa yhteensä, voidaan antaa arvioita oletusten puitteissa siitä miten kotitalouksien valaistuksen sähköenergiankulutus tulee muuttumaan tulevaisuudessa. Tämä on esitetty kuvassa 2.17. Kuvasta 2.17 nähdään, että sähköenergian kulutus putoaa vuoteen 2012 asti ollen noin 90 % alkuperäisestä kulutuksesta. tämän jälkeen valaistuksen sähköenergiankulutus tulee kasvamaan ja vuonna 2020 se on jo suurempi kuin vuonna 2007. Tässä kohdassa on syytä pitää mielessä edellä esitettyjen skenaarioiden rajoitteet, joissa LED-lamppuja ei tarkasteltu ollenkaan ja joissa suunnatuille lamputa ei asetettu minkäänlaisia toiminta vaatimuksia. Tämän lisäksi, jos EU-tason asetukset tulevat muuttumaan niillä saattaa olla huomattavia vaikutuksia sähköenergiankulutukseen. Tätä on mallinnettu tutkimuksessa Domestic lighting eri skenaarioiden osalta, joissa erityyppisillä oletuksilla saadaan huomattavasti pienempiä vuotuisia sähköenergiankulutuksia. Ero kuvan 2.16 ja skenaarioiden, joissa käytetään parasta mahdollista markkinoilla olevaa tekniikkaa, on yli 75 TWh, joka on yli 50 % kuvassa 2.16 esitetystä arviosta.



Kuva 2.17. Arvioitu Suomen kotitalouksien valaistuksen sähköenergiankulutus vuosina 2007-2020.

### 2.2.3 Muutokset palvelusektorin valaistuksessa

Kotitalouslamppujen kaltaisia yleistymisnäköymiä ei palvelusektorin valaistuksesta löytynyt. EU-tasolla on kuitenkin 2005 tehty tutkimus toimistovalaisituksen osalta. Tämäkään tutkimus ei antanut yhtä kattavia ennusteita toimistovalaisituksen kehittymisestä tulevana vuosina kuin mitä kotitalouksien osalta saatiin. Tutkimus Office Lighting näkee, että toimistovalaisitukseen ja sen tehokkuuteen vaikuttaa voimakkaasti kolme eri tekijää: lampun tyyppi, valaisimen tyyppi sekä liitäntälaitte (engl. ballast). [VITO07]

Toimistovalaisituksen osalta tutkimus Office Lighting toteaa, että toimistoissa pääsääntöisesti käytetään loisteputkivalaisimia. Tämän lisäksi toimistovalaisituksessa käytetään pienloistelamppuja ja halogeenilamppuja sekä ennen kieltoa myös hehkulamppuja. Ranskassa 2005 tehdyn tutkimuksen mukaan 61 % koko toimistopinta-alan sekä yli 90 % toimistojen työskentelyalan valaisimista on loisteputkia. Tyypillisimpänä lampun tehona 18 W, joita käytetään neljän lampun ryhmänä, tai 38 W, joita käytetään kahden lampun ryhmänä. Työskentelytilojen lisäksi loisteputkia on käytävissä ja toimistojen yhteisissä tiloissa. Koko toimistopinta-alan valaisimista 13 % on pienloistelamppuja. Tyypillisimmät kohteet ovat pöytäkohtaiset valaisimet sekä käytävät ja toimistojen yhteiset tilat. Hehkulamppuja on 11 % ja halogeenilamppuja 12 % toimistojen kaikista valaisimista. Tyypillisimmät käyttökohteet ovat pöytäkohtaiset valaisimet sekä vessojen valaisimet. Tutkimuksen mukaan EU-alueella käytetyistä loisteputkista, hehku- ja halogeenilampuista suurin osa tuotetaan EU:n alueella. Pienloistelamppujen kohdalla EU alue on tuonnin varassa. Lähinnä tuonti tulee Kiinasta. Tämä on linjassa jo aiemmin todetun kanssa.

Edellä mainittu lamppujen jakauma antaa suuntaa myös koko palvelusektorin valaistukselle. Luultavimmin palvelusektorin osalta suurin valaisintyyppi on loisteputki. Luultavaa kuitenkin on,

että pienloistelamppujen suhteellinen määrä voi olla suurempi kuin mitä edellisessä kappaleessa on esitetty, sillä koko palvelusektorin valaistus poikkeaa jossain määrin toimistojen valaistuksesta. Tänä päivänä myös hehkulamppujen osuus on varmasti pienempi johtuen käynnissä olevasta hehkulamppujen asteittaisesta markkinoilta poistumisesta.

Liitäntälaitteiden/kuristimien (engl. ballast) osalta tutkimus Office Lighting toteaa perustuen CELMA:n (EU:n alueen valaisimien ja niiden tarvitsemien elektronisten komponenttien valmistajien yhdistys, vapaa suomennos), että vuonna 2000 elektronisten liitäntälaitteiden myynti oli 17 % ja vuonna 2005 26 % liitäntälaitteiden kokonaismyynnistä. Loput olivat ferromagneettisia liitäntälaitteita. Uusissa asennuksissa elektronisten liitäntälaitteiden osuus oli vuonna 2000 24 % ja vuonna 2005 35 %. Liitäntälaitteiden prosentuaalinen myynti vastaa hyvin asennettujen liitäntälaitteiden prosentuaalista jakaumaa. Tutkimus Office Lighting viittaa 2001 tehtyyn DEFU tutkimukseen, jonka mukaan EU-25 (johon ei kuulu vuonna 2007 EU:hun liittyneitä Bulgariaa ja Romaniaa) alueen toimistojen liitäntälaitteista 17 % oli elektronisia. Tutkimuksen mukaan EU:ssa tuotettujen ja EU:hun tuotujen elektronisten liitäntälaitteiden suhde oli likimain sama vuonna 2004. Vaikka Kiinasta tuodaan paljon valaisintuotteita, niiden ei uskota vaikuttavan toimistojen valaistukseen sillä toimistovalistus toimii niin sanottuna business-to-business markkinana.

Valaisimien jakaumasta toimistoissa, ei ole saatavilla tarkkoja tietoja. Tutkimus tarkastelee olemassa olevia jakaumia ainoastaan kahden eri valaisintyyppin osalta nimeten ne A1 ja A2. Näiden jakauma perustuu DEFU tutkimukseen, jonka pohjalta on arvioitu jakauman olevan 73 % A1:lle ja 27 % A2:lle. A1 käsitetään selvästi suunnatuksi valaisimeksi ja A2 on osittain suunnattu tai kokonaan suuntaamaton. Tälläkin saralla Kiinan tuonnin uskotaan vaikuttavan vähän sillä toimistovalistus toimii niin sanottuna business-to-business markkinana.

Koska kyseessä oli toimistovalistus, tutkimus Office Lighting esitteli nykyisiä parantuneita tekniikoita ja tulevaisuuden tekniikoita niin valaisimille, lamppujen säädölle, lampuille kuin liitäntälaitteille. Valaisimien suhteen tutkimuksessa mainittiin parannettu valaisimien ylläpito sekä uusien heijastusmateriaalien käyttö. Valaistuksen säätötekniikoista mainittiin valaistuksen himmennys päivän valoon tai ylipäättään muuhun valaistukseen perustuen. Myös liiketunnistimien lisäämien voidaan nähdä säädöllisenä teknisenä ratkaisuna. Loisteputkien kehitymisestä tutkimus mainitsee tri-fosfori lamput (tri-phosphor), jotka ovat tehokkaampia kuin halofosfaattilamput, sekä himmennys 1 % käyttäen erityistä dc virransyöttöön perustuvaa tekniikkaa. Liitäntälaitteiden osalta parannetuista jo markkinoilla olevista tekniikoista mainittiin suurtaajuiset elektroniset liitäntälaitteet, tehokkaammat elektroniset liitäntälaitteet sekä elektroniset liitäntälaitteet, jotka mahdollistavat himmennuksen. Tulevaisuuden ei vielä markkinoilla olevista tekniikoista tutkimus mainitsee LED-lamppujen mahdollisen kehittymisen. Sähköenergiankulutukseksi tutkimus Office Lighting arvioi, että jos skenaario BAU (business as usual) toteutuu, sähköenergiaa kuluu toimistojen työtilojen valaistukseen noin 37,5 TWh vuodessa vuonna 2020. Jos tämän hetken paras mahdollinen tekniikka valtaa alaa, niin toimistojen työtilojen sähköenergiankulutus on vuonna 2020

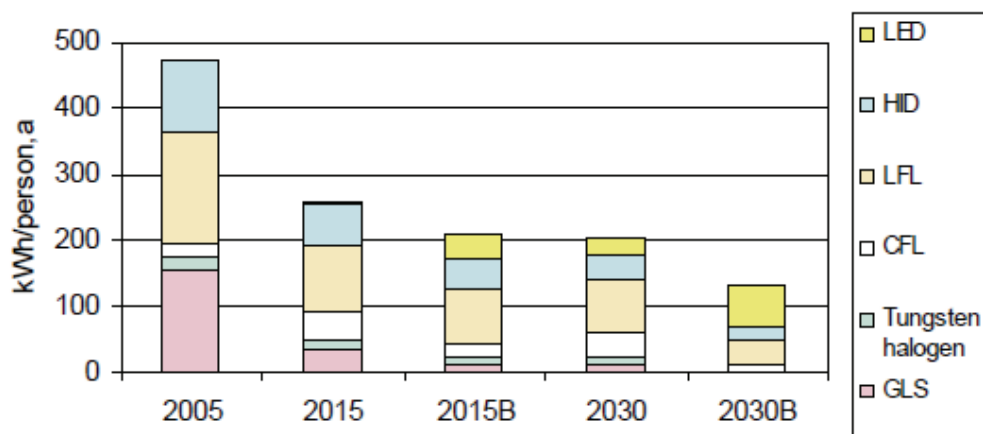
26,5 TWh, joka on 70,7 % BAU skenaarion kulutuksesta. Molemmissa tapauksissa vuonna 2005 sähköenergiankulutus oli 26,5 TWh.

Yhteenvedona tutkimus Office Lighting näkee, että toimistovalaituksessa loisteputket tulevat edelleen olemaan hallitsevia ainakin tämän vuosikymmenen. Merkittävin muutos tulee tapahtumaan liitäntälaitteissa. Ne tulevat vaihtumaan ferromagneettisista elektronisiin. Tämä johtopäätös on vaikuttanut EU:n päätöksen kanssa, jonka mukaan ferromagneettiset liitäntälaitteet tulevat poistumaan markkinoilta 2017. Tutkimus myös ehdotti tehokkuusvaatimuksia liitäntälaitteille. Tutkimus myös ehdotti, että halofosfaattiloisteaineella toimivat lamput tulisi korvata tehokkaammilla lampuilla, mikä myös on vaikuttanut EU:n päätökseen kieltää kyseiset lamput. [Täh10]

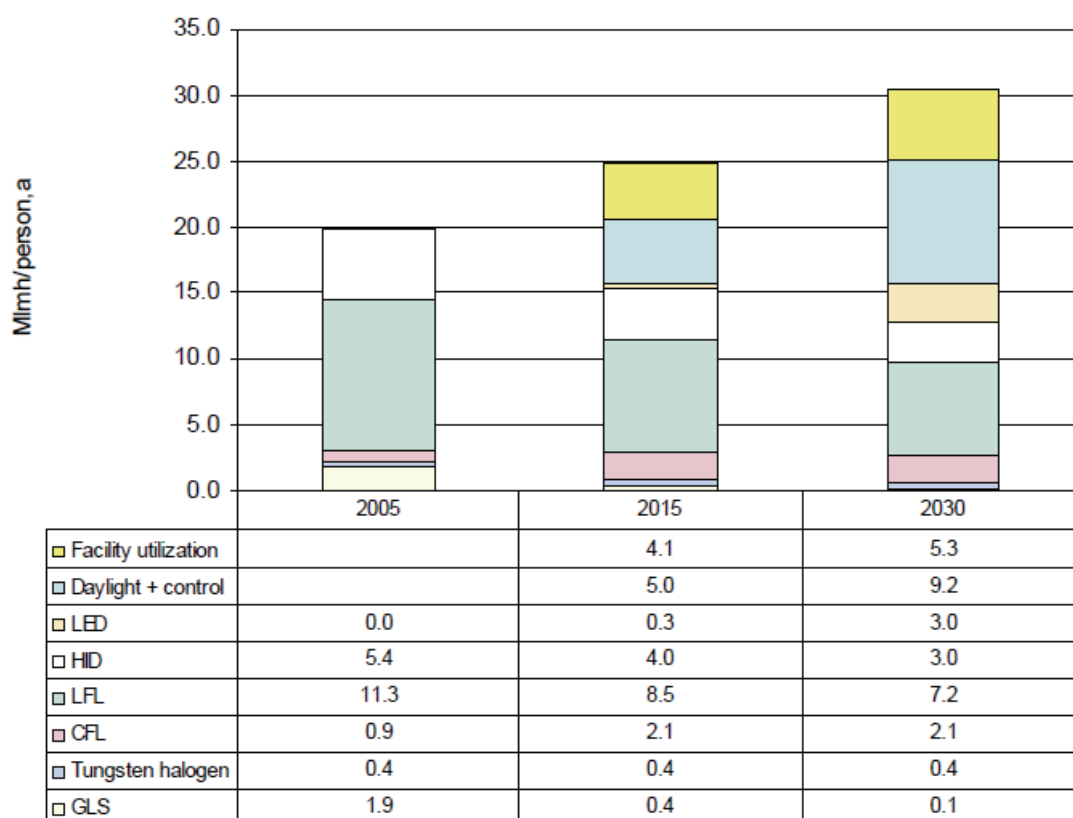
Kuten jo aiemmin lamppujen määrän arvioinnin kohdalla todettiin, toimistovalaisuus ei vastaa täysin koko palvelusektorin valaistusta. Toimistovalaisuudesta voidaan kuitenkin pitää koko palvelusektorin kannalta suuntaa antavana esimerkkitapauksena. Samat oletukset, jotka on johdettu toimistovalaitukselle, voidaan esittää myös koko palvelusektorin valaitukselle, sillä poikkeuksella, että pienloistelamppujen suhteellinen määrä tulee olemaan hivenen suurempi kuin mitä on aiemmin esitetty. Tutkimuksen Office Lighting toimistojen työtilojen valaituksen osalta on kovin hankalaa arvioida Suomen koko palvelusektorin valaitukseen käyttämää sähköenergiaa tulevaisuudessa. Tämä johtuu siitä, että kun vertaillaan toimistojen työtilojen ja kotitalouksien arvioituja sähköenergian kulutus määriä, huomataan kotitalouksien lukemien olevan huomattavasti suurempia. Suomessa taas koko palvelusektori kuluttaa selvästi kotitalouksia enemmän sähköä valaitukseen. Täten, jos käytetään suoraan toimistojen työtilojen prosentuaalista sähköenergian kulutuksen alenemaa koko palvelusektoriin, lopputulokseen jää huomattavasti epävarmuutta. Muita arvioita ei selvityksissä palvelusektorille löytynyt, joten tässä yhteydessä käytetään tutkimuksen arvioita. Sen mukaan BAU mallissa kasvua toimistojen työtilojen valaituksessa tulee vuosina 2005-2020 noin 42 %. Parhaan mahdollisen tekniikan implementoinnilla lisäystä ei tule. Näin ollen palvelusektorin valaitukseen kuluttamalle sähköenergialle Suomessa saadaan vaihteluväli 4,1-5,8 TWh, jonka sisällä todellinen palvelusektorin valaituksen sähköenergiankulutus mahdollisesti on.

Tutkimukset Domestic Lighting ja Office Lighting luovat aika maltillisen kuvan valaituksen sähköenergian käytöstä. Aalto yliopistossa tehty tutkimus ”Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings” taasen antaa huomattavasti optimistisemmän kuvan valaituksen sähköenergiankäytöstä. Tämän tutkimuksen hyvänä puolena mainittakoon, että sen ottaa skenaarioissaan huomioon LED-lamput. Tutkimuksen ”Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings” näkemys valaituksen käyttämästä sähköenergiasta henkilöä kohden on esitetty kuvassa 2.18. Arvio on esitetty maailman koko valaituksen sähköenergiankulutuksesta lamputyypeittäin. Skenaarioissa 2015B ja 2030B on oletettu, että LED-lamput yleistyvät voimakkaammin kuin skenaarioissa 2015 ja 2030. Tässä yhteydessä havaitaan huomattavasti voimakkaampi pudotus valaituksen sähköenergian kulutuksessa kuin mitä tutkimukset Domestic

Lighting ja Office Lighting antoivat. Tämä ero voidaan selittää, kun katsotaan kuvaa 2.19, jossa on esitetty tutkimuksen näkemys eri lampputyyppejen tuottamasta valaistuksesta vuosina 2005, 2015 ja 2030. Sen mukaan valaistuksen tuotossa merkittävä osa tulee tilojen hyödyntämisestä ja valaistuksesta, jota säädetään päivän valon mukaan. Tämä vaikuttaa huomattavasti toimistojen ja koko palvelusektorin valaistukseen, joten aikaisempi arvio voi olla hivenen pessimistinen. Toinen huomattava ero näiden kahden tutkimuksen skenaarioiden välillä tulee halogeenivalaistuksen määrästä, jonka osuuden valon tuotannosta ei oleteta kasvavan tutkimuksen ”Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings” mukaan. [Hal10]



Kuva 2.18. Arvioitu valaistuksen sähköenergian kulutus henkilöä kohti. [Hal10]



Kuva 2.19. Arvio eri lampputyyppejen tuottamasta valaistuksesta vuosina 2005, 2015 ja 2030 [Hal10]

### 3 Valaistukseen liittyvä standardointi

Valaistukseen liittyy monta eri standardia. Standardeja on hyvin yleisistä asioista hyvinkin yksityiskohtaisiin tiettyä laitetta tai laitteen osaa koskeviin standardeihin. Verkostovaikutuksien kannalta eräs hyvin merkittävä standardiperhe on EMC-perusstandardit IEC 61000 sarja, jonka osa 61000-3-2 käsittelee harmonisten yliaaltojen raja-arvoja ja osa 61000-3-3 käsittelee välkynnän ja jännitteenvaihteluiden raja-arvoja lähes kaikille alle 16 A:n laitteille. Osat 61000-3-4 ja 61000-3-5 käsittelevät vastaavasti yli 16 A:n laitteiden vaatimuksia. Näistä standardeista käsitellään tässä yhteydessä EN-61000-3-2 ” Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)”, sillä valaistuksen kannalta se on oleellinen yliaaltojen kannalta ja sen takia, että kyseisessä standardissa valaistuslaitteet on määritetty omaksi luokaksi. [EN-61000-3-2]

Standardi EN 61000-3-2 määrittelee 4 eri luokkaa laitteille. Laiteluokat, joille asetetaan erilaisia toimintavaatimuksia ovat seuraavat:

- Luokka A: balansoidut kolmivaihelaitteet, kotitalouslaitteet (pois lukien laitteet, jotka määritetty luokassa D), työkalut (pois lukien siirreltävät työkalut), hehkulamppujen himmentimet ja kaikki muut laitteet, joita ei ole mainittu seuraavissa luokissa
- Luokka B: siirreltävät työkalut (hitsauslaitteet, joka eivät ole tarkoitettu ammattikäyttöön)
- Luokka C: valaistuslaitteet
- Luokka D: PC:t, monitorit, radio tai televisio vastaanottimet, joiden teho  $\leq 600$  W

Valaistuksen kannalta kiinnostavin luokka on luokka C, jota tässä yhteydessä käsitellään. Luokalle C standardi antaa sallituksi yliaaltovirroiksi seuraavat rajat. Laitteen, jonka teho on yli 25 W, yliaaltovirrat eivät saa ylittää taulukossa 3-1 esitettyjä arvoja. Rajat on annettu prosentuaalisena arvona suhteessa perustaajuiseen virtaan.

Taulukko 3-1. Luokan C yli 25 W:n laitteiden yliaaltovirtojen rajat. [EN-61000-3-2]

| Harmonic order<br>n                         | Maximum permissible harmonic current expressed as a percentage of the input current at the fundamental frequency<br>% |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2                                           | 2                                                                                                                     |
| 3                                           | $30 \cdot \lambda$ *                                                                                                  |
| 5                                           | 10                                                                                                                    |
| 7                                           | 7                                                                                                                     |
| 9                                           | 5                                                                                                                     |
| $11 \leq n \leq 39$<br>(odd harmonics only) | 3                                                                                                                     |
| * $\lambda$ is the circuit power factor     |                                                                                                                       |

Valaistuslaitteille, joiden teho on alle 25 W, standardi määrittää, että yliaaltovirratt eivät saa ylittää taulukon 3-2 keskimmäisen sarakkeen arvoja. Rajat on annettu mA suhteessa laitteen tehoon. Tämän lisäksi kolmas yliaaltovirta ei saa ylittää 86 % eikä viides yliaaltovirta saa ylittää 61 % perustajuisen virran arvosta.

Taulukko 3-2. Yleisesti luokan D yliaaltovirtojen rajat. Keskimäinen sarake pätee luokan C alle 25 W:n laitteisiin. [EN-61000-3-2]

| Harmonic order<br>n                         | Maximum permissible harmonic current per watt<br>mA/W | Maximum permissible harmonic current<br>A |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 3                                           | 3.4                                                   | 2.30                                      |
| 5                                           | 1.9                                                   | 1.14                                      |
| 7                                           | 1.0                                                   | 0.77                                      |
| 9                                           | 0.5                                                   | 0.40                                      |
| 11                                          | 0.35                                                  | 0.33                                      |
| $13 \leq n \leq 39$<br>(odd harmonics only) | $3.85/n$                                              | See table 1                               |

Tämän standardin lisäksi EU:n asetukset asettavat rajoja lamppujen tuottamiin yliaaltoihin. Tämän hetken asetukset määrittelevät eri lampputyypin tehokertoimille rajoja. Luvussa 4 osoitetaan, että tehokerroin on perustajuisen tehokertoimen tulo perustajuisen virtakomponentin ja koko virran tehollisarvon suhteen kanssa. Näin ollen, jos lamppu tuottaa hyvin paljon yliaaltovirtoja, on mahdollista, että lamppu ei täytä tehokerroin vaatimusta. Tämä vaatimus on 0.5 alle 25 W lampuille, joka on suhteellisen matala.

Muita standardeja käydään tässä yhteydessä läpi luettelon omaisesti. Standardilistaus on otettu tutkimuksesta Domestic Lighting. Lista ei pyri olemaan kaiken kattava. Listauksessa on myös standardeja, joilla ei ole sähkötekniistä merkitystä. Standardien sisällöstä ei ole muuta tietoa kuin

mitä tutkimuksen Domestic Lighting tiivistelmät. Näitä standardeja ei ollut saatavilla tätä selvitystä tehtäessä. [VITO09]

- EN 60064: “Tungsten filament lamps for domestic and similar general lighting purposes - Performance requirements”
- EN 60357: “Tungsten halogen lamps (non-vehicle) - Performance specifications”
- EN 60969 : “Self-ballasted lamps for general lighting services - Performance requirements”
- EN 60081 : “Double-capped fluorescent lamps - Performance specifications”
- EN 60901: “Single-capped fluorescent lamps – Performance specifications”
- EN 50285: “Energy efficiency of electric lamps for household use – Measurement methods”
- EN 50285: “Energy efficiency of electric lamps for household use – Measurement methods”
- EN 60929 : “AC-supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps – Performance requirements”
- EN 12665 (2002): “Light and lighting - Basic terms and criteria for specifying lighting requirements”
- EN 60968 : “Self-ballasted lamps for general lighting services - Safety requirements”
- EN 60630 : “Maximum lamp outlines for incandescent lamps”
- EN 60669-2-1 : “Electronic switches for households and similar use”
- EN 61047 : “D.C. or A.C. supplied electronic step-down converters for filament lamps. Performance requirements”
- EN 50294 : “Measurement Method of Total Input Power of Ballast-Lamp Circuits”
- EN 60927: “Specification for auxiliaries for lamps. Starting devices (other than glow starters). Performance requirements”
- EN 61048 : “Auxiliaries for Lamps - Capacitors for Use in Tubular Fluorescent and Other Discharge Lamp Circuits - General and Safety Requirements”
- EN 61049 : “Capacitors for Use in Tubular Fluorescent and Other Discharge Lamp Circuits Performance Requirements”
- EN 13032-1 (2004), Lighting applications — Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires — Part 1: Measurement and file format
- EN 13032-2(2004): Light and lighting. Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires. Part 2: Presentation of data for indoor and outdoor work places
- CIE 127 (2007) : “Measurement of LED’s” (2nd ed.)

- Draft EN 62612 (IEC/PAS 62612) : “Self-ballasted LED-lamps for general lighting services >50V – Performance requirements”
- EN 60061 : “Lamp caps and holders together with gauges for the control of interchangeability and safety”
- EN 60598-1 : “Luminaires Part 1 : General requirements and tests”
- EN 60598-2: “Luminaires - Part 2: Particular requirements - Chapter 1: Fixed general purpose luminaires”
- EN 60598-2: “Luminaires - Part 2: Particular requirements - Chapter 2: Recessed luminaires”
- EN 60598-2: “Luminaires - Part 2: Particular requirements – Chapter 6: Luminaires with built-in transformers for tungsten filament lamps”

## 4 Yliaaltojen vaikutus näennäis-, pätö-, lois- ja särötehoon sekä esimerkkejä teknisistä toteutuksista tehokertoimen parantamiseksi

Tämän kappaleen osalta käytetään standardin IEEE 1549 teho määritelmiä. Pysyvässä tilassa ei sinimuotoinen jännite ja virta voidaan jaotella kahteen eri komponenttiryhmään: sähkövoimajärjestelmän taajuudella pyöriviin komponentteihin  $v_1$  ja  $i_1$  sekä jäljelle jääviin termeihin  $v_H$  ja  $i_H$ , jorka sisältävät kaikki loput harmoniset ja väliharmoniset termit. Komponentit esitettynä kaavamuodossa kaavoissa 4.1-4.4:

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (4.1)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (4.2)$$

$$v_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(\omega t - \alpha_h) \quad (4.3)$$

$$i_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(\omega t - \beta_h) \quad (4.4)$$

Vastaavat neliöidyt tehollisarvot ovat esitetty kaavoissa 4.5-4.8:

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (4.5)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (4.6)$$

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (4.7)$$

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (4.8)$$

Kokonaisjännite- ja virtasäro määritellään kaavojen 4.9-4.10 avulla.

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (4.9)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (4.10)$$

Hetkellinen teho voidaan määritellä kahdella tavalla kaavan 4.11 mukaisesti.

$$p = vi = p_a + p_q \quad (4.11)$$

missä

$$p_a = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t)]$$

$$p_q = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} 2V_m I_n \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t + \beta_n)$$

missä kulma  $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$  on osoittimien  $V_h$  ja  $I_h$  välinen kulma

Termi  $p_a$  sisältää kaikki komponentit keskiarvo on nolasta poikkeava. Termi  $p_q$  sisältää kaikki termit, jotka eivät osallistu tehonsiirtoon kuormalle. Toisin sanoen termin  $p_q$  keskiarvo on nolla.

Pätöteho määritellään kaavalla 4.12.

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt = P_1 + P_H \quad (4.12)$$

Perustaajuinen pätöteho määritellään kaavalla 4.13.

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (4.13)$$

Harmoninen pätöteho määritellään kaavalla 3.14.

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (4.14)$$

Perustaajuinen loisteho määritellään kaavalla 4.15.

$$Q_1 = \frac{\omega_1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1 \left[ \int v_1 dt \right] dt = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (4.15)$$

Budeanun loisteho määritellään kaavalla 4.16.

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h = Q_1 + Q_{BH} \quad (4.16)$$

missä

$$Q_{BH} = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \sin \theta_h$$

Näennäisteho määritellään kaavalla 4.17.

$$S = VI \quad (4.17)$$

Perustaajuinen näennäisteho määritellään kaavalla 4.18.

$$S_1 = V_1 I_1 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (4.18)$$

Näennäisteho voidaan jakaa kahteen komponenttiin kaavan 4.19 mukaisesti.

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (4.19)$$

$S_N$  on ei sinimuotoinen näennäisteho ja se voidaan jakaa kolmeen termiin kaavan mukaisesti 4.20.

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (4.20)$$

missä  $D_I = V_I I_H = S_1 (THD_I)$  on virran säröteho (current distortion power (var))

$D_V = V_H I_1 = S_1 (THD_V)$  on jännitteen säröteho (voltage distortion power (var))

$S_H = V_H I_H = S_1 (THD_I)(THD_V)$  on harmoninen näennäisteho (harmonic apparent power (va))

Harmoninen säröteho määritellään kaavalla 4.21.

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (4.21)$$

Toisaalta Budeanun määritelmien avulla voidaan määrittellä Budeanun säröteho. Ensiksi määritellään näennäisteho Budeanun määritelmillä kaavassa 4.22.

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (4.22)$$

Budeanun säröteho on kaavan 4.23 mukainen.

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (4.23)$$

Perustaajuinen tehokerroin määritellään kaavalla 4.24.

$$P_{F1} = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (4.24)$$

Kokonaistehokerroin määritellään kaavan 4.25 mukaisesti.

$$P_F = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{\left(\frac{P_1}{S_1}\right) \left[1 + \left(\frac{P_H}{P_1}\right)\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{P_H}{P_1}\right)\right] P_{F1}}{\sqrt{1 + THD_I^2 + THD_V^2 + (THD_I THD_V)^2}} \quad (4.25)$$

Käytännön ilmiöissä virtasäro on suurempi kuin jännitesäro. Tyypillisesti myös  $D_I > D_V > S_H > P_H$ . Tästä seuraa approksimaatio kaavan 3.26 mukaisesti.

$$P_F \approx \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} P_{F1} \quad (4.26)$$

Kaavan 4.26 mukaiseen tehokertoimen approksimaatioon päästään, jos tarkastellaan kaavaa 4.25 kaavan 4.27 mukaisesti ja oletetaan, että syöttävä verkko on jäykkä verkko.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i I_i \cos \phi_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2}} \quad (4.27)$$

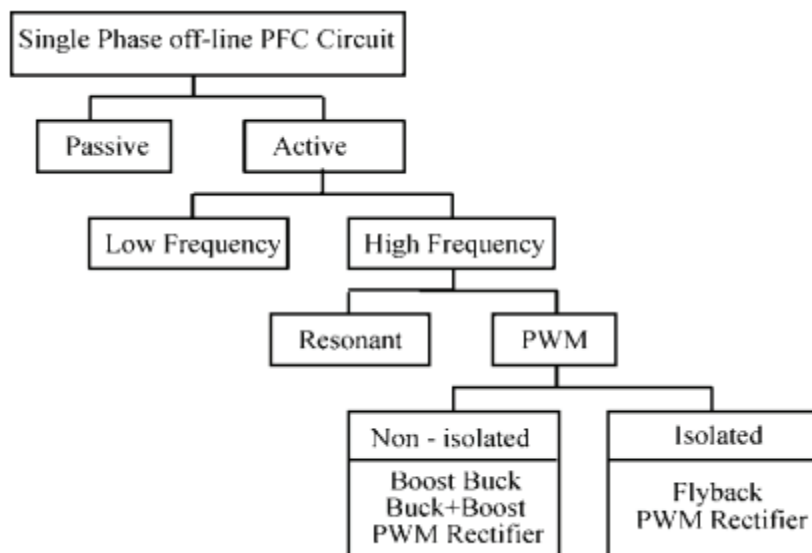
Kun kyseessä on jäykkä verkko, jännitteistä ainoastaan perustaajuinen jännite saa arvoja. Muut jännitearvot ovat nollia. Tästä seuraa, että tehokerroin kuormille, joiden virta on yliaaltopitoinen ja joiden jännite on sinimuotoinen, voidaan määrittää perustaajuisen virran tehollisarvon suhteena virran kokonaistehollisarvoon, joka kerrotaan perustaajuisen jännitteen ja virran välisen kulman kosinilla (toisin sanoen ”perinteisellä tehokertoimella”). Tämä on esitetty kaavassa 4.28. [Nou09]

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i I_i \cos \phi_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2}} = \frac{U_1 I_1 \cos \phi_1}{U_1 I_{RMS}} = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cos \phi_1 \quad (4.28)$$

Kaavasta 4.28 nähdään, että tehokerrointa voidaan parantaa, jos harmonisia yliaaltovirtoja voidaan pienentää. Tämän lisäksi tehokertoimeen vaikuttaa perustaajuisen jännitteen ja virran kulmaero, joka vastaa perinteistä tehokerrointa passiivisilla kuormilla.

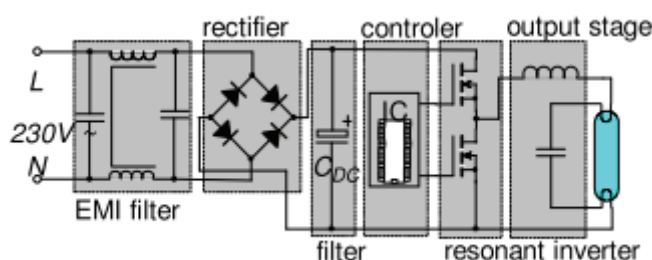
Tehokertoimen korjaus strategioita (PFC = Power Factor Correction) paperi ”PFC strategies in light of EN 61000-3-2” mainitsee kolme. Menetelmät jakautuvat passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Kuva 4.1 esittää useita erilaisia off-line PFC topologioita. Yksinkertaisin passiivinen menetelmä on kelan lisäämiseen ennen tasasuuntaussiltaa. Tällöin suurempien taajuuksien impedanssi kasvaa ja niiden ottaminen verkosta pienenee. Toinen tapa hahmottaa asiaa on tarkastella kelaan varastoitunutta energiaa. Tällöin, jos kelan induktanssi on riittävän suuri, siihen varastoitunut energia pystyy pitämään tasasuuntauksen johtavana pitemmän aikaa. Näin ollen virran käyrämuoto lähestyy sinimuotoista virtaa. Aktiiviset menetelmät perustuvat välipiirissä tai ennen

tasasuuntaussiltaa olevien kytkinkomponenttien ohjaukseen, joiden avulla sähköverkosta otettavaa virran käyrämuotoa säädetään. [Sup04]



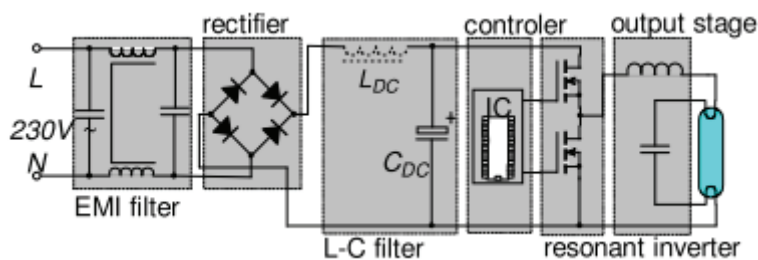
Kuva 4.1. Erilaisia PFC topologioita.

Alle 25 W:n lapuille suunnitellut elektroniset liitälaitteet voidaan toteuttaa kuvan 4.2 mukaisesti. Tällöin elektroninen liitälaitte toteuttaa standardin EN 61000-3-3 asettamat rajat. Näissä elektronisissa liitälaitteissa ei ole varsinaisesti PFC korjausta. Kustannustehokkuuden mielessä voisi olettaa, että tämän tyyppiset liitälaitteet ovat hyvin tyypillisiä lampuille, joiden teho on alle 25 W, koska ne eivät vaadi erillistä PFC korjausta.

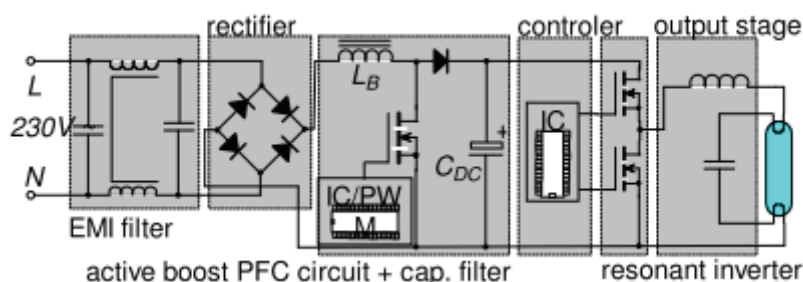


Kuva 4.2. Piirikaavio eräästä alle 25 W lampun elektronisesta liitälaitteesta. [Dra05]

Kun lampun teho on yli 25 W, tarvitaan PFC korjausta jotta standardin EN 61000-3-3 asettamat rajat voidaan täyttää. Eräs passiivinen PFC menetelmä on esitetty kuvassa 4.3, jossa kela on sijoitettu lampun välipiiriin. Elektroniset liitälaitteet on mahdollista toteuttaa myös aktiivisella PFC piirillä. Erä aktiivinen PFC piirikaavio on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.3. Piirikaavio elektronisesta liitantalaitteesta, jossa on passiivinen L-C PFC piiri. [Dra05]



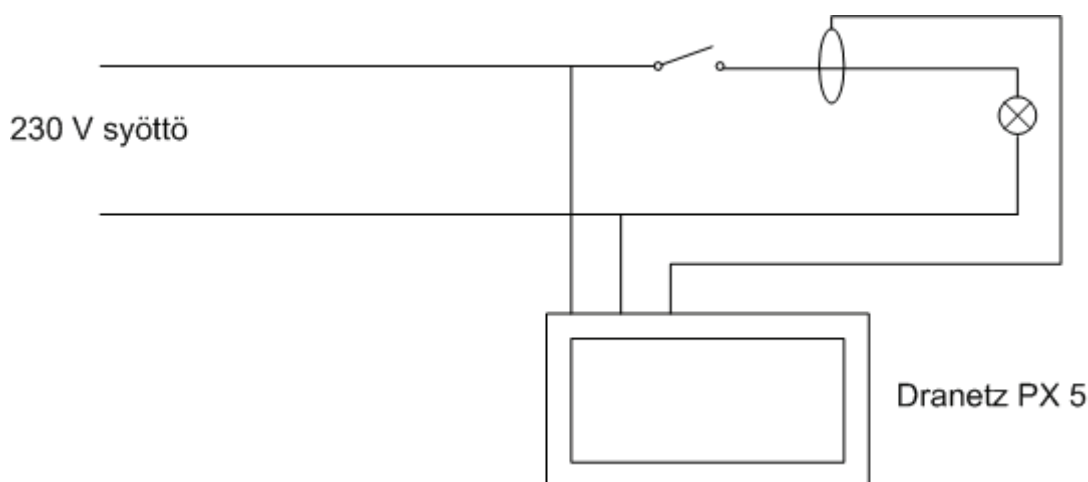
Kuva 4.4. Piirikaavio elektronisesta liitantalaitteesta, jossa on aktiivinen kaksivaiheinen PFC piiri. [Dra05]

Passiivisten ja aktiivisten PFC korjauksien yleisiä eroja on hahmoteltu EPSMA:n (European Power Supply Manufacturers Association, Euroopan teholahteiden valmistajien järjestö) julkaisussa, joka antaa yleisiä ohjeita standardille EN 61000-3-3. Sen mukaan passiivisten menetelmien etuja ovat yksinkertainen ja kestävä tekniikka sekä kustannustehokkuus. Passiivisten menetelmien huonoja puolia ovat tarve suurille ja painaville magneeteille, ei voida käyttää erilaisilla jännitteillä sekä sisään menovirta ei ole sinimuotoinen. Aktiivisten menetelmien hyviä puolia ovat: kattava harmonisten virtojen eliminointi, tehokerroin lähellä 1 sekä laaja mahdollisuus käyttää liitantalaitetta eri jännitearvoilla. Huonoja puolia ovat: PFC:stä aiheutuvat lisäkustannukset, komponenttien lisääntyvä määrä (enemmän rikkoontuvia komponentteja) ja negatiivinen vaikutus tehokkuuteen/hyötysuhteeseen.

Yliaallot koskevat kaikkia lamppeja, joissa tulee olemaan elektronin liitantalaitte eli pienloistelamppuja, tulevaisuudessa loisteputkia, LED-lamppuja ja mahdollisesti myös osaa halogeenilamppuista. Se miten yliaaltovirrat tulevat vaikuttamaan sähköverkkoon riippuu paljolti siitä miten lamppejen elektroniset liitantalaitteet suunnitellaan. Lamppejen tehokertoimet voivat parantua sisälähtöisesti valmistajien ja asiakkaiden valinnoilla tai tiukentuvien asetusten myötä. Kaikki lamput, jotka korvaavat hehkulamppuja ja joiden tehokerroin on muuta kuin yksi, lisäävät verkossa kiertäviä yliaaltovirtoja. Näiden lamppejen voidaan olettaa vaikuttavan verkossa suhteellisen pitkään, sillä pienloistelamppujen ja LED-lamppujen elinikä on huomattavasti hehkulamppuja pitempi. Tässä suhteessa tekniset parannukset tehokertoimen korjauksessa näkyvät viiveellä. Alkuvaiheessa yliaaltovirtojen kasvua hillitseivät halogeenilamput, joiden tehokerroin on 1. Tämä antaa aikaa parempien tehokertoimien omaavien lamppejen tulolle sähköverkkoon. Se

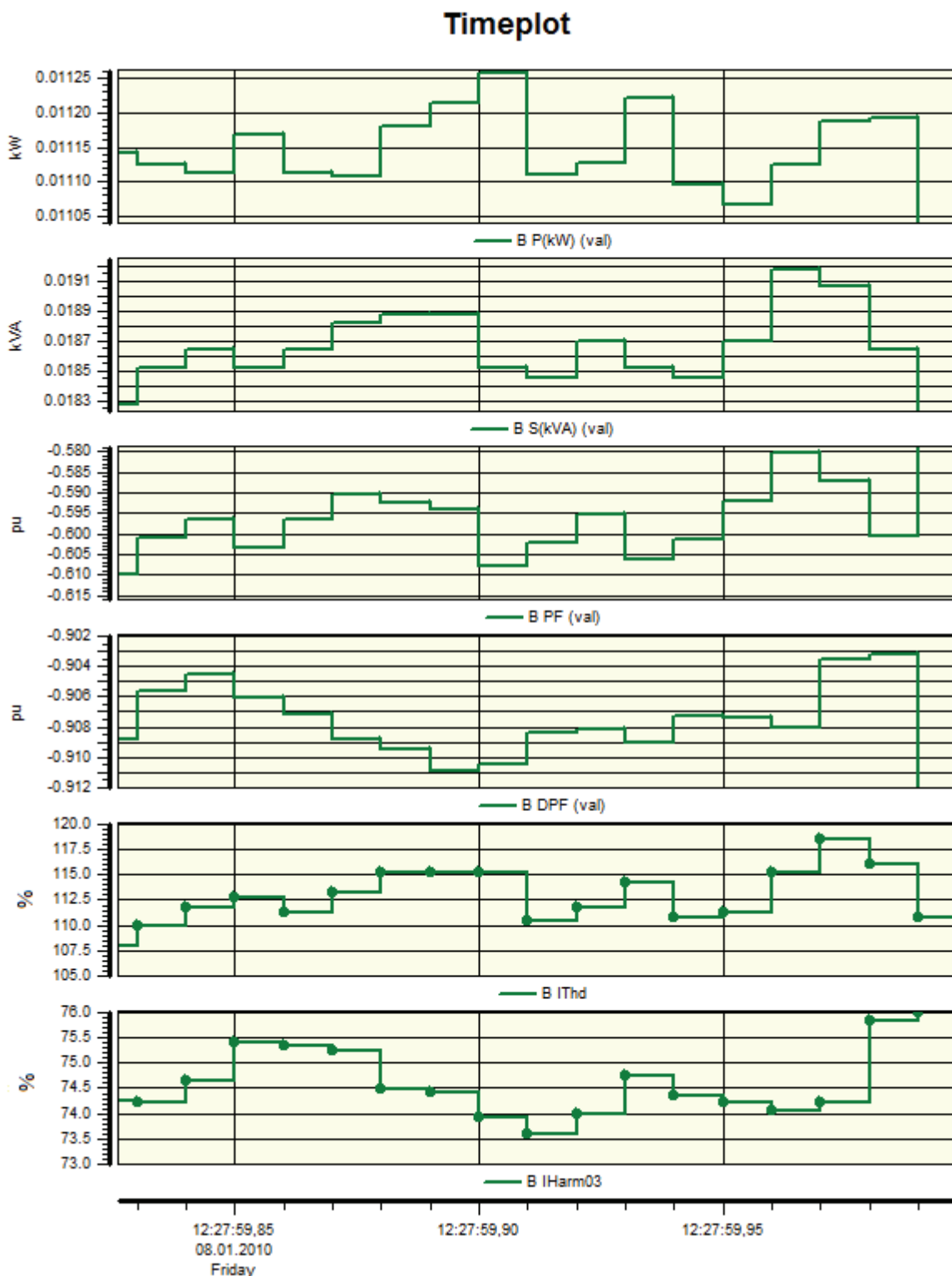
millainen relevanssi lamppujen yliaaltovirroilla tulee olemaan sähköverkon kannalta, riippuu siitä, millainen on usean lampun yhteisvaikutus yliaaltovirtoihin. Tämän lisäksi tulisi tarkastella sitä, millainen on lamppujen yhteisvaikutus muiden tehoelektroniikkaa sisältävien kuormien kanssa. Tarkasteluissa tulisi kiinnittää huomiota yliaaltojen vaikutuksiin, joita ovat: lisähäviöt verkkokomponenteissa, suoja- ja mittalaitteiden virhetoiminnot, ATK- ja automaatio järjestelmien häiriöt ja vauriot, televerkon häiriöt, nollajohtimen ylikuormitus 3. yliaaltovirrasta sekä resonanssit kompensointikondensaattoreiden ja verkon välillä [ABB]. Eritoten tulisi keskittyä laitteiden virhetoimintojen ja 3. yliaallon vaikutuksiin. Tarkastelut tulisi suorittaa mittaamalla elektronisella liitäntälaitteella varustettujen lamppuja tyypillistä kotitalous ja palvelualaa ympäristöä mallintavassa laboratorioympäristössä. Näiden tulosten pohjalta tulisi arvioida kuinka paljon jakeluverkkoyhtiön kustannukset tulevat nousemaan, jos havaitaan, että lampuista aiheutuvia harmonisia yliaaltoja joudutaan suodattamaan jakeluverkossa.

Eräälle pienloistelampulle, jonka valaistusvoimakkuus vastaa 60 W hehkulamppua, suoritettiin mittauksia, joissa tutkittiin puolijaksottain pätö- ja näennäistehoja sekä perustaajuista että kokonaistehokerrointa. Nämä tulokset saatiin Dranetz PX 5 laatuanalysaattorilla suoritetuista mittauksista sekä DranView ohjelmalla (versio 6.11.02). Virtapihtinä mittauksissa oli Dranetz TR2510 (0-10A). Yleiskuva mittausjärjestelystä on esitetty kuvassa 4.5.



Kuva 4.5. Yleiskuva lammumittauksista.

Kuvassa 4.6 on esitetty DranView ohjelmalta saadut puolijaksottaiset pätö- ja näennäisteho, perustaajuinen ja kokonaistehokerroin sekä virrankokonaissärö ja kolmannen virtayliaallon amplitudin suhde perustaajuiseen virtaan nähden. Kuvan 4.6 ajanjakson keskiarvo pätöteholle on 11,1 W, näennäisteholle on 18,7 VA, perustaajuiselle tehokertoimelle on 0.907  $\cos \phi$ , kokonaistehokertoimelle on 0,597, virrankokonaissärölle on 113 % ja kolmannelle virtayliaallolle on 74,6 %. Virran tehollisarvon keskiarvo samalta ajanjaksolta oli 0.0816A sekä 9. virtayliaalto 19,3 % ja 15. yliaaltovirta 23,0 % suhteessa perustaajuiseen virtaan.



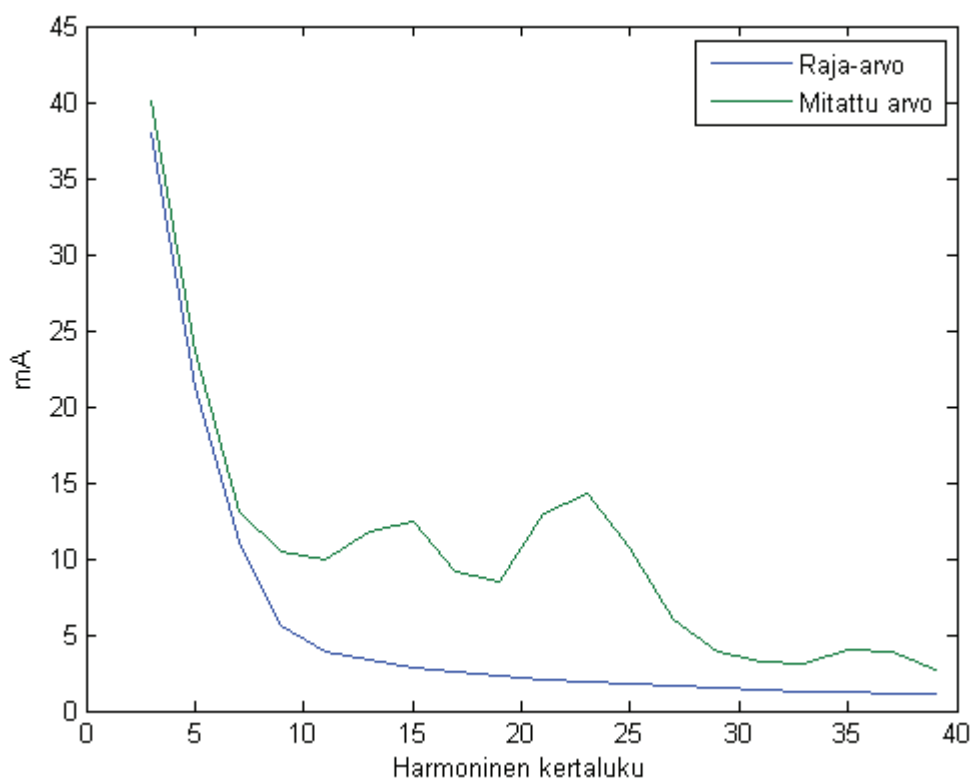
Kuva 4.6. Mittauksista saadut puolijaksottaiset pätö- ja loisteho, perustaajuinen ja kokonaistehokerroin sekä virran kokonaissärö ja kolmannen yliaallon arvot eräälle pienloistelampulle.

Laskennallisesti virran perustaajuinen virran tehollisarvo käyttäen kaavaa 4.10 on 0.054 A. Mitattujen tulosten kuvan 4.6 ajanjakson keskiarvo pyöristyy samaan lukemaan. Standardin EN-61000-3-2 asettamat rajat ovat: kolmas yliaaltovirta ei saa ylittää 86 % eikä viides yliaaltovirta saa ylittää 61 % perustaajuinen virran arvosta. Maksimiarvo kolmannelle yliaallolle oli alle 76 %.

Viidennelle yliaallolle maksimi-arvo mittauksissa oli alle 45,5 % eli nämä standardi ehdot lamppu täytti. Lisäksi yliaalto virrat eivät saa ylittää taulukossa 3-2 keskimmaisessä sarakkeessa annettuja arvoja. Taulukon 3-2 mukaiset raja-arvot ja mittauksista saadut kuvan 4.6 mittausajankohdan keskiarvot on esitetty parittomien 3.-11. harmonisten suhteen taulukossa 4-1 ja kaikkien parittomien harmonisten suhteen kuvassa 4.7. Taulukosta 4-1 ja kuvasta 4.7 nähdään, että kyseinen lamppu ei täytä sille standardissa EN-61000-3-2 asetettuja raja-arvoja harmonisille määrättyjen tehollisarvojen suhteen yhdelläkään harmonisella kertaluvulla.

Taulukko 4-1. Eräälle 11 W pienloistelampulle mitatut ja alle 25 W lampulle sallitut lasketut (11.1 W) yliaaltoarajat eri harmonisille kertaluvuille.

| Harmoninen kertaluku n | Sallittu tehollisarvo mA | Mitatun tehollisarvon keskiarvo mA |
|------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 3                      | 37.9                     | 40.1                               |
| 5                      | 21.2                     | 23.6                               |
| 7                      | 11.1                     | 13.0                               |
| 9                      | 5.58                     | 10.4                               |
| 11                     | 3.9                      | 9.9                                |



Kuva 4.7. Eräälle pienloistelampulle mitatut ja standardissa EN 61000-3-2 asetetut raja-arvot harmonisille virroille.

Mitattujen arvojen pohjalta voidaan tehdä suuntaa-antava laskelma minkälaisen muutoksen hehkulamppujen korvaus edellä mainitulla lampulla aiheuttaa 30 kotitalousasiakkaan muuntopiirissä, joka on lähellä kyselytutkimuksesta saatua asiakaspisteiden keskiarvoista lukumäärää muuntopiiriä kohden. Laskelman pohjaksi täytyy tehdä joukko oletuksia. Ensiksi oletetaan, että jännitteen muutos johtuu resistiivisestä komponentista, joten jännitteen kulmamuuutos on pieni ja virrat muuntajalla voidaan laskea asiakaspisteessä mitattujen virtakomponenttien itseisarvon summana. Oletetaan, että Suomessa on taulukon 2-6 mukaisesti 23,5 valaisinpistettä taloutta kohti ja, että kaikki valaisinpisteet on varustettu alun perin 60 W hehkulampulla. Viimeisin oletus ei ole täysin relevantti, koska kotitalouksissa on muitakin lampputyyppejä kuin hehkulamppuja, esim. loisteputkia. Oletetaan, että maksimi kuormituksen aikaan kaikista lampuista 60 % palaa. Oletetaan myös, että valaisinkuorma on tasaisesti jaettu eri vaiheiden välillä. Lamppujen alkuperäinen yhteenlaskettu pätöteho 25380 W. Tämä vastaa tasaisesti jaettuna 36,6 A vaihekohtaista summavirtaa. Koska kyseessä on symmetrisesti kolmelle vaiheelle jaettu resistiivinen kuorma, nollajohtimessa ei kulje näistä kuormista johtuen ollenkaan virtaa.

Korvauksen jälkeen lamppujen maksimikuorman aikainen näennäisteho on  $23,5 \cdot 0,6 \cdot 30 \cdot 18,7 \text{ VA} = 7910,1 \text{ VA}$ . Tämä vastaa tasaisesti jaettuna 11,42 A vaihekohtaista summavirtaa. Vaikka kyseiset lamppukuormat ovat jaotetut symmetrisesti eri vaiheiden välille, kolmella jaollisten yliaaltovirtojen virrat eivät summaudu nolaksi nollajohtimessa. Tällöin muuntajalla nollajohtimessa kulkee nollavirta, jonka tehollisarvo on kaavan 4.29 mukainen. Tällöin esimerkkilamppujen aiheuttaman nollavirran tehollisarvo muuntajalla  $I_{RMS0} = 19,48 \text{ A}$ , joka on noin 1,7 kertainen verrattuna vaihevirtaan.

$$I_{RMSN} = \text{kotitalouksien}(lkm) * \frac{\text{lamppuja}(päällä)}{\text{kotitalous}} \sqrt{I_3^2 + I_6^2 + I_9^2 + \dots} \quad (4.29)$$

Oletetaan seuraavaksi, että alun perin lamput ovat jakautuneet eri vaiheiden välille 60%-20%-20%. Tällöin vaiheella L1 on 15228 W lampputehoa ja vaiheilla L2 ja L3 on 5076 W lampputehoa. Tällöin nollajohtimessa kulkeva virta on vaihevirtojen summa kaavan 4.30 mukaisesti. Eli alkutilanteessa muuntajalla lampuista aiheutuu tehollisarvoltaan 44,1 A suuruinen virta nollajohtimeen.

$$\begin{aligned} \underline{I_a} &= \frac{15228 \text{ W}}{230 \text{ V}} \\ \underline{I_b} &= \frac{5076 \text{ W}}{230 \text{ V}} \angle -120^\circ \\ \underline{I_c} &= \frac{5076 \text{ W}}{230 \text{ V}} \angle 120^\circ \\ \underline{I_{RMSN}} &= \underline{I_a} + \underline{I_b} + \underline{I_c} = 44,1 \text{ A} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Oletetaan, että edellä mainitun lamppukuorman tehojaon mukaisesti kaikki lamput vaihdetaan pienloistelampuiksi, jotka ovat samanlaisia lampun kanssa, jolle suoritettiin mittauksia. Tällöin nollajohtimeen summautuu kaikki kolmannen yliaallon monikertojen komponentit ja lisäksi 40 % vaiheen L1 kaikista muista virtasärön taajuuskomponenteista kaavan 4.31 mukaisesti. Tällöin nollajohtimessa muuntajalla kulkee 22,5 A. Kun tätä arvoa verrataan hehkulamputta saatuun arvoon havaitaan, että kyseisessä lamppukuormanjakotilanteessa pienloistelamppujen aiheuttama nollavirta on pienempi kuin hehkulamppujen aiheuttama.

$$I_{RMSN} = \text{kotitalouksien}(lkm) * \frac{\text{lamppuja}(päällä)}{\text{kotitalous}} \sqrt{(0,4I_1)^2 + (0,4I_2)^2 + I_3^2 + \dots} \quad (4.31)$$

Seuraavaksi oletetaan, että lamppukuorman jakautuminen eri vaiheiden välillä on täysin satunnaista. Satunnaisuus on luotu siten, että ensiksi generoidaan kolme satunnaislukua a1,b1 ja c1. Näiden avulla luodaan kolme uutta satunnaislukua (a,b,c), joiden summa on 1 kaavan 4.32 mukaisesti. Nyt kuormitus jakautuu siten, että vaiheelle L1 tulee a\*lamppujen kokonaismäärä, vaiheelle L2 tulee b\*lamppujen kokonaismäärä ja vaiheelle L3 tulee c\*lamppujen kokonaismäärä. Tällöin hehkulamputta vaihevirit ja nollajohtimen virta on kaavan 4.33 mukainen. Pienloistelamputta vaihevirit ja nollajohtimen virta on esitetty kaavassa 4.34, jossa yhden lampun tuottama virta oletetaan samaksi mitatun lampun kanssa ja on jaettu taajuuskomponentteihin.

$$\begin{aligned} a &= \frac{a1}{a1 + b1 + c1} \\ b &= \frac{b1}{a1 + b1 + c1} \\ c &= \frac{c1}{a1 + b1 + c1} \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \underline{I_a} &= \frac{\text{lampput}(lkm, on) * a * 60W}{230V} \\ \underline{I_b} &= \frac{\text{lampput}(lkm, on) * b * 60W}{230V} \angle -120^\circ \\ \underline{I_c} &= \frac{\text{lampput}(lkm, on) * c * 60W}{230V} \angle 120^\circ \\ \underline{I_N} &= \underline{I_a} + \underline{I_b} + \underline{I_c} \Rightarrow I_{NRMS} = |\underline{I_N}| \end{aligned} \quad (4.33)$$

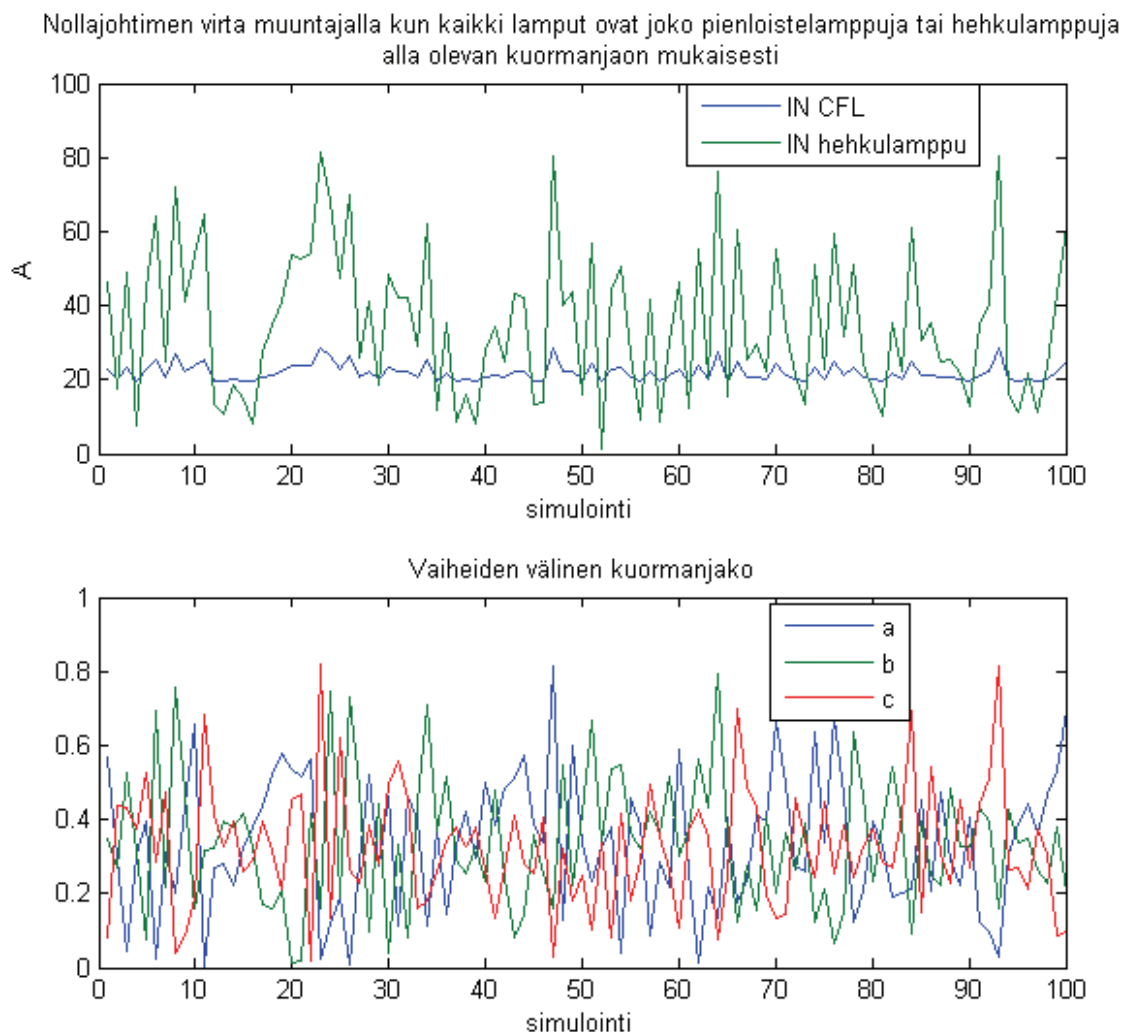
$$\begin{aligned}
 \underline{I}_a &= lamput(lkm, on) * a * \underline{I}_{mitattu} = lamput(lkm, on) * a * \begin{bmatrix} I_{1mit} \\ I_{2mit} \\ \vdots \\ I_{nmit} \end{bmatrix} \\
 \underline{I}_b &= lamput(lkm, on) * b * \underline{I}_{mitattu} * \underline{\alpha} = lamput(lkm, on) * b * \begin{bmatrix} I_{1mit} \\ I_{2mit} \\ \vdots \\ I_{nmit} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} e^{i * \frac{-120}{180} \pi} \\ \left( e^{i * \frac{-120}{180} \pi} \right)^2 \\ \vdots \\ \left( e^{i * \frac{-120}{180} \pi} \right)^n \end{bmatrix} \\
 \underline{I}_c &= lamput(lkm, on) * c * \underline{I}_{mitattu} * \underline{\alpha}2 = lamput(lkm, on) * c * \begin{bmatrix} I_{1mit} \\ I_{2mit} \\ \vdots \\ I_{nmit} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} e^{i * \frac{120}{180} \pi} \\ \left( e^{i * \frac{120}{180} \pi} \right)^2 \\ \vdots \\ \left( e^{i * \frac{120}{180} \pi} \right)^n \end{bmatrix} \quad (4.34) \\
 \underline{I}_N &= \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c \Rightarrow I_{NRMS} = |\underline{I}_N|
 \end{aligned}$$

missä  $\underline{I}_{mitattu}$  on mitattu yhden lampun tuottama virta jaettuna taajuuskomponentteihin

$\underline{\alpha}, \underline{\alpha}2$  ovat syöttävän vaiheen huomioon ottavat kertoimet

$lamput(lkm, on)$  päällä olevien lappujen kokonaismäärä  $30 * 23,5 * 0,6 = 423$

Tulokset satunnaisesti jakautuneiden lamppukuormien aiheuttamista nollajohtimen virroista on esitetty kuvassa 4.8. Ylemmässä kuvassa on esitetty nollajohtimessa kulkeva virta hehkulampuilla ja pienloistelampuille (CFL) ja alemmassa kuvassa on esitetty lamppukuormanjakautuminen eri vaiheiden kesken. Kuvasta 4.8 nähdään, että hyvin useassa satunnaisessa lamppukuormanjakotilanteessa pelkästään hehkulampuista aiheutuva nollajohtimen virta on suurempi kuin pelkästään pienloistelampuista aiheutuva nollavirta. Kun simuloiteja tehtiin useampia havaittiin, että noin 78 % satunnaisista lamppukuormanjakotapauksista pelkästään pienloistelamppujen aiheuttama nollajohtimen virta on pienempi kuin hehkulamppujen. Toisin sanoen pelkästään lampuista johtuva nollajohtimen virta saattaa jopa pienentyä, kun siirrytään käyttämään pienloistelamppuja, jos alkuperäinen kuormanjakautuminen ei ole lähellä symmetristä tapausta.



Kuva 4.8. Ylemmässä kuvassa nollajohtimen virta muuntajalla, kun kaikki kotitalouksien lamput ovat joko hehkulamppuja tai pienloistelamppuja ja lamppukuormat ovat jakautuneet alemman kuvan mukaisesti.

Edellä esitetty simulaatio osoittaa nollajohtimen virran suhteen, että tehoelektronisten kuormien määrän lisäksi erittäin suuri vaikuttava tekijä on kuormituksen jakautuminen eri vaiheiden välillä. Tässä yhteydessä on syytä pitää mielessä, että hehkulamppujen aiheuttamaa nollajohtimen virtaa voivat muut epäsymmetrisesti jakautuneet kuormitukset kompensoida, kun taas pienloistelamppujen kolmannen yliaallon monikertoja ei voida kompensoida muiden epäsymmetrisesti jakautuneiden kuormien yhteisvaikutuksella ja tässä kyseissä esimerkkitapauksessa pienloistelamput aiheuttavat nollajohtimeen aina vähintään 19,48 A virran. On myös syytä pitää mielessä lähtöoletukset, jotka tehtiin laskemisen mahdollistamiseksi. Esimerkiksi verkon resistiivisenä pitämisestä aiheutuu nollavirtoihin virhettä, joka saa aikaan sen, että todellisuudessa muuntajalla mitatut nollajohtimen virrat ovat hiivenen pienempiä kuin mitä simuloitiin. Tämä aiheutuu siitä, että asiakaspisteessä mitatun virran kulman referenssi arvona pidetään asiakaspisteen jännitettä, jonka kulma on hiivenen erilainen kuin muuntajalla olevan jännitteen. Tällöin mitattujen virtojen kulma-arvot ovat erilaisia ja niiden summan itseisarvo on pienempi kuin itseisarvojen summa.

Vaikka simulaatio osoitti, että nollavirran suuruuteen vaikuttaa erittäin voimakkaasti kuormien jakautuminen eri vaiheiden välillä ja että tietyissä tapauksissa hehkulamput tuottavat enemmän virtaa nollajohtimeen kuin pienloistelamput, ei se poista pienloistelamppujen aiheuttamaa nollajohtimen virran kasvuongelmaa. Kolmannen yliaallon monikertojen summautuminen muiden tehoelektroniikkakuormien kanssa kasvattaa nollajohtimessa kulkevaa virtaa, joka voi muodostua ongelmaksi nollajohtimen mitoituksen kannalta, jos verkossa on useita suuritehoisia tehoelektronisia laitteita. Edellä esitetty simulaatio ei myöskään poista muita yliaaltojen aiheuttamia mahdollisia ongelmia kuten: lisähäviöitä verkkokomponenteissa, suoja- ja mittalaitteiden virhetoimintoja, ATK- ja automaatio järjestelmien häiriötä ja vauriota, televerkon häiriötä sekä resonansseja kompensointikondensaattoreiden ja verkon välillä.

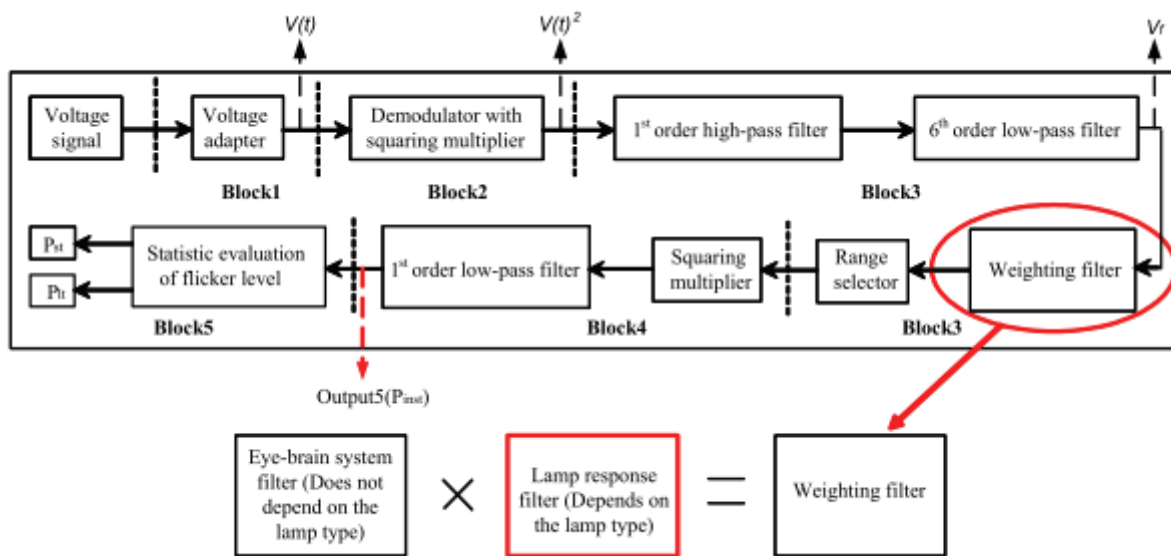
## 5 Energiansäästölamppujen välkyntä

Hyvin yleisesti käytetty välkynnän mittaamenetelmä perustuu standardiin IEC 61000-4-15. Sen alkuperäisenä tarkoituksena on ollut luoda yleisesti käytettävä välkynnän mittaamenetelmä perustuen välkynnästä tehtyihin tutkimuksiin ja aiemmin kansallisesti määriteltyihin standardeihin. Tämän standardin tulee pystyä: [IEC 61000-4-15, Cai09]

- 1) Indikoimaan hetkellinen välkynnän tuntemus
- 2) Antamaan sama indikoiva arvo samanlaisille välkynnän tuntemuksille moduloivan jännitteen muodosta riippumatta. Sen tulee myös toimia hyvin erilaisissa ympäristöissä.
- 3) Mahdollisuus pitempi aikaisiin mittauksiin.
- 4) Menetelmän pitää antaa tuloksena yksinkertainen jännitemuutoksen amplitudin funktio.
- 5) Mahdollisuus mitata säännöllisiä ja epäsäännöllisiä jännitemuutoksia taajuusalueella 1 Hz- 35 Hz 50 Hz:n järjestelmissä ja taajuusalueella 1 Hz - 40 Hz 60 Hz:n järjestelmissä.
- 6) Laitetta tulee olla yhden henkilön helppo käyttää.
- 7) Mahdollisuus helposti tarkastaa laitteen mittauksen toimivuus.
- 8) Menetelmän tulee antaa yksinkertainen numeerinen tulos jota voidaan verrata hyväksyttäviin arvoihin.

Menetelmään on rakennettu lamppu-silmä-aivo malli (lamp-eye-brain), joka simuloi ihmisen näön fysiologista herkkyyttä hehkulamputille. Kahdelle erilaiselle hehkulamputityypille 230 V 50 Hz ja 120 V 60 Hz (molemmat 60 W) on määritetty omat mallinsa. Välkynnän mittauksen lohkokaavio on esitetty kuvassa 5.1. Välkynnän mittaamenetelmä jakautuu 5 eri lohkoon. Näistä lohkot 2, 3 ja 4 kuvaavat lamppu-silmä-aivo mallia. Lohkossa 2 skaalattu verkkojännite korotetaan toiseen potenssiin, koska lampun tuottama valo on verrannollinen lampun kuluttamaan energiaan. Lohko 3 käsittää kolme erilaista suodinta. Ensimmäinen suodin on ensimmäisen kertaluvun ylipäästösuodin, jonka rajataajuus on 0.05 Hz. Toisena suotimena on kuudennen kertaluvun Butterworth alipäästösuodin. Näiden tarkoituksena on poistaa komponentit, jotka eivät aiheuta välkynnän tuntemusta. Kolmannen suotimen tarkoitus on kuvata kaasulla täytetyn hehkulamputin ja ihmisen visuaalisen havainnoinnin taajuusvastetta. Myös hehkulamputin lämpöaikavakio on huomioitu tässä suotimessa. Suotimen siirtofunktio on esitetty kaavassa 5.1. Tämä suodin voidaan ajatella

koostuvan kahdesta osasta, joista toinen kuvaan silmän ja aivojen muodostamaa systeemiä, jonka oletetaan olevan samankaltainen kaikille ihmisille, ja toinen hehkulampun välkyntä vastetta. Näitä ei kuitenkaan ole standardissa IEC 61000-4-15 erikseen määritelty, vaan yksi siirtofunktio kuvaa koko prosessia. Neljäs lohko koostuu neliöön korotuksesta ja ensimmäisen kertaluvun alipäästösuotimesta, aikavakio on 300 ms. Neljäs lohko kuvaa aivojen viivettä. Neljännen lohkon jälkeen saadaan ulostulona hetkellinen välkyntä taso. Välkyntämittarit kalibroidaan siten, että standardissa IEC 61000-4-15 määritellyissä taulukoissa 1 (sinimuotoinen modulointijännite) ja 2 (suorakulmainen modulointijännite) annetut jännitemuutokset aiheuttavat maksimissaan arvoa 1 vastaavan hetkellisen välkyntä häiritsevyyden  $\pm 5\%$  tarkkuudella. Lohkossa viisi suoritetaan statistisia tarkasteluja joiden avulla lasketaan lyhyt aikainen ja pitkä kestoinen välkyntä häiritsevyyksi.



Kuva 5.1. Välkyntämittauksen lohkoakaaviokuva. [Cai09]

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right) + \left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)} \quad (5.1)$$

missä 60 W 230 V:n hehkulampulle missä

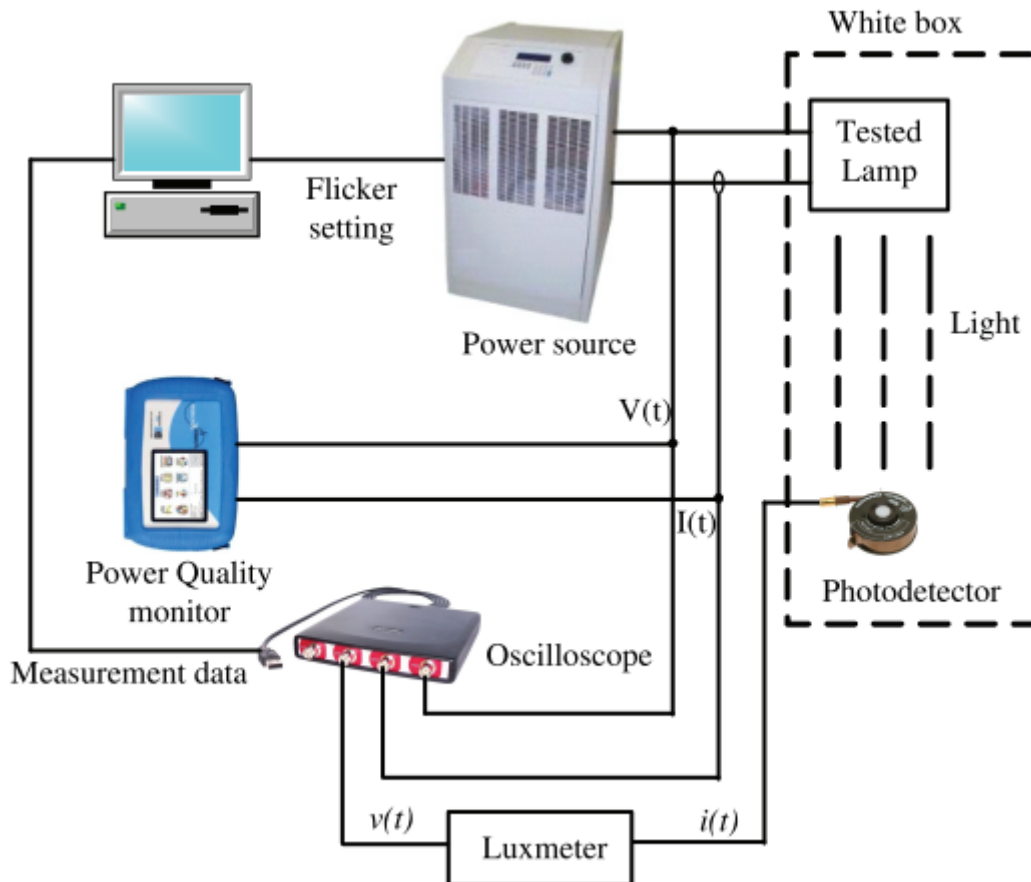
$$\begin{aligned} k &= 1,74802 \\ \lambda &= 2\pi 4.05981 \\ \omega_1 &= 2\pi 9,15494 \\ \omega_2 &= 2\pi 2,27979 \\ \omega_3 &= 2\pi 1,22535 \\ \omega_4 &= 2\pi 21,9 \end{aligned}$$

60 W 120 V hehkulampulle

$$\begin{aligned} k &= 1,74802 \\ \lambda &= 2\pi 4.167375 \\ \omega_1 &= 2\pi 9,077169 \\ \omega_2 &= 2\pi 2,939902 \\ \omega_3 &= 2\pi 1,394468 \\ \omega_4 &= 2\pi 17,31512 \end{aligned}$$

Erilaisilla lampputyypeillä on erilainen toimintaperiaate. Tästä myös seuraa se, että välkynnän vaste jännitemuutokselle on erilainen eri lamppu tyypeille. IEC:n standardien määrittelemä välkynnän mittaamenetelmä on tehty pitämään referenssilamppuina 60 W hehkulamppuja jännitteillä 230 V ja 120 V järjestelmästä riippuen. Tämä välkynnän mittaamenetelmä ei kykene määrittämään samanlaista numeerista tulosta samanlaisesta välkynnän häiritsevyydestä muille lampputyypeille.

Väitöskirjassa ”Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement” on tarkasteltu erilaisten lampputyypin välkynnän vastetta jännitemuutoksille ja näiden pohjalta on esitetty välkynnänmittauksen standardiin kehitysehdotuksia. Tutkimus on tehty Eindhovenin teknillisessä yliopistossa. Mittausjärjestelyiden yleiskuva on esitetty kuvassa 5.2. Mittauksissa käytettiin tietokoneella ohjelmoitavaa teholähdettä/jännitelähdettä, jonka avulla voitiin tuottaa halutun muotoinen moduloitu jännite. Teholähteestä saadut jännitteet toimivat lampun sisään menojännitteinä. Keskimääräinen ja hetkellinen valaistusvoimakkuus mitattiin valodetektorilla ja valaistusvoimakkuusmittarilla (luksimittari). Lyhytaikaista ja pitkäkestoista välkynnän tasoa mitattiin sähkön laatuanalyysattorilla, joka perustui IEC 61000-4-15 standardiin. Näitä välkynnän tasoja pidettiin mittauksissa referenssi tasoina eri lamppujen välillä. Oskilloskoopilla mitattiin kaikkia suureita, josta data siirrettiin tietokoneelle. Testattava lamppu ja valodetektor olivat suljetussa laatikossa, jonka sisäpinta oli valkoinen heijastusongelmien pienentämiseksi.



Kuva 5.2. Mittausjärjestelyiden yleiskuva. [Cai09]

Tutkimuksessa keskityttiin kotitalouksien käyttämiin lamppeihin. Tutkimus testasi yhteensä kuutta eri lampputyyppiä, joiden käyttöjännite oli 230 V. Testatut lamput olivat:

- 60 W:n hehkulamppu (toimi referenssilamppuna)
- 20 W:n halogeenilamppu elektronisella muuntajalla
- 15 W:n loisteputki (valaisimessa elektroninen liitäntälaitte)
- 11 W:n energiansäästölamppu (luultavimmin lampussa elektroninen liitäntälaitte)
- 9 W:n pienloistelamppu elektronisella liitäntälaitteella.
- 3,4 W:n LED lamppu elektroniselle liitäntälaitteella

Verrattaessa lamppujen erilaista välkynnän vastetta jännitemuutoksille, tutkimus tarkasteli standardin IEC 61000-4-15 määrittelemiä taulukoita 1 ja 2. Tarkastellaan ensiksi mittaustuloksia, jotka koskevat taulukkoa 1. Kyseisessä taulukossa on määritetty sinimuotoisen moduloivan jännitteen amplitudin, joka aiheuttaa hetkellisen välkyntätuntemuksen maksimiarvoksi arvon  $1 \pm 5\%$  tarkkuudella, suhde nimellisjännitteeseen. Lampun tuottaman valaistusvoimakkuuden voidaan olettaa olevan riippuvainen lampun kuluttamasta energiasta, joka on riippuvainen jännitteen neliöstä. Jos lamppua syöttävä jännite on moduloitu sinimuotoisella jännitteellä, voidaan tällöin lampun kuluttama energia ja lampun tuottama valaistusvoimakkuus jakaa useaan eri taajuuskomponenttiin. Moduloivan jännitteen modulointi kertoimen  $m$  ollessa pienempi kuin 0,1, joka toteutuu kaikissa taulukon 1 tapauksissa, taajuuskomponenttien  $2(\omega + \omega_m)$ ,  $2(\omega - \omega_m)$  ja  $2\omega_m$  arvot ovat pienet. Näissä tapauksissa nämä komponentit voidaan unohtaa. Jäljelle jää tasakomponentti sekä komponentit kulmataajuuksilla  $2\omega$ ,  $2\omega + \omega_m$ ,  $2\omega - \omega_m$  ja  $\omega_m$ . Tasakomponentti on näistä kaikista suuri ja valaistuksen mielessä se ei aiheuta välkyntää, koska se pysyy vakiona. Välkynnän kannalta myös kulmataajuudet  $2\omega$ ,  $2\omega + \omega_m$  ja  $2\omega - \omega_m$  ovat irrelevantit, koska tällöin ollaan taajuus alueella, joka on 100 Hz ympäristössä ja ihmisen näköhavainto ei kykene havaitsemaan tällä taajuudella olevaa välkyntää. Välkynnän kannalta ainoaksi relevantiksi tarkasteltavaksi taajuuskomponentiksi jää moduloivan jännitteen taajuus, joka on standardissa määritellyssä taulukossa 1 aina ihmisen havaitsemalla välkynnän taajuusalueella. Tätä edellä mainittua valaistusvoimakkuuden käyttäytymistä on havainnollistettu taulukossa 5-1, jossa on esitetty 60 W hehkulampun valaistusvoimakkuuden FFT analyysi, kun moduloivan jännitteen amplitudi on 4,6 V ja taajuus on 10 Hz. Taulukosta nähdään valaistuksen suuri tasakomponentti, 100 Hz:n ja siitä  $\pm 10$  Hz:n ympärillä olevien taajuuskomponenttien kasvaneet arvot. Tämän lisäksi nähdään modulointi taajuudella kasvanut arvo, aivan kuten edellä todettiin.

Taulukko 5-1. 60 W hehkulampun valaistusvoimakkuuden FFT analyysi, kun moduloivan jännitteen amplitudi on 4,6 V ja moduloiva taajuus on 10 Hz. [Cai09]

| Frequency (Hz)    | DC            | 10             | 20     | 30            | 40             | 50            |
|-------------------|---------------|----------------|--------|---------------|----------------|---------------|
| Illuminance (Lux) | <b>1869.3</b> | <b>36.5582</b> | 0.3721 | 1.7828        | 0.0517         | 3.8393        |
| Frequency (Hz)    | 60            | 70             | 80     | 90            | 100            | 110           |
| Illuminance (Lux) | 0.0453        | 0.5011         | 0.0383 | <b>4.0711</b> | <b>144.774</b> | <b>3.3086</b> |

Edellä mainitun seurauksena tutkimus esittelee suhteellisen valaistusvoimakkuuden vaihtelu. Suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu lasketaan kaavan 5.2 mukaisesti.

$$L_r(f_m) = \frac{L_{f_m}}{L_{av}} \times 100 \quad (5.2)$$

missä  $L_r(f_m)$  on moduloivan taajuuskomponentin suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu tietylle lampulle

$L_{f_m}$  on moduloivan taajuuskomponentin absoluuttinen valaistusvoimakkuus tietylle lampulle

$L_{av}$  on tietyn lampun keskimääräinen valaistusvoimakkuus, joka saadaan luksimittarilla

Jotta eri lamppujen välkyntävastetta voidaan vertailla keskenään, suhteellisarvoja joudutaan käyttämään. Suhteellisarvon referenssitasoksi tutkimuksessa valittiin hehkulampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu eri taajuuksilla, koska se hehkulamppu toimii standardin 61000-4-15 määrittävänä lampuna. Suhteellisarvo voidaan laskea kaavan 5.3 avulla.

$$L_{unit}(f_m) = \frac{L_r(f_m)}{L_b(f_m)} \quad (5.3)$$

missä  $L_{unit}(f_m)$  on moduloivan taajuuden suhteellisen valaistusvoimakkuuden vaihtelun suhteellisarvo

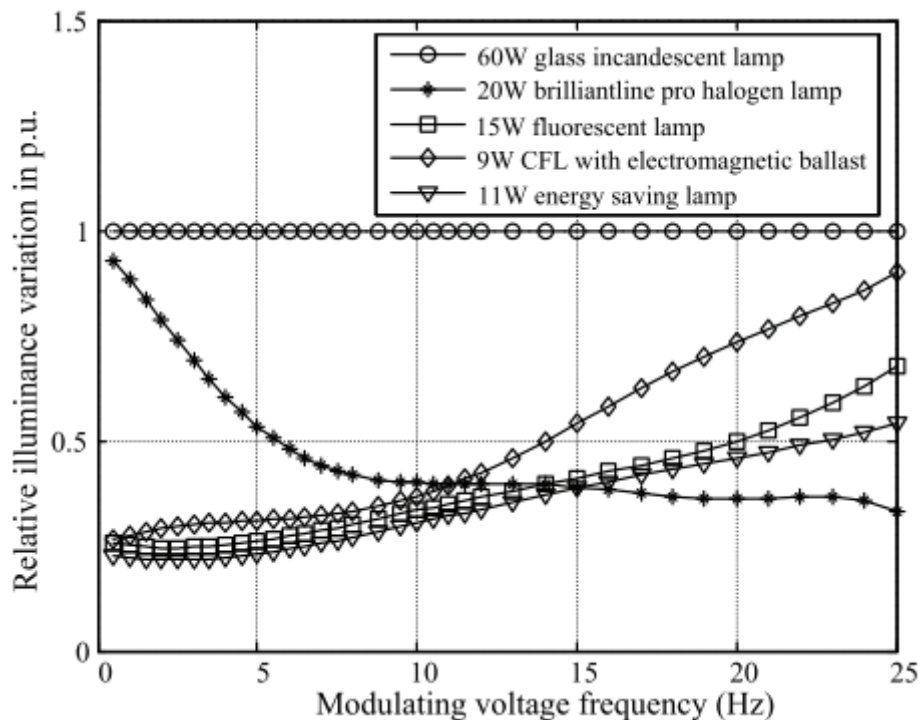
$L_r(f_m)$  on moduloivan taajuuskomponentin suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu tietylle lampulle

$L_b(f_m)$  on moduloivan taajuuskomponentin suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu hehkulampulle

Tutkimuksessa jokaiselle eri lampputyypille tehtiin mittauksia moduloiduilla syöttöjännitteillä, jotka on määritetty standardin IEC 61000-4-15 taulukossa 1, sillä poikkeuksella, että 33,33 Hz:n modulointitaajuudella ei suoritettu mittausta. Tämä taulukko on esitetty taulukossa 5-2. Taulukon 4\_2 moduloivan jännitteen suhteellinen jännitemuutos  $\Delta V/V$  on kaksi kertaa moduloivan jännitteen amplitudin kerroin m. Yhteensä 36:lla eri moduloivalla taajuudella suoritettiin mittauksia. Keskimääräinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu mitattiin tilanteessa, jossa syöttöjännitettä ei moduloitu. Absoluuttinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu mitattiin jokaiselle lampulle eri modulointitaajuuksilla. Suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu laskettiin kaavan 5.2 mukaisesti. Mahdollistaakseen eri lampputyypien vertailun, suhteellisista valaistusvoimakkuuden vaihteluista otettiin suhteellisarvo kaavan 5.3 mukaisesti. Kuvassa 5.3 on esitetty edellä mainituista mittauksista johdetut eri lampputyypien suhteellisten valaistusvoimakkuuden muutokset suhteellisarvona modulointitaajuuden funktiona. Käyrät on sovitettu käyttäen kuudennen kertaluvun polynomisovitetta.

Taulukko 5-2. Normalisoitu välkyntämittarin vaste sinimuotoiselle modulointijännitteelle. [IEC 61000-4-15]

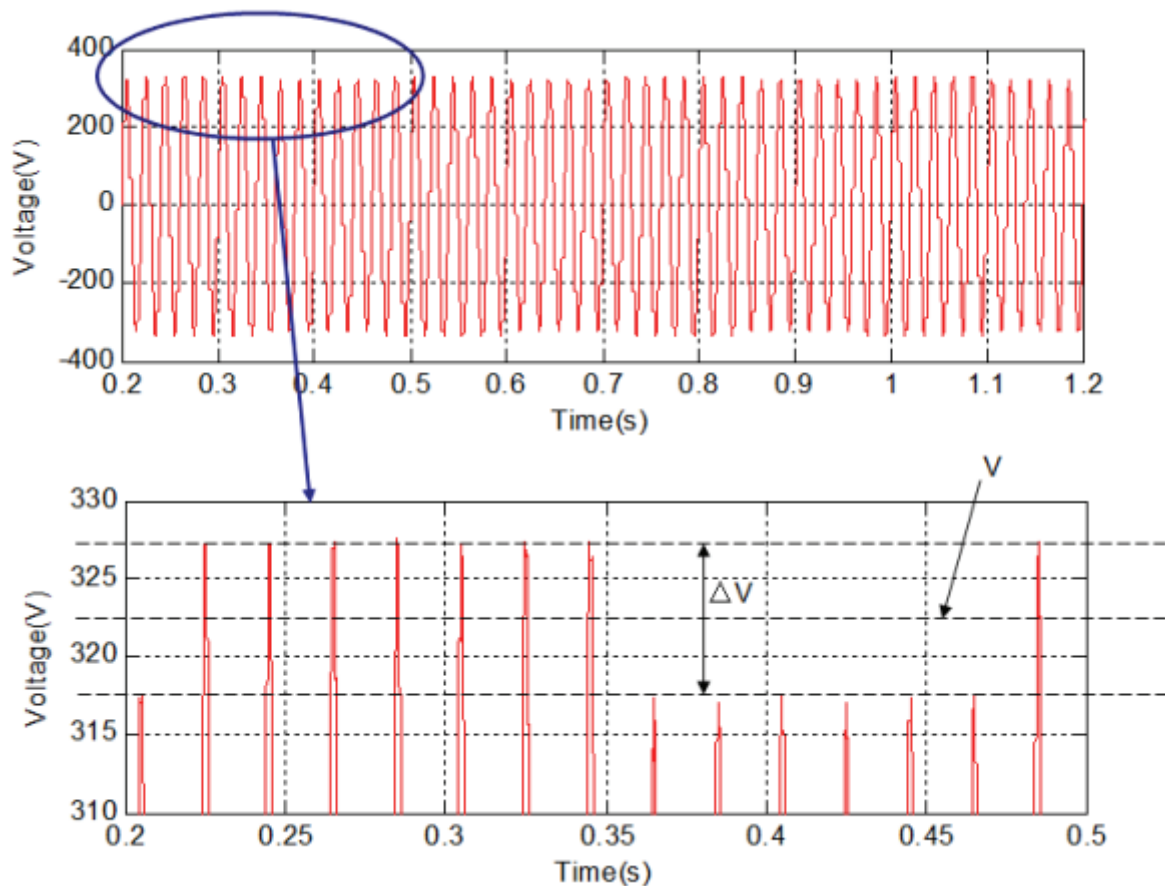
| Hz  | Voltage fluctuation<br>%   |                            | Hz    | Voltage fluctuation<br>%   |                            |
|-----|----------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|
|     | 120-V lamp<br>60 Hz system | 230-V lamp<br>50 Hz system |       | 120-V lamp<br>60 Hz system | 230-V lamp<br>50 Hz system |
| 0,5 | 2,457                      | 2,340                      | 10,0  | 0,339                      | 0,260                      |
| 1,0 | 1,463                      | 1,432                      | 10,5  | 0,355                      | 0,270                      |
| 1,5 | 1,124                      | 1,080                      | 11,0  | 0,374                      | 0,282                      |
| 2,0 | 0,940                      | 0,882                      | 11,5  | 0,394                      | 0,296                      |
| 2,5 | 0,814                      | 0,754                      | 12,0  | 0,420                      | 0,312                      |
| 3,0 | 0,716                      | 0,654                      | 13,0  | 0,470                      | 0,348                      |
| 3,5 | 0,636                      | 0,568                      | 14,0  | 0,530                      | 0,388                      |
| 4,0 | 0,569                      | 0,500                      | 15,0  | 0,593                      | 0,432                      |
| 4,5 | 0,514                      | 0,446                      | 16,0  | 0,662                      | 0,480                      |
| 5,0 | 0,465                      | 0,398                      | 17,0  | 0,737                      | 0,530                      |
| 5,5 | 0,426                      | 0,360                      | 18,0  | 0,815                      | 0,584                      |
| 6,0 | 0,393                      | 0,328                      | 19,0  | 0,897                      | 0,640                      |
| 6,5 | 0,366                      | 0,300                      | 20,0  | 0,981                      | 0,700                      |
| 7,0 | 0,346                      | 0,280                      | 21,0  | 1,071                      | 0,760                      |
| 7,5 | 0,332                      | 0,266                      | 22,0  | 1,164                      | 0,824                      |
| 8,0 | 0,323                      | 0,256                      | 23,0  | 1,262                      | 0,890                      |
| 8,8 | 0,321                      | 0,250                      | 24,0  | 1,365                      | 0,962                      |
| 9,5 | 0,330                      | 0,254                      | 25,0  | 1,472                      | 1,042                      |
|     |                            |                            | 33,33 | Test not required          | 2,130                      |
|     |                            |                            | 40,0  | 4,424                      | Test not required          |



Kuva 5.3. Eri lamppujen välkyntä vaste sinimuotoisille moduloiville jännitteille. Incandescent lamp = hehkulamppu, brilliantline pro halogen lamp = halogeenilamppu, fluorescent lamp = loisteputki, CFL = pienloistelamppu, energy saving lamp = energian säästölamppu. [Cai09]

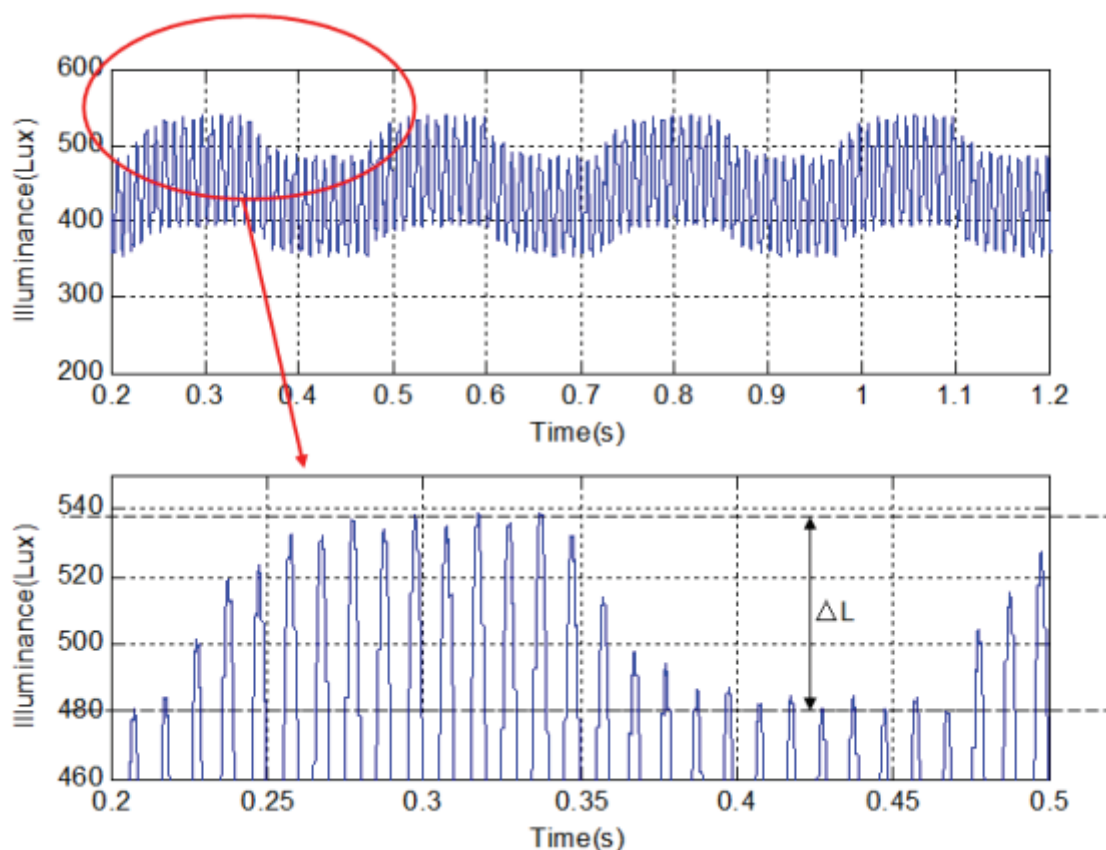
Koska suhteellisarvon perusarvoksi valittiin hehkulampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden muutos, on kuvan 5.3 arvot hehkulampulle kaikilla modulointitaajuuksilla 1. Kuvasta 5.3 nähdään, että hehkulamppu on kaikilla modulointi taajuuksilla kaikista herkin lampputyyppi välkynnälle, koska suhteellisen valaistusvoimakkuuden muutoksen suhteellisarvot ovat kaikilla modulointitaajuuksilla suurempia kuin muilla lampputyypeillä. 11 W energian säästölamppu on kaikista lampputyypeistä epäherkin välkynnälle, kun modulointitaajuus on alle 15 Hz. Tämä johtuu lampun toimintaperiaatteesta sekä elektronisesta liitäntälaitteesta, joka tuottaa lampulle vakaamman jännitteen ja virran. Halogeenilamppu on vuorostaan epäherkin lampputyyppi välkynnälle kun modulointitaajuus on välillä 15 Hz - 25 Hz. Tämä johtuu siitä, että itse halogeenilamppu toimii 12 V jännitteellä, joka saadaan aikaan elektronisella muuntajalla, joka vaikuttaa välkyntävasteeseen.

Tutkimuksessa käsiteltiin suorakulmaisen moduloivan jännitteen vaikutusta välkyntää, koska tämäntyyppisiä muutoksia on paljon jakeluverkossa esimerkiksi moottorien käynnistymisestä johtuen. Käsiteltävinä lampputyypeinä olivat edellisessä kohdassa mainitut lampputyytit, sillä erotuksella, että 9 W pienloistelamppua ei tarkasteltu. Koska jännitemuutos on nyt erilainen verrattuna sinimuotoiseen moduloivaan jännitteeseen, täytyy suhteellinen valaistusvoimakkuuden muutos määritellä eri tavalla. Tätä on havainnollistettu kuvissa 5.4 ja 5.5. Kuvassa 5.4 on esitetty mitattu jännite, kun moduloivana jännitteenä on suorakulmainen jännitemuutos, amplitudina on 3 % (230 V järjestelmässä) ja taajuutena 4 Hz. Kuvassa 5.5 on esitetty valaistusvoimakkuuden muutos edellä mainitulla modulointi jännitteellä.



Kuva 5.4. Mitattu suorakulmainen jännitemuutos, kun moduloivan jännitteen amplitudi on 3 % ja modulointitaajuus on 4 Hz. Alemmassa kuvassa on suurennus ylemmän kuvan sinisestä alueesta. [Cai09]

Lampun valaistusvoimakkuuden käyrämuoto on sinimuotoisesti amplitudimoduloitu, kun syöttöjännite on sinimuotoisesti moduloitu. Kun taas syöttöjännitteessä tapahtuva muutos on suorakulmainen, valaistusvoimakkuuden käyrämuoto ei enää seuraa amplitudimoduloitua siniaaltoa. Valaistusvoimakkuuden käyrämuoto muistuttaa tällöin suorakulmaista amplitudimodulaatiota pienillä modulointitaajuuksilla ja sinimuotoista amplitudimodulaatiota suuremmilla modulaatiotaajuuksilla. Tämä johtuu siitä hehkulangan lämmönsiirron tai elektrodien välisen purkauksen aikavakiosta. Tämä käyttäytyminen valaistusvoimakkuudessa nähdään kuvassa 5.5, jossa 60 W hehkulampun käyttöjännite on kuvan 5.4 mukainen.



Kuva 5.5. Mitattu valaistusvoimakkuuden muutos, kun moduloivan suorakulmaisenjännitteen amplitudi on 3 % ja modulointitaajuus on 4 Hz. Alemmassa kuvassa on suurennus ylemmän kuvan punaisesta alueesta. [Cai09]

Suorakulmaisen jännitemuutoksen aiheuttaman valaistusvoimakkuuden muutoksen takia tutkimus määrittelee valaistusvoimakkuuden muutoksen  $\Delta L$  suurimman ja pienimmän valaistusvoimakkuuden maksimiarvojen erotuksena. Tätä on havainnollistettu kuvassa 5.5. Suhteellinen valaistusvoimakkuuden muutos määritellään kaavan 5.4 mukaisesti.

$$L_r = \frac{\Delta L}{L_{av}} \times 100 \quad (5.4)$$

missä  $L_r$  on tietyn lampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu (ilmeisesti tietylle modulointitaajuudelle)

$\Delta L$  on tietyn lampun absoluuttinen kuvan 5.5 mukainen valaistusvoimakkuuden vaihtelu (ilmeisesti tietylle modulointitaajuudelle)

$L_{av}$  on tietyn lampun keskimääräinen valaistusvoimakkuus

Kuten aiemmin myös tässä kohdassa, jotta eri lampputaajia voidaan verrata keskenään, suhteellisarvoja joudutaan käyttämään. Suhteellisarvon perusarvoksi valitaan hehkulamput suhteellinen

valaistusvoimakkuuden vaihtelu tietyllä modulointitaajuudella. Suhteellisarvo lasketaan kaavan 5.5 mukaisesti.

$$L_{unit} = \frac{L_r}{L_b} \quad (5.5)$$

missä  $L_{unit}$  on tietyn lampun suhteellisen valaistusvoimakkuuden vaihtelun suhteellisarvo tietylle moduloivalle taajuudelle

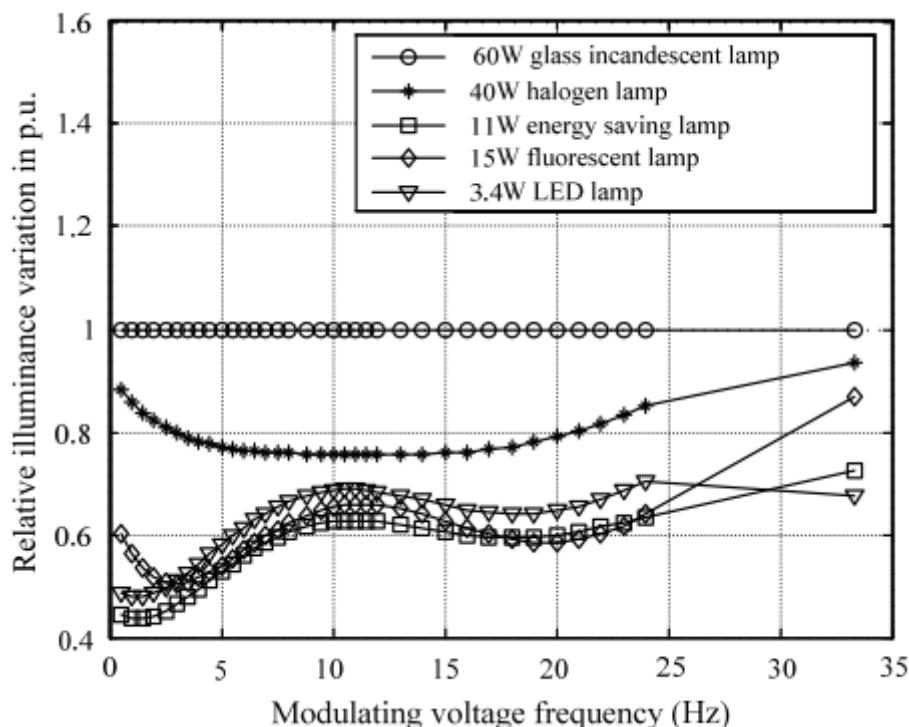
$L_r$  on tietyn lampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu tietylle moduloivalle taajuudelle

$L_b$  on hehkulampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu tietylle moduloivalle taajuudelle

Tutkimuksessa jokaiselle eri lampputyypille tehtiin mittauksia suorakulmaisesti moduloiduilla syöttöjännitteillä, jotka on määritetty standardin IEC 61000-4-15 taulukossa 2. Tämä taulukko on esitetty taulukossa 5-3. Taulukon 5-3 arvot aiheuttavat välkyntämittarin hetkellisen välkynnän tuntemuksen maksimi arvoksi  $1 \pm 5\%$  tarkkuudella. Yhteensä 36:lla eri moduloivalla taajuudella suoritettiin mittauksia. Suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu laskettiin kaavan 5.4 mukaisesti. Mahdollistaakseen eri lampputyypien vertailun, suhteellisista valaistusvoimakkuuden vaihteluista otettiin suhteellisarvo kaavan 5.4 mukaisesti. Kuvassa 5.6 on esitetty edellä mainituista mittauksista johdetut eri lampputyypien suhteellisten valaistusvoimakkuuden muutokset suhteellisarvona modulointitaajuuden funktiona. Käyrät on sovitettu käyttäen kuudennen kertaluvun polynomisovitetta.

Taulukko 5-3. Normalisoitu välkyntämittarin vaste suorakulmaiselle modulointijännitteelle. [IEC 61000-4-15]

| Hz  | Voltage fluctuation<br>%   |                            | Hz    | Voltage fluctuation<br>%   |                            |
|-----|----------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|
|     | 120 V lamp<br>60 Hz system | 230 V lamp<br>50 Hz System |       | 120 V lamp<br>60 Hz system | 230 V lamp<br>50 Hz system |
| 0,5 | 0,600                      | 0,514                      | 10,0  | 0,264                      | 0,205                      |
| 1,0 | 0,547                      | 0,471                      | 10,5  | 0,280                      | 0,213                      |
| 1,5 | 0,504                      | 0,432                      | 11,0  | 0,297                      | 0,223                      |
| 2,0 | 0,471                      | 0,401                      | 11,5  | 0,309                      | 0,234                      |
| 2,5 | 0,439                      | 0,374                      | 12,0  | 0,323                      | 0,246                      |
| 3,0 | 0,421                      | 0,355                      | 13,0  | 0,369                      | 0,275                      |
| 3,5 | 0,407                      | 0,345                      | 14,0  | 0,411                      | 0,308                      |
| 4,0 | 0,394                      | 0,333                      | 15,0  | 0,459                      | 0,344                      |
| 4,5 | 0,371                      | 0,316                      | 16,0  | 0,513                      | 0,376                      |
| 5,0 | 0,349                      | 0,293                      | 17,0  | 0,580                      | 0,413                      |
| 5,5 | 0,323                      | 0,269                      | 18,0  | 0,632                      | 0,452                      |
| 6,0 | 0,302                      | 0,249                      | 19,0  | 0,692                      | 0,498                      |
| 6,5 | 0,282                      | 0,231                      | 20,0  | 0,752                      | 0,546                      |
| 7,0 | 0,269                      | 0,217                      | 21,0  | 0,818                      | 0,586                      |
| 7,5 | 0,258                      | 0,207                      | 22,0  | 0,853                      | 0,604                      |
| 8,0 | 0,255                      | 0,201                      | 23,0  | 0,946                      | 0,680                      |
| 8,8 | 0,253                      | 0,199                      | 24,0  | 1,072                      | 0,743                      |
| 9,5 | 0,257                      | 0,200                      | 33,33 | Test not<br>required       | 1,67                       |
|     |                            |                            | 40,0  | 3,46                       | Test<br>not required       |

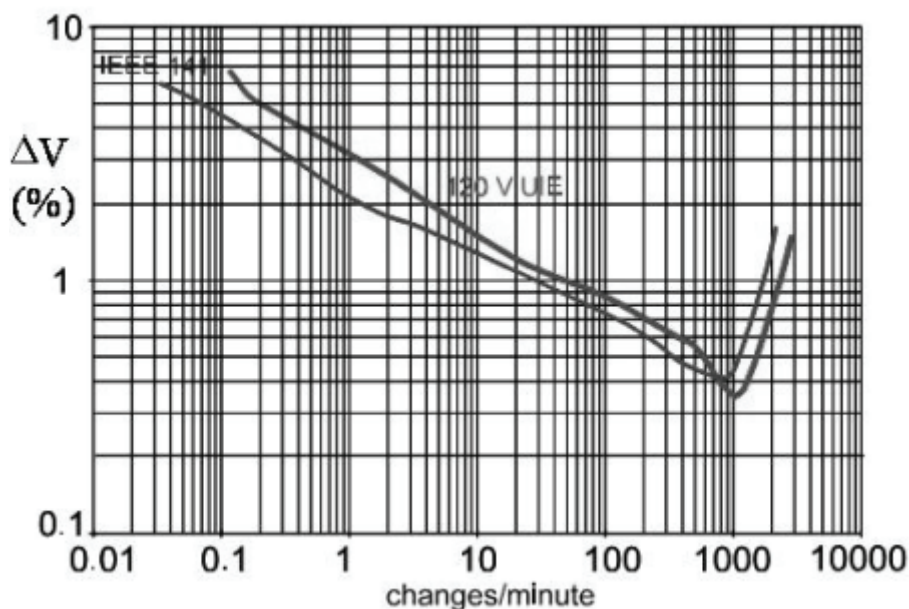


Kuva 5.6. Eri lamppujen suorakulmisen jännitemuutoksen välkyntävaste. Incandascient lamp = hehkulamppu, brilliantline pro halogen lamp = halogeenilamppu, fluorescent lamp = loisteputki, energy saving lamp = energian säästölamppu. [Cai09]

Koska suhteellisarvon perusarvoksi valittiin hehkulampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden muutos, on kuvan 5.6 arvot hehkulampulle kaikilla modulointitaajuuksilla 1. Kuvasta 5.6 nähdään, että hehkulamppu on kaikilla modulointi taajuuksilla kaikista herkin lampputyyppeistä välkyntälle, koska suhteellisen valaistusvoimakkuuden muutoksen suhteellisarvot ovat kaikilla modulointitaajuuksilla suurempia kuin muilla lampputyypeillä. 11 W energian säästölamppu on kaikista lampputyypeistä epäherkin välkyntälle. Tämä elektronisesta liitäntälaitteesta, joka ylläpitää vakaampaa lamppujännitettä. Ylipäätään tulokset ovat hyvin samansuuntaiset sinimuotoisesti moduloidun jännitteen kanssa. Erotuksena on, että halogeenilamppu on kaikilla modulointitaajuuksilla toiseksi herkin lampputyyppeistä välkyntälle. Myös kaikkien lampputyyppeiden suhteellisen valaistusvoimakkuuden muutoksen suhteellisarvot ovat suurempia eli ne ovat lähempänä hehkulampun muutoksia suorakulmaisella modulointijännitteellä kuin sinimuotoisella modulointijännitteellä.

Kuvat 5.3 ja 5.6 esittävät suhteellisen valaistusvoimakkuuden muutosta suhteessa hehkulampun valaistusvoimakkuuden muutokseen tietyllä modulointi taajuudella, kun moduloivan jännitteen amplitudi on sama kaikilla lampputyypeillä. Tyypillisesti helpoin tapa arvioida välkyntän tasoa on käyttää IEEE:n ja UIE:n määrittelemiä käyriä, jossa approksimoidaan lyhyt aikaisen välkyntän

häiritsevyysindeksin arvoa yksi suorakulmaisen jännitemuutoksen amplitudin ja toistuvuuden funktiona. Nämä käyrät on määritelty 50 Hz 230V ja 60 Hz 120 V hehkulampuille. Edellä mainitut käyrät on esitetty kuvassa 5.7.



Kuva 5.7. Pst = 1 välkyntä käyrät. [Halp03]

Kuvan 5.7 käyrät on määritelty hehkulampulle, joka on osoitettu olevan kaikista herkin lampputyyppi välkyntälle. Tutkimuksen eräänä tavoitteena oli luoda kuvan 5.7 tyyppiset käyrät myös muille lampputypeille.. Perusarvona tässä määrittelyssä käytetään hehkulampulle määritettyjä taulukon 5.2 arvoja. Tutkimuksen määrittämät käyrät perustuvat täten hetkelliseen välkyntän tuntemuksen määrittävään arvoon eikä lyhyt aikaiseen välkyntän häiritsevyysindeksiin. Tästä syystä tutkimus kutsuu niitä hetkellisen välkyntän käyriksi, joilla eri lamput saavat hetkellisen välkyntän tuntemuksen arvoksi 1. Syynä tähän on se, että lyhyt aikaisen ja hetkellisen välkyntän tuntemuksen välillä on lineaarinen suhde [Cai09]. Tästä syystä myös hetkellisen välkyntän tuntemuksen arvo indikoi välkyntän tasoa ja ihmisen tuntemaa välkyntää.

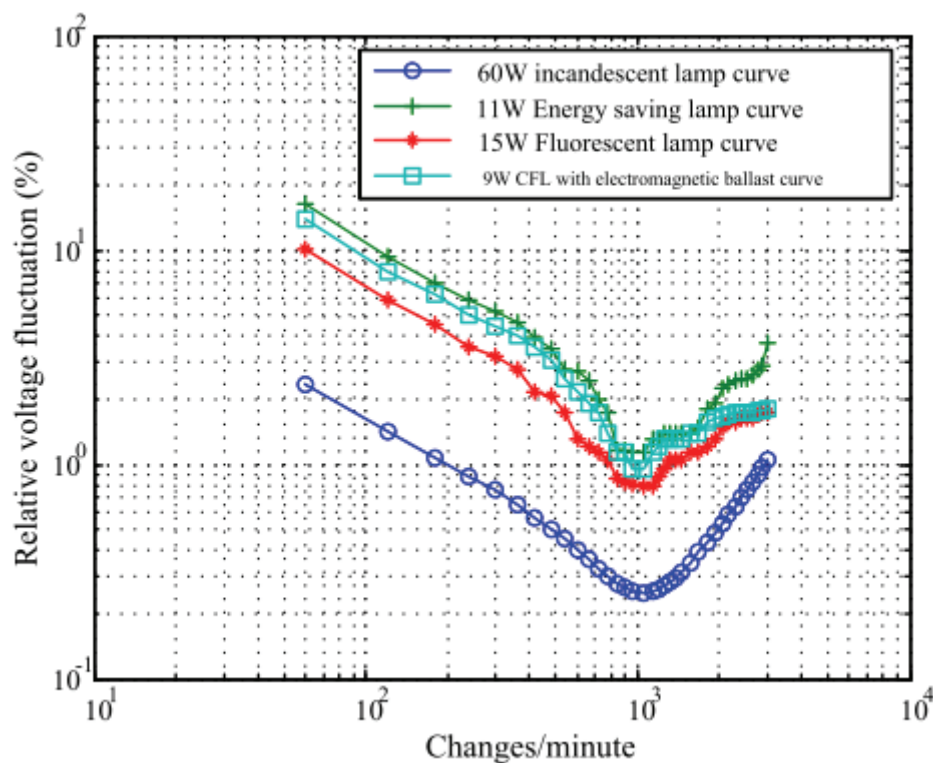
Mittaukset suoritettiin siten, että hehkulampulle tehtyjä mittauksia eri modulointitaajuuksille pidettiin referenssimittauksina. Näistä mittauksista laskettiin suhteellinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu käyttäen kaavaa 5.2. Yhtä suuren suhteellisen valaistusvoimakkuuden vaihtelun oletettiin aiheuttavan yhtä suuri välkyntän tuntemus. Tämä oletus todennettiin tutkimuksessa pienellä 10 henkilön koeotoksella ja se on selitetty väitöskirjan liiteosassa. Hetkellisen välkyntän määrittäviä käyrämittauksia suoritettiin yhteensä kolmelle eri lampulle: 11 W energian säästölampulle, 15 W loisteputkelle ja 9 W pienloistelampulle. Mittaukset suoritettiin seuraavan kuusiportaisen menetelmän mukaisesti.

1. Keskimääräinen valaistusvoimakkuus mitattiin normaaleissa jänniteolosuhteissa
2. Moduloitu jännite tietyllä taajuudella ja amplitudilla ohjattiin sisään menojännitteeksi lampulle. Testattavan lampun absoluuttinen valaistusvoimakkuuden vaihtelu mitattiin ja sille suoritettiin FFT analyysi.
3. Testattavan lampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden muutos laskettiin käyttäen kaavaa 4.2.
4. Testattavan lampun laskettua suhteellista valaistusvoimakkuuden muutosta verrattiin hehkulampun referenssiarvoihin. Moduloivaan jännitteen taajuus ja amplitudi otettiin talteen, jos verrattavat arvot olivat samat.
5. Jos testattavan lampun suhteellinen valaistusvoimakkuuden muutos oli pienempi kuin hehkulampun vastaava muutos, moduloivan jännitteen amplitudia nostettiin 0,5 V. Tämän jälkeen kohdat 2, 3 ja 4 suoritettiin uudestaan.
6. Talteen otetut modulointijännitteet jaettiin 230 V, jotta saataisiin laskettua suhteellinen jännitemuutos. Lasketuista suhteellisista jännitemuutoksista piirrettiin käyrä modulointitaajuuden funktiona.

Mittauksista saadut tulokset on esitetty kuvassa 5.8. Kuvassa 5.8 on hehkulampun käyrä piirretty käyttäen taulukon 5-2 arvoja. Muiden kolmen lampun arvot perustuvat mittauksiin. Jännitemuutosten taajuus on muutettu Hz-arvosta muutosta/minuutti arvoon. Tässä muutoksessa on otettu huomioon, että moduloivan jännitteen jakson aikana tapahtuu kaksi jännitemuutosta. Tästä syystä modulointitaajuudet on kaksinkertaistettu kuvassa 5.8.

Kuvasta 4\_8 nähdään, että hehkulamppu on kaikista herkin lampputyyppi välkynnälle, kuten jo aiemmin todettiin. Tämä nähdään siitä, että hetkellisen välkynnän tuntemuksen arvon 1 aiheuttaa hehkulampulle pienempi suhteellinen jännitemuutos kuin muille lampputypeille. Kuvaa 5.8 voidaan käyttää apuna määriteltäessä eri lampputyyppien aiheuttamaa hetkellistä välkynnän tuntemusta sekä välkyntätasoa. Näissä tarkasteluissa, etenkin lyhyt aikaisen välkyntäindeksin tasoa määriteltäessä, tulee ottaa huomioon:

1. Kuva 5.8 perustuu sinimuotoisesti moduloituun jännitteeseen
2. Se perustuu hetkellisen välkynnän tuntemuksen arvoon 1 eikä lyhytaikaisen välkynnän häiritsevyyden arvoon 1



Kuva 5.8. Välkyntäkäyrät hetkellisellä välkynnän havaitsemisarvolla 1 sinimuotoisen moduloivan jännitemuutoksen kaksinkertaisen taajuuden funktiona. Incandescent lamp = hehkulamppu, fluorescent lamp = loisteputki, CFL = pienloistelamppu, energy saving lamp = energian säästölamppu. [Cai09]

Näiden tulosten lisäksi väitöskirja esittää parannuksia välkynnän mittausmenetelmään. Nämä perustuvat sinimuotoisella moduloivalla jännitteellä tehtyihin mittauksiin. Tuloksena ne antavat uudenlaisia siirtofunktioita eri lamputyypeille lohkon 3 suotimelle 3 eli toisin sanoen muuttavat kaavassa 5.1 esitettyä siirtofunktiota. Muutoin välkynnän mittausmenetelmä pysyy ennallaan. Eri siirtofunktioita ei tässä yhteydessä käydä tarkemmin läpi.

## 6 Etäluettavat energiamittarit

Etäluettavat energiamittarit (*AMR*) ovat tällä hetkellä asennusvaiheessa monissa verkkoyhtiöissä, ja ne tarjoavat osaltaan mahdollisuuksia kulutuksen pienentämiseen. Suomen lain mukaan vuonna 2014 kaikista verkkoyhtiöiden energianlukumittareista 80 % tulee olla etäluettavia.

Etäluennan toteuttamiseen on olemassa erilaisia tekniikoita, joista PLC-tekniikka on hyvin houkutteleva, sillä se voidaan toteuttaa olemassa olevan infrastruktuurin avulla. PLC-tekniikan käyttämisessä on kuitenkin haasteita. Verkkoa ei ole alun perin suunniteltu suuritaajuisista tiedonsiirtoa varten, ja käytettäviltä signaaleilta vaaditaan suurta häiriöiden sietokykyä.

Sähkön laadun tutkimisessa on perinteisesti keskitytty alle 2 kHz taajuuksiin, ja niistä tiedetäänkin melko paljon. Yli 2 kHz alueen tutkimus on kuitenkin ollut huomattavasti vähäisempää johtuen vähäisestä tunnistetuiden häiriöiden määrästä sekä sopivan mittauslaitteiston puuttumisesta. PLC-mittareiden lisääntymisen vuoksi on tutkimukselle kuitenkin tarvetta, sillä PLC:n taajuusalue sijoittuu 2 kHz yläpuolelle välillä 3-95 kHz. Taulukossa 6-1 on esitetty lähteessä [Rön11] esitetty luokittelu erilaisista PLC:n ja asiakaslaitteiden välisistä vuorovaikutuksista ja tämän kirjallisuusselvityksen pohjalta syntynyt käsitys aikaisempien tutkimusten laajuudesta eri osa-alueilla.

Tässä raportissa esitellään aluksi pintapuolisesti PLC-tekniikan perusominaisuuksia luvussa 2. Luvussa 3 tarkastellaan PLC-signaalin kulkua sähköverkossa ja siihen vaikuttavia ilmiöitä. Luvuissa 4 ja 5 käydään läpi asiakkaiden sähkölaitteiden vaikutusta PLC-signaalin ja PLC-signaalin vaikutusta asiakkaan sähkölaitteisiin.

Taulukko 6-1. Energiamittareiden PLC-luennan ja asiakaslaitteiden väliset vuorovaikutukset [Rön11].

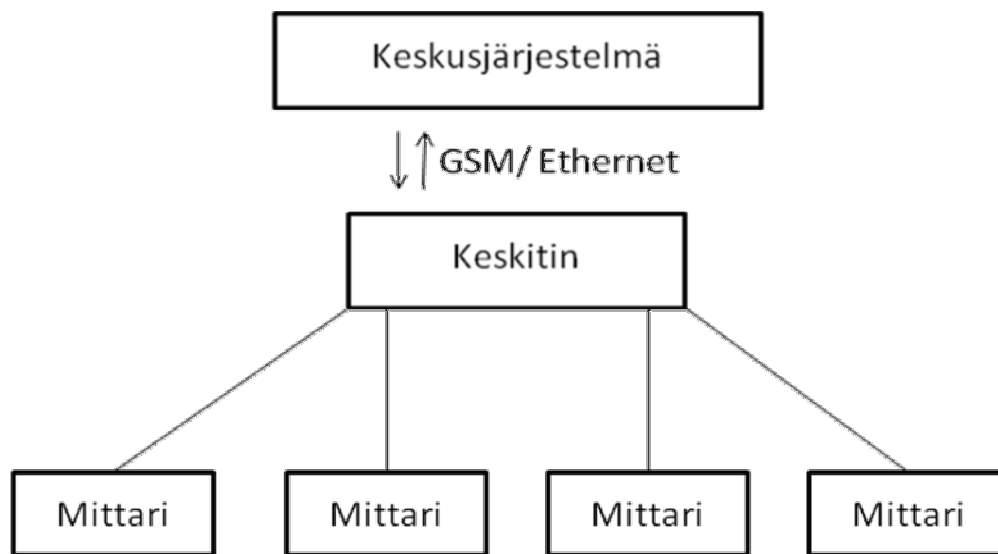
|   | Häiriön aiheuttaja                                                                                              | Häiriön ilmeneminen                                                                                                               | Aikaisempien tutkimusten laajuus                                                      |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| A | Sähkökäyttäjän laitteen aiheuttama jännite- tai virtasärö (häiriöt) PLC-taajuuksilla                            | PLC-signaali hukkuu häiriöihin ja kommunikatio ei onnistu                                                                         | Tutkittu laajimmin                                                                    |
| B | Sähkökäyttäjän laite muodostaa pieni-impedanssisen virtatien PLC-signaalille                                    | Vain pieni osa PLC-signaalista saapuu vastaanottimeen asti ja kommunikatio ei onnistu                                             | Tutkittu jonkin verran, lähinnä 1-vaihelaitteita (mm. Luleå University of Technology) |
| C | Jännitteen säröytyminen PLC-signaalin vaikutuksesta                                                             | Sähkökäyttäjän laitteen virhetoiminnot                                                                                            | Tutkittu melko vähän (Hipaisuhimmenninlamput - CENELEC)                               |
| D | PLC-signaali aiheuttaa sähkökäyttäjän laitteen läpi suuren virran                                               | Sähkökäyttäjän laitteen eliniän lyheneminen ja virhetoiminnot                                                                     | Tutkittu hyvin vähän                                                                  |
| E | PLC-signaalille alttiit sähkökäyttäjän epälineaariset laitteet aiheuttavat virtoja muilla kuin PLC-taajuuksilla | Mikä tahansa haittavaikutus, joka aiheutuu uusien taajuuskomponenttien syntymisestä, mukaan lukien radioliikenteen häiriintyminen | Tutkittu hyvin vähän                                                                  |

## 7 PLC-luentajärjestelmä

PLC (*Power Line Communication*) -tekniikka perustuu sähköverkon johtojen käyttämiseen tiedonsiirtoväylänä. Pääasiassa tekniikkaa hyödynnetään verkkoyhtiöiden etäluettavissa energiamittareissa, mutta tekniikkaa voidaan käyttää myös pienemmissä verkoissa esimerkiksi laajakaistayhteyden jakamiseen tai kotiautomaatiojärjestelmän toteuttamiseen. Kappaleessa esitellään pintapuolisesti järjestelmän rakenne, toiminta ja ominaisuudet.

### 7.1 *Rakenne*

PLC-luentajärjestelmä koostuu periaatetasolla keskusjärjestelmästä, keskittimistä ja energiamittareista. Toimintaa ohjataan keskusjärjestelmästä, joka on yhteydessä keskittimiin GSM-verkon tai Ethernet-liitännän kautta. Keskittimien ja mittareiden välinen kommunikointi on toteutettu PLC-tekniikan avulla. Järjestelmä toimii hierarkkisesti master/slave periaatteella. Ylimpänä master-yksikkönä toimii keskusjärjestelmä, johon on liitetty useita keskittimiä. Vastaavasti alempana master-yksikkönä toimii keskitin, johon on liitetty useita slave-yksikköinä toimivia energianlukumittareita (kuva 7.1). Keskittimet kontrolloivat mittarien toimintaa, ja mittarit lähettävät keskittimelle tietoja vain pyydettyäessä. Keskittimet välittävät tiedot edelleen eteenpäin keskusjärjestelmään. Jos välimatkat master- ja slave-yksikköjen välillä ovat pitkiä, voidaan väliin sijoittaa toistimia, jotka vahvistavat signaalia.



Kuva 7.1. PLC-järjestelmän rakenne

## 7.2 Modulointitekniikka

PLC-tekniikassa digitaalisessa muodossa olevaa dataa siirretään moduloimalla kantoaaltoa eri tekniikoilla. Täysin vapaasti modulointitekniikkaa ei voida valita, sillä sähköverkon korkean kohinatason vuoksi moduloinnin täytyy sietää hyvin häiriöitä. Esimerkiksi amplitudimodulaatio ei tule kyseeseen, sillä alkuperäistä signaalia olisi mahdoton selvittää vastaanottopäässä signaaliin summautuvan kohinan vuoksi [Lar07b]. Mittari voi lähettää tiedot mikrosekunteja tai useita sekunteja kestävinä purskeina riippuen mittarityypistä ja valmistajasta. Kantoaaltotaajuuksien valintaa ja käytettävissä olevaa kaistanleveyttä rajoittaa standardi EN 50065-1, jossa verkkoyhtiöiden käyttöön on allokoitu taajuusalue 3-95 kHz [Ano02]. Samassa standardissa on määritelty myös mm. sallitut lähetysjännitteet/-tehot.

Sähköverkossa yleisesti käytettyjä modulointitekniikoita on kolme. Taajuusvaihto moduloinnissa (FSK) käytetään kahta eri taajuutta kuvaamaan loogista nollaa ja ykköstä. Tällöin signaalia lähetetään vuorottelemalla näiden kahden taajuuden välillä. Vaihemoduloinnissa (PSK) looginen 0 ja 1 erotetaan 180 asteen vaihesiirrolla. PSK voidaan toteuttaa myös 90 asteen vaihesiirrolla, jolloin siirrettävän datan määrä kasvaa, mutta tällöin verkolta vaaditaan alhainen häiriötaso. OFDM-modulointi perustuu signaalin muuntamiseen diskreetillä Fourier-käänteismuunnoksella, jolloin useita eri taajuuksia käytetään samanaikaisesti kommunikointiin. Edellä esitetyistä perustekniikoista on käytössä myös kehittyneempiä variaatioita. [Lar07b]

## 7.3 AMR-mittareiden ominaisuudet

AMR-mittareiden avulla luetaan ensisijaisesti energiatiedot asiakkailta. Näin käytetystä sähköstä voidaan laskuttaa asiakkaita todellisen sähkönkulutuksen mukaan, jolloin tasauslaskuja ei tarvitse tehdä. Suomessa verkkoyhtiöt on velvoitettu lukemaan energiatiedot vähintään kerran

vuorokaudessa [Ano09]. Kulutustiedot voidaan halutessa lukea myös useammin, esimerkiksi tunneittain. Tällöin asiakkaalle voidaan tarjota mahdollisuus seurata omaa sähkön kulutustaan tuntitasolla internet-selaimella.

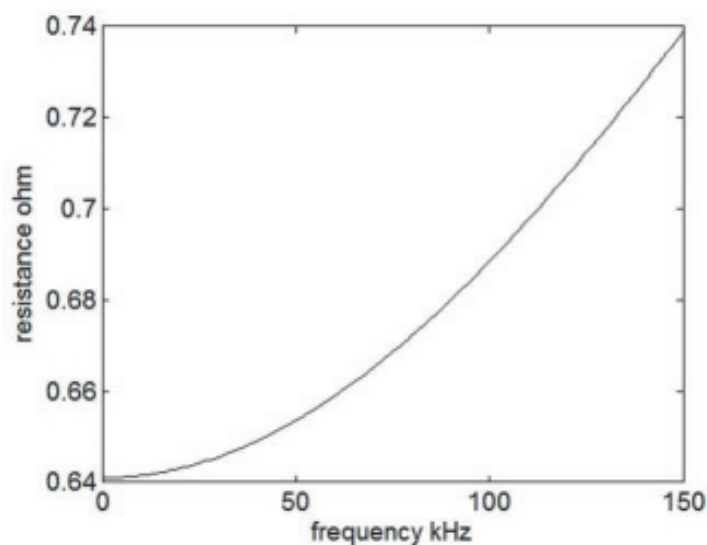
AMR-mittareiden ominaisuudet eivät rajoitu pelkästään energiamittaukseen. Mittareilla voidaan tallentaa sähkön laatutietoja kuten jännitteen tasoja, -vaihtelua ja -epäsymmetriaa, joita voidaan käyttää hyödyksi sähkön laadun tarkkailussa. Mittarit voivat tallentaa myös tietoa virtojen ja jännitteiden äkillisistä muutoksista esimerkiksi ennen sähkökatkoa. Tiedot voidaan lukea vian jälkeen tarkempaa selvitystä varten tai vaihtoehtoisesti itse mittareita voidaan käyttää hyödyksi vikapaikan selvittämiseen katkon aikana. Lisäksi AMR-mittarit mahdollistavat kuormien- ja tariffin ohjauksen, mikä mahdollistaa haluttujen kuormien kytkentätilan sekä sähkön hinnoittelun muuttumisen. Tämä mahdollistaa ennalta määriteltyjen sähkölaitteiden kytkemisen päälle haluttuina ajanjaksoina, ja sähkö voidaan hinnoitella perustuen sen markkinahintaan.

## 8 Sähköverkon suurtaajuusominaisuudet

Signaalien käyttäytyminen verkossa riippuu vahvasti käytetystä taajuudesta. Sähköverkko on suunniteltu käytettäväksi nimellisellä 50 Hz taajuudella, joten se on useiden kilohertsien taajuisen PLC-signaalin kulun kannalta haastava väylä. Kappaleessa esitellään suuritaajuisen signaalin käyttäytymistä sähköverkossa.

### 8.1 *Signaalin etenemiseen vaikuttavat ilmiöt*

Suurilla taajuuksilla PLC-signaalin kohtaamaan impedanssiin verkossa vaikuttavat resistiiviset häviöt, johtojen keskinäisreaktanssi, läheisyysvaikutus sekä virranähto. Resisttiiviset häviöt riippuvat johtimien materiaalista ja ne aiheuttavat signaalin muuttumista lämmöksi. Keskinäisreaktanssi aiheutuu johtojen välillä olevasta induktanssista ja kapasitanssista, joka saattaa aiheuttaa signaalin kulkeutumista muihin vaiheisiin heikentäen signaalin voimakkuutta. Virranähto-ilmiössä virta pakkautuu lähemmäs johdon pintakerrosta taajuuden kasvaessa, ja tämä aiheuttaa resistanssin kasvun. Läheisyysvaikutuksessa lähekkäin olevien johtojen vaihtelevat magneettikentät vaikuttavat toisiinsa vahvistaen virranähtoa ja lisäten edelleen resistanssia. Kuvassa 8.1 on esitetty näiden ilmiöiden aiheuttama resistanssin kasvu taajuuden funktiona. [Rön11]



Kuva 8.1. Virranähtöilmiön ja läheisyysvaikutuksen vaikutus johdon resistanssiin per kilometri [Rön11].

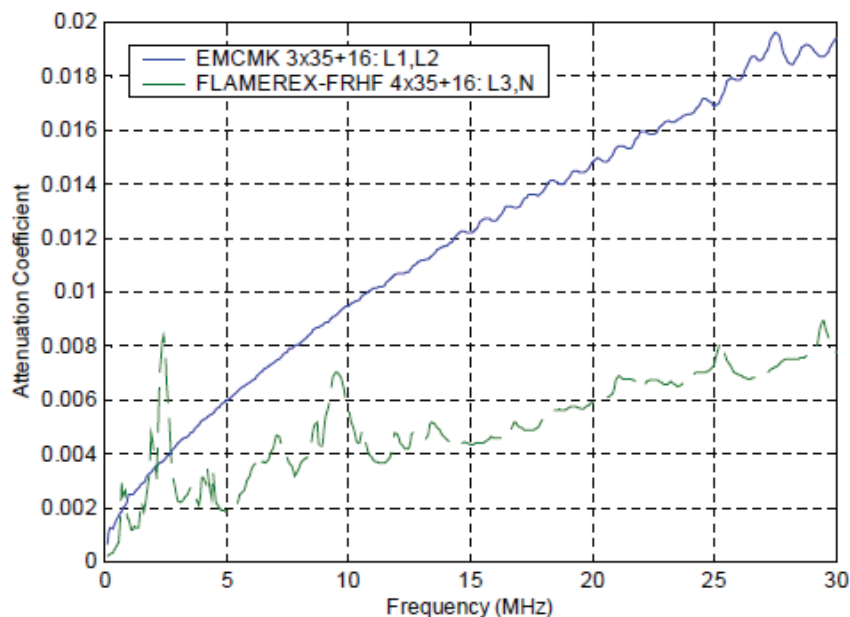
## 8.2 Impedanssisovitus

Verkon johdoille voidaan määritellä niin sanottu ominaisimpedanssi, joka riippuu johdon rakenteesta, käytetystä taajuudesta sekä ominaisresistanssista, -induktanssista, -kapasitanssista ja -konduktanssista. Ominaisimpedanssista käytetään myös nimeä aaltoimpedanssi, sillä sen avulla voidaan kuvata johtojen käyttäytymistä sähkömagneettisten aaltojen kuljettajana.

Signaalin siirtyessä johtotyyppistä toiseen se kohtaa epäjatkuvuuskohdan, jossa osa signaalista heijastuu takaisin. Heijastuneen signaalin suuruus määräytyy ominaisimpedanssien suhteen mukaan. Jos impedanssien välillä on suurta eroa, heijastuu suuri osa signaalista takaisin ja vastaavasti impedanssien ollessa täysin samat ei heijastumista tapahdu.

## 8.3 Johdon eristemateriaalin vaikutus

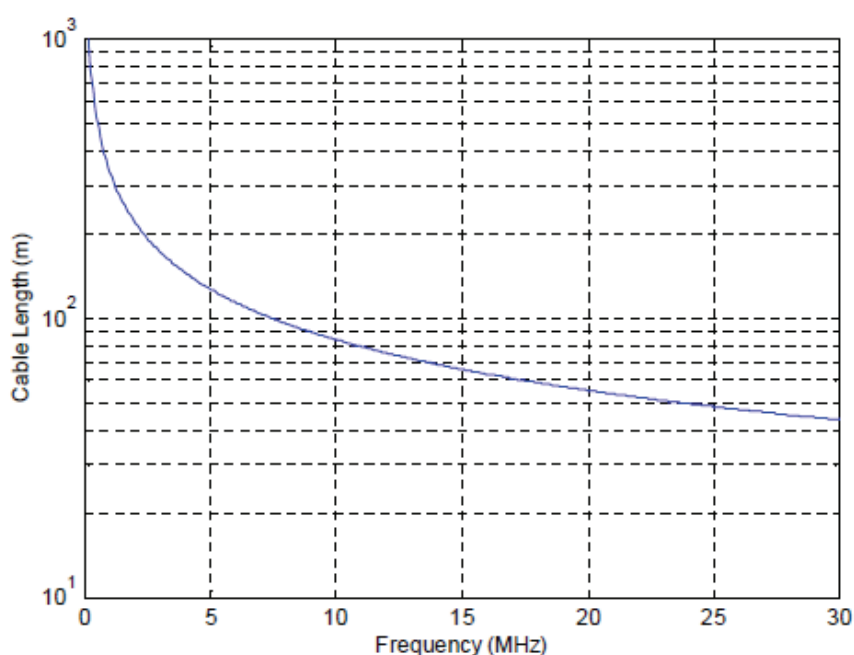
Johtojen eristemateriaalilla on suurilla taajuuksilla merkitystä signaalin vaimenemiseen johtuen dielektrisestä häviöistä [Aho01]. Ongelma tulee esiin lähinnä kaapeleilla, joiden materiaalina käytetään pienjänniteverkossa pääasiassa PVC- tai PEX-muoveja. Energiamittareiden etäluentaan käytettävillä taajuuksilla erot eristemateriaalien välillä ovat kuitenkin hyvin marginaalisia, sillä erot tulevat esiin vasta useampien megahertsien taajuuksilla. 30 MHz taajuudella PVC-eristeisellä kaapelilla vaimeneminen on yli kaksinkertainen verrattuna PEX-eristeiseen, mutta 100 kHz taajuudella vaimeneminen on molemmissa lähes samaa luokkaa (kuva 8.2) [Aho01]. Kaapelien poikkipinta-alalla ei ole merkitystä vaimenemisen kannalta, jos tarkastellaan samalla geometrialla toteutettuja kaapeleita.



Kuva 8.2. Vaimennuskertoimen taajuuden funktiona, vihreä PEX- ja sininen PVC-eristeinen [Aho01].

## 8.4 Johdon pituuden vaikutus

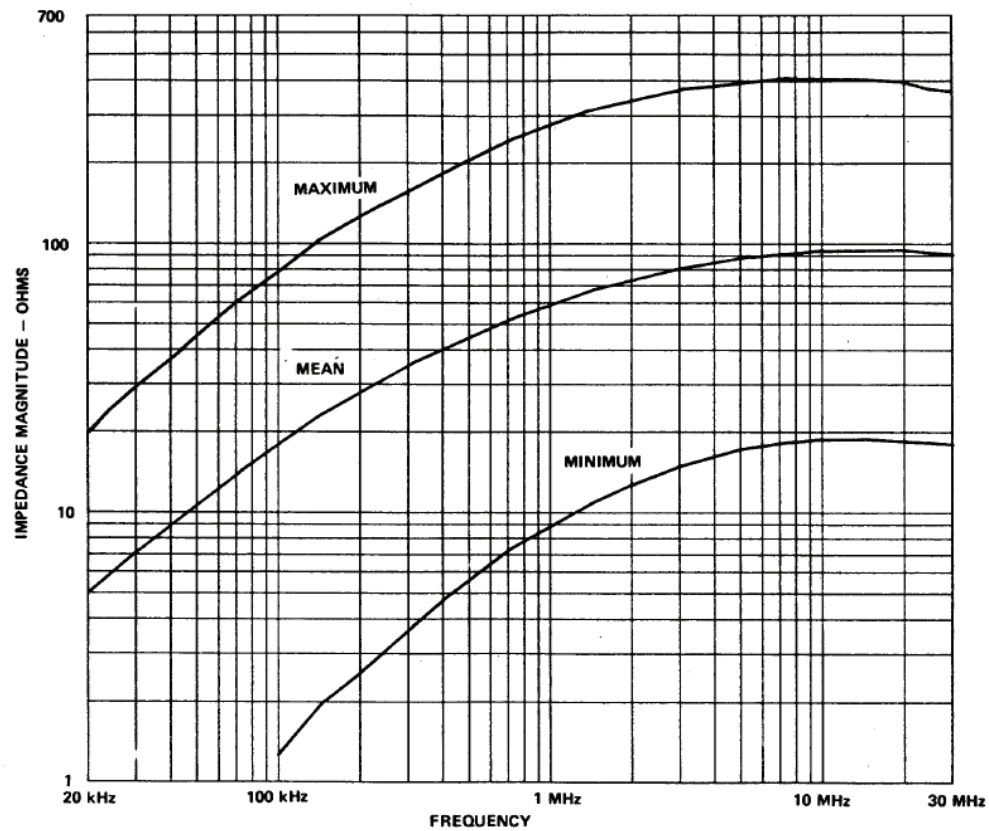
Johtojen pituus tulee harvoin rajoittavaksi tekijäksi tiedonsiirrossa. Yksittäisen johdon pituus tulee rajoitteeksi vasta useiden megahertsien taajuuksilla, sillä 100 kHz taajuudella signaalin jännitteen puolittumiseen tarvitaan yli 1000 metriä (kuva 8.3). Pienjänniteverkossa jännitteen aleneman vuoksi yksittäisten johtojen pituudet ovat korkeintaan 500 m [Lak08]. Tulee kuitenkin huomioida, että myös johtohaarojen määrä pienentää puoliintumismatkaa ja aiheuttaa signaalin vaimentumista. Johtohaarojen lukumäärän lisääntyessä signaali vaimenee, ja samalla käytettävissä oleva kaistanleveys pienenee [Ana08].



Kuva 8.3. Signaalin kulkema matka kaapelissa, jolloin signaalin jännite puolittuu PVC-eristeisessä kaapelissa [Aho01].

## 8.5 Kuormitustilanteen vaikutus

Kuormituksesta riippuva impedanssi on vahvasti aika- ja paikkariippuvainen suure, joka riippuu verkkoon kytkettyjen kuormien määrästä ja tyypistä. Kuormituksesta johtuvaa impedanssia on hyvin vaikea ennustaa tarkasti sen satunnaisuuden vuoksi. PLC-signaalin kannalta on oleellista tarkastella lähetinyksikön näkemää impedanssia, joka koostuu verkon, jakelumuuntajan, syöttökaapelien, asunnon johtojen ja asunnon kuormien impedansseista. Taajuusalueella 20 - 150 kHz signaalin kokeman kokonaisimpedanssin vaihteluväliksi saatiin 1-12  $\Omega$  [Vin85], 1-20  $\Omega$  [Tan88], 4-20  $\Omega$  [Nic73] ja 2-100  $\Omega$  [Mal76]. [Mal76] eroaa muista, sillä siinä on huomioitu kuormituksen vaihtelu. Saatu käyrästä on esitetty kuvassa 8.4.



Kuva 8.4. Euroopan sähköverkon johtojen kokonaisimpedanssi [Mal76].

## 9 Elektronisten kuormien PLC-luennalle aiheuttamat häiriöt

### 9.1 *Elektronisten kuormien aiheuttamat häiriöt*

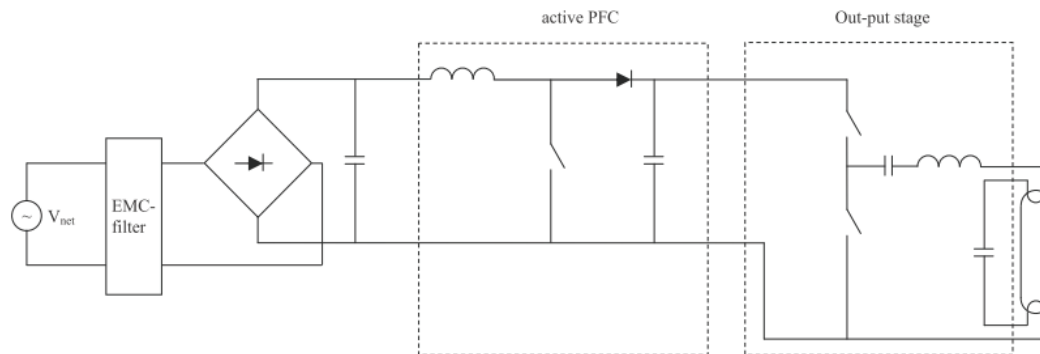
Tehoelektroniikan käytön määrä sähkölaitteissa on lisääntynyt hyvin paljon viime vuosina. Esimerkiksi Yhdysvalloissa on arvioiden mukaan tällä hetkellä 15 - 20 % ja tulevaisuudessa 70 - 85 % kuormien rajapinnoista verkkoon toteutettu tehoelektroniikalla [Ano94]. Lisäksi tulevaisuudessa kaikki jäljellä olevat hehkulamput tullaan korvaamaan energiansäästölampuilla ja LED-valaisimilla. Molemmat lampputyypit vaativat toimiakseen liitäntälaitteen, joka sisältää tehoelektroniikkaa. Yleisesti syitä tehoelektroniikan lisääntyneeseen käyttöön ovat paremmat energia- ja kustannustehokkuus sekä laitteiden koon pieneneminen [Ski99]. Lamppujen lisäksi muita käyttökohteita ovat mm. moottorikäytöt, elektroniikan teholahteet ja UPS.

Huonona puolena tehoelektroniikan komponenteissa on kuitenkin niiden epälineaarinen käyttäytyminen. Komponenttien ottama virta ei ole sinimuotoista, jolloin verkon virran ja jännitteen käyrämuodoissa tapahtuu vääristymää. Tällöin muodostuu yliaaltoja, jotka leviävät verkkoon, ja ovat usein syynä sähkön laatuongelmiin. Yliaallot muodostuvat eri taajuuskomponenteista, jotka saadaan selville Fourier-muunnoksen avulla. Tehoelektroniikan aiheuttamat suuritaajuiset yliaallot osuvat PLC-tiedonsiirron kanssa samalle taajuusalueelle ja saattavat aiheuttaa hyötysignaalin peittymisen tai vääristymisen, jos laitteiden välinen etäisyys on tarpeeksi lyhyt.

#### 9.1.1 Elektronisella liitäntälaitteella varustetut lamput

Pienloistelampuissa käytetään nykyään tehoelektroniikan avulla toteutettuja elektronisia liitäntälaitteita. Tavallisesti liitäntälaitteet koostuvat periaatetasolla EMC-suotimesta, tasasuuntaajasta, välipiirin kondensaattorista, aktiivisesta tehokertoimen korjaajasta (*APFC*) ja vaihtosuuntaajasta (kuva 9.1). Verkkotaajuinen vaihtojännite muunnetaan siis suuritaajuisemmaksi vaihtojännitteeksi, jolla pienloistelamppua käytetään. Lampun verkosta ottama virta on kuitenkin pulssimaista ja vahvasti vääristynyttä. Tämän vuoksi *APFC*:n avulla pyritään korjaamaan verkosta otettavan virran käyrämuotoa ja vähentämään pienitaajuisia yliaaltoja. Euroopassa EN 61000-3-2

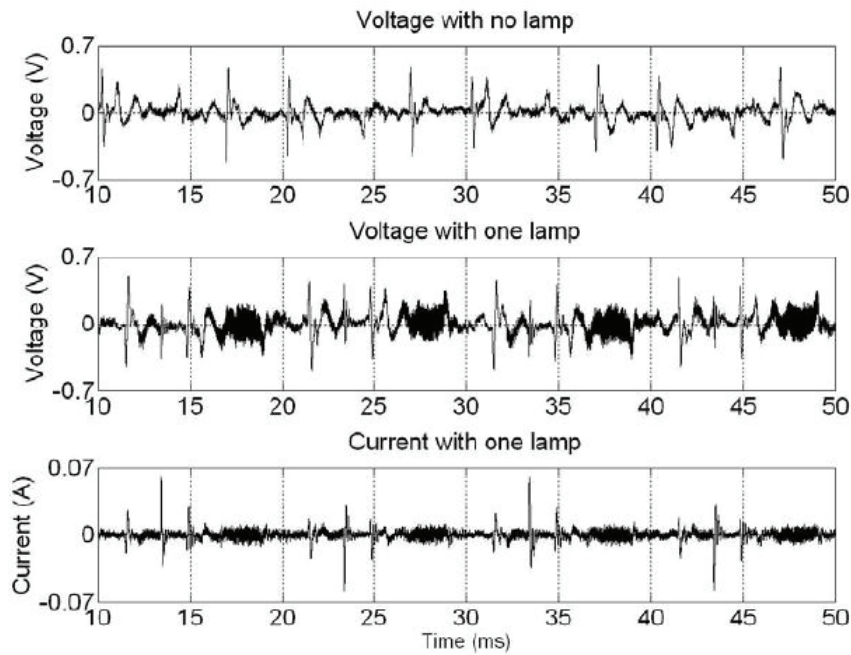
standardi suosittelee kaikille alle 16 A sähkölaitteille pienitaajuuksien yliaaltojen suodatuksen, ja se voidaan toteuttaa passiivisesti kuristimen avulla tai aktiivisesti APFC:n avulla. Alle 25 W lamput APFC:tä ei yleensä kustannussyistä ole, mutta yli 25 W lamput se on pakollinen.



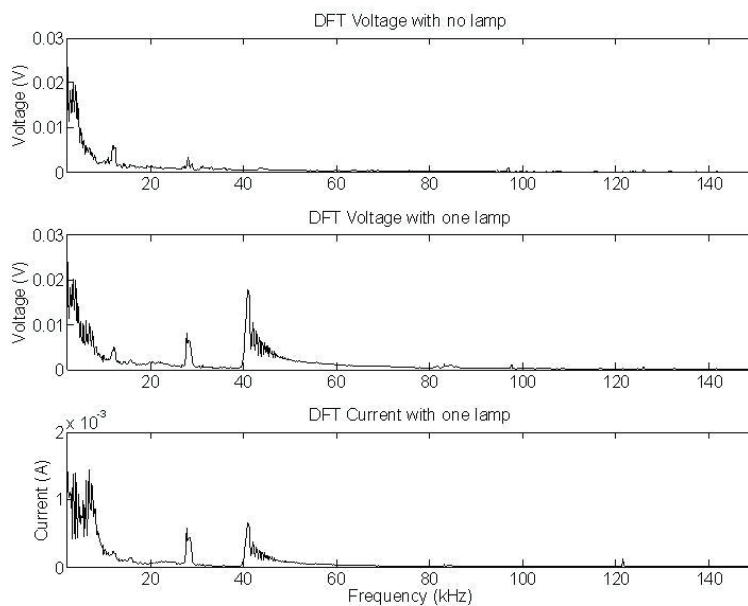
Kuva 9.1. Periaatekuva elektronisesta liitäntälaitteesta [Lar11].

APFC ei kuitenkaan estä korkeataajuuksien yli 2 kHz yliaaltojen leviämistä verkkoon. Lähteessä [Lar06] tutkittiin pienloistelamppujen aiheuttamia suuritaajuisia häiriöitä. Kuvassa 9.2 on esitetty mitatut APFC:llä varustetun lampun liitäntäpisteen jännite sekä laitteen ottama virta suodatettuna yli 2 kHz taajuuksille. Jännitteen ja virran käyrämuodossa voidaan havaita lampun kytkemisen jälkeen selvää oskillaatiota samoilla ajanhetkillä. Kuvassa 9.3 on tehty kyseisille käyrille DFT (*Discrete Fourier Transform*) -muunnos. Havaitaan, että lampun kytkemisen jälkeen taajuuskomponenttien määrä muuttuu. 28 kHz taajuudelle syntyy kapeakaistainen komponentti ja 41 - 100 kHz taajuusalueelle syntyy laajakaistainen komponentti. Toisaalta taustakohinasta aiheutuva 12 kHz komponentti näyttää katoavan lampun kytkemisen myötä. Pienloistelamput synnyttävät siis uusia taajuuskomponentteja, ja toisaalta absorboivat joitain taajuuksia.

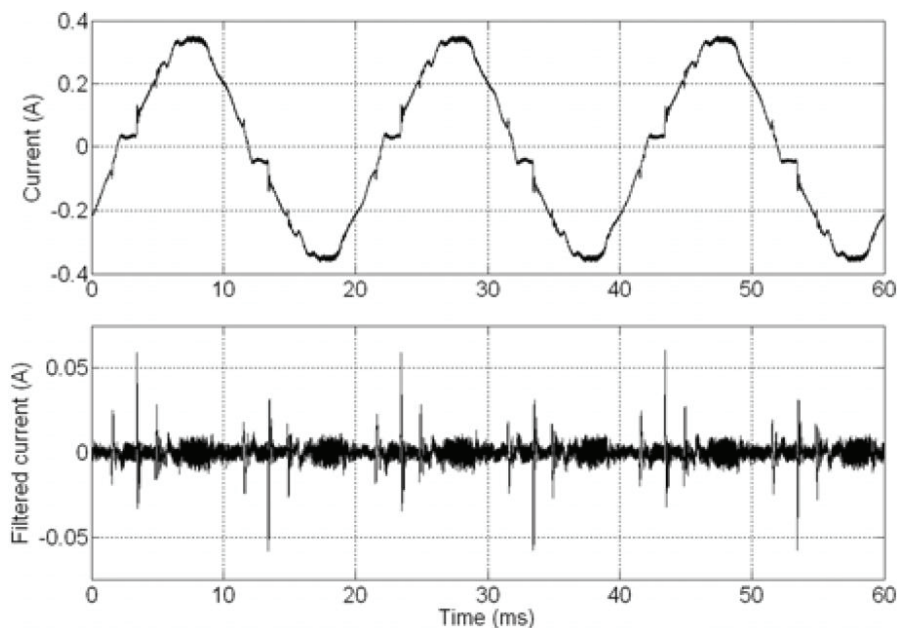
Jos käyrämuotoja tarkastellaan lähemmin, huomataan oskillaation tapahtuvan nollakohdan laskevalla reunalla (kuva 9.4). Oskillaatio tapahtuu, koska APFC ei pysty kontrolloimaan virtaa nollakohdan lähistöllä. Lisäämällä lamppujen määrää, kasvaa oskillaation amplitudi myös samassa suhteessa. [Lar07a]



Kuva 9.2. Ylhäällä jännite ilman lamppua, keskellä jännite lamppu kytkettynä, alhaalla virta lamppu kytkettynä [Lar06].



Kuva 9.3. Ylhäällä jännitteen spektri ilman lamppua, keskellä jännitteen spektri lamppu kytkettynä, alhaalla virran spektri lamppu kytkettynä [Lar06].

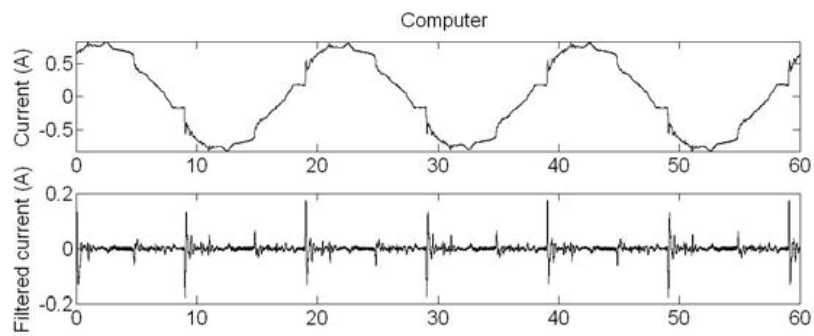


Kuva 9.4. Ylhäällä suodattamaton ja alhaalla suodatettu virran käyrämuoto [Lar07a].

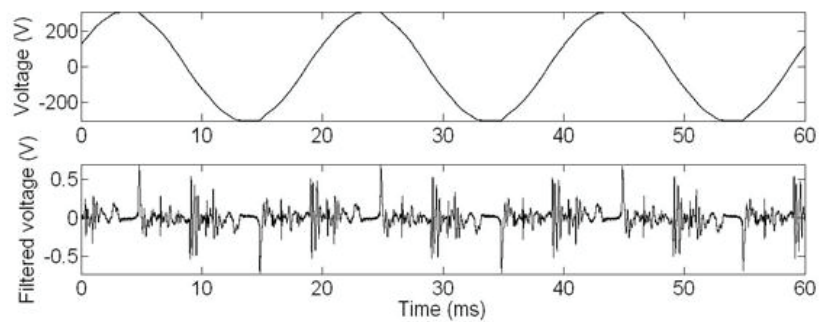
### 9.1.2 Hakkuriteholähteet

Hakkuriteholähteet ovat erittäin hyvän hyötysuhteen omaavia tehonlähteitä, joilla voidaan muuntaa jännitteen taajuutta ja amplitudia. Hakkuriteholähteiden toiminta perustuu virran katkomiseen transistorien avulla, jonka vuoksi niiden verkosta ottama virta ei ole täysin sinimuotoista. Kytkenästä aiheutuvien matalataajuuksisten yliaaltojen suodatus toteutetaan pienloistelamppujen tavoin APFC:n avulla ja yli 150 kHz yliaallot suodatetaan EMC-suotimen avulla. Väliin jäävää taajuuskaistaa 2-150 kHz jää kuitenkin suodattamatta.

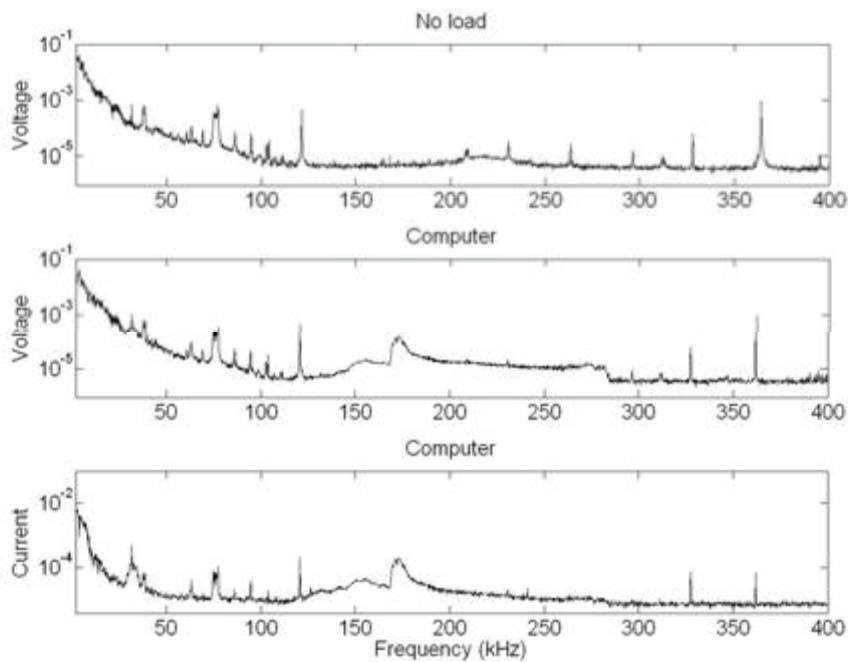
Lähteessä [Lar07b] tutkittiin hakkuriteholähteen aiheuttamia suuritaajuisia häiriöitä. Kuvissa 9.5 ja 9.6 on esitetty tietokoneessa käytetyn hakkuriteholähteen liitäntäpisteestä mitatut jännitteen ja virran käyrämuodot. Ylempi käyrä on suodattamaton ja alempi on suodatettu 2 kHz rajataajuudella. Liitäntälaitteiden tapaan sekä virran että jännitteen käyrissä havaitaan nollakohdan lähistöllä oskillaatiota. Kuvassa 9.7 on tehty suodatetuille käyrille DFT-muunnos, jossa havaitaan laajakaistainen häiriökomponentti taajuusvälillä 125 - 280 kHz. Hakkuriteholähteet lisäävät siis kohinasoa tasaisesti laajalla taajuusalueella, mutta eivät juuri aiheuta häiriöitä kapealla kaistalla.



Kuva 9.5. Tietokoneen hakkuriteholähteen virta, ylhäällä suodattamaton ja alhaalla suodatettu [Lar07b].



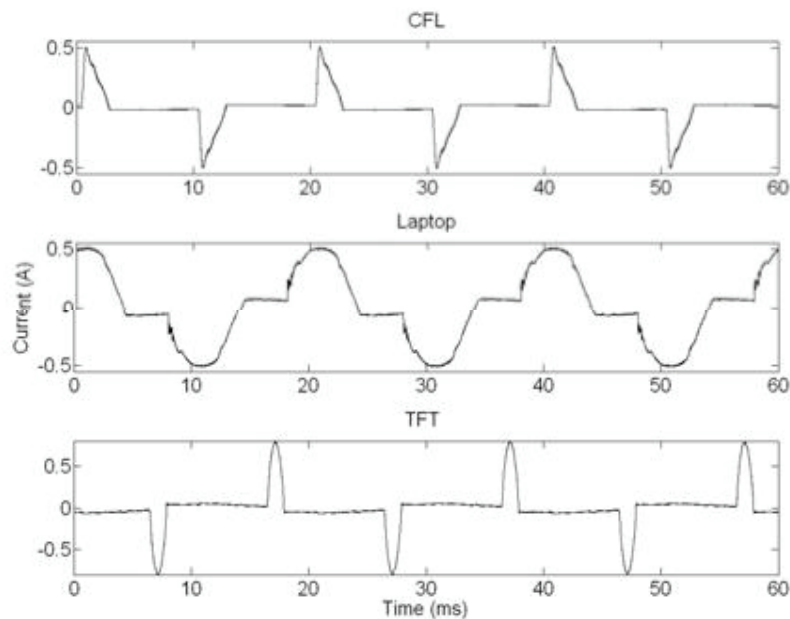
Kuva 9.6. Tietokoneen hakkuriteholähteen jännite, ylhäällä suodattamaton ja alhaalla suodatettu [Lar07b].



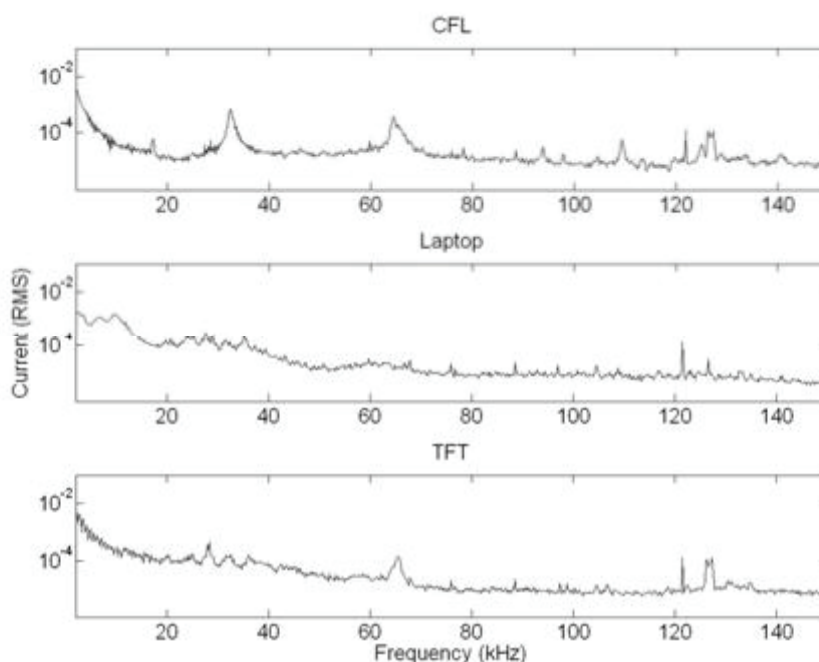
Kuva 9.7. Taajuusspektri jännitteelle ja virralle ennen tietokoneen kytkemistä ja kytkemisen jälkeen [Lar07b].

### 9.1.3 Laitteet ilman aktiivista tehokertoimen korjausta

Kaikissa sähkölaitteista APFC ei ole käytössä ja tällöin yliaaltojen määrä ja amplitudi kasvavat selvästi. Kuvissa 9.8 ja 9.9 on esitetty pienloistelampun, kannettavan tietokoneen ja litteän näytön liityntäpisteestä ottama virta sekä niiden DFT-muunnos. Käyrämuotojen voidaan todeta olevan hyvin vääristyneitä, ja DFT-muunnoksen perusteella ne sisältävät paljon suuri amplitudisia taajuuskomponentteja laajalla kaistanleveydellä.



Kuva 9.8. Pienloistelampun (CFL), kannettavan tietokoneen (Laptop) ja litteän näytön (TFT) ottama virta [Lar07b].

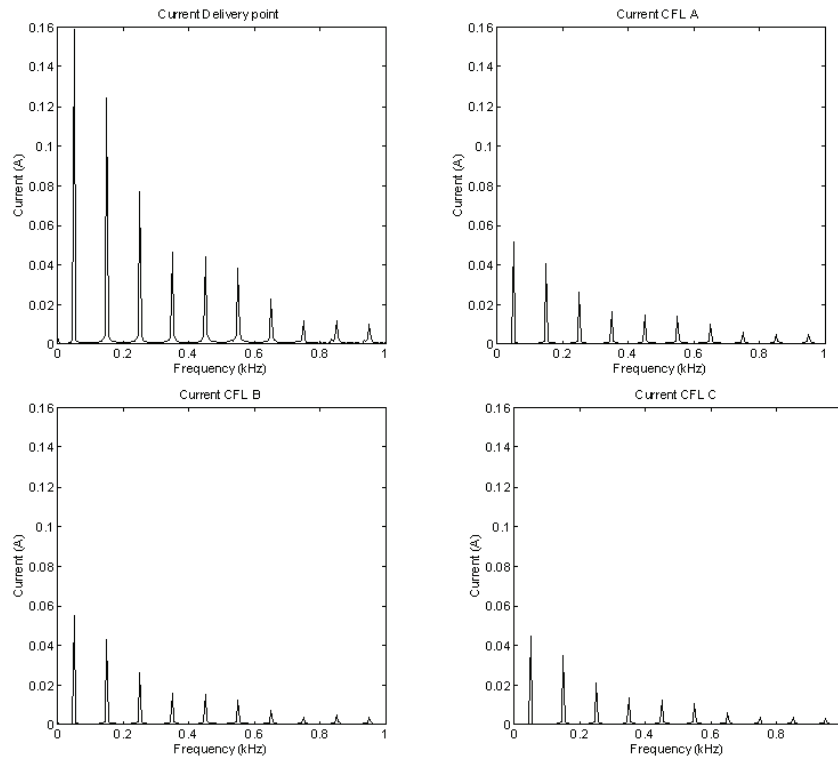


Kuva 9.9. Pienloistelampun (CFL), kannettavan tietokoneen (Laptop) ja litteän näytön (TFT) ottaman virran DFT-muunnos [Lar07b].

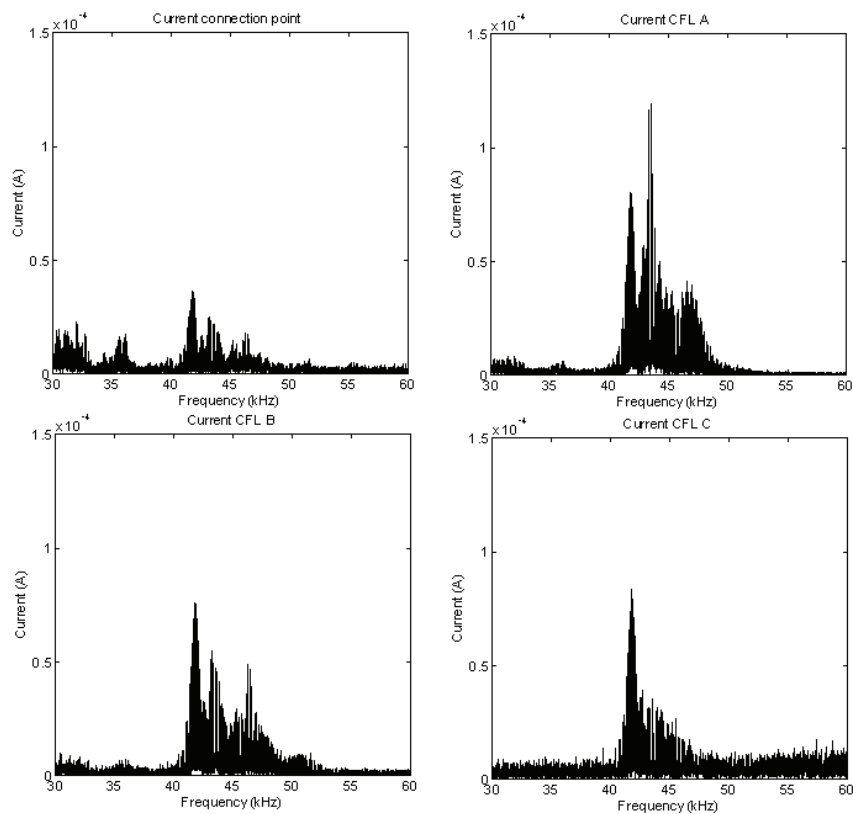
#### 9.1.4 Yliaaltojen kulkusuunta

Yliaaltojen käyttäytyminen riippuu muiden signaalien tavoin niiden taajuudesta. Paljon huomiota tutkimuksissa saaneiden pienitaajuuksien alle 2 kHz yliaaltojen tiedetään virtaavan verkkoon päin ja aiheuttavan virran tai jännitteen käyrämuodon vääristymistä muuntajalla riippuen kytkentätavasta. Kuvassa 9.10 on havainnollistettu pienitaajuuksien yliaaltojen käyttäytymistä. Taajuusspektri on esitetty alle 1 kHz taajuuksilla kolmen eri pienloistelampun ottama virta sekä niiden yhteisen jakelupisteen virta. Jakelupisteen virtojen komponenttien huomataan olevan selvästi summa eri lamppujen virtojen komponenteista eli verkosta otettavan virran käyrämuoto muuttuu.

Suuritaajuiset yliaallot käyttäytyvät kuitenkin eri tavalla. Kuvassa 9.11 on esitetty kuvaa 9.10 vastaavat kuvaajat suodatettuna yli 30 kHz taajuuksilla. Tällöin havaitaan, että jakelupisteen taajuuskomponentit ovatkin amplitudiltaan yksittäisten lamppujen taajuuskomponentteja pienempiä. Suuritaajuiset yliaallot eivät siis virtaa verkkoon päin vaan eri lamppujen välillä ja niillä ei juuri ole vaikutusta verkosta otettavan virran käyrämuotoon.



Kuva 9.10. Jakelupisteen (Delivery point) sekä energiasäästölamppujen A, B ja C (CFL A, B, C) ottaman virran spektri alle 1 kHz taajuusalueella [Lar07b].

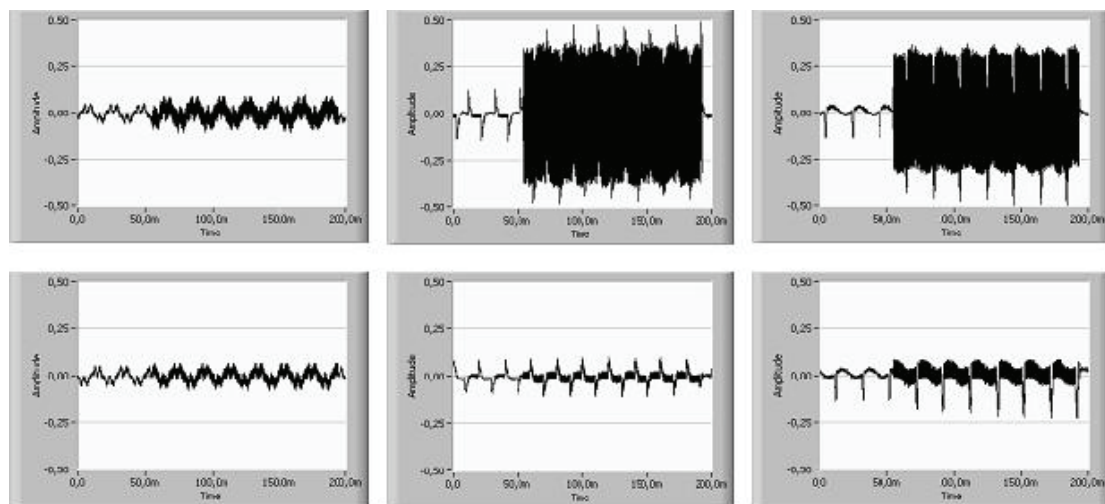


Kuva 9.11. Jakelupisteen sekä energiasäästölamppujen A, B ja C virran spektri taajuvälillä 30-60 kHz [Lar07b].

## 9.2 Signaalin vaimeneminen

Sähköverkon sisältämät kuormat ja osat voivat olla luonteeltaan resistiivisiä, induktiivisia tai kapasitiivisia. Toisiaan lähellä olevien induktiivisten ja kapasitiivisten osien välillä syntyy tietyllä taajuudella resonanssiipiiri, joka aiheuttaa reaktiivisten komponenttien kumoutumisen. Tällöin kyseisen taajuuden omaavaa signaalia rajoittavat ainoastaan resistiiviset häviöt ja virta kasvaa. Virran kasvua rajoittaa PLC-lähettimien rajoitettu lähetysteho, jolloin signaalin teho ei välttämättä riitä keskittimelle asti. Erilaisten resonanssiipiirien muodostuminen on luonnollisesti riippuvainen verkkoon kytkettyjen laitteiden määrästä ja tyypistä.

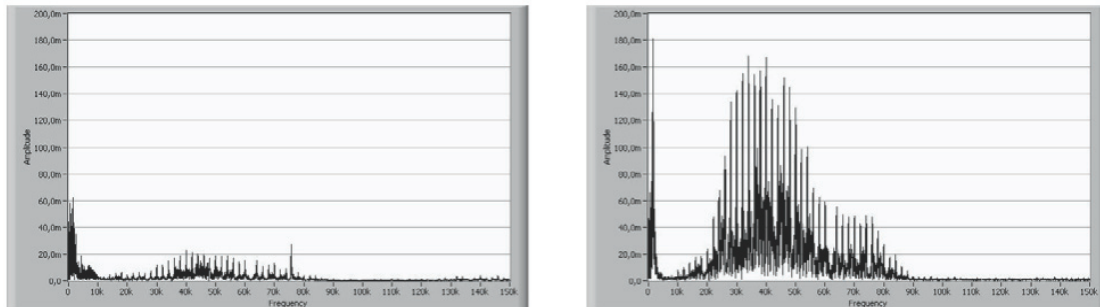
Resonanssiipiirit voivat muodostua ongelmaksi PLC-signaalille. Verkon impedanssi on tyypillisesti lievästi induktiivinen ja vastaavasti kapasitiivisia kuormia ovat mm. pienloistelamput ja LCD-televisiot. Näiden kahden välillä muodostuva resonanssiipiiri vaimentaa PLC-signaalia, koska signaalin näkemä impedanssi laitteeseen nähden on verkossa olevan keskittimen impedanssia pienempi. Kuvassa 9.12 on esitetty mitattuja PLC-signaalin käyrämuotoja pienloistelampun läheisyydessä. Alkuperäinen signaali on keskittimellä pienentynyt murto-osaan alkuperäisestä ja luentaongelmien esiintyminen on todennäköistä.



Kuva 9.12. Vasemmalta oikealle: keskittimelle saapuva signaali, energiansäästölampulle tuleva, mittarilta lähtevä [Rön07a].

Toinen mahdollisuus on resonanssiipiirin muodostuminen sähkölaitteiden EMC-suotimen kondensaattorin ja verkon välille. Lähteessä [Rön07b] tutkittiin resonanssiipiirin muodostumista koulurakennuksessa kytkemällä eri sähkölaitteita verkkoon. Kuvassa 9.13 on esitetty PLC-signaalin voimakkuus koulun palvelin kytkettynä ja ilman kytkentää. Signaalin havaitaan vaimenevan selvästi kytkettäessä palvelin verkkoon. Tällöin signaalista siis suuri osa kulkee pieni-impedanssista

reittiä sähkölaitteisiin, jolloin keskittimelle saapuva signaali vaimenee huomattavasti. EMC-suotimet ovat ongelmallisia, sillä kaikissa laitteissa ne eivät kytkedy irti verkosta, vaikka itse laite kytketään [Rön07b]. Tällöin resonanssiipiirien määrä ei siis riipu kytkentätilanteesta.



Kuva 9.13. PLC-signaalin voimakkuus; vasemmalla palvelin kytkettynä, oikealla kytkemättä [Rön07b].

Signaalin vaimeneminen resonanssiipiirien vaikutuksesta on tehoelektroniikkakuormien aiheuttamia häiriötä selvästi vakavampi ongelma. Signaalin vaimeneminen alentaa lisäksi sen häiriökestoisuutta, ja tällöin signaali on alttiimpi elektronisista kuormista aiheutuville yliaalloille [Ulr06]. Yliaallot nostavat kohinatasoa ja saattavat peittää signaalin aiheuttaen luentaongelmia. Molemmat häiriömuodot ovat siis yhteydessä toisiinsa. PLC:n kommunikointitaajuuksien on yleensä valittu etukäteen, jolloin niiden muuttaminen ei yleensä tule kysymykseen. Toisaalta niiden havaitseminen tai mittaaminen paikan päällä on haastavaa ja aikaa vievää, joten ongelma saattaa jäädä myös havaitsematta.

### 9.3 Ongelmien välttäminen

Elektronisten kuormien aiheuttamiin ongelmiin on muutamia korjausehdotuksia, joita esitettiin lähteessä [Ulr06]. Laitteiden aiheuttamien häiriöiden välttämiseksi yksinkertaisin tapa olisi kytkeä laitteet pois päältä kommunikoinnin ajaksi. Luenta voitaisiin toteuttaa esimerkiksi yöaikaan tiettyinä kellonaikana. Luonnollisesti tämä on monissa tapauksissa kohtuutonta asiakkaiden kannalta ja harva suostuisi järjestelyyn.

Toinen mahdollisuus on asentaa suodatin mittarin jälkeen estämään asiakkaalta tulevat häiriösignaalit. Suotimet ovat toimiva ratkaisu, mutta ongelmaksi muodostuu niiden toteutus sekä hinta. Kaikkiin kotitalouksiin asennettavan suotimen tulisi olla kaistanestosuodin välille 9-95 kHz, mikä ei ole taloudellisesti kannattavaa. Yksittäisissä tapauksissa ongelma voidaan korvata alipäästösuotimella 9 kHz rajataajuuksella, jos asiakkaalle ei ole tarvetta esimerkiksi laajakaistayhteyden käyttämiseen PLC:n kautta.

Signaalin vaimentumiseen ja laitteen ja verkon välille syntyvän resonanssiin korjaamiseen ei ole yksiselitteistä ratkaisua. Ongelman vaikeutta lisää se, että mahdollisia ongelmien aiheuttajaa on hyvin vaikea yksilöidä.

Vartenotettavin ratkaisu on mittareiden vaihtaminen toiseen tiedonsiirtotekniikkaan. Syynä on ongelmien suhteellinen harvuus, Ruotsissa keskimäärin 99/100 PLC-mittareista oli toimivia [Ulr06]. Tällöin pitkällä aikavälillä verkkoyhtiöille on taloudellisesti kannattavampaa vaihtaa yksittäiset PLC-mittarit toimimaan esimerkiksi GSM-verkossa, jolloin ongelmat poistuvat. PLC-taajuusalueen häiriötasoa koskevien standardien muuttaminen saattaisi tuoda helpotusta ongelmaan, mutta sen vaikutuksen näkyminen vie aikaa 5-10 vuotta.

## 10 PLC-luennan muille laitteille aiheuttamat häiriöt

### 10.1 Kondensaattoreiden ennenaikainen vanheneminen

Kappaleessa 9.2 mainittu resonanssipiirin muodostuminen EMC-suotimen kondensaattorin ja verkon välillä voi vaurioittaa suodinta. Resonanssipiirin vuoksi ainoat kondensaattorin läpi kulkevaa virtaa rajoittavat tekijä ovat resistiiviset häviöt, ja tällöin virta voi kasvaa moninkertaiseksi alkuperäisestä. Virran kasvu ilmenee kondensaattorin kuumentumisena ja mahdollisena vikaantumisena. [Rön11] mitattiin pahimmillaan LCD-television EMC-suotimen kondensaattorin läpi kulkevan virran huippuarvoksi 12,5 kHz taajuudella 2 A. Monissa laitteissa EMC-suodinta ei irroteta verkosta, vaikka laite sammutetaan. Tällöin PLC-signaalin ollessa päällä kondensaattori joutuu jatkuvalle rasitukselle. PLC-signaalin aiheuttama ylimääräinen suuritaajuinen ripplivirta saattaa rasittaa myös elektrolyyttikondensattoreita, joita käytetään yleisesti mm. teholähteissä tasasuuntauksen jälkeisinä suodinkondensattoreina.

### 10.2 Sähkölaitteiden toimintahäiriöt

PLC-signaali saattaa aiheuttaa myös suoraan toimintahäiriöitä asiakkaiden laitteissa. Lähteessä [Cen09] tutkittiin useassa Euroopan maassa ilmenneitä mahdollisia PLC-tekniikalla toimivien AMR-mittareiden aiheuttamia häiriöitä. Häiriöt esiintyivät hipaisuhimmentimellä varustetuissa lampuissa (TDL, touch dimmer lamp), joissa valotehoa voidaan säätää asteittain. Lamput kytkeytyvät päälle ja pois sekä valoteho muuttui asteittain PLC-signaalin ohjaamana. Häiriöiden havaittiin ilmenevän epäjatkuvilla, pulssimaisilla jännitteillä niiden nousevalla reunalla ja olevan riippumaton käytetyn mittarin modulaatiosta, kaistanleveydestä tai signaalin tasosta. Myös lähteen [Rön11] mittauksissa havaittiin samanlaisia häiriöitä TDL-lamppujen kanssa.

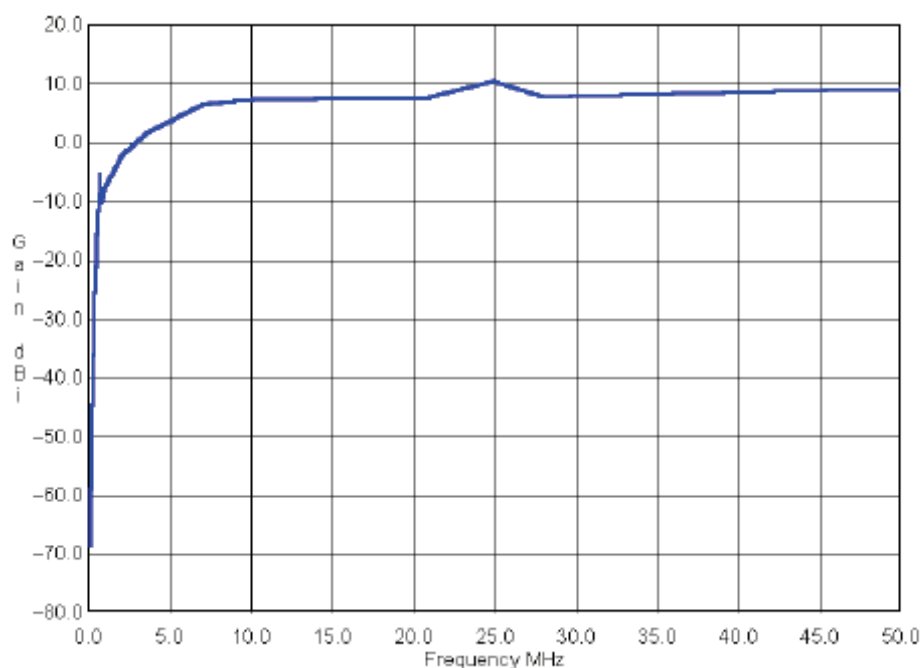
Tutkitut TDL-lamput ja AMR-mittarit olivat molemmat CE-hyväksytyjä, joten ne täyttävät tämänhetkiset standardit. Häiriöitä kuitenkin havaittiin esiintyvän laboratoriokokeissa, joten aiheeseen liittyvien standardien vaatimukset tarkastettiin. Tarkastuksessa havaittiin, että häiriönsietovaatimuksia epäjatkuville jännitteille taajuusalueella 15 - 150 kHz ei ole riittävissä määrin määritelty. Erityisesti standardien EN 50065-1, EN 61000-4-16 ja EN 61547 suunnittelussa

asia tulisi ottaa jatkossa huomioon. Suodattimien käytön aloittamista ei suositeltu, sillä niiden suunnittelu olisi vaikeaa sähkölaiteiden yksilöllisten ominaisuuksien vuoksi. [Cen09]

Häiriöt taajuusalueella 15 - 150 kHz eivät rajoitu ainoastaan PLC- ja TDL-laitteiden välille ja on mahdollista, että havaittu tapaus on ainoastaan jäävuoren huippu. Ongelmia on havaittu myös mm. keittiölaitteiden kelloissa, kahvinkeitimissä, pesukoneissa ja pisuaarin vedensäädössä. Lisäksi häiriölähteenä saattavat olla PLC-mittareiden ohella myös muut sähkölaitteet, jotka tuottavat kyseiselle taajuusalueelle häiriöjännitteitä. Kyseessä saattaa siis olla laajempikin EMC-ongelma, joka on tullut esille muuttuneen verkon käytön myötä.

### 10.3 Säteilyhäiriöt

AMR-luentaan käytettävät taajuudet ovat niin matalia, että niistä ei aiheudu merkittäviä säteilyhaittoja. Kuvassa 10.1 on esitetty säteilijänä toimivan sähköjohdon aiheuttama signaalin vahvistuminen. Häiriöt muuttuvat merkittäviksi vasta 1 MHz jälkeen, jolloin niistä saattaa olla merkittävää haittaa esimerkiksi radioliikenteelle [Har03], [Ben07].



Kuva 10.1. Signaalin vahvistus taajuuden funktiona sähköjohdoissa [Har03].

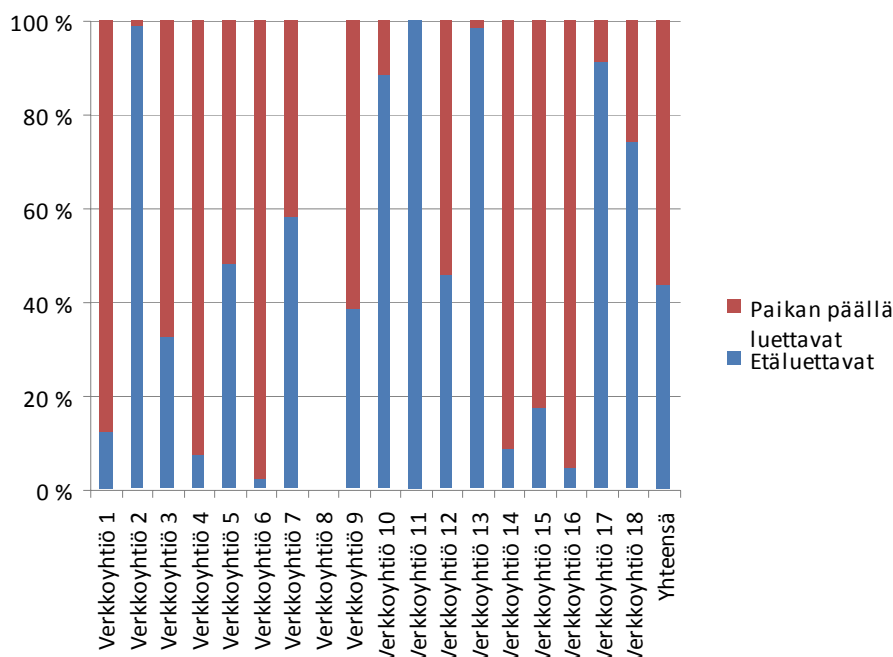
## 11 Kyselytutkimus etäluettavista energiamittareista

Projektin puitteissa tehtiin verkkoyhtiöihin etäluettavia energiamittareita koskeva kysely. Kysely toteutettiin sähköpostitse ja tavoitteena oli kartoittaa käytössä olevia ja käyttöön tulossa olevia etäluettavia energiamittareita, niiden luentatekniikoita, mittareilta kerättäviä tietoja ja uusiin mittareihin mahdollisesti liittyneitä ongelmia. Erityisesti pyrittiin kartoittamaan PLC-tekniikassa esiintyneitä ongelmia ja niiden laajuutta ja PLC-tekniikkaan liittyviä tutkimustarpeita. Ajankohta kyselylle ei ollut verkkoyhtiöiden kannalta kaikkein otollisin, koska monissa verkkoyhtiöissä etäluettavien mittareiden asennus ja käyttöönotto on parhaillaan meneillään ja henkilöstö on sen vuoksi varsin työllistettyä ja ajan löytäminen kyselyyn vastaamiseksi oli vaikeaa. Kyselyyn saatiin kuitenkin vastauksia varsin kiitettävästi yhteensä 18 verkkoyhtiöstä, joiden yhteenlaskettu energiamittareiden määrä on 1 935 275 eli kysely kattaa suunnilleen kaksi kolmannesta Suomen energiamittareista. Kaikki yhtiöt eivät vastanneet kaikkiin kysymyksiin, mistä johtuen eri kuvissa ja taulukoissa verkkoyhtiöiden määrä ja järjestys vaihtelevat.

Kuvassa 11.1 on esitetty etäluettavien energiamittareiden asennusten tilanne kyselyyn vastanneissa verkkoyhtiöissä. Koko otoksessa etäluettavien energiamittareiden määrä on 847 071 kpl joka edustaa noin 44 % kaikista otokseen osallistuneiden yhtiöiden energiamittareista. Viidellä otoksen yhtiöistä yli 80 % mittareista on jo etäluettavia. Kuudella asennukset ovat alkuvaiheessa (etäluettavia mittareita alle 20 %) ja lopuilla kuudella jotain tältä väliltä. Yksi yhtiöistä ei ilmoittanut etäluettavien mittareiden tämänhetkistä määrää. Vuoden 2013 loppuun mennessä kyselyyn vastanneissa yhtiöissä etäluettavia mittareita tulisi kyselyn perusteella olemaan 99,8 % eli VNA66/2009 [Ano09] sallimia poikkeuksia etäluennasta tulisi koko mittarikannan osalta olemaan todennäköisesti melko vähän.

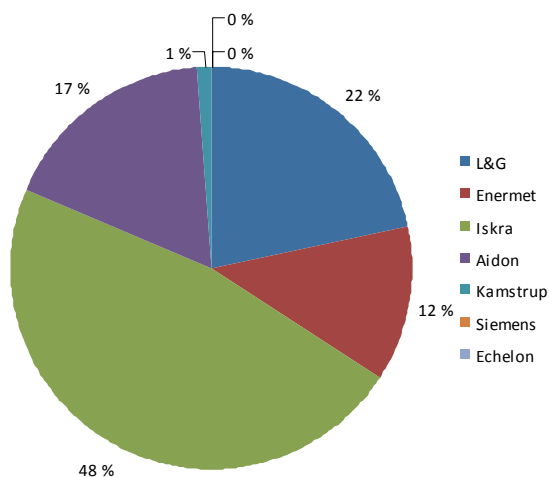
Kuvassa 11.2 on esitetty eri valmistajien osuus kaikista asennetuista etäluettavista mittareista alkuvuodesta 2011 ja vuoden 2013 lopussa. Tällä hetkellä Iskramecon osuus on otoksen yhtiöiden osalta lähes puolet, mutta vuoden 2013 loppuun mennessä kahden suuren valmistajan eli Landis&Gyrin (mukaanlukien Enermetin joka kuuluu nykyisin Landis&Gyriin) ja Echelonin mittareita olisi molempia otoksen yhtiöissä noin kolmannes, noin viidennes olisi Iskramecon mittareita ja loput noin 14 % olisi muiden valmistajien mittareita.

### Etäluettavien energiamittareiden asennusten tilanne 2011

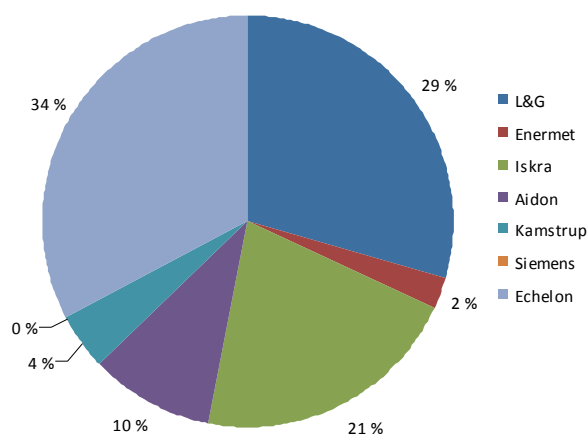


Kuva 11.1. Etäluettavien energiamittareiden asennusten tilanne alkuvuodesta 2011.

### Kaikkien mittareiden valmistajat 2011



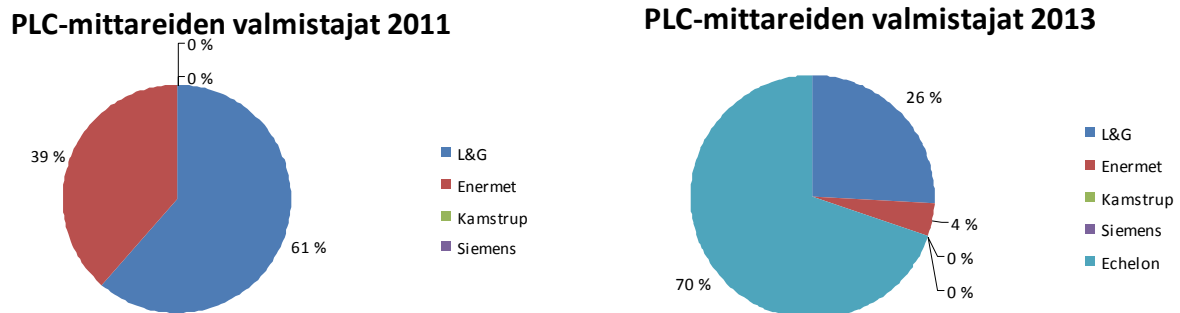
### Kaikkien mittareiden valmistajat 2013



Kuva 11.2. Eri valmistajien osuus kyselyyn vastanneiden verkkoyhtiöiden energiamittareista alkuvuodesta 2011 ja vuoden 2013 loppuun mennessä.

Kuvassa 11.3 on esitetty PLC-luentaisten mittareiden valmistajien osuudet tällä hetkellä ja vuoden 2013 lopussa kyselyyn vastanneiden yhtiöiden osalta. Landis&Gyrin osuus on tutkimuksen otoksessa jo nyt noin 60 % ja näyttäisi nousevan noin 70 %:iin vuoden 2013 loppuun mennessä. On

huomattava, että otoksesta puuttuvat mm. Iskraemecon PLC-luentaisten mittarit, koska niitä omistavat yhtiöt eivät joko osallistuneet kyselyyn tai eivät eritelleet eri luentatekniikoita käyttävien mittareiden määriä.

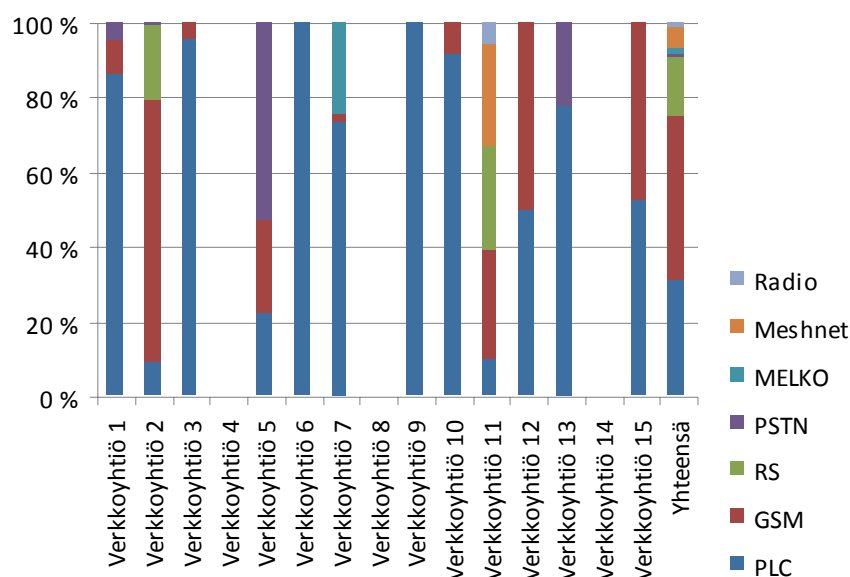


Kuva 11.3. Eri valmistajien osuus kyselyyn vastanneiden verkkoyhtiöiden PLC-luentaisten energiamittareista alkuvuodesta 2011 ja vuoden 2013 loppuun mennessä.

Kuvissa 11.4 ja 11.5 on esitetty etäluettavissa mittareissa käytettävien luentatekniikoiden osuudet verkkoyhtiöittäin ja koko otoksen osalta ("yhteensä"-pylväs) alkuvuodesta 2011 ja vuoden 2013 loppuun mennessä. Osa yhtiöistä ei eritellyt eri luentatekniikoita käyttävien mittareiden määriä ja sen vuoksi niiden kohdalta tiedot puuttuvat. PLC-tekniikkaan perustuvia mittareita on käytössä tällä hetkellä verkkoyhtiöitä 4 ja 16 lukuun ottamatta kaikissa verkkoyhtiöissä. Kahdeksassa verkkoyhtiössä kahdeksastatoista PLC on pääasiallinen luentatekniikka (yhtiöt 1, 3, 7, 9, 10, 11 ja 17). Keskijänniteverkossa PLC oli käytössä ainoastaan yhdessä kyselyyn vastanneista verkkoyhtiöistä (800 mittaria). Kyselyyn osallistuneissa yhtiöissä PLC-luentaisten mittareiden määrä tulee vuoden 2013 loppuun mennessä noin 3,6-kertaistumaan nykyisestä 240 514 mittarista 855 906 mittariin. Vuoden 2013 loppuun mennessä PLC-luentaisten mittareiden osuus otoksen kaikista etäluentaisista mittareista tulisi siis olemaan noin 50 %. Tämä yhdessä elektronisten kuormien ja uusien lampputeknologioiden yleistymisen kanssa saattaa lisätä myös luentaan liittyviä häiriöongelmia. Tyytyväisyys PLC-valintaan tuntui jakavan mielipiteitä puolesta ja vastaan, pääosin valintaan oltiin tyytyväisiä.

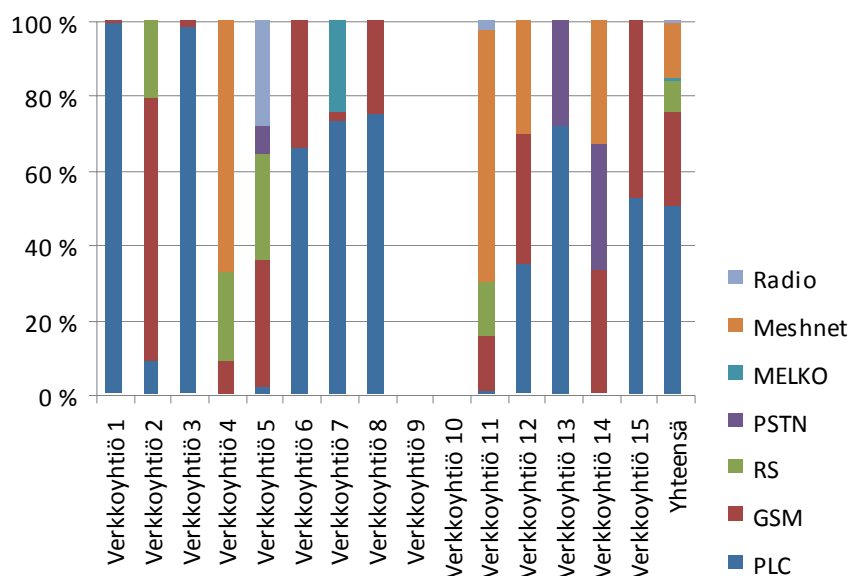
Kyselyssä kysyttiin myös PLC-tekniikkaan perustuvien järjestelmien osalta keskitintä kohden asennettujen mittareiden ja toistinten lukumäärää. Tulokset on esitetty graafisesti kuvissa 11.6...11.7. Kysymykseen vastanneissa yhtiöissä yhtä keskitintä kohden keskimäärin asennettujen mittareiden lukumäärien keskiarvo oli 113,49 ja toistimien lukumäärien keskiarvo 0,77 toistinta. Yhtä keskitintä kohden enimmillään asennettujen mittareiden lukumäärien keskiarvo oli vastaavasti 467 kpl ja toistinten 4,25 kpl.

## Eri kommunikointitekniikoiden osuudet 2011

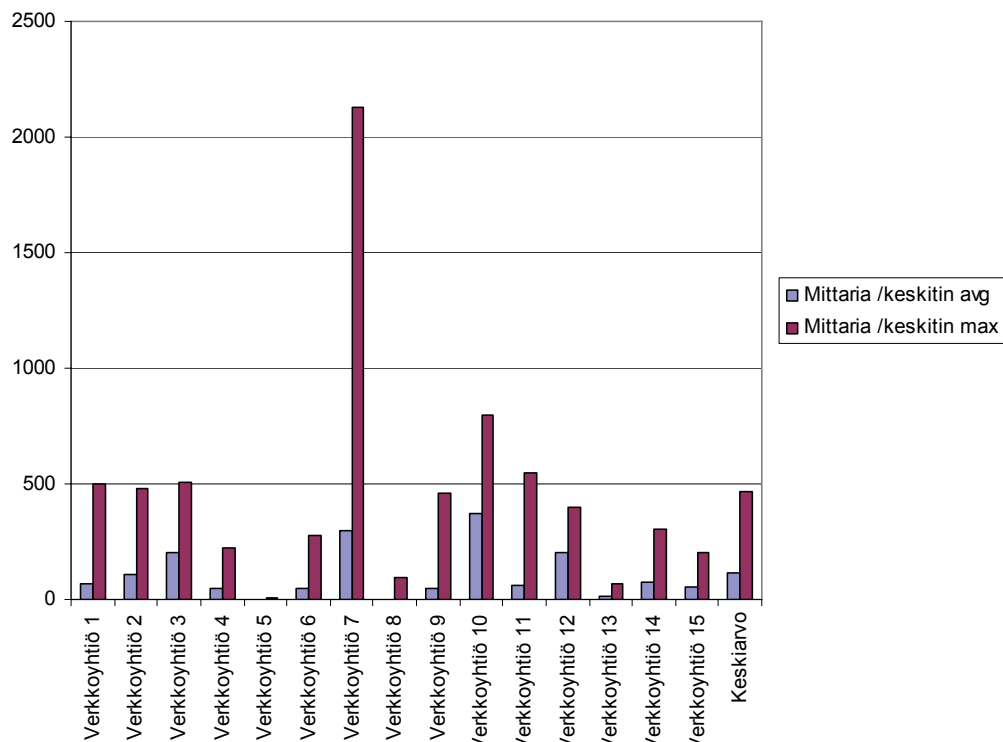


Kuva 11.4. Eri kommunikointitekniikoiden osuudet alkuvuodesta 2011.

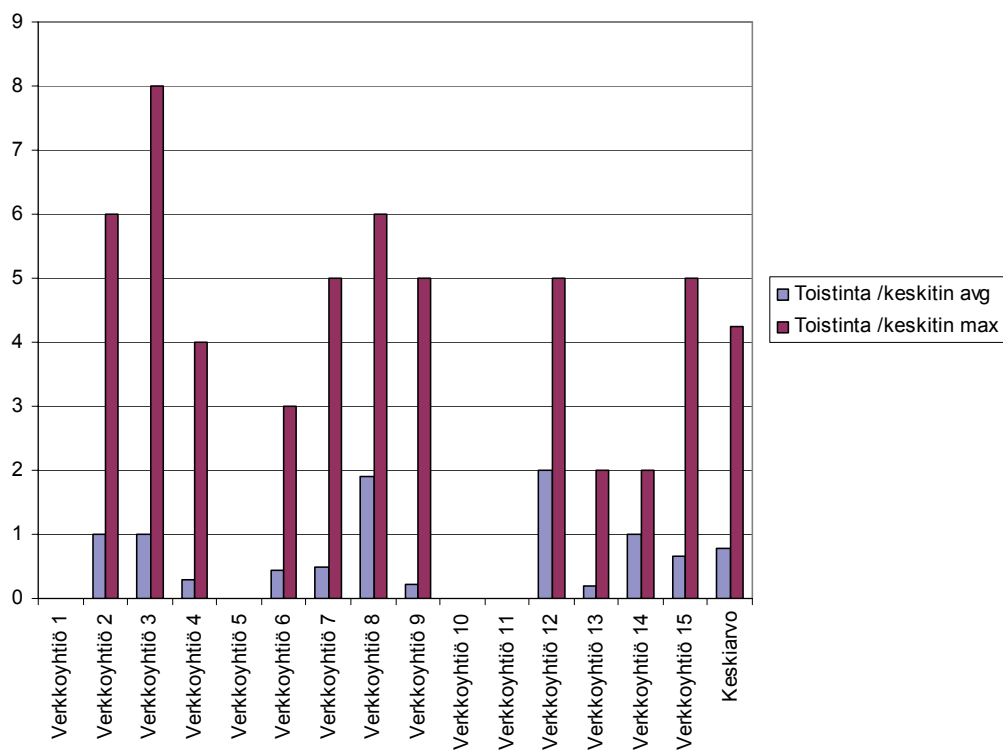
## Eri kommunikointitekniikoiden osuudet 2013



Kuva 11.5. Eri kommunikointitekniikoiden osuudet 2013 lopussa.



Kuva 11.6. Energiamittareiden määrä keskitintä kohden keskimäärin ja enimmillään kyselyyn vastanneissa verkkoyhtiöissä.

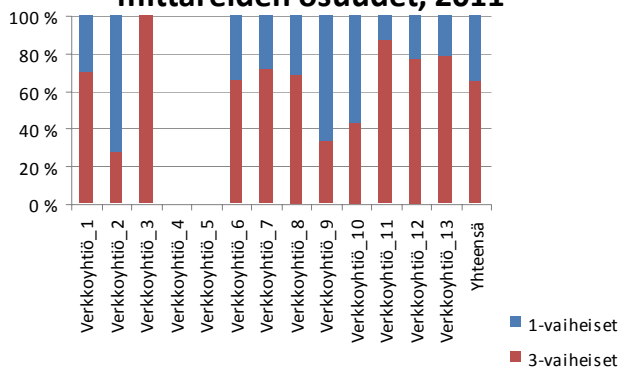


Kuva 11.7. Toistimien määrä keskitintä kohden keskimäärin ja enimmillään kyselyyn vastanneissa verkkoyhtiöissä.

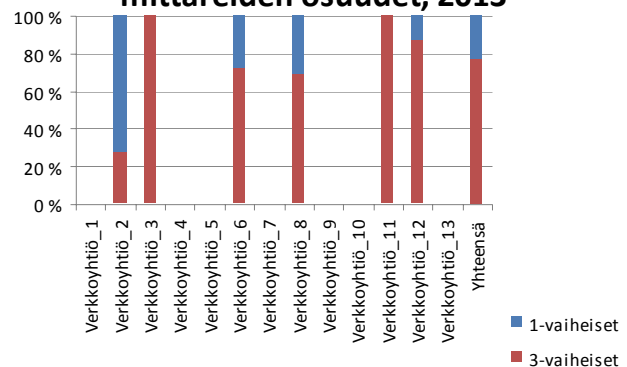
Kuten kuvasta 11.8 ilmenee, 1-vaiheisten mittareiden osuus näyttäisi tällä hetkellä olevan suurempi PLC-mittareissa (noin 35 %) kuin muilla kommunikaatiotekniikoilla toimivissa mittareissa (noin 9 %), mikä osaltaan selittynee sillä, että PLC-tekniikkaa käytetään erityisesti kaupunki- ja taajama-alueilla, joissa kerrostaloasuntojen määrä on suhteellisesti suurempi kuin maaseudulla. Vanhemmissa kerrostaloissa huoneistojen liittymät ovat usein 1-vaiheisia. Uudisrakentamisen ja sähkösanerausten myötä 1-vaiheisten liittymien suhteellinen osuus todennäköisesti tulevaisuudessa kuitenkin vähenee.

Kuvassa 11.9 on esitetty PLC-mittareiden ja muiden kuin PLC-mittareiden asennuskohteiden jakaumat alkuvuodesta 2011. Kuvan tiedot ovat suuntaa antavia, koska kaikki yhtiöt eivät jaotelleet mittareita asennuskohteittain ja jaottelun tarkkuus vaihteli. Kuvan tiedot kuitenkin kattavat noin 76...84 % alkuvuodesta 2011 yhtiöiden käytössä olleista etäluettavista mittareista. Kuten kuvasta ilmenee PLC-mittareista yli 60 % on kerrostalokohteissa ja muista mittareista yli 70 % on omakotitalokohteissa. Teollisuuden ja palvelusektorin suhteelliset osuudet ovat pienet.

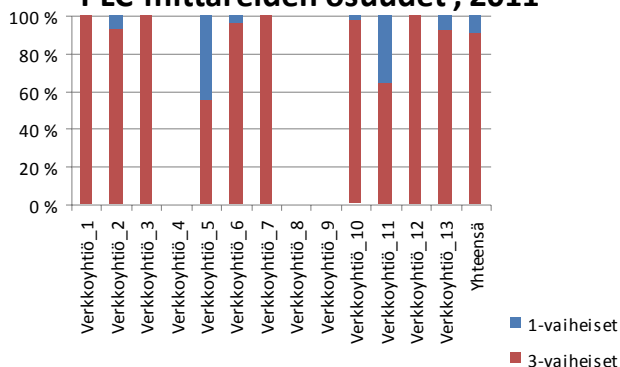
**1- ja 3-vaiheisten PLC-mittareiden osuudet, 2011**



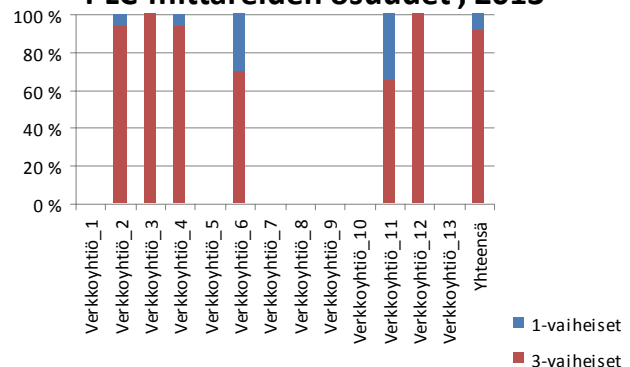
**1- ja 3-vaiheisten PLC-mittareiden osuudet, 2013**



**1- ja 3-vaiheisten muiden kuin PLC-mittareiden osuudet, 2011**

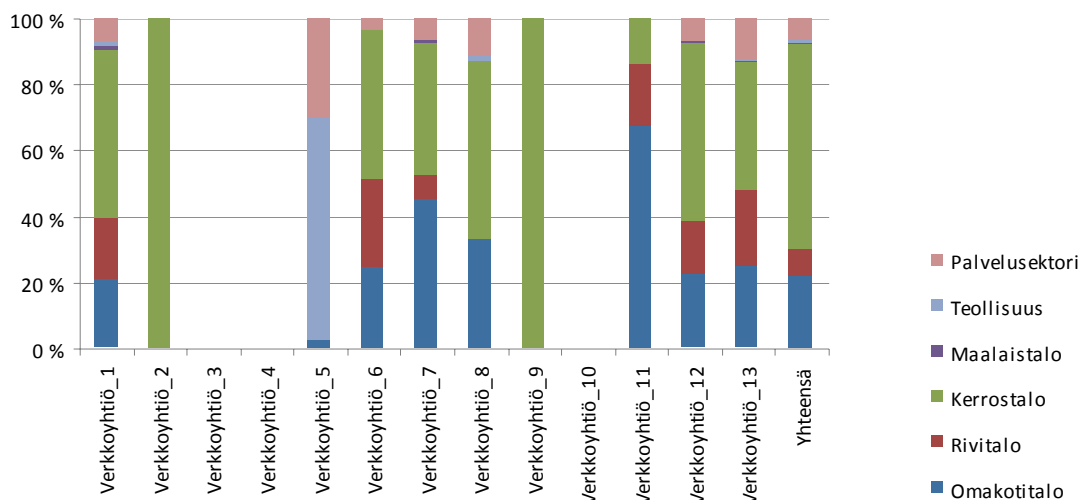


**1- ja 3-vaiheisten muiden kuin PLC-mittareiden osuudet, 2013**

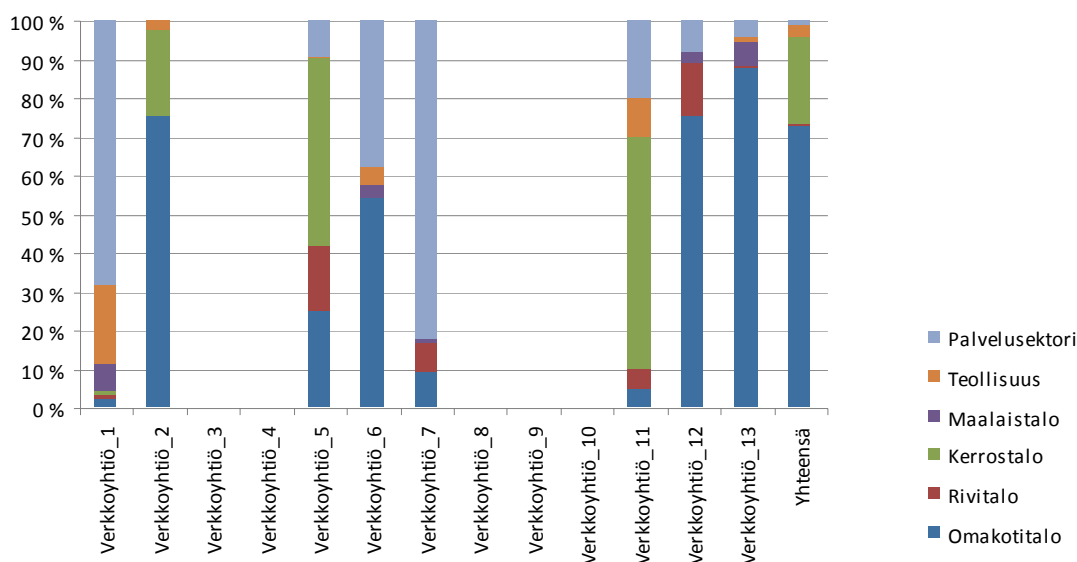


Kuva 11.8. 1- ja 3-vaiheisten mittareiden osuudet PLC-tiedonsiirtoon perustuvissa ja muissa mittareissa.

### PLC-mittareiden asennuskohteet 2011



### Muiden kuin PLC-mittareiden asennuskohteet 2011



Kuva 11.9. PLC-luentaisten ja muiden kuin PLC-luentaisten mittareiden asennuskohteiden jakaumat alkuvuodesta 2011.

Yhtiöiden PLC-luentaisten järjestelmilleen ilmoittamien lukemien saantoprosenttien keskiarvot on esitetty taulukossa 11-1. Huonoimman järjestelmän lukemien saantoprosentiksi ilmoitettiin vuorokauden ajalla 80 %, mutta pääsääntöisesti saantoprosentit olivat yhden vuorokauden ajallakin selvästi parempia. Puolella tiedon antaneista yhtiöistä (7 yhtiöllä 14:sta) saanto oli vuorokauden ajalla yli 95 %. Vertailua vaikeuttaa se, että osa yhtiöistä ilmoitti saannon pidemmällä 2-5 vuorokauden ajalla. Samaan taulukkoon on kerätty myös tietoja luentaongelmien ratkaisutavoista eri verkkoyhtiöissä. Yleisin luentaongelmien ratkaisutapa näyttää useimmissa yhtiöissä olevan toistimien lisääminen. Yhdessä yhtiössä kysymykseen vastanneista luentaongelman aiheuttajan selvittäminen ja aiheuttajaan kohdistuvat toimenpiteet ovat pääasiallinen ratkaisutapa. Yhdessä yhtiössä linjaksi on valittu mittarin vaihtaminen point-to-point mittariksi ja kahdessa muussa

yhtiössä oltiin menossa tähän suuntaan. 1-vaihemittareiden tapauksessa myös mittarin (ja liittymän) vaihtaminen vaiheelta toiselle on yksi mahdollinen ratkaisutapa, jota yksi yhtiöistä ilmoitti käyttäneensäkin. Taulukkoon 11-2 on kerätty tietoja yhtiöiden ilmoittamista etäluettavissa mittareissa esiintyneistä vikatyypeistä. Erään yhtiön ilmoituksen mukaan laitevikoja on esiintynyt 1,6 %:ssa mittareista.

Taulukko 11-1. Yhtiöiden PLC-luentaistille järjestelmilleen ilmoittamien lukemien saantoprosenttien keskiarvot ja luentaongelmien ratkaisutavat.

|                    | Saanto     |              | Luentaongelmien ratkaisutapa   |                                  |                                |                                                                           |                       |
|--------------------|------------|--------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|                    | Saanto [%] | Ajassa [vrk] | Toistimien lisääminen verkkoon | Keskittimien lisääminen verkkoon | Mittarin vaihto P2P-mittariksi | Aiheuttajan selvittäminen ja aiheuttajaan kohdistuvat korjaustoimenpiteet | Muu                   |
| <b>Verkkoyhtiö</b> |            |              |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |
| Verkkoyhtiö 1      | 99.2       | 1            |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |
| Verkkoyhtiö 2      | 96.5       | 2            | 92 % (-)                       | 1 %                              | 1 %                            | 3 %                                                                       | 3 %                   |
| Verkkoyhtiö 3      | 99.5       | 1            | 88 % (+)                       | 10 % (-)                         | 1 % (-)                        | 1 % (+)                                                                   | 0 %                   |
| Verkkoyhtiö 4      | 96         | 1            |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |
| Verkkoyhtiö 5      | 98         | 1            | 0 %                            | 0 %                              | 100 %                          | 0 %                                                                       | 0 %                   |
| Verkkoyhtiö 6      | 99         | 1            | 98 % (-)                       | 0 %                              | 0 %                            | 0 %                                                                       | 2 % (-) <sup>1)</sup> |
| Verkkoyhtiö 7      | 97         | 3            |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |
| Verkkoyhtiö 8      | 98.5       | 3            | 90 % (+)                       | 0 %                              | 5 % (++)                       | 5 % (+)                                                                   | 0 %                   |
| Verkkoyhtiö 9      | 99.7       | 3            |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |
| Verkkoyhtiö 10     | 88.5       | 1            | -                              | -                                | +                              | -                                                                         | +                     |
| Verkkoyhtiö 11     | 95         | 5            | 80 % (-)                       | 0 %                              | 0 %                            | 20 % (-)                                                                  | 0 %                   |
| Verkkoyhtiö 12     | 92         | 1            |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |
| Verkkoyhtiö 13     | 99.2       | 1            | 25 % (+)                       | 2,5 % (-)                        | 2,5 % (-)                      | 70% (-)                                                                   | 0 %                   |
| Verkkoyhtiö 14     | 98         | 1            |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |
| Keskiarvo          | 96.9       | 1.7          |                                |                                  |                                |                                                                           |                       |

<sup>1)</sup> 1-vaihemittari vaihdettu eri vaiheelle

Taulukko 11-2. Yhtiöiden ilmoittamia etäluentaisissa mittareissa esiintyneitä vikatyyppejä.

| Mittarivikatyyppi                  | Vikatyyppin ilmoittaneiden yhtiöiden lukumäärä |
|------------------------------------|------------------------------------------------|
| Tiedonsiirto ei toimi              | 3                                              |
| Mittarin näyttö pimenee            | 1                                              |
| Vikavallo palaa                    | 1                                              |
| Katkolaite ei toimi                | 1                                              |
| Lähetää "miljoonalukemaa"          | 2                                              |
| Selittämätön laiterikko            | 3                                              |
| Tuntiarvoja puuttuu                | 1                                              |
| Loissarja tallentunut päätösarjana | 1                                              |
| Pulssinkeruulaite rikkoontunut     | 1                                              |

Etäluettaviin energiamittareihin liittyviä häiriöongelmia kartoitettiin kyselyssä sekä asiakaslaitteiden aiheuttamien luentaongelmien että PLC-luennan aiheuttaman asiakaslaitteiden häiriintymisen osalta. Käytännön ongelmana verkkoyhtiöissä on usein se, että häiriöongelmia ei keskitetysti tilastoida mihinkään eikä niitä välttämättä dokumentoida kovin tarkkaan, jolloin kokonaiskuva ongelmistä on vaikea muodostaa. Osa mittareiden luentaongelmista tulee esille jo käyttöönottovaiheessa, mutta kuten taulukosta 11-3 ilmenee, ongelmia ilmaantuu yleisesti myös myöhemmin käytön aikana. Käytön aikana ilmaantuvat ongelmat saattavat johtua esimerkiksi kuormitusten tai verkkotopologian muutoksista, jotka saattavat johtaa signaali-kohinasuhteen heikkenemiseen mittarilla tai keskittimellä. Luentaongelmien yleisyys vaihteli verkkoyhtiöittäin melko paljon, joillakin yhtiöillä luentaongelmien määrä suhteutettuna mittarimäärään oli jopa yli 25 % kun joillakin se oli vain noin 1 % luokkaa. Esitettyjä lukuja on pidettävä lähinnä suuntaa antavina, koska tilastointi ei aiemmin mainituista syistä ole ollut kovin kattavaa eikä tarkkaa. PLC-mittareissa luentaongelmia ovat ainakin yhdessä mittarimallissa aiheuttaneet myös jakorajojen muutokset.

Taulukossa 11-4 on esitetty yhteenveto PLC-luentaisten mittareiden luentaongelmien aiheuttajista niiden verkkoyhtiöiden osalta, joista tietoja saatiin. Yleisiä luentaongelmien aiheuttajia näyttäisivät olevan taajuusmuuttajat (yleensä 3-vaiheisia), elektronisella liitälaitteella varustetut lamput (1-vaiheisia) ja kodinelektroniikan laitteet (1-vaiheisia). Erään verkkoyhtiön kokemusten mukaan taajuusmuuttajien kohdalla kyse on usein ollut asennusvirheistä.

Taulukko 11-3. PLC-luenteissa mittareissa käyttöönottovaiheessa ja käytön aikana esiintyneiden luentaongelmien määrät muutamissa verkkoyhtiöissä (s = satoja, k = kymmeniä, m= muutamia).

[illegible]

Taulukko 11-4. Luentaongelmien aiheuttajia (u = useita, m = muutamia).

| Verkkoyhtiö    | Ilmanvaihdon<br>taajuusmuuttaja<br>Muu | taajuusmuuttaja<br>UPS | Lamput (esim.LED ) | Digiboksi | Tietokone | Antennivahvistin | Lämmityksen ohjaus | Sisäverkko | Lämpöpumppu | Operaattorin<br>verkkolaite | Viallinen virtalähde | Liesituuletin | APK | Riittämätön<br>kentänvoimakkuus | Tuntematon |
|----------------|----------------------------------------|------------------------|--------------------|-----------|-----------|------------------|--------------------|------------|-------------|-----------------------------|----------------------|---------------|-----|---------------------------------|------------|
| Verkkoyhtiö 1  | 1                                      | 1                      |                    |           |           | m                |                    |            |             |                             |                      |               |     |                                 |            |
| Verkkoyhtiö 2  | 2                                      |                        |                    | 1         |           |                  |                    |            |             |                             |                      |               |     |                                 |            |
| Verkkoyhtiö 3  |                                        |                        |                    |           |           |                  |                    |            |             |                             |                      | 10            |     | 10                              |            |
| Verkkoyhtiö 4  |                                        |                        |                    |           |           | 1                |                    |            |             |                             |                      |               |     |                                 | 50         |
| Verkkoyhtiö 5  |                                        |                        |                    | 1         |           | 1                | 1                  | 1          |             |                             |                      |               |     |                                 |            |
| Verkkoyhtiö 6  | u                                      | m                      | m                  | m         | m         |                  |                    |            |             |                             |                      | m             |     | m (gprs)                        | m          |
| Verkkoyhtiö 7  | 2                                      | 5                      |                    |           |           |                  |                    |            | 3           | 7                           |                      |               |     | 10                              |            |
| Verkkoyhtiö 8  | m                                      | m                      |                    | m         | m         |                  |                    |            |             |                             |                      |               |     |                                 |            |
| Verkkoyhtiö 9  |                                        | 10                     |                    |           |           |                  |                    |            |             |                             |                      |               |     |                                 | 100        |
| Verkkoyhtiö 10 | 1                                      |                        |                    |           |           |                  |                    |            |             |                             |                      |               |     |                                 |            |
| Verkkoyhtiö 11 | 40                                     | 30                     |                    | 10        |           |                  |                    |            |             |                             | 20                   |               |     | 5                               |            |

Energiamittareiden PLC-luennan asiakaslaitteille aiheuttamat häiriöt olivat kyselyn perusteella melko harvinaisia. Alla on listattu kyselyssä esille tulleet häiriötapaukset:

1. 15 kpl Pistorasialiitäntäinen hipaisuhimmenninvalaisin
2. Muu valaistuksen ohjaus- tai säätölaite
3. 1 kpl Sähköverkon kautta (taajuuksilla 100 kHz tai 120 kHz) toimiva sisäpuhelinjärjestelmä, vika korjaantui asentamalla verkkosuodin
4. 1 kpl Sähköverkon kautta toimiva lähiverkko
5. 1 kpl Antennivahvistin
6. 1 kpl Omakotitalon lämmityksenohjausjärjestelmä
7. Liikennevalojen ohjaus
8. 2 kpl verkkoyhtiön Melko-järjestelmä

Kyselyyn vastanneiden verkkoyhtiöiden ulkopuolelta on lisäksi tiedossa muutamia tapauksia. Hipaisuhimmenninlamppujen häiriintymisongelmia on esiintynyt muuallakin Euroopassa ja niitä on tutkittu mm. CENELECin toimeksiannosta [Cen09]. Tutkimusten johtopäätös oli, että sekä hipaisuhimmenninlamput että mittareiden etälukuun käytettävät PLC-järjestelmät täyttävät niitä koskevat EMC-standardit. Tässä mielessä standardointia ei voi pitää nykyisellään riittävän kattavana.

Muissa kuin PLC-luentaissa mittareissa kommunikaatio-ongelmia näyttäisi kyselyn perusteella esiintyvän hieman vähemmän kuin PLC-luentaissa, kuten taulukosta 11-5 ilmenee. Tietoja oli kuitenkin käytettävissä vain muutamien yhtiöiden osalta ja kuten PLC-mittareiden tapauksessakin,

tilastointi ei välttämättä ole kovin kattavaa. Esimerkiksi matkapuhelin- tai muihin radioverkkoihin perustuvissa järjestelmissä kuuluvuusongelmia saattaa esiintyä kaupunkialueilla esimerkiksi kellareissa tai maaseudulla kuuluvuusalueiden reunoilla. Tällaisissa tapauksissa kuuluvuutta voidaan parantaa ulkoantennilla. Ohjelmistobugeja on esiintynyt sekä PLC-luenteissa että muissa etäluettavissa mittareissa. Yleinen ongelma erityisesti vapaa-ajan asunnoilla ovat myös vanhat keskukset, joissa mittari on kytketty pääkytkimen jälkeen. Näissä kommunikaatio katkeaa kommunikaatiotavasta riippumatta, kun asiakas esimerkiksi mökiltä lähtiessään katkaisee sähköt pääkytkimellä. Ongelmaa on pyritty vähentämään asiakkaiden ohjeistusta parantamalla (opastetaan pääkytkimen sijasta käyttämään mittarin katkopainiketta). Joissain tapauksissa sähköverkkoyhtiö on valinnut linjaksi keskusten muuttamisen niin, että mittari asennetaan ennen pääkytkintä.

Taulukko 11-5. Muissa kuin PLC-luenteissa mittareissa käyttöönottovaiheessa ja käytön aikana esiintyneiden luentaongelmien määrät muutamissa verkkoyhtiöissä (m= muutamia).

| Verkkoyhtiö   | Käyttöönottovaihe |             |           |             |            |         | Käyttövaihe |             |           |         |            |                           | Mittareita, joissa luentaongelmia [%] |
|---------------|-------------------|-------------|-----------|-------------|------------|---------|-------------|-------------|-----------|---------|------------|---------------------------|---------------------------------------|
|               | Kerrostalo        | Omakotitalo | Rivi talo | Maalaistalo | Teollisuus | Palvelu | Kerrostalo  | Omakotitalo | Rivi talo | Palvelu | Teollisuus | Muita kuin PLC-mittareita |                                       |
| Verkkoyhtiö 1 |                   |             |           |             | m          |         |             | m           |           |         |            | 352861                    |                                       |
| Verkkoyhtiö 2 | 700               |             |           |             |            |         |             |             |           |         |            | 141666                    | 0.49 %                                |
| Verkkoyhtiö 3 |                   | 100         |           | 100         |            |         |             |             |           |         |            | 2250                      | 8.89 %                                |
| Verkkoyhtiö 4 | 150               | 50          | 15        |             | 5          | 2       | 80          | 10          | 5         | 0       | 6          | 23477                     | 1.38 %                                |
| Verkkoyhtiö 5 |                   |             |           |             | 5          | 5       |             |             |           | 15      |            | 1294                      | 1.93 %                                |
| Keskiarvo     |                   |             |           |             |            |         |             |             |           |         |            |                           | 3.17 %                                |

Taulukossa 11-6 on esitetty yhteenveto etäluettaviin mittarijärjestelmiin (kaikki kommunikaatiotavat) liittyvistä käytännön järjestelyistä verkkoyhtiöissä. Taulukon luvut ilmoittavat kuinka monen yhtiön tapauksessa esimerkiksi verkkoyhtiö omistaa mittarit tai ulkopuolinen palveluntarjoaja hoitaa luennan. Kahta poikkeusta lukuun ottamatta verkkoyhtiö omistaa mittarit. Asennusten, luennan ja luenta- ja häiriöongelmien selvittelyssä käytännöt vaihtelevat enemmän. Kyselyn perusteella pienimmät verkkoyhtiöt hoitavat etäluettavien mittareiden asennuksen ja ylläpidon tyypillisesti itsenäisesti, suuremmat ovat ulkoistaneet em. toiminnot. Luenta- ja häiriöongelmien selvittely voi olla ulkoistettu esimerkiksi verkonrakennusyhtiölle, urakoitsijalle tai mittarivalmistajalle.

Yksitoista verkkoyhtiötä kerää kulutustietojen lisäksi tietoja mittarivioista, sähkökatkoista sekä sähkön laadusta (jännitteen taso, heilahtelu ja epäsymmetria). Katko- ja jännitetietojen lukeminen on joko käytössä tai suunnitteilla kaikissa yhtiöissä. Kymmenellä verkkoyhtiöllä on asennettuna laatuvahti-mittareita sähköasemille ja muutamille päämuuntajille jatkuvaan sähkön laadun valvontaan (kappalemäärä 3...300 kpl/yhtiö).

Taulukko 11-6. Etäluettavien mittareiden omistus-, asennus- ja ylläpitojärjestelyt.

|                                         |                                             | Mittareiden omistus | Mittareiden asennus | Mittareiden luenta | Luentaongelmien selvitys | Mittarin aiheuttamien häiriöiden selvitys |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
|                                         | Tekijäosapuoli                              |                     |                     |                    |                          |                                           |
| Eniten mittareita käsittävä järjestelmä | Verkkoyhtiö                                 | 15                  | 4                   | 8                  | 6                        | 10                                        |
|                                         | Saman konsernin toinen yhtiö                | 1                   | 2                   | 1                  |                          |                                           |
|                                         | Verkonrakennusyhtiöt/urakoitsijat           |                     | 4                   |                    | 1                        | 2                                         |
|                                         | Mittarivalmistaja                           |                     | 2                   | 3                  | 2                        | 2                                         |
|                                         | Ulkopuolinen palveluntarjoaja               |                     | 5                   | 6                  | 2                        | 2                                         |
|                                         | Verkkoyhtiö + ulkopuolinen palveluntarjoaja | 1                   | 1                   |                    | 7                        | 2                                         |
|                                         |                                             |                     |                     |                    |                          |                                           |
| PLC-järjestelmä                         | Verkkoyhtiö                                 | 15                  | 5                   | 8                  | 5                        | 7                                         |
|                                         | Saman konsernin toinen yhtiö                |                     | 1                   | 1                  |                          |                                           |
|                                         | Urakoitsijat                                |                     | 5                   |                    | 2                        | 2                                         |
|                                         | Mittarivalmistaja                           |                     | 1                   | 3                  | 2                        | 2                                         |
|                                         | Ulkopuolinen palveluntarjoaja               |                     | 3                   | 4                  | 3                        | 2                                         |
|                                         | Verkkoyhtiö + ulkopuolinen palveluntarjoaja | 1                   | 1                   |                    | 4                        | 3                                         |

Melko-järjestelmä näyttäisi olevan useimmissa verkkoyhtiöissä vähitellen poistumassa käytöstä tai poistettu jo, vain yksi verkkoyhtiö oli jatkamassa käyttöä. Melkoa käytetään kuormanohjaukseen, tariffien vaihtoon ja katuvalojen ohjaukseen.

Asiakkaiden kotinäyttö eli huoneistossa langattomasti tai pistorasiaan liitettyinä toimiva energiankulutusnäyttö tulee olemaan tarjolla neljässä verkkoyhtiössä lähivuosina. Internetin kautta seurattavaa tuntimittausta tullaan tarjoamaan asiakkaille kaikissa verkkoyhtiöissä lähivuosina.

## 12 Yhteenveto

EU:n asetukset valaistuksen tehostamiselle ovat muuttaneet huomattavasti lamppumarkkinoita. Kotitalouksien kannalta tällä hetkellä osittainen ja tulevaisuudessa lähes täydellinen hehkulamppujen markkinoille saattamiskielto aiheuttaa sen, että hehkulamput tullaan korvaamaan jollain muilla lampputyypillä. Halogeenilamput, pienloistelamput ja tulevaisuudessa LED-lamput tulevat olemaan todennäköisempiä korvaavia lampputyyppejä. Merkittävimmät palvelusektorin valaistukseen kohdistuvat vaikutukset aiheutuvat elohopealamppujen poistumisesta markkinoilta 13. huhtikuuta 2015, jolla on suuri vaikutus katuvalaistukseen. Myös suurpainenatriumlamput, jotka voidaan suoraan asentaa elohopealamppujen tilalle, kielletään samaan aikaan. Tämän lisäksi lähivuosina astuu voimaan palvelusektoria ja osin kotitalouksia koskevia rajoituksia, joilla on pienempiä vaikutuksia. Edellä mainittujen lisäksi magneettiset liitäntälaitteet (kuristimet) tulevat poistumaan markkinoilta 2017 ja ne tultaneen korvaamaan elektronisilla liitäntälaitteilla. Tässä yhteydessä on kuitenkin syytä muistaa, että kaikki lampputeknologioihin liittyvät päätökset ovat viime kädessä poliittisia ja siitä johtuen ne tuskin ovat täysin staattisia vaan tulevat luultavimmin muuttamaan ajan myötä.

Arvioita siitä miten lampputyypit tulevat kehittymään tulevaisuudessa on useita. Tutkimuksissa esitettyjen eri skenaarioiden välillä on huomattavia eroavaisuuksia. Kotitalousvalaistuksen osalta tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tutkimusta, jonka eräs skenaario on hyvin lähellä tämän hetken EU:n asetuksia. Sen mukaan valaistukseen käytettävä vuotuinen sähköenergiankulutus EU-27 alueella tulee ensin hivenen laskemaan, jonka jälkeen se hienokseltaan nousee valaistustarpeen kasvun takia. Palvelusektorin osalta EU:n määräyksien kanssa yhtä hyvin yhtenevää skenaariota ei löytynyt. Näiden lisäksi Aalto yliopistossa tehdyn tutkimuksen mukaan maapallolla valaistukseen käytetyn sähköenergian vuotuinen kulutus tulee laskemaan voimakkaasti, vaikka valaistustarve kasvaa. Tässä oletuksena on ollut se, että uudet teknologiat mahdollistavat energiatehokkaamman valaistuksen.

Standardoinnista tässä tutkimuksessa käytiin läpi yliaaltoja rajoittavaa standardia EN 61000-3-2, jossa on esitettyä mm. valaistukselle asetetut virtayliaallorajat. Tämän standardin osalta

tarkasteltiin vain valaistukselle asetettuja rajoja. Muita standardeja tässä tutkimuksessa käytiin luettelonomaisesti läpi.

Tehomääritelmiä käytiin läpi perustuen IEEE 1459 standardiin yksivaiheiselle kuormalle, jonka verkosta ottama virta on epäsinimuotoista. Sen pohjalta todettiin että näennäisteho on perustaaajuksen näennäistehon sekä ei-sinimuotoisen näennäistehon neliöiden summan neliöjuuri. Tehomääritelmien pohjalta johdettiin tarkka ja approksimoitu tehokerroin edellä mainitulle kuormalle. Samassa yhteydessä käytiin läpi yleisluontoisesti muutamia tehokertoimen parannusstrategioita. Strategiat tai topologiat voidaan jakaa mm. passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Passiivisten menetelmien etuja ovat yksinkertainen ja kestävä tekniikka sekä kustannustehokkuus. Passiivisten menetelmien huonoja puolia ovat tarve suurille ja painaville magneeteille, ei voida käyttää erilaisilla jännitteillä sekä sisään menovirta ei ole sinimuotoinen. Aktiivisten menetelmien hyviä puolia ovat: kattava harmonisten virtojen eliminointi, tehokerroin lähellä 1 sekä laaja mahdollisuus käyttää liitäntälaitetta eri jännitearvoilla. Huonoja puolia ovat: PFC:stä aiheutuvat lisäkustannukset, komponenttien lisääntyvä määrä (enemmän rikkoontuvia komponentteja) sekä suurtaajuisten häiriöiden lisääntyminen.

Työn yhteydessä tarkasteltiin myös eräälle pienloistelampulle suoritettuja mittauksia. Mittausten pohjalta tarkasteltiin lampun aiheuttamia yliaaltoja ja standardissa EN 61000-3-2 määriteltäviä yliaaltorajoja. Tässä tarkastelussa huomattiin kyseisen lampun osalta, että se ei täytä standardirajoja vaan ylitti ne kaikilla standardin määrittelemillä taajuusalueilla. Tämän lisäksi työssä suoritettiin laskelma, jonka tarkoituksena oli osoittaa minkälaisen nollajohtimenvirran kasvun muuntajalla hehkulamppujen korvaaminen pienloistelampuilla aiheuttaa 30 asiakkaan muuntopiirissä, kun tarkastellaan pelkästään lamppukuormia. Laskelmista selvisi, että kun lamppukuorma oletetaan täysin satunnaisesti jakautuneeksi vaiheiden välille, on todennäköisempää, että pienloistelamput pienentävät muuntajalla olevaa nollajohtimenvirtaa. Tämä johtuu siitä, että nollajohtimen virtaan vaikuttaa erittäin voimakkaasti kuormien epäsymmetrinen jakautuminen. Tässä yhteydessä on kuitenkin syytä muistaa, että tarkastelu koski ainoastaan lamppukuormaa. Vaikka hehkulamput olisivatkin jakautuneet täysin satunnaisesti eri vaiheiden välille, voi muiden kuormien satunnainen jakautuminen pienentää hehkulamppujen aiheuttamaa nollajohtimen virtaa. Pienloistelamppujen kolmella jaollisiin yliaaltoihin ei muiden kuormien satunnaisella jakautumisella ole merkitystä ja näin ollen pienloistelamput muodostavat aina tietyn suuruisen virran nollajohtimeen, kun lamppuja käytetään. Tämä saattaa muodostua ongelmaksi nollajohtimen mitoituksen kannalta, jos samassa pienjänniteverkossa on useita suuritehoisia tehoelektronisia laitteita.

Välkynnän osalta havaittiin, että pienloistelamppujen välkyntäherkkyys on erilainen kuin hehkulamppujen, koska valon tuotantoprosessi on erilainen. Välkynnän häiritsevyyden mittaamenetelmän määrittävä standardi IEC 61000-4-15, joka perustuu hehkulampan välkyntävasteen määrittämiseen, ei tästä syystä anna pienloistelamppujen tapauksessa välkynnän häiritsevyydestä oikeaa kuvaa. Eräässä väitöskirjassa käsiteltiin tätä ongelmaa ja kyseisen

väitöskirjan tuloksia esiteltiin tässä työssä. Väitöskirjatutkimuksessa oli mitattu 5 erilaisen pienloistelampun ja yhden hehkulampun valaistusvoimakkuuden muutosta suhteessa jännitteen muutokseen. Tämän pohjalta havaittiin, että hehkulamppu on kaikista lampputyypeistä herkin välkyynnälle. Epäherkimpiä olivat sinimuotoisesti moduloidulla jännitteellä 9 W pienloistelamppu kun modulointitaajuus oli alle 15 Hz ja elektronisella liitäntälaitteella varustettu halogeenilamppu kun modulointitaajuus oli yli 15 Hz. Suorakulmaisella modulointijännitteellä epäherkin lampputyyppi välkyynnälle oli 11 W energiansäästölamppu. Näiden mittausten pohjalta luotiin tutkimuksessa käyrät, jotka antavat sinimuotoisesti moduloidun jännitemuutoksen suuruuden hetkelliselle välkyynnän havaitsemiselle arvolla 1. Edelleen edellä mainittujen mittausten pohjalta väitöskirja teki parannusehdotuksia välkyynnän mittauksen määrittelevään standardiin IEC 61000-4-15, jotta eri lamppujen välkyntävasteet vastaisivat paremmin toisiaan.

Energiansäästölamppujen verkostovaikutusten lisäksi työn toisena tarkoituksena oli tehdä kirjallisuusselvitys elektronisten kuormien ja PLC-mittareiden luentajärjestelmän välisestä yhteensopivuudesta. Aiheesta on tehty jonkin verran tutkimuksia, mutta aiheen tuoreuden vuoksi niiden määrä on rajallinen.

Asiakkaan sähkölaitteet saattavat aiheuttaa ongelmia PLC-tiedonsiirrolle kahdella tavalla. Ne voivat vaimentaa PLC-signaalia tai aiheuttaa suuritaajuisia häiriöitä PLC-taajuuksille. Signaalin vaimeneminen aiheutuu asiakkaan laitteen ja verkon välillä muodostuvasta resonanssiipiiristä, jonka seurauksena PLC-vastaanottimelle saapuva signaali saattaa olla huomattavasti heikompi kuin tilanteessa jossa asiakkaan laite ei ole kytkettynä verkkoon. Tehoelektroniikkakuormien aiheuttamat häiriöt ovat käytännössä tehoelektroniikan komponenttien kytkennästä aiheutuvia yliaaltoja tai suuritaajuisia häiriöitä, jotka osuvat samalle taajuusalueelle PLC:n kanssa. Signaalin vaimentuminen on näistä kahdesta vakavampi ongelma, sillä potentiaalisten ongelmakohteiden määrä on suuri, ja tapausten havaitseminen on vaikeaa. Tehoelektroniikkakuormat aiheuttavat kohinatason nousua ja niistä on haittaa vain, jos etäisyys tehoelektroniikkalaitteen ja vastaanottavan PLC-laitteen välillä on tarpeeksi lyhyt.

Mahdollisia ratkaisuja ongelmiin olisivat häiriölähteiden irtikytkentä, suotimen asennus tai mittarin vaihto. Mittarin vaihtaminen esimerkiksi GSM-luentaan on näistä varteenotettavin, sillä laitteiden irtikytkeminen on asiakkaiden kannalta kohtuutonta ja suotimien asentaminen ei ole aina taloudellisesti kannattavaa.

PLC-signaali saattaa aiheuttaa sähkölaitteisiin toimintahäiriöitä tai vaurioittaa niitä. Jos resonanssiipiiri muodostuu EMC-suotimen kondensaattorin ja verkon välillä, saattaa kondensaattorin läpi kulkeva virta kasvaa suureksi, ja aiheuttaa ylikuumentumista. PLC-signaalin aiheuttama suoria toimintahäiriöitä on havaittu erityisesti hipaisuhimmentimellä varustetuissa lamppuissa, joissa signaalin vaikutuksesta valoteho on säätynyt kontrolloimattomasti. Ongelma

voitaisiin ratkaista korjaamalla PLC:n taajuusaluetta koskevia standardeja, sillä häiriöitä voi aiheutua mistä vain kyseiselle taajuusalueelle osuvasta signaalista.

Jatkotutkimusta tulisi kohdistaa siihen missä mittakaavassa pienloiste- ja ylipäättään elektronisella liitäntälaitteella varustetut lamput täyttävät niille asetetun yliaaltostandardin vaatimukset. Tämän pohjalla on mittauksiin perustuva löydös lampusta, joka ei kyseisiä rajoja täyttänyt. Tämän lisäksi tulisi mittauksiin perustuen todentaa työssä esitetty nollajohtimen virran määrittävä laskukaava. Lamppujen merkitystä ylipäättään kuormitukseen tulisi myös tarkastella mittauksiin perustuen, jolloin tarkastelun kohteena olisi esimerkiksi tyypillinen omakoti- tai kerrostaloasunto, jossa olisi tyypillisiä kuormia. Näiden mittausten pohjalta olisi mahdollista yksittäisen asiakkaan rajapinnassa tarkastella pienloistelamppujen vaikutuksia suhteessa muihin kuormiin sekä pystyttäisiin luomaan kokonaiskuvaa siitä, miten pienloistelamput erottuvat muista kuormituksista esimerkiksi muuntamotasolla. Väлкynnän mittaamisen osalta lisämittauksia tulisi suorittaa usean eri lamppuvalmistajan valmistamille lampuille, jolloin voitaisiin saada parempaa kokonaiskuvaa siitä, miten samankaltaisia välkyntävasteet eri lamppuvalmistajien lamppujen välillä ovat. Myös lamppujen impedansseja suurilla taajuuksilla ja suuritaajuisia häiriöitä olisi syytä tutkia tarkemmin.

Projektin kuluessa tehtiin sähköverkkoyhtiöihin etäluettavia energiamittareita koskeva kysely, johon vastasi yhteensä 18 verkkoyhtiötä, joilla on yhteensä 1 935 275 energiamittaria. Tutkimuksen perusteella vuoden 2013 lopussa otokseen kuuluneista 1 696 532 etäluettavasta mittarista 855 906 kpl (noin 50 %) tulisi olemaan PLC-tekniikkaan perustuvia (noin 3,6-kertainen määrä nykyiseen verrattuna). Kyselytutkimuksen perusteella asiakaslaitteiden häiriintyminen PLC-signaalista on melko harvinaista, mutta mahdollisista muista haitoista liittyen esimerkiksi laitteiden ennenaikaiseen vanhenemiseen ei ole olemassa tutkimustietoa. Asiakaslaitteiden aiheuttamia luentaongelmia näyttäisi esiintyvän melko yleisesti, joten sillä alueella tutkimustarvetta on. Osa luentaongelmista tulee ilmi heti käyttöönottovaiheessa, mutta niitä voi ilmetä myös myöhemmin. Muutenkin asiakaslaitteiden karakterisointia taajuusalueella 2...150 kHz on tehty melko vähän ja laitteiden välisistä ja laitteiden ja verkon välisistä keskinäisvaikutuksista on varsin vähän tutkittua tietoa saatavilla.

## Lähdeluettelo

- [Adt06] Adato. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2006. 2006.
- [Aho01] Ahola Jero, Lindh Tuomo, Partanen Jarmo, Silventoinen Pertti, Nerg Janne. Pienjännitevoimakkaapelien ominaisuudet sähköverkkotiedonsiirron kannalta, Tutkimusraportti 13. TESLA-raportti 52/2001. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2001.
- [Ana08] Anatory, J.; Theethayi, N.; Thottappillil, R.; Kissaka, M.M.; Mvungi, N.H.; , "The Influence of Load Impedance, Line Length, and Branches on Underground Cable Power-Line Communications (PLC) Systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on* , vol.23, no.1, pp.180-187, Jan. 2008.
- [Ano09] 66/2009, Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksessä ja mittauksesta. Työ- ja elinkeinoministeriö 1.3.2009.
- [Bas04] S. Basu, M.H.J.Bollen, T. M.Undeland. PFC Strategies in light of EN 61000-3-2. 2004. Conference. International Power Electronics and Motion Control Conference. Riga, Latvia.
- [Ben07] Bengner Josef, Chubukjian Arto, Hvidsten Knut-Inge, Kasper Brian, Otnes Roald. HF Interference, Procedures and Tools. Final Report of NATO RTO Information Systems Technology. RTO/NATO, June 2007.
- [Cai09] R. Cai. Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement. Dissertation. 2009. Eindhoven University of Technology. Netherlands.
- [Cen09] Cenelec, SC205A Mains Communication Systems. Study report on electromagnetic interference between electrical equipment/systems in the frequency range below 150 kHz. Jan. 2009.
- [Dra05] J. Drápela, M. Krátký, L. Weidinger, M. Závodný. Light Flicker of Fluorescent Lamps with Different Types of Ballasts Caused by Interharmonics. 2005. Power Tech, 2005 IEEE Russia.
- [ELC07] European Lamp Companies Federation. Lighting applications. [WWW]. [viitattu 27.4.2011]. Saatavissa: [http://www.elcfed.org/2\\_lighting\\_applications.html](http://www.elcfed.org/2_lighting_applications.html)

- [EUS] Eurostat tietokanta. [WWW]. Saatavissa: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home>
- [Har03] Hare Ed. Power Lines as Antennas From 100 kHz to 50 MHz. 2003.
- [Hal10] L. Halonen, E. Tetri, P. Bhusal. Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings. Aalto University, School of Science and Technology, Department of Electronics, Lighting Unit. IEA - International Energy Agency, ECBCS - Energy Conservation in Buildings and Community Systems. Espoo 2010.
- [Halp03] S.M. Halpin, R.T.M. Bergeron, R.F. Burch, L.E. Conrad, and T.S. Key. Voltage and Lamp Flicker Issues: Should the IEEE Adopt the IEC Approach, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, issue 3, Pages: 1088-1097, July 2003.
- [Hon09] S. Honkapuro, N. Jauhiainen, J. Partanen, S. Valkealahti. Sähkön ja kaukolämmön rooli energiatehokkuudessa ja energian säästössä. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto. 2009.
- [IEA06] International Energy Agency, Light's Labour's Lost, 2006. Pariisi, Ranska.
- [Lak08] Lakervi & Partanen. Sähkönjakelutekniikka. Gaudeamus Helsinki University Press/Otatieto. Helsinki, 2008. 295p.
- [Lar06] A. Larsson, "High frequency distortion in power grids due to electronic equipment", Licentiate dissertation, *Luleå University of Technology*, Skellefteå, Sweden, 2006.
- [Lar07a] A. Larsson, M. Bollen, Martin Lundmark, "Measurements of High-Frequency (2–150 kHz) Distortion in Low-Voltage Networks", *Int. Conf on Electricity Distribution (CIRED)*, Vienna, May 2007.
- [Lar07b] A. Larsson, M.H.J. Bollen, M. Lundmark, "Measurement and analysis of high frequency conducted disturbances," *Int. Conf on Electricity Distribution (CIRED)*, Vienna, May 2007.
- [Lar11] A. Larson. On High-Frequency Distortion in Low-Voltage Power Systems. Luleå University of Technology. Luleå 2011. ISBN 978-91-7439-218-0.
- [Mal76] J. A. Malack and J. R. Engstrom, "RF impedance of United States and European power lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. EMC-18, pp.36–38, Feb. 1976.
- [Nic73] J.R. Nicholson and J.A. Malack, "RF Impedance of Power Lines and Line Impedance Stabilization Networks in Conducted Interference Measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-15, no. 2, pp84-86, May 1973.
- [Nou09] L. Nousiainen. Single-Phase Electronic Load Interactions with Supply Network. 2009. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Sähköenergiatekniikan laitos.
- [Rön07a] S. Rönnberg, M. Lundmark, M. Wahlberg, M. Andersson, A. Larsson, and M. Bollen, "Attenuation and noise level—potential problems with communication via the power grid," presented at the *Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED)*, Vienna, Austria, May 2007.

- [Rön07b] S Rönnerberg, M Lundmark, M Wahlberg, M, Andersson, A Larsson, M Bollen. Attenuation and noise level- Potential problems with communication via the power grid. CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution, Paper 0186. Vienna 2007.
- [Rön11] Rönnerberg Sarah. Power Line Communication and Customer Equipment. Luleå University of Technology. Luleå 2011. ISBN 978-91-7439-238-8. 51 p.
- [Sip10] V. Sippola. Eco-design -direktiivin täytäntöönpanotoimenpiteiden vuoksi poistuvien lamppujen korvaaminen ulkovalaistuksessa. Diplomityö. Aalto yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan laitos. 2010.
- [Ski99] G. L. Skibinski, R. J. Kerkman and D. Schlegel, "EMI emissions of modern PWM AC drives," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 5, Issue: 6, pp. 47 - 80, 1999.
- [SSTL08] SSTL 2008, Energiatohukas valaistus vähentää hiilidioksidipäästöjä ja säästää rahaa, Esitelmä, Suomen sähkötukuliikkeiden liitto ry, Suomen Valoteknillinen Seura ry, Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry & Teknologiateollisuus ry, Viitattu 27.04.2011 Saatavissa: [http://www.valosto.com/tiedostot/Energiatohukas\\_valaistus.pdf](http://www.valosto.com/tiedostot/Energiatohukas_valaistus.pdf)
- [STK09] Sähkötöknisen kaupan liitto. EuP-direktiivi ohjaa valistuneisiin valaistusuudistuksiin toimistoissa, kouluissa, myymälöissä, teollisuudessa ja ulkoalueilla - Kysymyksiä ja vastauksia aiheesta. 2009. [WWW]. [viitattu 27.4.2011]. Saatavissa: <http://www.stkliitto.fi/viestinta/esitykset/555-eup-direktiivi-ohjaa-valistuneisiin-valaistusuudistuksiin-toimistoissa-kouluissa-myymaeloeissae-teollisuudessa-ja-ulkoalueilla.html>
- [Tan88] Tanaka, M. "High Frequency noise power spectrum, impedance and transmission loss of power line in Japan on intra-building power line communications," *IEEE Trans. Consum. Electron.* 1988, 34, 321-326.
- [Tao06] Tao L, Alexander D, 2006, "Real time Measurement of Power Disturbances: Part 1. Survey and a Novel Complex Filter Approach". *Electric Power Systems Research*. Vol. 76.
- [Täh10] L. Tähkämö, L. Halonen. Vihreämpää valaistusta lainsäädännöllä. Sähkö&Tele. 2010. Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Valaistussyksikkö.
- [Ulr06] Stein Ulrich, Carlsson Jan, Welinder Jan. Signal transmission via the low-voltage power grid. Elforsk report 06:22. SP Technical Research Institute of Sweden, April 2006.
- [Vin85] R. M. Vines, H. J. Trussell, L. J. Gale and J. B. O'Neal, "Impedance of the residential power distribution circuits," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-27, No. 1, February 1985.
- [VITO07] Flemish Institute for Technological Research NV ("VITO"). Lot 8: Office lighting. 2007.

- [VITO09] Flemish Institute for Technological Research NV ("VITO"). Lot 19: Domestic lighting. 2009.

### **Standardeja**

- [Ano94] "Power System Harmonics, Causes and effects of Variable Frequency Drives," *Relative to the IEEE 519-1992 Standard*, Raleigh, NC, U.S.A, August 1994.
- [Ano02] EN 50065-1, "Signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz-Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances", Suomen standardisoimisliitto SFS, 2002.
- [EN-61000-3-2] EN-61000-3-2. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase). Standardi.
- [IEC 61000-4-15] IEC 61000-4-15. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications. Standardi

### **EU direktiivit**

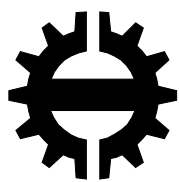
- [2005/32/EY] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2005/32/EY, energiaa käyttävien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettavien vaatimusten puitteista sekä neuvoston direktiivin 92/42/ETY ja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivien 96/57/EY ja 2000/55/EY muuttamisesta. 2005
- [2009/125/EY] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/125/EY, energiaan liittyvien tuotteiden ekologiselle suunnittelulle asetettavien vaatimusten puitteista. 2009.

### **EU asetukset**

- [244/2009] Komission asetus (EY) N:o 244/2009, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöönpanemisesta ympärisäteilevien kotitalouslamppujen ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta, 2009.
- [245/2009] Komission asetus (EY) N:o 245/2009, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöönpanemisesta loistelamppujen, joissa ei ole sisäistä virranrajoitinta, suurpaineipurkauslamppujen sekä virranrajoittimien ja valaisimien, joissa voidaan käyttää tällaisia lamppeja, ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta ja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2000/55/EY kumoamisesta, 2009.
- [859/2009] Komission asetus (EY) N:o 859/2009, asetuksen (EY) N:o 244/2009 muuttamisesta ympärisäteilevien kotitalouslamppujen ultraviolettisäteilyä koskevien ekologisten suunnitteluvaatimusten osalta, 2009.

- [347/2010] Komission asetus (EY) N:o 347/2010, asetuksen (EY) N:o 245/2009 muuttamisesta loistelamppujen, joissa ei ole sisäistä virranrajoitinta, suurpainepurkauslamppujen sekä virranrajoittimien ja valaisimien, joissa voidaan käyttää tällaisia lamppeja, ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta, 2010

## **Liite 1: Electronic loads and power line communication (PLC)**



**TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**M.SC. BASHIR AHMED SIDDIQUI**

**M.SC. MARKO PIKKARAINEN**

**DR. PERTTI PAKONEN**

**PROF. PEKKA VERHO**

**ELECTRONIC LOADS AND POWER LINE COMMUNICATION  
(PLC)**

**PROJECT REPORT**

# Table of Contents

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Table of Contents</b>                                                    | <b>2</b>  |
| <b>Chapter 1</b>                                                            | <b>4</b>  |
| <b>High Frequency Disturbances Caused by Electronic Loads to PLC</b>        | <b>4</b>  |
| 1.1 Introduction.....                                                       | 5         |
| 1.2 Power Electronic Loads.....                                             | 5         |
| 1.3 High Frequency Distortion .....                                         | 6         |
| 1.4 Emission by Different Electronic Equipment.....                         | 7         |
| 1.4.1. Fluorescent Lamps with HF Ballasts.....                              | 7         |
| 1.4.2. Filtered and Unfiltered Current through a Fluorescent Lamp.....      | 7         |
| 1.4.3. Network Effect with or without Lamp.....                             | 9         |
| 1.5 Frequency Domain Representation .....                                   | 10        |
| 1.6 Joint time-frequency Domain Representation .....                        | 11        |
| 1.7 Switched Mode Power Supply (SMPS) .....                                 | 15        |
| 1.7.1. Computer with Switched Mode Power Supply .....                       | 15        |
| 1.7.2. Frequency Domain Representation of Noise Generated by Computer ..... | 16        |
| 1.7.3. Spectrogram .....                                                    | 16        |
| 1.7.4. Measurement with no APFC .....                                       | 17        |
| 1.8 Interaction between Equipment in the Frequency Range 9-95 kHz .....     | 19        |
| 1.8.1. Experiments with Four CFLs .....                                     | 19        |
| 1.8.2. Distortion between Induction Cooker and CFLs.....                    | 21        |
| 1.9 Load affect on Power Line Communication.....                            | 21        |
| <b>Chapter 2</b>                                                            | <b>23</b> |
| <b>High Frequency Characteristics of Power Network and Loads</b>            | <b>23</b> |
| 2.1 Power Line Impedance .....                                              | 24        |
| 2.2 Load Impedance at High Frequencies .....                                | 28        |

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| <b>Chapter 3</b>  | <b>34</b> |
| <b>References</b> | <b>35</b> |

## **Chapter 1**

# **High Frequency Disturbances Caused by Electronic Loads to PLC**

## 1.1 Introduction

Power line communication (PLC) is a technique that employs the infrastructure of electrical power distributed system as a communication medium. In PLC system, the existing alternating current (AC) power lines serve as a transmission medium by which voice or data is transmitted to one or more receivers or load connected from an AC source. The system is attractive because it uses the existing lower voltage distribution network, since no new wiring is required. PLC system can provide number of services such as internet, home entertainment, home automation and enabling easy deployment of automated meter reading which is of most interest because 80% of the meters have to be remotely readable according to the legislation by the year 2014. In Europe, the available frequency intervals for communication systems in low voltage (LV) and medium voltage (MV) power networks are established by CENELEC EN 50065-1 [1]. This standard applies to electrical equipment using signals in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz to transmit information on low voltage electrical systems. It also specifies the allowed maximum signaling voltages used by the PLC system. The use of frequency band 3 kHz up to 95 kHz is restricted to electricity suppliers and their licensees. The object of the standard is to limit interference caused by signal transmission equipment to sensitive electronic equipment. However, effective implementation of high quality signal over power line is difficult enough, because of the unpredictable load, noise, attenuation and resonance effects. Power quality and high frequency interference problems have increased in power networks during the past few years with the introduction of sophisticated devices, whose performance is very sensitive to the quality of power supply. The proliferation of power electronic devices and nonlinear loads and the occurrence of electrical faults causes significant amount of power quality problems in distribution network [2].

## 1.2 Power Electronic Loads

In the recent years, large growth in the usage of electronic equipments, variable speed drives, fluorescent lamp with electronic ballast, computers, UPS etc. have been observed. With the advent of power electronics and proliferation of non-linear loads in industrial power applications, power harmonics and their effects on power quality are a topic of concern. Currently in the United States, only 15 to 20% of the utility distribution loading consists of non-linear loads. It is projected over the next ten years

that non-linear loads will comprise approximately 70 to 85% of the loading on nation's utility distribution systems [10].

All power electronics equipments generate and emit unwanted electrical signals (EMI noise) that can lead to performance degradation of PLC network. They generate high frequency conducted and radiated EMI noise and draw distorted line currents due to the sharp edges of the switching waveform with high  $dv/dt$ . Power electronic converters are widely used in many applications including motor drives, household appliances, electronic ballasts, computer supplies, power supplies for telecommunication equipment, etc. These power converters use the fast switching power semiconductor switches, such as MOSFET (Metal-oxide semiconductor field effect transistor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) as the preferred switching devices as they have many properties, such as higher efficiency, smaller size, and lower overall cost. However, fast switching speed of new converter/inverter technologies has the potential to cause EMI and high  $dt/dv$  [3].

### 1.3 High Frequency Distortion

The frequency range in the 'traditional' harmonic range up to 2 to 3 kHz has been under investigation for several years and large amount of knowledge has been gathered through the years on this issue. However, little or no attention is paid to the frequency range above the low-frequency harmonic range, or at least between 2 to 150 kHz. This is probably due to the apparent absence of well documented cases of interference found within this frequency range. Another more fundamental reason is the lack of appropriate measurement equipment to record and analyze high frequency phenomenon in PLC network.

One main reason for concern is the possible interference of high frequency distortion with power-line communications e.g., for automatic meter readings. The frequency range 9 to 95 kHz is used for the power-line communication [1] which is the same range that is often used when switching in switched mode power supplies, high frequency (HF) ballasts, etc.

Some potential sources of high frequency interference in PLC network can be categorized as follows:

- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Electronic fluorescent lighting ballasts & CFL lamps
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)

A common high frequency noise source is fluorescent lamp, when it is set to medium brightness, the maximum inrush current may cause impulse of several tens volts. Other potential sources of high frequency interference are AC motors (which can be found in vacuum cleaners, electric shavers and many common kitchen appliances) and switched power supplies that can cause significant amount of disturbance in PLC network [4].

## **1.4 Emission by Different Electronic Equipment**

This section will describe high-frequency interference problem with examples caused by different sources e.g., fluorescent lamps, computers, laptop battery charger, TFT screen, LDC screen etc.

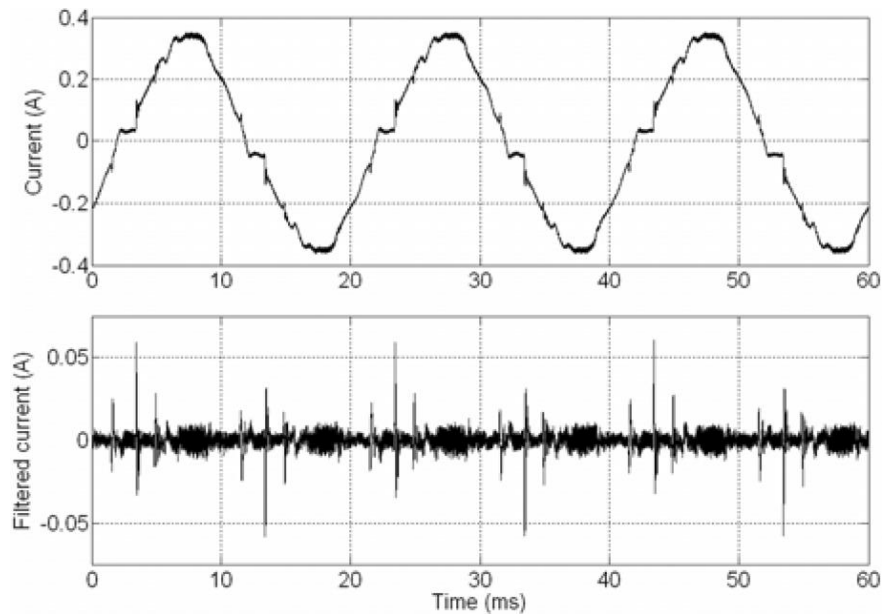
### **1.4.1. Fluorescent Lamps with HF Ballasts**

This type of load is increasing rapidly in offices and public buildings and therefore was considered a suitable load for examination. These lamps are equipped with HF ballasts with a voltage range of 230 to 240 V and nominal current between 0.29 and 0.33 A. Active Power Factor Correction (APFC) is really common among fluorescent lamps to reduce the harmonic content generated by the loads. For example, lighting equipment larger than 25 W has quite strict limits and therefore the use of APFC is common with this type of equipment. The APFC circuit is an additional source of HF signals next to the switching frequencies used for the dc/dc conversion in the electronic equipment.

### **1.4.2. Filtered and Unfiltered Current through a Fluorescent Lamp**

Figure 1.1 depicts the unfiltered and filtered current feeding a fluorescent lamp equipped with high-frequency ballast. The measurement took place in the laboratory of EMC-on-Site in Skellefteå (Sweden). The unfiltered current waveform shows a kind of notching slightly after the zero crossing current and a high-frequency oscillation at the

end of each notch. A high-frequency ripple can also be noticed in the current waveform around the maximum values. In Europe, this type of lighting equipment has to comply with the harmonic regulations of EN 61000-3-2. As a result, almost all fluorescent lights with high-frequency ballasts use active PFC circuits to reduce the harmonic content in the current.

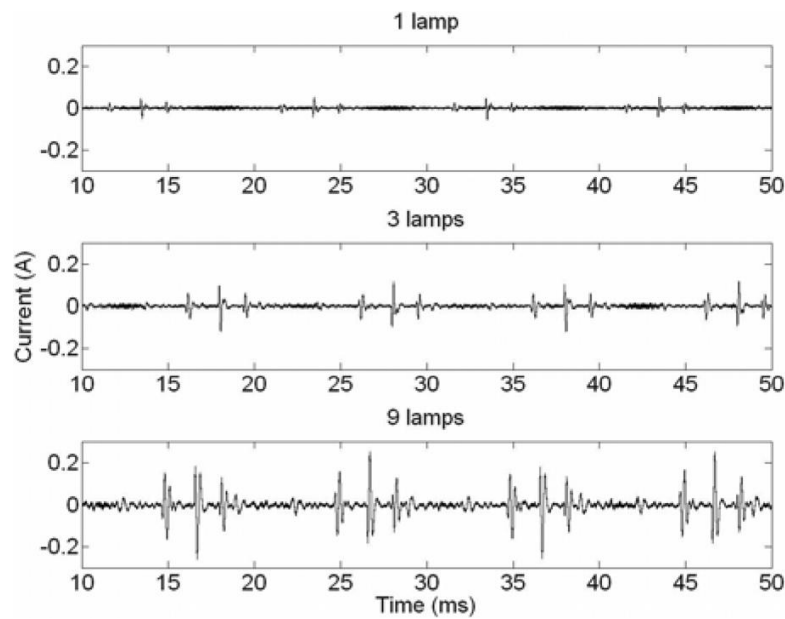


**Figure 1.1:** Unfiltered (top) and filtered current feeding a fluorescent lamp [6].

In the filtered current plot, current is filtered with a second order high-pass Butterworth filter with the cut-off frequency at 2 kHz. The current waveform shows recurrent oscillations that correspond with the end of the notches shown in the non-filtered current. The reason for the notches and the associated oscillations is clearly due the fact that the converter with active PFC is not able to control the current close to its zero crossing. The resulting disturbance is called “zero-crossing distortion” or “crossover distortion” [13], [14]. The distortion does not occur exactly with the current zero-crossing at the equipment terminals because of the presence of an electromagnetic-interference (EMI) filter between the equipment terminals and the terminals of the converter.

A high-frequency oscillation is present in between the zero-crossing oscillations in both the filtered and non filtered current. This oscillation is associated with the switching used in the active PFC circuits. Both the filtered and the non filtered current show a high-frequency non damped oscillation that is only present in between the zero-crossing

oscillations (i.e., with current maximum). This oscillation is associated with the switching used in the active PFC circuits. If the high-frequency oscillation is synchronized with the fundamental frequency, there will be an adding effect due to multiple lamps. Fig. 1.2 shows the filtered current feeding one through nine lamps. It is clearly visible that the amplitude of the oscillation increases with the number of lamps. But the amplitude of HF signals visible in between the notches seems not to increase with the number of lamps.



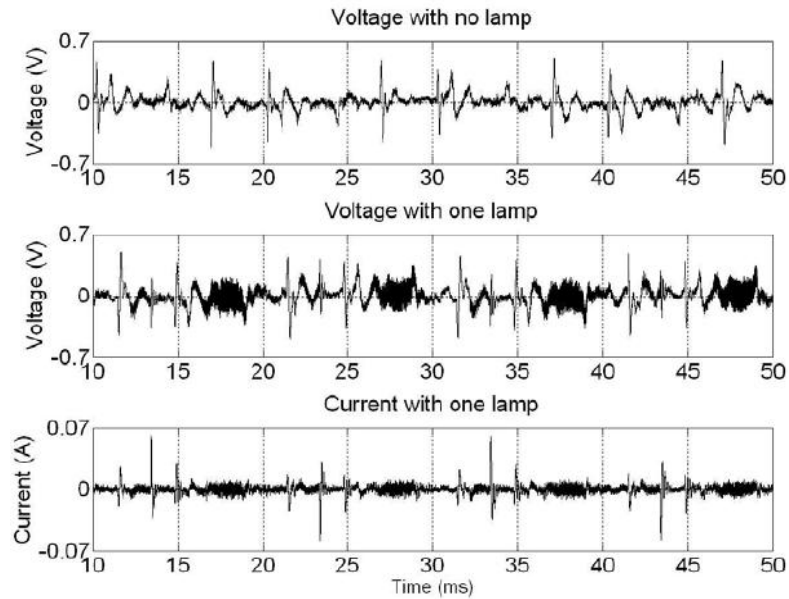
**Figure 1.2:** Filtered current for one, two and three lamps [6].

#### 1.4.3. Network Effect with or without Lamp

In Fig. 1.3 the voltage is filtered with the analogue filter and the current is digitally filtered with a second order high-pass Butterworth filter with the cut-off frequency at 2 kHz. The upper curve shows the filtered voltage with some background noise when no lamp is connected to the network. The middle curve shows the filtered voltage with one lamp connected, and the lower curve shows the filtered current measured together with the voltage in the middle curve.

In the upper curve high-frequency notches in the voltage waveform measured without a lamp can be easily observed. These notches can be assumed to originate from other sources connected to the LV network. Additional high-frequency notches can be clearly seen in the middle curve when lamp is connected to the network. The high-frequency

ripple in voltage due to the lamp current is visible as well. Note that the oscillations in current correspond to oscillations in the voltage.



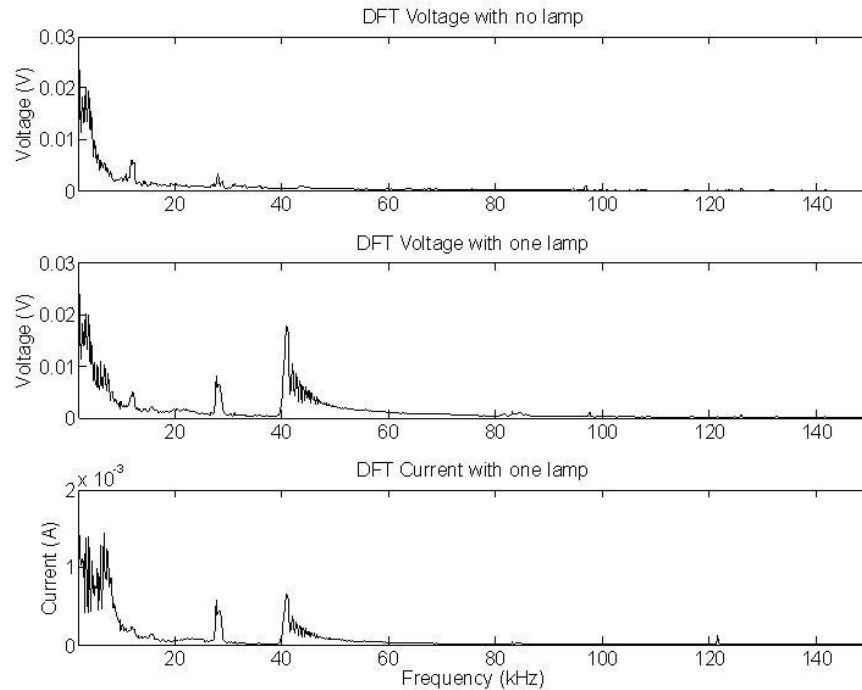
**Figure 1.3:** Filtered voltage with lamp (top), without lamp (middle) and current (bottom) drew by the lamp [5].

## 1.5 Frequency Domain Representation

Fig. 1.4 depicts the spectrum of voltage and current with and without lamp connected to the LV network. The two upper graphs show the voltage spectrum with and without lamp connected.

It is very evident from the graph that the two main signals above 20 kHz: around 28 kHz and upwards from 41 kHz is clearly visible but they are not found in the top graph when no lamp is connected. The same frequency components are also visible in the current spectrum when the lamp is in operation. It is therefore reasonable to assume that these signals are generated by the ballast.

A frequency component in the top curve around 12 kHz somewhat becomes smaller in the middle curve after connection of the lamp. The lamp may act as a filter for this frequency component. This is also worth noticing that small frequency component around 28 kHz is present in the top curve when no lamp is present. This frequency component results in much higher amplitude after the connection of the lamp. The background distortion may be due to lamps elsewhere.



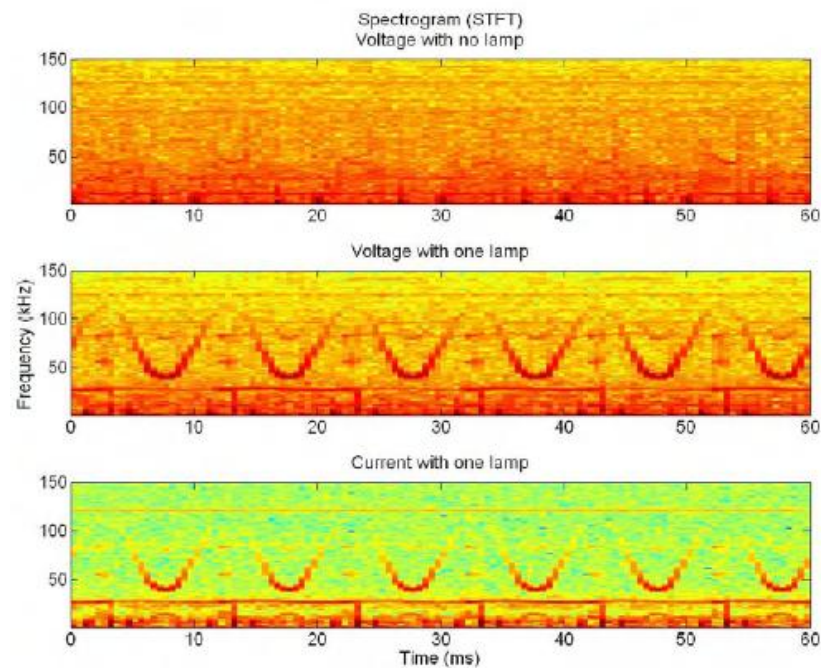
**Figure 1.4:** Spectrum of the background voltage: no lamp connected (top), lamp connected (centre) and the current drawn by the lamp (bottom) in the range 2 to 150 kHz [5].

## 1.6 Joint time-frequency Domain Representation

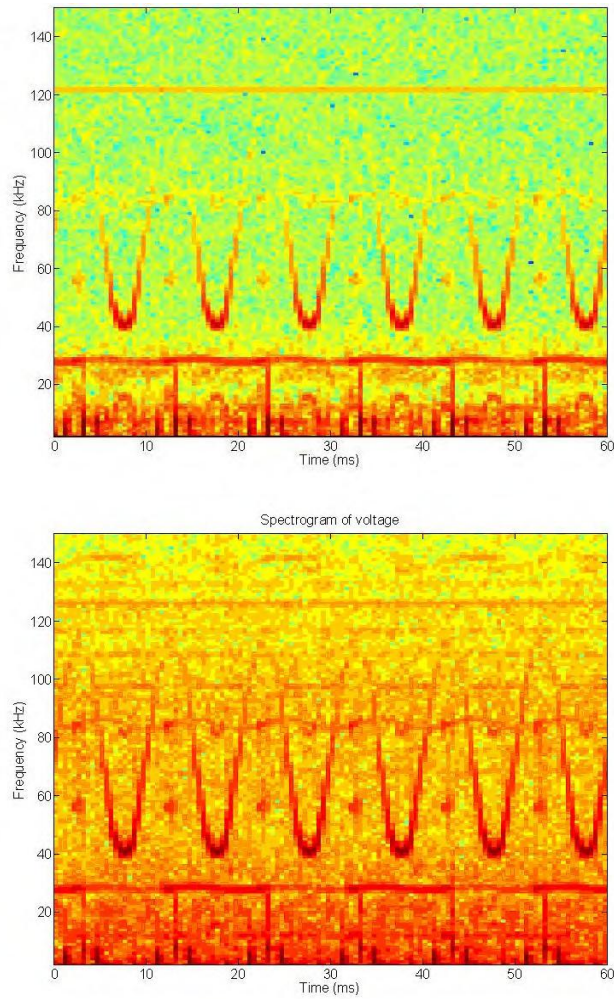
The spectrogram of voltage with and without lamp is compared in Fig. 1.5. The lamp current is also shown for comparison purposes. The background voltage (upper figure) shows no apparent pattern. When the lamp is connected, the variable-frequency component that is so clearly visible in the current spectrogram also shows up in the voltage spectrogram.

The Short Time Fourier Transform (STFT) of the voltage and current is shown separately in Fig. 1.6. The vertical scale covers the range between 2 and 150 kHz. Both spectrograms show about the same pattern. Note that red is highest amplitude, blue the lowest amplitude. Many of the higher frequency components are synchronized with the fundamental frequency, i.e. 50 Hz. The frequency around 28 kHz shows an almost constant frequency that has only a minor change in amplitude, but the signal around 41 kHz shows an arc-like function and is probably due to variable switching frequency. The high-frequency notches are visible as small lines in the lower frequency range

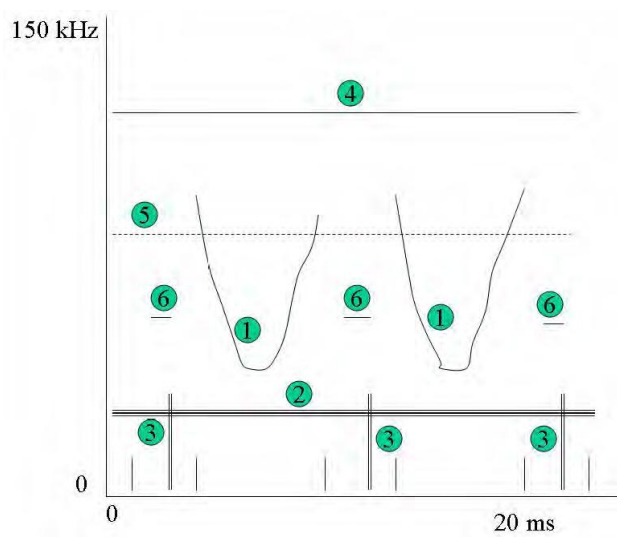
between the variable switching frequencies. The high frequency notches are slightly shifted in time compared to the middle of the two variable frequency components.



**Figure 1.5:** The spectrogram of voltage with no lamp (upper), voltage with one lamp (middle) and the current with one lamp (lower) [5].



**Figure 1.6:** Spectrogram of the filtered current (top) and voltage (bottom) [5].



**Figure 1.7:** Explanation of the frequency components found in the measured current and voltage spectrogram [5].

The time-frequency components that are visible in the spectrogram are referenced by numbers as shown in the Fig. 1.7 can be summarized as follows.

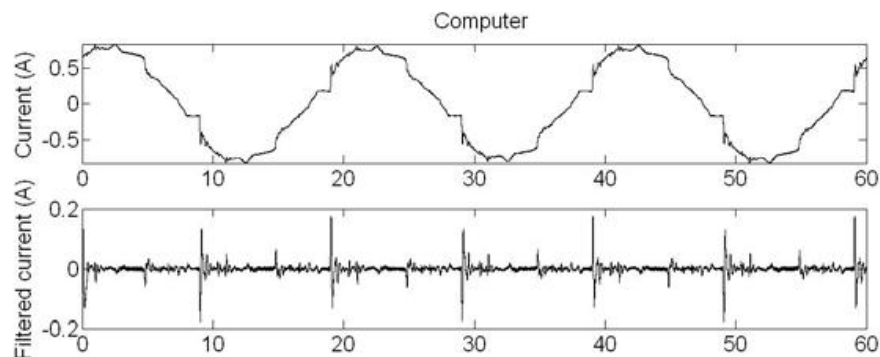
1. Varying frequency that is synchronized with the fundamental frequency i.e. 50 Hz that spreads from around 40 kHz up to more than 100 kHz. This component is presumably generated by the ballast.
2. Almost a stationary signal at about 28 kHz. Presumably generated by the ballast according to Fig. 1.4.
3. High-frequency notches in the lower frequency range are visible in Fig. 1.3. It repeats every 10 ms and therefore synchronized with the power system frequency. The main oscillation, in the middle of the group of three, is also presumably generated by the ballast.
4. Stationary frequency is visible around 120 kHz but the origin of this frequency is not known yet. It is assumed to be generated elsewhere. Note that the exact same frequency is not shown in both the voltage and the current. The frequency in the voltage is about 125 kHz, and the frequency in the current is about 120 kHz.
5. Component of constant frequency around 82 kHz, but randomly intermittent amplitude. There appears to be some correlation with the component around 55 kHz (component 6).
6. A short instantaneous frequency is showing up at approximately 55 kHz near the zero crossing and therefore considered as synchronized with the power system frequency. This component is visible in the background voltage and is therefore also presumably generated by the ballast according to Fig. 1.5.

## 1.7 Switched Mode Power Supply (SMPS)

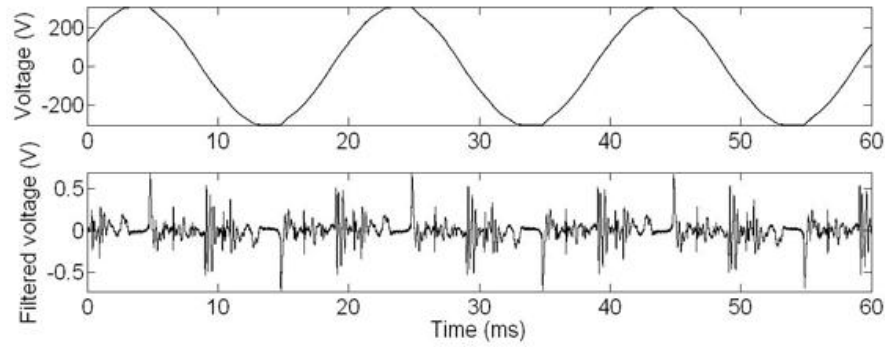
A switched-mode power supply (SMPS) is an electronic power supply embedded with a switching regulator in order to be highly efficient in the conversion of electrical power. An SMPS transfers power from a source to a load while converting voltage and current characteristics. The transistor of a switching mode supply switches very quickly (typically between 50 kHz and 1 MHz) between full-on and full-off states which reduces the wasted energy. Voltage regulation is provided by varying the ratio of on to off time. On the other hand, linear supply must dissipate the excess voltage to regulate the output. The main advantage of this method is greater efficiency because the switching transistor dissipates little power when it is outside of its active region. They are, however, more complicated, the generation of high-amplitude, high-frequency energy that the low-pass filter must block to avoid electromagnetic interference (EMI), and a ripple voltage at the switching frequency and the harmonic frequencies of it.

### 1.7.1. Computer with Switched Mode Power Supply

The measurement taken from a computer with a switch mode power supply equipped with active power factor correction is shown in Fig. 1.8. Both current and voltage waveform filtered by digital and analog filter, respectively are shown in the figure. The current waveform seems quite close to sinusoidal with the exception of some small deviations especially around the zero crossing. The current is slightly leading the voltage. The filtered voltage waveform shows some minor recurrent oscillations that are synchronized with the fundamental frequency at 50 Hz.



(a)



(b)

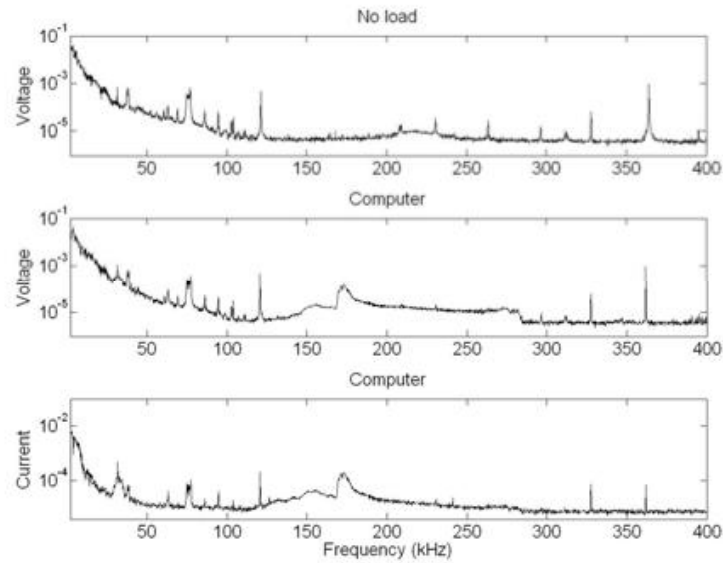
**Figure 1.8:** Voltage and current waveform at the terminals of a computer (a) Current, Filtered current (b) Voltage and filtered voltage [7].

### 1.7.2. Frequency Domain Representation of Noise Generated by Computer

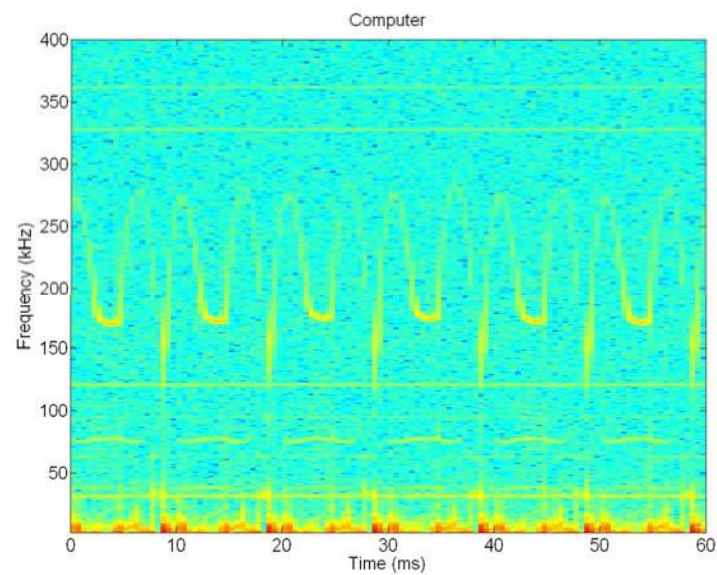
A frequency domain representation using a discrete Fourier transform (DFT) of the voltage and current at the terminal of the computer is presented in Fig. 1.9. The behavior of the network with or without load is also shown. Some narrowband components in both voltage and current waveform are visible. Most likely, it is the voltage distortion that drives the current distortion. The middle and lower plot shows the spectrum of the voltage and current when computer is connected. A wideband component is clearly visible from about 125 kHz to 280 kHz. Same kind of wideband component can also be noticed in the current waveform. Therefore, we can assume that these components are generated by the computer.

### 1.7.3. Spectrogram

A combined time-frequency domain representation is a good way to analyze the waveform. A short time Fourier transforms is applied to the current drawn by the computer as shown in Fig. 1.10. It is concluded that the components visible from 125 to 280 kHz are in fact a time-varying narrow-band signal. The signal shifts in frequency with a period of 10ms and is therefore synchronized with the power system frequency at 50 Hz.



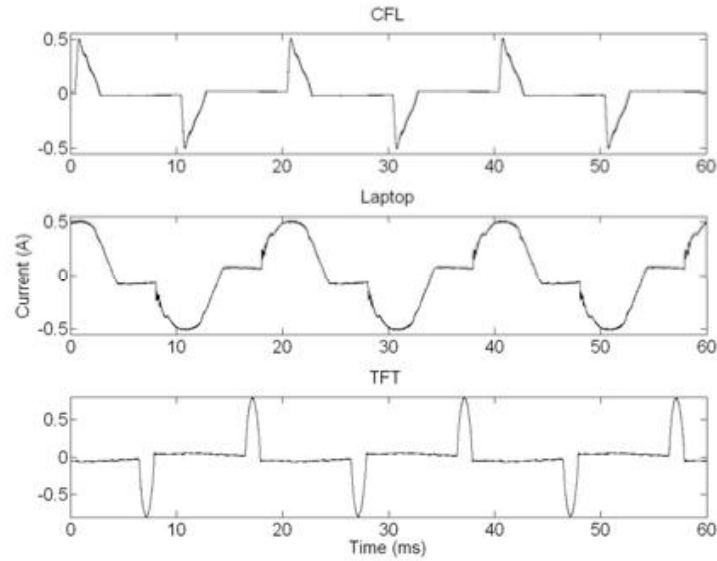
**Figure 1.9:** The spectrum of the background noise (upper). The voltage (middle) and current (lower) at the terminals of the computer [7].



**Figure 1.10:** The spectrogram of the current drawn by the computer [7].

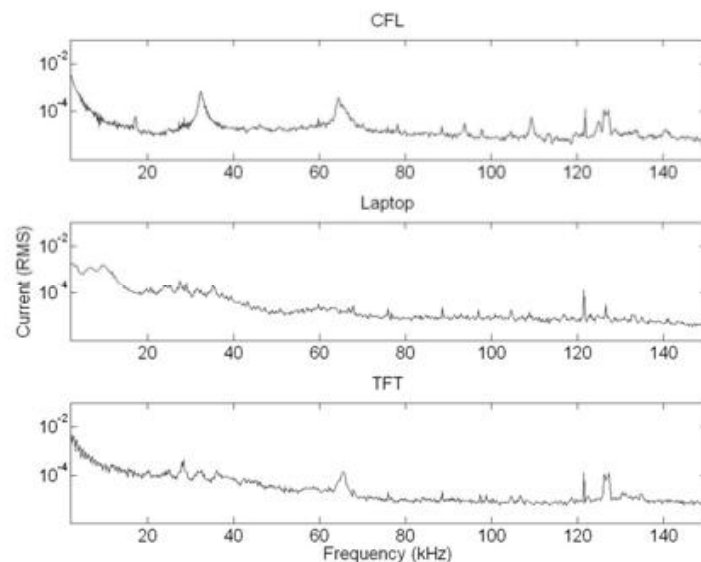
#### 1.7.4. Measurement with no APFC

More measurements of the current drawn by a computer compact fluorescent lamp (CFL), a laptop charger, and a TFT screen are shown in Fig. 1.11. Since no APFC is used during the measurement, waveform distortion is even more in all the three cases comparing to Fig. 1. 8.



**Figure 1.11:** Current drawn by a CFL (top), Laptop (middle) and TFT screen (lower) [7].

The frequency domain representation of the current taken from CFL, Laptop and TFT screen are shown in Fig 1.12. A wideband spectrum around 35 and 65 kHz is clearly visible in the spectrum of CFL and TFT. The laptop charger shows rather a smooth spectrum.



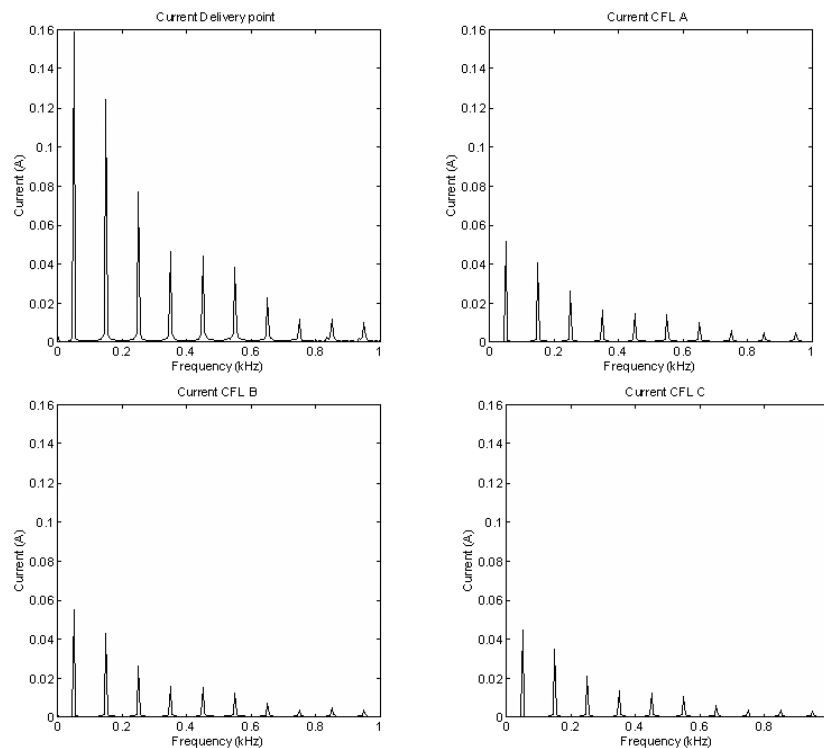
**Figure 1.12:** The spectrum of the current drawn by a CFL (upper), Laptop (middle) and TFT screen (lower) [7].

## 1.8 Interaction between Equipment in the Frequency Range 9-95 kHz

A study has been done in Sweden to investigate the effect of low impedance of individual devices that deteriorate the performance of the PLC network. Most electronic equipment forms a much lower impedance path to the grid. That result the conducted disturbances in this frequency range to flow between devices instead between devices and the grid.

### 1.8.1. Experiments with Four CFLs

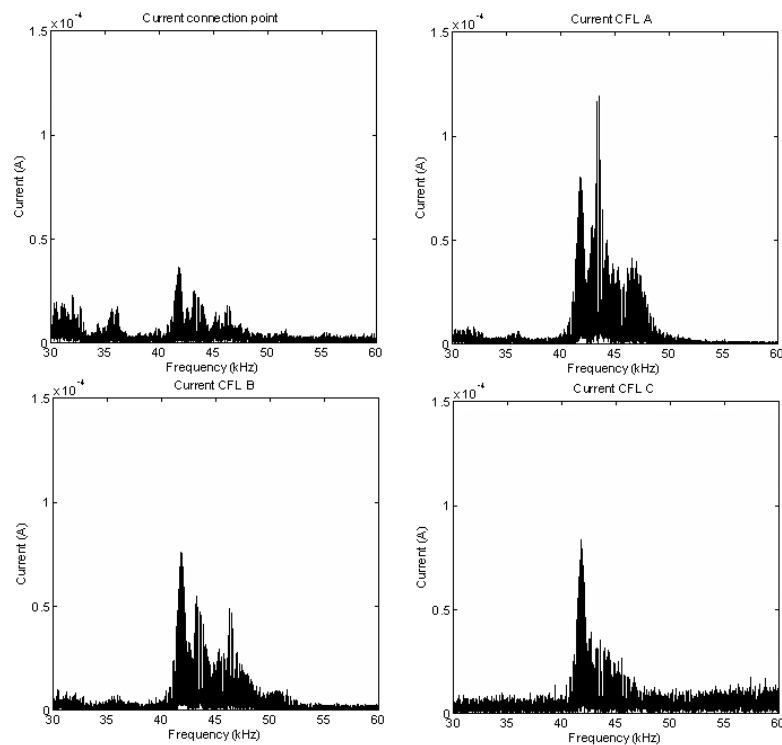
In this experiment, the effect of four identical compact fluorescent lamps connected to the network one at a time is observed. No other electronic load is taken into account during this experimental setup to mainly observe the distortion caused by those lamps. Fig. 1.13 shows the summing effect of current harmonic contents of three lamps and then the individual effect of those lamps at the connection point as well.



**Figure 1.13:** The spectrum of the current drawn by a CFL (upper), Laptop (middle) and TFT screen (lower) [7].

The given spectrum is obtained by taking a DFT over 200 ms window. It is clearly evident from the plot that the amplitude of the harmonics at the connection point is the sum of the amplitude of the harmonics produced by individual lamps.

But this doesn't seem valid for the case with higher frequencies. Fig. 1.14 shows the current spectrum (30-60 kHz) for the sum of the amplitudes of three lamps and then individuals at the connection point. The sum of current amplitude at the connection point is smaller than the current amplitude at the terminal of individual lamps.

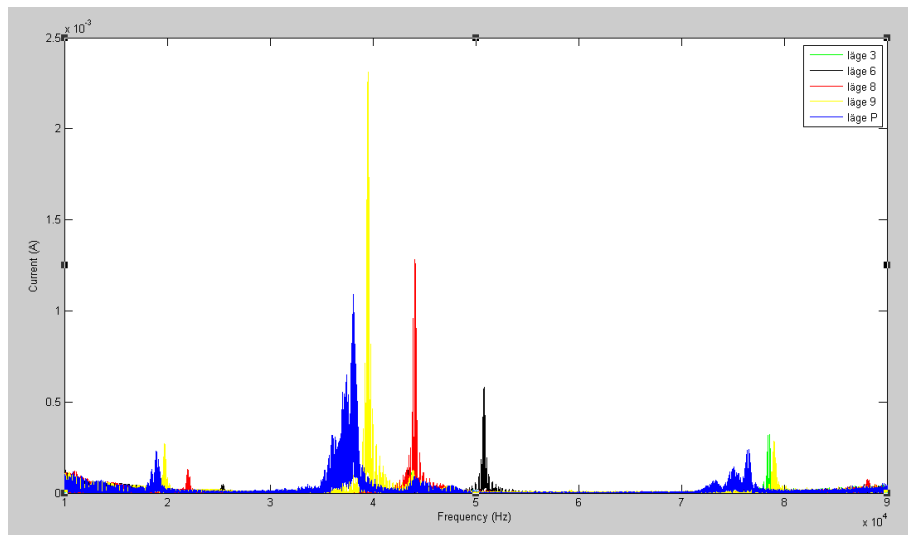


**Figure 1.14:** Current spectrum for the sum of three lamps (top left) and for three individual lamps [8].

Conclusion can be drawn from the above measurements that the main currents in this frequency range don't flow between equipment and the grid but between the equipments. It means that grid has high impedance for this frequency range. This is an important difference with lower frequency range (below 2 kHz) as shown in Fig. 1.12 where the distortion flows between the equipment and the grid.

### 1.8.2. Distortion between Induction Cooker and CFLs

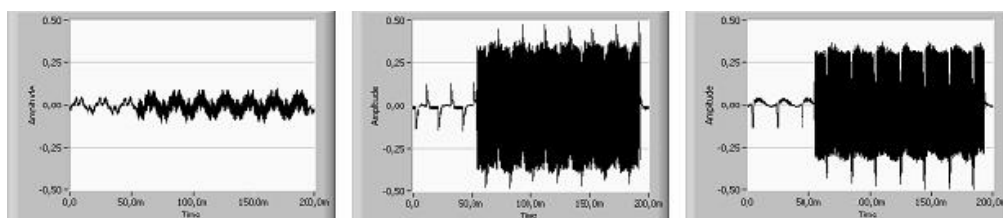
During this measurement a CFL is connected close to an induction cooker to observe the influence between devices. The current across the CFL is measured for different states of the induction motor, corresponding to different amount of energy delivered to the cooking process. The spectrum shown in Fig. 1.15 was obtained by taking a discrete Fourier transform over a 200 ms window. The different colors correspond to different states of the induction cooker. The horizontal scale is from 10 to 90 kHz. It can be concluded from the figure that neighboring device can have a strong effect on the emission and this influence does not have to be time-independent.



**Figure 1.15:** Spectrum of the current across CFL close to an induction motor [8].

## 1.9 Load affect on Power Line Communication

This study is conducted to show how different load affects power line communication. A setup was built using power line transceiver, a concentrator is used as receiver and energy saving lamp is connected to the neighboring building. The current received by the concentrator (left), current absorbed by the load (middle) and the current emitted by the transceiver (right) is shown in Fig. 1.16. The energy saving lamp forms a low-impedance path so that major part of this current absorbs by the lamp and very little reaches to the concentrator.



**Figure 1.16:** From left to right, Concentrator, 4W energy saving lamp and Power Meter Transceiver [9].

## **Chapter 2**

# **High Frequency Characteristics of Power Network and Loads**

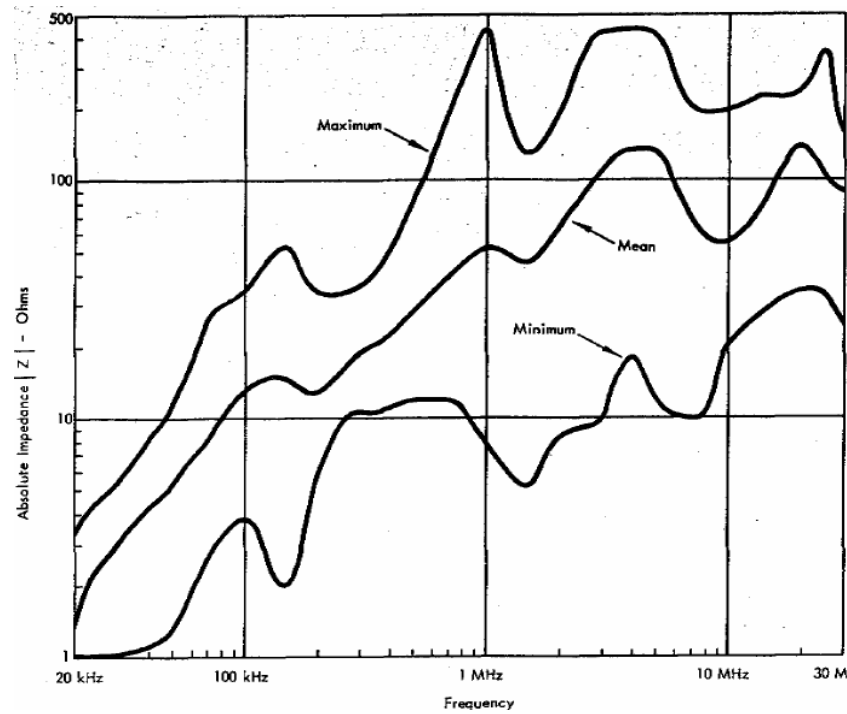
## 2.1 Power Line Impedance

There hasn't been carried out much research focused on high frequency characteristics of power line communication. Power line communication research has been mainly concentrated on home automation, broadband indoor communications and broadband data transfer in a low voltage distribution network between home and transformer station. Among the main technical challenges in power line communication, the PLC channel is a very harsh and noisy transmission medium because of its frequency selective and time-varying transfer function that exhibits several notches in the band of interest; moreover, a strong time-varying noise (colored background noise, narrowband noise, impulsive noise) is present and poses even more challenges in the path of successful communication. The channel transfer function of the power line may vary abruptly when the topology changes, i.e. when devices are plugged in or out and switched on or off.

According to studies done by H. Phillips in [11], the input impedance of power line channel is dependent on location and frequency and is typically in the range of few ohms to few kilo- ohms. At some frequencies, some peaks have been reported in the impedance characteristics. The impedance is influenced by characteristics impedance as well as connected electrical loads. According to statistical analysis of the measurement performed by Phillips in [12] in the frequency band 0–30 MHz, the average input impedance of the distribution network is between 100 ohms to 150 ohms.

The line losses, impedance mismatches, impedance discontinuities, low impedance loads and branch cables cause attenuation in a power-line channel [13]. In addition, the power line channel attenuation is highly frequency dependent and containing multiple narrowband notches in the frequency space. These notches come from the multipath signal propagation caused by the impedance mismatches of the distribution network. The statistical analysis of the channel measurements introduced in [12] shows that the average signal attenuation in the power line channel increases in the frequency band 300 kHz–5 MHz from 30 dB to 45 dB and in the frequency band 5–30 MHz from 45 dB to 50 dB.

The residential impedance is a crucial point for the PLC system design. The residential impedance is determined by the characterization of the distribution transformer secondary windings and the entrance cables, house wiring and electric loads. Fig. 2.1 illustrates the frequency response of a typical power line examined by the Nicholson and Malack.



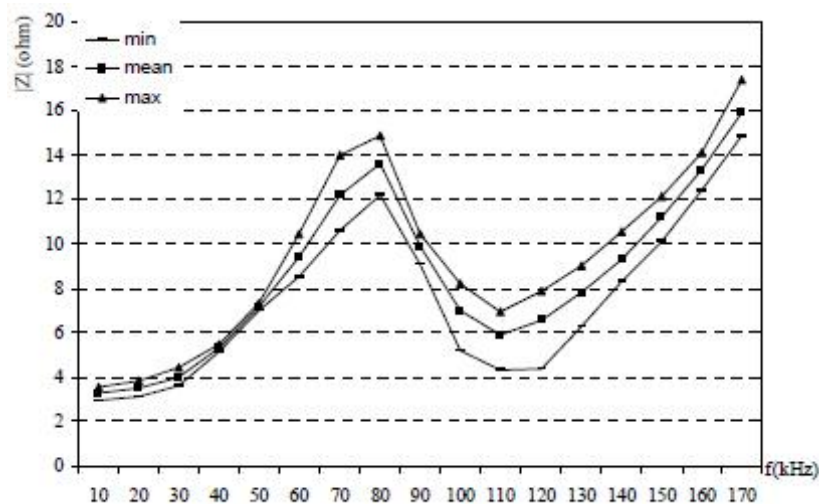
**Figure 2.1:** Power line impedance measurement by Nicholson and Malack [14].

Nicholson and Malack measured the power line impedance in the frequency band 20 kHz to 30 MHz and stated that the power line impedance increased from 10 ohms to 25 ohms in the frequency range between 20 kHz to 150 kHz [14].

Vines's studies partially confirm the results of the studies of Nicholson and Malack for frequencies up to 20 kHz [15]. Vines injected the voltage signal via a bandpass filter and measure the voltage and current at the frequency of interest. Their studies show that the impedance of residential power line is 1-12 Ohms. The affect of household loads on the overall residential impedance are also covered in Vines's studies. He stated that the impedance of most of the electrical devices is high compared to the unloaded power line impedance. Furthermore, the EMI filtering of switched mode power supplies causes problems as the capacitors used for these filters bypass the transmitted signal and PLC nodes should not be connected to these points. Tanaka measured the noise power

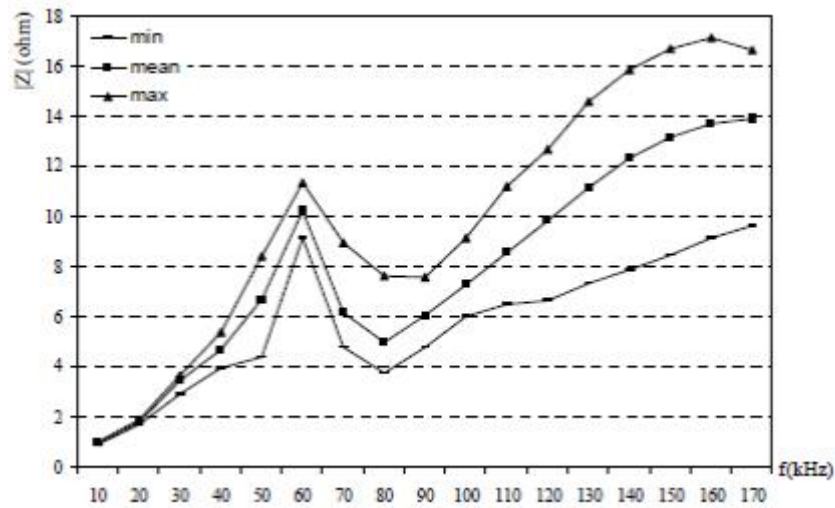
spectrum of power line at 10 kHz-100 MHz and the impedance characteristics and transmission loss power line at frequency band (10 kHz-20 MHz). He reported power line impedance from 1-20 ohms for the frequency band 10 kHz-150 kHz [24].

Impedance measurement of power lines in rural, urban and industrial area in Turkey is thoroughly studied in [25]. The frequency range of the measurement is chosen between 10 kHz to 150 kHz which is quite close to CENELEC bands. The main voltage is 220 VAC with frequency of 50 Hz for all the three environments in Turkey. Impedance measurements are made for frequencies ranging from 10 kHz to 170 kHz with 10 kHz frequency steps. Impedances are classified as min, mean and max values. This classification is important because the behaviour of power line channel is quite random and time dependent as the loads are connected and disconnected to the low voltage network, thus, changing the impedance of power line all the time. The measured data presented in this paper has been collected during different time of the day. The mean, max and min values are calculated for each frequency and graphical representations are made available which can be examined in the next section. Fig. 2.2, 2.3 and 2.4 shows the measured impedance vs. frequency plot for rural, urban and industrial power line, respectively. The impedance found to be 3-17 ohms, 1-17 ohms, and 1-21 ohms for rural, urban and industrial environment power line, respectively.



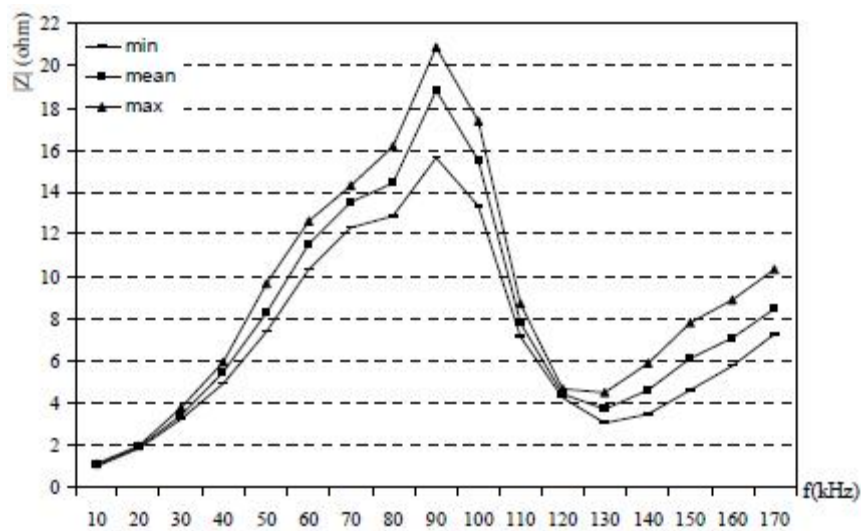
**Figure 2.2:** Impedance vs. frequency for rural environment [25].

It can be noticed from the above graph that  $|Z|$  decreases at the frequencies between 80-110 kHz bands while it increases at other frequencies. There is a resonance and local max at 80 kHz for rural power line.



**Figure 2.3:** Impedance vs. frequency for urban environment [25].

For urban environment, the impedance decreases at frequencies 60-80 kHz. Resonance and local maximum can be noticed at 60 kHz.

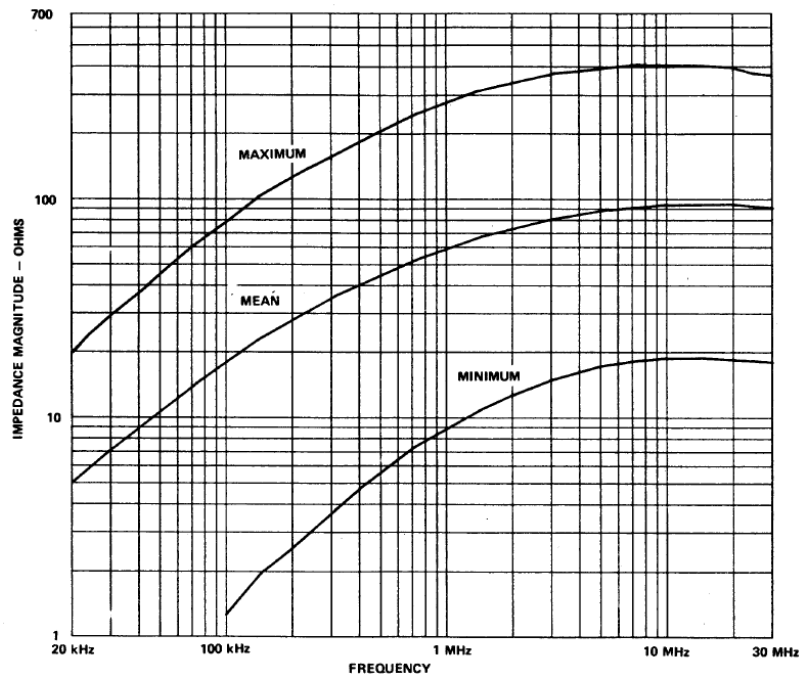


**Figure 2.4:** Impedance vs. frequency for industrial environment [25].

## 2.2 Load Impedance at High Frequencies

Load impedance is a highly time dependent quantity. There have been some studies on load impedance in PLC network reported in [16], [17] and [18]. The most extensive studies on this subject have been done by Malack and Engstrom of IBM, who measured the RF impedance of 86 commercial AC power distribution systems in six European countries. In this study, impedance measurement for various possible loads has been performed. These measurements show that the impedance of residential loads increases with frequency and are in the range of 1.5 to 80 ohms at 100 kHz. Fig. 2.5 shows the graph of aggregate European power line impedance [18].

Further study about the load impedance measurement in Turkish homes is reported in [19]. Fig. 2.6 shows a list of measurement for average loads in Turkish homes for frequency range 50 kHz to 200 kHz. It can be noticed that the impedance of the household appliances varies with frequency. The amount of load also varies during the day because people engaged in different kind of activities during different period of time. This varying behavior has great impact on the load impedance of power line channel.



**Figure 2.5:** Aggregate European power line impedance [18].

| APPLIANCE       | Avrg.<br>Power<br>(W) | RF IMPEDANCES MAGNITUDE<br>(KILOOHMS) |      |      |       |       |
|-----------------|-----------------------|---------------------------------------|------|------|-------|-------|
|                 |                       | Frequencies (KHz)                     |      |      |       |       |
|                 |                       | 50 Hz                                 | 50   | 100  | 150   | 200   |
| Coffeemaker     | 1200                  | 0.07                                  | 0.07 | 0.07 | 0.07  | 0.07  |
| Dishwasher      | 1200                  | 4.75                                  | 0.02 | 0.01 | 0.006 | 0.004 |
| Mixer           | 127                   | 8.25                                  | 23.5 | 10.4 | 6.43  | 4.91  |
| Oven            | 2500                  | 0.02                                  | 0.02 | 0.02 | 0.02  | 0.02  |
| Iron            | 1200                  | 0.85                                  | 0.35 | 0.40 | 0.46  | 0.52  |
| Toaster         | 1150                  | 3.50                                  | 0.03 | 0.02 | 0.01  | 0.007 |
| Washing mac.    | 512                   | 5.25                                  | 32.5 | 27.2 | 21.5  | 17.4  |
| Air conditioner | 860                   | 45.0                                  | 11.2 | 9.75 | 6.35  | 4.45  |
| Fan             | 88                    | 11.9                                  | 27.2 | 18.9 | 12.6  | 8.50  |
| Hair dryer      | 600                   | 4.72                                  | 47.1 | 39.2 | 24.20 | 12.70 |
| Shaver          | 15                    | 30.0                                  | 11.0 | 8.50 | 7.25  | 6.75  |
| Radio           | 70                    | 21.2                                  | 23.3 | 6.66 | 4.28  | 3.15  |
| Television      | 240                   | 0.05                                  | 0.06 | 0.02 | 0.01  | 0.006 |
| Type recorder   | 145                   | 2.53                                  | 21.4 | 4.7  | 3.13  | 2.50  |
| TV Anten. Amp   | 4                     | 100                                   | 21.4 | 13.3 | 4.70  | 5.09  |
| Vacuum cleaner  | 600                   | 47.0                                  | 8.72 | 3.13 | 2.01  | 1.36  |
| Lamp            | 75                    | 0.63                                  | 0.63 | 0.63 | 0.63  | 0.63  |
| Heater          | 2000                  | 0.25                                  | 0.25 | 0.25 | 0.25  | 0.25  |
| Computer (PC)   | 500                   | 6.00                                  | 0.27 | 0.30 | 0.315 | 0.33  |

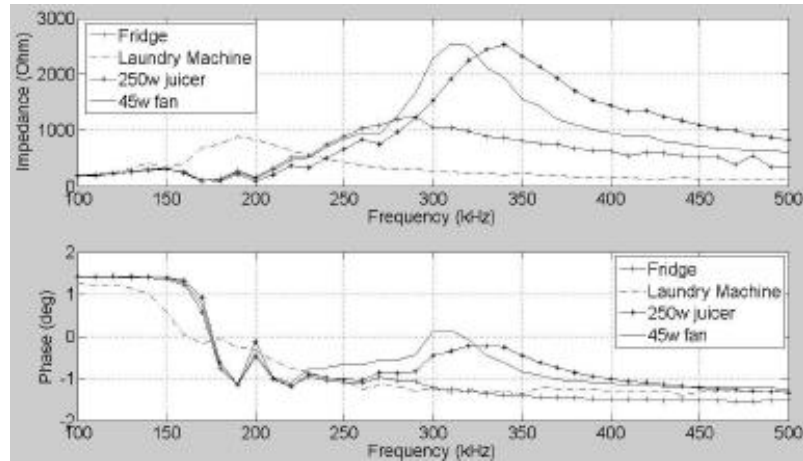
**Figure 2.6:** Load impedance measurement performed in Turkish homes [19].

Further studies have been reported in [20] by S. Tsuzuki and T. Takamatsu about the analysis of in-door power line branch impedance but it doesn't involved effect of loads on power line impedance. The effect of low voltage distribution network (LVDN) topology variation on signal multi-path interference and impedance mismatch has analyzed by A. Despina and A. Theodore in [21] but they haven't said much about loads effect on impedance, either. In their further research in [22], they have introduced the effect of appliances loads on LVPLC performance.

Some measurement results of impedance variation with frequency are reported in [23]. The measurement frequency range is from 100 kHz to 500 kHz. For the conveyance of analysis, electric loads are distributed into five groups, which are as follows.

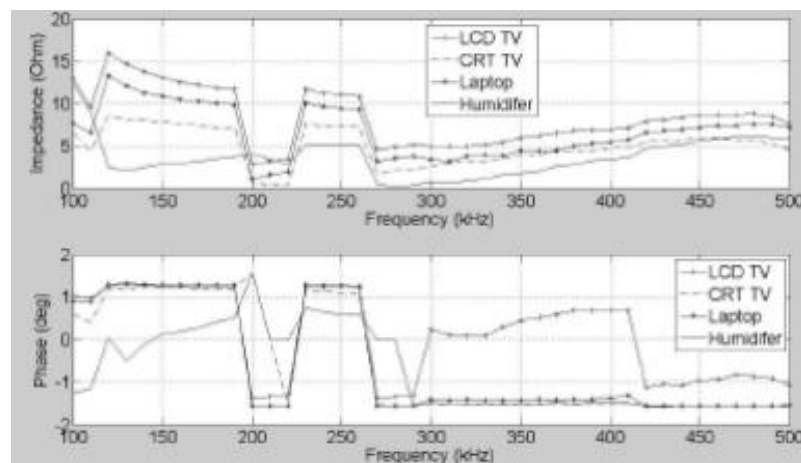
- Group 1 includes motor based loads i.e. fridge, laundry machine, Juicer and Fan. The impedance vs. frequency domain curve is shown in Fig. 2.7.

- Group 2 contains AC-DC power supply loads which include LCD TV, CRT TV, Laptop and Humidifier in our measurement. Fig. 2.8 depicted the impedance vs. frequency domain curve.



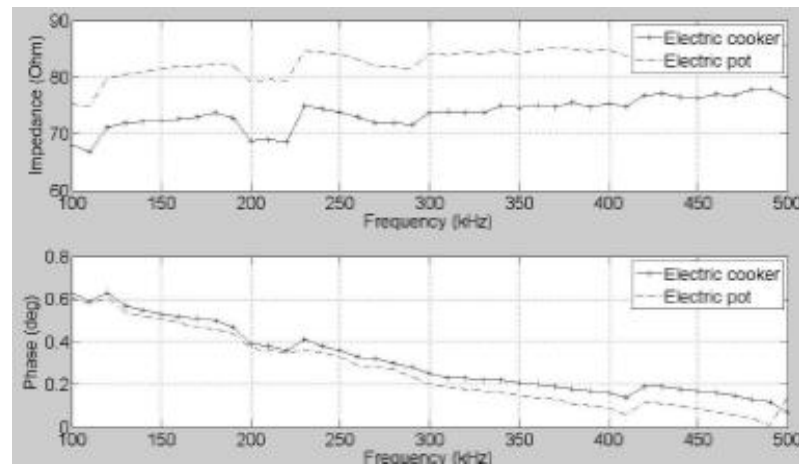
**Figure 2.7:** Impedance of motor based loads.

- Thermal resistance loads are categorized in group 3 which are mainly used in kitchen, such as electric cooker and electric pot. Frequency vs. impedance curve is shown in Fig. 2.9.



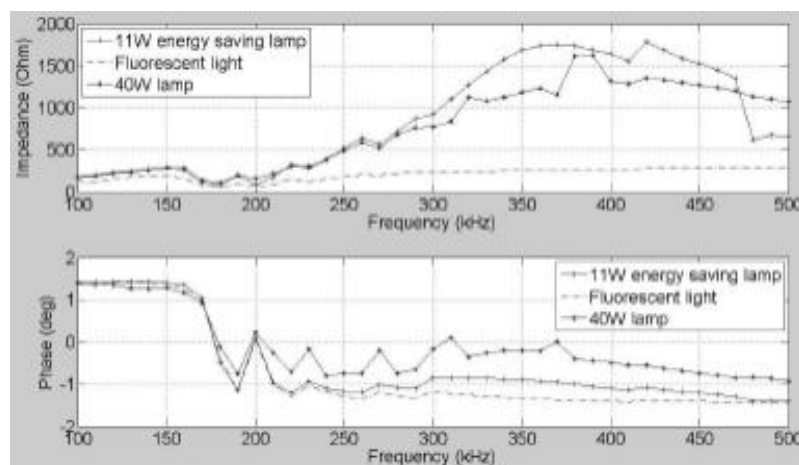
**Figure 2.8:** Impedance of AC-DC power supply loads.

- Group 4 deals with lamps based loads. Measurements have been taken using 11 Watt energy saving lamps, 40 Watt common lamp and compact fluorescent lamp. Measurement curve is shown in Fig. 2.10.

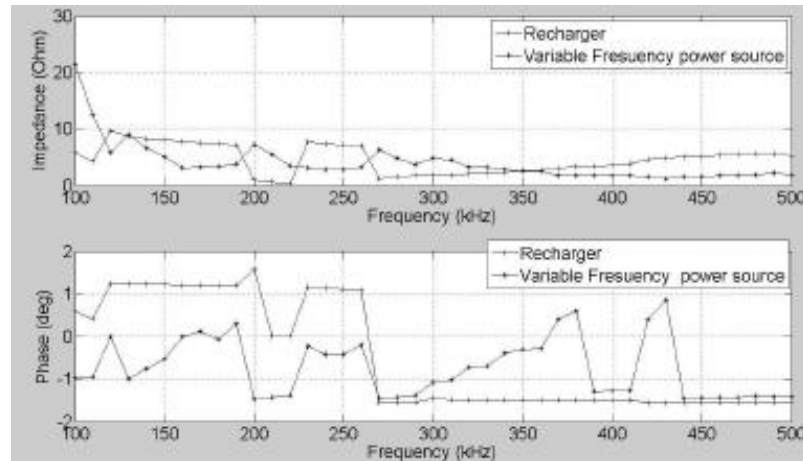


**Figure 2.9:** Impedance of thermal resistance based loads.

- Group 5 carries power type loads, such as recharger and variable frequency power source. Measurement curve is shown in Fig. 2.11.



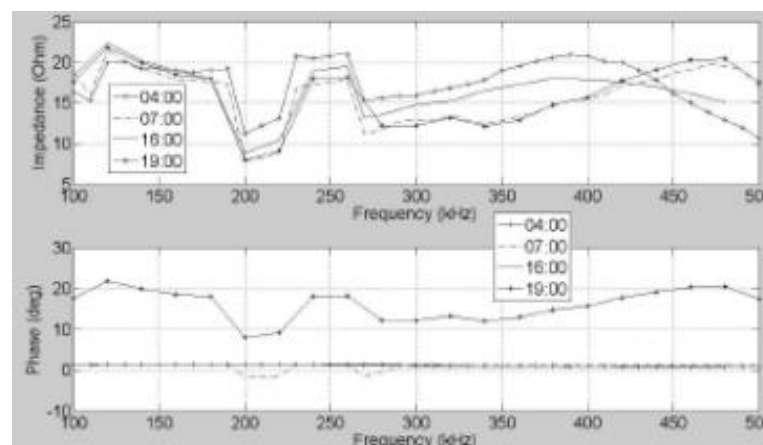
**Figure 2.10:** Impedance of lamp based loads.



**Figure 2.11:** Impedance of power type loads.

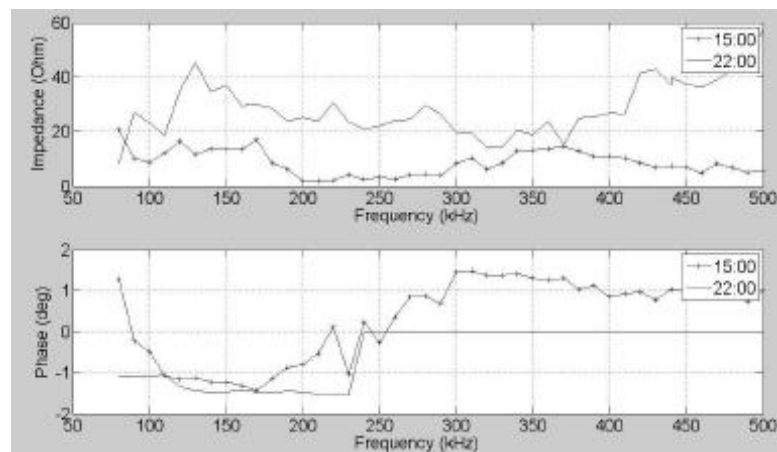
It is found that the electric loads in the same group have similar impedance characteristics. It can be seen from the graph that their impedance-frequency variation and phase-frequency variation have similar performance.

Impedance of distribution network was also measured in this study. Two different network types; resident block network and industrial network were considered. For residential block, measurements have taken during four different times, during peak time at 07:00 and 19:00, impedances vary at lower level than working time at 16:00 and the sleeping time at 04:00 where impedance level is high. This phenomenon can be seen in the graph shown in Fig. 2.12.



**Figure 2.12:** Impedance of power type loads.

For industrial network, two iconic times; one during normal working time at 15:00 and another during semi-working time at 22:00 were chosen. The impedance curve shown in Fig. 2.13 concludes the different consumption of electricity during different time.



**Figure 2.13:** Impedance of industrial network.

## Chapter 3

### Conclusions

The work reported so far in this literature review about the load impedance on power line communication is far from sufficient. There are not enough data available to facilitate the PLC system design. In order to design and improve the performance of PLC system, all the sources of signal impairment and noise insertion should be identified by taking more electrical loads measurements in the frequency range defined by CENELEC EN 50065-1 standard to transmit information on LV electrical network. This literature review is performed to gather all the existing information about PLC channel and load impedances at higher frequencies. All the results presented in this literature review show compatibility with each other. For example, line impedances are found to be 1.5-80 ohms [18], 1-12 ohms [15], 1-20 ohms [24], and 4-20 ohms [14]. All the results are similar to each other except the one presented in Ref 18 and that is due to the load variations on the line. If line has light loads, line impedance may be high such as 80 ohms.

## References

- [1] EN 50065-1, "Signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz-Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances".
- [2] Tao L, Alexander D, 2006, "Real time Measurement of Power Disturbances: Part 1. Survey and a Novel Complex Filter Approach". *Electric Power Systems Research*. Vol. 76.
- [3] G. L. Skibinski, R. J. Kerkman and D. Schlegel, "EMI emissions of modern PWM AC drives," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 5, Issue: 6, pp. 47 - 80, 1999.
- [4] Vellano N, Soletto K, 2007, "PLC Systems Performance Analysis Regarding Power Quality Disturbances". *IEEE International Symposium*. Vol. 10.
- [5] A. Larsson, "High frequency distortion in power grids due to electronic equipment", Licentiate dissertation, *Luleå University of Technology*, Kellefteå, Sweden, 2006.
- [6] A. Larsson, M. Bollen, Martin Lundmark, "Measurements of High-Frequency (2–150 kHz) Distortion in Low-Voltage Networks", *Int. Conf on Electricity Distribution (CIRED)*, Vienna, May 2007.
- [7] A. Larsson, M.H.J. Bollen, M. Lundmark, "Measurement and analysis of high-frequency conducted disturbances," *Int. Conf on Electricity Distribution (CIRED)*, Vienna, May 2007.
- [8] S. K. Rönnerberg, M. Wahlberg, M. H. J. Bollen, A. Larsson, M. Lundmark "Measurements of interactions between equipment in the frequency range 9 to 95 kHz," *CIRED*, Prague, June 2009.
- [9] S. Rönnerberg, M. Lundmark, M. Wahlberg, M. Andersson, A. Larsson, and M. Bollen, "Attenuation and noise level—potential problems with communication

- via the power grid,” presented at the *Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED)*, Vienna, Austria, May 2007.
- [10] “Power System Harmonics, Causes and effects of Variable Frequency Drives,” *Relative to the IEEE 519-1992 Standard*, Raleigh, NC, U.S.A, August 1994.
- [11] Holger Phillips, “Modeling of Power-line Communication Channels,” 3<sup>rd</sup> *International Symposium on Power-Line Communications and its Applications*, Lancaster UK 1999.
- [12] ] Holger Phillips, “Development of a Statistical Model for Power line Communication Channels”, *ISPLC 2000*, Limerick, UK, 5<sup>th</sup> –7<sup>th</sup>, April 2000.
- [13] Holger Phillips, “Performance Measurements of Power line Channels at High Frequencies,” *ISPLC 1998*, Soka University, Tokyo, Japan 1998.
- [14] J.R. Nicholson and J.A. Malack, “RF Impedance of Power Lines and Line Impedance Stabilization Networks in Conducted Interference Measurements,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-15, no. 2, pp84-86, May 1973.
- [15] R. M. Vines, H. J. Trussell, L. J. Gale and J. B. O’Neal, “Impedance of the residential power distribution circuits,” *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-27, No. 1, February 1985.
- [16] J. Huloux and L. Hanus, “ST7537 power line modem application,” *SGS-Thomson Microelectronics*, Applicat. Note AN655/0994, 1995.
- [17] G. Platt and B. Cook, “Domestic power line carrier communications,” in *Elect. Eng. Final Year Project*. Newcastle, Australia: Univ. Newcastle, 1999.
- [18] J. A. Malack and J. R. Engstrom, “RF impedance of United States and European power lines,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. EMC-18, pp. 36–38, Feb. 1976.
- [19] I. H. Cavdar, “Performance analysis of FSK power line communications systems over the time-varying channels: measurements and modeling,” *IEEE Trans. Power Delivery*, 1999.
- [20] S. Tsuzuki, T. Takamatsu, Y. Yamada, “An Estimation Method of the Transfer Function of Indoor Power line Channels for Japanese Houses,” *IEEE, Proc. 6th*

- International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications*, Athens, Greece, Mar., 2002, pp. 55-59.
- [21] A. Despina and A. Theodore, "Multi path Characterization of Indoor Power line Networks," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.20, No. 1, Jan. 2005, pp.90-99.
- [22] A. Despina, and A. Theodore, "Measurements based Method for Impedance Characterization of Residential Loads," *IMTC 2004- Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Lake Como, Italy, May 18–20, Vol. 1, 2004, pp.375-379.
- [23] H. Tian, R. Yuan, et al. "Analysis on Impedance Related Signal Attenuation for Power Line Communication," *2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, March, 2011, Shenzhen, China.
- [24] Tanaka, M. "High Frequency noise power spectrum, impedance and transmission loss of power line in Japan on intra-building power line communications," *IEEE Trans. Consum. Electron.* 1988, 34, 321-326.
- [25] I. Hakki Cavdar, Engin karadeniz, "Measurements of Impedance and Attenuation at CENELEC Bands for Power Line Communications Systems," *Journal Article, Sensors*, 2008.