



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**ENERGIANSÄÄSTÖLAMPPUJEN VAIKUTUKSET
PIENJÄNNITTEISEN SÄHKÖNJAKELUVERKON
KUORMITUKSEEN JA HÄVIÖIHIN**

**The effect of energy saving light bulbs on the load and losses
in a low voltage distribution network**

Mikko Vainikka

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Mikko Vainikka

Energiansäästölamppujen vaikutukset pienjännitteisen sähkönjakeluverkon kuormitukseen ja häviöihin

2012

Kandidaatintyö.

29 s, 12 kuvaa, 3 taulukkoa.

Tarkastaja: Nuorempi tutkija Tero Kaipia

Euroopan Unioni kieltää matalan hyötysuhteen lamppujen käyttämisen sekä sisä- että ulkovalaisimissa. Näin ollen matalan hyötysuhteen lamput, kuten perinteiset hehkulamput tulee vaihtaa paremman hyötysuhteen lamppuihin, kuten energiansäästölamppuihin. Energiansäästölamppuissa 230 V, 50 Hz verkkosähkö muunnetaan valonlähteelle sopivaksi tehoelektroniikan avulla. 50 Hz perustaajuuden virran lisäksi energiansäästölamput ottavat verkosta harmonisia yliaalloja. Harmoniset yliaallot aiheuttavat lisähäviöitä verkostokomponenteissa, kuten muuntajissa ja johdoissa. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan millaisia vaikutuksia hehkulamppujen vaihtaminen energiansäästölamppuihin aiheuttaa pienjännitteisessä jakeluverkossa. Työssä tarkastellaan lyhyesti myös energiansäästölamppujen energiatehokkuutta, sekä sitä, millaisia rajoitteita standardit asettavat harmonisille yliaalloille.

Työ muodostuu kahdesta perusosasta: kirjallisuusosioista ja esimerkkilaskelmasta. Laskelmassa tutkitaan pienjännitteistä sähkönjakeluverkkoa. Verkkoon mitoitetaan ensin muuntaja, jonka jälkeen tarkastellaan muuntopiirin asiakkaiden aiheuttamat vaikutukset muuntopiiriin muuntajalle, kun asiakkaat vaihtavat lamppunsa energiansäästölamppuihin. Tuloksista käy ilmi, että tehokerroin pienenee vaihdettaessa energiansäästölamppuihin. Laskutettavan pätötehon osuus pienenee ja loistehon osuus kasvaa. Lisäksi harmoniset yliaallot aiheuttavat lisähäviöitä mm. jakelumuuntajassa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Mikko Vainikka

The effect of energy saving light bulbs on the load and losses in a low voltage distribution network

2012

Bachelor's Thesis.
29 p, 12 figures, 3 graphs.

Examiner: Younger researcher Tero Kaipia

European Union is forbidding lamps with low efficiency in both indoor and outdoor lighting. Low efficiency lamps include incandescent lamps which should be changed to lamps with higher efficiency such as compact fluorescent lamps. In compact fluorescent lamps 230 V, 50 Hz electricity is transformed into electricity which suits better for the lamp. This is done with power electronics. Compact fluorescent lamps have other frequencies in its current besides the 50 Hz basic frequency. These other frequencies are called harmonics. Harmonic distortion causes increased losses in the network components such as transformers and wires. In this Bachelor's Thesis is studied what kind of effects changing incandescent lamps to compact fluorescent lamps causes in low voltage electricity distribution network. In the thesis is shortly studied the energy efficiency of compact fluorescent lamps and what kind of limits standards state for the harmonics.

The thesis is formed from two parts: theory part and example calculation part. In the calculation part there is studied low voltage electricity distribution network where is first dimensioned a transformer and then examined the effects on that transformer when all customers in that area change their incandescent lamps to compact fluorescent lamps. The results of this case example show that power factor decreases when incandescent lamps are changed to compact fluorescent lamps. Also the share of active power is decreasing and the share of reactive power is increasing. Transformer is also experiencing some extra load losses due to harmonic distortion.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET | 5 |
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 2 ENERGIANSÄÄSTÖLAMPUT JA SÄHKÖTEHO | 8 |
| 2.1 Tekniikka | 8 |
| 2.2 Standardit | 10 |
| 2.3 Harmoniset ja yliaaltoteoria..... | 12 |
| 2.4 Teho ja loisteho | 13 |
| 3 SÄHKÖVERKON KUORMITUS JA MITOITTAMINEN | 15 |
| 3.1 Kuormituksen mallintaminen ja jakelumuuntajan valinta | 15 |
| 3.2 Säröhäviöt verkossa | 17 |
| 3.3 Lamppujen aiheuttama kuorma..... | 19 |
| 4 LASKENNALLINEN TARKASTELU | 20 |
| 4.1 Esimerkki-muuntopiiri..... | 21 |
| 4.2 Energiansäästölamppujen vaikutus kuormitukseen..... | 22 |
| 4.3 Energiansäästölamppujen vaikutus muuntajahäviöihin | 24 |
| 5 YHTEENVETO | 25 |
| LÄHTEET | 27 |

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

| | |
|----------------|--|
| φ | Vaiheensiirtokulma |
| ε | Annuiteettikerroin |
| κ | Tehon kasvusta riippuvan maksun diskonttauskerroin |
| κ_0 | Jaksollisen maksun diskonttauskerroin |
| σ | Keskihajonta |
| D | Säröteho |
| h | Harmonisen järjestysluku |
| H_P | Sähkötehon hinta [€/kW] |
| H_E | Sähköenergian hinta [€/kWh] |
| I_h | Harmonisen h virta |
| I_L | Kuormavirta |
| I_1 | Perustaaajuisen virran RMS arvo nimelliskuormalla |
| Q | Loisteho |
| ρ | Korkokanta |
| P | Pätöteho |
| P_k | Muuntajan kuormitushäviöt |
| P_{kn} | Muuntajan nimelliskuormitushäviöt |
| P_0 | Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt |
| P_{0n} | Muuntajan nimellistyhjäkäyntihäviöt |
| P_{max} | Maksimiteho a prosentin ylitystodennäköisyydellä |
| P_{ave} | Asiakkaan keskimääräinen pätöteho |
| P_{WE1} | Käämityksen nimellispisteen pyörrevirtahäviöt perustaaajuudella |
| P_{CE1} | Litosten ja kytkentöjen nimellispisteenpyörrevirtahäviöt perustaaajuudella |
| P_{SE1} | Hajavuon aiheuttamat häviöt nimelliskuormalla perustaaajuudella |
| P_{LL1} | Nimelliset kuormitushäviöt perustaaajuudella |
| $P_{LL_{tot}}$ | Muuntajan kuormitushäviöt ei-sinimuotoisella kuormalla |
| r | Tehonkasvu [%/a] |
| S | Näennäisteho |
| S_m | Muuntopiirin näennäisteho |
| S_n | Muuntajan nimellisteho |
| t_h | Kuormitushäviöiden vaikutusaika |
| u_1 | Perustaajuinen jännite |
| U | Muuntajan pääjännite yläjännite puolella |

| | |
|-------|--|
| U_n | Muuntajan nimellisjännite yläjännitepuolella |
| z_a | Normaalijakaumasta saatava a prosentin ylitystodennäköisyyttä vastaava kerroin |

1 JOHDANTO

Euroopan Unionin (EU) direktiivi kieltää vuoden 2016 syyskuun jälkeen matalan hyötysuhteen lamput sekä sisä- että ulkovalaisimissa. Tämä tarkoittaa, että kotitalouksien hehkulamput vaihdetaan pääosin erilaisiin energiansäästölamppuihin. Energiansäästölamput laskevat valaistuksen kuluttamaan pätötehoa, mutta samalla loistehon osuus tyypillisesti lisääntyy verkossa.

Työn päätavoitteena on selvittää energiansäästölamppujen ja erityisesti niiden aiheuttamien harmonisten yliaaltovirtojen vaikutuksia pienjännitteisen sähkönjakeluverkon kuormitukseen ja häviöihin. Erityisesti tarkastellaan lamppujen vaikutusta jakelumuuntajan häviöihin. Energiansäästölamppujen tekniikkaa käydään lävitse niin loistelamppujen kuin LEDien osalta, jonka lisäksi esitetään tärkeimpiä harmonisia yliaaltoja koskevia standardeja. Esimerkkilaskuissa keskitytään loistelamppujen aiheuttamiin häviöihin. Tarkastelun perusteella pyritään selvittämään millaisia vaikutuksia energiansäästölamppuilla on sähköverkon energiatehokkuuteen.

Työn teoriaosuuden keskeinen osa on sähkötehon määritelmän tarkastelu, jossa tulee esille, miten sinimuotoisen verkkovirran teho eroaa ei-sinimuotoisen sähkön tehosta eli särötehosta. Kokonaisteho muodostuu 50 Hz perustaajuisen sähkön pätö- ja loistehon lisäksi särötehosta, joka puolestaan syntyy pääosin kulutuskojeiden aiheuttamien harmonisten yliaaltojen seurauksena. Tämä on ns. epälineaarinen kuorma. Tehokertoimien laskentaa on avattu sekä sinimuotoisen tehokertoimen osalta että ei-sinimuotoisen kokonaistehokertoimen osalta.

Laskuesimerkkinä tarkastellaan erään haja-asutusalueen muuntopiirin avulla, kuinka muuntopiirin kaikkien asiakkaiden hehkulamppujen vaihto energiansäästölamppuihin vaikuttaa pienjänniteverkossa. Muuntopiirin verkko mitoitetaan huomioiden ainoastaan perustaajuinen kuorma. Tämän jälkeen vaihdetaan kaikki lamput energiansäästölamppuihin ja tutkitaan, kuinka vaihto vaikuttaa erityisesti jakelumuuntajan kuormitushäviöihin ja kuormituksen tehokertoimeen. Oletuksena on, että kuormitushäviöt tippuvat vaihdettaessa hehkulamput vähemmän pätötehoa kuluttaviin loistelamppuihin. Laskelmissa selvitetään myös miten muuntopiirin tehonjakauma valaistukseen ja muuhun kuormaan muuttuvat.

2 ENERGIANSÄÄSTÖLAMPUT JA SÄHKÖTEHO

Energiansäästölamppuihin lukeutuvat loistelamput ja LEDit. Työssä painopisteenä ovat loistelamput, joten pääpaino on niiden tekniikan läpikäymisessä. Standardeissa käsitellään lähinnä harmonisvirtojen raja-arvoja.

EU on asettanut vaatimukset lamppujen energiatehokkuudelle. EU:n asetuksen (244/2009, annettu 18.3.2009) mukaan kielletään asettamasta markkinoille lamppuja, jotka ovat tehottomia. Käytännössä tämä tarkoittaa hehkulamppuja, jotka korvataan energiansäästölampeilla, jolloin säästetään energiaa ja hiilidioksidipäästöt pienenevät. (Motiva 2011)

Kotitalouksien valoteholtaan huonot (n. 7-15 lm/W) hehkulamput vaihdetaan energiansäästölamppuihin, joilla on hyvä valoteho (55 lm/W). Hehkulamppujen tehosta suurin osa muuttuu lämmöksi. Tämä on osaltaan syynä siihen, että niiden käytöstä luovutaan. Hehkulamppujen tilalle tulevat energiansäästölamput, joiden valoteho on parempi kuin hehkulampeilla ja niiden käyttöikä on huomattavasti pidempi (12000 h). (Honkapuro et al. 2009)

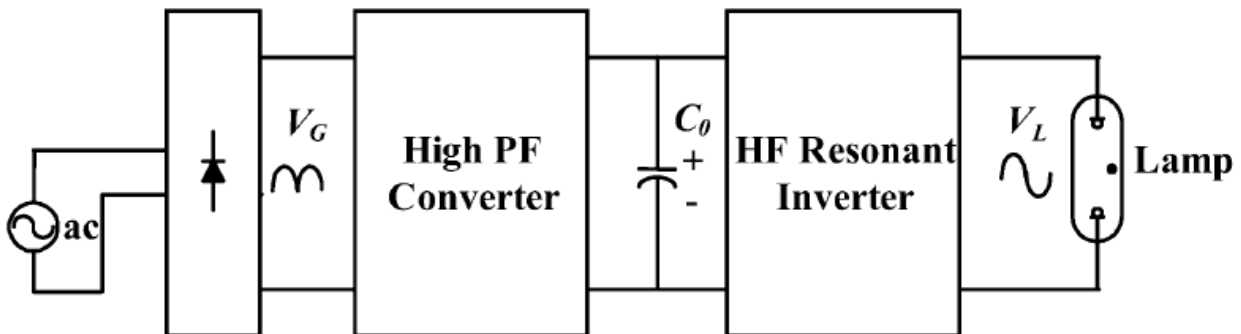
2.1 Tekniikka

Loistelampussa on purkausputki, joka on päällystetty loisteaineella sisäpuolelta. Putken kummassakin päässä on elektroneja emittoivalla aineella päällystetty volframilankaelektrodi, eli katodi. Lamppu on täytetty jalokaasulla, tavallisesti argonilla tai kryptonilla syttymisen helpottamiseksi. Lampun sisällä on pieni määrä elohopeaa, joka kuumennettaessa höyrystyy ja lopulta emittoi säteilyä. (Halonen 1992, 204 - 207)

Loistelampun sähköpurkauksen vastus pienenee virran kasvaessa. Jos loistelamppu kytkettäisiin suoraan verkkojännitteeseen, virta kasvaisi jatkuvasti ja sulattaisi lopulta johdikkeet. Tästä syystä virtaa pitää rajoittaa kuristimella. Loistelampun katodeja täytyy esihehkuttaa käytettäessä normaalia käyttöjännitettä, sillä lamppu ei syty muuten. Esihehkutus voidaan toteuttaa joko sytyttimellä tai hehkumuuntajan avulla. Lamppu lämpenee muutaman minuutin, jonka aikana elohopea höyrystyy lopulliseen paineeseensa, lampun antama valovirta kasvaa ja värisävy muuttuu. Yksikantaloistelampuissa on sama toimintaperiaate kuin edellä on esitetty. Yksikantaloistelamput eroavat muista loistelampuista rakenteeltaan. Ne ovat kooltaan pienempiä ja niiden rakenne on toteutettu yhdistämällä kaksi tai useampi purkausputki sarjaan putken ylä- ja/tai alaosasta, jotta purkaus pääsee etenemään elektrodilta toiselle. (Halonen 1992, 207 – 208, 219)

Loistelampun kannassa on elektroninen liitälaitte, jolla parannetaan lampun elinikää, ja jonka avulla lamppu luovuttaa noin 10 % enemmän valoa. Elektroninen liitälaitte muodostaa värähtelypiirin lampun kanssa, ja lisäksi siinä on apupiirejä, joilla voidaan rajoittaa virtaa, valvoa lampun lämpötilaa ja suodattaa häiriöitä. (Siltala 2010)

Kuvassa 2.1 on esitetty perinteinen elektroninen liitälaittekytkentä. Kytkentä koostuu kahdesta osasta, konverterista ja invertteristä. Ensin on kokoaaltotasasuuntaaja, joka syöttää konverteria. Konverteria käytetään, jotta invertterille syötettävä dc-jännite olisi hyvälaatuista. Korkeataajuusinvertteriä käytetään lampun sytyttämiseen ja lampun virran stabiloimiseen käytön aikana. (Ponce et al. 2006)



Kuva 2.1 Pienloistelampun elektroninen liitälaitte. Liitälaitteessa on korkea tehokertoiminen konverteri ja korkeataajuuksinen invertteri. (Ponce et al. 2006)

LED tulee sanoista Light Emitting Diode eli valoa emittoiva diodi. LED on puolijohde. Se koostuu P-tyypin (positiivisesti varautuneista) ja N-tyypin (negatiivisesti varautuneista) materiaaleista. Katodilta anodille kulkee päästösuuntainen virta. Virta kuljettaa elektroneja sirun liitoskohtaa kohti. LEDiin syötetty jännite saa elektroneissa aikaan liikettä, jolloin ne törmäävät toisiinsa liittymäkohdassa. Elektronien törmäyksessä syntyy energiaa, josta osa muuttuu valoksi ja osa lämmöksi. (Siltala 2010)

LED toimii tasasähköllä. LED-valaisimessa tarvitaan teholähde, joka muuttaa verkon vaihtosähkön tasasähköksi. Teholähteet ovat joko lineaarisia tai hakkuritekniikalla toteutettuja. Hakkuriteholähteellä virta ja jännite saadaan sopivaksi LEDille. Virtaa rajoitetaan vakiovirtalähteellä. LED-teholähteissä on myös tehokertoimen korjauspiiri, jolla saadaan pienennettyä verkkoon aiheutuvaa häiriötä. (Shuuya 2011)

2.2 Standardit

IEC-standardeista energiansäästölamppujen kannalta tärkein on IEC 61000 -sarja, jossa käsitellään EMC-asioita (Electromagnetic compatibility) eli sähkömagneettista yhteensopivuutta. Standardissa 61000-3-2 käsitellään harmonisten virtojen raja-arvoja, kun vaihevirta on alle 16 A. Standardi 61000-3-2 on jaettu neljään eri kategoriaan, mutta kiinnostavin kategoria on kategoria C eli valaistuslaitteet. Standardi määrittää mm. alle 25 W valaistuslaitteiden yliaaltovirtojen rajat. Standardin määrittelemät yliaaltovirtojen rajat on esitetty taulukossa 2.1. (Pikkarainen et al. 2011)

Taulukko 2.1 IEC-standardin 61000-3-2 mukaiset yliaaltovirtojen sallitut rajat. Keskimäinen sarake pätee alle 25 W valaisimille. (Pikkarainen et al. 2011)

| Harmonisen numero n | Suurin sallittu harmonisvirta wattia kohden mA/W | Suurin sallittu harmonisvirta A |
|------------------------|--|------------------------------------|
| 3 | 3,4 | 2,3 |
| 5 | 1,9 | 1,14 |
| 7 | 1 | 0,77 |
| 9 | 0,5 | 0,4 |
| 11 | 0,35 | 0,33 |
| $11 \leq n \leq 39$ | $3,85/n$ | |

Alle 25 W valaistuslaitteiden harmoniset virrat eivät saa ylittää taulukossa 2.1 keskimäisen sarakkeen arvoja. Lisäksi kolmas yliaaltovirta ei saa ylittää 86 % ja viides yliaaltovirta ei saa ylittää 61 % perustaajuisen virran arvosta. (Pikkarainen et al. 2011).

SFS-EN 60929 -standardi asettaa lampun käyttövirran aallonmuodolle vaatimuksia. Kun lampun virranrajoitinta käytetään nimellisjännitteellä, lampun vakauduttua virran aaltomuodon on täytettävä seuraavat ehdot:

- a) Jokaisessa peräkkäisessä puolijaksossa lampun virran verhoikäyrä ei saa poiketa enemmän kuin 4 % samasta ajasta pääverkkojännitteen nolapisteen ohituksen jälkeen. Tämän vaatimuksen tarkoituksena on välttää verhoikäyrän aaltomuodon epäyhdenmukaisuus pääjohdon puolijaksojen välillä.
- b) Huippuarvon ja tehollisarvon maksimisuhde ei saa ylittää 1,7 yksittäistä suurtaajuuksista huippukerointa. (SFS-EN 60929)

SFS-EN 50160 -standardi määrittelee sähkönjakelujännitteen yliaaltojen rajat. Jännitteestä otetaan viikon pituisia mittausjaksoja. Harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvon tulee olla 95 % ajasta taulukon 2.2 mukaisissa rajoissa laskettaessa 10 minuutin keskiarvoista.

Taulukko 2.2 Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut rajat pj-verkossa prosentteina perustajuisesta jännitteestä u_n . (Viljainen 2001)

| Parittomat yliaallot | | | | Parilliset yliaallot | |
|----------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Kolmella jaottomat | | Kolmella jaolliset | | | |
| Järjestysluku h | Suhteellinen jännite (U_h) | Järjestysluku h | Suhteellinen jännite (U_h) | Järjestysluku h | Suhteellinen jännite (U_h) |
| 5 | 6,0 % | 3 | 5,0 % | 2 | 2,0 % |
| 7 | 5,0 % | 9 | 1,5 % | 4 | 1,0 % |
| 11 | 3,5 % | 15 | 0,5 % | 6...24 | 0,5 % |
| 13 | 3,0 % | 21 | 0,5 % | | |
| 17 | 2,0 % | | | | |
| 19 | 1,5 % | | | | |
| 23 | 1,5 % | | | | |
| 25 | 1,5 % | | | | |

Taulukko 2.3 määrittelee suurimmat yliaaltovirrat, joiden on suositeltavaa esiintyä sähkökäyttäjällä liittämiskohdassaan, jossa liitytään yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Virtarajojen ylittyessä sähkökäyttäjän on joko pienennettävä yliaaltovirtoja tai sovittava verkonhaltijan kanssa suuremmasta siirtokapasiteetista. (SENER 1999)

Taulukko 2.3 Pienjänniteverkkoon liittyneen sähkökäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittämiskohdassa tarkasteltuna. (SENER 1999)

| Referenssivirta | Suositeltava raja | |
|--------------------|--|----------------------------------|
| ≤ 25 A | Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita | |
| > 25 A ... 200 A | Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta | |
| > 200 A | Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta: | |
| | järjestysluku n | sallittu arvo referenssivirrasta |
| | < 11 | 7 % |
| | 11-16 | 3,5 % |
| | 17-22 | 2,5 % |
| | 23-34 | 1,0 % |
| > 34 | 0,5 % | |

IEEE-standardin 519 mukaan harmonisvirrat aiheuttavat muuntajissa kupari- ja hajavuohäviöitä ja harmoniset jännitteet aiheuttavat rautahäviöitä. Harmonisten aiheuttamat pyörrevirtahäviöt nostavat muuntajan rakenteiden lämpötilaa. Standardissa määritetään ylärajaksi virran särölle 5 %. Suurimmiksi ylijännitteiksi määritetään kuormitetulle muuntajalle 5 % ja tyhjäkävälle muuntajalle 10 % nimelliskuormalla. Pitää huomata, että harmonishäviöt ovat taajuusriippuvaisia, eli mitä suurempi taajuus sitä suuremmat häviöt. (IEEE 519)

2.3 Harmoniset ja yliaaltoteoria

Verkossa esiintyviä perustaajuuden kerrannaisia, jotka esiintyvät virroissa ja jännitteissä, kutsutaan yliaalloiksi. Suomen sähköverkossa perustaajuutena on 50 Hz, joten esim. 3. harmoninen yliaalto on siis 150 Hz. Useimmiten esiintyvät yliaallot ovat 3. ja 5. yliaalto, eli 150 Hz ja 250 Hz. Kolmas yliaalto summautuu nollajohtimeen. Valaistusjärjestelmillä yliaaltojen virrat voivat kohota jopa 30 % vaihevirrasta, joka tarkoittaa sitä, että nollajohtimessa tämä näkyy kolminkertaisena eli $0,9 \times$ vaihevirta. (ABB 1999)

Yliaaltolähteet aiheuttavat jännitesäröä (THD), joka tarkoittaa harmonisten taajuuksien energiamäärän suhdetta perustaajuuden energiaan (Parkkinen, 2008). Jännitesärö aiheuttaa sen, että jännitteen muoto poikkeaa sinimuotoisesta. Kolmivaiheiset kuormitukset aiheuttavat 5., 7., 11., 13., jne. yliaaltoja ja yksivaiheiset kuormitukset taas 3. yliaaltoa ja sen kerrannaisia. (ABB2 2000)

Huonolaatuinen jännite aiheuttaa ongelmia tietynlaisissa laitteissa, kuten tietokoneissa. Jännitesärö aiheuttaa myöskin johtimien lämpenemistä, sekä sulakkeiden ja releiden toimintahäiriöitä. Yliaaltojen poistaminen verkosta pienentää myös jännitesäröä. (Kontturi & Ålander 2008)

Yliaallot aiheuttavat sähköverkossa mm. seuraavanlaisia ongelmia:

- lisähäviöt verkostokomponenteissa
- suoja- ja mittalaitteiden virhetoiminnot
- nollajohtimen ylikuormitus 3. yliaaltovirrasta
- resonanssit kompensointikondensaattoreiden ja verkon välillä

Jos resonanssitilanne pääsee syntymään, yliaaltolähteen tuottama virta vahvistuu moninkertaiseksi kompensointikondensaattorin ja verkon välillä. Resonanssi nostaa myöskin jännitesärön arvoa, jonka seurauksena on huono sähkönlaatu ja häiriöiden todennäköinen kasvaminen. 3. yliaaltovirta summautuu nollajohtimeen, josta aiheutuu ylikuormitusta ja voimakkaita magneettikenttiä. (ABB 2000)

Kontturi & Ålanderin (2008) työn tuloksista käy ilmi, että heidän mittaamassaan liittymässä yliaaltoilmiö kasvoi voimakkaasti. Kokonaissärön suhteellinen osuus nousi 10 – 50 %. Joka tapauksessa jännitesärö pysyi alle 2,5 % ja muuntamalla alle 2 %.

Yliaaltoja voidaan suodattaa käyttämällä imupiirejä, mutta imupiiri ei suodata kolmatta harmonista yliaaltoa. Imupiiri on passiivinen suodatusmuoto. Imupiirisuodatus tapahtuu kytkemällä

kondensaattoreista ja induktansseista koostuvia sarjaresonanssipiirejä verkkoon. Toinen vaihtoehto on käyttää aktiivista suodatusta. Aktiivinen suodatin on laite, jolla syötetään verkkoon yliaaltojen kanssa samaa taajuutta, mutta vastakkaisessa vaiheessa olevia yliaaltokomponentteja. Aktiivinen suodatin reagoi nopeasti verkossa tapahtuviin muutoksiin. (Kontturi & Ålander 2008)

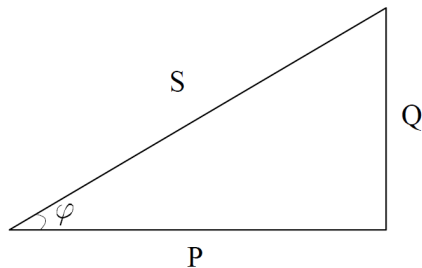
SFS 6000-5-52 -standardin mukaan nollajohtimen poikkipinta saa olla pienempi kuin vaihejohtimien, jos seuraavat ehdot täyttyvät:

- suurin nollajohtimessa normaalitilanteessa esiintyvä virta ei ole suurempi kuin pienennetyn nollajohtimen kuormitettavuus
- nollajohdin on ylivirtasuojattu
- nollajohtimen poikkipinta on vähintään 16 mm² kuparia tai 25 mm² alumiinia.

Kolmella jaolliset yliaallot summautuvat nollajohtimeen ja aiheuttavat siinä suuremman virran kuin vaihejohtimessa (ABB 1999). Tämä ilmiö tulee huomioida johtimien valinnassa.

2.4 Teho ja loisteho

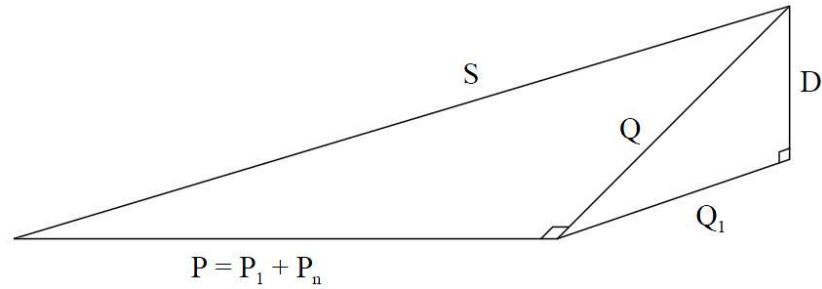
Sähköverkon näennäisteho S muodostuu pätötehosta P ja loistehosta Q . Kuva 2.2 havainnollistaa näiden suhdetta.



Kuva 2.2 Perinteinen tehokolmio.

Kuvasta 2.2 nähdään, että tehot saadaan laskettua trigonometrian avulla, kuten seuraavassa yhtälössä on esitetty

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.1)$$



Kuva 2.3 Kolmiulotteinen tehokolmio, jossa on huomioitu säröteho D. (SENER, 1999)

Kuvassa 2.3 on esitetty tehokolmio, joka ottaa huomioon harmonisista yliaalloista johtuvat säröhäviöt. Kokonaisnäennäisteho, jossa on mukana säröteho, on esitetty seuraavassa yhtälössä

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (2.2)$$

jossa Q on perustaajuinen loisteho. Nyt säröteho D ei sisällä yliaaltopätötehoa vaan yliaaltoloistehoa sekä eri taajuuksien virtojen ja jännitteiden tuloja (loistehoa). (SENER 1999)

Sähköverkossa pyritään siirtämään pätötehoa ja loisteho pyritään aina tekemään paikan päällä, jolloin johdolla voidaan siirtää enemmän pätötehoa. Perustaajuisten pätötehon ja perustaajuisten näennäistehon suhdetta kuvaa tehokerroin $\cos \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (2.3)$$

jossa φ = vaiheensiirtokulma.

Ideaalisessa tapauksessa tehokerroin olisi 1, jolloin verkossa siirtyisi vain pätötehoa ja näin ollen virta ja jännite olisivat saman vaiheisia. Energiansäästölamppuja käytettäessä pätötehon tarve pienenee verrattaessa hehkulamppuihin, mutta samalla loistehon määrä kasvaa, jolloin tehokerroin pienenee (Kontturi, Ålander 2008).

Kokonaistehokerroin (Power Factor) kuvaa kokonaispätötehon ja kokonaisnäennäistehon suhdetta, kuten on esitetty kaavassa (2.4) (SENER, 1999).

$$\frac{P}{S} = \frac{\sum_n P_n}{S} = \frac{P_1 + \sum_{n \neq 1} P_n}{S} \quad (2.4)$$

Jotkin sähkölaitteet tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi loistehoa. Loisteho kuvaa magneettitai sähkökenttään varastoitunutta energiaa. Loistehoa tarvitsevia laitteita ovat mm. moottorit, muuntajat ja purkauslamput. Energiansäästölamput kuuluvat purkauslamppuihin, joten ne

tarvitsevat toimiakseen loistehoa, jonka ne ottavat verkosta. Loistehon tarkoituksena on ylläpitää magneettikenttää eikä siis tehdä työtä. (Kontturi & Ålander 2008)

Kontturi & Ålanderin (2008) työn tuloksista nähdään, että heidän mittaamassaan liittymässä energiansäästölamppujen käyttö pienentää pätötehoa n. 3 – 5 kW ja loisteho kasvaa n. 1,5 – 5 kVAR. Näennäisteho ei muuttunut juurikaan, sillä pätötehon pienentymisen korvaa kasvanut loisteho. Loistehon kasvamisesta johtuen tehokerroin pieneni jopa 0,5 eli näennäistehosta vain puolet on pätötehoa. Muuntamalla pätöteho pieneni 40 – 60 kW ja loisteho kasvoi 20 – 40 kVAR.

3 SÄHKÖVERKON KUORMITUS JA MITOITTAMINEN

Käydään läpi miten jakelumuuntaja mitoitetaan muuntopiiriin, sekä kuinka kuormitusta mallinnetaan. Energiansäästölamput pienentävät pätötehohäviöitä, mutta samalla ne tuovat harmonisista yliaalloista johtuvia ongelmia. Energiansäästölamput aiheuttavat säröhäviöitä verkossa, jotka mm. lisäävät muuntajan kuormitushäviöitä, joka aiheuttaa muuntajan ylimitoitusta.

3.1 Kuormituksen mallintaminen ja jakelumuuntajan valinta

Asiakkaiden kuormitusta mallinnetaan kuormitusmalleilla. Kuormitusmallit kuvaavat sähkökäyttäjän määrällisesti ja ajallisesti vaihtuvaa sähkönkulutusta. Kuormitusmallien avulla voidaan määrittää sähkökäyttäjän tehontarve. Nykyisin on käytössä Sähkölaitosyhdistyksen vuonna 1992 julkaisemaan sähkön käytön kuormitustutkimukseen perustuvat kuormitusmallit. Mittaukset tehtiin lähes 1200 kohteessa. Mittausten perusteella on saatu eri tyyppikäyttäjien tuntikohtainen tehovaihtelu, tuntikeskitehujen vaihtelu ja lämpötilariippuvuus. (Partanen et al. 2011)

Muuntopiiriin tulee ensin mitoitaa sopiva muuntaja. Muuntajan mitoitusteho saadaan seuraavan yhtälön mukaisesti

$$P_{\max} = n \cdot P_{\text{ave}} + z_a \cdot \sqrt{n} \cdot \sigma, \quad (3.1)$$

jossa σ on keskihajonta,
 P_{\max} on tekninen mitoitusteho,
 n on asiakkaiden lukumäärä,
 P_{ave} on asiakkaan 50 % ylitystodennäköisyyttä vastaava huipputuntiteho,
 z_a on normaalijakaumasta saatava ylitystodennäköisyyttä a vastaava kerroin.

Muuntajan mitoituksessa tulee huomioida myös taloudellisuus. Muuntajan taloudelliseen mitoitukseen vaikuttaa tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt. Muuntajan kokonaishäviöt saadaan laskettua seuraavan yhtälön mukaan

$$P_{\text{kok}} = \left(\frac{S_m}{S_n}\right)^2 \cdot P_{\text{kn}} + \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \cdot P_{0n}, \quad (3.2)$$

jossa P_{kn} on muuntajan nimelliskuormitushäviöt,
 S_m on muuntopiirin näennäisteho,
 S_n on muuntajan nimellisteho,
 P_{0n} on muuntajan nimellistyhjäkäyntihäviöt,
 U on muuntajan pääjännite yläjännitepuolella,
 U_n on muuntajan nimellisjännite yläjännitepuolella.

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt vaikuttavat koko vuoden ajan eli 8760 h, kun taas kuormitushäviöille täytyy laskea huipunkäyttöaika vuosienergian ja muuntopiirin tehon perusteella. Kuormituksen huipunkäyttöajaksi saadaan 2100 h. Häviöiden huipunkäyttöaika saadaan laskettua seuraavalla yhtälöllä

$$t_h = 0,17 \cdot t_k + \frac{0,83 \cdot t_k^2}{8760 \text{ h}}, \quad (3.3)$$

jossa t_k on kuormituksen huipunkäyttöaika,
 t_h on häviöiden huipunkäyttöaika.

Häviöiden huipunkäyttöajaksi saadaan $t_h = 800$ h. Yhtälö (3.3) on tarkoitettu suuremmille asiakasmäärille, mutta sen voidaan olettaa olevan riittävän tarkka myös tässä tapauksessa. Muuntajan häviöistä aiheutuneet kustannukset on määritettävä koko muuntajan pitoajalta, joka on 40 a. Muuntajan koko pitoajan häviökustannukset saadaan seuraavalla yhtälöllä

$$K_h = \kappa_0 \cdot P_0 \cdot (H_P \cdot 8760 \text{ h} \cdot H_E) + \kappa \cdot P_k \cdot (H_P \cdot t_h \cdot H_E), \quad (3.4)$$

missä κ on tehon kasvusta riippuvan maksun diskonttauskerroin,
 κ_0 on jaksollisen maksun diskonttauskerroin,
 H_P on sähkötehon hinta [€/kW],
 H_E on sähköenergian hinta [€/kWh].

Diskonttauskerroin jaksolliselle maksulle määritetään seuraavasti

$$\kappa_0 = \varepsilon \frac{\varepsilon^t - 1}{\varepsilon - 1}, \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{p}{100}}, \quad (3.6)$$

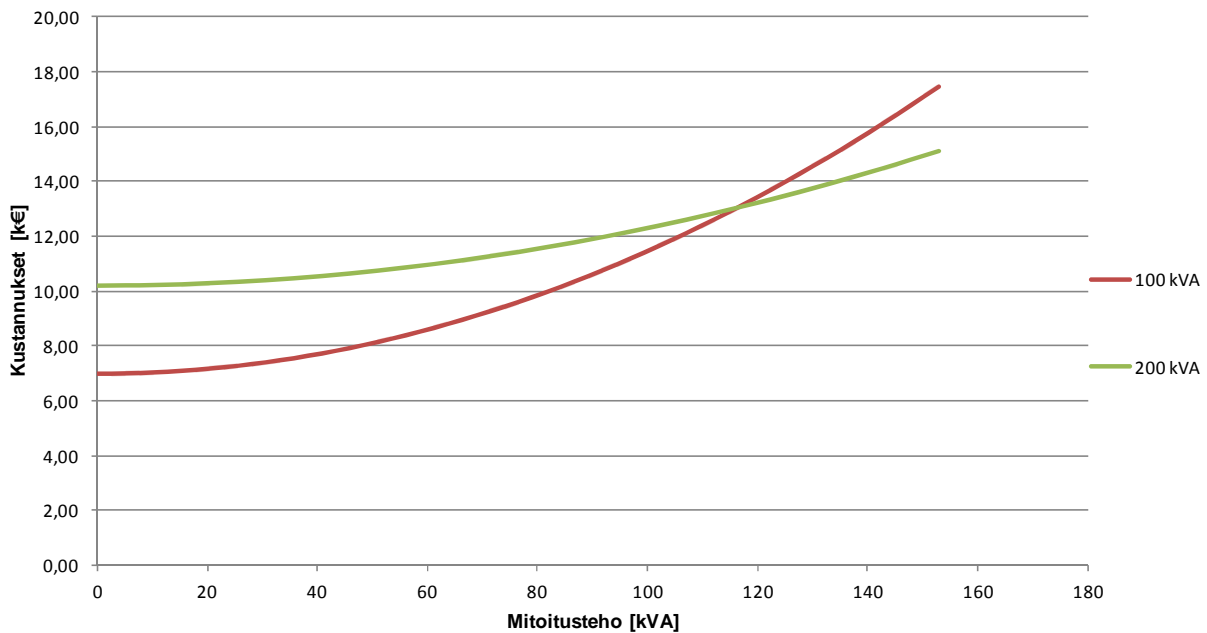
jossa p on korkokanta,
 t on häviöiden vaikutusaika.

Diskonttauskerroin κ määritetään samalla yhtälöllä kuin κ_0 , mutta aika ja annuiteetti ε muuttuvat. Nyt annuiteettikerroin lasketaan seuraavasti

$$\varepsilon_2 = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^2}{1 + \frac{p}{100}}, \quad (3.7)$$

jossa r on tehonkasvu %/a.

Muuntajan kokonaiskustannukset saadaan lisäämällä häviöiden hintaan muuntajan investointihinta, joka saadaan Energiamarkkinaviraston sivuilta. Laskuissa käytetään arvoja $p = 5\%$, $r = 2\%/a$, $H_P = 50 \text{ €} / \text{kW}$, $H_E = 0,05 \text{ €} / \text{kWh}$, $T = 40 \text{ a}$ ja $t_h = 800 \text{ h}$. Laskuista saadaan kuvan 3.1 mukaiset mitoituskäyrät.



Kuva 3.1 Muuntajan taloudellinen mitoitus.

3.2 Säröhäviöt verkossa

Muuntajan kuormitus kilpiarvoissa esitetyillä nimellisarvoilla vaatii, että jännite ja virta ovat sinimuotoisia. Verkossa olevat epälineaarisuudet, kuten suuntaajat, vääristävät sinimuotoisen käyrän, joka kasvattaa muuntajan häviöitä ja pienentää kuormitettavuutta. Jännitteessä esiintyvät yliaallot suurentavat muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä vain hieman ja suurimmassa osassa tapauksista sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Virrassa esiintyvät yliaallot suurentavat muuntajan kuormitushäviöitä. Tämä johtuu siitä, että pyörrevirrat ja virranahto ovat taajuudesta riippuvia ja kasvavat yliaallojen vaikutuksesta. Säröhäviöiden takia muuntaja joudutaan ylivoimittamaan. (ABB 2000)

Jakelumuntajan häviöt, kun otetaan huomioon myös harmoniset yliaallot, voidaan laskea yhtälöllä (3.8) (Partanen et al. 2010)

$$P_{LL_tot} = \underbrace{P_{LL1} \times \left(\frac{I_L}{I_1} \right)^2}_{\text{Resistiiviset häviöt}} + \underbrace{P_{WE1} \times \left(\sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2 \right)}_{\text{Pyörrevirtahäviöt}} + \underbrace{(P_{CE1} + P_{SE1}) \times \left(\sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0,8} \right)}_{\text{hajavuon aiheuttamat häviöt}}, \quad (3.8)$$

jossa

esiintyvän kuormavirran I_L tehollisarvo määritetään seuraavasti

$$I_L = \sqrt{\sum_1^n I_h^2}, \quad (3.9)$$

joissa h on harmonisen järjestysluku,

I_h on harmonisen h virta,

I_1 on perustaajuisen virran RMS arvo nimelliskuormalla,

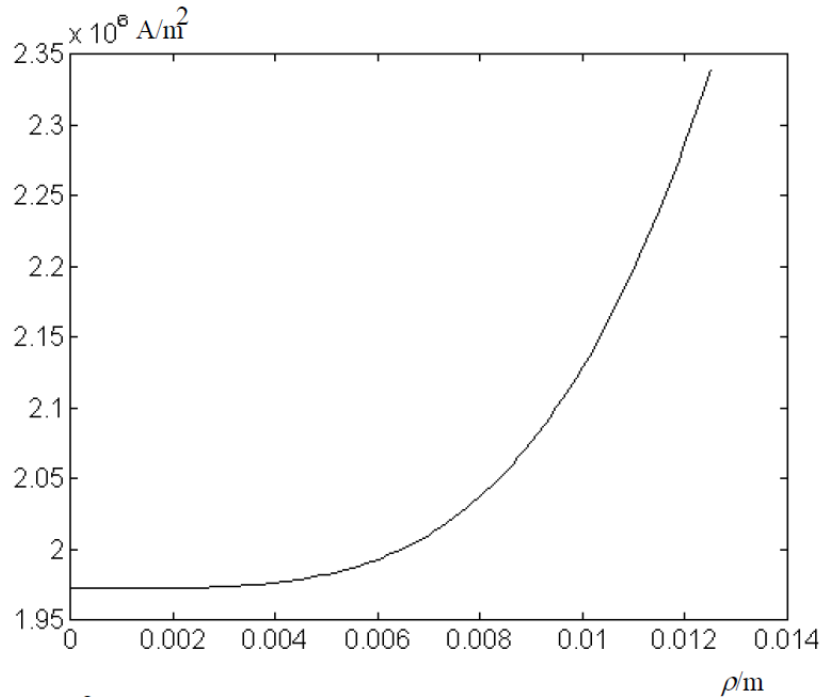
P_{LL1} on nimelliset kuormitushäviöt perustaajuudella,

P_{WE1} on käämityksen nimellispisteen pyörrevirtahäviöt perustaajuudella,

P_{CE1} on liitosten ja kytkentöjen nimellispisteenpyörrevirtahäviöt perustaajuudella,

P_{SE1} on hajavuon aiheuttamat häviöt nimelliskuormalla perustaajuudella.

Kaapelin vaihtovirtaresistanssi on korkeampi kuin tasavirtaresistanssi. Tämä johtuu virran ahtautumisesta ja läheisyysvaikutuksesta. Vaihtovirralla virta ahtautuu johtimen reunoille, koska magneettikenttä synnyttää pyörrevirtoja. Pyörrevirroilla on eri kulkusuunta eri osissa johdinta. Tästä johtuen virrantiheys on korkeampi johtimen reunoilla. Virranahto on esitetty kuvassa 3.2. (Khegay 2010)



Kuva 3.2 Virranahto 500 mm²:n kuparijohtimessa 1000 A:n virralla 50 Hz:n taajuudella. Johtimen säde on 0,0125 m. (Pyrhönen & Nerg 2004)

Virrantiheys jakautuu epätasaisesti johtimella johtuen toisen johtimen läheisyydestä. Ensimmäisen johtimen magneettikenttä indusoi pyörrevirtoja toiseen johtimeen. Pyörrevirrat kulkevat samaan suuntaan kuin toisen johtimen päävirta sillä puolella jolla on ensimmäinen johdin. Toisen johtimen toisella puolella taas pyörrevirrat kulkevat toiseen suuntaan. Lopulta virrantiheys on suurempi niillä johtimen puolilla jotka ovat toisten johtimien vieressä, kuin mitä se on muilla puolilla johdinta. (Khegay 2010)

Khegayn (2010) ja Lovinskiyn (2010) diplomitöiden perusteella voidaan kaapelin resistanssin kasvu jättää huomioimatta ainakin taajuusalueella 50 Hz – 2 kHz merkityksettömän kasvun vuoksi. Lisäksi tätä suurempitaajuisten virtojen suuruudet ovat useimmiten hyvin pieniä.

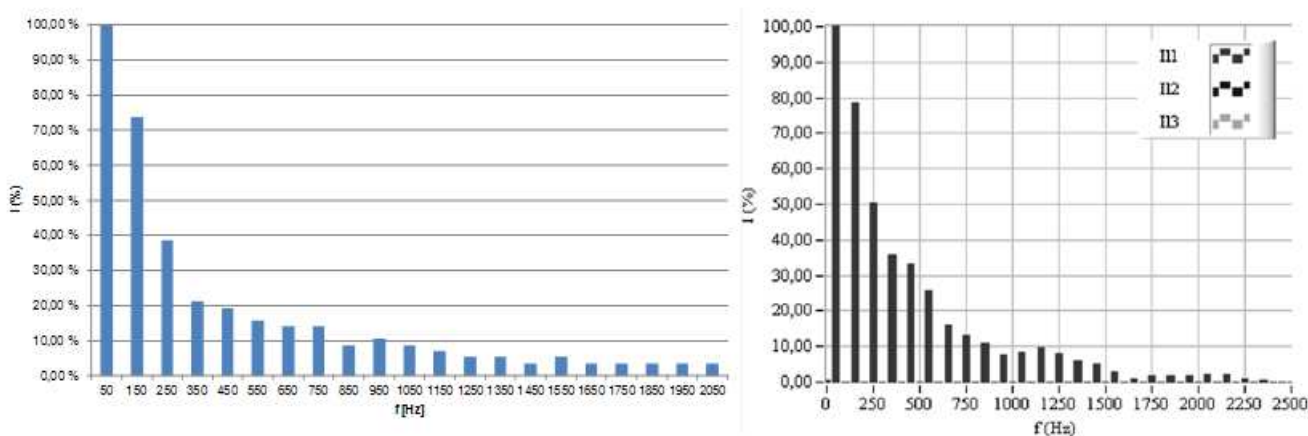
3.3 Lamppujen aiheuttama kuorma

Energiansäästölamppujen loisteho otetaan verkosta, jolloin loisteho kasvattaa kuorman virtaa ja pienentää johtimen kapasiteettia siirtää pätötehoa. Virta voidaan jakaa pätö- ja loisvirtaan. Loisvirran kasvu kasvattaa kokonaisvirtaa ja kääntäen, loisvirran pienentäminen pienentää kokonaisvirtaa. (Kontturi & Ålander 2008).

Energiansäästölamppujen hyvänä puolena ovat pienentyneet pätötehohäviöt, ja haittapuolena harmonisvirtojen aiheuttamat ongelmat, jotka voidaan tehokkaasti kompensoida vain aktiivisilla

kompensaattoreilla. Harmonisvirrat aiheuttavat virtojen kasvamista pienjänniteverkon nollajohtimessa. Harmonisvirrat aiheuttavat harmonisjännitteitä, jotka voivat häiritä moottoreita ja uusia elektronisia laitteita. Harmonisvirtojen ongelmat vaikuttavat lähinnä pienjänniteverkossa, jossa ne syntyvät. Jakelumuuntaja on tehokas este harmonisvirtojen kulkeutumiseen pienjänniteverkosta keskijänniteverkkoon. (Matvoz 2008)

Energiansäästölamputta on 50 Hz taajuussisällön lisäksi muitakin taajuuskomponentteja. Kuvassa 3.3 on havainnollistettu erään 11 W energiansäästölamputta virran taajuussisältöä.



Kuva 3.3 Megaman liliput 11 W -energiansäästölamputta virran spektrimuoto sekä erään toisen energiansäästölamputta spektrimuoto (Matvoz 2008)

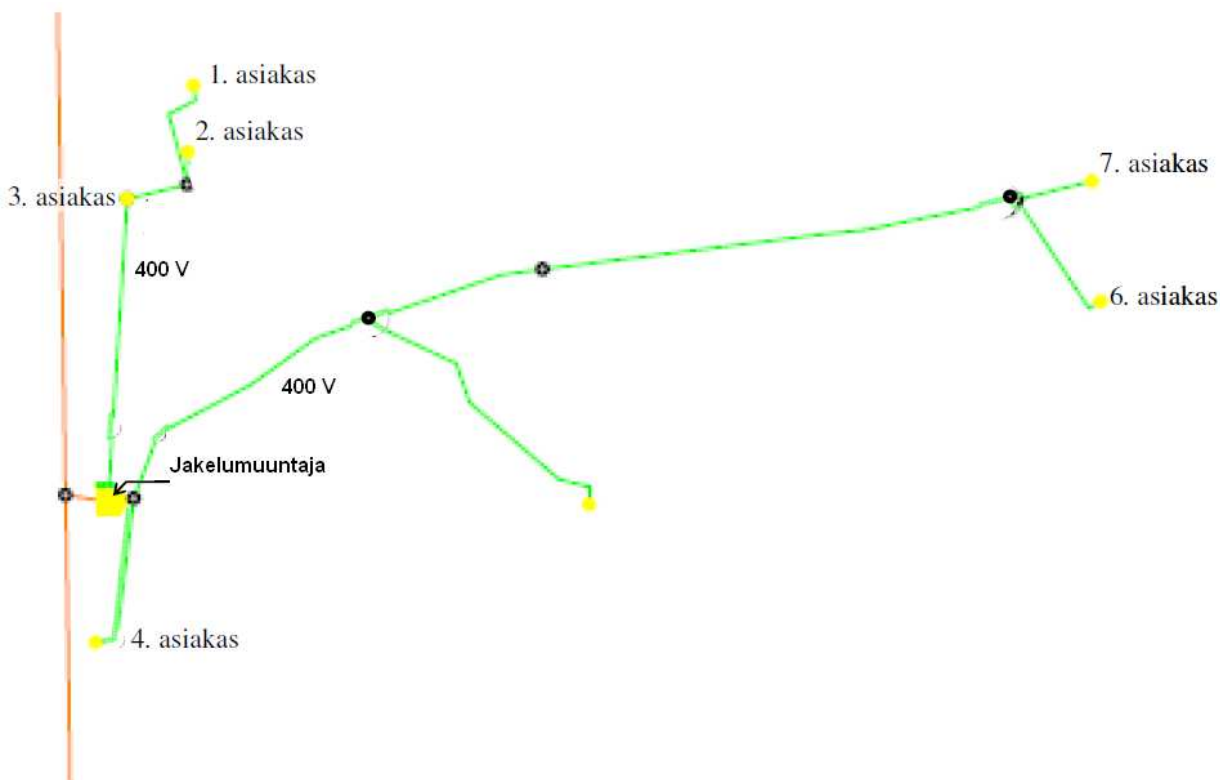
Kuvasta 3.3 nähdään virran eri harmonisten suuruudet. Kuvassa 3.3 suurin amplitudi on 50 Hz taajuus ja siitä seuraavat ovat parittomia harmonisia eli 3., 5. jne. Sähköjakaiverkkoon liittyvissä laskelmissa käytetään harmonisvirtojen arvoja 40. harmoniseen asti. Kuvassa 3.3 on vertailtu kahdessa eri mittauksessa mitattujen energiansäästölamppujen spektriä. Spektrit eivät eroa toisistaan juurikaan. Verrattaessa Megaman liliput 11 W -energiansäästölamputta mitattuja harmonisvirta-arvoja ja taulukossa 2.1 esitettyjä virtarajoja huomataan, että energiansäästölamppu ei täytä standardin mukaisia vaatimuksia. Kyseisen lampun harmonisvirrat on mitattu Agilent 6812B -tehoanalysaattorilla. Virtarajojen ylittyminen voi johtua mm. siitä, että standardimittausolosuhteet ovat niin hyvät.

4 LASKENNALLINEN TARKASTELU

Energiansäästölamppujen vaikutuksia tutkitaan haja-asutusalueella sijaitsevalla muuntopiirillä. Vaikutuksia tutkitaan niin asiakkaiden kuormituksen näkökulmasta, kuin koko muuntopiiri tasolla. Energiansäästölamput vaikuttavat niin tehon kulutukseen kuin kokonaisenergiaan.

4.1 Esimerkki-muuntopiiri

Työssä tutkitaan, millaisia vaikutuksia jakelumuuntajalle on siitä, kun kotitalousasiakkaat vaihtavat hehkulamppunsa energiansäästölamppuihin. Vaikutuksia on tutkittu kuvan 4.1 mukaisessa muuntopiirissä. Kirjallisuusselvityksen perusteella muuntajan häviöissä tapahtuva muutos on merkittävämpi kuin johtojen häviöissä tapahtuva muutos. Muuntopiirissä on 7 asiakasta, joista jokaisen asiakkaan huipputehon ajatellaan olevan 17 kW Paajasen (2009) työn mukaisesti, vuosittaisen energiankulutuksen 20000 kWh ja lamppujen lukumäärän 30 lamppua per asiakas. Lamput ovat yksivaihekuormitusta, mutta työssä ajatellaan niiden jakautuvan tasaisesti kaikille kolmelle vaiheelle.

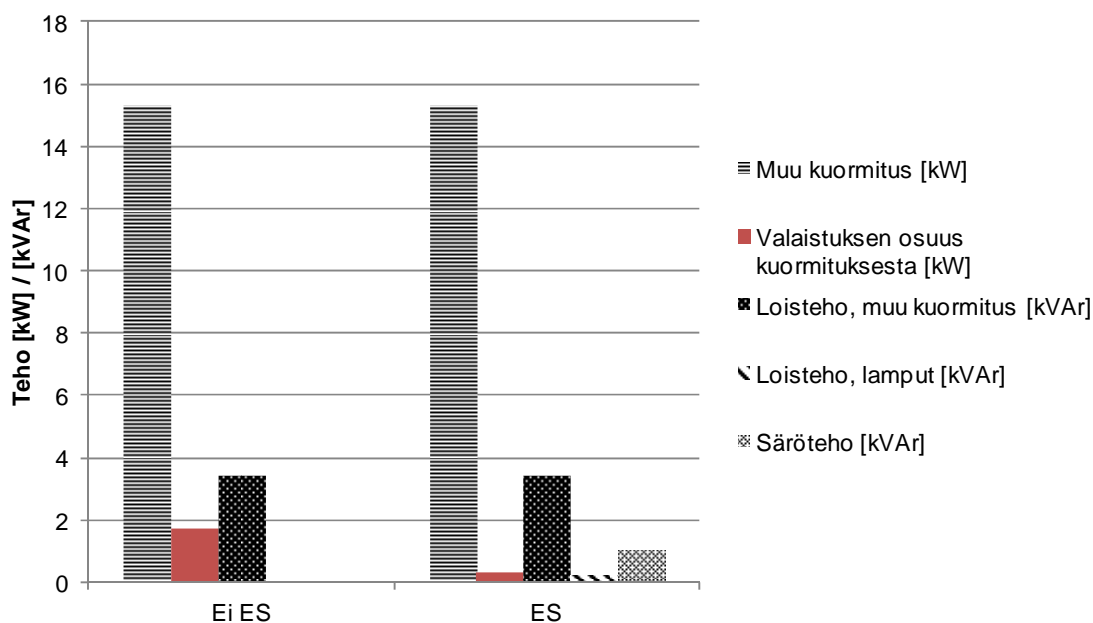


Kuva 4.1 Esimerkkinä sähkönjakeluverkko, jonka mukaisesti lasketaan verkon tehot.

Muuntopiirin vuosienergia on 140 MWh. Yhtälön (3.1) avulla voidaan käänteisesti ratkaista yksittäisen asiakkaan keskimääräinen huipputeho, eli 50 % ylitystodennäköisyyttä vastaava huipputeho. Kun oletetaan keskihajonnaksi 50 % ja annetun huipun ylitystodennäköisyydeksi 95 %, saadaan yhden asiakkaan keskimääräiseksi huipputehoksi 9,3 kW. Koko muuntopiirin keskimääräiseksi huipputehoksi saadaan 65,2 kW. Jakelumuuntajan tekniseksi mitoitusvahvuudeksi saadaan 85,5 kW. Kuvasta 4.1 nähdään, että mitoitusvahvuuden ollessa 85,5 kW on 100 kVA muuntaja on teknisesti ja taloudellisesti paras vaihtoehto kyseiseen muuntopiiriin.

4.2 Energiansäästölamppujen vaikutus kuormitukseen

Hehkulamppujen vaihtaminen energiansäästölamppuihin pienentää valaistuksen osuutta päätötehuormituksessa. Valaistuksen osuus kuormituksesta hehkulamppuja käyttämällä on 1,7 kW. Lamppujen vaihtamisen seurauksena asiakkaan loisteho kasvaa ja särötehoa esiintyy. Kuvassa 4.2 on esitetty yhden asiakkaan tehojen jakauma. Asiakkaan laitteistojen huipputeho ennen lamppujen vaihtamista on 17 kW. Lamppujen vaihtamisen jälkeen huipputeho on 15,5 kW. Tehokerroin hehkulamppu kuormalla on 0,98, ja vaihdettaessa hehkulamput energiansäästölamppuihin kokonaistehokerroin on 0,96. Kokonaistehokerroin eroaa tehokertoimesta siinä, että kokonaistehokertoimessa huomioidaan myöskin säröteho, joka aiheutuu energiansäästölamppuista.



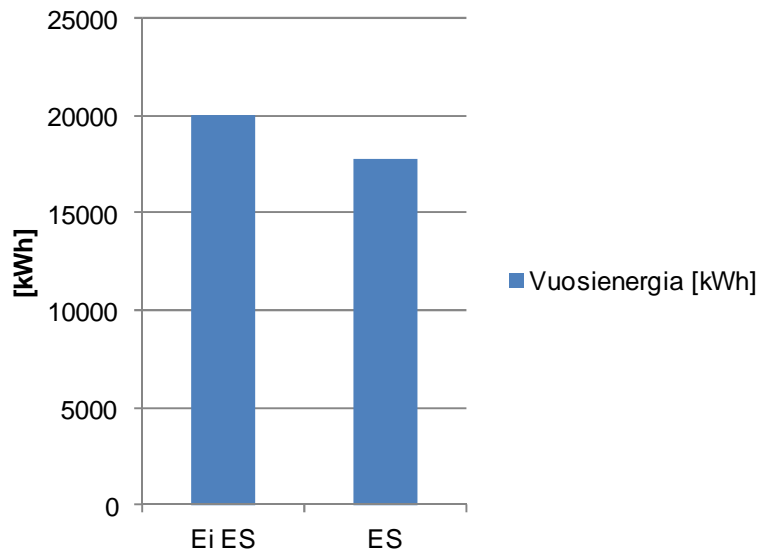
Kuva 4.2 Asiakkaalla tehohiipun aikaan esiintyvä tehojakauma. Tehot on eritelty valaistuksen ja muun kuormituksen osalta. Merkintä ES tarkoittaa tilannetta, jossa hehkulamput on korvattu energiansäästölamppuilla.

Savon Sanomissa (2010) julkaistussa lehtiartikkelissa pohditaan, että loistelamppujen loisteho voi tulla osaksi sähkölaskua, ellei loistelamppuihin tule loistehon kompensointia. Kuten edellä on esitetty, loistehon osuus kasvaa verkossa, ja on hyvinkin mahdollista, että loistehosta aletaan laskuttaa asiakkaita.

Seesvuoren esitelmässä (2010) osoitetaan mittauksilla, että 11 W energiansäästölampulla on mitattu 7 W päätöteho- ja 79 VA loisteho-osuudet. Vertailussa 60 W hehkulamppua vastaava energiansäästölamppu varaa noin 80 VA verkkokapasiteettia. Nykyisin, kun laskutus perustuu

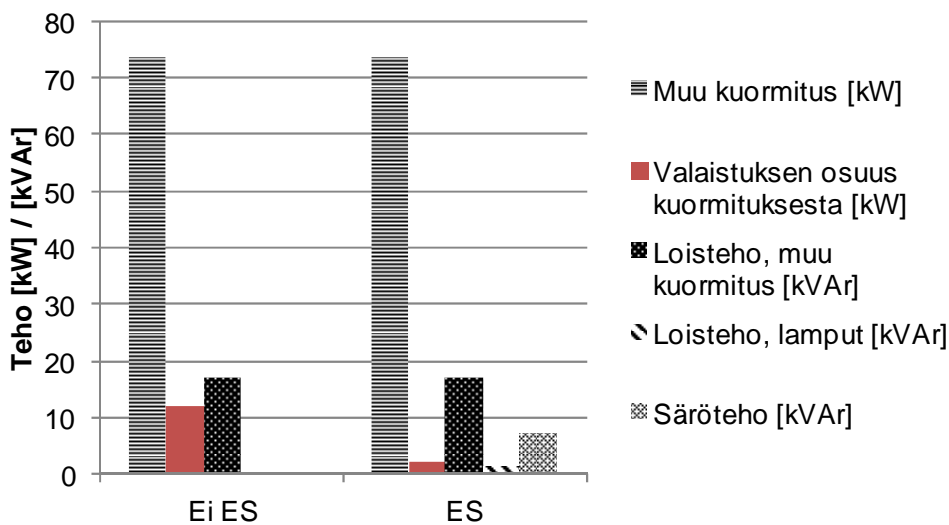
ainoastaan pätötehoon, verkkoyhtiö tekisi tulevaisuudessa tappiota 380 snt joka tunti, kun otetaan huomioon loistehon vaatima kompensointi ja yliaaltojen suodatus. (Seesvuori 2010)

Hehkulamppujen vaihtaminen energiansäästölamppuihin pienentää myös vuosienergiaa. Yhden asiakkaan vuosienergia on 20000 kWh, kun valaisimina ovat hehkulamput. Kuvassa 4.3 on esitetty yhden asiakkaan vuosienergian muuttumista vaihdettaessa valaisimet energiansäästölamppuihin.



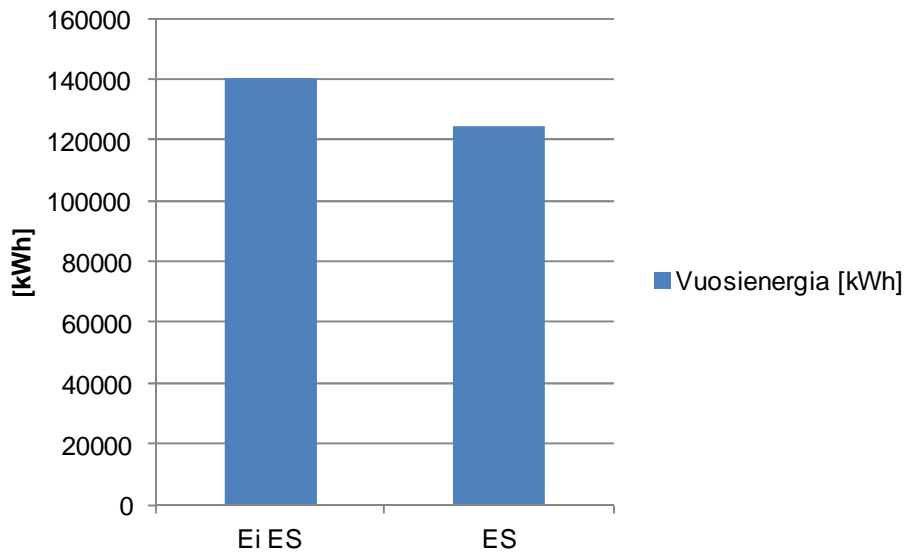
Kuva 4.3 Asiakkaan vuosienergia tilanteissa, joissa valaisimina ovat hehkulamput tai energiansäästölamput. Energiansäästölamppujen vaikutukset muuntajahäviöihin

Käydään läpi energiansäästölamppujen vaikutukset muuntajan kuormitushäviöihin sekä tehojen jakautuminen muuntajalla, jossa on huomioitu koko muuntopiirin tehot. Kuvassa 4.4 on esitetty tehojakauma muuntajalla.



Kuva 4.4 Muuntajalla tehohiipun aikaan esiintyvä tehojakauma. Tehot on eritelty valaistuksen ja muun kuormituksen osalta.

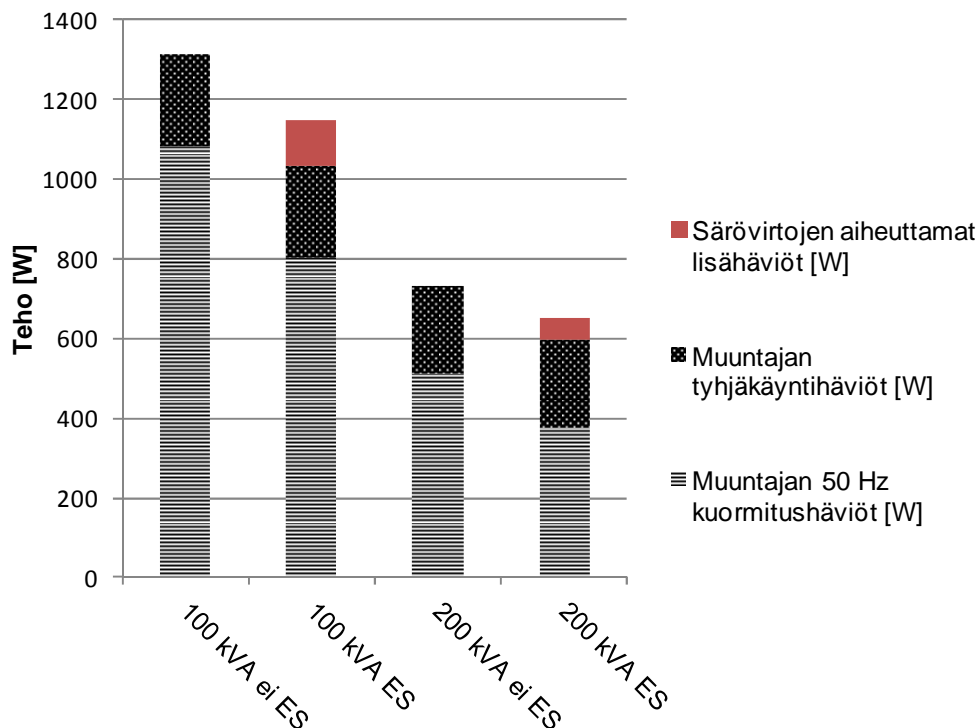
Muuntopiirin vuosienergia on 140000 kWh, kun asiakkailla on valaisimina hehkulamput. Vuosienergia tippuu kuvan 4.5 osoittamalla tavalla 125000 kWh:iin, kun asiakkaat vaihtavat hehkulamppunsa energiansäästölamppuihin.



Kuva 4.5 Muuntopiirin vuosienergia tilanteissa, joissa valaisimina ovat hehkulamput tai energiansäästölamput.

4.3 Energiansäästölamppujen vaikutus muuntajahäviöihin

Muuntajan häviölaskelmat on tehty 100 kVA ja 200 kVA muuntajille yhtälön (3.8) mukaisesti. Laskuissa käytettiin lamppuna Megaman liliput 11 W -energiansäästölamppua, jonka virran spektri on esitetty kuvassa 3.3. Muuntajan häviölaskelmat tehtiin tilanteissa, jossa on aluksi hehkulamput valaisimina ja sitten energiansäästölamput. Laskujen tulokset on esitetty kuvassa 4.6.



Kuva 4.6 Muuntajien häviöt. Merkintä ES tarkoittaa energiansäästölamppuja.

Kuvasta 4.6 nähdään, että 50 Hz:n kuormitushäviöt pienenevät vaihdettaessa hehkulamput energiansäästölamppuihin. Energiansäästölamppujen muuntajassa aiheuttamat lisähäviöt ovat kuitenkin huomattavia. Tämä voi pahimmillaan johtaa siihen, että muuntaja ikääntyy nopeammin, eli se voidaan joutua vaihtamaan aikaisemmin kuin on ollut tarkoitus. Lisäksi, jos saneerauksen yhteydessä päätettäisiin pienentyneen 50 Hz kuorman vuoksi vaihtaa muuntaja pienempään, voisi se särötehon vuoksi jäädä alimitoitetuksi. Mikäli kuormitus on esimerkiksi enemmän painottunut valaistukseen, niin särövirtojen aiheuttaman kuormituksen osuus on suurempi. Mikäli asiakkaat eivät olisi sähkölämmittäjiä, olisi valaistuksen osuus suurempi, joka lisää lamppujen aiheuttamaa särötehon merkitystä mm. muuntajan mitoituksessa. Tämän vuoksi ongelmia saattaa esiintyä esimerkiksi kaukolämpö-taajamissa. Tarvitaan lisää kohdetarkasteluja erilaisissa muuntopiireissä.

5 YHTEENVETO

Tavoitteena oli selvittää vaikutukset pienjännitesähköverkolle tilanteessa, jossa kotitalouksien hehkulamput vaihdetaan energiansäästölamppuihin. Energiansäästölamppuihin vaihtaminen pienentää pätötehuormaa, mutta samalla energiansäästölamppujen harmonisvirrat aiheuttavat lisähäviöitä niin muuntajissa kuin johdoissa.

Työssä keskityttiin loistelamppujen harmonisvirtojen aiheuttamiin häviöihin muuntajissa. Johdot jätettiin huomioimatta laskelmissa, sillä niissä aiheutuvat lisähäviöt eivät ole niin merkityksellisiä kuin muuntajahäviöt. Muuntopiiriin mitoitettiin muuntaja, kuten kappaleessa 3.1 on esitetty. Muuntajan häviölaskelmien tulokset on esitetty kappaleessa 4. Tuloksista nähdään, että kotitalouksien hehkulamppukuormalla pätötehon osuus on 83 % ja loistehon 17 %. Vaihdettaessa hehkulamput loistelamppuihin pätötehon osuus pienenee 74 prosenttiin ja verkossa alkaa esiintyä särötehoa. Kappaleen 4.3 kuvassa 4.6 on esitetty muuntajille aiheutunut kuormitushäviöiden kasvu. Kuvasta 4.6 nähdään, että kuormitushäviöt pienenevät vaihdettaessa energiansäästölamppuihin, mutta harmonisten aiheuttamat lisähäviöt ovat kuitenkin huomattavia. Loistehon osuuden kasvaessa verkossa voidaankin miettiä, että aletaanko loistehostakin laskuttaa asiakkaita energiansäästölamppujen yleistyessä. On kuitenkin huomattava, että laskelmissa mittaukset sekä oletukset aiheuttavat virhettä, kuten lamppukuorman jakautumista tasaisesti kaikille vaiheille.

Jatkotutkimusta tulisi tehdä LED-valaisimien osalta. Tässä työssä ei LED-valaisimia käsitelty häviölaskelmissa, mutta ne myös aiheuttavat verkkoon särövirtoja. Muuntopiirissä tehtävillä mittauksilla saataisiin selville kuinka tarkka teoreettinen tarkastelu on käytännössä, sekä nollajohtimessa esiintyvät virtojen suuruudet käytettäessä energiansäästölamppuja hehkulamppujen sijaan. Muuntaja mitoitetaan muuntopiiriin asiakkaiden pätötehon, ja arvioidun loistehon avulla. Muuntajan mitoituksessa tulisi myös huomioida elektroniikan aiheuttamat särötehot, jotka varaavat verkoston kapasiteettia ja kasvattavat muuntajan häviöitä. Nyt muuntajan mitoituksessa voi käydä niin, että muuntaja on alimitoitettu kuorman muuttuessa yhä elektronisemmaksi.

LÄHTEET

Aalto, H. 2011. Teholähteet LED-valaistuksessa ja sopivan valinta kotitalouskäyttöön. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.12.2011]. Saatavissa <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/72524/nbnfi-fe201111075809.pdf?sequence=3>

ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita, luku 9: Loistehon kompensointi ja suodatus. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.11.2011]. Saatavissa http://heikki.pp.fi/abb/090_0007.pdf

ABB. 1999. Kolmannen yliaallon opas. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.11.2011]. Saatavissa [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/662C86451B71D70DC1256C5500269561/\\$File/THF11FI96_04.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/662C86451B71D70DC1256C5500269561/$File/THF11FI96_04.pdf)

ABB2. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita, luku 11: Tehomuuntajat. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.11.2011]. Saatavissa http://heikki.pp.fi/abb/110_0007.pdf

Chapman, D. 2001. Power Quality Application Guide: Harmonics causes and effects. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.12.2011]. Saatavissa <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/downloads/pqug/31-causes-and-effects.pdf>

Halonen L., Lehtovaara J.. 1992. Valaistustekniikka. Otatieto Oy. Jyväskylä. ISBN 951 672-145-1

Honkapuro S., Jauhiainen N., Partanen J., Valkealahti S. 2009. Sähkön ja kaukolämmön rooli energiatehokkuudessa ja energian säästössä. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.12.2011]. Saatavissa http://www.energia.fi/sites/default/files/sahko_ja_kaukolampo_energiatehokkuudessa_20091112_0.pdf

IEEE 519 Standardi: Suositeltavat käyttötavat ja vaatimukset harmonisten hallintaan sähkövoimajärjestelmissä. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.2.2012]. Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=210894>

Khegay J. 2010. Optimization of the power cable for low voltage direct current system. Diplomityö.

Kontturi M., Ålander J.. 2008. Energiansäästölamppujen verkkovaikutukset. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.10.2011]. Saatavissa <http://www.ncp.fi/julkaisut/sahkoinenjulkaisu/Kontturi%20&%20%C3%85lander.pdf>

Lovinskiy, N. 2010. Effects of imbalances and non-linear loads in electricity distribution system. Diplomityö.

Matvoz D. & Maksic M. 2008. Impact of compact fluorescent lamps on the electric power network. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.3.2012]. Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4668864>

Motiva, 2011. Euroopan komission asetus (N:o 244/2009) lamppujen energiatehokkuudelle. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.11.2011]. Saatavissa http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/vaikuta_hankinnoilla_valaistus/euroopan_komission_asetus_%28n_o_244_2009%29_lamppujen_energiatehokkuudelle

Paajanen, P. 2009. Tasasähkön käyttömahdollisuudet pienjännitesähkökojeissa ja kiinteistösähköverkoissa. Diplomityö.

Parkkinen, A.. 2008. Harmonissäröä pienentävät tasasuuntaajatopologiat. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.12.2011]. Saatavissa <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/42655/nbnfi-fe200811052058.pdf?sequence=3>

Partanen, J. et al. 2010. Tehoelektroniikka sähkönjakelussa – Pienjännitteinen tasasähkönjakelu. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.2.2012]. Saatavissa http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/research/electricitymarkets/publications/Documents/Tehoelektroniikka_sahkonjakelussa-Loppuraportti-2010_ISBN978-952-214-981-7.pdf

Partanen, J. et al. 2011. Sähkömarkkinat – opetusmoniste.

Ponce M. et al. 2006. High efficient integrated electronic ballast for compact fluorescent lamps. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.2.2012]. Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1603686>

Pikkarainen M, Bashir S., Vehmasvaara S., Pakonen P., Verho P. 2011. Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien ja mittariluentajärjestelmien välinen yhteensopivuus – Vaihe 1. Loppuraportti. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.12.2011]. Saatavissa http://www.energia.fi/sites/default/files/energiansaastolamppujen_verkostovaikutukset_ja_plc-projekti_loppuraportti_2011.pdf

Pyrhönen, Juha & Nerg Janne. 2004. Sähkömagnetismi. Opetusmateriaali.

Savon Sanomat. 2010. Energiansäästölamput uhkaavat sähkölaskua. [lehtiartikkeli]. [viitattu 3.5.2012]. Saatavissa <http://www.savonsanomat.fi/savo/loissahko-ja-yliaallot-uhkaavat-sahkolaskua/1041359>

Seesvuori, R. 2010. Energiaa säästävien laitteiden vaikutukset sähköverkolle. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.6.2012]. Saatavissa http://www.energia.fi/sites/default/files/dokumentit/sahkomarkkinat/Energiatehokkuus/lu_seesvuori_saastol_verkkovaik.pdf

SENER, 1999. Sähköenergialiitto ry. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen. Julkaisusarja 1/99. Helsinki 1999. s. 7-9, 18 ja 24. ISBN 952-9696-25-6

Shuuya, N. 2011. LED-teholähteet ja niiden ominaisuudet. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.5.2012]. Saatavissa https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/36211/Shuuya_Nathan.pdf?sequence=1

Siltala, S. 2010. Energiatehokas toimisto - LED-teknologia. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.12.2011]. Saatavissa <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/59436/nbnfi-fe201003041455.pdf?sequence=3>

Viljainen, S. 2001. Sähkön laadun seurantamittausten nykytila Suomessa ja erään mittalaitteen soveltuvuus sähkön laadun mittaamiseen. Diplomityö.