

Jani Pulkkinen

Teollisuusvalaistuksen kompensointi ja yliaaltosuodatus

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
1.4.2012

ALKULAUSE

Kiitän Ruukki Oyj:n Hämeenlinnan tuotantolaitoksen sähkökäyttöjen valvojaa Arto Savolaista, sähköosaston työnjohtajaa Rauli Jokista ja sähköosaston sähköpäivystyksen työntekijöitä. Kiitän lisäksi lehtori Sampsu Kuparia Metropolia Ammattikorkeakoulusta.

Tekijä Otsikko	Jani Pulkkinen Teollisuusvalaistuksen kompensointi ja yliaaltosuodatus
Sivumäärä Aika	32 sivua + 1 liite 1.4.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Sampsa Kupari kunnossapitoinsinööri Arto Savolainen
<p>Insinööriyössä selvitettiin tuotantohallin valaistuksen kompensoinnin nykytila. Lisäksi selvitettiin valaistuksen aiheuttamat yliaallot kiinteistön sähköverkkoon. Sähköteknisin mittauksin saatiin selvitettyä valaistuksen kompensointitarve ja kompensointilaitteiston kunto. Mittausten perusteella kompensointi säädettiin mahdollisimman optimaaliseksi, laitteiston puitteissa.</p> <p>Työssä havaittiin, että useilla valaistuskeskuksilla oli rikkoutuneita kompensointilaitteita tai niitä ei ollut ollenkaan. Näin ollen useat keskuksset olivat alikompensoituja. Mittauksissa kävi ilmi, että verkossa esiintyy suuria määriä virtayliaalloja. Virtayliaallot saattoivat olla syynä kompensointilaitteiden rikkoutumisiin. Virtayliaallot eivät kuitenkaan aiheuttaneet suurta säröytymää jännitteen käyrämuotoon. Jännitteen hyvään laatuun vaikutti kiinteistön ylimitoitettu sähköverkko.</p> <p>Työssä tultiin siihen tulokseen, että virtayliaallojen vuoksi valaistuksen kompensoinnissa tulisi käyttää estokelaparistoja. Yliaaltotilanne ei vaadi muita toimenpiteitä, koska jännitesäro pysyi pienenä. Työssä annettiin kolme erilaista vaihtoehtoa kompensointitilanteen korjaamiseksi.</p>	
Avainsanat	loisteho, yliaallot, kompensointi, suodatus

Author Title	Jani Pulkkinen Compensating and Filtering of Industrial Lightning
Number of Pages Date	32 pages + 1 appendix 1 April 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Sampsa Kupari, Senior Lecturer Arto Savolainen, Section Manager
<p>The purpose of this thesis was to evaluate the state of the current compensation equipment for the lighting of a production hall. Also the harmonics caused by the lighting to the mains were investigated. The need for compensation of reactive power and the state of the current compensation equipment were investigated using electrical measurements. Based on the measurements the current compensation equipment was adjusted as well as possible.</p> <p>It was discovered that several compensating devices were broken down or they had been removed. Thus, many distribution boards were undercompensated. Measurements showed large numbers of current harmonics. The current harmonics could be the reason for breakdowns of the compensation devices. However, the current harmonics were not causing much distortion to the voltage waveform. The main reason for the good quality of voltage was the oversized grid in the production hall.</p> <p>It was concluded that filtered capacitor banks must be used for compensating because of the high levels of current harmonics. Because the voltage distortion remained low, the situation with harmonics does not require any further measures. Three different solutions for fixing the situation with the compensation are given in this thesis.</p>	
Keywords	reactive power, harmonics, compensating, filtering

Sisällys

Alkulause

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Symbolit

1	Johdanto	1
2	Sähkön laatuvaatimukset	1
3	Loisteho	2
3.1	Kapasitiivinen loisteho	3
3.2	Induktiivinen loisteho	4
3.3	Loistehon vaikutukset sähköverkoissa	5
3.4	Loistehon kompensointi	6
3.5	Erytymäiset loistehon kompensointilaitteet	6
3.6	Kompensoinnin mitoitus	7
3.7	Resonanssin huomioon ottaminen kompensoinnin mitoituksessa	9
4	Yliaallot	9
4.1	Yliaaltojen vaikutukset sähköverkoissa	13
4.2	Yliaallot ja muuntajat	13
4.3	Yliaaltojen suodatus	15
4.3.1	Passiivisuodatin	15
4.3.2	Aktiivisuodatin	16
5	Mittaukset	17
5.1	Mittausten tavoitteet	18
5.2	Mittausmenetelmät	19
5.3	Mittalaitteet	20
6	Mittauksetulokset	20

6.1	Nykyinen kompensointilaitteisto	20
6.2	Loistehomittausten tulokset	22
6.3	Yliaaltomittausten tulokset	25
6.4	Mittaustulosten arviointi	27
7	Jatkotoimenpidesuosituks	30
8	Yhteenveto	31
	Lähteet	32
	Liite	
	Kompensoinnin mitoitustaulukko	

Symbolit

I	virta; A
U	jännite; V
P	teho; W
S	näennäisteho; VA
Q	loisteho; var
f	taajuus; Hz
$\cos\varphi$	tehokerroin
η	hyötysuhde
S_k	oikosulkuteho; kVA
Q_c	kondensaattorin tuottama loisteho; kva _r
f_r	resonanssitaajuus; Hz
I_h	harmonisen yliaallon RMS virta; A
h	harmonisen yliaallon moninkerran järjestysluku

1 Johdanto

Kulutuselektroniikan määrän kasvaessa kotitalouksissa, myös loistehon kulutus on kasvanut merkittävästi. Loistehon kulutuksen kasvua on pyritty rajoittamaan asettamalla rajat suurille loistehon kuluttajille mm. teollisuudelle. Loistehon kulutusrajat määrittävät verkosta otettavan loistehon määrän. Jos kulutusraja rikotaan, joutuu kuluttaja maksamaan loistehomaksua. Loistehomaksun tarkoitus on kannustaa teollisuutta tuottamaan kuluttamansa loisteho, jolloin loistehon tuotanto ei jää vain sähköntuottajan ja siirtoverkon omistajan vastuulle. Loistehon paikallisella tuotannolla säästetään siirtoverkon kapasiteettia pätöteholle sekä pienennetään jännitteen alenemaa siirtojohtimissa.

Tämä insinööritoimisto on tehty yhteistyössä Ruukki Oyj:n kanssa. Ruukki Oyj on suomalainen metallialan yritys, jonka toimialaa ovat metalliin perustuvat komponentit, järjestelmät ja kokonaistoimitukset. Yritys työllistää noin 12 000 henkeä 27 maassa. Yrityksellä on toimipisteitä Suomessa 31 paikkakunnalla.

Työssä selvitetään Ruukki Oyj:n Hämeenlinnan tuotantohallin valaistuksen loistehonkompensoinnin nykytila mittausten avulla. Seuraavaksi pyritään säätämään nykyinen kontaktoriohjattu kompensointi mahdollisimman hyvin ja kerrotaan vastaako kompensointi nykyisiä suosituksia. Työssä pyritään antamaan kokonaiskuva nykyisen kompensointilaitteiston tilasta sekä annetaan korjaussuositus työn tilaajalle. Lisäksi selvitetään mittauksin valaistuksen aiheuttamat yliaallot kiinteistön sähköverkkoon. Lopuksi verrataan tuloksia standardeihin ja annetaan korjaussuositus työn tilaajalle.

2 Sähkön laatuvaatimukset

Sähkönjakeluverkon sähkön laatuvaatimukset on säädetty standardissa SFS-EN 50160. Kyseinen standardi koskee pääasiassa sähkön tuottajaa ja myyjää. Kuluttajan vastuulla on estää sähkön epäpuhtauksien pääsy kuluttajalta jakeluverkkoon. Edellä mainittuja sähkön epäpuhtauksia ovat yliaallot ja loisteho. SFS-EN 50160 -standardi määrittelee rajat seuraaville komponenteille:

- jännitetaso
- ylijännite
- jännitekuopat
- välkyntä
- epäsymmetria
- signaalijännitteet
- jännitesärö
- verkkotaajuus. [1, s. 4.]

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan sähkön laatua loistehon sekä yliaaltojen ja niiden aiheuttamien jännite- ja virtasäröjen osalta. SFS-EN 50160 -standardi ei kuitenkaan käsittele lainkaan virtayliaaltoja, joten tässä työssä käytetään mittaustulosten arviointiin IEC 61000-3-4 -standardia. Standardi määrittää virtayliaalltorajat sähkölaitteille 63 A:n asti.

3 Loisteho

Loisteho on välttämätöntä, koska monet kulutuslaitteet tarvitsevat loistehoa toimiakseen. Loistehoa tarvitaan esimerkiksi sähkömoottoreissa pitämään yllä magneettikenttää. Loisteho poikkeaa pätötehosta siinä, että se ei tee lainkaan mekaanista työtä. Loisteho synnyttää kuitenkin virran, loisvirran. Loisvirta kuormittaa siirtojohtimia, jolloin osa johtimien tehonsiirtokapasiteetista kuluu loistehon aiheuttaman virran siirtämisessä. [2, s.133.]

Loistehoa voi olla kahdentyyppistä: kapasitiivista tai induktiivista. Vaikka loisteho on tarpeellista, se on myös haitallista. Loistehon haitallisuus johtuu loistehon synnyttämän virran ja jännitteen välisestä vaihe-erosta. Loistehon synnyttämä vaihe-ero alentaa tehokerrointa, joka vuorostaan vaikuttaa alentavasti laitteiden pätötehoon:

$$P = U * I * \cos \varphi \quad \text{pätöteho} \quad (1)$$

$$S = U * I \quad \text{näennäisteho} \quad (2)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad \text{loisteho} \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{tehokerroin} \quad (4)$$

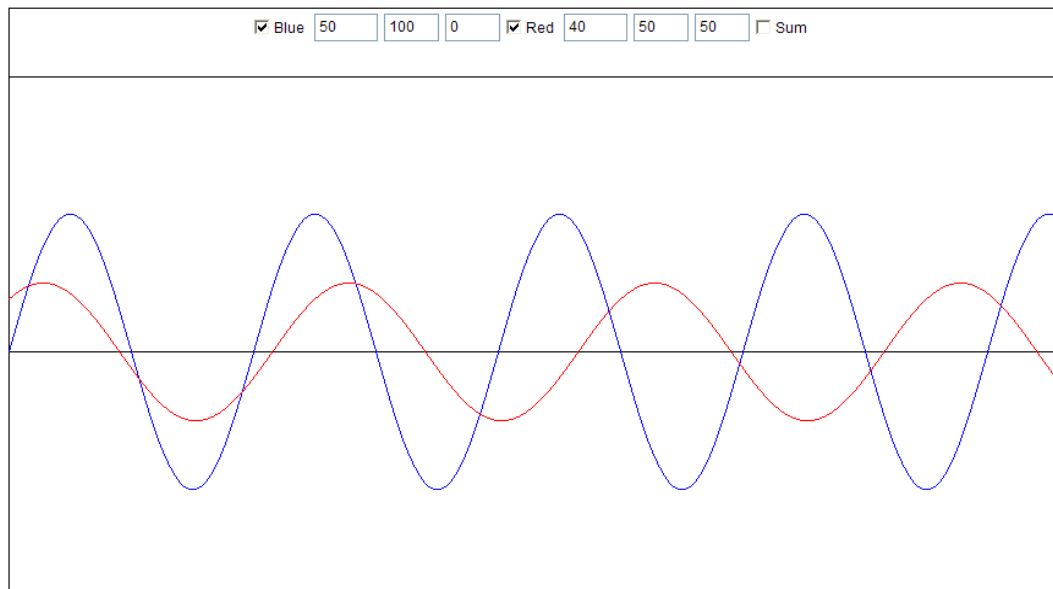
Pätöteho selvitetään yhtälön 3 eli loistehon yhtälön avulla, jolloin nähdään selvemmin, kuinka loisteho vaikuttaa pätötehoon.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \Leftrightarrow Q^2 = S^2 - P^2 \Leftrightarrow P^2 = S^2 - Q^2 \Leftrightarrow P = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

Johdetusta yhtälöstä voidaan huomata, että mitä pienempi on loistehon määrä, sitä suurempi on pätöteho suhteessa näennäistehoon. Täysin reaktiivisella kuormalla pätö- ja näennäisteho ovat yhtä suuria. Pätöteho voidaan laskea myös yhtälön 1 avulla, jossa tehokerroin pienentää pätötehoa. Yhtälöstä 4 voitiin havaita, kuinka tehokerroin muodostuu. Tehokerroin muodostuu siis pätö- ja näennäistehon suhteesta.

3.1 Kapasitiivinen loisteho

Kapasitiivista loistehoa [Q_{kap}] = var syntyy, kun kuormassa on kapasitanssia eli energiaa varaavia komponentteja esim. kondensaattoreita. Kapasitiivinen loisteho synnyttää vaihe-eron, jossa jännite on virtaa jäljessä tietyn asteluvun α verran.



Kuva 1. Kapasitiivisen loistehon aiheuttama vaihesiirto

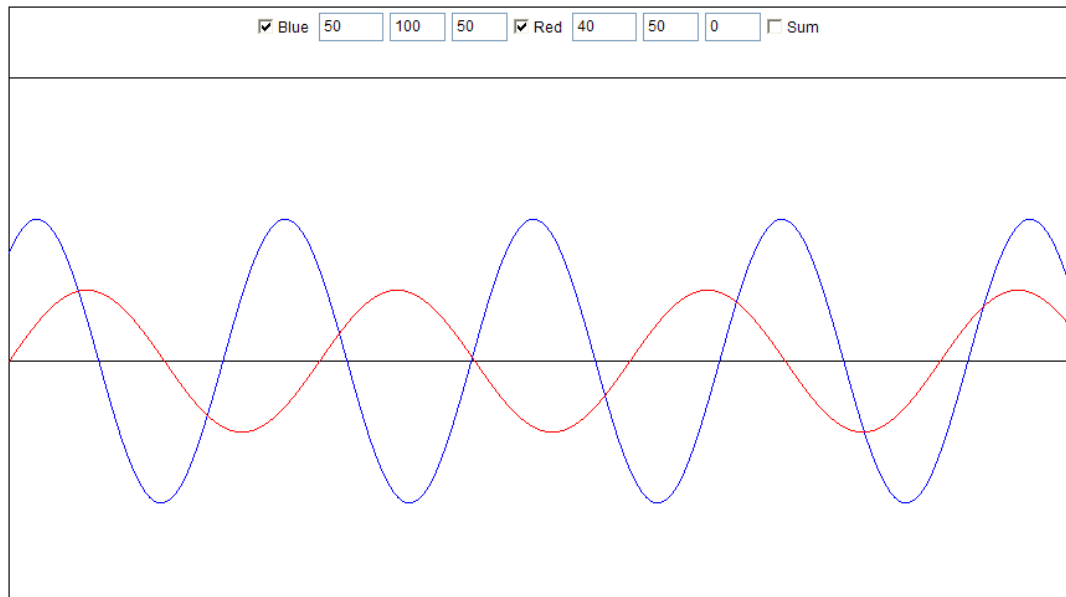
Kuvassa 1 (s. 3) on graafisesti havainnollistettu kapasitiivisen loistehon aiheuttama virran ja jännitteen välinen vaihesiirto. Kuvassa sinisellä on piirretty jännitteen käyrämuoto ja punaisella virran käyrämuoto. Kuten kuvasta 1 voitiin havaita, aiheuttaa kapasitiivinen loisteho vaihesiirron, jossa jännite on virtaa jäljessä. Tämä tarkoittaa, että virran amplitudi on jo kasvanut nollatason yläpuolelle, kun jännitteen amplitudi alkaa vasta nousta.

Kapasitiivinen loisteho tarkoittaa, että laite tai laitteisto tuottaa loistehoa. Loistehoa voidaan tuottaa mm. voimalaitoksien tahtigeneraattoreissa käyttämällä ylimagnetointia. Loistehon tuotanto tahtigeneraattoreilla tapahtuu kuitenkin aina päätötehon kustannuksella. Tästä syystä mm. teollisuus maksaa käytetystä loistehosta, jos verkon haltijan määrittelemä raja ylittyy. Loistehoa voidaan tuottaa myös erilaisilla kompensointilaitteilla.

Kotitalouksilta loistehosta ei toistaiseksi suoranaisesti veloteta loistehomaksua, mutta myös osaltaan sähkön hinnan nousuun vaikuttaa kasvanut loistehon kulutus, esim. tietokoneiden, energiansäästölamppujen, taulutelevisioiden ja muiden loistehoa kuluttavien laitteiden määrän kasvaessa. Lisääntynyt loistehon kulutus aiheuttaa sähköyhtiöille kasvaneita investointikustannuksia kaapeloinnin siirtokapasiteetin kasvattamisen ja loistehon tuotannon kautta.

3.2 Induktiivinen loisteho

Induktiivista loistehoa Q_{ind} (var) syntyy, kun kuormassa on induktanssia eli virran muu-
tosta vastustavia komponentteja, esim. keloja. Induktiivinen loisteho synnyttää vaihe-
eron, jossa jännite on virtaa edellä tietyn asteluvun σ verran.



Kuva 2. Induktiivisen loistehon aiheuttama vaihesiirto

Kuvassa 2 on graafisesti havainnollistettu induktiivisen loistehon aiheuttama virran ja jännitteen välinen vaihesiirto. Kuvassa sinisellä värillä on piirretty jännitteen käyrämuoto ja punaisella värillä virran käyrämuoto. Kuten kuvasta 2 voitiin havaita, aiheuttaa kapasitiivinen loisteho vaihesiirron, jossa jännite on virtaa edellä. Tämä tarkoittaa, että jännitteen amplitudi on jo kasvanut nollatason yläpuolelle, kun virran amplitudi alkaa vasta nousta.

Induktiivinen loisteho tarkoittaa, että laite tai laitteisto kuluttaa loistehoa. Tällöin kuluttava loisteho on otettava joko sähköverkosta tai tuotettava paikallisesti laitteen läheisyydessä.

3.3 Loistehon vaikutukset sähköverkoissa

Loisteho aiheuttaa siirtohäviöitä, koska verkossa joudutaan siirtämään myös loistehoa eikä pelkästään pätötehoa. Loistehon vuoksi osa kaapelin tehonsiirtokyvystä menee siten hukkaan. Usein loistehon vuoksi kaapelit voidaan joutua ylivoimattamaan, jotta pätötehon siirtokyky pysyisi samana kasvavan loistehon viedessä osansa kaapelin tehonsiirtokyvystä. Kaapeleiden ylivoimattaminen kasvattaa merkittävästi taloudellisia investointeja johtuen johtimien raaka-aineina käytettyjen materiaalien korkeasta hinnasta. Lisäksi loisteho aiheuttaa jännitteen alenemaa, joka saattaa aiheuttaa ongelmia

mm. moottoreille ja muille jännitteen amplitudiin herkästi suhtautuville laitteille. Loistehon synnyttämä virta aiheuttaa myös ylimääräistä lämpenemää johtimissa ja keskuksissa.

Moottoreilla jännitteen alenema vaikuttaa suoraan pätötehoon ja myös moottorin tuottamaan vääntömomenttiin. Lisäksi jännitteen alenema saattaa aiheuttaa ylimääräistä lämpenemää moottorin käämityksissä, jolloin moottorin elinkaari lyhenee. Moottorikäyttöjen yhteydessä onkin tärkeää tarkkailla sähkön laatua.

3.4 Loistehon kompensointi

Loistehoa kompensoidaan pyrkimällä saamaan verkon induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi yhtä suuriksi. Loistehoa voidaan kompensoida lisäämällä verkkoon kompensointikondensaattoreita, jotka asennetaan joko kuorman rinnalle tai kuorman kanssa sarjaan. Kompensointikondensaattoreita kutsutaan yleisesti kompensointiparistoiksi, koska ne koostuvat useista pienemmistä kondensaattoreista, joilla jokaisella on oma varokkeensa oikosulkusuojauksen saavuttamiseksi.

Kompensointiparistot tuottavat kuorman vaatiman loistehon, ja näin ollen loistehoa ei tarvitse ottaa siirtoverkosta, jolloin loistehomaksut pienenevät. Kompensointi rakennetaan yleensä joko kuormaa syöttäville keskuksille tai kuorman läheisyyteen, jolloin muut sähköverkon johtimet eivät joudu siirtämään loistehosta aiheutunutta virtaa. Lisäksi kompensoinnin ohjaus tulisi toteuttaa niin, että kompensointi on kytkettynä verkkoon vain kompensoitavan kuorman kanssa.

3.5 Erityyppiset loistehon kompensointilaitteet

Säädettäviä kompensointilaitteita käytetään yleensä kohteissa, joissa loistehon tarve vaihtelee. Säädettävät kompensointilaitteet koostuvat useista yksiköistä, joita automaattikka kytkee päälle tai pois päältä senhetkisen tarpeen mukaan. KytKentä perustuu reaaliaikaiseen loistehonmittaukseen ja nopeisiin tyristorikytkimiin.

Passiivisia kompensointiparistoja käytetään kohteissa, joissa loistehon tarve on vakio tai lähes vakio. Kompensointiparistot voidaan mitoittaa kohteeseen joko laskennan avulla tai loistehomittausten perusteella. Laskennan avulla kompensoinnin mitoitus on työläämpää, jos kyseessä on monimutkainen sähköverkko.

Verkon yliaaltopitoisuus vaikuttaa merkittävästi käytettävän kompensointilaitteiston valintaan. Pieniä yliaaltopitoisuuksia sisältävässä verkossa voidaan kompensointiin käyttää perinteisiä kompensointiparistoja. Yliaaltopitoisuuden lisääntyessä on siirryttävä käyttämään estokelaparistoja, jotka eivät vahingoitu yliaaltojen vuoksi. Runsaasti yliaaltoja sisältävässä verkossa on käytettävä yliaaltosuodattimia, joilla voidaan myös tuottaa tarvittava loisteho.

3.6 Kompensoinnin mitoitus

Kompensoinnin mitoitus voidaan toteuttaa joko laskentaan tai loistemittauksiin perustuen. Loistehomittauksiin perustuva kompensoinnin mitoitus tulee kyseeseen vain jo olemassa olevissa asennuksissa. Tällaisessa tapauksessa kuorman syöttöjohtimista mitataan esimerkiksi kolmivaiheisella tehoanalysaattorilla tai dataloggerilla kuorman ottama loisteho. Tehoanalysaattorin ilmoittama loisteho $[Q] = kva_r$ ilmoitetaan kompensointilaitteiston valmistajalle, joka valmistaa kohteeseen mitoitettun kompensointipariston.

Kohteissa, joissa loisteho ei ole vakio mittausta olisi hyvä jatkaa n. 30 min – 8h, jotta saataisiin selville tarvittavat loistehon vaihtelut. Kohteissa, joissa loisteho ei ole vakio on dataloggeri ehdoton työkalu kompensoinnin mitoituksessa. Kalliiden mittalaitteiden hankinta ei ole välttämätöntä eikä aina järkevääkään, sillä useat yritykset myyvät loistehomittauspalveluita. Useiden loistehomittauspalveluita myyvien yritysten kautta on myös mahdollista hankkia tarvittava loistehonkompensointilaitteisto.

Laskennalla selvitettävä kompensoinnin mitoitus voidaan tehdä joko olemassa oleviin asennuksiin tai vasta suunnitteilla oleviin asennuksiin. Kompensointitarpeen määrä voidaan selvittää, kun tiedetään kuorman pätöteho, tehokerroin ja hyötysuhde. Yleensä johtimista aiheutuvat muutokset laskentaan käytettävissä arvoissa ovat niin pieniä, että

niitä ei tarvitse ottaa huomioon. Tosin siirtoverkkojen loistehonkompensoinnin laskennassa johtimien impedanssi tulee ottaa huomioon suurien johdinpituuksien takia:

Seuraavaksi pitää valita tavoiteltu tehokerroin, yleensä käytetään arvoa 0,95 - 0,98. Moottoreiden kompensointia suunniteltaessa on tärkeää varoa ylikompensoimista, koska ylikompensointi saattaa aiheuttaa moottorin itsesyttymisen. Itsesyttymisellä moottoreiden yhteydessä tarkoitetaan moottorin muuttumista generaattoriksi, kun moottori sammutetaan. Tämä saattaa tuottaa suuria ylijännitteitä, jotka vaurioittavat komponentteja. Siksi moottoreille suositettu suurin kompensoinnilla saavutettu tehokerroin on 0,97. [2, s. 134.]

Tarvittavan kompensoinnin määrä voidaan tämän jälkeen selvittää seuraavasta yhtälöstä:

$$Q = \frac{P[kW]}{\eta} * (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

, jossa [loisteho] $Q = \text{kva}_r$

[pätöteho] $P = \text{kW}$

$\eta =$ Kuorman hyötysuhde

$\varphi_1 =$ Kuorman tehokerroin ennen kompensointia

$\varphi_2 =$ Kuorman tavoiteltu tehokerroin

Lasketaan esimerkkitapaus symmetriselle kolmivaiheiselle kuormalle, jonka pätöteho on 11kW, hyötysuhde 0,895, tehokerroin ennen kompensointia 0,89 ja tehokertoimen tavoite 0,97.

Sijoitetaan arvot seuraavaan yhtälöön:

$$Q = \frac{11 \text{ kW}}{0,895} * (\tan 0,89 - \tan 0,97) = -2,76 \text{ kVar}$$

Esimerkkikuorman loistehonkulutus on siis 2,76 kva_r.

Vastaavasti tarvittava kompensointi voidaan selvittää taulukon (liite) kertoimien avulla. Oikea kerroin haetaan katsomalla taulukon vasemmalta sivulta kuorman tehokerroin $\cos \varphi_1$ ja taulukon yläriviltä tavoiteltu tehokerroin $\cos \varphi_2$. Näiden lukujen risteämäkoh-

dasta saadaan kerroin, jolla kerrotaan kuorman [pätöteho] $P = kW$ ja näin saadaan nopeasti selvitettyä kuorman loistehotarve.

3.7 Resonanssin huomioon ottaminen kompensoinnin mitoituksessa

Yliaaltopitoisessa verkossa resonanssin huomioon ottaminen on erittäin tärkeää, koska resonanssitilanteessa yliaaltovirta voi kasvaa jopa 20-kertaiseksi. Kompensointilaitteiston kapasitanssi ja verkon induktanssi muodostavat aina resonanssipiirin jollakin taajuudella. Tästä syystä viritystaajuutena käytetään taajuutta, joka on alempi kuin minkään verkossa esiintyvän yliaallon moninkerran taajuus. Yleensä kompensointilaitteisto viritetään 189 Hz:n taajuudelle, joka ei osu minkään harmonisen yliaallon moninkerralle.

Kompensointilaitteiston resonanssitaajuus voidaan selvittää yhtälön 5 avulla:

$$[\text{Resonanssitaajuus}] f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} * f_1 \quad (5)$$

,jossa

[verkon oikosulkuteho] $S_k = kVA$

[kondensaattorin tuottama loisteho] $Q_c = kva_r$

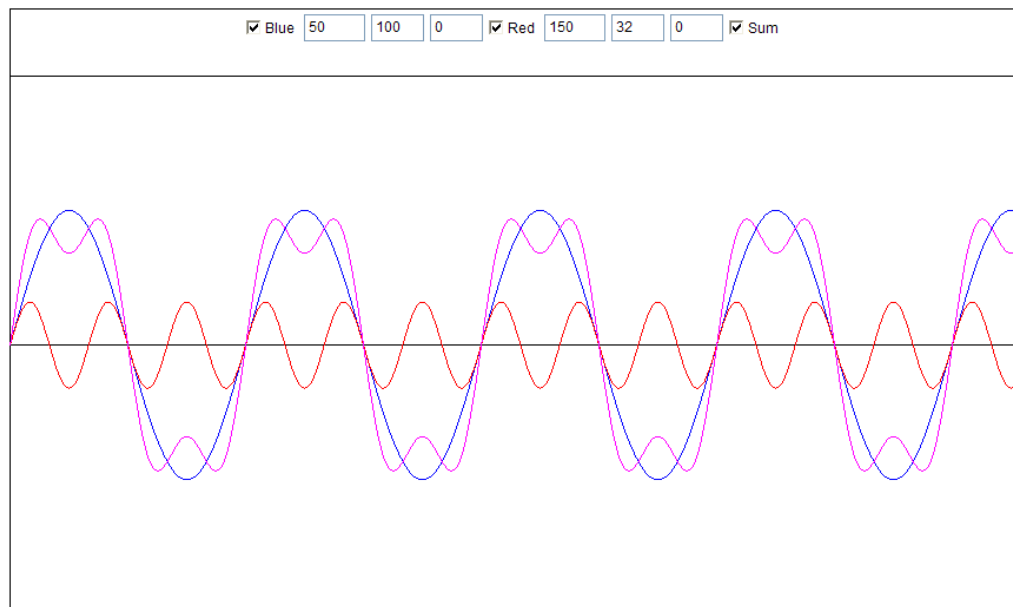
[verkon taajuus] $f_1 = Hz$.

4 Yliaallot

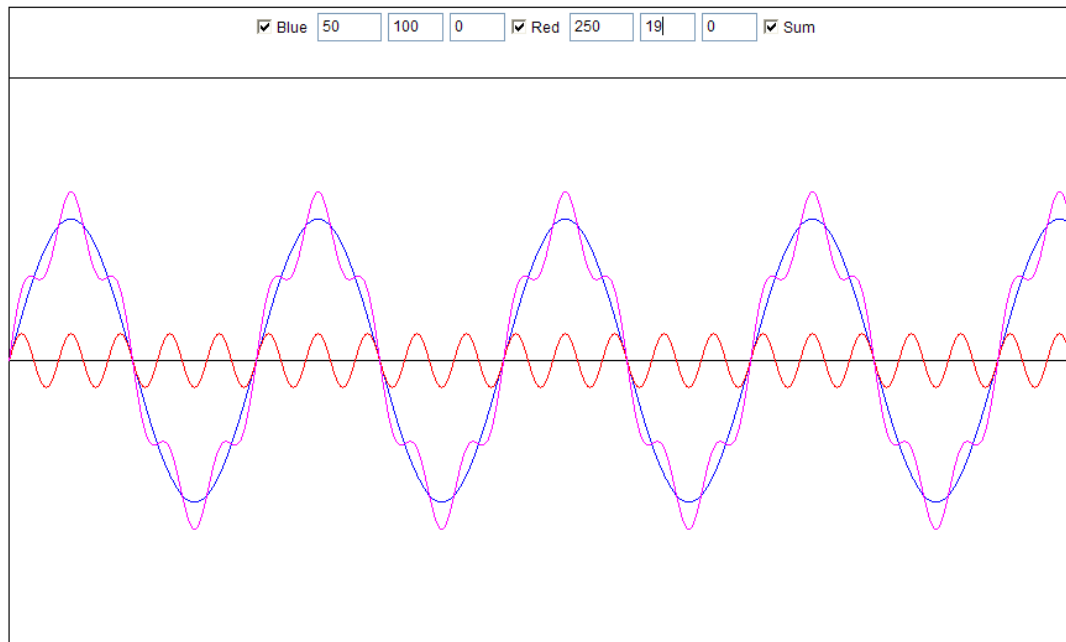
Yliaaltoja verkkoon aiheuttavat epälineaariset kuormat, joiden ottama virran muoto ei ole sinimuotoista. Epälineaarisia kuormia ovat esimerkiksi tasavirtakatkojat, taajuusmuuttajat, valokaariuunit, induktiokuumentimet, hitsauslaitteet, purkauslamput, UPS-laitteet (Uninterruptible Power Supply) ja tietokoneet. Yliaallot ovat perustaajuisen 50 Hz:n verkkosähkön monin kertoja. Esimerkiksi kolmannen yliaallon taajuus on $3 * 50 Hz = 150 Hz$ ja viidennen $5 * 50 Hz = 250 Hz$ jne.

Tällaisia yliaaltoja kutsutaan harmonisiksi yliaalloiksi. Harmonisten yliaaltojen käyrämuoto on säännöllinen, mutta poikkeaa siniaallosta. Lisäksi verkossa voi esiintyä epäharmonisia yliaaltoja, joiden käyrämuoto on epäsäännöllinen. Epäharmoniset yliaallot ovat vielä kohtuullisen harvinaisia ja esiintyessään vähäisiä, joten niille ei ole määritelty rajoja kaikissa standardeissa.

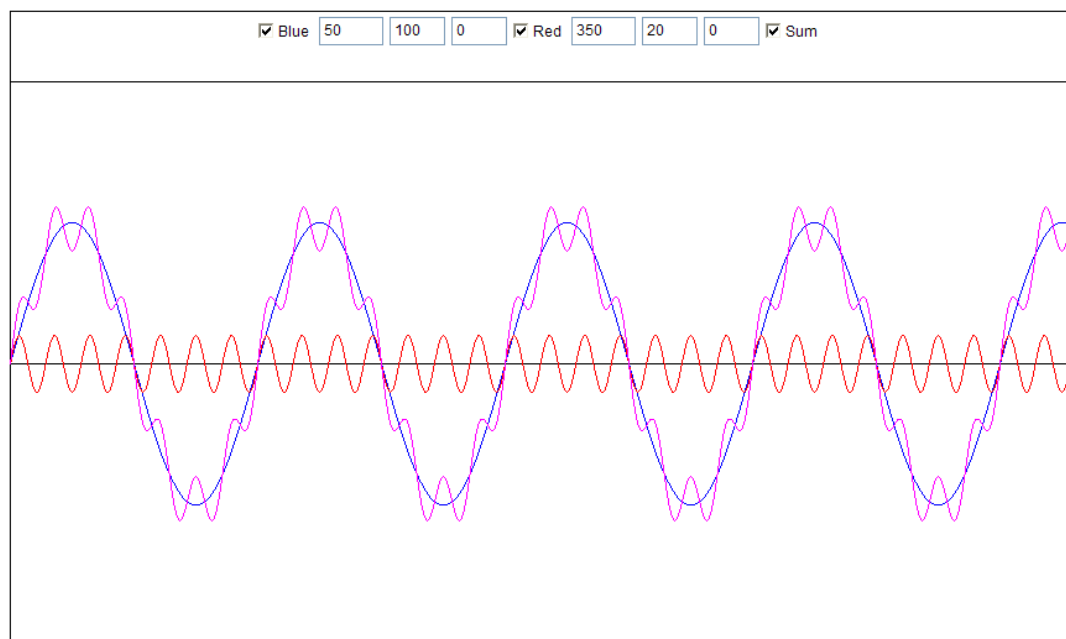
Kuvissa 3 – 7 (ks. s. 10 - 12) esitellään eritaajuisten yliaaltovirtojen vaikutuksia perusaallon aaltomuotoon. Mainittakoon, että kuvat 1 - 7 on tehty Delawaren yliopiston sini-aaltosimulaattorilla. Simulaattorilla voidaan tarkastella minkä tahansa taajuuden vaikutusta perusaaltoon. Lisäksi simulaattorilla voidaan muokata sekä perusaallon, että yliaallon amplitudia sekä vaihesiirtoa. Simulaattori käyttää laskentaan Fourierin sarjalaskentaa.



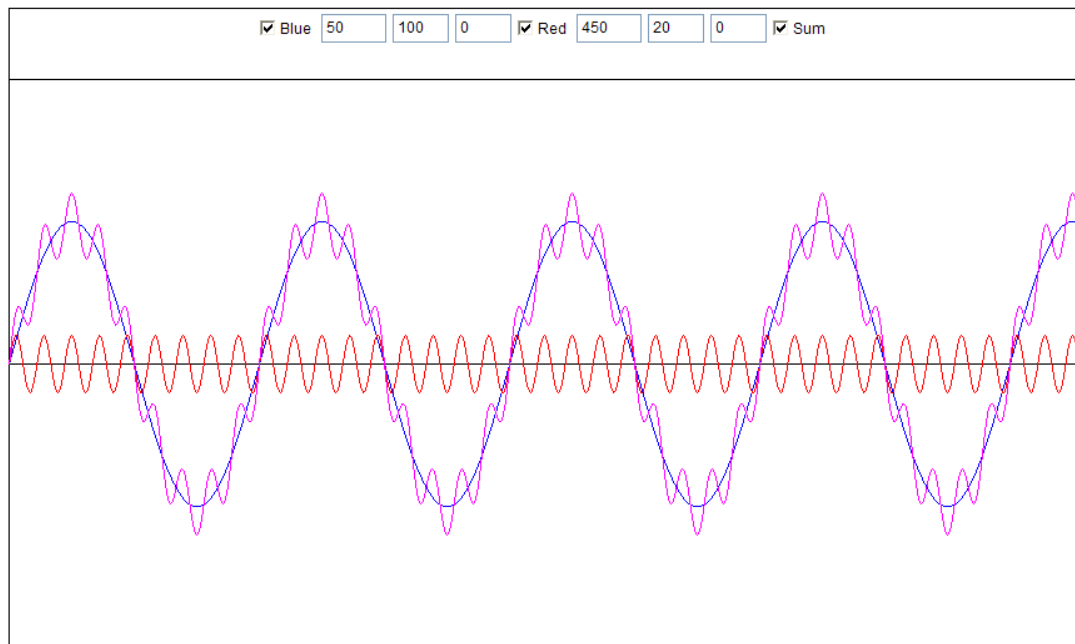
Kuva 3. Kolmannen yliaallon vaikutukset perusaaltoon



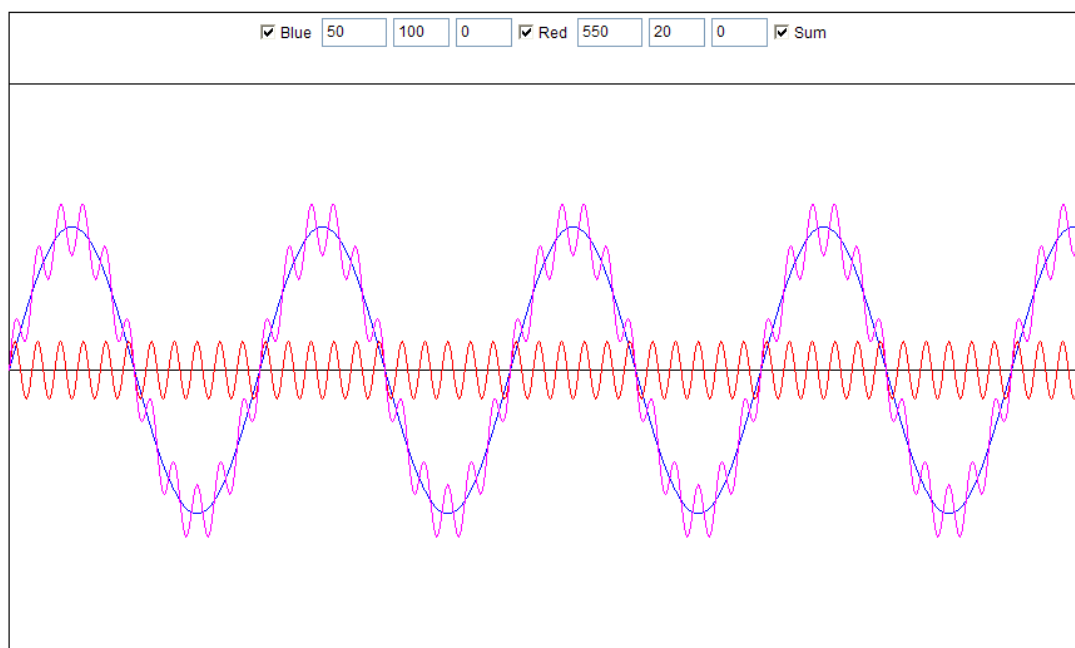
Kuva 4. Viidennen yliaallon vaikutukset perusaaltoon



Kuva 5. Seitsemännen yliaallon vaikutukset perusaaltoon



Kuva 6. Yhdeksännen yliaallon vaikutukset perusaaltoon



Kuva 7. Yhdennentoista yliaallon vaikutukset perusaaltoon

Kuvissa 3 - 7 on sinisellä merkitty 50 Hz:n vaihtosähkön perusaalto, punaisella yliaallon käyrämuoto ja violetilla perusaallon ja yliaallon summa. Kuvista voidaan havaita helposti, kuinka kukin yliaalto aiheuttaa säröä perusaallon käyrämuotoon.

4.1 Yliaaltojen vaikutukset sähköverkoissa

Yliaaltovirrat aiheuttavat sähköverkossa virta- ja jännitesäröä, jolloin jännitteen ja virran käyrämuodot eivät ole enää sinimuotoisia. Jännitteen käyrämuodon muutokset aiheuttavat mittausvirheitä sekä muita virheitä ja jumittautumisia jännitteen käyrämuotoon herkästi suhtautuvissa laitteissa. Tällaisia laitteita ovat esim. taajuusmuuttajat ja tietokoneet. Lisäksi yliaaltovirrat kuormittavat johtimia, keskuksia sekä muuntajia ja aiheuttavat vaurioita johtimien ja moottoreiden käämityksien eristeissä. Kolmella jaolliset yliaaltovirrat summautuvat nollajohtimiin ja saattavat pahimmassa tapauksessa ylikuormittaa nollajohtimen.

4.2 Yliaallot ja muuntajat

Yliaaltovirrat aiheuttavat muuntajissa pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat ylimääräistä lämpenemää. Ylimääräinen lämpenemä aiheuttaa sen, että muuntajaa ei voida kuormittaa sen nimellisteholla. Jos muuntajaa tästä huolimatta kuormitetaan nimellisteholla, muuntajan eristeiden suurin sallittu lämpötila saattaa ylittyä, joka johtaa läpilyöntiin eristeiden pettäessä, jolloin muuntaja vaurioituu.

Yliaaltovirtojen kuormittavuutta muuntajilla kuvaa K-factor eli K-kerroin. K-kerroin ilmaisee, kuinka suurella kuormalla perinteistä muuntajaa voidaan käyttää, kun muuntajan takana oleva kuorma aiheuttaa tietyn kokoisen K-kertoimen. K-kertoimen ja kuvan 8 (s. 14) kuvaajan avulla voidaan nopeasti selvittää perinteisen muuntajan maksimi käyttöaste, jolla muuntajan elinikä ei lyhene merkittävästi ylimääräisen lämpenemän vuoksi. Esimerkiksi 3-vaiheinen tehoanalysaattori Fluke 435 kertoo virtayliaaltomittauksen yhteydessä myös K-kertoimen. [3, s. 2.]

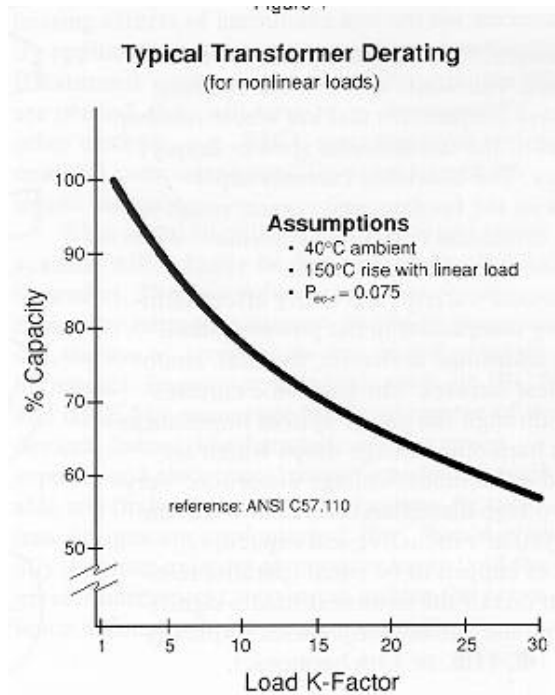
Kuorman K-kerroin voidaan määrittää myös yhtälön 6 avulla:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 * h^2, \text{ jossa} \quad (6)$$

K = kuorman K-kerroin

I_h = harmonisen yliaallon virran rms arvo

h = yliaallon järjestysluku [4, s.3.]



Kuva 8. K-kertoimen ja muuntajan kuormitettavuuden välinen suhde [3, s. 2.]

Yliaaltopitoisessa verkossa suositetaan käytettäväksi ylimitoitettuja muuntajia, jolloin niitä voidaan kuormittaa riittävän pienellä käyttöasteella. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää niin sanottuja K-muuntajia, joiden sisäinen rakenne mahdollistaa koko nimellistehon käytön yliaaltopitoisessa verkossa. K-muuntajat ovat kalliimpia ja poikkeavat tavallisista muuntajista muun muassa sydänmateriaaliltaan, suuremmilta vaihe- ja nollaliitteililtään, lämpökapasiteetiltaan ja käämitystekniikoiltaan. K-muuntajan hankinta on kuitenkin halvempaa, kuin reilusti ylimitoitetun tavallisen muuntajan. K-muuntajia on saatavilla erilaisilla luokituksilla K-4, K-9, K-13, K-20, K-30, K-40 ja K-50.

K-luokat määritellään seuraavasti:

K-4, 100 % lineaarista ja 50 % epälineaarista kuormaa

- 3 yliaaltoa 16,7 %
- 5 yliaaltoa 10,0 %
- 7 yliaaltoa 7,1 %
- 9 yliaaltoa 5,6 %
- $9 < h < 25 = 1/(I^* 0,5)$

K-13, 100 % lineaarista ja 100 % epälineaarista kuormaa

- 3 yliaalto 33,3 %
- 5 yliaalto 20,0 %
- 7 yliaalto 14,3 %
- 9 yliaalto 11,1 %
- $9 < h < 25 = 1/(I^* 1,0)$

K-20, 100 % lineaarista ja 125 % epälineaarista kuormaa

- 3 yliaalto 41,7 %
- 5 yliaalto 25,0 %
- 7 yliaalto 17,9 %
- 9 yliaalto 13,9 %
- $9 < h < 25 = 1/(I^* 1,25)$. [5, s.10, 11.]

4.3 Yliaaltojen suodatus

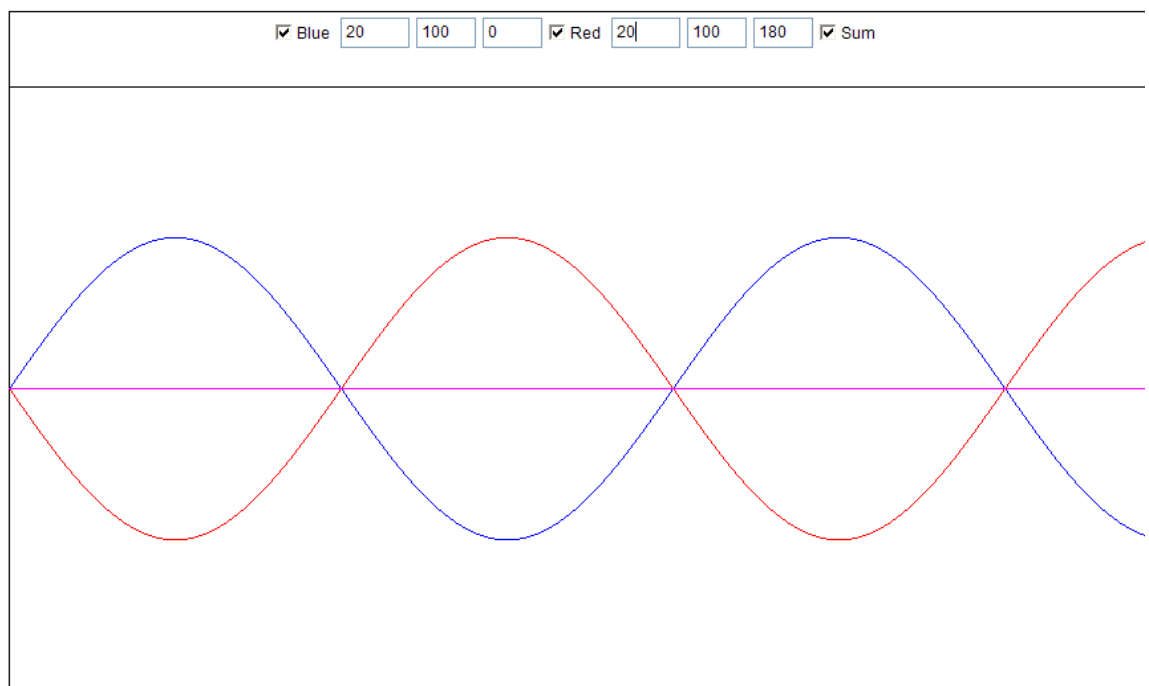
Yliaaltoja suodatetaan yliaaltosuodattimilla. Suodattimet voivat olla passiivisia tai aktiivisia. Passiivisuodattimia kutsutaan yleisesti imupiireiksi. Passiivisuodattimia käytetään tilanteissa, joissa kuorman synnyttämät yliaallot ovat kokoajan samoja eli verkossa esiintyy vain tiettyjä yliaaltotaajuuksia. Aktiivisuodattimia käytetään tilanteissa, joissa yliaallot ovat vaihtelevia amplitudiltaan ja taajuudeltaan. Vaihtelevia yliaaltoja synnyttävät esimerkiksi suuntaajakäytöt.

4.3.1 Passiivisuodatin

Passiivisuodattimet koostuvat kondensaattorin ja kuristimen sarjaankytkennästä eli imupiiristä. Imupiirin komponentit valitaan niin, että niiden keskinäinen resonanssi osuu halutun yliaallon moninkerralle. Passiiviset suodattimet poistavat vain sen komponenttien määrittämää yliaallon moninkertaa. Passiivisuotimista voidaan muodostaa myös laajakaistainen suodin, jossa on useiden eri moninkertojen suodattimia rinnankytkettynä. Taloudellisesti on järkevää käyttää laajakaistaisia suodattimia, jos suodatettavien yliaaltotaajuuksien määrä ei ylitä kolmea kappaletta.

4.3.2 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodattimet ovat erittäin nopeita ja tehokkaita laitteistoja. Aktiivisuodattimien toiminta perustuu tarkkaan loistehomittaukseen ja 180-asteen vaihekääntöön. Aktiivisuodattimen mittausyksikkö tarkkailee verkon yliaaltopitoisuutta suurella näytteenototaajuudella ja analysoi verkossa esiintyvät yliaaltojen moninkerrat aina 40 kertalukuun asti. Seuraavaksi aktiivisuodatin syöttää verkkoon vastaavat virrat 180-asteen vaihekäännön jälkeen. Tällöin vastakkaisvaiheiset virrat kumoavat toisensa.



Kuva 9. Aktiivisuodattimen toimintaperiaate

Kuvassa 9 on graafisesti havainnollistettu aktiivisuodattimen toimintaperiaate. Kuvaan on sinisellä merkitty verkossa esiintyvän yliaallon käyrämuoto, punaisella 180-asteen vaihesiirron jälkeen verkkoon syötetty aaltomuoto ja violetilla näiden summa. Yliaallon aaltomuodon ja verkkoon syötetyn vastakkaisvaiheisen aaltomuodon summa on nolla. Aktiivisuodattimen toiminta perustuu siis vastakkaisvaiheisuuteen.

5 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin Ruukki Oyj:n Hämeenlinnan tuotantotiloissa. Mittauksissa jouduttiin käyttämään erityistä varovaisuutta, koska kaikki mittaukset suoritettiin jännitteisinä. Henkilökohtaisia suojaimia käytettiin asianmukaisesti mittausten aikana. Suojaimiin lukeutuivat mm. sähkömiehen kumihansikkaat, turvakengät, suojalasit, suojakypäriä, turvavaljaat sekä erilaiset jännitetyökalut. Lisäksi ryhmäkeskuksilla mittauksia suoritettaessa peitettiin jännitteiset kiskot suojilla, sekä lattialla käytettiin kumimattoa estämään jalkojen kautta maadoittuminen.

Kuvassa 10 on ilmakuva Ruukki Oyj:n Hämeenlinnan kiinteistöistä. Kuvaan on punaisella rajattu työkohteena oleva tuotantohalli, jonka pinta-ala on n. 10 ha.



Kuva 10. Ruukki Oyj Hämeenlinnan tuotantotila

5.1 Mittausten tavoitteet

Mittausten tavoitteena oli selvittää tuotantohallin valaistuksen loistehonkompensoinnin nykytila, jotta nykyinen kontaktorihjattu kompensointi voitiin säätää mahdollisimman hyvin ja voitaisiin selvittää tarpeet jatkotoimenpiteille. Lisäksi tavoitteena oli selvittää valaistuksen aiheuttamat yliaallot kiinteistön sähköverkkoon sekä tarpeet jatkotoimenpiteille yliaallojen osalta.



Kuva 11. i-valon Regular -valaisin

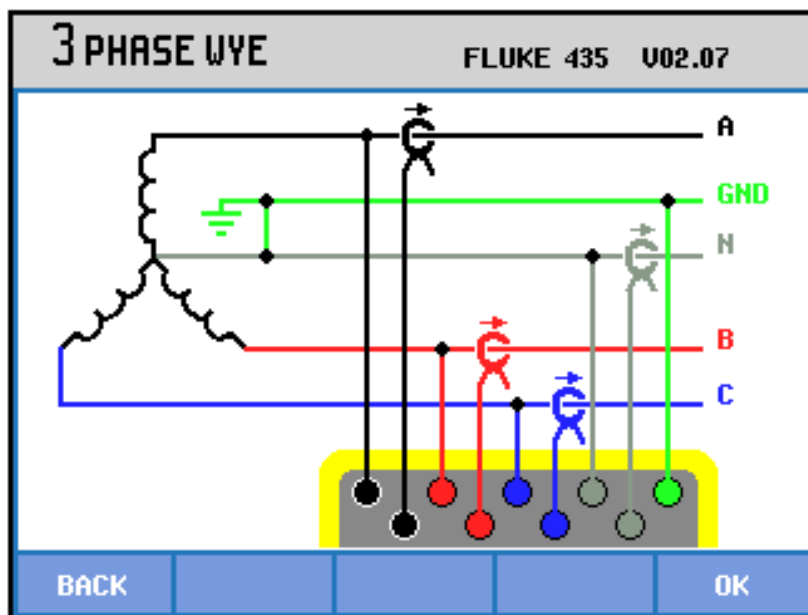


Kuva 12. i-valon Super -valaisin

Kuvassa 11 (s.18) on mittausten kohteena olevien i-valon Regular -syväsäteilijän kuva. Lisäksi kohteessa käytetään kuvan 12 (s.18) i-valon Super -syväsäteilijöitä. Näissä valaisimissa käytetään 400 W:n korkeapainenaatriumlamppuja. Kohteessa mittausten piiriin kuuluvien syväsäteilijöiden yhteenlaskettu pätöteho on lähes 600 kW ja niiden ottama virta on noin 3 kA.

5.2 Mittausmenetelmät

Mittaukset suoritetaan 3-vaiheisella Fluke 435 -tehoanalysaattorilla keskuskohtaisesti, valaistusta syöttäviltä valaistuskeskuksilta sekä valaistuskeskuksia syöttäviltä ryhmäkeskuksilta. Mittaukset valaistuskeskuksilla suoritetaan olemassa olevan kompensoinnin ollessa kytkettynä sekä poiskytkettynä. Mittaukset ryhmäkeskuksilta suoritetaan olemassa olevan kompensoinnin optimoinnin jälkeen.



Kuva 13. Fluke 435 –mittauskytkentä

Mittauksissa käytössä on kuvan 13 mittauskytkentä. Mittauskytkennässä virrat mitataan suoraan vaihe- ja nollajohtimilta i430 flex -virtapihdeillä ja jännitteet varokkeilta tai muusta soveltuvasta pisteestä hauenleuoilla. Valaistuskeskuksia syöttävillä ryhmäkeskuksilla virrat mitataan virtamuuntajien toisiosta.

5.3 Mittalaitteet

Mittalaitteena käytettiin 3-vaiheista Fluke 435 –tehoanalysaattoria (kuva 14), jolla saatiin mitattua keskuksien pätöteho, näennäisteho, loisteho, tehokerroin sekä jännite- ja virtasärö. Tässä kyseisessä mittalaitteessa on myös dataloggeri-ominaisuus, joka on lisätty jälkikäteen ohjelmallisesti.



Kuva 14. 3-vaiheinen Fluke 435 -tehoanalysaattori

6 Mittaustulokset

6.1 Nykyinen kompensointilaitteisto

Tuotantotilassa olemassa olevat kompensointilaitteet on asennettu vuosina 1970 – 1972. Valaistuskeskuksien kompensointilaitteet koostuvat yhdestä tai useasta kondensaattoriparistosta. Osa kondensaattoriparistoista on purettu pois valaistuskeskuksilta mahdollisesti rikkoutumisien takia. Mittausten aikana löydettiin muutamia rikkiäisiä kondensaattoriparistoja.

Nykyinen kompensointilaitteisto on tulossa elinkaarensa loppuun suuren ikänsä puolesta. Tätä väitettä tukee myös jo rikkoutuneiden kompensointilaitteiden määrä. Kaiken

kaikkiaan rikkiäisiä tai jo pois purettuja kompensointilaitteita oli n. 40 % kompensointilaitteiden alkuperäisestä määrästä.

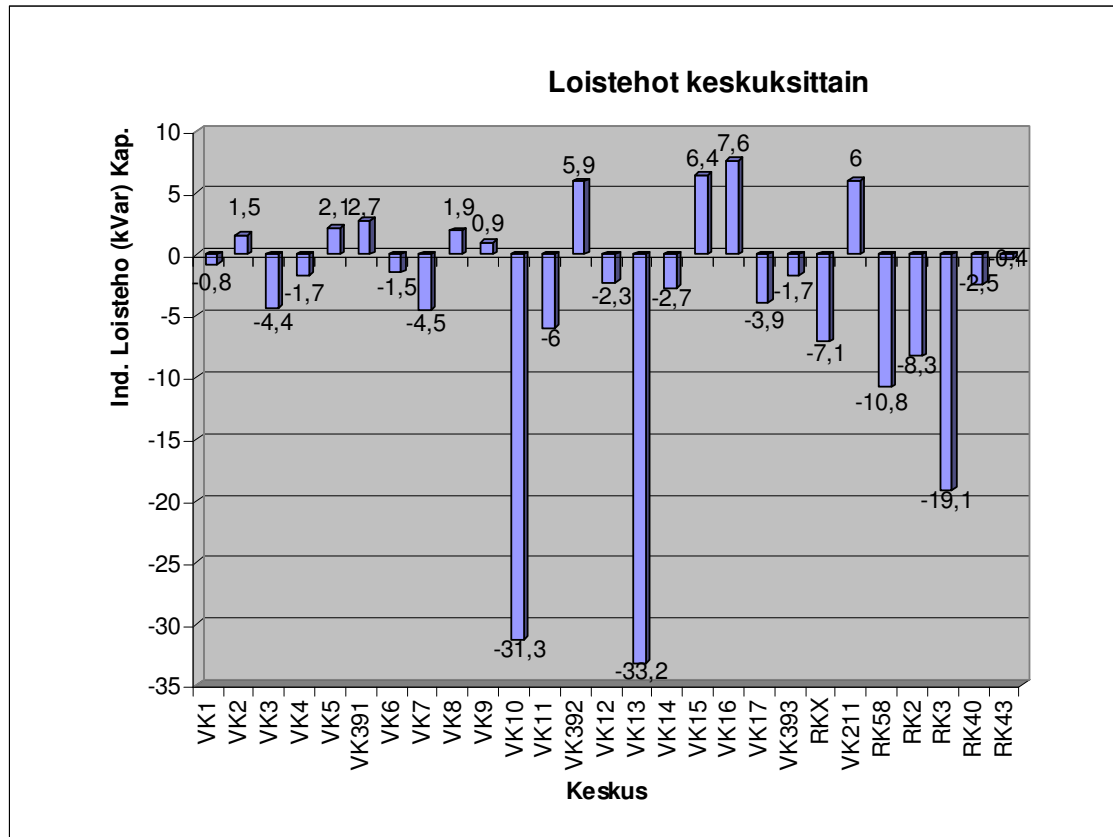
Taulukko 1. Nykyinen kompensointilaitteisto

Keskustunnus	C1	C2	C3	C4
VK1	poistettu	poistettu	-	-
VK2	OFF (20 kva _r)	ON (20 kva _r)	-	-
VK3	poistettu	poistettu	-	-
VK4	rikki	poistettu	-	-
VK5	OFF (30 kva _r)	ON (20 kva _r)	-	-
VK391	ON (20 kva _r)	ON (20 kva _r)	-	-
VK6	ON (30 kva _r)	-	-	-
VK7	poistettu	ON (30 kva _r)	-	-
VK8	poistettu	ON (30 kva _r)	-	-
VK9	ON (30 kva _r)	-	-	-
VK10	poistettu	poistettu	-	-
VK11	ON (30 kva _r)	poistettu	-	-
VK392	poistettu	rikki	-	-
VK12	OFF (30 kva _r)	ON (20 kva _r)	poistettu	-
VK13	poistettu	ON (30 kva _r)	-	-
VK14	ON (30 kva _r)	poistettu	-	-
VK15	poistettu	ON (30 kva _r)	-	-
VK16	ON (30 kva _r)	poistettu	-	-
VK17	OFF (20 kva _r)	ON (30 kva _r)	-	-
VK393	ON (30 kva _r)	rikki	poistettu	-
RK2	ON (40 kva _r)	-	-	-
RK3	ON (20 kva _r)	-	-	-
RK58	ON (5 kva _r)	ON (5 kva _r)	ON (5 kva _r)	ON (5 kva _r)
RKX	-	-	-	-
VK211	ON (30 kva _r)	poistettu	-	-

Taulukkoon 1 on merkitty punaisella keskuksset, joilla ei ole lainkaan kompensointia. Lisäksi taulukosta nähdään keskuksilla olevien kompensointilaitteiden määrä sekä niiden optimoinnin jälkeinen kytkentätila. Lisäksi taulukkoon on merkitty sulkeisiin kompensointiparistojen kompensointiteho.

6.2 Loistehomittausten tulokset

Kuvassa 15 esitetään loistehomittausten tulokset kootusti kaikilta keskuksilta.



Kuva 15. Loistehot keskuksittain

Kuten kuvasta 15 voidaan havaita, kompensoinnin kokonaistila optimoinnin jälkeen on kohtalaisen hyvä. Valaistuskeskuksilla 11 ja 13 sekä ryhmäkeskuksilla 3, 40, 43 ja 58 kompensoinnin nykytila vaatii korjaustoimenpiteitä.

Syöttökeskuksien RK 40 ja 43 kuvassa 15 olevat arvot on annettu virtamuuntajien jälkeen, joten todelliset loisteholukemat keskuksilla ovat RK 40: 1250 kva_r ja RK 43: 680 kva_r.

Kompensoinnin optimoinnin vaikutukset valaistuskeskuksilla

Power & Energy				
FUND	0:01:55			
	L1	L2	L3	Total
kW	7.1	7.6	8.2	22.9
kVA	9.4	9.7	10.2	29.4
kVAR	6.2	6.1	6.1	18.4
PF	0.74	0.76	0.78	0.76
Cos ϕ	0.75	0.78	0.80	
A rms	42	44	46	
	L1	L2	L3	
V rms	226.07	226.40	226.18	
05/20/11 10:00:09 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

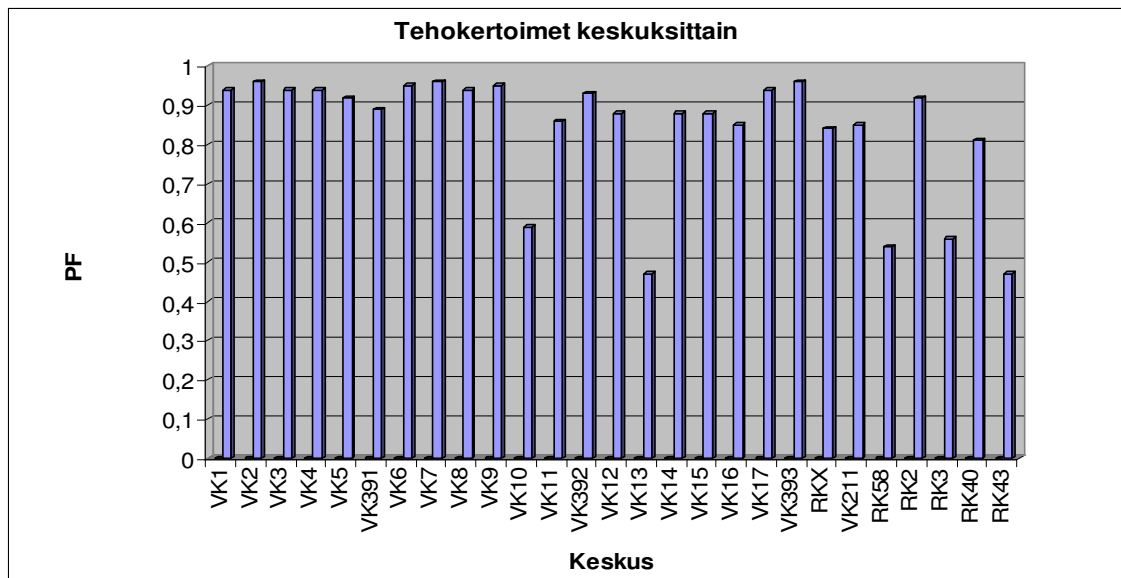
Kuva 16. VK 2 Teho ja energia ennen kompensoinnin optimointia

Kuvassa 16 on Fluke 435 tehoanalysaattorin teho ja energia välilehden antamat mittaukset valaistuskeskukselta 2, ennen olemassa olevan loistehonkompensoinnin optimointia.

Power & Energy				
FUND	0:02:02			
	L1	L2	L3	Total
kW	7.0	7.6	8.1	22.6
kVA	7.0	7.6	8.1	22.7
kVAR	0.6	0.4	0.4	1.5
PF	0.96	0.95	0.96	0.96
Cos ϕ	1.00	1.00	1.00	
A rms	32	35	37	
	L1	L2	L3	
V rms	226.33	226.56	226.00	
05/20/11 10:00:16 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

Kuva 17. VK 2 Teho ja energia kompensoinnin optimoinnin jälkeen

Kuvassa 17 (s.23) on fluke 435 tehoanalysaattorin teho ja energia välilehden antamat mittaustulokset valaistuskeskukselta 2, olemassa olevan loistehonkompensoinnin optimoinnin jälkeen. Mittaustuloksista voidaan todeta loistehon kompensoinnin optimoinnilla saavutettavat muutokset, aiemmin keskus oli alikompensoitu $18,4 \text{ kva}_r$ ja optimoinnin jälkeen ylikompensoitu $1,5 \text{ kva}_r$. Optimoinnin jälkeen vaihevirratt alenivat keskuksella n. 20 % ja tehokerroin parani $0,20$ yksikköä arvosta $0,76$ arvoon $0,96$. Jos kohteessa kaikilla keskuksilla virrankulutus vähentyisi n. 20 %, se vastaisi koko hallin valaistuksessa yli 500 A :n vähennystä.

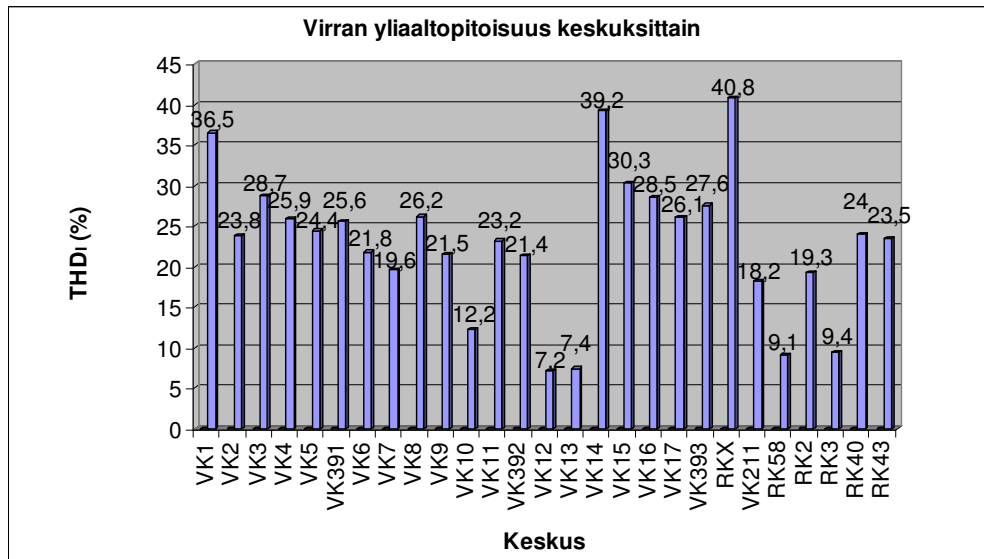


Kuva 18. Tehokertoimet keskuksittain

Kuvasta 18 voitiin todeta yhteneväisyys kuvan 15 (s.22) tietojen kanssa. Keskuksilla, joilla loistehon kompensointia ei ole riittävästi, on myös tehokerroin alentunut.

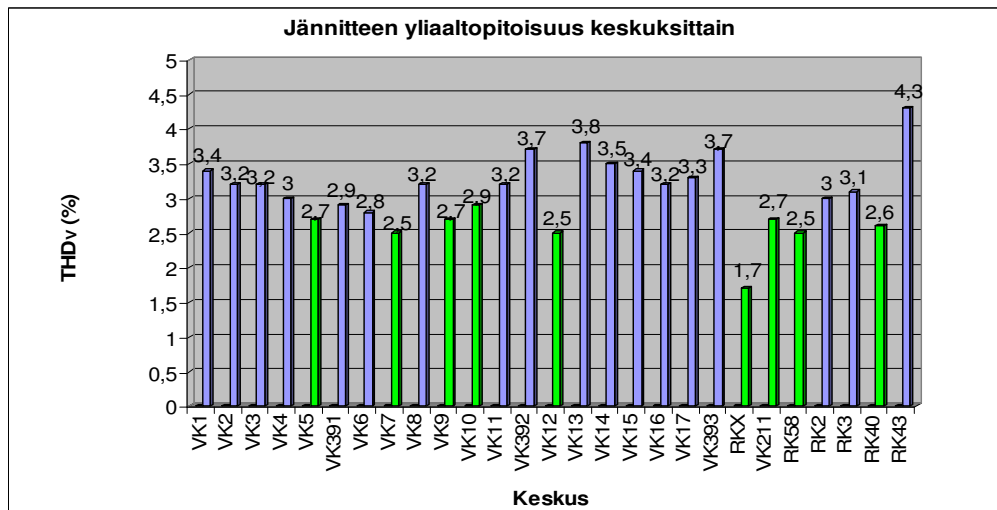
6.3 Yliaaltomittausten tulokset

Kuvassa 19 esitetään virran yliaaltomittausten tulokset kaikilta keskuksilta



Kuva 19. Virran yliaaltopitoisuus keskuksittain

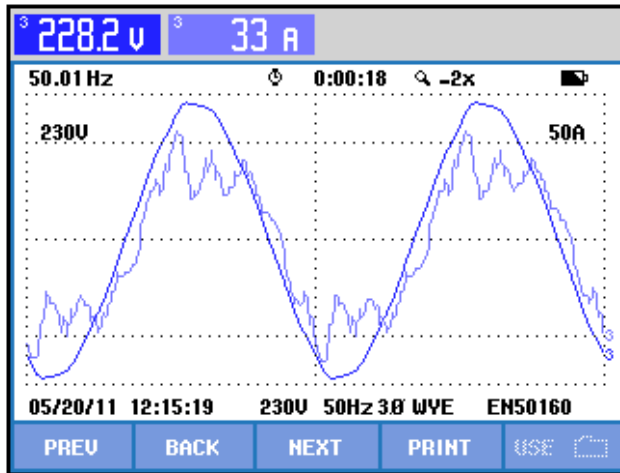
Kuten kuvasta 19 voitiin havaita, on virran yliaaltopitoisuus verkossa melko suuri lukuun ottamatta valaistuskeskuksia 7, 10, 12, 13 ja VK211 sekä ryhmäkeskuksia 58, 2 ja 3.



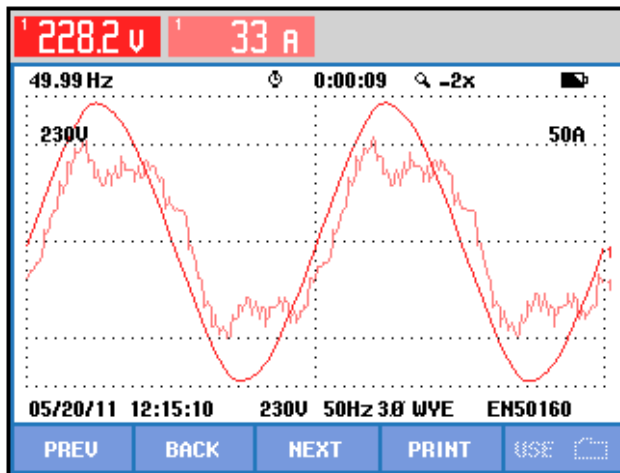
Kuva 20. Jännitteen yliaaltopitoisuus keskuksittain

Kuvaan 20 on vihreillä palkeilla merkitty keskuksia, joiden THD_v on hyvä eli alle 3 %. [6, s. 29]

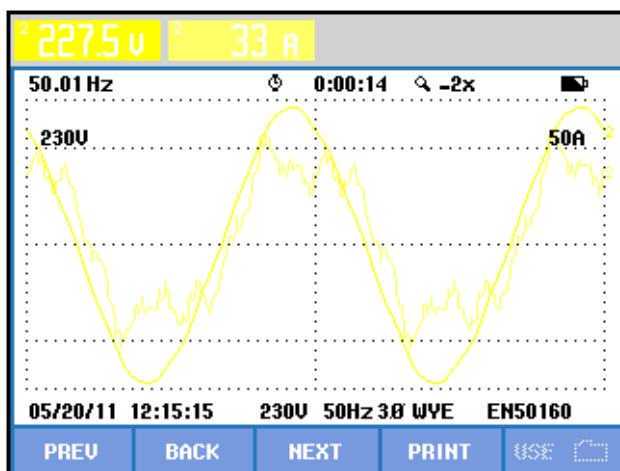
Vaiheiden L1, L2 ja L3 virran ja jännitteen kuvaajat Fluke 435 -tehoanalysaattorista. Säröytyneempi kuvaaja esittää virran käyrämuodon, ja lähes sinimuotoinen kuvaaja jännitteen käyrämuodon.



Kuva 21. L1:n virran ja jännitteen käyrämuodot

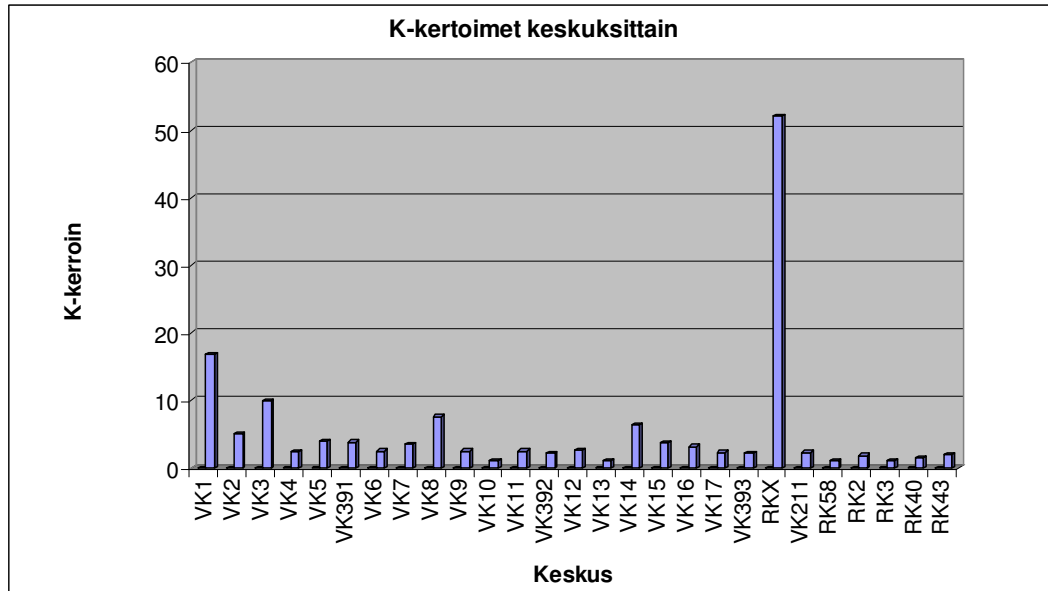


Kuva 22. L2:n virran ja jännitteen käyrämuodot



Kuva 23. L3:n Jännitteen ja virran käyrämuodot

Kuvissa 21, 22 ja 23 (s. 26) on nähtävissä vaiheiden L1, L2 ja L3 jännitteiden ja virtojen käyrämuodot. Kuvista voitiin havaita, kuinka radikaalisti yliaallot aiheuttavat virran käyrämuotoon säröytymistä. Toisaalta jännitteen käyrämuoto on lähes sinimuotoista.



Kuva 24. K-kertoimet keskuksittain

Kuvasta 24 on nähtävissä kaikkien keskuksien virtayliaaltomittausten aikana saadut K-kertoimet. Muutamilla keskuksilla kerroin on hyvin suuri, mutta valtaosalla keskuksista K-kerroin jää alhaiseksi. Tärkeimpiä mittaustuloksia K-kertoimien osalta ovat valaistuskeskuksia syöttävien ryhmäkeskusten tulokset.

6.4 Mittaustulosten arviointi

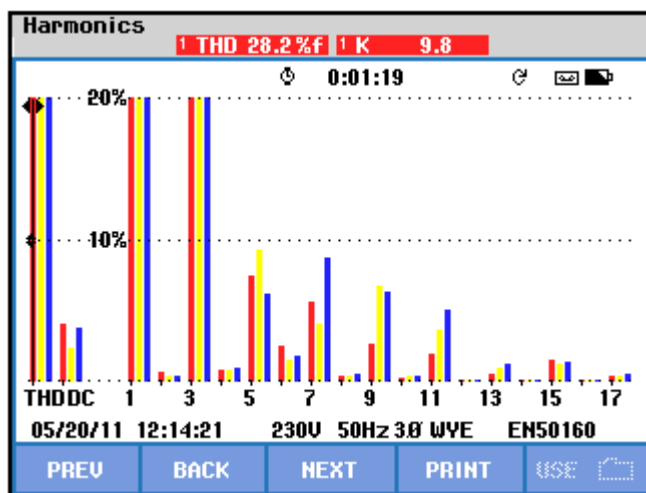
Kaiken kaikkiaan mittaustulokset loistehon osalta eivät ole hälyttäviä, mutta joillakin keskuksilla olemassa oleva kompensointilaitteisto oli purettu pois luultavasti rikkoutumisen seurauksena. Tästä syystä ko. keskuksien olivat alikompensoituja ja tilanne vaatii korjaustoimenpiteitä. Kompensointilaitteistojen hajoamiset saattavat johtua kompensointilaitteiden iäkkyydestä tai verkon liian suuresta virtayliaaltopitoisuudesta.

Lisäksi valaistuksen syöttökeskuksilla RK 40 ja RK 43 loistehopitoisuudet olivat suuret, tilanne vaatii korjaustoimenpiteitä. Yliaaltomittausten tulokset olivat odotusten mukaiset. Purkauslamput synnyttävät suuria määriä harmonisia virtayliaaltoja, kuten kuvasta 19 (s. 25) voidaan todeta.

Taulukko 2. IEC 61000-3-4 standardin raja-arvot harmonisten virtakomponenttien amplitudeille

Virtakomponentin perusaallon moninkerta	Suurin sallittu amplitudi (prosenttia perusaallon amplitudista)	Virtakomponentin perusaallon moninkerta	Suurin sallittu amplitudi (prosenttia perusaallon amplitudista)
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

Taulukossa 2 esitettiin IEC 61000-3-4 -standardin määrittelemät rajat 16 - 63 A:n kulutuslaitteistojen harmonisille yliaaltovirroille. Lähestulkoon kaikilla keskuksilla 3, 9, 11, 13, 15 ja 17 virtayliaallon rajat rikkoutuivat. Viides virtayliaalto jäi kaikilla keskuksilla pari prosenttiyksikköä alle maksimirajan ja seitsemännen virtayliaallon rajat rikkoutuivat vain muutamilla keskuksilla.



Kuva 25. VK 3 Virran yliaaltospektri

Kuvassa 25 esitettiin valaistuskeskus VK 3:n virtayliaaltospektri. Kuva on tyyppiesimerkki mittauskohteen valaistuksen syöttöverkon virran yliaaltopitoisuudesta, jossa standardoidut raja-arvot ylittyvät muilla paitsi 5, 7 ja 17 yliaalloilla. Kuvasta voidaan myös havaita epäsymmetristen vaihekuormien vaikutukset yliaaltopitoisuuksiin. Suuremman kuorman omaavalla vaiheella esiintyy myös enemmän yliaaltoja.

Lisäksi mittauksissa havaittiin tasajännitekomponenttia, joka kyllästää muuntajien rautasydämen. Rautasydämen kyllästyminen aiheuttaa muuntajilla suuria tehohäviöitä. Tyypillisesti 1 %:n DC-komponentti aiheuttaa muuntajalle n. 10 %:n tehohäviön. Suositukset DC-komponentin maksimiksi ovat noin 2 %. Tasajännitekomponentin tuottaja olisi hyvä jäljittää, jotta asiaan voitaisiin puuttua. Tässä työkohteessa tasajännitekomponentti saattaa johtua muuntajan epälinearisesta kuormituksesta tai viallisista taa-juusmuuttajista.

Vaikka virran yliaaltopitoisuus on suuri lähes kaikilla keskuksilla, kiinteistön verkko on riittävän matalaimpedanssinen ja muuntaja riittävästi ylimitoitettu, jotta virtasäro ei pääse aiheuttamaan suuria muutoksia jännitteen aaltomuotoon. Esimerkiksi valaistuskeskusten syöttökaapelit on mitoitettu aiemmin käytettyjen 700 W:n elohopealamppujen mukaan, joten nykyisellä valaistuksella syöttökaapeleiden kapasiteetista on käytössä vain 25 %. Impedanssi pienenee merkittävästi käytettäessä paksumpia johtimia. Muuntajan käyttöaste vuonna 2005 suoritettujen mittausten mukaan oli n. 70 %.

Jännitteen yliaaltopitoisuudet on esitetty kuvassa 20 (s. 25), josta voidaan todeta jännitteen THD-arvon pysyvän hyvän laadun määritelmän alueella osalla keskuksista $THD_U < 3 \%$, ja loputkin keskuksista täyttävät normaalilaadun määritelmät $THD_U < 6 \%$.

IEEE 519 -laitestandardin mukaan verkkoon liitettävien laitteiden tulee pystyä toimimaan 3 % jänniteyliaaltoja sisältävässä verkossa. Koska verkossa esiintyy paikoittain suurempia jänniteyliaaltopitoisuuksia, laitteiden toiminnot voivat häiriintyä. Laitteissa saattaa esiintyä mittarivirheitä, jumittautumisia ja ylimääräistä lämpenemää mm. kompensointilaitteissa sekä muita toimintahäiriöitä jännitteen amplitudiin herkästi suhtautuvissa laitteissa.

Kuormien K-kerroin mittaustulokset eivät aiheuta syytä huoleen. Vaikka joillakin keskuksilla K-kerroin oli hyvinkin suuri, avainasemassa ovat kuitenkin valaistuskeskuksia syöttävien ryhmäkeskusten RK40 ja RK43 K-kertoimet. Näillä keskuksilla K-kertoimet jäivät alle kahden, jotka myöntävät muuntajalle 98 %:n kuormitettavuuden. Voidaan siis todeta, että ainakaan valaisimien synnyttämät yliaallot eivät yksinään aiheuta muuntajalle ongelmia. Muuntajan koko kuormituksen K-kerrointa ei tässä työssä ole tutkittu.

7 Jatkotoimenpidesuosituksset

Virtayliaaltopitoisuus verkossa on suhteellisen korkea, joten tavalliset kompensointiparistot eivät kestä luvattua elinikäänsä. Korkean virtayliaaltopitoisuuden vuoksi, tulee suositusten mukaan käyttää kompensoinnissa estokelaparistoja.

Ensimmäinen vaihtoehto olisi korvata rikkoutuneet kompensointilaitteet uusilla estokelaparistoilla ja aina vanhan kompensointilaitteen hajotessa, korvata se estokelaparistolla. Tämä lähestymistapa kompensoinnin toteuttamisessa on kuitenkin kyseenalainen, koska valaisimia vaihdetaan kompensoituihin valaisimiin valaisinhuoltojen yhteydessä. Uusien valaisimien myötä kompensointitarve muuttuu jatkuvasti. Tämä ongelma voitaisiin ratkaista käyttämällä kompensoimattomia valaisimia ja toteuttamalla kompensointi estokelaparistoilla kootusti valaistuskeskuksilla. Käyttämällä kompensoimattomia valaisimia voitaisiin myös poistaa riski resonanssitilanteeseen, joka saattaisi aiheutua valaisimien omista kompensointikondensaattoreista. Lisäksi valaisimien omat kompensointikondensaattorit saattavat tuhoutua verkossa esiintyvien virtayliaaltojen vuoksi, koska kondensaattoreilla ei ole estokeleja.

Koska olemassa olevan kompensointilaitteiston ikä on n. 40 vuotta, toisena vaihtoehtona olisi uusita koko kompensointilaitteisto kerralla. Tällöin välttyttäisiin tilanteilta, joissa vanha kompensointilaitteisto rikkoutuu ja valaistuskeskus jää ilman kompensointia. Valaistuskierroksen tiheydestä riippuen keskus saattaisi olla kompensoimattomana kuukausia. Tämän ratkaisun taloudelliset investoinnit saattaisivat jäädä hivenen alhaisemmiksi, koska kompensointilaitteita hankittaisiin suurempi määrä kerralla, jolloin määräänukset tulisivat kyseeseen.

Kolmantena vaihtoehtona olisi valaistuskeskusten uusiminen niiden iän vuoksi. Keskusten iän ja vaikeiden ympäristöolosuhteiden vuoksi, myös keskukset saattavat olla lähellä elinkaarensa loppua. Uusiin keskuksiin voitaisiin sisällyttää estokelaparistot ja keskusten uusiminen voitaisiin ajoittaa tuotantoseisokkien ajalle. Tämä ennakoiva keskusten uusiminen pienentäisi suunnittele mattomien tuotantoseisokkien riskiä. Koska keskusten uusiminen vaatii suunnittelua ja keskusten valmistaminen aikaa, voitaisiin kompensoimattomien keskusten kompensointi hoitaa tällä välin käyttämällä muiden keskusten ylimääräisiä kompensointilaitteita.

8 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää Ruukki Oyj:n Hämeenlinnan tuotantohallin valaistuksen kompensoinnin nykytila. Mittauksin saatiin selvitettyä nykyisen valaistuksen loistehontarve. Mittaustuloksien perusteella nykyiset kompensointilaitteet optimoitiin. Osalla keskuksista kompensointitarvetta ei saatu täytettyä johtuen rikkoutuneista kompensointilaitteista. Lisäksi nykyinen kompensointilaitteisto ei ole suosituksen mukainen, vaan suuren virtayliaaltopitoisuuden vuoksi kohteessa tulisi käyttää estokelaparistoja.

Monilla valaistuskeskuksilla nykyinen kontaktoriohjattu kompensointilaitteisto ei ollut oikein säädetty, vaan keskuksset olivat reilusti ali- tai ylikompensoituja. Kompensoinnin optimoinnin jälkeen valaistuksen näennäisteho putosi n. 20 % useilla keskuksilla.

Kompensoinnin nykytila kokonaisuutena ei ole hälyttävä, mutta rikkoutuneiden kompensointilaitteiden määrästä voidaan päätellä, että nykyinen kompensointilaitteisto on saavuttamassa elinkaarensa loppupään. Niinpä olisi jo tässä vaiheessa viisasta puuttua asiaan ja mahdollisesti uusia koko kompensointilaitteisto. Uutena kompensointilaitteistona tulisi käyttää estokelaparistoja, jolloin välttyttäisiin kompensointilaitteiden eliniän lyhentymiseltä verkossa esiintyvien virtayliaaltojen vuoksi.

Lisäksi mittauksissa ilmeni suuria virran yliaaltopitoisuuksia kaikilla valaistuskeskuksilla, mittaustulokset osoittautuivat ennako-odotusten mukaisiksi. Virtayliaallot ylittävät nykyisten standardien ilmoittamat suositukset. Jännitteen yliaaltopitoisuudet sen sijaan olivat huomattavasti ennako-odotuksia alhaisemmat. Osaltaan tähän vaikuttaa kiinteistön reilusti ylimitoitettu verkko. Tällaisessa matalaimpedanssisessa verkossa virtayliaallot eivät aiheuta jännitteen käyrämuotoon suurta säröytymää. Koska jännitteen yliaaltopitoisuus ei ole huolestuttavalla tasolla, yliaaltojen vuoksi ei tarvitse ryhtyä jatkotoimiin. Lisäksi tämän työn tarkoituksena oli antaa työn tilaajalle suosituksia jatkotoimista, joita tässä työssä esiteltiin kolme erilaista.

Lähteet

- [1] Suomen standardisoimisliitto SFS ry, SFS-EN 50160:2008. *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*.
- [2] Sähköasennustekniikka 3. Suomen Sähkö – ja teleurakoitsijaliitto ry:n julkaisu. Tampere: Tammerpaino Oy
- [3] K-factor transformers and nonlinear loads. 1995. Verkkodokumentti. Liebert Corporation.
<<http://www.emersonnetworkpower.co.in/KnowledgeCenter/Whitepapers/KFactorTransformer.pdf>>. Luettu 5.1.2012
- [4] K-factor can be a misleading power quality indicator. Verkkodokumentti. Powersmiths international corp.
<<http://www.powerstudies.com/articles/KFactor.pdf>>. Luettu 10.2.2012
- [5] Course No E-3003. Verkkodokumentti. PHDengineer.
<<http://www.pdhenineer.com/courses/e/E-3003.pdf>>. Luettu 10.2.2012
- [6] Sähköenergia liitto ry Sener. 2001. Jakeluverkon sähkön laadun arviointi. Helsinki
- [7] Loistehon kompensointi ja yliaaltosuodatus. Verkkodokumentti.
<http://heikki.pp.fi/abb/090_0007.pdf>. Luettu 9.12.2011

Kompensoinnin mitoitus taulukko [7, s. 2.]

$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$							
	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,80
0,30	3,18	3,04	2,98	2,93	2,85	2,7	2,56	2,40
0,32	2,96	2,82	2,76	2,71	2,63	2,48	2,34	2,21
0,34	2,77	2,62	2,56	2,52	2,44	2,28	2,15	2,02
0,36	2,59	2,45	2,39	2,34	2,26	2,11	1,97	1,84
0,38	2,43	2,29	2,23	2,18	2,11	1,95	1,81	1,68
0,40	2,29	2,15	2,09	2,04	1,96	1,81	1,67	1,54
0,42	2,16	2,02	1,96	1,91	1,83	1,68	1,54	1,41
0,44	2,04	1,90	1,84	1,79	1,71	1,56	1,42	1,29
0,46	1,93	1,79	1,73	1,68	1,60	1,45	1,31	1,18
0,48	1,83	1,69	1,62	1,58	1,50	1,34	1,21	1,08
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,40	1,25	1,11	0,98
0,52	1,64	1,50	1,44	1,39	1,31	1,16	1,02	0,89
0,54	1,56	1,42	1,36	1,31	1,23	1,07	0,94	0,81
0,56	1,48	1,34	1,28	1,23	1,15	1,00	0,86	0,73
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,62	1,27	1,12	1,06	1,01	0,94	0,78	0,65	0,52
0,64	1,20	1,06	1,00	0,95	0,87	0,72	0,58	0,45
0,66	1,14	1,00	0,94	0,89	0,81	0,65	0,52	0,39
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,45	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,72	0,96	0,82	0,76	0,71	0,64	0,48	0,34	0,21
0,74	0,91	0,77	0,71	0,66	0,58	0,42	0,29	0,16
0,76	0,86	0,71	0,65	0,60	0,53	0,37	0,24	0,11
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,82	0,70	0,56	0,49	0,45	0,37	0,21	0,08	
0,84	0,65	0,50	0,44	0,40	0,32	0,16	0,03	
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,14	0,07			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							