

Vesa Raitolampi

# TEOLLISUUSKIINTEISTÖN SÄHKÖN LAATUMITTAUKSET

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

2016

# TEOLLISUUSKIINTEISTÖN SÄHKÖN LAATUMITTAUKSET

Raitolampi, Vesa  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Toukokuu 2016  
Ohjaaja: Tuomela, Jorma  
Sivumäärä: 32  
Liitteitä: -

Asiasanat: Yliaallot, Loisteho, Jännitesärö

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli mitata sähkön laadullisia ominaisuuksia teollisuuskiinteistön sähköpääkeskuksessa. Mittaukset suoritettiin Kemira Oyj:n Porin tehtaalla. Mittauksien avulla pyrittiin selvittämään epälineaaristen kuormien vaikutusta sähköverkon laatuun. Koska tehtaan kuormat sisältävät paljon taajuusmuuttajia ja muita epälineaarisia kuormia, näiden ottamien virtojen oletettiin aiheuttavan verkkoon häiriöitä.

Työssä mitattiin jännitteen ja virran eri ominaisuuksia. Mittaukset suoritettiin tehdas-kiinteistön pääkeskuksessa, kymmenen sekunnin keskiarvolla neljän tunnin ajan. Mittausajankohdaksi pyrittiin etsimään sellainen ajankohta, jolloin tehdas olisi normaalia kuormitustilannetta vastaavalla ajolla. Tuloksien analysointiin käytettiin apuna standardin SFS-EN-50160 raja- ja viitearvoja.

Saatujen mittaustuloksien perusteella voitiin todeta, että teollisuuskiinteistön sähköverkon laatu oli hyvässä kunnossa. Kaikki tulokset pysyivät standardin määrittelemien raja-arvojen sisäpuolella. Sähköverkko ei nykyisessä tilassaan tarvitse lisämittauksia, mutta tulevaisuudessa kuormituksen kasvaessa ne voivat olla tarpeen.

# POWER QUALITY MEASUREMENTS OF INDUSTRIAL PROPERTY

Raitolampi, Vesa

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Automation Engineering

May 2016

Supervisor: Tuomela, Jorma

Number of pages: 32

Appendices: -

Keywords: Harmonic waves, Reactive-power compensation, Voltage distortion

---

The purpose of this thesis was to measure the qualitative features of electricity in the electric switchboard of industrial property. With the measurements were tried to solve influence of non-linear loads quality of electrical network. Because the loads of the factory include plenty of frequency converters and other non-linear loads, these matters were assumed to cause interruptions to the network.

In this thesis were measured different features of voltage and current. These measurements were made in the main electric switchboard of the industrial property, with ten seconds average value for four hours time. The timing of the measurement was striven to find a time, when the factory would be in a normal load situation. Limit and reference values of the standard SFS-EN-50160 were used to help to analyze the results.

It was possible to detect by the measurement results that the quality of electrical network of industrial property was in faultless condition. All of the results stayed inside the reference values of the standard. The electrical network does not need additional measurements in its status quo, but they might become needful in the future.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	STANDARDI.....	7
	2.1 Laatustandardi .....	7
3	JÄNNITTEEN OMINAISUUDET .....	8
	3.1 Taajuus .....	8
	3.2 Jännitekuoppa.....	8
	3.3 Nopeat jännitemuutokset.....	9
	3.4 Ylijännitteet .....	10
	3.4.1 Transienttiylijännitteet.....	10
	3.5 Epäsymmetria.....	11
4	YLIAALLOT .....	12
	4.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot .....	12
	4.2 Yliaaltokomponentit.....	13
	4.3 Yliaallot matemaattisesti .....	14
	4.4 Yliaaltojen lähteet.....	15
	4.5 Yliaaltojen haittatekijät .....	15
	4.6 Nollajohtimen ylikuormittuminen.....	16
5	LOISTEHO JA KOMPENSOINTI .....	17
	5.1 Loisteho .....	17
	5.2 Kompensointiratkaisut.....	17
	5.3 Kompensoinnin syyt.....	18
6	MITTAUKSET .....	19
	6.1 Mittaukset yleisesti.....	19
	6.2 Mittauskytkennät .....	20
	6.2.1 Jännitteeseen osaan kohdistuva toimenpide.....	21
	6.3 Mitattava kuorma ja verkkovaikutukset .....	21
7	TULOKSET .....	22
	7.1 Jännite.....	22
	7.2 Virta.....	23
	7.3 Taajuus .....	24
	7.4 Välkyntä .....	24
	7.5 Jännitteen epäsymmetria .....	26
	7.6 Harmoniset yliaaltojännitteet .....	27
	7.7 Harmoniset yliaaltovirrat.....	28
	7.8 Tehot.....	29

8 YHTEENVETO .....	30
LÄHTEET .....	31
LIITTEET	

# 1 JOHDANTO

Sähkön laatua voidaan käsitellä monista näkökulmista jännitteen ja virran harmonisista yliaalloista aina käyttökeskeytyksiin. Hyvällä sähkön laadulla saadaan aikaan verkon käyttövarmuutta ja tuotannon varmuutta. Sähkön laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat aina liittymiskohdan jännitteen ominaisuudet sekä kuluttajan omassa verkossa vaikuttavat sähkölaitteet ja niistä johtuvat häiriöt verkkoon.

Lisääntyneet tietokoneet ja muu kulutuselektroniikka ovat ongelma nykypäivän sähköverkolle. Näiden laitteiden ottama virta ei ole puhdasta siniaaltoa vaan ne sisältävät virran perusaalton nähden harmonisia yliaaltovirtoja. Nämä harmoniset yliaaltovirrat voivat aiheuttaa esimerkiksi jännitteen säröytymistä, suoja- ja mittalaitteiden virhetoimintoja, jakelumuuntajien häviöiden kasvua sekä niiden ylimääräistä lämpenemistä.

Tässä työssä tutkitaan teollisuuskiinteistön sähkön laatua. Sähkön laatumittaukset suoritettiin Kemira Oyj:n Porin tehtaalla, joka valmistaa vedenkäsittelykemikaaleja. Aluksi työssä käsiteltiin jännitteen sähkön laadullisia ominaisuuksia ja lopuksi perehdyttiin saatuihin mittaustuloksiin ja tehtiin johtopäätökset niiden pohjalta.

## 2 STANDARDI

### 2.1 Laatustandardi

Standardi SFS-EN-50160 käsittää jakelujännitteen ominaisuuksia yleisessä jakeluverkossa. Jakeluverkon haltija on vastuussa sähkökäyttäjän liittymiskohdassa. Tähän rajapintaan standardi antaa tarkat sähkön laadulliset kriteerit. Sähkökäyttäjän näkökulmasta katsottuna standardi ei määrittele mitään sähkön laadullisia kriteereitä. Mutta standardin antamia raja- ja viitearvoja voidaan käyttää apuna, kun määritellään sähköverkon laadullista tilaa. Taulukossa 1. esitetään, millaisista erilaisista laatuksiteereistä pienjänniteverkon jännite voi koostua ja mitä raja-arvoja standardi niille määrittelee. (Männistö yms. 2006, 21)

Taulukko 1. Pienjänniteverkon jännitteen laatuksiteerit. (Lakervi & Partanen 2008, 256)

Jännitteen ominaisuus	Korkealaatu	Normaali-laatu	Standardin SFS-EN 50160 mukainen laatu	Huomautus
Taajuus	50 Hz ± 0,5 %	50 Hz ± 1 %	99,5 % vuodesta 50 Hz ± 1 %, 100 % ajasta 50 Hz +4 % / -6 %	Mittaus 10s jaksoina
Jännitteen vaihtelu	100 % ajasta 225-235 V	100 % ajasta 207- 244 V	95 % $U_N \pm 10 \%$ , 100% ajasta $U_N +10\% / -15 \%$	Mittaus tehollisarvojen 10 min keskiarvoina viikon ajan
Nopeat jännitemuutokset	$P_{ST} \leq 1$ ja $P_{LT} \leq 0,8$	$P_{LT} \leq 1$	95 % $P_{LT}$ - arvoista $\leq 1$	
Harmoniset yliaallot	$THD \leq 3 \%$	$THD \leq 6 \%$	95 % ajasta $THD \leq 8 \%$	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan
Epäsyyntia	$U_{SH} \leq 1 \%$	$U_{SH} \leq 1,5 \%$	95 % $U_{SH} \leq 2 \%$	Mittaus 10 min jaksoina viikon ajan

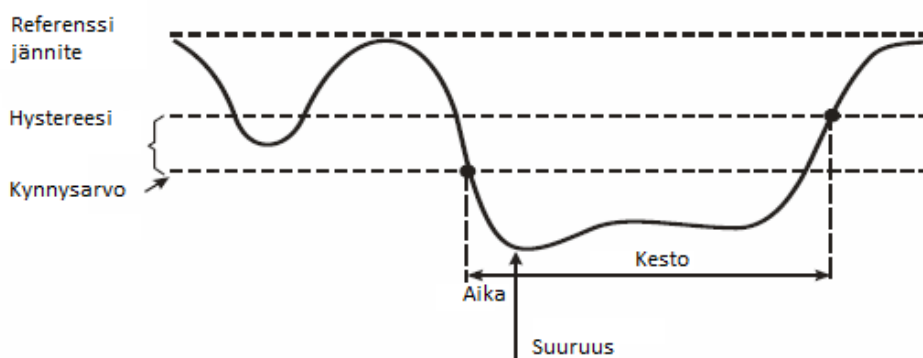
### 3 JÄNNITTEEN OMINAISUUDET

#### 3.1 Taajuus

Suomessa sähköverkon taajuus on 50 Hz. Taajuus kuvaa jännitteen perusaallon jaksomäärää mitattuna tietyllä ajanjaksolla. Taajuuspoikkeamat ovat hyvin harvinaisia Suomessa. Yleensä niitä esiintyy vain varavoimakäytöissä ja pienillä jakelualueilla. Nopeat kuormitusmuutokset yksityisillä generaattoreilla ovat pääasiallinen syy taajuuspoikkeamille. Muita syitä voivat olla yksittäisen generaattorin säätö- ja ohjauslaitteista johtuvat ongelmat tai epästabiili ja ylikuormitettu maaseutuverkko. (ABB TTT-käsikirja 2007, 2)

#### 3.2 Jännitekuoppa

Kuopat ja kohoumat ovat nopeita muutoksia jännitteen nimellisarvoista. Kuoppa syntyy, kun jännite alenee nopeasti 1-90 % nimellisjännitteestä ja palautuu takaisin normaaliin tilaansa. Kuopan kestoaika voi vaihdella puoliaallosta muutamaan sekuntiin. Kolmivaihejärjestelmässä kuoppa määritellään siten, että yksi tai useampi vaihe laskee alle nimellisarvon. Kuopan loppu taas määräytyy siitä, kun kaikki vaiheet ovat palautuneet nimellisjännitteeseen, huomioiden määritellyn hystereesin. Kuvassa 1. on esitetty jännitekuoppa tarkemmin. Jännitekuopan aiheuttajia ovat yleensä jakeluverkon vikatapaukset tai suurten sähkökoneiden käynnistykset. (Fluke 2006, 9)



Kuva 1. Jännitekuoppa (Fluke 2006, 9)



### 3.3 Nopeat jännitemuutokset

Nopeat jännitemuutokset ovat jännitteen tehollisarvon nopeita muutoksia kahden stabiilin arvon välillä. Nämä muutokset aiheutuvat yleensä isojen kuormien päälle- ja poiskytkemisistä sekä nopeista jälleenkytkemisistä. Muita syitä voivat olla kuormituksessa tapahtuvat muutokset tai järjestelmän mahdolliset vikatapaukset. Normaaleissa käyttöolosuhteissa, nopeat jännitemuutokset voivat olla yleensä  $\pm 5\%$  nimellisjännitteestä. Lyhytaikaisia muutoksia voi tapahtua muutamia kertoja päivässä. Muutoksien suuruus voi olla  $\pm 10\%$  nimellisjännitteestä.

Nopeita ja toistuvia jännitemuutoksia kutsutaan välkynnäksi. Ne voivat aiheuttaa valaistuksen vilkkumista ja herkkien laitteiden häiriöitä. Häiritsevyys riippuu kestoajasta, jännitteen vaihtelun suuruudesta ja esiintymistiheydestä. Välkynnän mittaamiseksi on olemassa verkkoanalysaattoreita, jotka antavat tulokseksi kymmenen minuutin mittausjaksolle lyhytaikaisen häiritsevyysindeksin  $P_{st}$ , jonka avulla pystytään laskemaan pitkäaikainen häiritsevyysindeksi  $P_{lt}$ . Kaavassa 1 on esitetty pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin laskukaavaa. (Alanen & Hätönen, 18)

$$P_{lt} = \left[ \sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12} \right]^{1/3}$$

(1)

Standardissa SFS-EN-50160 on häiritsevyysindeksi jaettu lyhytaikaiseen  $P_{st}$  ja pitkäaikaiseen häiritsevyyssiindeksiin  $P_{lt}$ . Standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa ja minkä tahansa viikon aikana jännitteen vaihtelun aiheuttaman pitkäaikaisen häiritsevyysindeksin tulisi olla  $P_{lt} \leq 1$  95 % ajasta. (Lakervi & Partanen 2008, 252)

### 3.4 Ylijännitteet

Ylijännitteet voidaan jakaa pitkä- ja lyhytkestoisiin ylijännitteisiin. Pitkäkestoisten ylijännitteiden tasot ovat matalia eli noin 1,4–4,3 jännitteen huippuarvosta. Kun jännitteen huippuarvot ovat jännitetoleranssirajan yläpuolella, ne lasketaan ylijännitteiksi. Lyhytaikaiset ylijännitteet eli toisin sanoen transientit, ovat kestoiltaan lyhyitä ja niiden jännitetasot voivat nousta satoihin megavoltteihin. (Lamberg 2009, 4)

#### 3.4.1 Transienttiylijiännitteet

Transienttiylijiännite on lyhytaikainen värähtelevä ylijännite tai toisissa tapauksissa ei-värähtelevä ylijännite. Tavallisesti transienttiylijiännite vaimenee voimakkaasti ja on kestoiltaan enintään muutamia millisekunteja. Nousuaika näille on yleensä alle mikrosekunneista millisekunteihin eli hyvin pieniä. Syitä transienteille voivat olla salaman iskut, erilaisista sähköverkon kytkentätoimenpiteistä johtuvat transientit tai sähköstaattisista purkauksista johtuvat ylijännitteet. Transientit voidaan jakaa keston ja ilmiön mukaan kolmeen osaan. (Energiateollisuus 2014, 18)

Loivat transientit ovat suuruudeltaan noin kaksi kertaa jännitteen huippuarvosta ja ne ovat kestoiltaan millisekunteja, mutta pienempiä kuin yksi verkkopakso. Tämä puolestaan aiheuttaa suuria virranmuutoksia hyvin lyhyessä ajassa. (Lamberg 2009,5)

Jyrkät transientit eli salaman aiheuttamat transienttiylijiännitteet ovat energisesti suurempia. Tästä syystä myös niiden tuhot ovat suurempia. Nousuaika jyrkillä transienteilla voi olla joitakin mikrosekunteja ja puoliintumisaika tavallisesti kymmeniä mikrosekunteja jännitteen ollessa 200 - 500 kV. (Lamberg 2009, 5)

Erittäin jyrkät transientit syntyvät yleensä erottimia avatessa ja siitä johtuvien valo-kaarien katkeamisesta ja jälleensyttymisistä. Erottimien avausliikkeen aikana voi syntyä kymmeniä jälleensyttymisiä. Verkkoon, johon erottimet on kytketty, syntyy suuri-

taajuinen värähtely jokaisesta syttymisestä. Ylijännitteen syttymiseksi tarvittava sopiva kapasitanssi löytyy yleensä mittamuuntajasta, kun erottimen väliaineena on ilma. Purkausvirtojen huippuarvot voivat saavuttaa 2–3 kA tason, kun taas värähtelyn taajuus vaihtelee 100 kHz – 10 MHz välillä. (Korhonen 2009, 24)

### 3.5 Epäsymmetria

Jännitteen epäsymmetria johtuu kolmivaiheverkon epäsymmetrisistä kuormista. Epäsymmetria voi häiritä herkkiä laitteita tai suurentaa sähkömoottorin roottorihäviötä ja pienentää momenttia. (ABB TTT-käsikirja, 5)

Vaihejännitteet ja -virrat muodostuvat kolmesta osasta, jotka ovat myötä-, vasta- ja nollakomponentti. Myötäkomponenttia esiintyy normaaleissa symmetrisissä kolmivaihejärjestelmissä. Vastakomponentti johtuu taas epäsymmetrisistä vaihejännitteistä ja -virroista. Nollakomponentteja voi esiintyä epäsymmetrisillä kuormilla nelijohdinjärjestelmissä ja ne vastaavat nollajohtimen virtaa. (Fluke 2006, 13)

Jännitteen epäsymmetriaa voidaan määritellä siten, että monivaihejärjestelmän ”vaihejännitteiden tehollisarvot ja niiden väliset kulmat eivät ole samat.” Epäsymmetrian suuruus ilmaistaan yleensä nolla- ja vastakomponenttien suhteessa myötäkomponenttiin. Jännitteen epäsymmetria määritellään kaavan 2 avulla. (SFS-EN-50160, 22)

Standardissa SFS-EN-50160 sanotaan, että ”normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jokaisen, jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % (perustaajuisesta) myötäkomponentista.” (SFS-EN-50160, 22)

$$u_n = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \text{ missä}$$

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (2)$$

$U_n$  = epäsymmetria

$\beta$  = jännitekerroin

$U_{12}$  = jännite vaiheiden L1-L2 välillä

$U_{23}$  = jännite vaiheiden L2-L3 välillä

$U_{13}$  = jännite vaiheiden L1-L3 välillä

## 4 YLIAALLOT

### 4.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot

Vaihtojännitteet ja -virrat ovat säröytyneitä, jos niiden käyrämuodot poikkeavat perustajuisesta sinimuotoisesta käyrästä. Epälineaaristen kuormien verkosta ottamat tai verkkoon syöttämät virrat, jotka poikkeavat siniaallosta säröyttävät verkkojännitettä. Koska nämä virrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä. Myös resonanssi-ilmiot voivat suurentaa verkossa esiintyviä yliaaltoja.

Nimellistaajuudeltaan 50 Hz säröytyneissä sähköverkoissa voi esiintyä tämän taajuuden harmonisia yliaaltoja sekä epäharmonisia yliaaltoja. Epäharmoninen yliaaltotaajuus on taajuus, joka ei ole perusaallon taajuuden monikerta. (Männistö ym. 2006, 26)

Standardissa SFS-EN-50160 määritellään harmonisille yliaaltojännitteille taulukon 1. mukaisia arvoja. Standardissa sanotaan, että jokaisen viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 1 annettu arvo. Resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäiselle

harmoniselle komponentille. Lisäksi jännitteen kokonaissärökertoimen tulisi olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. (SFS-EN-50160, 22)

Taulukko 2. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittämiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustaajuisesta jännitteestä. (SFS-EN-50160, 22)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Yliaaltojännite	Järjestysluku h	Yliaaltojännite	Järjestysluku h	Yliaaltojännite
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1.5 %	4	1 %
11	3.5 %	15	0.5 %	6...24	0.5 %
13	3 %	21	0.5 %		
17	2 %				
19	1.5 %				
23	1.5 %				
25	1.5 %				

#### 4.2 Yliaaltokomponentit

Harmoniset yliaallot jaetaan eri komponentteihin niiden taajuuden ja ominaisuuksien mukaan. Taulukosta 3 näemme, että ensimmäinen taajuus on perustaajuus (50 Hz), toinen harmoninen on kaksi kertaa perustaajuuden suuruinen (100 Hz) ja niin edelleen.

Harmoninen kiertosuunta voi olla positiivinen, negatiivinen tai nolla. Esimerkiksi positiivinen kiertosuunta merkitsee sitä, että harmoniset yliaallot yrittävät pyörittää oikosulkumoottoria nopeammin, kuin mitä perustaajuus on. Negatiivisessa taas päinvastoin eli ne yrittävät hidastaa moottorin pyörimisnopeutta. Näissä molemmissa tapauksissa moottorien vääntömomentit pienenevät ja moottorit lämpenevät. Nolla kiertosuunnassa harmoniset taas summautuvat nollajohtimeen, mikä taas voi johtaa nollajohtimen ylikuumentumiseen. (Fluke 2006, 10)

Taulukko 3 Harmonisten yliaaltojen komponentit.

Harmoni- set	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	.9	10.	11.	....
Taajuus	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz	350 Hz	400 Hz	450 Hz	500 Hz	550 Hz	....
Kierto- suunta	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	....

#### 4.3 Yliaallot matemaattisesti

Jännitteen ja virran säröytyneitä käyrämuotoja pystytään myös käsittelemään jaksollisesti vaihtelevina suureina. Kaavasta 3 näemme kuinka niitä voidaan matemaattisesti esittää yhden tai useamman sinifunktion summana. Fourier-analyysin avulla saadaan tulokseksi jännitteen yhtälö, jonka komponenttien kertoimet antavat tulokseksi taajuuskomponenttien pitoisuudet.

”Tietyn taajuuden tehollisarvoon suhteutettua pitoisuutta kutsutaan särökertoimeksi, kun taas erilaisiin taajuuskomponentteihin jaettua signaalia voidaan kutsua spektriiksi. Signaalin integroituvalla funktiolla  $f$  määritellään sen Fourier-muunnos.” (Männistö ym. 2006, 26 ; Alanen & Hätönen, 16)

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

$f$  = alkuperäinen signaali aikatasossa

$w$  = kulmataajuus

$F$  = fourier muunnettu signaali aikatasossa

Signaalin harmonisella kokonaissäröllä THD määritetään harmonisten yliaaltojen määrä suhteessa, joko perustaajuiseen komponenttiin THD-F tai jännitteen tehollisarvoon THD-R, joiden laskukaavat on esitetty kaavoissa 4 ja 5. (Männistö ym. 2006, 29)

$$THD - F = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_{1v}} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$THD - R = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\% \quad (5)$$

$U_v$  = perustaajuinen jännitteen tehollisarvo

$U$  = yliaaltojännitteen tehollisarvo

#### 4.4 Yliaaltojen lähteet.

Epälineaariset kuormat voivat aiheuttaa sähköverkkoon yliaaltoja. Näitä epälineaarisia kuormia teollisuusympäristössä voivat olla esimerkiksi taajuusmuuttajakäytöt, hakku-ritehonlähteet, tietokoneet, purkauslamput, hitsauslaitteet sekä vikaantuneiden moottoreiden ja muuntajien magneettipiirit. Näiden kuormitusten ottamat yliaaltovirrat aiheuttavat verkon impedanssien kautta kulkiessaan yliaaltojännitteitä ja jännitteen särytymistä. (Lakervi & Partanen 2008, 254)

#### 4.5 Yliaaltojen häirtatekijät

Yliaallot voivat aiheuttaa erilaisia haittoja sähköverkkoon. Esimerkiksi yliaallot voivat kasvattaa häviöitä sähköverkoissa tai käyttäjien laitteissa. Myös sähkölaitteiden kuormitettavuuksien alentuminen on yksi häirtatekijä.

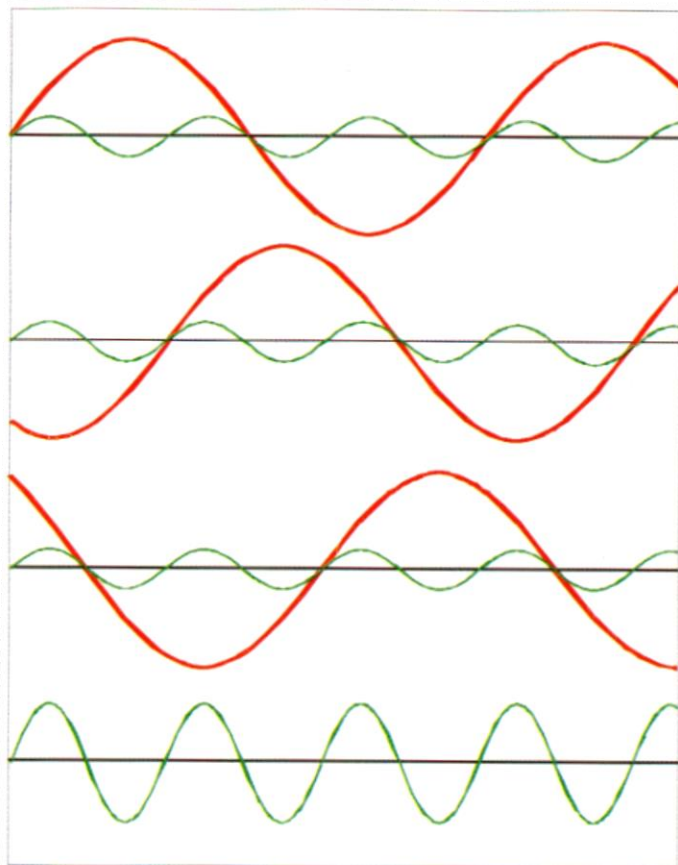
Yliaallot voivat aiheuttaa herkissä mittareissa virhenäyttämiä sekä automaatiolaitteiden ja suojaeleiden virhetoimintoja. Myös radiotaajuiset häiriöt voivat johtua yliaaltojen seurauksesta. Näiden edellä mainittujen häiriöiden syinä ovat yleensä sähkönkäyttäjän omien laitteiden synnyttämät virtayliaallot. (Männistö ym. 2006, 30)

#### 4.6 Nollajohtimen ylikuormittuminen

Epäsymmetrisillä kuormilla nollajohdin kuormittuu suurimmillaan saman verran kuin eniten kuormitettu vaihejohdin. Jos kolmivaihekuorma on täysin symmetristä, niin nollajohdin ei kuormitu lainkaan.

Kolmella jaottomat harmoniset yliaallot kuormittavat nollajohdinta samalla tavalla kuin virran perusaalto. Kun taas kolmella jaolliset harmoniset yliaallot voivat saada aikaan nollajohtimeen tehollisarvoltaan vaihejohtimia suuremman virran, jolloin nollajohtimeen summautuneen virran amplitudi on kolminkertainen vaihejohtimen vastaavaan virtaan nähden. (Kuva 2)

Johtimen kuormitettavuus pienenee virran taajuuden kasvaessa, kun johtimen vaihtovirtaresistanssi kasvaa. (Männistö ym. 2006, 32)



Kuva 2. Nollajohtimeen summautuneet kolmannet yliaaltovirrat. (Männistö ym. 2006, 33)



## 5 LOISTEHO JA KOMPENSOINTI

### 5.1 Loisteho

Toiset sähkölaitteet tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi myös loistehoa. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi teollisuuden sähköverkoissa oikosulkumoottorit, muuntajat ja kuristimella toimivat valaisimet. Edellä mainituissa laitteissa varsinaisen työn tekee pätöteho ja loistehoa tarvitaan vain magneettikentän ylläpitämiseen. (Silvennoinen ym. 1998)

Loistehoa ei kannata kuljettaa jakeluverkossa, koska se kuormittaa turhaan jakeluverkkoa. Yksinkertainen ratkaisu tähän on pyrkiä kompensoimaan kulutuspiisteiden lähellä. Kun loisteho on induktiivista, niin kompensointiin käytetään vastakkaista reaktiivista kuormitusta eli kapasitanssia sisältäviä kondensaattoreita. (STEK:in WWW-sivut 2014)

### 5.2 Kompensointiratkaisut

Loistehon kompensoinnissa käytettäviin ratkaisuihin vaikuttavat monet asiat. Esimerkiksi näihin vaikuttavat tekijät voivat olla kompensoitavat laitteet ja verkon yliaaltopitoisuus. Kompensointi voidaan toteuttaa laitekohtaisesti, ryhmäkohtaisesti tai keskitetysti.

Kuorman kanssa rinnan kytketyt paristot eli rinnakkaiskondensaattoriparistot jaetaan kahteen ryhmään kiinteisiin ja säädettäviin paristoihin. Kiinteissä paristoissa kondensaattoriteho toimii ilman säätöä sähköverkoissa. Kun taas säädettävissä automatiikkaparistoissa sähköverkkoon kytkettyä kondensaattoritehoa säädetään portaittain.

Automatiikkaparistoja säätää loistehonsäätäjä, johon voidaan ennalta määritellä hahtumisrajat sekä induktiiviselle että kapasitiiviselle loisteholle. Säädin toimii siten,

että keskuksen syötöstä mitataan virtamuuntajan kautta loistehon tarvetta. Säädin laskee tämän mittatuloksen perusteella, kuinka paljon kondensaattoriparistoja se kytkee verkkoon tai pois verkosta. (Männistö ym. 2006, 50)

Jos kompensoitava verkko sisältää paljon yliaaltoja, niin yleensä kompensointi suoritetaan rinnakkaiskondensaattorin sijaan estokelaparistolla. Kiinteä estokelaparisto koostuu kondensaattoriyksikön kanssa sarjaankytketystä estokelakuristimesta. Estokelaparistolla pystytään välttämään haitallisten resonanssi-ilmiöiden syntyminen kondensaattorin kapasitanssin ja verkon induktanssin välille. Kompensointikondensaattorin kapasitanssi ja verkon induktanssi voivat muodostaa rinnakkaisresonanssiipiirin, jossa tietty viritystaajuus voi osua jonkun satunnaisen yliaaltotaajuuden kohdalle. Tästä syystä voivat tämäntaajuiset yliaaltovirrat vahvistua jopa 20-kertaisiksi. Tämän takia ei suositella kompensoimaan loistehoa tavallisilla kompensointikondensaattoreilla yliaaltopitoisissa verkoissa. (Männistö ym. 2006, 52)

Aktiivisuodattimia voidaan myös käyttää yliaaltopitoisissa verkoissa loistehon kompensoimiseen. Aktiivisuodattimella voidaan yliaaltojen suodatuksen lisäksi hallita kuormituksen tasaisuutta sekä säätää portaattomasti loistehoa. (ST 52.16 2014, 4)

### 5.3 Kompensoinnin syyt

Sähkönkuluttaja tekee kompensoinnin yleensä lähellä kulutuspistettä, koska energia-yhtiö laskuttaa kuluttajan tuottamasta loistehon määrästä. Loistehomaksu on verrattain suuri muuhun energiamaksuun nähden. Joillakin energiayhtiöillä on ilmaisen loistehon osuus vain 16 % pätötehosta. Tällä määrittelyllä energiayhtiöt pyrkivät kuluttajan hankkimaan itse loistehon kompensointilaitteita.

Hyvän kompensoinnin johdosta pystytään myös lisäämään verkon siirtokapasiteettia. Koska kuorman ottama virta lasketaan näennäistehosta, jolloin kokonaisvirtaan vaikuttaa myös loisteho. Kun kuoritusvirrasta poistuu loistehokomponentti, verkon pätötehon siirtokapasiteetti kasvaa.

Kompensoinnin aiheuttaman kokonaisvirran pienenemisen johdosta vähenee verkon pätötehohäviöt, jolloin keskusten, kaapeleiden ja muuntajien lämpötila alenee. (Männistö ym. 2006, 81)

## 6 MITTAUKSET

### 6.1 Mittaukset yleisesti

Mittaukset suoritettiin tehdaskiinteistön pienjännitekojeiston SC33 pääkeskuksessa. Mittauksien avulla pyrittiin selvittämään tehdaskiinteistön sähkön laatua ja kuormitusta. Mittauksissa käytettiin Fluken 435 -verkkoanalysaattoria, jonka avulla pystyttiin selvittämään kiinteistön sähkön laadun ominaisuuksia.

Mittaukset päätettiin tehdä kompensoinnin ollessa päällä ja yritettiin saada mittauksille sellainen ajankohta, että tehdas olisi normaalia kuormitustilannetta vastaavassa ajossa.

Mittaukset suoritettiin kymmenen sekunnin keskiarvolla neljän tunnin ajan. Mittauksissa käytettiin apuna verkkoanalysaattorin loggeri-toimintoa. Loggeri mahdollistaa monien eri arvojen tallentamisen suurella erottelukyvällä pitkään muistiin.

Koska Fluken 435 -verkkoanalysaattori tarjoaa laajan valikoiman eri mittauksia sähköverkon laadun selvittämiseen, niin osa mittausmahdollisuuksista jouduttiin karsimaan pois.

Saadut tulokset siirrettiin verkkoanalysaattorista tietokoneen Power log -ohjelmaan, josta oli jälkeenpäin helpompi tarkastella ja analysoida saatuja mittaustuloksia. Mittaustuloksia vertailtiin standardin SFS-EN 50160 määrittämiin raja-arvoihin.

## 6.2 Mittauskytkennät

Mittauskytkennät suoritettiin kuvan 3 mukaisesti. Alkuperäisen suunnitelman mukaan virranmittauslenkit piti asentaa suoraan pääkeskukseen tulevilta kiskosilloilta. Kiskot olivat niin hyvin suojattu, että sinne ei ollut turvallista asentaa virranmittauslenkkejä. Tämän johdosta virranmittaukset päätettiin suorittaa virtamuuntajan toisiopuolelta. Virran mittauksissa käytettiin Fluken i400s -virtapihtejä, jotka aseteltiin virtamuuntajan toisiopuolelta tuleviin johtimiin. Virtamuuntajan muuntosuhde oli 2500/5 A, jonka johdosta verkkoanalysaattoriin tehtiin virta-alueen skaalaus. Virtapihtien oikean suunnan tarkistus tehtiin analysaattorin vektorinäyttöä apuna käyttäen.

Jännitteen mittauspisteenä käytettiin keskuksen lähtöä, jonka kahvasulakkeisiin kiinnitettiin verkkoanalysaattorin mittaussleuat. Leukojen kiinnityksessä oltiin tekemisissä jännitteisien osien kanssa, joten turvallisuuden varmistamiseksi käytettiin asianmukaisia suojavarustuksia.



Kuva 3. Mittauskytkennät pääkeskuksessa.

### 6.2.1 Jännitteiseen osaan kohdistuva toimenpide

”SFS 6002 uudesta versiosta on jätetty pois määritelmä ”jännitteiseen osaan kohdistuva toimenpide”, mutta jännitetyönä ei edelleenkään pidetä erikseen määriteltyjä toimenpiteitä, joissa voidaan koskettaa jännitteistä osaa asianmukaisella välineellä tai joutua jännitetyöalueelle.

Tämänkaltaisia tehtäviä ovat esimerkiksi käyttötoimenpiteet, kuten sähkölaitteiston tilan muuttaminen ja sähkölaitteiston kytkentä- ja erotustyöt, sähkölaitteiston toiminnan tarkistukset, kuten mittaukset, testaukset ja aistinvaraiset tarkastukset sekä sulakkeiden, lamppujen ja tarvikkeiden vaihto kunnossapitotöissä. Perustason jännitetöissä työkohteen oikosulkuvirta on rajoitettu tai työkohteen ympäristö on riittävästi kosketussuojattu.”(Mäkinen 2015)

### 6.3 Mitattava kuorma ja verkkovaikutukset

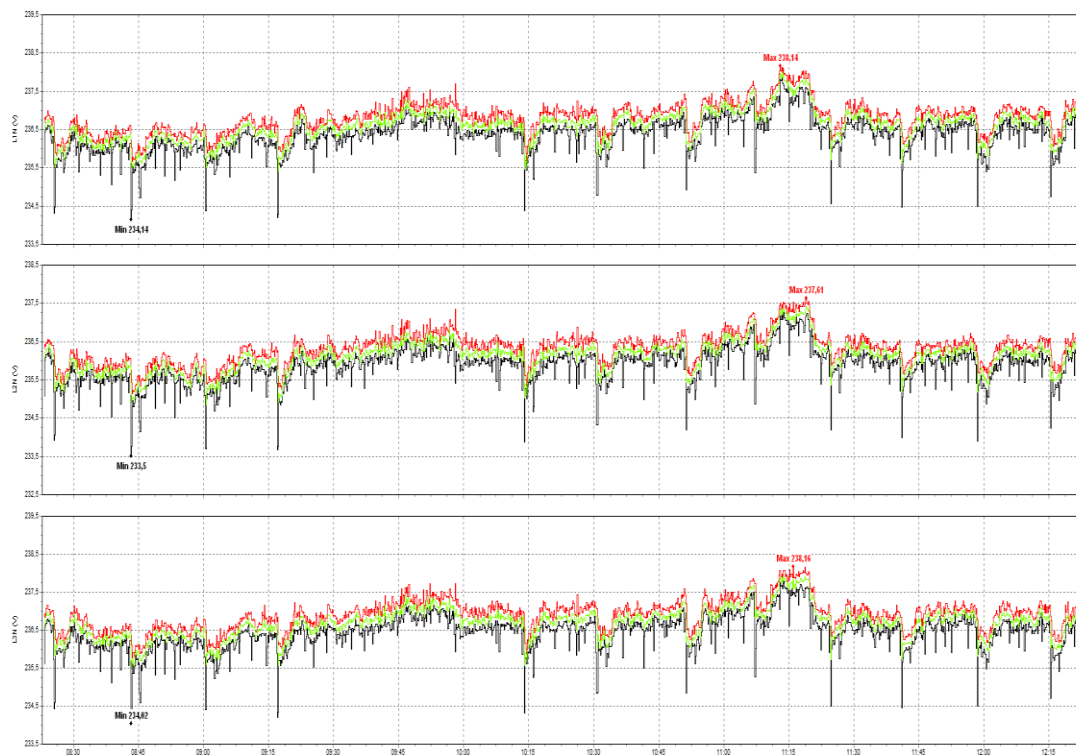
Mitattava kuorma muodostuu suurimmaksi osaksi taajuusmuuttajalähdöistä, suorista moottorilähdöistä, saattolämmityksistä sekä valaistuksesta. Eli suurimmaksi osaksi mitattava kuorma on epälineaarista, mikä taas aiheuttaa kuorman ottaman virran aaltomuodon poikkeamisen syöttöjännitteen aaltomuodosta.

Näistä suurimpia yliaaltojen aiheuttajia ovat taajuusmuuttajakäytöt ja valaistuksessa käytettävät purkauslamput. Jännitteen säröytymistä voi esiintyä myös moottoreiden epälineaarisuuksien takia, mutta niiden merkitys käytännössä on vähäinen.

## 7 TULOKSET

### 7.1 Jännite

Jännitemittaukset suoritettiin jännitteen tehollisarvona vaihe- ja nollajohtimen väliltä. Mittauksista saatiin jännitteen minimi, maksimi ja kymmenen sekunnin keskiarvo neljäntuntin ajalta. (Kuva 4)



Kuva 4. Pääkeskuksesta mitattu jännite.

Mittaustulosten perusteella saatiin jännitteille seuraavat tulokset. L1-vaiheen minimi oli 234,1V ja maksimi 238,1V. L2-vaiheen minimi oli 233,5V ja maksimi 237,6V. L3-vaiheen minimi oli 234,0V ja maksimi 238,2V.

Tehdyn mittauksen perusteella jännite täyttää hyvän laadun kriteerit. Jännitteen tehollisarvo pysyi 95% mittausajasta  $\pm 4\%$  välillä.

## 7.2 Virta

Virranmittauksissa mitattiin virran minimi, maksimi ja kymmenen sekunnin keskiarvo eri vaiheilta neljän tunnin ajan. (Kuva 5)



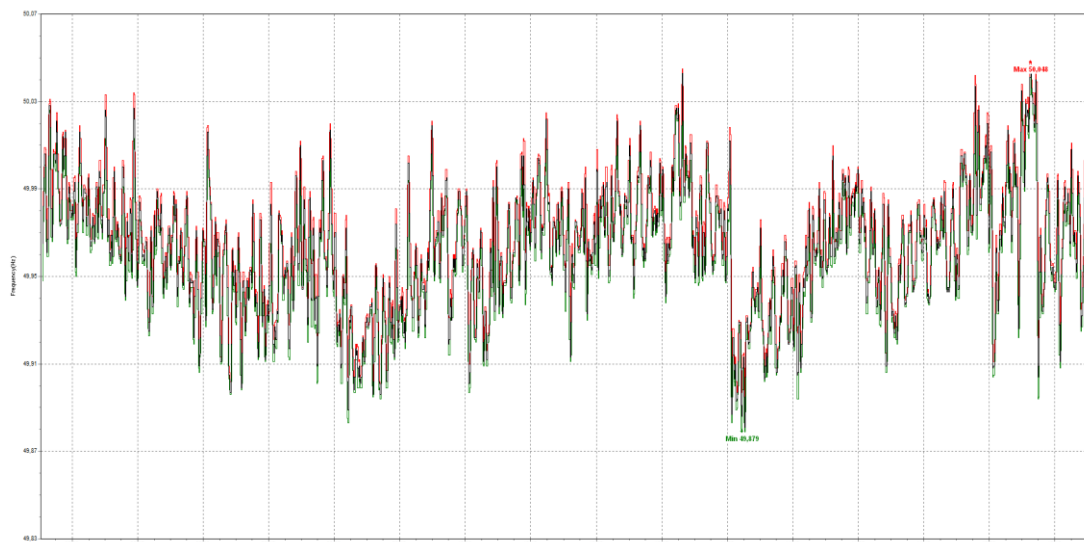
Kuva 5. Pääkeskuksesta mitatut virrat

Mittaustulosten perusteella L1-vaiheen minimi oli 710A ja maksimi 1070A keskiarvona 945A. L2-vaiheen minimi oli 745A ja maksimi 1065A ja keskiarvona 965A. L3-vaiheen minimi oli 710A ja maksimi 1055A ja keskiarvona 945A.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että pääkeskuksen kuormitettavuus on riittävä pääkeskuksen ja pääkytkimen nimellisvirran ollessa 2500A. Vaiheiden vinokuormituksen voidaan todeta olevan varsin vähäinen.

### 7.3 Taajuus

Kuvassa 6 on esitetty taajuuden minimi, maksimi ja kymmenen sekunnin keskiarvo neljän tunnin ajalta.



Kuva 6. Pääkeskuksen jännitteen taajuus.

Jännitteen taajuudelle määritellään standardissa kolme laatuluokkaa:

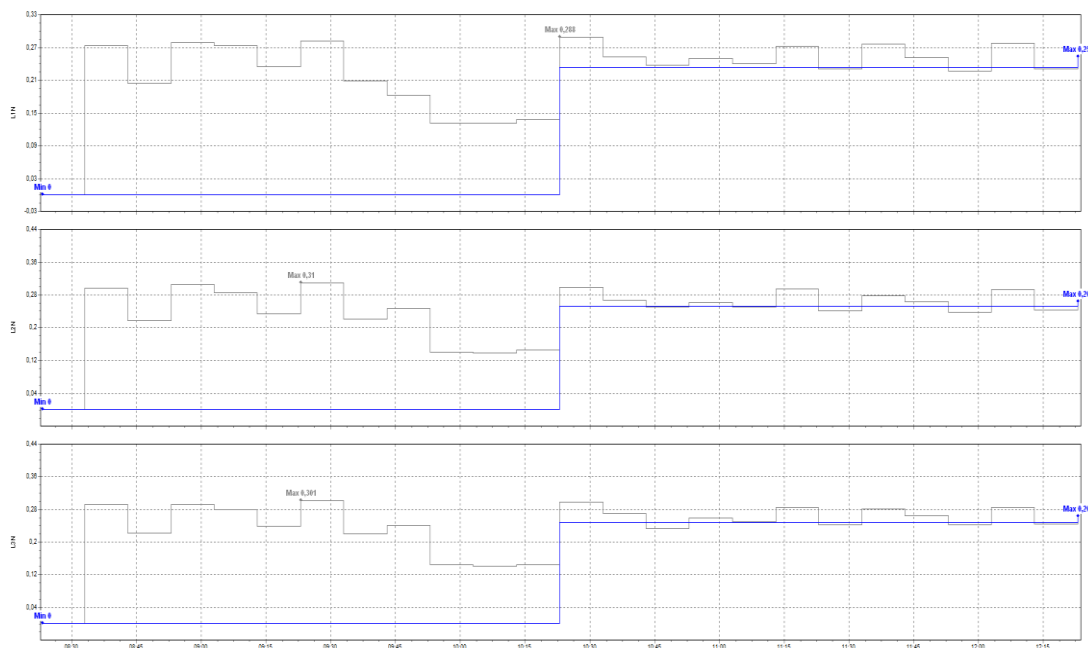
- Korkea laatu: Taajuus  $\pm 0.5\%$
- Hyvä laatu: Taajuus  $\pm 1\%$
- Standardin laatu: Taajuuden vaihteluväli 95% mittausajasta välillä  $\pm 1\%$

Saatujen mittaustulosten perusteella jännitteen taajuus täyttää korkean laadun kriteerit.

### 7.4 Välkyntä

Välkyntää mitattaessa mitattiin jännitteen vaihtelun aiheuttaman välkynnän pitkäaikaista häiritsevyysindeksiä  $P_{lt}$  ja lyhytaikaista häiritsevyysindeksiä  $P_{st}$ . Standardi antaa mittausaikasuositukseksi viikon keston ja mittausajat tapahtuvat kymmenen minuutin jaksoissa, mutta tässä mittauksessa mittausajaksi määräytyi neljän tunnin kesto ja jakson ajaksi kymmenen sekuntia. (Kuva 7)





Kuva 7. Jännitteen lyhyt- ja pitkäaikaiset häiritsevyyssindeksit.

Jännitteen aiheuttamalle välkyntälle määritellään standardissa kolme laatuluokkaa.

- Korkea laatu:  $P_{st, 3max} \leq 1$  ja  $P_{lt max} \leq 0,8$
- Normaali laatu:  $P_{lt max} \leq 1$
- Standardi laatu: 95% ajasta  $P_{lt}$  arvo on  $\leq 1$

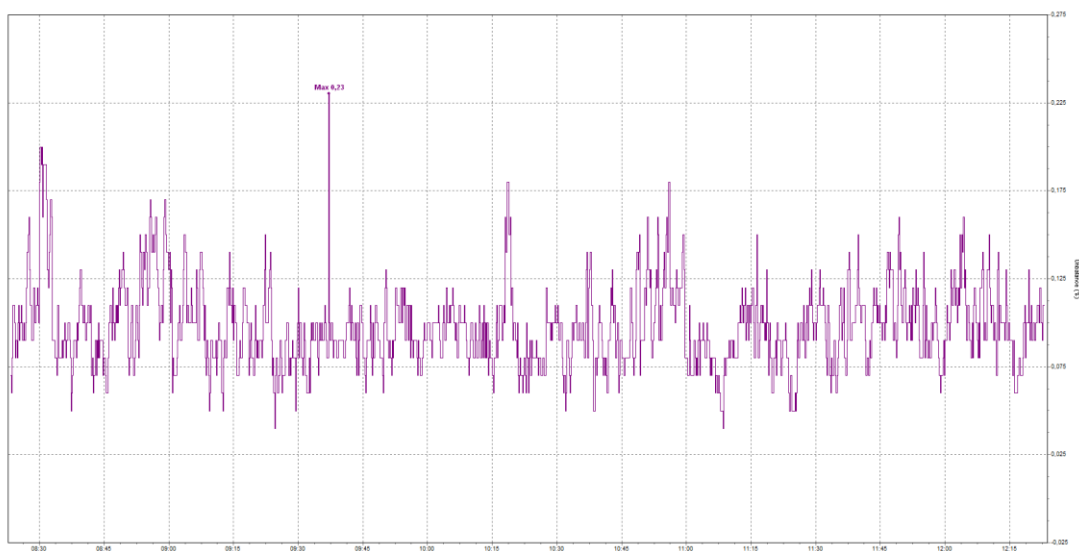
Mittaustulosten perusteella lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksin maksimi arvo oli 0,31, joka saatiin L2-vaiheelta. Pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin maksimi arvo oli 0,26, joka myös saatiin L2-vaiheelta.

Saatujen mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että verkossa ei ole ollut suurta välkyntää mittausjakson aikana. Välkyntää aiheutuu verkon jännitevaihteluista, jotka johtuvat nopeista kuormitusmuutoksista. Jännitevaihtelun suuruus riippuu kuormitusmuutosten suuruudesta ja verkon jäykkyydestä.

Saadut mittaustulokset täyttävät korkean laadun kriteerit.

## 7.5 Jännitteen epäsymmetria

Jännitteen epäsymmetriaa mitattiin jännitteessä esiintyvän vastakomponentin suuruuden avulla. Vastakomponentti laskettiin kymmenen sekunnin mittausjakson tehollisarvojen keskiarvoista. (Kuva 8)



Kuva 8. Pääkeskuksen jännitteen epäsymmetria.

Standardi määrittelee jännitteen epäsymmetrialle kolme laatuluokkaa.

- Korkea laatu: 100 % jännitteen  $U_{uSh}$  -arvoista  $\leq 1$  %
- Normaali laatu: 100 % jännitteen  $U_{uSh}$  -arvoista  $\leq 1,5$  %
- Standardi laatu: 95 % jännitteen  $U_{uSh}$  -arvoista  $\leq 2$  %

Mittausten perusteella jännitteen epäsymmetriaa ei juurikaan esiinny. Maksimi arvoksi saatiin 0.23 %. Mittausten perusteella voidaan todeta, että vaihejännitteiden tehollisarvot tai niiden väliset kulmat ovat lähes samat.

Mittaustulos täyttää korkean laadun kriteerit.

## 7.6 Harmoniset yliaaltojännitteet

Mittauksissa mitattiin sähköverkon harmonisia yliaaltoja. Harmonisten yliaaltojännitteiden suuruuksia tarkastellaan harmonisella kokonaissäröllä (THD). Kuvassa 9 nähdään hetkellisiä arvoja mittauksesta.

Jännitteen harmoninen kokonaissärö pysyi koko mittausjakson ajan 4 %:n tasolla. Kolmella jaottomat yliaallot H5, H7 ja H11 olivat odotetusti suurempia kuin muut yliaallot. Epälineaaristen kuormien yliaaltovirrat aiheuttavat verkon impedanssien kautta kulkiessaan nämä yliaaltojännitteet.

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	4.1	4.2	4.1	68.2
H3%f	0.2	0.2	0.2	36.7
H5%f	3.3	3.3	3.2	12.0
H7%f	2.1	2.2	2.2	37.4
H9%f	0.0	0.1	0.1	22.8
H11%f	1.2	1.2	1.2	21.2
H13%f	0.3	0.3	0.3	12.3
H15%f	0.1	0.1	0.0	13.3
06/04/16 08:22:11 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W U&A	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Kuva 9 Harmoniset yliaaltojännitteet.

Standardi määrittelee jännitteen kokonaissärölle kolme laatuluokkaa.

- Korkea laatu: Jännitteen kokonaissärö  $THD \leq 3 \%$
- Hyvä laatu: Jännitteen kokonaissärö  $THD \leq 6 \%$
- Standardi laatu: Jännitteen kokonaissärö  $THD \leq 8 \%$

Mittaukset täyttävät hyvän laadun kriteerit jännitteen kokonaissärössä. Standardi määrittelee myös taulukon 1 mukaisesti jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvolle raja-arvon. Kaikki yksittäiset harmoniset yliaaltojännitteet alittivat selvästi nämä arvot.

## 7.7 Harmoniset yliaaltovirrat

Mittauksessa mitattiin harmonisia yliaaltovirtoja ja virrankokonaissäröä THD. Kuvassa 10 esiintyy virran hetkelliset yliaallot ja virrankokonaissärö THD.

Mittauksetuloksista päätellen virrankokonaissärö oli mittausjakson aikana noin 17-18 %. Kolmella jaottomien yliaaltokomponenttien H5, H7, H11 ja H13 suuruus johtuu epälinearisista kolmivaihekuormista. Pääkeskuksen kanssa rinnan kytketty estokelapari, jonka viritystaajuus on 189 Hz suodattaa tyypillisesti näitä yliaaltovirtoja 10-30 % viidennen yliaallon määrästä.

Kolmatta yliaaltoa H3, joka summautuu nolnaan ei mittauksissa juurikaan hälyttävästi esiintynyt.

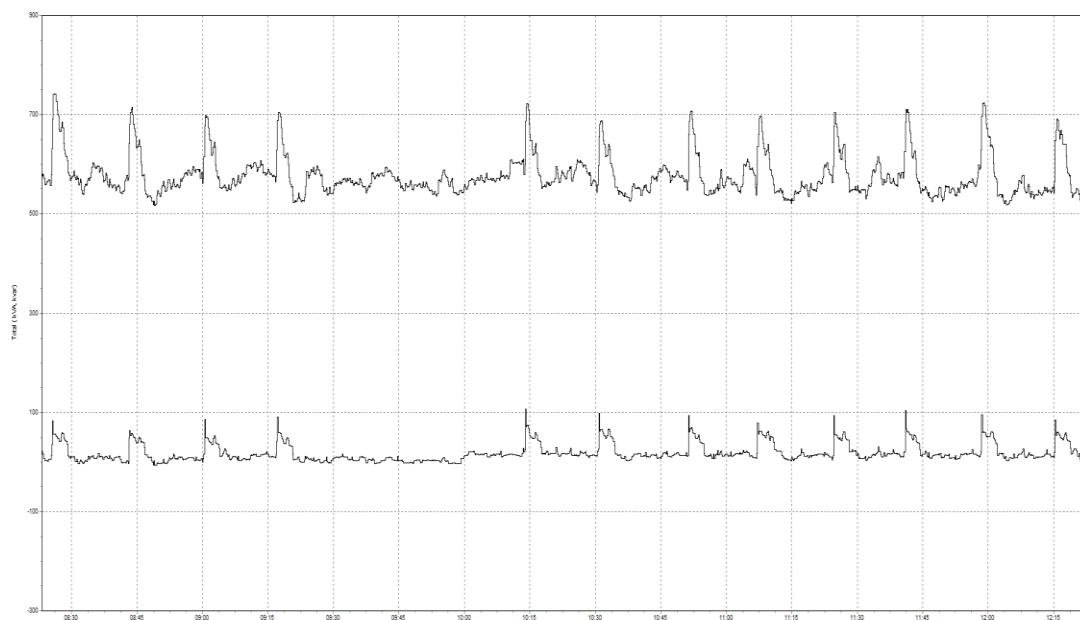
HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	17.6	17.1	17.4	50.7
H3%f	1.8	1.1	1.0	24.1
H5%f	15.9	15.4	15.8	14.8
H7%f	5.6	6.0	5.9	10.0
H9%f	0.2	0.3	0.3	8.0
H11%f	3.9	3.5	3.8	6.5
H13%f	1.4	1.7	1.7	5.8
H15%f	0.2	0.2	0.1	4.7
06/04/16 08:22:17 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W U&A	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Kuva 10. Pääkeskuksen harmoniset yliaaltovirrat .

Standardi SFS-EN-5160 ei anna harmonisille yliaaltovirroille mitään raja-arvoja. Mittausten perusteella virran harmoniset yliaallot eivät aiheuttaneet suurta jännitesäröä, koska muuntaja ja kompensointilaitteet olivat hyvin mitoitettu.

## 7.8 Tehot

Tehon mittauksissa mitattiin SC33 pääkeskuksen ottamaa näennäistehoa jakelumuuntajalta. Pääkeskusta syöttävän jakelumuuntajan nimellisteho oli 1600 kVA. Mittauksissa myös selvitettiin, mikä on verkosta otettavan induktiivisen loistehon tai verkkoon syötettävän kapasitiivisen loistehon osuus mittausjakson aikana. Kuvasta 11 nähdään mittausjakson aikana otettava näennäis- ja loisteho.



Kuva 11. Pääkeskuksesta mitatut näennäis- ja loistehot.

Mittaustuloksista päätellen SC33 pääkeskusta syöttävästä jakelumuuntajasta otettu näennäisteho oli suurimmillaan 742 kVA, mikä on yli puolet jakelumuuntajan nimellistehosta.

Pääkeskusta kompensoi Tampereen kondensaattoritehtaan valmistama 300kVar:in seitsenportainen estokelaparisto. Estokelapariston vuoksi verkosta otettavan induktiivisen loistehon osuus pysyy hyvällä tasolla ja ylikompensointiaakaan ei ole. Isommat loistehopiikit johtuvat kuormituksessa tapahtuvista piikeistä.

Mittausten perusteella voidaan todeta, että loistehon kompensointiin tarkoitettu estokelaparisto toimii oikealla tavalla.

## 8 YHTEENVETO

Sähkön laatu oli mitatussa tehdaskiinteistössä hyvä. Vaikka ennen mittauksia tiedettiin, että mitattava kohde tulisi sisältämään paljon epälineaarista kuormaa, niin mitaustulosten perusteella harmonisten jännite- ja virtayliaaltoja esiintyminen oli odotettua pienempää.

Jännitteen kokonaissärö pysyi neljän prosentin tietämällä, mikä on standardin SFS-EN-50160 arvojen sisäpuolella. Jännitteen kokonaissärön pienuus johtuu verkon hyvästä mitoituksista ja estokelapariston suodatusominaisuuksista. Kuitenkin täytyy ottaa huomioon se mahdollisuus, että jotkut herkät laitteet ja ohjaukset voivat kuitenkin häiriintyä jo jännitteen kokonaissärön ollessa noin kolmen prosentin luokkaa.

Pienjännitekojeiston ja jakelumuuntajan kuormitettavuus oli tehtyjen mittausten perusteella riittävä. Muuntajasta otettu näennäisteho oli mittausjakson aikana suurimmillaan 47 % muuntajan nimelliskuormitettavuudesta. Tulevaisuudessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon tuotantolinjojen lisäämisen tarve. Eli onko nykyisen muuntajan kuormitettavuus enää silloin riittävä.

Jos sähkölaitteissa ilmenee odottamatonta vikaa tai muita häiriöitä, voidaan mittausten perusteella sulkea ainakin osittain pois se mahdollisuus, että ongelmat johtuisivat verkon huonosta sähkön laadusta.

Mielestäni tämä opinnäytetyö täytti kaikki odotukseni. Ammatillisen osaamisen näkökulmasta katsottuna tämä työ antaa tulevaisuudessa itselleni paremman kuvan siitä, mitkä asiat vaikuttavat sähkön laatuun ja mitkä ovat niiden verkkovaikutukset. Tämä opinnäytetyö antaa myös paremmat valmiudet käyttää verkkoanalysointia ja tulkita saatuja mittaustuloksia.

## LÄHTEET

ABB TTT- käsikirja 2007-07.

Alanen & Hätönen. 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta. Espoo: VTT. VTT Working papers 52. Viitattu 9.4.2016 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/w52.pdf>

Energiateollisuus 2014. Sähkön toimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. Viitattu 15.4.2016 [http://energia.fi/sites/default/files/sahkon\\_laatu\\_ja\\_toimitustapavirheen\\_sovellusohje\\_2014.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/sahkon_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf)

Fluke Corporation 2006. Fluke 434/435 Kolmivaiheinen sähkönlaatuanalysointilaite. Käyttöohje. Viitattu 10.4.2016 [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:5f6q4YyBtI4J:www.yeint.fi/files/products/434\\_435\\_K\\_ytt\\_ohje.pdf+&cd=10&hl=en&ct=clnk&gl=us](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:5f6q4YyBtI4J:www.yeint.fi/files/products/434_435_K_ytt_ohje.pdf+&cd=10&hl=en&ct=clnk&gl=us)

Korhonen, H. 2009. Ylijännitesuojaus pienjänniteverkossa. AMK-opinnäytetyö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Viitattu 8.4.2016 <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/3529/Ylijannitesuojaus%20pienjanniteverkossa.pdf>

Lakervi & Partanen 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Hakapaino.

Lamberg, V. 2002. Teollisuusverkon kartoitus, mitoitus, riskiarvio ja huoltosuunnitelma. Diplomityö. TTY. Viitattu 10.4.2016

Mäkinen, P. 2015. Täsmennyksiä jännitetyöohjeisiin. Viitattu 24.4.2016 [http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/sahkoinfo-lehti/s\\_sahkoturvallisuus/fi\\_FI/tasmennyksia\\_jannitetyoohjeisiin/](http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/sahkoinfo-lehti/s_sahkoturvallisuus/fi_FI/tasmennyksia_jannitetyoohjeisiin/)

Männistö, Hietalahti, R. Seesvuori, V. Seesvuori & Wilén 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere: Tammer-Paino

SFS-EN-50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet 2010. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS. Viitattu 17.4.2016.  
<http://www.sfs.fi>

Silvennoinen, Lehtelä, Havunen, Kaartinen & Korpinen 1998. Sähkövoimatekniikka-opus. Tampere: TTY

ST 52.16. Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. 2014. Sähkötieto ry. Espoo: Sähköinfo Viitattu 14.4.2016.  
<http://www.sahkoinfo.fi/severi>

Sähköturvallisuuden edistämiskeskuksen www-sivut 2014. Viitattu 19.4.2016.  
[http://www.stek.fi/kysy\\_sahkosta/sahkoverkot/fi\\_FI/loisteho/](http://www.stek.fi/kysy_sahkosta/sahkoverkot/fi_FI/loisteho/)