

Teemu Koivisto

L-LINJAN INDUKTIOUUNIN YLIAALTOJEN TUTKIMINEN

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2014

## L-LINJAN INDUKTIOUUNIN YLIAALTOJEN TUTKIMINEN

Koivisto, Teemu  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Maaliskuu 2014  
Ohjaaja: Lehtio, Ari  
Sivumäärä: 43  
Liitteitä: 2

Asiasanat: Yliaalto, Induktiouuni, Induktori,

---

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia Luvata Pori Oy:n kiinteistössä ilmeneviä ylijännitteitä, jotka aiheuttavat sulattamon taajuusmuuttajissa ylijännitesuojan toiminnan. Ylijännitteiden aiheuttajiksi epäiltiin L-linjan induktiouunin aiheuttamia harmonisia yliaaltoja. Työssä tutkittiin verkon sähkön laatua ja ilmiötä, ongelman selvittämiseksi.

Induktiouunia syöttävällä keskuksella suoritettiin verkkoanalysointia avulla kaksi mittausta, joiden tuloksista saatiin tutkittua tehon muutoksia, jännitteen ja virran aaltomuotoa, sekä kytkentätilanteen aikana tapahtuvat muutokset verkossa.

Mittaustulosten avulla oli mahdollista päätellä, että yliaallot eivät aiheuttaneet huomattavaa säröytymistä jännitteessä ja näin ollen ylijännitteitä. Taajuusmuuttajien ylijännitesuojan toiminnan aiheuttavaksi ongelmaksi epäiltiin tulosten perusteella olevan kompensointikondensaattorien kytkeytyminen verkkoon ja siitä johtuvat ylijännitteet.

Opinnäytetyön tilaajalle ehdotettiin kondensaattorien kytkeytymisestä johtuvan ylijännitteen ehkäisemistä vaimennusvastuksen tai 0-pistekytkeytimen avulla. Molemmat menetelmät on mahdollista toteuttaa jälkikäteen ja tarjoavat mahdollisuuden ylijännitteen ehkäisyyn.

## STUDY OF L-LINE INDUCTION FURNACE HARMONICS

Koivisto, Teemu

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

February 2014

Supervisor: Lehtio, Ari

Number of pages: 43

Appendices: 2

Keywords: Harmonic, Induction furnace, Inductor

---

The purpose of this thesis was to study overvoltages occurring at Luvata Pori Oy property. These overvoltages make the overvoltage protectors of the frequency converters at the smelting plant to operate. The cause of overvoltages at L-line induction furnace was thought to be harmonics. In this thesis network power quality and phenomena were studied to solve the problem.

Two measurements were carried out at distributing network by using a network analyzer. The results revealed power changes, voltage and current waveforms as well as changes taking place in the network during switching.

Based on the measurements, it was possible to conclude that harmonics did not cause significant distortion in voltage and therefore did not cause overvoltages. On the basis of the results, the problem causing the frequency converter overvoltage protectors to operate was compensation capacitors switching to network and overvoltages caused by this.

To eliminate this problem from network, the use of concentrated resistive suppressor or 0-position switch were suggested for the commissioner of the thesis. Both of these methods can be implemented retrospectively and offer a possibility to prevent overvoltages.

# SISÄLLYS

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1      | JOHDANTO.....  | 6  |
| 2      | SÄHKÖN LAATU .....   | 7  |
| 2.1    | Laatuun vaikuttavat tekijät .....                                      | 7  |
| 2.1.1  | Verkkotaajuus.....   | 7  |
| 2.1.2  | Jakelujännitteen suuruus.....  | 7  |
| 2.1.3  | Jännitetaso vaihtelut .....  | 8  |
| 2.1.4  | Nopeat jännitemuutokset.....   | 8  |
| 2.1.5  | Jännitekuopat.....   | 8  |
| 2.1.6  | Lyhyt keskeytykset.....  | 9  |
| 2.1.7  | Pitkät keskeytykset .....  | 9  |
| 2.1.8  | Johtimen ja maan väliset tilapäiset käyttötaajuiset ylijännitteet..... | 9  |
| 2.1.9  | Johtimen ja maan väliset transienttiylijännitteet .....                | 10 |
| 2.1.10 | Jakelujännitteen epäsymmetria .....                                    | 10 |
| 2.1.11 | Harmoninen yliaaltojännite.....  | 10 |
| 2.1.12 | Epäharmoninen yliaaltojännite.....                                     | 10 |
| 2.1.13 | Verkon signaalijännitteet liittämiskohdassa.....                       | 10 |
| 3      | YLIAALLOT .....  | 11 |
| 3.1    | Perusteet .....  | 11 |
| 3.2    | Aiheuttajat .....  | 12 |
| 3.3    | Haitat .....   | 13 |
| 3.4    | Fourier analyysi.....  | 14 |
| 3.5    | Standardi.....   | 14 |
| 3.5.1  | Yliaaltojännitteet .....   | 14 |
| 3.5.2  | Yliaaltovirrat.....  | 16 |
| 4      | YLIAALTOJEN SUODATUS.....  | 18 |
| 4.1    | Merkitys .....   | 18 |
| 4.2    | Toteutus.....  | 19 |
| 4.2.1  | Rakenteelliset muutokset.....  | 19 |
| 4.2.2  | Yliaaltosuodattimet.....   | 21 |
| 4.3    | Mitoitus ja valinta.....   | 24 |
| 5      | INDUKTIOUUNI .....   | 25 |
| 5.1    | Kouru-uuni .....   | 25 |
| 5.2    | Muuntajat .....  | 26 |
| 5.3    | Kompensointi .....   | 27 |
| 6      | SÄHKÖN LAADUN MITTAUS.....   | 27 |
| 6.1    | Lähtökohta.....  | 27 |

|   |    |
|---|----|
| 6.2 Mittaustapa .....                     | 27 |
| 6.3 Mittaukset.....                       | 28 |
| 7 TULOSTEN ANALYSOINTI .....              | 29 |
| 7.1 EN 50160.....                         | 29 |
| 7.2 Tehot.....                            | 30 |
| 7.3 Jännitteen ja virran aaltomuoto ..... | 31 |
| 7.4 Yliaallot.....                        | 33 |
| 7.5 Transienttiylijännitteet .....        | 36 |
| 8 JOHTOPÄÄTÖKSET .....                    | 39 |
| 9 YHTEENVETO .....                        | 40 |
| LÄHTEET.....                              | 43 |
| LIITTEET                                  |    |

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Luvata Pori Oy tehtaalla sijaitsevan induktiouunin aiheuttamia harmonisia yliaaltoja ja niiden vaikutusta pääkeskuksen muuhun laitteistoon. Pääkeskuksen taajuusmuuttajissa on ilmennyt ylijännitteistä johtuvia suojalaitteiden toimintaa. Ylijännitteiden aiheuttajiksi epäillään uunin induktorien aiheuttamia harmonisia yliaaltoja.

Opinnäytetyössä perehdytään harmonisten yliaaltojen syntymiseen ja niiden vaikutukseen paikallisessa pienjänniteverkossa. Aihe käsittelee myös erilaisia harmonisten yliaaltojen suodatus ja vaimennusmenetelmiä, sekä tarkoitukseen luotua laitteistoa. Työssä tarkastellaan lisäksi standardin esittämiä sähkönlaadun arvoja ja niiden mittauksetapoja.

Paikallisessa verkossa ilmenneiden ongelmien selvittämiseksi pääkeskuksella suoritetaan sähkön laatumittauksia. Sähkön laatumittausten tuloksia analysoimalla saadaan selville induktiouunin aiheuttamien harmonisten yliaaltojen luomat ongelmat. Näiden tulosten pohjalta voidaan päätellä jatkotoimenpiteen verkossa ilmenevien harmonisten yliaaltojen redusoinniseksi. Tuloksia verrataan myös standardiin jotta saadaan selville paikallisen pienjänniteverkon sähkön laatu.

## 2 SÄHKÖN LAATU

### 2.1 Laatuun vaikuttavat tekijät

#### 2.1.1 Verkkotaajuus

Jakelu jännitteen nimellistaajuuden on oltava 50 Hz. Alla on mainittu vaatimuksen normaaleissa käyttöolosuhteissa perustaajuudelle 10 sekunnin aikavälillä (taulukko 1). (SFS-EN 50160, 14)

TAULUKKO 1. Sallittu taajuuden vaihtelu yhteiskäyttöverkoissa ja erillisverkoissa. (SFS-EN 50160, 14)

|   |                         |                 |
|---|-------------------------|-----------------|
| Yhteiskäyttöverkoissa:  |                         |                 |
| 50 Hz ± 1 %   | (eli 49,5 Hz...50,5 Hz) | 99,5 % vuodesta |
| 50 Hz + 4 % / - 6 %   | (eli 47 Hz...52 Hz)     | 100 % vuodesta  |
| Erillisverkoissa (esim. jakelujärjestelmät tietyillä saarilla): |                         |                 |
| 50 Hz ± 2 %   | (eli 49 Hz...51 Hz)     | 95 % vuodesta   |
| 50 Hz ± 15 %  | (eli 42,5 Hz...57,5 Hz) | 100 % vuodesta  |

#### 2.1.2 Jakelujännitteen suuruus

Standardissa on määritelty nimellisjännitteen  $U_n$  arvot. Julkisessa pienjännite verkossa nimellisjännite vaiheen ja nollan välillä, tai vaiheiden välillä on 230 V (taulukko 2). (SFS-EN 50160, 16)

TAULUKKO 2. Standardin määrittelemä nimellisjännitteen  $U_n$  (SFS-EN 50160, 16)

|   |
|---|
| Nelijohtimiselle kolmivaihejärjestelmälle:  |
| $U_n = 230$ V vaiheen ja nollan välillä     |
| Kolmijohtimiselle kolmivaihejärjestelmälle: |
| $U_n = 400$ V vaiheiden välillä             |

### 2.1.3 Jännitetason vaihtelut

Standardissa jännitevaihtelulle on annettu  $\pm 10$  % vaihtelualue, mutta tilanteet jotka eivät ole osapuolten kohtuullisessa hallinnassa ovat poissuljettu. Nämä tilanteet johtuvat yleensä vikatapauksista ja jännitekatkoksista. Syrjäseuduilla sallitaan  $+10$  % /  $-15$  % vaihtelu. (SFS-EN 50160, 16)

### 2.1.4 Nopeat jännitemuutokset

Nopeat jännitemuutokset tapahtuvat yleensä asiakkaan kytkentätilanteista ja kuormituksen vaihteluista. Muutokset eivät yleensä ylitä 5 % arvoa, mutta muutamia kertoja päivässä voi tapahtua jopa 10 % muutos. Nopeiden jännitemuutosten aiheuttamalle välkyännälle on asetettu häiritsevyyssindeksi. 95 % ajasta pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin tulisi olla  $P_t \leq 1$ . (SFS-EN 50160, 16)

### 2.1.5 Jännitekuopat

Jännitekuopat ovat yleensä seuraus yleisen jakeluverkon vioista tai verkonkäyttäjän asennuksista. Jännitekuoppien esiintyminen on odottamatonta ja satunnaista. Vuositainen esiintymistiheys on hyvin riippuvainen jakelujärjestelmän tyypistä, sekä havainnointipaikasta. (SFS-EN 50160, 18)

Normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitekuoppien odotetaan esiintyvän kymmenestä jopa tuhanteen. Suurin osa on kestoaltaan alle yhden sekunnin ja jännite pysyy yli 40 %. Suurempia ja kestoaltaan pidempiä jännitekuoppia saattaa satunnaisesti esiintyä. Asiakkaan asennuksista tapahtuvien kytkentöjen johdosta jännitekuoppia voi esiintyä hyvinkin usein. Tällöin jännite usein pysyy 85...95 % arvossa nimellisjännitteestä  $U_n$ . (SFS-EN 50160, 18)



### 2.1.6 Lyhyt keskeytykset

Verkossa ilmenevien lyhyiden keskeytysten pituus on 70 %:ssa tapauksista alle yhden sekunnin ja esiintymismäärä vaihtelee kymmenestä useisiin satoihin. (SFS-EN 50160, 18)

### 2.1.7 Pitkät keskeytykset

Pitkät keskeytyksen käsitetään häiriökeskeytyksiksi. Aiheuttajan on usein ulkoinen tapahtuma, johon ei voi vaikuttaa. Häiriökeskeytyksille ei ole mahdollista antaa tyyppillistä arvoa, sillä järjestelmärakenteet eroavat toisistaan merkittävästi ja on mahdotonta ennustaa vuotuisia sääoloja, sekä kolmannen osapuolen vaikutuksia. Tästä syystä normaaleissa olosuhteissa pitkien keskeytysten määrä voi olla 10...50. (SFS-EN 50160, 18)

### 2.1.8 Johtimen ja maan väliset tilapäiset käyttötaajuiset ylijännitteet

Tilapäinen käyttötaajuuksinen ylijännite aiheutuu yleensä yleisen jakeluverkon tai asiakkaan asennuksissa olevan vian seurauksena. Ylijännite saattaa nousta jopa vaiheiden välisen jännitteen suuruiseksi, koska kolmivaihejärjestelmän nolllapiste siirtyy. Kuormituksen epäsymmetrisyys ja viallisen johtimen ja maan välinen jännönsimpedanssi vaikuttavat hetkelliseen arvoon. Tietyissä tilanteissa muuntajan korkeajännitepuolella sattunut vika saattaa aiheuttaa korkeintaan 1,5 kV ylijännitteen pienjännitepuolelle. (SFS-EN 50160, 18)

Ylijännitteen kestoa pystytään rajoittamaan keskijännitesuojauksen ja vian selvittämiseen käytetyn katkaisijan toiminta-ajalla. Kesto on yleensä rajoitettu viiteen sekuntiin. (SFS-EN 50160, 18)

### 2.1.9 Johtimen ja maan väliset transienttilylijännitteet

Transienttilylijännitteet jäävät tavallisesti alle 6 kV. Aiheuttajana voivat olla esimerkiksi ukkonen ja kytkentään indusoituneet ylijännitteet. (SFS-EN 50160, 18)

### 2.1.10 Jakelujännitteen epäsymmetria

Normaaleissa käyttöolosuhteissa jakelujännitteen vastakomponentin tehollisarvon 10 minuutin keskiarvon tulee olla 0...2 % myötäkomponentista. Joillakin alueilla voidaan kytkentöjen perusteella sallia 3 % epäsymmetria. Epäsymmetrian tulee olla alle 2-3 % jokaisena viikkona 95 % ajasta. (SFS-EN 50160, 20)

### 2.1.11 Harmoninen yliaaltojännite

Normaaleissa käyttöolosuhteissa, jokaisen viikon aikana, 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisen tehollisarvon tulee olla pienempi tai yhtä suuri sille määritelty arvo. Resonanssin voivat aiheuttaa suurempia arvoja yksittäiselle harmoniselle yliaallolle. (SFS-EN 50160, 20)

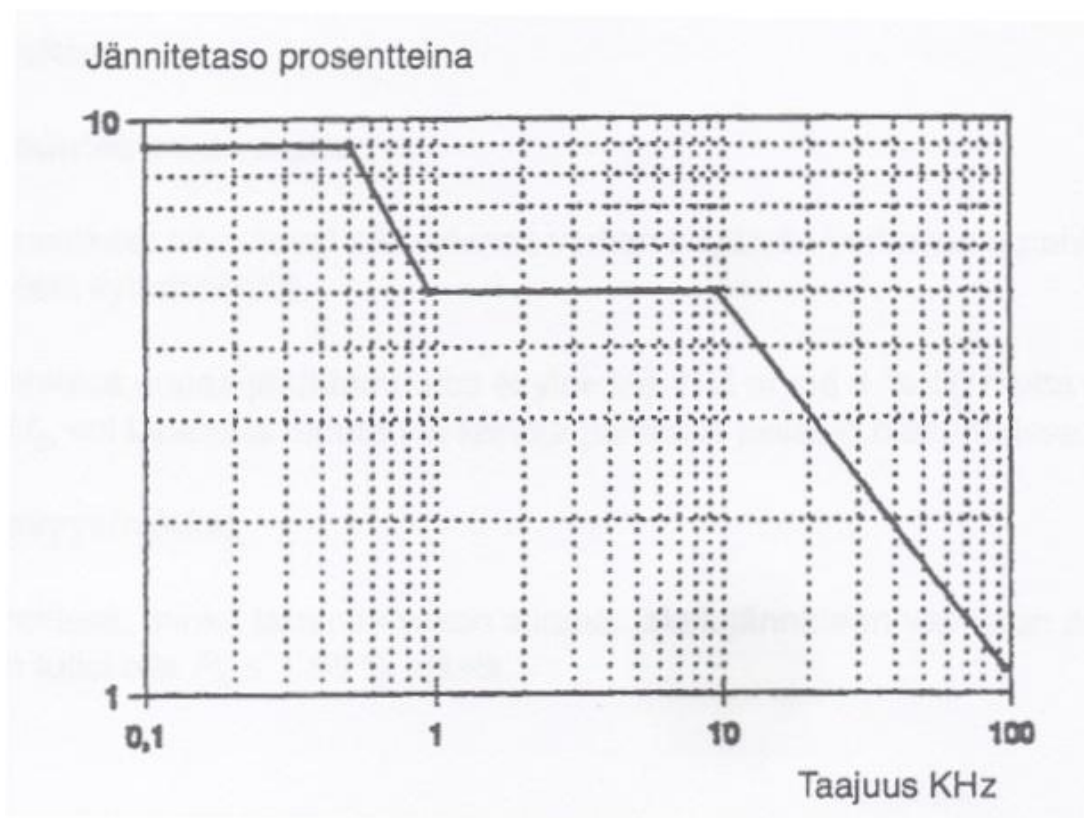
Jakelujännitteen kokonaissärön tulee olla jokaisena viikon aikana pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. (SFS-EN 50160, 20)

### 2.1.12 Epäharmoninen yliaaltojännite

Epäharmonisten yliaaltojen taso on kasvamassa elektroniikan lisääntymisen vuoksi. Tasoja harkitaan lisäkokemusta myötä. (SFS-EN 50160, 20)

### 2.1.13 Verkon signaalijännitteet liittämiskohdassa

Maissa jossa sähkötoimittaja välittää sähköverkon avulla viestejä, tulee signaalijännitteen kolmen sekunnin keskiarvon olla 99 % päivästä mukainen (kuva 1). (SFS-EN 50160, 22)



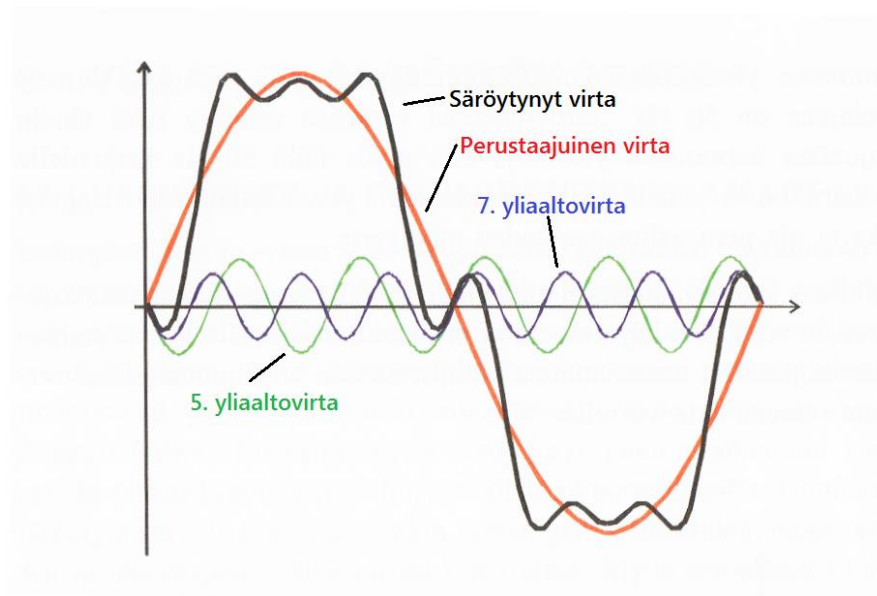
KUVA 1. Sallitun signaalijännitteen taso taajuuden funktiona. (SFS-EN 50160, 22)

### 3 YLIAALLOT

#### 3.1 Perusteet

Yliaallot ovat seurausta verkon vaihtojännitteen ja -virran säröytymisestä. Säröytymisellä tarkoitetaan käyrämuodon poikkeamista sinimuodosta. Kuormitusvirran epäsinimuodon aiheuttaa epälineaarinen kuorma. Esimerkiksi kolmivaiheinen tasasuuntaussilta, jonka virran käyrämuoto on kantikas. Virran epäsinimuotoisuus saa aikaan jännitteet säröytymisen ja yliaaltokomponenttien muodostumisen verkkoon (kuva 2). Jännite säröytyy, koska perustaajuisesta sinikäyrästä poikkeavat virrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä. Verkon impedanssien pienuudesta johtuen virran särö on usein jännitteen säröä suurempi. Vaikka jännitteen ja virran käyrämuo-

to säröytyy, voidaan niitä silti käsitellä jaksollisesti vaihtelevina suureina. Käyrämuoto voidaan matemaattisesti esittää syntyneen useammasta eritaajuisesta sini-  
käyrästä. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, R., Seesvuori, V. & Wilén 2006, 26–28)



KUVA 2. 3. ja 5. yliaallon summautuminen perustaajuiseen virtaan. (Männistö ym. 2006, 28)

Suomessa yleisen sähkönjakeluverkon nimellistaajuus on 50 Hz, joka on myös perusaallon taajuus. Verkossa ilmenee kahden tyyppisiä yliaaltoja, harmonisia ja epäharmonisia. Harmoniset yliaallot ovat perusaallon taajuuden moninkertoja. Epäharmoniset aallot eivät ole perusaallon taajuuden moninkertoja. (Männistö ym. 2006, 27)

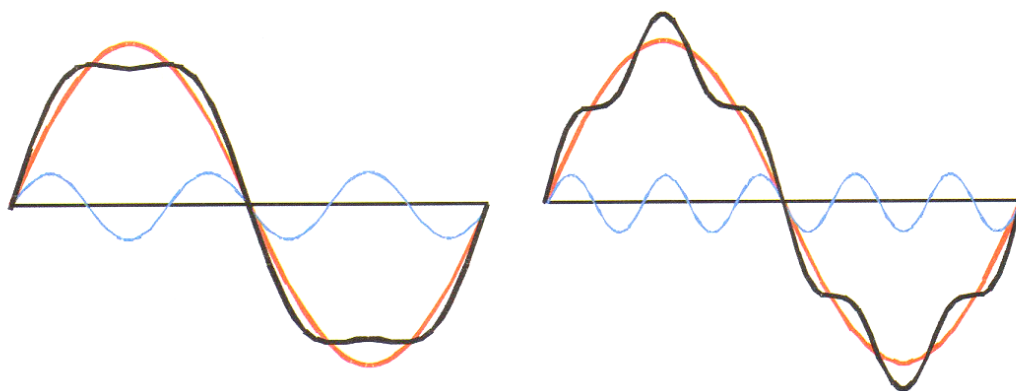
### 3.2 Aiheuttajat

Yliaaltojen aiheuttajiin kuuluvat tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, hakkuriteholähteet, ns. energiansäästöloistelamput, puolijohdekytkimet, tyristorisäätimet, kodin ja toimistotilojen elektroniikka, purkauslamput, hitsauslaitteet, valokaariuunit sekä viikaantuneiden moottorien ja muuntajien magneetti piirit. Myös sähkön laatua parantamaan tarkoitettuista UPS-laitteista, osa tuottaa paljon yliaaltoja. (Männistö ym. 2006, 30)

Myös sähköverkon kompensoinnissa käytettävät kondensaattoriparistot saattavat aiheuttaa yliaaltoja. Syöttävän verkon ominaisuuksista ja verkon yliaaltoja aiheuttavista kuormituksista riippuen kondensaattoriparistot saattavat yhdessä verkon induktanssien kanssa muodostaa resonanssipiirejä jotka vahvistavat yliaaltoja merkittävästi. (Männistö ym. 2006, 30)

### 3.3 Haitat

Yliaallot kasvattavat häviöitä sähköverkon ja sähkönkäyttäjien laitteistoissa. Muun muassa muuntajien kuormitettavuus alenee yliaaltojen vaikutuksesta. Yliaallot vaikuttavat myös mittaustuloksiin, sekä suojalaitteiden toimintaa. Erityisesti 3. sekä 5. yliaalto vaikuttavat mittaustuloksiin (kuva 3). Edellä mainitut ongelmat korostuvat erityisesti resonanssitilanteissa, jolloin jännite säröytyy huomattavasti. Yliaallot aiheuttavat myös magneettikentän kautta häiriöitä AV-laitteissa. Erityisesti 3. yliaalto on merkittävä, sillä se summautuu vaihejohtimista nollajohtimeen ja leviää verkon kautta mahdollisesti myös johtaviin runkorakenteisiin. Pienitaajuuksiset yliaallot aiheuttavat pääasiassa sähköverkon komponenttien rikkoutumista, sekä laitteiston ylikuumenemistä. Suuremmat yliaaltotaajuudet aiheuttavat usein ääni- ja radiotaajuisia häiriöjännitteitä. (Männistö ym. 2006, 30–36)



KUVA 3. Vasemmalla 3. yliaallot summautuminen ja alentava vaikutus. Oikealla 5. yliaallon korottava vaikutus. (Männistö ym. 2006, 31)

### 3.4 Fourier analyysi

Sähköverkkoa suunniteltaessa on oleellista laskea olemassa olevan tai tulevan verkon yliaaltorasitus. Fourier-analyysin avulla on mahdollista määrittää matemaattisesti verkon yliaaltorasitus. Analyysin avulla voidaan etsiä sinimuotoisten signaalien sarjakehitelmää, joka tuottaa signaalin mukaisen virran. Fourier-analyysin tarve verkon sähkönlaadun tarkkailussa on erittäin vähäistä, sillä nykyaikaiset mittarit osaavat laskea automaattisesti yliaaltorasituksen. (Männistö ym. 2006, 39–40)

### 3.5 Standardi

SFS-EN 50160 standardi käsittelee sähkön laatua yleisessä jakeluverkossa. Standardia sovelletaan yleisen jakeluverkon ja liittyjän verkon rajapisteessä, joka on sopimuksissa määritelty. Jakeluverkon haltija on vastuussa sähkön laadusta rajapisteseen saakka, ja SFS-EN 50160 standardi antaa tarkat vaatimukset sähkön laadulla tässä pisteessä. Liittyjän verkon sähkön laatuun standardi ei ota kantaa, mutta käyttäjä voi käyttää standardia ja muita julkaisuja oman verkon laadun arviointiin. Standardi SFS-EN 50160 määrittelee yliaaltojännitteiden suurimman sallitun tason ja jakelujännitteen ominaisuuksia keski- ja pienjänniteverkossa. Standardi ei ota kantaa yliaaltovirtoihin. (Männistö ym. 2006, 21, 42)

#### 3.5.1 Yliaaltojännitteet

Standardissa käsitellään erikseen harmonisia ja epäharmonisia yliaaltojännitteitä. Epäharmonisten yliaaltojännitteiden käsittely standardissa on suppeampi, koska epäharmonisten yliaaltojen vaikutus verkossa on vähäisempää. Harmonisille yliaaltojännitteille, joiden järjestysluku on 2 - 25, on laadittu taulukko, josta voidaan todeta suurin sallittu suhteellinen jännite (taulukko 3). Viikon pituisen mittausjakson aikana normaaleissa käyttöolosuhteissa, tulee jokaisen yksittäisen yliaaltojännitteen tehollisarvon 10 minuutinkeskiarvon olla 95 % ajasta alle tai tasan standardin SFS-EN 50160 asettama arvo. Kokonaissärökertoimen eli THD (kaava 1) tulee alittaa 8 % arvo, vaikka ongelmia saattaa ilmetä jo 3 % arvolla. THD arvo sisältää harmoniset

yliaaltojännitteet järjestyslukuun 40 saakka.  $THD_U$  kertoo yksittäisen yliaaltojännitteen suhteen perustaajuiseen jännitteeseen (kaava 2). (SFS-EN 50160, 12, 20)

TAULUKKO 3. SFS-EN 50160 standardin antamat harmonisten yliaaltojännitteiden arvot järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustaajuisesta jännitteestä. (SFS-EN 50160, 20)

| Parittomat yliaallot |                                |                    |                                | Parilliset yliaallot |                                |
|----------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Kolmella jaottomat   |                                | Kolmella jaolliset |                                |                      |                                |
| Järjestysluku h      | Suhteellinen Jännite ( $U_n$ ) | Järjestysluku h    | Suhteellinen Jännite ( $U_n$ ) | Järjestysluku h      | Suhteellinen Jännite ( $U_n$ ) |
| 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 %                          |                    |                                |                      |                                |

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2} \quad (1)$$

Jossa

$THD$  = kokonaissärökerroin

$U_h$  = yliaaltojännite

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (2)$$

Jossa  $THD_U$  = harmoninen jännitesärö  
 $U_1$  = perustaajuinen jännite

### 3.5.2 Yliaaltovirrat

SFS-EN 50160 standardissa ei käsitellä yliaaltovirtoja, mutta on suositeltavaa että sähkökäyttäjät ja jakeluverkonhaltijat tarkastelevat myös yliaaltojännitteiden lisäksi yliaaltovirtoja. Mikäli saman liittymän kautta saa sähkönsä useampi sähkökäyttäjä, saattaa olla tarve tarkastella omassa sähköverkossa muodostuvia yliaaltovirtoja energianmittauspisteessä. Yliaaltovirtojen tarkasteleminen on suositeltavaa, sillä yliaaltovirrat vaikuttavat suoraan jännitteen säröytymiseen samassa verkon osassa. Lisäksi hyväksyttävissä rajoissa pysyvät yliaaltovirrat saattavat summautua muiden käyttäjien yliaaltovirtojen kanssa muissa verkon kohdissa ja aiheuttaa jännitteen säröytymistä. IEEE 519 standardi antaa suositukset yliaaltovirroille verkkoihin joiden oikosulkuvirran ja kuormitusvirtojen suhde on 20 - 50 kertainen (taulukko 4 ja taulukko 5). Jos näitä suosituksia ei pystytä täyttämään, on suositeltavaa sopia jakeluverkon haltijan kanssa siirtokapasiteetin kasvattamisesta tai suosituksista poikkeamisesta, jos jakeluverkon kapasiteetti sen sallii. Yliaaltovirtojen tarkastelussa käytetään kokonaisvärökerrointa (THD) ja yliaaltovirtojen vertaamista referenssivirtaan (kaava 3 ja kaava 4) (Männistö ym. 2006, 42–46).

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

Jossa  $I_{ref}$  = referenssivirta  
 $P$  = liittymissopimuksen pätöteho  
 $U_N$  = verkon nimellisjännite



$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (4)$$

Jossa

$THD_I$  = harmoninen virtasärö

$I_h$  = yliaaltovirta

$I_1$  = perustaajuinen virta

TAULUKKO 4. Pienjänniteverkkoon liittyneen sähkönkäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittämiskohdasta tarkasteltuna (Männistö ym. 2006, 44).

| Referenssivirta  | Suositeltava raja   |                                  |
|------------------|---|----------------------------------|
| $\leq 25$ 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  | 7,0 %                            |
|                  | 11 - 16   | 3,5 %                            |
|                  | 17 - 22   | 2,5 %                            |
|                  | 23 - 34   | 1,0 %                            |
| > 34             | 0,5 %   |                                  |

TAULUKKO 5. Keski­jänniteverkkoon liittyneen sähkö­käyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittämiskohdasta tarkasteltuna (Männistö ym. 2006, 45).

| Referenssivirta | Suositeltava raja  |                                  |
|-----------------|--|----------------------------------|
| Kaikki          | Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta. Lisäksi eri yliaaltojen osalta: |                                  |
|                 | Järjestysluku n  | Sallittu arvo referenssivirrasta |
|                 | < 11   | 7,0 %                            |
|                 | 11 - 16  | 3,5 %                            |
|                 | 17 - 22  | 2,5 %                            |
|                 | 23 - 34  | 1,0 %                            |
| > 34            | 0,5 %  |                                  |

## 4 YLIAALTOJEN SUODATUS

### 4.1 Merkitys

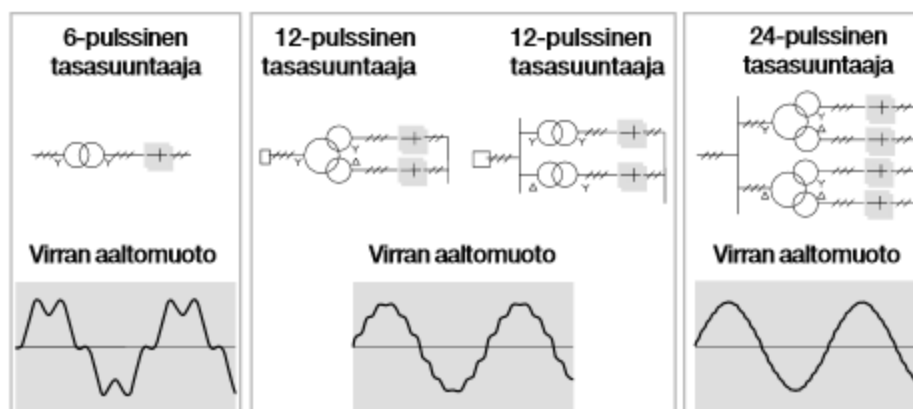
Yliaaltojen suodattaminen voi tuoda merkittäviä hyötyjä. Muuntajissa yliaaltovirrat aiheuttavat kuparihäviöitä ja hajakenttien aiheuttamia häviöitä. Yliaaltojännitteet lisäävät muuntajissa rautahäviöitä. Yhdessä nämä aiheuttavat muuntajan lämpenemistä, sekä häviöiden kasvua. Johtimissa yliaaltovirrat saavat aikaan ylimääräistä lämpenemistä, kun yliaaltovirta ahtautuu johtimen ulkokehälle. Moottoreissa ja generaattoreissa yliaaltovirrat ja -jännitteet aiheuttavat lämpenemistä kupari- ja rautahäviöiden vaikutuksesta. Lisähäviöt alentavat moottorin hyötysuhdetta ja sen kautta saattavat vaikuttaa väntömomenttiin. Elektroniikassa yliaallot aiheuttavat herkästi virhe-toimintoja. Jännitteen säröytyminen vaikuttaa laitteiden synkronointiin ja aiheuttaa häiriöitä. Kytkinlaitteissa yliaallot aiheuttavat ennaikaista vanhenemista lisälämpenemisen kautta. Lämpeneminen vaikuttaa eristysmateriaalien kestoon ja saattavat aiheuttaa niiden pettämisen. Huippuarvoa mittaavat suojareleet saattavat toimia virheellisesti säröytyneillä virroilla ja aiheuttaa ei-toivottuja katkoksia prosessissa. Suodattamalla yliaaltoja voidaan päästä eroon edellä mainituista ongelmista ja näin pidentää laitteiston käyttöikää ja vähentää kuormitusta (Tuomainen 1997, 5–7).

## 4.2 Toteutus

### 4.2.1 Rakenteelliset muutokset

Tasavirta käytössä on mahdollista pienentää verkon yliaaltopitoisuutta käyttämällä kehittyneempiä tasasuuntaajia. Yleisin vaihtovirtakäyttöjen tasasuuntauspiiri on 6-pulssinen diodisilta. 6-pulssinen diodisilta aiheuttaa verkon virran säröytymistä, muodostaen suuren määrän pieniä yliaaltoja 5., 7. ja 11. Tästä syystä 6-pulssi-tasasuuntaajan käyttö edellyttää syöttömuuntajan ylivoimista ja jonkin verran yliaaltojen suodattamista. 6-pulssitasasuuntaajan muodostamia yliaaltoja on mahdollista pienentää muuttamalla tasasuuntauksen rakennetta 12 tai useampi pulssiseksi (ABB Tekninen opas nro 6, 2001, 18).


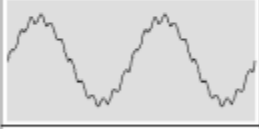
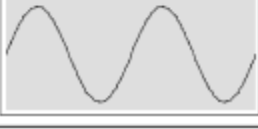
12-pulssitasasuuntaajassa käytetään kahta rinnankytkettyä 6-pulssi tasasuuntaajaa. Tasasuuntaajia syötetään yhdellä kolmikäämisellä muuntajalla tai kahdella kaksikäämisellä muuntajalla. Molemmissa tapauksissa muuntajan toisiossa on  $30^\circ$  vaihe-ero. 24-pulssisessa tasasuuntaajassa käytetään kahta rinnankytkettyä 12-pulssi tasasuuntaajaa, joita syöttää kaksi kolmikäämistä muuntajaa joiden toisiossa on  $30^\circ$  vaihe-ero. Sekä 12 että 24-pulssi tasasuuntaajassa, jotkin syötönpuolen yliaallot ovat vastakkaisuuntaisia ja näin ollen eliminoivat toisensa. Yliaaltojen eliminoituminen tasoittaa virran sini-muotoa (kuva 4) (ABB Tekninen opas nro 6 2001, 19).



KUVA 4. Tasasuuntaajien rakenteet (ABB Tekninen opas nro 6, 2001, 18).

Verkkokommutoidut tasasuuntaajat muodostetaan 6-pulssisillan tavoin, korvaamalla diodit tyristoreilla. Tyristoreilla on mahdollisuus säätää syttymiskulmaa liipaisupulssin avulla. Verkkokommutoitujen tasasuuntaajien virran käyrämuoto on samanlainen 6-pulssi dioditasasuuntaajan kanssa, mutta muuttuvan tehokertoimen takia näennäisvirrat ja yliaaltojen absoluuttiset arvot kasvavat. Myös syöttöjännitteessä saattaa ilmetä häiriöitä, syttymiskulmasta riippuen. Verkkokommutoitavan tasasuuntaajan aiheuttamia häiriöitä on mahdollista poistaa korvaamalla se itsekommutoivista komponenteista valmistetulla tasasuuntaussillalla. Verkkokommutoidun tasasuuntaajan tavoin sekä tasasuuntaus että takaisinsyöttö on mahdollista, mutta tässä laitteessa myös tasajännitetasoa ja tehokerrointa voidaan säätää erikseen tehon virtaussuunnasta riippumatta. Itsekommutoidulla tasasuuntaajalla on myös muita etuja verkkokommutoituun tasasuuntaajan nähden. Tärkeimpiä ovat mahdollisuus tuottaa loistehoa ja kompensoida rinnakkaisten kuormien yliaaltovirtoja, lähes sinimuotoinen syöttövirta pienellä yliaaltosisällöllä (kuva 5) ja jos syöttöjännite on pieni, tasajännitettä voidaan korottaa, jotta moottorijännite pysyy korkeampana kuin syöttöjännite (ABB Tekninen opas nro 6 2001, 19–20).

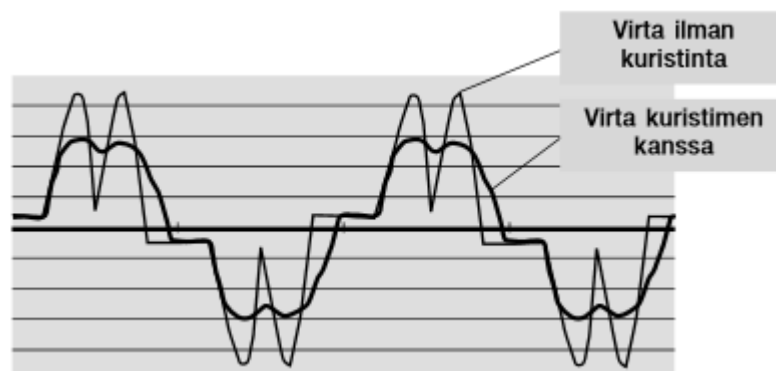
Tyristoreilla toteutetusta tasasuuntaajasta eroten, IGBT-transistoreista rakennettu tasasuuntaaja on itsekommutoiva. Tämä tarkoittaa että tasasuuntauksen ja takaisinsyötön lisäksi myös tasajännitetasoa ja tehokerrointa on mahdollista hallinta virran suunnasta riippumatta. IGBT-transistorien käyttö mahdollistaa johtavuuden hallinnan tyristoria paremmin, jolloin IGBT-sillalla on mahdollista tuottaa lähes sinimuotoista jännitettä (ABB Tekninen opas nro 6 2001, 20–21).

| Syöttö                     | Virta TDH (%) | Jännite TDH (%)<br>RSC=20 | Jännite TDH (%)<br>RSC=100 | Virran aaltomuoto  |
|----------------------------|---------------|---------------------------|----------------------------|--|
| 6-pulssinen tasasuuntaaja  | 30            | 10                        | 2                          |  |
| 12-pulssinen tasasuuntaaja | 10            | 6                         | 1,2                        |  |
| IGBT-syöttöyksikkö         | 4             | 8                         | 1,8                        |  |

Särö on %:eina RMS-arvoista

KUVA 5. Säröytyminen eri syöttötyypeillä (ABB Tekninen opas nro 6, 2001, 20).

Jänniteohjattujen vaihtovirtakäyttöjen yliaaltopitoisuutta on mahdollista pienentää kytkemällä kuristin vaihtovirtasyöttöön tai tasajännitevälipiiriin. Sopivan kokoisen kuristimen avulla voidaan vaikuttaa jännitteen THD arvoon ja yliaaltovirtoihin (kuva 6) (ABB Tekninen opas nro 6 2001, 21–23).



KUVA 6. Kuristimen vaikutus virtakäyrään (ABB Tekninen opas nro 6 2001, 21).

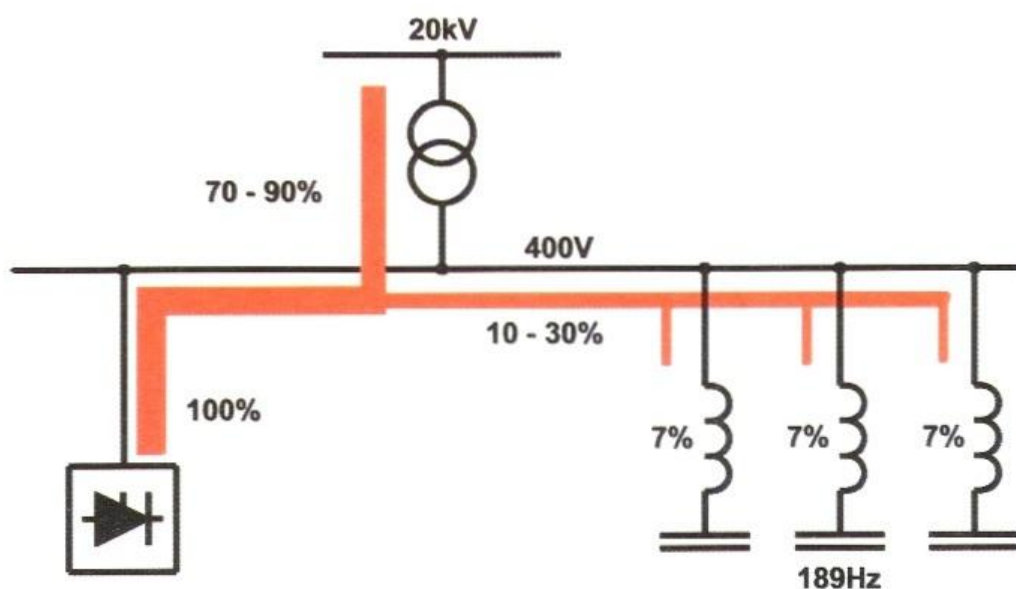
## 4.2.2 Yliaaltosuodattimet

### 4.2.2.1 Estokelaparisto

Estokelaparistolla pyritään välttämään haitallisen resonoinnin syntyminen kompensoinnin kapasitanssin ja verkon induktanssi välillä. Resonointi tilanteessa jotkin yli-

aaltovirrat saattavat vahvistua jopa 20-kertaiseksi. Resonanssin aiheuttama virtasärö aiheuttaa myös jännitteen säröytymistä. Tästä syystä yliaaltopitoisissa verkoissa käytetään estokelaparistoja yhdessä kondensaattorien kanssa. Estokelaparistossa jokainen porras muodostuu sarjakytketystä kondensaattorista ja kuristimesta (kuva 7). Näin muodostetaan sarjaresonanssiipiiri, jonka viritystaajuus pyritään pitämään pienempänä, kuin pienimmän verkossa esiintyvän harmonisen yliaallon taajuus. Viritystaajuuden alapuolella paristo on kapasitiivinen, eli tuottaa loistehoa. Viritystaajuuden yläpuolella paristo on induktiivinen, eikä vahvasta tyypillisiä yliaaltotaajuuksia. Estokelaparistoja käytetään sekä keskitetyssä että paikallisessa kompensoinnissa. Paikallisessa kompensoinnissa paristo kytketään usein kompensoitavan laitteen kanssa rinnan jolloin se voidaan kytkeä päälle samaa aikaa (Männistö ym. 2006, 52–53).

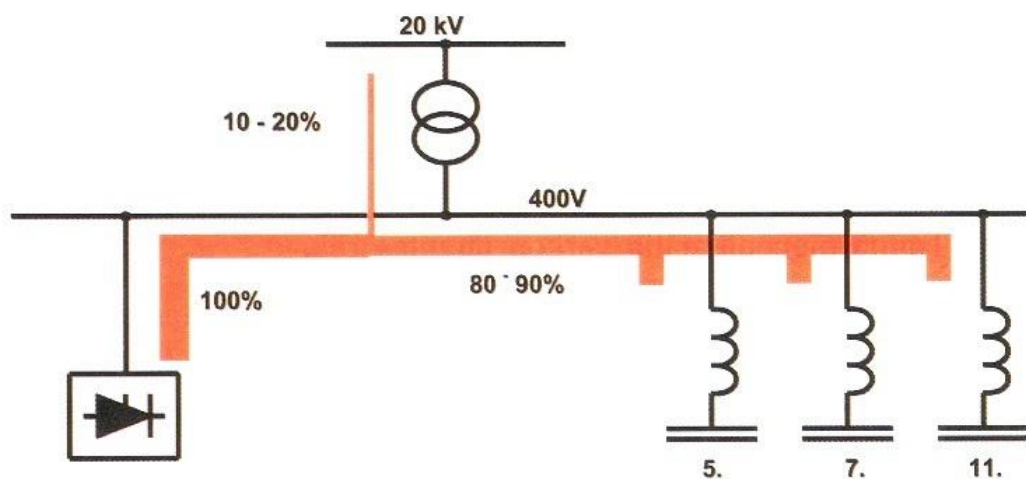
Estokelaparistolla on myös suodattava vaikutus johon viritystaajuus vahvasti vaikuttaa. Kun käytetään 189Hz viritystaajuutta, mikä on normaalia teollisuudessa, on yliaalto suodatus 10...30 % luokkaa 5. yliaallon kohdalla. Suodatusvaikutus riippuu kompensoinnin tehosta ja viritystaajuudesta. Suodatusvaikutus heikkenee, mitä enemmän viritystaajuus poikkeaa esiintyvistä yliaaltotaajuuksista. Estokelapariston käytössä tarvitsee ottaa huomioon, että ei vaimenneta verkonkäskyohjaussignaaleja. Estokelaparistoja suositellaan käytettäväksi kun verkon jännitteen kokonaissärö on yli 3 % (Männistö ym. 2006, 52–53).



KUVA 7. Estokelapariston kytkentä (Männistö ym. 2006, 54).

#### 4.2.2.2 Passiivisuodatin

Yliaaltosuodattimia käytetään samalla tavalla kuin estokelaparistojakin, verkoissa joissa on yliaalto sisältöä. Yliaaltosuodattimet suorittava kompensoinnin lisäksi myös yliaaltosuodatusta ja näin parantavat verkon sähkön laatua. Kuten estokelaparisto, myös yliaaltosuodatin koostuu kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkennästä (kuva 8). Kondensaattorit mitoitetaan niin että haluttu loistehon kompensointiaste saavutetaan. Kuristimien induktanssi valitaan niin, että yhdessä kondensaattorien kanssa saavutetaan yliaaltotaajuuksilla hyvin pieni impedanssinen sarjaresonanssiipiiri. Tällöin suuri osa yliaalloista kulkeutuu suodattimeen. Normaalisti yliaaltosuodattimet on viritetty kolmelle yleisimmälle yliaaltotaajuudelle, jotka ovat 5., 7. ja 11. harmoninen yliaalto. Yliaaltosuodattimia käytetään usein keskitetysti, jolloin pystytään suodattamaan taloudellisemmin keskusten ja laitteistojen yliaaltoja (Männistö ym. 2006, 55, 62).

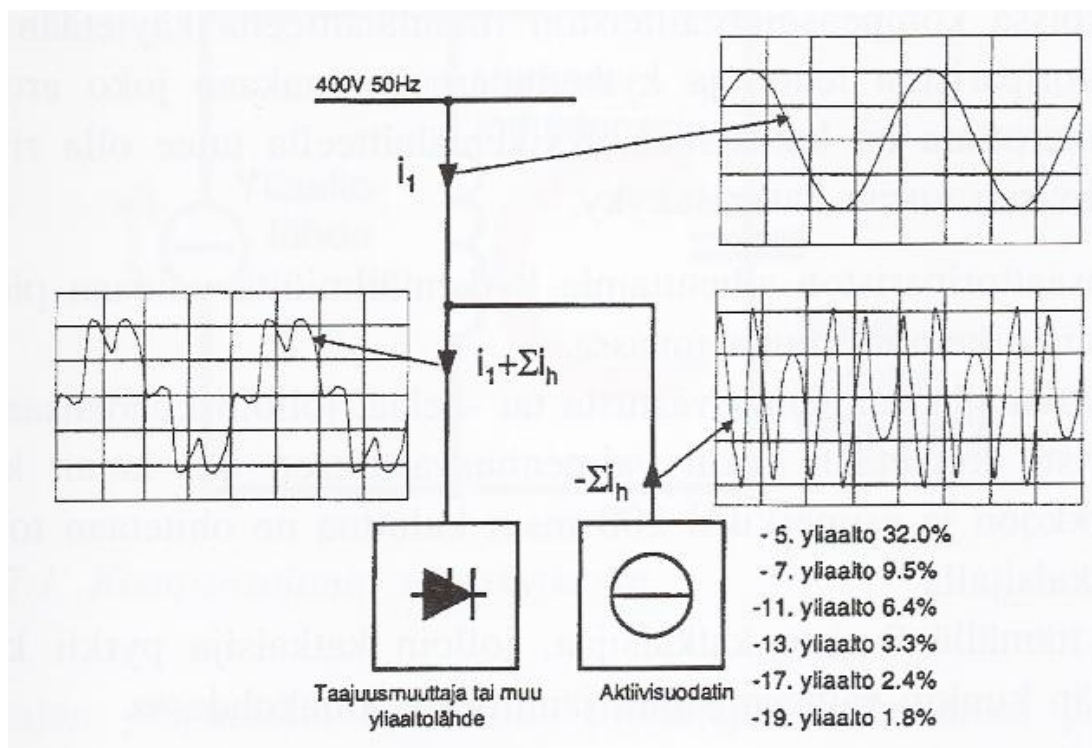


KUVA 8. Passiivisen yliaaltosuodattimen kytkentä (Männistö ym. 2006, 56).

#### 4.2.2.3 Aktiivisuodatin

Passiivisilla komponenteilla toteutettujen yliaaltosuodattimien rinnalle on kehitetty myös aktiiviset yliaaltosuodattimet. Puolijohdetekniikalla toteutetut aktiivisuodattimet pystyvät reagoimaan verkon yliaaltopitoisuuden muutoksiin ja luomaan  $180^\circ$

vaihesiirrossa olevia virtoja jotka kumoavat yliaaltoja (kuva 9). Puolijohdetekniikka mahdollistaa yliaaltosuodatuksen ilman loistehon kompensointia, sekä useampien yliaaltotaajuuksien suodatuksen. Aktiivisuodatin voidaan asentaa mihin tahansa verkon pisteeseen, jolloin voidaan parantaa kustannustehokkuutta ja vaikutusta kriittisissä kohdissa. Verkon ominaisuudet, kuten kapasitiivisuus, induktiivisuus, epäsymmetria tai jännitevaihtelut, eivät vaikuta suodattimen toimintaa (Männistö ym. 2006, 62).



KUVA 9. Aktiivisen yliaaltosuodattimen toimintaperiaate. Aktiivisuodatin luo  $180^\circ$  vaihesiirrossa olevia virtoja jotka kumoavat yliaaltovirrat (Männistö ym. 2006, 63).

### 4.3 Mitoitus ja valinta

Yliaaltopitoisen verkon suodatustavan valinnassa vaikuttaa moni muuttuja. Tasasuuntaajia sisältävissä järjestelmissä on kannattavaa korvata 6-pulssi tasasuuntaajat yliaaltoja vähentävillä 12- ja 24-pulssi tasasuuntaajilla, jotka sisältävät kuristimia. Näin saadaan vähennettyä tasasuuntaajien aiheuttamaa yliaaltokuormaa verkossa. Jos järjestelmä ei sisällä huomattavaa määrää tasasuuntaajia, vaan yliaaltolähteinä toimivat muut järjestelmän komponentit, on kannattavaa siirtyä estokelaparistoihin ja yliaaltosuodattimiin. Estokelaparistojen ja yliaaltosuodattimien valinnan rajana voidaan



pitää yli 3 % kokonaisjännitesäröä. Tämän rajan jälkeen on kannattavaa laskennallisesti tarkastella mahdollista tarvetta muuntaa kompensointiparistot estokela- tai suodatinparistoiksi. Valinnat ovat järjestelmä kohtaisia ja niihin vaikuttaa mm. yliaaltovirrat, suodatusvaatimukset ja verkon oikosulkuteho. On suositeltavaa suorittaa yliaaltoanalyysi ennen suodatustavan valintaa. Analyysi antaa kokonaiskuvan säröistä verkon eri osissa (Männistö ym. 2006, 97–98).

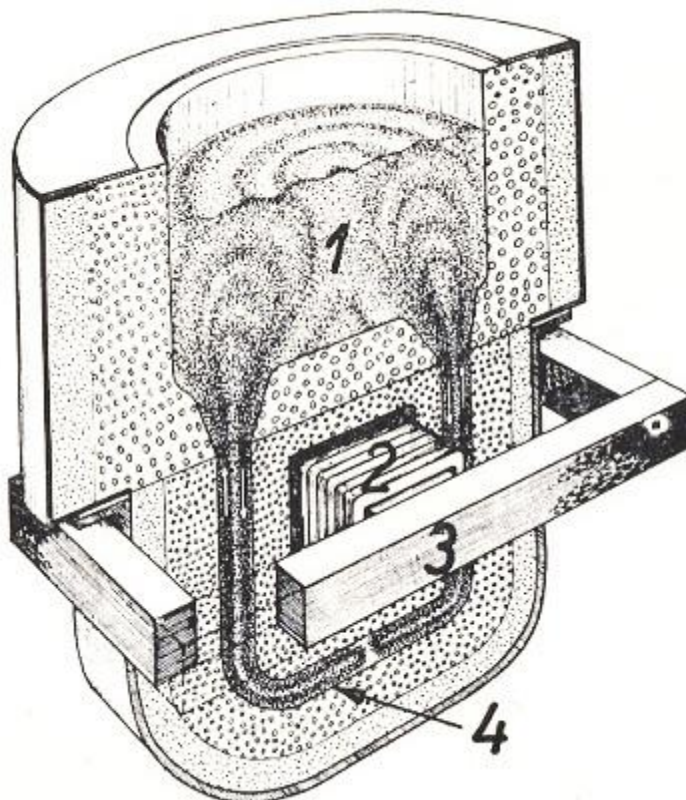
## 5 INDUKTIOUUNI

Luvata Pori Oy:ssä käytetään induktiosulatusta, jonka avulla tuotannossa käytettävä kupari saadaan sulatettua ja alustettua lopputuotteen valmistukseen. Perinteisistä tavoista poiketen induktiosulatuksessa on mahdollista lämmittää kohdetta ilman kosketusta. Energia syötetään magneetikentän välityksellä kohteeseen jolloin lämpöä kuljettavaa väliainetta, sekä kohdetta kuumempaa lämmönlähdettä ei tarvita. Uunin toiminta perustuu vaihtovirtakäyttöisen induktorin magneetikenttään tuottamiin pyörrevirtoihin, jotka metallipanokseen vaikuttaessa aiheuttavat sen kuumenemisen ja sulamisen (Wikman, Sippola, Järvinen, Murtopuro, Sirviö, Sonninen, Kautto, Lindén, Nilsson-Ollandt & Peräniitty 1995, 59–60).

### 5.1 Kouru-uuni

Tutkitun L-linjan uuni on tyypiltään kouru-uuni, jossa sula kupari virtaa kourun kautta induktorin läpi altistuen lämmittävälle magneetikentälle (kuva 10). Uunissa käytetään kuparin sulattamiseen kahta 400 kW induktoria jotka on sijoitettu uunin alapuolelle. Kouru-uunin toimintaa vastaa pitkälti muuntajaa jonka toisiopiirinä on sula kupari. Induktori koostuu rautasydämeestä, jonka ympärille on käämitty induktiokela. Induktiokelan lämmittää kuparin, yli sen 1084 °C sulamispisteen, magneetikentän avulla. Prosessissa syntyvää lämmön vaikutusta laitteistoon pyritään rajoittamaan käämityksessä kiertovesijäähdytyksellä ja rautasydämessä ilman avulla. Jäähdytys estää käämityksen vaurioitumisen lämmön vaikutuksesta ja mahdollistaa pidemmän käyttöiän. Kouru-uuni vaatii jatkuvaa käyttöä, jotta kupari sula ei pääse jäähtymään

ja kutistuessaan vaurioittamaan käämitystä (Autere, Ingman & Tennilä 1969, 204–205).



KUVA 10. Kouru-uunin rakenne. 1. Uunipesä, 2. Ensiökäämi, 3. Magneettisydän, 4. Toisiopiirin muodostava sulametallikouru (Autere ym. 1969, 204).

## 5.2 Muuntajat

Molemmille induktoreille on oma 500 kVA 2-vaiheinen säästömuuntaja (Liite 1). Osassa kiinteistön induktiokouru-uuneista on uusittu 3-vaiheinen muuntaja, mutta ainakin toistaiseksi L-linjan induktoreita syöttää kaksivaiheiset muuntajat joista toinen on kytketty välille L1-L2 ja toinen L1-L3.

Säästömuuntajissa ensiö- ja toisiokäämiä ei ole erotettu galvaanisesti, vaan muuntaja koostuu vain yhdestä käämistä jossa toinen johdin on yhteinen ensiö- ja toisiopuolella. Tämä mahdollistaa helpon tehonsäädön induktorin käyttöä ajatellen. Säästömuuntajan on korkea- ja matalajännite puoli joka on mahdollista valita kontaktorikytkem-

nän avulla. Matalajännite puolella on kolme tehopykälää joka on käsin valittavissa laitteiston ollessa pois käytöstä. Korkeajännitepuolella on yhdeksän tehopykälää joiden valinta tapahtuu sähkömoottorin avulla ja onnistuu myös sulatuksen aikana. (Mehta, V.K & Mehta, R 2006, 163-166)

### 5.3 Kompensointi

Järjestelmän molemmat induktorit on varustettu omalla 1200 kVar kompensointipiirillä. Tämä mahdollistaa induktoria edeltävien komponenttien mitoittamisen pienemmälle virralle ja paremman kustannustehokkuuden. Kondensaattoriparisto kytkeytyy induktorin kanssa samanaikaisesti verkkoon. Koska induktorin ja kondensaattoripariston reaktanssit pysyvät muuttumattomina, määräytyy induktorin ottama ja kondensaattoripariston tuottama loisteho jänniteportaan mukaan. Kondensaattoriparisto sijaitsee L-linjan sähkökeskuksen ulkopuolella ja kompensoinnin määrää on mahdollisuus vaihtaa muuttamalla kytkentöjä paristossa.

## 6 SÄHKÖN LAADUN MITTAUS

### 6.1 Lähtökohta

Työn tavoitteena on selvittää ovatko yliaaltojen aiheuttamat transientit aiheuttaneet keskuksen taajuusmuuttajakäytöissä ylijännitesuojien laukeamisia. Mittauksilla halutaan selvittää yliaaltojen vaikutus ja myös mahdolliset muut syyt keskuksen ylijännitteisiin. Samalla mittauksella saadaan myös tietoa sähköverkon sähkönlaadusta.

### 6.2 Mittaustapa

Keskustelussa mittareista esille nousi kaksi vartenotettavaa vaihtoehtoa. Ensimmäinen vaihtoehto oli tehdä mittaukset kahdella Fluken oskilloskoopilla, joista toinen mittaisi transientteja ja toinen harmonisia yliaaltoja. Koska oskilloskoopeissa ei ole omaa toimintoa datan talletukseen, olisi sen säilyttämiseen käytetty erillistä datalog-

geria. Toiseksi vaihtoehdoksi nousi Topas 1000 energia-analysaattori. Topas 1000 ei vaadi ulkopuolisia laitteita mittausten suorittamiseksi, vaan sen muistiin voidaan tallentaa suuri määrä mittausdataa. Koska Topas 1000 oli huomattavasti helpompi asentaa mittaamaan keskuksen sähkön laatua, päädyttiin sen valintaan.

Mittauksia varten käytiin keskustelua mittauspaikasta, jotta saavutettaisiin mahdollisimman hyvä kuva keskuksen sähkön laadusta. Koska keskuksessa on olemassa Carlo Gavazzi WM3-96 energia-analysaattori, päädyttiin sijoittamaan mittari analysaattorin jo olemassa oleviin liittimiin, jolloin on mahdollista käyttää samoja virtamuuntajia. Näin oli mahdollista välttää uusien virtamuuntajien asennus mittauskäyttöön tai yli 1 kA virralle tarkoitettujen virtapihtien käyttö, sillä yksittäisen vaiheen virta keskuksessa ylitti usein yli 1 kA rajan.

### 6.3 Mittaukset

Ensimmäinen mittaus suoritettiin 18. - 20. marraskuuta. Mittarit haettiin Satakunnan ammattikorkeakoululta aamulla ja asennettiin paikalleen mittauksia varten. Jännitemittaus saatiin liitettyä hauenleukoja käyttäen paikoilleen keskuksessa sijaitsevan 1250 ampeerin kytkimen taakse. Virtapihdit sijoitettiin keskuksen energia-analysaattorin johtimiin. Tästä syystä oli tärkeää selvittää virtamuuntajien muutosuhde jonka avulla Topas 1000 pystyi määrittämään virran oikean arvon.

Topas 1000 ohjelmoitiin suorittamaan mittaus aikavälillä 18. marraskuuta kello 10:10 - 20. marraskuuta kello 11:00. Tällä aikavälillä oletettiin olevan induktiouunilla korkea käyttöaste, jotta saataisiin hyvä kuva verkon sähkön laadusta normaalissa käytössä.

Toinen mittaus suoritettiin 7. tammikuuta kello 10:15 - 10. tammikuuta kello 10:55. Valmistelut olivat samat kuin edellisellä mittauskerralla. Toisella mittauskerralla oli tavoitteena saada enemmän mittausdataa ja tallentaa ensimmäisellä kerralla esiintynyt ilmiö uudestaan ja mahdollisesti useammin.

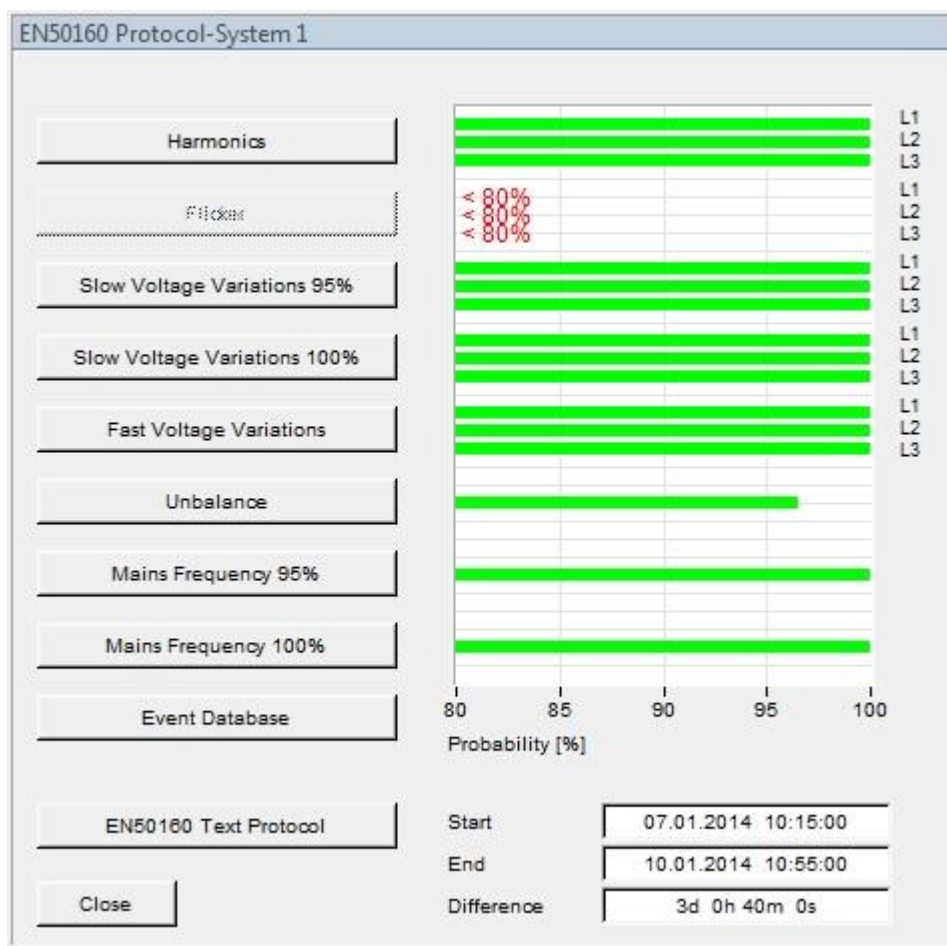
## 7 TULOSTEN ANALYSOINTI

### 7.1 EN 50160

Sähköön laatuun liittyvän standardin EN50160 arvoja on mahdollista suoraan verrata Topas 1000 energia analysaattorin tuloksiin mittarin ohjelmiston avulla. Alustavasti molemmissa mittauksissa standardin määrittävät ehdot täyttyvät, eli sähkön laadussa ei ole suurta huomautettavaa (kuva 11), mutta välkyntä ja epäsymmetria vaativat tarkempaa tutkimista. Mittausjaksolta on myös mahdollista tulostaa kattava EN50160-raportti, josta voidaan tutkia tuloksia (LIITE 2).

Välkyntä häiritsevyysindeksin määrittämiseksi vaaditaan viikon pituinen mittausjakso, mutta opinnäytetyötä varten suoritettavat mittaukset olivat 2 ja 3 vuorokauden mittaiset. Näin ollen standardin määrittämään häiritsevyysindeksiä ei pystytty mittaamaan. Tuloksista pystyttiin kuitenkin tutkimaan häiritsevyysindeksin 10 minuutin keskiarvoa, joka pysyi molempien mittausten aikana 100 % ajasta alle 1 %. Ensimmäisen mittauksen huippuarvo oli 0,53 ja toisen 0,62.

Epäsymmetrian kohdalla saavutettiin arvo 96,56 % joka täyttää standardin vaatimukset, mutta ei ole täydellinen tulos. Mittausjakson aikana Topas 1000 taltioi 436 kymmenen minuutin keskiarvoa, joista seitsemän aikana epäsymmetria ylitti 2 % arvon. korkein ylitys oli 3,96 % jolloin L1 jännite oli 226,48 V, L2 222,33 V ja L3 229,03 V. Edellä mainitut seitsemän ylitystä ovat tapahtuneet aikana, jolloin myös kuormitus on kasvanut tai laskenut huomattavasti.



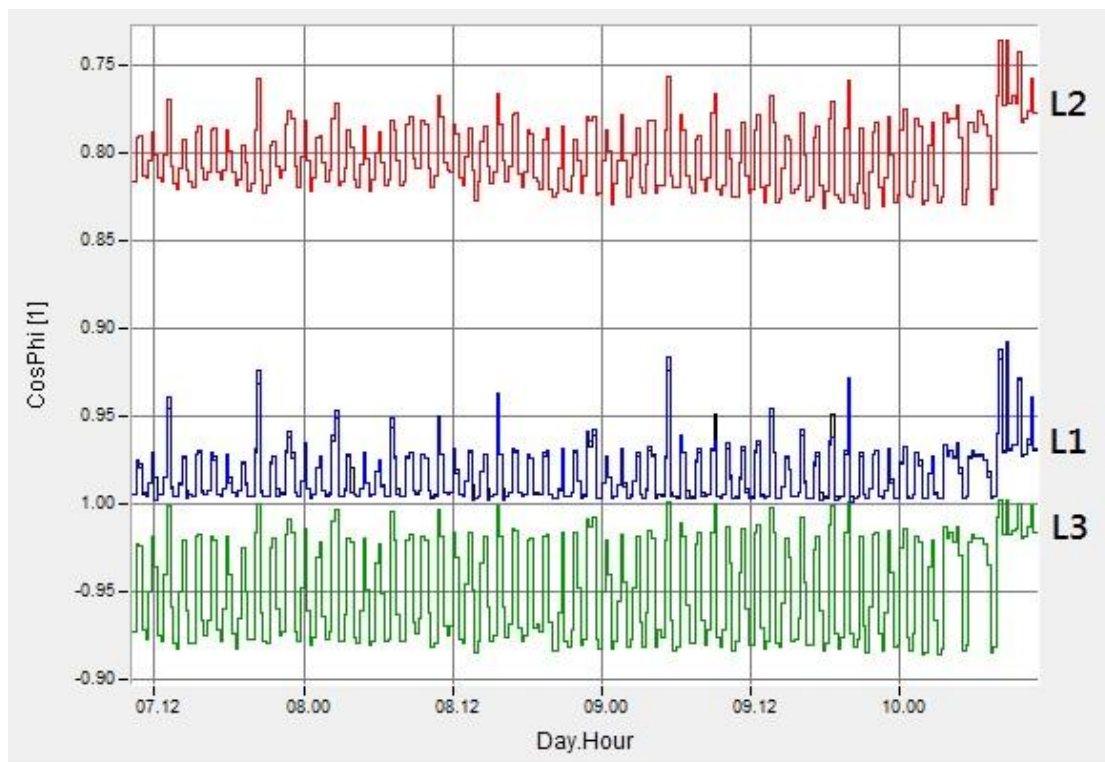
KUVA 11. Yleiskatsaus EN 50160 tuloksiin ajalta 7. tammikuuta kello 10:15 - 10. tammikuuta kello 10:55. Välkynnän laskemiseksi ei tullut tarpeeksi dataa.

## 7.2 Tehot

Mittarin avulla oli mahdollista seurata pätötehon, loistehon ja näennäistehon muutoksia, jolloin voitiin päätellä induktorien kuormitus eri vuorokauden aikoihin. Pätötehon ja näennäistehon osalta ei mittausten aikana ilmennyt mitään mainittavaa. Pätöteho vaihteli mittaus jakson aikana 70 kW ja 520 kW välillä, kun taas näennäistehon vaihtelu pysyi 90 kVA ja 570 kVA välillä. Kun huomioidaan yksittäisen induktorin huipputehon olevan 400 kW, voidaan pätötehon ja näennäistehon olettaa olevan kohtuullisia kahden induktorin järjestelmässä.

Loistehon arvoja tutkittaessa, huomattiin arvoissa huomautettavaa (kuva 12). Vaiheessa L2 kulki huomattavasti enemmän loistehoa, kuin noin 70 % suuremman nä-

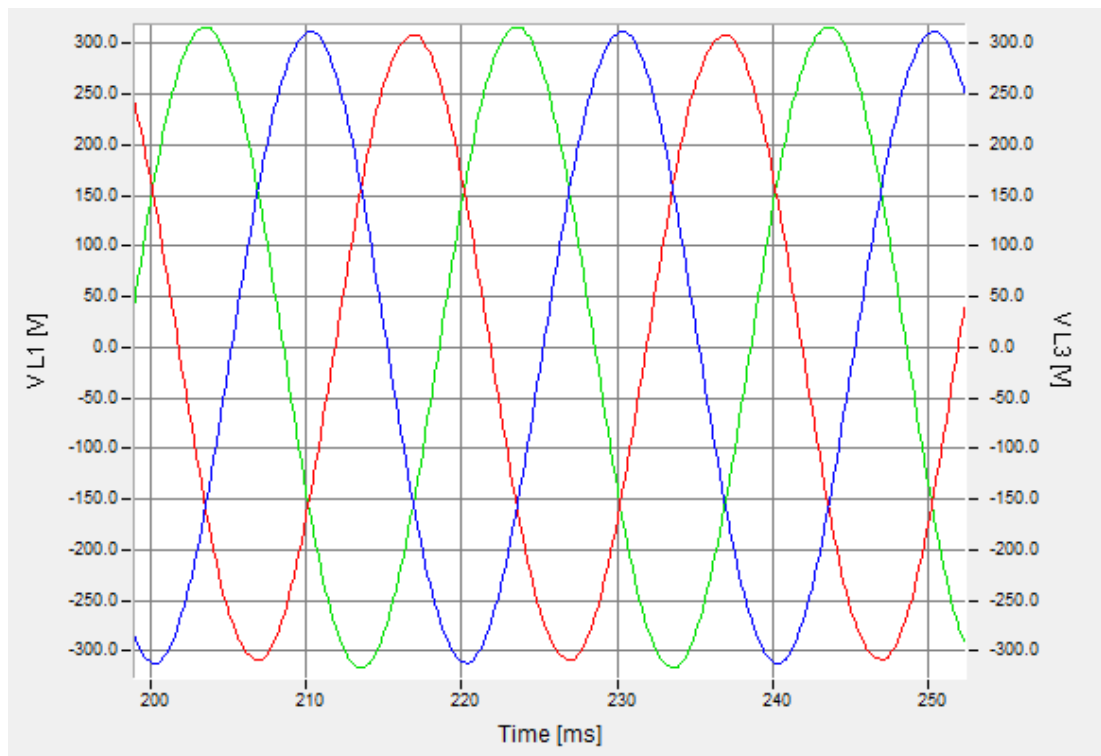
ennäistehon omaavassa vaiheessa L1. Vaiheessa L3 oli huomattavasti kapasitiivista loistehoa. Tämä oli odotettavissa, sillä ennen mittausten aloittamista huomattiin keskuksessa jo olemassa olevassa energia analysaattorissa kapasitiivinen tehokerroin vaiheella L3. Verkon loistehon ja tehokertoimen summa pysyy lievästi induktiivisena, joten vaikutusta sähköjakelijan verkkoon ei ole.



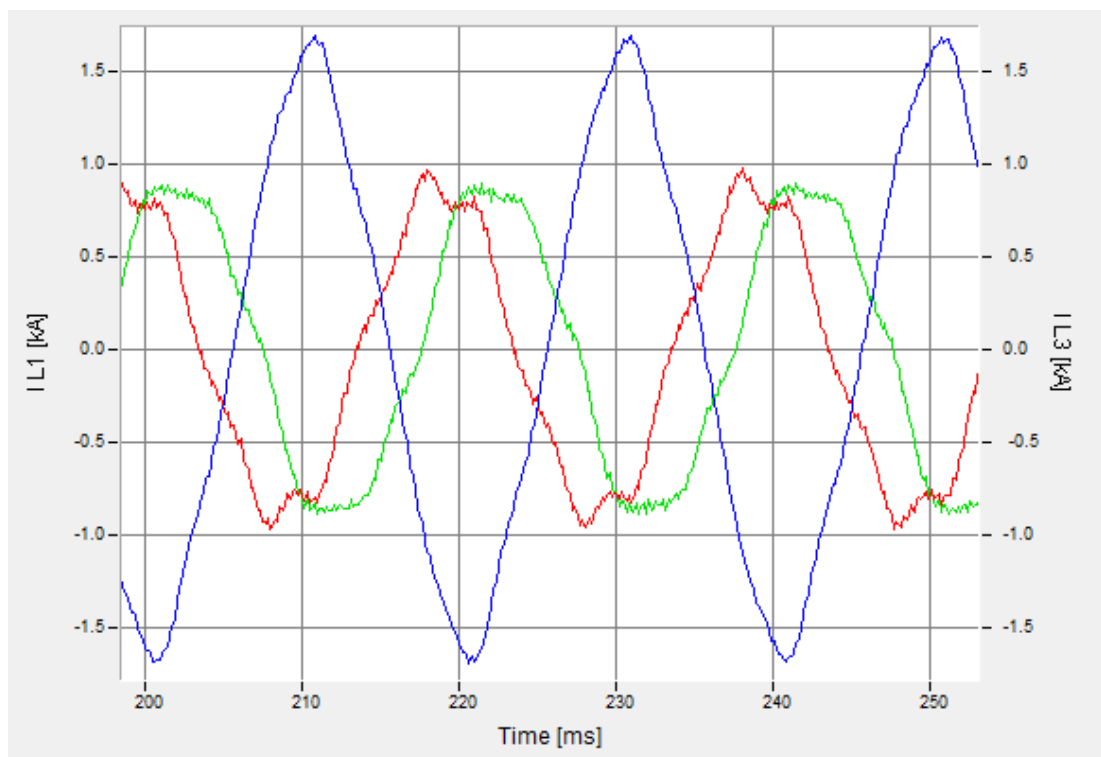
KUVA 12. Vaihekohtaiset muutokset tehokertoimessa ajalla 7. tammikuuta kello 10:15 - 10. tammikuuta kello 10:55.

### 7.3 Jännitteen ja virran aaltomuoto

Topas 1000 tarjoaa mahdollisuuden nauhoittaa oskilloskooppi kuvaa, kun asetetut arvot verkon ominaisuuksissa täyttyvät. Aaltomuodot jännitteelle ja virralle on nauhoitettu normaalissa kuormitustilanteessa, jolloin molemmat induktorit ovat käytössä suurella teholla. Kuvista voidaan huomata, että jännitteen säröytyminen on hyvin vähäistä, kun taas virrassa on huomattavasti enemmän säröä (kuva 13 ja 14). Kuormitus ei myöskään ole jakautunut symmetrisesti vaiheiden välille. Tuloksista voidaan erottaa, että induktorit on kytketty välille L1-L2, sekä L1-L3.



KUVA 13. Jännitteen aaltomuoto molempien induktorien ollessa käytössä.

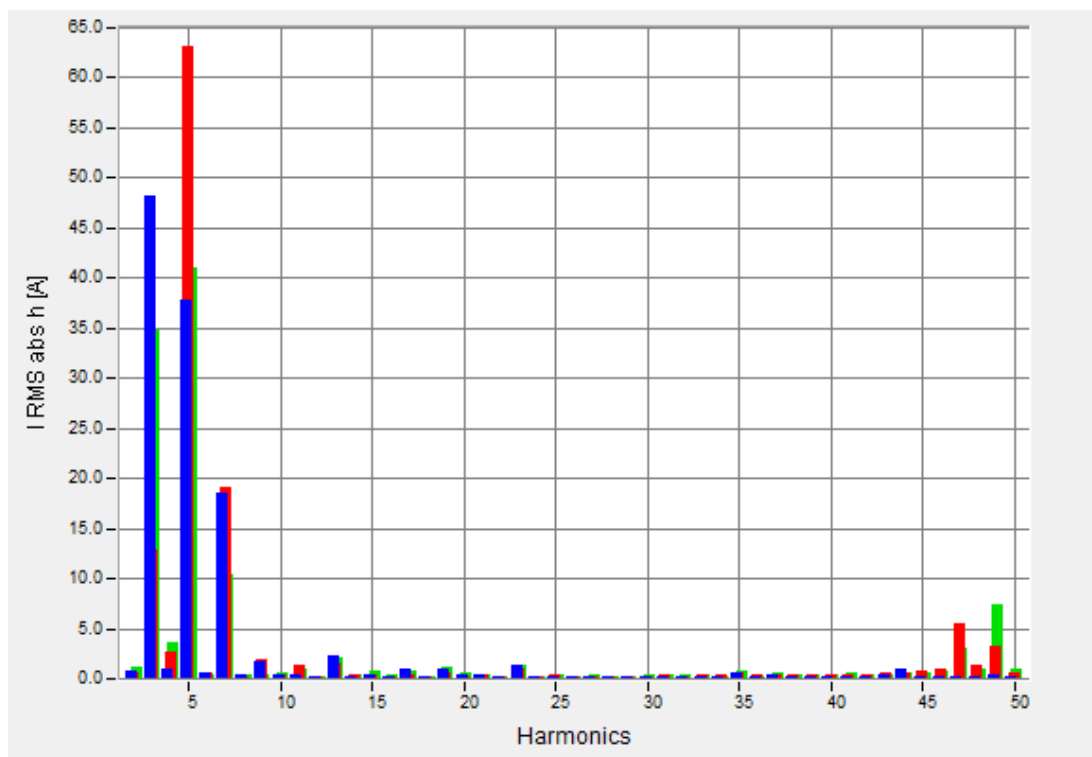


KUVA 14. Virran aaltomuoto molempien induktorien ollessa päällä.

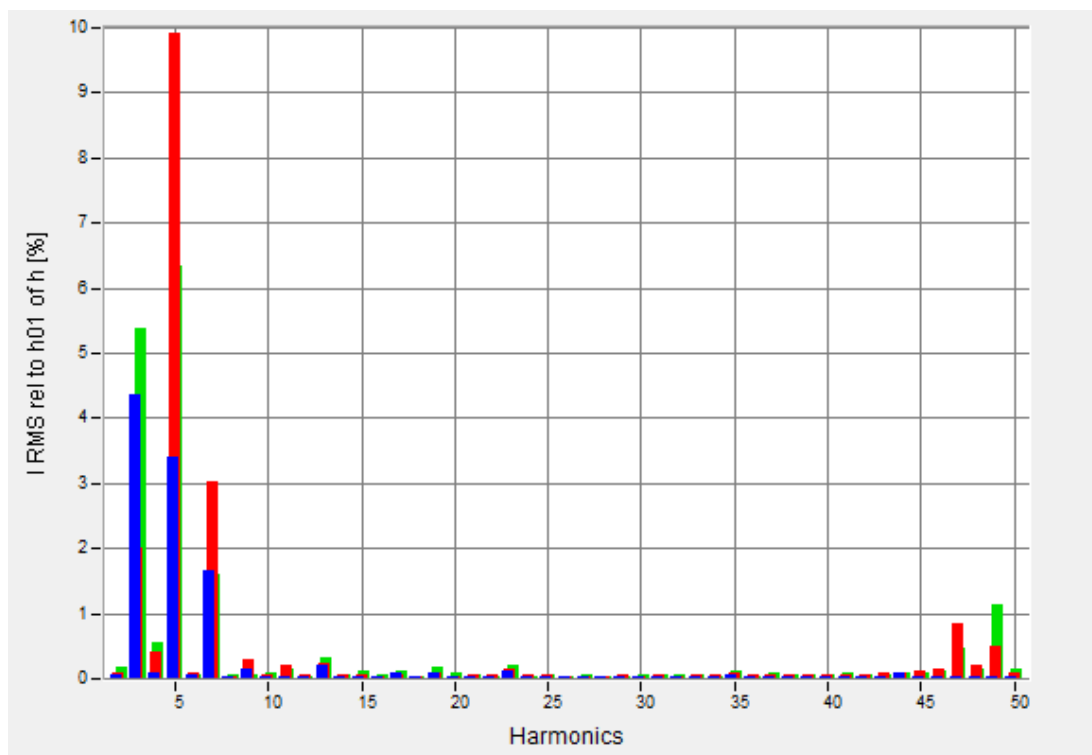


## 7.4 Yliaallot

Kuten edellä huomattiin, verkon virta säröytyi huomattavasti. Tästä syystä on kannattavaa tutkia aaltomuodon yliaaltosisältöä. Yliaaltosisältöä tutkiaksemme suoritettiin Fourier-analyysi, mutta Topas-1000 on suorittanut tämän puolestamme joten sopivan taulukon avulla voidaan tutkia yliaaltosisältöä (kuva 15 ja 16).



KUVA 15. Yliaaltovirtojen absoluuttiset arvot.



KUVA 16. Yliaaltovirtojen arvo suhteessa virran perusaaltoon.

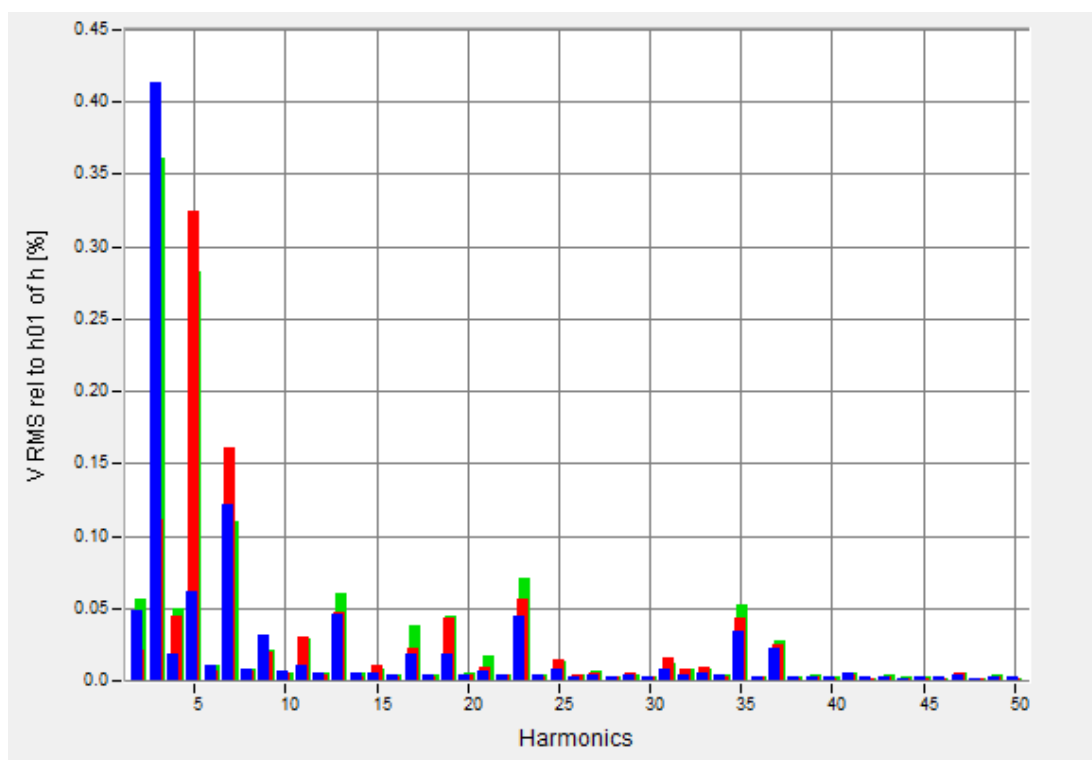
Yliaalto spektristä on huomattavissa, että 3. ja 5. yliaalto ovat merkittävimmät. Arvon vaihtelu on suurta, sillä 3. yliaalto vaihtelee 12...49 A välillä ja 5. yliaalto 37...63 A välillä. Myös 7. yliaaltoa esiintyy huomattavasti, mutta sen arvo on huomattavasti pienempi.

Alla on laadittu taulukko virran kokonaissäröstä ja virrasta hetkellä, jolloin molemmat induktorit ovat päällä suurella teholla (taulukko 6).

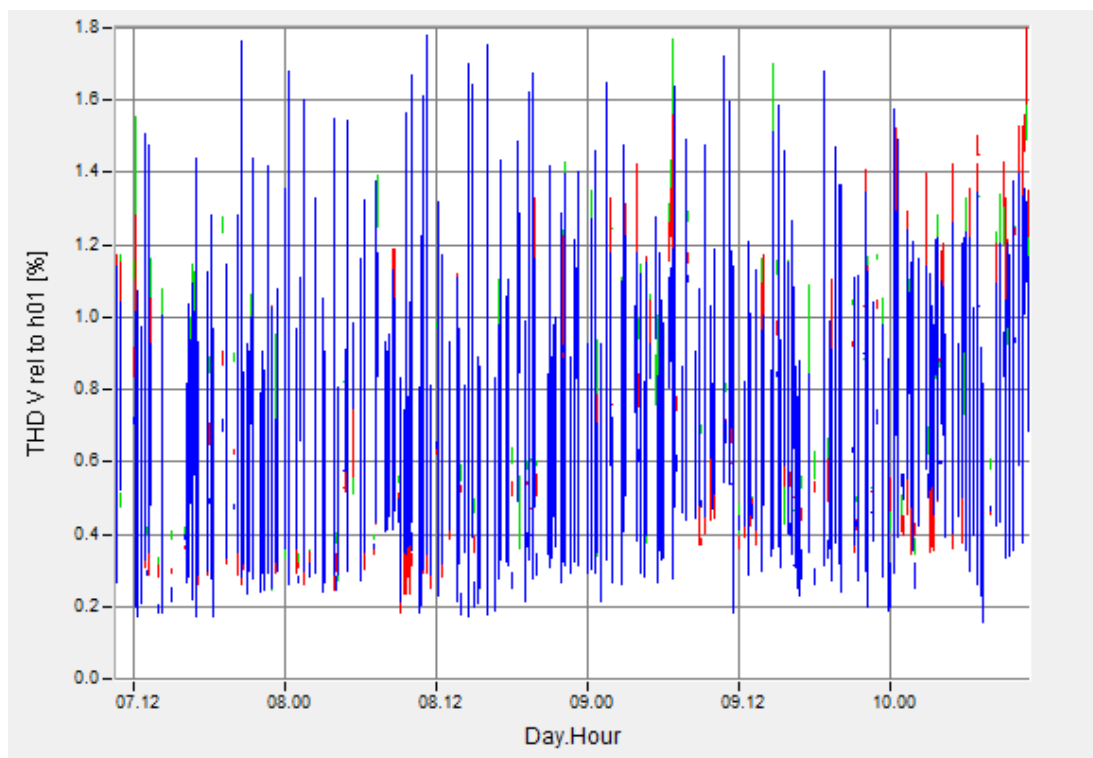
TAULUKKO 6. Katsaus vaihekohtaiseen virran tehollisarvoon, sekä kokonaissärön absoluuttiseen ja suhteelliseen arvoon.

|               | IL1     | IL2   | IL3   |
|---------------|---------|-------|-------|
| $I_{rms}$ (A) | 1 116,3 | 640,5 | 650,1 |
| $THD_I$ (A)   | 131,7   | 154,0 | 115,2 |
| $THD_I$ (%)   | 11,9    | 23,9  | 17,8  |

Virran säröytyminen ei kuitenkaan aiheuta, yhdessä verkon impedanssien kanssa, huomattavaa jännitteen säröytymistä (kuva 17). Tämä oli mahdollista todeta jo EN50160 mittauksen harmonisten yliaaltojen tuloksista. Tässä mittauksessa jännitteen 10 minuutin THD keskiarvo pysyi alle kahdeksan prosentin, joka on standardissa määritelty raja-arvo. Myös jännitteen aaltomuodossa ei ollut suurta poikkeavuutta, vaan se vastasi puhdasta sinimuotoa. Tutkimalla tuloksia jännitteen harmonisista yliaalloista, huomataan että kolmen vuorokauden mittausjaksolla jännitteen THD arvo ei ole ylittänyt 1,8 prosentin arvoa (kuva 18).



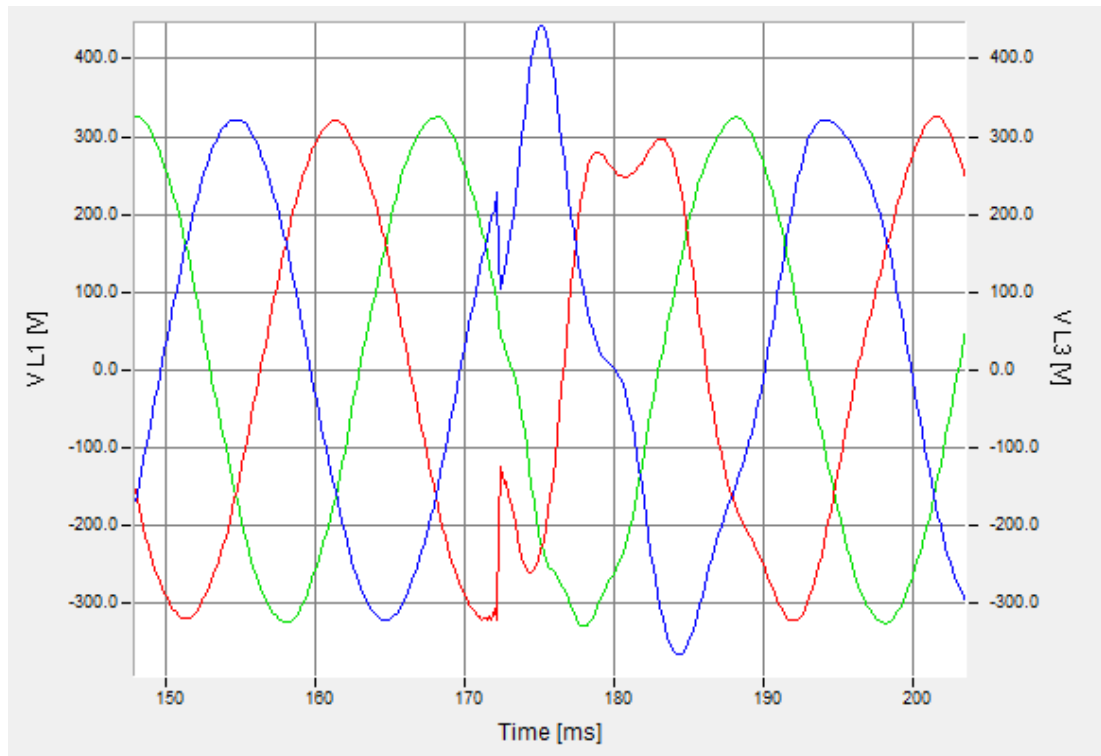
KUVA 17. Yliaaltojännitteen suhteessa jännitteen perusaaltoon.



KUVA 18. Jännitteen kokonaissärö suhteessa jännitteen perusaaltoon ajalla 7. marraskuuta kello 10:15 - 10. marraskuuta kello 11:00.

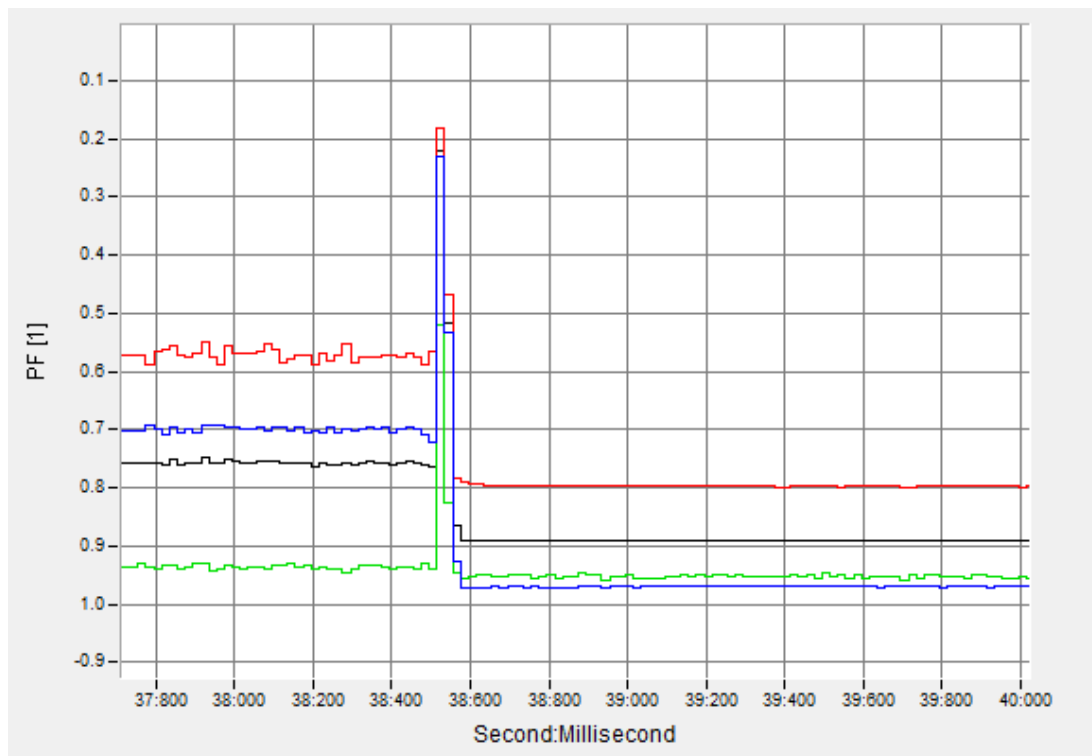
### 7.5 Transienttiylijännitteet

Mitatussa verkossa ilmeni mittausjakson aikana huomattavasti transienttiylijännitteitä. Tutkimalla oskilloskoopin ja transienttimittausten tuloksia, huomataan aiheutuneiden ylijännitteiden olevan vain 1...1,4-kertainen normaali jännitteen huippuarvoon verrattaessa (kuva 19). Transienttien ilmenemishetkellä voidaan myös huomata jännitteen pyrkivän kohti nollaa ja sen jälkeen nousevan voimakkaasti.



KUVA 19. Kytentähetkellä jännite pyrkii kohti nollakohtaa, jonka jälkeen se nousee hieman normaalin huippuarvon yli.

Ylijännitteet ilmenevät induktorien kytkemishetkillä, jolloin verkon teho usein nousee huomattavasti. Induktorien kytkeytyessä verkkoon, kytkeytyy myös induktorin kompensoiva kondensaattoriparisto verkkoon (kuva 20).



KUVA 20. Induktorin kytkentähetkellä myös kompensointikondensaattoriparisto kytkeytyy verkkoon, joka on havaittavissa tehokertoimen parantumisella.

Loistehon kompensoinnissa käytettävä kondensaattoriparisto aiheuttaa kytkettäessä loivia ja vaatimattomia transienttiylijännitteitä. Ennen kytkentää kondensaattorien napojen välinen jännite on nolla. Tämä aiheuttaa kytkentähetkellä verkonjännitteen putoamisen hetkellisesti kohti nollaa. Kun kondensaattorit ovat latautuneet, verkon jännite kääntyy kohti normaalia tilaa. Koska syöttävässä verkossa on induktanssia, tapahtuu ilmiö vaimenevana värähtelynä, johon sisältyy myös normaalin verkkotaajuuden ylittäviä kohtia. Värähtelyn taajuuteen vaikuttaa verkon induktanssin ja kondensaattorien kapasitanssin muodostava sarjaan kytkennän resonanssitaajuus. Suurin verkkojännitteen ylitys ilmenee kun kytkentä tapahtuu lähellä verkkojännitteen huippuarvoa. Ylijännitteen huippuarvo voi olla teorian mukaan 1...2 kertaa jännitteen hetkellinen huippuarvo. (Mäkinen, Nikander & Pylvänäinen 2007, 45).

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

L-linjan induktiouunia syöttävän keskuksen sähkön laadussa ei EN50160 standardin mukaan ole suurta moitittavaa, sillä molemmilla mittauskerroilla Topas 1000 mittarin EN50160 mittaus oli standardin mukaan hyväksyttävä. Ainoastaan epäsymmetri-an kohdalla oli tapahtunut kymmenen minuutin keskiarvolle asetetun raja-arvon ylityksiä. Näistä huolimatta epäsymmetria pysyi standardin asettaman 95 % ajan alle 2 %. Näin voidaan olettaa sähkön laadun olevan standardin osilta kunnossa. Välkynä arvon mittaaminen oli ainut osa-alue, johon ei saatu vaadittua viikon mittausta. Saa-duista tuloksista kuitenkin huomattiin, että välkynnän häiritsevyysindeksi pysyi mo-lempien mittausten aikana alle standardin raja-arvon.

Tehoja mitattaessa esiin nousi vaiheiden L2 ja L3 kompensointi. L2 vaiheessa oli huomattavasti enemmän induktiivista tehoa kuin vaiheessa L1, minkä tehokerroin oli luokkaa 0,99–0,92. L3 vaiheen teho taas oli huomattavasti kapasitiivista. Tämä viit-taisi häiriöön kompensoinnin kytkennöissä ja edellyttäisi jatkotutkimuksia poik-keavuuden aiheuttajan löytämiseksi ja korjaamiseksi. Huomattavaa kiireellisyyttä selvityksillä en oleta olevan, sillä keskuksen kokonaistehokerroin on hieman induk-tiivisen puolella ja näin ollen ei aiheuttaisi loistehomaksuja.

Jännitteen yliaaltojen osalta syöttävän keskuksen sähkön laatu oli erinomainen ja vain muutamia vähäisiä ylityksiä 2. ja 4. yliaallon osalta oli havaittavissa. Kaiken kaikkiaan jännitteen kokonaissärö pysyi huomattavasti alle standardin asettaman kahdeksan prosentin raja-arvon. Toisin kuin jännitteen, virran yliaallot olivat huomattavasti suurempia. Yliaaltovirroissa ilmeni jopa yli 40 % arvoja verrattaessa pe-rusaaltoon. Mutta koska yliaaltovirrat eivät aiheuta jännitteen säröytymistä tai muuta häiriötä, ei niiden suodattamiselle ole tarvetta. Suurten yliaaltovirtojen taustalla voi-daan olettaa olevan induktorien aiheuttaman suuri induktiivinen kuorma.

Kolmen vuorokauden mittausjakson aikana verkossa ilmeni huomattavasti pieniä yli-jännitteitä. Nämä ylijännitteet ilmenivät hyvin usein jännitteettömän induktorin kyt-keytyessä verkkoon. Koska jännitteen aaltomuoto kytkentätilanteessa pyrki kohti nol-laa ja nousi kevyesti normaalin huippuarvon yli hetki sen jälkeen, ilmiö vaikuttaa aiheuttavan olevan jännitteettömän kompensointipariston kytkeytyminen verkkoon.

Kondensaattorin kytkeytyessä se pyrkii latautumaan ja aiheuttaa nopean tiputuksen jännitteessä ja myöhemmin pienen nousun huippuarvossa. Huippuarvon ylitys on suoraan riippuvainen kytkentähetkestä. Mitä lähempänä huippua kytkentä tapahtuu, sitä suurempi ylijännitteestä tulee.

Kondensaattoripariston aiheuttamaa kytkentäilmiötä on mahdollista pienentää käyttämällä 0-piste kytkintä tai vaimennusta. 0-pistekytkimellä on mahdollista hallita kytketymiskohtaa. Kytkin tarkkailee jännitteen aaltomuotoa ja pyrkii kytkemään jokaisen vaiheen kiinni nollakohdassa ja näin vähentäen ylijännitteitä. Vaimennuksella tarkoitetaan vaimennusvastuksen tai -kelan kytkemistä kondensaattoripariston yhteyteen. Paristo kytketään verkkoon aluksi vastuksen tai kelan kautta ja 200 millisekunnin kuluttua se ohitetaan, jolloin paristo jatkaa toimintaa normaalisti.

ABB:n asiantuntijat kertoivat puhelimitse, että mahdolliset vaimennusvastukset ja 0-pistekytkimet ovat yksilöllisiä tuotteita ja valmiita tuotteita ei ole varastossa. Kyseiset tuotteet suunnitellaan tapauskohtaisesti ABB:n toimesta. ABB:n asiantuntija ehdotti myös kolmatta vaihtoehtoa ylijännitteiden ehkäisemiseksi. Koska taajuusmuuttajat on sijoitettu tälle hetkellä samaan verkkoon kompensointipiirin kanssa, olisi taajuusmuuttajien sijoittaminen eri verkkoon keino ehkäistä ylijännitteiden välittymistä kondensaattoreilta.

## 9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön perustana oli tutkia Luvata Pori Oy:n L-linjan induktiouunin ylijännitteitä, jotka ovat aiheuttaneet häiriöitä taajuusmuuttajissa. Ylijännitteiden aiheuttajana epäiltiin olevan alun perin syöttävässä keskuksessa ilmenevät yliaallot, sillä induktiouunit ovat huomattavia induktiivisia kuormia ja yhdessä sulan kuparin kanssa voisivat luoda resonanssitilanteita, jotka vahvistavat yliaaltoja.

Työ aloitettiin tarkastelemalla sähkön laatua käsittelevän standardin EN50160 asettamia vaatimuksia. EN50160 standardissa esitetyistä vaatimuksista laadittiin opin-



näytetyöhön oma osuus ja sen sisältö käsiteltiin lyhyesti. EN50160 asetuksia käytettiin myöhemmin tulosten analysoinnissa sähkön laadun määrittämiseen.

Opinnäytetyötä aloittaessa epäiltiin häiriöiden aiheuttajaksi yliaaltoja, joten ne oli syytä ottaa standardia laajempaan käsittelyyn. Yliaaltojen aiheutumisesta, haitoista ja toteamisesta laadittiin teoriapohjaista tekstiä, jonka on tarkoitus auttaa ymmärtämään yliaaltoja.

Yliaaltojen teorian lisäksi käsiteltiin laiteratkaisuja, joilla voidaan ehkäistä yliaaltojen syntymistä, sekä mahdollisia suodattamisratkaisuja, joilla voidaan poistaa yliaaltoja verkosta. Todettiin että ehkäiseminen oli mahdollista erilaisten tasasuuntajien käytön avulla ja suodattamisessa oli mahdollista käyttää siihen erityisesti valmistettuja laitteita.

Työtä varten perehdyttiin myös lyhyesti uunin rakenteeseen ja siihen liittyviin laiteratkaisuihin. Aiheessa kerrottiin tarkemmin kouru-uunin rakenteesta, kuparin sulatuksen tekevän induktorin toiminnasta ja sitä syöttävän säästömuuntajan ominaisuuksista. Lisäksi käsiteltiin työn loppuvaiheessa merkittäväksi nousseen kompensoinnin toimintaa.

Koska epäiltiin yliaaltoja taajuusmuuttajien vikatoimintojen aiheuttajiksi, haluttiin järjestää mahdollisimman kattava mittaus. Tällä tavoin pystyisimme myöhemmin seuraamaan verkossa tapahtuvia ilmiöitä ja kuormituksen muutoksia. Näiden pohjalta on mahdollista yhdistää tapahtumia toisiinsa ja todeta mahdollinen vian aiheuttaja verkossa. Tämän kaltaiseen mittaukseen soveltui parhaiten Topas 1000 mittari ja yhdessä opettajien kanssa kävimme läpi mittarin käyttöä, jotta mittaukset olisivat mahdollisimman onnistuneet.

Mittausten kautta saatiin huomattava määrä mittausdataa. Mittauksia suoritettiin yhteensä viisi vuorokautta. Tänä aikana oskilloskooppi teki noin 500 nauhoitusta jännitteen ja virran käyrämuodosta. Näitä nauhoituksia aktivoivat yliaallot, transientit ja jännitteen muutokset. Tulosten analysoimiseen kului useampi ilta, jotta aaltomuodoista ja verkon tapahtumista voitiin tunnistaa vikatoimintojen aiheuttaja. Loppujen lopuksi mittauksista ilmeni toistuva kuvio, joka oli yhdistettävissä kondensaattorien

kytkentätilanteeseen. Hankkimalla lisää informaatiota kyseisestä ilmiöstä, oli mahdollista tarkentaa päätelmää.

Opinnäytetyön suorittaminen on tuonut minulle huomattavasti enemmän tietoa sähkön laatua koskevista standardeista, niiden mittauksesta ja laadun parantamisesta. Toivon että näistä opituista asioista on hyötyä, sillä sähkön laatu on kasvava puheenaihe lisääntyvän elektroniikan takia.

Toivon myös, että opinnäytetyöstä on hyötyä Luvata Pori Oy:lle. Sähkön laatua ei välttämättä ryhdytä parantamaan, mutta informaatio sen tilanteesta on varmasti hyödyllistä.

## LÄHTEET

Tuomainen, M. 1995. Säädettyjen käyttöjen yliaallot ja loistehon kompensointi. Tampere: Nokia Capacitors Oy

Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R., Seesvuori, V., & Wilén, T. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy

Wikman, K., Sippola, J., Järvinen, A., Murtopuro, M., Sirviö, S. Sonninen, R., Kautto, J., Lindén, J., Nilsson-Ollandt, B.-J & Peräniitty, M. 1995. Sähkölämpötekniikat: Periaatteet ja sovellukset. Espoo: Otatieto Oy

ABB. 2001. Tekninen opas nro 6 - Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto opas. Viitattu 30.1.2014. <http://www.abb.com>

Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. 1969. Valimotekniikka. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy

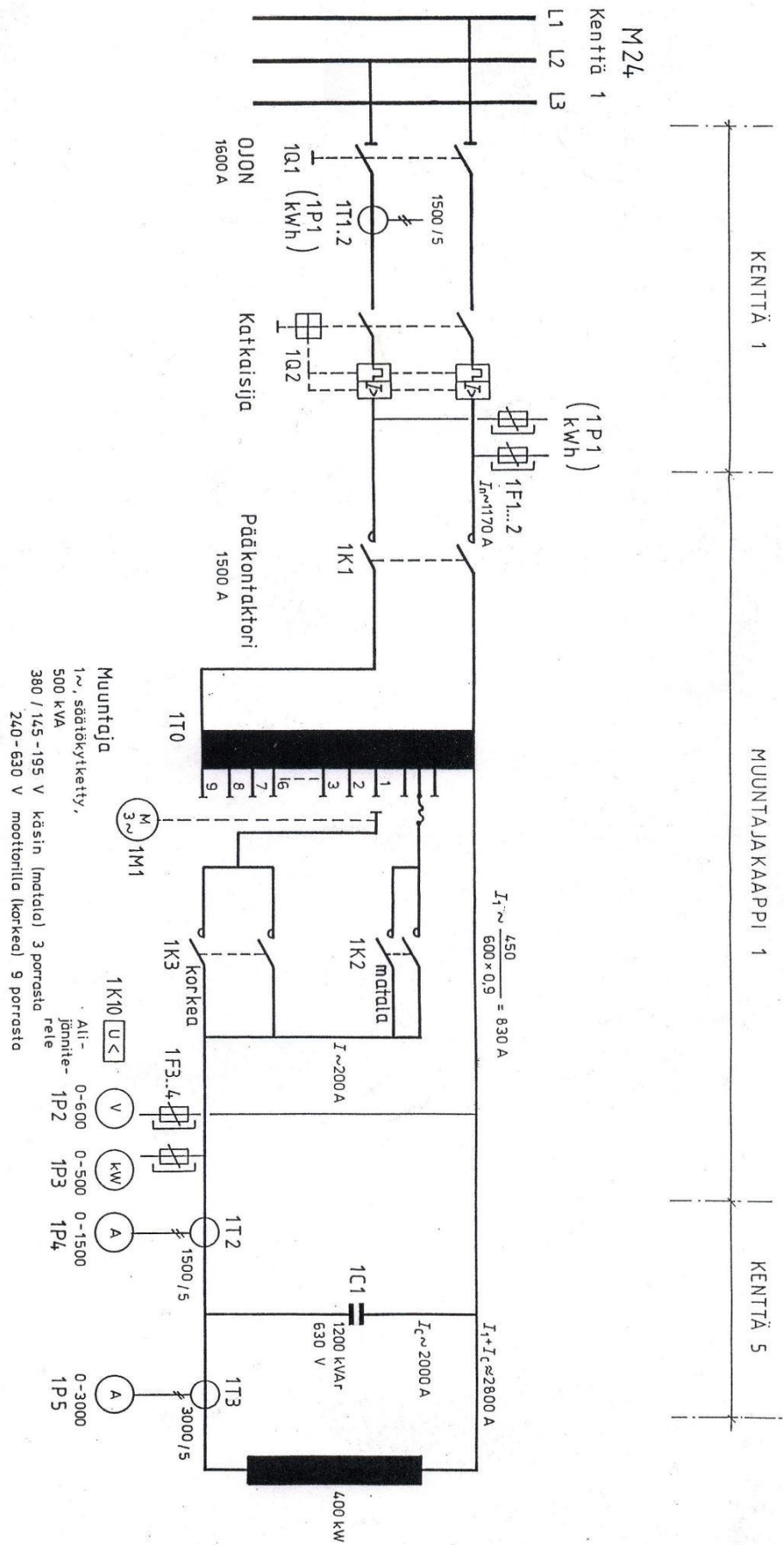
Mehta, V.K & Mehta, R. 2006. Principles of Electrical Machines. India: S Chand & Co Ltd. Viitattu 24.2.2014. <http://www.scribd.com/doc/18815834/144/Theory-of-Autotransformer>

Mäkinen, A. Nikander, A & Pylvänäinen, J. 2007. Sähköverkkojen häiriöiden ja sähkölaitteiden yhteensopivuuden hallinta. Viitattu 30.1.2014. <http://energia.fi/>

Koskinen, R & Niemi, P. 2011. Induktiokouru-uunit Viitattu 30.1.2014. [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN\\_sulatustekniikka\\_08.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_sulatustekniikka_08.pdf)

SFS-EN 50160. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet (EN 50160:2007). 2007. Finnish Standards Association SFS. Helsinki: SFS. Viitattu 30.1.2014. <http://www.sfs.fi/>

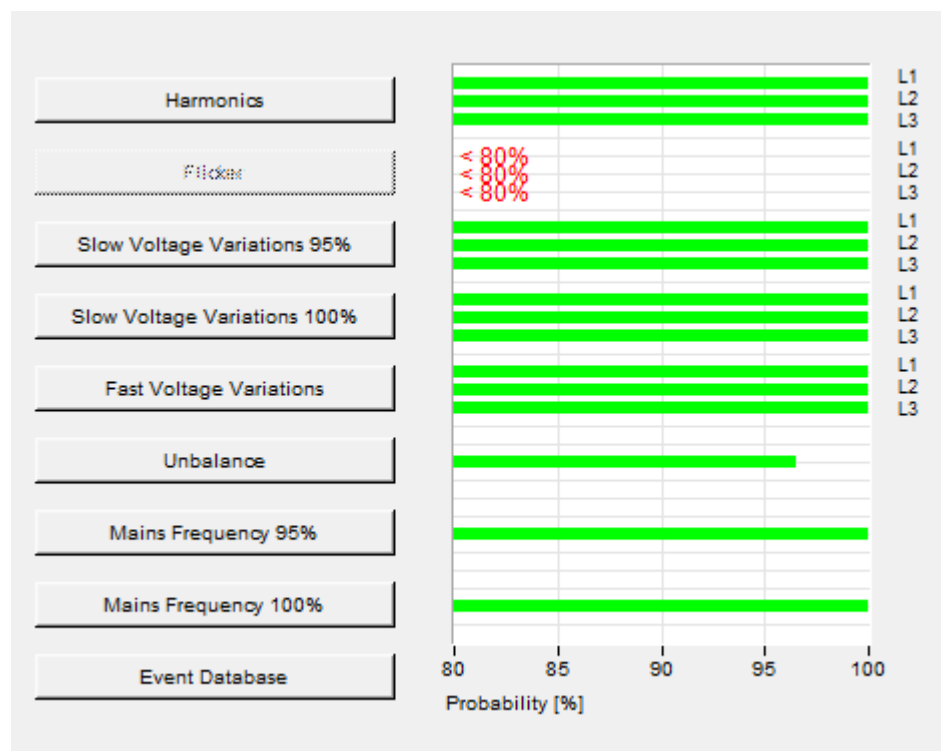
LIITE 1



EN50160 REPORT

PC software: Version 1.7.12 20071030  
 Firmware: Version 1.7.12 20071030  
 Copyright: Copyright (c) 2007 Fluke Corporation, www.fluke.com

**Overview**



**General**

|                      |                |
|----------------------|----------------|
| Company:             | Luvata         |
| Department:          |                |
| Contact:             | Jari Pohjatalo |
| Cause of measurement | Yliaallot      |

## Settings

| <b>Test equipment</b>            |                             |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Firmware:                        | Version 1.7.12 20071030     |
| PC-software:                     | Version 1.7.12 20071030     |
| <b>Measurement</b>               |                             |
| File location:                   | e:\Ohjelmat\Fluke\Luvata 2\ |
| File name:                       | 2MITTAUS.DEF                |
| Start time:                      | 07.01.2014 10:15:00         |
| End time:                        | 10.01.2014 10:55:00         |
| Difference:                      | 3d 0h 40m 0s                |
| Flagging:                        | ---                         |
| <b>Nominal values</b>            |                             |
| Nominal voltage Un:              | 230.00V                     |
| Nominal voltage Un ph-ph:        | ---                         |
| Nominal frequency:               | 50.00Hz                     |
| <b>Event Limits</b>              |                             |
| Dip threshold:                   | 90.00%                      |
| Swell threshold:                 | 110.00%                     |
| Interruption threshold:          | 1.00%                       |
| Hysteresis:                      | ---                         |
| S/L Interruption time threshold: | 180.00s                     |
| <b>EN50160 Statistics</b>        |                             |
| Voltage 95% pos. limit:          | 110.00%                     |
| Voltage 95% neg. limit:          | 90.00%                      |
| Voltage 100% pos. limit:         | 110.00%                     |
| Voltage 100% neg. limit:         | 85.00%                      |
| Frequency 95% pos. limit:        | 101.00%                     |
| Frequency 95% neg. limit:        | 99.00%                      |
| Frequency 100% pos. limit:       | 104.00%                     |
| Frequency 100% neg. limit:       | 94.00%                      |
| Long-term Flicker Plt:           | 1.00                        |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| Max. number of Events:       | 100   |
| Unbalance:                   | 2.00% |
| THD:                         | 8.00% |
| <b>Rapid Voltage Changes</b> |       |
| Minimum rate of change:      | 5.00% |

## Harmonics

### Statistics

| <b>Total harmonic distortion</b> |                        |           |           |           |
|----------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Designation</b>               | <b>Tolerance range</b> | <b>L1</b> | <b>L2</b> | <b>L3</b> |
|                                  | [ % ]                  | [ % ]     | [ % ]     | [ % ]     |
| THD                              | 0.00 - 8.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| <b>Harmonics</b>                 |                        |           |           |           |
| <b>Order</b>                     | <b>Tolerance range</b> | <b>L1</b> | <b>L2</b> | <b>L3</b> |
| Nr.                              | [ % ]                  | [ % ]     | [ % ]     | [ % ]     |
| 2                                | 0.00 - 2.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 3                                | 0.00 - 5.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 4                                | 0.00 - 1.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 5                                | 0.00 - 6.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 6                                | 0.00 - 0.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 7                                | 0.00 - 5.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 8                                | 0.00 - 0.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 9                                | 0.00 - 1.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 10                               | 0.00 - 0.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 11                               | 0.00 - 3.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 12                               | 0.00 - 0.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 13                               | 0.00 - 3.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 14                               | 0.00 - 0.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 15                               | 0.00 - 0.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 16                               | 0.00 - 0.50            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |
| 17                               | 0.00 - 2.00            | 100.00    | 100.00    | 100.00    |

|    |             |        |        |        |
|----|-------------|--------|--------|--------|
| 18 | 0.00 - 0.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 19 | 0.00 - 1.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 20 | 0.00 - 0.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 21 | 0.00 - 0.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 22 | 0.00 - 0.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 23 | 0.00 - 1.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 24 | 0.00 - 0.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 25 | 0.00 - 1.50 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

The table shows the percentage of 10-minute-interval values which are within the tolerance range.

At least 95% of the values of one week have to be within the tolerance range.

## Harmonics

### Measurement values

| Total harmonic distortion |                 |            |       |       |                |       |       |
|---------------------------|-----------------|------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
| Designation               | Tolerance range | 95%-values |       |       | Maximum values |       |       |
|                           |                 | L1         | L2    | L3    | L1             | L2    | L3    |
|                           | [ % ]           | [ % ]      | [ % ] | [ % ] | [ % ]          | [ % ] | [ % ] |
| THD                       | 0.00 - 8.00     | 0.87       | 1.10  | 1.12  | 1.09           | 1.56  | 1.44  |
| Harmonics in % of Un      |                 |            |       |       |                |       |       |
| Order                     | Tolerance range | 95%-values |       |       | Maximum values |       |       |
|                           |                 | L1         | L2    | L3    | L1             | L2    | L3    |
| Nr.                       | [ % ]           | [ % ]      | [ % ] | [ % ] | [ % ]          | [ % ] | [ % ] |
| 2                         | 0.00 - 2.00     | 0.10       | 0.08  | 0.06  | 0.12           | 0.10  | 0.07  |
| 3                         | 0.00 - 5.00     | 0.51       | 0.42  | 0.45  | 0.92           | 0.63  | 0.72  |
| 4                         | 0.00 - 1.00     | 0.07       | 0.09  | 0.10  | 0.10           | 0.18  | 0.18  |
| 5                         | 0.00 - 6.00     | 0.70       | 0.97  | 0.90  | 0.92           | 1.31  | 1.28  |
| 6                         | 0.00 - 0.50     | 0.02       | 0.02  | 0.02  | 0.04           | 0.03  | 0.04  |
| 7                         | 0.00 - 5.00     | 0.42       | 0.39  | 0.74  | 0.52           | 0.57  | 0.97  |
| 8                         | 0.00 - 0.50     | 0.01       | 0.02  | 0.02  | 0.02           | 0.04  | 0.03  |



|    |             |      |      |      |      |      |      |
|----|-------------|------|------|------|------|------|------|
| 9  | 0.00 - 1.50 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.07 | 0.10 | 0.09 |
| 10 | 0.00 - 0.50 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.03 |
| 11 | 0.00 - 3.50 | 0.16 | 0.20 | 0.20 | 0.36 | 0.42 | 0.47 |
| 12 | 0.00 - 0.50 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 13 | 0.00 - 3.00 | 0.14 | 0.19 | 0.19 | 0.22 | 0.31 | 0.31 |
| 14 | 0.00 - 0.50 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| 15 | 0.00 - 0.50 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| 16 | 0.00 - 0.50 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| 17 | 0.00 - 2.00 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| 18 | 0.00 - 0.50 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 19 | 0.00 - 1.50 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.08 | 0.10 |
| 20 | 0.00 - 0.50 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.05 |
| 21 | 0.00 - 0.50 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.05 | 0.07 |
| 22 | 0.00 - 0.50 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.05 |
| 23 | 0.00 - 1.50 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.27 | 0.29 | 0.28 |
| 24 | 0.00 - 0.50 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 25 | 0.00 - 1.50 | 0.12 | 0.18 | 0.16 | 0.27 | 0.35 | 0.34 |

## Flicker

---

### Statistics

| Designation | Tolerance range | L1 | L2 | L3 |
|-------------|-----------------|----|----|----|
| Plt         | 0.00 - 1.00     |    |    |    |

At least 95% of the values of one week have to be within the tolerance range.

### Measurement values

| Designation | Tolerance range | 95%-values |    |    | Maximum values |    |    |
|-------------|-----------------|------------|----|----|----------------|----|----|
|             |                 | L1         | L2 | L3 | L1             | L2 | L3 |
| Plt         | 0.00 - 1.00     |            |    |    |                |    |    |

## Slow voltage variations

---

### Statistics

| Designation         | Tolerance range | L1     | L2     | L3     |
|---------------------|-----------------|--------|--------|--------|
|                     | [ V ]           | [ % ]  | [ % ]  | [ % ]  |
| Phase voltages 95%  | 207.00 - 253.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| Phase voltages 100% | 195.50 - 253.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

At least 95% of the values of one week have to be within the 95% tolerance range.

100% of the values of one week have to be within the 100% tolerance range.

### Measurement values

| Designation       | Tolerance range | L1     | L2     | L3     |
|-------------------|-----------------|--------|--------|--------|
|                   | [ V ]           | [ V ]  | [ V ]  | [ V ]  |
| Overvoltages 100% | 253.00          | 229.01 | 226.24 | 231.97 |
| Overvoltages 95%  | 253.00          | 228.25 | 225.28 | 230.83 |
| Voltage dips 95%  | 207.00          | 222.25 | 219.55 | 223.93 |
| Voltage dips 100% | 195.50          | 221.47 | 218.94 | 222.67 |

## Fast voltage variations

---

### Statistics

| Designation    | Tolerance range | L1    | L2     | L3     |
|----------------|-----------------|-------|--------|--------|
|                | [ % ]           | [ % ] | [ % ]  | [ % ]  |
| Phase voltages | 11.50           | 99.99 | 100.00 | 100.00 |

# Unbalance

---

## Statistics

| Designation                   | Tolerance range | Values in tolerance |
|-------------------------------|-----------------|---------------------|
|                               | [ % ]           | [ % ]               |
| Neg. system / positive system | 0.00 - 2.00     | 96.56               |

At least 95% of the values of one week have to be within the tolerance range.

## Measurement values

| Designation | Tolerance range | 95%-Value | Max-Value |
|-------------|-----------------|-----------|-----------|
|             | [ % ]           | [ % ]     | [ % ]     |
| Unbalance   | 0.00 - 2.00     | 1.96      | 3.96      |

# Frequency

---

## Statistics

| Designation    | Tolerance range | Values in tolerance |
|----------------|-----------------|---------------------|
|                | [ Hz ]          | [ % ]               |
| Tolerance 95%  | 49.500 - 50.500 | 100.00              |
| Tolerance 100% | 47.000 - 52.000 | 100.00              |

At least 95% of the values of one week have to be within the 95% tolerance range.

100% of the values of one week have to be within the 100% tolerance range.

## Measurement values

| Designation  | Tolerance range | Values |
|--------------|-----------------|--------|
|              | [ Hz ]          | [ Hz ] |
| Maximum 100% | 52.000          | 50.140 |
| Maximum 95%  | 50.500          | 50.102 |
| Minimum 95%: | 49.500          | 49.881 |
| Minimum 100% | 47.000          | 49.813 |

## Events

---

### Overvoltages

| <b>Designation</b> | <b>L1</b> | <b>L2</b> | <b>L3</b> | <b>L123-N</b> |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Number             | 0         | 0         | 1         | 0             |
| Maximum value [V]  | 0         | 0         | 253.23    | 0             |
| Maximum duration   | 0.000us   | 0.000us   | 10.000ms  | 0.000us       |

### Voltage dips

| <b>Designation</b> | <b>L1</b> | <b>L2</b> | <b>L3</b> | <b>L123-N</b> |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Number             | 1         | 3         | 0         | 0             |
| Minimum value [V]  | 206.61    | 204.56    | 0         | 0             |
| Maximum duration   | 9.9862ms  | 9.9976ms  | 0.000us   | 0.000us       |

### Short interruptions

| <b>Designation</b> | <b>L1</b> | <b>L2</b> | <b>L3</b> | <b>L123-N</b> |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Number             | 0         | 0         | 0         | 0             |
| Maximum duration   | 0.000us   | 0.000us   | 0.000us   | 0.000us       |

### Long interruptions

| <b>Designation</b> | <b>L1</b> | <b>L2</b> | <b>L3</b> | <b>L123-N</b> |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Number             | 0         | 0         | 0         | 0             |
| Maximum duration   | 0.000us   | 0.000us   | 0.000us   | 0.000us       |