



## **TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Sähkötekniikka**

**Sähkövoimatekniikka**

**INSINÖÖRITYÖ**

**SÄHKÖN LAATU TEOLLISUUSVERKOSSA**

**Työn tekijä: Lasse Torkkeli  
Työn valvoja: Jari Ijäs  
Työn ohjaaja: Markku Hakasalo**

**Työ hyväksytty: \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2011**

**Jari Ijäs  
lehtori**



## **ALKULAUSE**

Tämä insinööri työ tehtiin Saint-Gobain rakennustuotteet Oy:n Hyvinkään Isoverin ja Kirkkonummen Gyprocin yksiköille. Haluan kiittää erityisesti tämän mielenkiintoisen työn antanutta sekä työn ohjaajana toiminutta Isoverin sähkökäytön johtajaa insinööri Markku Hakasaloa, sekä työn valvojaa Metropolia ammattikorkeakoulun lehtori Jari Ijästä. Kiitän myös lehtori Sampsa Kuparia sähkölaatuun liittyvistä neuvoista työn aikana.

Helsingissä 2.6.2011

Lasse Torkkeli

## TIIVISTELMÄ

<b>Työn tekijä:</b> Lasse Torkkeli	
<b>Työn nimi:</b> Sähkön laatu teollisuusverkossa	
<b>Päivämäärä:</b> 2.6.2011	<b>Sivumäärä:</b> 47 s. + 2 liitettä
<b>Koulutusohjelma:</b> Sähkötekniikka	<b>Suuntautumisvaihtoehto:</b> Sähkövoimatekniikka
<b>Työn valvoja:</b> lehtori, Jari Ijäs	
<b>Työn ohjaaja:</b> insinööri, Markku Hakasalo	
<p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Saint-Gobainin eristetehtaan sähköverkon sähkönlaatua häiriöiden kartoittamiseksi sekä mahdollisia tulevaisuuden investointeja varten. Mittauksia varten tehtaan verkosta valittiin tarkoin mahdollisia häiriöpitoisuuksia sisältäviä kohteita joista otettiin mittaustuloksia analysointia varten.</p> <p>Työn lähtökohtana oli selvittää, minkälaisia tehtaan sähkön laatua heikentävien komponenttien tuottamat häiriöt ovat, onko kyseisistä häiriöistä ympäröivälle sähköverkolle haittaa ja voiko ongelmia järkevillä investoinneilla poistaa. Tehtaassa toimii paljon erilaisia sähköverkkoon häiriöitä tuottavia komponentteja, esimerkiksi taajuusmuuttajat, induktiokuumentimet ja valaistus, jotka ottavat jännitettä ja virtaa epälineaarisesti aiheuttaen verkkoon nimellistaajuudesta poikkeavia virtoja ja jännitesäröjä eli yliaalloja.</p> <p>Häiriöiden poistamiseen on olemassa monia tehokkaita ja toimivia menetelmiä, mutta ne voivat myös väärin mitoitettuna aiheuttaa verkkoon lisää ongelmia. Sähkön laatua parantavia tekijöitä ovat esim. oikein mitoitettu verkko, oikeanlaiset kytkennät sekä suotimet kuten, aktiivi- ja passiivisuodin. Häiriöiden poistaminen on hyvin tärkeää, koska se vähentää sähkönkulutusta, lisää laitteiden elinikää ja parhaimmillaan voi säästää henkiä.</p>	
<b>Avainsanat:</b> sähkön laatu, yliaallot, jännitesärö	

## ABSTRACT

<b>Name:</b> Lasse Torkkeli	
<b>Title:</b> Quality of power in industry grids	
<b>Date:</b> 2.6.2011	<b>Number of pages:</b> 47 p. + 2 attachments
<b>Department:</b> Electrical engineering	<b>Study Programme:</b> Electrical power engineering
<b>Instructor:</b> Jari Ijäs, Senior Lecturer	
<b>Supervisor:</b> Markku Hakasalo, Electric Engineer	
<p>The purpose of this study was to examine the power quality in the grid in Saint-Gobain Isover's insulation factory and Gyproc's drywall factory. The aim was to identify any disturbances and to determine the need for potential future investments. To perform the measurements to be analyzed, the focus was on selecting such points in the grid which would contain a large quantity of power quality disturbances.</p> <p>One objective of this study was to examine what kind of power quality distortions the components in the factories produce. The focus was on analyzing, if there are such distortions, which can affect harmfully the other components in the factories, and if there are reasonable ways to eliminate these problems. These two factories operate with a wide range of equipment, which produces power quality distortions on the grid, including equipment such as frequency converters, induction heaters and lighting. These components use current in a non-linear way, which produces current on the grid with a different frequency to the nominal current. Currents with abnormal frequency are called harmonic and they produce voltage distortion in the impedances of the grid.</p> <p>There are many functional and efficient ways to eliminate power quality distortions, but these methods may also cause more problems on the grid if the proportion is wrong. A properly sized grid, the right kind of connections, as well as active and passive filters, are all efficient factors for increasing the quality of power. We cannot underestimate the importance of good quality of electricity, because it reduces power losses, increases the life of the equipment and at best can save lives.</p>	
<b>Keywords:</b> power quality, harmonic, voltage distortion	

## SISÄLLYS

## ALKULAUSE

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## SISÄLLYS

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SÄHKÖN LAATU</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Sähkön laatustandardi</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Jännitevaihtelut</b>	<b>4</b>
2.2.1	<i>Jännitetaso</i>	4
2.2.2	<i>Ylijännite</i>	5
2.2.3	<i>Jännitekuopat</i>	7
2.2.4	<i>Välkyntä</i>	8
2.2.5	<i>Epäsymmetria</i>	9
2.2.6	<i>Signaalijännitteet</i>	10
<b>2.3</b>	<b>Yliaallot</b>	<b>11</b>
<b>2.4</b>	<b>Verkkotaajuus</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>PÄTÖ- JA LOISTEHON SÄÄTÖ</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>LAADUN PARANTAMINEN</b>	<b>20</b>
<b>4.1</b>	<b>Verkon mitoitus</b>	<b>20</b>
<b>4.2</b>	<b>Laitevalinnat</b>	<b>21</b>
<b>4.3</b>	<b>Suotimet</b>	<b>21</b>
4.3.1	<i>Passiivisuodin</i>	22
4.3.2	<i>Aktiivisuodatin</i>	24
<b>5</b>	<b>SÄHKÖNLAADUN MITTAUKSET</b>	<b>26</b>
<b>5.1</b>	<b>Mittauslaitteisto</b>	<b>26</b>
<b>5.2</b>	<b>Mittauspisteet</b>	<b>27</b>
<b>5.3</b>	<b>Mittaustekniikka</b>	<b>28</b>
<b>5.4</b>	<b>Mittaustulokset ja kommentit</b>	<b>29</b>
<b>5.5</b>	<b>Mittaustulosten yhteenveto</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>46</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>48</b>

## **LIITTEET**

LIITE 1: Isoverin Hyvinkään tehtaan KAG-keskuksen aikajanamittausten tulokset

LIITE 2: Gyprocin Kirkkonummen tehtaan PK1.2-keskuksen aikajanamittausten tulokset

## 1 JOHDANTO

Nykyajan teollisuuden sähköverkko on jatkuvan muutoksen tilassa. Markkinoille tulee koko ajan uusia, tehokkaampia ja tarkempia sähkölaitteita. Nämä laitteet tuottavat tuotteita entistä nopeammin ja tarkemmin sekä kuluttavat sähköä paljon paremmalla hyötysuhteella.

Tällainen nykyajan sähkölaitteisto vaatii erilaisia keinoja työstää sähköä erilaisiin aaltomuotoihin kuhunkin käyttötarkoitukseen sopivaksi. Sähkön muokkaamiseen tarkoitettua laitteiston valmistamista määrää kuitenkin kustannuskysymykset, jolloin katsotaan hyötylaatusuhteeltaan parasta vaihtoehtoa monesti kuitenkin ajattelematta sähkönlaadullisia seurauksia.

Kun haetaan hyvän hyötysuhteen omaavaa moottorikytkentää, voidaan ottaa esimerkiksi taajuusmuuttaja joka muokkaa sähkön aaltomuotoa paremmin prosessissa toimivaan muotoon. Taajuusmuuttajat vaikuttavat paljon vaihtosähkön sinimuotoisuuteen riippuen niiden tekniikasta. Parempaa tekniikkaa käytettäessä taajuusmuuttajasta verkkoon aiheutuvien yliaaltojen määrä luonnollisesti vähenee. Parempi tekniikka kuten 12-pulssikytkentä verrattuna 6-pulssikytkentään, maksaa huomattavasti enemmän. Komponenttien laatu ja ohjaustekniikka ovat yksi yliaaltojen syntyminen vaikuttava tekijä. Taajuusmuuttajat ovat vain yksi monista sähkön laatuun vaikuttavista teollisuuden sähkölaitteista.

Teollisuudessa käytetään paljon sähkön laatuun vaikuttavia komponentteja. Nämä laadulliset ongelmat voivat korjaamattomina vaikuttaa lukuisilla tavoilla sähköverkon ja tuotannon toimintaan. Pahimmillaan huonoon kuntoon päästetty sähköverkon tila voi aiheuttaa pitkiä tuotantokatkoksia, rikkoa omia ja naapurikiinteistön laitteistoja sekä aiheuttaa suuria tehohäviöitä, jotka pitkällä aikavälillä tulevat hyvin kalliiksi.

Tämä insinööri työ käsittelee Saint-Gobainin Isoverin Hyvinkään eristetuote- ja Gyprocin Kirkkonummen kipsilevytehtaan sähkön laadun tilaa. Yrityksellä oli tarve kartoittaa tehdasverkon tärkeimmissä kulutusasteissa vallitseva sähkön laadullinen tila, koska aikaisempia tutkimuksia ei riittävässä määrin ollut tehty. Selvityksen tarkoituksena on tutkia, minkälaisia ongelmia mahdolliset häiriöt tuottavat ja mitä näille ongelmille voidaan tehdä.

Yksi nykyajan suurimmista ja kasvavista sähköverkon laadun ongelmista on yliaallot. Nämä harmoniset ja epäharmoniset yliaallot tuleekin ottaa vakavasti huomioon verkkoja suunnitellessa. On hyvin todennäköistä, että sähköverkkojen yliaaltopitoisuus kasvaa runsaasti tulevaisuudessa esimerkiksi juuri lisääntyvien taajuusmuuttajakäyttöjen takia. Tässä insinööriyössä painopisteenä on yliaaltojen vaikutusten tutkiminen.

Työssä tutkitaan tehtaan jakelujärjestelmän pienjänniteverkon yliaalloista syntyviä häiriöitä ja arvioidaan niiden vaikutusta muuhun verkkoon. Mittauskohteiksi työssä on valittu tarkoin harkitut pisteet, joissa tiedetään olevan suuria määriä yliaaltoja sekä tärkeitä pisteitä, joiden toimintaan sähkön huono laatu voi vaikuttaa.

## 2 SÄHKÖN LAATU

Sähkö on muutakin kuin television, lampujen tai imurin toimintaa kun pistotulpan kiinnittää seinään. Sähkö on paljon monimuotoisempi asia, kuin miksi se tavallisesti mielletään. Tämä melkein jokaisen ihmisen kuluttama perustuote koostuu monesta eri komponentista, kuten potentiaalieroista, virrasta ja taajuudesta. Tämän tuotteen siirtyminen tuotannosta kuluttajalle on pitkä tie, jonka matkalla tapahtuu paljon muutoksia. Näin ollen sähkön siirtäminen kuluttajalle ei ole aina itsestäänselvyys.

Sähkön siirtoreiteillä vaikuttavat paljon ulkopuoliset tekijät, kuten yleiset sääilmiöt. Kova tuuli aiheuttaa puiden kaatumisia voimalinjoille, ja salamet aiheuttavat suurienergisiä jännitepiikkejä, joita huonosti suojatut järjestelmät eivät kestä. Lisäksi verkon kuluttajien käyttämistä sähköisistä laitteista aiheutuu paljon häiriöitä verkolle ja sen käyttäjille.

Tulevaisuus tuo todennäköisesti lisää ongelmia sähkön käyttäjälle, kuten myös sen toimittajalle. Ennen sähkölaitteet olivat pääosin resistiivistä kuormaa, joka kuluttaa sähköä lineaarisesti. Nykyajan kehittynyt laitteisto on paljon monimutkaisempaa ja laitteiston kuorma ei olekaan enää niin lineaarista. Sähköverkossa esiintyy nykyään yhä lisääntymässä määrin olevia juuri epälineaarisesti sähköä ottavia laitteita. Nämä epälineaariset komponentit haukkaavat sähköä vain osan sen käyrämuodosta, jolloin sähköverkkoon muodostuu perustaajuudesta poikkeavia yliaaltoja. Yliaallot vaikuttavat sähköverkon toimintaan monella eri tavalla.



Vaikka moni sähköinen laite on nykyään suunniteltu niin, että ne tarvitsevat mahdollisimman puhdasta lineaarista vaihtosähköä, aiheuttavat ne kuitenkin samalla häiriöpitoista aaltomuotoa sähköverkkoon. Tällainen mahdollisimman halvalla tuotettu sähkölaite on nykypäivänä yleinen ja aiheuttaakin siksi toisinaan suuria vaikeasti paikannettavia vikoja sähköverkkoon.

## 2.1 Sähkön laatustandardi

Sähkö on tuote siinä missä moni muukin kuluttajille tuotava palvelu. Nykyään puhutaan paljon sähkön laadusta, ja minkälaista sen tulisi olla. Myös sähkölle on asetettu standardit, joiden määreissä sähkön tulisi pysyä kun sitä tuodaan verkkoyhtiöltä kuluttajalle.

SFS-EN 50160-standardia sovelletaan nykyään Suomen normaalioloissa, jotta saataisiin riittävän hyvä sähkön laatu laitteille niiden turvallisuuden ja toimivuuden takaamiseksi. Standardi sisältää sähkön eri komponenteille määreitä, joiden rajoissa verkkoyhtiöiden sähkön on pysyttävä. Standardilaatuinen sähkö ei kuitenkaan aina tarkoita, että sähkön laatu olisi riittävän hyvää, mutta se ainakin asettaa laadulle jonkinlaiset kriteerit.

Sähkönlaadun standardin mukaisiksi sähkön laatuksikriteereiksi mainitaan seuraavat komponentit:

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

Huonosta sähkönlaadusta voi aiheutua vaaraa sähkölaitteen toiminnalle ja tästä johtuen myös ihmiselle. Laatuksiteereiden ansiosta nämä sähköstä aiheutuvat vaarat saadaan pidettyä ainakin jollain määritettävällä tasolla.

## **2.2 Jännitevaihtelut**

### *2.2.1 Jännitetaso*

Jännitetason vaihtelu verkossa voi aiheutua monesta syystä. Yleensä kyseessä on jonkinasteinen vikatilanne, väärin mitoitettu verkko tai loistehon kompensointi. Siirtoverkkojen automaattisten käämikytkinten takia jännitteen vaihtelut eivät loppukäyttäjälle näy, joten jakeluverkon loppupäässä vallitseva maksimikuorman jännitteen itseisarvo on verkon mitoitustilanteessa ratkaiseva tekijä. Jos tämä kuorma ylittyy esimerkiksi vikatilanteessa tai ylikuormituksesta, syntyy verkkoon alijännitettä.

Sähkön käyttäjälle jännitteen tason pysyminen nimellisarvoisena on tärkeä sähkön laatutekijä. Laitteet ja johtimet on suunniteltu toimimaan tietyllä jännitetasolla. Jännitetason heilahdellessa voi laitteille aiheutua välitöntä tai pitkällä aikavälillä syntyvää vaaraa. Jännitteen noustessa liian korkeaksi voi tietyille jännitetasolle suunnitellun laitteen tai kaapelin eristeet pettää ja syntyä läpilyöntejä, jolloin nämä rikkoontuvat tai niiden turvallisuus heikkenee suuresti.

Liian matala jännitetaso nostaa virtaa suuremmaksi, joka voi nostaa laitteen tai johtimen lämmön liian korkeaksi. Tällöin eristeet voivat sulaa tai muut laitteen tärkeät toiminnot häiriintyä, jolloin niille ja käyttäjille voi aiheutua suurta vaaraa. Jännitetason laskemisen vaikutukset eivät kuitenkaan yleensä ole yhtä välittömiä kuin sen nousun vaikutukset. [2. s. 38.]

Jännitetason vaihtelulle on standardissa SFS-EN 50160 asetettu tietyt rajat, joiden sisällä se saa vaihdella.

### **Pienjänniteverkot**

Standardin laatu: 95 % jokaisen viikon aikana mitattujen tehollisarvojen 10 min keskiarvoista tulee olla 207...253 V ja 100 % tehollisarvojen 10 min keskiarvoista 195,5...253 V.

Normaali laatu: Jokaisen viikon aikana mitattujen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla 207...244 V.

Korkea laatu: Jokaisen viikon aikana mitattujen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla 220...240 V ja 10 minuutin arvojen keskiarvo 225...235 V. [3, s. 2.]

### **Keskijänniteverkot**

Standardin laatu: 95 % jokaisen viikon aikana mitattujen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla  $U_c \pm 10\%$  sisällä.

Normaali laatu: Jokaisen viikon aikana mitattujen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvot ovat välillä  $U_c \pm 10\%$

Korkea laatu: Jokaisen viikon aikana mitattujen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvot ovat välillä  $U_c \pm 4\%$  ja 10 minuutin arvojen keskiarvo välillä  $U_c \pm 2,5\%$ . [3, s. 2.]

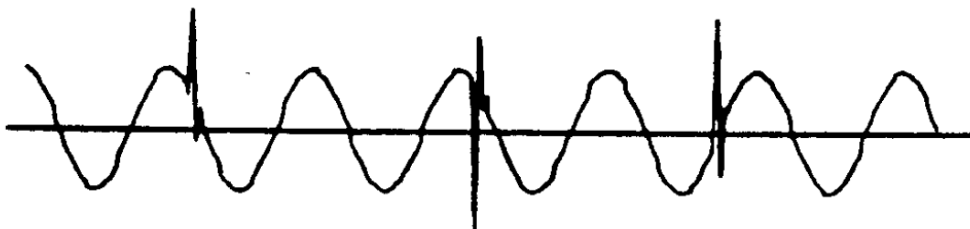
#### *2.2.2 Ylijännite*

Ylijännitteitä syntyy sähkötekniikassa johtuen erilaisista ilmiöistä. Yleisesti nämä luokitellaan lyhyisiin eli transientteihin, ja pitkäkestoiisiin ylijännitteisiin. Ylijännite on sähkötekniikalle laitteille vaarallista, mikäli sitä ei ole suunniteltu kestäväksi tällaisia ilmiöitä.

Ylijännitteistä transientti on lyhytkestoinen jännitepiikki. Tämä jännitepiikki jaotellaan lyhyisiin ( $<1\ \mu\text{s}$ ), keskipitkiin ( $1\text{...}100\ \mu\text{s}$ ) ja pitkiin ( $>100\ \mu\text{s}$ ). Transientteja syntyy sähköverkkoon sen komponenteista sekä luonnonilmiöistä, kuten salamoista. Komponenteista pitkiä transientteja verkkoon aiheuttavat esimerkiksi sulakkeiden palaminen, ja kompensointiparistojen kytkemiset. Verkkoon johtuneet keskipitkät transientit muodostuvat katkaisijoiden toiminnasta tai verkon läheisyyteen iskeneistä salamoista. Lyhyet transientit aiheutuvat paikallisten kuormien kytkeytymisestä.

Laitteistolle vaarallisimpia transientteja ovat esimerkiksi salamoista aiheutuvat suuritehoiset jännitepiikit johtuen niiden suuresta tehosta. Tavallisesti sähkölaitteet on suunniteltu niin, että ne kestävät normaalista käytöstä syntyviä transientteja. Salamet voivat siirtää transientteja verkkoon suoralla kytkeytymisellä, induktiivisesti ja kapasitiivisesti. [4, s. 3.]

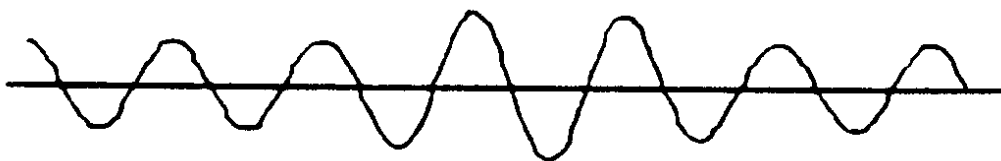
Transientit aiheuttavat erisuuruisia ongelmia riippuen niiden amplitudista, nousuajasta ja kestoajasta. Nämä sähköverkon yleisimpiin ongelmiin kuuluvat ylijännitteet voivat elektronisten laitteistojen rikkomisen lisäksi häiritä automatiikkaa ohjaavia tietokoneita aiheuttaen ohjatun prosessin vaiheissa vaaratilanteita virhetoimintojen vuoksi. [5, s. 11.]



*Kuva 1. Transienttiylijännite [4, s. 4]*

SFS-EN 50160 mukaan transienttiylijännitteiden huippuarvo ei tavallisesti ylitä arvoa 6 kV. [1, s. 18.]

Pienitaajuiset ylijännitteet, joita ei luokitella transienteiksi, ovat amplitudiltaan paljon pienempiä mutta kestoajaltaan paljon pidempiä kuin transientit eikä niiden taajuus-sisältö ole läheskään yhtä laaja kuin esimerkiksi lyhyissä transienteissa. Pienitaajuiset ylijännitteet muodostuvat verkkoon esimerkiksi verkon vikatilanteista, katkaisijatoiminnoista, ja epäsymmetrisestä kuormituksesta. Näiden ylijännitteiden kestoikaan vaikuttavat merkittävästi generaattoreiden jännitteen säätö sekä muiden säätöön osallistuvien laitteiden toiminta, kuten verkon automaattiset kelakytkimet. Yleisin pientaajuisia ylijännitteitä aiheuttava ilmiö on yksivaiheinen maasulku, joka aiheuttaa muiden terveiden vaiheiden jännitteen nousun. [5, s. 13.]



*Kuva 2. Nopea jännitteen nousu [4, s. 3]*

SFS-EN 50160-standardi sanoo, että pienjänniteverkoissa tilapäinen käyttötaajuinen ylijännite esiintyy yleensä yleisen jakeluverkon tai asiakkaan asennuksissa olevan vian aikana, ja poistuu kun vika selvitetään. Näissä olosuhteissa ylijännite voi nousta vaiheiden välisen jännitteen suuruiseksi (440 V:n jännitteeseen saakka 230/400 V:n verkossa) kolmivaihejärjestelmän nollapisteen siirtymän vuoksi. Hetkellinen arvo riippuu kuormituksen epäsymmetriasta sekä viallisen johtimen ja maan välisestä jäännösimpedanssista. Ylijännitteen kestoaika on tyypillisesti korkeintaan 5 s.

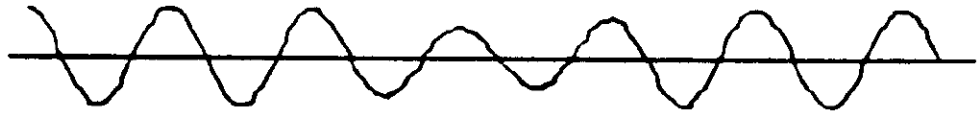
Tietyissä olosuhteissa muuntajan yläjännitepuolella esiintyvä vika aiheuttaa pienjännitepuolelle käyttötaajuuden ylijännitteen vikavirran kulkuajaksi. Näiden ylijännitteiden tehollisarvo ei tavallisesti ylitä arvoa 1,5 kV.

Keskijänniteverkoissa SFS-EN 50160-standardin mukaan jännitemuutos ei yleensä ylitä arvoa 4 %  $U_C$  normaaleissa käyttöolosuhteissa, mutta lyhytaikainen muutos, jonka suuruus voi olla jopa 6 %  $U_C$ , voi tapahtua muutamia kertoja päivässä joissain olosuhteissa. [1, s. 18, 24.]

### 2.2.3 Jännitekuopat

Suuremmat jännitepudotukset, eli jännitekuopat, ovat jännitteen putoamista tietyn jännitetason alle. SFS-EN 50160 standardin mukaan jännitekuoppa on tila, jossa jännite alenee äkillisesti 1...90 % nimellisjännitteestä ja palautuu lyhyen ajan kuluttua normaalitasolle. Ne ovat odottamattomia ja hyvin satunnaisia tapahtumia. [1, s. 18.]

Jännitekuoppa on vikatila, joka aiheutuu jossain kohdin verkkoa syntyneestä oikosulusta, suurten kuormien kytketyymisestä tai esimerkiksi sähkölaitteen viasta. Vian sijainnista riippuen, esimerkiksi oikosulun aiheuttama, jännitekuoppa voi vaikuttaa suurelle määrälle käyttäjiä riippuen siitä, kuinka suuri määrä kuluttajia vaikutusalueella on. Mikäli oikosulkusuojauksen toiminta-ajan kestävä vika tapahtuu lähellä sähköasemaa, aiheutuu siitä erittäin syvä tämän toiminta-ajan kestävä jännitekuoppa kaikille sähköasemaan kytketyille asiakkaille. Vika heijastuu myös muuhun verkkoon vaimentuen impedanssin suurentuessa vikapisteen ja muun verkon välillä. Toisin sanoen, mitä kauemmas vikapistestä tehon tulosuuntaan päästään, sitä pienemmäksi jännitekuoppa jää.



Kuva 3. Jännitekuoppa [4, s. 3]

Jännitekuopat voivat suuruudestaan riippuen aiheuttaa teollisuudessa suuria ongelmia kuten käyttökatkoksia. Jännitteen hetkellinen tippuminen voi aiheuttaa ongelmia automaatiolaitteistolle ja sähkökäyttöille esimerkiksi kontaktoreille aiheutuneen energiapuutteen takia. Energiapuutteen takia kontaktorin kärjet voivat aueta väärällä hetkellä. Näistä häiriöistä voi aiheutua teollisuudessa suuria tappioita, koska pahimmillaan keskeytyneen tuotannon uudelleenkäynnistäminen voi olla aikaa ja energiaa vievää toimintaa, pois lukematta rikkoutuneiden laitteistojen uusimista. [2, s. 31.]

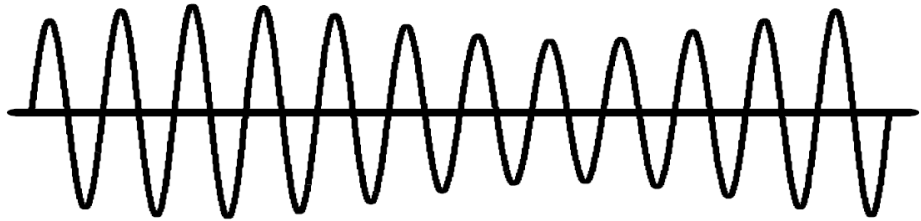
Standardin mukaan pienjänniteverkoissa normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitekuoppien odotettavissa oleva määrä vuoden aikana voi olla muutamista kymmenistä tuhanteen. Suurin osa jännitekuopista on kestoaltaan alle 1 sekuntia, ja jännite jää suuremmaksi kuin 40 %. suurempia ja pienempiä jännitekuoppia voi kuitenkin silloin tällöin esiintyä. Joillakin alueilla voi asiakkaan asennuksissa tapahtuvien kytkentöjen johdosta esiintyä hyvinkin usein jännitekuoppia, joissa jännite pysyy 85...90 % nimellisjännitteestä  $U_n$ .

Suurjänniteverkoissa standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitekuoppien odotettavissa oleva määrä vuoden aikana voi olla muutamista kymmenistä tuhanteen. Suurin osa jännitekuopista on kestoaltaan alle 1 sekuntia ja niiden suuruus on alle 60 %. Suurempia ja pidempiä jännitekuoppia voi kuitenkin silloin tällöin esiintyä. Joillakin alueilla voi asiakkaan asennuksissa tapahtuvien kytkentöjen johdosta esiintyä hyvinkin usein jännitekuoppia, jotka ovat suuruudeltaan 10...15 %  $U_C$ . [1, s. 18, 24.]

#### 2.2.4 Välkyntä

Välkyntä on jännitetason nopeaa muutosta edestakaisin, ja se aiheuttaa valojen haitallista välkkymistä ja sekä mahdollisesti ongelmia herkille kuormille kuten tietokoneille. Tätä tapahtumaa aiheuttavat mm. suuret kuormat, valokaariuunit ja kuljettimien moottorit. [6, s. 15.]

Välkynnälle on standardissa SFS-EN 50160 määrätty häiritsevyyssindeksit pitkäaikaiselle  $P_{It}$  ja lyhytaikaiselle häiritsevyydelle  $P_{st}$ .



Kuva 4. Jännitetason välkyntä [4, s. 3]

Standardin mukaan välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyyss indeksin tulisi olla 95 % ajasta  $P_{It} \leq .1$ . Standardissa on myös huomautus välkynnän subjektiivisuudesta, joka tarkoittaa, että joissain tilanteissa arvon ollessa 1 välkyntä on hyvin häiritsevää, kun taas toisessa tilanteessa suurempia  $P_{It}$  tasoja on havaittu ilman minkäänlaista häiritsevyyttä. [1, s. 16.]

### 2.2.5 Epäsymmetria

Kolmivaiheverkossa kytkettäessä eri vaiheille erisuuruisia kuormia syntyy epäsymmetristä kuormitusta toisin sanoen vinokuormaa. Nämä erisuuruiset kuormitukset syntyvät mm. generaattorin sähkömotorisista voimista, verkon epäsymmetrisistä impedansseista tai eri vaiheiden kesken kytketystä epäsymmetrisestä kuormituksesta. Esimerkiksi toimistoverkot ja niiden jakelupisteisiin eri vaiheille kytkettävät eritehoiset sähkölaitteet ovat yksi epäsymmetrisen kuormituksen lähteitä.

Epäsymmetrisyys aiheuttaa verkkoon jännite-epäsymmetriaa, joista kantaverkon merkittävimmät ovat valokaariuunit ja ratakäytöt. Myös verkon impedansseissa saattaa esiintyä pieniä epäsymmetrioita johtuen esimerkiksi rinnakkaiskondensaattorien sulakepaloista, sydänmuuntajista ja epätäydellisestä vuorottelusta johdoilla.

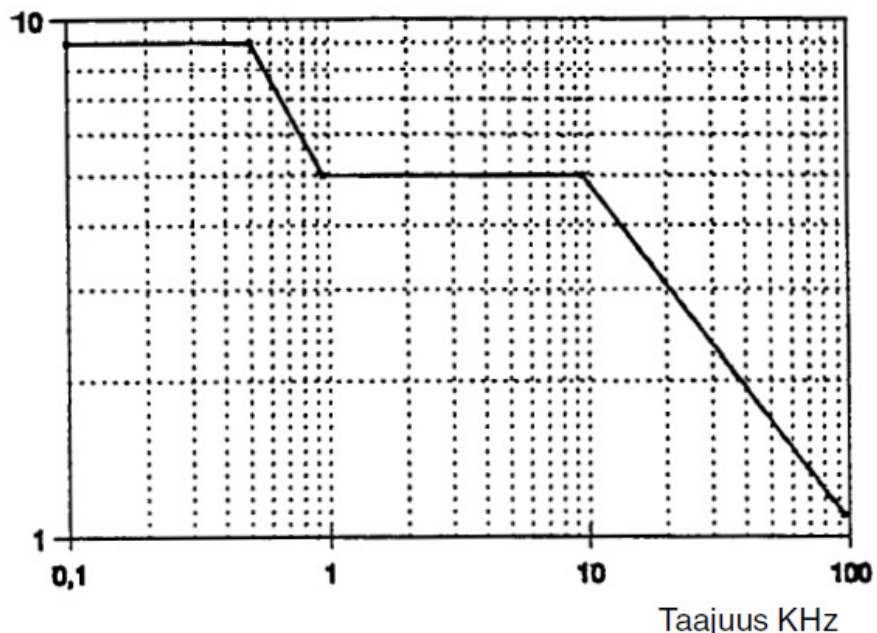
Verkon epäsymmetrisyys on verkolle epäedullinen tilanne ja siitä aiheutuukin erisuuruisia haittoja. Verkon epätaloudellisen käytön takia ongelmat lisääntyvät, kun generaattorin roottorin lisähäviöt kasvavat, jännitteen säätölaitteissa voi esiintyä vääriä toimintoja ja epäsymmetriset kuormitukset aiheuttavat kolmatta yliaaltoa. [7: III, s. 23.]

Standardin SFS-EN 50160 mukaan jokaisen viikon aikana normaaleissa käyttöolosuhteissa 95 % jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista tulee olla 0...2 % perustaajuisesta myötäkomponentista. Kun Joillakin alueilla osa asiakkaista on yksi tai kaksivaiheisesti kytkettyjä, esiintyy kolmivaiheasiakkaan liittämiskohdassa epäsymmetria-arvoja 3 %:iin saakka. Standardissa mainitaan arvot vain vastakomponentille, koska se on mahdollisesti järjestelmään kytkettyjen laitteiden kannalta olennainen. [1, s. 20.]

### 2.2.6 Signaalijännitteet

Nykyajan sähköverkkojen kaukokäyttöjärjestelmät vaativat toimiakseen erilaisia viestiyhteyksiä. Yhtenä viestiyhteytenä käytetään siirtojohtoja. Tästä käytöstä siirtojohdoille syntyy sivutuotteena häiriötä ohjaustoimintojen ulkopuoliselle käytölle. Näiden järjestelmien verkkoon aiheuttamaa muutosta kutsutaan signaalijännitteeksi ja kyseiset järjestelmät lisäävät nykyaikana lisääntymässä määrin olevia sähköverkon häiriöitä. Signaalijännitteille on laatustandardissa rajat, jotka eivät saa verkon kytkentäpisteissä ylittyä. Standardi SFS-EN 50160 kohdassa 4.13 mainitaan seuraavat asiat.

Yli 99 % päivästä signaalijännitteen kolmen sekunnin keskiarvon tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin kuvassa 1 annetut arvot.



Kuva 5. Yleisessä PJ-jakeluverkossa käytettävien signaalitaajuuksien jännitetasot prosentteina nimellisjännitteestä  $U_n$  [1, s. 22]

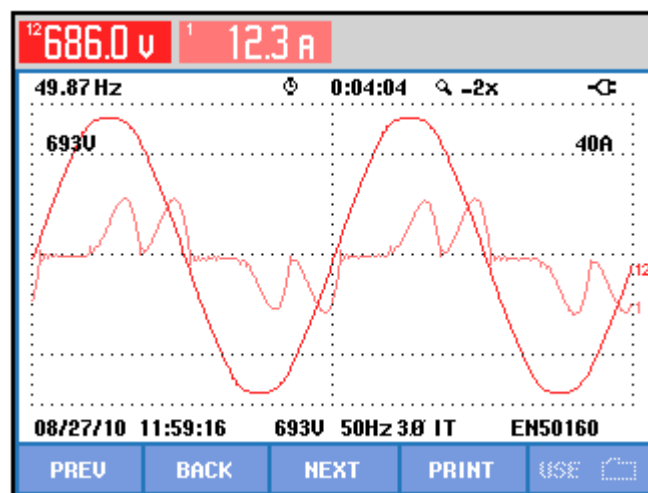


HUOM. Sähköverkon kantoaaltosignaaleja taajuudeltaan välillä 95 kHz...148,5 kHz voidaan käyttää asiakkaiden asennuksissa. Vaikka yleisen järjestelmän käyttö viestinsiirtoon asiakkaiden välillä ei ole sallittua, on yleisessä pienjänniteverkossa otettava tällä taajuusalueella huomioon jännitteet 1,4 V saakka. Koska viereiset viestinsiirtojärjestelmät voivat vaikuttaa toisiinsa, saattaa olla tarpeellista, että asiakas asentaa viestinsiirtojärjestelmänsä sopivan suojauksen. [1, s. 22].

## 2.3 Yliaallot

Vaihtosähkötekniikassa jännitteen tai virran käyrämuodon poiketessa normaalista sinimuodosta voidaan sen ajatella muodostuvan useasta eri taajuisesta taajuuskomponentista, jotka ovat summautuneet perustaajuuden kanssa, jolloin puhutaan jännitteen ja virran säröytymisestä. Nämä eritaajuiset taajuuskomponentit vaihtosähköverkossa ovat yliaaltoja, jotka ovat enimmäkseen perusaaltotaajuuden sinimuotoisia monikertoja eli harmonisia yliaaltoja.

Runsaasti yliaaltainen verkon tilanne on todella epäsuotuisa sen laitteille, koska sähköjärjestelmät on suunniteltu toimimaan normaalilla lineaarisella sinimuotoisella jännitteellä. Verkossa esiintyy myös epäharmonisia yliaaltoja, mutta ne eivät ole toistaiseksi lähellekään yhtä yleisiä kuin harmoniset yliaallot, eivätkä tästä johtuen aiheuta suurempia ongelmia verkon tilanteeseen. [7: IV, s. 1.]

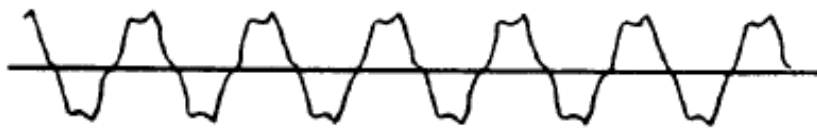


Kuva 6. Taajuusmuuttajan ottama puhdas jänniteaalto, ja voimakkaasti yliaaltoutunut virta

Kuvan 6 kaltaisessa tilanteessa taajuusmuuttajan voimakas yliaaltosisältö ei välttämättä aiheuta jännitesäröä verkon impedansseissa, mikäli verkko on hyvin mitoitettu.

Tarkastellessa yleisesti sähkötekniikan komponentteja ja sen laitteiston toimintaa oletetaan laitteiden olevan virran ja jännitteen suhteen ominaisuuksiltaan lineaarisia. Näin onkin useimmissa tapauksissa riittävän tarkasti, vaikka käytännössä sähköjärjestelmät sisältävät runsaasti laitteita, joiden toimintaan liittyy epälineaarisia ilmiöitä. Esimerkiksi pienikin muuntajan toisioon yliaallon aiheuttama tasavirta kyllästää rautasydäntä ja magnetoimisvirtaan syntyy yliaaltoja. [7: IV, s. 7.]

Tällaiset epälineaaristen komponenttien verkosta ottamat ja verkkoon syöttämät virrat aiheuttavat verkkojännitteen säröytymistä. Verkkojännitteen säröytyminen muodostuu perustaaajuudesta poikkeavien epäsinimuotoisten virtojen aiheuttamista jännitehäviöistä verkon impedansseissa. Tämä säröytynyt jännite muodostaa sinimuodosta poikkeavia virtoja lineaarisillakin komponenteilla. Jännitteen säröytymistä aiheuttavat jonkin verran myös generaattoreiden, moottoreiden ja muuntajien lievät epälineaarisuudet. [8, s. 26.]



*Kuva 7. Harmonisten yliaaltojen säröyttämä jännite [4, s. 4]*



*Kuva 8. Epäharmonisten yliaaltojen säröyttämä jännite [4, s. 4]*

Virran ja jännitteen säröytynyttä käyrämuotoa voidaan yleensä käsitellä jaksollisesti vaihtelevina suureina. Tällaiset siniaallot voidaan matemaattisesti esittää syntyneen useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta komponentista. Kirjallisuudessa on osoitettu, että jokaista funktiota voidaan kuvata määrättyllä välillä Fourier'n sarjalla, kun kyseessä on jaksollinen funktio.

Jaksollinen jännitteen funktio  $u(t)$ , voidaan esittää:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

Jossa:

$n$  on Kokonaisluku

$T$  on Jaksonpituus

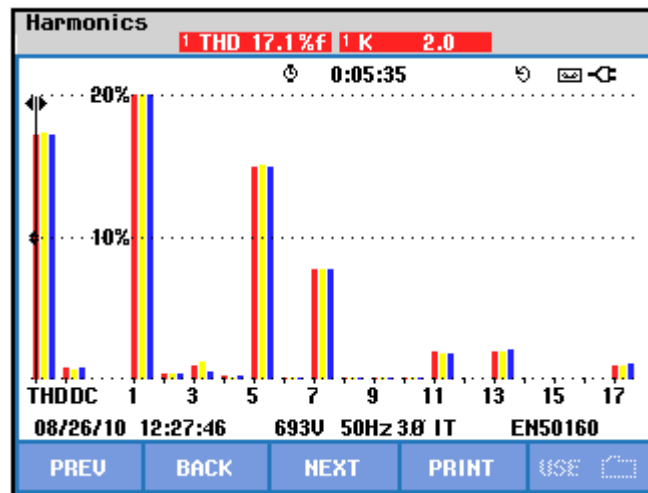
$U_0$  on Jännitteen tasakomponentti

$A_n$  ja  $B_n$  ovat Fourier'n sarjan kertoimia.

Tämä sarjakehitelmä voidaan saattaa myös muotoon, jossa kukin taajuuskomponentti on määritelty amplitudinsa  $\hat{u}_n$  ja nollavaihekulmansa  $a_n$  avulla

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{u}_n \sin(n\omega t + a_n) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \sin(n2f_1 t + a_n) \quad (2)$$

Tämän sarjakehitelmän avulla jaksollinen epäsinimuotoinen funktio voidaan esittää tasakomponentin, perustaajuisen komponentin ja harmonisten yliaaltojen summana. [8, s. 26.]



Kuva 9. Eräs fourier'n sarjan spektrimuunnos

SFS-EN 50160-standardissa on määritelty sallitut rajat jännitesärölle. Standardi kertoo, että normaaleissa käyttöolosuhteissa, jokaisen viikon aikana, 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 1 annettu arvo.

Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen (mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka) tulee olla yhtä suuri tai pienempi kuin 8 %.

Taulukko 1. SFS-EN 50160 rajat jännitesärölle [1, s. 26]

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

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

Standardissa ei ole säädetty epäharmonisesta jännitesäröstä sen vähäisyyden vuoksi. Todennäköisesti tilanteeseen tulee muutoksia, mikäli jännitesäröt lisääntyvät tulevaisuudessa. [1, s. 26.]

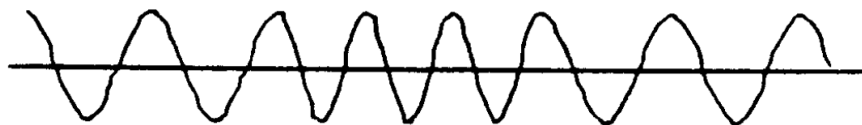
## 2.4 Verkkoataajuus

Sähkötekniikassa taajuus on pääosin vaihtosähköverkon ominaisuus, joka muodostuu sähkögeneraattorin navoilta koneen roottorin pyöriessä. Taajuuden suuruus riippuu generaattorin pyörimisnopeudesta sekä sen napaparien lukumäärästä. Suomessa ja yleisesti Euroopassa on käytössä 50 Hz:n taajuus, kun taas esimerkiksi Amerikassa käytetään 60 Hz:n taajuutta.

Taajuuspoikkeamat ovat hyvin harvinaisia Suomen kaltaisten suurten verkkojen alueella, jossa monen maan kantaverkot yhdistyvät, koska normaalit kuormamuutokset eivät muuta suhteellisesti verkon kuormatilannetta merkittävästi. Tällöin puhutaan niin sanotusti hyvin jäykästä verkosta. Taajuuspoikkeamat ovat kuitenkin mahdollisia hyvin suurissa kuormitustilanteissa. Yleisesti näissäkään tilanteissa jäykissä verkoissa taajuuden muutokset eivät ole kovin suuria, korkeintaan yhden hertsin luokkaa.

Poikkeamat ovat yleisempiä pienillä jakelualueilla kuten varavoimakone- tai saarekekäyttöillä, koska pienten koneiden ohjaus- ja säätölaitteet eivät ehdi sähköverkon suhteellisesti suuriin kuormamuutoksiin mukaan. Tällaisissa pienissä verkoissa muutaman hertsin huojunta on normaalia.

Taajuuden muutokset voivat aiheuttaa ongelmia laitteilla, jotka ovat mitoitettu tietylle taajuudelle, tai esimerkiksi tietylle pyörimisnopeudelle. Taajuuden pudotessa esimerkiksi oikosulkumoottorin nopeus putoaa. Taajuuden nouseminen ja laskeminen muuttaa myös jännitettä. [4, s. 2.]



Kuva 10. Taajuuden vaihtelua [4, s. 2]

Suomen sähkönlaatustandardissa SFS-EN 50160 on taajuudelle asetettu rajat, joissa sen tulee pysyä. Standardin mukaan mittaus tehdään 10 sekunnin jaksojen keskiarvoista keskeytykset poisluettuna viikon ajalta.

Standardinlaatu: 50Hz  $\pm$  1 % on 99,5 % vuodesta ja 50 Hz + 4 % / -6 % 100 % ajasta.

Lisäksi ST 52.20-kortissa mainitaan arvot normaalilaadulle sekä korkealle laadulle.

Normaali laatu:  $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$  on  $100 \%$  ajasta.

Korkea laatu:  $50 \text{ Hz} \pm 0,5 \%$  on  $100 \%$  ajasta.

Pohjoismaiden yhteiskäytössä taajuus on vaihdellut normaalikäytöissä  $\pm 0,1 \text{ Hz}$ . [3, s. 2.]

### **3 PÄTÖ- JA LOISTEHON SÄÄTÖ**

Teollisuuden sähköverkko on täynnä erilaisia sähkölaitteita, joiden toiminta tarvitsee pätötehon lisäksi loistehoa. Sähkötekniikassa sähköenergian muuntaminen mekaaniseksi energiaksi edellyttää voiman tai vääntömomentin kehittämistä. Tämän mekaanisen energian luomiseksi tarvitaan sähkövirta ja magneettikenttä. Magneettikenttä saadaan aikaiseksi tavallisimmin rautasydämen ja johtimesta kiedotun käämin avulla. Tällaiset komponentit pyrkivät hidastamaan virran muutosta, jolloin virta jää jälkeen jännitteestä niin, että virran ja jännitteen välille syntyy vaihesiirtokulma.

Koska vaihtosähkötekniikassa magneettikenttään varastoitunut energia heilahtelee kaksinkertaisella verkon taajuudella energialähteen ja kuormituspisteen välillä, aiheuttaa se johdossa virtalämpöhäviöitä. Tämän magnetointienergian siirtäminen aikayksikössä kuormituksen ja generaattorin välillä on induktiivista loistehoa.

Vaikka loisteho itsessään ei ole sähkön laadullinen vaan pikemminkin ominaisuudellinen komponentti, on se tässä insinööriyössä läheinen ja tärkeä osa käsiteltäväksi. Loisteho ja sen kompensointi vaikuttavat suurelta osin sähköverkon siirtokykyyn ja toimintaan, joten on tärkeää ymmärtää tämän sähkökomponentin luonne suunniteltaessa teollisuuden sähköverkkoja mahdollisimman optimoidun sähkönkäytön saavuttamiseksi.

Loisteho vaikuttaa paljon sähköverkon toimintaan muutenkin kuin vain varaamalla verkon siirtokapasiteettia pätöteholta. Loisteho lisää muuntajien jännite-, teho- ja energiahäviöitä niin normaaleissa käyttö- kuin varasyöttötilanteissakin. Pätöteho- ja energiahäviöt loistehon siirrossa nostavat sähkönsiirtokustannuksia pelkkään pätötehon siirtoon nähden.

Loistehon siirto aiheuttaa sen verkon kapasiteetin varauksen takia suuria kustannuksia, joten on erityisen tärkeää tuottaa se mahdollisimman lähellä kulutuspistettä kalliiden siirtovaihtoehtojen sijaan. Kantaverkkoyhtiöt ovatkin asettaneet loistehosiirtoon suhteellisen korkeahintaiset tariffit pelkkään pätötehon siirtoon verrattuna. Tämän tarkoitus on vähentää loistehon siirtoa kantaverkossa. Menetelmällä tavoitellaan kansantaloudellista optimointia kantaverkosta oton ja jakeluverkonhaltijan oman kompensoinnin kesken, jolloin jakeluverkonhaltija siirtää osan kompensointivelvoitteestaan loistehomaksulla sähkönkäyttäjille.

Pätö- ja loistehon säätö on erityisen tärkeää myös verkon stabiilisuuden ylläpitämiseksi. Kehitettävän tehon tarve muokkautuu verkon kuormien perusteella, joten on tärkeää, että verkossa on kohtuullinen määrä tuotantokapasiteettia varavoimana. Hetkellinen tehotasapaino koskee sekä pätö- että loistehoa.

Pätötehon nopeat kuormitusmuutokset näkyvät verkon taajuuden muutoksena. Tällaisen nopean kuormitusmuutoksen vaikutus taajuuteen jää kuitenkin hyvin pieneksi, mikäli verkossa on esimerkiksi suuri määrä tahtikoneita, jotka pyrkivät tasoittamaan verkon taajuuden poikkeamia kuten Suomen tilanteessa. Verkon loistehomuutokset näkyvät verkon jännitetason muutoksina. Voidaan siis sanoa, että verkon pätötehomuutokset vaikuttavat verkon taajuuteen ja loistehomuutokset verkon jännitteeseen.

Loistehon säätämiseen teollisuudessa on käytännössä kahta eri tapaa. Loisteho tuotetaan yleisimmin verkkoon kytkemällä verkon kanssa rinnan kondensaattoriparistoja. Vaihtelevissa loistehotilanteissa kondensaattoreita asetetaan rinnan useita, joita tehotilanteen mukaan kytketään päälle ja pois. Tämän säätelyn suorittaa automaattinen loistehonsäätäjä, joka mittaa verkon loistehotilanteen ja pyrkii yhdistämään tilanteen mukaan parhaan kytkennän, jolla saavutetaan mahdollisimman hyvä tehokerroin. [9, s. 112, 122-123.]



*Kuva 11. Isoverin TAG-keskuksen loistehosäätäjäyksikkö*



*Kuva 12. Estokelallinen kondensaattoriparistokytkentä [10, s. 9]*

Toinen tapa loistehon säätämiseen on tahtikoneen yli- tai alimagnetointi, jolloin saadaan vastaavasti verkkoon lisättyä induktiivista tai kapasitiivista loistehoa. Tällä tavalla voidaan johonkin prosessiin valitusta koneesta ottaa samalla prosessin tarvitsema loisteho. Esimerkiksi tilanne, jossa on 3 sähkökoneita, joista yksi on tahtikone ja kaksi oikosulkukonetta. Tällaisessa tilanteessa voidaan tahtikoneen ylimagnetoinnilla tuottaa molempien oikosulkukoneiden vaatima magnetointiin tarvittava loisteho. [9, s. 123.]



## Resonanssit

Kompensointilaitteiden hankintaa suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon verkon yliaalto-tilanne. Nämä yliaaltoisuudet on huomioitava, koska liitettäessä kompensointilaitteita verkkoon syntyy rinnakkais-, sekä sarjaresonanssiipiirejä.

Resonanssiipiirit ovat vaaraksi laitteistolle jos kompensoitavassa verkossa on suuri määrä yliaaltoisuutta. Kuristamattomasta kondensaattoriparistosta syntyy verkkoon tällainen yliaaltoja vahvistava resonanssiipiiri. Tämä mekanismi vahvistaa yliaallot pienjänniteverkoissa tyypillisesti 1...5 ja keskijänniteverkossa jopa 10...20 kertaa alkutilannetta suuremmaksi. Kyseiset resonanssitilanteet useimmiten nostavat laitteiston virrat niin suuriksi, että laitteisto vaarantuu ja kompensointiin käytettävät kondensaattorit rikkoutuvat.[8, s. 65.]



Kuva 13. Resonanssitilanteen sijaiskytkentä [8, s. 65 lähdettä mukaillen]

Resonanssin yliaaltoja vahvistava ominaisuus riippuu siitä kuinka lähellä yliaaltojen taajuus on verkon resonanssitaajuutta. Verkon ja kuristamattoman kondensaattoripariston välinen resonanssitaajuus saadaan laskettua seuraavalla yhtälöllä. [11, s. 22.]

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \cdot f_n$$

(3)

Jossa:

$f_r$  on rinnakkaisresonanssitaajuus [Hz]

$S_k$  on verkon oikosulkuteho [kVA]

$Q_c$  on kompensointiteho [kVAr]

$f_n$  on verkon nimellistaajuus [Hz]. [8, s. 22.]

## 4 LAADUN PARANTAMINEN

Sähköverkon laatuun vaikuttavia häiriöitä vastaan on olemassa paljon erilaisia häiriöitä poistavia ratkaisuja. Tällaisia korjausmenetelmiä olisi järkevää miettiä, jo ennen kuin häiriöt alkavat vaikuttaa tuotantoon ja voivat tuoda suuriakin tappioita.

Laadunparannustarpeet riippuvat tuotannon tyypistä, eli minkälaisia tuotannon laitteet ovat. Tarve riippuu siitä, miten laitteisto kestää esimerkiksi transientteja, ja onko laitteisto mitoitettu niin tiukaksi, ettei se enää kestä häiriöiden aiheuttamaa lisäkuormitusta. Esimerkiksi pelkän transienttisuojan lisääminen on kohtuullisen halpaa, jos sitä verrataan yliaaltojen rasittamaa tiukaksi mitoitettun suurtehomuuntajan vaihtamiseen.

Työn yliaaltopainotteisuudesta johtuen seuraavat laadunparannusmenetelmät käsittelevät ainoastaan yliaaltojen poistamiseen tarkoitettuja ratkaisuja.

### 4.1 Verkon mitoitus

Koska yliaaltovirtojen kulkuun ja säröytymiseen vaikuttavat pitkälti verkon impedanssit, voidaan jännitesärön muodostumiseen vaikuttaa paljon verkon komponenttien mitoittamisella. Mikäli verkon suunnittelutilanteessa on tiedossa verkon suuri yliaaltopitoisuus, voidaan verkon muuntajia ylimitoittaa niin että niiden impedanssit jäävät suhteellisen pieneksi kulutettuun tehoon nähden. Tällä tavoin yliaaltovirrat eivät säröydy niin vahvasti pieniksi jäävissä impedansseissa ja aiheuta laitteistoa häiritsevää jännitesäröä. Verkon impedanssiin vaikuttaa myös muut komponentit kuten siirtotiet itsessään.

Vaikka osa yliaalloista poistuu verkosta muuttuessaan siirtoteissä lämmöksi, niin suurin osa niistä kuitenkin jatkaa matkaansa hyvin mitoitettun verkon muihin pisteisiin ja summautuu toisten lähteiden aiheuttamien yliaaltojen kanssa. Tällä tavoin tiettyyn pisteeseen kertyvät yliaallot voidaan suodattaa keskitetysti.

Yliaaltojen siirtyminen suoraan jakeluverkkoon on toistaiseksi vielä ongelma, koska määräykset eivät määrää rajoja kuluttajan tuottamille yliaalloille. Tästä johtuen yliaallot siirtyvätkin monesti sähkön tuottajan ongelmaksi ellei erillisiä sopimuksia niiden rajoiksi aseteta. [7: IV, s. 8.]

## 4.2 Laitevalinnat

Yliaaltojen syntyyn vaikuttavat useat seikat, mutta yleisin ja suurin yliaaltolähde on kuitenkin suuntaajat. Esimerkiksi taajuusmuuttajakäytön aiheuttamat yliaallot riippuvat pitkälti laitteiston tekniikasta. 6-pulssinen tasasuuntaaja aiheuttaa huomattavasti enemmän yliaaltoja kuin 12-pulssinen, mutta on paljon edullisempi valmistaa. [11, s. 19.]

Kuitenkaan kaikkiin yliaaltolähteisiin ei voida vaikuttaa pelkillä laitevalinnoilla. Tällaisia häiriölähteinä toimivia laitteita ovat mm. valokaariuunit jotka tuottavat laajan spektrin erilaisia yliaaltotaajuuksia. [12, s. 15 – 16, 35.]

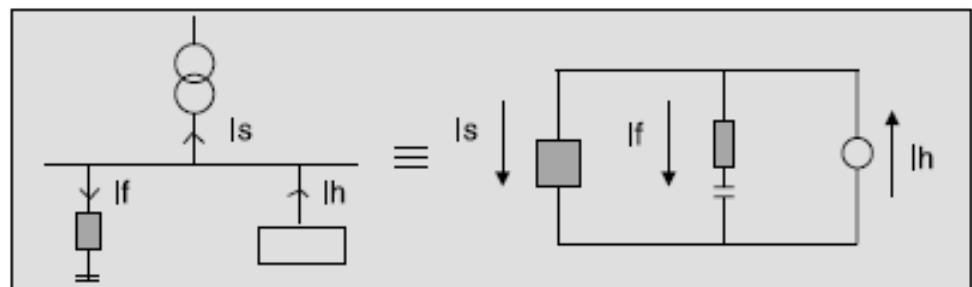
## 4.3 Suotimet

Sähköverkossa ilmaantuvat yliaallot voidaan suodattaa yksinkertaisin sekä kehittyneemmin menetelmin käyttäen sähkön laatua parantavia suodattimia. Näillä suodattimilla saadaan sähköverkosta poistettua yliaaltoisuutta ja samalla kompensoitua loistehon tarvetta, joita esimerkiksi moottorikäytöt ja valaistus aiheuttavat.

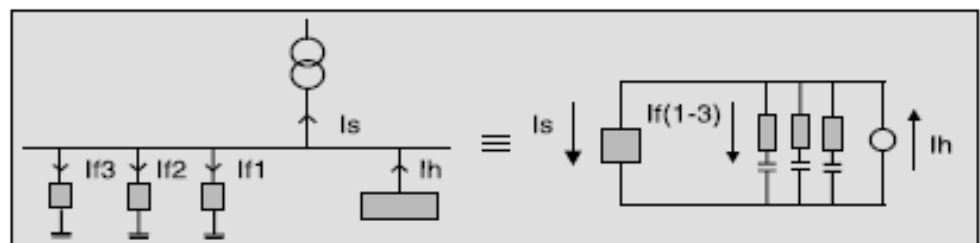
Oikeanlaisen suodattimen valintaan vaikuttavat sähkön laadun tilanne ja hyvän laadun tarve, verkon mitoitus sekä mahdolliset tulevaisuuden lisäykset. Suodattaminen kannattaa erityisesti silloin, kun yliaaltopitoisuus on hyvin suuri. Tällaisessa tilanteessa suodatin maksaa itsensä ajan kanssa takaisin, koska se vähentää yliaaltojen aiheuttamia tehohäviöitä ja lisää sähkölaitteiston käyttöikä. Riippuen sähköverkosta saattaa suodattaminen olla hyvinkin halpaa, mutta hankalissa sähkökäytöissä suodattamisen monimutkaisuuden takia kustannukset saattavat kasvaa liian isoiksi verrattuna siitä saataviin hyötyihin.

#### 4.3.1 Passiivisuodin

Passiivisuodattimia on erilaisia, yhdelle, tai useammalle yksittäiselle taajuudelle viritetty passiivisuodin sekä monelle taajuudelle viritetty passiivisuodin, eli laajakaistainen suodin. Useamman kuin kolmen yksittäisen yliaaltotaajuuden toteuttaminen on liian kallista ja hankalaa, joten useamman taajuuden yliaallot kannattaa suodattaa muilla keinoilla. Passiivisuotimet eivät käytännössä tuhoa yliaaltoja, vaan ne ohjaavat verkon yliaaltovirrat niiden kautta muodostuneen pieni-impedanssisen kulkutien kautta pois verkosta, jolloin ne eivät synnytä merkittävästi jännitesäröä.



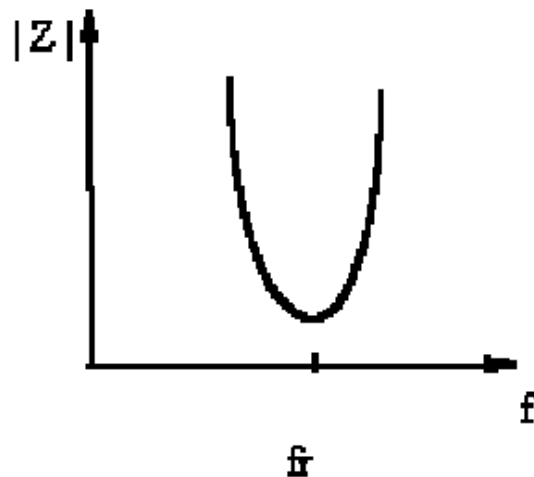
Kuva 14. Yhden taajuuden passiivisuotimen sijaiskytkentä [13, s. 24]



Kuva 15. Useamman taajuuden passiivisuotimen sijaiskytkentä [13, s. 24]

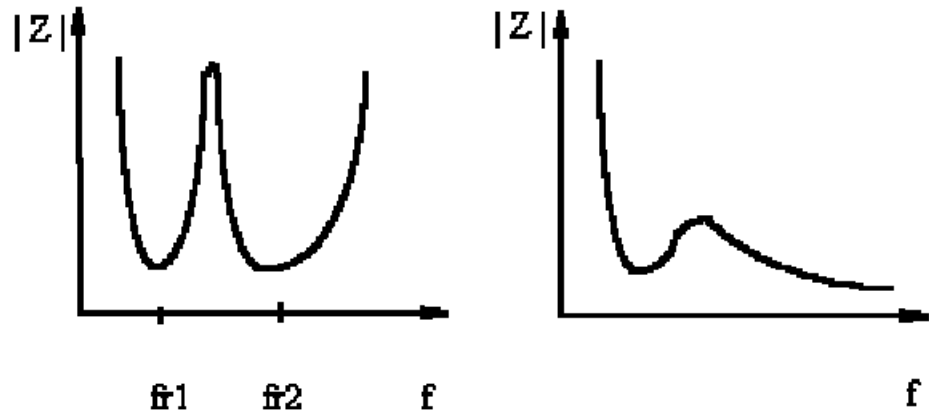
Yhdelle taajuudelle viritetty passiivisuodin on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen. Se on käytännössä verkon kanssa rinnan kytketty kondensaattorin ja kuristimen sarjaan kytkentä. Tällainen ratkaisu on erinomainen, kun verkossa syntyy suurimmaksi osaksi vain yhtä yliaaltokomponenttia. Esimerkiksi taajuusmuuttajakäytöissä muodostuu paljon viidettä yliaaltoa, jonka taajuus on 250 Hz.

Vaihtosähkön käyttäytymisen vuoksi voidaan kelakondensaattoriparistolla rakentaa juuri 250 Hz:n alueelle muodostuva matalaimpedanssinen poistumistie viidennelle yliaallolle. Tietyllä taajuusalueella saadaan mitattua kelakondensaattoriparisto päästämään kyseisen taajuusalueen virrat esimerkiksi maahan. Perustaajuudella tämä impedanssi on käytännössä ääretön, joten normaalitaajuudella virrat eivät pääse siirtymään maahan.



Kuva 16. Yhden taajuuden suodattimen impedanssikäyrä [11, s. 32]

Monen taajuuden passiivisuodin toimii käytännössä samalla tavalla kuin yhden taajuuden passiivisuodin. Tässä ratkaisussa kytketään rinnan useille yliaaltotaajuuksille mitoitettuja kelakondensaattoriparistoja, jonka vaihtoehtona on piirin virittäminen laajemmalle kaistalle. Laajakaistasuodin, jota voidaan kutsua ylipäästösuodattimeksikin, tulisi virittää pienimmille merkittäville yliaaltotaajuuksille. [12, s. 32-33.]

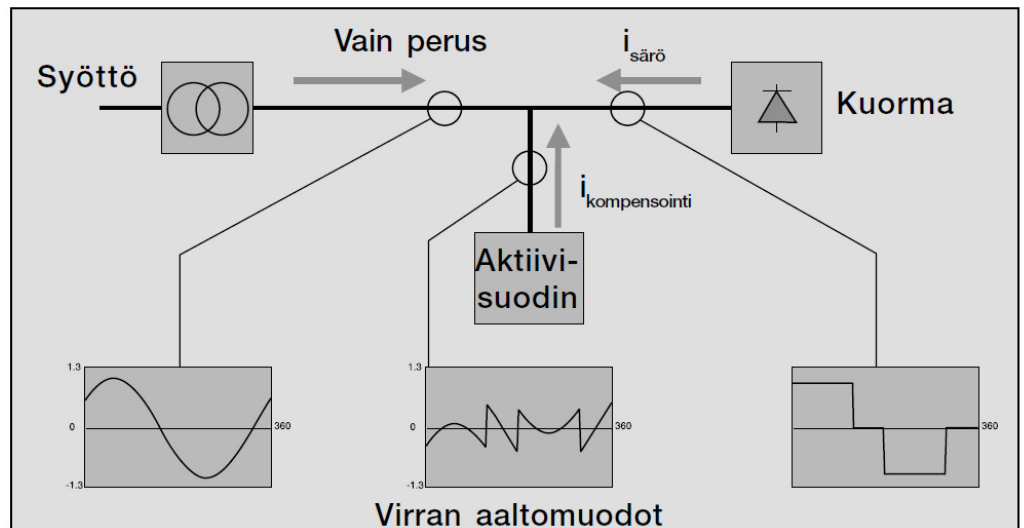


Kuva 17. Kahden taajuuden ja laajakaistaisen suodattimen impedanssikäyrät [11, s. 33]

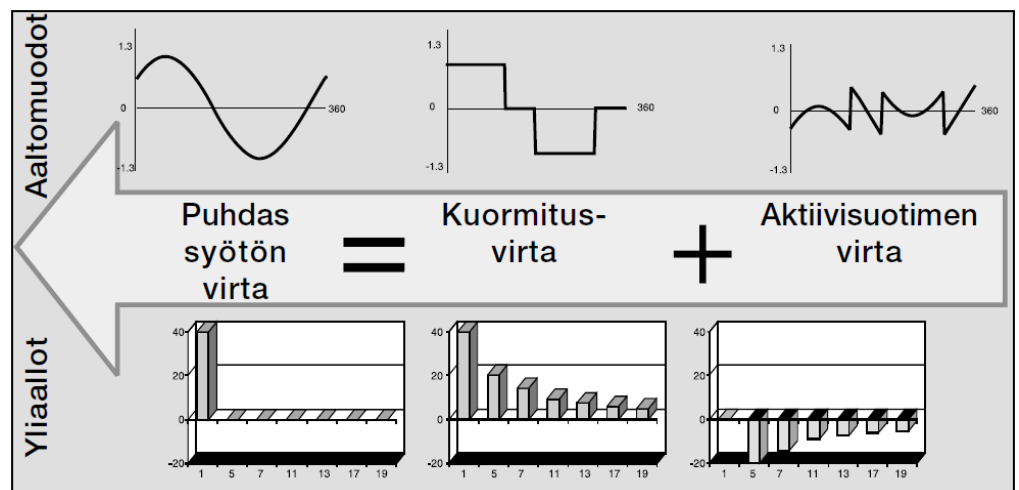
#### 4.3.2 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodatin on hyvin tehokas vaihtoehto yliaaltoisuuden vähentämiseen ja jopa poistamiseen. Nämä aktiiviset yliaaltosuodattimet eroavat passiivisuotimesta monella tapaa. Passiivisuotimet on mitoitettu toimimaan juuri tietyllä alueella suodattaen pois vain ennalta määrätyt yliaallot. Aktiivisuodatin taas poistaa verkosta yliaaltopitoisuuksia jopa 50 harmoniseen yliaaltoon asti. Aktiivisuodattimet mittaavat virran yliaaltokomponentit ja tuottavat niiden kanssa  $180^\circ$  asteen vaihesiirrossa olevan virran kumoten alkuperäisen yliaaltovirran.

Hyvin toteutettu aktiivisuodatin ei voi ylikuormittua, vaan se poistaa verkosta maksimissaan oman nimellistehonsa verran yliaaltoja ja jättää loput suodattamatta. Näin ollen aktiivisuodattimia voidaan kytkeä monta kappaletta rinnan, jolloin saadaan suodatustehoa lisättyä. Sen voi siis ajatella olevan virtalähde, jota vain ohjataan syöttämään haluttu virta yliaaltopulsseja vastaan. Toimintaperiaatteeltaan aktiivisuodin on samanlainen kuin taajuusmuuttaja jossa PWM-modulaatiolla tuotetaan haluttu virta invertterin kautta verkkoon. Näissä inverttereissä käytetään useimmiten IGBT-transistoreita mutta myös muita puolijohteita voidaan käyttää kuten GTO, ja MOSFET-transistoreita.



Kuva 18. Aktiivisuotimen toimintaperiaate [13, s. 25]



Kuva 19. Aktiivisuotimen toimintaperiaate [13, s. 25]

Aktiivisuodattimessa on paljon etuja verrattuna perinteisiin passiivisuodattimiin. Sen sijoitusriippumattomuus, mahdollisuus valita useampia suodatettavia taajuuksia, suodattaminen ilman loistehon tuottoa, pienempi tilantarve ja rinnakkaisresonanssiriskittömyys tekevät siitä paljon käytännöllisemmän verrattuna passiivisuodattimeen. Näiden ominaisuuksien vuoksi aktiivisuodattimen voi asentaa mihin tahansa verkon pisteeseen. Tärkeimmät kriteerit päätettäessä, käytetäänkö aktiivisuodatinta vai muita ratkaisuja ovat, kustannustehokkuus, säröä aiheuttavien kuormien laatu ja niiden sijainti.

Lisäksi aktiivisuodatin on riippumaton virran suunnasta, käyrämuodosta ja virtamuutoksen dynamiikasta. Lisäksi ole väliä, onko vaihesiirto induktiivinen, kapasitiivinen tai kuorma epäsymmetrinen. Verkon jännitteen laatu eikä impedanssi vaikuta suodattimen toimintaan.

Aktiivisuodattimet ovat toistaiseksi passiivisuodattimiin verrattuna hyvin kalliita, mutta niiden hyvän yliaaltosuodatuksen vuoksi ne ovat erinomainen valinta kohteisiin, joissa on hankalia epäsäännöllisiä yliaaltopitoisuuksia sekä herkkiä sähkölaitteita. Tällaisissa käytöissä aktiivisuodatin suojelee laitteita yliaaltojen aiheuttamilta rikkoontumisilta ja tehohäviöiltä, joten se maksaa itsensä todennäköisesti takaisin lyhyelläkin aikavälillä. [8, s. 62.]

## 5 SÄHKÖNLAADUN MITTAUKSET

Sähkön laadussa on monta komponenttia, jotka kukin vaikuttavat eritavoin laitteiston toimintaan. Standardissa SFS-EN 50160 on mainittu tärkeimmät näistä komponenteista. Tässä työssä painopisteenä ovat yliaallot ja niiden vaikutus tehtaan verkkoon, joten mittaukset ja niiden tulokset käsittelevät ainoastaan näitä sähkönlaadun komponentteja.

### 5.1 Mittauslaitteisto

Mittauksissa käytettiin sähkönlaadun mittauksiin tarkoitettua Fluke 435-sähkönlaadun mittaria. Kyseinen mittari mittaa standardin SFS-EN 50160 mainitsevat sähkön laadun komponentit. Mittarissa on myös oskilloskooppi, jota käytettiin virran ja jännitteen aaltomuotojen tallentamiseen.



Kuva 20. Fluke 435-sähkönlaadun mittari



Mittarin virtamittauspuoleen kuuluu 4 virranmittausta sisältäen 3-vaihejärjestelmän kaikki vaiheet L1, L2, L3 sekä nollavaiheen mittauksen. Virtojen mittaukseen käytettiin Fluken i430-flex taipuisia virtamittauskärkiä, jotka on helppo asettaa virtakiskojen ympärille. Kyseiset virtamittauskärjet muuntavat mitattavan virran mittarille sopivaksi. Mittari tulkitsee mitattua virtaa mittaajan asettamien oletusarvojen avulla.



*Kuva 21. Fluke i430 flex-virtamittauskärki*

Mittarin jännitemittauspuoleen kuuluu 5 sisääntuloa sisältäen L1, L2, L3, N ja maadoituksen mittauksen. Tässä mittauksessa jännitteen mittaukseen käytettiin Fluken TLS 430 hauenleuka sarjaa. Kyseisissä mittakärjissä ei ole minkäänlaista jännitteenalennusmekanismia, joten mittarille saapunut jännite on suoraan vaiheiden välinen jännite.



*Kuva 22. Fluke TLS 430-jännitemittaussarja*

## 5.2 Mittauspisteet

### **Saint-Gobainin, Isoverin tehtaan mitatut keskuksat ja lähdöt:**

- TAG. Keskus sisältää paljon tärkeitä toimintoja sekä joitain yliaaltovirtoja aiheuttavia komponentteja.

- KAG. Keskus sisältää pääosin suuria taajuusmuuttajakäyttöjä.
- LCK. Keskuksessa pääosin valaistuskuormaa.
- LCK:lta lähtevä pääkonttorin syöttö. Pääkonttorin kulutus on pääosin valaistusta ja ATK laitteistoa.

#### **Saint-gobainin Gyprocin tehtaan mitatut keskuksat:**

- *PK1*
- *PK2*
- *M1.1*
- *M1.2.*

Gyprocin mitatut keskuksat sisältävät koko tehtaan hyvin sekalaisen kuorman, kuten taajuusmuuttajia, valaistusta ja monenlaisia prosesseja.

### **5.3 Mittaustekniikka**

Keskuksien mittaukset suunniteltiin ja toteutettiin niin, että tehtaat olivat normaalissa sähkökuormituksessa. Tällä tavalla tehtaista saatiin mitattua normaalin tuotannon aiheuttamat sähkönlaadulliset komponentit.

Keskuksilta suoritettavat mittaukset mitattiin niin, että mittauskärjet yhdistettiin suoraan virtakiskoille ilman välimuuntajia. Tällä tavoin mittauksista saatiin luotettavimmat mittaustulokset.



*Kuva 23. Virtakiskojen jännite ja virtamittaus*

Mikäli mittaukset sisältävät lisäksi erillisiä jännite- tai virtamuuntajia, voi näiden ylimääräisten komponenttien impedanssit ja kytkennät vaikuttaa mitattavan sähkön olomuotoon, jolloin mittaustulosten tarkkuus heikentyy.

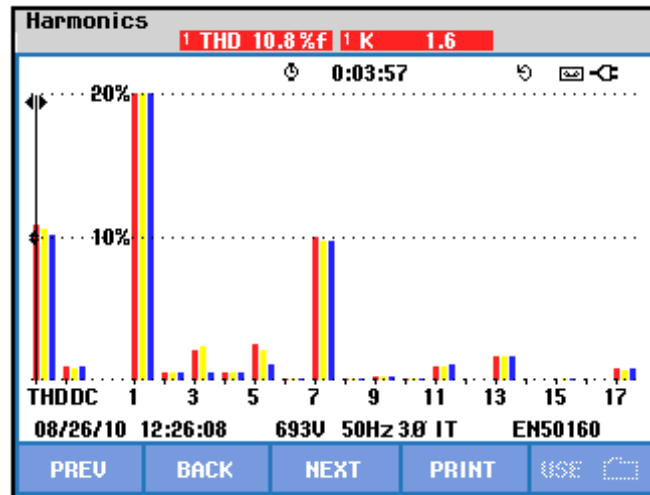
Kompensointipariston sisältävät mittauskohteet mitattiin kompensoinnilla ja ilman kompensointia. Näin toimien mahdolliset resonanssitilanteet ja muu yliaaltovaikutus verkkoon saatiin selville.

#### **5.4 Mittaustulokset ja kommentit**

##### **Isover, Hyvinkää**

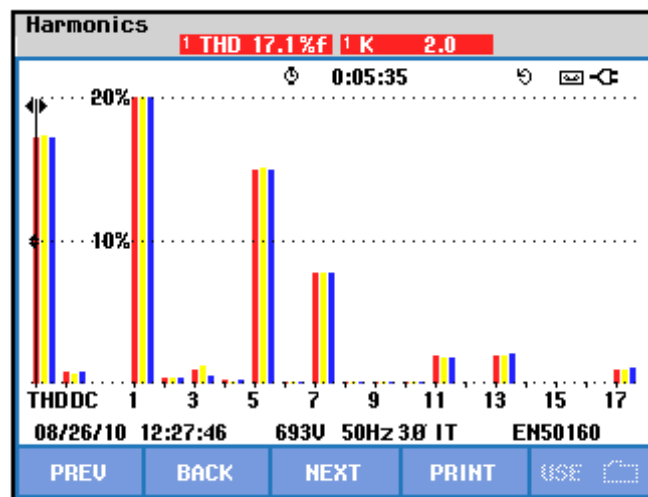
Isoverin Hyvinkään eristetehtaan mittauspisteet on valittu niiden kuormien perusteella. Mitatuilla alueilla on tyypillisiä yliaaltolähteitä kuten taajuusmuuttajia sekä loistevalaisimia.

##### **TAG mittaukset**



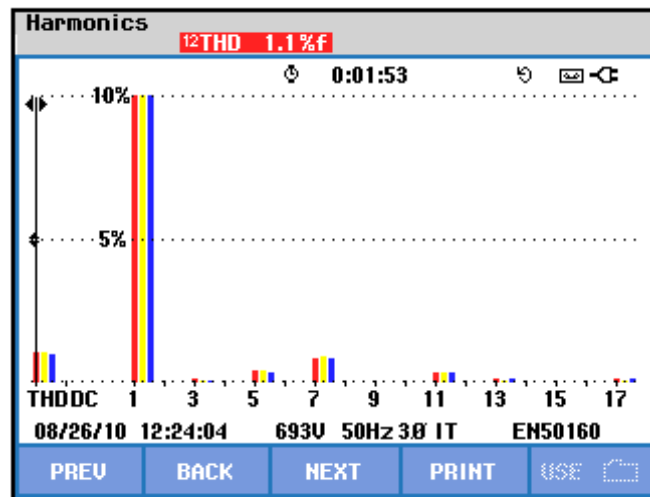
Kuva 24. TAG-yliaaltovirrat suotimella

TAG:n mitattu (kuva 24) yliaaltovirtojen THD-taso on n. 10 % mikä aiheutuu melkein täysin seitsemänneistä yliaallosta.



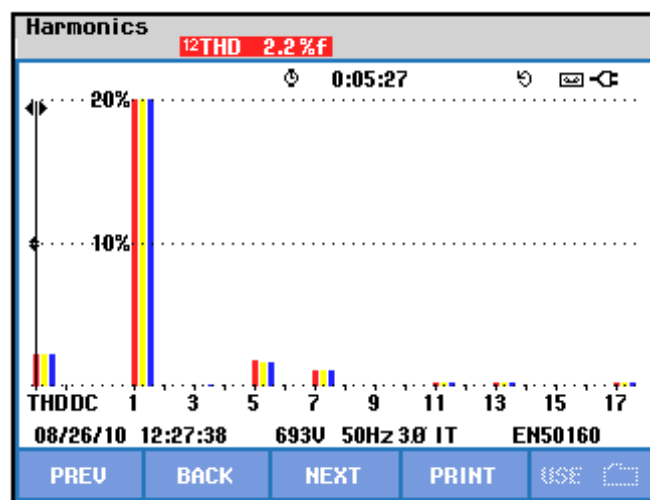
Kuva 25. TAG-yliaaltovirrat ilman suodinta

Kuvan 25 (s. 29) näyttämästä mittaustuloksesta selviää, että passiivisuodin toimii hyvin suodattaen melkein täysin viidennen yliaallon samalla laskien THD-tasoa n. 8 %.



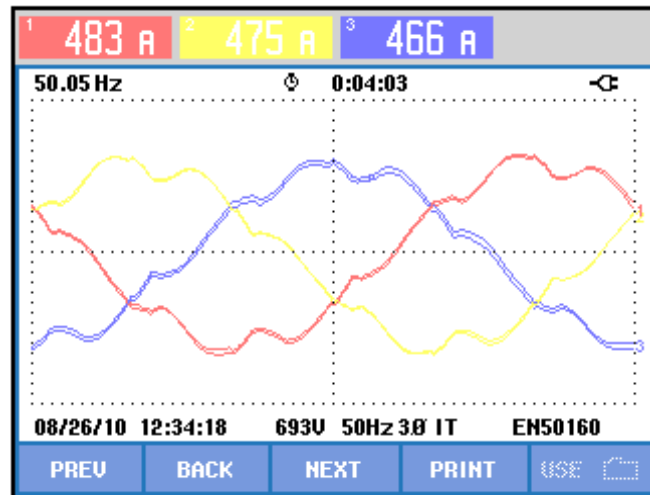
Kuva 26. TAG-jännitesäröt suotimella

Jännitesäröt pysyvät alle 3 %:n tasolla, joka on hyvä jännitesärötaso. Se ei aiheuta todennäköisimmin ongelmia tämän kaltaisessa sähkölaitteistossa.



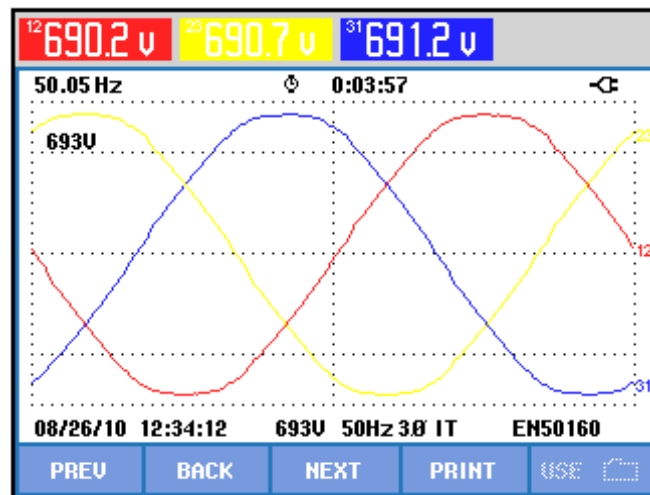
Kuva 27. TAG -jännitesäröt ilman suodinta

Suotimen poistaminen lisää hiukan viidennen yliaallon aiheuttamaa jännitesäröä mutta ei merkittävästi. Jännitesärö jää edelleen alle 3 %:n tasolle.



Kuva 28. TAG-virran oskilloskooppikuva suotimen kanssa

Virran yliaallot säröyttävät hieman TAG:n virran sinimuotoisuutta. Keskukselle on kytketty suoraan taajuusmuuttaja joka aiheuttaa suurimman osan sen yliaalloista. Kuvaaja on saanut hieman taajuusmuuttajan aiheuttamaa aaltomuotoa ja se on tunnistettavissa kuvaajasta.



Kuva 29. TAG-Jännitteen oskilloskooppikuva suotimella

Jännitteen oskilloskooppikuva kertoo saman kuin jännitesärön spektri esitys, eli yliaaltovirrat eivät juuri vaikuta jännitteen sinimuotoisuuteen.

## **TAG-kommentit**

TAG-keskus sisältää huomattavan määrän viidettä ja seitsemättä virran yliaaltoa. Keskuksen yhden taajuuden passiivisuodatus toimii hyvin 5:nen yliaallon poistamiseen mutta lisää hiukan seitsemättä virran yliaaltoa. Vaikka 7:s virran yliaalto jää 10 % tuntumaan ja nostaa samalla kokonaisvirtasärön n. 10 % suuruiseksi, se ei vaikuta keskukselle tulevaan jännitesäröön merkittävästi. Jännitesäröt jäävätkin hyvin mataliin lukemiin.

Jännitesärö jää hyvin pieneksi koska keskuksen syötön muuntajat ovat hyvin mitoitettuja, eikä virran särö näin ollen muutu merkittävästi muuntajan impedansseissa jännitesäröksi.

Jännitesäröjen jäädessä erinomaiselle tasolle keskuksen yliaaltotilanne on miellyttävä. Keskuksen yksitaajuinen passiivisuodin on hiukan vanhentunut, kun katsotaan verkon muuttunutta tilannetta ja kondensaattorien ikää. Mikäli loistehon suodatuksen estokelalliset kondensaattoriparistot alkavat olla käyttöikänsä päässä, kannattaa harkita yksitaajuisten passiivisuotimen vaihtamista kaksitaajuiseen viidettä ja seitsemättä yliaaltoa pienentävään passiivisuotimeen. Tällä tavoin saadaan myös suodatettua jäljelle jäänyt 7:s yliaalto mahdollisimman pieneksi.

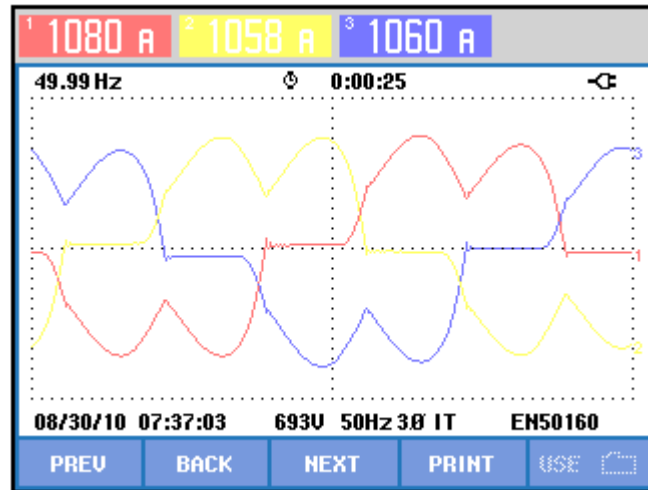
10 % virran THD ei yksinään todennäköisesti vaikuta tehtaan laitteiston toimintaan. Kuitenkin yliaaltojen summautuessa muissa kytkentäpisteissä se voi pahimmassa tapauksessa summautua muiden yliaaltolähteiden virtoihin aiheuttaen tästä johtuen suurentuneessa muodossaan ongelmia.

Yliaaltojen etenemistä on hyvin hankala ennustaa tämänkokoisessa tehtaan verkossa. Tämän takia on hyvä kunnostaa pienillä kustannuksilla korjattavat mahdollisia vikoja aiheuttavat yliaaltolähteet.

TAG-keskuksen yliaaltotasot ovat suhteellisen pieniä ja sähkönlaatu vaikuttaa mittaustulosten perusteella kiitettävältä. Mutta mikäli tehtaaseen tehdään hankintoja, kannattaa niiden aiheuttamia sähköverkon tilan muutoksia pitää silmällä, jotta yliaaltoisuus pysyy järkevällä tasolla, eikä arvaamattomia keskeytyksiä pääse niistä johtuen sattumaan.

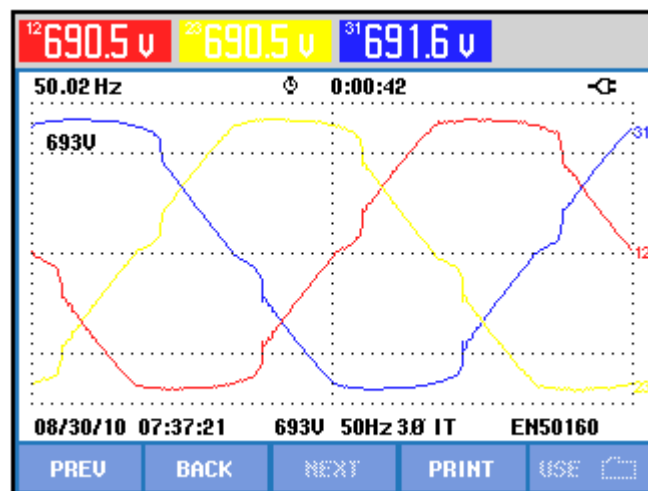
## KAG-mittaustulokset

KAG:n keskuksella on erittäin suuri yliaaltovirtapitoisuus, n. 30...40 % pääaallosta. Nämä virran yliaallot säröyttävät melko vahvasti jännitettä, jonka takia jännitesärö on parhaimmillaan melkein 8 %. Yliaallot koostuvat pääosin 5:stä ja 7:stä yliaallosta ja niiden monikerroista. KAG-keskuksen aikajanamittausten tulokset liitteessä 1.



Kuva 30. KAG-virran oskilloskooppikuva

Kuvassa 30 näkyy tyypillinen 3-vaiheisen taajuusmuuttajan aiheuttama virran säröytyminen.



Kuva 31. KAG-jännitteen oskilloskooppikuva

Oskilloskooppikuvista näkee, miten suhteellisen suuritehoiset (THD yli 35 %) yliaaltovirrat (kuva 30) aiheuttavat jännitteen käyrämuodon säröytymistä eli jännitesäröä (kuva 31).



### **KAG-kommentit**

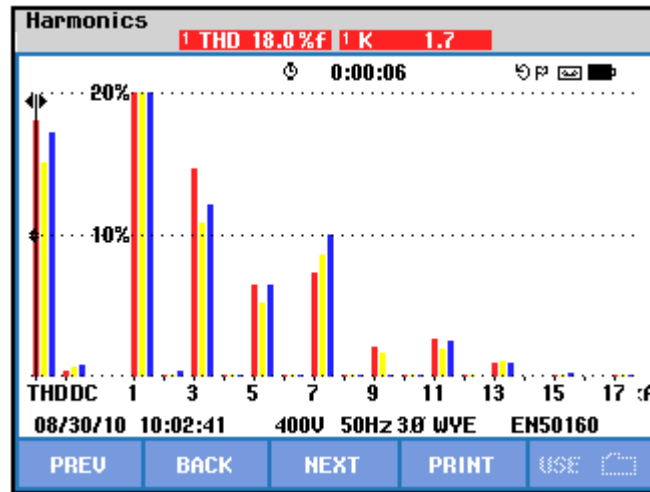
Tämä keskus sisältää käytännössä pelkästään isoja epäsäännöllisiä taajuusmuuttajakäyttöjä. Virran aaltomuoto on muodostunutkin klassiseksi taajuusmuuttajan aiheuttamaksi virran kuvaajaksi.

Keskuksen kiskoilta mitattu jännitteen oskilloskooppikuva (kuva18) näyttää jännitteen sinimuotoisuuden muuttuneen merkittävästi. Jännitteen käyrämuodon muutos johtuu virran yliaalloista muuttumisesta tehtaan verkon impedansseissa jännitesäröksi. Todennäköisesti suurin osa jännitesäröstä syntyy KAG-keskusta syöttävältä muuntajalta. Keskuksella oleva jännitesäröisyys on jo suhteellisen suurta joten sähkön laatu mitatussa pisteessä on heikohkoa. Tämänkokoiset jännitesärötasot voivat aiheuttaa herkässä laitteistossa ongelmia.

Keskus on rajattu hyvin omalle alueelleen, ja siihen ei ole kytketty mitään herkkiä laitteistoja. Vaikka keskuksen jännitesäröt ovat erittäin suuria, ei ole järkevää investoida tällaisen käytön tarvitsemaan aktiivisuodattimeen. Suuriin yliaaltovirtaisuuksiin käytetyt aktiivisuodattimet ovat erittäin kalliita ja kannattavuus niiden hankkimiselle tällaisessa tilanteessa on melkein mahdoton selvittää.

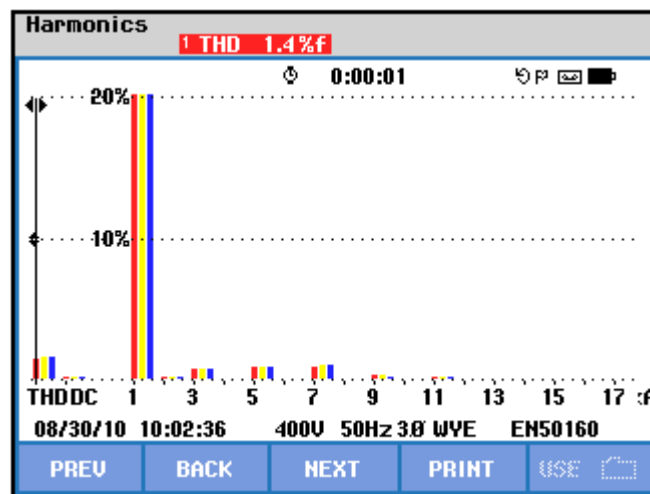
Keskusta syöttävän muuntajan arvoja, laitteistojen lämpötiloja ja jännitesäröjä on syytä pitää silmällä. Suuri jännitesärö voi johtaa laitteiston ylikuumentumiseen, vaikka sitä ei ylikuormitettaisi. Muuntajan ensiöpuolen yliaaltotilannetta on myös syytä tarkkailla, mikäli sieltä löytyy mahdollisia alennusmuuntajia sisältäviä mittauspisteitä.

## LCK-mittaustulokset



Kuva 32. LCK-yliaaltovirrat

Pääosin 3:nen 5:nen ja 7:nen yliaaltovirran aiheuttama THD-taso on n. 18 %. Keskuksessa hieman myös 9:tä, 11:ta ja 13:ta yliaaltovirtaa (kuva 34).



Kuva 33. LCK-jännitesärö

LCK-keskuksella olevat yliaaltovirrat eivät juurikaan säröytä keskuksen jännitettä (kuva 33).

Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N
V <sub>rms</sub>	227.73	227.24	228.53	0.20
V <sub>pk</sub>	326.0	325.4	326.4	0.3
CF	1.43	1.43	1.43	OL
Hz	49.979			
	L1	L2	L3	N
A <sub>rms</sub>	206	210	198	51
A <sub>pk</sub>	292	301	282	90
CF	1.42	1.44	1.43	1.75
08/30/10 10:03:02 400V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

Kuva 34. LCK-jännitteet ja virrat

LCK:n jännitteet ja virrat esitetään kuvassa 34. Tehon käyttö LCK:lla on melko symmetristä, mutta silti todennäköisesti 3:nen yliaallon summautunut virta nostattaa nolla-johtimen virtaa.

### LCK-kommentit

LCK on varastohallin keskus, jonka kuormana on pääosin valaistusta. Loistevalaisimet tuottavat kolmatta yliaaltoa, mikä näkyy mittaustuloksia tarkastellessakin. Keskukselta löytyy myös runsaasti viidettä ja seitsemättä yliaaltoa.

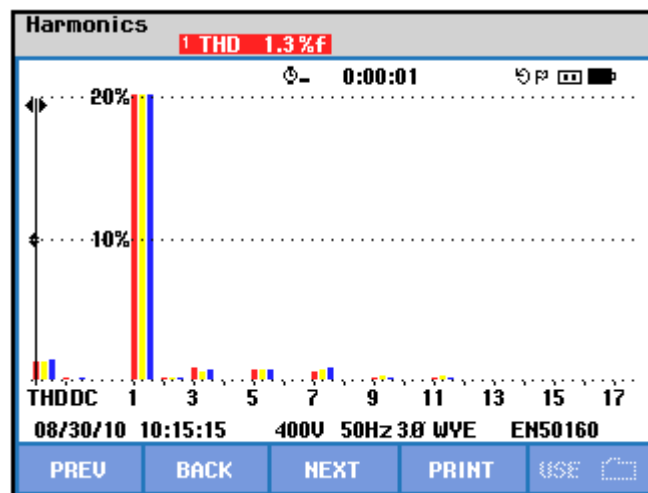
Kolmas yliaalto on yleisimpiä ongelmia juuri valaistuskuormissa. Tämä yliaalto on ongelmallinen, koska se summautuu nollajohtimeen. Mikäli syöttökaapelit on mitoitettu tiukasti voi tällainen runsaasti kolmatta yliaaltoa sisältävä keskus aiheuttaa ylikuormitusriskin syöttökaapeleihin. Mitatussa keskuksessa ylikuormituksen riskiä ei ole, koska se on reilusti ylimitoitettu tämänhetkisellemme käytölle.

THD-tasot keskuksessa nousee jokaisella vaiheella 15 ja 20 % väliin, joten yliaaltopitoisuutta voi pitää melko suurena. viidennen ja seitsemännen yliaallon lähteitä on vaikea ilman lisämittauksia arvioida. Kyseiset yliaallot voivat olla lähtöisin taajuusmuuttajista tai vastaavista laitteista.

Keskuksessa ei juuri esiinny jännitesäröä minkä syynä todennäköisimmin on muuntajien ja kaapeleiden pelivaran suoma pieni impedanssinen kulkutie. Yliaaltojen etenemistä on kuitenkin vaikea ennustaa, mutta todennäköisimmin suurin osa siirtyy seuraavana kytkentäpisteessä olevalle pääkytkinasemalle.

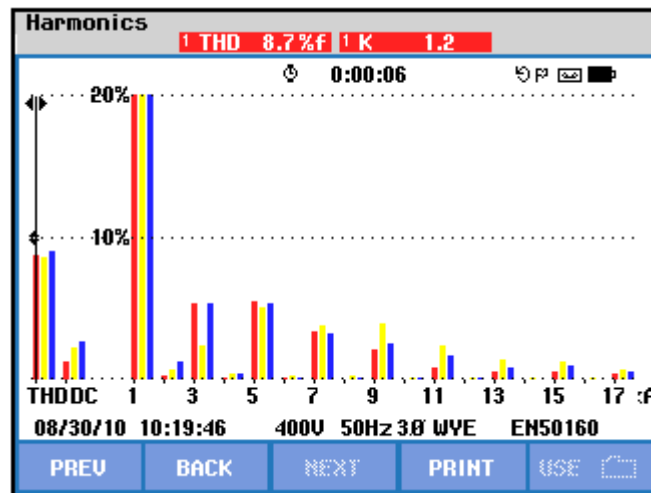
LCK:n jännitesäröjen jäädessä hyvin pieniksi ei yliaaltotilanne todennäköisesti aiheuta suuria ongelmia tässä kytkentäpisteessä. Kuitenkin suurehko yliaaltovirtojen määrä lisää melko varmasti yliaaltopitoisuutta tehtaan pääkytkinasemassa.

### Pääkonttorin syötön mittaustulokset



Kuva 35. Pääkonttorin syötön jännitesärö

Pääkonttorin syötössä ei ole juuri lainkaan jännitesäröä. Kolmannen, viidennen ja seitsemännen yliaallon aiheuttama jännitesärö on maksimissaan noin 2 %.



Kuva 36. Pääkonttorin syötön yliaaltovirrat

Yliaaltovirrat pysyvät pääkonttorin syötössä hyvin maltillisella tasolla. Tässä pisteessä mittarin ilmoittama THD-taso (kuva 36) on hiukan alle 10 %.

### Pääkonttorin syöttö kommentit

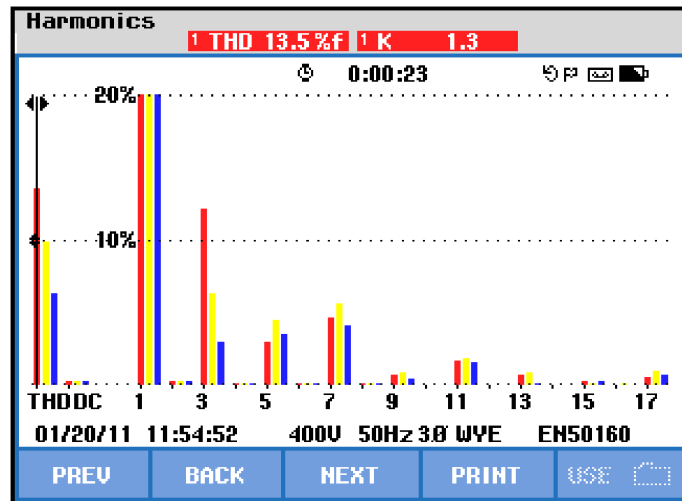
Yliaaltovirta ei juurikaan säröytä syötön jännitettä. Tästä johtuen pääkonttorin kuormat kuten tietokoneet tai valaistus eivät todennäköisesti häiriinny yliaaltotilanteesta.

### Gyproc, Kirkkonummi

Gyprocin Kirkkonummen mittaukset suoritettiin suoraan tehtaan pääsyötöiltä muuntajan toisiopuolelta. Mittaukset suoritettiin tehtaan normaalikuormalla, joten kaikki normaalikäytössä ilmenevät tehtaan kuormista aiheutuvat yliaallot näkyvät tuloksista.

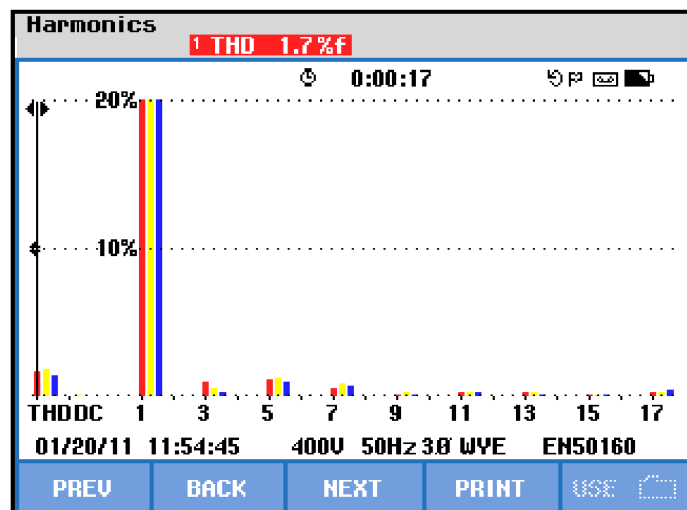
Mittaukset otettiin myös n.10 minuutin ajalta 1 sekunnin keskiarvoina poistamalla kompensointiparistot pois käytöstä osaksi aikaa mittausta. Poistamalla kompensointiparistot hetkellisesti käytöstä saatiin selville myös kompensoinnin vaikutus yliaaltoisuuteen.

## M1.1-mittaustulokset



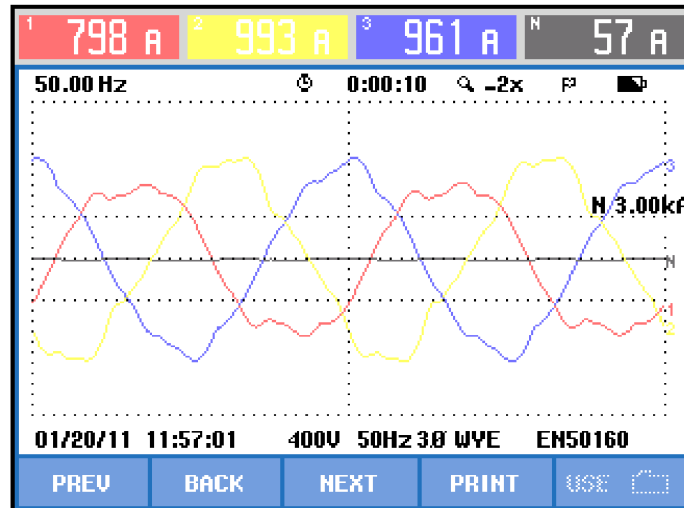
Kuva 37. Keskuksen M1.1-yliaaltovirrat

Tässä pisteessä virran 3:n vaiheen THD-arvot ovat noin 10 %. Kolmannen yliaallon osuus on runsaampaa L1-vaiheella. Suurempi kolmannen virran yliaallon pitoisuus juuri vaiheella L1 on tyypillistä, koska ensimmäiselle vaiheelle kytketään usein enemmän yksivaihekuormia kuin muille vaiheille.



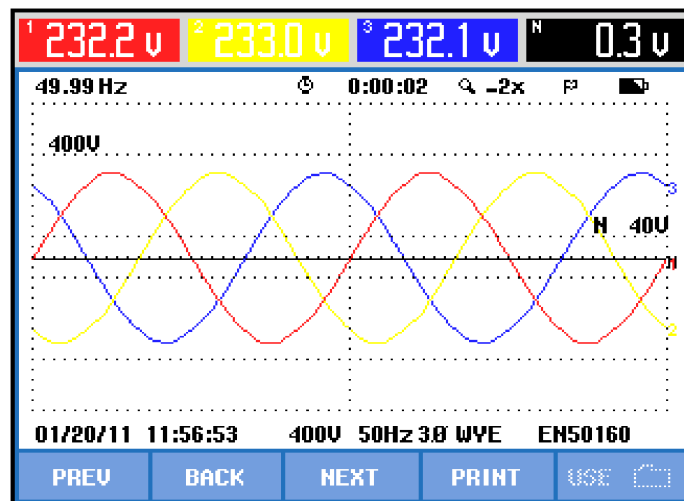
Kuva 38. Keskuksen M1.1-jännitesärö

Keskuksen jännitesärön THD-arvot ovat alle 3 % (kuva 38). Jännitesärön THD-arvo koostuu pienestä säröytymisestä 3:lla, 5:llä ja 7:llä yliaallolla.



Kuva 39. M1.1-virran kuvaaja

Epäsymmetrinen kuormien kytkentä aiheuttaa kuvan 39 kaltaisen siniaaltokuvaajien erilaisuuden. Ensimmäisen vaiheen suurempi 150 Hz:n yliaaltopitoisuus saa kuvaajan näyttämään enemmän kantiaalloita kuin muiden vaiheiden kuvaajat. Kolmannen yliaallon pitoisuus syntyy tyypillisistä yksivaihekuormista, kuten valaistuksesta.



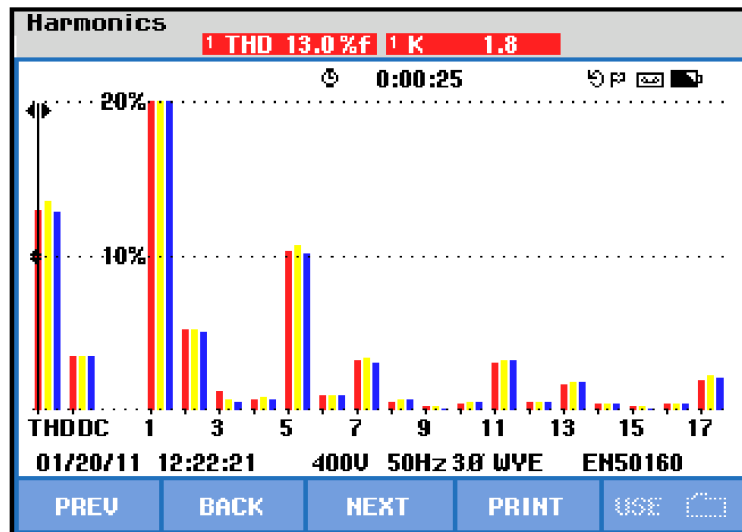
Kuva 40. M1.1-jännitteen kuvaaja

Jännitesäröä ei tällä keskuksella juuri ilmaantunut, joten jännitteen siniaaltoisuuskin on puhdasta.

### M1.1-kommentit

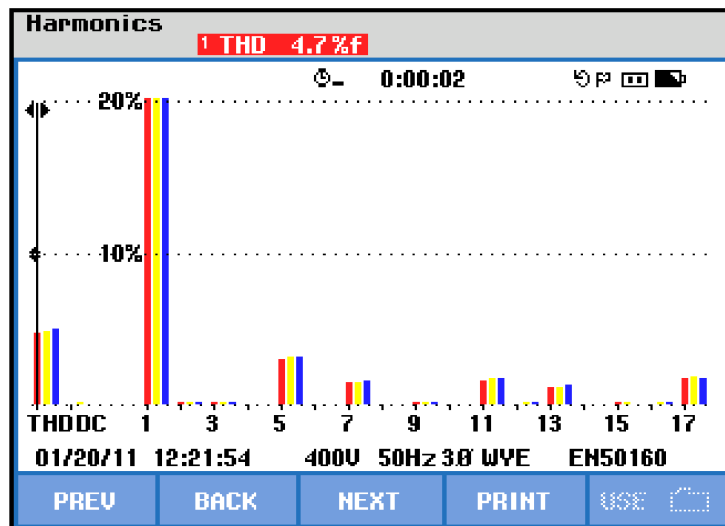
M1.1:n Syöttö sisältää selvästi eniten 3:tta yliaaltoa, joka viittaa valaistus-, tai muuhun yksivaihekuormaan. Virran yliaaltopitoisuus ei näytä aiheuttavan suurta jännitesäröä, joka on kiitettävällä tasolla mitatussa syötössä.

## M1.2-mittaustulokset



Kuva 41. M1.2-yliaaltovirrat

M1.2:n yliaaltovirtapitoisuuden (kuva 41) THD-arvo on n. 13 %. DC-komponentti on epätavallisen korkea n. 4 %. 100 Hz:n yliaaltovirtapitoisuus on epätavallisen runsasta n. 5 % pää-aallosta. Osassa järjestysluvultaan yli 11:sta yliaalloissa on epätavallisia arvoja.



Kuva 42. M1.2-jännitesärö

M1.2-jännitesärön (kuva 42) THD-arvo on koholla vaikka normaalin rajoissa. Jännitesärö 17:sta yliaallolla on yli standardin määräämän 2 %:n rajan.



Power & Energy				
FUND	0:00:00			
	L1	L2	L3	Total
kW	362.7	356.7	363.9	1083
kVA	368.8	364.1	371.8	1105
kVAR	67.1	72.7	76.1	215.9
PF	0.98	0.97	0.97	0.97
Cos $\phi$	0.98	0.98	0.98	
Arms	1602	1583	1617	
	L1	L2	L3	
Vrms	231.90	231.79	231.67	
01/20/11 12:22:37		400V 50Hz 3 $\phi$ WYE		EN50160
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

Kuva 43. M1.2-tehot

Keskuksen läpi kulkeva nimellisteho on n. 1.1 MW ja hyvän tehokertoimen ansiosta pätoheho lähes saman suuruinen.

### M1.2-kommentit

M1.2-syötössä on melko suuri n. 5 % THD-arvo jännitesärölle. Jännitesärön arvot pysyvät kuitenkin standardin hyväksymissä arvoissa, paitsi 17 järjestysluvun jännitesärö.

Tuloksissa esiintyy toista virran yliaaltoa n. 5 %, mikä voi olla merkki laitteiston viasta. Toista yliaaltoa synnyttää esimerkiksi myös teollisuudessa käytettävät syklokonvertterit.

Mittaustuloksissa esiintyy myös virran DC-komponenttia. Tämä tasasähkökomponentin lähde olisi hyvä selvittää, koska se aiheuttaa muuntajan rautasydämen vahvaa kyllästymistä. Rautasydämen kyllästyminen taas aiheuttaa suurta häviötehoa. Suositukset DC-komponentin maksimiksi ovatkin 2 % luokkaa. 1 % DC-komponentti lisää muuntajan häviötehoja n. 10 %.

Virran yliaallot eivät tässä syötössä pääse nousemaan erityisen suureksi. Eikä mittaustuloksista havaittu yliaaltoa lisäävää resonanssiipiiriä. Nykyinen estokelallinen kompensointiparistoyksikkö laskee hiukan virran yliaaltoa ja tästä johtuen myös jännitesäröä.

Tässä pisteessä lisämittauksille on tarvetta, jotta toisen yliaallon häiriölähteet saataisiin selvitettyä ja ennakoitua mahdollisia laiterikkoja. Tämän kytkentäpisteen muuntajan kuormana on yli megawatin kulutus, joten sille tuleva tasavirtakomponentin poistaminen vähentäisi häviötehoja huomattavasti.

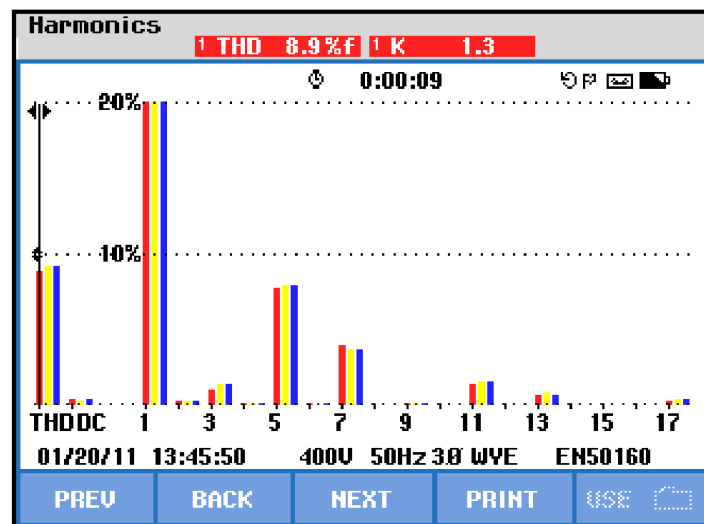
### PK1-mittaustulokset

PK1:n mittaukset tehtiin pääosin aikajanamittauksina (liite 2.). Keskuksen yliaaltovirrat ovat n. 12 % joista syntyy n. 2 %:n jännitesärö. Estokelallinen kompensointiparisto toimii hyvin ja suodattaa osan yliaaltovirtoja laskien samalla myös jännitesärön arvoa n. 0.5 %.

### PK1-kommentit

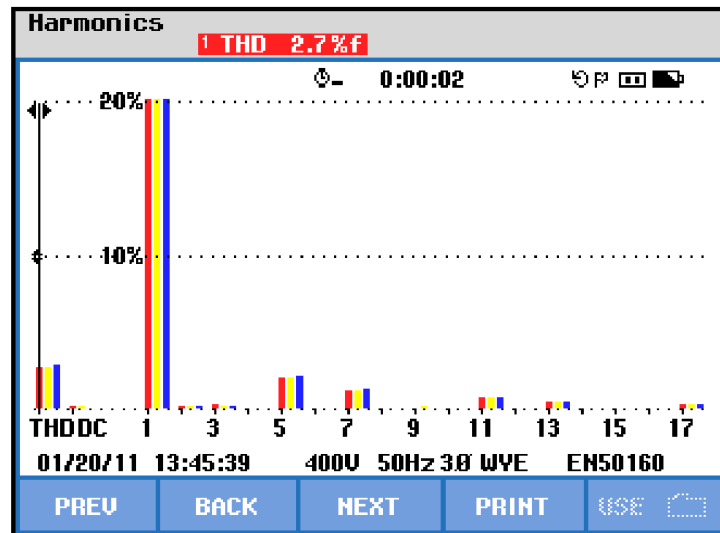
Tuloksista havaitaan jännitesärön THD-arvon olevan 2.0 – 2.5 % kompensoinnin kanssa. Ilman kompensointia arvo nousee parhaimmillaan n. 3 % arvoon, joten se on siedettävällä tasolla.

### PK2-mittaustulokset



Kuva 44. PK2-yliaaltovirrat

PK2:n yliaaltovirtojen (kuva 47) THD-arvo on alle 10 %. Yliaaltovirtojen taso pysyy suhteellisen matalana.



Kuva 45. PK2-jännitesärö

### PK2-kommentit

PK2:n mittaustulokset ovat pitkälti PK1:n kaltaiset. Yliaaltovirrat nostaa jännitesärön THD-arvon n. 3 % tuntumaan. Mittaustuloksissa ei ilmaannu hälyttäviä häiriötasoja.

## 5.5 Mittaustulosten yhteenveto

Saint-Gobainin tehtaiden laitteistossa on paljon yliaaltoja muodostavia laitteita. Yliaaltovirtojen THD-tasot nousevat parhaimmillaan yli 35 % tasolle. Jännitteen säröt pysyvät kuitenkin pääosin kaikissa mitatuissa kohteissa standardien asettamien rajojen sisäpuolella.

Saint-Gobainin Gyprocin tehtaassa M1.2:n toisen yliaallon särö ja suurehko DC-komponentti antaa aiheita lisämittauksille. Vaikka 2. järjestysluvun yliaalto ei välttämättä ole laitteen viasta johtuvaa on sen aiheuttaja silti syytä selvittää. M1.2:n tasasähkökomponentin poistaminen vähentäisi paljon suurella teholla kuormitettavan muuntajan häviötehoja. Lisäksi sähkölaatustandardin ylittävä arvo tapahtuu järjestysluvultaan 17:ta yliaallolla. Tähän syynä on todennäköisimmin DC-komponentin suuri arvo tai 2. järjestysluvun yliaallon lähde.

Mittaustulokset kertovat, että tehtaissa esiintyy jonkin verran yliaaltovirtoja kaikissa mitatuissa pisteissä. Verkon tilannetta on siis hyvä tarkkailla varsinkin tiukemmin mitoitetuissa pisteissä. Jännitteen säröytymistä näissä mittaus tuloksissa ei juuri esiintynyt ainakaan standardien arvoja ylittäviä määriä muualta kuin Isoverin KAG-keskuksen ja Gyprocin M1.2-keskuksen alueelta. Silti niidenkin osalta tehtaan verkkoa kannattaa pitää silmällä. Jännitteen säröytymistä voi seurata esimerkiksi myös sähkönlaatumittaria halvemmillä mittalaitteilla kuten oskilloskoopin sisältävällä mittarilla. Kun jännite on vahvasti säröytynyttä, sen sinimuotoisuus muuttuu vahvasti, jolloin sitä pystyy arvioimaan silmämääräisesti.

Isoverin tehtaan mittauksissa ei ole tutkittu keskijännitepuolen kytkentäpisteitä. Yliaaltojen luonteen takia olisi hyvä tutkia myös keskijännitepuolen kytkentäpisteitä, mikäli sieltä löytyy toimivia alennusmuuntajia. Mitatuista tuloksista on mahdoton arvioida, minkälaista tehtaan kytkentäpisteen sähkönlaatu on.

## 6 YHTEENVETO

Sähkön laatu ja sen arviointi on monitasoinen asia eikä sen arvioinnille ole olemassa täysin yksiselitteistä menetelmää. Toinen sähkölaite saattaa kestää sen, mistä toinen rikkoutuu välittömästi.

Tässä työssä tutkittiin yliaaltojen esiintymistä melko laajalla otannalla. Mittaustuloksista selviää hyvin, että Isoverin sähköverkko on yliaaltojen suhteen melko puhdasta. Yliaaltovirrat eivät juuri säröydy tehtaiden impedansseissa jännitesäröksi. Muutamia ongelmapistettä tehtaiden verkosta kuitenkin löytyi, mikä ei tämän kokoisissa verkoissa ole kovinkaan yllättävää.

Tämän kokoisten tehdasverkkojen sähkönlaatu on hyvä tarkkailla, jotta säästyttäisiin ikäviltä yllätyksiltä. Yliaaltojen etenemistä on vaikea ennustaa, joten mittauksia tehdessä kannattaa valita useita paikkoja joista mittauksia tehdään.

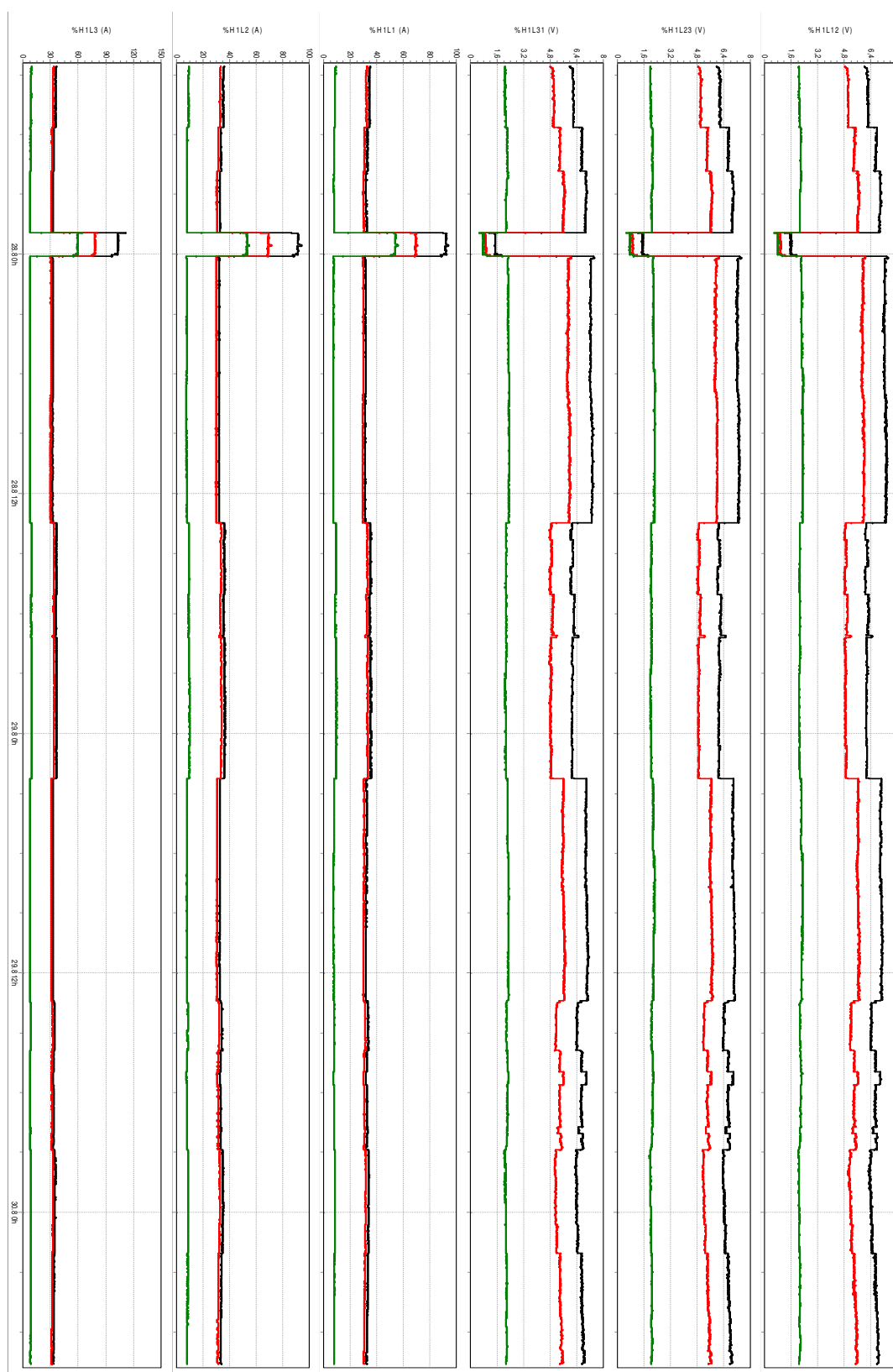
Yliaallot voivat vaikuttaa laitteistoon monella tavalla, joten mikäli laitteistoissa ilmenee niille epätavallista toimintaa tai jopa niiden rikkoontumista voi kyseessä olla yliaallot. Epätavallinen toiminta voidaan havaita myös aistinvaraisesti, koska yliaallot tuottavat mahdollista resonoimista yms. oireita laitteistoon. Tällaiset resonoinimet voidaan havaita esimerkiksi moottoreiden epätavallisena tärinästä.

Muitakin sähkön laadullisia ilmiöitä on hyvä havainnoida ja pohtia mistä ne voivat johtua. Esimerkiksi tämän työn mittauksia tehdessä valojen sekä moottorien toiminta häiriintyi selvästi ukkosen salamoidessa ulkopuolella.

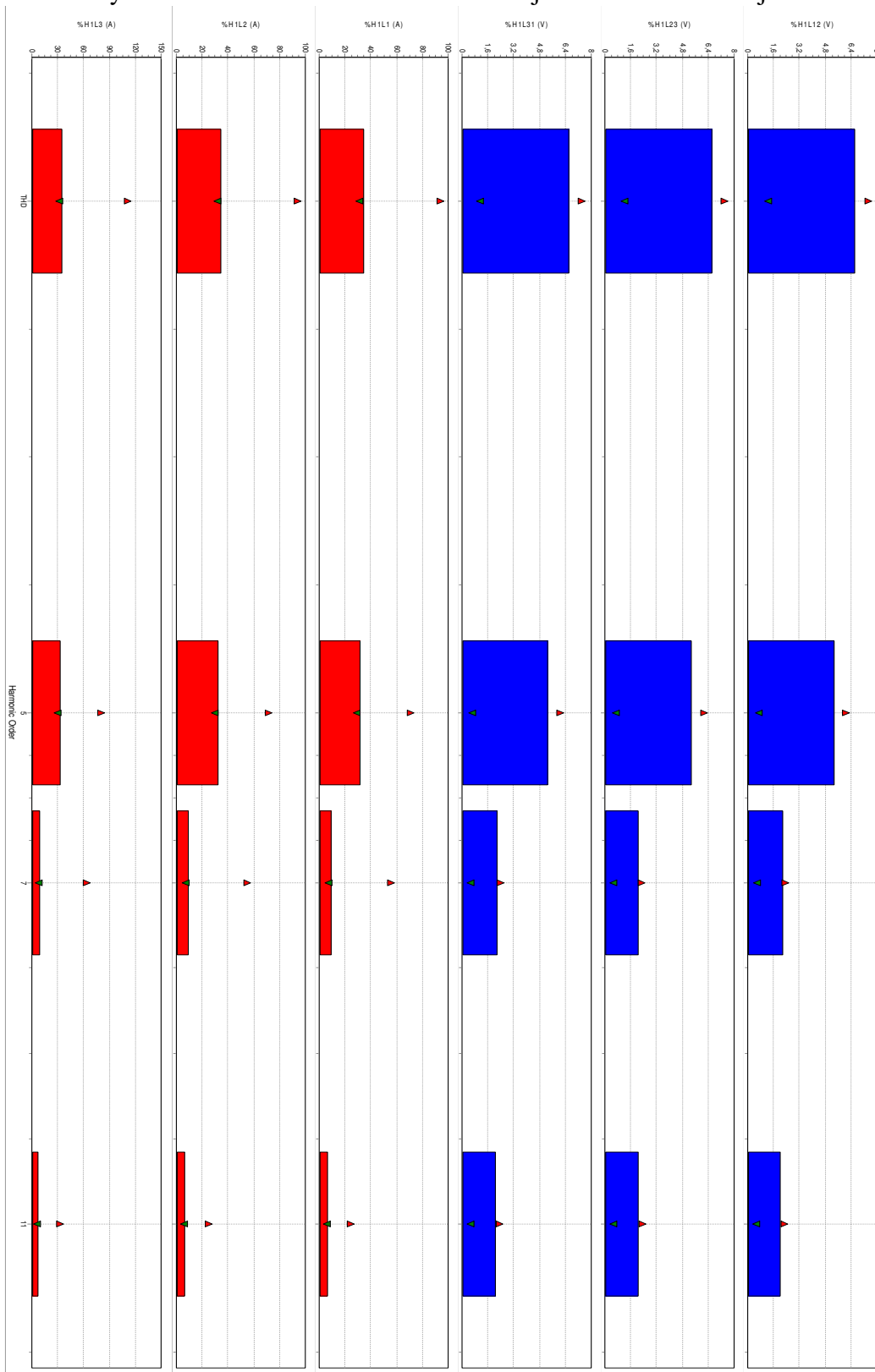
**LÄHTEET**

- [1] Suomen standardisoimisliitto SFS ry, SFS-EN 50160:2008. *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*.
- [2] Lakervi, Erkki – Partanen, Jarmo. *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki: Otatieto 2008.
- [3] Sähkötieto ry, ST-kortti 52.50 sähkön laatu. *Käsitteet ja vaatimukset*. Espoo: Sähköinfo 2006.
- [4] ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita luku 4. *Sähkön laatu* [verkkodokumentti, viitattu 15.1.2011]. Saatavissa: [http://heikki.pp.fi/abb/040\\_0007.pdf](http://heikki.pp.fi/abb/040_0007.pdf)
- [5] Korhonen, Heljä, insinööriyö. *Ylijännitesuojaus pienjänniteverkoissa*. 2009.
- [6] Viljanen, Satu, diplomityö. *Sähkön laadun seurantamittausten nykytila suomessa ja erään mittalaitteen soveltuvuus sähkön laadun mittaamiseen*. Lappeenranta: 2001.
- [7] Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. *Sähköverkkojen häiriökysymykset*. 1977.
- [8] Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, *Yliaallot ja kompensointi*. Espoo: 2006.
- [9] Tonteri, Antti J. *Sähkölaitostekniikka*. Porvoo: WSOY 1993.
- [10] Nokian Capacitors, *pienjännitetuotteiden tuote-opas* [verkkodokumentti, viitattu 10.2.2011]. Saatavissa: <http://www.nokiancapacitors.fi/lowvoltage.htm>
- [11] Virtanen, Tuomas, tutkintotyö. *Jänniteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle*. Tampere: 2005.
- [12] Korpinen, Leena. *Yliaalto-opus* [verkkodokumentti, viitattu 27.2.2011]. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
- [13] ABB, tekninen opas nro. 6. *Vaihtovirtakäyttäjien yliaalto-opas* [verkkodokumentti, viitattu 10.3.2011]. Saatavissa: [http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$File/Tekninen\\_opas\\_nro\\_6.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf)

## Isoverin Hyvinkään tehtaan KAG-keskuksen aikajanamittaus: Yliaallot.

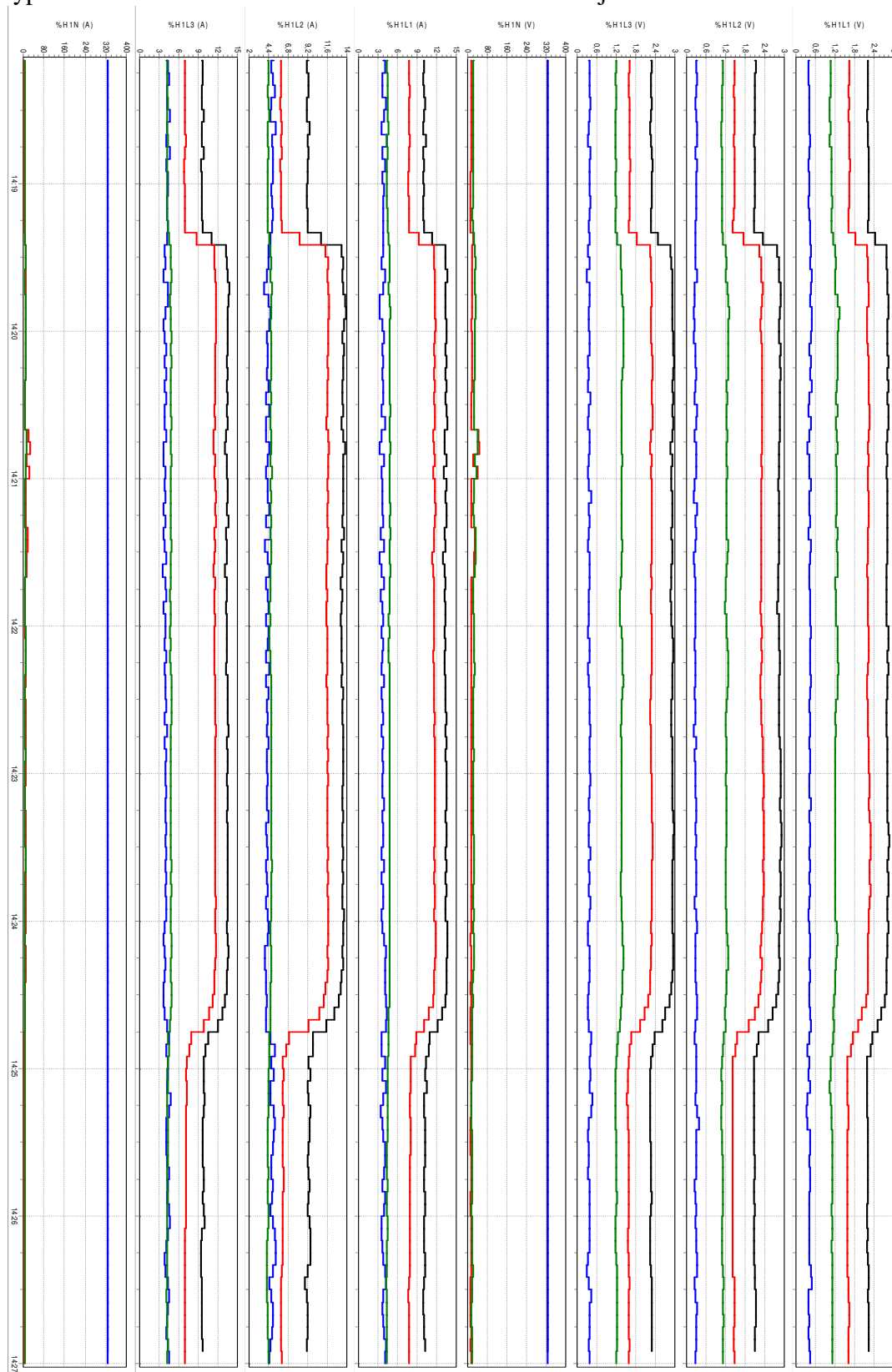


Isoverin Hyvinkään tehtaan KAG-keskuksen aikajanamittaus: Yliaaltojen keskiarvot.





## Gyprocin Kirkkonummen tehtaan PK1.2-keskuksen aikajanamittaus: Yliaallot



Gyprocin Kirkkonummen tehtaan PK1.2-keskuksen aikajanamittaus: Yliaaltojen keskiarvot.

