

KIINTEISTÖJEN PÄÄKESKUKSIEN SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET, LÄMPÖKUVAUKSET JA KOMPENSOINTIYKSIKÖIDEN HUOLLOT

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Juho-Erik Taskinen			
Työn nimi Kiinteistöjen pääkeskuksien sähkönlaatumittaukset, lämpökuvaukset ja kompensointiyksiköiden huollot			
Päiväys	18.1.2016	Sivumäärä/Liitteet	51/38
Ohjaajat lehtori Jari Ijäs, yliopettaja Juhani Rouvali			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Lassila & Tikanoja Oyj Kiinteistötekniikka			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tavoitteena oli suorittaa yhteistyössä Lassila & Tikanojan Oyj Kiinteistötekniikan yksikön kanssa asiakkaan vuokrattavia toimitiloja tarjoavien kiinteistöjen pääkeskuksien sähkönlaatumittaukset, lämpökuvaukset ja kompensointiyksiköiden määräaikaishuollot. Kiinteistöjen sähkönlaadusta tehtiin asiakkaalle selvitys ja lämpökuvauksien ja kompensointiyksiköiden huoltojen tuloksista valmisteltiin huoltoopöytäkirjat huoltojärjestelmään liitettäväksi.</p> <p>Sähkönlaatumittaukset toteutettiin Fluke 434-II -verkkoanalysointilaitteella viidelle pääkeskukselle seuraten standardin SFS-EN 50160 ohjeistuksia. Mittaustuloksien analysoinnissa keskityttiin jännitteen laadun keskeisiin ominaisuuksiin. Lämpökuvaukset suoritettiin Fluke Ti150 -lämpökameralla kuvaamalla keskuskeskukset ja kompensointiyksiköt kauttaaltaan. Merkittäviä lämpenemiä havaittaessa kohde tutkittiin tarkemmin, jotta voitiin arvioida huomiota herättävän lämpenemisen syytä. Osana kiinteistöjen vuosittaisia määräaikaishuoltoja huollettiin asiakkaan viisi estokelaparistoin toteutettua kompensointiyksikköä. Huollot sisälsivät lämpökuvauksen lisäksi aistinvaraisen tarkastuksen ja paristojen virtamittaukset.</p> <p>Sähkönlaatumittauksien perusteella ei herännyt aihetta epäillä, että kiinteistöjen sähkönlaadussa olisi huomioitavia ongelmia. Standardin SFS-EN 50160 määrittämiä jännitteen ominaisuuksien rajoja ei mittauksien aikana ylitetty. Lämpökuvauksien tuloksissa havaittiin pääkeskuksilla kolme kohdetta, joissa ilmeni suhteellisen symmetrisestä kuormituksesta huolimatta kohtalaisen suuri lämpötilaero. Kyseisien lämpenemien epäiltiin johtuvan löysentyneistä liitoksista, jotka jatkotoimenpiteinä kiristetään ja lämpökuvataan uudestaan. Kompensointiyksiköiden huolloissa havaittiin, että kompensoinnin tarve on kiinteistöissä suhteellisen vähäistä. Kompensointiyksiköt olivat aistinvaraisen tarkastuksen ja paristojen virtamittauksien perusteella hyväkuntoisia, eikä kompensointiyksiköille tarvitse suorittaa korjaavia toimenpiteitä.</p>			
Avainsanat sähkönlaatu, kompensointi, lämpökuvaus, verkkoanalysointilaitteet, määräaikaishuollot			
Julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author Juho-Erik Taskinen			
Title of Thesis Power Quality Measurement, Thermal Imaging and Maintenance of Compensation Units of Main Distribution Boards			
Date	January 18, 2016	Pages/Appendices	51/38
Supervisors Mr. Jari Ijäs, Senior Lecturer and Mr. Juhani Rouvali, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Lassila & Tikanoja Plc Kiinteistötekniikan yksikkö			
<p>Abstract</p> <p>The objective of this final project was to do power quality measurements and thermal imaging of the main distribution boards and scheduled maintenance of compensation units in the premises of the client. The work was carried out in co-operation with the client, Lassila & Tikanoja Oyj kiinteistötekniikan yksikkö (property maintenance and maintenance of technical systems in Lassila & Tikanoja). The client was reported about the power qualities in the premises and the results of the scheduled maintenance and thermal imaging were reported in the maintenance service of the client.</p> <p>Power quality measurements were done with Fluke 434-II Power quality analyzer in five main distribution boards by following the SFS-EN 50160 standard. When analyzing the results of the measurements, focus was on the voltage quality features. Thermal imaging was done with Fluke Ti150 infrared camera by thermal imaging the overall layout of the distribution boards and compensation units. If any remarkable temperature rise was noticed, the target was further investigated to find out the possible reason for the temperature rise. The maintenance was done in five blocking reactor compensation units. The maintenance included sensory examination and current measurements of the capacitor.</p> <p>Power quality measurements did not raise any suspicion about problems with the power qualities in the premises. Standard SFS-EN 50160 sets the limits to the voltage qualities which were never exceeded during the measurements. During the thermal imaging, three unequally heated targets were spotted, despite the relatively symmetrical electric loads. It was assumed that the temperature rose due to the loose junctions, which will be tightened and re-examined by thermal imaging. During the annual maintenance of the compensation unit, it was found out that the need for compensation was relatively low in these premises. Based on the sensory inspections and current measurements of the capacitor it can be stated that the compensation units are in good condition and there is no need for further maintenance.</p>			
Keywords power quality, compensation, thermal imaging, power quality analyzer, annual maintenance			
Public			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	LASSILA & TIKANOJA OYJ	7
3	TUTKITTAVAT KIINTEISTÖT	8
4	SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET	9
4.1	Pääkeskusten sähkönlaatumittaus	9
4.1.1	Fluke 434-II -verkkoanalysointilaite	9
4.1.2	Fluke PowerLog	10
4.2	Sähkön laatuun vaikuttavat tekijät	11
4.2.1	Lois- ja säröteho	11
4.2.2	Taajuus	12
4.2.3	Harmoniset yliaallot.....	12
4.2.4	Epäharmoniset yliaallot.....	14
4.2.5	Jännitteen ominaisuudet.....	14
4.2.6	Vaihekuormituksen epäsymmetria	15
4.2.7	Välkyntä	15
4.3	Standardin SFS-EN 50160 määrittämät vaatimukset sähkönlaadulle	16
4.3.1	Verkon jatkuvat ominaisuudet.....	16
4.3.2	Taajuus	16
4.3.3	Jännite	16
4.3.4	Välkyntä	16
4.3.5	Harmoninen ja epäharmoninen yliaaltojännite.....	17
4.3.6	Jännitehäiriöt.....	18
4.4	Sähkönlaatumittauksien suorittaminen kiinteistön pääkeskuksille	18
4.5	Sähkönlaatumittauksien tulokset.....	20
4.5.1	Jännitetason vaihtelu.....	20
4.5.2	Jännitetason mittaustuloksien tulkinta	20
4.5.3	Vaihekuormituksen epäsymmetria	21
4.5.4	Välkyntä	22
4.5.5	Taajuus	24
4.5.6	Yliaallot	26
5	SÄHKÖVERKON KOMPENSOINTI.....	29

5.1	Kompensoinnin laitevalintoja ja toteutustapoja pienjänniteverkossa	29
5.1.1	Laitekohtainen kompensointi.....	29
5.1.2	Ryhmäkohtainen kompensointi.....	30
5.1.3	Keskitetty kompensointi.....	30
5.1.4	Kondensaattoriyksiköt	31
5.1.5	Rinnakkaiskondensaattoriparisto	32
5.1.6	Estokelaparisto	33
5.1.7	Yliaaltosuodatin.....	34
5.1.8	Aktiivisuodatin	34
5.2	Kompensointiyksiköiden määräaikaishuolto.....	35
5.2.1	Aistinvarainen tarkastaminen	36
5.2.2	Aistinvaraisien tarkastuksien tulokset.....	38
5.2.3	Kondensaattoriparistojen virtamittaus.....	39
5.2.4	Kondensaattoriparistojen virtamittauksen tulokset.....	39
5.2.5	Virtamittauksien tuloksien analysointi	41
6	KESKUKSIEN JA KOMPENSOINTIYKSIKÖIDEN LÄMPÖKUVAUS.....	42
6.1	Lämpökuvauksen hyödyntäminen sähköhuolloissa	42
6.2	Lämpökameran toimintaperiaate.....	42
6.3	Lämpökuvaamisen suorittamisperiaatteet ja tavoitteet	43
6.4	Fluke Ti105 -lämpökamera	43
6.5	Fluke SmartView	44
6.6	Lämpökuvauksen suorittaminen	45
6.7	Lämpökuvien analysointi	46
6.7.1	Pääkeskusten lämpökuvauksien päätelmät	46
6.7.2	Kompensointiyksiköiden lämpökuvauksien päätelmät.....	49
7	LOPPUPÄÄTELMÄT	51
	LÄHTEET	52
	LIITE 1 MSB01-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI	54
	LIITE 2 MSB02-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI.....	61
	LIITE 3 MSB03-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI.....	66
	LIITE 4 MSB-02-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI.....	74
	LIITE 5 MSB-03-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI.....	82

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on kiinteistöjen pääkeskusten sähkönlaatumittaus, lämpökuvaus ja kompensointiyksiköiden huolto. Työ tehdään osana asiakkaan kiinteistön teknistä vuosihuoltoa yhteistyössä Lassila & Tikanoja Oyj Kuopion Kiinteistötekniikan yksikön kanssa. Koska aihe on osa asiakkaan kiinteistön määräaikaista huoltotoimenpiteitä, vaaditaan työstä varsinaisen opinnäytetyön raportin lisäksi myös asiakkaalle oma raportti tehdyn huoltotyön ja kerätyn materiaalin pohjalta.

Nykypäivänä etenkin uudemmissa kiinteistöissä kiinnitetään yhä enemmän huomiota energiatehokkuuteen ja sähkötekniisten ratkaisujen sujuvaan toimivuuteen. Pääkeskusten sähkönlaatumittaukset, lämpökuvaaminen ja kompensointiyksiköiden huolto ovat toimenpiteitä, joiden avulla ylläpidetään ja kehitetään kiinteistön teknistä tasoa ja varmatoimisuutta. Sähkönlaatumittauksien avulla voidaan havaita mahdollinen kiinteistön sähkönlaadun vaihtelu, minkä jälkeen voidaan tutkia laadun vaihtelun syitä. Lämpökuvaamalla keskukset ja kompensointiyksiköt voidaan havaita sähkölaitteiston heikentyneestä kunnosta johtuvia kuumenemia, kuten löysiä liitoksia, jotka aiheuttavat kipinöinnin ja palovaaran riskin. Kompensointiyksiköiden tehtävänä on tuottaa verkon tarvitsema loisteho paikallisesti pääkeskuksella, jolloin vältytään loistehon siirtämiseltä jakeluverkossa. Oikein toteutetulla loistehonkompensoinnilla minimoidaan kompensointilaitteiston resonoinnista johtuva yliaaltojen muodostuminen kompensoitavaan verkkoon. Huoltamalla kompensointiyksiköt määräaikaaisesti vähennetään laitteiden vikaantumisriskejä ja siitä aiheutuvia sähkönjakelun häiriöitä, verkon vikatiloja ja taloudellisia tappioita.

Työn aluksi mitataan verkkoanalysointilaitteilla kiinteistöjen sähkönlaatu sovituilla pääkeskuksilla. Mittauksien yhteydessä tehdään myös kompensointiyksiköiden vuosihuolto, joka sisältää aistinvaraisen tarkastuksen ja kondensaattoriyksiköiden virtamittauksen. Virtamittauksien jälkeen keskukset ja kompensointiyksiköt lämpökuvataan osana vuosihuollon toimenpiteitä.

2 LASSILA & TIKANOJA OYJ

Lassila & Tikanoja Oyj:n historia ulottuu vuoteen 1905, jolloin nimellä aloitettiin tukkukauppatoiminta. Yrityksen toiminta on tästä ajasta kehittynyt ja muuttunut ajan kuluessa merkittävästi. Nykyisen toimintamuotonsa L&T sai 2000-luvun alussa, kun lanseerattiin L&T-tuotemerkki, joka kattaa kaikki yhtiön toimialat: Ympäristöpalvelut, Kiinteistö- ja käyttäjäpalvelut ja Teollisuuspalvelut. L&T työllistää yli 8 000 eri alan ammattilaista ja toimii Suomen lisäksi Ruotsissa, Norjassa, Latviassa ja Venäjällä. (Lassila & Tikanoja Oyj 2015.)

Kuopion kiinteistötekniikan yksikkö koostuu työnjohdon toimihenkilöistä sekä LV-, IV-, sähkö-, automaatio- ja kylmätekniikan ammattipätevyiden omaavista asentajista. Kiinteistötekniikan yksikön tarjoaman palvelun tavoite on ylläpitää ja kehittää jatkuvasti asiakaskohteen teknistä toimivuutta.

3 TUTKITTAVAT KIINTEISTÖT

Opinnäytetyön asiakas on kiinteistöyritys, joka tarjoaa vuokrattavia toimistotiloja liiketoiminnan harjoittajille. Yhteensä vuokratiloja tarjoavia asiakkaan kiinteistöjä on yhdeksän kappaletta sekä kaksi pysäköintihallia. Kiinteistöjen pinta-ala on yhteensä lähes 150 000 m². Sähkön laadun mittaukset ja huoltotoimet suoritettiin vanhemman sähköasentajan avustuksella kolmen kiinteistön pääkeskuksille ja kompensointiyksiköille. Mitattavat kiinteistöt käsittävät yhteensä noin 40 000 m² toimistopinta-alaa. Mitattavia pääkeskuksia ja huollettavia kompensointiyksiköitä oli viisi kappaletta.

Tilat edustavat modernia teknisesti hyvin varusteltua kiinteistöä. Nykypäivän modernin toimiston laitteistossa on elektroniikkaa, kuten tietokoneita ja näyttöjä. Suurissa toimitiloissa on myös paljon valonlähteitä, joista suurin osa on loisteputki- tai LED-valaisimia. Lisäksi kiinteistöjen sähkökuormasta voidaan mainita esimerkiksi UPS-varavoimalaitteistot ja mittavat automatiikalla ohjatut ilmanvaihtojärjestelmät.

4 SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET

4.1 Pääkeskusten sähkönlaatumittaus

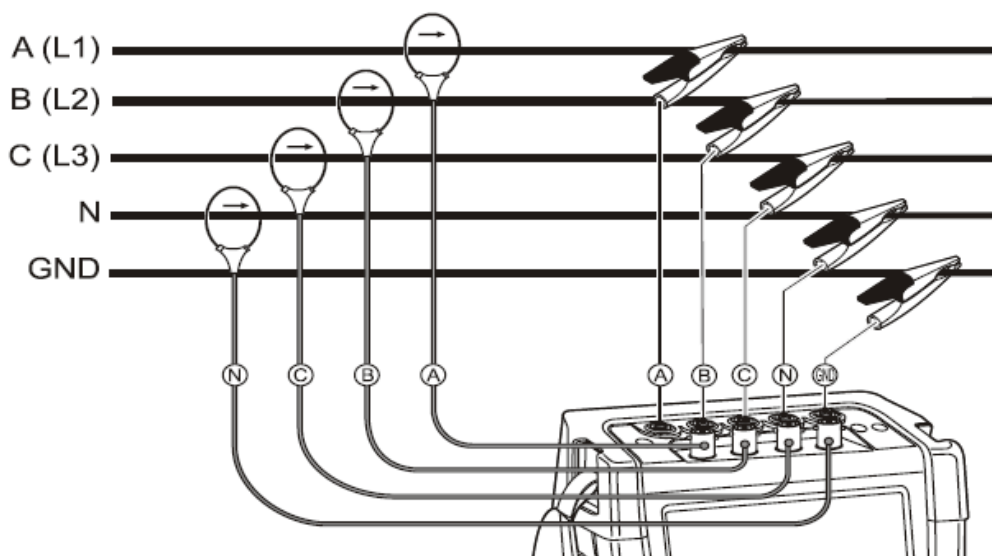
Pääkeskusten sähkönlaatumittausten tavoitteena on selvittää ja raportoida asiakkaalle kiinteistön verkon sähkön laatu. Kiinteistön sähkölaitteiden käyttäjät voivat tehdä aistinvaraisia havaintoja mahdollisista sähkönlaadun heittelyistä, kuten valojen välkynnästä tai tietokoneen näytön väreilyistä, mutta kun tehdään perusteellinen analysointi kiinteistön sähkönlaadusta ja -kulutuksesta, tarvitaan avuksi verkkoanalysaattorin mittaustieto. Kyseisestä kohteesta ei ole tietoa, että sähkön laadussa olisi ollut käyttäjien havaitsemia ongelmia, mutta silti analysointia pidettiin kannattavana toimenpiteenä. Kiinteistö tehdään aika-ajoin muutoksia, joten muuttuvien kuormitusten mahdollinen vaikutus verkkoon voidaan paremmin arvioida, kun tiedetään verkon nykyinen tila.

Mittaukset suoritettiin Fluke 434-II -verkkoanalysaattorilla vuorokauden pituisilla mittausajanjaksoilla. Verkkoanalysaattori kytketään mittauksen ajaksi kiinteistöjen pääkeskuksiin. Mittaustulokset analysoidaan ja mahdollisista huomioista raportoidaan pääkeskusten määräaikaishuolto raporttien yhteydessä.

4.1.1 Fluke 434-II -verkkoanalysaattori

Työssä käytettiin Fluke 434-II kolmivaiheista sähkönlaadun analysaattoria. Laitteella pystytään mittaamaan lähes kaikki sähkönjakelujärjestelmässä esiintyvät parametrit, kuten jännitteet, virrat, taajuus, energiankulutus, tehot, harmoniset ja epäharmoniset yliaallot, kuormituksen epäsymmetria ja välkyntä. Laitteessa on yli kymmenen erilaista mittaustoimintoa, joista työssä käytettiin sähkönlaadun (monitoring) mittausta. Fluke 434-II täyttää mittaustarkkuudeltaan standardin IEC 61000-4-30 luokan A vaatimukset ja turvallisuusmääräyksiltä standardin IEC 61010 määrittämät 600 V CAT IV ja 1000 V CAT II ylijänniteluokitukset. (Fluke Corporation 2015a.)

Mittarin mukana tulee neljä virtapihtiä ja viisi jännitteenmittausjohdinta, joiden avulla analysaattori saadaan mittaamaan samanaikaisesti kaikki tarvittavat mittauspisteet kuvan 1 mukaisella mittakytkennällä. Fluke 434-II tallentaa keräämänsä mittaustiedon SD-muistikortille, josta materiaalia voidaan myöhemmin tutkia joko mittarista käsin sen omalta näytöltä tai siirtämällä mittaustiedon tietokoneelle Fluken Powerlog-ohjelmalle luettavaksi. (Fluke Corporation 2015a.)

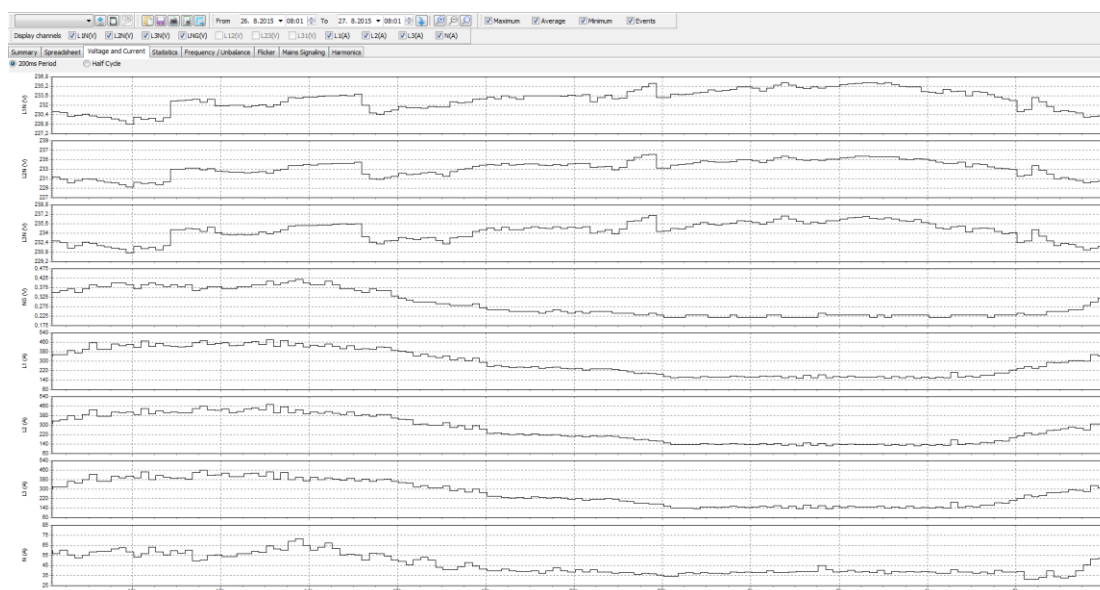


KUVA 1. Analysaattorin kytkentä 3-vaiheiseen sähköverkkoon (Fluke Corporation 2012.)

4.1.2 Fluke PowerLog

Fluke PowerLog (versio 4.02) on Fluken kehittämä PC-ohjelma, joka on vapaasti ladattavissa Fluken kotisivuilta sekä toimitetaan CD-kopiona Fluke 434-II -verkkoanalysaattorin mukana. PowerLogin avulla kerättyä mittaustietoa voidaan hallita ja tarkastella tietokoneelta käsin. Tiedonsiirto mittarilta tietokoneelle tapahtuu USB-kaapeliyhteydellä PowerLogin download-toiminnolla.

PowerLogin avulla käyttäjä voi tarkastella erikseen jokaista tallentamaansa mittausta. Ohjelma lajittelee mittaukseen liittyviä tarkasteltavia suureita, kuten jännitteet, yliaallot tai taajuuden omiin välilehtiin. Lisäksi käyttäjän on helppo valita, esimerkiksi mitä vaiheita hän haluaa tarkastella tuloksista (kuva 2). Näin käyttäjän on helppo keskittyä kerralla vain haluamiensa suureiden tarkasteluun, vaikka kerättyä mittaustietoa olisi suuriakin määriä. (Fluke Corporation 2007.)

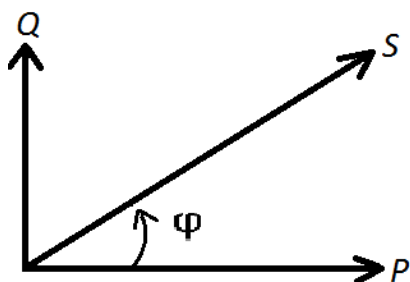


KUVA 2. PowerLogin käyttöliittymä vuorokauden kestäneen monitoring-mittauksen jännitteitä tarkasteltaessa (Taskinen 2015-8-20.)

4.2 Sähkön laatuun vaikuttavat tekijät

4.2.1 Lois- ja säröteho

Loisteho on vaihtovirran suure, joka kuvaa jännitteen ja virran välisestä vaihe-erosta johtuvan näennäistehon ja pätötehon erotusta. Loistehon perusyksikkö on vari ja sen tunnus on var. Loistehon määrää kuormituksessa kuvataan tehokertoimella $\cos \varphi$. Tiedettäessä pätöteho P ja loisteho Q voidaan tehokertoimen $\cos \varphi$ suuruus laskea kaavan 1 avulla. Lisäksi vaihtosähkön tehosuureet näennäisteho S , pätöteho P ja loisteho Q ovat keskenään toisistaan riippuvaisia tehokolmiossa (kuva 3) kaavan 2 mukaisesti. (Mäkelä, Soininen, Tuomola, Öistämö 2010, 126.)



KUVA 3. Tehokolmio (Mäkelä ym. 2010, 126.)

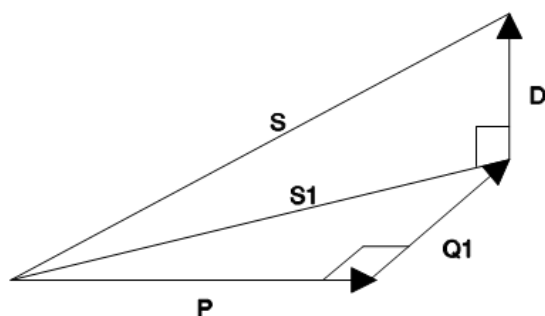
$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2)$$

Loistehoa tarvitaan sähköverkossa tiettyjen sähkölaitteiden toimintaa varten. Laitteet, kuten muuntajat, moottorit tai loistelamput, tarvitsevat varsinaista työtä varten pätötehoa ja loistehoa magneettikentän ylläpitoa varten. Yhdessä pätöteho ja perustaajuinen loisteho muodostavat näennäistehon S . Tehokerroin $\cos \varphi$ kuvaa laitteen tarvitseman pätötehon osuuden kokonaistehosta. (Tiainen ja Vitikka 2004, 133.)

Yliaaltopitoisessa verkossa esiintyy pätö- ja loistehon lisäksi säröteho D , joka koostuu harmonisten yliaaltojen muodostamasta tehosta. Särötehon määritelmästä ei olla kansainvälisesti yhtä mieltä, mutta yksi määritelmä säröteholle esitetään kaavassa 3, jossa Q_1 on perustaajuinen loisteho. Määritelmän säröteho D sisältää yliaaltoloistehon ja eritaajuisien virtojen ja jännitteiden summan, mutta ei yliaaltopätötehoa. Tehojen summautuminen esitetään kuvan 4 kolmiulotteisen tehokolmion avulla. (Ruppa 2001, 9 – 11.)

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (3)$$



KUVA 4. Särötehon D muodostuminen (Ruppa 2001, 10.)

Yliaaltopitoista verkkoa mitattaessa tulee huomioida käytettävän mittalaitteen mittausperiaate. Kaikki käytössä olevat loistehomittarit eivät kykene erottamaan loistehon perus- ja yliaaltotehoja. Tällöin yliaallot voivat aiheuttaa merkittäviä mittavirheitä. Esimerkiksi yliaaltopitoisen verkon kokonaisvirran mittauksessa tulisi käyttää TRMS-tyypin mittaria, joka pystyy erottelemaan perus- ja yliaallon tehollisarvot. (Hietalahti, Männistö, Seesvuori, Seesvuori ja Wilén 2006, 107.)

4.2.2 Taajuus

Taajuus on vaihtosähkön suure, joka kuvaa kuinka useasti virran tai jännitteen suuruus ja muutossuunta muuttuvat sekunnin aikana. Taajuuden SI-tunnus on f , yksikön nimi hertsi ja tunnus Hz. Tiedettäessä vaihtosähkön jaksonaika T , voidaan taajuus laskea kaavan 4 mukaisesti (MÄKELÄ ym. 2010, 126.). (Honkanen 1998, 1.)

$$f = \frac{1}{T} \quad (4)$$

Suomen sähköverkon nimellistaajuus f_n on 50 Hz, mikä tarkoittaa kaavan 4 avulla laskettuna, että yhden jaksonajan pituus on 20 ms. Suomen kantaverkon taajuutta valvotaan kantaverkkoyhtiö Fingridin toimesta ja sen sallitaan normaalitilanteissa vaihdella välillä 49,9 – 50,1 Hz. Taajuuden vaihtelu johtuu sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainon vaihtelusta. Sähkön kulutuksen ollessa tuotantoa suurempi, laskee taajuus alle nimellistaajuuden f_n 50 Hz ja vastaava tuotannon ollessa kulutusta suurempi nousee taajuus yli nimellisarvon. Tehotasapainon muuttumisesta johtuvaa taajuuden vaihtelua tasapainotetaan sähkönverkon taajuus- tai manuaaliohjatulla käyttö- ja häiriöreserveillä. (Fingrid 2015.)

4.2.3 Harmoniset yliaallot

Harmoniset yliaallot ovat verkkotaajuuden monikertoja, jotka syntyvät sähköverkossa sen epälineaarisen kuorman johdosta. Tietyt elektroniikkalaitteet ottavat verkon virtaa vain osan siniaallon puolijaksosta, synnyttäen verkkoon virran harmonisia yliaaltoja. Yleisimpiä verkossa esiintyviä yliaaltoja ovat harmoniset 3., 5., 7., ja 11.yliaaltovirrat, jotka ovat perustaajuuden 50 Hz monikertoja. Esimerkiksi 3. yliaallon taajuus on 3×50 Hz eli 150 Hz ja 5. yliaallon taajuus on 5×50 Hz eli 250 Hz. Parillisia yliaaltoja, kuten esimerkiksi 2. yliaaltoa (100 Hz) synnyttävät vain verkon vialliset laitteet. (Sähköinfo Severi 2006b, 1.)

Tyypillisiä yliaaltojen aiheuttajia ovat esimerkiksi tietokoneet, purkausvalaisimet, taajuusmuuttajat, UPS-akustot tai suuntaajakäytöt. Kolmannen yliaallon aiheuttajia ovat esimerkiksi tietokoneet, purkausvalaisimet ja UPS-laitteet. Väärin suunniteltu verkon kompensointi voi myös aiheuttaa resonointia, joka saattaa kasvattaa yliaallot moninkertaisiksi. Yliaaltojen määrää verkossa kuvataan harmonisen kokonaissärön kertoimella THD, joka voidaan määrittellä jännitteelle, virralle tai teholle. Jännitteen harmoninen kokonaissärö THD ilmoittaa prosenttiyksikkönä yliaaltojen tehollisen osuuden suhteessa perustaajuiseen komponenttiin (THD-F) tai jännitteen tehollisarvoon (THD-R) (Hietalahti ym. 2006, 13). (Sähköinfo Severi 2014b, 1 – 2.)

THD-F tai THD-R lasketaan kaavojen 5 ja 6 avulla, missä U_1 on perustaajuuden jännitteen tehollisarvo, U koko jännitteen tehollisarvo ja U_h yliaaltojännitteen tehollisarvo. Standardin SFS-EN 50160 mukaan vakiintuneena käytäntönä on, että jännitteen kokonaissärön arvioinnissa huomioidaan harmoniset yliaallot järjestysluvun 40:n yliaaltoon asti. (Hietalahti ym. 2006, 29.)

$$THD - F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \quad (5)$$

$$THD - R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots}^{\infty} (U_h)^2}}{U} \quad (6)$$

Yliaaltojen liian suuri määrä voi aiheuttaa sähköverkossa useita ongelmia. Kasvava THD-arvo aiheuttaa verkon jännitekäyrän säröytymisen eli jännitteen aaltomuodon muuttumisen epälineaariseksi. Yliaallot aiheuttavat sähköverkon komponenteissa ylimääräistä lämpenemistä ja käyttöiän lyhenemistä. Lisäksi ne kuormittavat sähköverkkoa aiheuttaen häviöitä sähkönsiirrossa ja heikentäen laitteiden ja järjestelmien tehokerrointa. Yliaallot voivat myös johtaa mittarien virhenäyttämiin ja erilaisen automaatio- tai suojalaitteiden toimintahäiriöihin. Järjestysluvultaan kolmella jaolliset parittomat yliaallot kuormittavat verkon nollajohtimen virran pahimmillaan moninkertaiseksi suhteessa vaihevirtaan, vaikka verkon 3-vaihekuorma olisi symmetrinen. Määräysten mukaan nollajohtimen poikkipinnaksi sallitaan puolet vaihejohtimen poikkipinnasta, eikä sitä normaalisti suojata sulakkeilla. Tästä johtuen nollajohdin ei kestä mahdollista yliaalloista aiheutuvaa kuormitusta, jonka seurauksena on tulipaloriskin. (Hietalahti ym. 2006, 30 – 33.)

Yliaaltoja aiheuttava kuormitus on lisääntynyt kuluttajien sähköverkossa, joten yliaaltoja joudutaan yhä useammin suodattamaan sähkön hyvän laadun ylläpitämisen vuoksi. Pahimmassa tapauksessa yliaaltosuodattimen käyttö on perusedellytys verkon normaalille käytölle. Yliaaltojen suodatuksen johdosta verkon THD-arvo pienenee ja tämän myötä kulutuskojeiden häiriöiden ja vaurioiden todennäköisyys alenee. (Hietalahti ym. 2006, 85.)

4.2.4 Epäharmoniset yliaallot

Epäharmonisia yliaalloja synnyttävät erittäin epälineaarisesti toimivat laitteet, joiden verkosta otta-
ma virta vaihtelee jännitejakoista riippumatta. Epäharmoniset aallot eivät ole sähköverkon perus-
taajuuden kerrannaisia kuten harmoniset yliaallot. Summautuessaan verkkotaajuuteen, epäharmoni-
set yliaallot aiheuttavat sähköverkon sinimuotoon alle tai yli verkon perustaajuuden jaksollista vaih-
telua. Ne ovat kuitenkin harvinainen ilmiö verkossa, eivätkä ne pääsääntöisesti aiheuta ongelmia.
Tästä johtuen sähkönladun standardi SFS-EN 50160 ei aseta epäharmonisille yliaalloille selkeitä ra-
ja-arvoja. (Alanen ja Hätönen 2006, 16.)

4.2.5 Jännitteen ominaisuudet

Jännitetaso nousee ja laskee sähköverkossa jatkuvasti. Jännitteen ominaisuuksien vaihtelu voidaan
jakaa jatkuviin ilmiöihin ja jännitehäiriöihin. Jatkuvia ilmiöitä ovat jännitetason poikkeamat jännit-
teelle asetetusta nimellisarvosta, joka on normaalisti määritelty pienjänniteverkossa vaiheen ja nolla-
johtimen välille arvoksi $U_n = 230$ V. Jännitetason poikkeamien tyypillisiä aiheuttajia ovat kuormituk-
sen muuttuminen ja epälineaariset kuormat. (SFS-EN 50160 2010, 10.)

Jännitehäiriöllä tarkoitetaan tilannetta, jolloin jännitteen käyrämuoto poikkeaa yllättäen merkittävästi
normaalista tai halutusta käyrämuodosta. Tyypillisiä jännitehäiriön aiheuttajia ovat erinäiset sähkö-
verkon vikatilanteet ja sääolosuhteet. Jännitehäiriöt ovat yleensä ennalta arvaamattomia ja niiden
haitallisuus vaihtelee tapauksittain. (SFS-EN 50160 2010, 10.)

Jännitekuopalla tarkoitetaan tilannetta, jolloin jakelujännitteen tehollisarvo laskee 90 %:n alapuolelle
nimellisarvostaan ja palautuu tietyn ajan kuluttua takaisin. Jännitekuoppien kestot voivat olla tyypil-
lisesti kymmenistä millisekunneista aina minuutteihin asti. Yleisiä syitä jännitekuopille ovat verkossa
tapahtuvat suuritehoisten laitteiden kytkennät tai vikatilanteet. Jännitekuopan sähköverkossa aiheut-
tamia haittoja ovat esimerkiksi automaation, prosessilaitteiden ja elektroniikan toimintahäiriöt ja va-
laistuksen muutokset. (Sähköinfo Severi 2006a, 4.)

Transienttiylijännite on ilmiö, jossa tapahtuu jännitteen lyhytkestoinen ja voimakas värähtelevä tai
värähtelemätön ylijännite, joka vaimenee nopeasti takaisin normaalitasoon ja jonka energiasisältö
vaihtelee hyvin paljon tapauksittain. Tyypillisesti transienttiylijännitteen nousuaika on muutamista
mikrosekunneista millisekunteihin. Transienttiylijännitteen aiheuttajia voivat olla esimerkiksi ukko-
nen, sähköverkon kytkentätilanteet tai suojauksen, kuten sulakkeiden toiminta. (Sähköinfo Severi
2006c, 1.)

4.2.6 Vaihekuormituksen epäsymmetria

Jännitteiden epäsymmetrialla eli vinokuormituksella tarkoitetaan kolmivaihejärjestelmän kuormituksen epätasaista jakautumista kolmen vaiheen välillä. Ideaalisessa tilanteessa verkon pääjännitteen nimellisjännitteen ollessa $U_n = 400 \text{ V}$, on jokaisen vaiheen jännite $400 \text{ V} / \sqrt{3} \approx 230 \text{ V}$. Käytännössä kuitenkin vaihejännitteiden suuruuksien välillä ilmenee yleensä enemmän tai vähemmän vaihtelua. Sähkölaadullisesti vinokuormituksen suurin sallittu poikkeama yhdellä vaiheella on $\pm 10 \%$ vaihejännitteiden keskiarvosta. (Sähköinfo Severi 2006c, 1.)

Merkittävä kolmivaiheinen epäsymmetrinen kuormitus voi olla haitallinen sähkölaitteistoille ja jopa yleinen turvallisuusriski, sillä epäsymmetrinen kuormitus aiheuttaa nollajohtimelle lisäkuormitusta. Nollajohtimen mitoituksessa ei yleensä huomioida tällaista epäsymmetrisen kuormituksen aiheuttamaa virran kasvua. Nollajohdinta ei suojata sulakkeilla, joten kasvanut kuormitus voi aiheuttaa johdinten lämpenemisen seurauksena eristeiden sulamisen ja tulipalovaaran. (Kontturi ja Ålander 2008, 11.)

4.2.7 Välykynnä

Välykynnällä tarkoitetaan valolähteen luminanssin tai spektrijakauman arvoissa tapahtuvien muutoksien aiheuttamaa näköaistimuksen ärsykettä. Valaisimessa ilmenevä välykynnä voi olla niin selvää, että ihminen tiedostaa sen, tai sellaista, jota ihminen ei havaitse, mutta kokee pitempinä jaksoina ärsyttävänä. Valaisimissa ilmenevä välykynnä aiheutuu pääosin jännitteenvaihtelun suuruudesta ja taajuudesta. Yleisiä syitä jännitteenvaihtelulle ovat verkon laitteiden, kuten moottoreiden tai pumppujen aiheuttamat nopeat kuormitusmuutokset. Jännitteenvaihtelun suuruuteen vaikuttavat syöttävän verkon jäykkyys ja kuormitusmuutoksen suuruus. (Suurinkeroinen 2012, 7 – 13.)

Välykynnästä aiheutuvaa häiritsevyyttä arvioidaan pitkäaikaisella häiritsevyyksindeksillä P_{lt} . P_{lt} -arvo voidaan laskea kaavan 7 avulla, kun tiedetään lyhytaikainen häiritsevyyksindeksi P_{str} , joka mitataan kymmenen minuutin aikaväliltä. (SFS-EN 50160 2010, 6.)

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{stri}^3}{12}} \quad (7)$$

Välykynnän häiritsevyys koetaan usein hyvin subjektiivisesti. Yleisesti määritellään, että pitkäaikainen $P_{lt} \geq 1$ arvo koetaan häiritsevänä. Kuitenkaan pelkkä välykynnän mittaaminen ja välykynnästä johtuvan häiritsevyyden arvon $P_{lt} \leq 1$ toteaminen ei aina tarkoita, ettei sähkökäyttäjää koe välykynnästä aiheutuvia haittavaikutuksia. Tapauksittain myös alle $P_{lt} = 1$ arvon välykynnälle altistuminen pitkäaikaisesti voidaan kokea häiritsevänä. Vastaavasti myös tapauksissa, jolloin $P_{lt} \geq 1$, saatetaan selvitä ilman välykynnästä aiheutuvia haittavaikutuksia. (SFS-EN 50160 2010, 12.)

4.3 Standardin SFS-EN 50160 määrittämät vaatimukset sähkölaadulle

Sähkölaadun arvioinnissa käytetään vertailukohteena CENELECin teknillisen komitean TC 8X laatimaa standardia SFS-EN 50160, joka hyväksyttiin 1.3.2010. Standardi määrittelee jännitteelle asetetut ominaisuudet verkon käyttäjän pien-, keski- ja suurjännitteisen vaihtosähköjako- ja jakeluverkon liittymiskohdassa normaalin käyttöolosuhteen vallitessa. (SFS-EN 50160 2010, 2.)

Standardi määrittelee sallitut vaihtelut pien-, keski- ja suurjänniteverkon jakelujännitteen suuruudelle, taajuudelle, aaltomuodolle ja kolmivaiheisen jännitteen epäsymmetrialle. Standardi myös määrittää verkossa ilmenevien harmonisten ja epäharmonisten yliaaltojen ja välkyntien sallitun määrän. Standardi määrittelee jatkuville ilmiöille sallitut raja-arvot, mutta antaa jännitehäiriöille, kuten jännitekuopille tai ylijännitteille pelkästään suuntaa antavia arvoja. (SFS-EN 50160 2010, 4 - 5.)

4.3.1 Verkon jatkuvat ominaisuudet

4.3.2 Taajuus

Jakeluverkon nimellistaajuuden f_n tulee olla 50 Hz. Standardi määrittää yhteiskäyttöverkon taajuudelle keskiarvon 10 s aikavälein mitattuna siten, että vuodessa 95 % ajasta jännitteen tulee olla $f_n \pm 1$ % eli välillä 49,5 Hz – 50,5 Hz ja 100 % ajasta $f_n + 4$ % / - 6 % eli välillä 47 Hz – 52 Hz. Erillisverkossa vastaavasti raja-arvot ovat 95 % viikosta $f_n \pm 2$ % ja 100 % ajasta $f_n \pm 15$ %. (SFS-EN 50160 2010, 11.)

4.3.3 Jännite

Jännitteen vaatimukseksi SFS-EN 50160 määrittää, että jännitetason vaihtelu normaaleissa käyttöolosuhteissa ei saa ylittää ± 10 % tasoa nimellisjännitteestä U_n . Esimerkiksi nimellisvaihejännitteen ollessa 230 V ylärajaksi määritetään $1,1 \times 230 \text{ V} = 253 \text{ V}$ ja alarajaksi $0,9 \times 230 = 207 \text{ V}$. Mikäli tapauksen verkko ei ole liitettyä yleiseen sähköverkkoon tai se sijaitsee syrjäseudulla, sallitaan jännitevaihteluksi $+10$ % / -15 %. Jännitteen epäsymmetrian raja-arvot standardi määrittelee siten, että normaaleissa käyttöolosuhteissa 95 % jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisista keskiarvoista tulee olla 0 ja 2 %:n välillä myötäkomponenttiin nähden. (SFS-EN 50160 2010, 11.)

4.3.4 Välkyntä

Verkossa ilmenevää jännitteen vaihtelusta aiheutuvaa välkyntää kuvataan välkyntäindeksillä P_{lt} . Normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon pituisen mittausjakson aikana pitkäaikaisen häiritsevyysohjauksen tulee olla 95 % ajasta $P_{lt} \leq 1$. Standardissa huomautetaan, että välkyntään reagoiminen on subjektiivista ja se voi vaihdella välkyntä aiheuttajan ja keston mukaan. Tapausittain $P_{lt} = 1$ voidaan kokea ärsyttäväksi, kun taas toisinaan suurempiakin P_{lt} -arvoja voi ilmetä ilman haittavaikutuksia. (SFS-EN 50160 2010, 12.)

4.3.5 Harmoninen ja epäharmoninen yliaaltojännite

Jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 min keskimääräisen tehollisarvon tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukon 1 sille antama suhteellisen jännitteen U_h arvo. Myös jakelujännitteen kokonaissärökertoimen THD-arvo tulee olla $THD \leq 8\%$. THD arvoon huomioidaan vakiintuneena käytäntönä kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40. yliaaltoon asti. Kuitenkaan taulukossa 1 ei määritetä sallittuja arvoja järjestysluvultaan yli 25 oleville harmonisille aalloille, sillä ne ovat tavallisesti hyvin pieniä ja arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi. (SFS-EN 50160 2010, 12.)

TAULUKKO 1. Standardin SFS-EN 50160 määrittämät sallitut harmonisten yliaaltojännitteiden arvot perustaaajuisessa jännitteessä. (SFS-EN 50160 2010, 12.)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (Uh)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (Uh)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (Uh)
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 %				

Epäharmoniset yliaaltojännitteet ovat nykypäivän verkossa harvinainen ilmiö. Tämän hetken SFS-EN 50160 standardi ei määrittele epäharmonisille yliaalloille yksiselitteisiä sallittuja tasoja, vaan niitä harkitaan hankittavien lisätietojen perusteella. (SFS-EN 50160 2010, 12.)

4.3.6 Jännitehäiriöt

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee verkon jännitehäiriöiksi käyttökeskeytykset, jännitekuopat ja ylijännitteet. Jännitehäiriöt ovat ennalta-arvaamattomia ja ne johtuvat usein erilaisista sähköverkon vikatilanteista. SFS-EN 50160 ei anna yksiselitteisiä ohjeita jännitehäiriöiden ilmenemisen sallituille raja-arvoille niiden satunnaisuuden takia. Mikäli kuitenkin jännitekuoppia ja ylijännitteitä halutaan arvioida, tulee se tehdä standardin EN 61000-4-30 ohjeistuksella. (SFS-EN 50160 2010, 13 - 15.)

4.4 Sähkönlaatumittauksien suorittaminen kiinteistön pääkeskuksille

Mittaukset suoritettiin kolmessa kiinteistössä yhteensä viidelle pääkeskukselle elo- ja syyskuun vaihteessa. Mitatut keskuksset olivat nimeltään MSB, MSB2, MSB3, MSB-02 ja MSB-03. Kaikkien keskuksien kuorma koostui toimistotiloille tyypillisestä kuormasta, kuten loisteputki- tai LED-valaisimista, tietokoneista ja esimerkiksi ilmanvaihtoon ja sen automatisoituun ohjaukseen liittyvästä laitteistosta.

Jokaiselle keskukselle suoritettiin Fluke 434-II verkkoanalysointilaitteella vuorokauden mittainen monitoring-mittaus, joka tallentaa mittausjakson ajalta taajuuden, vaihejännitteiden ja -virtojen, jänniteepäsymmetrian, välkynnän ja yliaaltojen 10 sekunnin keskiarvoja. Sen avulla saadaan tallennettua kaikki perustieto sähköverkosta, jolla voidaan arvioida sähkön laatua. Standardi SFS-EN 50160 määrittelee ajallisesti verkon sähkönlaatumittaukset viikon kestäviin mittausjaksoihin, mutta määräaikaishuoltojen aikataulujen asettamien haasteiden takia mittauksien kesto jouduttiin rajoittamaan vuorokauden mittaisiksi (SFS-EN 50160 2010, 11). Kuitenkin täyden vuorokauden aikana saatiin käsitys kiinteistön sähköverkon kuormituksen erilaisista muutostilanteista, kuten ilmaston käynnistymisestä tai vilkkaimman työajan valaisimien ja toimistolaitteiden aiheuttamasta kuormituksesta.

Kiinteistöt olivat mittauksien ajan arkipäiväisesti toiminnassa, joten pääkeskuksia ei voitu kytkeä jännitteettömäksi. Tästä johtuen verkkoanalysointilaitteen kytkeminen ja irrottaminen suoritettiin keskuksen ollessa normaalisti kuormitettuna. Kytkeä tehdessä käytettiin turvallisuuden huomioiden jännitetyöhanskoja ja suojavisiirillä varustettua kypärää. Vaihe- ja nollajännitteiden mittaus onnistui helpon keskuksen oman tehomittarin riviliittimeltä. Virtapihdit lenkitettiin joko keskuksen vaihe- ja nollakiskojen ympärille tai vaihtoehtoisesti kiskoja syöttävien kaapeleiden ympärille riippuen siitä, kumpi oli keskuksen rakenteesta johtuen turvallisempaa ja helpompaa toteuttaa. Maadoituksen mitatahdimin liitettiin hauenleualla maadoituskiskoon.



KUVA 5. Virtamittaus vaihekiskoilta keskuksella MSB-03 (Taskinen 2015-08-27.)



KUVA 6. Fluke 434-II kytkettynä mittaamaan keskusta MSB02 (Taskinen 2015-08-28.)

4.5 Sähkönlaatumittauksien tulokset

4.5.1 Jännitetason vaihtelu

PowerLog-ohjelman statistiikka-ominaisuuden avulla pystytään helposti tarkastelemaan mittauksessa ilmenneet 10 sekunnin huippu- ja minimiarvot mitatuilla suureilla. Taulukossa 2 esitetään kaikkien viiden pääkeskuksen mittaustulokset vaihejännitteiden raja-arvojen suhteen.

TAULUKKO 2. Eri keskuksilta mitatut vaihejännitteiden raja-arvot

Jännite (V)	L1		L2		L3	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Keskus MSB	235,83	228,82	236,14	229,23	236,96	230,66
Keskus MSB2	236,92	230,54	237,45	230,75	238,01	231,78
Keskus MSB3	237,49	230,71	237,75	230,91	238,53	231,91
Keskus MSB-02	237,98	230,5	238,14	231,2	239,01	232,02
Keskus MSB-03	238,35	231,31	238,84	231,63	239,61	232,41

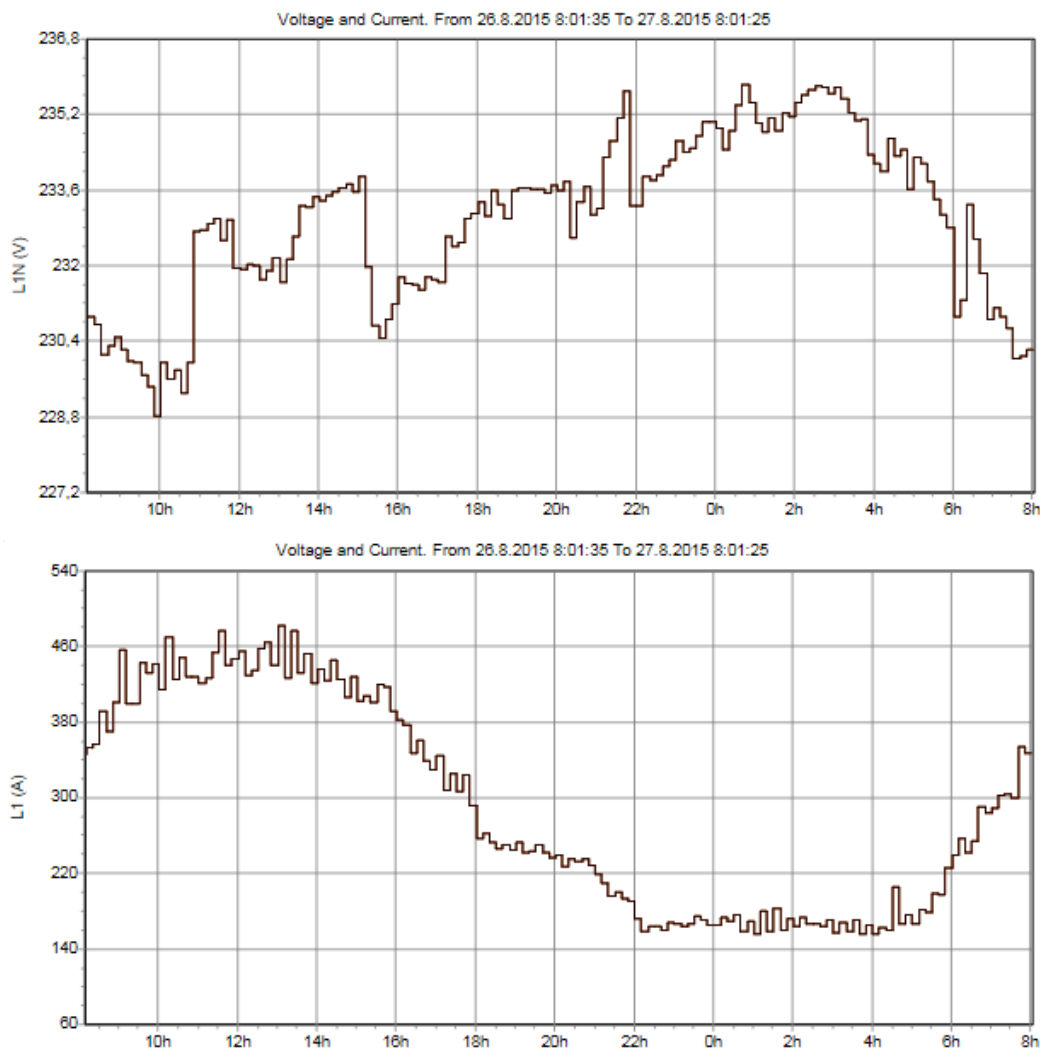
Standardi SFS-EN 50160 määrittelee, ettei jännite saa normaaliolosuhteissa nimellisjännitteen ollessa 230 V ylittää 253 V:a eli 10 % poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vastaavasti jännite ei saa myöskään pudota alle 207 V:n. Taulukon 2 mukaisista mittaustuloksista nähdään, että korkein mitattu 10 s jännitteen keskiarvo on keskuksella MSB-03 vaiheella L3 239,61 V eli noin +4,2 % poikkeama nimellisjännitteestä. Alin mitattu jännitteen arvo on keskuksella MSB vaiheella L3 228,82 V eli noin -0,5 % poikkeama nimellisjännitteestä.

4.5.2 Jännitetason mittaustuloksien tulkinta

Mittaustuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että tulokset ovat keskiarvoja tietyltä ajalta. Tästä syystä eri vaiheiden jännitteet ovat myös hetkellisesti käyneet taulukoitujen huippuarvojen yläpuolella ja minimiarvojen alapuolella. Mittauksen aikana on esimerkiksi voinut esiintyä jännitekuoppia tai transienttilyijännitteitä, jotka ovat kuitenkin olleet niin lyhytkestoisia, etteivät ne ole vaikuttaneet jännitetasoihin taulukon 2 tuloksien perusteella merkittävästi. Fluke 434-II -analysointilaitteen Logger-mittauksella voitaisiin tutkia tällaisia lyhytkestoisia tapahtumia, mutta sähkönlaatumittauksen kannalta tarkastelu ei ole välttämätöntä.

Jännitetason muutosta vuorokauden mittauksen aikana tarkasteltaessa havaitaan, että kaikille mittauksille tyypillistä on jännitetason nouseminen iltaa ja yötä kohti. Kiinteistön kuormitus vähenee työntekijöiden lähtiessä töistä, kun laitteita ja valoja sammutetaan ja lopulta ilmanvaihtokoneet sammuvat ajastetusti. Vastaavasti kuormitusvirrat nousevat ja jännitetaso laskee aamusta päivää kohti, kun kiinteistön ruuhkaisin ajanjakso saavutetaan. Viidestä keskusmittauksesta neljän keskuksen vaiheiden jännitehuiput mitattiin kellon ajanjaksolla 21:00 – 4:00. Ainoana poikkeuksena havaittiin keskuksen MSB2 vaihe L1 jännitehuippu 236,92 V, joka mitattiin päivällä kello 14:58:48. Kuvio 1 esittää PowerLogin tulostaman mittaraportin pohjalta keskuksen MSB vaiheen L1 jännitteen ja virran

muutoksen vuorokauden mittauksen aikana. Raportin graafisesta esityksestä nähdään, kuinka kuorman vähentyessä jännitetaso pääsääntöisesti nousee.



KUVIO 1. Keskuksen MSB vaiheen L1 jännitteen ja virran muutos vuorokauden mittauksessa (Taskinen 2015-08-27.)

Vaihekohtaisten jännitetasojen mittaustulokset ovat hyvin tasaiset. Kaikki mittaustulokset ovat 228,82 V:n ja 239,61 V:n välillä eli 10,79 V vaihteluvälissä. Tuloksista ei myöskään havaita selviä eroja eri vaiheiden tai keskuksien välillä, vaan kaikki viisi mittausta ovat hyvin samanlaisia. Standardin SFS-EN 50160 laatuvaatimukset täyttyvät vuorokauden kestävässä mittauksissa erinomaisesti. Tuloksien perusteella ei ole syytä epäillä, että sähköverkossa esiintyisi tällä hetkellä käyttäjä- tai laiteperäistä toimintaa, joka aiheuttaisi jännitteelle häiriöilmiöitä.

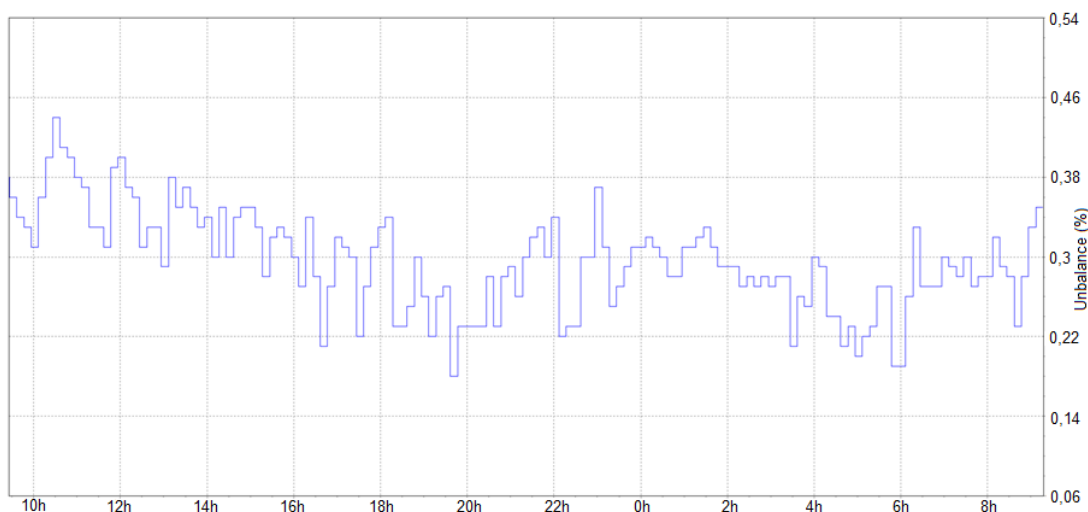
4.5.3 Vaihekuormituksen epäsymmetria

Taulukossa 3 esitetään jokaisen mittauksen 10 minuutin keskiarvon jännite-epäsymmetrian raja-arvot.

TAULUKKO 3. Mittauksien vaihekuormituksen epäsymmetrian huippu- ja minimiarvot

Keskus	Jännite-epäsymmetria (%)	
	Max	Min
MSB	0,42	0,22
MSB2	0,38	0,18
MSB3	0,40	0,13
MSB-02	0,43	0,16
MSB-03	0,44	0,18

SFS-EN 50160 määrittelee sallitun jännitteen epäsymmetrian niin, että vastakomponentin 10 minuutin tehollisista keskiarvoista 95 % tulee olla 0 ja 2 %:n välillä myötäkomponenttiin nähden. Taulukon 3 mittaustuloksista havaitaan, että jännite-epäsymmetriaa esiintyy kaikkien keskuksien syöttämässä verkossa eikä täysin ideaalista symmetristä verkon tilannetta ilmene. Kuitenkin suurin mitattu epäsymmetrian arvo on vain 0,44 % keskuksella MSB-03. Kuvio 2 esittää keskuksen MSB-03 mittauksen jännitteen epäsymmetrian 10 minuutin keskiarvoina. Kuvioista havaitaan, että epäsymmetrian huippuarvo on mitattu heti mittauksen alkuhetkillä, kello 10 jälkeen.



KUVIO 2. Keskuksen MSB-03 mittauksen jännitteen epäsymmetria (Taskinen 2015-09-15.)

Tuloksista nähdään, ettei mittauksien aikana standardin asettamia vaatimuksia rikota. Mitatuissa verkoissa kuormitus on jaettu onnistuneesti eri vaiheiden kesken eikä mittauksen aikana ole tapahtunut vaihekuormituksen epäsymmetriaa aiheuttavia merkittäviä vikatilanteita, kuten yhden vaiheen suojausten toimintaa. Epäsymmetria on huippuarvossakin niin vähäistä, ettei sen takia voida olettaa nollajohtimen ylikuormittumisen riskiä.

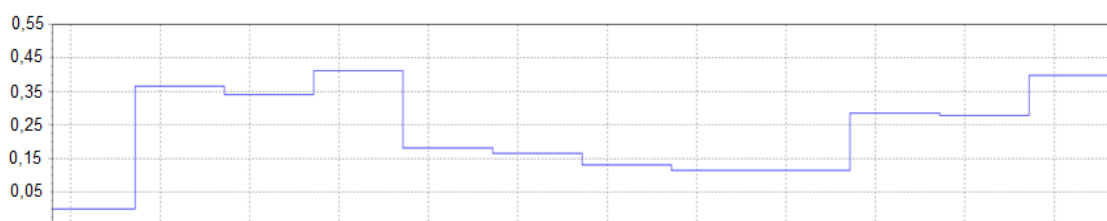
4.5.4 Välykynnä

Taulukossa 4 esitetään jokaisen pääkeskuksen vaihekohtaisen välykynnän huippuarvot. Mittausarvot ovat analysoijan kahden tunnin välein keräämiä välykynnän P_{IT} -kertoimen keskiarvoja, joita kertyy yhden vuorokauden aikana yhteensä 12 kappaletta yhtä vaihetta kohden.

TAULUKKO 4. Mittauksien vaihekohtaisen välkynnän P_{It} huippuarvot

Välkyntä (P_{It})			
Keskus	L1	L2	L3
MSB	0,226	0,231	0,314
MSB2	0,204	0,206	0,228
MSB3	0,216	0,165	0,242
MSB-02	0,412	0,391	0,376
MSB-03	0,352	0,350	0,345

Kaikkien mittauksien välkynnän huippuarvot sijoittuivat 0,216:n ja 0,412:n välille. Mittauksille tyypillistä on myös, että välkynnän P_{It} -arvo vaihtelee mittauksen aikana. Kuviossa 9 esitetään keskuksen MSB-02 vaiheen L1 välkynnän mittaus vuorokauden ajalta. Mittauksesta tulee huomioida, että analysoija laskee ensimmäisen P_{It} -arvon vasta, kun mittauksista on kulunut kaksi tuntia. Tästä syystä P_{It} -arvo on ensimmäiset kaksi tuntia nolla.

KUVIO 3. MSB-02 vaiheen L1 välkynnän P_{It} arvon vuorokauden mittaus (Taskinen 2015-10-02.)

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee, että välkynnän P_{It} -arvon tulisi olla normaaleissa käyttöolosuhteissa 95 % ajasta alle 1. Vuorokauden kestävät mittaukset eivät osoita, että kiinteistöiden sähköverkossa ilmenisi standardin rajoja ylittäviä välkynnän arvoja. Kuitenkaan tämä ei aina tarkoita sitä, että välkyntä ei aiheuttaisi tiloissa oleville henkilöille oireita. Tästä huolimatta voidaan pitää epätoiminnaisena, että välkynnän takia tarvittaisiin toimenpiteitä, sillä suurinkin mitattu välkynnän pitkäaikaisindeksi on alle puolet standardin vaatimuksesta. Lisäksi tietoon ei ole tullut, että tiloissa olisi koettu välkynnästä aiheutuvia oireita.

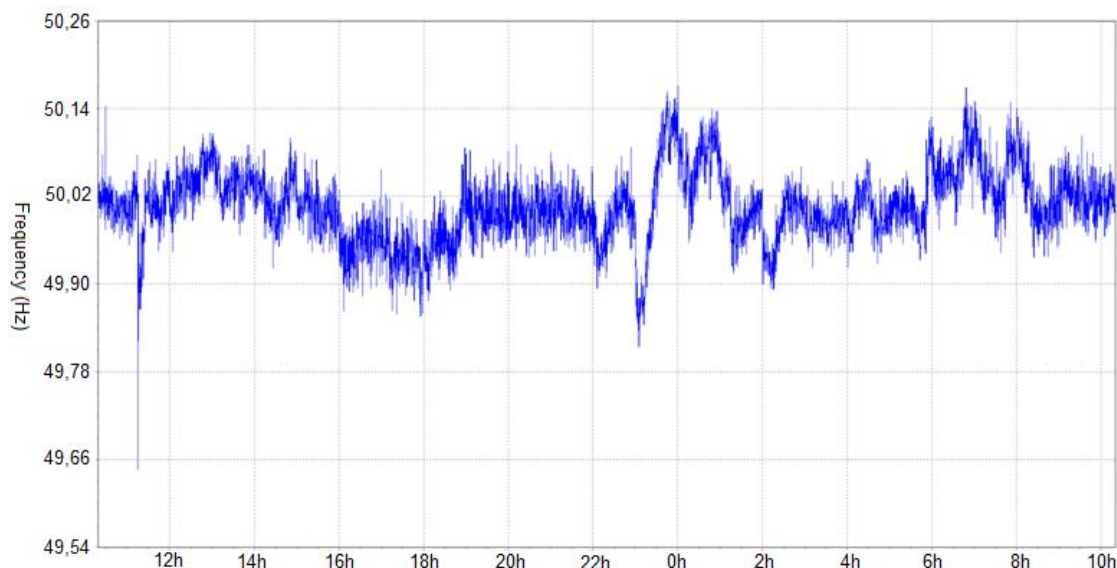
4.5.5 Taajuus

Taulukossa 5 esitetään jokaisen mitatun keskuksen taajuuden 10 sekunnin keskiarvon huippu- ja minimiarvot.

TAULUKKO 5. Taajuuden mitatut huippu- ja minimiarvot eri keskuksilla

Taajuus (Hz)		
Keskus	Max	Min
MSB	50,15	49,834
MSB2	50,159	49,815
MSB3	50,171	49,646
MSB-02	50,154	49,864
MSB-03	50,219	49,849

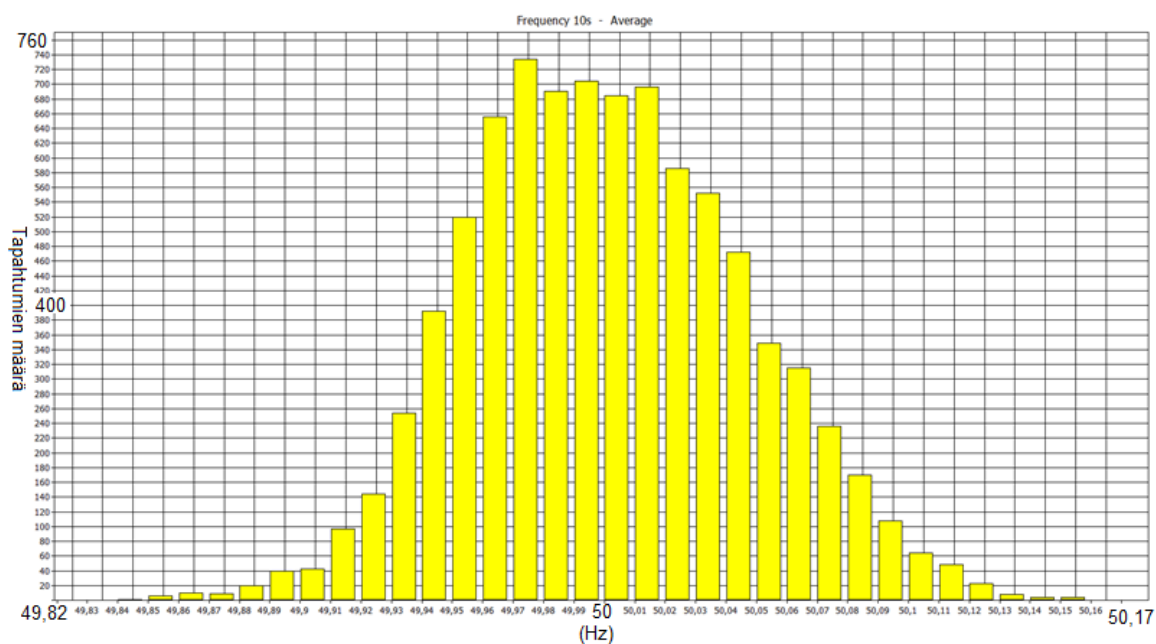
Standardi SFS-EN 50160 määrittää, että vuodessa 95 % ajasta tulee jännitteen olla $f_n \pm 1$ % eli välillä 49,5 Hz – 50,5 Hz ja 100 % ajasta $f_n +4$ % / -6 % eli välillä 47 Hz – 52 Hz. Taulukon 5 mittaustuloksia tarkasteltaessa nähdään, että jokaisen keskuksen syöttämän verkon taajuus pysyy koko mittauksen ajan standardin vaatiman 95 % ajan vaatimuksen sisällä. Suurin poikkeama nimellisarvosta on mitattu keskuksella MSB3 kello 11:15, jolloin taajuuden poikkeama oli $-0,7$ %. Kuvio 4 esittää koko mittauksen taajuuden ajanfunktiona. Mittauksen alkupuolelta havaitaan, kuinka taajuuden 10 sekunnin keskiarvo on hetkellisesti käynyt alimmassa arvossaan 49,646 Hz.



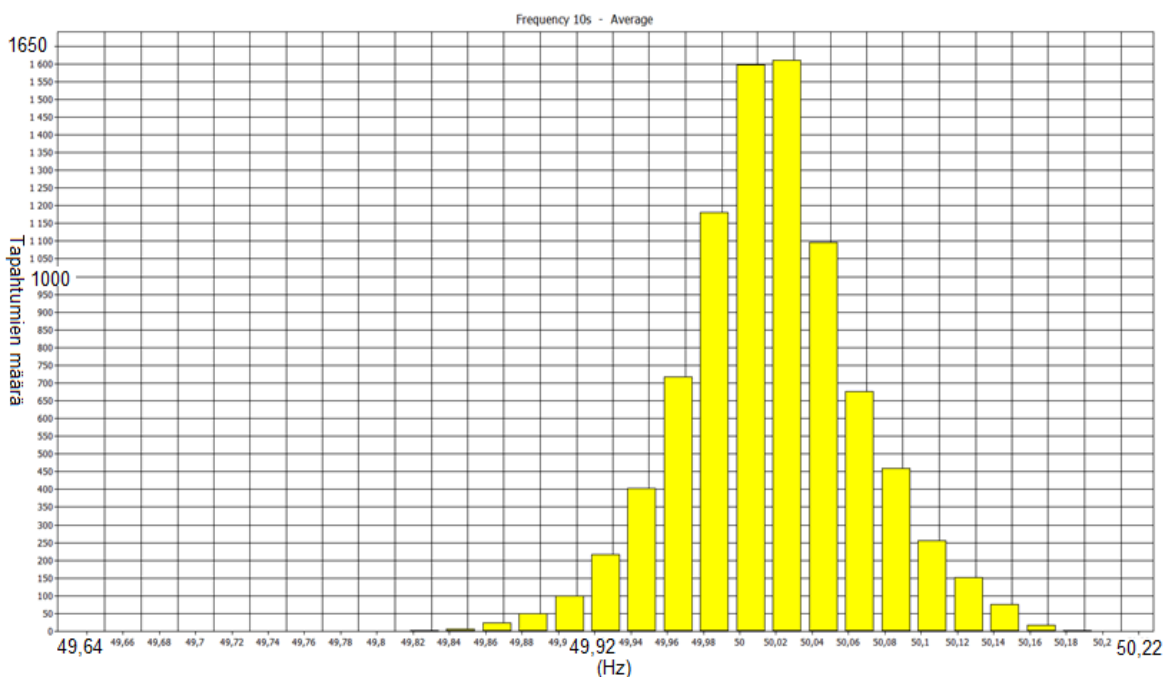
KUVIO 4. Keskuksen MSB3 vuorokauden mittauksen taajuuden 10 sekunnin keskiarvo ajan funktiona (Taskinen 2015-09-04.)

Pelkästään minimi ja maksimiarvojen tarkastelu ei kerro yksiselitteistä totuutta mitattujen verkkojen taajuuden laatueroista. Powerlog-ohjelman avulla saadaan myös graafinen tieto siitä, kuinka monta tapahtumaa mittauksen aikana oli eri taajuuden arvoilla (kuvio 5). Pylväsdiagrammi ilmoittaa pystyakselilla "event" lukumäärän, eli kuinka monta mittaustapahtumaa 10 sekunnin keskiarvolla vaakakselin osoittamalla taajuuden arvolla mittauksen aikana ilmeni. Pylväsdiagrammista huomataan val-

taosan taajuuden mittauksista sijoittuvan noin 49,95 – 50,03 Hz alueelle, eli hyvin lähelle nimellistaajuuden 50 Hz arvoa. Vastaavasti kuvio 6 esittää keskuksen MSB3 taajuuden mittatuloksien hajonnan. Vertailemalla keskuksien MSB ja MSB3 taajuuden mittauksia havaitaan, että vaikka keskuksen MSB3 verkossa oli kaikista mittauksista suurin ero minimi ja maksimi arvoilla (50,171 Hz – 49,646 Hz = 0,525) ja suurin poikkeama taajuuden nimellisarvosta, sijoittui kuitenkin kyseisen keskuksen taajuuden mittaustapahtumista määrällisesti isompi osa hyvin lähelle nimellistaajuuden arvoa.



KUVIO 5. Keskuksen MSB taajuuden mittaustapahtumien jakautuminen eri taajuuden alueille. (Tas-kinen 2015-09-04.)



KUVIO 6. Keskuksen MSB3 taajuuden mittaustapahtumien jakautuminen eri taajuuden alueille. (Tas-kinen 2015-09-04.)

Mittau tuloksien perusteella ei herää epäilystä sähkönlaadun ongelmista taajuuden suhteen. Taajuuden vaihtelu on hyvin pientä, eikä standardin määrittämien raja-arvojen ylityksen riskiä ilmennyt mittauksien aikana.

4.5.6 Yliaallot

Yliaaltojen analysoinnissa keskitytään pääosin yleisimpiin verkossa esiintyviin yliaaltoihin, eli harmoonisiin järjestysnumeroltaan 3., 5., 7., 9. ja 11. yliaaltoihin sekä verkon kokonaissärökertoimen THD arvoon. Taulukossa 6 esitetään kaikkien viiden pääkeskuksen mittauksen THD, 3., 5., 7., 9. ja 11. yliaaltojen osuus kokonaisjännitteestä. Taulukoidut tulokset ovat mittauksen aikana esiintyneet vaihekohtaiset huippuarvot ja ne ovat analysaattorin mittaamia 10 minuutin keskiarvoja.

TAULUKKO 6. Mittauksien vaihekohtaiset 3., 5., 7., 9. ja 11. yliaaltojen sekä THD:n suurin hetkellinen osuus kokonaisjännitteestä.

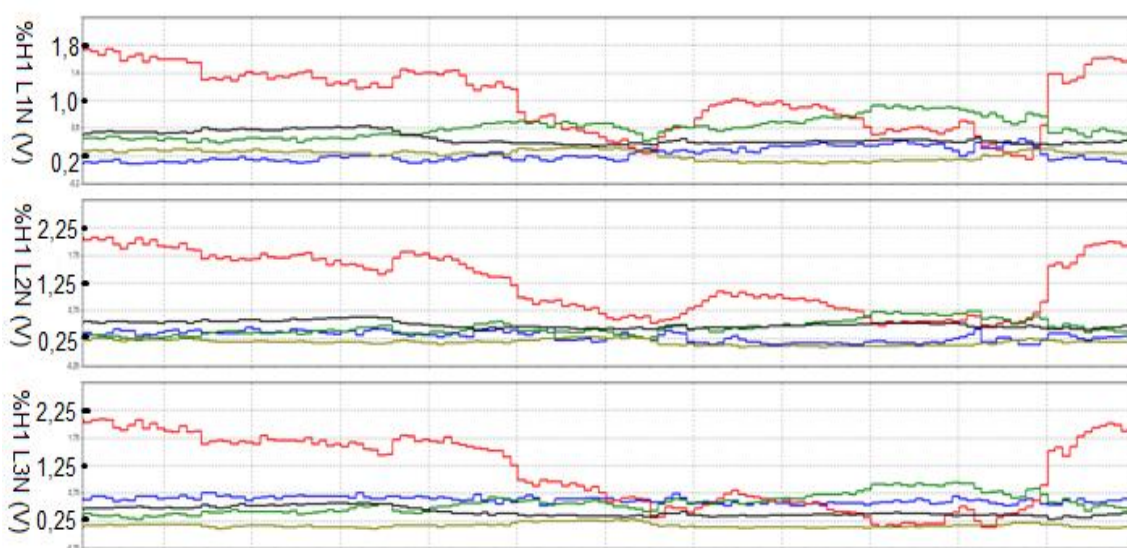
Yliaalto	THD	3.	5.	7.	9.	11.
SFS-EN 50160 sallima $\leq (U_n)$	8 %	5,0 %	6,0 %	5,0 %	1,5 %	3,5 %
Keskus MSB						
L1	1,97	0,44	1,77	0,92	0,63	0,32
L2	2,26	0,44	1,99	0,74	0,63	0,28
L3	2,32	0,76	2,09	0,94	0,57	0,27
Keskus MSB2						
L1	2,41	0,51	1,89	1,19	0,72	0,33
L2	2,59	0,63	2,07	0,99	0,81	0,41
L3	2,59	0,79	2,03	1,19	0,69	0,35
Keskus MSB3						
L1	2,42	0,45	1,90	1,31	0,67	0,31
L2	2,57	0,6	2,22	1,03	0,75	0,39
L3	2,59	0,8	2,16	1,25	0,65	0,35
Keskus MSB-02						
L1	2,51	0,79	1,79	1,33	0,83	0,40
L2	2,55	0,86	2,05	1,2	0,87	0,48
L3	2,59	1,03	2,01	1,27	0,70	0,33
Keskus MSB-03						
L1	2,42	0,63	1,82	1,13	0,86	0,40
L2	2,54	0,69	2,05	0,94	0,85	0,44
L3	2,54	0,99	2,05	1,12	0,69	0,31

Standardi SFS-EN 50160 määrittää, että kokonaissärön eli THD:n osuus saa olla korkeintaan 8 % koko jakelujännitteestä. Taulukoissa 1 ja 6 esitetyistä standardin SFS-EN 50160 määrittämistä raja-arvoista nähdään, että 3. yliaallon sallittu 10 minuutin keskiarvon osuus kokonaisjännitteestä on 5,0 %, 5. yliaallon 6,0 %, 7. yliaallon 5,0 %, 9. yliaallon 1,5 % ja 11. yliaallon 3,5 %. Suurin mitattu THD arvo on 2,59 % ja se esiintyi mittauksissa keskuksen MSB2 vaiheilla L2 ja L3, keskuksen MSB3 vaiheella L3 ja keskuksen MSB-02 vaiheella L3. Vastaavasti suurimmat mitatut yliaaltojen osuudet kokonaiskuormasta olivat:

- 3. yliaalto 1,03 % keskuksella MSB-02 vaiheella L3
- 5. yliaalto 2,22 % keskuksella MSB3 vaiheella L2
- 7. yliaalto 1,33 % keskuksella MSB-02 vaiheella L1
- 9. yliaalto 0,87 % keskuksella MSB-02 vaiheella L2
- 11. yliaalto 0,48 % keskuksella MSB-02 vaiheella L2.

Yliaaltojen määrä verkossa ei ole haitallisen suuri ja standardin raja-arvojen ylittymisen riskiä mittauksissa ei esiinny minkään yliaallon tai kokonaissärön THD suhteen.

Mittauksien perusteella havaitaan, että suurin osa mitatuista yliaalloista on 5. yliaaltoa. Kuviossa 7 esitetään keskuksen MSB yliaaltojen mittaus vuorokauden ajalta. Punainen käyrä esittää 5. yliaaltoa, sininen 3. yliaaltoa, vihreä 7. yliaaltoa, musta 9. yliaaltoa ja keltainen 11. yliaaltoa. Kuvioista nähdään, kuinka päiväsaikaan kuormitusta ollessa enemmän, esiintyy 5. yliaaltoa eniten. Illalla ja yöllä kuormituksen ollessa vähäistä, 5. yliaallon määrä vähenee hetkittäin samalle tasolle muiden analysoidujen yliaaltojen kanssa. Kaikille viidelle mittaukselle tyypillistä oli, että verkon 3., 7., 9. ja 11. yliaaltojen vaihtelu oli vähäistä kokonaiskuormaan suhteutettuna, kun taas 5. yliaalto oli selvämmin riippuvainen kuorman määrästä.



KUVIO 7. Pääkeskuksen MSB mitatut yliaallot vuorokauden aikana. (Taskinen 2015-09-17.)

Verkossa esiintyi myös järjestysnumeroltaan parillisia sekä järjestysnumeroltaan 11. suurempia yliaaltoja. Kuitenkin näiden yliaaltojen osuus kokonaiskuormasta oli niin pieni, ettei niistä aiheutunut sähkönlaadulle merkittävää vaikutusta. Esimerkkinä voidaan mainita keskuksen MSB3 mittaus, jossa järjestysnumeroltaan 2. yliaallon keskiarvo kokonaiskuormasta oli noin 0,08 % ja 4. yliaallon noin 0,04 %.

Estokelaparistoa suositellaan käytettäväksi sähkönverkon THD arvon ollessa yli 3 % (Hietalahti ym. 2006, 52.). Kompensointi onkin toteutettu kaikilla viidellä pääkeskuksella estokelaparistoilla varustetuilla kompensointiyksiköillä, jotka on asetettu viritystaajuudeltaan yliaaltoja suodattavaan 189 Hz taajuuteen. Mittaustuloksien perusteella todetaan, ettei asiakkaan kiinteistön verkossa esiinny merkittäviä määriä yliaaltoja. Kuitenkin yliaaltojen määrän oletetaan tulevaisuudessakin lisääntyvän kulluttajien verkossa. Tästä johtuen on mahdollista, että verkon sähkönlaatu huononee yliaaltojen suhteen. Mikäli tulevaisuudessa yliaaltojen määrä verkossa moninkertaistuisi, jouduttaisiin harkitsemaan esimerkiksi yliaaltosuodattimilla toteutetun kompensoinnin asentamista.

5 SÄHKÖVERKON KOMPENSOINTI

Tietyt sähköverkonlaitteet tarvitsevat pätötehon lisäksi loistehoa toimiakseen oikein. Tällaisissa laitteissa varsinaisen työn tekee pätöteho ja loisteho ylläpitää magneettikenttää. Tyypillisiä loistehoa tarvitsevia laitteita ovat esimerkiksi purkausvalaisimet tai moottorit. Sähköverkon loistehon tarve voi hetkellisesti vaihdella hyvin paljon verkossa esiintyvän kuorman mukaan. (Tiainen ja Vitikka 2004, 131.)

Sähkökäyttäjän tarvitsema loisteho voidaan tuottaa energialaitoksen generaattorilla pätötehon yhteydessä, minkä jälkeen se siirretään sähkökuluttajille kantaverkossa. Kuitenkaan loistehon siirtäminen pitkiä siirtoverkkoja pitkin ei ole ideaalinen ratkaisu verkkoyhtiölle, sillä loisteho vie osan verkon siirtokapasiteetista ja aiheuttaa häviöitä verkon muuntajissa. Tästä syystä sähkökäyttäjiä laskutetaan siirretystä loistehosta erillisellä loistehomaksulla, joka määräytyy kuukausittaisen loistehohuipun mukaan. Loistehon aiheuttama lisääntynyt kapasiteetti kuluttajan liittymässä voi johtaa siihen, että liittymisluokkaa joudutaan suurentamaan, mikä useimmiten johtaa sähköpääkeskuksen tai kiinteistön liittymiskaapelin suurentamistarpeisiin. Kompensoinnin ansiosta verkon kokonaisvirta myös pienenee, mikä vähentää verkon komponenttien, kuten keskuksien lämpenemisestä aiheutuvia häviöitä (Sähköinfo Severi 2014a, 5 – 6.). Yleisesti loistehon siirtämisestä aiheutuvilta lisäkustannuksilta voidaan siis välttyä, kun loistehon tuotetaan siellä, missä on sen tarvetta. (Viljanen 2015.)

5.1 Kompensoinnin laitevalintoja ja toteutustapoja pienjänniteverkossa

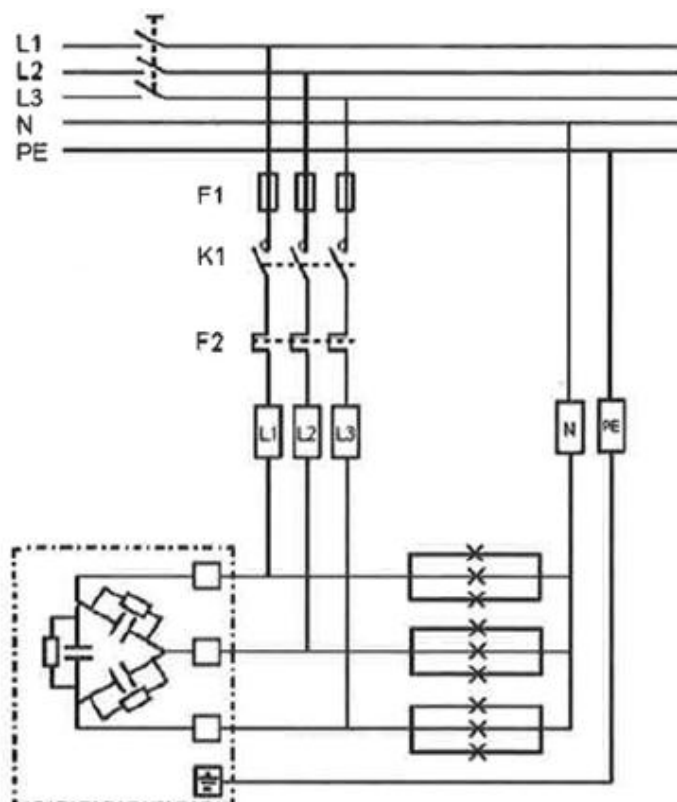
Kompensointi voidaan toteuttaa pienjänniteverkossa käyttäjän tarpeiden mukaan usealla eri ratkaisulla. Toteutustapa voi olla laite- tai ryhmäkohtainen kompensointi tai kiinteistön ryhmä- tai pääkeskukselle sijoitettava keskitetty kompensointi. Laitevalintoina voidaan käyttää verkon sähkölaadullisten tekijöiden mukaan esimerkiksi rinnakkais- tai estokelaparistoja. Hyvin yliaaltopitoisissa verkoissa laitevalintoina käytettäisiin tyypillisesti yliaalto- tai aktiivisuodattimia. (Hietalahti ym. 2006, 88.)

5.1.1 Laitekohtainen kompensointi

Laitekohtaista kompensointia hyödynnetään valaisin- ja moottoriasennuksissa, joissa rinnakkaisparisto kytketään laitteittain loistehoa tarvitsevalle laitteelle. Toteutustavalla vältetään kuormittamasta koko verkkoa tarvittavalla loisteholla, kun loistehon tuotto mitoitetaan ja sijoitetaan laitteittain. Samalla vaikutetaan myös laitteen tehokertoimeen. Esimerkiksi kompensoimattoman ja liitäntälaitteetoman purkausvalaisimen tehokerroin on noin $\cos \varphi 0,5$. Tällöin laitekohtaisen kompensoinnin avulla tehokerroin voidaan nostaa lähelle arvoa $\cos \varphi 0,9$. (Hietalahti ym. 2006, 89.)

5.1.2 Ryhmäkohtainen kompensointi

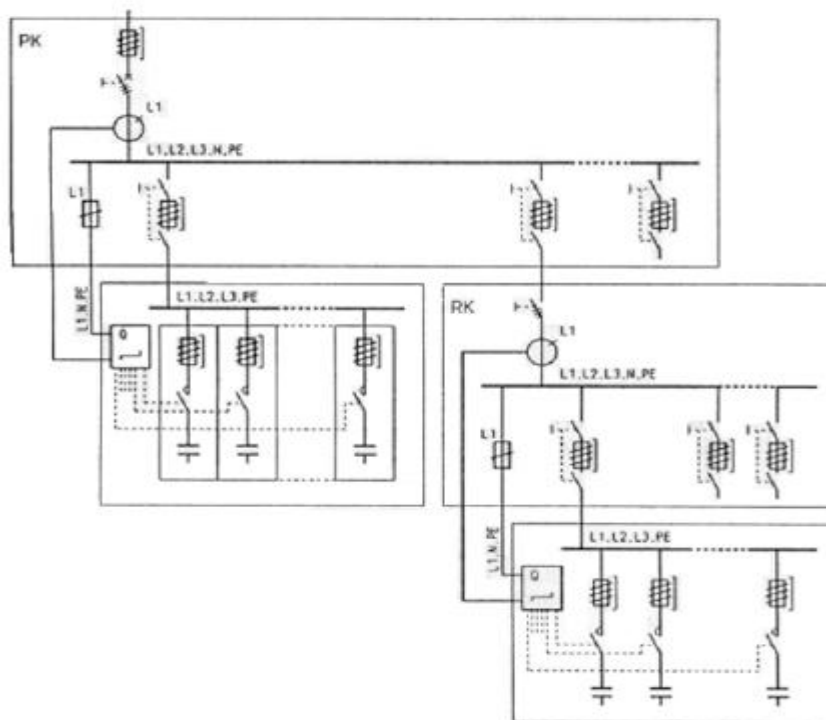
Ryhmäkohtaista kompensointia hyödynnetään pääasiassa 3-vaiheisten valaisin- tai moottoriryhmien kompensoinnissa. Valaisinryhmän kompensointiyksikkö koostuu 400 V:n 3-vaiheisista kondensaattoreista, joka pyritään sijoittamaan kuvan 7 mukaisesti valaisinkuorman painopisteelle. Moottoriryhmän kompensointiteho lasketaan selvittämällä ensin jokaisen ryhmän moottorin kompensointitarve, minkä jälkeen kompensointitehot lasketaan yhteen huomioiden mahdolliset tasauskertoimet. Moottorit ja kompensointilaitteisto voidaan kytkeä verkkoon samanaikaisesti, kun moottoreiden ja kompensoinnin kontaktorien ohjaus toteutetaan yhteisellä ohjauksella. (Hietalahti ym. 2006, 90.)



KUVA 7. Valaisinryhmän kompensointi (Hietalahti ym. 2006, 92.)

5.1.3 Keskitetty kompensointi

Keskitetty kompensointi tarkoittaa toteutustapaa, jossa kompensointilaitteisto on sijoitettu kiinteistön tai teollisuuslaitoksen pää- tai ryhmäkeskukselle kompensoimaan koko keskuksen syöttämään verkkoa. Keskitetyn kompensoinnin kompensointiyksikön laitevalintoina voidaan käyttää rinnakkaisparistoja, estokelaparistoja tai yliaaltosuodattimia. Kondensaattoripariston koko määräytyy pätötehon mukaan. Yleensä kondensaattoripariston koko on noin puolet pätötehon huipusta, mutta mikäli valaistus toteutetaan erillisellä kompensoinnilla, mitoitetaan kondensaattoriparisto noin 35 - 45 % suuruuteen pätöteho huipusta. (Hietalahti ym. 2006, 88 - 89.)



KUVA 8. Keskitetyn kompensoinnin kytkentäperiaate pää- ja ryhmäkeskuksella (Hietalahti ym. 2006, 90.)

Tyypillisesti keskitetyt kompensointiyksiköt ovat rakenteeltaan 3-vaiheisia ja loistehosäätimellä ohjattuja. Säädetävän kompensoinnin rakenne on porrasmainen, jossa jokainen kompensointiporras muodostuu tietyn tehoisesta paristosta tai suodattimesta. Loistehosäädin pyrkii pitämään tehokerroksen asetetussa arvossa kytkemällä automaattisesti kompensointiportaita verkkoon tai verkosta pois senhetkisen loistehotarpeen mukaan. (Hietalahti ym. 2006, 88 - 89.)

5.1.4 Kondensaattoriyksiköt

Nykyään pienjännitteiset kondensaattorielementit valmistetaan pääsääntöisesti metalloidusta polypropyleenikalvosta. Elementit ovat kuivia ja ne on varustettu sisäisellä suojalla ylipainetta, -virtaa ja -lämpöä vastaan. Elementissä tapahtuva lämpilyönti aiheuttaa metallointikerroksen höyrystymisen ja oikosulun ja tekee elementistä itsestään parantuvan. (Hietalahti ym. 2006, 48.)

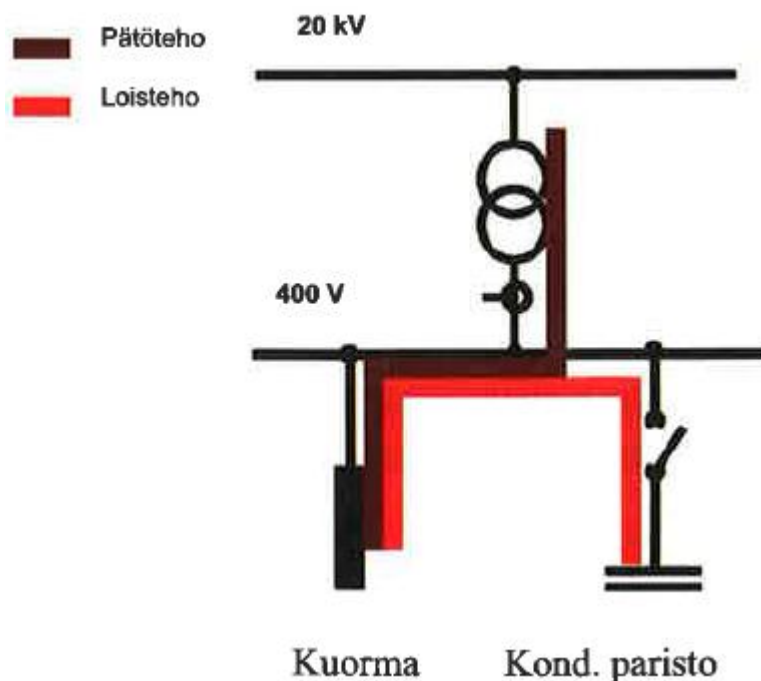
Kondensaattoriyksikkö koostuu rinnankytketyistä kondensaattorielementeistä. Yksiköt ovat yleensä 3-vaiheisia, joiden sisäiset elementit kytketään kolmioon tai tähteen. Tyypillisesti pienjännite kondensaattoriyksikön nimellisjännite on 400 V, 525 V tai 690 V ja loisteholtaan 2,5 – 100 kVAr. (Hietalahti ym. 2006, 48.)

Kondensaattoriyksiköiden huoltotarve on pääsääntöisesti hyvin vähäinen. Kondensaattoriyksiköt tulisi huoltaa ensimmäisen kerran 2 - 3 kuukauden kuluttua laitteiston käyttöönottohetkestä ja tämän jälkeen vuoden välein. Kondensaattoriyksiköiden käyttöikä voi kuitenkin lyhentyä esimerkiksi huonot ympäristöolosuhteet, kuten liian kostea ja kuuma ympäristö. Tästä syystä asennuskohteen ympäristöolosuhteet vaikuttavat merkittävästi laitteiston elinikään. (Sähköinfo Severi 2014a, 6.)

5.1.5 Rinnakkaiskondensaattoriparisto

Rinnakkaiskondensaattoriparistot muodostuvat kondensaattoriyksiköistä, suojalaitteista sekä pariston toimintaa ohjaavista kytkinlaitteista. Ne jaetaan käyttötavan mukaan kiinteisiin ja säädettäviin paristoihin. Kiinteissä paristoissa kondensaattoriparistojen loisteho liitetään kompensoitavaan verkkoon ilman erillistä säätöä. Tällöin kompensointiteho on aina vakio eivätkä kuorman loistehotarpeen muutokset vaikuta kompensointitehon suuruuteen. (Hietalahti ym. 2006, 49 - 50.)

Säädettäviä paristoja eli automatiikkaparistoja käytetään keskitetyssä kompensoinnissa pää- tai ryhmäkeskuksilla. Automaattisessa toiminnassa kondensaattoreita kytetään portaittain verkkoon tai verkosta pois kompensoitavan verkon hetkittäisen loistehotarpeen mukaan. Automatiikkaparistojen ohjauksesta vastaa yleensä loistehon säädin, joka mittaa kuormituksen loistehon hetkittäistä tarvetta. Säädin pyrkii pitämään tehokertoimen mahdollisimman lähellä ennalta asetettua tehokertoimen arvoa ohjaamalla kondensaattoriparistojen kytkinlaitteita. (Hietalahti ym. 2006, 49 - 50.)



KUVA 9. Rinnakkaiskompensoinnin periaate (Hietalahti ym. 2006, 50.)

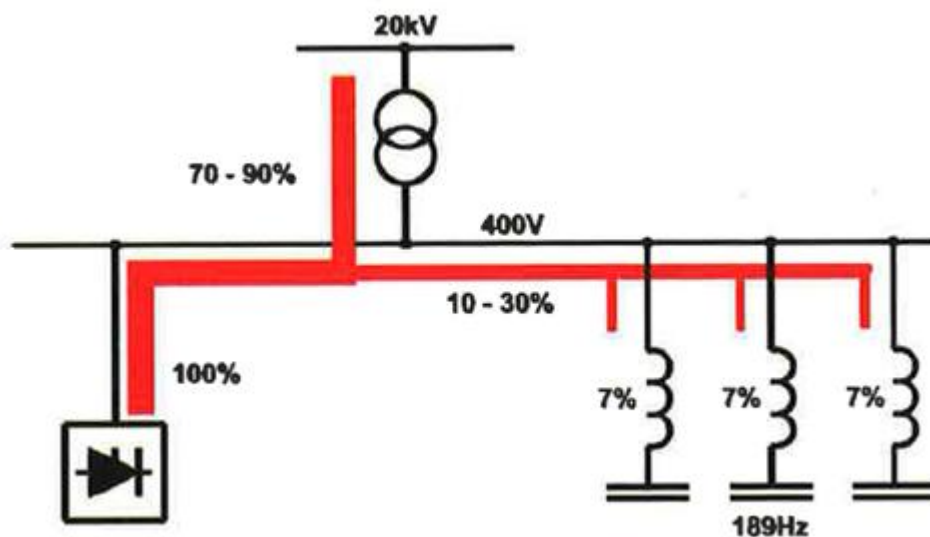
Rinnakkaiskondensaattoripariston käyttö on mahdollista, kun verkossa ei esiinny merkittäviä määriä yliaaltoja. Kuitenkin nykypäivänä estokelaparistot ja yliaaltosuodattimet ovat pääosin syrjäyttäneet rinnakkaisparistot kompensoinnin laitevalintana. Syynä on lähes poikkeuksetta yliaaltolähteitä sisältävä nykypäivän sähkökuorma, joka aiheuttaisivat perinteisien kondensaattoriparistojen kanssa resonointiriskin, vahvistaen yliaaltotaajuiset virrat jopa 20-kertaisiksi. (Hietalahti ym. 2006, 50.)

5.1.6 Estokelaparisto

Yliaaltopitoisissa verkoissa kompensoinnin laitevalintana tulisi käyttää rinnakkaiskondensaattoriparistojen sijasta estokelaparistoja tai yliaaltosuodattimia. Estokelapariston käyttöä suositellaan, kun verkon kokonaissärö THD on yli 3 %. Estokelaparisto on rakenteeltaan porrasmainen, jossa jokainen porraskoostuu kondensaattoripariston ja kuristimen sarjakytkennästä sekä suojaus- ja kytkinlaitteista. (Hietalahti ym. 2006, 52.)

Kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkentä muodostaa sarjaresonanssipiirin, joka viritetään alemmalle taajuudelle, kuin verkossa esiintyvä pienin haitallinen yliaaltotaajuus. Tällöin paristo on viritystaajuuden alapuolella kapasitiivinen, tuottaen loistehoa verkkoon ja viritystaajuuden yläpuolella induktiivinen, jolloin se ei vahvista verkossa esiintyviä yliaaltoja. Tyypillisiä viritystaajuuksia estokelaparistoille on 144 Hz tai 189 Hz. (Hietalahti ym. 2006, 52 - 54.)

Estokelaparistolla on myös yliaaltoja suodattava vaikutus, johon vaikuttavat estokelan kompensointiteho ja viritystaajuus. Suodattava vaikutus on kaikista voimakkain lähellä estokelan viritystaajuutta ja heikkenee, mitä enemmän viritystaajuus poikkeaa yliaaltojen taajuuksista. Tästä johtuen estokelat halutaan virittää verkossa eniten esiintyvien ja ongelmallisimpien yliaaltojen mukaan. Kuvassa 10 esitetään estokelapariston suodattavan vaikutuksen periaate sähköverkossa. (Hietalahti ym. 2006, 52 - 54.)



KUVA 10. Estokelapariston suodattava vaikutus (Hietalahti ym. 2006, 54.)

5.1.7 Yliaaltosuodatin

Merkittäviä määriä yliaaltoja sisältävässä verkossa käytetään kompensoinnin laitevalintana yliaaltosuodattimia. Yliaaltosuodattimien etu on niiden kyky yhtäaikaisesti tuottaa kompensointiin vaadittava loisteho sekä suodattaa verkossa esiintyviä yliaaltovirtoja, vähentäen verkon jännitesärön THD suuruutta.

Yliaaltosuodattimen kompensointiin tarvittavan loistehon tuotto ja yliaaltoja suodattava vaikutus perustuvat kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkentään. Kondensaattoreiden loisteho mitoitetaan vastaamaan haluttua kompensointiastetta. Kondensaattorin kanssa sarjaan kytketyn kuristimen induktanssi mitoitetaan siten, että kuristin ja kondensaattori muodostavat yliaaltotaajuuksille pieni-impedanssisen sarjaresonanssiipiirin, joka imee valtaosan verkossa syntyvistä yliaalloista. Yleensä yliaaltosuodatin koostuu useammasta kuristimen ja kondensaattorin sarjakytkennästä, jolloin jokainen imuupiiri viritetään suodattamaan tiettyä yliaaltotaajuutta siten, että kaikki yleisimmät yliaaltotaajuudet saadaan suodatettua. Tyypillisesti suodatettavia yliaaltotaajuuksia ovat 5., 7. ja 11. yliaalto. (Hietalahti ym. 2006, 55 - 56.)

5.1.8 Aktiivisuodatin

Yliaaltosuodatus voidaan toteuttaa myös perinteisten passiivisten komponenttien lisäksi puolijohdetekniikka hyödyntävillä aktiivisuodattimilla. Passiiviset yliaaltosuodattimet suodattavat aina tiettyä verkon yliaaltoa, kun taas aktiiviset suodattimet ovat ohjattuja virtalähteitä, jotka mittaavat jatkuvasti verkossa esiintyviä eri taajuuksia yliaaltokomponentteja. Aktiivisuodattimet tuottavat mitattuihin yliaaltokomponentteihin nähden 180 asteen vaihesiirrossa olevan virran, jonka vaikutuksesta yliaallon virta kumoutuu verkossa. Suodatin ei myöskään ylikuormitu, vaan kapasiteetin ylittäessä se jatkaa yliaaltojen suodatusta, jättäen kapasiteetin yli menevät yliaaltovirrat suodattamatta. (Hietalahti ym. 2006, 62.)

Aktiivisuodattimen etuja perinteiseen passiiviseen suodattimeen verrattuna on se, että se ei vaadi asennettuna yhtä paljon tilaa ja se voi suodattaa useita eri yliaaltotaajuuksia. Lisäksi aktiivisuodattimella voidaan suodattaa hankalat parittomat kolmella jaolliset nollajohtoon summautuvat yliaallot. Aktiivisuodatin toimii myös riippumatta kompensoitavan virran käyrämuodosta ja suunnasta, kuorman ollessa epäsymmetrinen ja vaihesiirron ollessa induktiivinen tai kapasitiivinen. Toistaiseksi aktiivisuodattimien yleistymiselle esteenä on suodattimien suhteellisen korkea hankintahinta. (Hietalahti ym. 2006, 62.)

5.2 Kompensointiyksiköiden määräaikaishuolto

Kompensointiyksikkö vaatii ajoittain huoltoa aivan kuten muutkin sähköverkon laitteet. Käyttöönotto-tarkastuksen jälkeen kompensointiyksikkö vaatii määräaikaisesti tarkastus ja huoltotoimenpiteet, vaikka käyttöasteesta riippuen laitteisto voi kestää vuosiakin ilman huollon tarvetta. Kompensointilaittevalmistajat ohjeistavat, että ensimmäinen tarkastus laitteistolle tulisi tehdä 2 – 3 kuukautta käyttöönoton jälkeen ja tästä eteenpäin kerran vuodessa. (Hämeen Sähkö Oy 2015.)

Asiakkaan kiinteistön määräaikaishuoltojen vuosiohjelman määräämät kompensointiyksikköjen huollot suoritettiin viidelle kompensointiyksikölle elokuun ja syyskuun vaihteessa. Huollot aloitettiin suorittamalla kompensointiyksikölle aistinvarainen tarkastus. Tämän jälkeen kondensaattoriparistojen kunto tutkittiin kuormittamalla kompensointiportaita ja mittaamalla paristoyksiköiden jokaisen vaiheen virta.

Huollettavat kompensointiyksiköt ovat kohteesta riippuen Alstom Nokian Capacitorsin tai Electronicon kolmivaiheisia estokelaparistoin varustettuja yksiköitä, jotka sijaitsevat sähköpääkeskuksella. Kompensointi on toteutettu kohteesta riippuen joko neljällä, viidellä tai kuudella kondensaattorin ja kuristimen sarjakytken portaalla. Portaiden päälle- ja poiskytkentä on toteutettu automaattisesti kontaktoreja ohjaavalla Nokian Power Factor Controller NC-12 säätimellä, poislukien keskus MSB2, jossa kompensointiyksikön säätimenä toimii Beluk BLR-CX. Kondensaattoriparistojen koko vaihtelee kompensointiyksiköstä ja portaasta riippuen 10 kVAr:sta aina 120kVAr:iin asti. Taulukossa 7 esitetään huollettujen kompensointiyksiköiden portaiden määrä ja paristojen tehot kilovareina (kVAr). Keskuksen MSB2 kompensoinnin paristot ovat Electroniconin valmistamia. Muiden huollettujen keskuksien paristot ovat Nokian Capacitorsin valmistamia.

TAULUKKO 7: Kompensointiyksiköiden porraskohtaiset kondensaattoriparistojen tehot (kVAr)

Porras nro	1.	2.	3.	4.	5.	6.
MSB	40	80	120	120	120	120
MSB2	10	23,2	23,2 + 10,0	23,2 + 23,2	23,2 + 23,2	-
MSB3	10	20	40	40	-	-
MSB-02	20	40	60	80	80	-
MSB-03	20	40	80	80	-	-


Kuvassa 11 on keskuksen MSB kompensointiyksikkö suojakannet avattuna. Alhaalla sijaitsevat kuusi kondensaattoriparistoyksikköä. Paristojen yläpuolella ovat kondensaattoriparistojen kanssa sarjaan kytketyt kuristimet. Kuristimien yläpuolella ovat kompensointiportaita kytkevät kontaktorit ja suojarokkeet. Kontaktoreja ohjaava säädin sijaitsee koteloinnin ovelta. Kompensointiyksikön paristoyksikkö, kuristin, kontaktori ja sulakesuojaus muodostavat yhden kolmivaiheisen kompensointiportaan. Kyseisessä kompensointiyksikössä portaita oli yhteensä kuusi.



KUVA 11. Keskuksen MSB estokelaparistoin toteutettu 6-portainen kompensointiyksikkö (Taskinen 2015-10-20.)

5.2.1 Aistinvarainen tarkastaminen

Kompensointiyksikön määräaikaishuoltoon sisällytetään aistinvarainen tarkastus, joka voidaan suorittaa kompensointiyksikön ollessa normaalisti toiminnassa. Kompensointiyksiköllä työskennellessä on tärkeää muistaa, että vaikka kompensointiyksikkö olisi kytketty jännitteettömäksi, voivat kondensaattoriparistot olla vielä varautuneita ja hengenvaarallisia pitkiäkin aikoja. Isoissa kompensointiyksiköissä energiamäärät ovat niin suuria, että on myös olemassa valokaaren riski. Toisinaan pienjännitekondensaattoriryksikössä asennetaan napojen välille purkausvastukset, joiden ansiosta paristo purkaa varaamansa jännitteen nopeammin. Huollettavissa paristoissa vastuksia ei ollut asennettuna. Valmistaja kuitenkin määrittelee paristojen jännitteen purkautumisajan alle tietyn jännitetason. Esimerkiksi Nokian Capacitorsin valmistamalle keskuksen MSB03 kompensointiyksikön paristoille on määritelty alle 75 Voltin jännitteeseen purkautumiselle ajaksi 180 s.

 NOKIAN CAPACITORS AN ALSTOM COMPANY	
PJ-ESTOKELAPARISTO	
TYYPPI	D137.5/12+25+2x50-400-50/189-0618E
MITOITUSTEHO	137.5 kvar
NIMELLISJÄNNITE	400 V
NIMELLISTAAJUUS	50 Hz
MITOITUSVIRTA	232 A
MITOITUSKAPASITANSSI	μF
MITOITUSINDUKTANSSI	mH
VIRITYSTAAJUUS	189 / 7 Hz/%
OIKOSULKUVIRTA I _{cw}	25 kA
PURKAUTUMISAIKA 75 V	180 s
JÄLLEENKYTKENTÄAIKA MINIMI	s
LÄMPÖTILA-ALUE	0/+40 °C
IP-KOODI	IP20C
STANDARDI	IEC/EN 61439-2

KUVA 12. MSB03 Kompensointiyksikön tekniset tiedot (Taskinen 2015-10-20.)

Aistinvarainen tarkastus aloitettiin tarkastamalla laitteisto ulkopuolisesti varmistamalla, että varoitus- ja merkintäkilvet ovat paikoillaan, laitteiston käyttöohjeet löytyvät keskustilasta, kotelointi on ehjä ja kannen lukitus toimii. Sisäpuolelta tutkittiin ensimmäisenä yleinen siisteys, ettei laitteistoon ole kerntynyt pölyä ja likaa, joka aiheuttaisi toimintahäiriöitä. Tarkastuksessa irrotettiin ilmansuodattimet ja varmistettiin, että ne eivät ole keränneet liikaa pölyä tai muuta ilman kiertämistä haittaavaa likaa. Riittävän ilmankierron varmistamiseksi oli hyvä myös tarkistaa, että kompensointiyksikön tuulettimet pyörivät kunnolla, jotta laitteiston jäähdytys toimii oikein ja vältetään ylikuumentumista, sillä korkeat lämpötilat voivat lyhentää kondensaattorien käyttöikää merkittävästi. Jäähdytystä tarkastaessa varmistettiin myös, että tuuletinta ohjaava lämpörele reagoi sen asetusarvojen muutoksiin, jotta tuulettimet toimivat ennenkuin kompensointiyksikön lämpötila nousee merkittävästi. Aistinvaraisessa tarkastuksessa on myös tärkeää kiinnittää huomiota mahdollisiin toiminnasta aiheutuviin ääniin, koska esimerkiksi viallinen kontaktori voi toimiessaan pitää totutusta poikkeavaa ääntä.

Aistinvaraista tarkastusta jatkettiin käymällä silmämääräisesti läpi laitteiston mekaaninen kunto. Ensimmäisenä tarkastettiin sulakkeiden ehjyys ja katsottiin laitteiden liitokset, että ulkopuolisesti kaikki näytti olevan kunnossa. Tämän jälkeen varmistettiin kondensaattoriparistojen kunto, ettei niissä ilmene kolhuja, pullistumia tai muita selkeitä päällepäin näkyviä vaurioita. Mikäli silmämääräisesti ei havaita mitään huomauttamisen arvoista, voidaan laitteiston olettaa olevan tältä osin kunnossa.

5.2.2 Aistinvaraisien tarkastuksien tulokset

Ensimmäinen huomio määräaikaishuollon aikana oli, että kompensointi oli jokaisessa kiinteistössä vähäisellä käytöllä. Yleisesti ottaen kaikkien kompensointiyksiköiden ilmoittama sähköverkon tehokerroin oli induktiivinen $0,99 - 1,0 \cos \varphi$ ja kompensointia oli käytössä yksiköstä riippuen 0-2 porrasta. Vähäisimmillään kompensointiyksikön käyttö oli keskuksella MSB3, jossa ei huoltojen aikana ollut kompensoinnin portaita lainkaan kytkettynä. Kyseisen kompensointiyksikön ohjauspaneelista luettavan käyttöhistorian mukaan kompensoinnilla oli ollut yhteensä vain 191 kytkennän ohjaustahtumaa.

Huomioitavaa on myös, että pääkeskuksen MSB-02 kompensointiyksiköllä oli määräaikaishuoltoa aloittaessa kompensointia käytössä kaksi porrasta yhteensä viidestä portaasta, mikä oli laskenut ohjauspaneelin ilmoittaman tehokertoimen kapasitiiviseen $\cos \varphi$ 0,96 arvoon, aiheuttaen näin verkkoon ylikompensointia. Ohjauspaneeli resetoitiin ja automaattiohjaus otettiin uudelleen käyttöön, jonka jälkeen kompensointi asettui ensimmäiselle portaalalle ja tehokerroin asettui arvoon $\cos \varphi$ 1. Syy poikkeavaan tehokertoimeen oli, että kompensoinnin ohjauspaneelia oli käytetty käsikäytöllä, eikä ohjausta palautettu sen jälkeen automaattille.



KUVA 13. Kompensointiyksikön MSB-03 varokesuojaus (Taskinen 2015-10-20.)

Aistinvaraisien tarkastuksien perusteella ei havaittu kompensointiyksiköiden kunnossa puutteita, jotka aiheuttaisivat tarvetta jatkotoimenpiteille. Laitteistot olivat siisteydeltään lähes uuden veroisia, eikä likaa tai pölyä ollut kertynyt suojakoteloinnin sisäpuolelle. Laitteiston ilmanvaihto toimi vähäisestä kuormituksesta huolimatta ja ilmanvaihtoa ohjaava lämpörele reagoi asetusarvojen muutoksiin. Myös ilmansuodattimet olivat puhtaat, eikä niitä jouduttu vaihtamaan. Komponenttien ja laitteiston koteloinnin mekaanisessa kunnossa ei havaittu huomautettavaa. Lisäksi laitteiston tekniset kilpiarvot ja huoltomerkinnot olivat paikoillaan ja luettavissa yksikön koteloinnin kannessa.



KUVA 14. Kompensointiyksikön ilmansuodattimen irrotus ja tarkastus (Taskinen 2015-08-27.)

5.2.3 Kondensaattoriparistojen virtamittaus

Kompensointiyksikön kondensaattoriparistojen, kontaktorien ja ohjauspaneelin kunto tutkittiin kytkemällä kompensoinninportaita käsikäyttöisesti aloittaen ensimmäisestä portaasta ja edeten järjestyksessä porraskerrallaan viimeiseen portaaseen asti. Kytketyn portaan kondensaattoriyksikön jokaisen vaiheen virta mitattiin käyttäen digitaalista 240 CAT II/600V -virtapihtimittaria. Kondensaattoriyksiköiden virtamittauksen yhteydessä pystyttiin samalla koestamaan kompensointiyksikön säätimen ja kompensointiportaiden kontaktorikytkentöjen oikea toiminta.

5.2.4 Kondensaattoriparistojen virtamittauksen tulokset

Taulukoissa 8, 9, 10, 11, ja 12 esitetään keskuksien MSB, MSB2, MSB3, MSB-02 ja MSB-03 kompensointiyksiköiden kondensaattoriparistojen virtamittaus. Tuloksissa esitetään kompensointiyksiköiden jokaisen kondensaattoriportaan nimellisvirrat I_n sekä mitatut vaihevirrat yhden desimaalin tarkkuudella.

TAULUKKO 8. Keskuksen MSB kondensaattoriparistojen nimellisvirrat ja virtamittaus

MSB	I_n (A)	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)
1. porras	44	34,9	35,3	35,0
2. porras	80	71,0	70,6	70,5
3. porras	132	108,9	107,6	108,2
4. porras	132	107,8	107,1	108,3
5. porras	132	110,0	109,8	108,1
6. porras	132	108,0	107,7	108,1

TAULUKKO 9. Keskuksen MSB2 kondensaattoriparistojen nimellisvirrat ja virtamittaus

MSB2	I_n (A)	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)
1. porras	14	17,8	18,1	18,0
2. porras	37	34,1	34,3	34,1
3. porras	51	50,4	50,2	50,2
4. porras	74	72,1	71,0	72,0
5. porras	74A	70,8	71,3	70,4

TAULUKKO 10. Keskuksen MSB3 kondensaattoriparistojen nimellisvirrat ja virtamittaus

MSB3	I_n (A)	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)
1. porras	11	9,0	9,0	9,1
2. porras	22	18,5	18,7	18,5
3. porras	44	36,7	37,1	37,0
4. porras	44	37,2	37,0	37,6

TAULUKKO 11. Keskuksen MSB-02 kondensaattoriparistojen nimellisvirrat ja virtamittaus

MSB-02	I_n (A)	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)
1. porras	22	18,4	18,5	18,5
2. porras	44	35,6	35,1	35,2
3. porras	66	55,1	55,0	54,7
4. porras	88	73,7	74,2	73,9
5. porras	88	74,1	74,0	74,5

TAULUKKO 12. Keskuksen MSB-03 kondensaattoriparistojen nimellisvirrat ja virtamittaus

MSB-03	I_n (A)	L1 (A)	L2 (A)	L3 (A)
1. porras	22	18,1	18,0	18,0
2. porras	44	35,4	35,7	35,5
3. porras	88	73,1	73,2	72,8
4. porras	88	72,9	73,0	73,5

Virtamittauksien perusteella todetaan, että kaikkien kompensointiyksikköjen ohjauspaneeli toimii oikein sekä automaattiasetuksella että käsikäyttöisenä. Kompensointiportaita pystyttiin käsikäytöllä kuormittamaan huoltosuunnitelman mukaisesti mittauksien ajan. Ohjauspaneeli myös palautti kompensointiasteen porras kerrallaan tehokertoimen arvoon $\cos \varphi$ 0,99 - 1, kun automaattiohjaus kytkettiin takaisin käyttöön. Samalla varmistettiin, että portaiden kytkennöistä vastaavat kontaktorit toimivat oikein yhdessä ohjauksen kanssa.

Virtamittauksien arvojen analysoinnissa kiinnitettiin huomiota vaiheiden keskinäiseen symmetriaan ja vaihevirtojen suuruuteen suhteessa nimellisvirtaan I_n . Mittaustulokset esitetään yhden desimaalin tarkkuudella, mikä on analysointiin riittävä tarkkuus, kun otetaan huomioon 240 CAT II/600V -virtapihtimittarin tarkkuus ja mitattujen virtojen kokoluokka.

5.2.5 Virtamittauksien tuloksien analysointi

Kondensaattoriyksikköjen virtojen epäsymmetriat olivat taulukoitujen mittaustuloksien perusteella niin pieniä, etteivät ne aiheuta epäilyjä kondensaattoriyksiköiden puutteellisesta kunnosta. Suurimmillaan epäsymmetria ilmeni keskuksen MSB kompensoinnin 3. portaalla vaiheiden L1 ja L2 välillä, jolloin mitattujen virtojen suurusero oli $108,9 \text{ A} - 107,6 \text{ A} = 1,3 \text{ A}$. Kyseisen portaan nimellisvirta I_n on 132 A , joten ero on suhteessa niin pieni, ettei sen perusteella ole syytä epäillä merkittävää pariston kompensointitehon heikkenemistä.

Vaihevirtojen mittaustuloksia tarkasteltaessa verrattiin mitatun virran suuruutta suhteessa kondensaattoripariston kilpiarvoissa määriteltyyn nimellisvirtaan I_n . Tuloksien perusteella voidaan yleistää, että mitatut vaihevirratt olivat pääosin kondensaattoriyksiköiden nimellisvirtoja hieman pienempiä, lukuun ottamatta keskuksen MSB2 kompensointiyksikön ensimmäisen portaan Electroniconin kondensaattoriyksikköä, jossa pariston nimellisvirta on 14 A ja mitatut vaihevirratt olivat $17,8 - 18,1 \text{ A}$. Valmistajittain kondensaattoreille sallitaan tietty virran arvo, jonka niiden tulee kestää pitkäaikaisessa kuormituksessa. Electronicon sallii kondensaattoreilleen pitkäaikaisen kuormitusvirran suuruuden $1,3 \times I_n$ arvosta jopa $2,0 \times I_n$ virran arvoihin asti (Electronicon 2014). Vastaavasti Nokian Capacitorsin kondensaattoriyksiköiden pitkäaikaiseksi virran kuormitukseksi sallitaan $1,3 \times I_n$ (Nokian Capacitors 2008). Kompensoinnin MSB2 ensimmäisen portaan kondensaattoriyksikön mitatut vaihevirratt oolivat $1,27 - 1,29$ -kertaisia nimellisvirtaan 14 A nähden, joten virran suuruuksien ei oletta olevan pariston kunnolle haitallisia, vaikka ne ylittivät nimellisvirran arvon.

Kondensaattoriyksiköiden virtamittauksien perusteella ei ole aihetta epäillä, että kondensaattoriyksiköiden kunnossa olisi puutteita. Vuosihuoltojen perusteella todetaan, että kompensointiyksiköt ovat hyvässä kunnossa ja toimivat oikein. Tarkastustulokset raportoidaan asiakkaan huoltojärjestelmään ja seuraava huolto määritetään tehtäväksi noin vuoden kuluttua syksyllä 2016.

6 KESKUKSIEN JA KOMPENSOINTIYKSIKÖIDEN LÄMPÖKUVAUS

6.1 Lämpökuvauksen hyödyntäminen sähköhuolloissa

Lämpökuvaus on yleistynyt yhtenä osana sähkökunnossapidon palvelutarjontaa. Se on yksi parhaita ja vähiten normaalia laitteiston toimintaa häiritseviä tapoja selvittää sähköteknisten laitteiden kuntoa sekä ennakoita mahdollisia henkilö- ja omaisuusvahinkoja aiheuttavia vikoja. Tilastollisesti arviolta noin kolmannes kaikista tulipaloista saa alkunsa sähkölaitteiden viallisesta toiminnasta (Sähkö SASP Oy 2015). Lisääntyneet sähköpalot ovat yksi syy sähkölaitteiston kuvaamisen yleistymiselle huolto-toimenpiteenä, jolla pyritään ennakoimaan tuotannon keskeytyksiin ja vaaratilanteisiin johtavat paloriskit. (Sähköinfo Severi 2014c, 1.)

Lämpökameratekniikan kehittymisen myötä kameroiden koko on pienentynyt ja mittaustarkkuus parantunut, minkä vuoksi kameran käyttäminen on entistä vaivattomampaa ja mittaustulokset ovat luotettavampia. Lämpökuvauksen suorittamista varten ei tarvita fyysistä kontaktia kohteeseen, joten kohteen vaurioitumisriskiä ei synny eikä liikkuva tai luoksepääsemätön kohde ole mahdoton kuvata. (Sähköinfo Severi 2014c, 6.)

6.2 Lämpökameran toimintaperiaate

Lämpökamera on toimintaperiaatteeltaan pyrometri eli lämpösäteilyn vastaanotin, jonka toiminta perustuu materiaalien pinnalta säteilevän lämpösäteilyn havaitsemiseen. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, joka on fyysisestä kontaktista aiheutuvan johtumisen ja kulkeutumisen lisäksi merkittävimpiä lämpöenergian leviämistapoja. Lämpökamera mittaa säteilevän lämpöenergian ja muodostaa sen perusteella digitaalisen kuvan, jonka värisävyt ilmaisevat pintojen lämpötilan. (Sähköinfo Severi 2014c, 6.)

Emissiivisyys eli emissiokerroin on materiaalin lämpösäteilyä kuvaava ominaisuus. Kerroin kuvaa, kuinka suuren osan mitatusta lämpösäteilystä kappale itse säteilee ja kuinka suuri osa säteilystä on peräisin muualta ympäristöstä. Kertoimen arvo sijoittuu 0:n ja 1:n välille. Emissiokertoimen 0 omaava materiaali heijastaa täydellisesti kaiken lämpösäteilyn ja kertoimen 1 omaava materiaali on täysin heijastamaton. Todellisuudessa näitä ääriarvoja ei esiinny, vaan emissiokerroin on aina jotain niiden väliltä. Taulukossa 13 on esitetty joitakin aineille määriteltyjä ohjeellisia emissiokertoimia. (Sähköinfo Severi 2014c, 5 - 6.)

TAULUKKO 13. Aineiden ohjeellisia emissiokertoimia (Sähköinfo Severi 2014c, 6.)

Ihmisen iho	0,98
Vesi	0,98
Sähköteippi	0,95
Maali	0,9
Paperi	0,9
Posliini, lasitettu	0,92
Posliini, kiiltävä valkoinen	0,70 - 0,75
Kupari, hapettunut	0,68
Kupari, kiillotettu	0,02
Alumiini, kiillotettu	0,05
Alumiini, hapettunut	0,20 - 0,30
Alumiini, karkeistettu	0,18
Volframi, hehkulanka	0,39

Lämpökameran mittauksen luotettavuutta saadaan parannettua asettamalla kuvausasetuksiin kuvattavan materiaalin emissiokerroin ja ympäristön taustalämpötila. Matalien emissiokertoimien kuvaaminen on yleisesti ottaen epäluotettavaa huolimatta kameran kuvausasetusten asettamismahdollisuuksista. Alle 0,6 emissiokertoimen omaavien materiaalien luotettava lämpökuvaaminen on jo vaikeaa eikä mittaus ole yleensä tarkka, vaikka ympäristön aiheuttama lämpösäteily huomioidaan. (Sähköinfo Severi 2014c, 5 - 6.)

6.3 Lämpökuvaamisen suorittamisperiaatteet ja tavoitteet

Opinnäytetyön yhtenä tavoitteena oli tehdä pääkeskuksille ja kompensointiyksiköille määräaikaishuoltoihin kuuluva yleinen kunnon tarkastus. Tästä syystä mitatut keskuksat ja kompensointiyksiköt kuvattiin Fluke Ti105 -lämpökameralla aistinvaraisin tarkastuksien jälkeen. Toimenpide on normaalisti melko vaivaton, nopea ja turvallinen suorittaa. Fyysistä kontaktia keskuksen osiin kuvauksen aikana ei tarvita, mutta aina on olemassa pieni valokaaren riski, minkä takia kuvauksen ajan tulisi käyttää suojaavia varusteita. Informatiivisten kuvien saamisen vuoksi on hyvä avata keskuksen suojakannet ja peitelevyt siltä osin, kuin se on työn suorittamisen kannalta turvallista ja tarpeellista. Tämän jälkeen keskus kuvataan noin 1,5 m päästä. (Fluke Corporation 2008.)

6.4 Fluke Ti105 -lämpökamera

Fluke Ti105 -lämpökamera on teollisiin ja kaupallisiin sovelluksiin suunniteltu malli. Kameran suunnittelussa on pyritty varmistamaan sen helppo ja nopea käytettävyys, jotta vian haku olisi mahdollisimman vaivatonta ja nopeaa. Laite painaa noin 0,7 kg ja pienikokoisena laitteena sen käyttö on mahdollista myös ahtaammissa tiloissa. (Fluke Corporation 2015c.)

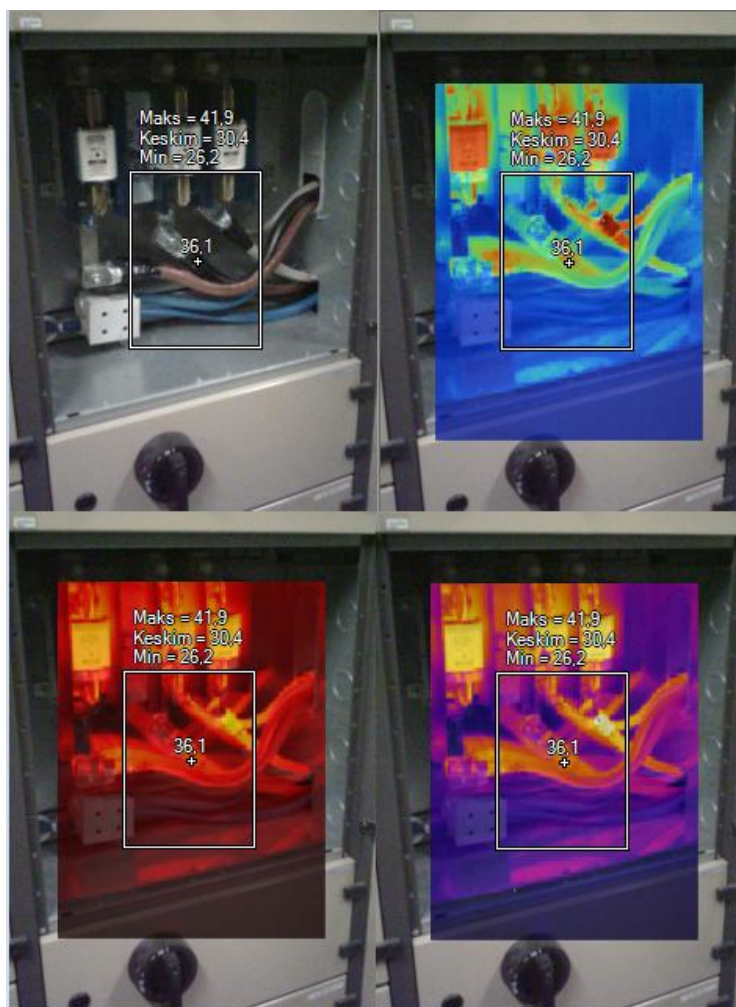
Fluke Ti105:n ominaisuuksiin kuuluvat IR-Fusion tekniikka, joka mahdollistaa kahden kuvan näkymän. Tekniikan avulla käyttäjä voi tarkastella yhtäaikaaisesti perinteistä valokuvaa ja lämpökuvaa. Fluke Connect -ominaisuudella kuvausmateriaalin tallentaminen ja jakaminen onnistuu esimerkiksi saman tien kuvauspaikalla älypuhelimien tai tabletin avulla. Integroidulla kohdevalolla mahdollistetaan huonosti valaistussa tilassa kuvaaminen. (Fluke Corporation 2015c.)



KUVA 15. Fluke Ti105 -lämpökamera (Taskinen 2015-10-27.)

6.5 Fluke SmartView

SmartView on Fluken suunnittelema ohjelma, jonka avulla pystytään optimoimaan ja analysoimaan kerättyä kuvamateriaalia tehokkaasti. SmartView on saatavilla tietokoneelle, tabletille ja kännykälle. Ohjelmiston voi ladata ilmaiseksi Fluken sivustolta tai mobiililaitteille App Storesta. Ohjelma mahdollistaa emissioikertoimen ja taustalämpötilan säätämiseen sekä kuvan värikartan vaihtamisen soveltuvuuden mukaan. Kuvassa 16 esitetään sama kuva vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas ensin ilman värikarttaa ja tämän jälkeen värikartoilla "sininen ja punainen", "kuuma metalli" ja "rautasävyt" Lisäksi SmartView:n avulla kuviin pystytään lisäämään vapaasti merkintöjä, kuten lämpötilapisteitä. Ohjelmisto mahdollistaa laajoilla ominaisuuksilla varustellun ammattimaisen raportin luomisen, mikä lähetys onnistuu helposti vaikka mobiililaitteella kuvauspaikalta. (Fluke Corporation 2015b.)

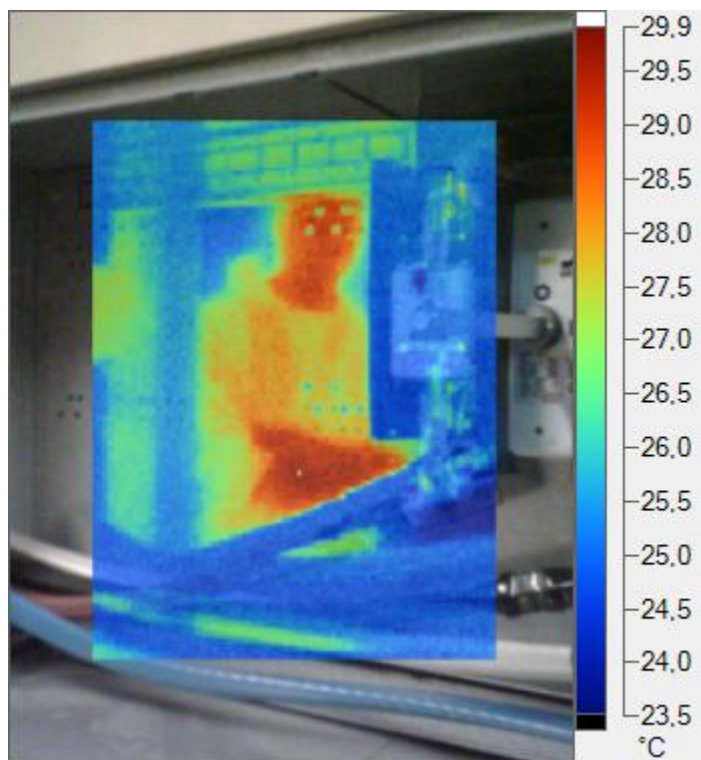


KUVA 16. SmartViewin värikarttojen muokkausmahdollisuuksia (Taskinen 2015-10-26.)

6.6 Lämpökuvauksen suorittaminen

Lämpökuvauksien aluksi Fluke Ti105 kameran asetukset säädettiin kuvaksia varten. Asetuksista määriteltiin kuvaustilojen taustalämpötilaksi 24 °C ja heijastukset huomioivaksi emissiokertoimeksi 0,95. Asetetun emissiokertoimen ja taustalämpötilan avulla pyritään saamaan mahdollisimman tarkkoja arvoja korkean emissionkertoimen omaavista pinoista, kuten kaapelien eristeistä. Joillakin kuvattavien pintojen materiaaleilla, kuten alumiinisilla kaapelikengillä on matala emissiokerroin 0,05 – 0,30. Tästä johtuen pinnoissa esiintyy herkästi lämpösäteilyn heijastumia, jotka aiheuttavat kuvan lämpötila-arvojen tarkkuuden heittelyä. Mitattavan kohteen emissiokertoimen ollessa alle 0,6, on lämpökuvan tulokset herkästi epäluotettavia kameran asetusarvojen valitsemisesta huolimatta. (Sähköinfo Severi 2014c, 6.)

Kuvaukset aloitettiin avaamalla normaalisti kuormitetun keskuksen ja kompensointiyksikön suojakannet auki, jotta komponentteihin saatiin esteetön näköyhteys. Tämän jälkeen keskus ja kompensointiyksikkö kuvattiin kauttaaltaan. Lämpökuvatessa tuli varoa, ettei esimerkiksi keskuksen kotelointi heijasta lämpökuvaaajasta peräisin olevaa lämpösäteilyä, jolloin kuvan informatiivisuus kärsii. Kuvassa 17 esitetään lämpökuva, jossa kuvaaja heijastuu nousujohdon syöttöä ympäröivästä suojakoteloinnista.



KUVA 17. Keskuksen koteloinnista heijastuva lämpökuvaaja (Taskinen 2015-10-27.)

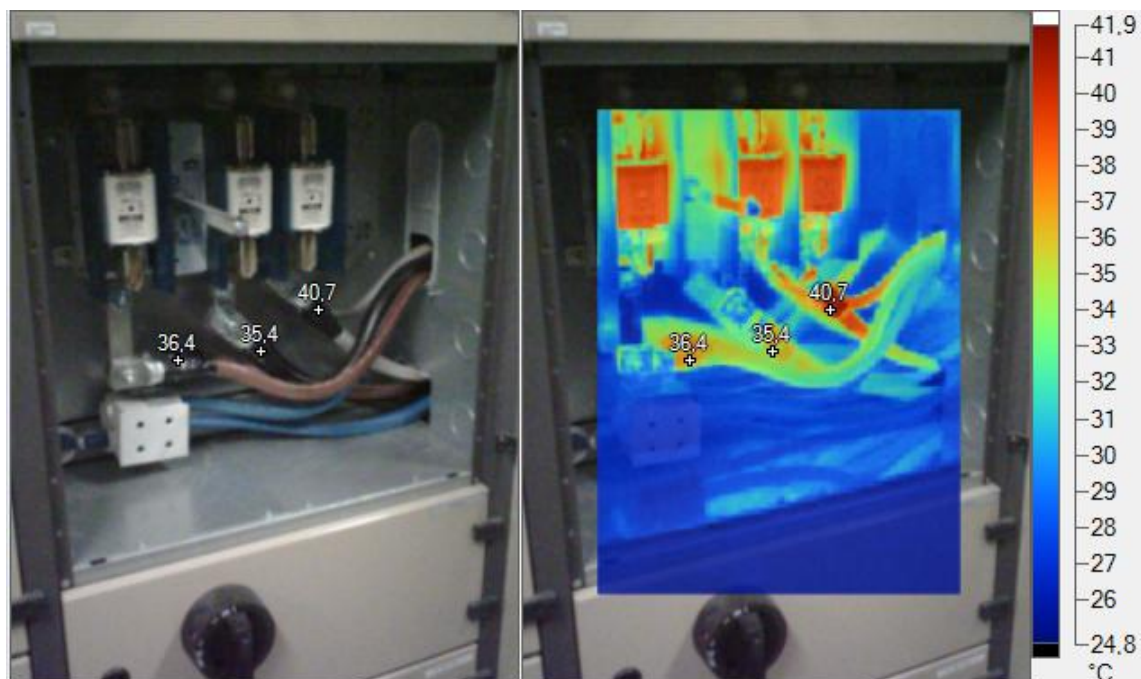
Lämpökuvista havaittiin, mitkä keskuksen tai kompensoinnin osat olivat lämmenneitä kuormituksen johdosta. Esimerkiksi vedenjäähdytyslaitteiston nousujohto oli jo viilenneen kelin takia täysin ilman kuormitusta, joten lämpökuvan kautta ei pystytty analysoimaan komponenttien kuntoa. Mikäli kuormitetuissa komponenteissa, kuten kaapelien liittimissä, havaittiin huomattavan korkeita lämpötiloja tai keskinäisiä suuria lämpötilaeroja, mitattiin komponenttien kuormitusta Fluke FC a3001 virtamittarilla.

Opinnäytetyöni aihealueen rajauksen johdosta mahdolliset lämpökuvien tuloksista johtuvat jatkotoimenpiteet eivät kuulu työni raportointiin. Kuitenkin mahdollisesti ilmeneviin huomiota herättäviin lämpökuviiin reagoidaan jatkotoimenpitein, joilla laitteiston epänormaalien lämpenemien syy saadaan selvitettyä ja korjattua.

6.7 Lämpökuvien analysointi

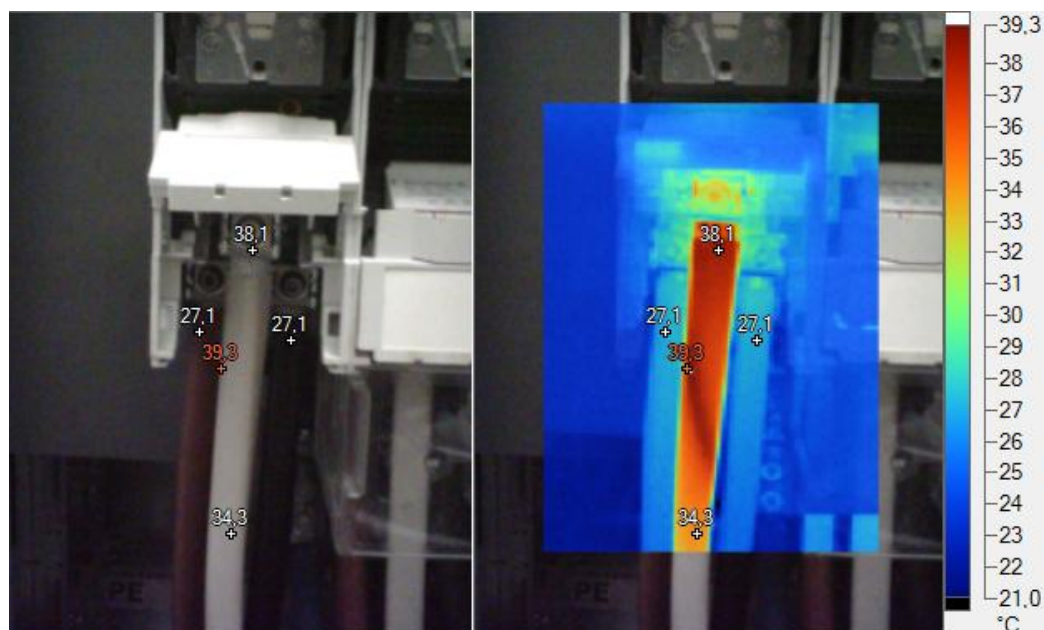
6.7.1 Pääkeskuksien lämpökuvauksien päätelmät

Lämpökuvauksen avulla tarkastettavilta pääkeskuksilta löydettiin kolme lämpenemää, jotka aiheuttavat jatkotoimenpiteitä kuvaamisen jälkeen. Huomiota aiheuttaneet lämpenemät esitetään kuvissa 18, 19 ja 20.



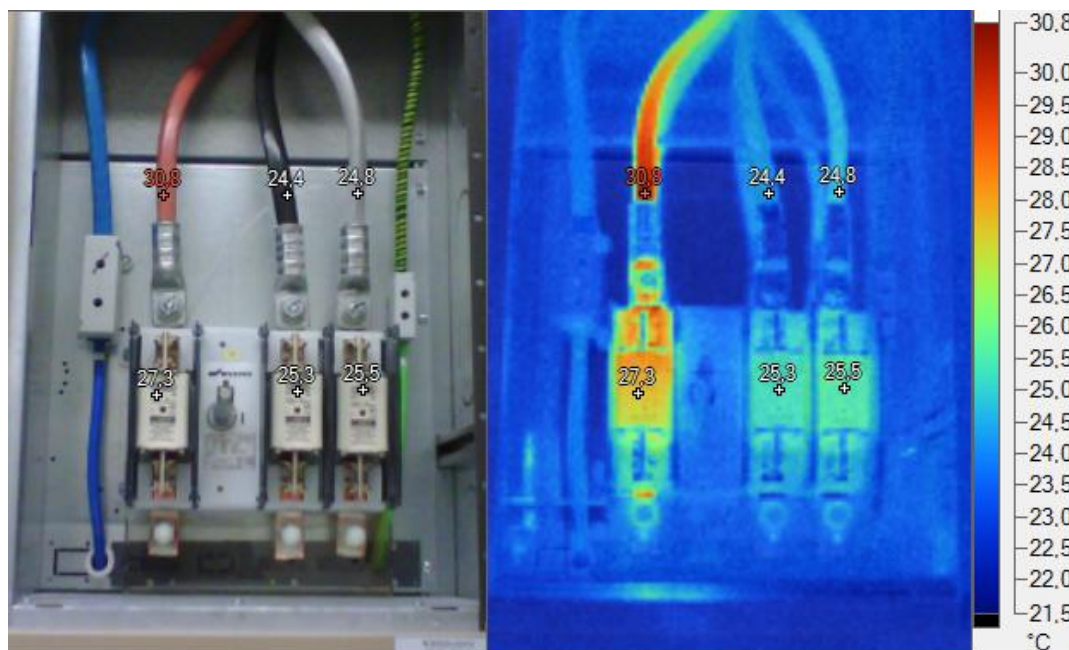
KUVA 18. Keskuksen MSB nousujohdon lämmennyt vaihe L3 (Taskinen 2015-10-27.)

Ensimmäinen lämpökuvauksen huomio syntyi keskuksella MSB kuvatessa nousujohdon SB51 sulakesuojatun syötön. Lämpökuvasta (kuva 18) havaittiin, että vaihejohtimista L3 oli vaiheita L1 ja L2 selkeästi lämpimämpi. Lämpökuvaan merkittiin jälkikäteen havainnollistavat lämpöpisteet kaapelien ja kaapelikenkien teipattuihin liitoksiin. Lämpöpisteistä nähdään, että vaiheen L1 liittimen lämpötila on 36,4 °C, L2 liittimen 35,4 °C ja L3 liittimen 40,7 °C eli lämpötilaeroa on vaiheiden L2 ja L3 välillä peräti 5,3 °C. Havainnon jälkeen jokaiseen vaiheen kaapelin kuormitus mitattiin ja tuloksiksi saatiin vaiheille L1 = 95 A, L2 = 89,5 A ja L3 = 90 A. Mitattujen virtojen perusteella voidaan todeta, ettei vaihe L3 ole kahta muuta vaihetta enemmän kuormitettu, vaikka lämpökuvan perusteella näin voitaisiin olettaa. Tästä syystä epäiltiin, että vaiheen L3 kaapelin ja varokesuojauksen välinen liitos on löystynyt, johtaen liitoksen resistanssin nousuun, kasvattaen kyseisen pisteen lämpöhäviötä.



KUVA 19. Muuntajalta nouseva keskuksen MSB2 syöttö (Taskinen 2015-10-27.)

Kuvan 19 tilanne on hyvin vastaava, kuin analysoitu kuvan 18 tilanne. Muuntajalta nouseva keskuksen MSB syöttökaapelin vaiheiden välillä havaittiin selkeä lämpötilaero. Vaiheen L3 kaapelin lämpötila on lämpimimmillään 39,3 °C, kun L1 ja L2 kaapelien lämpötilat ovat noin 27 °C luokkaa. Mitatut vaihekohtaiset kuormat ovat L1 = 68 A, L2 = 67 A ja L3 = 69 A, joten lämpötilaeron ei voida olettaa johtuvan epäsymmetrisestä kuormituksesta. Lisäksi SmartView:llä lisättyjä lämpötilapisteitä tarkastelemalla havaitaan, että johdin on noin 4 °C lämpimämpi liitoksen lähellä, kuin pienen matkan päässä merkatussa pisteessä, kuvan 19 alaosassa.



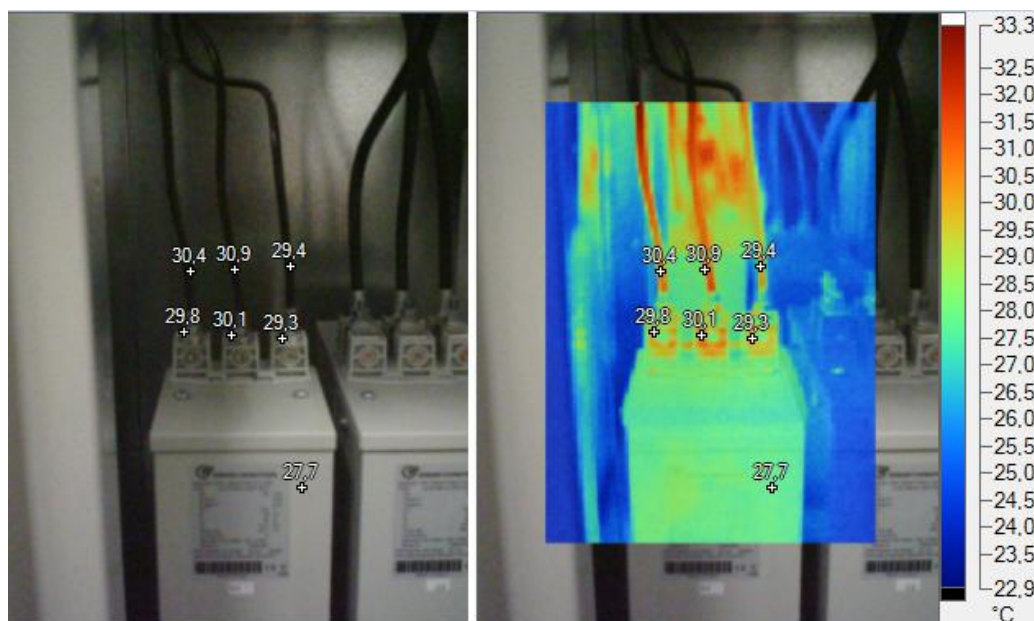
KUVA 20. Keskuksen MSB-02 nousujohdon syöttö. (Taskinen 2015-10-27.)

Kuvassa 20 esitetään keskuksen MSB-02 nousujohdon SB602.2 syötön sulakesuojaus. Lämpökuvasta havaittiin, että vaiheen L1 johdin oli läheltä liitosta noin 6 °C lämpimämpi kuin vaiheet L2 ja L3. Lisäksi havaitaan, että vaiheen L1 sulake on noin 2 °C lämpimämpi kuin muiden vaiheiden sulakkeet. Usein epäsymmetriatilanteissa ensimmäinen vaihe kuormittuu muita vaiheita enemmän. Kuitenkin johtimille suoritetuilla virtamittauksilla vaihekohtaisiksi kuormituksiksi mitattiin L1 = 50 A, L2 = 49 A ja L3 = 52 A, minkä perusteella epäsymmetrinen kuormitus ei ollut lämpötilaerojen syynä. Tapauksessa tehdään samat johtopäätökset, kuin kuvien 18 ja 19 tapauksissa. Liitos on uskottavasti löystynyt ja aiheuttanut näin kasvaneet lämpöhäviöt.

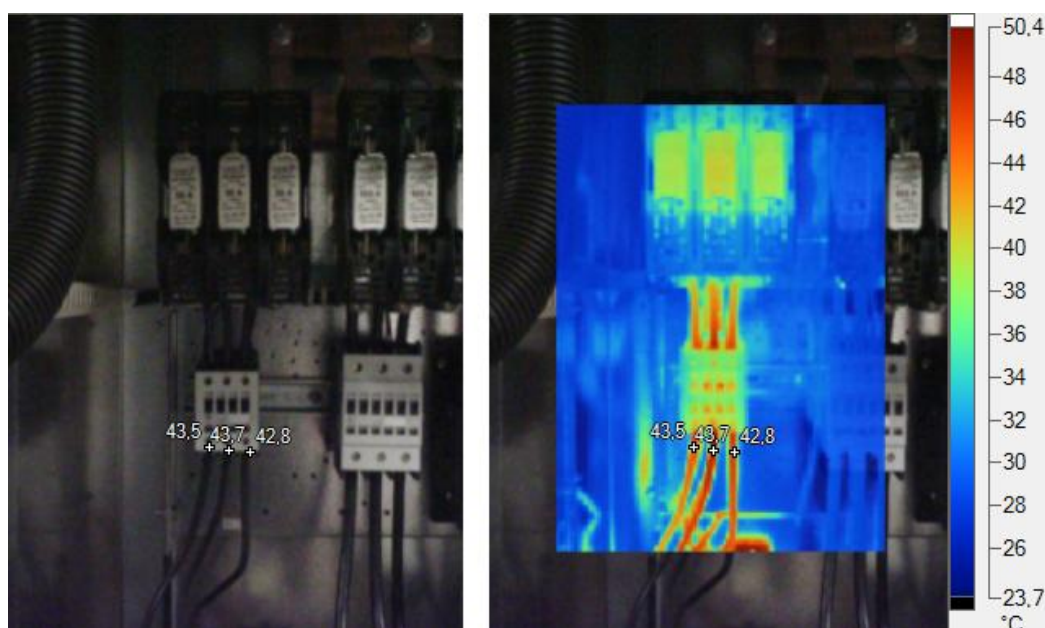
Pääkeskusten lämpökuvauksien pohjalta tehtiin kolme havaintoa epänormaaleista lämpenemisistä sähkölaitteistoissa, joiden syiksi epäillään löystyneitä liitoksia. Voisi olla myös mahdollista, että lämpenemä johtuisi liitoksen hapettumisesta, mutta koska silmämääräisesti liitokset näyttävät hyväkuntoisilta, ei hapettumaa pidetä yhtä todennäköisenä syynä, kuin löysiä liitoksia. Vian korjausta jatketaan kiristämällä liitokset, jonka jälkeen laitteiston annetaan toimia normaalisti kuormitettuna hetken aikaa. Lopuksi ongelmakohdat lämpökuvataan, jotta nähdään, onko huomiota herättänyt lämpötilaero hävinnyt. Mikäli liitosten kiristys ei poista ongelmaa, voi lämpenemän aiheuttaja olla esimerkiksi hapettunut liitos tai lämpimän pisteen läheisyydessä toimiva viallinen komponentti.

6.7.2 Kompensointiyksiköiden lämpökuvauksien päätelmät

Kompensointiyksiköiden lämpökuvauksen merkitys jäi lopulta huollon kannalta vähäiseksi kompensointiyksiköiden vähäisten kuormitusten vuoksi. Kompensointiyksiköt kuvattiin siltä osin, kuin ne olivat kuormitettuina. Mikäli jokainen kompensointiporras haluttaisiin kuvata, tulisi portaita pitää kuormitettuina, jotta kuormituksen aiheuttama lämpenemä voitaisiin kuvata luotettavasti. Kuitenkaan kiinteistön sähköverkkoa ei huoltojen yhteydessä haluttu ylikompensoida pitemmäksi ajaksi, joten kompensointiyksiköt kuvattiin siltä osin, kuin ne olivat kuormitettuina. Kuvissa 21 ja 22 esitetään keskuksen MSB-kompensointiyksikön ensimmäinen kompensointiporras.



KUVA 21. Keskuksen MSB kompensointiyksikön 1. portaan kondensaattoriyksikkö (Taskinen 2015-10-27.)



KUVA 22. Keskuksen MSB kompensointiyksikön 1. portaan kontaktorionjous (Taskinen 2015-10-27.)

Kuvien 21 ja 22 perusteella havaitaan, kuinka kondensaattoriyksikön kaikki kolme vaihetta ovat suhteellisen tasaisesti lämmentyneitä. Aiemmin suoritettujen kondensaattoriyksiköiden virtamittauksien tuloksien perusteella myös todettiin, että kondensaattoriparistojen kuormituksen epäsymmetria on hyvin vähäistä. Lämpökuvista huomioitavaa on myös, että komponenteissa ilmentyneet lämpenemät olivat pääosin vähäisiä. Esimerkiksi kuvan 21 kondensaattoriyksikkö on kuormittuneena lämpimälläänkin kaapeliliittimien kohdalta n. 30 °C:n luokkaa, joka vastaa 6 °C lämpenemää ympäristöön verrattuna.

Kuvan 22 porrasta ohjaavalla kontaktorilla havaitaan noin 42 – 44 °C:n lämpötiloja, mikä tarkoittaa noin 20 °C lämpenemää suhteessa keskustilan ympäristön lämpötilaan. Tyypillinen 3-vaiheisen AC-kontaktorin sallittu ylin lämpötila on valmistajan ja mallin mukaan 50 – 60 °C, joten kuvien perusteella ei voida olettaa, että kontaktorin toiminnallinen lämpötila on laitteelle haitallinen. On olemassa mahdollisuus, että kiinteistön loistehon tarve lisääntyy tulevaisuudessa. Tällöin kompensointiyksikön lisäkuormittuminen voi nostaa komponenttien lämpötilaa aiheuttaen riskin kontaktorin lämpötilarajan ylitymisestä. Huomioitavaa on, että huoltojen aikana kompensointiyksiköiden ilmanvaihto toimii suhteellisen alhaisen lämpötilan vuoksi jaksottaisesti. Kompensointiyksikön lämpötilaa voidaan tarvittaessa laskea alentamalla jäähdytystuulettimia ohjaavan lämpöreleen havahtumisrajaa asteittain alhaisemmaksi siten, että jäähdytys alkaa toimia yhtäjaksoisesti.

Lämpökuvaamisen merkittävyys kompensointiyksiköiden huolloille oli lopulta vähäinen, mutta sen avulla pystyttiin varmistamaan, ettei laitteistossa ollut sillä hetkellä selviä lämpenemiseen johtavia vikoja. Kompensointiyksiköiden määräaikaishuoltoon on hyvä jatkossakin sisällyttää lämpökuvaus, sillä sen avulla voidaan havaita esimerkiksi ajan mittaan löystyviä liitoksia tai viallisia kontakteja. Yhteenvedona kompensointiyksiköiden lämpökuvauksista todetaan, etteivät ne tuoneet ilmi huomioita, joiden takia olisi syytä epäillä laitteiston puutteellista kuntoa.

7 LOPPUPÄÄTELMÄT

Opinnäytetyöni käsitti aihealueeltaan käytännössä kolme kokonaisuutta, jotka kuitenkin liittyivät osittain toisiinsa. Hyvä puoli suhteellisen laajassa kokonaisuudessa oli, että työtä tehdessä pääsi tutkimaan ja opiskelemaan teoriaa ja käytäntöä useammasta aihealueesta. Aihealueen saadessani ja opinnäytetyöni aloittaessani käsiteltävät asiat olivat vielä hyvin vieraita, mutta nykypäivänä saatavilla olevan suuren tietomäärän ansiosta hahmottuivat kokonaisuudet työtä tehdessä yhä enemmän. Vastaavasti haasteena laajassa aihealueessa on suuren tietomäärän hallitseminen, omaksuminen ja jäsentely. Työn kannalta oli tärkeää pyrkiä rajaamaan teorian ja käytännön kokonaisuudet siten, ettei työstä tulisi sekava ja epäjohdonmukainen. Tietenkin jos työn tekisi nyt uudestaan, toteuttaisi käytännön asiat, kuten mittaukset, varmasti sujuvammin ja johdonmukaisemmin.

Asiakkaan näkökulmasta uskon työn sujuneen hyvin. Suoritetut sähkönlaatumittaukset eivät osoittaneet mitään, mikä aiheuttaisi epäilyjä kiinteistöjen sähköjärjestelmien ongelmista. Lämpökuvauksissa havaittiin muutamat huomionarvoiset seikat, jotka aiheuttavat jatkotoimenpiteitä. Kiinteistön omistajan kannalta on tärkeää, että vastaavanlaiset lämpenemät havaitaan ja niihin reagoidaan, ennen kuin ne aiheuttavat lisävahinkoja, -kustannuksia ja vaaratilanteita. Myös kompensointiyksiköiden huollot sujuivat hyvin osana asiakkaalle sovittuja huoltotoimenpiteitä. Huoltojen perusteella raportoitiin, että kompensointiyksiköiden määräaikaishuollot ovat tämän vuoden osalta kunnossa ja niihin palataan noin vuoden kuluttua, ellei niiden toiminnassa havaita merkittäviä muutoksia.

Opiskelijan näkökulmasta voidaan sanoa, että erilaiset ongelmatilanteet antavat mahdollisuuden pohtia asioita, kuten mistä ne johtuvat ja miten niihin tulee reagoida. Esimerkiksi, jos kiinteistön verkon sähkönlaadussa olisi havaittu ongelmia, tulisi selvittää, mikä ongelman aiheuttaa ja miten se voidaan korjata. Tällaisia tilanteita, jotka johtivat ongelman arviointiin ja jatkotoimenpiteisiin, tuli ainoastaan lämpökuvauksissa.

Opinnäytetyö tuotti lopulta asiakkaan huoltojärjestelmään kompensointiyksiköiden huoltoreportoinnin sekä asiakkaalle toimitettavan selvityksen kiinteistöjen sähkönlaadusta. Työ perehdytti sähkönlaatumittauksen, lämpökuvaamisen ja kompensoinnin perusteisiin, antaen aiheisiin hyvät pohjatiedot mahdollista lisäperehtymistä varten.

LÄHTEET

- ALANEN, Raili ja HÄTÖNEN, Hannu 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta [Tutkimus]. [Viitattu 2015-11-02.] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>
- ELECTRONICON 2014. Key components for power factor correction [Verkkoesite]. [Viitattu 2015-11-05.] Saatavissa: <http://www.powercapacitors.info/flash/200.003-020010/index.html#p=1>
- FINGRID 2015. Taajuuden ylläpito sähköjärjestelmässä. [Viitattu 2015-10-28.] Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/kantaverkonABC/Sivut/ABCtaajuuden_yllapito.aspx
- FLUKE CORPORATION 2007. Power Log PC Application Software. Users Manual. [Viitattu 2015-11-26.] Saatavissa: <http://media.fluke.com/documents/PowerLogumeng0300.pdf>
- FLUKE CORPORATION 2008. Solving electrical problems with thermal imaging. [Viitattu 2015-10-02.] Saatavissa: http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/3359026_6251_ENG_A_W.PDF
- FLUKE CORPORATION 2012. Fluke 434"/435"/437" 3-vaiheinen energia- ja sähkönlaatuanalysointilaite. [Käyttöohje]. [Viitattu 2015-09-15.] Saatavissa: http://www.fluke.com/fluke_www/manualsdownload_web2.asp?location=F430-II_umfin0100.pdf&Manual_Ver_ID=3454&language=Suomi&UserLanguage=fi&Supplement=false
- FLUKE CORPORATION 2015a. Fluke 430-sarjan kolmivaiheiset sähkönlaadun analysointilaite. [Viitattu 2015-10-20.] Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/fifi/sahkonlaatuokalu/kolmivaiheinen/fluke-430-series.htm?pid=56078>
- FLUKE CORPORATION 2015b. Lämpökuvauksen SmartView-analysointi- ja raportointiohjelmisto sekä mobiilisovellus. [Viitattu 2015-11-19.] Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/fifi/lisavarusteet/ohjelmisto/fluke-smartview-ir.htm?pid=56169>
- FLUKE CORPORATION 2015c. Fluke Ti105-lämpökamera teollisiin ja kaupallisiin sovelluksiin. [Viitattu 2015-11-19.] Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/fifi/lampokamerat/ti105.htm?pid=74966>
- HIETALAHTI, Lauri, MÄNNISTÖ, Matti, SEESVUORI, Reino, SEESVUORI, Vesa ja WILÉN, Tarmo 2006. Yliaalloit ja kompensointi. 1. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- HONKANEN, Jukka 1998. Sähkötekniikan peruskäsitteet. [Viitattu 2015-10-28.] Saatavissa: <http://www.kolumbus.fi/jukka.u.honkanen/husmed/tiedostot.html>
- HÄMEEN SÄHKÖ OY 2015. Kompensoinnin vuosihuolto. [Viitattu 2015-10-14.] Saatavissa: <http://www.hameensahko.fi/?cat=20>
- KONTTURI, Marko, ÅLANDER, Jouni 2008. Energiansäästölamppujen verkkovaikutukset. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Tietotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2015-11-21.] Saatavissa: <http://www.karelia.fi/julkaisut/sahkoinenjulkaisu/Kontturi%20&%20%20C3%85lander.pdf>
- LASSILA & TIKANOJA OYJ 2015. Yritys. [Viitattu 2015-10-05.] Saatavissa: <http://www.lassila-tikanoja.fi/yritys/>
- MÄKELÄ, Mikko, SOININEN, Lauri, TUOMOLA, Seppo, ÖISTÄMÖ, Juhani 2010. Tekniikan kaavasto. 9. painos. Tampere: AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka.

NOKIAN CAPACITORS 2008. Pienjännitetuotteiden tuote-opas [verkkoesite]. [Viitattu 2015-11-05.] Saatavissa: <http://www.sahkonumerot.fi/5704510/doc/brochure/>

RUPPA, Erkki 2001. Yliaallot. [Viitattu 2015-10-28.] Saatavissa: <http://salabra.tp.samk.fi/er/siirto/ylihallot.doc>

SUURINKEROINEN, Seppo 2012. Välkyntä ja sen aiheuttajia sähköverkossa. [Viitattu 2015-09-29.] Saatavissa: <http://www.ksoy.fi/sahkonsiirto/urakoitsijapalvelu/muut-tekniset-ohjeet>

SÄHKÖ SASP OY 2015. Lämpökuvauspalvelumme. [Viitattu 2015-11-03.] Saatavissa: <http://sasp.fi/lampokuvaus>

SÄHKÖINFO SEVERI 2006a. ST 52.50. Sähkön laatu. Käsitteet ja vaatimukset [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-10-06.] Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/>

SÄHKÖINFO SEVERI 2006b. ST 52.51.03. Sähkön laatu. Harmoniset yliaallot [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-10-06.] Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/>

SÄHKÖINFO SEVERI 2006c. ST 52.51.04. Sähkön laatu. Vinokuormitus, nollajohdin ja transienttiyljännitteet [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-10-07.] Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/>

SÄHKÖINFO SEVERI 2014a. ST 52.15. Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-11-15.] Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/>

SÄHKÖINFO SEVERI 2014b. ST 52.16. Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 100V:n pienjänniteverkossa [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-11-15.] Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/>


SÄHKÖINFO SEVERI 2014c. ST 53.62. Sähkölaitteistojen lämpökuvaus [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-11-18.] Saatavissa: <http://severi.sahkoinfo.fi/>

TIAINEN, Esa ja VITIKKA, Veli-Pekka 2004. Sähköasennustekniikka 3. 2. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

VILJANEN, Timo 2015. Virtuaali ammattikorkeakoulu. Sähköverkon kompensointi. [Viitattu 2015-10-12.] Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1134045922435/1134046524532/1134046634756/1134046693839.html>

YLEISESTÄ JAKELUVERKOSTA SYÖTETYN SÄHKÖN JÄNNITEOMINAISUUDET 2010. SFS-EN 50160. Vahvistettu 2010-11-22. SESKO ry. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

LIITE 1 MSB01-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI

	Filename MEAS 27 -- FLUKE 430-II (COM4).fpg	Report Date/Time 28.9.2015 18:39:12	Page 1
Instrument Information			
Model Number	FLUKE 430-II		
Serial Number	30833001		
Firmware Revision	V04.02		
Software Information			
Power Log Version	4.2		
FLUKE 345 DLL Version	11.20.2008		
FLUKE 430 DLL Version	1.0.0.32		
FLUKE 430-II DLL Version	1.0.0.32		
General Information			
Recording location			
Client	I&t kite		
Notes	5155		



Measurement Summary

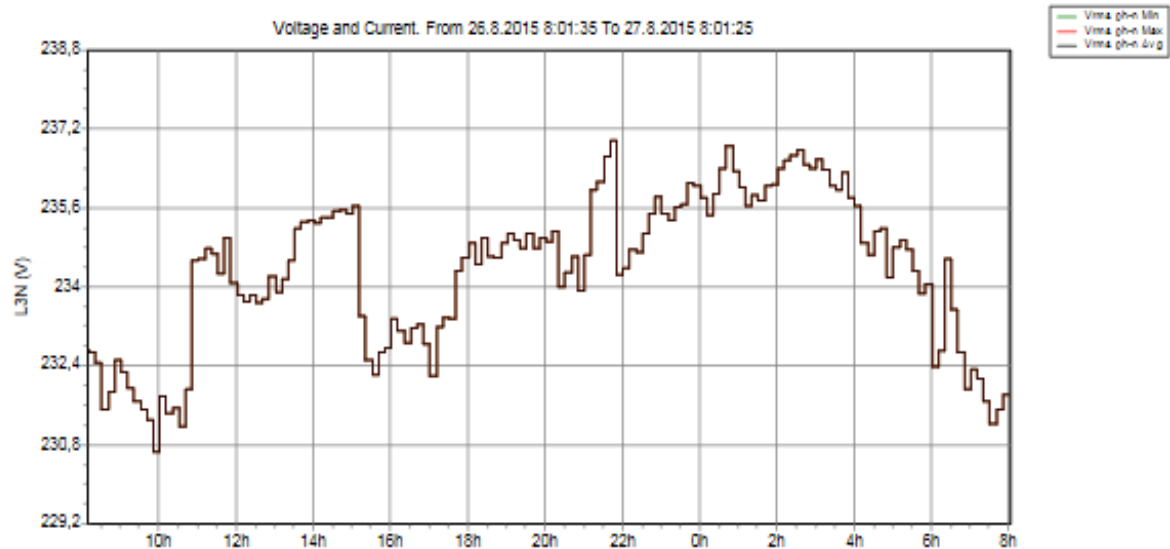
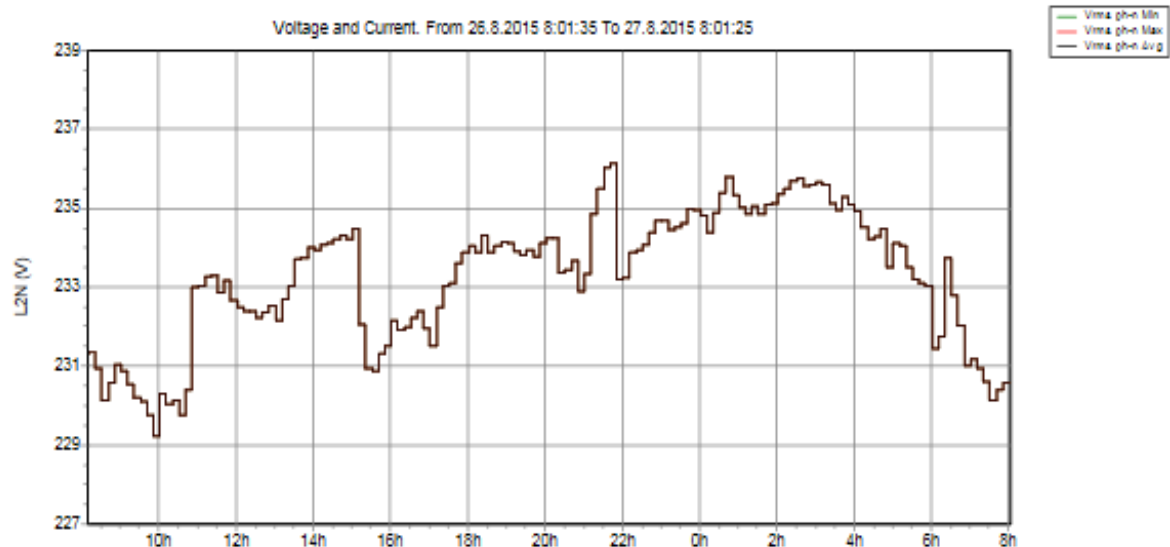
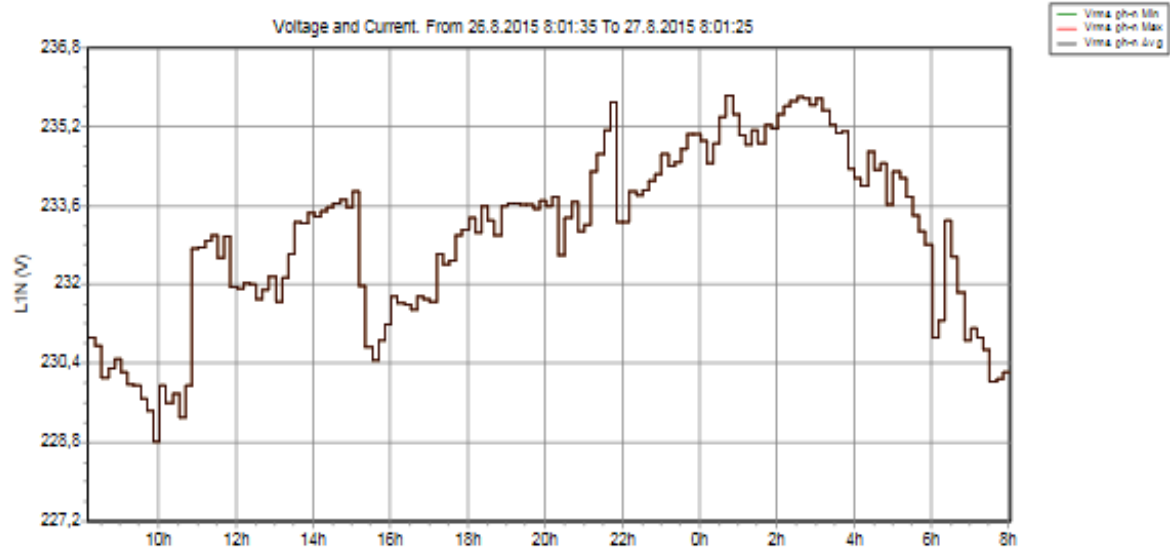
Measurement topology	Wye mode
Application mode	Monitor
First recording	28.8.2015 8:01:35
Last recording	27.8.2015 8:01:25
Recording interval	0h 10m 0s 0msec
Nominal Voltage	230 V
Nominal Current	300 A
Nominal Frequency	50 Hz
File start time	28.8.2015 8:01:25
File end time	27.8.2015 8:01:25
Duration	1d 0h 0m 0s 00msec
Number of events	0
Events downloaded	Yes
Number of screens	0
Screens downloaded	Yes
Power measurement method	Unified
Cable type	Copper
Harmonic scale	%H1
THD mode	THD 40
CosPhi / DPF mode	Cos Phi

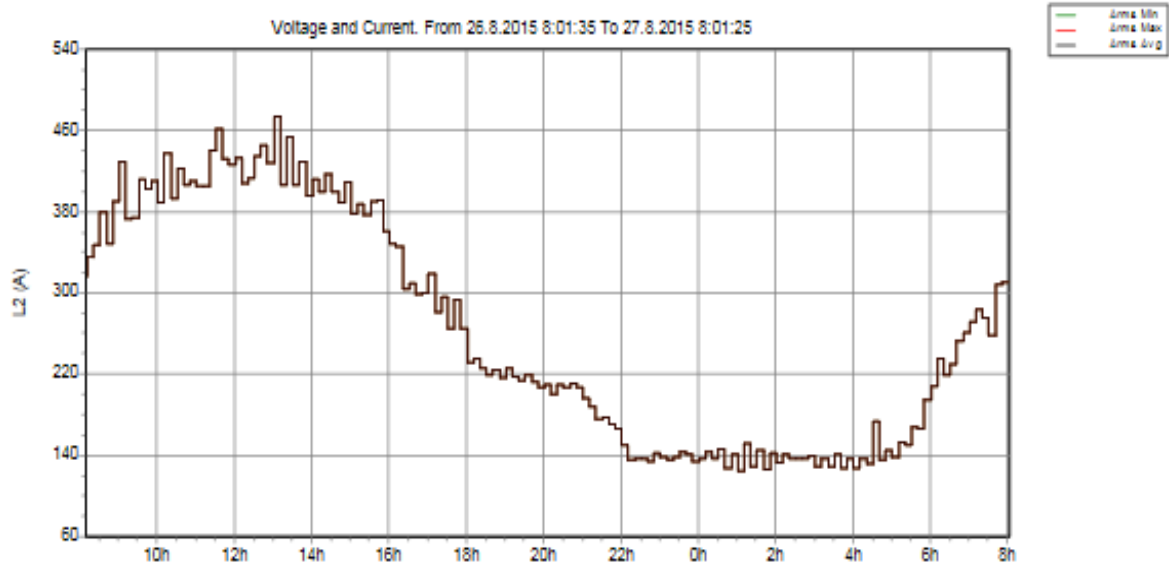
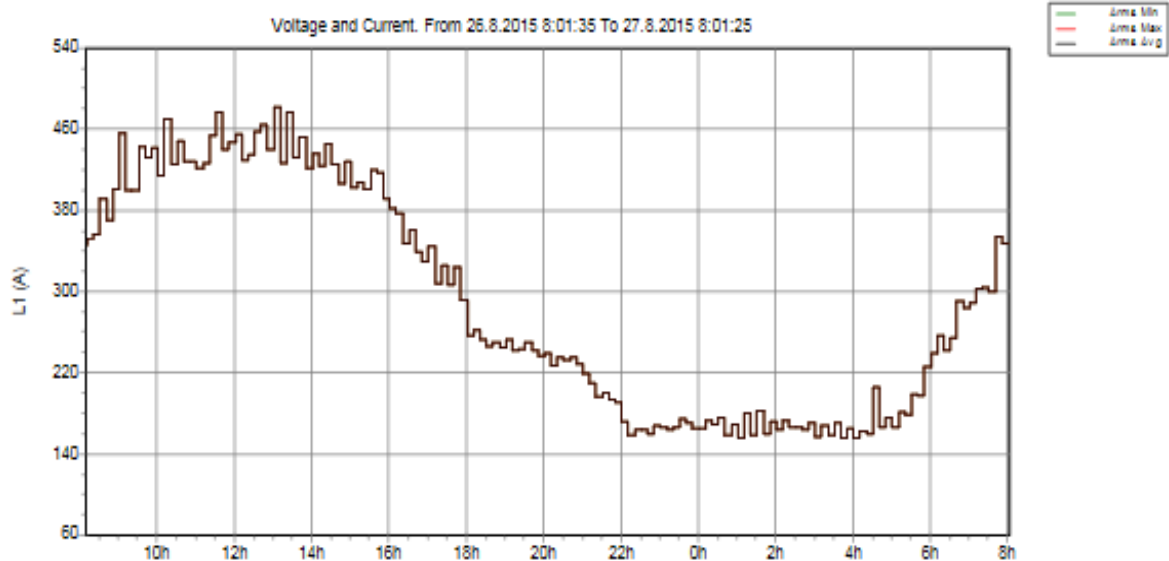
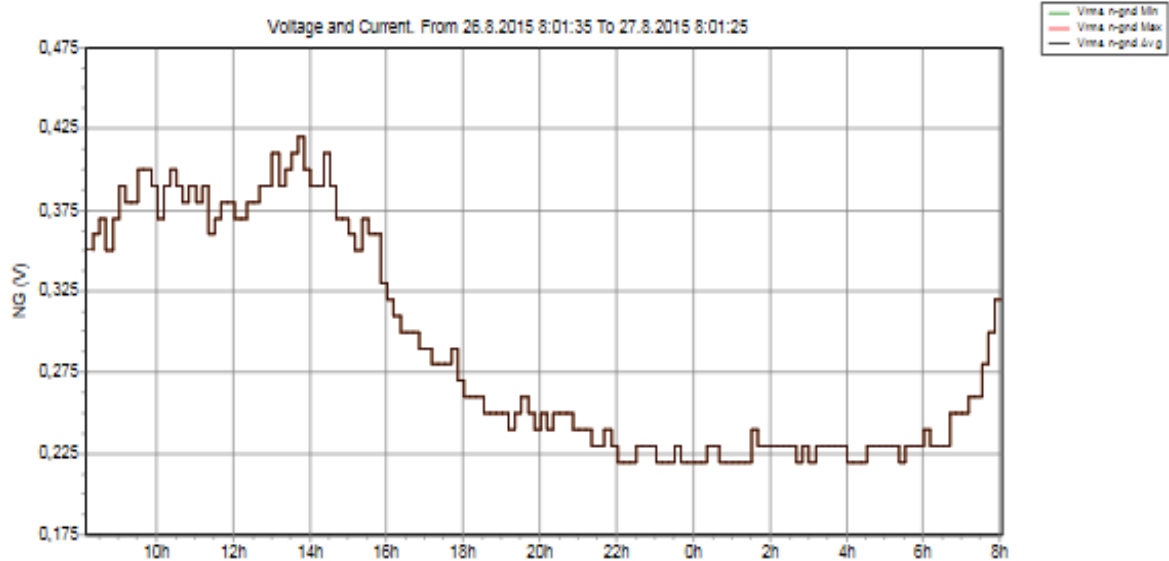
Recording Summary

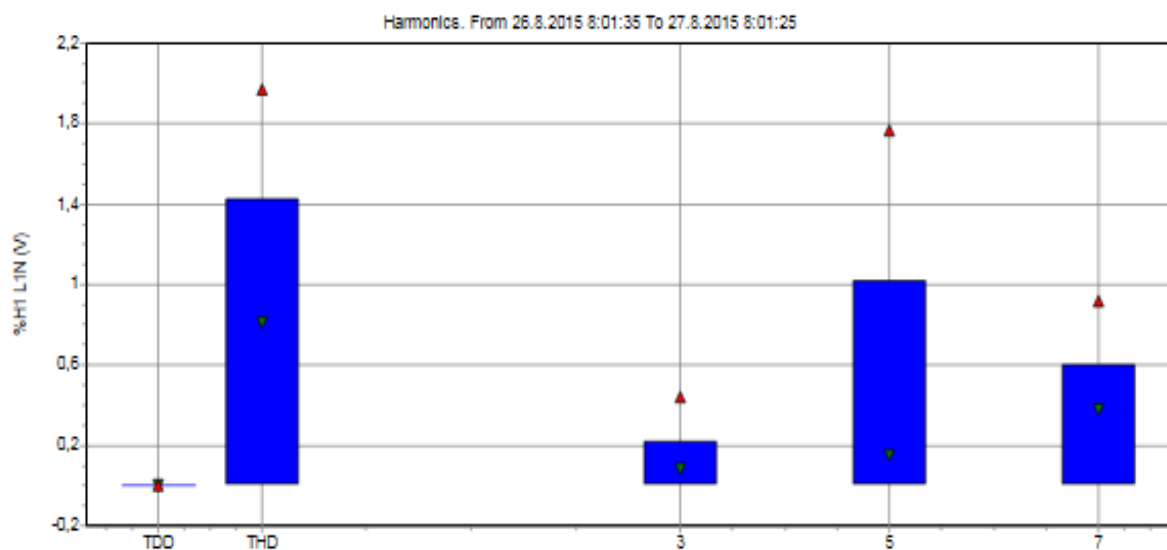
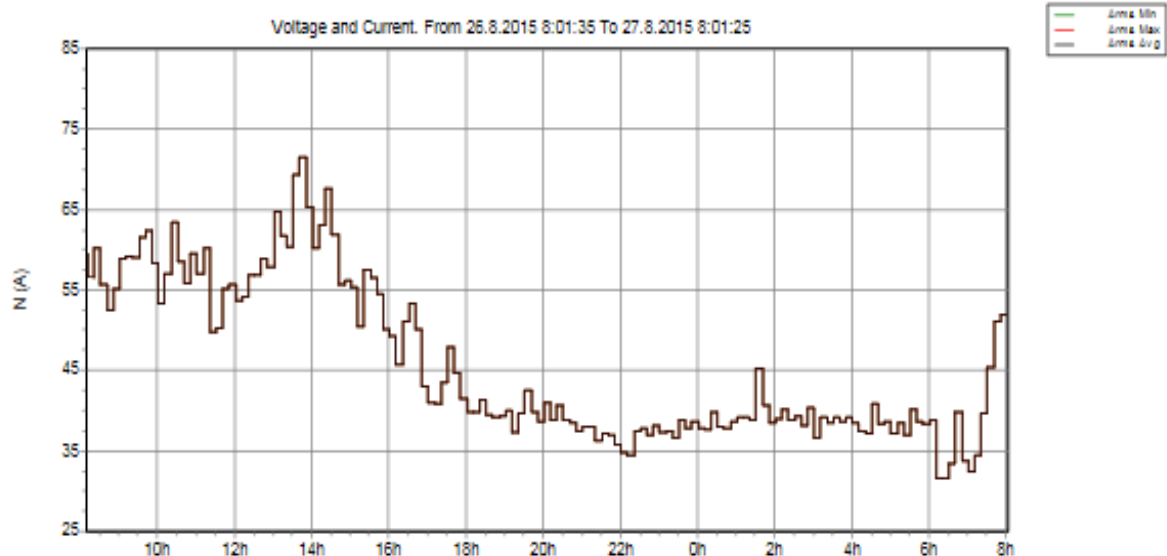
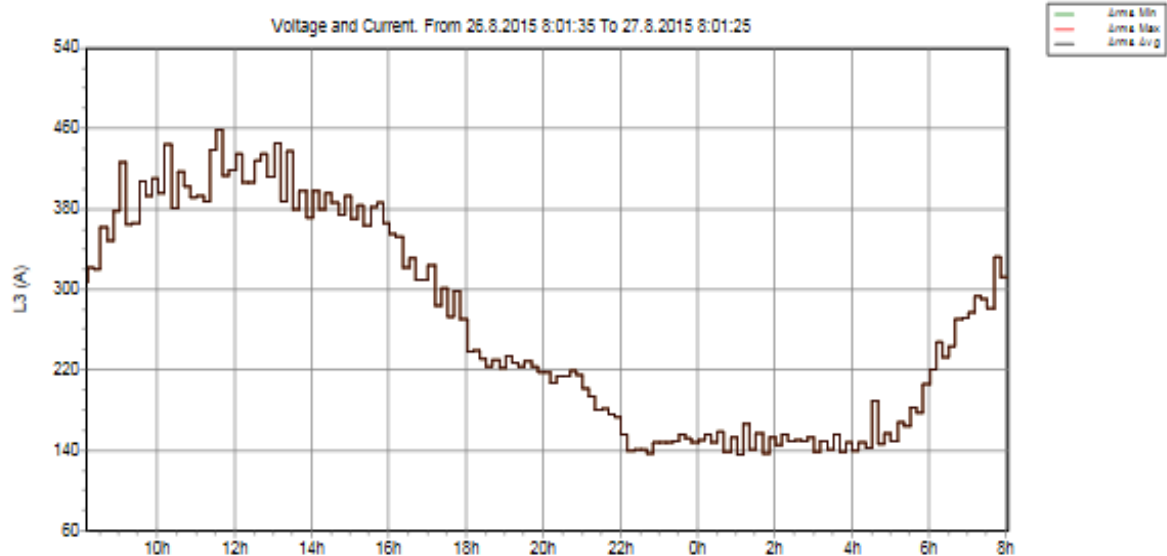
RMS recordings	144
DC recordings	0
Frequency recordings	8640
Unbalance recordings	144
Harmonic recordings	144
Power harmonic recordings	0
Power recordings	0
Power unbalance recordings	0
Energy recordings	0
Energy losses recordings	0
Flicker recordings	0
Mains signaling recordings	144

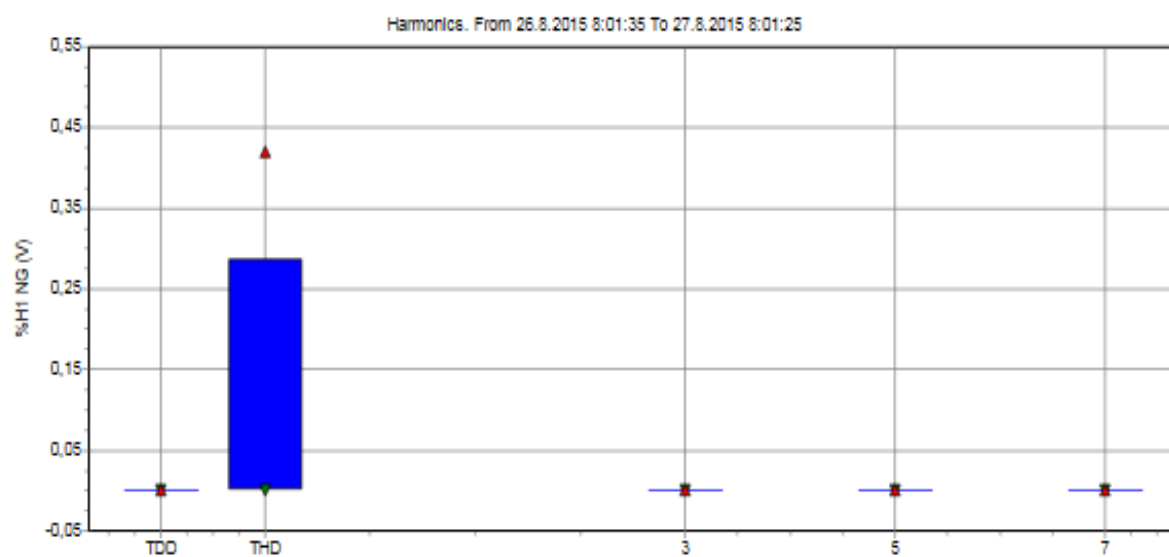
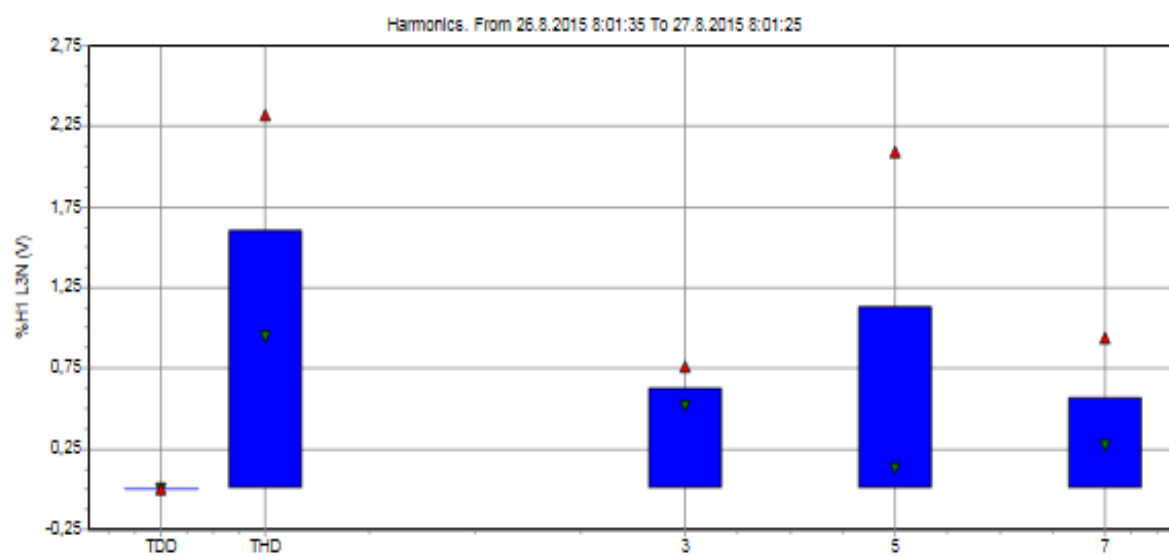
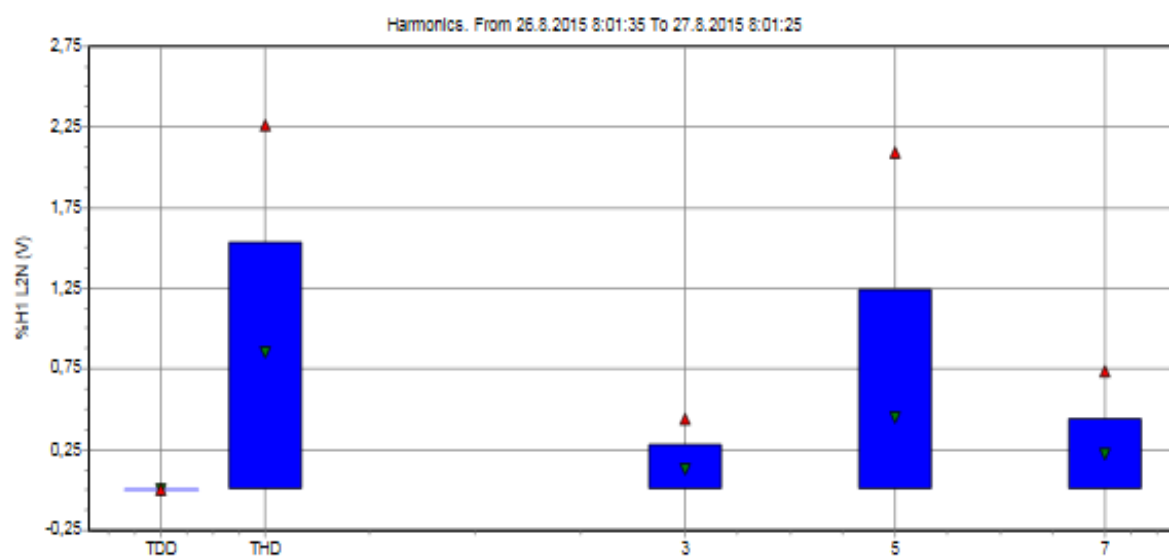
Events Summary

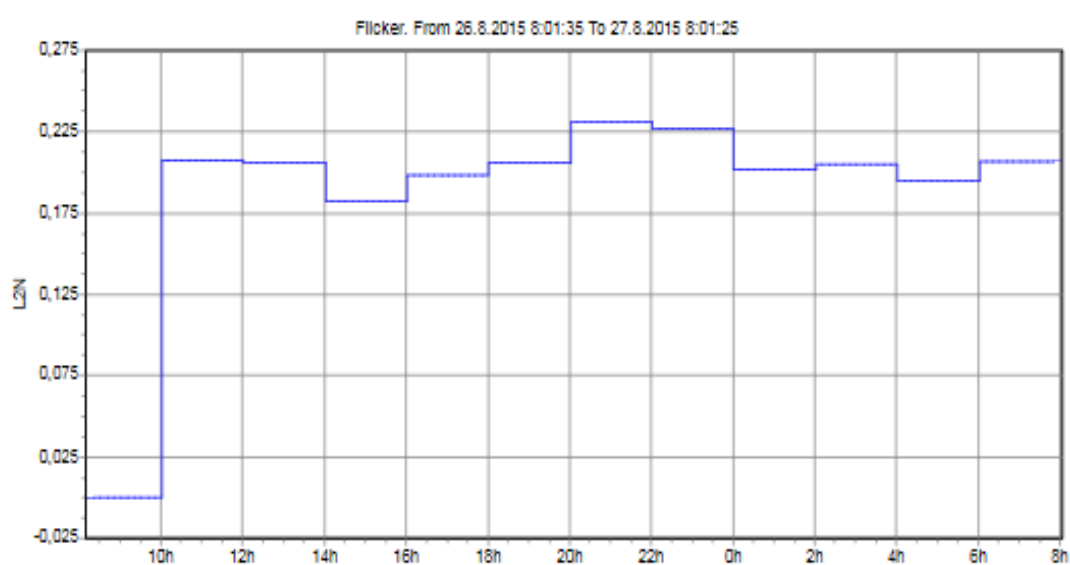
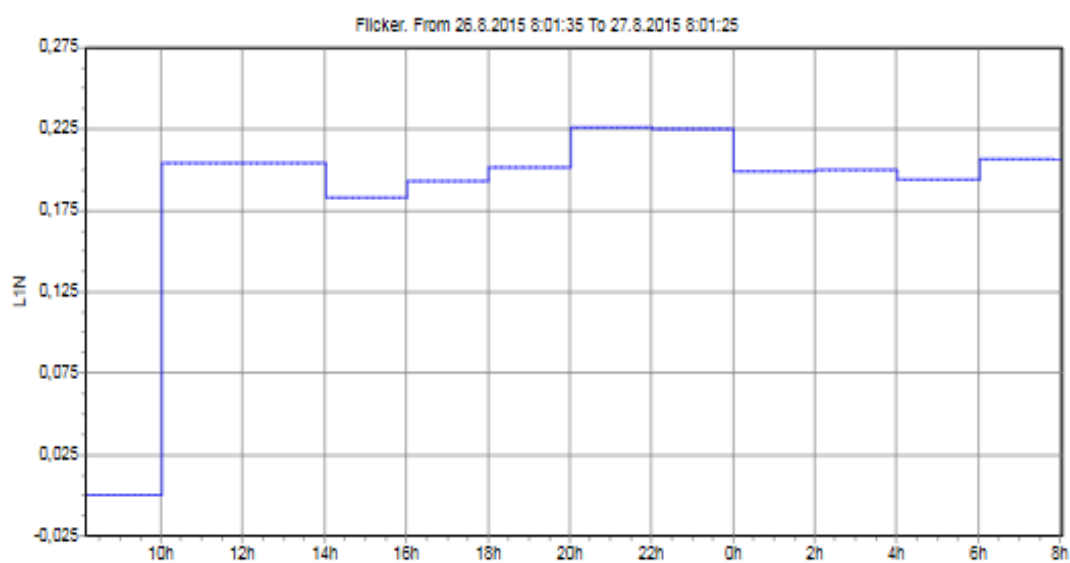
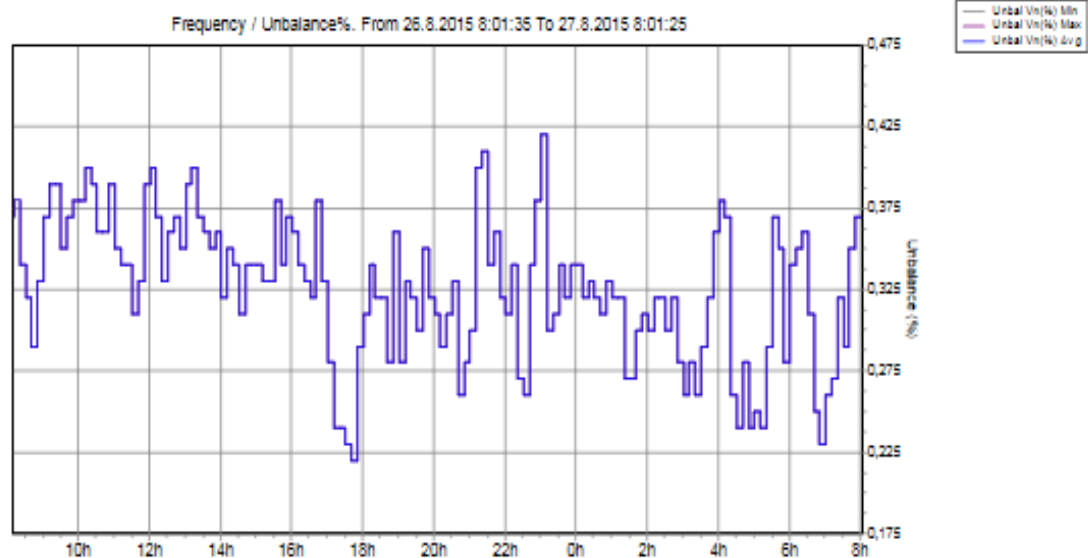
Dips	0
Swells	0
Transients	0
Interruptions	0
Voltage profiles	0
Rapid voltage changes	0
Screens	0
Waveforms	0
Intervals without measurements	0
Inrush current graphics	0
Wave events	0
RMS events	0











LIITE 2 MSB02-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI

Filename	Report Date/Time	Page
MEAS 48 -- SD Card.fpq	28.9.2015 19:17:23	Page 1

Instrument Information

Model Number	FLUKE 430-II
Serial Number	29643107
Firmware Revision	V04.01

Software Information

Power Log Version	4.2
FLUKE 345 DLL Version	11.20.2006
FLUKE 430 DLL Version	1.0.0.32
FLUKE 430-II DLL Version	1.0.0.32

General Information

Recording location
Client
Notes

Measurement Summary

Measurement topology	Wye mode
Application mode	Monitor
First recording	31.8.2015 14:58:58
Last recording	1.9.2015 14:58:48
Recording interval	0h 10m 0s 0msec
Nominal Voltage	230 V
Nominal Current	300 A
Nominal Frequency	50 Hz
File start time	31.8.2015 14:58:48
File end time	1.9.2015 14:58:48
Duration	1d 0h 0m 0s 31msec
Number of events	0
Events downloaded	Yes
Number of screens	0
Screens downloaded	Yes
Power measurement method	Unified
Cable type	Copper
Harmonic scale	%H1
THD mode	THD 40
CosPhi / DPF mode	Cos Phi

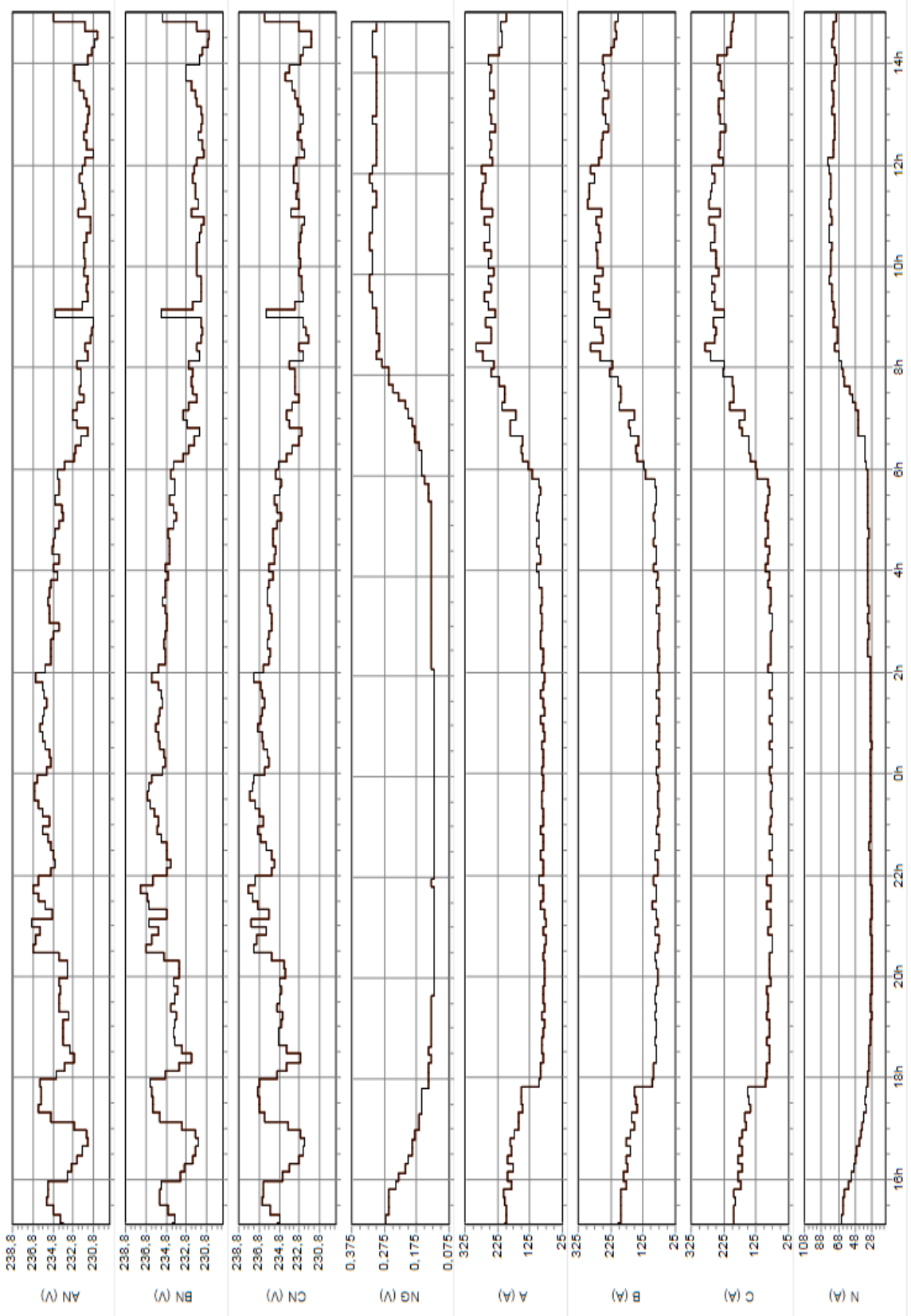
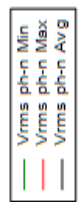
Recording Summary

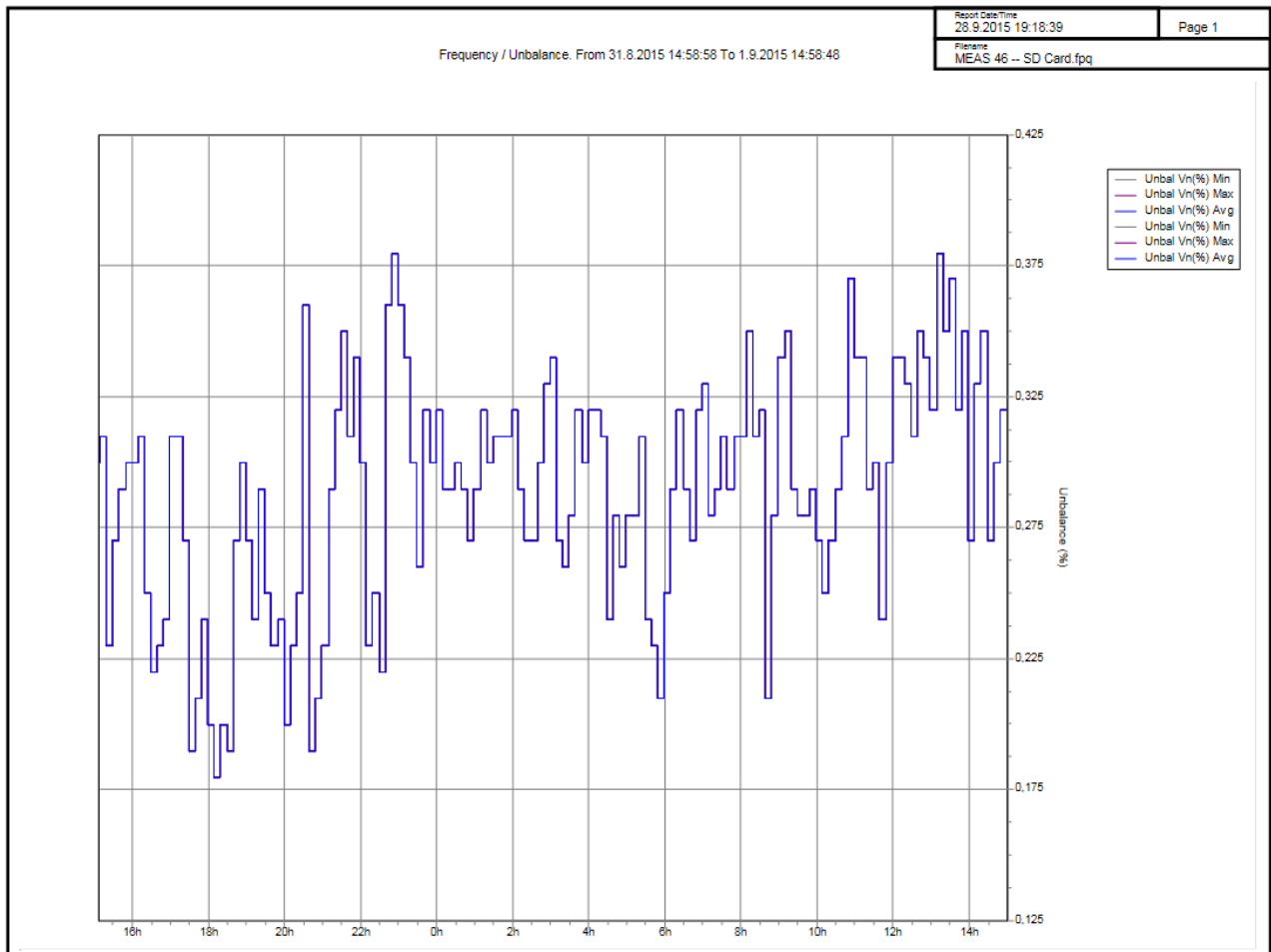
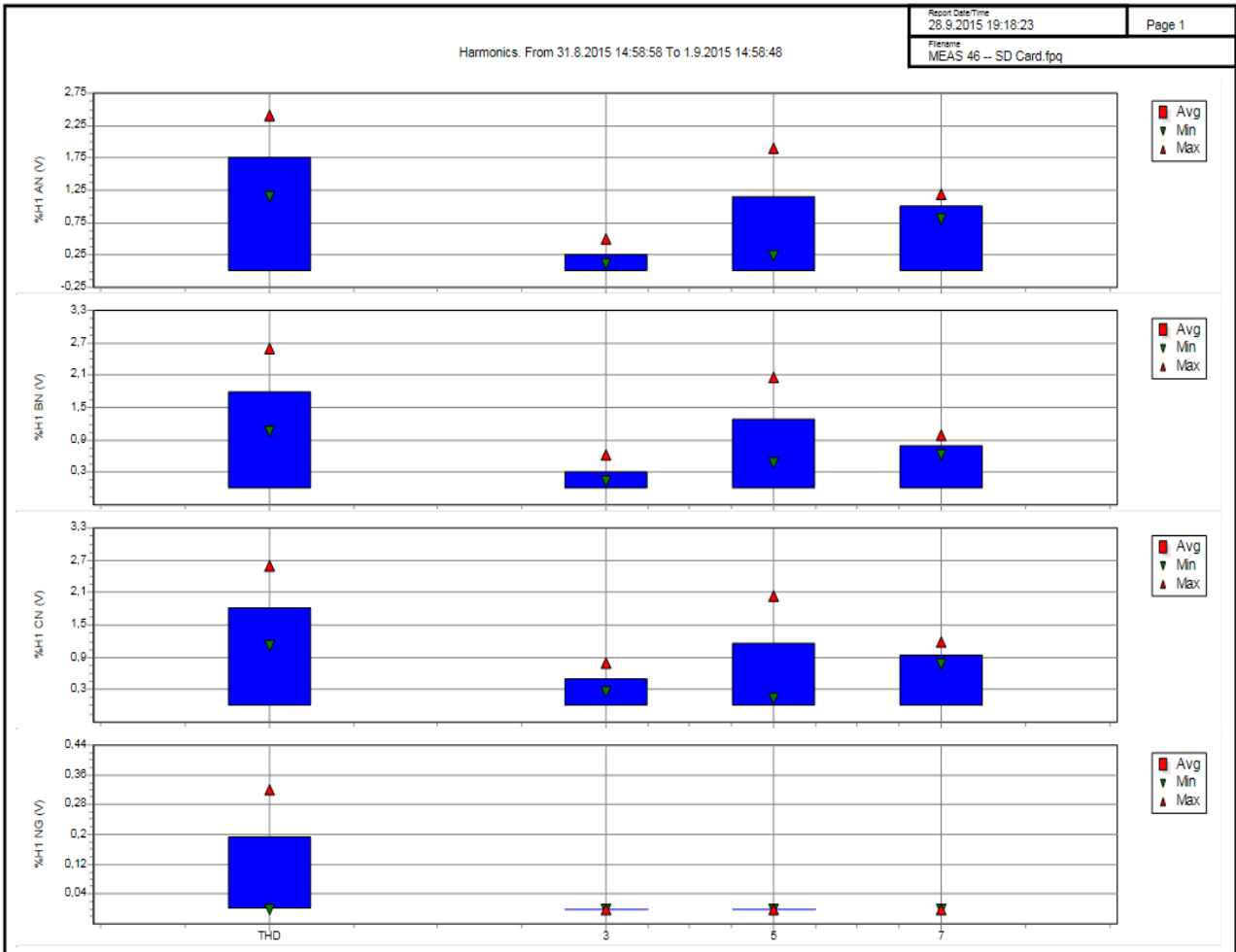
RMS recordings	144
DC recordings	0
Frequency recordings	8640
Unbalance recordings	144
Harmonic recordings	144
Power harmonic recordings	0
Power recordings	0
Power unbalance recordings	0
Energy recordings	0
Energy losses recordings	0
Flicker recordings	0
Mains signaling recordings	144

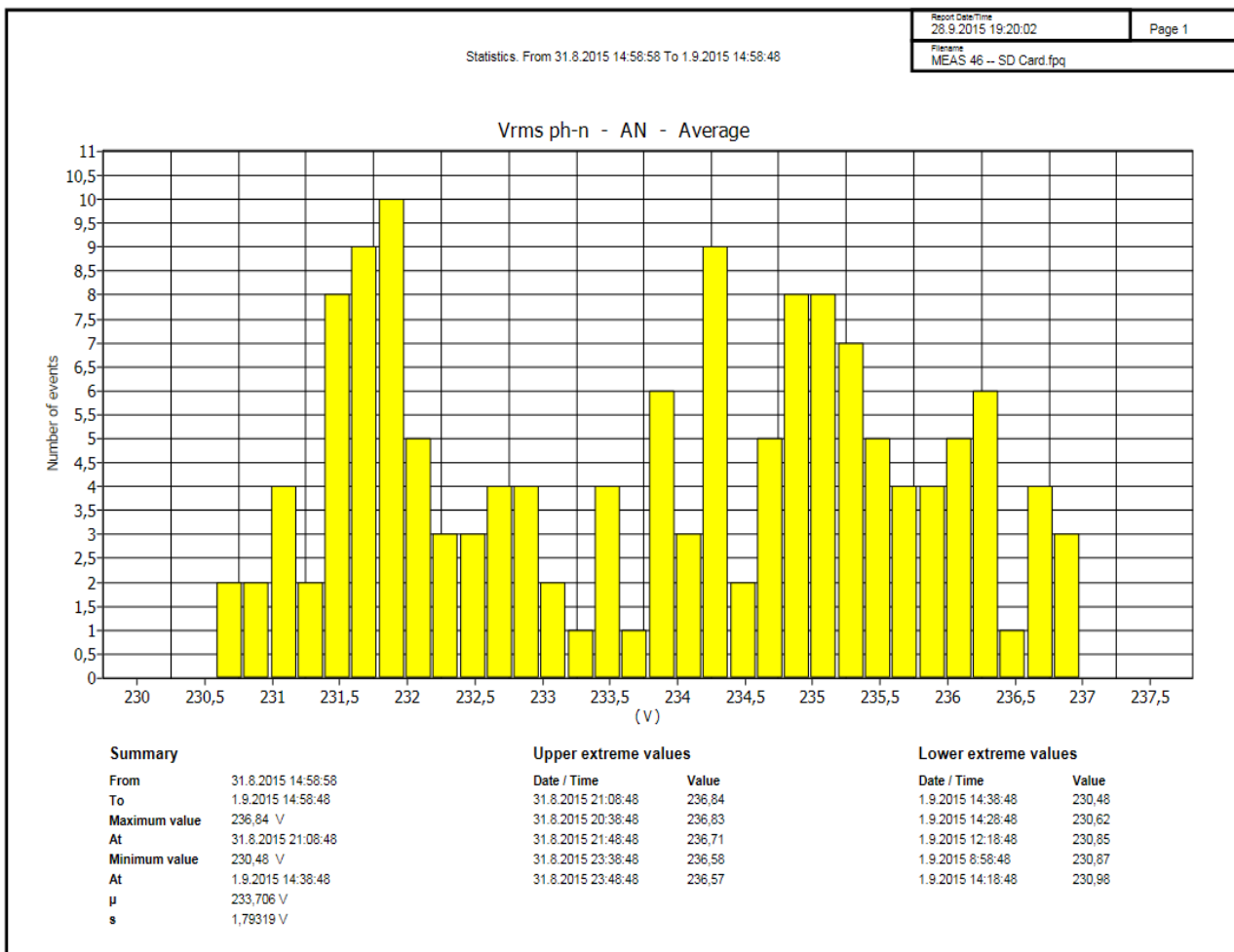
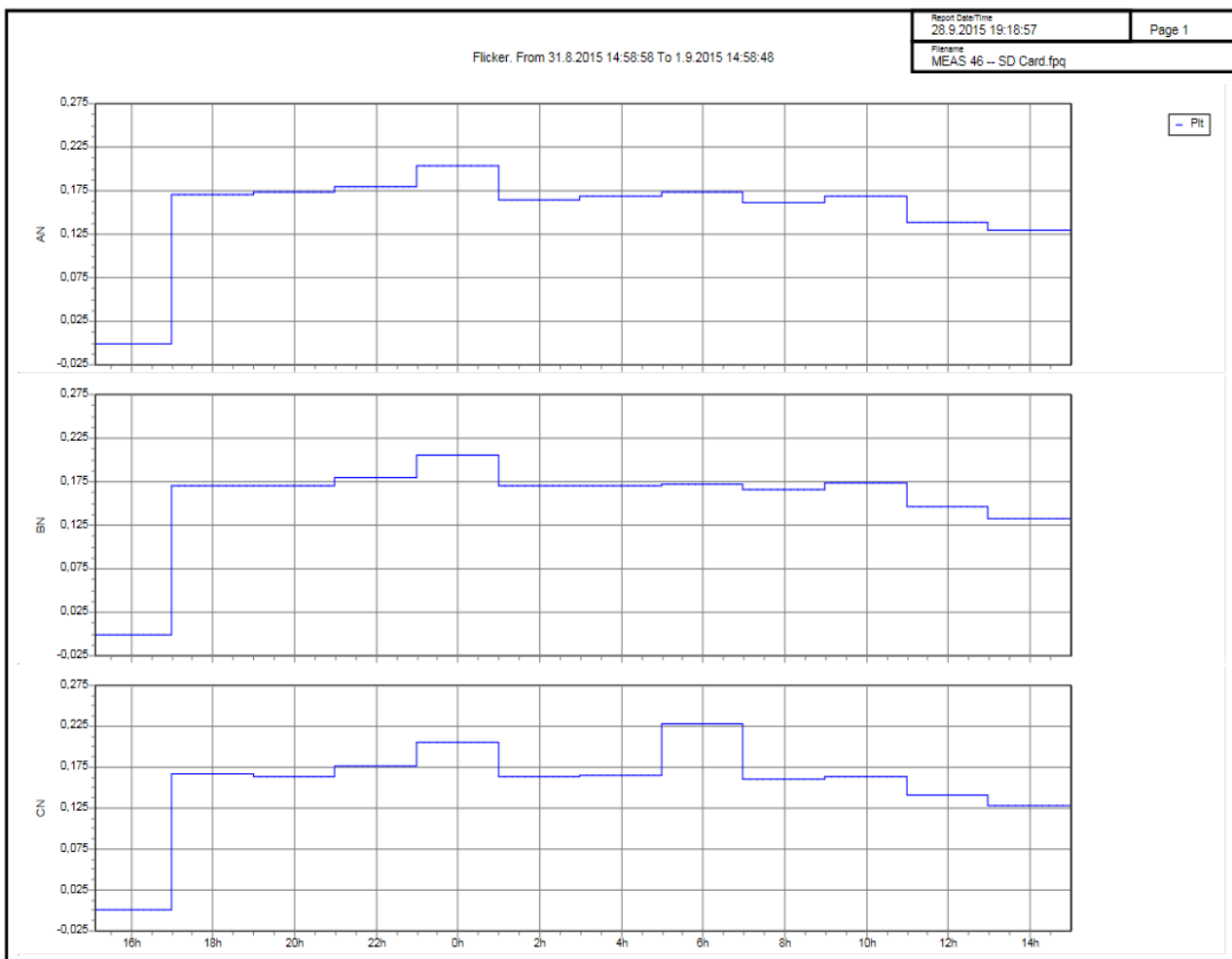
Events Summary

Dips	0
Swells	0
Transients	0
Interruptions	0
Voltage profiles	0
Rapid voltage changes	0
Screens	0
Waveforms	0
Intervals without measurements	0
Inrush current graphics	0
Wave events	0
RMS events	0

Voltage and Current. From 31.8.2015 14:58:58 To 1.9.2015 14:58:48







LIITE 3 MSB03-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI

Filename
MEAS 43 -- SD Card.fpqReport Date/Time
28.9.2015 19:01:55

Page 1

Instrument Information

Model Number	FLUKE 430-II
Serial Number	29843107
Firmware Revision	V04.01

Software Information

Power Log Version	4.2
FLUKE 345 DLL Version	11.20.2006
FLUKE 430 DLL Version	1.0.0.32
FLUKE 430-II DLL Version	1.0.0.32

General Information

Recording location
Client
Notes



Measurement Summary

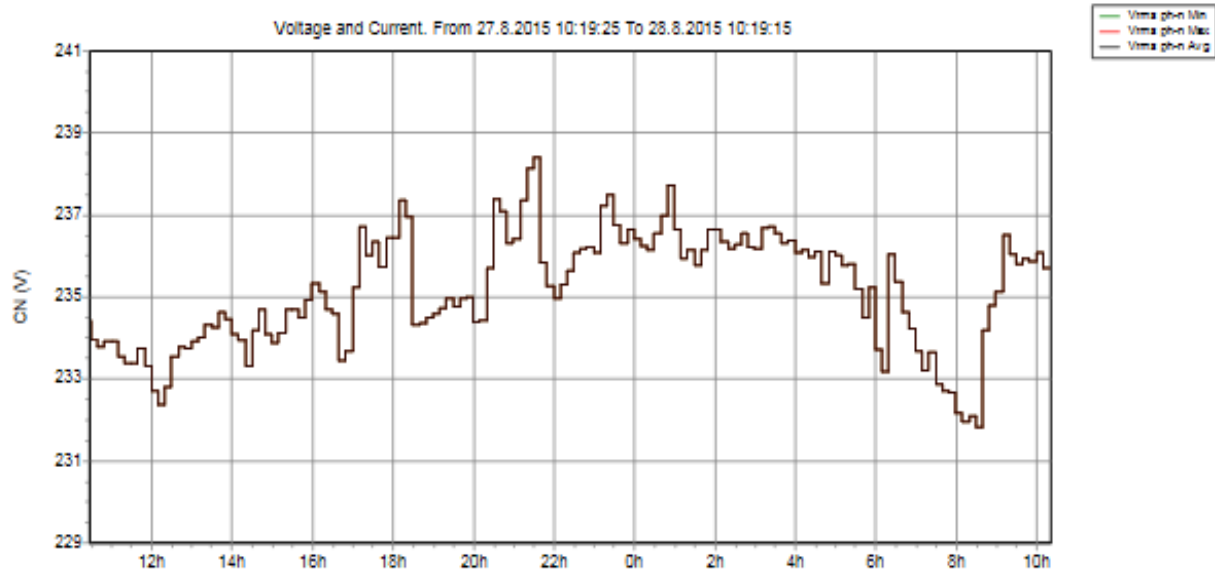
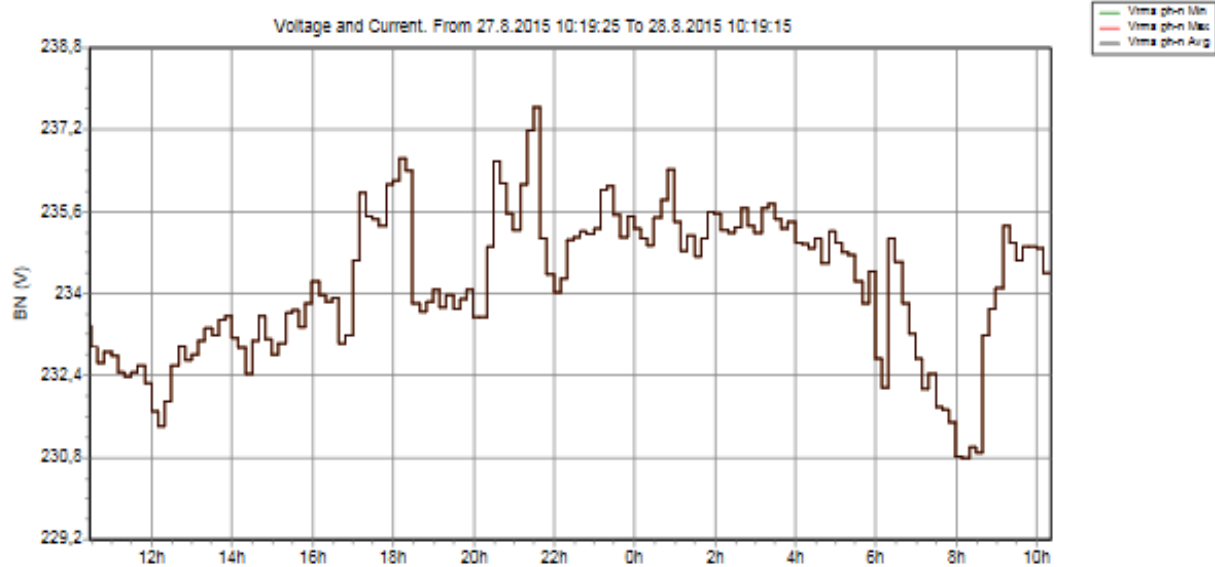
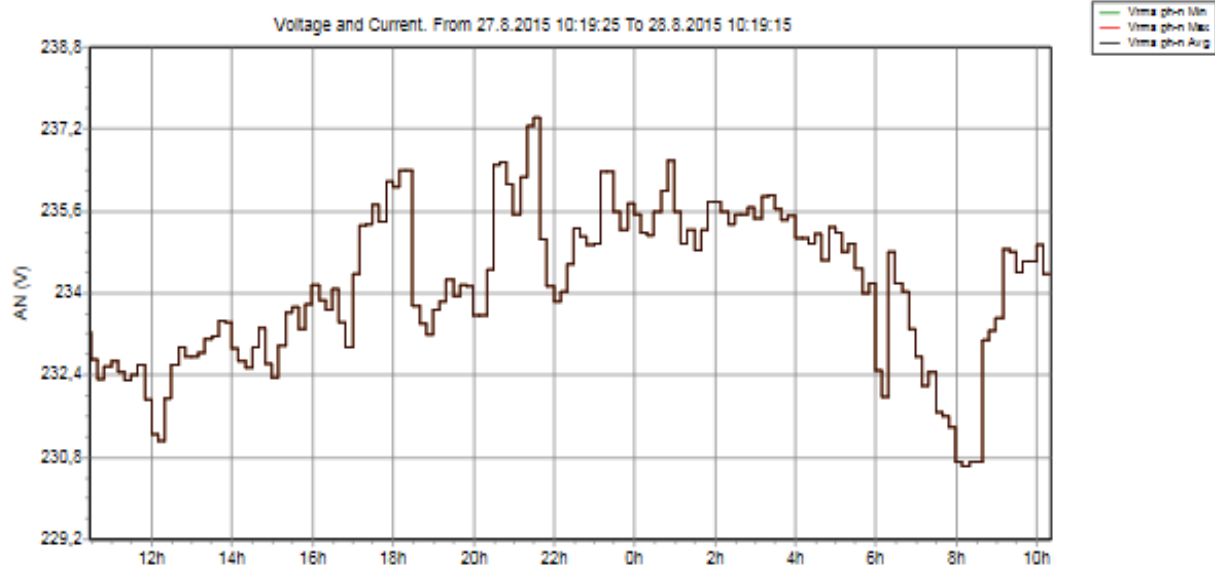
Measurement topology	Wye mode
Application mode	Monitor
First recording	27.8.2015 10:19:25
Last recording	28.8.2015 10:19:15
Recording interval	0h 10m 0s 0msec
Nominal Voltage	230 V
Nominal Current	300 A
Nominal Frequency	50 Hz
File start time	27.8.2015 10:19:15
File end time	28.8.2015 10:19:16
Duration	1d 0h 0m 0s 142msec
Number of events	0
Events downloaded	Yes
Number of screens	0
Screens downloaded	Yes
Power measurement method	Unified
Cable type	Copper
Harmonic scale	%H1
THD mode	THD 40
CosPhi / DPF mode	Cos Phi

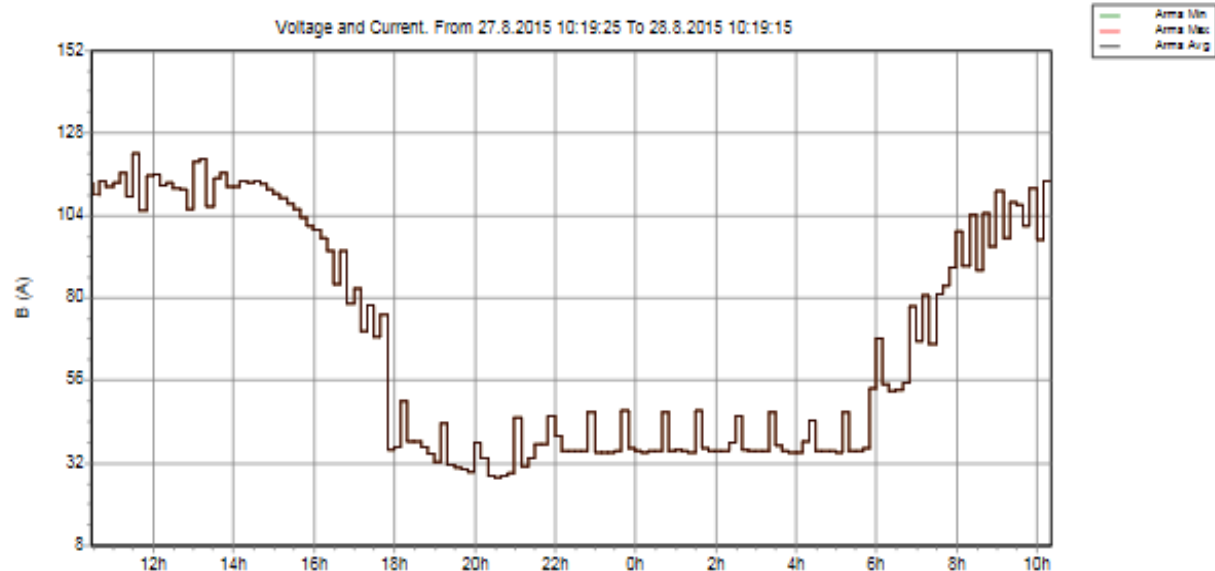
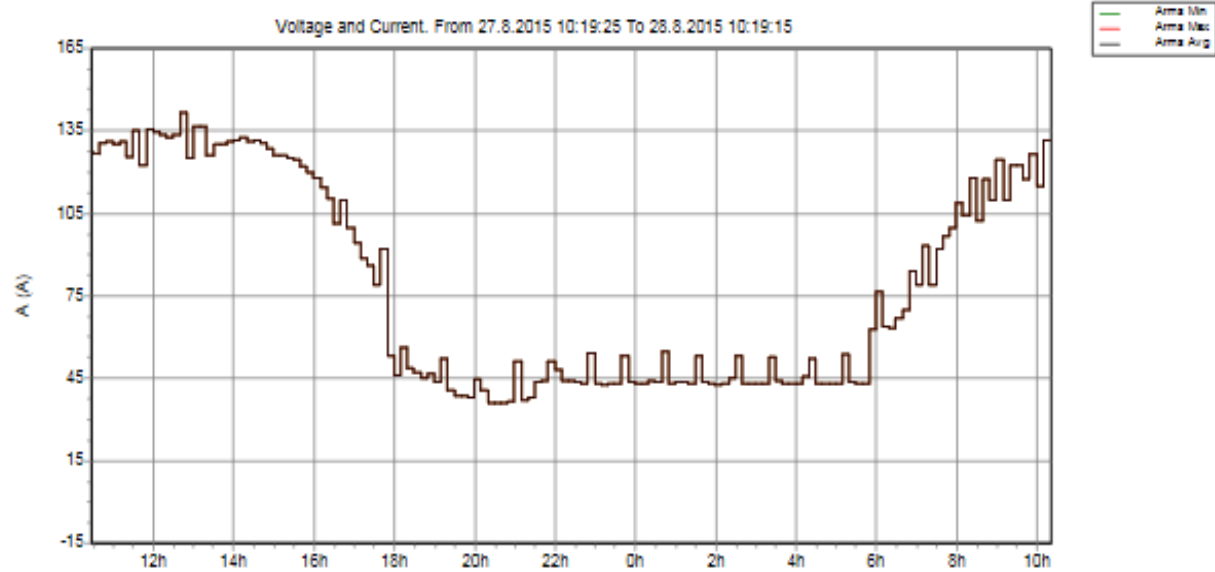
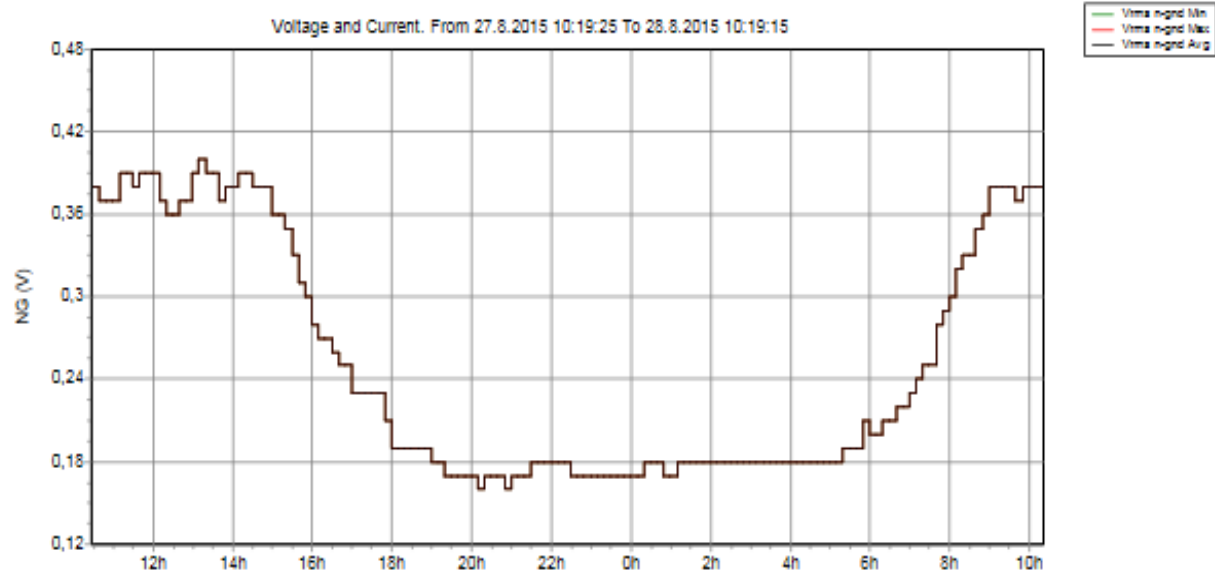
Recording Summary

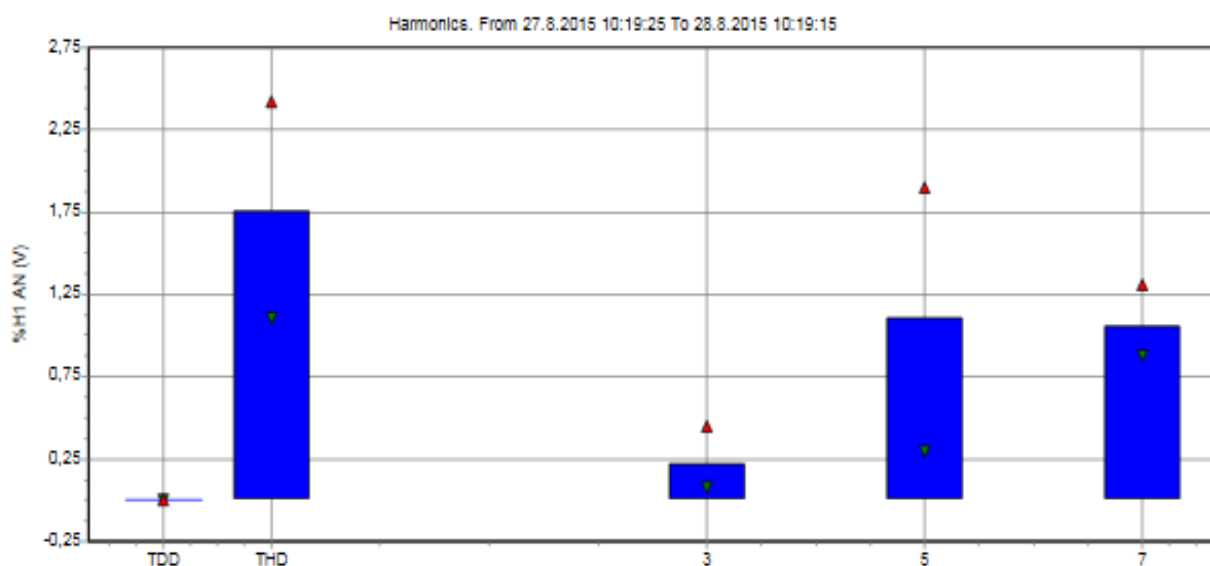
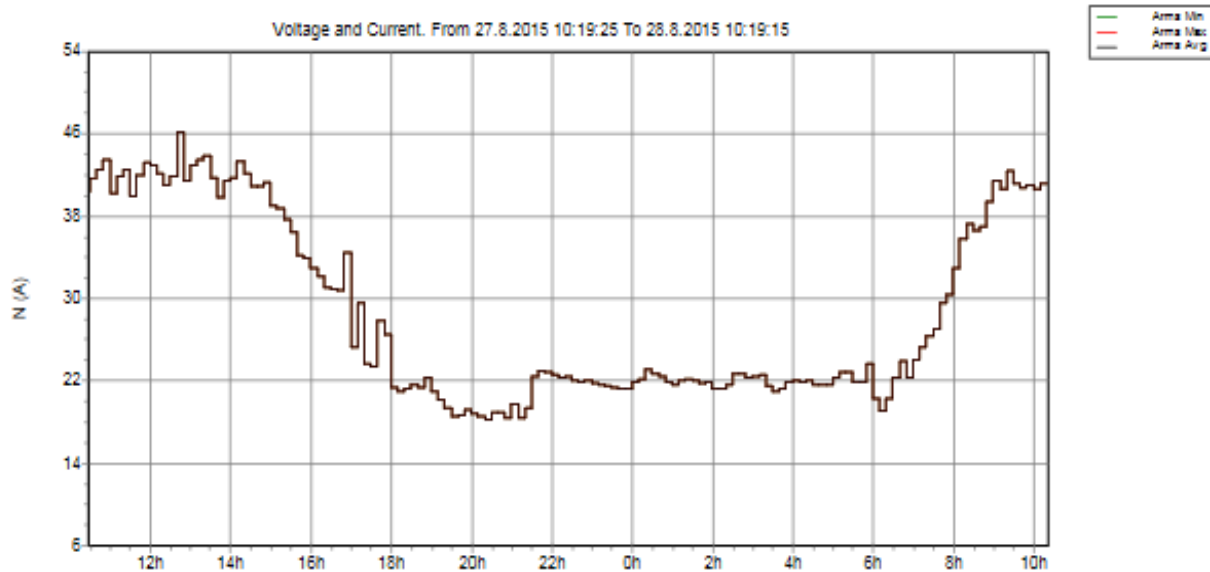
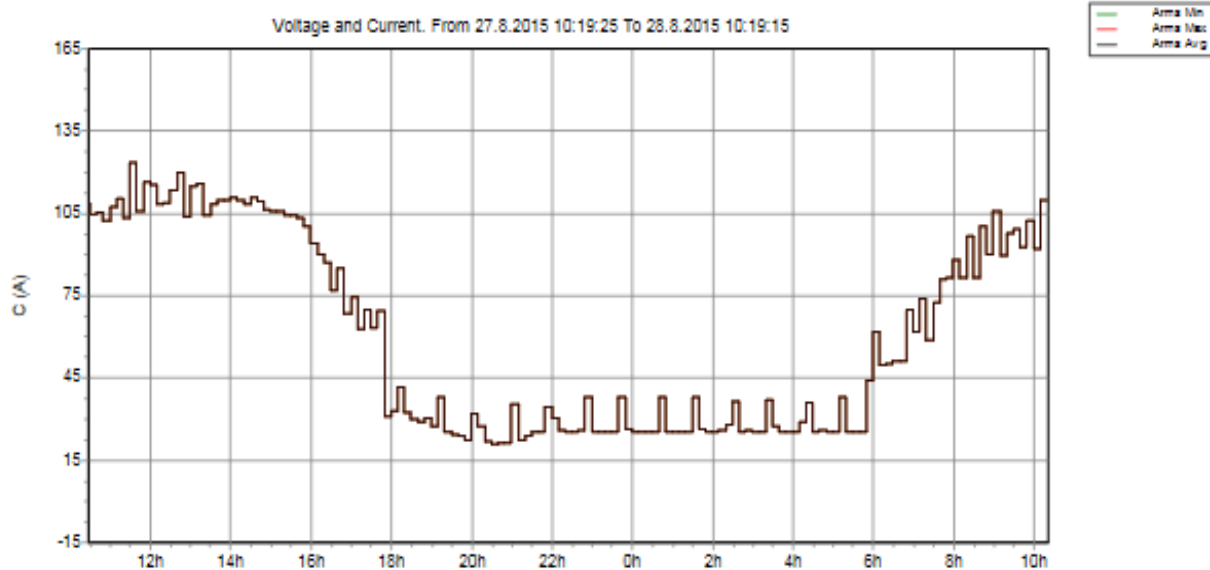
RMS recordings	144
DC recordings	0
Frequency recordings	8640
Unbalance recordings	144
Harmonic recordings	144
Power harmonic recordings	0
Power recordings	0
Power unbalance recordings	0
Energy recordings	0
Energy losses recordings	0
Flicker recordings	0
Mains signaling recordings	144

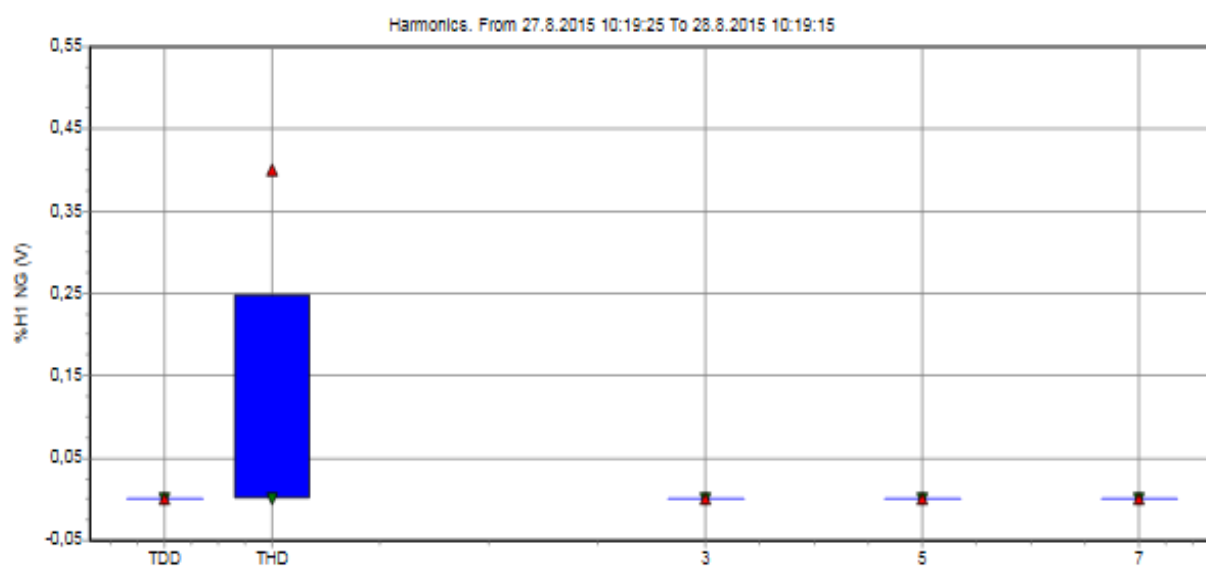
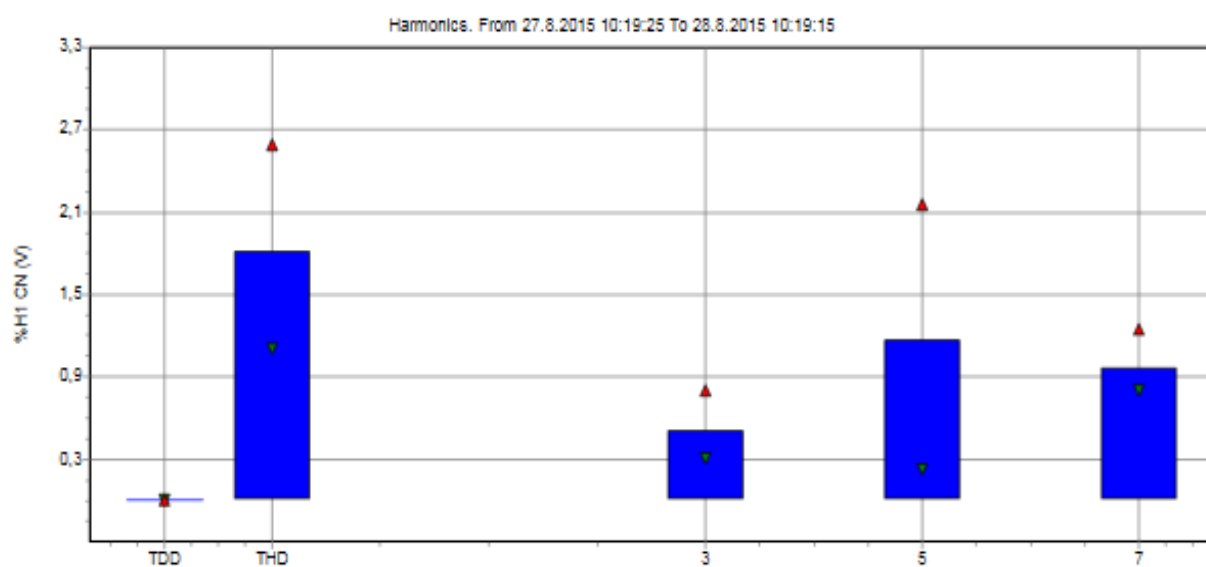
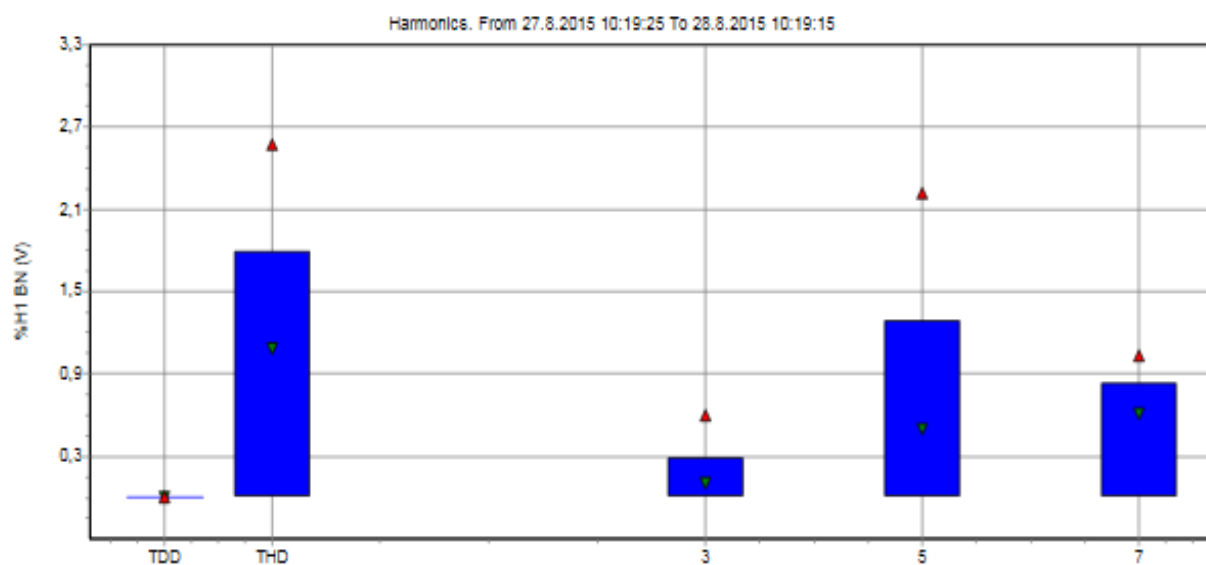
Events Summary

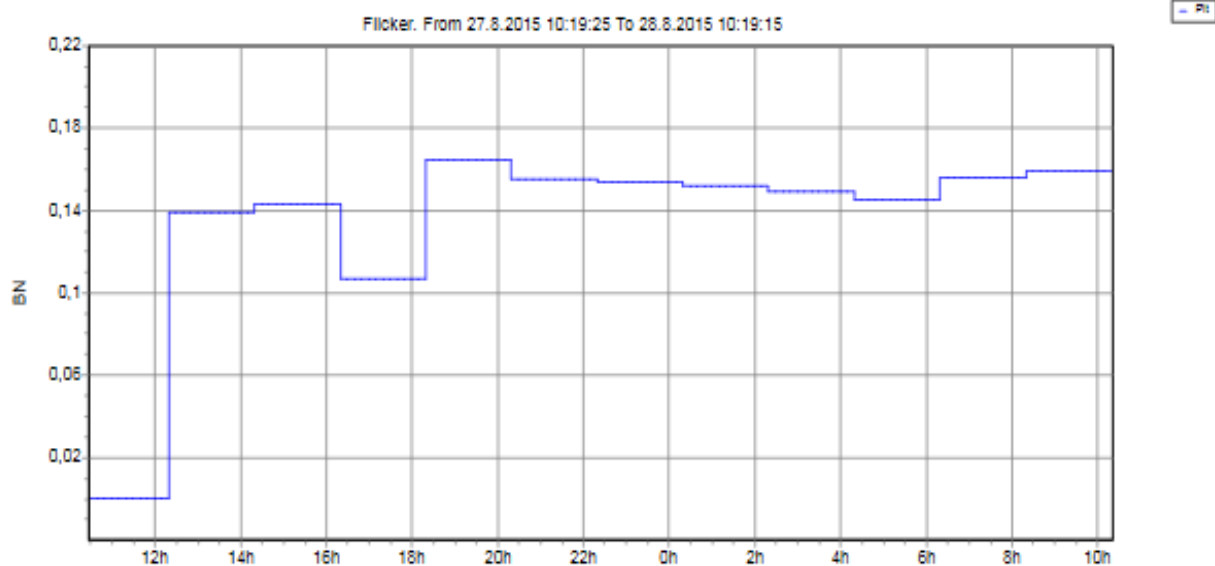
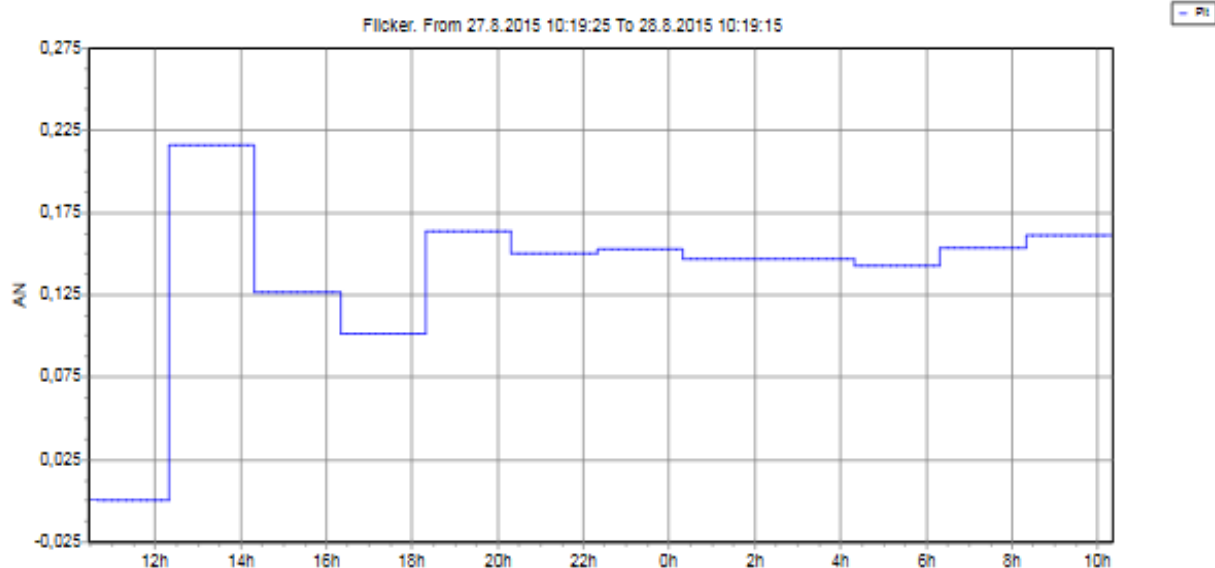
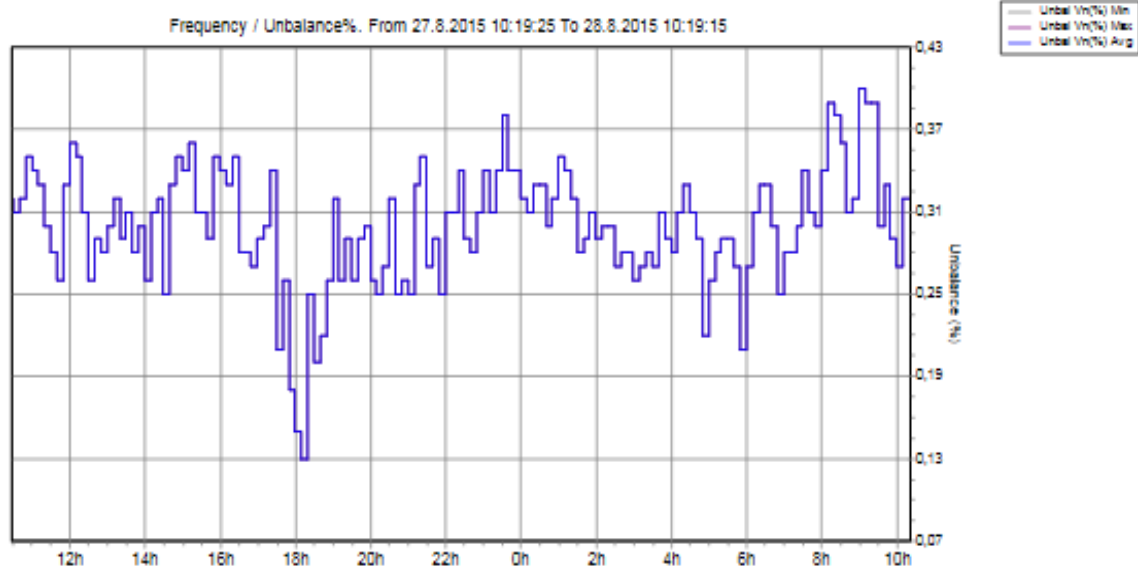
Dips	0
Swells	0
Transients	0
Interruptions	0
Voltage profiles	0
Rapid voltage changes	0
Screens	0
Waveforms	0
Intervals without measurements	0
Inrush current graphics	0
Wave events	0
RMS events	0

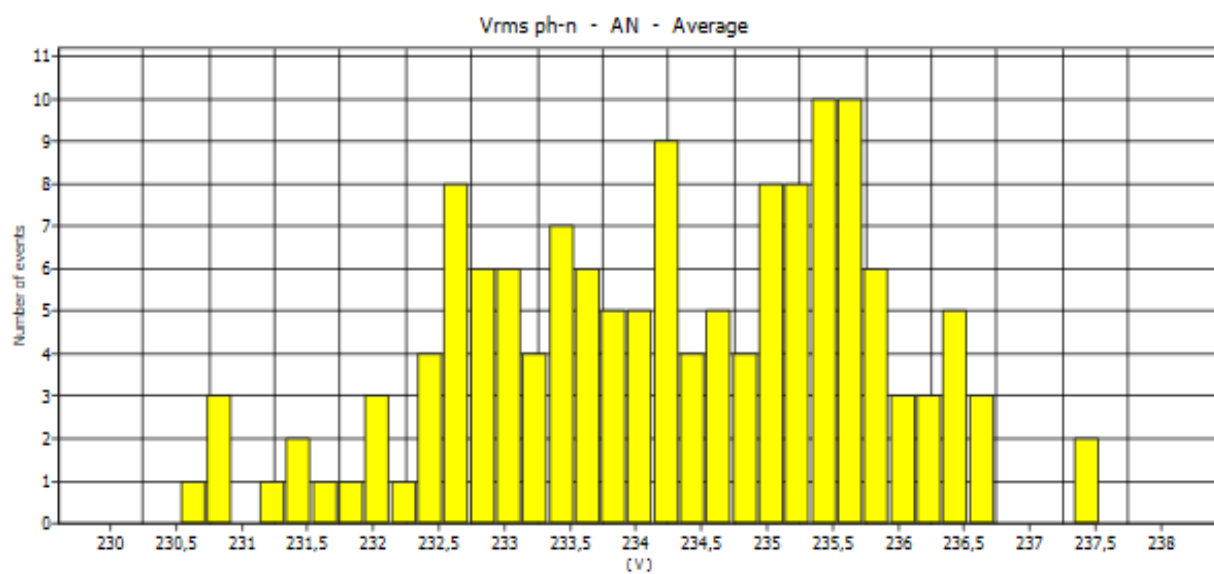
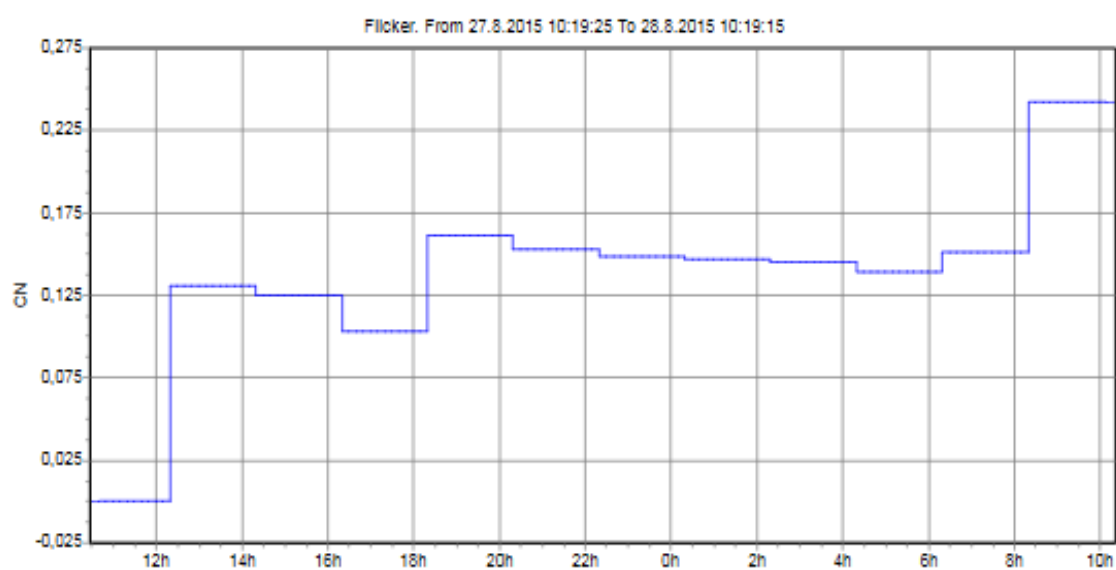












LIITE 4 MSB-02-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI

Filename
MEAS 36 -- FLUKE 430-II (COM4).fpqReport Date/Time
28.9.2015 18:49:44

Page 1

Instrument Information

Model Number	FLUKE 430-II
Serial Number	30833001
Firmware Revision	V04.02

Software Information

Power Log Version	4.2
FLUKE 345 DLL Version	11.20.2006
FLUKE 430 DLL Version	1.0.0.32
FLUKE 430-II DLL Version	1.0.0.32

General Information

Recording location	
Client	I&t kite
Notes	5155



Measurement Summary

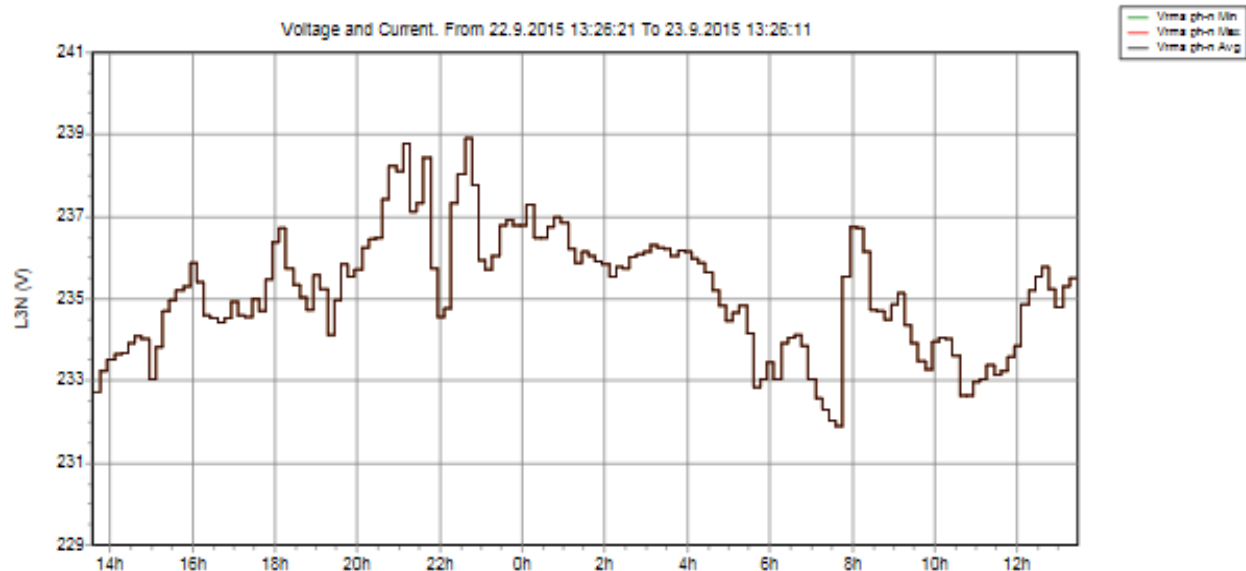
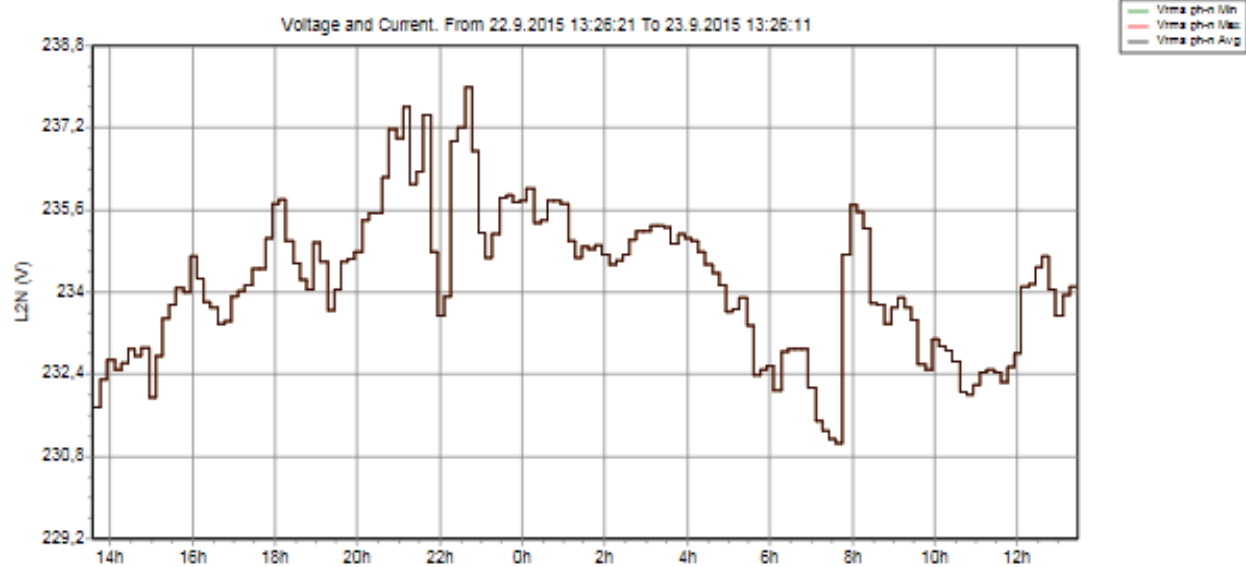
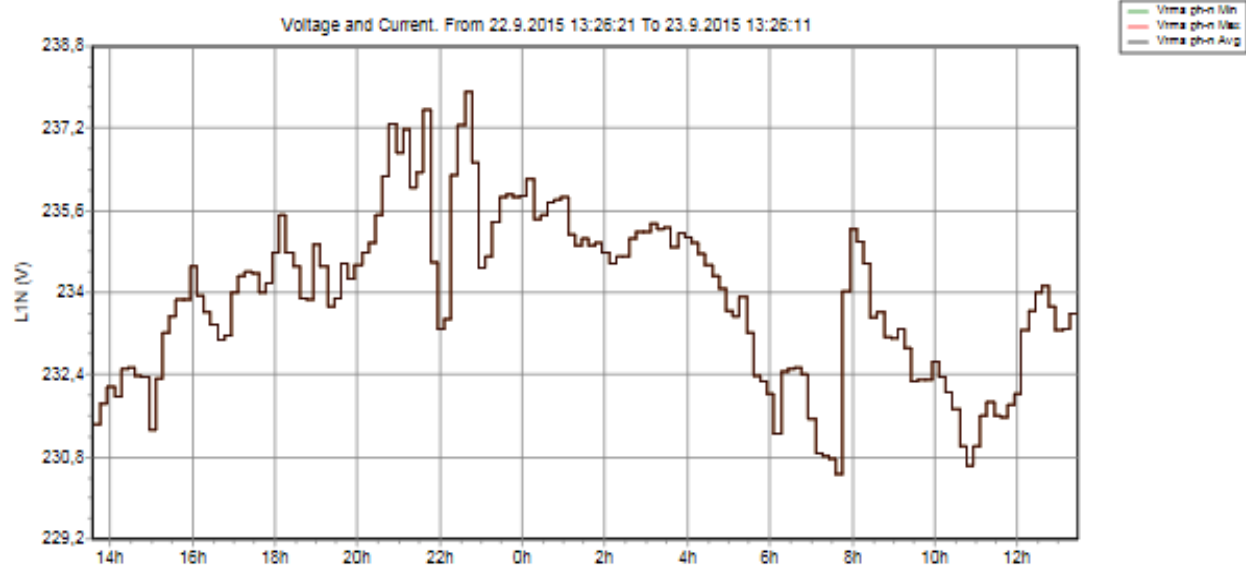
Measurement topology	Wye mode
Application mode	Monitor
First recording	22.9.2015 13:26:21
Last recording	23.9.2015 13:26:11
Recording interval	0h 10m 0s 0msec
Nominal Voltage	230 V
Nominal Current	300 A
Nominal Frequency	50 Hz
File start time	22.9.2015 13:26:11
File end time	23.9.2015 13:26:11
Duration	1d 0h 0m 0s 146msec
Number of events	0
Events downloaded	Yes
Number of screens	0
Screens downloaded	Yes
Power measurement method	Unified
Cable type	Copper
Harmonic scale	%H1
THD mode	THD 40
CosPhi / DPF mode	Cos Phi

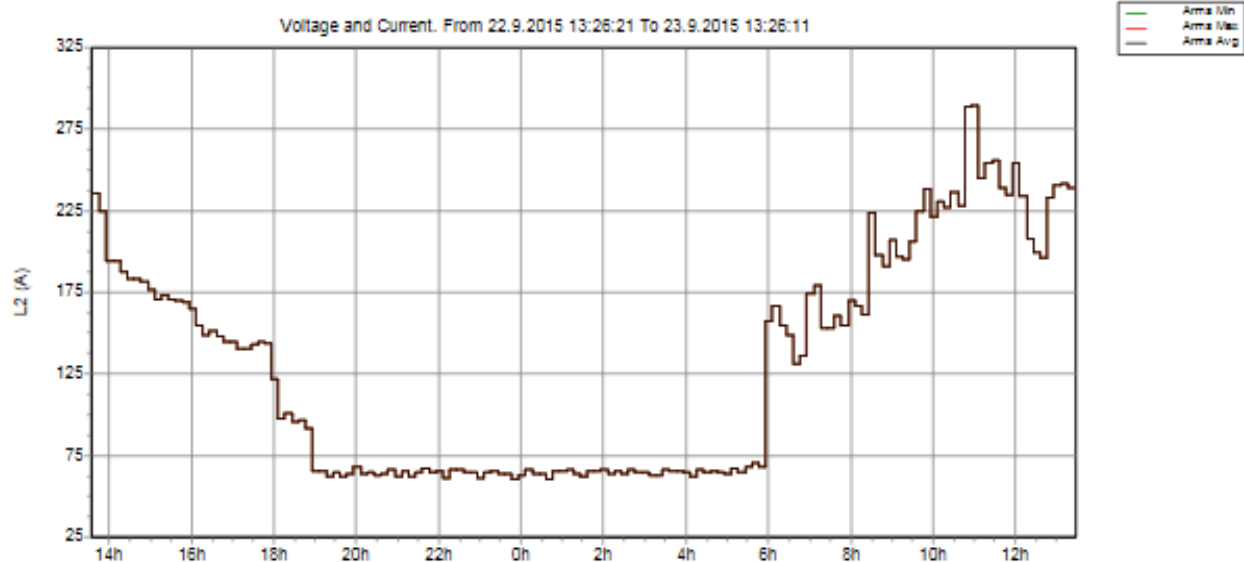
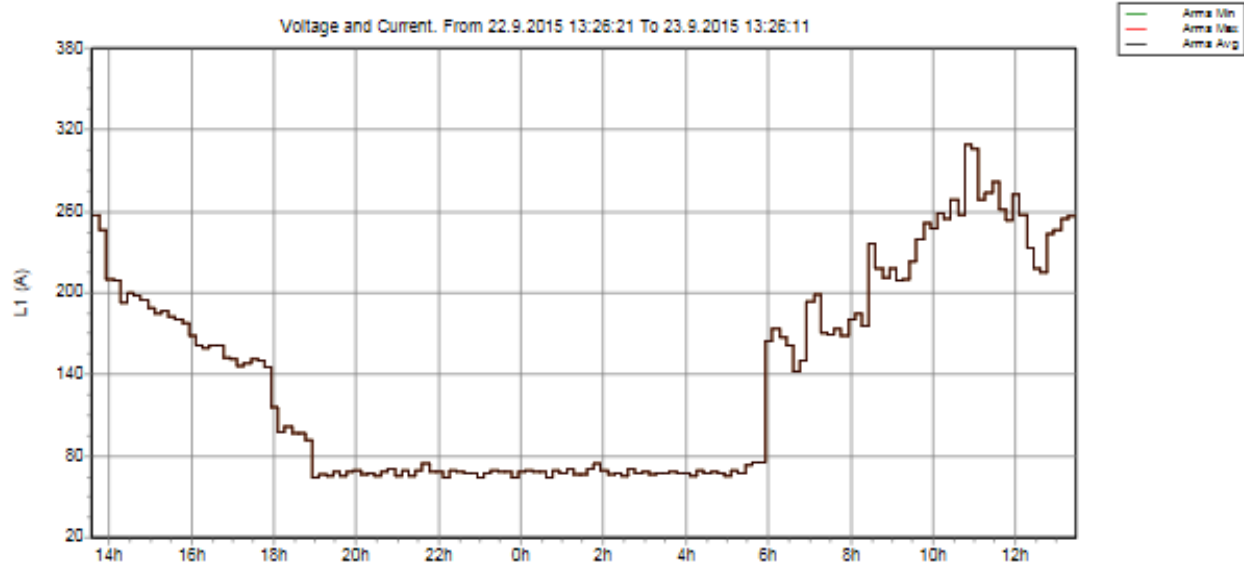
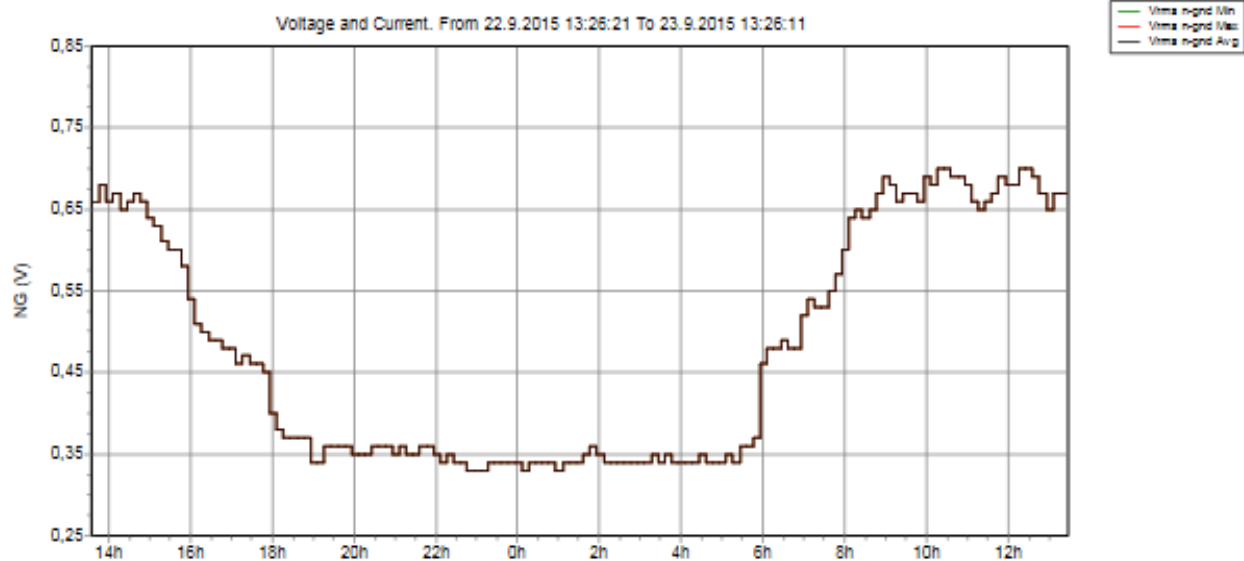
Recording Summary

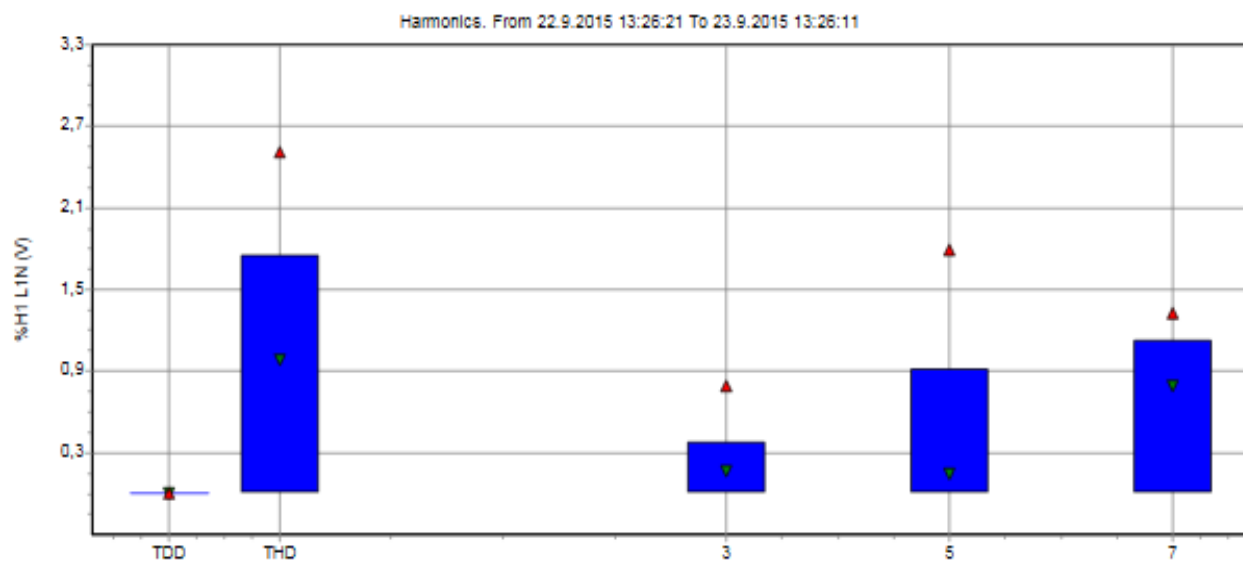
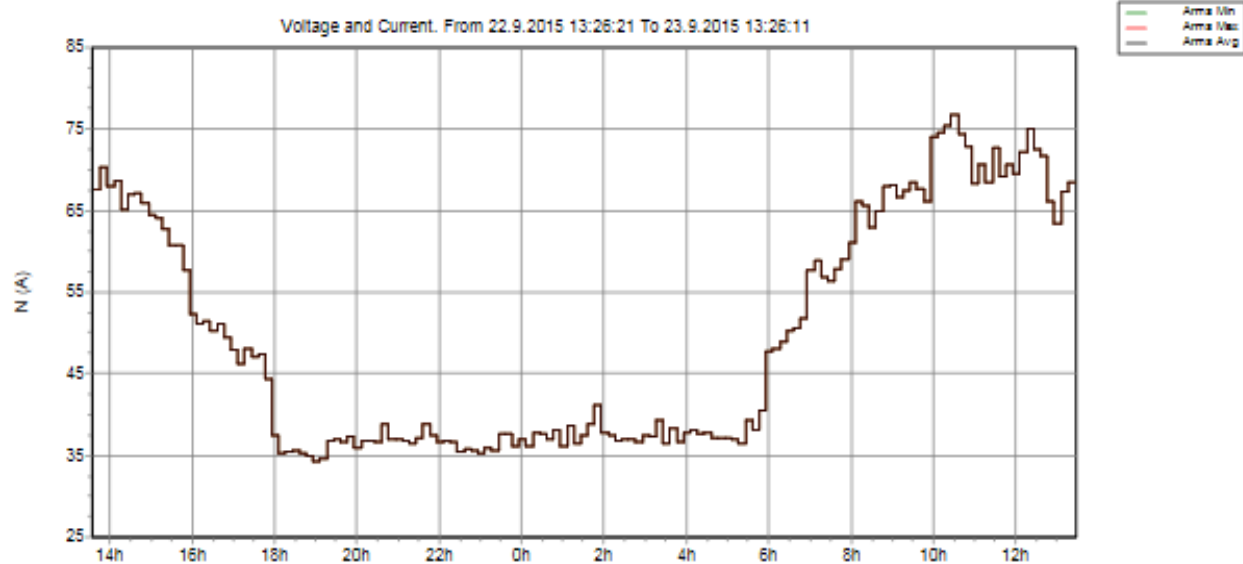
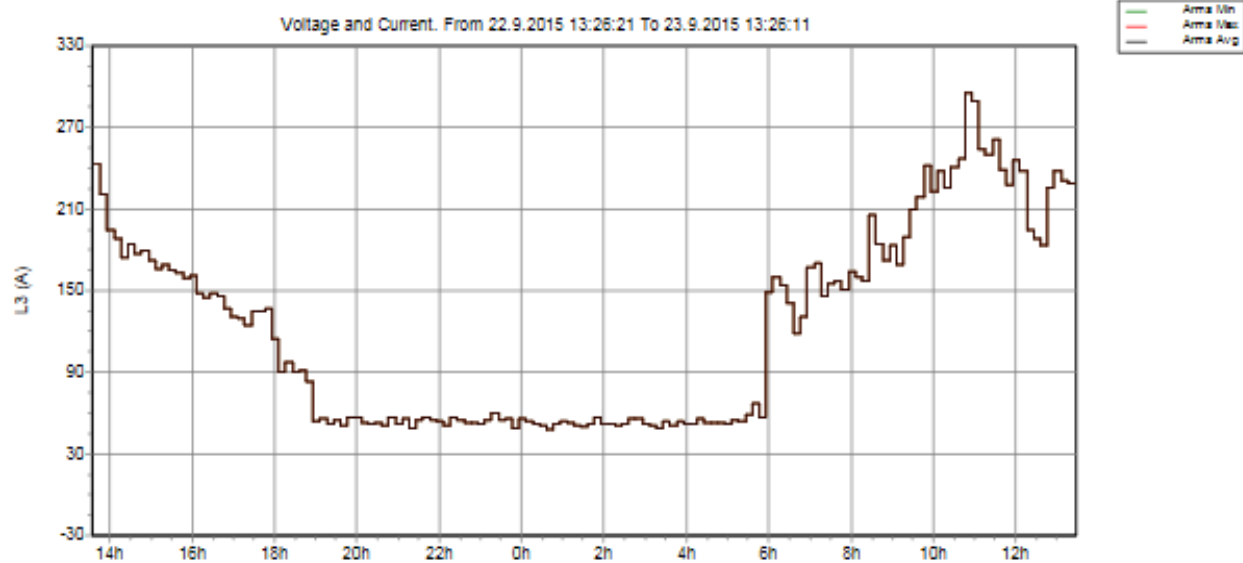
RMS recordings	144
DC recordings	0
Frequency recordings	8640
Unbalance recordings	144
Harmonic recordings	144
Power harmonic recordings	0
Power recordings	0
Power unbalance recordings	0
Energy recordings	0
Energy losses recordings	0
Flicker recordings	0
Mains signaling recordings	144

Events Summary

Dips	0
Swells	0
Transients	0
Interruptions	0
Voltage profiles	0
Rapid voltage changes	0
Screens	0
Waveforms	0
Intervals without measurements	0
Inrush current graphics	0
Wave events	0
RMS events	0

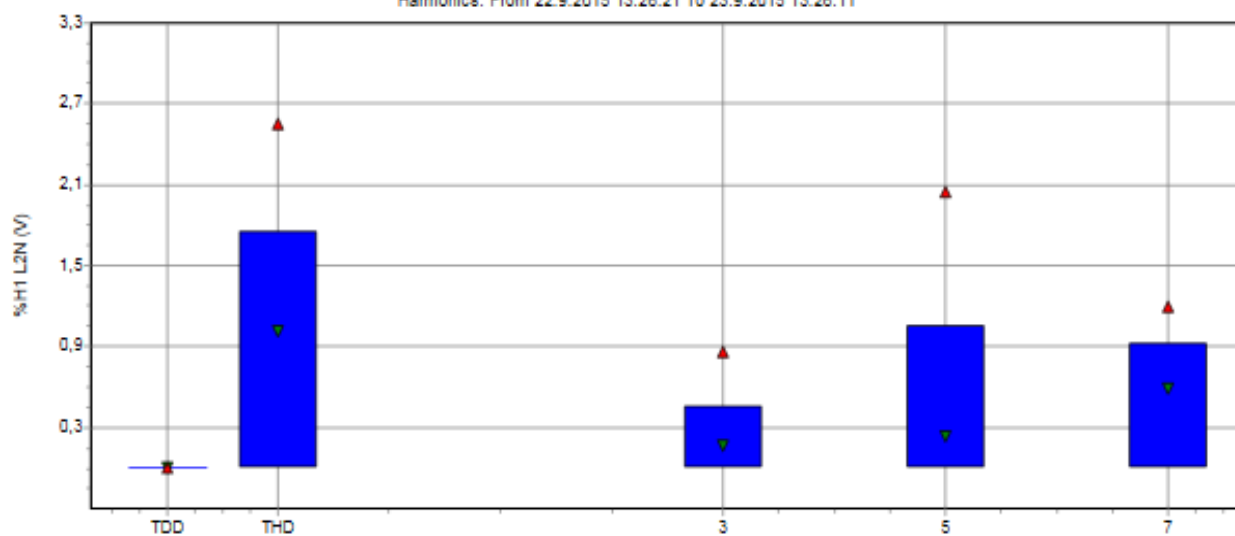




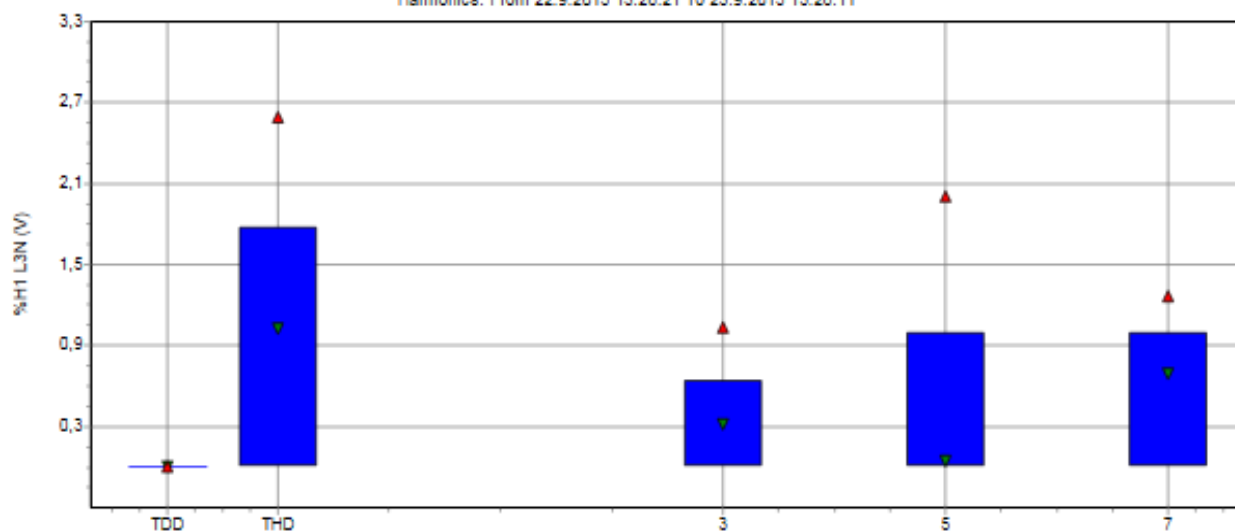




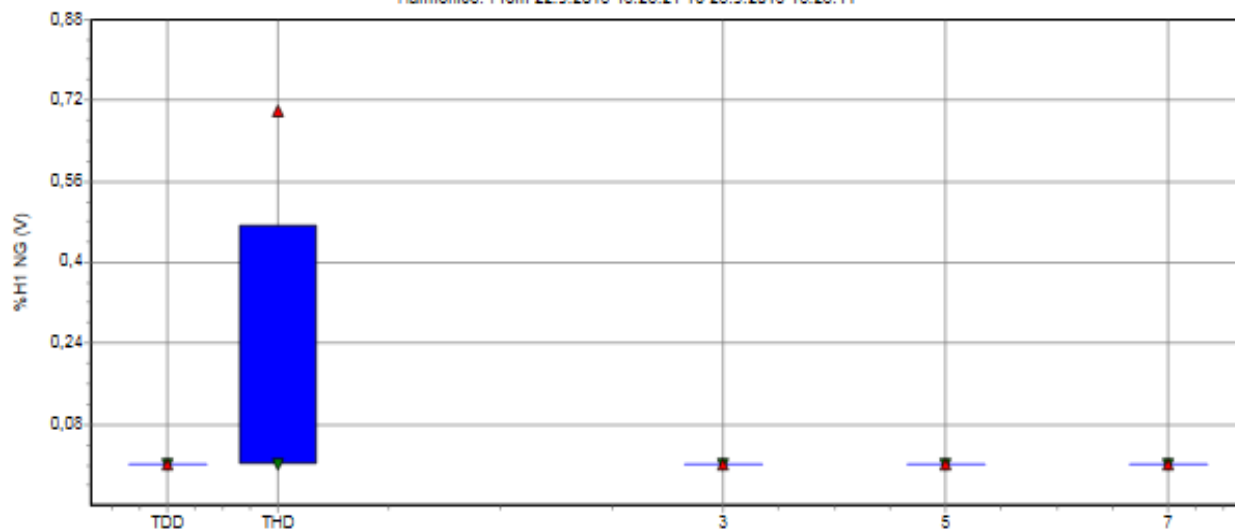
Harmonics. From 22.9.2015 13:26:21 To 23.9.2015 13:26:11

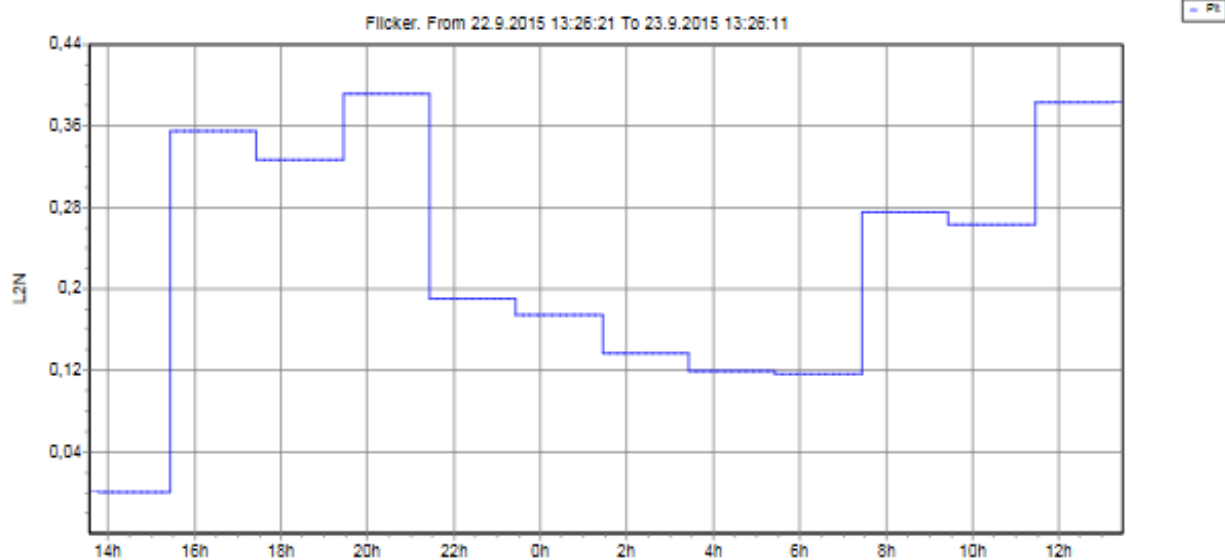
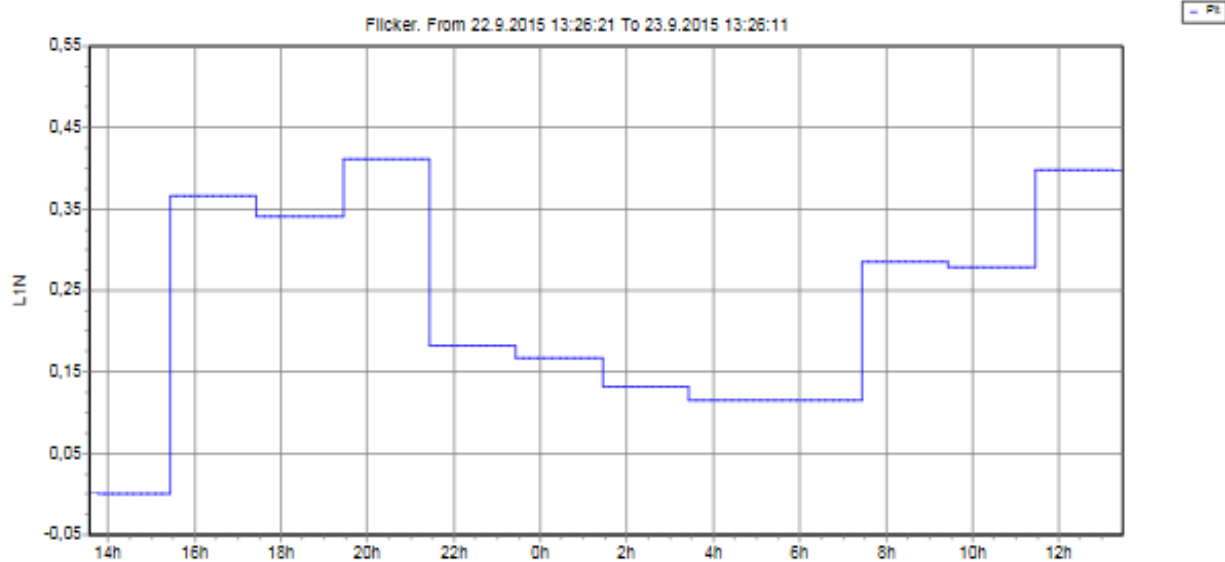
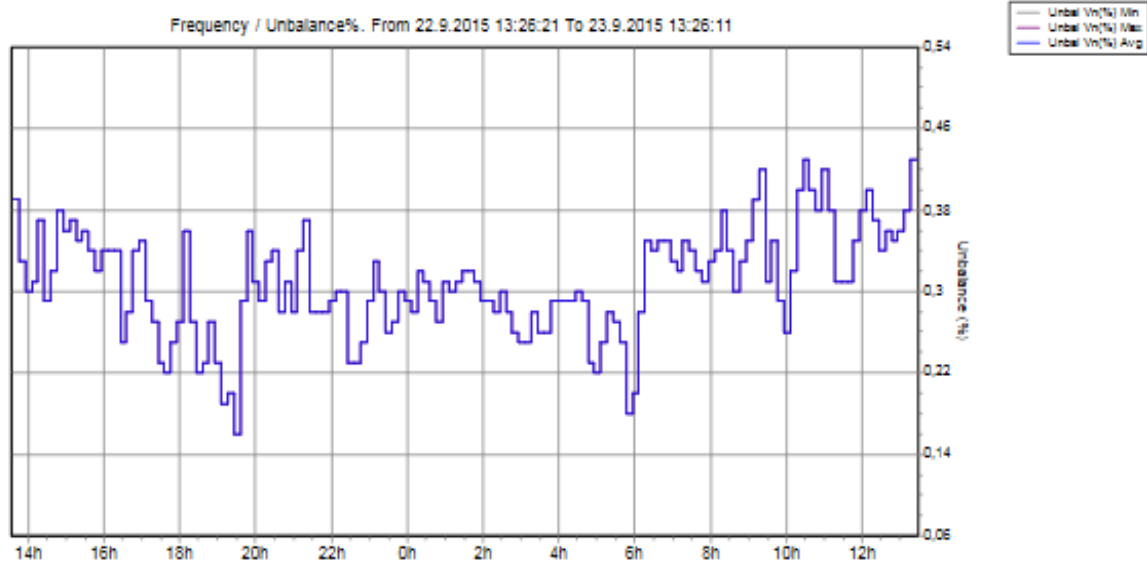


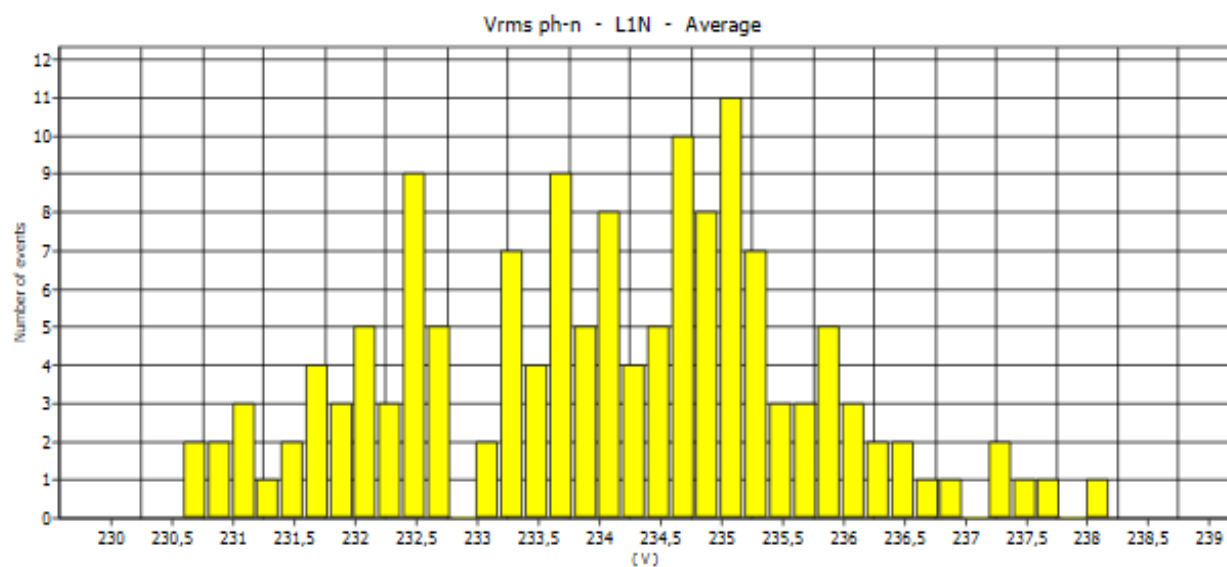
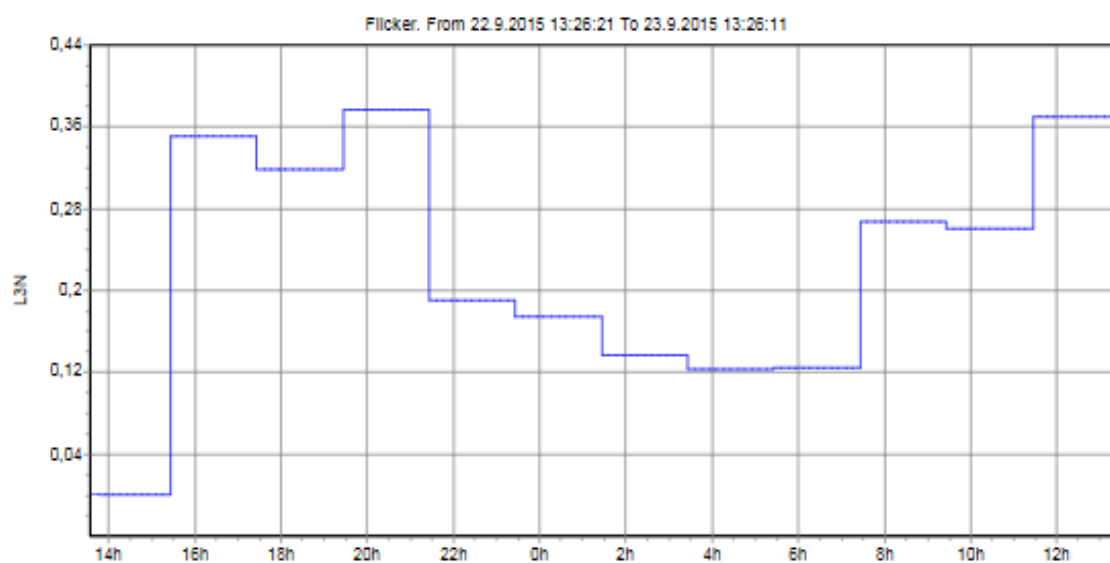
Harmonics. From 22.9.2015 13:26:21 To 23.9.2015 13:26:11



Harmonics. From 22.9.2015 13:26:21 To 23.9.2015 13:26:11







LIITE 5 MSB-03-MITTAUKSEN POWERLOG-RAPORTTI

Filename
MEAS 33 -- FLUKE 430-II (COM4).fpqReport Date/Time
28.9.2015 18:47:53

Page 1

Instrument Information

Model Number	FLUKE 430-II
Serial Number	30633001
Firmware Revision	V04.02

Software Information

Power Log Version	4.2
FLUKE 345 DLL Version	11.20.2006
FLUKE 430 DLL Version	1.0.0.32
FLUKE 430-II DLL Version	1.0.0.32

General Information

Recording location	
Client	I&t kite
Notes	5155



Measurement Summary

Measurement topology	Wye mode
Application mode	Monitor
First recording	2.9.2015 9:16:43
Last recording	3.9.2015 9:16:33
Recording interval	0h 10m 0s 0msec
Nominal Voltage	230 V
Nominal Current	300 A
Nominal Frequency	50 Hz
File start time	2.9.2015 9:16:33
File end time	3.9.2015 9:16:33
Duration	1d 0h 0m 0s 154msec
Number of events	0
Events downloaded	Yes
Number of screens	0
Screens downloaded	Yes
Power measurement method	Unified
Cable type	Copper
Harmonic scale	%H1
THD mode	THD 40
CosPhi / DPF mode	Cos Phi

Recording Summary

RMS recordings	144
DC recordings	0
Frequency recordings	8640
Unbalance recordings	144
Harmonic recordings	144
Power harmonic recordings	0
Power recordings	0
Power unbalance recordings	0
Energy recordings	0
Energy losses recordings	0
Flicker recordings	0
Mains signaling recordings	144

Events Summary

Dips	0
Swells	0
Transients	0
Interruptions	0
Voltage profiles	0
Rapid voltage changes	0
Screens	0
Waveforms	0
Intervals without measurements	0
Inrush current graphics	0
Wave events	0
RMS events	0

