



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Kujala Joni

# TEOLLISUUSVERKON SÄHKÖN LAADUN SELVITYS

Tekniikka  
2020

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Joni Kujala
Opinnäytetyön nimi	Teollisuusverkon sähkön laadun selvitys
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	45 + 6 liitettä
Ohjaaja	Timo Männistö

---

Opinnäytetyöni tarkoituksena oli tutkia kurikkalaisen metalliteollisuusyrityksen Relicomp Oy:n teollisuusverkon sähkön laatuongelmia. Alustavissa mittauksissa vuonna 2018 oli havaittu yliaalloja sekä korkeita virran hetkellisarvoja. Tämän työn tarkoituksena oli tehdä sähkön laatumittaukset kahdessa ongelmallisessa jakokeskuksessa ja selvittää ongelmia aiheuttavat sähkön laadun suureet, jolloin ongelmat voitaisiin ratkaista.

Työssä tehdyt mittaukset suoritettiin Metrel MI-2592 PowerQ4-energia-analysaattorin avulla. Mittarin avulla voitiin suorittaa standardin SFS-EN-50160 mukaiset sähkön laatumittaukset. Mittausten tuloksia saatettiin tarkastella Metrel PowerView-ohjelmalla sekä Excel-taulukkolaskentaohjelmalla ja tällöin verrata mittausten tuloksia standardin SFS-EN-50160 määrittämiin raja-arvoihin.

Työtä varten suoritettujen mittausten tulokset vastasivat aikaisempien mittausten tuloksia. Mittausten perusteella ongelmallisiksi osoittautuivat virran yliaaltopitoisuus sekä puutteellisesti toimiva loistehon kompensointi.

## ABSTRACT

Author	Joni Kujala
Title	Study of Power Quality in an Industrial Grid
Year	2020
Language	Finnish
Pages	45 + 6 Appendices
Name of Supervisor	Timo Männistö

---

The purpose of this thesis was to study the power quality of industrial network at Relicomp Oy, a metal industry company located in the town of Kurikka. During the preliminary measurements in 2018, high current levels and current harmonics were detected. The purpose of this thesis was to conduct power quality measurements at the same two problematic locations, to identify the problem and to find a way to solve it.

The measurements were made using the Metrel MI-2592 PowerQ4 energy analyzer. The meter was used to perform power quality measurements in accordance with standard SFS-EN-50160. The results of these measurements could then be viewed and analyzed with the Metrel PowerView software and the Excel spreadsheet software. The measurement results were then compared with the limit values specified by the standard SFS-EN-50160.

The results of the measurements corresponded to the results of the previous measurements. According to the measurement data, high levels of current harmonics and poor reactive power compensation proved to be the two most problematic factors.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

LIITETUETTELO

1	JOHDANTO .....	12
2	SÄHKÖN LAATU .....	13
2.1	SFS-EN-50160-standardi .....	13
2.1.1	Taajuuspoikkeamat .....	13
2.1.2	Jännitteen taso .....	14
2.1.3	Jännitteen vaihtelu.....	15
2.1.4	Loisteho.....	16
2.1.5	Välkyntä.....	18
2.1.6	Jännitepiikit.....	18
2.1.7	Yliaallot.....	19
2.1.8	THD ja TDD .....	22
2.1.9	Verkon signaalijännite .....	24
2.1.10	Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria.....	25
2.1.11	Tasajännitekomponentti .....	27
3	TARKASTELTAVA KOHDE.....	28
3.1	Verkon rakenne.....	28
3.2	Mittauskohteet.....	30
4	MITTAUKSET .....	32
4.1	Mittalaite.....	32
4.2	Mittautulokset.....	33
4.3	Mittauksen 15.10. – 23.10.2019 tulokset, JK-103 .....	33
4.4	Mittauksen 25.10. – 02.11.2019 tulokset, JK-105 hitsaamo.....	37
5	KORJAUSTOIMENPIDE-EHDOTUKSET .....	40
5.1	Loistehon ylikompensointi jakokeskustasolla .....	40
5.2	Yliaallot.....	41
6	YHTEENVETO.....	43

LÄHTEET.....45

LITTEET

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Esimerkkikuva taajuuspoikkeaman aaltomuodosta.....	14
<b>Kuva 2.</b> Jännitteenkohouman esimerkkikuvaaja.....	15
<b>Kuva 3.</b> Jännitekuopan esimerkkikuvaaja.....	15
<b>Kuva 4.</b> Tehokolmio.....	16
<b>Kuva 5.</b> Transienttiylijännitteen kuvaaja.....	19
<b>Kuva 6.</b> Harmonisen yliaallon säröyttämän jännitteen kuvaaja.....	21
<b>Kuva 7.</b> Epäharmonisen yliaallon säröyttämän jännitteen kuvaaja.....	21
<b>Kuva 8.</b> Signaalijännitteiden sallitut jännitetasot kytkentäpisteessä. /4/.....	25
<b>Kuva 9.</b> Estokelapariston kilpiarvot.....	30
<b>Kuva 10.</b> Esimerkkimittaustilanne JK-105.....	31
<b>Kuva 11.</b> JK-103:n kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon arvot, sekä tehokerroin PF ajan funktiona.....	35
<b>Kuva 12.</b> JK-103:n jännitteen yliaaltopitoisuus spektri prosentteina.....	36
<b>Kuva 13.</b> JK-103:n virran kymmenen minuutin keskiarvojen yliaaltopitoisuuksien huippuarvojen spektri prosentteina.....	36
<b>Kuva 14.</b> JK-105 hitsaamon kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon arvot, sekä tehokerroin PF ajan funktiona.....	38
<b>Kuva 15.</b> JK-105 hitsaamon jännitteen yliaaltopitoisuus spektri prosentteina.....	39
<b>Kuva 16.</b> JK-105 hitsaamon virran kymmenen minuutin keskiarvojen yliaaltopitoisuuksien huippuarvojen spektri prosentteina.....	39
<b>Kuva 17.</b> Vaihejohtimien jännitteen arvot ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	1
<b>Kuva 18.</b> Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	3
<b>Kuva 19.</b> Taajuus ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	4
<b>Kuva 20.</b> Pätöteho ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	5
<b>Kuva 21.</b> Näennäisteho ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	5
<b>Kuva 22.</b> Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 20.11. – 28.11.2018.....	6
<b>Kuva 23.</b> Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyysindeksi ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	7
<b>Kuva 24.</b> L1-vaiheen THD voltteina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	9

<b>Kuva 25.</b> L1-vaiheen THD ampeereina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	9
<b>Kuva 26.</b> L1-vaiheen TDD prosentteina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.....	11
<b>Kuva 27.</b> nollajohtimen TDD prosentteina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018...	11
<b>Kuva 28.</b> Vaihejohtimien jännitteen arvot ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018....	14
<b>Kuva 29.</b> Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	16
<b>Kuva 30.</b> Taajuus ajan funktiona 28.11- 10.12.2018.....	16
<b>Kuva 31.</b> Pätöteho ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	18
<b>Kuva 32.</b> Näennäisteho ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	18
<b>Kuva 33.</b> Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 28.11. – 10.12.2018.....	19
<b>Kuva 34.</b> Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyysindeksi ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	20
<b>Kuva 35.</b> Välkynnän lyhytkestoinen häiritsevyysindeksi ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	20
<b>Kuva 36.</b> L1-vaiheen THD voltteina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	21
<b>Kuva 37.</b> L1-vaiheen THD ampeereina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	22
<b>Kuva 38.</b> nollajohdon THD ampeereina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	22
<b>Kuva 39.</b> L1-vaiheen TDD prosentteina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	23
<b>Kuva 40.</b> Nollajohdon TDD prosentteina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.....	24
<b>Kuva 41.</b> Vaihejohtimien jännitteen arvot ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019....	28
<b>Kuva 42.</b> Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	30
<b>Kuva 43.</b> Taajuus ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	31
<b>Kuva 44.</b> Pätöteho ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	32
<b>Kuva 45.</b> Näennäisteho ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	33
<b>Kuva 46.</b> Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 15.10. – 23.10.2019.....	34
<b>Kuva 47.</b> Power factor $PF_{tot}$ 15.10. – 23.10.2019.....	35
<b>Kuva 48.</b> Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyysindeksi ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	36

<b>Kuva 49.</b> Välkynnän lyhytkestoinen häiritsevyysindeksi ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	36
<b>Kuva 50.</b> L1-vaiheen THD voltteina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	38
<b>Kuva 51.</b> Nollajohdon THD voltteina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	39
<b>Kuva 52.</b> L1-vaiheen THD ampeereina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	39
<b>Kuva 53.</b> Nollajohdon THD ampeereina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.....	40
<b>Kuva 54.</b> Vaiheen L1 sekä nollajohdon TDD ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019. ....	41
<b>Kuva 55</b> Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN jännitteen arvot ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	45
<b>Kuva 56.</b> Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	46
<b>Kuva 57.</b> Taajuus ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	47
<b>Kuva 58.</b> Pätöteho ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	48
<b>Kuva 59.</b> Näennäisteho ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	49
<b>Kuva 60.</b> Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 25.10. – 2.11.2019.....	49
<b>Kuva 61</b> Power factor $PF_{tot}$ 25.10. – 2.11.2019.....	50
<b>Kuva 62.</b> Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyysindeksi ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	51
<b>Kuva 63.</b> Välkynnän lyhytkestoinen häiritsevyysindeksi ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	51
<b>Kuva 64.</b> Vaiheen L1 ja LN jännitteen THD voltteina ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	53
<b>Kuva 65.</b> Vaiheen L1 ja LN virran THD voltteina ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	54
<b>Kuva 66.</b> Vaiheen L1 ja LN jännitteen TDD prosentteina ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.....	55
<b>Kuva 67.</b> Metrel MI-2592-datalehti, sivu 1.....	58
<b>Kuva 68.</b> Metrel MI-2592-datalehti, sivu 2.....	59
<b>Kuva 69.</b> Nokian Capacitors D-sarjan estokelapariston ominaisuudet. ....	60
<b>Kuva 70.</b> Nokian Capacitors D-sarjan estokelapariston tekniset tiedot. ....	61



<b>Taulukko 1.</b> Harmonisten yliaaltojännitteiden liittymiskohdan sallitut arvot prosentteina perustaaajuisesta jännitteestä.....	20
<b>Taulukko 2.</b> Jännitetason 69–161 kV rajat harmonisille yliaaltovirroille. /6/ .....	23
<b>Taulukko 3</b> PK:n syöttämät alakeskukset.....	28
<b>Taulukko 4.</b> Virtamittauksen tuloksia 20.11. – 28.11.2018.....	2
<b>Taulukko 5.</b> L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018. .....	12
<b>Taulukko 6.</b> L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018. .....	12
<b>Taulukko 7.</b> L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018. .....	13
<b>Taulukko 8.</b> Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018. .....	13
<b>Taulukko 9.</b> Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 20.11. – 28.11.2018.....	13
<b>Taulukko 10.</b> Virtamittauksen tuloksia 28.11. – 10.12.2018.....	15
<b>Taulukko 11.</b> L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018. .....	25
<b>Taulukko 12.</b> L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018. .....	25
<b>Taulukko 13.</b> L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018. .....	26
<b>Taulukko 14.</b> Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018.....	26
<b>Taulukko 15.</b> Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 28.11. – 10.12.2018.....	26
<b>Taulukko 16.</b> Virtamittauksen tuloksia 15.10. – 23.10.2019.....	29
<b>Taulukko 17.</b> Virran ja jännitteen THD-arvot.....	37
<b>Taulukko 18.</b> L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019. .....	42

<b>Taulukko 19.</b> L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019. .....	42
<b>Taulukko 20.</b> L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019. .....	43
<b>Taulukko 21.</b> Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019.....	43
<b>Taulukko 22.</b> Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 15.10. – 23.10.2019.....	43
<b>Taulukko 23.</b> Virtamittauksen tuloksia 25.10. – 2.11.2019.....	46
<b>Taulukko 24.</b> Jännitteen THD-arvot 25.10. – 2.11.2019.....	52
<b>Taulukko 25.</b> Virran THD-arvot 25.10. – 2.11.2019.....	53
<b>Taulukko 26.</b> L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019. .....	56
<b>Taulukko 27.</b> L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019. .....	56
<b>Taulukko 28.</b> L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019. .....	56
<b>Taulukko 29.</b> Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019. .....	57
<b>Taulukko 30.</b> Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 25.10. – 2.11.2019.....	57

**LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Mittauksen 20.11. – 28.11.2018 tulokset

**LIITE 2.** Mittauksen 28.11. – 10.12.2018 tulokset

**LIITE 3.** Mittauksen 15.10. – 23.10.2019 tulokset

**LIITE 4.** Mittauksen 25.10. – 2.11.2019 tulokset

**LIITE 5.** Metrel MI-2592-datalehti

**LIITE 6.** Nokian Capacitors, pienjännitetuotteiden tuote-opas

## 1 JOHDANTO

Sähköllä, kuten muillakin tuotteilla, on laatua määrittävät tekijänsä. Sähkön käyttäjän kokemat sähkön laadun häiriöt voivat johtua, esimerkiksi puutteellisesti mitoitettusta sähkönjakeluverkosta. Sähkön laadun häiriöt voivat myös syntyä käyttäjän tilojen omassa sähköverkossa. Huonolaatuinen sähkö voi aiheuttaa merkittäviä kustannuksia sekä muita haittoja niin sähkönjakeluverkolle kuin käyttäjillekin. Sähkön laatua voidaan arvottaa muun muassa taajuuden, jännitteen tason, jännitteen kohoumien ja kuoppien tason, jännitepiikkien tason, yliaaltojen määrän ja laatuja, kolmivaihejärjestelmän symmetrisyyden ja tasajännitekomponentin perusteella. Sähkön laatuun kiinnitetään entistä enemmän huomiota häiriöitä aiheuttavien komponenttien sekä häiriöherkkien laitteiden jatkuvasti lisääntyessä.

Opinnäytetyöni tarkoituksena on tehdä sähkön laatumittauksia kurikkalaisessa ohutlevyteknologiaan erikoistuneessa metalliteollisuusyrityksessä Relicomp Oy:ssä, jossa oli havaittu ongelmia sähkön laadussa, ja pyrkiä ratkaisemaan sähkön laatuongelma. Tehtaan verkossa oli havaittu muun muassa suuria jännitepiikkejä, jotka olivat jopa rikkoneet laitteita. Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä kauhajokelaisen yrityksen Heatek Oy:n kanssa, joka tarjosi tarvittavan osaamisen sekä mittalaitteet.

Työn alkuosassa käyn läpi sähkön laatuun vaikuttavia tekijöitä standardin SFS-EN-50160 näkökulmasta. Seuraavaksi työssä kerron lyhyesti mittauskohteesta, mittalaitteesta sekä tarkastelen saatuja mittaustuloksia. Lopuksi käyn läpi mahdollisia korjausvaihtoehtoja havaittuihin ongelmiin.

## 2 SÄHKÖN LAATU

### 2.1 SFS-EN-50160-standardi

Eurooppalaisen yleisen jakeluverkon alueella kuluttajan liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien rajat tai arvot määritetään SFS-EN 50160-standardin mukaisesti. Standardi ei ole velvoittava kuluttajan omassa, sisäisessä verkossa. Standardi voidaan myös korvata kokonaan tai osittain kuluttajan ja jakeluverkko-operaattorin välisillä sopimuksilla. Standardissa määritellään, kuvataan ja spesifioidaan jännitteen pääominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa yleisiin pien-, keski-, ja suurjännitteisiin vaihtosähköverkkoihin normaaleissa käyttöolosuhteissa. Standardia ei siis sovelleta poikkeuksellisissa käyttöolosuhteissa, kuten luonnonkatastrofin tai muun vastaavan epänormaalin käyttöolosuhteen tapauksissa. /1,3,4/

#### 2.1.1 Taajuuspoikkeamat

Suurien sähkölaitosten jakelualueilla poikkeamat normaalitaajuudesta ovat melko harvinaisia. Standardin SFS-EN 50160 mukaan, Suomessa jakelujännitteen verkkotaajuuden on oltava 50 Hz. Keskenään synkronisesti toimivissa yhteiskäyttöverkoissa perustaajuuden keskiarvon, mitattuna kymmenen sekunnin ajanjaksolta, tulee normaaleissa käyttöolosuhteissa olla 49,5 Hz ja 50,5 Hz välillä 99,5 % vuodesta. Taajuuden on pysyttävä aina 47 Hz ja 52 Hz välillä. Taajuuspoikkeamia esiintyykin yleensä esimerkiksi verkon saarekekäytössä, voimakonekäytössä ja pienillä jakelualueilla. Erillisverkoissa vaatimukset ovat hieman vapaammat. Taajuuden on oltava 49 Hz ja 51 Hz välillä 95 % viikosta, mutta aina 42,5 Hz ja 57,5 Hz välillä. Kuvassa 1 on esitettyä esimerkkipäätötaajuuspoikkeaman aaltomuotona.

Useimmiten taajuuden seurannasta vastaa yhteiskäyttöalueen verkko-operaattori. Taajuuspoikkeamien pääasialliset syyt ovat yleensä generaattorien nopeat kuormitusmuutokset, riittämättömät generaattorin ohjaus- ja säätölaitteet sekä joskus epästabili ja ylikuormitettu verkko. Tavallinen sähkökäyttäjä ei yleensä voi omilla laitteillaan vaikuttaa verkon taajuuteen. /2,4/



**Kuva 1.** Esimerkkikuva taajuuspoikkeaman aaltomuodosta.

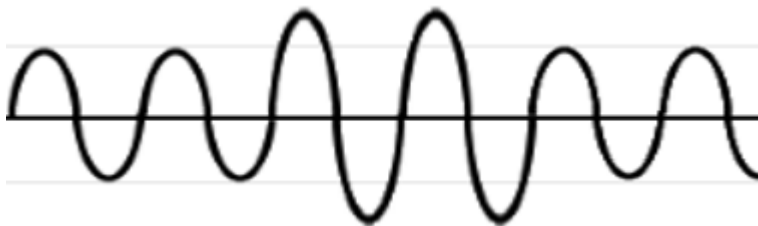
### 2.1.2 Jännitteen taso

Jakelujännitteen suuruudella tarkoitetaan liittymiskohdasta tietyllä aikavälillä mitattua jännitteen tehollisarvoa. Alijännitteestä voidaan puhua, kun jännite on 90 % tai alle sopimuksen mukaisesta jännitteestä. Ylijännite vastaavasti tarkoittaa sitä, että jännite on 110 % tai yli sopimuksen mukaisesta jännitteestä. Normaaleissa olosuhteissa näitä vaihteluita ei saisi ylittää, pois lukien keskeytysjaksot. Erityisillä syrjäseutujen verkon käyttäjillä alijännitettä sallitaan 85 % sopimuksen mukaisesta jännitteestä, mikäli verkon käyttäjälle ei tästä aiheudu haittaa. Lisäksi näitä verkon käyttäjiä tulisi informoida näistä vaihteluista. Verkko-operaattorin tulee tehdä tarvittavat korjaustoimenpiteet, mikäli käyttäjä valittaa jännitevaihteluiden aiheuttamista ongelmista ja mittauksista ilmenee, että jännitteen poikkeamat ylittävät annetut raja-arvot. Sopimuksen mukainen jakelujännite on usein myös käytettävän järjestelmän nimellisjännite, mutta se voi olla myös muu verkon käyttäjän ja jakeluverkko-operaattorin välisen sopimuksen mukainen jännite.

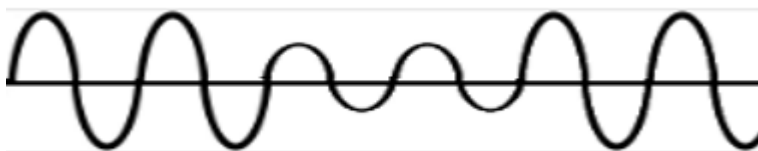
Jännitemittaukset suositellaan tekemään standardin EN 61000-4-30 mukaisesti käyttäen vähintään viikon mittaista mittausajanjaksoa. Tänä ajanjaksona suoritetaan 1008 kappaletta 10 minuutin mittauksia. Vähintään 95 % näistä mittausjaksoista jakelujännitteen on oltava  $\pm 10$  % sovitusta jakelujännitteestä. Yksikään 10 minuutin mittausjaksona mitatun jännitteen tehollisarvojen keskiarvoista ei saa olla rajojen + 10 % ja - 15 % ulkopuolella sopimuksen mukaisesta jännitteestä. Mahdolliset jännitekatkokset jätetään huomiotta tulosten käsittelyssä. Jännitteen suuruuden vaihteluun vaikuttaa muun muassa verkon kuormitustilanteet. Yksittäisten käyttäjien hetkellinen sähkönkulutus on mahdoton ennustaa tarkasti, joten verkot suunnitellaan todennäköisyyksiin perustuen. /2,4/

### 2.1.3 Jännitteen vaihtelu

Nopeat jännitemuutokset johtuvat yleensä verkossa tapahtuvista kuormitusmuutoksista, kytkennöistä tai vikatilanteista. Nopealla jännitteenmuutoksella tarkoitetaan tilannetta, jossa vaihtojännitteen tehollisarvo muuttuu nopeasti ja hetkellisesti nimellisarvostaan. Jännitteenmuutoksia voidaan luokitella suuruutensa sekä pituutensa mukaan. Muutokset ovat kestoaltaan kymmenestä millisekunnista yhteen minuuttiin. Jännitteenkohouma on tilanne, jossa vaihtojännitteen tehollisarvo tilapäisesti nousee yli 110 %:n vertailujännitteestä. Esimerkkikuva jännitteenkohouman aaltomuodosta on kuvassa 2. Jännitteenkohouman tyypillinen aiheuttaja on erilaiset kytkentätoimenpiteet sekä kuormien erottamiset. Jännitteen tehollisarvon nopeassa ja lyhytkestoisessa laskussa 90 %:n vertailujännitteestä, kyseessä on niin sanottu jännitekuoppa. Jännitekuopat johtuvat tyypillisesti erilaisissa jakeluverkossa tai verkonkäyttäjän asennuksissa tapahtuvista vioista. Esimerkkikuva jännitekuopan aaltomuodosta on kuvassa 3. Jännitekuopat sekä -kohoumat ovat tyypillisesti odottamattomia ja satunnaisia ilmiöitä. Jännitteen vaihtelut voivat olla ongelmallisia herkille kuormille, kuten tietokoneille. /2,3,4/



**Kuva 2.** Jännitteenkohouman esimerkkikuvaaja.

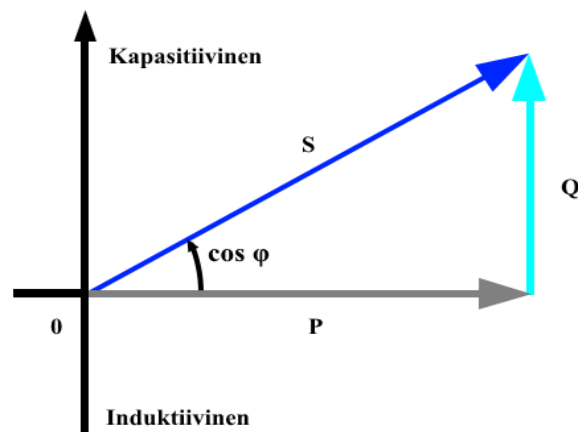


**Kuva 3.** Jännitekuopan esimerkkikuvaaja.

### 2.1.4 Loisteho

Loisteho on täysin riippuvainen kunkin asiakkaan omien tilojen laitteista, eikä sitä siksi käsitellä standardissa SFS-EN-50160. Loisteholla on kuitenkin merkittävä rooli, kun tarkastellaan sähkön laatua. Käsitteellä loisteho kuvataan näennäistehon ja pätötehon vektoreiden erotusta, joka on kuvassa 4 esitetty niin kutsutulla tehokolmiolla. Toisin kuin pätöteho, loisteho ei ole työtä tekevää tehoa, mutta se kuitenkin kuormittaa johtoja. Puhtaasti resistiiviset kuormat kuluttavat vain pätötehoa. Jotkin kulutuslaitteet kuitenkin vaativat pätötehon lisäksi loistehoa magneettikentän ylläpitämiseen. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi sähkömoottorit, purkauslamput ja muuntajat. Laite ottaa tarvitsemansa loistehon verkosta, ellei sitä tuoteta kuormaa varten paikallisesti. Mikäli loisteho joudutaan ottamaan verkosta, pienentää se johtimien pätötehon siirtokapasiteettia.

Valtakunnallinen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj velvoittaa paikalliset verkkoyhtiöt huolehtimaan alueensa loistehotasapainosta. Tästä syystä verkkoyhtiöt laskuttavat erikseen asiakkaiden verkosta ottamasta loistehosta sekä asiakkaiden verkkoon tuottamasta loistehosta. Hinnoittelut vaihtelevat verkkoyhtiöittäin, tarkoituksena on ohjata niiden asiakkaita huolehtimaan itse loistehon kompensoinnistaan. Loistehon hinnoittelun vuoksi, taloudellisinta on tuottaa tarvittava määrä loistehoa lähellä sitä tarvitsevaa kulutuslaitetta.



**Kuva 4.** Tehokolmio.



Loistehoa kompensoimalla voidaan pienentää verkon kokonaisvirtaa, jolloin pätötehon siirtokapasiteetti paranee. Siirtokyvyn parantuessa pätötehohäviöiden aiheuttama johtojen lämpenemä vähenee. Koska oikeanlaisella loistehon kompensoinnilla kokonaisvirta alenee, myös kuormituksen aiheuttama jännitteenalennema vähenee.

Kuormasta riippuen, loisteho voi olla joko kapasitiivista tai induktiivista. Loistehon ollessa induktiivista, kuorma ottaa verkosta loistehoa. Vastavuoroisesti loistehonkulutuksen ollessa kapasitiivista, loistehoa tuotetaan verkkoon. Jotta sähköyhtiöiden ei tarvitse ylimitoittaa siirtoverkkojaan loistehon siirtämiseksi, ne pyrkivät saamaan asiakkaansa kompensoimaan oman loistehonkulutuksensa asettamalla lisämaksuja loisteholle. Loistehon kompensointi voidaan toteuttaa kolmella tavalla; yksittäiskompensoinnilla laitekohtaisesti, ryhmäkompensoinnilla ryhmäkeskustasolla tai keskitetysti pääkeskustasolla.

Yksittäiskompensointia voidaan soveltaa esimerkiksi purkauslamppuille tai moottoreille, joiden loistehonkulutus pysyy lähes vakiona aina laitteen käydessä. Ryhmäkohtainen kompensointi on kuin yksittäiskompensointi, mutta yksittäisten laitteiden sijaan kompensoidaan ryhmä laitteita, esimerkiksi moottoreita, mitä ohjataan samanaikaisesti. Ryhmäkompensointi toteutetaan esimerkiksi, kun ryhmäkeskus sijaitsee kaukana pääkeskuksesta. Yksittäis- ja ryhmäkompensoinnista ollaan pyrkimässä eroon, sillä ylläpito niissä on haastavampaa kuin keskitetyssä kompensointitavassa.

Keskitetyssä kompensoinnissa käytetään pääasiassa automaattisia kompensointiparistoja, jotka sijoitetaan pääkeskukseen. Automaattisessa kompensointiparistossa loistehonsäädin ohjaa kondensaattoriportaita päälle kompensointitarpeen mukaan. Mikäli verkossa on yliaaltoja, kompensointi tapahtuu joko estokelaparistoilla tai yliaaltosuodattimilla. Estokelaparistossa kondensaattoriportaat on varustettu estokeloilla rinnakkaisresonanssien estämiseksi. Kelat suojaavat kondensaattoriportaita yliaaltojen vaikutuksilta, mutta paristo ei juurikaan yliaaltoja verkosta suodata. Yliaaltopitoisessa verkossa jännitesärön ollessa suuri, loistehon kompensointiin käytetään yliaaltosuodatinta.

/1,2/

### 2.1.5 Vätkyntä

Nopeat jännitteen vaihtelut voivat aiheuttaa silmin havaittavaa valaisimien kirkkauden vaihtelua eli valojen vätkyntää. Tietyn havahtumistason yläpuolella vätkyntä muuttuu silmiä ärsyttäväksi ja vätkynnän aiheuttama ärsytys kasvaa nopeasti vätkynnän amplitudin kasvaessa. Standardissa SFS-EN 50160 määritellään vätkynnän ärsyttävyyden voimakkuus häiritsevyyssindekseihin. Lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi ( $P_{st}$ ) mitataan 10 minuutin aikaväliltä. Pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi ( $P_{lt}$ ) lasketaan kahdestatoista kahden tunnin mittausjakson aikana saaduista lyhytaikaisista häiritsevyyssindekseistä kaavan 1 mukaisesti. Vätkynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin tulisi olla viikon pituisen mittausjakson aikana vähintään 95 % ajasta arvoltaan yksi tai alle. Vätkynnän aiheuttama häiritsevyys on luonteeltaan subjektiivista ja tästä johtuen arvon yksi ylittävä pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi ei välttämättä aiheuta häiriötä. /2,3,4/

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

### 2.1.6 Jännitepiikit

Lyhyitä ylijännitepiikkejä kutsutaan transienttiylijännitteiksi ja ne voidaan jaotella kestonsa mukaan pitkiin yli 100  $\mu$ s transientteihin, keskipitkiin alle 100  $\mu$ s transientteihin ja lyhyisiin, alle 1  $\mu$ s pituisiin transientteihin. Transienttiylijännitteet voivat olla, aiheuttajasta riippuen, satojen tai jopa kymmenien tuhansien volttien suuruisia, aiheuttaen näin ongelmia varsinkin jänniteherkille laitteille.

Pitkiä transienttiylijännitteitä aiheuttavat esimerkiksi sulakkeiden palamiset ja kompensointikondensaattorien kytkeytyminen. Kompensointikondensaattorien kytkennän aiheuttamat transientit ovat melko matalia, yleensä noin muutamien kilovolttien tasoa, mutta voivat siitä huolimatta olla ongelmallisia herkemmille elektroniikkalaitteille.

Tyypillinen keskipitkien transienttien aiheuttaja on suoraan sähkölinjaan tai sen läheisyyteen iskevä salama. Salamoinnin aiheuttamat transienttijännitteet ovat

merkittävästi suurempia kuin vikatilanteiden tai kuormien kytkeytymisen aiheuttamat transienttiylijännitteet. Ne saattavat olla suuruudeltaan jopa kymmenien kilovolttien tasoa. Salaman iskun aiheuttamat transienttiylijännitteet ovat kuitenkin melko harvinaisia.

Lyhyitä transienteja aiheuttaa yleensä kuormien, kuten moottorien, kytkeytymiset. Yleisimmät transienttiylijännitteiden aiheuttajat ovat laitteiden kytkeytymistilanteet sekä vikatilanteet, kuten maasulku. Kuvassa 5 on esitettyä esimerkki transientin vääristämästä aaltomuodosta /2,4/



**Kuva 5.** Transienttiylijännitteen kuvaaja.

### 2.1.7 Yliaallot

Sähköverkon jännitteitä ja virtoja, joiden taajuus ylittää verkon nimellistaajuuden, kutsutaan yliaalloiksi. Harmoniset yliaallot ovat verkon nimellistaajuuden monikertoja, mitkä summautuessaan nimellistaajuuden päälle aiheuttavat laitteille ylimääräisiä häviöitä. Suomessa verkon taajuus on 50 Hz, joten esimerkiksi kolmas yliaalto on 150 Hz, viides yliaalto taas 250 Hz ja niin edelleen. Epäharmoniset yliaallot eivät ole nimellistaajuuden monikertoja. Niitä syntyy epälineaarisista laitteista, joiden virta vaihtelee jännitejaksosta riippumatta. Summautuessaan perustaajuuden päälle, epäharmoniset yliaallot aiheuttavat jaksollista vaihtelua sinimuotoiseen perustaajuuteen. Epäharmoniset yliaallot ovat kuitenkin huomattavasti harvinaisempia kuin harmoniset yliaallot.

Standardin SFS-EN 50160 mukaan, yhden viikon pituisena mittausjaksona, 95 % jakelujännitteen jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista on oltava taulukon 1 esittämien arvojen suuruisia tai matalampia. Standardin mukaan jakelujännitteen harmoniset yliaallot johtuvat pääasiassa jakelujärjestelmän kaikille jännitetasoille kytketyistä sähkökäyttäjien

epälineaarista kuormista. Esimerkit harmonisten ja epäharmonisten yliaaltojen såröyttämästä jännitteestä ovat esitettyinä kuvissa 6 ja 7.

**Taulukko 1.** Harmonisten yliaaltojännitteiden liittymiskohdan sallitut arvot prosentteina perustaajuisesta jännitteestä.

Parittomat yliaallot		Parilliset yliaallot	
Järjestysluku	Suhteellinen jännite	Järjestysluku	Suhteellinen jännite
n	$u_h$	n	$u_h$
3	5,0 %	2	2,0 %
5	6,0 %	4	1,0 %
7	5,0 %	6	0,5 %
9	1,5 %	8	0,5 %
11	3,5 %	10	0,5 %
13	3,0 %	12	0,5 %
15	0,5 %	14	0,5 %
17	2,0 %	16	0,5 %
19	1,5 %	18	0,5 %
21	0,5 %	20	0,5 %
23	1,5 %	22	0,5 %
25	1,5 %	24	0,5 %

Yliaaltoja synnyttävät muun muassa vinokuormitus sekä virran tai jännitteen suhteen epälineaariset virtapiirin osat, kuten tehoelektronikka. Niiden verkosta ottama virta on epäsinimuotoista. Yleensä harmonisia tai epäharmonisia yliaaltojännitteitä synnyttävät muun muassa erilaiset puolijohdetekniikalla toteutetut suuntaajakäytöt, ylikuormitetut muuntajat, epäsymmetriset kuormitukset, hakkuriteholähteet, tasasuuntaajat, taajuusmuuttajat, tyristorikäytöt ja purkauslamput. Yliaallot eivät välttämättä ole ongelma vain niitä aiheuttavalle laitteelle, sillä yliaallot leviävät helposti verkkoa pitkin, aiheuttaen ongelmia myös muille laitteille. Yliaallot aiheuttavat häviöiden kasvua verkossa, muuntajien ylikuormittumista, laitteiden kuormitettavuuden alenemista, mittareiden virhenäyttämiä, suoja-reiden virhetoimintoja, äänihäiriöitä ja nollajohtimen ylikuormittumista.



**Kuva 6.** Harmonisen yliaallon säröyttämän jännitteen kuvaaja.



**Kuva 7.** Epäharmonisen yliaallon säröyttämän jännitteen kuvaaja.

Yliaaltoja torjutaan yleisesti erilaisilla yliaaltosuodattimilla. Suodattimet sijoitetaan rinnan kuorman kanssa, lähelle yliaaltoja tuottavaa laitetta. Näin minimoidaan yliaaltojen kulkema matka verkossa ja täten niiden aiheuttamat ongelmat laitteille. Yliaaltosuodattimet luokitellaan aktiivisiin ja passiivisiin suodattimiin.

Aktiiviset yliaaltosuodattimet ovat tehpuolijohteilla toteutettuja yliaaltovirtalähteitä. Aktiivisuodatin syöttää verkkoon samoja yliaaltoja mitä se verkosta havaitsee, mutta vastakkaisvaiheisina. Vastakkaisvaiheiset yliaallot kumoavat toisensa, jättäen jäljelle sinimuotoisemman jännitteen. Aktiivinen yliaaltosuodatin tehoa myös epäharmonisiin yliaaltoihin. Aktiivisia yliaaltosuodattimia käytetään, kun yliaallot vaihtelevat taajuudeltaan tai suuruudeltaan, eikä useamman imupiirin käyttö ole järkevää, esimerkiksi tilan puutteen takia tai taloudellisista syistä.

Passiivinen yliaaltosuodatus toimii kuristimien ja kondensaattorien sarjakytkennöistä muodostuvalla imupiirillä, joka voidaan virittää suodattamaan haluttuja yliaaltoja ja niiden monikertoja. Imupiiri voidaan virittää myös suodattamaan jopa kolmea eri yliaaltotaajuutta ja niiden monikertaa. Eri taajuuksille viritettyjä imupiirejä voidaan myös kytkeä rinnakkain, jolloin saadaan

suodatettua useampia yliaaltoja samanaikaisesti. Passiivisen yliaaltosuodattimen induktanssi valitaan siten, että sen komponenteista muodostuu pieni-impedanssin resonanssiipiiri, joka poistaa kohteena olevan yliaallon ja sen monikerrat. Perustaajuudella impedanssin olisi oltava mahdollisimman suuri, jotta pätötehohäviöt eivät kasva tarpeettoman suuriksi. Passiivisuodattimia käytetään, mikäli verkossa havaitaan esiintyvän erityisesti jotain tiettyä yliaaltotaajuutta. Passiivisuodatin toimii myös kompensointikondensaattorina, sillä perustaajuudellaan se on kapasitiivinen ja tuottaa induktiivista loistehoa.

Yliaaltojen suodattamisessa täytyy erikseen huomioida kolmas yliaalto ja sen kerrannaiset. Kolmannet harmoniset yliaaltotaajuudet, kuten 3, 9, 15 jne. ovat poikkeuksellisia, sillä ne eivät kumoudu kolmivaihejärjestelmän keskipisteessä, vaan ne summautuvat. Toisin kuin muut yliaallot, kolmannet yliaallon virrat summautuvat muista vaiheista nollajohtimeen. Tyypillisiä kolmannen yliaallon aiheuttajia ovat muun muassa purkauslamput sekä tietokoneet. Kolmannen yliaallon suodattamiseen käytetään THF-suodatinta, joka sijoitetaan muuntajan ja keskuksen nollaliitinten väliin. THF-suodatin muodostaa 150 Hz taajuudelle suuren impedanssin, joka muuttaa kolmannen yliaaltovirran jännitteeksi. /1,2,4/

### **2.1.8 THD ja TDD**

Jännitteen THD (Total Harmonic Distortion) eli harmoninen kokonaissärökerroin, ilmaisee harmonisten komponenttien voimakkuuden suhteen perusaaltoon nähden. THD-arvo on siis hyödyllinen keino saada nopea käsitys verkon yliaaltopitoisuudesta. Mikäli kokonaissärön havaitaan olevan suuri, voidaan ryhtyä tarkastelemaan yksittäisiä yliaaltotaajuuksia ongelmallisimman löytämiseksi. Taulukossa 1 näkyvien yksittäisten yliaaltojen keskimääräisten tehollisarvojen lisäksi standardissa SFS-EN-50160 määritellään, että jakelujännitteen kokonaissärökertoimen, mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot 40:een järjestyslukuun asti, tulisi lisäksi olla korkeintaan 8 %. Rajaaminen 40. järjestyslukuun on vakiintunut, sillä sen ylämentäessä mittaustulokset saattavat olla epäluotettavia, riippuen mittauksessa käytettävän jännitemuuntajan ominaisuuksista. Jännitteen kokonaissärökerroin voidaan laskea kaavan 2 avulla.

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

, missä

$h$  = harmonisen järjestysluku

$U_h$  = yksittäisen harmonisen suhteellinen amplitudi verrattuna perustajuisen jännitteen amplitudiin.

Sähkön laadulla viitataan yleensä jännitteen laatuun, sillä sitä voidaan hallita jännitelähteessä toisin kuin virtaa. Asiakas siis vastaa virran laadusta, kun taas sähkön tuottaja tai jakelija vastaa jännitteen laadusta. Standardi SFS-EN-50160 ei määritä virralle laaturajoja, sillä asiakkaan tilojen virran suuruus ja laatu on täysin riippuvainen asiakkaan omien laitteiden kuormasta. Sen sijaan virran laadun arvottamiseen voidaan käyttää IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standardin Std. 519-2014 suosituksia. Taulukossa 2 on esitettyä IEEE Std 519-2014-standardin antamat harmonisten yliaaltovirtojen suositusrajat. Kymmenen minuutin keskiarvojen harmonisten yliaaltovirtojen tulee olla 1,5 taulukon antaman rajan sisällä 99 % viikosta. Parillisten kertalukujen yliaaltovirtojen raja on 25 % taulukon antamista arvoista. /1,2,4,6/

**Taulukko 2.** Jännitetason 69–161 kV rajat harmonisille yliaaltovirroille. /6/

Maksimi virran harmonisen särön osuus kuormitusvirrasta IL prosentteina						
Yksittäisen parittoman harmonisen yliaallon kertaluku						
Oikosulkusuhte*	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8,0
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15,0
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20,0

\*  $I_{SC}/I_L$  Yliaaltovirran mittauspisteen oikosulkuvirta  $I_{SC}$  suhteutettuna kuormitusvirtaan  $I_L$ .

Myös virralle voidaan laskea THD-arvo, mutta virran yliaaltopitoisuuden arviointiin käytetään yleensä TDD-arvoa (Total Demand Distortion) eli kokonaiskuorman särökerrointa. TDD-arvo kuvastaa signaalin säröytyneen osan suuruutta korkeimman kuormitusvirran arvoon suhteutettuna. TDD-arvoa käytetään yleisesti virran yliaaltopitoisuuden arviointiin, sillä THD-arvon laskeminen virralle voi antaa harhaanjohtavan suuria arvoja. Esimerkiksi pienillä virroilla toimivat laitteet eivät välttämättä aiheuta paljon häiriötä, vaikka todellisuudessa niiden kokonaissärö olisikin suuri. Virran TDD-arvo voidaan laskea kaavan 3 mukaisesti. /1,2,4,6/

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_2^h (I_h)^2}}{I_L} \quad (3)$$

, missä

$I_h$  = yksittäisen harmonisen suhteellinen amplitudi verrattuna perustaajuisen virran amplitudiin

$I_L$  = virta suurimmalla käytetyllä kuormituksella

$h$  = harmonisen järjestysluku.

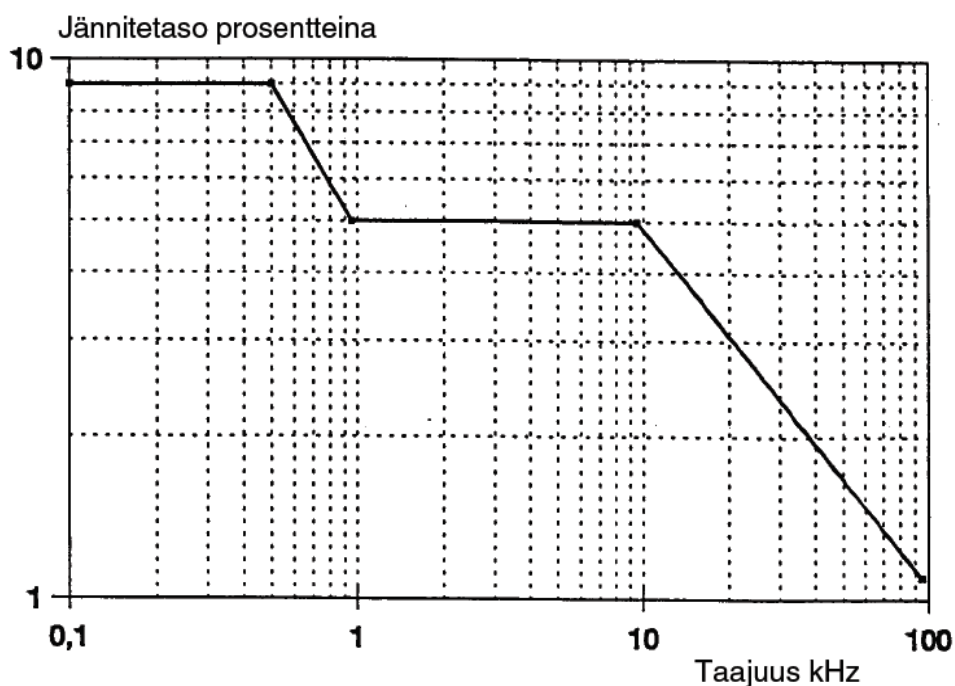
### 2.1.9 Verkon signaalijännite

Euroopassa verkko-operaattorit voivat käyttää yleistä jakeluverkkoa viestien siirtoon lisäämällä korkeataajuisen viestisignaalin jännitteeseen. Signaalijännitteen avulla verkko-operaattorit voivat viestiä jakeluverkon järjestelmille hyödyntäen siirtojohtoa. Yleisen järjestelmän käyttö verkon asiakkaiden välisessä viestinsiirrossa ei ole sallittua. Yleisesti verkon signaalit on jaoteltu kolmeen ryhmään taajuutensa perusteella. Verkkokäsky signaalit ovat verkkojännitteeseen kerrostettuja 0,11 – 3 kHz taajuisia sinimuotoisia jännitesignaaleita. Sähköverkon kantaaltosignaalit ovat sinimuotoisia jännitesignaaleita, taajuudeltaan 3 – 148,5 kHz. Joissain verkoissa käytetään kanto-aaltoyhteyksissä myös yli 148,5 kHz



taajuuksia. Merkinantosignaalit ovat lyhytaikaisia muutoksia jänniteaallon valituissa kohdissa.

Standardissa SFS-EN 50160 on määritelty signaalijännitteiden sallitut raja-arvot kytkentäpisteessä. Kuvassa 8 on esitetty standardin vaatimukset signaalijännitteiden sallituista suuruuksista. Yli 99 % vuorokaudesta signaalijännitteiden kolmen sekunnin keskiarvo saa olla korkeintaan kuvassa annettujen arvojen mukainen. Jännitetasot on esitetty prosentteina nimellisjännitteestä. /4/



**Kuva 8.** Signaalijännitteiden sallitut jännitetasot kytkentäpisteessä. /4/

### 2.1.10 Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria

Kolmivaihejärjestelmä on symmetrinen, kun vaihevirran ja -jännitteen itseisarvot ovat samansuuruiset ja perättäiset vaihevirtojen ja -jännitteiden väliset kulmat ovat yhtä suuret. Vaihevirtojen suunta ja suuruus muuttuvat jatkuvasti samalla taajuudella ja niiden välillä on  $120^\circ$  vaihesiirto. Järjestelmä on epäsymmetrinen, mikäli jokin ehdoista ei täyty. Epäsymmetrian suuruus ilmaistaan yleensä nolla- ja

vastakomponenttien suhteena myötäkomponenttiin nähden. Jännitteen epäsymmetria voidaan laskea kaavan 4 avulla.

$$U_n = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4)$$

, missä

$U_n$  = epäsymmetria

$\beta$  = jännitekerroin.

Kaavassa 4 tarvittava jännitekerroin  $\beta$  voidaan laskea käyttämällä kaavaa 5.

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2} \quad (5)$$

, missä

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

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

$U_{31}$  = jännite vaiheiden L3 ja L1 välillä.

Standardin SFS-EN 50160 mukaan viikon pituisella mittausjaksolla jakelujännitteen jokaisen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % saa olla korkeintaan 2 % perustaajuisesta myötäkomponentista. Jännitteen epäsymmetria johtuu yleensä verkon epäsymmetrisistä kuormista. Vinokuormitusta voi aiheutua myös esimerkiksi yhden vaiheen palaneesta sulakkeesta tai kompensointiparistosta. Epäsymmetrinen kuormitus voi aiheuttaa yliaaltoja sekä virtaa nollajohtimeen. Suuri virta nollajohtimessa voi aiheuttaa sen lämpenemistä, ja täten esimerkiksi eristeiden sulamista ja tulipalovaaran. /2,3/

### **2.1.11 Tasajännitekomponentti**

Tasajännitekomponentin suuruus vaihtosähköpiirissä on usein matala, joten niiden merkitys on käytännössä melko vähäinen. Mikäli kuitenkin tasajännitekomponentti nousee jostain syystä korkeaksi, se saattaa aiheuttaa ongelmia muuntajissa, lisätä korroosiota liitoksissa ja aiheuttaa toimintahäiriöitä jänniteherkille piireille. Vaihtojännitteeseen tasajännitekomponentteja synnyttävät esimerkiksi tasasuuntaajat ja elektroninen ohjaus. /2/

### 3 TARKASTELTAVA KOHDE

#### 3.1 Verkon rakenne

Relicomp Oy:n Kurikan tehtaan laitekanta koostuu pääasiassa erilaisista metallin käsittelykoneista, kuten hitsauslaitteista ja leikkauskoneista. Liittymisjohto ja 1000 A pääsulakkeet sijaitsevat pääkeskuksessa samoin kuin keskitetyn kompensoinnin laitteet. Lisäksi JK-IVK 2:n syöttämä ilmanvaihtokone sijaitsee pääkeskuksessa. Pääkeskus syöttää 18 alakeskusta, joiden tiedot ovat näkyvissä taulukossa 3. Tässä työssä keskityttiin tarkastelemaan jakokeskuksia JK-103 sekä JK-105 hitsaamo, sillä näiden keskusten laitteissa oli havaittu ongelmia ja mittaukset suoritettiin siinä.

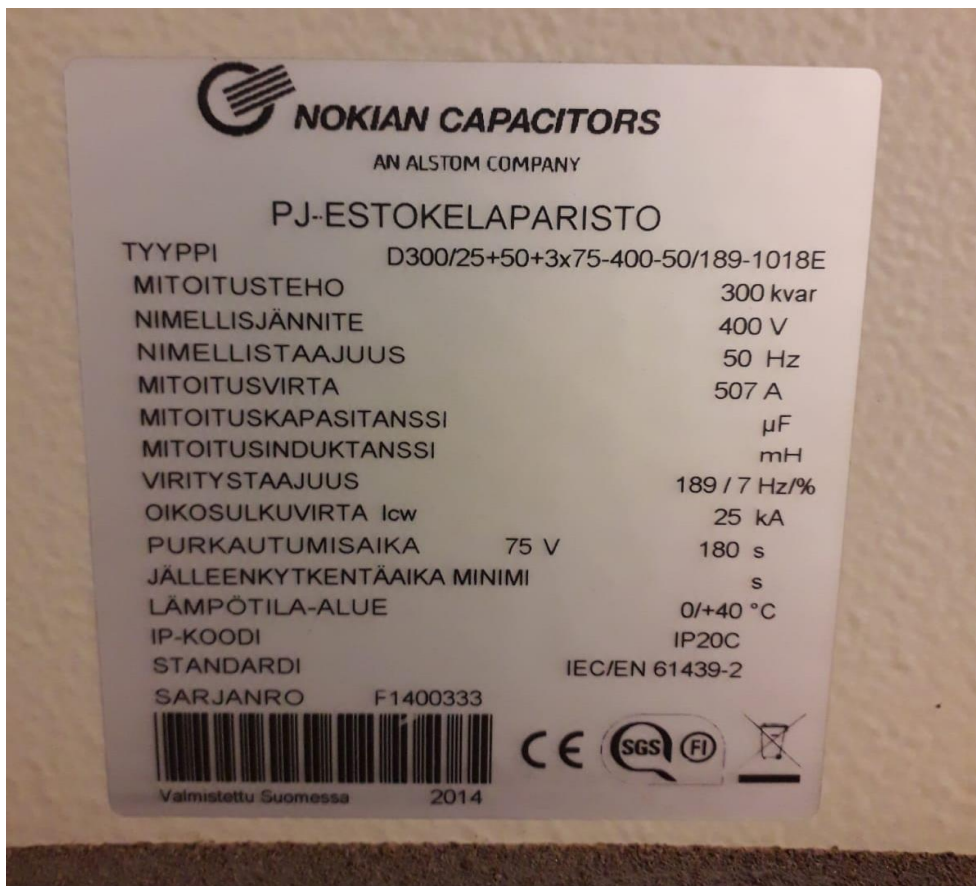
**Taulukko 3** PK:n syöttämät alakeskukset.

Nimi	Kaapelilaji	Sulakkeen koko
JK-101	5x25S	63/63 A
JK-102	AMCMK 4x150+41	400/400 A
JK-103	AMCMK 4x150+41	400/400 A
JK-104	AMCMK 4x150+41	400/400 A
JK-105 Hitsaamo	AMCMK 4x240+120	400/630 A
JK-105	MCMK 4x25+16	63/63 A
JK-106	AMCMK 4x185+95	400/400 A
JK-IVK	AMCMK 4x70+21	125/125 A
JK-IVK 2	AMCMK 4x70+21	63/125 A
Kompressori	MCMK 4x35+16	125/250 A
Kompressori Vasen	MCMK 4x16+16	63/125
Kompressori Oikea	MCMK 4x16+16	63/125
Kompressori Varakäyttö	MCMK 4x35+25	125/125 A
Wagner OK	MCMK 4x35+25	80/400 A
Kompensointiparisto	MCMK 43x185+95	630/630 A
Maalaamo	AMCMK	400/400 A
Autolämmitys		160/250 A
Kiinteistö		

Loistehon kompensointi on toteutettu keskitetysti pääkeskustasolla estokeloilla varustetulla, automaattisella kompensointiparistolla. Erillistä yliaaltojen kompensointia ei sen sijaan kohteessa ole. Kuvassa 9 on näkyvissä pariston kilpiarvot, ja liitteessä 6 on pariston teknisiä tietoja Nokian Capacitorsin esitteestä.

Kompensointiparisto on Nokian Capacitors D-sarjaan kuuluva D300/25+50+3x75-400-50/189-1018E. D-sarjan paristojen vakioporraskoot ovat: 3.13, 6.25, 12.5, 25, 37.5, 50 ja 75 kvaria. Tehoportaiden määrä voidaan valita kolmesta seitsemään. Relicomp Oy:n käyttämässä, 300 kvar:lle mitoitettussa mallissa valitut porraskoot ovat: 25 kvar, 50 kvar ja 3 x 75 kvar ja sen viritystaajuus on 189 Hz. Paristoa ohjaava loistehosäädin on Nokian Capacitors:n NC-12. Tavoitetehtokerroin  $\cos \varphi$  on säädetty 0,9:ään. Pariston loistehosäädin laskee algoritmin avulla, mitkä portaat tulee kytkeä verkkoon, jotta tavoitetehtokerroin saavutettaisiin.

Estokelapariston loistehosäädin on aseteltu käyttöönoton yhteydessä. Säätimen induktiiviset ja kapasitiiviset havahtumisrajat on aseteltu symmetrisesti  $\pm 0.140$ . Säätimen käyttämä ohjelma valitaan pariston porrasssekvenssin mukaisesti. Säätimessä on käytössä Optimal-ohjelma, mikä pyrkii saavuttamaan tavoite  $\cos \varphi$ :n mahdollisimman nopeasti. Ohjelma pyrkii suorittamaan kompensoinnin hyödyntämällä ensin mahdollisimman suurta porrasta tilanteen mukaan ja hienosäätää kytkemällä pienempiä portaita. Tämä mahdollistaa pariston nopean reagoinnin nopeasti tapahtuviin kompensointitilanteiden muutoksiin. Vastavuoroisesti säätimen Normal-ohjelma pyrkisi saavuttamaan tavoite  $\cos \varphi$ :n aloittamalla mahdollisimman pienestä portaasta kompensointitarpeen muuttuessa. Optimal ja Normal -ohjelmien lisäksi säätimessä on vaihtoehtoina Stack, Circular 1:1:1 ja Circular 1:2:2 -ohjelmat. Kuitenkin vain Optimal-ohjelma soveltuu tarkasteltavan pariston porrasssekvenssille. /7/



**Kuva 9.** Estokelapariston kilpiarvot.

### 3.2 Mittauskohteet

Mittauksia oli suoritettu aiemmin jakokeskuksissa 103 sekä 105. Mittaus 4.10 – 15.10.2018 oli suoritettu hitsaamon jakokeskuksessa JK-105. Mittaus 28.11. – 10.12.2018 suoritettiin jakokeskukseen JK-103.

Jakokeskuksen JK-103 kuormana on kolme eri hitsausrobotia, kahdeksan muuta hitsauslaitetta, sekä yksi kuljetinrata. Keskuksen sulakkeen koko on 400 A. Myös jakokeskuksen JK 105 sulakkeen koko on 400 A ja sen kuormana on kuusi särmäyskonetta, viisi metallin leikkauskonetta sekä 3D-laserleikkuri.

Tätä työtä varten suoritettiin uudet mittaukset 15.10. – 23.10.2019 jakokeskuksessa JK-103 ja 25.10. – 2.11.2019 jakokeskuksessa JK-105. Kuvassa 10 on esitetty esimerkkutilanne mittausten suorittamisesta. Jännitteen mittaus tapahtui vaiheisiin kiinnitettyjen hauenleukojen avulla, jotka näkyvät kuvassa punaisina johtoina.

Virtamittaus tapahtui kuvassa näkyvien sinisten Hall-anturien avulla, jotka voitiin helposti kiertää jokaisen vaiheen ympärille. Mittari jätettiin sähkötilaan noin viikoksi tekemään mittaukset, minkä jälkeen mittausdata saatettiin ottaa talteen mittarista tarkastelua varten.



**Kuva 10.** Esimerkkimittaustilanne JK-105.

## 4 MITTAUKSET

### 4.1 Mittalaite

Mittauksissa käytettiin Metrel MI-2592 PowerQ4-energia-analysointia. Mittari on IEC-standardien 61557-12 sekä 61000-4-30 mukainen. Mittari on kolmivaiheverkon tarkasteluun, analysointiin ja vianetsintään suunniteltu kädessä pidettävä analysointilaite. Analysointilaite voi tallentaa 509 eri sähkön laadullista parametria mitattavasta kohteesta. MI-2592:ssä on neljä kanavaa, joilla voi mitata samanaikaisesti virtaa ja jännitettä. Analysointilaite voi mitata virran ja jännitteen TRMS:n, eli true root mean square-arvon. Neliöllinen keskiarvo, eli RMS, tarkoittaa vaihtovirran aaltomuodosta keskiarvon laskemista ja muuntamista vastaavaksi tasavirta-arvoksi. Vaihtovirran aaltomuodosta laskettu keskiarvo ei ole täsmällinen, ellei aaltomuoto ole täydellisen sinimuotoinen. True-RMS-mittari kykenee mittaamaan täsmällisesti RMS-arvon puhtaasta sinimuotoisesta vaihtovirrasta sekä vääristyneistä aaltomuodoista. True-RMS-mittari mittaa vaihtovirran käyrän hetkellisen arvon neliön, mistä se laskee keskiarvon ja laskee neliöjuuren tästä keskiarvosta. Liitteessä 5 on analysointilaitteen ominaisuuksia esittelevä datalehti, mistä löytyy luettelo sen ominaisuuksista sekä teknisistä tiedoista. /5/

Mittaustulosten tarkasteluun käytettiin Metrel Powerview v3-ohjelmaa, joka ryhmittelee mittaustulokset selkeään ja helposti luettavaan luetteluun. Mittaustulosten tarkastelu Powerview-ohjelmassa onnistuu klikkaamalla haluttua suuretta, jolloin ohjelma piirtää kuvaajan arvon muutoksista ajan funktiona sekä taulukon jokaisesta mitatusta arvosta. Myös useamman mittaustuloksen yhtäaikainen tarkastelu onnistuu. Kaavioissa vaiheen L1 kuvaaja esitetään sinisenä, L2-vaiheen kuvaaja punaisena ja L3-vaiheen kuvaaja vihreänä. Taulukon voi kopioida suoraan taulukkolaskentaohjelmaan, kuten Microsoft Exceliin, joka helpottaa merkittävästi datan tarkempaa analysointia.



## 4.2 Mittaustulokset

Kohteeseen oli tehty mittauksia jo edeltävänä vuotena 2018, joiden tuloksia saatoin tarkastella ennen omien mittausteni aloittamista. Aikaisempien mittausten tulosten tarkemmat tarkastelut ovat liitteissä yksi ja kaksi. Ensimmäinen mittaus JK-105:ssa oli suoritettu 4.10 – 15.10.2018. Jatkomittaukset suoritettiin samana vuonna 20.11 – 28.11 ja 28.11 – 10.12. jakokeskuksessa JK-103. Tätä työtä varten tehdyt mittaukset suoritettiin 15.10. - 23.10.2019 jakokeskuksessa JK-103 ja jakokeskus JK-105 hitsaamon mittaukset suoritettiin 25.10. – 2.11.2019. Mittausjaksojen kestoksi asetettiin 8 vuorokautta, jotta saataisiin varmuudella kokonainen työviikko mitattua tarkasteltavaksi. Tämän työn yhteydessä tehtyjen mittausten tarkemmat tarkastelut JK-103:lle löytyvät liitteestä 3 ja JK-105 tarkastelut liitteestä 4. Tässä työssä keskityn tarkastelemaan näiden kahden mittaussarjan tuloksia. Seuraavissa kappaleissa keskityn tarkastelemaan tuloksia vain merkittävimpien tulosten kannalta. Mittaustulosten pidemmät tarkastelut löytyvät edellä mainituista liitteistä.

## 4.3 Mittauksen 15.10. – 23.10.2019 tulokset, JK-103

Keskuksen JK-103 jännitteen taso oli pysynyt samoilla tasoilla aikaisemman mittauksen kanssa. Jännite oli ehkä hieman koholla, mutta kaikki vaiheet olivat tasaisesti kuormitettuja, eikä jännitteen taso ylittänyt standardin SFS-EN-50160 asettamia  $\pm 10\%$  nimellisjännitteen muutoksen raja-arvoja.

Nollajohdossa esiintyy kaiken aikaa noin 50 V jännite, sekä sen virta vaihtelee kulutuksen mukaan. Arkipäivinä työaikaan nollajohdon virta vaihtelee noin 20 ja 30 A välillä. Kaapelit kestävät ongelmitta näin pienen kuormituksen. Kuitenkin nollajohdossa ei saisi esiintyä kuormitusta, sillä se saattaa aiheuttaa ongelmia. Nollajohdossa kulkeva virta osoittautui olevan pääasiassa kolmannen yliaallon aiheuttamaa. Pelkästään virran kolmannen yliaallon osuus oli noin 20 A tasolla työaikaan arkipäivinä. Noin 50 V nollajohdon jännitteestä huolimatta, vaiheilla ei ole havaittavissa huomattavaa epäsymmetriaa. Nollajohdon jännitteessä kolmannen yliaallon osuus vaihteli noin 20 V tasolla.

Myös virran kymmenen minuutin keskiarvojen taso pysyi kohtuullisella tasolla koko mittauksen ajan, mutta korkeimmilla kuormituspiikeillä virran hetkellisarvon taso saattoi nousta jopa lähes 100 ampeerin verran.

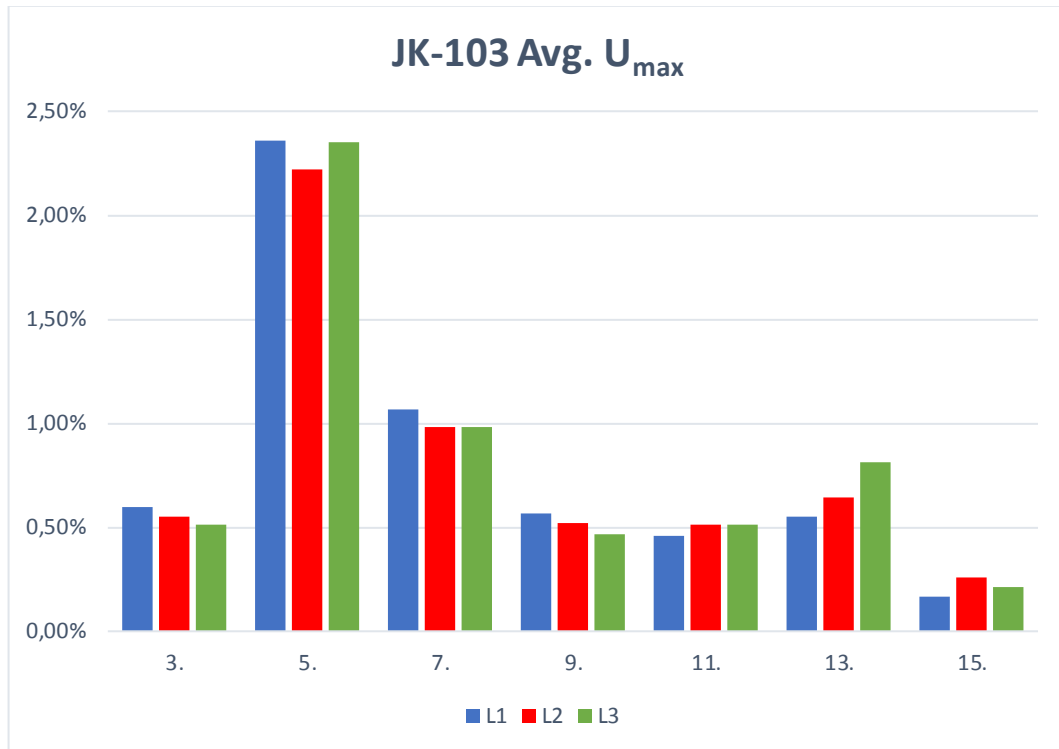
Perusaallon taajuus oli pysynyt standardin sallimissa rajoissa. Koska taajuus määräytyy kantaverkon taajuuden mukaan, ei tavallinen sähkökäyttäjä siihen kykene vaikuttamaan omalla laitekannallaan. Myös välkyntä oli pysynyt samalla tasolla aikaisempaan mittaukseen nähden, ja oli yhä standardin sallimissa rajoissa.

Tehojen suhteen tilanne JK-103:ssa sen sijaan osoittautui ongelmalliseksi. Erityisesti loistehon osuus oli merkittävä. Aikaisemmassakin mittauksessa kapasitiivisen loistehon kulutus oli jakautunut selkeisiin kulutuspiikkeihin viikonlopulle. Korkein piikki oli 9,75 kvar suuruinen. Uusimmassa mittauksessa sen sijaan on selkeästi nähtävissä viisi erillistä kulutuspiikkiä, joista pienimmän korkein hetkellisarvo oli 2,13 kvar ja suurimman piikin korkein hetkellisarvo 17,85 kvar. Kapasitiivisen loistehon kulutuspiikit tapahtuivat öisin pätötehon kulutuksen ollessa vähäinen. Tämä käyttäytyminen viittaa loistehon kompensointilaitteiston automaattisen säädön ongelmiin, mikä johtaa ylikompensointiin. Kiinteällä kompensointiparistolla kapasitiivinen loisteho nousisi aina pätötehon kulutuksen laskiessa. Myös induktiivisen loistehon kulutus nousee ajoittain korkeaksi työpäivien aikana. Jotkin laitteet vaativat toimiakseen loistehoa, mutta liiallinen loisteho kuormittaa verkkoa tarpeettomasti. Korkeahkosta loistehon kulutuksesta johtuen, tehokerroin laskee toisinaan hyvinkin matalalle. Tehokertoimen kymmenen minuutin keskiarvot pysyvät hyväksyttävällä tasolla, mutta vaiheiden tehokertoimen hetkellisarvot voivat pudota jopa alle 0,4. Kuvassa 11 on esitettyä tehokerroin, kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon arvot ajan funktiona sekä tehokerroin.

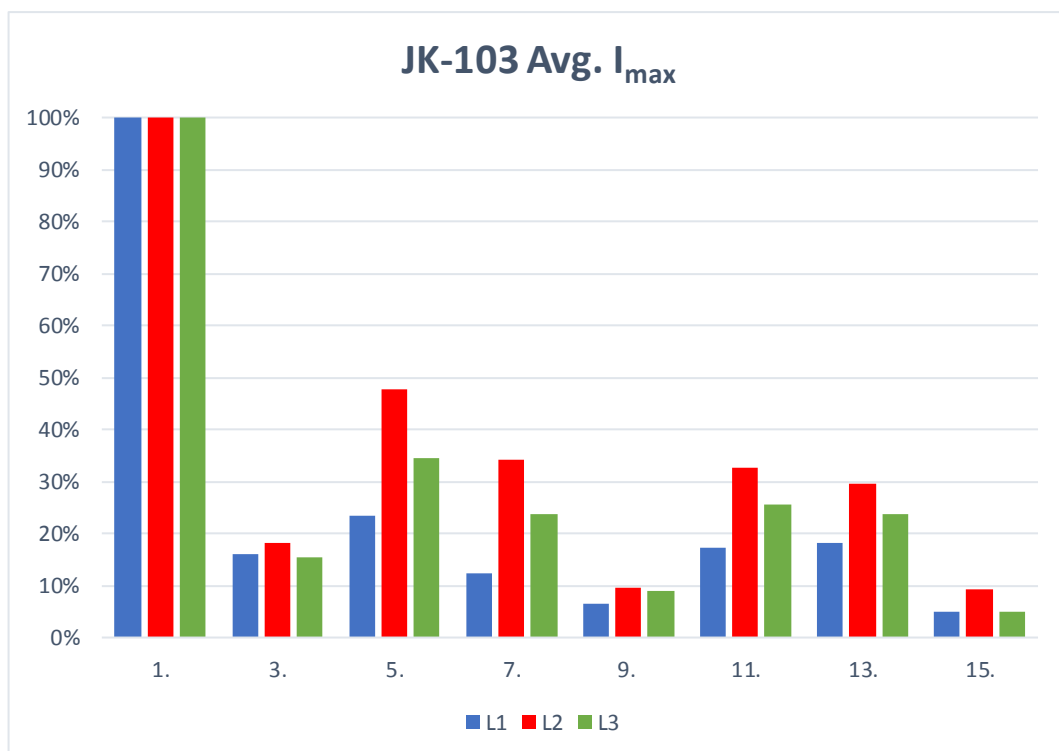


**Kuva 11.** JK-103:n kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon arvot, sekä tehokerroin PF ajan funktiona.

Korkeahkon loistehon tason lisäksi virran laatu on huono. Virrassa on paljon yliaaltoja, vaikka jännitteen yliaaltojen tasot pysyvät täysin standardin SFS-EN-50160 vaatimissa tasoissa. Kuvassa 12 on esitettyä JK-103:n jännitteen yliaaltopitoisuus prosentteina. Kuvassa 13 on esitetty JK-103:n vaihevirtojen kymmenen minuutin keskiarvojen yliaaltotaajuuksien huippuarvot perusaallon suhteen. Kuvasta huomataan, että vaihejohtimien virran yliaaltopitoisuus on korkea erityisesti vaiheella L2.



**Kuva 12.** JK-103:n jännitteen yliaaltopitoisuus spektri prosentteina.



**Kuva 13.** JK-103:n virran kymmenen minuutin keskiarvojen yliaaltopitoisuuksien huippuarvojen spektri prosentteina.

#### 4.4 Mittauksen 25.10. – 02.11.2019 tulokset, JK-105 hitsaamo

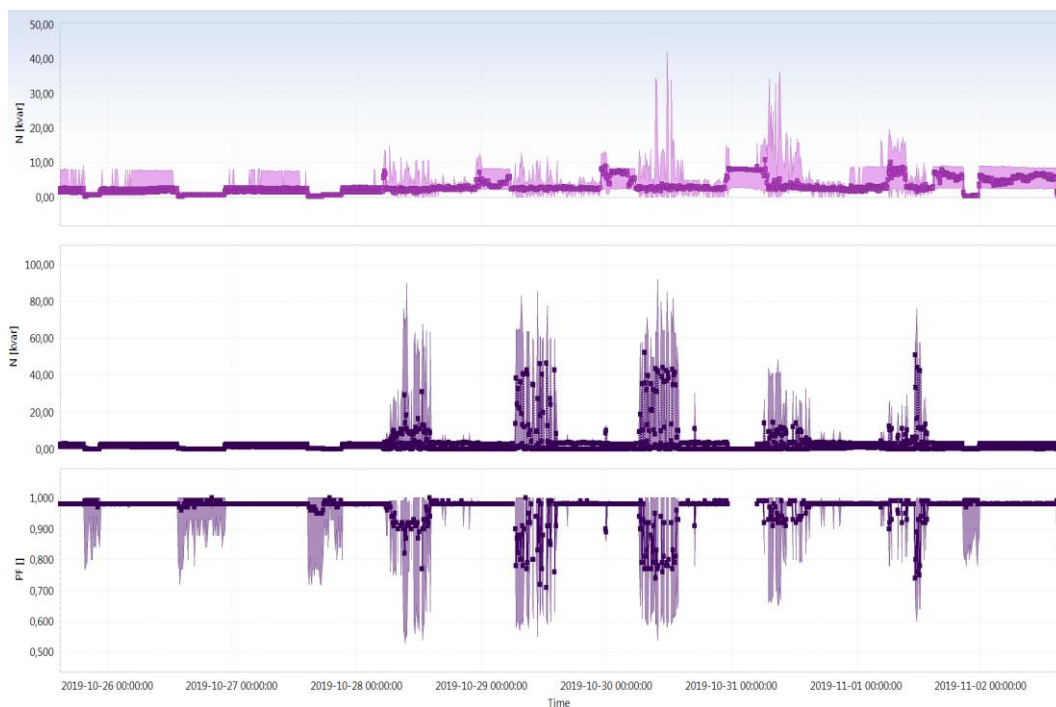
Keskuksen JK-105 jännitteen taso oli myös pysynyt samoilla tasoilla aikaisemman mittauksen kanssa, vaikkakin jännite oli hieman korkeammalla tasolla. Jännite oli hieman koholla, mutta jännitteen epäsymmetriaa ei ole havaittavissa. Jännitteen taso ei ylittänyt standardin SFS-EN-50160 asettamia  $\pm 10$  % nimellisjännitteen muutoksen raja-arvoja. Nollajohdon jännite oli jälleen noin 50 V tasolla koko mittauksen ajan ja jännitteessä oli jälleen merkittävä määrä kolmansia yliaaltoja, vaihdellen noin 18 ja 21 voltin välillä. Myöskään JK-105 hitsaamon vaihejännitteiden suhteen ei ollut havaittavissa vinokuormitusta. Vaihejännitteiden väliset erot olivat korkeintaan vain muutamien volttien tasoa.

Virran kymmenen minuutin keskiarvojen taso pysyi matalalla tasolla koko mittauksen ajan, mutta arkipäivinä työaikaan tapahtui huomattavia kuormituspiikkejä. Virran hetkellisärvot nousivat terävästi monta kertaa päivän aikana ja nousivat jopa yli 250 ampeeriin vaiheilla L1 ja L3. Vaiheen L2 korkein virran hetkellisärvö oli vain hieman yli 113 A. Virran kulutuksen osalta on siis havaittavissa vinokuormitusta. Nollajohtoa kuormittava virta vaihteli vaihejohtimien kuormitusmuutosten mukaisesti. Kymmenen minuutin keskiarvot olivat noin 5 – 6 A tasolla, mutta työpäivän aikana hetkellisärvot nousivat korkeimmillaan lähes 25 ampeeriin. Virran kulutuspiikkien tapahtuessa, myös kolmannen yliaallon osuus nollajohdon virrassa lisääntyi merkittävästi. Virran kolmansien yliaaltojen osuus oli noin 1,5 ampeerin tasolla, mutta kulutuspiikkien tapahtuessa, hetkellisärvot nousivat korkeimmillaan 7,3 ampeeriin.

Perusaallon taajuus oli pysynyt standardin sallimissa rajoissa. Välkynnän häiritsevyyssindeksi oli noussut aikeisempaan mittaukseen nähden, mutta oli pysynyt yhä standardin sallimissa rajoissa.

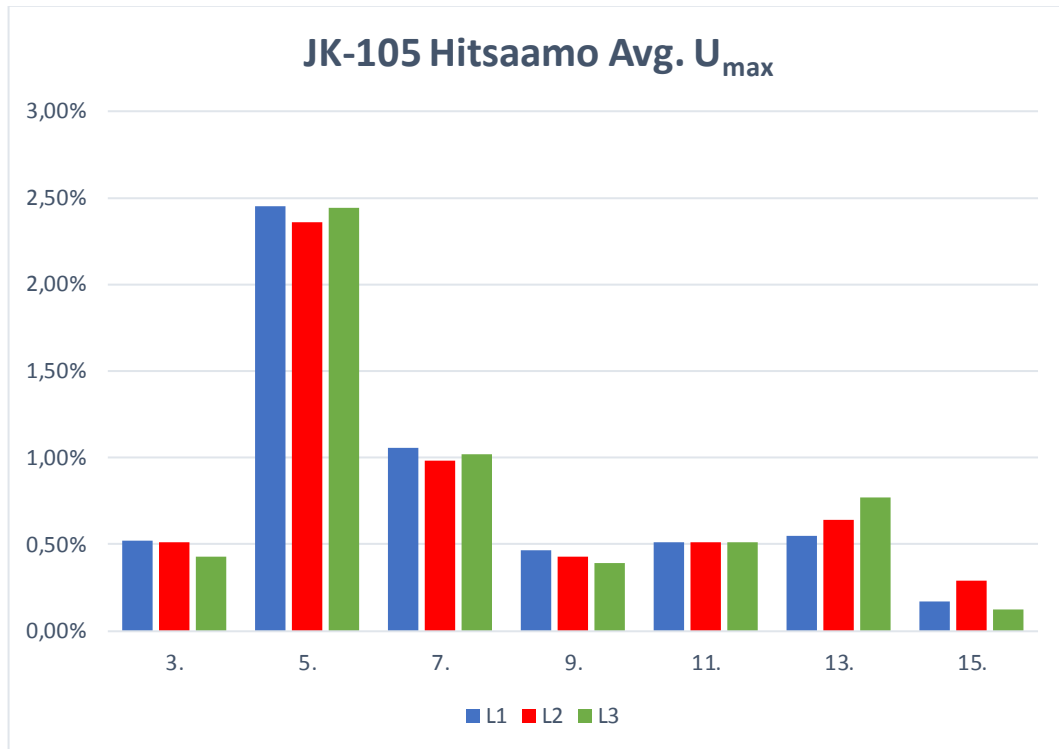
Tehojen osalta tilanne osoittautui ongelmalliseksi myös JK-105:ssä. Erityisesti loistehon osuus oli jälleen merkittävä. Aikaisemmassa mittauksessa loistehon kulutus kävi kapasitiivisen puolella vain yhden kerran koko mittausjakson aikana

ja tällöinkin piikki oli korkeimmillaankin vain 6,15 kvar. Uudessa mittauksessa sen sijaan, kapasitiivisen loistehon kulutus on jatkuvaa ja on päivittäin noin 10 kvar tasolla. Kulutuksessa oli myös muutama todella korkea piikki, joista korkein kävi jopa 41,97 kvar. Myös induktiivisen loistehon kulutus nousee merkittävästi työpäivien aikana. Korkein huippu oli jopa 91 kvar. Tehokerroin laskee arkipäivinä jopa 0,53. Viikonloppuisin tehokerroin on vain 0,72. Vaiheen 2 tehokerroin on alimmillaan 0,78:n, kun taas vaiheiden 1 ja 3 tehokertoimet putoavat ajoittain jopa 0,2:een. Kuvassa 14 on esitettyinä kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon arvot sekä tehokerroin ajan funktiona. Loistehon taso on siis jälleen ongelmallinen myös Jk-105 hitsaamossa. JK-105 hitsaamon kuormitus on hyvin voimakkaasti vaihtelevaa.

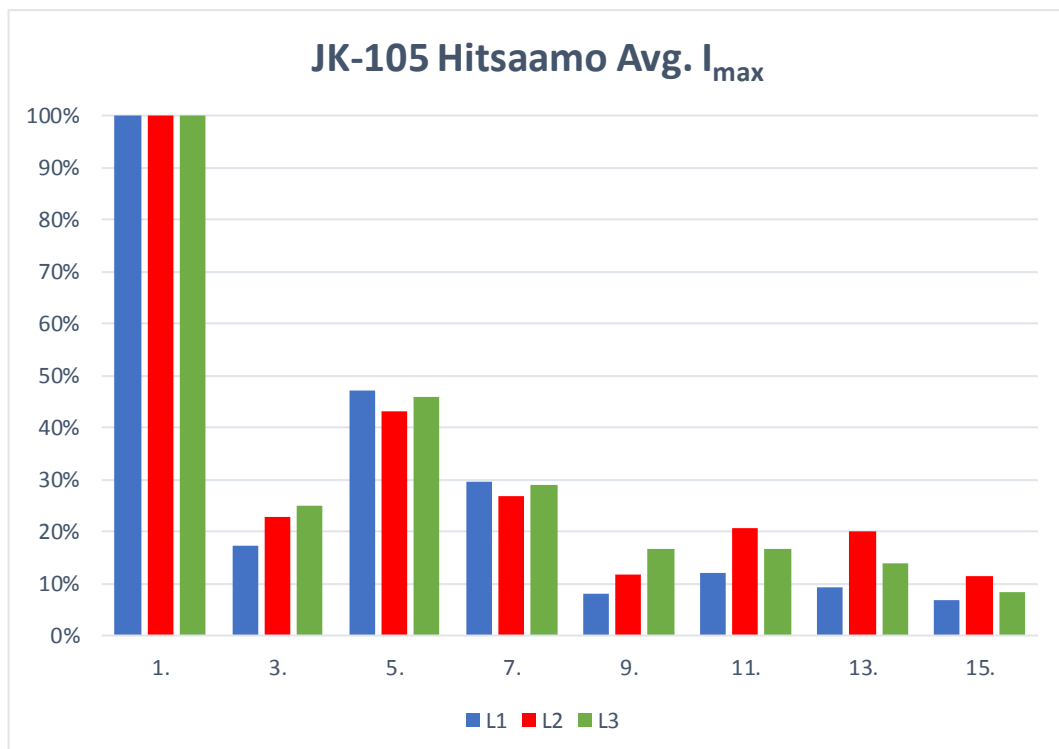


**Kuva 14.** JK-105 hitsaamon kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon arvot, sekä tehokerroin PF ajan funktiona.

Jännitteessä 5. yliaaltojen osuus on jälleen suurin, kuten kuvasta 15 huomataan. Kuten kuvasta 16 voidaan huomata, erityisesti 5. ja 7. yliaallon pitoisuus vaihejohtimien virrassa on korkea, mutta melko tasainen vaiheiden välillä.



**Kuva 15.** JK-105 hitsaamon jännitteen yliaaltopitoisuus spektri prosentteina.



**Kuva 16.** JK-105 hitsaamon virran kymmenen minuutin keskiarvojen yliaaltopitoisuuksien huippuarvojen spektri prosentteina.

## 5 KORJAUSTOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Ongelmana molemmissa mittauskohteissa on virran yliaallot sekä loistehon ylikompensointi. Mittausten pohjalta, JK-105 hitsaamossa oli havaittavissa virtojen vinokuormitusta. Lisäksi molemmissa mittauskohteissa nollajohdon jännite oli noin 50 V tasolla, mikä on potentiaalinen turvallisuus riski. Kolmannen yliaallon osuus nollajohdon virrassa ja jännitteessä oli merkittävä. Lisäksi huomioitavaa oli se, että pääkeskuksen virtamittarit näyttävät virheellisiä lukemia. Yksi yliaaltojen vaikutus on juuri mittarien virhenäyttämät. Mikäli pääkeskuksen mittarien virhenäyttämät ovat yliaaltojen aiheuttamia, eivätkä esimerkiksi vain viallisten mittarien toimintahäiriöitä, voi tämä vihjata yliaaltojen olevan ongelmallisella tasolla myös verkon muissa osissa.

### 5.1 Loistehon ylikompensointi jakokeskustasolla

Molemmissa mittauskohteissa oli havaittavissa selvää loistehon ylikompensointia. Kuormituksen pienentyessä iltaisin, loistehon kulutus oli kapasitiivista. Mikäli ylikompensointia on pääkeskustasolla ja loistehoa syötetään verkkoon, loistehon kompensointilaitteisto vaatii tarkempaa tarkastelua. Automaattisen estokelapariston loistehosäätimen tavoite  $\cos \varphi$ -arvossa sekä havahtumisrajoissa olisi esimerkiksi säätömahdollisuutta tarpeen vaatiessa.

NC-12 loistehonsäädin mahdollistaa jopa 12 portaan ohjaamisen. Mikäli pariston rakenne sallii, vaihtoehtona voisi olla myös pienempien kompensointiportaiden lisääminen nykyisten portaiden rinnalle. Lisäämällä paristoon portaita, saataisiin sen säätöihin lisää joustavuutta. Pienempien kompensointiportaiden lisäämisen avulla paristo voisi reagoida paremmin loistehon kulutuksen muutoksiin ja mahdollinen ylikompensointi vähenisi. Lisäportaiden avulla myös pariston kokonaiskompensointikyky kasvaisi. Tämä vaihtoehto saattaisi olla harkinnan arvoinen, mikäli kompensointitarve lisääntyy tulevaisuudessa esimerkiksi laitehankintojen myötä.



## 5.2 Yliaallot

Jännitteen THD-arvot pysyivät hyvin standardin SFS-EN-50160 sallimissa rajoissa, eivätkä ensi silmäyksellä siis vaatisi toimenpiteitä. Lisäksi yksittäisten yliaaltotaajuuksienkin tasot pysyivät standardin vaatimalla tasolla. Kuitenkin virta oli hyvin voimakkaasti säröytynyttä ja vaatii tarkastelua. Molemmissa mittauskohteissa viides ja seitsemäs yliaalto olivatkin merkittävimmät vaihejohtimilla. Nollajohtimen virrassa oli merkittävä määrä kolmansia yliaaltoja. Molemmissa jakokeskuksissa on siis mahdollisesti useita epälineaarisia kuormia, mitkä synnyttävät verkkoon yliaaltoja. Hitsauslaitteet, joita tehtaalla on useampia, on tunnettu esimerkki epälineaarisista kuormista. Yliaaltojen minimoiminen auttaisi myös nostamaan ajoittain hyvinkin matalalle putoavaa tehokerrointa.

Nollajohdon jatkuva kuormittuneisuus on potentiaalinen turvallisuusriski, sillä vikatilanteessa nollajohdossa kulkeva virta voi aiheuttaa ylikuumentumista ja jopa tulipalovaaran. Lisäksi nollajohtimen jännite oli alituisesti noin 50 V tasolla. Mahdolliset 50 V jännitemuutoksetkin vaihejohtimilla saattavat olla vahingollisia laitteille. Pienemmät yksivaiheiset laitteet eivät välttämättä kestä, tai toimi odotetusti mahdollisissa 50 voltin yli- tai alijännite tilanteessa. Samoin useampivaiheiset laitteet voivat kärsiä potentiaalisesta vinokuormitustilanteesta.

Merkittävä osa nollajohtimen kuormituksesta voitaisiin poistaa lisäämällä kolmannen yliaallon suodatin pääkeskustasolle. Pelkästään tämä ratkaisu jättäisi muut yliaallot nykyiselle tasolle, mutta nollajohtimen kuormitus vähenisi merkittävästi. Tämä johtuu kolmannen yliaallon erityispiirteestä. Se summautuu kaikista vaiheista saman vaiheisina nollajohtimeen, eikä siis kumoudu kuten muut yliaallot. Kolmannen yliaallon suodattaminen alentaisi myös nollajohtimen jännitteen tasoa merkittävästi ja näin minimoisi vaihejohtimilla myös mahdollisesti haitallisten jännitteenmuutosten riskiä.

Mikäli kolmannen yliaallon suodatin päädyttäisiin lisäämään, hyödyllinen vaihtoehto voisi olla myös harkita imupiirin lisäämistä pääkeskuksen rinnalle suodattamaan myös viidettä yliaaltoa. Kuten mittaustuloksista huomataan, viides yliaalto on myös merkittävä virran särön aiheuttaja vaihejohtimilla. Seitsemännen

yliaallon pitoisuus on toiseksi korkeimmalla tasolla. Suodattamalla siis vain viidettä yliaaltoa vaihejohtimilta, saavutettaisiin merkittävin vaikutus. Kaksoisviritetyt suodattimen lisääminen ei välttämättä toisi riittävää lisähyötyä, ottaen huomioon mahdollisesti kasvanut laitekustannus ensimmäisen kertaluokan suodattimeen nähden.

Keskuksen JK-103 tapauksessa, vaiheessa L2 on paljon enemmän yliaaltoja muihin vaiheisiin nähden. Tämä saattaa johtua siitä, että jokin laite tai laitteet aiheuttavat erityisen paljon yliaaltoja yhdelle vaiheelle. Tilanteesta voitaisiin saada varmuus suorittamalla lisämittauksia myös JK-103:n laiteille. On mahdollista, että laitteet aiheuttavat yliaaltoja erityisesti vain yhdelle vaiheelle. Näiden laitteiden vaihejärjestyksen ollessa sama, ne yhdessä aiheuttavat paljon yliaaltoja tälle yhdelle vaiheelle. Vaihtelemalla laitteiden vaihejärjestyksiä verkkoon kytkettäessä, yliaaltorasitusta voitaisiin jakaa eri vaiheiden kesken. Mikäli ongelma on useamman laitteen aiheuttama, näiden laitteiden kytkentöjä verkkoon voitaisiin muuttaa. Tämä ratkaisu ei yliaaltojen määrää vähentäisi, mutta yliaallot jakautuisivat tasaisemmin vaiheiden välille.

On myös mahdollista lisätä pääkeskuksen rinnalle aktiivinen yliaaltosuodatin. Tällä tavoin voitaisiin päästä eroon kaikista yliaalloista niin vaihe- kuin nollajohtimillakin. Lisäksi sen vaatima tilantarve olisi pienempi kuin passiivisten suodattimien, mutta tilanpuutteenkaan ei pitäisi olla tässä tapauksessa ongelma. Erilliselle imupiirille sekä kolmannen yliaallon suodattimelle ei olisi tarvetta, sillä aktiivinen yliaaltosuodatin voisi suodattaa kaikki harmoniset ja epäharmoniset yliaaltotaajuudet kerralla. Aktiivinen yliaaltosuodatin on kuitenkin kallis laiteratkaisu. Lisäksi aktiivisen yliaaltosuodattimen lisääminen pääkeskustasolle saattaisi olla jopa ylimitoitettu ratkaisu. Suurin vaikutus verkon sähkön laatuun voidaan saavuttaa jo pelkästään suodattamalla sekä kolmatta että viidettä yliaaltoa tai toista näistä yliaaltotaajuuksista. Muidenkin yliaaltotaajuuksien suodattamisen tuoma lisähyöty aktiivisuodattimella olisi vähäinen verrattuna jo edellä mainittujen yliaaltojen suodattamisen tuomiin vaikutuksiin.

## 6 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin Relicomp Oy:n kahden jakokeskuksen, JK-103 ja JK-105 hitsaamon sähkön laatua, työtä varten suoritettujen mittaustuloksien avulla. Työn eteneminen oli ajoittain hidasta, kun esimerkiksi sopivaa hetkeä mittausten suorittamiselle odotettiin. Työtä tehdessä sain kuitenkin erinomaista käytännön kokemusta sähkön laatumittausten tekemisestä, sekä sain tutustua teollisuuden sähköverkkoon käytännönläheisellä tavalla.

Mittausten tulosten perusteella voidaan sanoa, että verkon sähkön laadussa on havaittavissa ongelmia. Mittausten tuloksia tarkastellessa ongelmalliseksi osoittautuivat virran yliaaltopitoisuudet, sekä loistehon ajoittainen ylikompensointi. Lisämittaukset muissakin keskuksissa olisivat tarpeen, parhaan mahdollisen parannusehdotuksen tarjoamiseksi.

Lisämittauksilla voitaisiin varmistua, onko korkeahko yliaaltopitoisuus koko verkon laajuinen ongelma, vai onko se esimerkiksi rajoittunut vain tiettyihin keskuksiin. Mikäli yliaaltojen aiheuttamat ongelmat rajoittuvat vain muutamaan keskukseseen, vaihtoehtona voisi olla lisätä yliaaltosuodattimet näiden ongelmallisten ryhmäkeskusten rinnalle. Näin voitaisiin minimoida yliaaltojen kulkema matka verkossa. Mikäli kuitenkin yhtä selkeää yliaaltojen aiheuttajaa ei ole, ja virran yliaaltopitoisuus on korkea useammassa keskuksessa, paras vaihtoehto olisi suodattaa yliaallot pääkeskustasolla.

Molemmissa mittauskohteissa oli havaittavissa myös loistehon ylikompensointia. Tämä ei kuitenkaan välttämättä ole lopulta ongelma mahdollisten loistehotariffimaksujen näkökulmasta, mikäli muiden keskusten induktiivisen loistehon tarve kumoaa JK-103:n ja JK-105 hitsaamon kapasitiivisen loistehon tuotannon, jolloin pääkeskus ei tuota kapasitiivista loistehoa verkkoon. Tehdashallissa on esimerkiksi paljon valaisimia, mitkä tarvitsevat loistehoa toimiakseen. Loistehon siirtäminen kuormittaa kuitenkin verkkoa tarpeettomasti ja laskee sen siirtokapasiteettia. Lisämittauksilla muihinkin keskuksiin voitaisiin selvittää loistehon kulutuksen todellinen tilanne. Pääkeskustason loistehomittauksilla voitaisiin varmistua siitä, tuotetaanko loistehoa verkkoon päin.

Mikäli näin on, ja siitä aiheutuu lisäkustannuksia loistehomaksujen muodossa, olisi syytä tarkastella loistehon kompensointilaitteiston asetteluarvoja.

Sähkön laatumittauksia suoritetaan usein vasta ongelmien ilmetessä, esimerkiksi kun laitteet eivät toimi oikein. Sähkön laatuun liittyviä ongelmia voitaisiin kuitenkin vähentää merkittävästi säännöllisten laatumittausten avulla. Esimerkiksi jopa vuosittaisella tarkastuksella verkon tilasta saataisiin hyvä kuva. Joiltain yllättäviltä ongelmatilanteilta ja niiden aiheuttamilta mahdollisilta lisäkustannuksilta voitaisiin myös välttyä, kun verkon terveyttä tarkkaillaan. Sähkön laatumittaukset olisivat erityisen hyödyllisiä, kun verkkoon tehdään esimerkiksi laitehankintoja tai muita muutostöitä. Mahdollisesti ongelmallisiin sähkön laadun muutoksiin voitaisiin puuttua jo hyvissä ajoin. Lisäksi mahdollisten laitehankintojen yhteydessä voitaisiin paremmin arvioida laitteiden vaikutukset ja toimivuus verkossa.

Relicomp Oy:n tapauksessa erityisesti yliaaltopitoisuutta tulisi pitää silmällä. Mikäli yliaaltojen pitoisuudet virrassa tai jännitteessä nousevat entisestään, voi niistä muodostua merkittäviä lisäkustannuksia laitteiden virhetoimintojen tai jopa laiterikkojen myötä. Näitä riskejä voitaisiin vähentää investoimalla yliaaltosuodatuslaitteistoon. Mikäli yliaaltosuodattimen hankintaan ei päädytä, verkon yliaaltotilanteen tehostettu tarkkailu olisi suositeltavaa. Vuosittainen tai jopa puolivuositainen yliaaltopitoisuuksien mittaaminen verkon yliaaltopitoisimmissa keskuksissa, voisi olla harkinnan arvoinen vaihtoehto tilanteen kehittymisen seuraamiseksi.

## LÄHTEET

/1/ Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. 2016. Yliaalto-opus. Viitattu 18.4.2019 <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

/2/ ABB:n TTT-käsikirja 2000-07 Viitattu 18.4.2109

/3/ Leonardo Energy Power Quality Tutorial. Viitattu 20.4.2019 <https://www.leonardo-energy.org/resources/435/power-quality-tutorial-58111b0256edb>

/4/ Suomen standardisoimisliitto SFS. SESKO Ry. 2010. SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet.

/5/ Fluke Corporation. Mitä true-RMS tarkoittaa? Viitattu 20.5.2019 <https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/parhaat-kaytannot/mittauksen-perusteet/sahko/mita-true-rms-tarκοittaa>

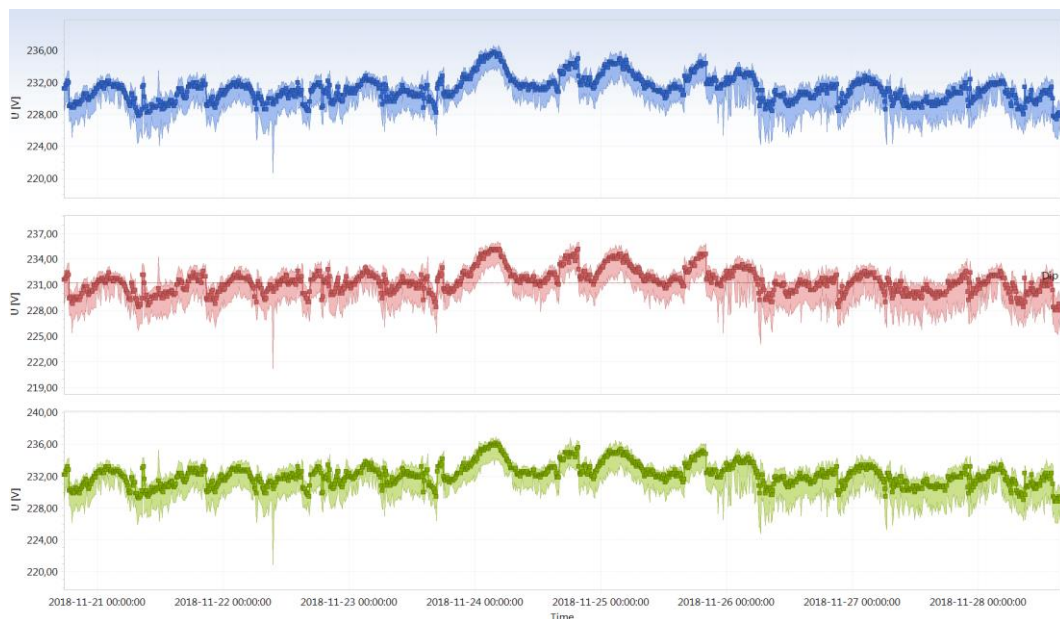
/6/ IEEE Standards Association. IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems

/7/ Nokian Capacitors Pienjännitetuotteiden tuote-opas. Viitattu 14.2.2020 <https://www.sahkonumerot.fi/5704584/doc/brochure/>

## LIITE 1

**MITTAUKSEN 20.11. – 28.11.2018 TULOKSET****Jännitteet**

Mittaustulokset on otettu kymmenen minuutin mittausjaksojen keskiarvoista. Mittauksen aikana 95% jännitetason tehollisarvojen kymmenen minuutin jaksojen keskiarvojen vaihteluista eivät saisi ylittää  $\pm 10\%$  muutoksen nimellisjännitteestä, eli 207 – 253 V. Koko mittauksen ajan jännitteen olisi pysyttävä 195.5 voltin ja 253 voltin välillä. Mittauksen aikana L1-vaiheen jännite oli korkeimmillaan 235.8 V ja matalimmillaan 227.4 V. Korkein hetkellisarvo oli 236,6 V ja matalin hetkellisarvo 220,7 V. Vaiheen L2 jännitteen keskiarvojen huippuarvo oli 235.2 V ja minimiarvo 228 V. Korkein hetkellisarvo oli 236,1 V ja matalin hetkellisarvo 221,2 V. Vaiheen L3 jännitteen huippuarvo oli 236.2 V ja minimiarvo 228.8 V. Hetkellisarvoista korkein oli 235,7 V ja matalin 220,9 V. Jännitetason vaihtelut ovat siis hyvin standardin SFS-EN-50160 määrittämien raja-arvojen sisäpuolella. Jännitteiden arvot ajan funktiona näkyvät kuvassa 17. Vaiheen L1 arvot on piirretty sinisellä, vaiheen L2 arvot punaisella ja L3 vaiheen arvot vihreällä.



**Kuva 17.** Vaihejohtimien jännitteen arvot ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.

## Virrat

Poimin mittaustuloksesta muutamia virran arvoja, jotka näkyvät taulukossa 4. Taulukossa on näkyvissä virtojen L1 – L3 ja LN hetkelliset minimi- ja huippuarvot. Lisäksi taulukossa on vaiheiden kymmenen minuutin keskiarvojen huippu- ja minimiarvot. Koko mittauksen virtamittausten trendikaaviot ovat nähtävissä kuvassa 18, missä L1-vaiheen virta on sininen, L2-vaihe punainen, L3-vaihe vihreä ja nollajohto vaalean sinisenä. Vaiheiden L1 – L3 kymmenen minuutin keskiarvojen virrat vaihtelivat noin 30 ampeerin ja 300 ampeerin välillä. Virran hetkellisarvot olivat jopa kuitenkin L1-vaiheella 542.91 A, L2-vaiheella 564.15 A ja L3-vaiheella 558.78 A. Virran arvoissa on nähtävissä suurta vaihtelua, sillä virran suuruus on riippuvainen kuormitustilanteesta. Korkeimmillaan virrat olivatkin arkipäivinä ja matalimmillaan ne olivat lauantaina ja sunnuntaina. Myös nollajohdin on hieman kuormitettuna, tämä voi johtua kuormituksen epäsymmetriasta tai kolmannesta yliaallosta ja sen kerrannaisista. Kymmenen minuutin keskiarvojen arvot vaihtelivat 1.23 – 3.30 A välillä, mutta hetkelliset huippuarvot nollajohtimessa olivat jopa 10 ampeerin tasolla.

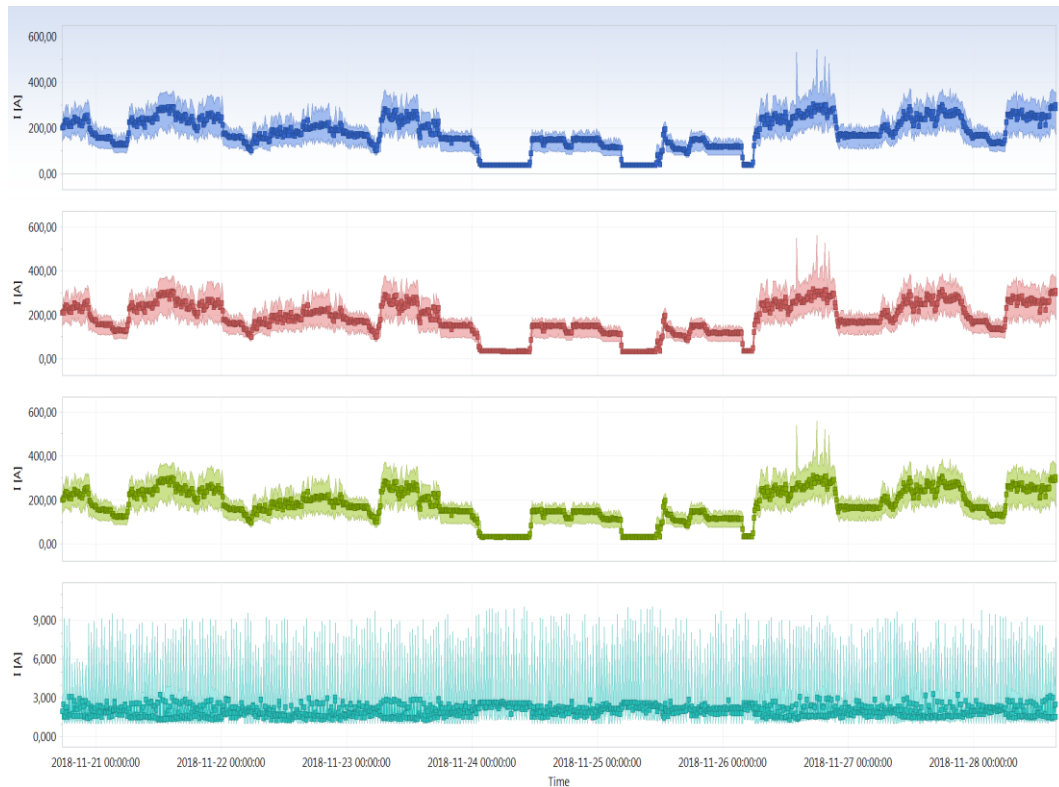
**Taulukko 4.** Virtamittauksen tuloksia 20.11. – 28.11.2018.

L1 I min	31,26 A
L1 I max	542,91 A
L1 I keskiarvo min	34,02 A
L1 I keskiarvo max	301,44 A

L3 I min	28,47 A
L3 I max	558,78 A
L3 I keskiarvo min	30,57 A
L3 I keskiarvo max	309,6 A

L2 I min	29,4 A
L2 I max	564,15 A
L2 I keskiarvo min	31,29 A
L1 I keskiarvo max	316,32 A

LN I min	1,02 A
LN I max	10,05 A
LN I keskiarvo min	1,23 A
LN I keskiarvo max	3,30 A

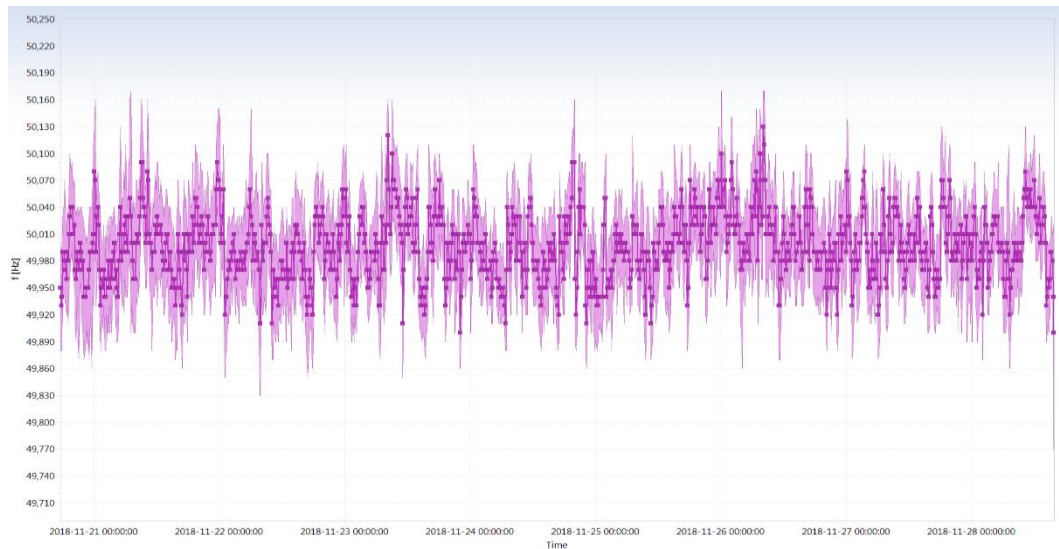


**Kuva 18.** Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.

### Taajuus

Standardin SFS-EN-50160 mukaan taajuuden on pysyttävä aina 47 Hz ja 52 Hz välillä ja 99,5 % vuodesta 49,5 – 50,5 Hz rajoissa. Mittausjakson aikana taajuus oli alimmillaan 49,77 Hz ja korkeimmillaan 50,17 Hz. Nämä arvot ovat helposti standardin minimivaatimuksen 47 – 52 Hz rajoissa. Taajuuden kymmenen minuutin keskiarvojen alin arvo oli 49,9 Hz ja keskiarvojen korkein arvo oli 50,13 Hz. Taajuus ajan funktiona näkyy kuvassa 19.

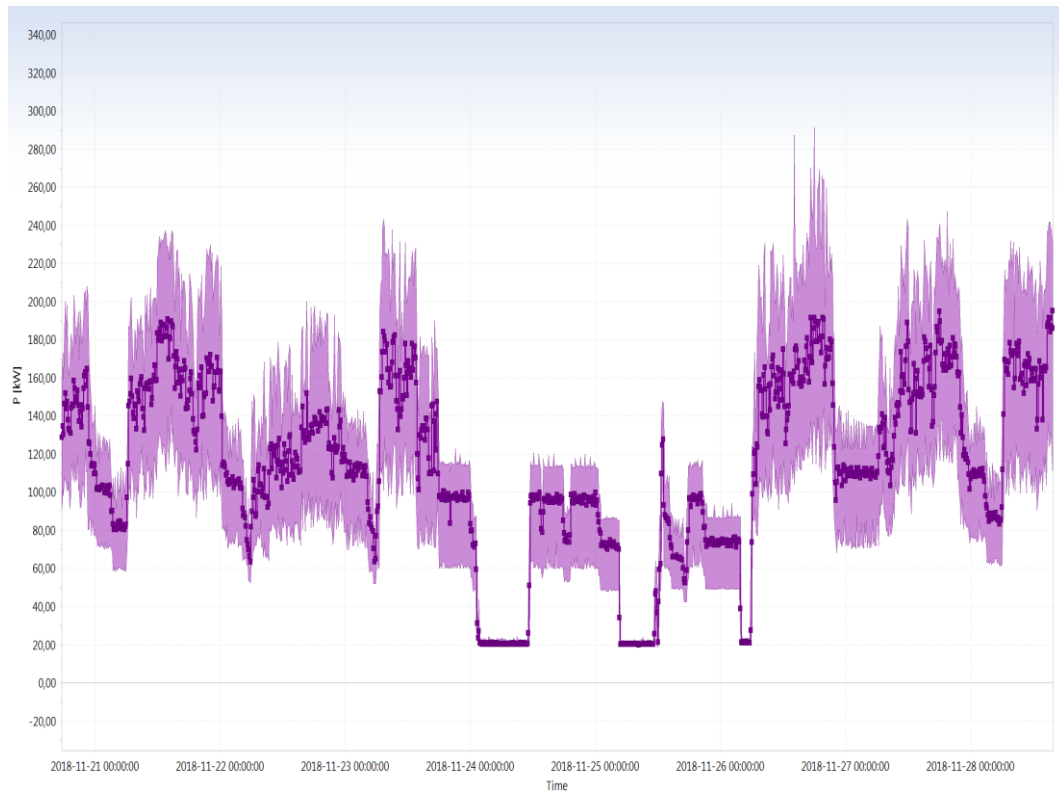




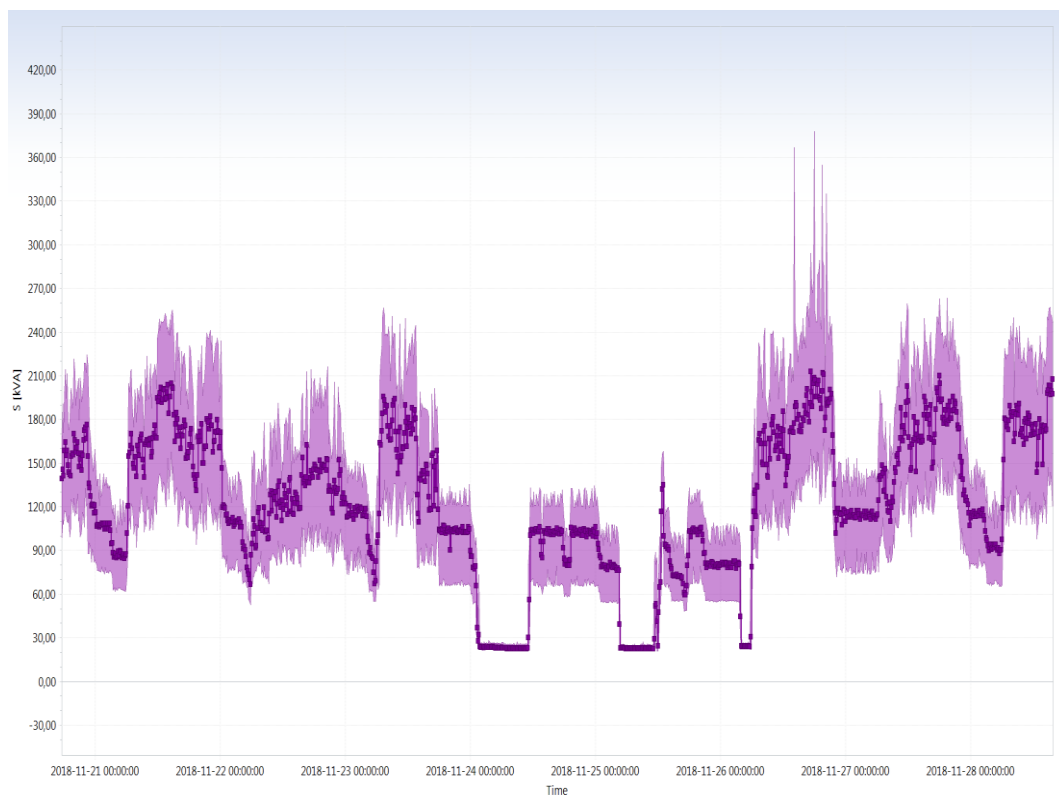
**Kuva 19.** Taajuus ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.

### **Tehot**

Relicomp Oy:n tehonkulutukset ajan funktiona ovat nähtävissä kuvissa 20 - 22. Pätötehon hetkellinen korkein huippuarvo oli 291,45 kW ja matalin hetkellinen minimiarvo 18,93 kW. Kymmenen minuutin keskiarvoista korkein arvo oli 195,15 kW ja matalin 19,98 kW. Näennäistehon suurin hetkellisarvo oli 378,06 kVA ja pienin hetkellisarvo 20,76 kVA. Kymmenen minuutin keskiarvoista suurin arvo oli 212,97 kVA ja pienin arvo 22,29 kVA. Induktiivisen loistehon kymmenen minuutin keskiarvoista suurin arvo oli 92,79 kvar ja pienin 9,78 kvar. Hetkellinen huippuarvo oli kuitenkin jopa 240,84 kvar ja hetkellinen minimiarvo 5,4 kvar. Kapasitiivinen loisteho oli nolla koko mittauksen ajan, lukuun ottamatta yhtä piikkiä torstai aamuna 22.11. kello 5:49 jolloin kapasitiivisen loistehon hetkellinen kulutus oli 6,15 kvar:a.



**Kuva 20.** Pätöteho ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.



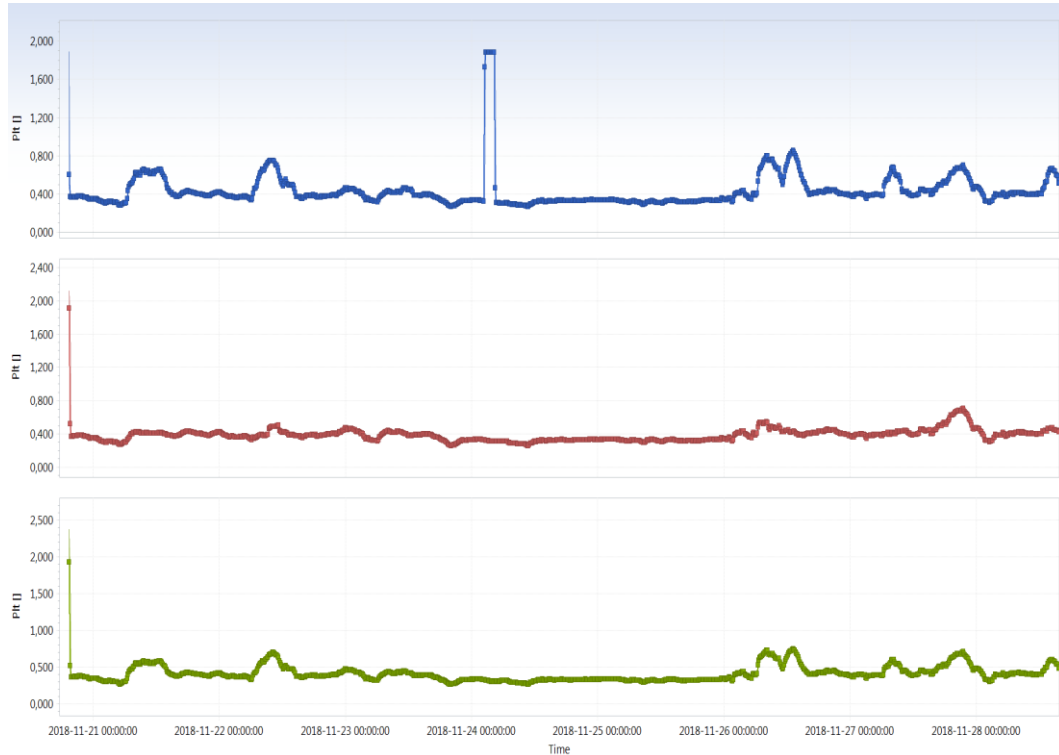
**Kuva 21.** Näennäisteho ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.



**Kuva 22.** Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 20.11. – 28.11.2018.

### Välkyntä

Pitkäkestoiset välkyntän häiritsevyysindeksit ajan funktiona näkyvät kuvassa 23. Standardissa SFS-EN-50160 määritellään, että pitkäkestoinen välkyntän häiritsevyysindeksi tulisi olla viikon mittaisen mittausjakson aikana 95% ajasta yksi tai alle. Vaiheen 1 pitkäaikaiset välkyntäindeksit olivat suurimpia. Yhdessä viikossa on 1008 kappaletta 10 minuutin mittausjaksoja, joista 12:a pitkäaikainen välkyntäindeksi oli 1 tai suurempi. Laskemalla siis  $12/1008$  tulokseksi saadaan noin 1,2 %, joka on standardin sallimassa 5 % rajoissa.

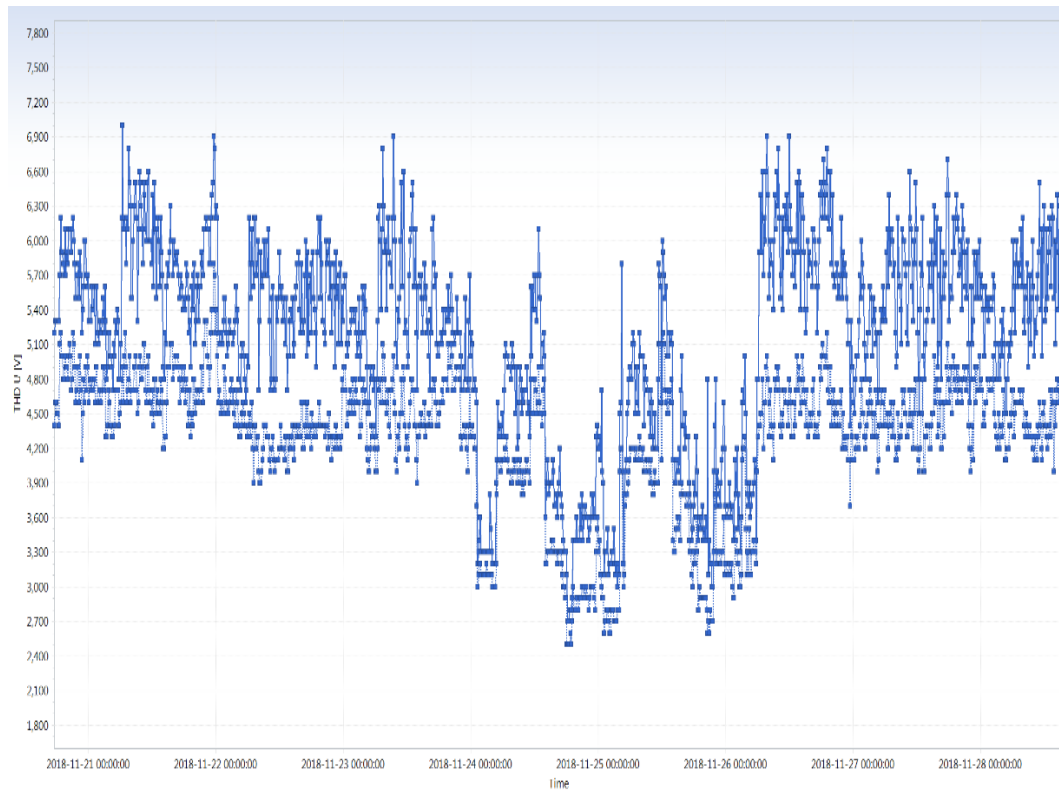


**Kuva 23.** Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyyssindeksi ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.

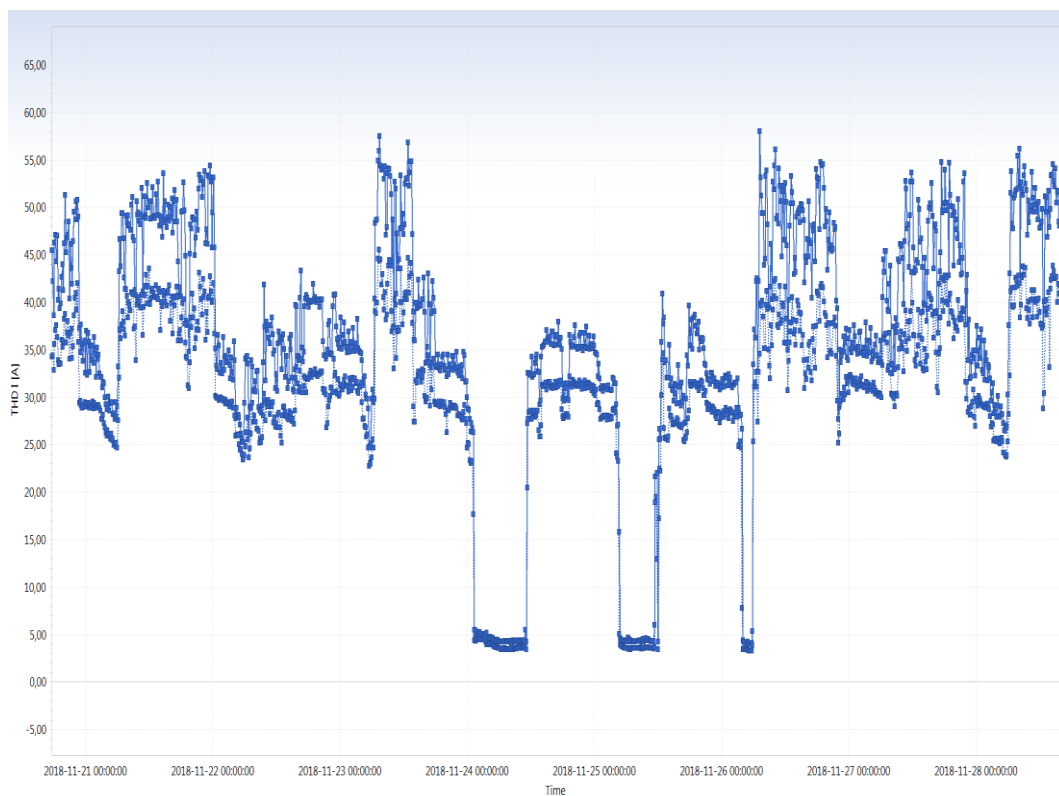
## THD

Harmoninen kokonaissärö eli THD ilmaisee perustaajuuden ylittävien taajuuksien kokonaismäärän. Metrel Powerview-ohjelma antaa THD-arvot jokaiselle vaiheelle jännitteenä ja virtana, joista saatoin laskea niiden osuudet prosentteina. Vaiheen L1 jännitteen korkein THD:n kymmenen minuutin keskiarvoista oli 2,51 %. Matalimmillaan jännitteen THD oli 1,07 %. Virran THD:n osuus oli korkeimmillaan jopa 29,64 % ja matalimmillaan 7,23 %. Vaiheen L2 jännitteen korkein THD:n arvo oli 2,64 % ja matalimmillaan 0,99 %. Virran THD vaiheella L2 oli korkeimmillaan 31,21 % ja matalimmillaankin se oli 7,92 %. Vaiheen L3 jännitteen THD oli 2,54 % ja matalimmillaan 1,19%. Virran korkein THD vaiheella L3 oli 31,14 % ja matalimmillaan 7,01 %. Nollajohdon jännite oli lähes koko mittauksen ajan nolla voltia yhtä kymmenen minuutin keskiarvoa lukuun ottamatta, jolloin sen jännite oli 1,9 V ja THD 31,58 %. Nollajohdon virran THD oli korkeimmillaan 61,70 % ja matalimmillaan 15,91 %.

Standardin SFS-EN-50160 mukaan jakelujännitteen kokonaissärökertoimen tulee olla 8 % tai pienempi. Jännitteen THD-arvot ovat siis hyvin standardin sallimissa rajoissa. Virran THD:lle ei ole standardin määrittämiä rajoja virran luonteesta johtuen. Huomioitavaa kuitenkin on yliaaltojen yhteisvaikutuksen aiheuttama suuri virran nousu. Jokaisella vaiheella virrasta noin 30 % oli yliaaltojen aiheuttamaa. Vaiheen 1 THD-arvot ovat nähtävissä voltteina ajan funktiona kuvassa 24 ja THD:t ampeereina ajan funktiona kuvassa 25. Koska vaiheiden THD kuvaajat ovat lähes identtiset, vain vaiheen 1 kuvaaja on esitettyinä.



**Kuva 24.** L1-vaiheen THD voltteina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.

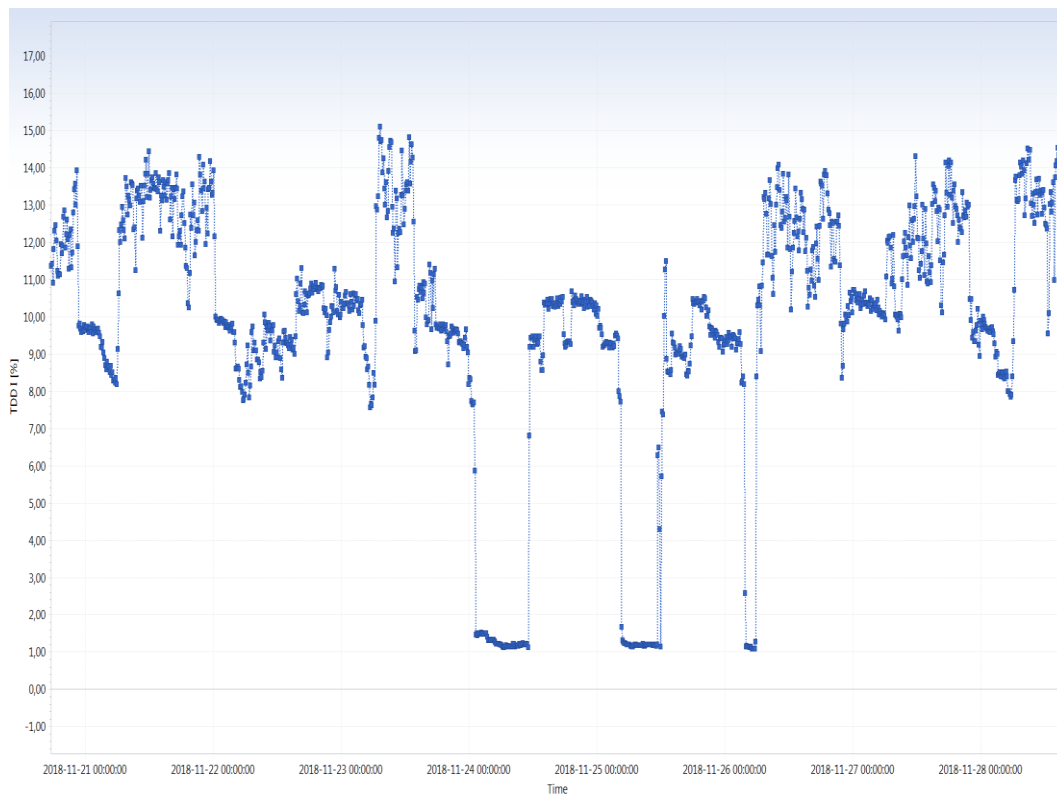


**Kuva 25.** L1-vaiheen THD ampeereina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.

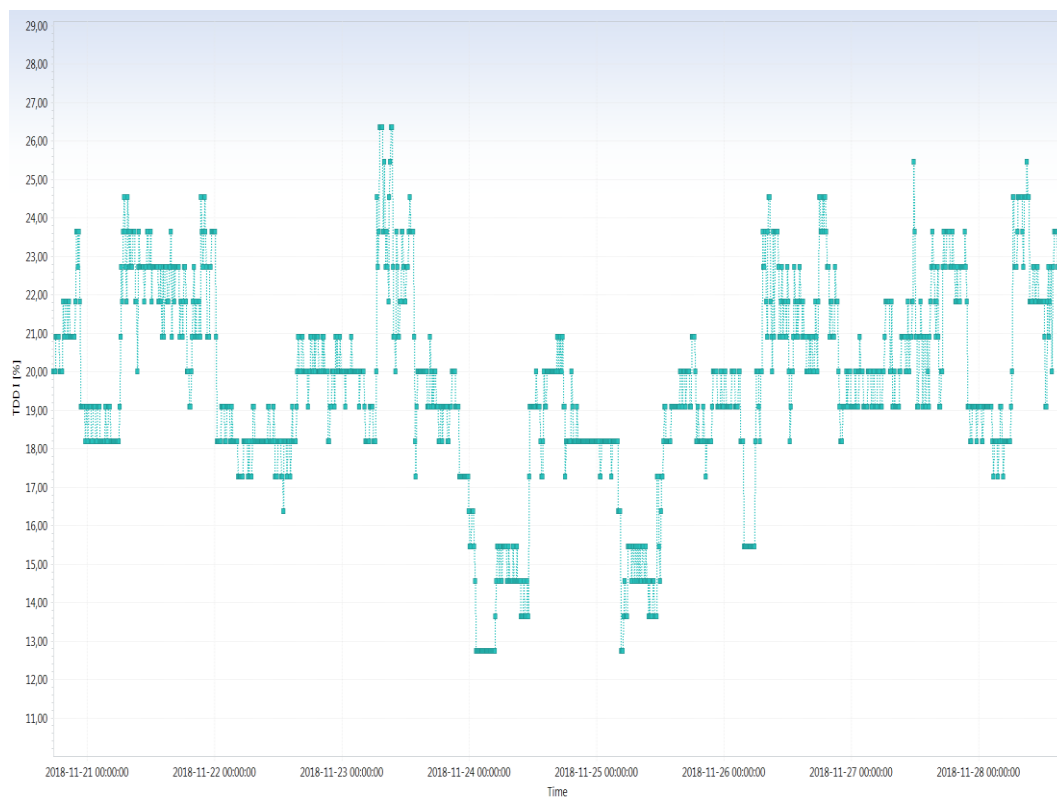
## **TDD**

Metrel MI-2592 PowerQ4 energia-analysaattori mittaa THD-arvon lisäksi myös TDD-arvon (total demand distortion), joka on kuin THD-arvo mutta suhteutettuna perusaallon sijaan korkeimpaan kuormitusvirran arvoon. TDD lasketaan yhtälön 3 mukaisesti.

TDD-arvot on laskettu kymmenen minuutin keskiarvoina. Korkeimmillaan TDD-arvo L1-vaiheella oli 15,11% ja matalimmillaan 1,07%. Vaiheella L2 TDD oli korkeimmillaan 15,2% ja matalimmillaan 1,11%. Vaiheen L3 suurin TDD-arvo oli 14,53% ja matalin oli 0,99%. Nollajohtimella TDD oli korkeimmillaan 26,36% ja matalimmillaan 12,73%. Vaihejohtimien TDD-arvojen kuvaajat ovat jälleen lähes identtiset, joten vain 1 vaiheen kuvaajan lisäksi nollajohdon TDD-arvon kuvaajat on esitetty kuvissa 26 ja 27.



**Kuva 26.** L1-vaiheen TDD prosentteina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.



**Kuva 27.** nollajohtimen TDD prosentteina ajan funktiona 20.11. – 28.11.2018.



## Yliaallot

Taulukossa 5 on nähtävissä vaiheen L1 yliaaltojen suuruudet jännitteen sekä virran arvoina perusaallosta viidenteentoista yliaaltoon saakka. Taulukossa 6 vaiheen L2 arvot ja L3-vaiheen arvot taulukossa 7. Taulukossa 8 on nollajohdon arvot. Taulukoissa on jokaisen vaiheen perusaallon ja yliaaltojen jännitteen ja virran hetkelliset huippuarvot, sekä korkeimmat ja matalimmat kymmenen minuutin keskiarvot. Taulukossa 9 on standardin SFS-EN-50160 mukainen vertailu yliaaltojen osuudesta perusaaltoon nähden prosentteina. Kun sen arvoja verrataan taulukon 1 arvoihin, on nähtävissä se, että harmonisten yliaaltojen osuudet viidenteentoista yliaaltoon saakka ovat standardin sallimissa rajoissa. Prosenttiosuudet on laskettu jakamalla yliaallon jännite perusaallon jännitteellä.

**Taulukko 5.** L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018.

L1 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	236,6	4,7	4,5	3,7	2,4	3,5	2,8	1,6
MAX avg	235,6	2,9	3,8	3,2	1,8	2,5	2	0,8
MIN avg	227,2	0,3	1,4	0,6	0,3	0,2	0,1	0

L1 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	541,05	12	53,37	17,37	2,97	16,5	5,52	2,55
MAX avg	299,04	5,91	41,82	13,32	1,95	13,11	3,78	1,08
MIN avg	33,69	0,33	1,98	0,6	0,15	0,81	0,6	0,12

**Taulukko 6.** L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018.

L2 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	236,1	3,7	4,5	3,8	2,6	4,6	4,2	1,9
MAX avg	235,2	2,3	3,6	3,1	1,9	3,2	3,1	0,8
MIN avg	228	0,3	1,2	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1

L2 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	560,97	35,55	55,89	18,96	13,59	17,82	6,48	4,95
MAX avg	313,92	5,01	44,28	15,03	2,19	13,86	4,62	1,23
MIN avg	30,93	0,57	2,13	0,3	0,12	0,99	0,6	0,12

**Taulukko 7.** L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018.

L3 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	236,8	4,3	4,5	4,1	2,3	3,9	3,6	1,3
MAX avg	236	2,5	3,7	3,4	1,3	2,8	2,7	0,7
MIN avg	228,6	0,1	1,5	0,8	0,2	0,3	0,1	0,1

L3 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	538,92	49,35	52,29	18,39	15,78	16,8	11,28	10,35
MAX avg	307,2	4,74	41,22	15,06	1,65	12,66	4,26	1,62
MIN avg	30,21	0,33	1,74	0,69	0,21	0,84	0,18	0,12

**Taulukko 8.** Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 20.11. – 28.11.2018.

LN U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	2	0,7	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0
MAX avg	1,7	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0
MIN avg	0	0	0	0	0	0	0	0

LN I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	9,96	0,75	0,75	0,54	0,33	0,63	0,3	0,18
MAX avg	3,12	0,33	0,42	0,36	0,18	0,39	0,18	0,09
MIN avg	0,93	0,15	0,09	0,09	0,09	0,09	0,06	0,06

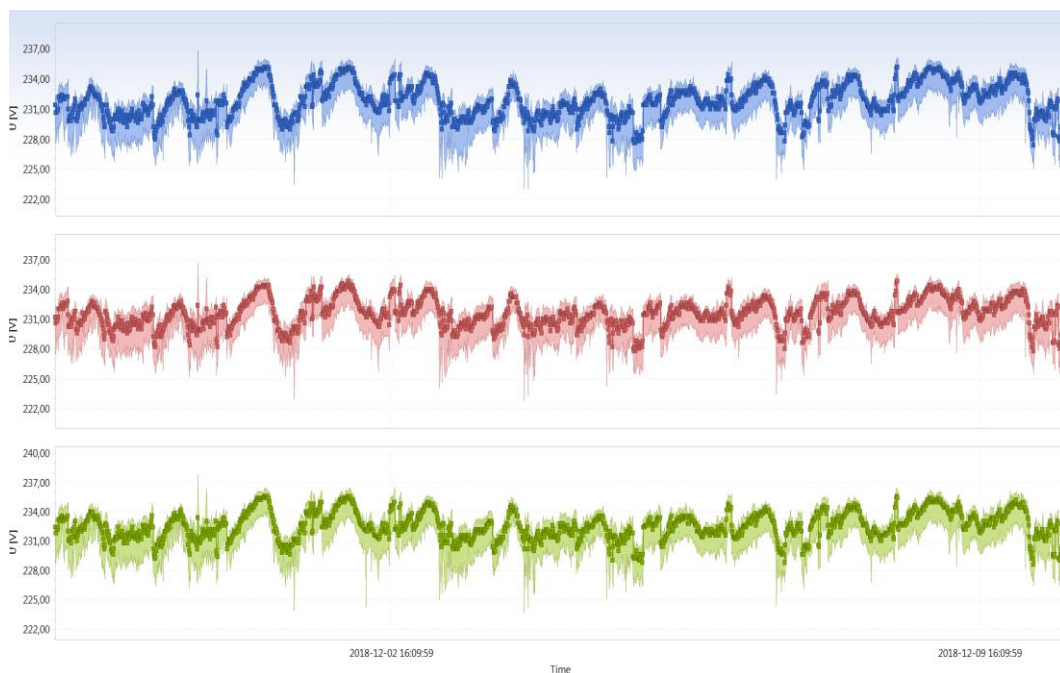
**Taulukko 9.** Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 20.11. – 28.11.2018.

Avg Umax [%]	3. [%]	5. [%]	7. [%]	9. [%]	11. [%]	13. [%]	15. [%]
L1	1,26 %	1,65 %	1,39 %	0,79 %	1,08 %	0,87 %	0,34 %
L2	0,99 %	1,56 %	1,35 %	0,83 %	1,39 %	1,34 %	0,34 %
L3	1,07 %	1,60 %	1,47 %	0,57 %	1,21 %	1,16 %	0,30 %
SFS-EN-50160	5,0 %	6,0 %	5,0 %	1,5 %	3,5 %	3,0 %	0,5 %

## LIITE 2

**MITTAUKSEN 28.11. – 10.12.2018 TULOKSET****Jännitteet**

Mittaustulokset on jälleen otettu kymmenen minuutin mittausjaksojen keskiarvoista. Koko mittauksen ajan jännitteen olisi pysyttävä 195.5 voltin ja 253 voltin välillä. Mittauksen aikana L1-vaiheen jännitteen keskiarvo oli korkeimmillaan 235,2 V ja matalimmillaan 227,4 V. Korkein hetkellisarvo oli 236,8 V ja matalin hetkellisarvo 223,1 V. Vaiheen L2 korkein jännitteen keskiarvo oli 234,8 V ja matalin 227,8 V. Korkein jännitteen hetkellisarvo oli 236,7 V ja matalin 222,8 V. Vaiheen L3 jännitteen huippuarvo oli 235,6 V ja minimiarvo 228,6 V. Korkein hetkellisarvo oli 237,8 V ja matalin hetkellisarvo oli 223,7 V. Jännitetason vaihtelut ovat siis hyvin standardin SFS-EN-50160 määrittämän  $\pm 10$  % nimellisjännitteen muutoksen, eli 207 – 253 V rajoissa. Mittauksen jännitteen arvot näkyvät kuvassa 28. Vaiheen L1 arvot ovat jälleen sinisellä, vaiheen L2 arvot punaisella ja L3-vaiheen arvot vihreällä.



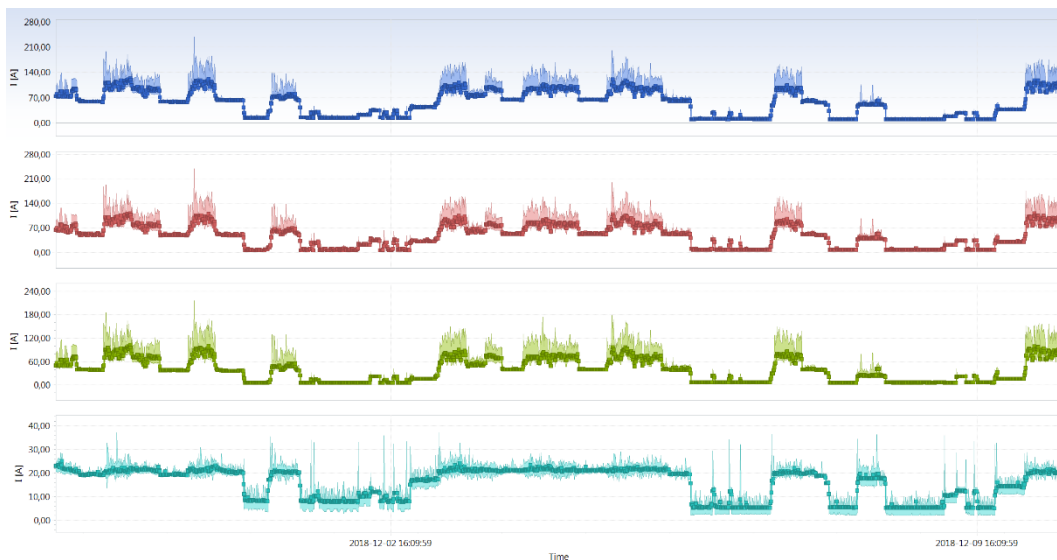
**Kuva 28.** Vaihejohtimien jännitteen arvot ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.

## Virrat

Taulukossa 10 on nähtävissä vaiheiden L1 – L3 ja LN hetkelliset minimiarvot ja huippuarvot, sekä vaiheiden kymmenen minuutin keskiarvojen huippu- ja minimiarvot. Koko mittauksen virtamittausten trendikaaviot ovat nähtävissä kuvassa 29, missä jälleen L1-vaiheen virta on sininen, L2-vaihe punainen, L3-vaihe vihreä ja nollajohdon virta vaalean sininen. Vaiheiden L1 – L3 kymmenen minuutin keskiarvojen virrat vaihtelivat noin 6 ampeerin ja 122 ampeerin välillä. Virran hetkellisarvot olivat L1-vaiheella 238,89 A, L2-vaiheella 239,1 A ja L3-vaiheella 216,27 A. Kymmenen minuutin keskiarvojen virran arvot vaihtelivat 5,07 – 25,08 A välillä ja hetkellinen virran huippuarvo nollajohtimessa oli 37,2 ampeeria.

**Taulukko 10.** Virtamittauksen tuloksia 28.11. – 10.12.2018.

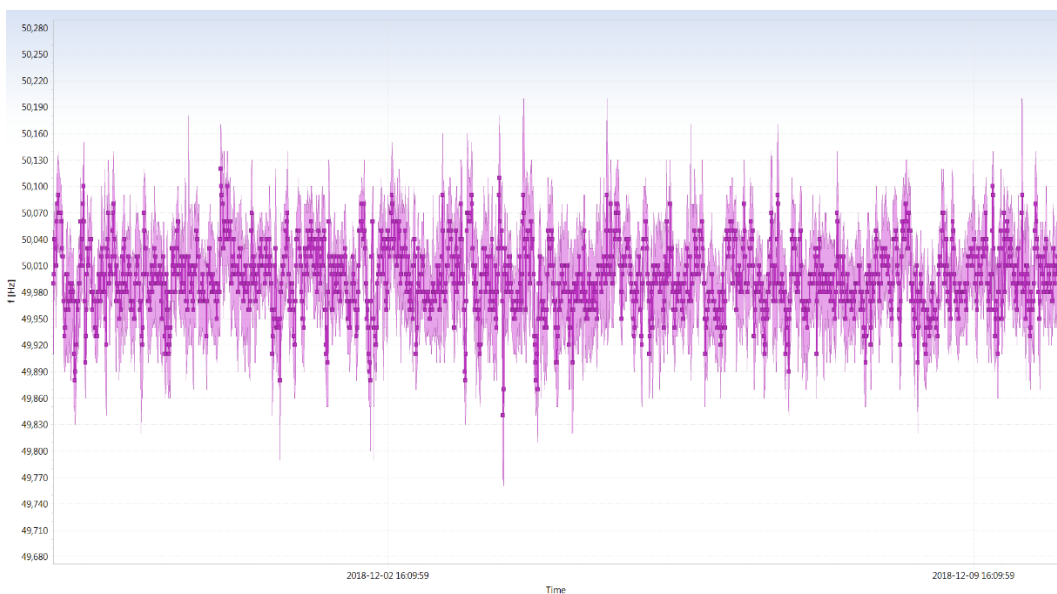
L1 I min	9,24 A	L3 I min	3,84 A
L1 I max	238,89 A	L3 I max	216,27 A
L1 I keskiarvo min	9,36 A	L3 I keskiarvo min	5,28 A
L1 I keskiarvo max	122,76 A	L3 I keskiarvo max	102,12 A
L2 I min	2,64 A	LN I min	2,01 A
L2 I max	239,1 A	LN I max	37,2 A
L2 I keskiarvo min	5,91 A	LN I keskiarvo min	5,07 A
L2 I keskiarvo max	111,24 A	LN I keskiarvo max	25,08 A



**Kuva 29.** Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.

### Taajuus

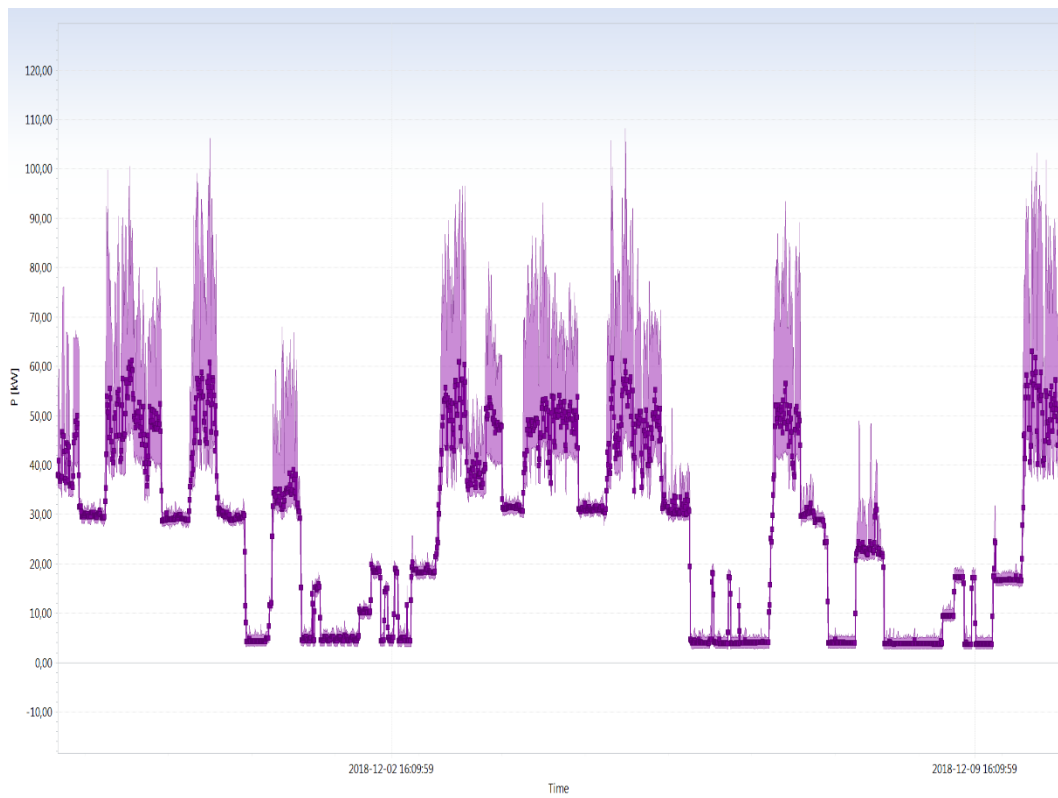
Taajuus oli 28.11 – 10.12 mittausjakson aikana alimmillaan 49,76 Hz ja korkeimmillaan 50,2 Hz, joka on jälleen standardin SFS-EN-50160 sallimissa rajoissa. Taajuuden kymmenen minuutin keskiarvojen alin arvo oli 49,84 Hz ja keskiarvojen korkein arvo oli 50,12 Hz. Taajuus ajan funktiona näkyy kuvassa 30.



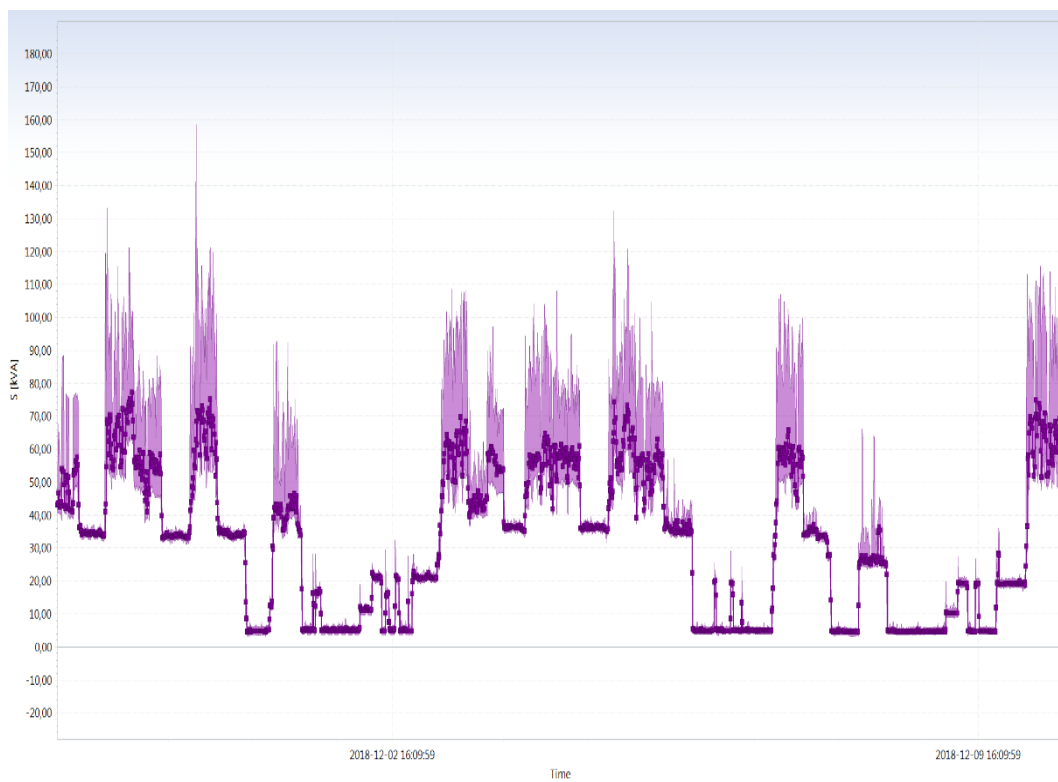
**Kuva 30.** Taajuus ajan funktiona 28.11- 10.12.2018.

## Tehot

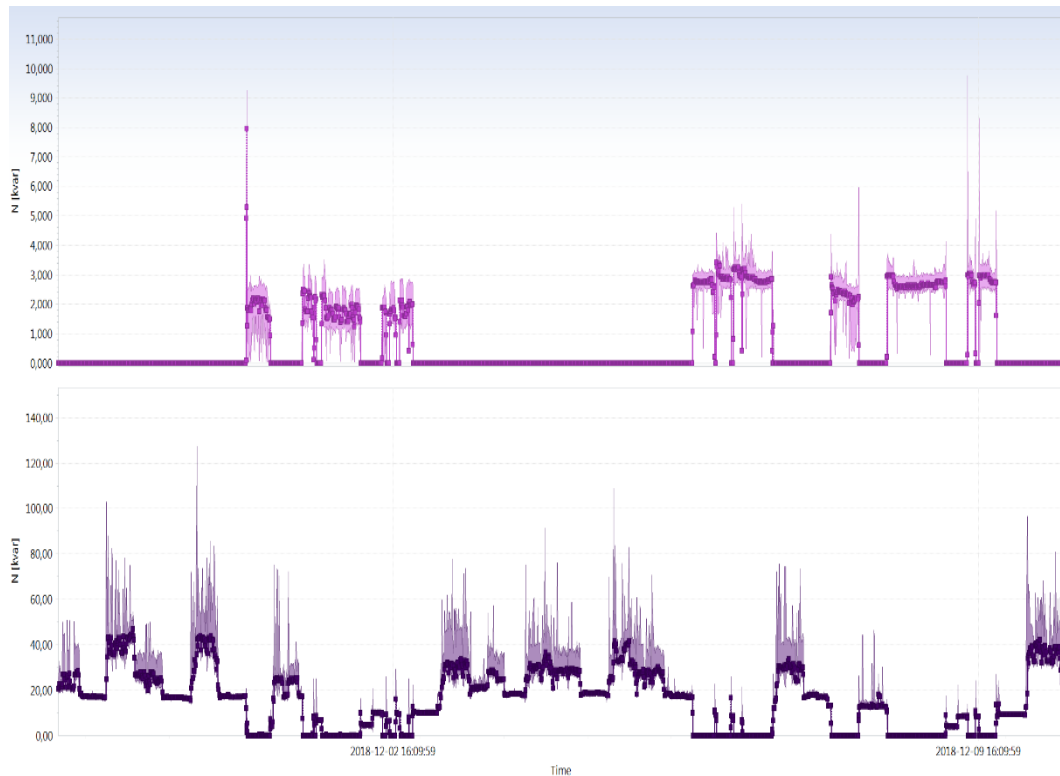
Tehonkulutukset ajan funktiona näkyvät kuvissa 31 - 33. Pätötehon korkein hetkellinen huippuarvo oli 108,21 kW ja matalin hetkellinen minimiarvo 2,73 kW. Kymmenen minuutin keskiarvoista korkein arvo oli 62,97 kW ja matalin 3,63 kW. Näennäistehon suurin hetkellisarvo oli 158,55 kVA ja pienin hetkellisarvo 3 kVA. Kymmenen minuutin keskiarvoista suurin arvo oli 77,13 kVA ja pienin arvo 4,47 kVA. Kapasitiivisen loistehon kymmenen minuutin keskiarvoista suurin arvo oli 5,26 kvar ja alimmillaan nolla. Hetkellinen huippuarvo oli 9,75 kvar:a. Induktiivisen loistehon kymmenen minuutin keskiarvoista korkein arvo oli 46,86 kvar ja matalimmillaan se oli myöskin nolla. Induktiivisen loistehon korkein hetkellisarvo oli 127,5 kvar:a. Tehomittauksen tuloksista huomataan, kuinka pätö- ja näennäistehojen kulutukset olivat merkittävästi alemmalla tasolla JK-105 mittaukseen verrattuna. Myös induktiivisen loistehon kulutus oli matalammalla tasolla, mutta kapasitiivisen loistehon kulutus oli merkittävästi suurempaa. Aiemmassa mittauksessa kapasitiivisen loistehon kulutus oli koko mittauksen ajan nolla yhtä 5,7 kvar:n kulutuspiikkiä lukuun ottamatta. Tässä mittauksessa kapasitiivisen loistehon kulutus oli korkeimmillaan 9,75 kvar, mutta kulutuspiikkejä oli useita ja suuri osa niistä tapahtui viikonloppuina. Erityisen suuret kulutuspiikit olivat perjantaina 30.11. kello 22:10 ja sunnuntaina 9.12. kello 13:00. Kuten JK-105:n mittauksessa, torstai aamuna kapasitiivisen loistehon kulutus nousi nollostaa, mutta yhden piikin sijaan kulutus jatkui noin 21 tuntia kunnes se palasi jälleen hetkellisesti nolnaan.



**Kuva 31.** Pätöteho ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.



**Kuva 32.** Näennäisteho ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.

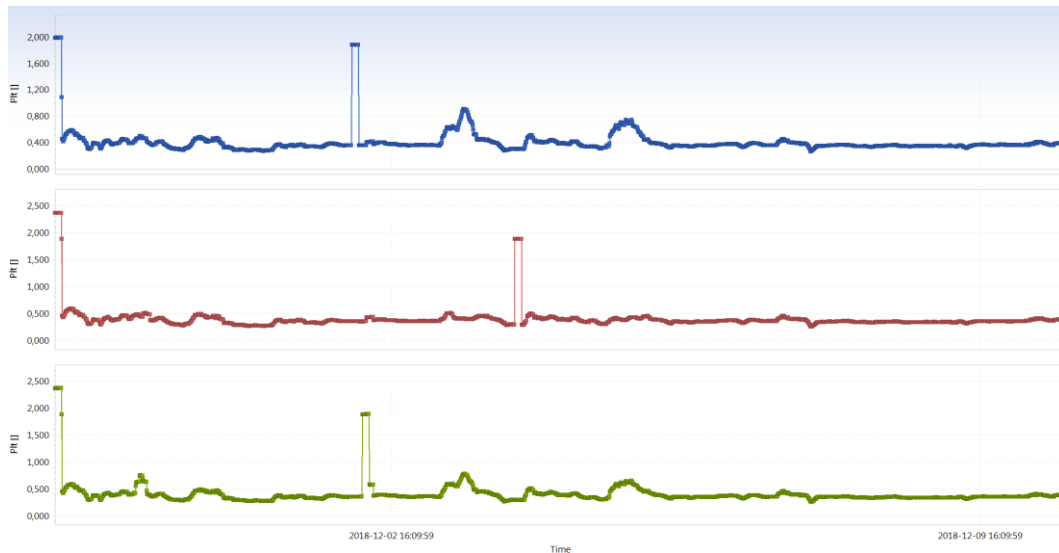


**Kuva 33.** Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 28.11. – 10.12.2018.

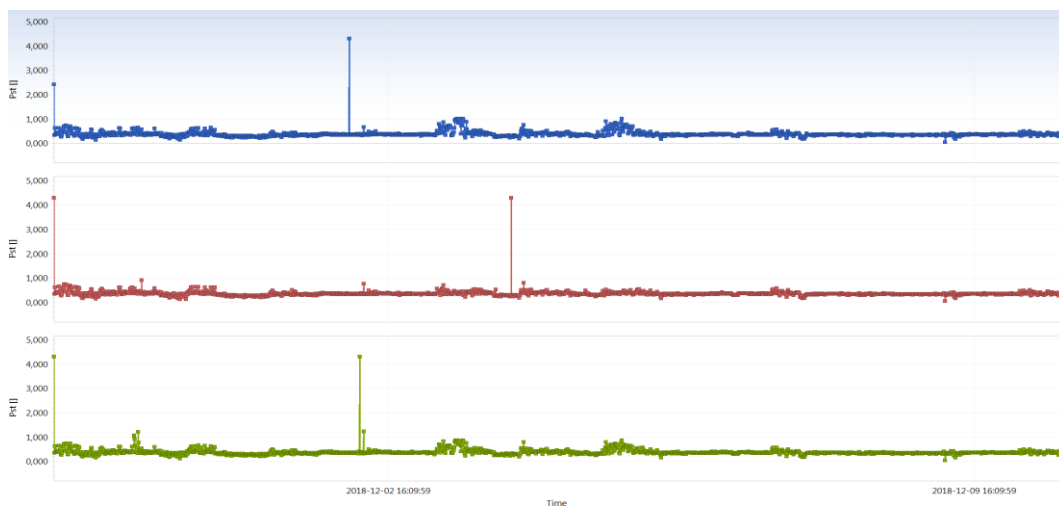
### Välkyntä

Pitkäkestoiset välkyntän häiritsevyysindeksit ajan funktiona näkyvät kuvassa 34 ja lyhytkestoiset kuvassa 35. Vaiheen 1 pitkäaikaiset välkyntäindeksit olivat jälleen suurimpia. Yhdessä viikossa on 1008 kappaletta 10 minuutin mittausjaksoja, joista 24:ssä pitkäaikainen välkyntäindeksi oli 1 tai suurempi. Laskemalla siis  $24/1008$  tulokseksi saadaan noin 2,4%, joka on standardin sallimassa 5% rajoissa.





**Kuva 34.** Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyyssindeksi ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.



**Kuva 35.** Välkynnän lyhytkestoinen häiritsevyyssindeksi ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.

## THD

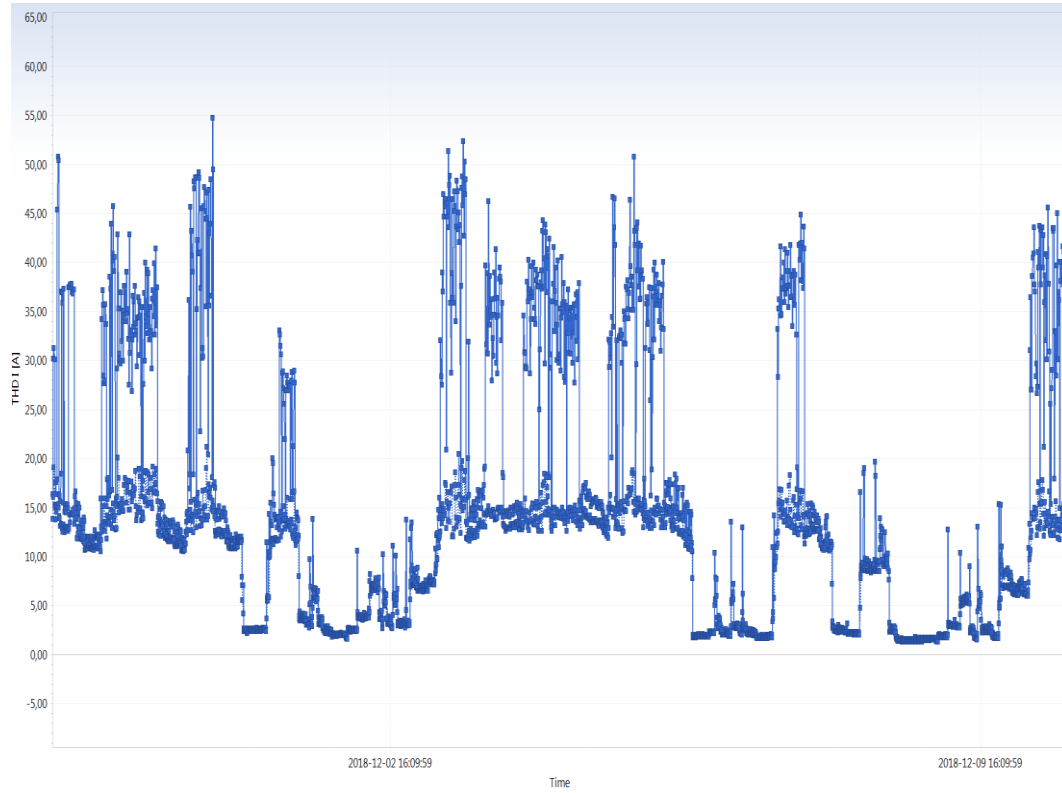
Vaiheen L1 jännitteen korkein THD:n kymmenen minuutin keskiarvoista oli 2,45%. Matalimmillaan jännitteen THD oli 0,47%. Virran THD:n osuus oli korkeimmillaan jopa 29,38% ja matalimmillaan 11,29%. Vaiheen L2 jännitteen korkein THD:n arvo oli 2,51% ja matalimmillaan 0,55%. Virran THD vaiheella L2 oli korkeimmillaan 29,92% ja matalimmillaankin se oli 6,12%. Vaiheen L3 jännitteen THD oli 2,37% ja matalimmillaan 0,47%. Virran korkein THD vaiheella

L3 oli 48,28% ja matalimmillaan 10,06%. Nollajohdon jännite oli koko mittauksen ajan nolla voltia. Nollajohdon virran THD oli korkeimmillaan 98,88% ja matalimmillaan 17,97%.

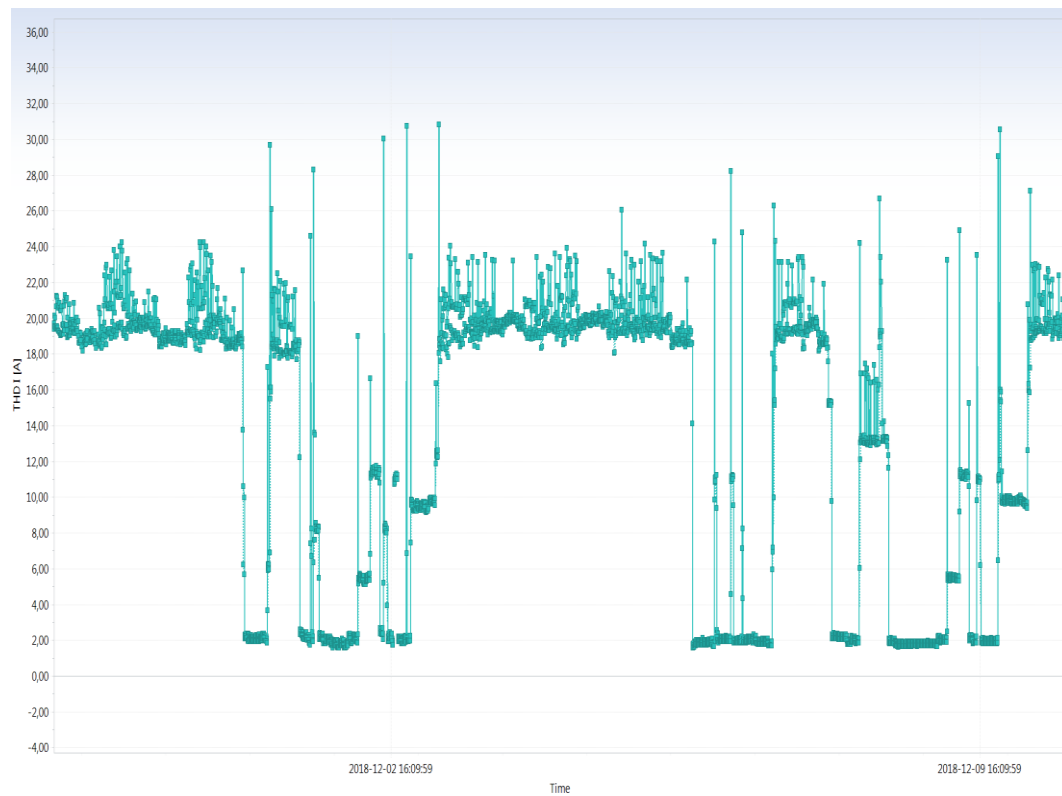
Standardin SFS-EN-50160 mukaan jakelujännitteen kokonaissärökertoimen tulee olla 8% tai pienempi. Jännitteen THD-arvot ovat siis hyvin standardin sallimissa rajoissa. Virran THD:lle ei ole standardin määrittämiä rajoja virran luonteesta johtuen. Huomioitavaa kuitenkin on yliaaltojen yhteisvaikutuksen aiheuttama suuri virran nousu. Jälleen jokaisella vaiheella virrasta noin 30% oli yliaaltoja, mutta tämä tapahtui itsenäisyyspäivänä 6.12. jolloin vaiheen L3 virta oli vain 6,96 A ja THD ampeereina oli 3,36 A. Vaiheen 1 THD-arvot voltteina ajan funktiona ovat kuvassa 36 ja THD ampeereina ajan funktiona on kuvassa 37. Nollajohdon THD ampeereina ajan funktiona on esitettyä kuvassa 38.



**Kuva 36.** L1-vaiheen THD voltteina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.



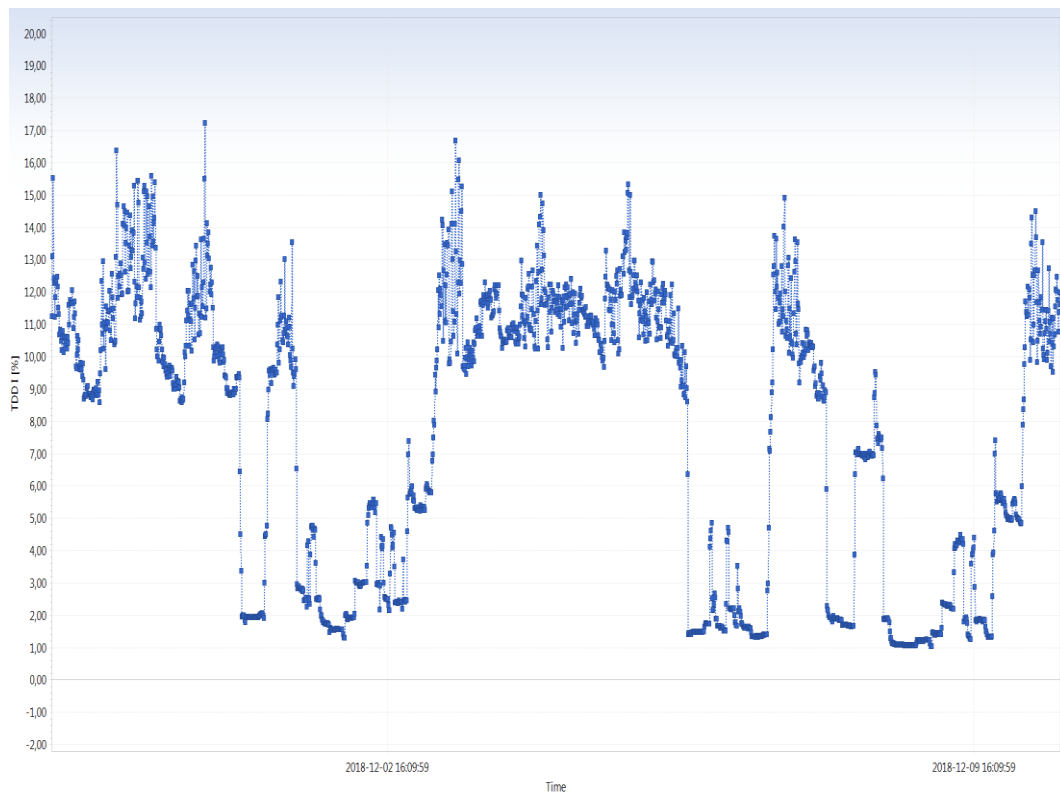
**Kuva 37.** L1-vaiheen THD ampeereina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.



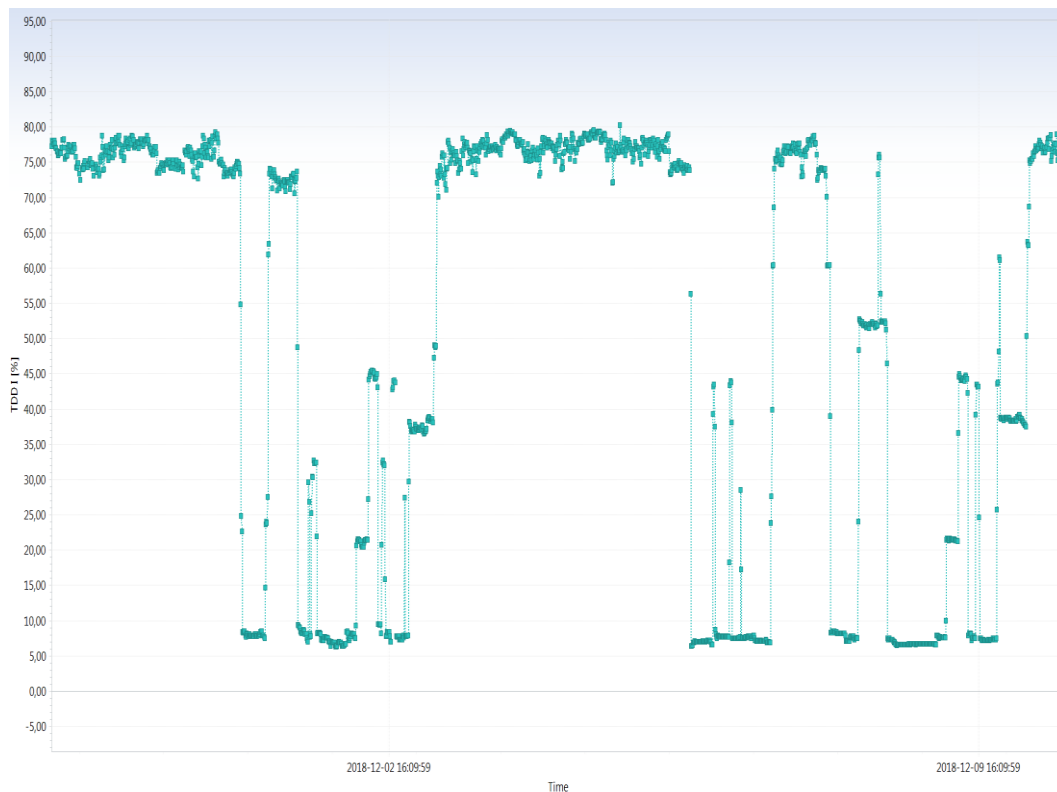
**Kuva 38.** nollajohdon THD ampeereina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.

## TDD

Vaiheen L1 TDD-arvo oli korkeimmillaan 17,23% ja matalimmillaan 1,03%. Vaiheella L2 TDD oli korkeimmillaan 16,34% ja matalimmillaan 0,57%. Vaiheen L3 suurin TDD-arvo oli 18,01% ja matalin oli 0,53%. Nollajohtimella TDD oli korkeimmillaan 80,26% ja matalimmillaan 6,22%. Vaiheen 1 TDD-arvot näkyvät kuvassa 39. Nollajohdon TDD näkyy kuvassa 40.



**Kuva 39.** L1-vaiheen TDD prosentteina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.



**Kuva 40.** Nollajohdon TDD prosentteina ajan funktiona 28.11. – 10.12.2018.

### **Yliaallot**

Taulukossa 11 on nähtävissä vaiheen L1 yliaaltojen suuruudet jännitteen sekä virran arvoina perusaallosta viidenteentoista yliaaltoon saakka. Taulukossa 12 vaiheen L2 arvot ja L3-vaiheen arvot taulukossa 13. Nollajohdon arvot ovat taulukossa 14. Taulukoissa on jälleen jokaisen vaiheen perusaallon ja yliaaltojen jännitteen ja virran hetkelliset huippuarvot, sekä kymmenen minuutin keskiarvojen korkein ja matalin arvo. Taulukossa 15 on lisäksi jälleen merkittynä standardin SFS-EN-50160 mukainen vertailu yliaaltojen osuudesta perusaaltoon nähden prosentteina. Harmonisten yliaaltojen osuudet viidenteentoista yliaaltoon saakka olivat tässäkin mittauksessa standardin sallimissa rajoissa.

JK-105 mittaukseen nähden vaiheiden yliaaltojen aiheuttamien jännitteiden korkeimmat huippuarvot olivat keskenään lähes samalla tasolla, eroa oli alle voltin verran jokaisella vaiheella. Myös kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot olivat lähes samalla tasolla. Matalimmat kymmenen minuutin keskiarvot olivat hieman alemmalla tasolla edelliseen mittaukseen nähden, erityisesti

viidennen yliaallon osalta. Nollajohdon yliaaltojen osuus oli merkittävästi korkeammalla tasolla. Esimerkiksi nollajohdon kolmannen yliaallon aiheuttaman virran korkein hetkellisarvo oli jopa 28,86 A kun se JK-105 mittauksessa oli vain 0,75 A.

**Taulukko 11.** L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018.

L1 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	236,6	4,7	5,1	3,8	2,3	3,6	2,3	1,5
MAX avg	235,2	2,6	4,2	3,1	1,8	2,2	1,6	0,7
MIN avg	227,2	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0

L1 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	230,52	20,37	46,11	26,52	6,15	14,61	6,93	3,69
MAX avg	121,56	10,02	14,88	9,42	4,23	7,89	4,65	0,81
MIN avg	9	0,48	0,15	0,21	0,45	0,09	0,12	0,09

**Taulukko 12.** L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018.

L2 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	236,7	3,3	4,9	3,5	2,4	4,2	3,7	1,8
MAX avg	234,8	2	4	2,7	1,9	2,5	2,7	0,8
MIN avg	227,6	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1

L2 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	228,3	22,8	43,62	27,54	4,56	13,86	9,33	2,61
MAX avg	110,16	7,08	13,95	7,8	2,79	4,86	5,97	1,08
MIN avg	5,76	0,12	0,09	0,09	0,15	0,09	0,06	0,09

**Taulukko 13.** L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018.

L3 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	237,8	3,7	5,1	4	2,2	3,7	3,5	1,5
MAX avg	235,6	2,3	4,2	3,2	1,3	2,3	2,4	0,6
MIN avg	228,4	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1

L3 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	207,87	22,41	43,8	30,21	3,78	9,96	10,29	3,15
MAX avg	100,92	6,96	13,41	9,27	2,16	4,62	7,05	1,17
MIN avg	4,89	0,21	0,12	0,06	0,09	0,09	0,09	0,06

**Taulukko 14.** Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 28.11. – 10.12.2018.

LN U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	0	0	0	0	0	0	0	0
MAX avg	0	0	0	0	0	0	0	0
MIN avg	0	0	0	0	0	0	0	0

LN I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	34,65	28,86	7,47	3,24	8,94	3,24	1,95	1,86
MAX avg	16,17	19,29	3,81	1,95	6,78	2,34	1,23	1,5
MIN avg	2,25	1,11	0,12	0,15	0,54	0,15	0,06	0,12

**Taulukko 15.** Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 28.11. – 10.12.2018.

Avg Umax [%]	3. [%]	5. [%]	7. [%]	9. [%]	11. [%]	13. [%]	15. [%]
L1	1,12 %	1,81 %	1,34 %	0,79 %	0,96 %	0,69 %	0,30 %
L2	0,86 %	1,74 %	1,17 %	0,82 %	1,10 %	1,17 %	0,35 %
L3	0,99 %	1,81 %	1,38 %	0,56 %	1,00 %	1,04 %	0,26 %
SFS-EN-50160	5,00 %	6,00 %	5,00 %	1,50 %	3,50 %	3,00 %	0,50 %

## LIITE 3

**MITTAUKSEN 15.10. – 23.10.2019 TULOKSET****Jännitteet**

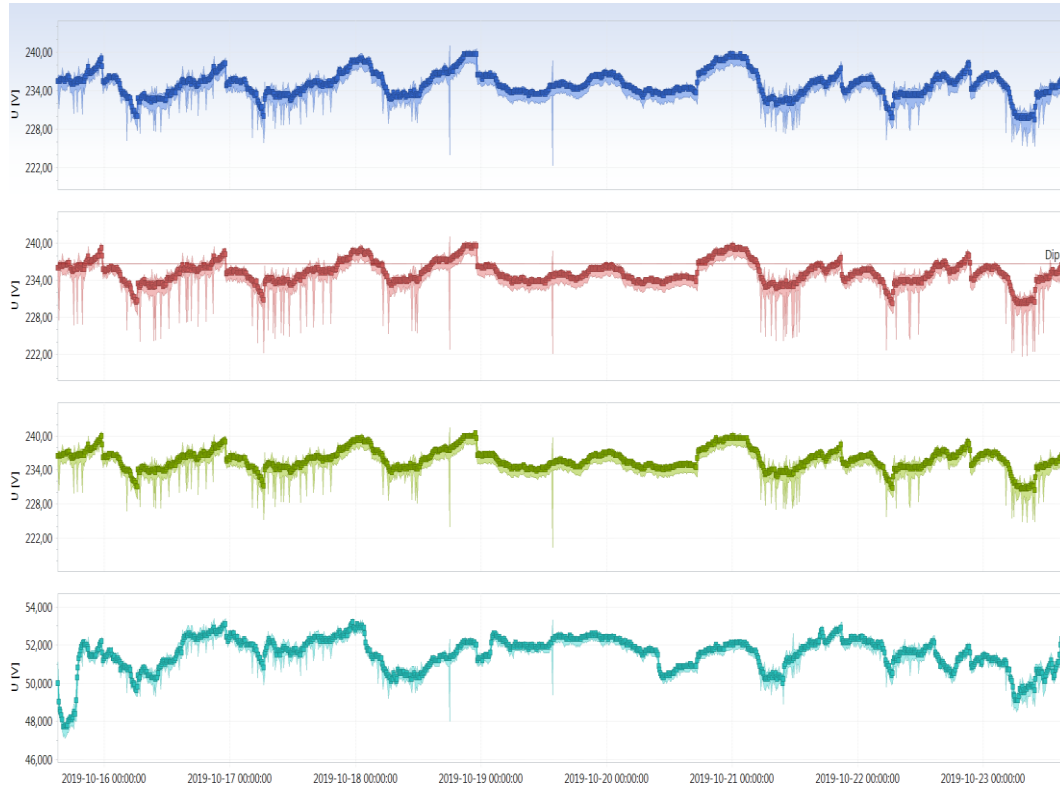
Mittauksen aikana L1-vaiheen jännitteen keskiarvo oli korkeimmillaan 239,5 V ja matalimmillaan 229,4 V, kun samassa jakokeskuksessa aiemmin mitattiin 235,2 V ja matalimmillaan 227,4 V. Korkein hetkellisarvo oli 241 V ja matalin 222,3 V, kun aiemmassa mittauksessa korkein hetkellisarvo oli 236,8 V ja matalin hetkellisarvo 223,1 V.

Vaiheella L2 jännitteen korkein hetkellisarvo oli 239,6 V ja matalin 230,2 V. Hetkellisarvoista korkein oli 241,1 V ja matalin 221,6 V. Aiemmassa mittauksessa keskiarvojen huippuarvot olivat 234,8 V ja 227,8 V. Jännitteen hetkellisarvojen huippuarvot olivat 236,7 V ja 222,8 V.

Vaiheen L3 jännitteen keskiarvo oli suurimmillaan 240,4 V ja matalimmillaan 230,4 V. Aiemmassa mittauksessa vastaavat arvot olivat 235,6 V ja 228,6 V. Korkein hetkellisarvo oli 241,5 V. Matalin hetkellisarvo oli 220,3 V. Aikaisemmassa mittauksessa vastaavat arvot olivat 237,8 V ja 223,7 V. Jännitetason vaihtelut olivat siis yhä hyvin standardin SFS-EN-50160 määrittämän  $\pm 10$  % nimellisjännitteen muutoksen, eli 207 – 253 V rajoissa.

Kymmenen minuutin keskiarvot nollajännitteellä olivat korkeimmillaan 53,2 V ja matalimmillaan 47,2 V. Nollajohdon jännite oli korkeimmillaan 53,4 V ja matalimmillaankin se oli 47,9 V. Jännitteen arvot näkyvät kuvassa 41. Vaiheen L1 arvot ovat jälleen sinisellä, vaiheen L2 arvot punaisella ja L3-vaiheen arvot vihreällä. Nollajohdon jännite on esitettyä vaalean sinisellä.





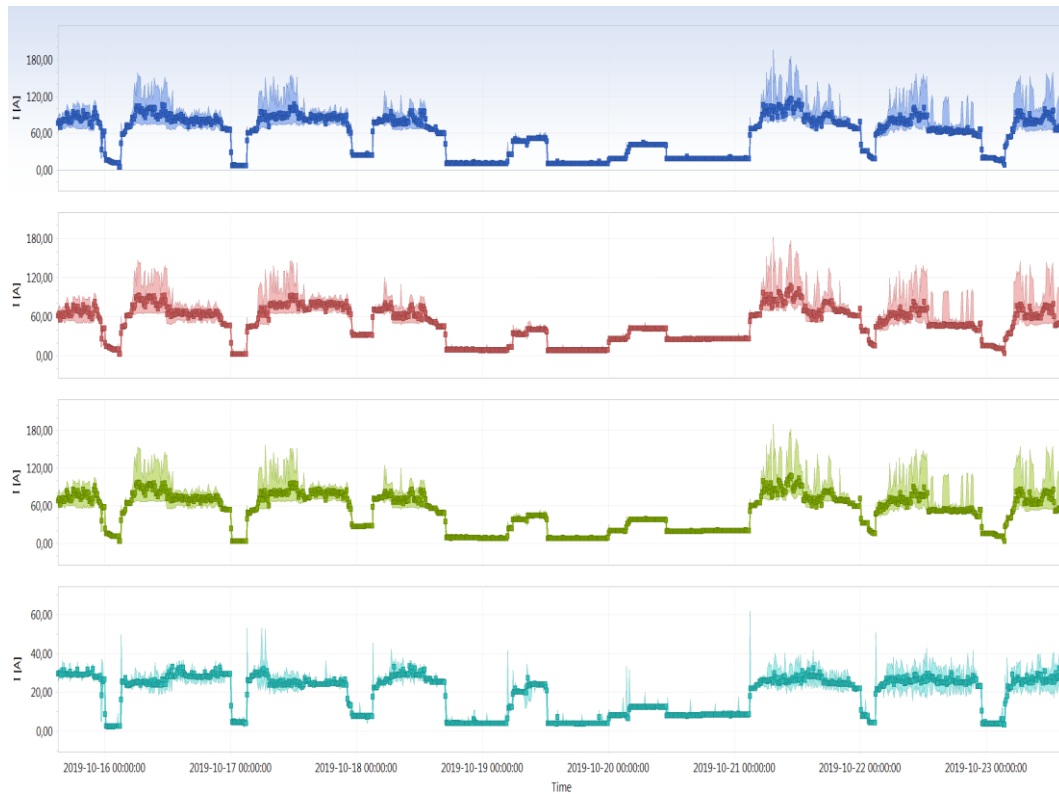
**Kuva 41.** Vaihejohtimien jännitteen arvot ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

## Virrat

Virtamittausten tulokset ovat näkyvissä taulukossa 16. Edelliseen mittaukseen nähden jokaisella vaiheella virran hetkelliset huippuarvot olivat matalammat. Edellisen mittauksen tulokset ovat näkyvissä taulukossa 10. L2 vaiheen hetkellinen huippuarvo oli laskenut eniten aikaisempaan mittaukseen nähden, ja se oli laskenut 56,88 A:n verran. Vastaava L1 vaiheen virran arvo oli 42,57 A matalammalla ja L3 vaiheen virta 26,01 A alemmalla tasolla. Myös muissa vaiheiden virtamittauksissa virtojen arvot ovat aikaisempaa matalammalla tasolla, mutta mitään muuta maininnan arvoista ei arvoista löydy. Sen sijaan nollajohdon virran hetkellinen huippuarvo oli noussut jopa lähes 25 A verran aikaisemman mittauksen arvosta. Kymmenen minuutin keskiarvojen huippuarvot olivat sen sijaan lähes samoilla tasoilla, vain noin 8 A kasvulla edelliseen mittaukseen nähden. Kuvassa 42 on esitettyinä vaiheiden virrat ajan funktiona.

**Taulukko 16.** Virtamittauksen tuloksia 15.10. – 23.10.2019.

L1 I min	3,84 A	L3 I min	3,3 A
L1 I max	196,32 A	L3 I max	190,26 A
L1 I keskiarvo min	3,96 A	L3 I keskiarvo min	3,57 A
L1 I keskiarvo max	116,52 A	L3 I keskiarvo max	108,36 A
L2 I min	2,25 A	LN I min	1,29 A
L2 I max	182,22 A	LN I max	61,86 A
L2 I keskiarvo min	2,4 A	LN I keskiarvo min	2,25 A
L2 I keskiarvo max	106,68 A	LN I keskiarvo max	33,27 A



**Kuva 42.** Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

## Taajuus

Mittausjakson aikana taajuuden kymmenen minuutin keskiarvot olivat korkeimmillaan 50,14 Hz ja matalimmillaan 49,87 Hz. Taajuuden korkein hetkellinen huippuarvo oli 50,2 Hz ja matalin hetkellisarvo 49,79 Hz. Verkon taajuus on siis yhä SFS-EN-50160-standardin sallimissa rajoissa. Taajuus ajan funktiona on esitettyä kuvassa 43.



**Kuva 43.** Taajuus ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

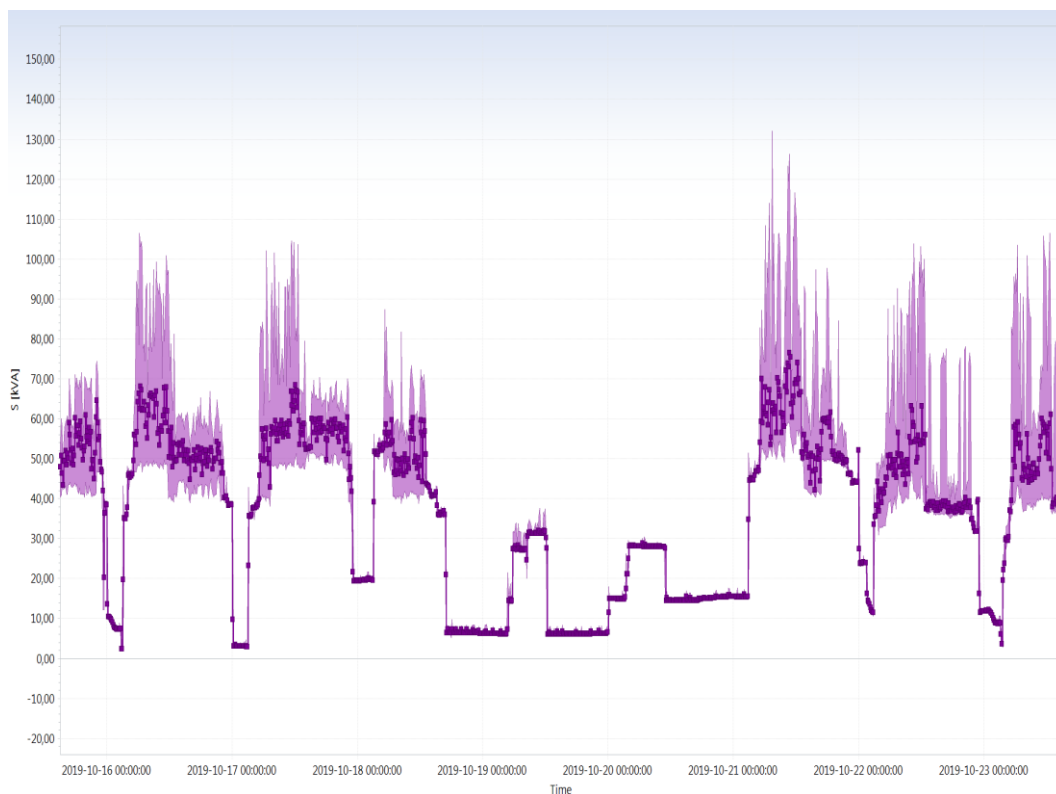
### **Tehot**

Pätötehon korkein arvo kymmenen minuutin keskiarvoista oli 66,15 kW ja matalin 1,95 kW. Vastaavat arvot olivat aikaisemmassa mittauksessa 62,97 kW ja 3,63 kW. Pätötehon korkein hetkellinen huippuarvo oli 107,79 kW ja matalin hetkellisarvo oli 1,86 kW. Aiemmassa mittauksessa korkein huippuarvo oli 108,21 kW ja matalin hetkellinen minimiarvo 2,73 kW. Pätötehon osalta arvot ovat siis pysyneet samalla tasolla. Pätöteho ajan funktiona on esitettyinä kuvassa 44.



**Kuva 44.** Pätöteho ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

Näennäistehon kymmenen minuutin keskiarvoista suurin oli 76,53 kVA ja pienin 2,34 kVA kun vastaavat arvot aiemmassa mittauksessa olivat 77,13 kVA ja 4,47 kVA. Korkein hetkellisarvo näennäisteholla oli 132,09 kVA ja matalin hetkellisarvo 1,95 kVA. Huippuarvot ovat siis hieman laskeneet aiemman mittauksen 158,55 kVA ja 3 kVA hetkellisarvoista, kymmenen minuutin keskiarvojen pysyessä lähes samalla tasolla. Näennäisteho ajan funktiona on esitettyä kuvassa 45.

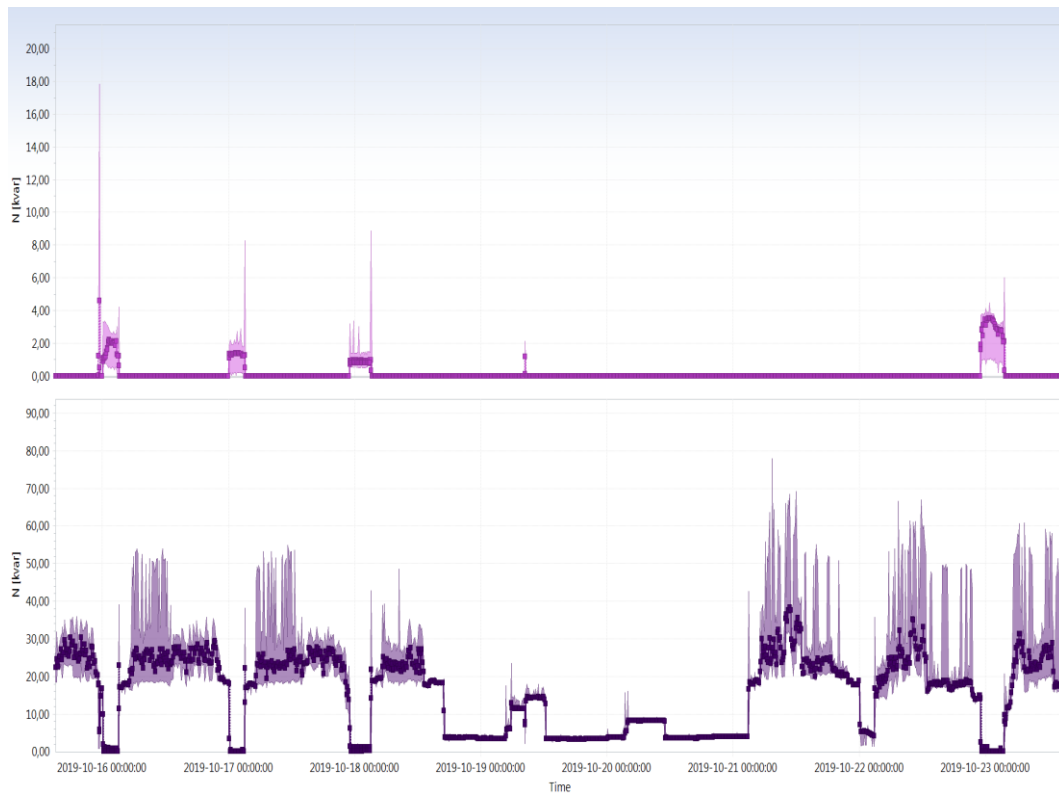


**Kuva 45.** Näennäisteho ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

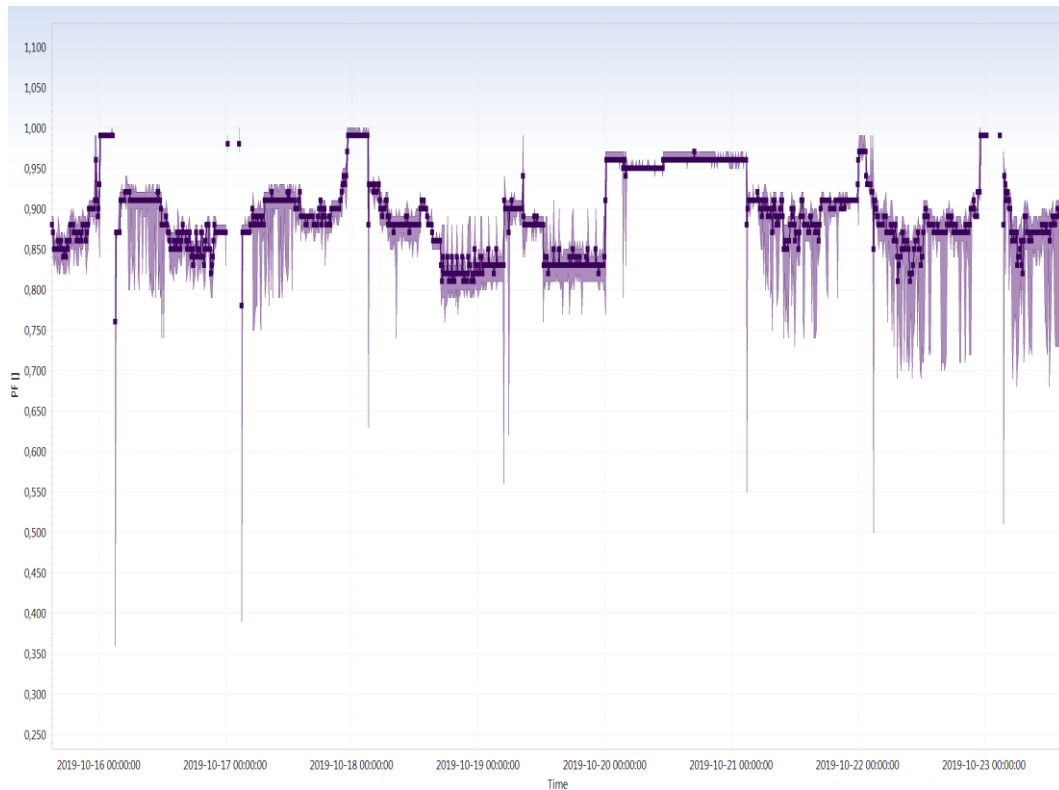
Kapasitiivisen loistehon kymmenen minuutin keskiarvoista matalin arvo pysyi edelleen nollassa ja korkeimmillaan keskiarvo oli 3,54 kvar:ia, hieman matalammalla tasolla siis aiemmasta 5,26 kvar:sta. Sen sijaan hetkellinen huippuarvo oli merkittävästi suurempi 17,85 kvar, kun se aiemmin oli 9,75 kvar:a. Induktiivisen loistehon kymmenen minuutin keskiarvoista korkein arvo oli 38,43 kvar ja pienimmillään se oli edelleen nollassa. Induktiivisen loistehon korkein hetkellisarvo oli 77,94 kvar:a, joka aiemmassa mittauksessa oli 127,5 kvar. Kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon kulutukset ovat esitettyinä kuvassa 46. Loistehon kulutus menee kapasitiivisen puolelle tehonkulutuksen ollessa matala, esimerkiksi suurin kapasitiivisen loistehon kulutuspiikki tapahtuu tiistain ja keskiviikon välisenä yönä kello 23:28. Tämä voi viitata esimerkiksi ylimitoitettuun kompensointiin, tai liian hitaasti reagoivaan automaattiseen loistehon kompensointilaitteistoon.

Tehokerrointa on arvioitu mittarin laskemalla PF-arvolla, joka tulee sanoista power factor. Tehokerroin PF kuvaa pätötehon ja näennäistehon suhdetta, jossa

huomioidaan myös yliaallot. Korkeahkosta loistehon kulutuksesta johtuen, tehokerroin laskee toisinaan hyvinkin matalalle. Tehokertoimen muutokset ajan funktiona näkyvät kuvassa 47. Tehokertoimen kymmenen minuutin keskiarvot pysyvät hyväksyttävällä tasolla, mutta tehokertoimen hetkellisarvot voivat pudota jopa alle 0,4.



**Kuva 46.** Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 15.10. – 23.10.2019.

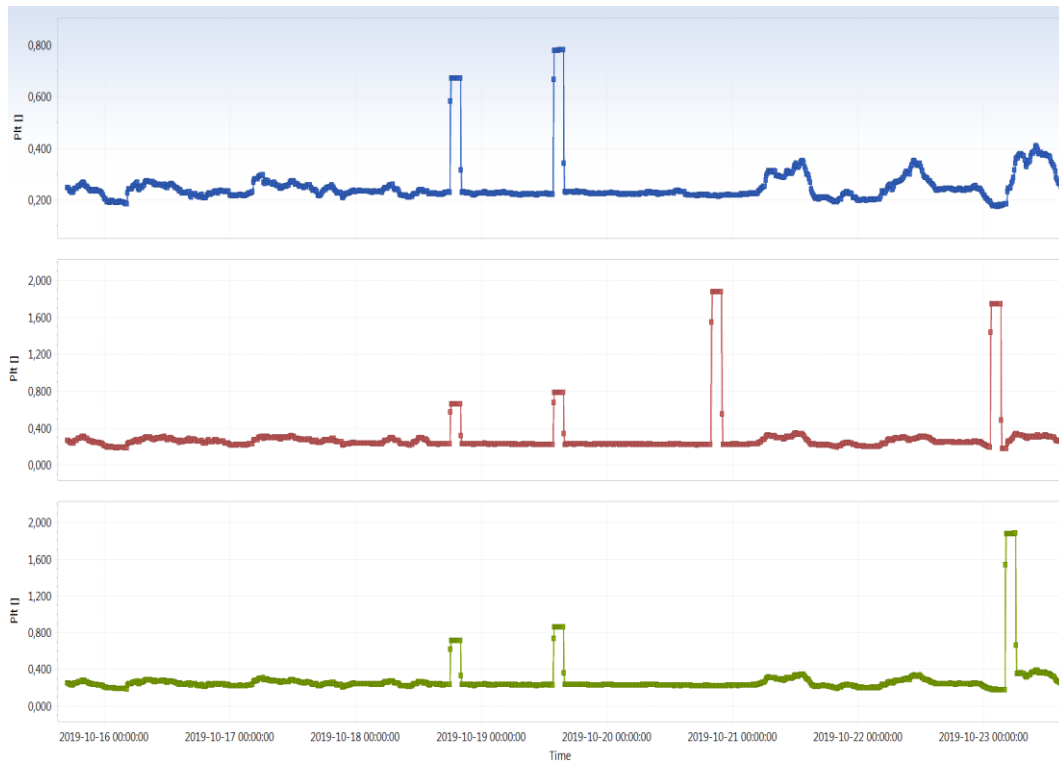


**Kuva 47.** Power factor  $PF_{tot}$  15.10. – 23.10.2019.

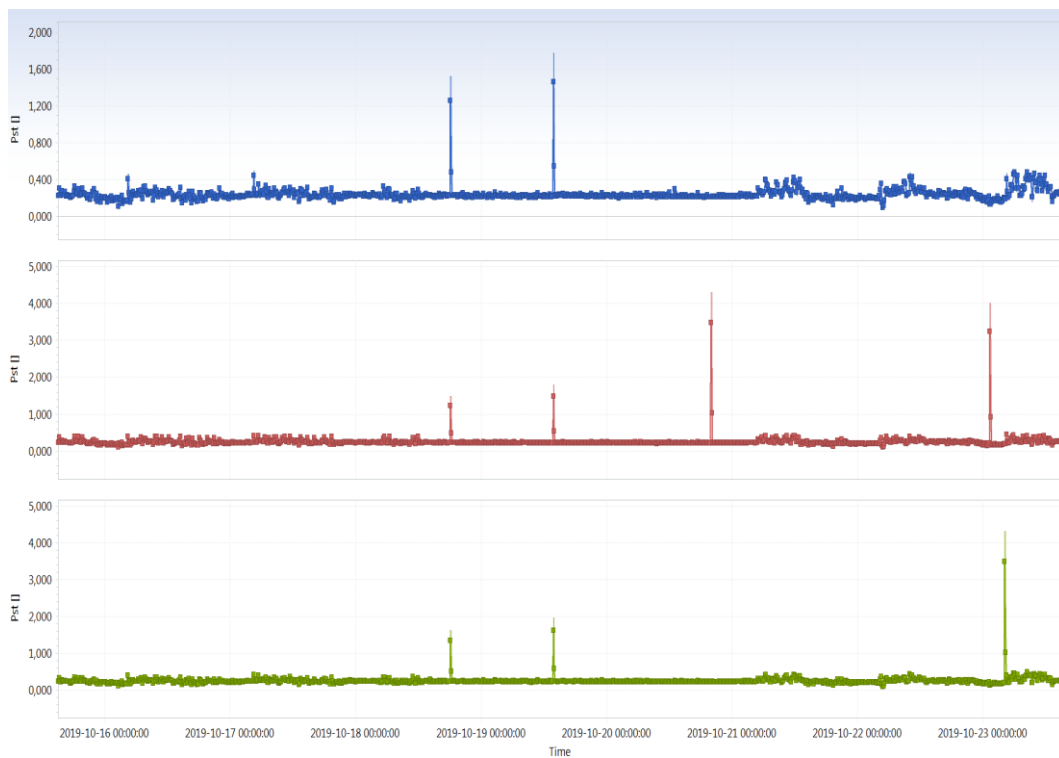
### Välkyntä

Pitkäkestoiset välkynnän häiritsevyysindeksit ajan funktiona on esitetty kuvassa 48. Lyhytkestoisen välkynnän häiritsevyysindeksit näkyvät kuvassa 49. Tällä kertaa vaiheen 1 välkynnän häiritsevyyden arvot olivat pienimmät, korkeimman kymmenen minuutin keskiarvon ollessa vain 0,78. Vaiheen 2 korkein häiritsevyysindeksin arvo sen sijaan oli 1,879 ja vaiheella 3 kyseinen arvo oli 1,881. Pitkäaikaisen välkynnän häiritsevyysindeksi on kuitenkin yhä standardin SFS-EN-50160 sallimissa rajoissa. Eniten arvon yksi ylittäviä häiritsevyysindeksejä oli 24 kappaletta vaiheella 2. Jälleen voitiin siis laskea 24/1008 jolloin tulokseksi saadaan jälleen noin 2,4% joka on standardin sallimassa 5% rajoissa.





**Kuva 48.** Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyyssindeksi ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.



**Kuva 49.** Välkynnän lyhytkestoinen häiritsevyyssindeksi ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

## THD

Vaiheen L1 jännitteen korkein THD:n kymmenen minuutin keskiarvoista oli 2,57% kun se aiemmin oli 2,45%. Matalimmillaan jännitteen THD oli 0,85% kun se aiemmin oli 0,47%. Virran THD:n osuus oli korkeimmillaan 33,61% ja matalimmillaan 10,67%. Vaiheen L2 jännitteen korkein THD:n arvo oli 2,44% kun se aiemmin oli 2,51%. Matalimmillaan vaiheen L2 jännitteen THD-arvo oli 0,89% sen aiemmin ollessa 0,55%. Virran THD vaiheella L2 oli korkeimmillaan 57,78% ja matalimmillaankin se oli 5,68%. Vaiheen L3 jännitteen THD oli 2,47% kun se aikaisemmin oli 2,37%. Matalimmillaan vaiheen L3 jännitteen THD oli 0,80%. Virran korkein THD vaiheella L3 oli 47,79% ja matalimmillaan 8,22%. Nollajohdon jännitteen korkein THD:n arvo oli 45,22%. Matalimmillaan nollajohdon jännitteen THD-arvo oli 39,07%. Nollajohdon virran THD oli korkeimmillaan 96,58% ja matalimmillaankin se oli 9,02%. Vaiheiden THD:n arvot esitettyinä taulukossa 17.

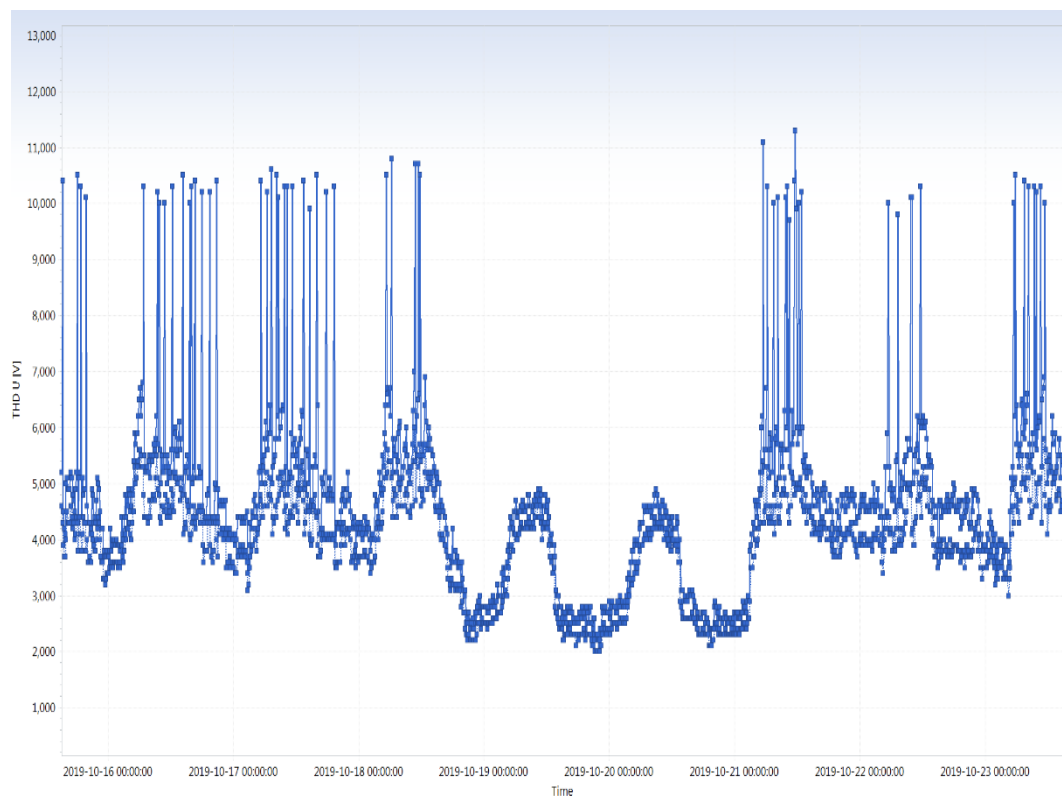
**Taulukko 17.** Virran ja jännitteen THD-arvot.

Jännite THD 15.10. – 23.10.2019					Jännite THD 28.11. – 10.12.2018				
	L1	L2	L3	LN		L1	L2	L3	LN
THD U max [%]	2,57%	2,44%	2,47%	45,2%	THD U max [%]	2,45%	2,51%	2,37%	
THD U min [%]	0,85%	0,89%	0,80%	39,0%	THD U min [%]	0,47%	0,55%	0,47%	

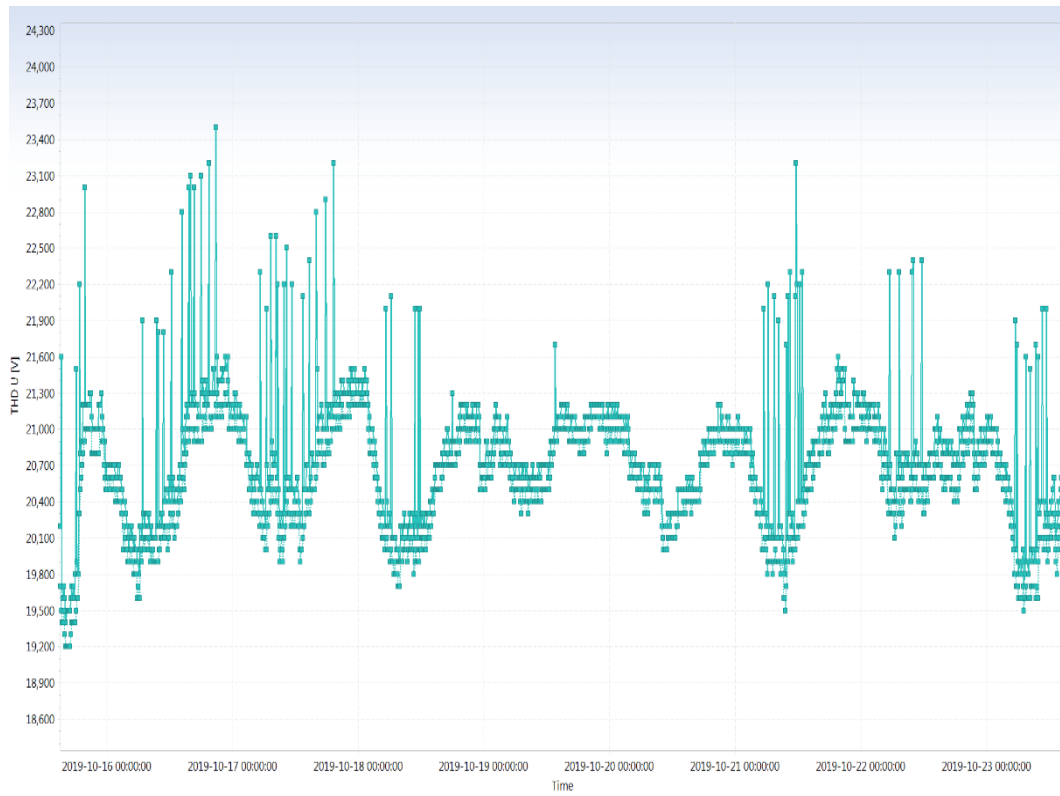
  

Virta THD 15.10. – 23.10.2019					Virta THD 28.11. – 10.12.2018				
	L1	L2	L3	LN		L1	L2	L3	LN
THD I max [%]	33,61 %	57,78 %	47,79 %	96,58 %	THD I max [%]	29,38 %	29,92 %	48,28 %	98,88 %
THD I min [%]	10,6%	5,68%	8,22%	9,02%	THD I min [%]	11,2%	6,12%	10,0%	17,9%

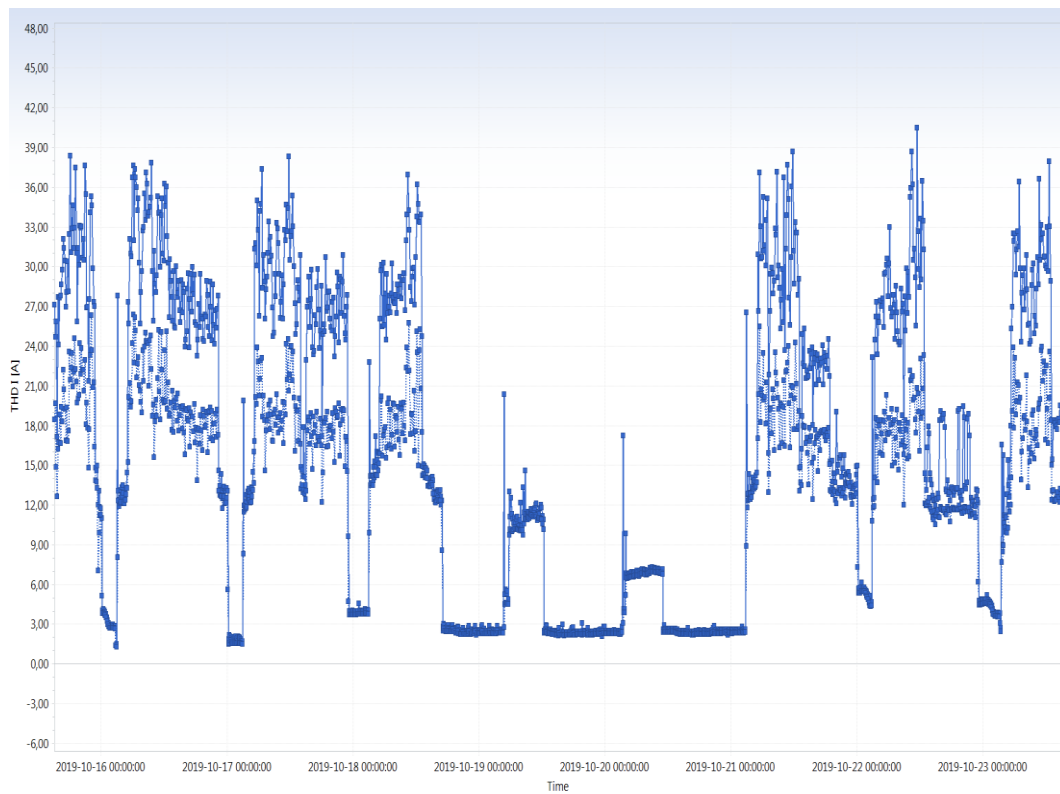
Kuten aikaisemmassakin mittauksessa, standardin SFS-EN-50160 vaatima 8 % tai alle, jakelujännitteen kokonaissärökerroin vaatimus tulee täytettyä. Kuten aiemmassa mittauksessa, virran THD-arvo on melko korkea. Kuvassa 50 on näkyvissä mittauksen jännitteen THD-arvot ajan funktiona ja kuvassa 51 nollajohdon jännitteen THD-arvo. Kuvassa 52 on mittauksen virran THD-arvot ajan funktiona ja kuvassa 53 nollajohdon virran THD-arvot ajan funktiona. THD-arvojen kuvaajat ovat jälleen lähes identtisiä vaiheiden välillä, joten vain vaiheen L1 ja LN THD-arvot ovat esitettyinä.



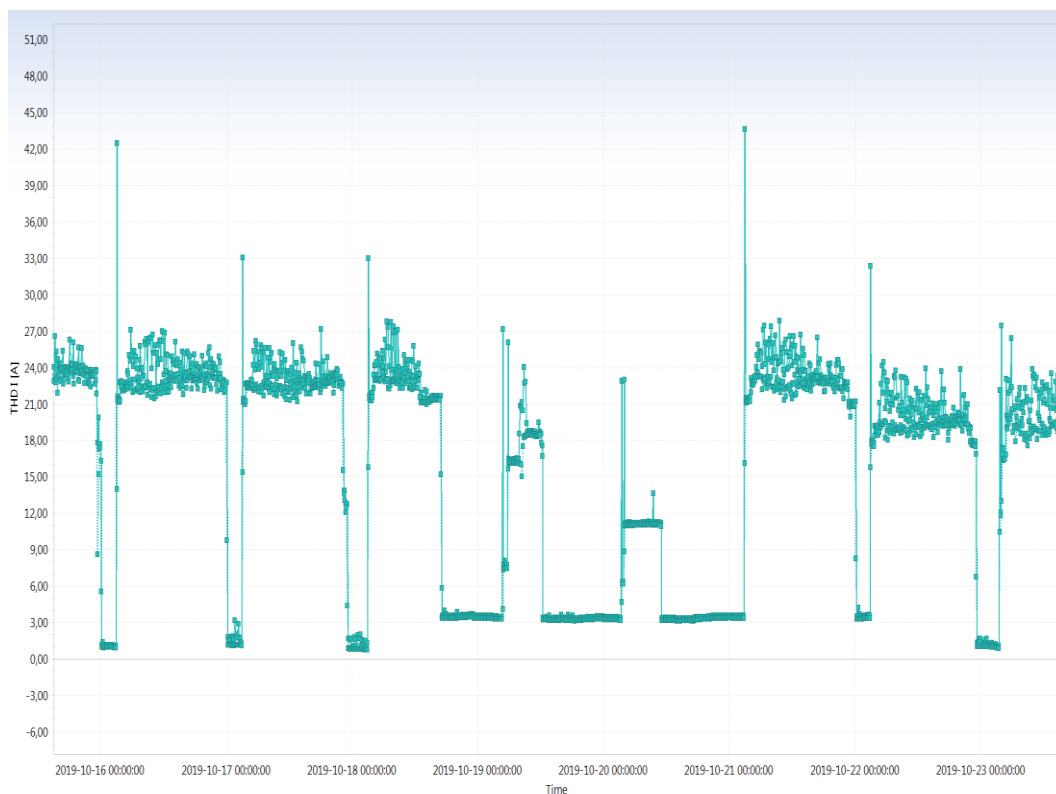
**Kuva 50.** L1-vaiheen THD voltteina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.



**Kuva 51.** Nollajohdon THD voltteina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.



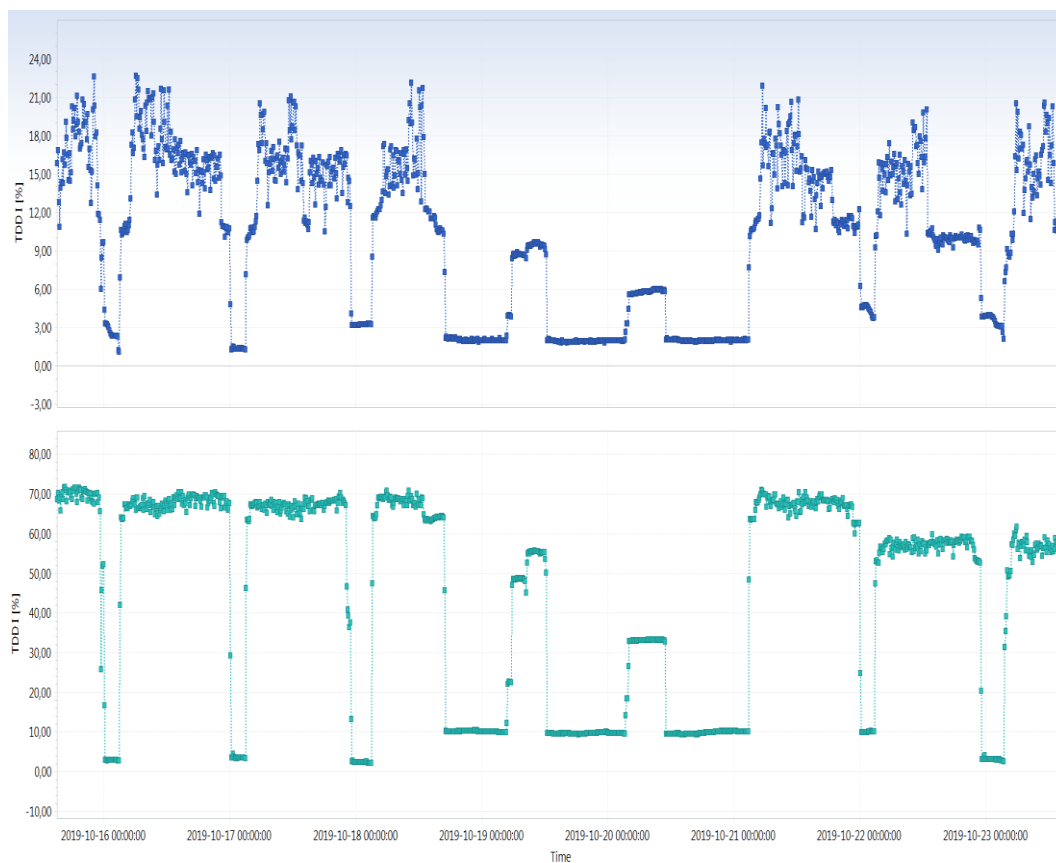
**Kuva 52.** L1-vaiheen THD ampeereina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.



**Kuva 53.** Nollajohdon THD ampeereina ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

## TDD

Vaiheen L1 TDD-arvo oli korkeimmillaan 22,66 %, joka on pieni nousu edellisen vuoden 17,23%:n. Matalimmillaan TDD oli 1 vaiheella 1,08% eli noin samalla tasolla aiemman mittauksen 1,03% kanssa. Vaiheella L2 TDD oli korkeimmillaan 22,1% ja matalimmillaan 1,15%, kun vastaavat arvot olivat aiemmassa mittauksessa 16,34% ja 0,57%. Myös vaiheen L3 suurin TDD-arvo oli noussut hieman. Korkein TDD:n arvo oli 22,9% ja matalin 1,11%, kun edellisessä mittauksessa nämä arvot olivat 18,01% ja 0,53%. Sen sijaan nollajohtimella TDD oli hieman laskenut. Korkeimmillaan nollajohdon TDD-arvo oli 70,78%, kun se edellisessä mittauksessa oli 80,26%. Matalimmillaan nollajohdon TDD oli 2,16%. Aiemmassa mittauksessa nollajohdon TDD-arvo oli 6,22%. Vaiheen 1 TDD-arvot on esitetty kuvassa 54 tumman sinisellä, ja nollajohdon TDD vaalean sinisillä alempana kuvaajana.



**Kuva 54.** Vaiheen L1 sekä nollajohdon TDD ajan funktiona 15.10. – 23.10.2019.

### Yliaallot

Taulukossa 18 on nähtävissä vaiheen L1 yliaaltojen suuruudet jännitteen sekä virran arvoina perusaallosta viidenteentoista yliaaltoon saakka. Taulukossa 19 vaiheen L2 arvot ja L3-vaiheen arvot taulukossa 20. Nollajohdon arvot ovat taulukossa 21. Taulukoissa 22 on esitettyä vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina verrattuna standardin SFS-EN-50160 sallimiin arvoihin.

Aikaisempaan mittaukseen lähes jokaisen yliaallon prosentuaalinen osuus oli hieman alhaisemmalla tasolla. Vain viidennen yliaallon osuus oli hieman korkeammalla aikaisempaan mittaukseen nähden, mutta vain noin 0,5 prosenttiyksikön verran. Muidenkin yliaaltojen osuuden muutos oli kaikissa tapauksissa alle yhden prosenttiyksikön. Kahden mittaussarjan perusteella on mahdoton sanoa, seuraavatko muutokset jotain trendiä vai johtuvatko nämä pienet erot vain erilaisista mittaustilanteista. Joka tapauksessa, kaikki jännitteen

yliaaltojen osuudet olivat yhä standardin SFS-EN-50160 rajoissa. Huomioitavaa kuitenkin on, että vaikka 15. yliaaltoa on korkeimmillaankin vain 0,26 %, on se kuitenkin noin 52 % standardin asettamasta 0,50 % rajasta.

Poikkeuksellista aikaisempaan mittaukseen nähden, nollajohdon yliaaltojen jännitteelle on nyt mitatut arvot. Kuten taulukosta 21 huomataan, kolmannella yliaallolla on merkittävin osuus nollajohdon yliaalloista. Kolmannen yliaallon luonteesta johtuen tämä ei ole yllättävää. Muiden yliaaltojen aiheuttama jännite on vain muutamien volttien luokkaa, korkein hetkellisarvo oli seitsemännellä yliaallolla, mutta sekin oli vain viisi volttia.

**Taulukko 18.** L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019.

L1 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	241	9,9	7	3,2	2,4	1,7	1,6	1,4
MAX avg	239,6	1,4	5,5	2,5	1,3	1,1	1,3	0,4
MIN avg	229,4	0,1	1,1	0,3	0,4	0,1	0,1	0

L1 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	193	24,3	34,98	19,47	12,54	10,5	6,75	7,11
MAX avg	113,76	10,2	21,93	8,64	4,83	5,1	4,71	1,47
MIN avg	3,66	0,27	0,54	0,09	0,15	0,24	0,54	0,12

**Taulukko 19.** L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019.

L2 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	240,9	3,5	9,2	2,7	2,2	1,8	1,8	2,1
MAX avg	239,6	1,3	5,2	2,3	1,2	1,2	1,5	0,6
MIN avg	230	0,2	1,3	0,3	0,1	0	0,3	0,1

L2 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	179,58	20,04	32,31	18,33	10,05	9,09	6,36	6,06
MAX avg	104,4	6,72	19,83	9,03	2,55	3,33	3,78	1,26
MIN avg	1,86	0,21	0,69	0,09	0,12	0,21	0,51	0,06

**Taulukko 20.** L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019.

L3 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	241,4	9,3	6,5	2,9	2	1,9	2,4	1,5
MAX avg	240	1,2	5,5	2,3	1,1	1,2	1,9	0,5
MIN avg	230,4	0,1	1,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0

L3 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	187,5	21,63	35,31	20,07	10,53	9	7,02	4,74
MAX avg	105,84	6,93	20,67	9,3	2,67	3,72	5,43	1,11
MIN avg	3,03	0,15	0,33	0,09	0,12	0,27	0,39	0,06

**Taulukko 21.** Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 15.10. – 23.10.2019.

LN U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	49	22,8	3,5	5	2,9	2,4	1,8	1,3
MAX avg	48,6	20,8	3,2	3,7	2,5	1	1,7	0,9
MIN avg	43,6	18,6	1,9	2,3	1,6	0,2	0,8	0

LN I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	50,43	36,99	8,01	5,25	11,22	4,86	3,51	4,98
MAX avg	25,92	22,38	3,99	2,79	7,44	3,36	1,98	2,49
MIN avg	1,59	0,09	0,12	0,09	0,42	0,18	0,06	0,24

**Taulukko 22.** Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 15.10. – 23.10.2019.

Avg Umax [%]	3. [%]	5. [%]	7. [%]	9. [%]	11. [%]	13. [%]	15. [%]
L1	0,6 %	2,36 %	1,07 %	0,57 %	0,46 %	0,55 %	0,17 %
L2	0,55 %	2,22 %	0,98 %	0,52 %	0,51 %	0,64 %	0,26 %
L3	0,51 %	2,35 %	0,98 %	0,47 %	0,51 %	0,81 %	0,21 %
SFS-EN-50160	5,00 %	6,00 %	5,00 %	1,50 %	3,50 %	3,00 %	0,50 %



## LIITE 4

**MITTAUKSEN 25.10. – 2.11.2019 TULOKSET****Jännitteet**

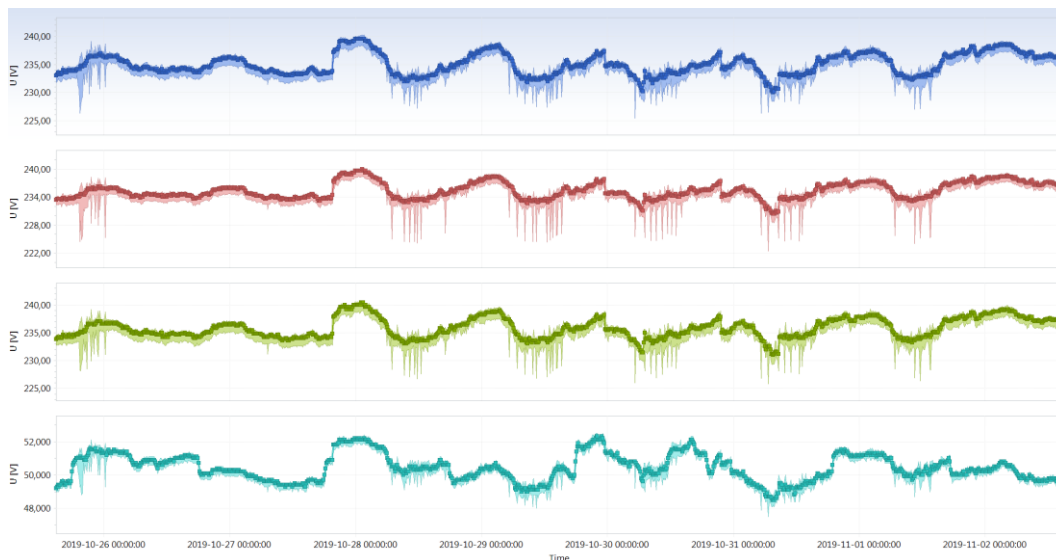
Mittauksen aikana L1-vaiheen jännitteen kymmenen minuutin keskiarvojen korkein arvo oli 239,6 V, eli hieman korkeampi kuin aikaisemman mittauksen 235,8 V. Matalimmillaan jännitteen keskiarvo oli 230 V, jälleen hieman koholla aikaisempaan 227,4 V:n. Korkein jännitteen hetkellisarvo oli 240,3 V ja alimmillaan jännitteen hetkellisarvo oli 225,4 V. Aikaisemmassa mittauksessa vastaavat hetkellisarvohuiput olivat 236,6 V ja 220,7 V.

Vaiheen L2 jännitteen keskiarvojen huippuarvo oli 240 V ja matalin keskiarvo 230,4 V. Aiemmassa mittauksessa vastaavat arvot olivat 235,2 V ja 228 V. Korkein hetkellisarvo oli 240,3 V ja matalin hetkellisarvo 222,4 V. Aikaisemmassa mittauksessa korkein hetkellisarvo oli 236,1 V ja matalin hetkellisarvo 221,2 V.

Vaiheen L3 jännitteen kymmenen minuutin keskiarvojen korkein arvo oli 240,4 V. Keskiarvojen matalin arvo oli 231 V. Aikaisemmassa mittauksessa korkein keskiarvo oli 236,2 V ja matalin 228,8 V. Korkein hetkellisarvo oli 240,8 V ja matalin hetkellisarvo 225,8 V. Aiemmassa mittauksessa hetkellisarvoista korkein oli 235,7 V ja matalin 220,9 V.

Nollajohdon jännitteen kymmenen minuutin keskiarvojen korkein arvo oli 52,3 V ja matalin 48,5 V. Korkein hetkellisarvo oli 52,5 V.

Jännitetason vaihtelut ovat siis edelleen hyvin standardin SFS-EN-50160 määrittämien raja-arvojen sisäpuolella. Jännitteiden arvot ajan funktiona näkyvät kuvassa 55. Vaiheen L1 arvot on piirretty sinisellä, vaiheen L2 arvot punaisella ja L3 vaiheen arvot vihreällä.



**Kuva 55** Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN jännitteen arvot ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.

### **Virrat**

Taulukossa 23 on näkyvissä virtojen L1 – L3 ja LN hetkelliset minimi- ja huippuarvot. Lisäksi taulukossa on vaiheiden kymmenen minuutin keskiarvojen huippu- ja minimiarvot. Koko mittauksen virtojen arvot ajan funktiona ovat nähtävissä kuvassa 56. Vaiheiden L1 – L3 kymmenen minuutin keskiarvojen virrat vaihtelivat noin 1 ampeerin ja 55 ampeerin välillä, mikä on merkittävästi alhaisempi kuin aikaisemmassa mittauksessa. Virran hetkellisarvot olivat L1 ja L3 vaiheilla yli 250 A, mutta L2-vaiheella virta oli vain hieman yli 113 A. Korkeimmillaan virrat olivat jälleen arkipäivinä kello 6 ja 16 välillä, ja matalimmillaan ne olivat viikonloppuna.

Nollajohtin oli hieman enemmän kuormitettuna kuin aiemmassa mittauksessa vaihejohtimien merkittävästi alemmasta virran tasosta huolimatta. Vaikka nollajohtimen virta oli korkeimmillaankin vain lähes 25 A, on se silti yli kaksinkertainen edellisen mittauksen huippuarvoon nähden.

**Taulukko 23.** Virtamittauksen tuloksia 25.10. – 2.11.2019.

L1 I min	1,2 A
L1 I max	251,13 A
L1 I keskiarvo min	1,23 A
L1 I keskiarvo max	53,76 A

L3 I min	1,17 A
L3 I max	270,51 A
L3 I keskiarvo min	1,59 A
L3 I keskiarvo max	55,98 A

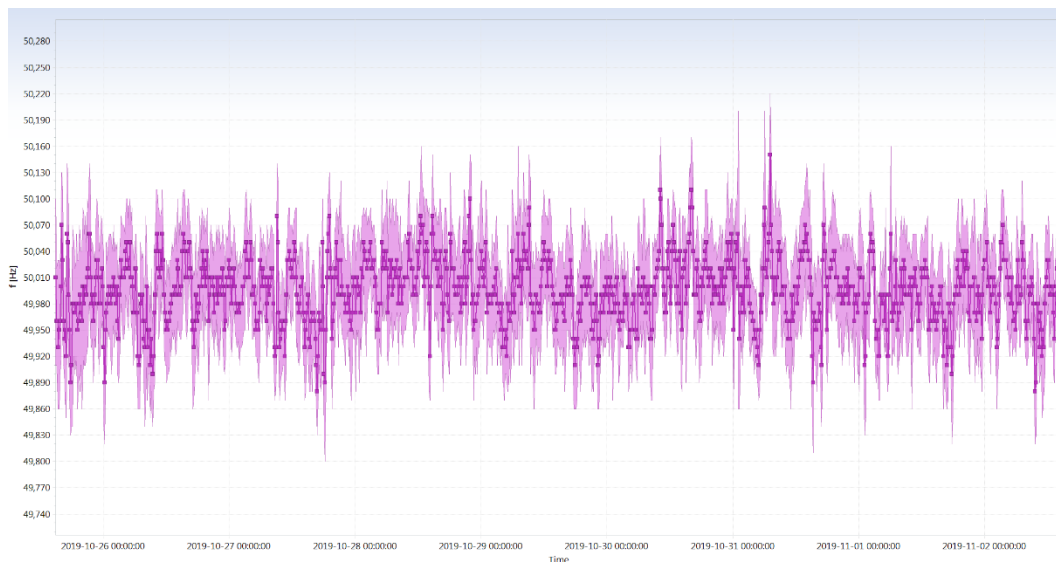
L2 I min	1,02 A
L2 I max	113,73 A
L2 I keskiarvo min	1,02 A
L1 I keskiarvo max	56,28 A

LN I min	0 A
LN I max	24,93 A
LN I keskiarvo min	0 A
LN I keskiarvo max	8,52 A

**Kuva 56.** Vaiheiden L1, L2, L3 ja LN virran arvot ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.

### Taajuus

Mittausjakson aikana taajuuden kymmenen minuutin keskiarvo oli matalimmillaan 49,88 Hz ja korkeimmillaan 50,15 Hz. Korkein taajuuden hetkellisarvo oli 50,22 Hz ja matalin hetkellisarvo 49,8 Hz. Nämä arvot ovat helposti standardin minimivaatimuksen 47 – 52 Hz rajoissa, ja lähes identtiset aikaisemman mittauksen taajuuden arvojen kanssa. Taajuuden kuvaaja ajan funktiona on kuvassa 57.



**Kuva 57.** Taajuus ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.

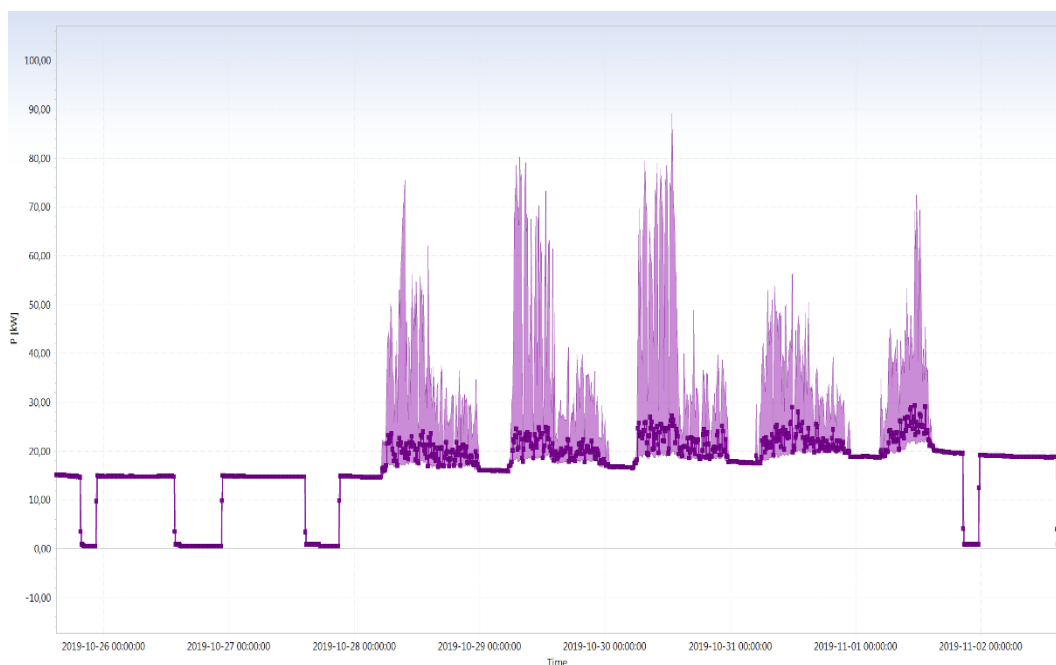
### **Tehot**

Tehonkulutukset ajan funktiona ovat nähtävissä kuvissa 58 - 60. Pätötehon hetkellinen korkein huippuarvo oli 89,22 kW ja matalin hetkellisarvo 0,42 kW. Aiemmassa mittauksessa pätötehon korkein hetkellisarvo oli 291,45 kW ja minimiarvo 18,93 kW. Kymmenen minuutin keskiarvoista korkein arvo oli 29,25 ja matalin 0,45 kW. Aiemmassa mittauksessa vastaavat arvot olivat 195,15 kW ja 19,98 kW.

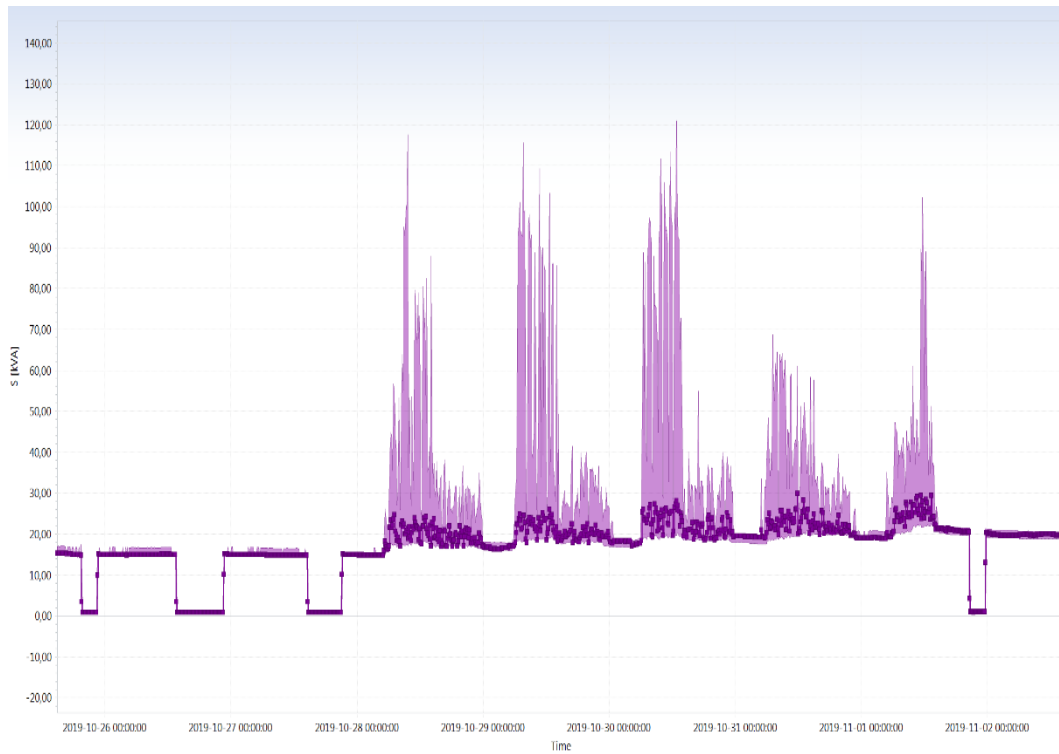
Näennäistehon suurin hetkellisarvo oli 121,01 kVA ja matalin hetkellisarvo 0,45 kVA. Aiemmassa mittauksessa korkein hetkellisarvo oli 378,06 kVA ja pienin 20,76 kVA. Kymmenen minuutin keskiarvoista suurin arvo oli 29,91 kVA ja matalin 0,84 kVA. Aiemmassa mittauksessa korkein arvo kymmenen minuutin keskiarvoista oli 212,97 kVA ja pienin 22,29 kVA.

Induktiivisen loistehon kymmenen minuutin keskiarvoista suurin arvo oli 52,26 kvar, kun se aikaisemmassa mittauksessa oli 92,79 kvar. Korkein hetkellisarvo oli 91,83 kvar. Hetkellinen huippuarvo aikaisemmassa mittauksessa oli jopa 240,84 kvar. Aikaisemmassa mittauksessa pienin arvo kymmenen minuutin keskiarvoista oli 9,78 kvar, mutta nyt pienin keskiarvo oli nolla kvar:a. Hetkellinen minimiarvo 5,4 kvar mutta sekin oli nyt nolla. Kapasitiivinen loisteho oli aikaisemmassa

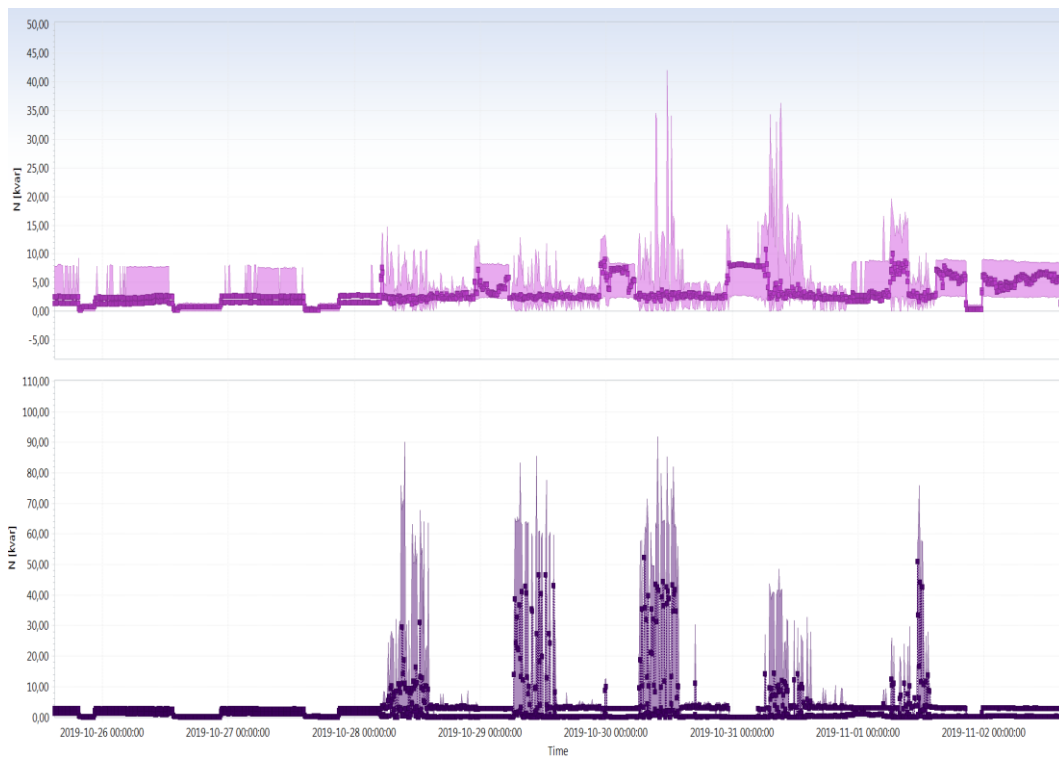
mittauksessa nolla koko mittauksen ajan, lukuun ottamatta yhtä 6,15 kvar piikkiä. Tässä mittauksessa kapasitiivisen loistehon kulutuspiikkejä oli useampia. Kapasitiivisen loistehon kymmenen minuutin keskiarvo oli korkeimmillaan 10,77 kvar ja korkein hetkellinen huippuarvo oli 41,97 kvar. Kymmenen minuutin keskiarvoista alin arvo oli 0,27 kvar ja hetkellisarvoista matalin 0,03 kvar. Tehokerroin on esitettyä kuvassa 61. Hetkellisarvot käyvät melko matalalla, noin 0,54 tasolla. Tilanne ei kuitenkaan ole yhtä heikko, kuin JK-103 tehokertoimella.



**Kuva 58.** Pätöteho ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.



**Kuva 59.** Näennäisteho ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.



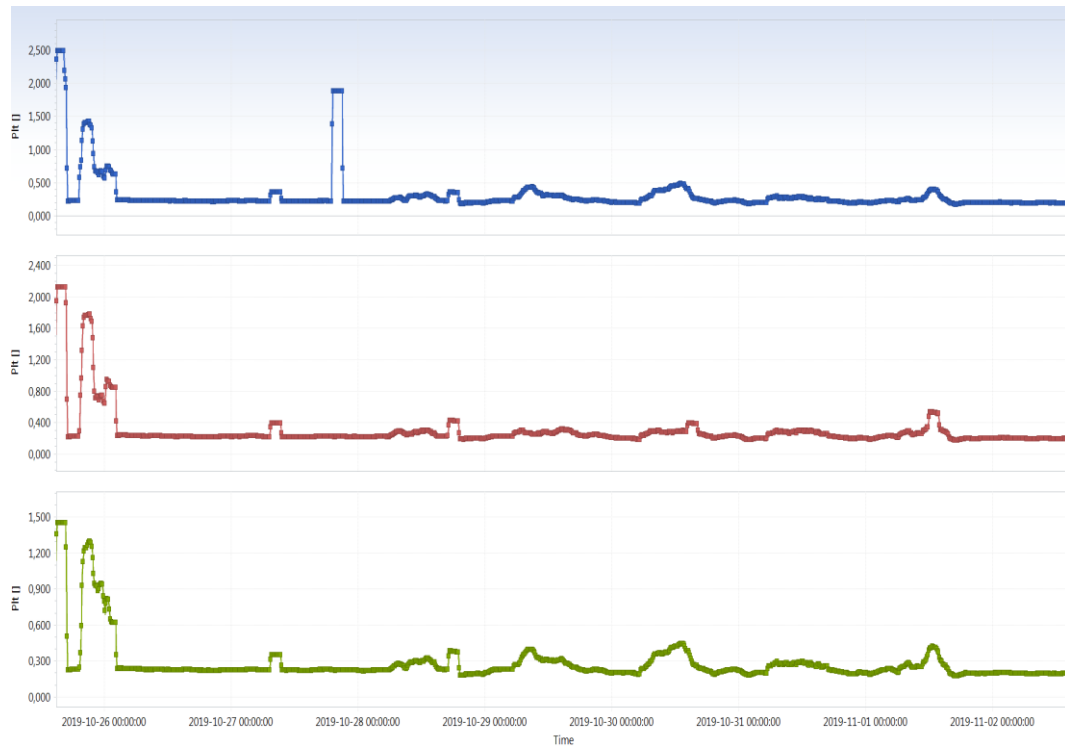
**Kuva 60.** Loisteho ajan funktiona (ylempi kapasitiivinen, alempi induktiivinen) 25.10. – 2.11.2019.



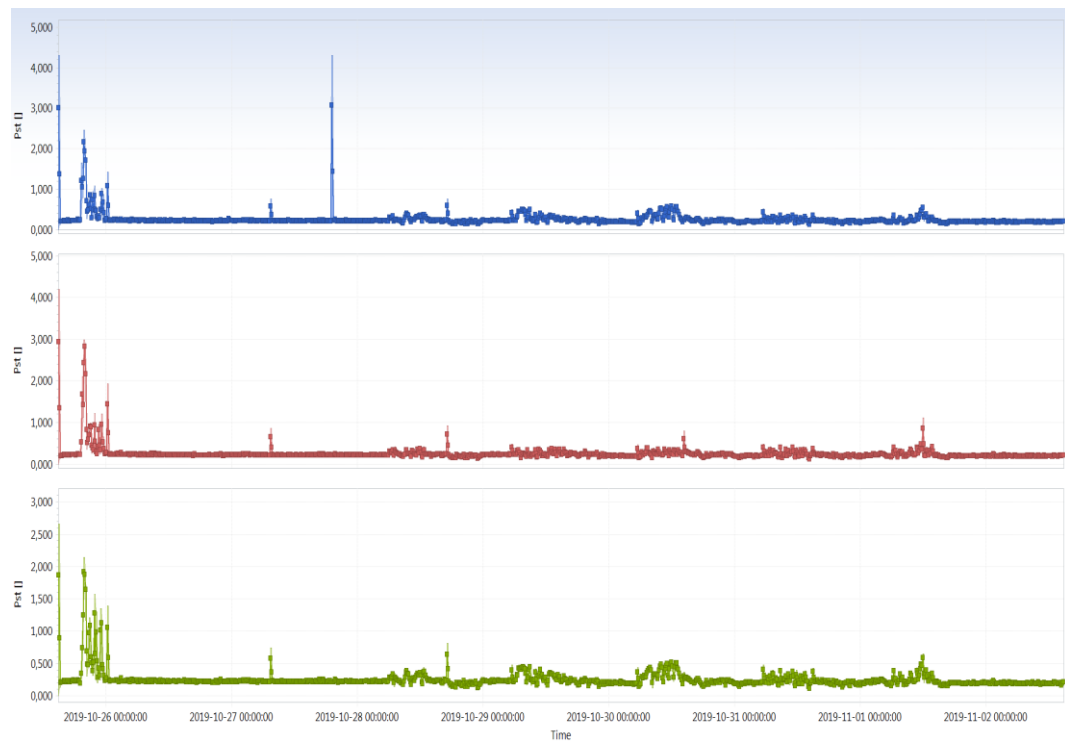
**Kuva 61** Power factor  $PF_{tot}$  25.10. – 2.11.2019.

### Välkyntä

Pitkäkestoiset välkynnän häiritsevyyssindeksit ajan funktiona näkyvät kuvassa 62 ja lyhytkestoiset kuvassa 63. Standardissa SFS-EN-50160 määritellään, että pitkäkestoinen välkynnän häiritsevyyssindeksi tulisi olla viikon mittaisen mittaussjakson aikana 95% ajasta yksi tai alle. Jälleen vaiheen 1 pitkäaikaiset välkyntäindeksit olivat suurimpia. Yhden viikon 1008 kappaleen 10 minuutin mittaussarjoista 37:ssä välkyntäindeksi oli yksi tai suurempi. Laskemalla siis  $37/1008$  tulokseksi saadaan noin 3,7 %, joka on standardin sallimassa 5 % rajoissa. Nousua on kuitenkin tapahtunut aikaisemman mittauksen 1,2% nähden. Jälleen on mahdotonta sanoa kahden mittaussarjan perusteella, onko kyseessä vain hetkellinen muutos vai trendi.



**Kuva 62.** Välkynnän pitkäkestoinen häiritsevyyssindeksi ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.



**Kuva 63.** Välkynnän lyhytkestoinen häiritsevyyssindeksi ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.



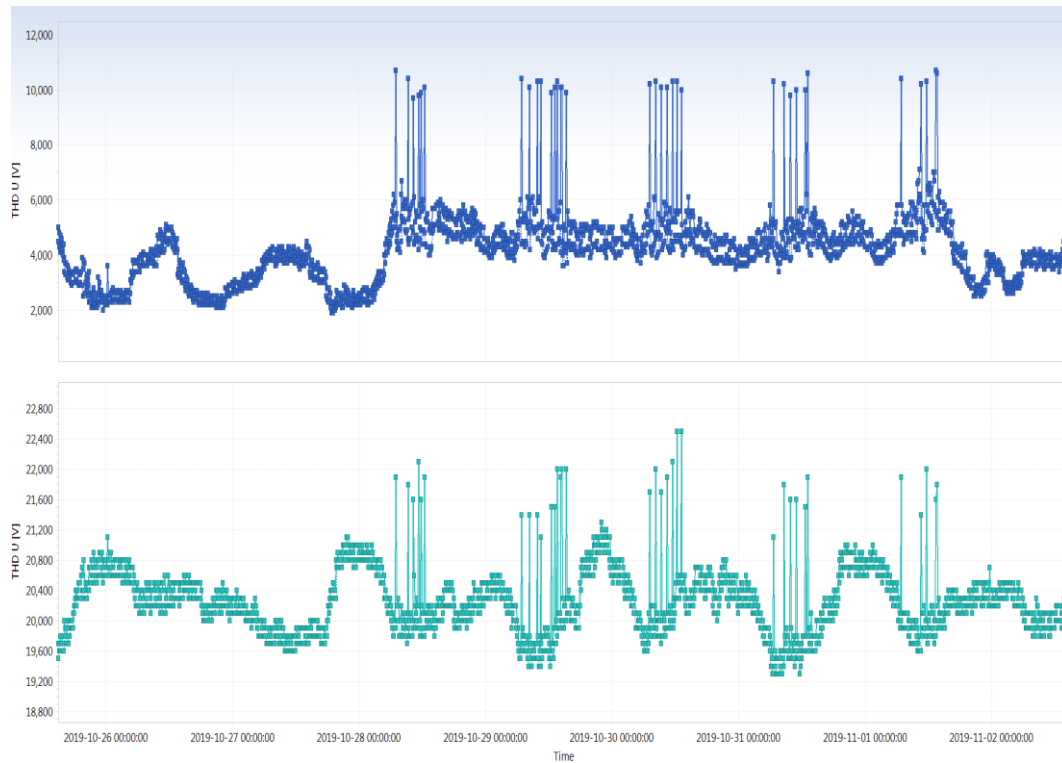
## THD

Mittauksen jännitteen THD-arvot verrattuna edellisen mittauksen arvoihin on nähtävissä taulukossa 24. Virtojen THD-arvot on esitetty taulukossa 25. Jännitteen THD-arvojen huippuarvot olivat pysyneet kaikilla vaiheilla samalla tasolla, eroa aikaisemman mittauksen huippuarvoihin oli vain alle yksi prosentti. Myös minimiarvot olivat samalla tasolla aikaisempaan mittaukseen nähden. Nollajohdon jännitteen THD-arvo sen sijaan oli hieman kohonnut noin 9 prosenttiyksikön verran, mutta alimmillaan se oli laskenut nolnaan. Kuten aikaisemmassakin mittauksessa, jännitteen THD:n arvot olivat standardin sallimissa rajoissa. Jännitteen THD huippuarvot ovat nähtävissä taulukossa 24 ja virran THD-huippuarvot taulukossa 25.

Virran THD-arvot olivat tässäkin mittauksessa hyvin korkeat ja ne olivat nousseet merkittävästi aikaisemman mittauksen arvoista. THD-arvon mukaan jokaisella vaiheella virrasta noin puolet oli yliaaltojen aiheuttamaa. Virran THD-arvo voi kuitenkin olla hieman harhaanjohtavan suuri ja parempi mittari onkin korkeimpaan kuormitusvirtaan suhteutettu TDD-arvo. Vaiheen 1 THD-arvot ovat nähtävissä voltteina ajan funktiona kuvassa 64 ja THD:t ampeereina ajan funktiona kuvassa 65.

**Taulukko 24.** Jännitteen THD-arvot 25.10. – 2.11.2019.

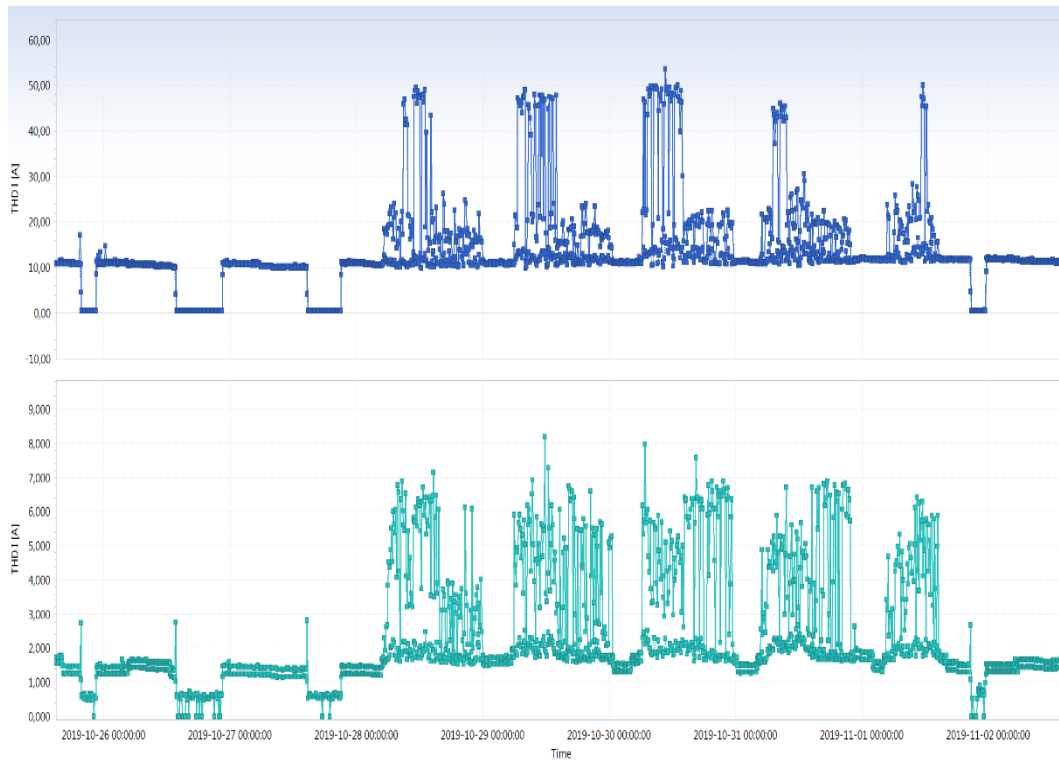
THD U	25.10. – 2.11.2019	20.11. – 28.11.2018
U1 max	2,67 %	2,51 %
U1 min	0,81 %	1,07 %
U2 max	2,57 %	2,64 %
U2 min	0,85 %	0,99 %
U3 max	2,65 %	2,54 %
U3 min	0,81 %	1,19 %
UN max	40,64 %	31,58 %
UN min	38,89 %	0 %



**Kuva 64.** Vaiheen L1 ja LN jännitteen THD voltteina ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.

**Taulukko 25.** Virran THD-arvot 25.10. – 2.11.2019.

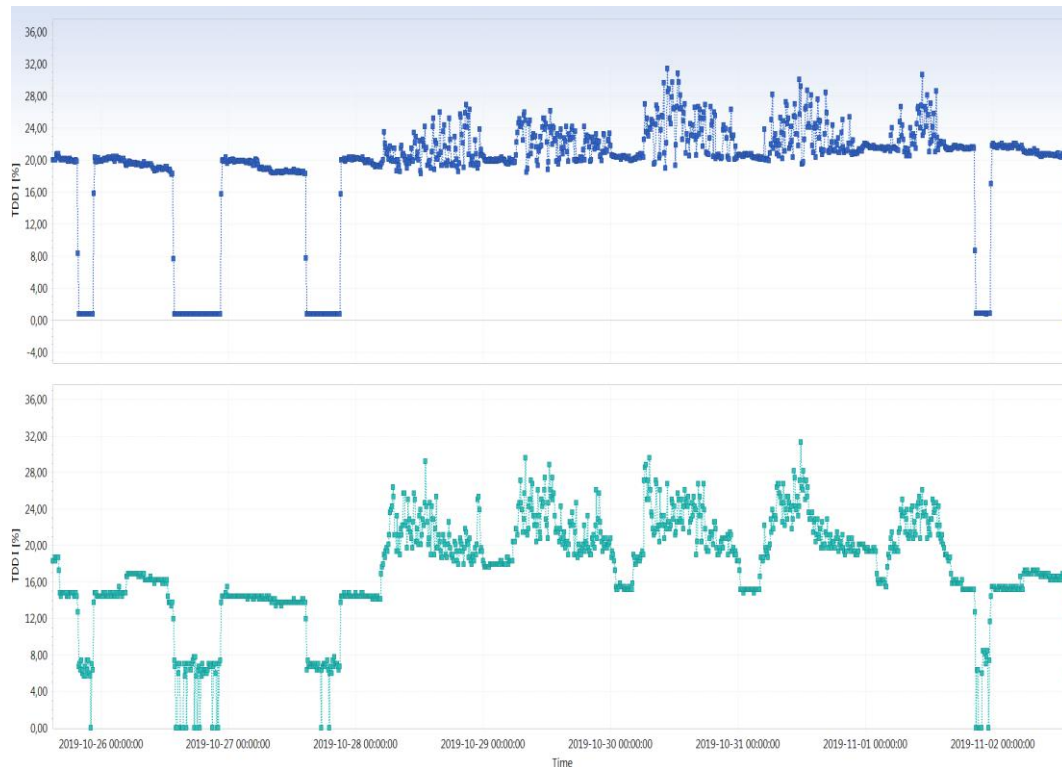
THD I	25.10. – 2.11.2019	20.11. – 28.11.2018
I1 max	49,18 %	29,64 %
I1 min	27,19 %	7,23 %
I2 max	52,94 %	31,21 %
I2 min	26,25 %	7,92 %
I3 max	48,25 %	31,14 %
I3 min	24,63 %	7,01 %
IN max	68,57 %	61,70 %
IN min	0,00 %	15,9 %



**Kuva 65.** Vaiheen L1 ja LN virran THD voltteina ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.

### TDD

Korkeimmillaan TDD-arvo L1-vaiheella oli 31,42 %, kun se aikaisemmassa mittauksessa oli 15,11%. Matalimmillaan vaiheen L1 TDD oli 0,78%, sen aikaisemmin ollessa 1,07%. Vaiheella L2 TDD oli korkeimmillaan 31,02% ja matalimmillaan 0,85%. Aikaisemmassa mittauksessa vastaavat arvot olivat 15,2% ja 1,11%. Vaiheen L3 suurin TDD-arvo oli 30,76%, kun se aikaisemmassa mittauksessa oli 14,53%. Matalin TDD:n arvo oli 0,91%, kun se aikaisemmin oli 0,99%. Myös nollajohtimella TDD oli noussut, vaikkakin ei yhtä merkittävästi kuin vaihejohtimien. Korkeimmillaan nollajohtimen TDD oli 31,34% ja matalin arvo oli nolla prosenttia. Aikaisemmassa mittauksessa vastaava arvo oli 26,36% ja matalimmillaan 12,73%. Vaiheiden L1 ja LN TDD-arvot prosentteina ajan funktiona ovat esitettyinä kuvassa 66.



**Kuva 66.** Vaiheen L1 ja LN jännitteen TDD prosentteina ajan funktiona 25.10. – 2.11.2019.

### Yliaallot

Taulukossa 26 on nähtävissä vaiheen L1 yliaaltojen suuruudet jännitteen sekä virran arvoina perusaallosta viidenteentoista yliaaltoon saakka. Taulukossa 27 vaiheen L2 arvot ja L3-vaiheen arvot taulukossa 28. Taulukossa 29 on nollajohdon arvot. Taulukoissa on jokaisen vaiheen perusaallon ja yliaaltojen jännitteen ja virran hetkelliset huippuarvot, sekä korkeimmat ja matalimmat kymmenen minuutin keskiarvot. Taulukossa 30 on standardin SFS-EN-50160 mukainen vertailu yliaaltojen osuudesta perusaaltoon nähden prosentteina. Kun sen arvoja verrataan taulukon 1 arvoihin, on nähtävissä se, että jännitteen yliaaltojen osuudet ovat pieniä, ja ne ovat standardin sallimissa rajoissa. Prosenttiosuudet on laskettu jakamalla yliaallon jännite perusaallon jännitteellä.

**Taulukko 26.** L1-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019.

L1 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	240,2	8,9	7,3	2,9	2,2	1,6	1,7	1,3
MAX avg	239,6	1,2	5,7	2,5	1,1	1,2	1,3	0,4
MIN avg	230	0,1	1,1	0,1	0,3	0	0,1	0

L1 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	236,94	46,8	31,17	16,05	6,6	11,61	5,31	2,82
MAX avg	51	8,31	13,92	7,74	0,81	4,83	1,89	0,33
MIN avg	1,1	0,12	0,12	0,09	0,09	0,09	0,09	0,06

**Taulukko 27.** L2-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019.

L2 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	240,2	8,9	7,3	2,9	2,2	1,6	1,7	1,3
MAX avg	239,6	1,2	5,7	2,5	1,1	1,2	1,3	0,4
MIN avg	230	0,1	1,1	0,1	0,3	0	0,1	0

L2 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	109,89	21,81	26,64	15,75	2,91	11,47	4,89	1,83
MAX avg	53,1	7,26	14,22	8,1	0,81	4,65	1,95	0,33
MIN avg	0,75	0,18	0,09	0,09	0,09	0,12	0,15	0,09

**Taulukko 28.** L3-vaiheen yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019.

L3 U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	240,8	9,1	6,8	2,7	0,9	1,7	2,1	1,3
MAX avg	240,4	1	5,7	2,4	0,1	1,2	1,8	0,3
MIN avg	231	0,1	1,2	0,1	2	0	0,1	0

L3 I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	257,4	41,88	28,05	15,63	6,18	10,08	5,34	2,43
MAX avg	53,1	9,84	13,62	8,01	0,75	4,32	2,04	0,39
MIN avg	1,08	0,21	0,15	0,15	0,09	0,12	0,06	0,06

**Taulukko 29.** Nollajohdon yliaaltojen jännitteen ja virran arvot 25.10. – 2.11.2019.

LN U	1. [V]	3. [V]	5. [V]	7. [V]	9. [V]	11. [V]	13. [V]	15. [V]
MAX	48,1	21,8	3,5	4,8	2,6	2,1	1,7	1,2
MAX avg	47,9	20,5	3,1	3,6	2,3	1	1,5	0,8
MIN avg	44,4	18,6	1,9	2,3	1,7	0,2	0,9	0

LN I	1. [A]	3. [A]	5. [A]	7. [A]	9. [A]	11. [A]	13. [A]	15. [A]
MAX	22,83	7,32	4,89	2,64	1,71	1,56	0,99	0,66
MAX avg	8,04	2,16	1,2	0,9	0,36	0,51	0,3	0,18
MIN avg	0	0	0	0	0	0	0	0

**Taulukko 30.** Vaihejohtimien yliaaltojen kymmenen minuutin keskiarvojen korkeimmat arvot prosentteina 25.10. – 2.11.2019.

Avg Umax [%]	3. [%]	5. [%]	7. [%]	9. [%]	11. [%]	13. [%]	15. [%]
L1	0,52 %	2,45 %	1,06 %	0,47 %	0,51 %	0,55 %	0,17 %
L2	0,51 %	2,36 %	0,98 %	0,43 %	0,51 %	0,64 %	0,29 %
L3	0,43 %	2,44 %	1,02 %	0,39 %	0,51 %	0,77 %	0,13 %
SFS-EN-50160	5,0 %	6,0 %	5,0 %	1,5 %	3,5 %	3,0 %	0,5 %

## LIITE 5



METREL®

**Metrel MI-2592 PowerQ4**

*energia-analysaattori  
kolmivaiheverkon analysointiin*

**Uutuus:**  
4-kanavainen malli!



*Paikallista sähkönlaatuun liittyvät ongelmat nopeasti ja tarkasti*


*Mittaa virtaa ja jännitettä kolmesta vaiheesta sekä nolajohtimesta samanaikaisesti*

Metrel MI-2592 on kädessä pidettävä ja helppokäyttöinen energia-analysaattori kolmivaiheverkon analysointiin, monitorointiin sekä vianhakuun. MI-2592:n neljä kanavaa mittaa samanaikaisesti virtaa ja jännitettä, joka tekee siitä entistä nopeamman ja luotettavamman työkalun verkon ongelmien selvittämiseen. MI-2592:n monipuoliset ja helppokäyttöiset toiminnot, yhdistettynä uuteen PowerView-ohjelmistoon, tarjoaa käyttäjälleen helpon tavan tulostaa, analysoida ja tallentaa mittaustuloksia. MI-2592 on ensimmäinen kädessä pidettävä analysaattori, joka on IEC 61000-4-30 luokka S ja IEC 61557-12 standardin mukainen.

**Ominaisuuksia:**

- 4 jännitekanavaa, 0...1000 Vrms (Cat III 1000V)
- 4 virtakanavaa, automaattisella pihdintunnistuksella
- Reaaliaikaiset mittaukset (U, I, P, Q, S, PF, cosφ, THD)
- EN50160-mittaus sekä välkyntä
- 4-kvadrantimittaus (generaattorit ja kuormat, kapasitiivinen tai induktiivinen)
- Yhteensä 509 erilaista parametria voidaan analysoida tai tallentaa samanaikaisesti
- 8 MB muisti mahdollistaa yli 4 viikon yhtäjaksoisen mittauksen
- PowerQ4 on IEC 61000-4-30 luokka S, sähkönlaadun standardin mukainen
- Tehomittaukset on IEC 61557-12 ja IEEE 1448 mukaiset
- Suuri ja selkeä 320x200 pisteen LCD-näyttö
- Reaaliaikaiset Scope-, Trend-mittaustoiminnot
- Taipuisat virtapihdit, jotka toimivat ilman ulkoista jännitelähdettä
- 8-kanavan 16-bitininen samanaikainen mittaus
- Jopa 15 tunnin toiminta-aika yhdellä latauksella
- Tehokas PowerView-ohjelmisto
- Jännite TRMS, huippuarvo ja CF (4 kanavaa)
- Virta TRMS, huippuarvo ja CF (4 kanavaa)
- Teho (pätöteho, näennäisteho ja loisteho)
- Tehokerroin, cosφ
- Välkyntämittaus
- Harmoonisten analysointi 50 harmooniseen asti, THD
- Energiamittaukset generaattorit ja kuormat, kapasitiivinen tai induktiivinen
- Sähkönlaadun analysointi EN50160
- Katkoksien, jännitealenemien kuoppien tallennus
- Käynnistysvirtojen tarkkailu ja tallennus
- Tallennus (10 asetettavaa hälytystä)
- Aaltomuodon näyttö

**Kuva 67.** Metrel MI-2592-datalehti, sivu 1.

 **METREL**<sup>®</sup>

**Teknisiä tietoja:**

**AC-jännite**  
 Sisääntulokanavat: 4 kpl  
 Jännitealue: 5 ... 1500 Vrms L – N  
 (20 ... 2600 Vrms L – L)  
 Tarkkuus: 0,2 % lukemasta  
 Resoluutio: 10 mV, 100 mV  
 Näytteenottataajuus: 1024 kpl / 10 sek  
 Taajuusalue: 10 ... 70 Hz

**AC-virta**  
 Sisääntulokanavat: 4 kpl  
 Sisääntulojännite: 20,0 mVrms ... 2 Vrms  
 Mittausvirta: 3...6000 A (pihdit A1227)  
 Resoluutio: 0,1 mV (0,1 A pihdit A1227)  
 Tarkkuus: 0,25 % lukemasta  
 Näytteenottataajuus: 1024 kpl / 10 periodi

Toiminnot	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus
Taajuus:	10,00...70,00 Hz	2 mHz	±10 mHz
Teho	0,000k...9,999 M	4 dig	±0,5 % lukemasta
Tehokerroin	-1,00...1,00	0,01	±0,02 %
cosφ	0,00...1,00	0,01	±0,02 %
	Uhn < 3 % Unom	10 mV	±0,15 % Unom
	3 % U4nom		
Harmooniset	< Uhn < 20 % Unom	10 mV	5% Uhn
50 asti	lhn < 10 % IN	10 mV	±0,15 % IN
	10 % IN < lhN		
	< 100 % IN	10 mV	5% InN
	0 % Unom < THDU		
	< 20 % Unom	0,1 %	±0,3
	0 % IN < THDI		
THD	< 100 % IN	0,1 %	±0,6
	100 % IN < THDI		
	< 200 % IN	0,1 %	±1,5

**Jänniteenalenema**  
 Suuruus: 20...1500 V  
 10 mV, 100 mV 0,5 % lukemasta  
 Kesto: 30 ms...168 h ; 1 ms ; ±20% ms

**Tallennus**  
 Intg.priori: 1 ... 3600 s  
 Maks. parametrit: 509  
 Portit: USB, RS232  
 Näyttö: LCD, 320x200  
 Muistimoduuli: 8 MB flash  
 Käyttöjännite: 230 VAC tai 6x1,2 V akkuparisto  
 Ylijännite: 1000 V CAT III, 600 V CAT IV  
 Suojaus: Kaksoiseristys  
 Koko / paino: 220x115x90 mm / 0,65 kg

**Peruspaketti**

- Power Q4 -mittalaite
- 1-vaihe taipuisat virtapihdit 3 kA, 300 A 30 A 4 kpl (A1227)
- Mittapää punainen 3 kpl
- Mittapää musta 1 kpl
- Krokotiili punainen 3 kpl
- Krokotiili musta 1 kpl
- Mittajohdin musta 1 kpl
- Mittajohdin vihreä 1 kpl
- Mittajohdin punainen 3 kpl
- PC-ohjelmisto PowerView
- Muuntaja
- 1,2 V NIMH akkuparistot 6 kpl
- Kantolaukku
- Instruction manual
- Kalibraatiotodistus

**Lisätarvikkeet**

A1020, kantolaukku

A1037, virtamuuntaja 5 A / 1 V

A1069, virtapihti 100 A / 1 V

A1122, virtapihti 5 A / 1 V

S2014, sulakeadapterit

**Kuva 68.** Metrel MI-2592-datalehti, sivu 2.



## LIITE 6

## Estokelaparisto - D-sarja



## Tuotteen ominaisuudet

D-sarjan paristot on tarkoitettu suuritehoisten keskusten loistehon kompensointiin. Vakio por - raskoot : 3.13, 6.5, 1.5, 5, 37.5, 50 ja 75 kvar. Paristo on varustettu oven alapuolella olevalla il - mansuodatinkasetilla, joka vaihdettavissa ovea avaamatta. Muita ominaisuuksia; loistehonsäädin pariston ovessa, kaapeliliityntä joko ylhäältä tai al - haalta, paristossa tila kytkinvarokkeelle.



1. Tuuletin
2. Loistehonsäädin
3. Sulakkeet
4. Kontaktorit
5. Kuristin
6. Kondensaattori yksiköt
7. Ilmansuodatin

**Kuva 69.** Nokian Capacitors D-sarjan estokelapariston ominaisuudet.

### Tekniset tiedot

Nimellisjännite	400 V...690 V
Nimellistaajuus	50 Hz tai 60 Hz
Nimellisteho	45...450 kvar
Tehoportaiden määrä	3...7
Viritystaajuus	189 Hz ja 141 Hz (muut taajuudet kysyttäessä)
Eristys taso	3 kV
Sallittu jatkuva ylijännite	1.1 x Un
Yliaaltomitoitus	IEC 1000-- mukaisesti
Asennusolosuhteet	sisäasennus
Kotelointiluokka	IPOC
Lämpötilaluokka	0°C ...+40°C
	Keskiarvo 4h: +35°C
	Keskiarvo 1 vuosi: +5°C
Mitat (levxsvxkorkeus)	600 x 600 x 1800 mm
(vaihtoehto korkeus 000mm)	<b>800 x 600 x 1800 mm</b>
(vaihtoehto korkeus 000mm)	1000 x 600 x 1800 mm
(vaihtoehto korkeus 000mm)	100 x 600 x 1800 mm
Paino	180...610 kg
Väri	RAL703 (vaalean harmaa)
Normi	IEC 60831 – 1&, EN 60439-1

#### Asiakkaan edut

- modulaarinen selkeä rakenne
- laajennettavuus

#### Tyypillisiä kohteita

- toimistorakennukset
- kauppakeskukset,
- teollisuus
- kiinteistöt

#### Sovellukset

- tehokertoimen parantaminen yliaaltopitoisissa verkoissa

**Kuva 70.** Nokian Capacitors D-sarjan estokelapariston tekniset tiedot.