



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Lampinen Jarkko

KUNNOSSAPIDON MITTAUKSET
KOLMIVAIHE-
TEHOANALYSAATTORIN AVULLA

PeakTech 4145 Kolmivaiheinen tehoanalysointori

Tekniikka
2016

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jarkko Lampinen
Opinnäytetyön nimi	Kunnossapidon mittaukset kolmivaihetehoanalysointorin avulla
Vuosi	2016
Kieli	suomi
Sivumäärä	59
Ohjaaja	Västi Mikko

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä selkeäsanainen tulkintaohjeistus kolmivaiheisen tehoanalysointorin mittaustulosten analysointiin ja selvittää mitattavassa kohteessa olevat ongelmat ja esitellä niihin mahdolliset ratkaisut. Työ tehtiin Trifitec Finland Oy:lle keväällä 2016.

Työssä tutustuttiin SFS-EN 50160 -standardin asettamiin vaatimuksiin pienjaka-
verkon sähkön laadusta ja kuinka laadun mittaukset tulisi standardin mukaan suorittaa. Kerätyn materiaalin pohjalta tehtiin mittaustulosten tulkintaohjeistus, missä käydään läpi yksi kerrallaan mitattavat suureet, kuinka niiden mittaus tapahtuu, millaiset vaatimukset standardi asettaa sähkön laadulle ja kuinka mahdolliset ongelmat voitaisiin korjata.

Työssä toteutettiin mittaukset Järvisuon ammatti-instituutin Kurejoen toimipisteen opetusmaatilán navettarakennuksen pääkeskukseen. Mittaustulokset analysoitiin luodun tulkintaohjeistuksen perusteella. Mittaustuloksien perusteella tulkittiin, että kohteessa on muutamia sähkötekniisiä ongelmia, joihin ehdotettiin mahdollisia korjaustoimenpiteitä ongelmien korjaamiseksi.

ABSTRACT

Author	Jarkko Lampinen
Title	Maintenance Measurements Using Three-Phase Power Analyzer
Year	2016
Language	Finnish
Pages	59
Name of Supervisor	Västi Mikko

The purpose of this thesis was to make a clear interpretations instruction for three-phase power analyzer measurements. The instructions contain guidelines how to determine the issues of the measured site. In addition, the instructions also contain possible solutions to typical issues. The thesis was made for Trifitek Finland Oy in the spring of 2016

The thesis examined the SFS-EN 50160 standard, which sets requirements to the quality of electricity in the low voltage distribution network and how the quality of the measurements should be according to the standard. On the basis of the collected material interpretation of the measurement instructions were made, which go through one by one the measurement variables: how the measurement is done, what requirements the standard sets to power quality and how potential problems could be repaired. The measurements were made for Kurejoki's office of Järviseudun Ammatti-instituutti and more specific for the main exchange of farm's cowhouse. The measurement results were analysed using interpretation instructions. Based on the interpretation of the instructions some issues were found and possible solutions to them were determined.

Keywords Interpretation instructions, three phase power analyzer, measurement result, reactive power, harmonic wave

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT

1	JOHDANTO	10
2	TEHOANALYSAATTORILLA SUORITETTAVAT MITTAUKSET	12
	2.1 Mittalaitteen käyttötarkoitus	12
	2.2 Mitattavat suureet.....	13
	2.2.1 Jännite, virta ja taajuus	13
	2.2.2 Heilunta, kuopat ja kohoumat	14
	2.2.3 Yliaallot.....	15
	2.2.4 Teho ja energia.....	17
	2.2.5 Välkyntä ja vinokuorma.....	18
	2.2.6 Transientit ja käynnistysvirrat.....	19
3	KÄYTETTÄVÄ MITTALAITE.....	21
	3.1 Mittalaitteen ominaisuudet.....	21
	3.2 Mittalaitteen käyttö	22
4	MITTAUKSET.....	26
	4.1 Mitattava kohde	26
	4.2 Mittausten toteutus.....	26
5	MITTAUSTULOSTEN TULKINTAOHJE.....	28
	5.1 Jännite-, virta- ja taajuusmittaukset	28
	5.2 Heilunta, kuopat ja kohoumat	29
	5.3 Yliaallot ja THD	30
	5.4 Tehomittaukset.....	31
	5.5 Välkyntä ja vinokuormitus.....	32
	5.6 Transientit ja käynnistysvirrat.....	33
6	MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI.....	34
	6.1 Jännite-, virta- ja taajuusmittaukset	35
	6.1.1 Jännitemittaustulokset ja niiden analysointi	35

6.1.2	Virran mittaustulokset ja niiden analysointi	36
6.1.3	Taajuusmittaustulokset ja niiden analysointi	38
6.2	Yliaaltomittaukset	39
6.2.1	Jänniteyliaallot	39
6.2.2	Kokonaissärö THD.....	43
6.3	Teho- ja energiamittaukset.....	43
6.3.1	Tehomittaukset ja mittaustulosten analysointi.....	44
6.3.2	Energiamittaukset ja mittaustulosten analysointi.....	51
6.4	Vinokuormitusmittaukset.....	53
6.4.1	Jännitteen epäsymmetria	53
6.4.2	Vinokuormitus	54
6.5	Loppupäätelmät.....	55
7	YHTEENVETO	56
	LÄHTEET.....	58

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuvio 1. Työprosessin kuvaus.....	11
Kuvio 2. Erilaisia mittalaitteita.....	12
Kuvio 3. Jännitekuopan kuvaaja.....	15
Kuvio 4. Ylijännitekohouman kuvaaja.....	15
Kuvio 5. Viides yliaalto summautuu perustajuisen signaalin kanssa ja näin vääristää sinikäyrää.	16
Kuvio 6. Tehokolmio.....	18
Kuvio 7. PeakTech 4145 -kolmivaihetehoanalysointilaite.....	21
Kuvio 8. Mittalaitteen kytkentä.....	22
Kuvio 9. Mittalaitteen trendinäyttö.....	24
Kuvio 10. Mittalaitteen oskilloskooppinäyttö.....	24
Kuvio 11. Mittalaitteen vektorinäyttö.....	25
Kuvio 12. Mittalaitteen pylväsnäyttö.....	25
Kuvio 13. Mittalaite on kytkettynä syöttökaapeliin mittauksia varten.....	27
Kuva 14. Sallitut välkyntämäärät jännitteen muutoksen ja muutosmäärän suhteen.	32
Kuvio 15. Mittaustulosten analysointiprosessi.....	34
Kuvio 16. Vaiheen L1 jännitteen tehollisarvo.....	35
Kuvio 17. Vaiheen L1jännitteen huippukertoimen kuvaaja.....	36
Kuvio 18. Vaiheen L1 virran tehollisarvo.....	36
Kuvio 19. Vaiheen L3 virran tehollisarvo.....	37
Kuvio 20. Vaiheen L3 virran huippukerroinkuvaaja.....	38
Kuvio 21. Verkon taajuuden kuvaaja.....	38
Kuvio 22. Vaiheen L1 jännitteen perusaallon tehollisarvokuvaaja.....	39
Kuvio 23. Vaiheen L1 jännitteen 2. yliaallon kuvaaja. Verkon 2. yliaalto on tyypillisesti pieni.....	40
Kuvio 24. Vaiheen L1 jännitteen 3. yliaallon kuvaaja.....	40
Kuvio 25. Vaiheen L1 6. jännite yliaallon kuvaaja.....	41
Kuvio 26. Vaiheen L1 jännitteen THD:n kuvaaja.....	43
Kuvio 27. Järjestelmän kokonaispätötehon kuvaaja.....	44
Kuvio 28. Vaiheen L1 pätötehon kuvaaja.....	45

Kuvio 29. Vaiheen L2 pätötehon kuvaaja.	45
Kuvio 30. Vaiheen L3 pätötehon kuvaaja.	46
Kuvio 31. Järjestelmän kokonaisloistehon kuvaaja.	46
Kuvio 32. Vaiheen L1 loistehon kuvaaja.	47
Kuvio 33. Vaiheen L2 loistehon kuvaaja.	48
Kuvio 34. Vaiheen L3 loistehon kuvaaja.	48
Kuvio 35. Järjestelmän näennäistehon kuvaaja.	49
Kuvio 36. Vaiheen L1 näennäistehon kuvaaja.	49
Kuvio 37. Vaiheen L2 näennäistehon kuvaaja.	50
Kuvio 38. Vaiheen L3 näennäistehon kuvaaja.	50
Kuvio 39. Kiinteistön pätötehon kulutus, kuvassa esitetyllä ajanjaksolla.	51
Kuvio 40. Kiinteistön energiankulutus kilovolttiampeeerituntina kuvassa esitetyllä ajanjaksolla.	52
Kuvio 41. Jännitteen vinokuormitus prosentteina.	53
Kuvio 42. Vinokuormituksen vastakomponentti.	54
Kuvio 43. Nollavirta prosentteina.	54
Taulukko 1. Jännitekuoppien tilastointiin käytettävä taulukko	30
Taulukko 2. Ylijännitteiden tilastointiin käytettävä taulukko	30
Taulukko 3. Standardin SFS-EN 50160 mukaiset harmonisten yliaaltojen raja-arvot.	31
Taulukko 4. Taulukko harmonisten jänniteyliaaltojen analysointituloksista.	42

LYHENTEET JA MERKINNÄT

φ	kulmakerroin phi
μs	mikrosekunti
A	virran mittayksikkö ampeeri
A(L1)	mittalaitteenliitin vaiheelle L1
B(L2)	mittalaitteenliitin vaiheelle L2
BNC-liitin	Bayonet Neill-Concelman –liitin, mittalaitteen virtamittausliitinten tyyppi
C(L1)	mittalaitteenliitin vaiheelle L3
CF	Crest Factor, huippukerroin
GB	Gigabyte eli gigatavu, tallennuskapasiteetin yksikkö
gG-sulake	gG on sulakkeen tyyppi, tarkoittaa yleiskäyttöön tarkoitettua sulaketta, jonka katkaisukyky käsittää koko virta-alueen
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö
$I_{\text{neg}}(\%)$	virran vastakomponentin osuus myötäkomponentista
$I_{\text{zero}}(\%)$	virran nollakomponentin osuus myötäkomponentista
kV	jännitteen yksikkö, kilovoltti
kVA	näennäistehon yksikkö, kilovolttiampeeri
kVA _r	loistehon yksikkö, kilovari
kVA _h	näennäisenergian yksikkö, kilovolttiampeeritunti
kVA _r h	loisenergian yksikkö, kilovaritunti

kW	pätötehon yksikkö, kilovatti
kWh	pätoenergian yksikkö, kilovattitunti
LAN	Local Area Network eli lähiverkko
L1	sähköjärjestelmän ensimmäinen vaihe
L2	sähköjärjestelmän toinen vaihe
L3	sähköjärjestelmän kolmas vaihe
N	sähköjärjestelmän nollajohdin
N(N)	mittalaitteen liitin nollajohtimelle
Plt	välkynnän pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi
Pst	välkynnän lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi
P	pätöteho
Q	loisteho
S	näennäisteho
THD	Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö
UIE-IEC	välkynnän mittausmenetelmä
USB-liitin	Universal Serial Bus -tyyppinen liitin

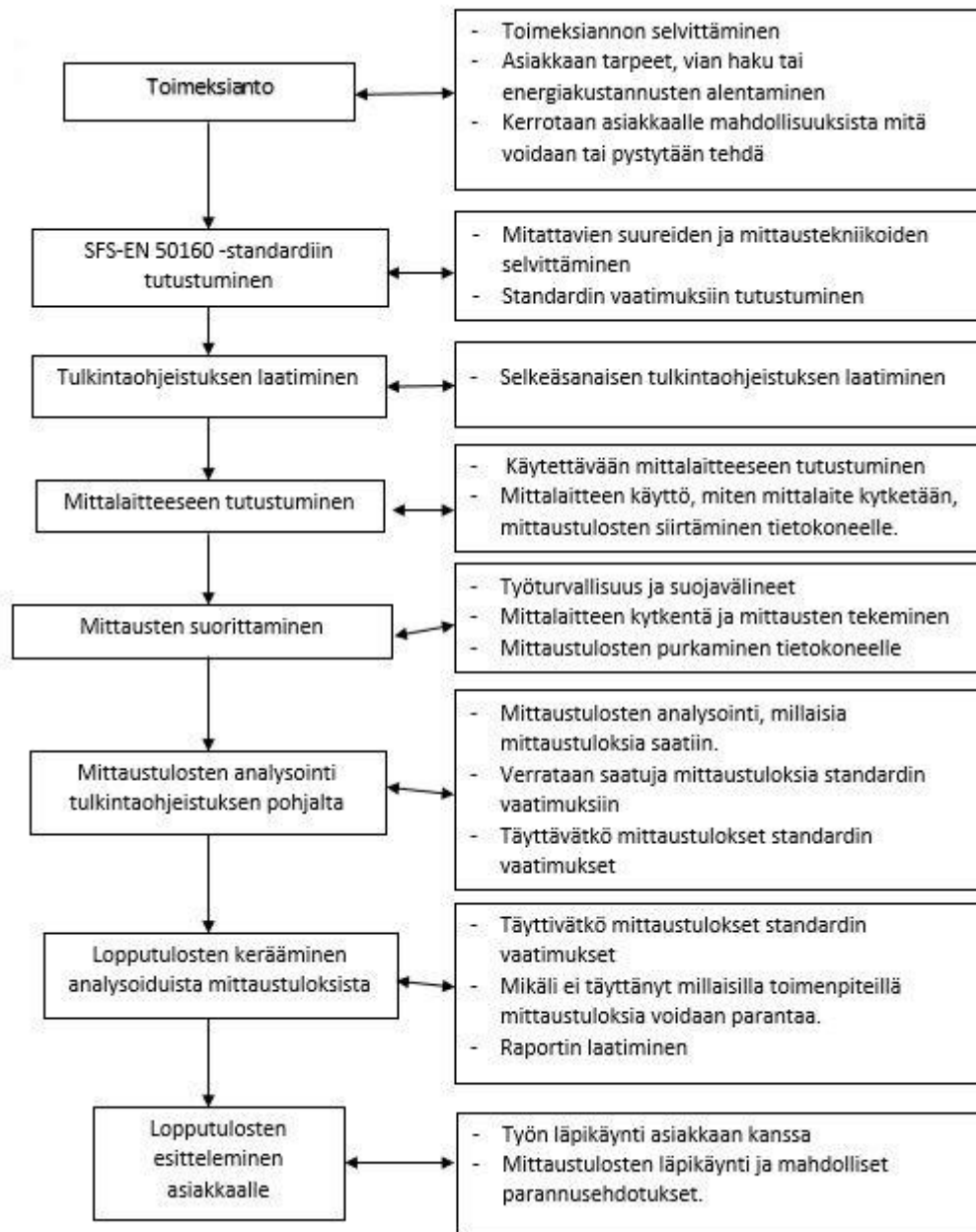
1 JOHDANTO

Sähköverkkoja kehitetään jatkuvasti ja sähkön laadun tarkkailuun kiinnitetään entistä enemmän huomiota. Myös sähköverkon kunnossapitoon liittyvien mittausten merkitys kasvaa, kun häiriöitä aiheuttavat komponentit lisääntyvät, tällaisia laitteita ovat esimerkiksi verkkoon kytketyt taajuusmuuttajat. Tämän takia myös sähkön laatua analysoivien mittalaitteiden kehitys ja ennen kaikkea käyttö on lisääntynyt merkittävästi. Kuitenkaan pelkästä mittalaitteella mittaamisesta ei juuri ole hyötyä, vaan on osattava myös tulkita mittaustuloksia oikein. Tämän työn tavoitteena on tehdä selkeä sanainen tulkintaohjeistus kolmivaiheisen tehoanalysaattorin mittaustulosten analysointiin ja selvittää mitattavassa kohteessa olevat ongelmat ja tuoda niihin mahdolliset ratkaisut.

Opinnäytetyö toteutettiin Trifitek Finland Oy:lle keväällä 2016. Työssä tehtiin mitaukset PeakTech 4145 -kolmivaiheisella tehoanalysaattorilla Järviseudun ammatti-instituutin Kurejoen toimipisteen opetusmaatilan navettarakennuksessa olevalle pääkeskukselle. Keskuksen kautta syötetään navettarakennuksen lisäksi useita muita rakennuksia, joissa sijaitsee opetus- ja toimistotiloja.

Kiinteistön pääkeskuksen kautta syötetään merkittävää määrää loistevalaisimia sekä suuria moottoreita, jotka käynnistyvät useita kertoja päivän aikana. Kiinteistö olikin erinomainen kohde mittausten suorittamiseen.

Työn ensimmäisessä osassa käydään läpi niitä mittauksia, joita sähköverkosta mitataan. Samalla tarkastellaan sähköverkon mittauksia SFS-EN 50160 -standardin pohjalta ja tehdään mittaustulosten tulkintaohje standardin ja muun kerätyn materiaalin pohjalta. Työn toisessa osassa tutustutaan käytettävän mittalaitteen ominaisuuksiin, esitellään mitattava kohde ja kohteelle tehtävät mitaukset. Kolmannessa osassa analysoidaan mittaustulokset tehdyn tulkintaohjeistuksen pohjalta ja esitellään suositellut korjaavat toimenpiteet. Työkokonaisuuden rakenne on kuvattu kuviossa 1.



Kuvio 1. Työprosessin kuvaus

2 TEHOANALYSAATTORILLA SUORITETTAVAT MITTAUKSET

Seuraavassa osiossa käydään läpi yleisesti tehoanalysaattorilla suoritettavia kunnossapitomittauksia. Lisäksi tarkastellaan sitä, millaisiin käyttötarkoituksiin mittalaitetta käytetään sekä millaisia hyötyjä mittalaitteen käytöstä ja mittaustulosten oikeaoppisesta tulkinnasta on käyttäjälle.

2.1 Mittalaitteen käyttötarkoitus

Tehoanalysaattori on sähköverkon tilan analysointi mittauksiin tarkoitettu mittalaitte. Analysaattoria voidaan käyttää tutkittaessa yksittäisen kuormituksen verkko-vaikutuksia tai tutkittaessa verkon tilaa pidemmällä aikavälillä. Tehoanalysaattoreita käytetään niin sähkötekniikan laboratorioissa kuin asennusliikkeissä ja sähkölaitoksilla. Mittalaitteen pääasialliset käyttökohteet ovat sähkön laadun tarkkailussa ja vianetsinnässä. Tehoanalysaattoreita löytyy räätälöityinä moniin erikoiskäyttötarkoituksiin ja käyttökohteisiin. Mittalaitteiden fyysinen koko myös vaihtelee siroista kannettavista yksivaiheisista pihtimallisista mittalaitteista kolmivaiheisiin suuriin pyörillä kulkeviin mittaussyksiköihin.



Kuvio 2. Erilaisia mittalaitteita.

2.2 Mitattavat suureet

Tehoanalysaattorilla mitattaviin suureisiin kuuluu muun muassa jännite, virta ja niiden käyrämuodot sekä taajuus, jännitetason heilunta, jännitekuoppien ja kohoumien mittaaminen. Tehoanalysaattorilla pystytään mittaamaan myös sähköverkon yliaallot, mikä on hyvin merkittävä osa sähköjäljennön laadun tarkkailua ja sähköverkon kunnossapitoa. Mittalaitteella pystytään mittaamaan myös kuormitustehot ja kuorman kuluttamat energiat. Välyntä- ja vinokuormitusmittaukset voidaan yleensä tehdä tehoanalysaattorin avulla ja tarkastella vikatilanteiden aiheuttamia transienttivirtoja tai moottorien aiheuttamia käynnistysvirtoja. /3,4,11/

SFS-EN 50160 -standardin mukaan verkon tilaa tutkittaessa mitattavat suureet ovat jännitteen tehollisarvo, taajuus, kokonaissärö (THD), yksittäisten harmonisten yliaaltojen tasot, vinokuormitus ja välyntä. Standardi määrittelee sen, miten mitattavia suureita tarkastellaan. Esimerkiksi jännitettä ja sen muutoksia tarkastellaan viikon aikana mitattujen kymmenen minuutin keskiarvojen perusteella. Tämä tarkoittaa kaikkiaan 1008 mittaustulosta. Mittalaitteen mittaustuloksista pystytään analysoimaan mitatun sähköjärjestelmän tila /12/. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty mitattavia suureita, niiden mittausta ja mittaustulosten tulkintaa.

2.2.1 Jännite, virta ja taajuus

Verkonjännitteen mittauksessa mitataan ja tarkastellaan jännitteen tehollisarvoa sekä sen käyrämuotoa. Käyrämuotoa voidaan tarkastella mittalaitteen antaman huippukertoimen (CF) perusteella tai vaihtoehtoisesti tarkastella myös silmämääräisesti mittalaitteen oskilloskooppitoimintaa hyväksi käyttäen. Mittauksen aikana tarkastellaan, kuinka paljon mitattu jännite poikkeaa ilmoitetusta nimellisjännitteestä: /11/ SFS-EN 50160 -standardin mukaisessa jännitteen tarkastelussa tarkastellaan viikon aikana mitattuja jännitteen kymmenen minuutin keskiarvoja. /13/

Virran mittauksessa tarkastellaan verkossa kulkevan virran määrää eli tarkastellaan, ovatko kaikki vaiheet kuormitettu tasaisesti ja ettei mitään vaihetta ylikuormiteta. Lisäksi tarkastellaan virrankäyrämuotoa, joko mittalaitteen laskeman huippukerto-

men (CF) perusteella, tai mittalaitteen oskilloskooppitoiminnon avulla. Huippukerros kuvaa, kuinka säröytynyttä virta tai jännite on. Puhtaalla sinimuotoisella jännitteellä ja virralla huippukertoimen tulisi olla mahdollisimman lähellä 1,41. /1,11/

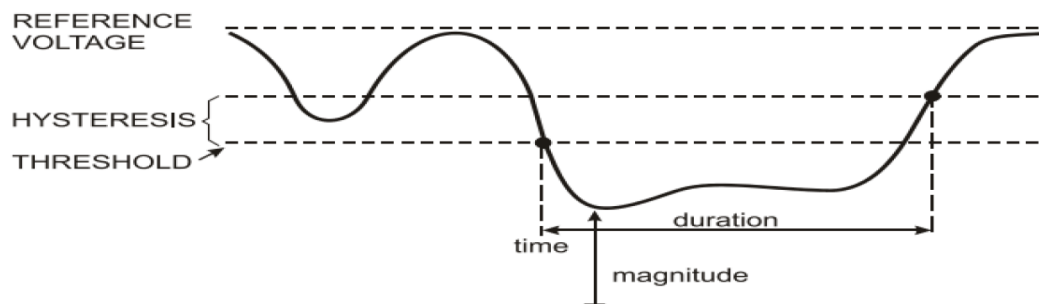
Taajuusmittauksessa tarkastellaan kuinka paljon verkontaajuus eroaa ilmoitetusta nimellistaajuudesta. Mikäli taajuudessa havaitaan merkittäviä heilahteluja tai taajuus on jatkuvasti liian alhainen tai vastaavasti havaitaan selkeää ylitaajuutta, voidaan taajuuden vaihteluja tutkia tarkemmin, esimerkiksi mittalaitteen oskilloskooppitoiminnon avulla ja selvittää, mistä rajut taajuuden muutokset johtuvat. /11/

Sähköverkon taajuus määräytyy Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon taajuuden mukaan ja Suomessa Fingrid Oyj valvoo taajuudensäätöä. Sähkökäyttäjä ei yleensä pysty vaikuttamaan verkon taajuuteen siihen kytketyillä laitteillaan. /2/

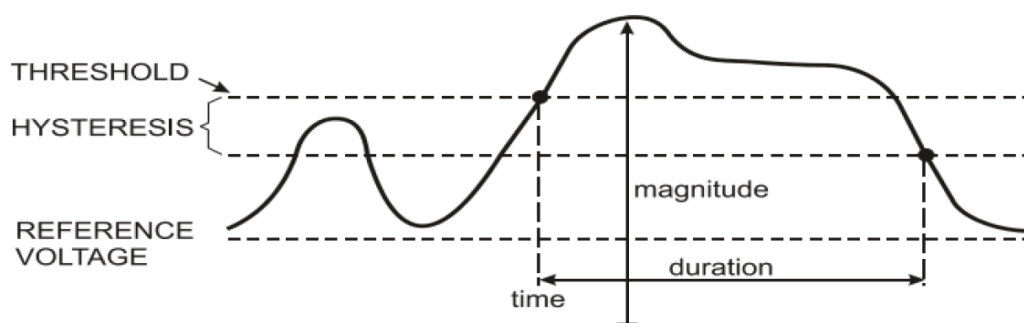
2.2.2 Heilunta, kuopat ja kohoumat

Jännitteen heiluntamittauksilla tarkastellaan, kuinka paljon verkon jännite heiluu verkon käyttötilanteiden aikana. Jännitekuopat (engl. dips) aiheutuvat yleensä verkoon käytön aikana syntyneistä oikosulkuvioista tai muista äärimmäisen suurta virtaa ottavista kuormituksen muutoksista. Jännitteen kohoumat (engl. swells) voivat olla vaiheiden välisiä tai vaiheen ja maan välisiä. Sähköjärjestelmän maadoitustavasta riippuen, vaiheiden ja maan väliset viat saattavat aiheuttaa jännitteen kohoumia terveiden vaiheiden ja maan välille. /11,13/

Jännitekuoppien ja kohoumien mittaukselle pystytään asettamaan havahtumiskynnys, jolloin mittalaite alkaa tallentaa jännitteen muutoksia. Tapahtuman tallennus päättyy, kun jännite on kohonnut tai laskenut mittaushystereesin verran yli asetellusta kynnyksjännitteestä. Näin voidaan jälkikäteen tarkastella sitä, missä tilanteessa jännitekuoppa tai kohouma syntyi. /11/



Kuvio 3. Jännitekuopan kuvaaja

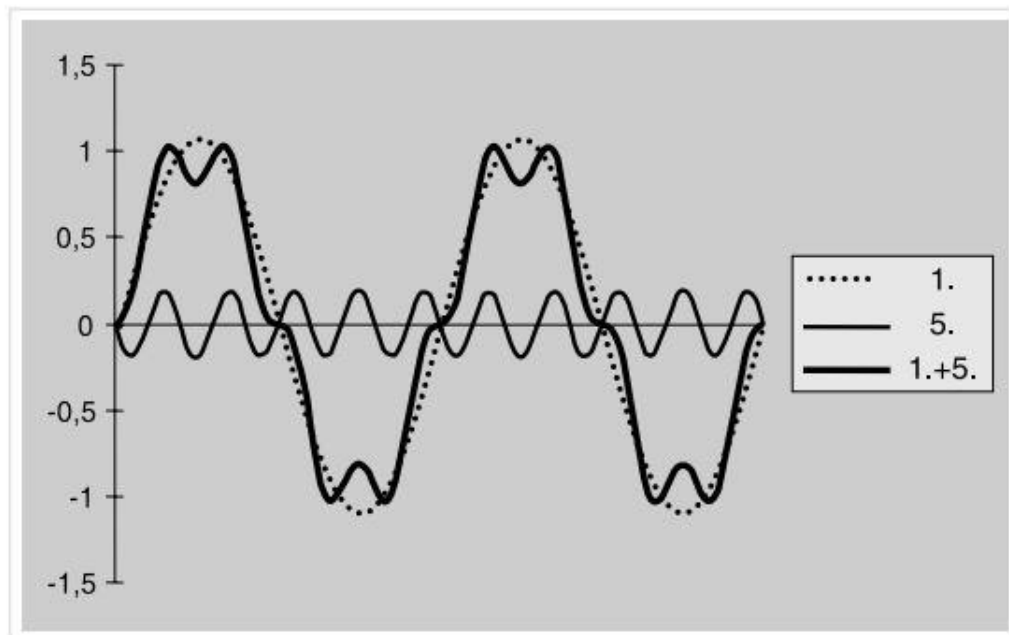


Kuvio 4. Ylijännitekohouman kuvaaja

Jännitekuoppien ja kohoumien tarkempi arviointi on määritelty standardissa EN 61000-4-30. SFS-EN 50160 -standardissa määritetään vain summittaiset raja-arvot ja raportointiin käytetyt taulukot. Jännitekuopat ja kohoumat tilastoidaan taulukoihin tarkempaa arviointia varten. /2,13/

2.2.3 Yliaallot

Harmoniset yliaallot ovat sähköverkossa kulkevia sinimuotoisia jännitteitä, joiden taajuus on jokin jakelujännitteen perusaallon kokonaislukukerrannainen. Tyypillisiä jakeluverkossa esiintyviä yliaaltoja ovat esimerkiksi 3. yliaalto ($3 \cdot 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$) ja 5. yliaalto ($5 \cdot 50 \text{ Hz} = 250 \text{ Hz}$). Epäharmoniset yliaallot ovat myös sinimuotoisia ja kulkevat perustaajuuden signaalin mukana, mutta ne eivät ole taajuudeltaan kokonaislukukerrannaisia perustaajuuden kanssa. Yliaallot vääristävät jännitettä tai virtaa summautuessaan perusaallon kanssa, jolloin puhutaan säröytymisestä. /9/



Kuvio 5. Viides yliaalto summautuu perustaajuisen signaalin kanssa ja näin vääristää sinikäyrää.

Yliaaltoja aiheuttavat verkkoon kytketyt epäsinimäistä virtaa ottavat laitteet. Kotitalouden peruskulutuskojeista suurimpia yliaaltojen aiheuttajia ovat esimerkiksi televisiot ja tietokoneet. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että kaikki elektroniset laitteet aiheuttavat verkkoon yliaaltoja. Teollisuusverkoissa suurimpia yliaaltolähhteitä ovat muun muassa taajuusmuuttajat, hakkuritehonlähteet, purkauslamput ja ylikuormitetut muuntajat. /9,16/

Yliaaltojen vaikutuksesta yliaaltoja synnyttävien laitteiden kanssa samaan sähkönsyöttöön kytketyt muuntajat, kaapelit, moottorit, generaattorit ja kondensaattorit voivat ylikuumentua, mikä lyhentää merkittävästi niiden elinikää. Lisäksi muissa laitteissa saattaa esiintyä erilaisia ongelmia, kuten elektroniset näytöt ja valot saattavat vilkkua, katkaisijat voivat laueta, tietokoneet voivat kaatua tai esimerkiksi mittalaitteet voivat antaa vääriä mittaustuloksia. /16/

Mitä enemmän virta tai jännite sisältää yliaaltoja, sitä säröytyneempiä ne ovat ja sitä vääristyneempi on sinikäyrä. Tätä kuvataan harmonisen kokonaissärön THD:n avulla sillä se kertoo, kuinka monta prosenttia kokonaisvirrassa on yliaaltoja. /13/

2.2.4 Teho ja energia

Verkossa kulkevaa ja sitä kuormittavaa sähkötehoa kutsutaan näennäistehoksi S . Näennäisteho muodostuu kahdesta eri tehokomponentista, jotka ovat pätöteho P ja loisteho Q . Pätöteho on näennäistehon työtä tekevä komponentti, joka saa esimerkiksi hehkulampun palamaan ja vastuksen lämpenemään. Loisteho taas, nimensä mukaisesti vain, siirtyy loisena sähköverkossa kulkevan tehon mukana ja kuormittaa siten sähköverkkoa. Loisteho voidaan vielä jakaa kahteen komponenttiin: induktiiviseen ja kapasitiiviseen loistehoon. Induktiiviset laitteet (kelat) ottavat verkosta loistehoa. Tällöin jännitteen ja virran välille muodostuu vaihesiirtokulma φ . Kulma on merkiltään positiivinen eli jännite on niin sanotusti virtaa edellä ja loistehoa otetaan verkosta. Kapasitiivista loistehoa sisältävät laitteet (kondensaattorit) syöttävät verkkoon loistehoa. Näin ollen jännitteen ja virran väliseksi vaihesiirtokulmaksi muodostuu negatiivinen kulma, eli virta kulkee jännitteen edellä. /1,15/

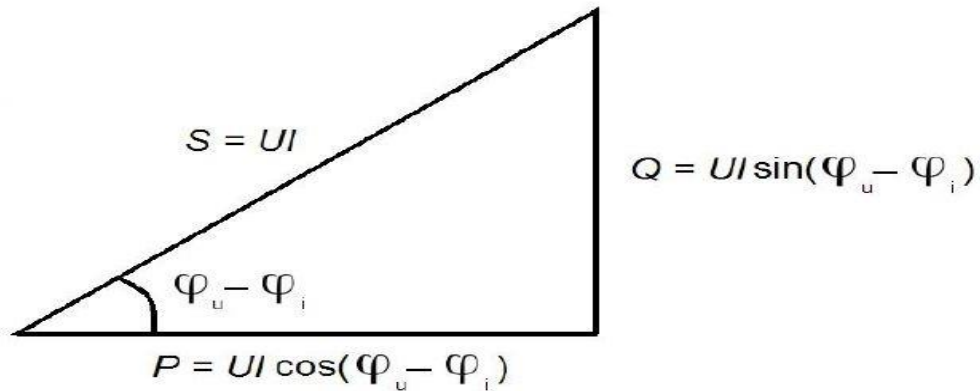
Loisteho kuormittaa turhaan sähkön siirtoverkkoa, ja siksi sähköyhtiöt laskuttavat suurilta sähkönkuluttajilta erikseen myös siirretystä loistehosta. Loisteho on mahdollista kompensoida paikallisesti joko kiinteistö-, keskus- tai laitekohtaisilla kompensointilaitteistoilla. Tällöin ei siirtoverkkoa pitkin tarvitse kuljettaa loistehoa ja myös siirtoverkon kuormitettavuus paranee. Lisäksi loistehon kompensointi pienentää jännitteenalenemaa pienjakeluverkossa. /17/.

Loistehon kompensointilaitteisto voidaan mitoittaa laskennallisesti tai mittaamalla. Uusissa rakennuksissa ainoa keino mitoittaa kompensointi on tehdä se laskennallisesti, mutta jo olemassa olevissa kiinteistöissä kompensointitarpeen määrittäminen voidaan tehdä mittaamalla kompensoinnin tarve, esimerkiksi tehoanalyysointia avulla.

Tehoanalyysointia avulla verkosta pystytään mittaamaan samanaikaisesti sekä verkossa kulkeva pätöteho P , loisteho Q että näennäisteho S . /17/

Verkossa kulkevaa tehoa pystytään kuvaamaan kolmen tehosuureen avulla:

- pätötehon $P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$;
- loistehon $Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$; ja
- näennäistehon $S = U \cdot I$.



Kuvio 6. Tehokolmio

Näennäisteho S voidaan laskea myös Pythagoraan lausekkeen avulla, joka on esitetty kaavassa 1.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1)$$

2.2.5 Välkyntä ja vinokuorma

Välkyntä johtuu jännitteen nopeista vaihteluista, joita aiheuttavat usein esimerkiksi verkkoon kytketyt kytkentäpisteen oikosulkutehoo suhteutettuna suuret epätasaiset kuormat omakotitaloissa. Tällaisia voivat olla esimerkiksi lämpöpumput tai yksivaiheiset hitsauskoneet. Tavalliselle käyttäjälle suurin jännitteen vaihtelun aiheuttama haitta on valojen välkyntä, jota aiheutuu jo noin prosentin jännitteen vaihteluilla. Lisäksi välkyntä voi aiheuttaa häiriöitä tuotantoprosesseissa ja näin lisätä kustannuksia. /5,7/

Välkyntää on kuvattu myös valolähteen luminanssin (pintakirkkauden) tai spektrijakauman muutosten aiheuttama näköaistimuksen epävakaisuudeksi, jonka ärsyttävyyttä kasvaa nopeasti heilahtelun amplitudin mukana. Tietyillä taajuuksilla myös pienet amplitudit voivat olla ärsyttäviä. /10/

Välkynnän ärsyttävyyttä standardissa tarkastellaan lyhytaikaisella häiritsevyysindeksillä P_{st} ja pitkäaikaisella häiritsevyysindeksillä Plt , jotka saadaan UIE-IEC välkynnän mittausmenetelmän avulla. /2/ Lyhytaikainen häiritsevyysindeksi P_{st} mitataan kymmenen minuutin aikaväliltä ja pitkäaikainen häiritsevyysindeksi Plt lasketaan kahdestatoista kahden tunnin mittausaikaväliltä saadusta P_{st} -arvosta alla esitetyn kaavan 2 mukaan. /2/

$$Plt = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st,i}^3}{12}} \quad (2)$$

Välkyntäongelmia pystytään korjaamaan rajoittamalla suurten kuormien ottamaa käynnistysvirtaa, esimerkiksi pehmokäynnistimen tai taajuusmuuttajan avulla. Myöskään nykyaikaiset vaihtosuuntaajaohjatut lämpöpumput eivät juuri ollenkaan aiheuta verkkoon välkyntäongelmia. /5/

Epäsymmetrialla eli vinokuormituksella tarkoitetaan, vaihejännitteiden väliset vaihesiirtokulmat eivät ole yhtä suuria. Epäsymmetriaa pienjakeluverkkoon yleisimmin aiheuttavat vaiheita epätasaisesti kuormittavat yksivaiheiset sähkölaitteet. Kolmivaiheverkossa epäsymmetrian aiheuttaja voi olla myös esimerkiksi maasulku tai yhden vaiheen sulakkeen palaminen. /8/

2.2.6 Transientit ja käynnistysvirrat

Transienttiylijännite on tavallisesti nopeasti vaimeneva kestoltaan muutamia millisekunteja kestävä värähtelevä tai ei värähtelevä ylijännite. Transienttien nousuajat vaihtelevat alle mikrosekunnista aina muutamiin millisekunteihin. Transienttiylijännitteitä aiheuttavat muun muassa salamot ja erilaiset verkon kytkentätapahtumat.

Sähkökäyttöpaikoilla esiintyvät transienttiylijännitteet aiheutuvat pääasiallisesti muiden verkkoon kytkettyjen sähkölaitteiden kytkennöistä. Transienttiylijännitteet on mahdollista jaotella ilmiön kestoajan mukaan esimerkiksi seuraavasti:

Pitkä transientti $>100\mu s$:

- Sulakkeen palaminen, huippuarvo 1-2 kV.

- Kompensointikondensaattorin kytkentä, transienttijännitteen huippuarvo 2-3 kertaa jakelujännitteen huippuarvo, värähtelevä, värähtelytaajuus voi vaihdella muutamasta sadasta hertsistä aina muutamaan kilohertsiin.

Keskipitkä transientti 1–100 μ s:

- Suoraan johtimeen osuneet salamaniskut, jännitteen amplitudi voi olla jopa 20 kV.
- Johtimen lähelle iskeneen salaman indusoimat jännitteet, jänniteamplitudi nousee harvoin yli 6kV, mutta voi olla jopa 20 kV.
- Katkaisijoiden tekemät kytkennät ja erotukset.

Lyhyt transientti <1 μ s:

- Paikalliset kuormien kytkennät, amplitudi 1-2 kV. /2/

Transienttiylijännitteen energiasisältö vaihtelee huomattavasti transientin aiheuttajan mukaan. Ukkosen aiheuttamalla indusoituneella ylijännitteellä on tavallisesti suurempi amplitudi, mutta kuitenkin pienempi energiasisältö kuin kytkennästä aiheutuneella ylijännitteellä. /2/ Verkko on mahdollista suojata transienttiylijännitteiden varalta asentamalla kiinteistön pääkeskukselle ylijännitesuojat. /13/

Suuret ja pitkäaikaiset käynnistysvirrat voivat aiheuttaa verkkoon ylikuormitustilanteita, joista aiheutuva jännitteen notkahdus havaitaan epämiellyttävänä valojen välkkymisenä. Pahimmassa tapauksessa suuret ja pitkäkestoiset käynnistysvirrat voivat aiheuttaa jopa ylikuormitussuojan laukeamisen ja jännitekatkoksen. /11/

3 KÄYTETTÄVÄ MITTALAITE

Mittauksissa käytetty tehoanalysaattori oli PeakTech'in 4145 -kolmivaihetehoanalysaattori.



Kuvio 7. PeakTech 4145 -kolmivaihetehoanalysaattori.

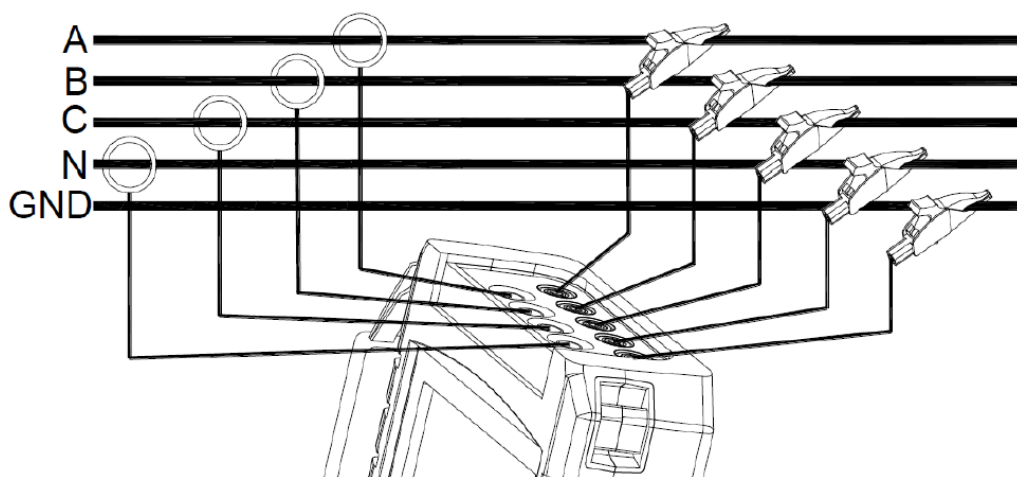
3.1 Mittalaitteen ominaisuudet

Mittalaitteella pystytään mittaamaan ja tarkastelemaan kaikkia neljää jännitettä tai virtaa samanaikaisesti mittalaitteen näytöltä. Mittalaite mittaa jännitteen ja virran puolijaksojen tehollisarvot ja tasakomponentit. Mittalaitteella pystytään suorittamaan harmonisten ja epäharmonisten yliaaltojen mittaukset aina 50. yliaaltoon saakka ja havainnoimaan transienttiylijännitteet. Mittalaite mittaa pätö-, lois- ja näennäistehot sekä sähköenergiat. Lisäksi laite pystyy laskemaan todelliset tehokerroimet ja vaihesiirtokulmat. Mittalaitteen avulla on mahdollista suorittaa välkyntämittaukset sekä käynnistysvirtamittaukset. Mittalaitteella pystytään myös havaitsemaan ja tallentamaan jännitteen heilunta, kuopat ja kohoumat sekä nopeat jännitteen muutokset ja katkokset. /11/

Mittalaite käyttää oletuksena mittaustulosten analysointiin SFS-EN 50160 -standardia. Mittalaite on myös mahdollista kytkeä lähiverkkoon, jolloin laitteen mittauksia päästään tarkastelemaan etänä tietokoneelta. Mittalaitteessa on sisäänrakennettuna 8 GB -muistikapasiteetti. Mittaustulokset on mahdollista siirtää mittalaitteesta tietokoneelle myös USB-portin kautta, tietokoneella mittaustuloksia voidaan tarkastella mittalaitteen mukana tulevan PowerAnalyzer-ohjelmiston avulla /11/

3.2 Mittalaitteen käyttö

Kuviossa 8 on esitetty mittalaitteen kytkentä kolmivaiheiseen verkkoon. Mittalaitteella on mahdollista suorittaa mittaukset myös yksivaiheisena, jolloin käytössä ovat vain mittalaitteen A(L1) jännite- ja virtaliittimet sekä nolla- ja maadoitusliitin.



Kuvio 8. Mittalaitteen kytkentä

Aloitettaessa mittausten tekeminen, mittalaite käynnistetään ja asetetaan perusparametrit. Mittalaitteeseen asetetaan sähköjärjestelmän tyyppi, järjestelmän nimellijännite, taajuus sekä virtapihtien muuntosuhde. Aina kun ollaan mittaamassa kolmivaiheista järjestelmää, mittalaite kytketään verkkoon samalla tavalla.

Mittalaitteen kytkentäjärjestys on seuraava:

1. Tee virranmittauskytkennät.
 - a. Kiinnitä virtapihdit johdinten ympärille, vaiheet A(L1), B(L2) ja C(L3), nolla N(N).
 - b. Virtapihteihin on merkitty nuoli polariteetin varmistamiseksi.
2. Tee jännitemittauskytkennät.
 - a. Kytke ensin maadoitusjohdin.
 - b. Kun maadoitus on kytketty, voidaan kytkeä nolla (N) sekä vaiheet A(L1), B(L2) ja C(L3).
 - c. Yksivaiheisissa kytkennöissä voidaan käyttää jännitetuloa A(L1) tai virtatuloa A(L1) tai jännitepuolen maadoitusliitintä. /11/

Jännitemittaus voidaan suorittaa yksivaiheisena tai kolmivaiheisena. Mittauksessa kytketään mittajohtimet kaikkiin kolmeen vaiheeseen normaalin jännitemittarin tavoin mitattavan jännitteen rinnalle. Lisäksi kytketään mittajohtimet nolla- ja maadoituskiskoon. Tehtäessä mittaus yksivaiheisena, kytketään mittalaite mitattavan vaiheen ja nollan välille. Mittauksia suoritettaessa on maadoitusjohtimen aina oltava kytkettynä.

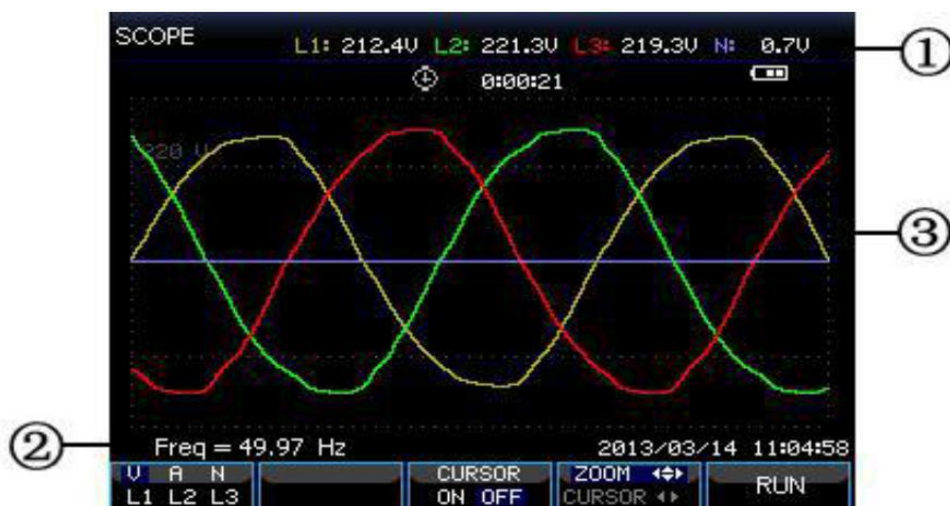
Virranmittaus tapahtuu mittalaitteen mukana tulevilla taipuisilla virranmittauslenkeillä, jotka kytketään vaihejohdinten ja nollajohtimen ympärille. Mittalaitteen mukana tulevien virranmittauspäiden maksimivirta on 3000 A. Mittalaitteeseen on myös saatavilla lisävarusteena erilaisia virranmittauspäitä. Mitattaessa yksivaiheista virtaa, kytketään virtapihdit vain mittavaan vaiheeseen ja nollajohtimeen. Taajuuden mittaus tapahtuu samanaikaisesti jännitteen- tai virranmittauksen aikana, mittalaite mittaa kulloinkin mitattavan suureen taajuuden ja esittää sen mittalaitteen näytöllä kahden desimaalin tarkkuudella.

Mittalaitteen kytkentä on aina samanlainen riippumatta mitattavasta suureesta. Mitattavia suureita voidaan tarkastella mittalaitteen trendinäytöltä, joka on esitetty kuviossa 9.



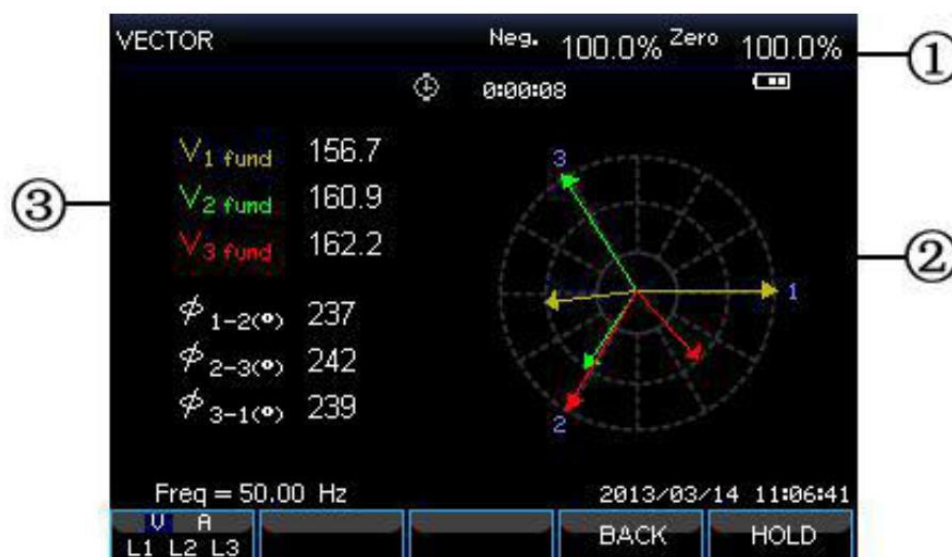
Kuvio 9. Mittalaitteen trendinäyttö

Mitattavien jännitteiden ja virtojen käyrämuotoja voidaan tarkastella oskilloskoopin avulla, joka on esitetty kuviossa 10.



Kuvio 10. Mittalaitteen oskilloskoopinäyttö

Mittalaitteen vektorinäytön avulla voidaan tarkastella esimerkiksi vinokuormitustilanteissa vaiheiden välisiä vaihesiirtokulmia. Kuva mittalaitteen vektorinäytöstä on esitetty kuviossa 11.



Kuvio 11. Mittalaitteen vektorinäyttö

Yliaaltojen tarkastelu on mahdollista mittalaitteen pylväsnäytöltä, joka on esitetty kuviossa 12.



Kuvio 12. Mittalaitteen pylväsnäyttö

4 MITTAUKSET

4.1 Mitattava kohde

Kohde, jossa mittaukset suoritettiin, oli Järviseudun ammatti-instituutin Kurejoen toimipisteen opetusmaatilän pääkeskus. Keskus syöttää maatilän navettarakennuksen lisäksi useita muita rakennuksia, joissa sijaitsee opetus-, toimisto- sekä varastotiloja. Oppilaitoksen maatilalla tuotetaan maitoa ja navetassa on kaikkiaan 24 lehmää, 12 hiehoa ja 12 vasikkaa. Eläimet ruokitaan ja lehmät lypsetään kahdesti päivässä. Lisäksi Kurejoen toimipisteessä annetaan puu-, metalli- ja luonnonvara-alojen koulutusta. /6/

Pääkeskus on myös aiemmin syöttänyt oppilaitoksen kahta rivitaloasuntolaa, mutta niiden syöttö on käännetty muualle aiemmin keväällä 2016. Keskuksen pääkytkimenä toimi varokekytkin, jossa oli 315 A gG-kahvapääsulakkeet. Asiakas halusi pääkeskukselle tehtävän jännite-, yliaalto-, teho- ja energiamittaukset ja niiden analysoinnit. Asiakkaalle esitettiin myös heilunta- ja välkyntämittausten suorittamista, mutta asiakas ei pitänyt niiden suorittamista sillä hetkellä ajankohtaisena.

4.2 Mittausten toteutus

Verkon mittaukset tehtiin rakennuksen pääkeskuksella ja mittalaite kytkettiin pääkytkinvarokkeen alle tulleeseen syöttökaapeliin. Mittauksia tehtäessä paikalla oli opinnäytetyöni valvoja toimitusjohtaja Ari Matintupa Trifitek Finland Oy:stä. Kuvista 13 nähdään, kuinka mittalaite on kytketty mittausta varten.

Ensin asetettiin paikoilleen virtamittauslenkit: mittajohtimet asetettiin mittalaitteen BNC-liittimiin ja virtapihti asetettiin mitattavan vaiheen ympärille. Kun kaikki virtalenkit olivat paikoillaan, kytkettiin jännitteen mittaukset hauenleukojen avulla paikoilleen. Kytkentä aloitettiin kytkentäohjeiden mukaisesti maadoitusliittimestä, jonka kytkemisen jälkeen voitiin kytkeä kiinni kaikki muut jännitteen mittaukset. Kun kytkennät olivat tehty, asetettiin mittalaitteen loggeri-toiminto päälle ja mittalaite sai aloittaa mittaustulosten tallentamisen. Koska keskuksen kansi oli jätettävä

mittausten ajaksi auki, asetettiin vielä varoitusnauha ja varoituskilpi avonaisen keskuksen eteen mittausten ajaksi.



Kuvio 13. Mittalaite on kytkettynä syöttökaapeliin mittauksia varten.

Kuvasta voidaan huomata, että oikeanpuoleinen 315 A:n pääsulake on jouduttu aiemmin vaihtamaan.

Mittauskohteessa jännitteiset osat olivat hyvin lähellä, jolloin virtamittaussilmukoita ja jänniteleukoja asennettaessa paikoilleen täytyi toimia hyvin varovaisesti. Koska mittajohtimia asennettaessa ulotutaan erittäin pitkälle jännitetyölle, on mittajohtimia asennettaessa asentajalla oltava asiaan kuuluvat suojavälineet.

Mittausten tekemisessä tärkeimpiä lähtökohtia ovat tulosten riittävä luotettavuus ja tarkkuus. /18/ SFS-EN 50160 -standardin mukaisia mittauksia verkolle ei pystytty kaikilta osin tekemään, rajallisen ajankäytön vuoksi. Verkolle tehtiin kuitenkin mittauksia useampana päivänä, jotta voitaisiin varmistua mittaustulosten luotettavuudesta ja tarkkuudesta.

5 MITTAUSTULOSTEN TULKINTAOHJE

Seuraavaksi käydään läpi mitattavat suureet ja käydään läpi mittaustulosten tulkin-taohjeistus. Jos mittaustulokset eivät täytä standardin vaatimuksia, selvitetään mil-laisilla toimenpiteillä ne olisi mahdollista korjata.

5.1 Jännite-, virta- ja taajuusmittaukset

Jännitemittauksessa tutkitaan, pysyykö kiinteistön jakelujännite standardin asetta-missa rajoissa. Standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa nimellisjännit-teen ollessa 230 V ja nimellistaajuuden 50 Hz, tulee 95 prosentin mittaustuloksista olla välillä +/-10 % eli välillä 207 V...253 V ja kaikkien mittaustulosten tulisi olla +10 %:n/-15 %:n välillä eli välillä 195,5 V...253 V. /13/

Mikäli jännitteessä mitattaisiin suuria muutoksia, esimerkiksi niin, että jännite ro-mahtaisi merkittävästi kuormituksen aikana, ongelman korjaamiseksi olisi sähkö-yhtiön nostettava syöttöjännitettä kiinteistöä syöttävällä jakelumuuntajalla. Jakelu-muuntajissa ei yleisesti käytetä käämikytkimiä, joilla jännitetason korjaaminen on-nistuisi kuormituksen aikana, vaan yleensä jännitetason valinta tapahtuu muuntajan kannella olevan väliottokytkimen avulla. Väliottokytkimen säätö tapahtuu aina muuntajan ollessa jännitteetön. Kiinteän jännitteensäädön takia on otettava huomi-oon myös jännitteen kohoaminen kuormituksen ollessa pienimmillään. Jännitteen tehollisarvon lisäksi jännitteen mittauksessa tarkastellaan jännitteen huippuker-rointa, joka kuvaa kuinka sinimuotoista jännitesignaali on. Puhtaan sinimuotoisen signaalin huippukerroin 1,41 ja huippukertoimen ollessa lähellä 1,8 on jännite hy-vin säröytynyttä. /1/ Jännitteen säröytyminen aiheutuu jännitesignaaliin summautu-neista yliaaltokomponenteista. Jännitteen huippukerrointa on mahdollista korjata asentamalla verkkoon imupiirejä, jotka suodattavat yliaaltokomponentit pois.

Virtamittauksessa tutkitaan, kuinka paljon kiinteistön pääsulakkeiden läpi kulkee virtaa ja mittaustulosten avulla nähdään sulakkeiden mahdollinen ylikuormittumi-nen. Mikäli mittaustulosten perusteella nähdään, että sulakkeet ylikuormittuvat tai ovat lähellä ylikuormittumista, on tähän mahdollinen ratkaisu pääsulakekoon kas-vattaminen. Keskusta syöttävä nousukaapeli ja keskuksen rakenne määrittää, onko

pääsulakkeiden kasvattaminen mahdollista. Usein voi olla mahdollista, että sula-keeseen kasvattaminen ei ole myöskään järkevää, vaan syy sulakkeiden ylikuormittumiseen löytyy muualta. Esimerkiksi verkosta otettu loisteho kuormittaa kiinteistön pääsulakkeita siinä missä työtä tekevä päätötehoikin. Usein loistehon kompensoinnilla voi ratkaista sulakkeiden ylikuormitusongelman. Virranmittauksessa tutkitaan huippukerrointa samoin kuin jännitteen mittauksessa. Virran huippukertoi-meen pätevät samat raja-arvot kuin jännitteeseen, puhtaan sinimuotoisen signaalin huippukerroin on 1,41 ja hyvin säröytyneenä voidaan pitää huippukerrointa 1,8. /11/

Taajuusmittauksissa tutkitaan syöttävän verkon taajuutta. SFS-EN 50160 -standardin mukaan taajuuden vaihtelua tarkastellaan 10 sekunnin keskiarvon perusteella. Standardin mukaan yhteiskäyttöverkoissa, joiden nimellistaajuus on 50 Hz, tulee taajuuden keskiarvon 10 sekunnin aikaväliltä mitattuna olla $\pm 1\%$ eli 49,5 Hz...50,5 Hz:n välillä 99,5 % vuodesta. Lisäksi taajuuden keskiarvojen tulee pysyä $\pm 4\%$ eli 47 Hz...52 Hz:n välillä 100 % ajasta. Lisäksi standardissa määritellään, että erillisverkoissa, joiden nimellistaajuus on 50 Hz, tulee taajuuden keskiarvon 10 sekunnin aikaväliltä mitattuna olla $\pm 2\%$ eli 49 Hz...51 Hz:n välillä 95 % viikosta. Lisäksi taajuuden keskiarvojen tulee pysyä $\pm 15\%$ eli 42,5 Hz...57,5 Hz:n välillä 100 % ajasta. /13/ Yksittäinen käyttäjä ei tyypillisesti pysty vaikuttamaan taajuuteen kuormituksellaan. Yleisen sähköverkon taajuuden säädöstä Suomessa huolehtii Fingrid Oyj. Verkon taajuus määräytyy Pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon taajuuden mukaan. /2/

5.2 Heilunta, kuopat ja kohoumat

Heiluntamittauksissa tutkitaan, kuinka paljon verkonjännite heiluu. SFS-EN 50160 -standardin mukaan jännitekuopat määritellään prosentteina nimellisjännitteestä. Standardin mukaan jännitekuopaksi luokitellaan kaikki 10 millisekuntista 10 minuuttiin kestävät hetket, jolloin jännite laskee alle 90 prosenttiin nimellisjännitteestä. Standardin mukaan monivaihejärjestelmissä jännitekuoppa alkaa siitä, kun yhden vaiheen jännite laskee alle havahtumiskynnyksen ja päättyy siihen, kun kaikkien vaiheiden jännitteet ovat kohonneet havahtumisrajalle tai sen yläpuolelle. SFS-

EN-50160-standardissa ylijännitekohouma määritellään prosentteina nimellisjännitteestä. Standardin mukaan jännitekohoumaksi luokitellaan kaikki 10 millisekunnista 1 minuuttiin kestävät hetket, jolloin jännite kohoaa yli 110 prosenttiin nimellisjännitteestä. Standardi antaa jännitekuopille ainoastaan indikaatiiviset arvot, joita ei voida pitää sähkömarkkinalain mukaisena virheen rajana. Standardin mukaan jännitekuoppien arviointi tulee tehdä standardin EN 61000-4-30 mukaisesti. /13/ Taulukossa 1 ja 2 on esitetty jännitekuoppien ja kohoumien tilastointiin käytettävät taulukot.

Taulukko 1. Jännitekuoppien tilastointiin käytettävä taulukko

Jäännösjännite u %	Kesto aika t ms				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1\ 000$	$1\ 000 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 60\ 000$
$90 > u \geq 80$	ALKIO A1	ALKIO A2	ALKIO A3	ALKIO A4	ALKIO A5
$80 > u \geq 70$	ALKIO B1	ALKIO B2	ALKIO B3	ALKIO B4	ALKIO B5
$70 > u \geq 40$	ALKIO C1	ALKIO C2	ALKIO C3	ALKIO C4	ALKIO C5
$40 > u \geq 5$	ALKIO D1	ALKIO D2	ALKIO D3	ALKIO D4	ALKIO D5
$5 > u$	ALKIO X1	ALKIO X2	ALKIO X3	ALKIO X4	ALKIO X5

Jännitekuopat luokitellaan taulukkoon jäännösjännitteen ja kuopan kestoajan perusteella. /13/

Taulukko 2. Ylijännitteiden tilastointiin käytettävä taulukko

Ylijännite u %	Kesto aika t ms		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 60\ 000$
$u \geq 120$	ALKIO S1	ALKIO S2	ALKIO S3
$120 > u > 110$	ALKIO T1	ALKIO T2	ALKIO T3

Jännitekohoumat luokitellaan taulukkoon kohouman maksimijännitteen ja sen kestoajan perusteella. /13/

5.3 Yliaallot ja THD

Yliaaltomittauksissa tarkastellaan jänniteyliaaltojen osuutta jännitteen perusaalosta. SFS-EN 50160 -standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikonpituaisen mittausjakson aikana, 95 prosenttia jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin raja-arvo, joka on esitetty taulukossa 3. /13/

Mikäli jokin yliaaltokerrannainen ylittää raja-arvon, täytyy verkkoon asentaa yliaaltokomponentin mukaan mitoitettu imupiiri, joka suodattaa kyseisen yliaaltokomponentin pois. Kuitenkaan pienten yksittäisten piikkien takia ei välttämättä ole järkevää asentaa imupiiriä, ellei tarkemmilla tutkimuksilla voida osoittaa piikin aiheuttavan häiriöitä sähköverkossa.

Taulukko 3. Standardin SFS-EN 50160 mukaiset harmonisten yliaaltojen raja-arvot.

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

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

Lisäksi standardin mukaan jakelujännitteen harmoninen kokonaissärö THD, johon on laskettu mukaan kaikki yliaallot aina järjestyslukuun 40 saakka, ei saa ylittää 8 prosenttia. SFS-EN 50160 -standardissa ei vielä anneta rajoja epäharmonisille yliaalloille, mutta mainitaan, että niitä ollaan kartoittamassa ja tulevat olemaan osana tulevia standardeja. /13/ THD:n ylittyessä, joudutaan verkkoon asentamaan imupiiri. Imupiiri kannattaa mitoitaa suurimman tehollisarvon omaavan yliaaltokomponentin mukaan (yleensä pienillä kertaluvuilla 3. 5. 7.), jolloin kokonaissärö pienenee eniten.

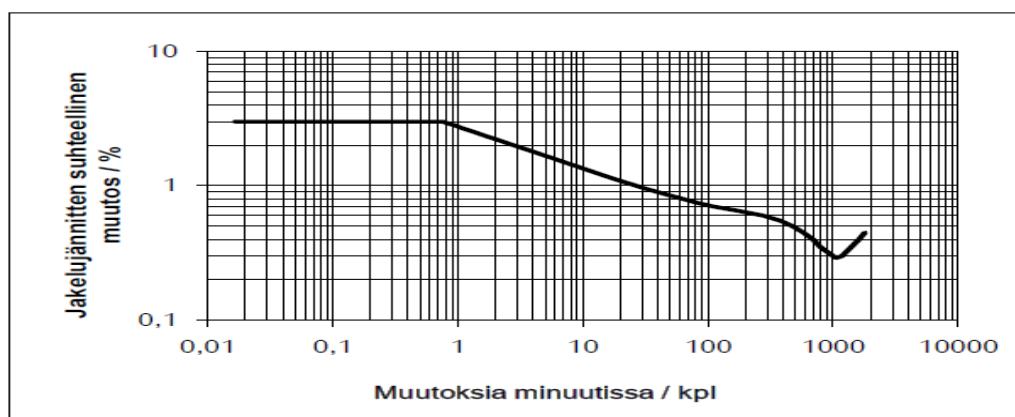
5.4 Tehomittaukset

Tehomittausten perusteella nähdään verkosta otettavan tehon vaihtelu ja vaiheiden keskinäisten kuormitusten tasaisuus. Loistehomittausten perusteella nähdään, kuinka paljon verkossa kulkee loistehoa. Energiamittausten perusteella nähdään, kuinka paljon verkosta otetaan energiaa. Loisteho kuormittaa turhaan kiinteistön

pääsulakkeita ja saa aikaan suuret loistehomaksut käyttäjälle ja siksi loistehon kompensointilaitteiston asentaminen on usein järkevää. Näin ollen kalliit loistehomaksut poistuvat sähkölaskusta ja voidaan välttyä mahdolliselta pääsulakekoon kasvattamiselta.

5.5 Välkyntä ja vinokuormitus

Välkyntämittauksissa tarkastellaan jännitetason nopeita vaihteluja, jotka aiheuttavat valojen välkkymistä. Välkyntää aiheuttavat yleensä verkon oikosulkutehoo suhteutettuna suurten kuormien käynnistykset omakotitaloissa. Tällaisia voivat olla esimerkiksi maalämpöpumput. Nopeita jännitteenmuutoksia rajoittamalla, valojen haitallinen välkkyminen voidaan estää. Kuviosta 14 nähdään toistuvien nopeiden jännitemuutosten suositellut maksimiarvot alueella 0,01...2000 muutosta minuutissa. Kuviosta käy ilmi, että ihmisen silmä on herkimmillään, kun jännitteen muutoksia on hieman yli 1000 kappaletta minuutissa.



Kuva 14. Sallitut välkyntämäärät jännitteen muutoksen ja muutospäänteen suhteen.

Standardin SFS-EN 50160 mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa, minkä tahansa viikon pituisen mittausjakson aikana, jännitteen vaihtelun aiheuttaman välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin tulisi olla 95 prosenttia ajasta pienempi kuin 1.

Mikäli raja-arvot ylittyvät, on suurimpien kuormien käynnistysvirtaa rajoitettava, esimerkiksi pehmokäynnistimen avulla. Myös nykyaikaisilla vaihtosuuntaajaohjatuilla lämpöpumpuilla ja muilla taajuusmuuttajaohjatuilla laitteilla pystytään korjaamaan välkyntäongelmia. /5/

Vinokuormituksella tarkoitetaan vaiheiden epätasaista kuormittumista. Standardin mukaan viikon mittaisella tarkastelujaksolla normaaleissa käyttöolosuhteissa 95 % jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista tulee olla välillä 0...2 % myötäkomponentista. Standardissa sanotaan myös, että joillakin alueilla, kun esim. osalla asiakkaista on yksi- tai kaksivaiheisia liittymiä, esiintyy kolmivaiheasiakkaan liittämiskohdassa epäsymmetria-arvoja 3 % saakka. /2/ SFS-EN 50160 -standardi suosittelee, että suurin sallittu vaiheiden välinen vinokuormitus olisi ± 10 %. /14/ Mittaustulosten perusteella nähdään, ovatko vaiheet kuormitettu tasaisesti. Uudelleentasaamalla kuormat vaiheiden kesken, saa ongelman ratkaistua.

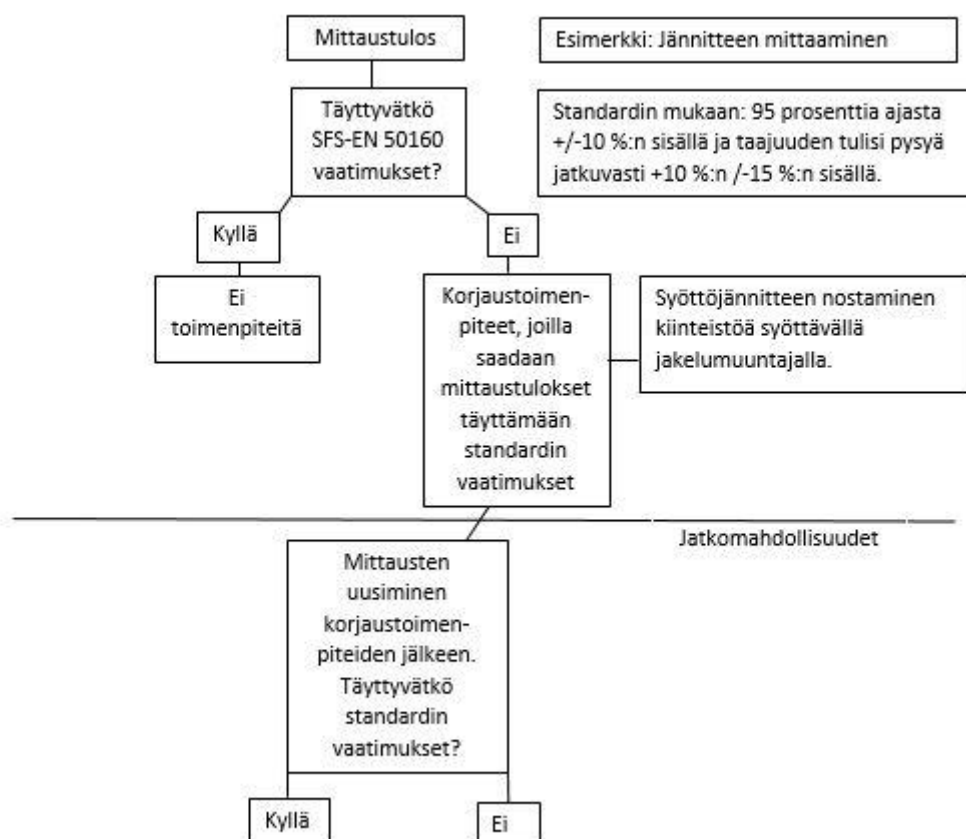
5.6 Transientit ja käynnistysvirrat

Transienttiylijännitteitä verkkoon aiheuttavat yleensä muun muassa ukkonen ja erilaiset verkossa tehtävät kytkennät. Suuret transienttiylijännitteet voivat aiheuttaa vikoja verkkoon kytketyissä laitteissa. Kiinteistön sähköjakeluverkko voidaan suojata transienttiylijännitteitä vastaan asentamalla pääkeskukseen ylijännitesuojat. /2/

Suuret ja pitkäaikaiset käynnistysvirrat kuormittavat verkkoa ja ne voivat aiheuttaa verkkoon suuria jännitteen notkahduksia ja valojen välkyntää. Pahimmassa tapauksessa ne voivat aiheuttaa esimerkiksi ylikuormitussuojien laukeamisen. Suuria käynnistysvirtoja on mahdollista rajoittaa, esimerkiksi tähtikolmiokäynnistimen, pehmokäynnistimen tai taajuusmuuttajan avulla. /11/

6 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Seuraavassa osassa käydään läpi mittalaitteen tallentamia mittaustuloksia ja analysoidaan niitä. Analysoinnissa keskitytään siihen, olivatko saadut mittaustulokset halutunlaisia ja mitä niiden perusteella pystytään sähköverkon tilasta kertomaan. Mikäli standardin vaatimukset eivät täyty, tulkintaohjeistuksen perusteella voidaan selvittää kuinka mittaustulokset olisi mahdollista korjata. Analysointiprosessi on kuvattu kuviossa 15.



Kuvio 15. Mittaustulosten analysointiprosessi.

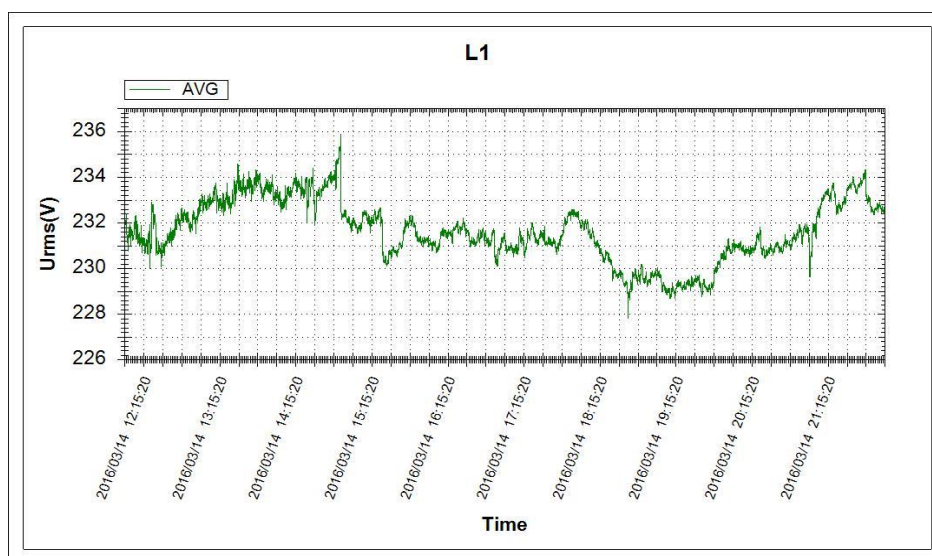
Analysointiprosessissa tarkastellaan kutakin mitattua suuretta yksi kerrallaan ja verrataan saatuja mittaustuloksia standardin asettamiin raja-arvoihin. Mikäli mi-

tattu suure pysyy standardin asettamien raja-arvojen sisällä, ei toimenpiteitä vaadita. Mikäli standardin asettamat raja-arvot ylittyvät, täytyy etsiä ratkaisu ongelman korjaamiseksi.

6.1 Jännite-, virta- ja taajuusmittaukset

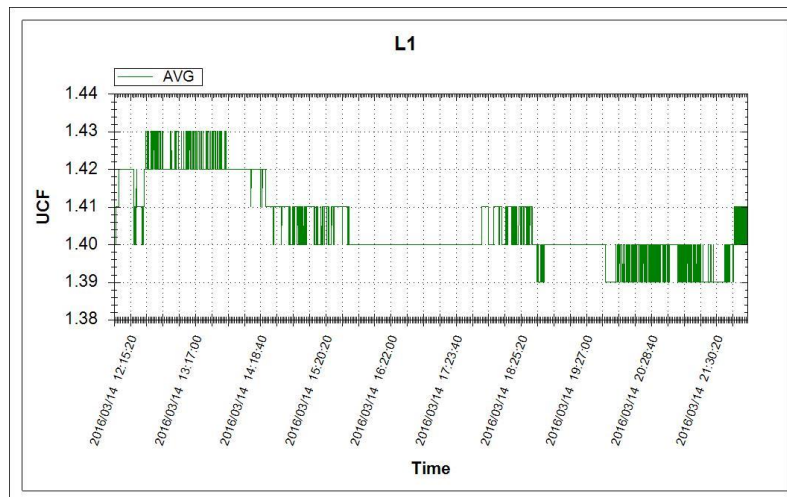
6.1.1 Jännitemittaustulokset ja niiden analysointi

Mittausten perusteella nähdään, että jännite käy korkeimmillaan noin 240 V:ssa, mikä tarkoittaa noin 4,3 prosentin ylitystä. Alimmillaan jännite käy noin 225 V:ssa, mikä tarkoittaa noin 2,1 prosentin alitusta. Mittaustulosten perusteella pystytään sanomaan verkon jännitteen pysyvän hyvin tulkintaohjeistuksen vaatimissa rajoissa, eikä näin ollen jännitteen muutokset vaadi toimenpiteitä. Kuviossa 16 esitetty vaiheen L1 tehollisarvon kuvaaja.



Kuvio 16. Vaiheen L1 jännitteen tehollisarvo.

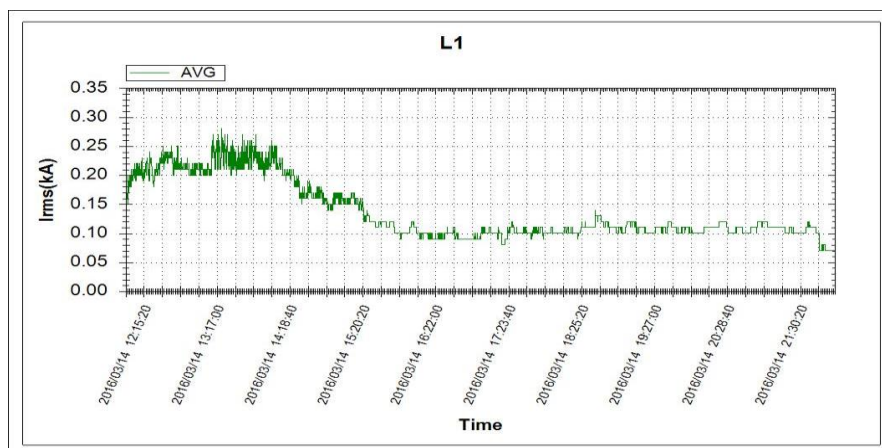
Mittausten perusteella jännitteen huippukerroyksiköt vaihteli kaikissa kolmessa vaiheessa noin 1,38–1,43 välillä. Tulkintaohjeistuksen perusteella jännitteen käyrämuodon takia ei tarvitse ryhtyä toimenpiteisiin. Vaiheen L1 jännitteen huippukerroyksikökuvaaja on esitetty kuviossa 17.



Kuvio 17. Vaiheen L1jännitteen huippukertoimen kuvaaja.

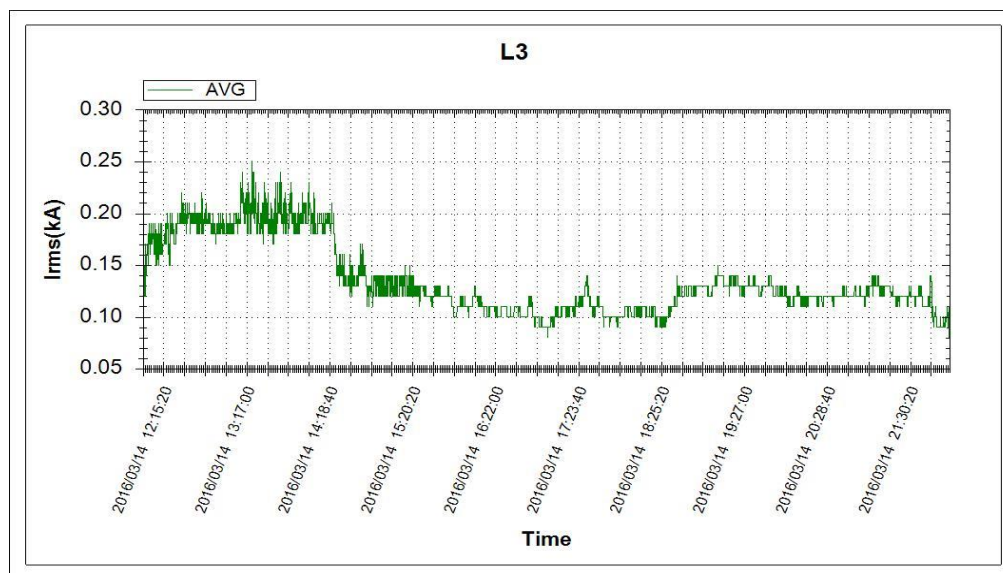
6.1.2 Virran mittaustulokset ja niiden analysointi

Virranmittaustuloksista voidaan nähdä, että kuormituksen aikana 315 A:n pääsulakkeet ovat lähes täyteen kuormitettuja. Kuormitus vaihtelee merkittävästi vuorokauden aikana. Päivisin kuormitus on suurimmillaan, jolloin virta nousee korkeimmillaan noin 300 ampeeriin. Öisin kuormitus on minimissään, jolloin virta laskee alimmillaan noin 50 ampeeriin. Vaiheen L1 virran tehollisarvon kuvaaja on esitetty kuviossa 18.



Kuvio 18. Vaiheen L1 virran tehollisarvo.

Tällaiset kuormitusilanteet ovat hankalia kiinteistön omistajan kannalta, vaikka suurta kulutusta ja kuormaa ei ole päivän aikana kuin muutaman tunnin ajan. Suuri hetkellinen huippukuormitus kasvattaa kiinteistön pääsulakkeiden kokoa, mistä aiheutuvat esimerkiksi kalliit liittymismaksut. Vaiheen L3 virran tehollisarvon kuvaaja on esitetty kuviossa 19.

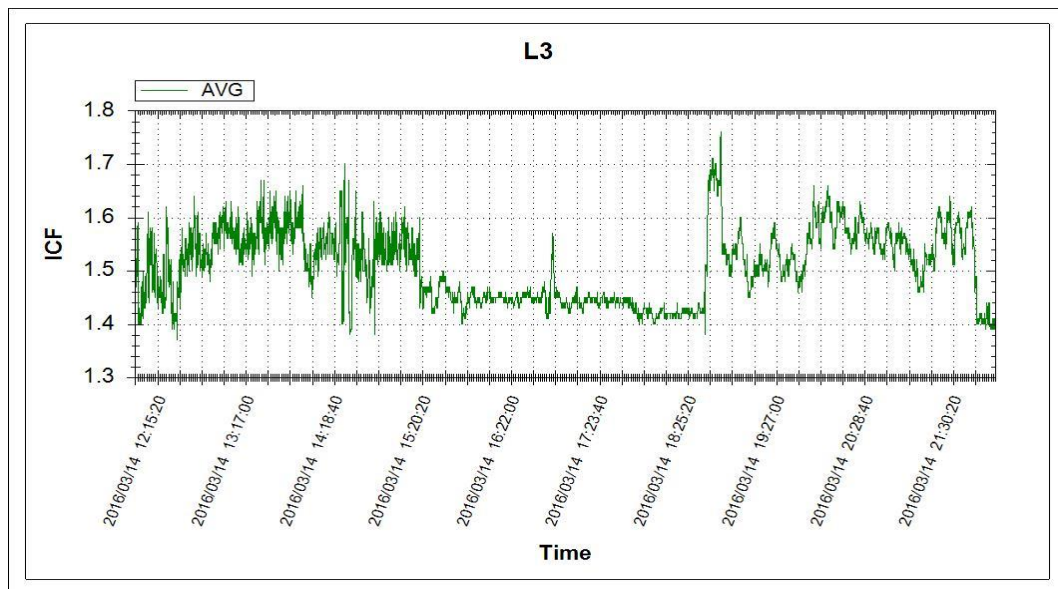


Kuvio 19. Vaiheen L3 virran tehollisarvo.

Tulkintaohjeistuksessa mainitaan, että pääsulakkeiden ylikuormitusongelmat on mahdollista korjata pääsulakkeiden kokoa kasvattamalla. Tämä ei välttämättä ole ainut ratkaisu ongelmaan, vaan ylikuormituksen voi aiheuttaa esimerkiksi verkosta otettu loisteho.

Virran huippukerroinmittausten mukaan pahimmillaan huippukerroin on vaiheessa L3, jonka kuvaaja on esitetty kuviossa 20. Mittausten perusteella virran huippukerroin käy pahimmillaan hyvin lähellä 1,8. Tulkintaohjeen perusteella ei kuitenkaan ole vielä syytä ryhtyä toimenpiteisiin, koska kyseessä on yksittäinen piikki eikä se ylitä tulkintaohjeessa kerrottua raja-arvoa.

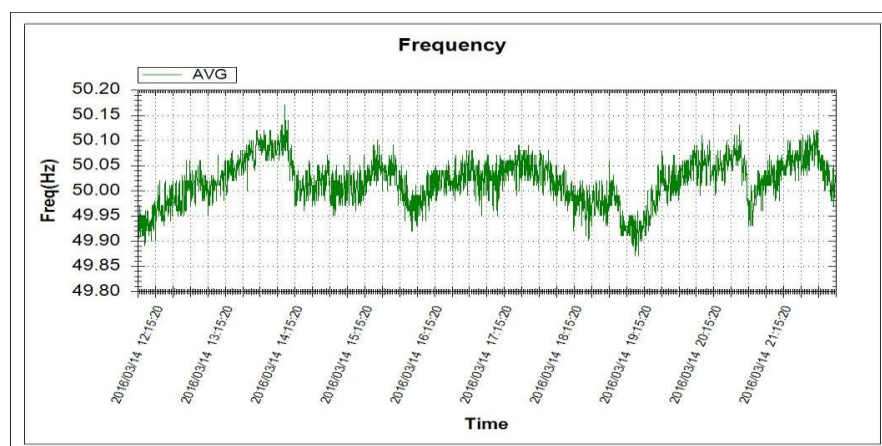
Tulkintaohjeen mukaan jännitteen yliaaltokomponentit aiheuttaa signaalin käyrämuodon vääristymisen. Ohjeistuksessa kerrotaan, että keino ongelmien korjaamiseksi on imupiirien asentaminen yliaaltokomponenttien suodattamiseksi.



Kuvio 20. Vaiheen L3 virran huippukerroinkuvaaja.

6.1.3 Taajuusmittaustulokset ja niiden analysointi

Suoritettujen mittausten ja tulkintaohjeistuksen perusteella, verkon taajuus pysyy sallituissa rajoissa, eikä aiheuta toimenpiteitä.



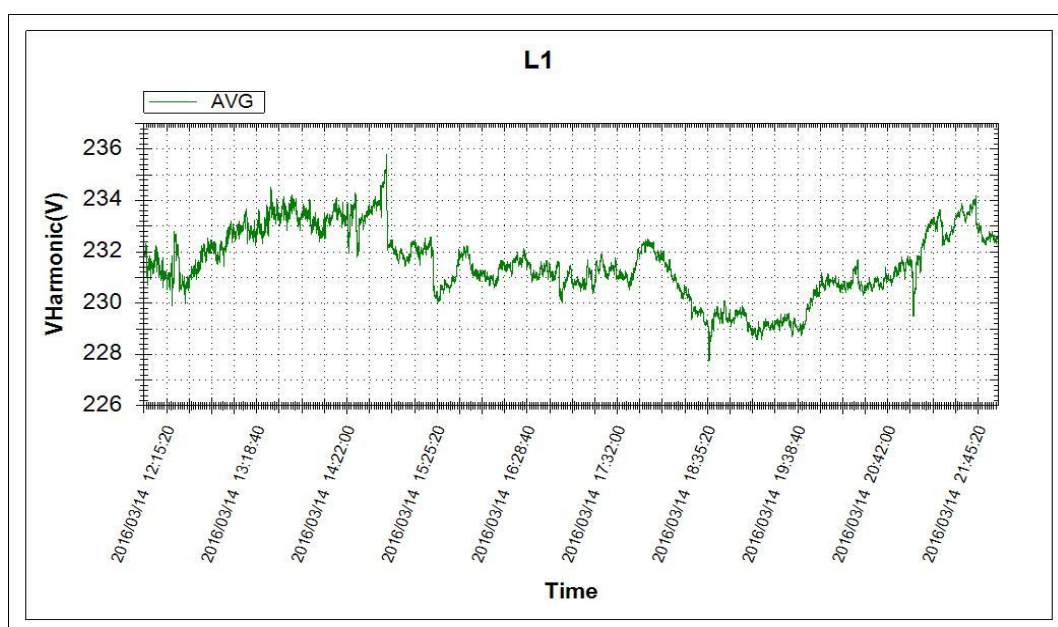
Kuvio 21. Verkon taajuuden kuvaaja.

6.2 Yliaaltomittaukset

Seuraavaksi käydään läpi yliaaltomittaustulokset. Ensin käydään läpi jänniteyliaaltojen mittaustulokset ja sen jälkeen virtayliaaltojen mittaustulokset.

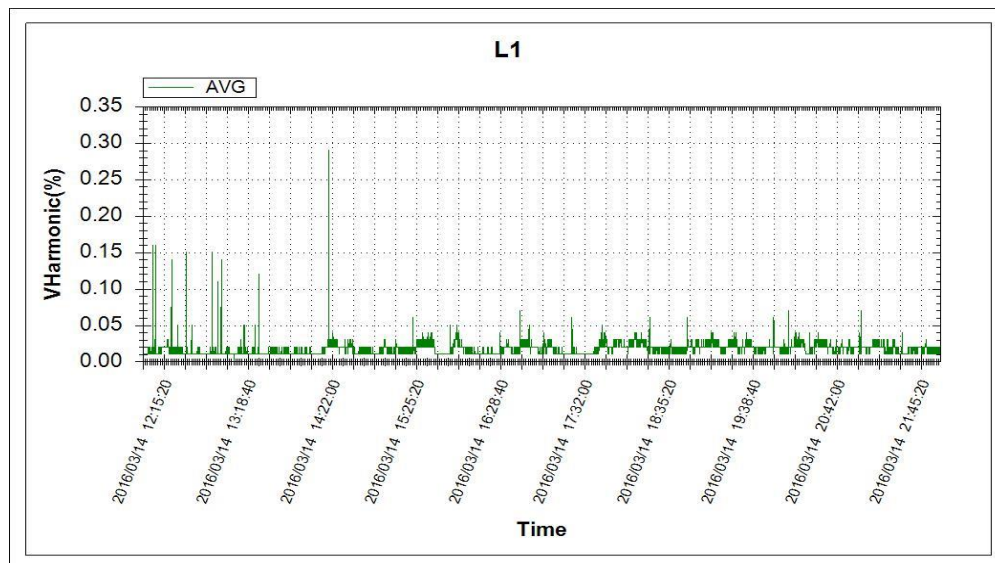
6.2.1 Jänniteyliaallot

Yliaaltomittausten perusteella verkon harmoniset yliaallot eivät aiheuta toimenpiteitä. Kuviossa 22 on esitettyä verkon jännitteen perusaallon kuvaaja, perusaallolla tarkoitetaan perustaajuista 50 Hz:n jännitesignaalia ilman siihen summautuneita yliaaltokomponentteja.

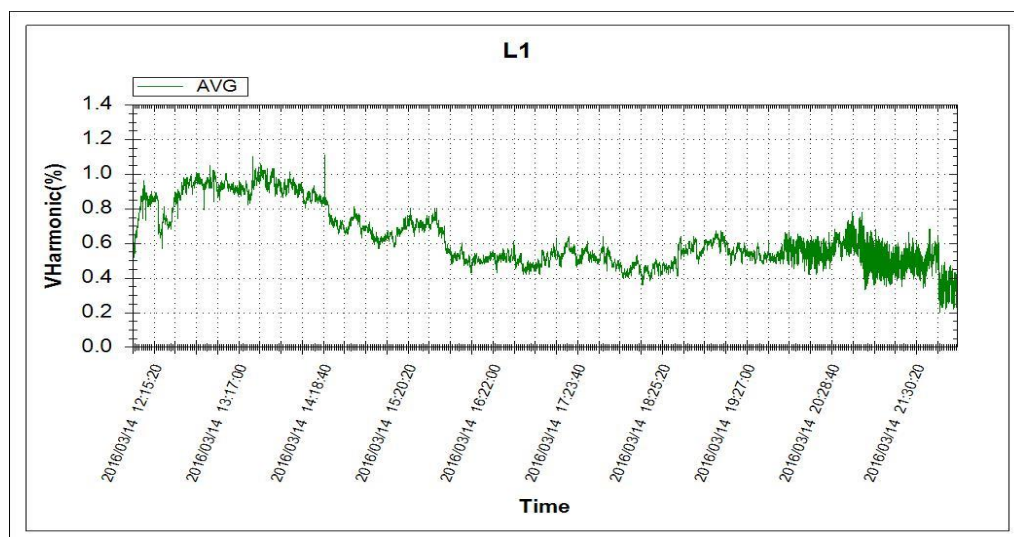


Kuvio 22. Vaiheen L1 jännitteen perusaallon tehollisarvokuvaaja.

Kuviosta 23 nähdään miltä mittausten perusteella tyypillisesti pienet yliaaltokertoimet verkossa vaikuttivat. Mittauksissa näkyi ainoastaan yksittäisiä piikkejä, jotka jäivät myös hyvin alhaisiksi raja-arvoon verrattuna. Myös tyypillisesti suurimmat yliaaltokertoimet (3,5,7,11), jotka tulkintaohjeessa määritellään korkeammilla raja-arvoilla, jäivät hyvin alhaisiksi.



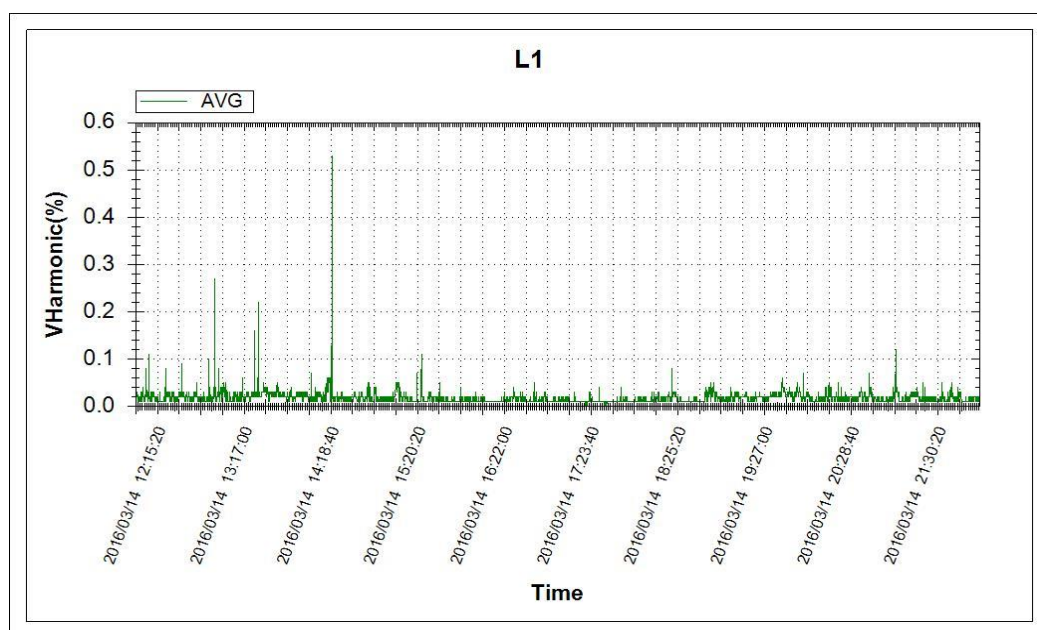
Kuvio 23. Vaiheen L1 jännitteen 2. yliaallon kuvaaja. Verkon 2. yliaalto on tyypillisesti pieni.



Kuvio 24. Vaiheen L1 jännitteen 3. yliaallon kuvaaja.

Mittaustulosten perusteella 3. harmoninen yliaalto on pahimmillaan noin 1,1 prosenttia, kun yliaallolle määritelty raja-arvo on 5 prosenttia, jolloin ei ole syytä ryhtyä toimenpiteisiin 3. yliaallon takia. Vaiheen L1 jännitteen 3. yliaallon kuvaaja on esitetty kuviossa 24.

6. yliaallolle määritellään raja-arvoksi 0,5 % kuvasta 25 nähdään, kuinka yksittäinen yliaaltopiikki kohoaa 0,5 prosentin yli. Tulkintaohjeistuksen mukaan yliaallolle olisi mahdollista määrittää suodatinta, jonka avulla yliaaltopiikki olisi mahdollista poistaa. Ohjeessa kuitenkin mainitaan, että yhden yksittäisen piikin takia ei ole järkevää asentaa suodatinta, ellei tarkemmissa tutkimuksissa todeta sen aiheuttavan merkittäviä häiriöitä.



Kuvio 25. Vaiheen L1 6. jännite yliaallon kuvaaja.

Alla esitettyyn taulukkoon 4 on kerätty kaikkien 25 ensimmäisen harmonisen jänniteyliaallon mitatut maksimi-arvot, yliaaltokertaluvulle asetettu raja-arvo sekä merkitty alittaaako tai ylittääkö yliaaltokertalukua asetetun raja-arvon.

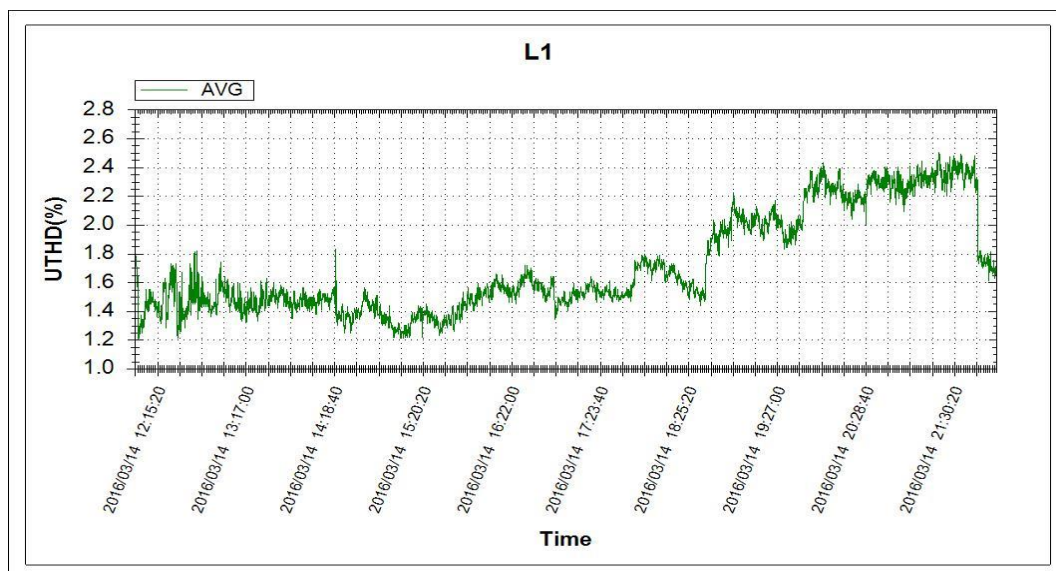
Taulukko 4. Taulukko harmonisten jänniteyliaaltojen analysointituloksista.

Verkon harmonisten jänniteyliaaltojen arviointi					
Yliaalto	Maksimi	Raja-arvo	Alle	Yli	Huomiot.
2.	0,30%	2,00%	x		
3.	1,10%	5,00%	x		
4.	0,27%	1,00%	x		
5.	1,30%	6,00%	x		
6.	0,55%	0,50%		x	Vain yksittäinen piikki.
7.	2,20%	5,00%	x		
8.	0,28%	0,50%	x		
9.	0,51%	1,50%	x		
10.	0,05%	0,50%	x		
11.	0,90%	3,50%	x		
12.	0,04%	0,50%	x		
13.	0,25%	3,00%	x		
14.	0,02%	0,50%	x		
15.	0,14%	0,50%	x		
16.	0,03%	0,50%	x		
17.	0,20%	2,00%	x		
18.	0,01%	0,50%	x		
19.	0,15%	1,50%	x		
20.	0,01%	0,50%	x		
21.	0,06%	0,50%	x		
22.	0,01%	0,50%	x		
23.	0,10%	1,50%	x		
24.	0,01%	0,50%	x		
25.	0,04%	1,50%	x		

Jos mittausten perusteella jokin yliaaltotaajuuskomponentti ylittää standardin asetteleman raja-arvon, tulkintaohjeen perusteella ratkaisu yliaaltokomponentin pienentämiseen on kyseiselle yliaaltokomponentille mitoitetun imupiirin asentaminen verkkoon.

6.2.2 Kokonaissärö THD

Mittaustuloksien perusteella verkon THD on suurimmillaan noin 2,5 %. Tulkintaohjeistuksen perusteella ei ole tarvetta ryhtyä toimenpiteisiin. Kuviossa 26 on esitetty verkon yhden vaiheen THD:n kuvaaja.



Kuvio 26. Vaiheen L1 jännitteen THD:n kuvaaja.

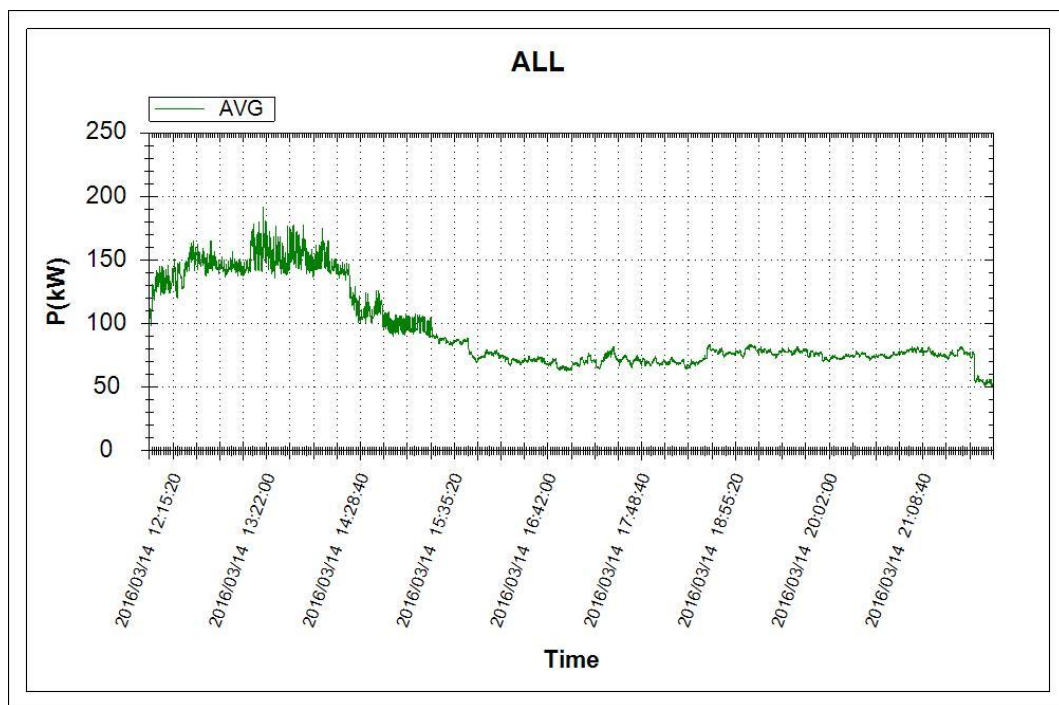
Jos THD ylittää raja-arvon, tulkintaohjeistus ehdottaa kokonaissäröongelmien korjaamiseksi imupiirien asentamista, tehollisarvoltaan suurimmille yliaaltokomponenteille.

6.3 Teho- ja energiamittaukset

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi teho- ja energiamittausten tuloksia. Tarkastellaan erikseen pätö-, lois- sekä näennäistevoja kokonaisuutena ja vaihekohtaisesti. Lisäksi tarkastellaan järjestelmän energiankulutuksia.

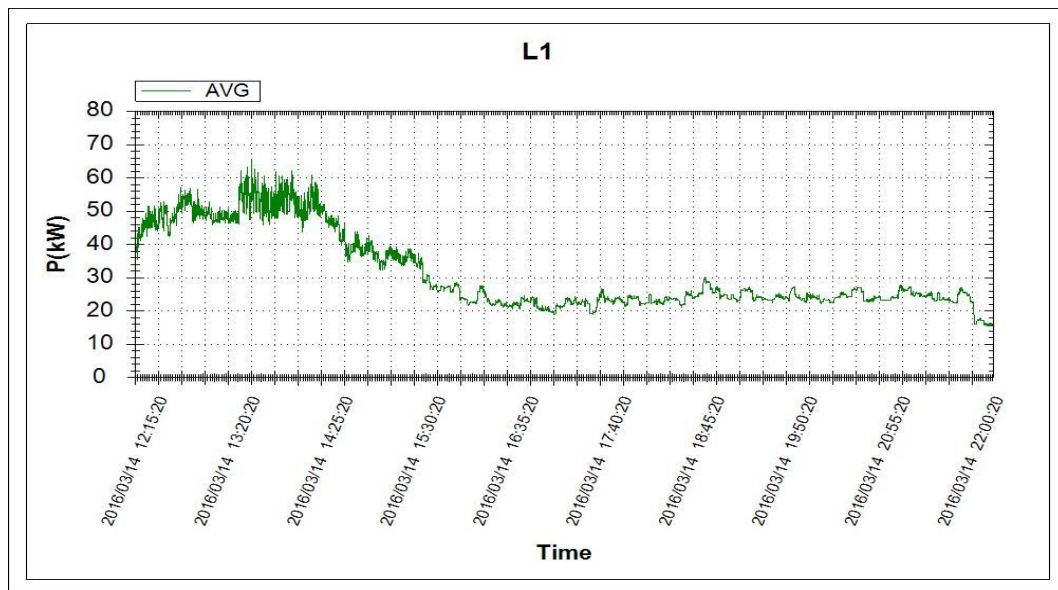
6.3.1 Tehomittaukset ja mittaustulosten analysointi

Kuviossa 27 on esitettyä verkossa kulkevan kokonaispätötehon kuvaaja. Kokonaispätöteho on kaikkien kolmen vaiheen tehojen summa. Mittaustulosten perusteella verkosta otetaan korkeintaan 200 kW pätötehoa.



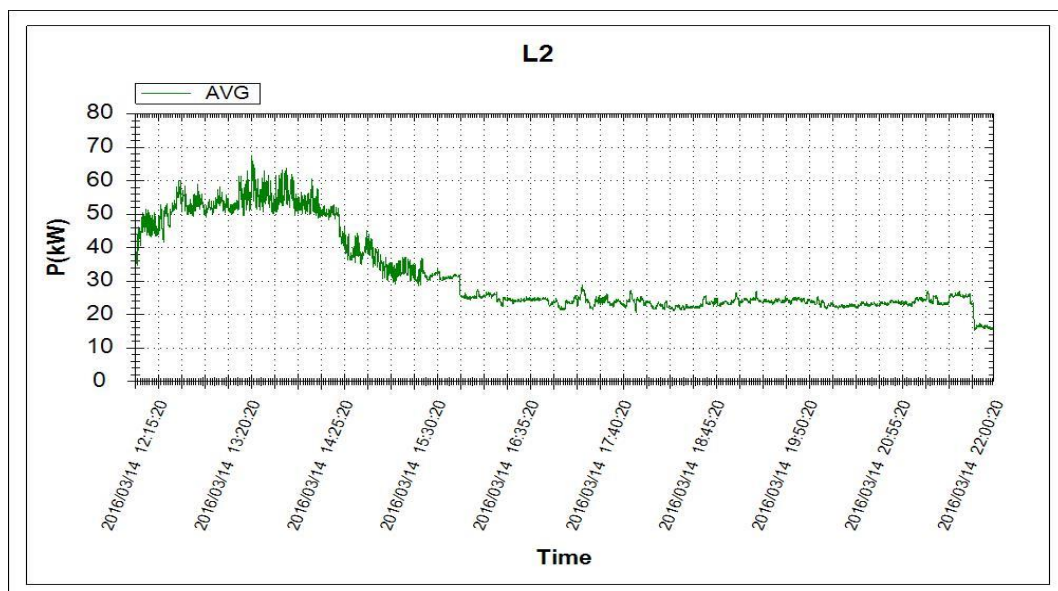
Kuvio 27. Järjestelmän kokonaispätötehon kuvaaja.

Kuviosta 27 nähdään, kuinka kuormitus on suurimmillaan päivällä, jolloin henkilökunta ja oppilaat ovat paikalla ja luokkatiloissa on valot päällä. Mittaustuloksista nähdään kuinka kulutus laskee, kun henkilökunta alkaa iltapäivällä lähteä töistä. Kuvioista 28, 29 ja 30 nähdään, kuinka pätöteho jakaantuu kolmen vaiheen kesken.

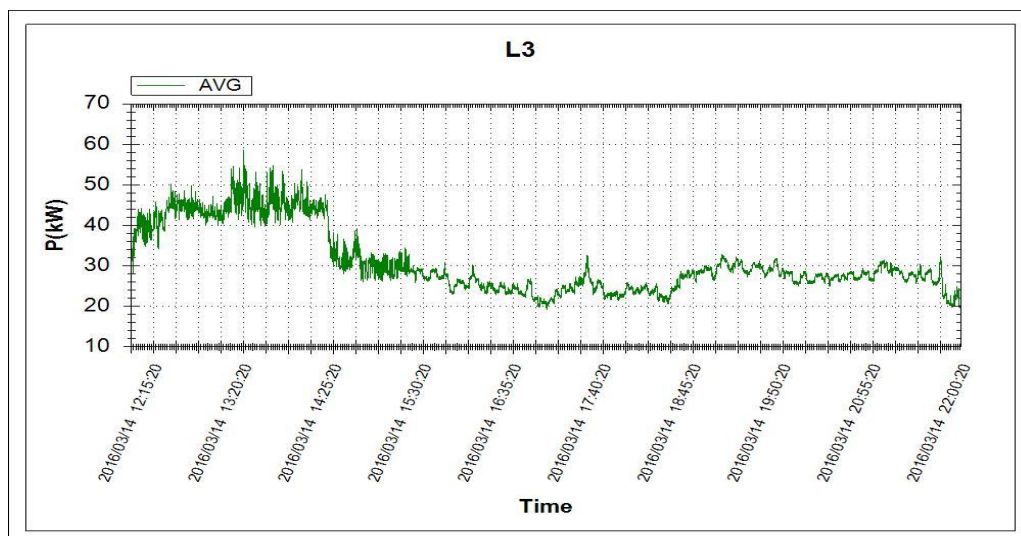


Kuvio 28. Vaiheen L1 pätötehon kuvaaja.

Kuvioista nähdään, kuinka kuormitus on jakaantunut kolmen vaiheen kesken. Kuvioiden perusteella voidaan sanoa, että vaihetta L3 kuormitetaan hieman enemmän illan aikana kuin kahta muuta vaihetta.

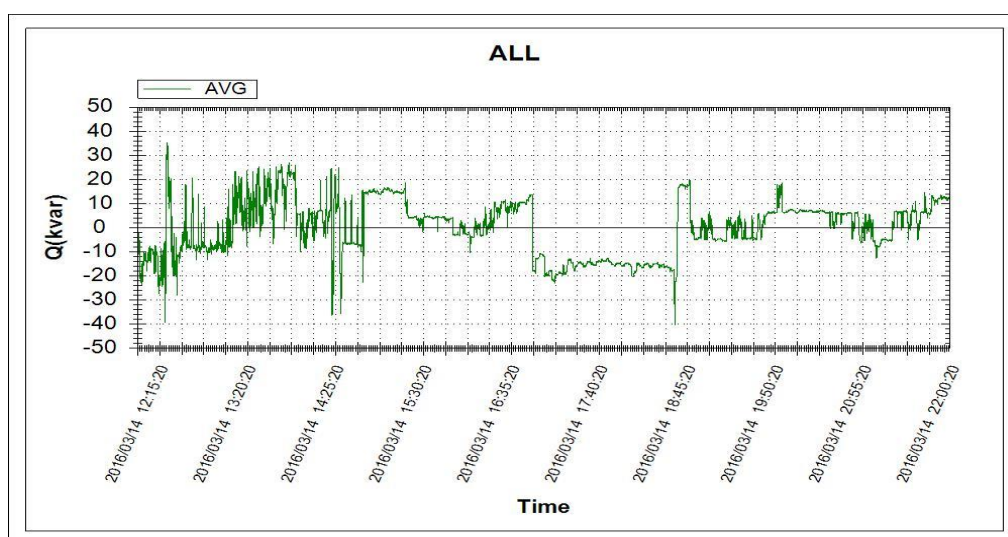


Kuvio 29. Vaiheen L2 pätötehon kuvaaja.



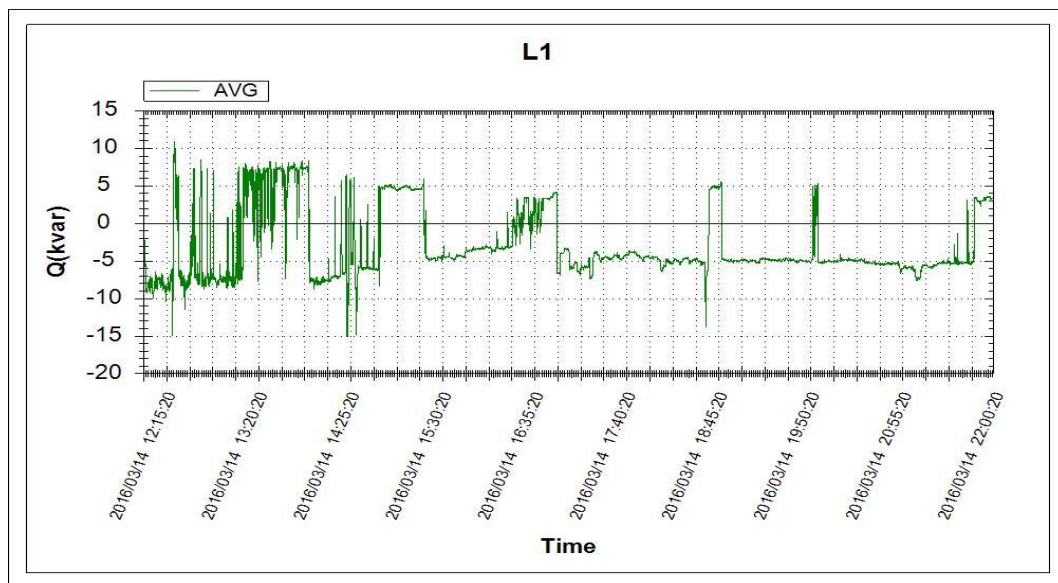
Kuvio 30. Vaiheen L3 pätötehon kuvaaja.

Kuviosta 31 nähdään, kuinka loisteho vaihtelee voimakkaasti kapasitiivisen ja induktiivisen tehon välillä suuren kuormituksen aikana. Samankaltainen heilunta jatkuu myös pienemmällä kuormalla. Noin kello 16.30 ja kello 18.45 välillä on kokonaisloistehossa erikoinen rappu kapasitiiviselle puolelle, joka päättyy erikoiseen piikkiin.



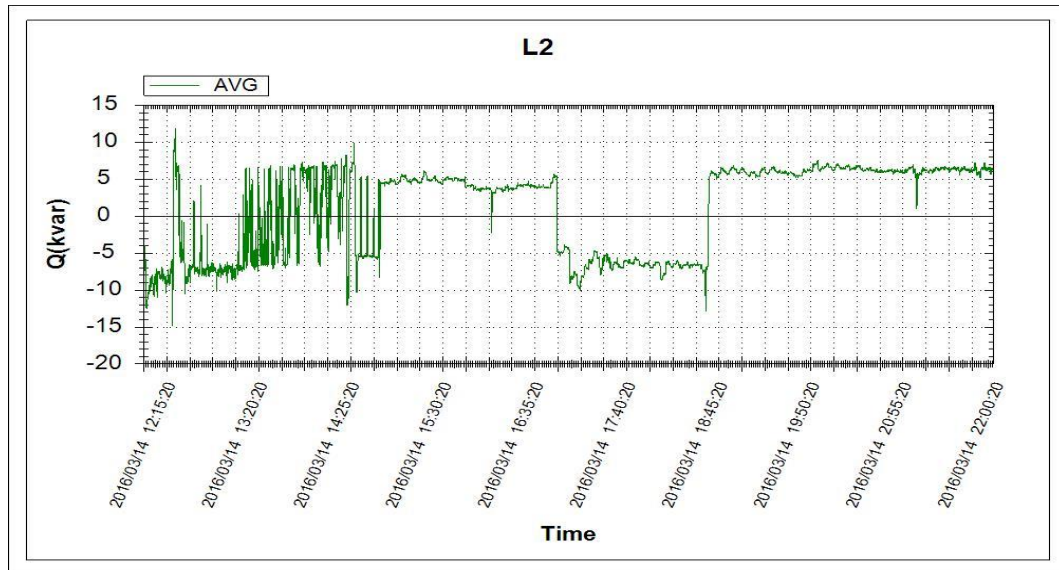
Kuvio 31. Järjestelmän kokonaisloistehon kuvaaja.

Kuviossa 32 on vaiheen L1 loistehon kuvaaja ja kuvioista voidaan nähdä, kuinka vaihe kärsii selkeästä ylikompensoinnista vaiheen ollessa kapasitiivisella puolella suurimman osan ajasta. Tarkemmilla tutkimuksilla voitaisiin selvittää, johtuuko tämä kompensointilaitteiston ongelmasta vai onko vaiheen kuormitus muuttunut radikaalisti kapasitiivisemmäksi kompensointilaitteiston asennuksen jälkeen.

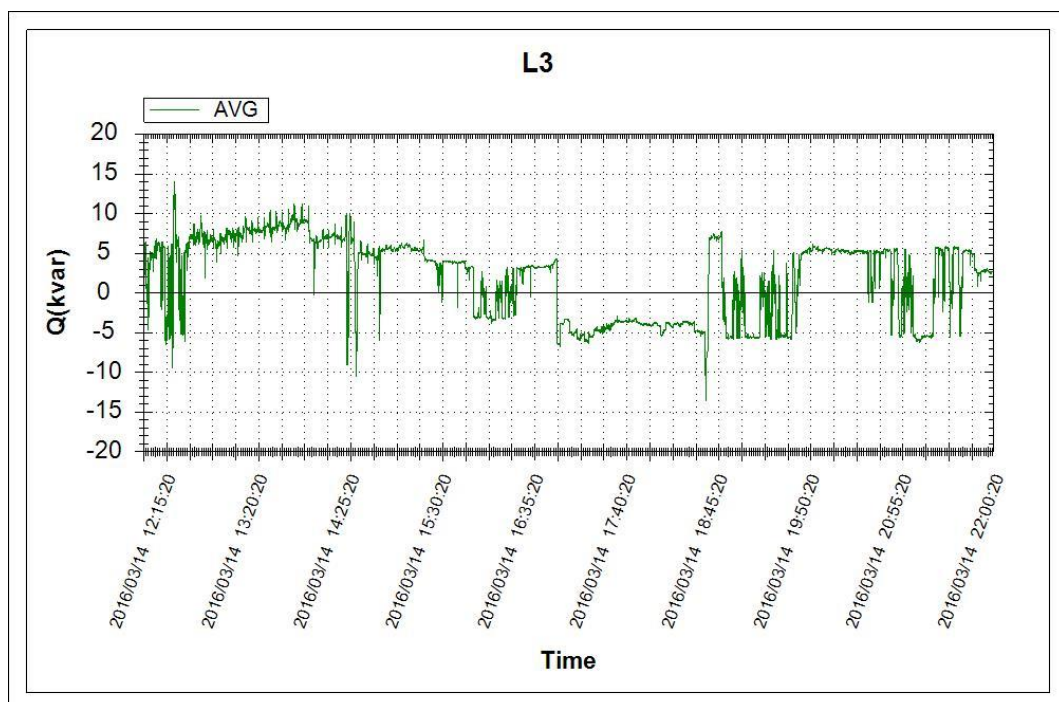


Kuvio 32. Vaiheen L1 loistehon kuvaaja.

Kuvioista 33 ja 34 nähdään, kuinka kaksi muuta verkon vaihetta ovat selkeästi induktiivisempia kuin ensimmäinen vaihe. Tästä johtuneen myös erikoisesti käyttäytyvä kokonaisloistehon kuvaaja. Myös kahdessa muussa vaiheessa on samalla aikavälillä kapasitiivinen notkahdus. On kuitenkin muistettava, ettei välttämättä kannata tarkastella liikaa hetkellisiä loistehokäyriä, sillä loistehokäyrältä nähdään vain verkossa kulkevan loistehon määrä. Koska induktiivinen loisteho ja kapasitiivinen loisteho ovat toisensa kumoavia komponentteja, on vaikea sanoa pelkkien tehokvaajien perusteella, kuinka paljon loistehoa verkosta otetaan. Energiamittaukset kertovat kuinka paljon loistehoa sähkönsiirtoverkosta otetaan. Energiamittauksia käsitellään tässä työssä näennäistehokuvaajien jälkeen.

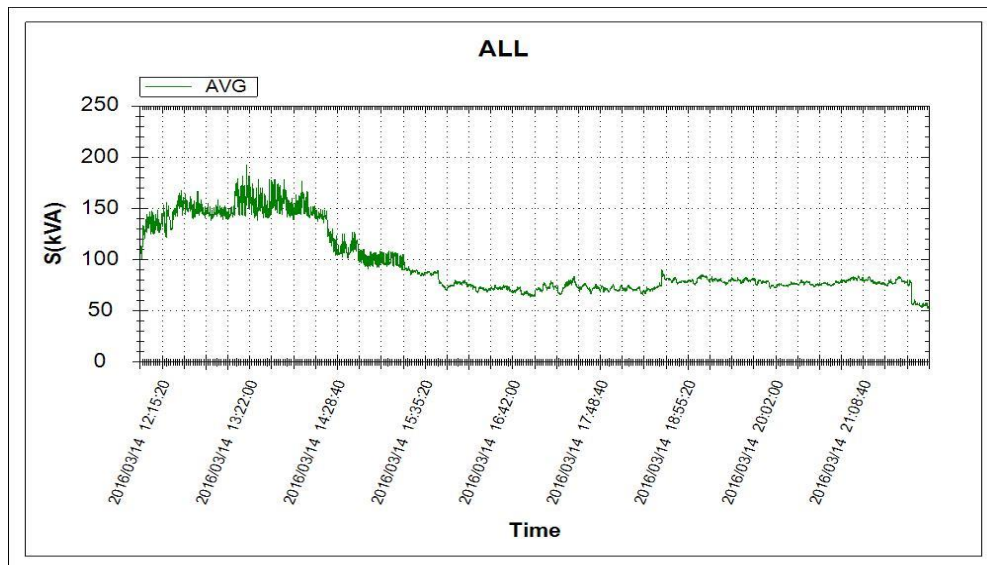


Kuvio 33. Vaiheen L2 loistehon kuvaaja.

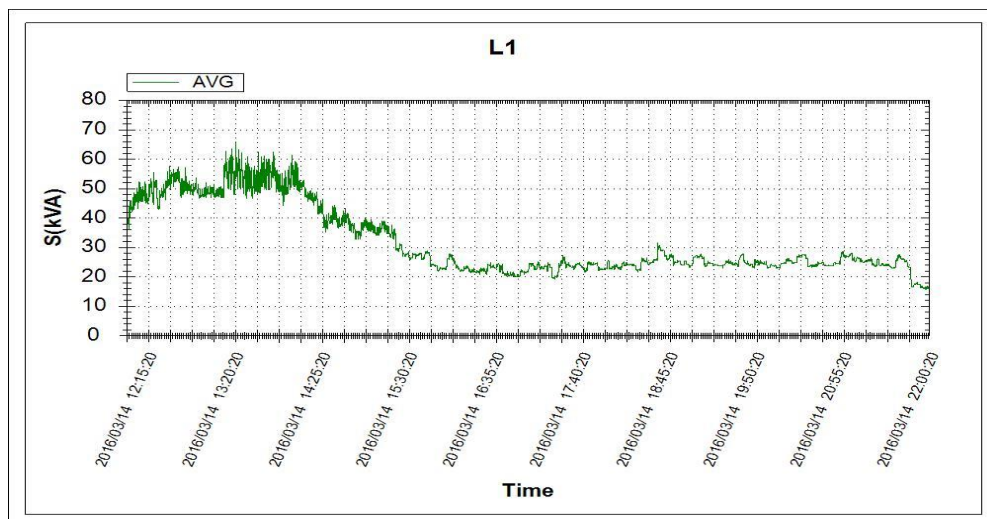


Kuvio 34. Vaiheen L3 loistehon kuvaaja.

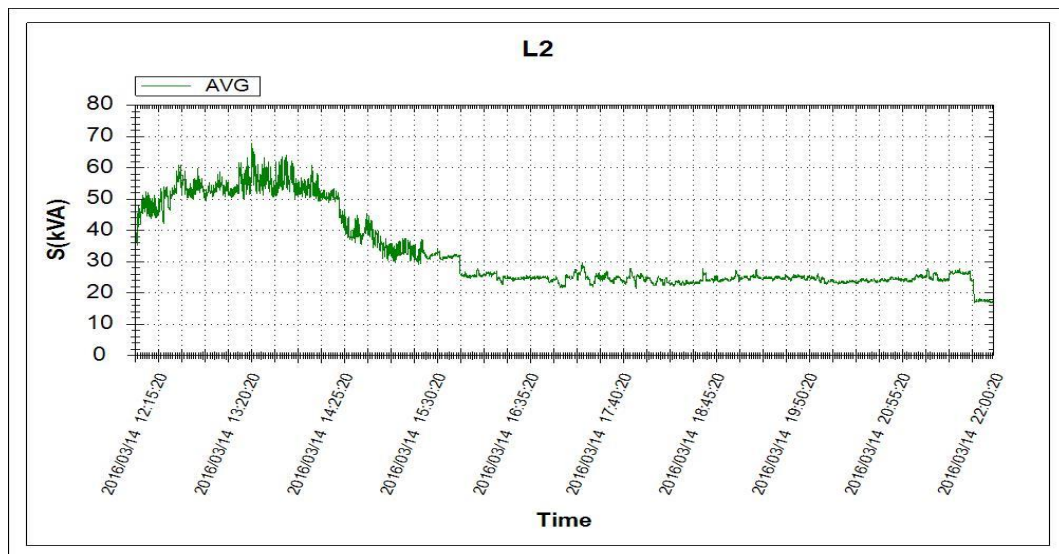
Kokonaisnäennäistehon kuvaaja on esitetty kuviossa 35. Kuvaaja on profiililtaan hyvin samanlainen kuin kuviossa 27 esitetty pätötehon kuvaaja, vaikka siihen on summutunut myös, edellä kuviossa 31 esitetty, hyvin paljon erilainen kokonaisloistehon kuvaaja.



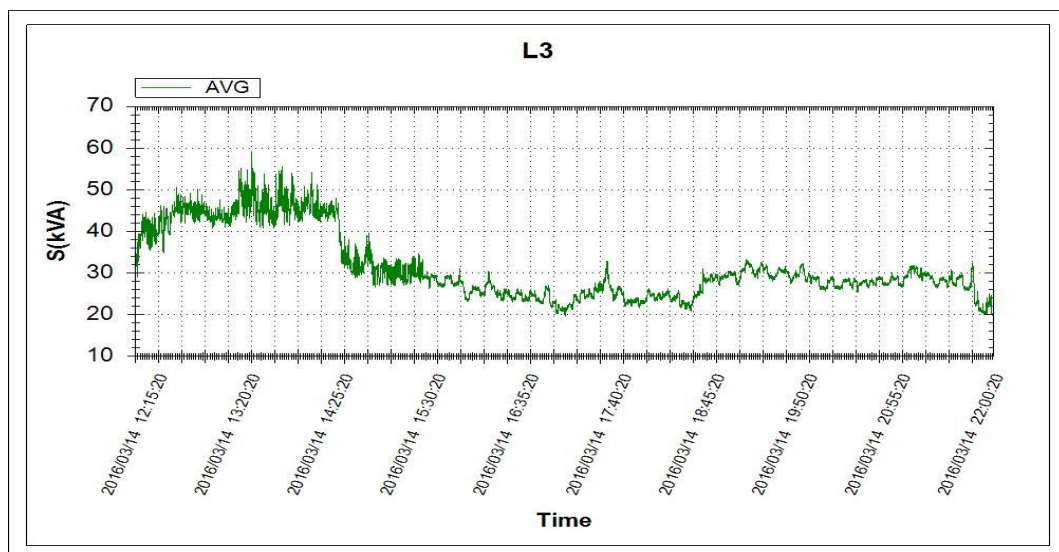
Kuvio 35. Järjestelmän näennäistehon kuvaaja.



Kuvio 36. Vaiheen L1 näennäistehon kuvaaja.



Kuvio 37. Vaiheen L2 näennäistehon kuvaaja.

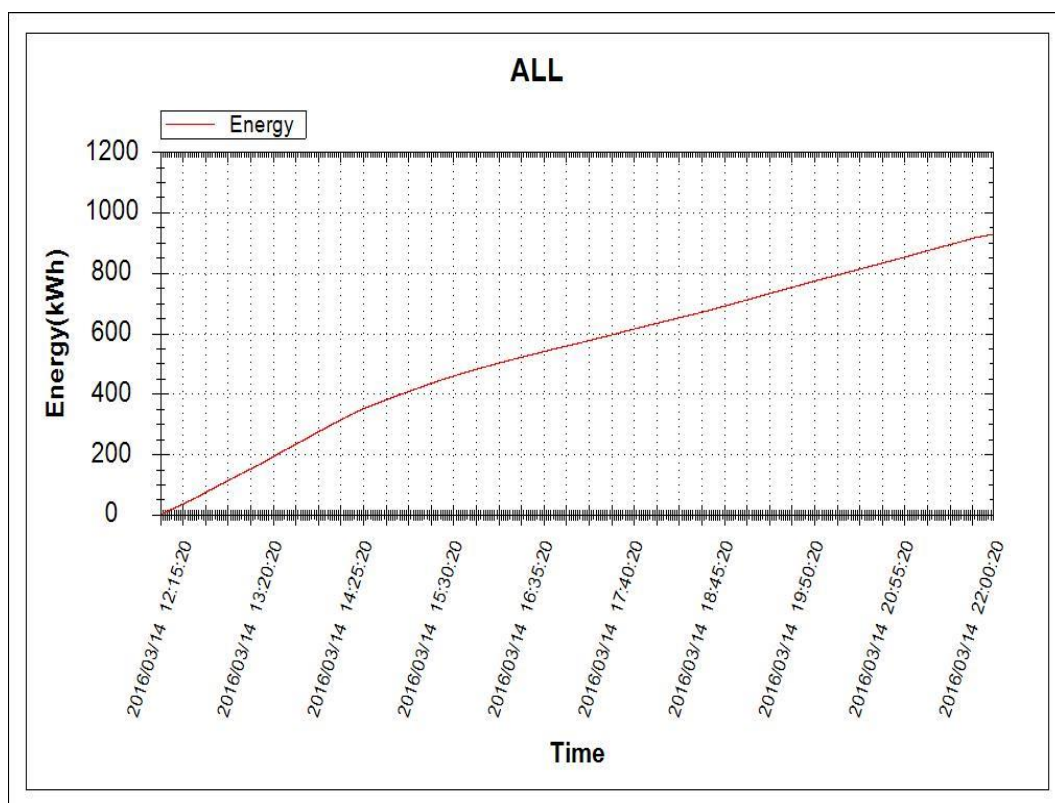


Kuvio 38. Vaiheen L3 näennäistehon kuvaaja.

Yläpuolella kuvioissa 36, 37 ja 38 on esitettyinä näennäistehokuvaajat kaikista kolmesta vaiheesta. Kuvioista nähdään, että ne ovat hyvin samankaltaisia pätötehon kuvaajien kanssa.

6.3.2 Energiamittaukset ja mittaustulosten analysointi

Alla olevista kuvista nähdään kiinteistön energiankulutus samassa ajanjaksossa, missä muutkin mittaustulokset on esitetty. Kuvioista 39 nähdään kiinteistön kuluttaman pätöenergian määrä, tällöin mittayksikkö on kilovattituntia (kWh) noin 10 tunnin aikana kiinteistössä kuluu noin 925 kilovattituntia sähköä. Selkeä kulmakerroimen lasku nähdään kuvaajassa iltapäivällä, kun kulutus alkaa laskea iltaa kohti.



Kuvio 39. Kiinteistön pätötehon kulutus, kuvassa esitetyllä ajanjaksolla.

Kuviossa 40 on esitetty näennäisenergian kulutus kilovolttiampeiritunteina, jolloin energiaan on laskettu sekä verkosta otettu pätöteho että loisteho. Verkosta otetun loistehon määrä voidaan helposti laskea tehojen kaavasta,

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (3)$$

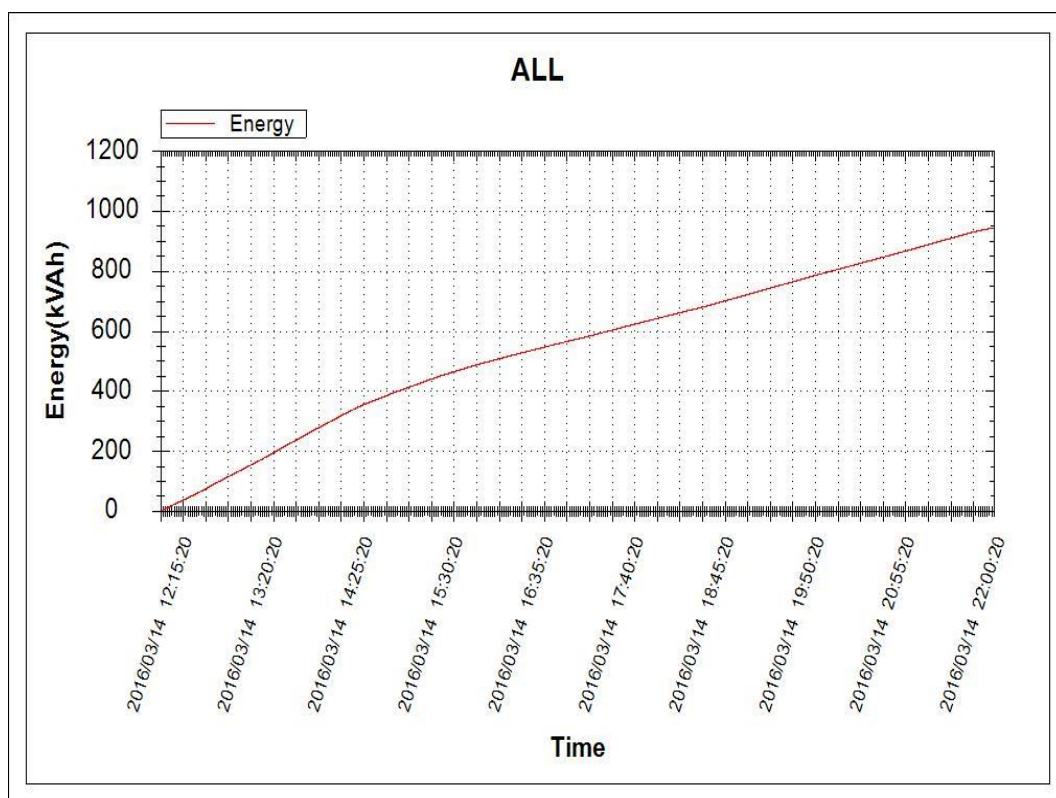
jolloin loistehon kaavaksi saadaan

$$Q = \sqrt{(S^2 - P^2)} \quad (4)$$

Kuviosta 40 nähdään, että kokonaisenergian kulutus on noin 945 kilovolttiampereituntia. Näin voidaan laskea alla olevan laskutoimituksen mukaan verkosta otettavan loisenergian määrä.

$$Q = \sqrt{945^2 - 925^2} = 193,4kVarh \quad (5)$$

Loistehon yksikkö on vari, jonka lyhenne on VAR. Yleensä sopivan kokoinen mit-tayksikkö on kVAR eli kilovari. Loisenergian yksikkö ilmoitetaan yleensä muo-dossa kVARh. Laskelmien perusteella kiinteistössä kului noin 10 tunnin aikana 193 kVARh vaikka kiinteistön loistehon kompensointi oli käytössä.



Kuvio 40. Kiinteistön energiankulutus kilovolttiampereituntina kuvassa esitetyllä ajanjaksolla.

Mittaustulosten perusteella kiinteistössä energiaa vuorokauden aikana kului noin 2050 kWh ja 2100 kVAh. Tulosten perusteella voidaan laskea vuorokaudessa kulunut loisenergia seuraavasti:

$$Q = \sqrt{2100^2 - 2050^2} = 455,5 \text{ kVAh} \quad (6)$$

Vuorokausikulutuksesta voidaan laskea vuotuinen kulutus olettaen, että kulutus olisi vuoden jokaisena päivänä samanlainen. Tällöin vuodessa loistehoa kuluisi

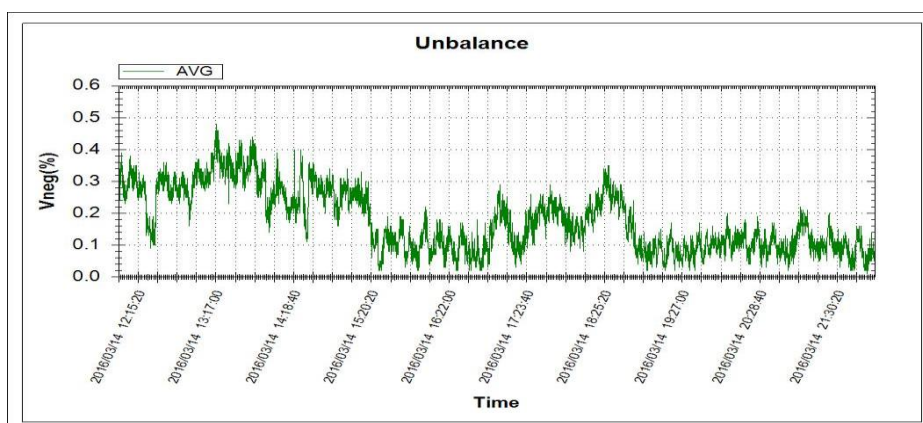
$$Q_{365} = 365 \text{ d} \cdot 455,5 \text{ kVAh} = 166257,5 \text{ kVAh} \quad (7)$$

Laskelmien perusteella nähdään, kuinka paljon kiinteistö kuluttaa loistehoa verkosta, vaikka kiinteistössä on toimiva kompensointilaitteisto. Mittaustulosten ja tulkintaohjeistuksen perusteella olisi järkevää harkita loistehonkompensoinnin uudelleenmitoittamista.

6.4 Vinokuormitusmittaukset

6.4.1 Jännitteen epäsymmetria

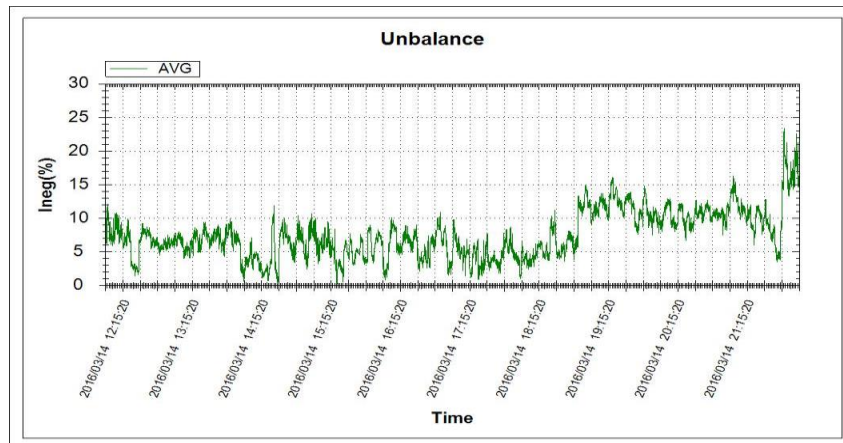
Tulkintaohjeistuksen perusteella mitattu jännite-epäsymmetria pysyy sallituissa rajoissa, eikä aiheuta toimenpiteitä. Jännitteen epäsymmetrian kuvaaja on esitetty kuviossa 41.



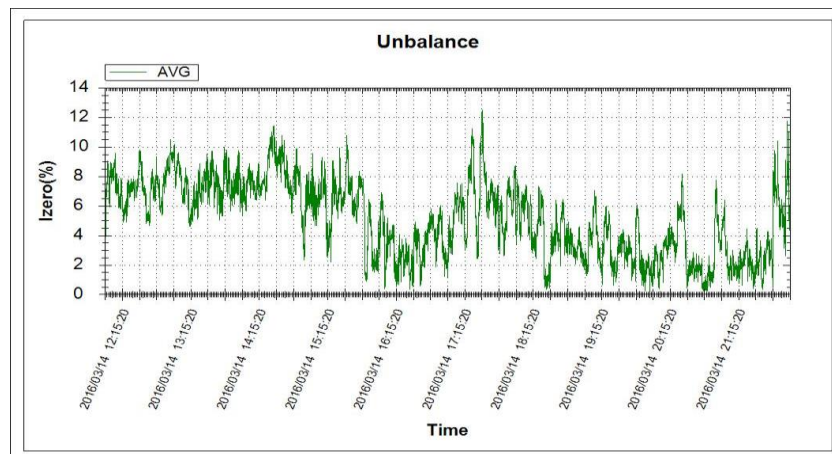
Kuvio 41. Jännitteen epäsymmetria prosentteina.

6.4.2 Vinokuormitus

Mittaustuloksista havaitaan, että vinokuormitus on suurimmillaan 20 -25 %, joka ylittää tulkintaohjeistuksen antamat rajat. Vinokuormitus on pahimmillaan ilta- ja yöaikaan, jolloin verkkoon kytketyt yksivaiheiset laitteet eivät jakaannu tasaisesti vaiheiden kesken. Vinokuormituksen kuvaajat on esitetty kuvioissa 42 ja 43.



Kuvio 42. Vinokuormituksen vastakomponentti.



Kuvio 43. Nollavirta prosentteina.

Tulkintaohjeen mukaisesti vinokuormitusongelman ratkaisuna on kuormitusten tasaaminen vaiheiden kesken.

6.5 Loppupäätelmät

Mittaustulosten ja tulkintaohjeistuksen pohjalta tehdyn analysoinnin perusteella voidaan tuloksista kerätä seuraavat loppupäätelmät.

Jännitteen ja taajuuden mittaustulokset täyttivät standardin vaatimukset eivätkä aiheuta toimenpiteitä. Virtausmittauksissa havaitaan pääsulakkeiden ylikuormitusongelmaa päivisin. Tähän helpoin ratkaisu on pääsulakekoon kasvattaminen, mikäli se on mahdollista.

Teho- ja energiamittausten perusteella pystyttiin tutkimaan sitä, kuinka paljon esimerkiksi loistehoa otetaan sähkönsiirtoverkosta. Tehtyjen tehomittausten perusteella pystytään sanomaan, että pätöteho kuormittaa verkkoa hyvin tasaisesti eikä se aiheuta ongelmia järjestelmässä. Järjestelmän loistehot vaihtelevat melko paljon vaiheiden kesken. Energiamittausten perusteella voidaan todeta, kiinteistössä toimivasta loistehonkompensoinnista huolimatta, että loistehoa otetaan sähkönsiirtoverkosta melko paljon, eli noin 455,5 kVArh vuorokaudessa. Suuntaa antavaksi vuotuiseksi loistehoksi voidaan laskea noin 166 258 kVArh, sillä laskennassa on oletuksena, että kulutus olisi vuoden jokaisena päivänä samanlainen. Suuren loisenergian kulutuksen takia suositellaan loistehon kompensoinnin uudelleenmitoittamista. Loistehon kompensoinnin uudelleenmitoituksella olisi mahdollista päästä eroon pääsulakkeiden ylikuormittumisongelmasta.

Yliaaltomittauksien perusteella vain 6. yliaallossa havaittiin piikki, joka ylittää standardin rajat. Mittauksien mukaan jännitteen kokonaissärö THD jäi noin 2,6 prosenttiin. Havaintojen perusteella ei ole syytä ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin. Vinokuormitusmittausten perusteella virran perustaajuinen vastakomponentti $I_{neg}(\%)$ kohoaa pahimmillaan noin 10–15 prosenttiin ja virran nollakomponentti $I_{zero}(\%)$ kohoaa pahimmillaan noin 15 prosenttiin. Mittausten perusteella voidaan sanoa, että kuormia tulisi jakaa tasaisemmin vaiheiden kesken. Kuitenkin suurin vinokuormitus on pienimmän kokonaiskuormituksen aikaan myöhään illalla ja yöllä. Tällöin, kun kokonaisvirta on pieni, on myös kuormituksen jakaminen mahdollisesti hankalampaa toteuttaa.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä selkeäsananainen tulkintaohjeistus kolmivaiheisen tehoanalysointin mittaustulosten analysointiin ja selvittää mitattavassa kohteessa olevat ongelmat ja etsiä niihin mahdollisia ratkaisuja. Ensimmäisenä aloitettiin tutustumalla SFS-EN 50160 -standardiin ja sitä kautta kerättyyn muuhun teorialamateriaaliin.

Seuraavana työn osana oli mittaustulosten tulkintaohjeistuksen laatiminen standardin ja muun kerätyn teorialamateriaalin pohjalta. Ohjeistuksessa käytiin läpi kaikki tutkittavat suureet yksi kerrallaan ja käytiin läpi millaiset raja-arvot standardi asettaa tutkittaville suureille. Jos suure ylittää raja-arvon, miten ongelma olisi mahdollista korjata.

Yhtenä työn osana oli mittalaitteeseen tutustuminen ja sen käytön opetteleminen. Mittalaite tuli tutuksi, kun tehtävänä oli kääntää mittalaitteeseen suomenkielinen käyttöohje englanninkielisen manuaalin pohjalta. Lisäksi tutustuttiin mittalaitteen muihin ominaisuuksiin, kuten mittalaitteen etäluentamahdollisuuteen LAN-verkon kautta.

Työn seuraavana osana oli mittausten suorittaminen. Mittalaite vietiin Järviseedun ammatti-instituutin Kurejoen toimipisteeseen. Mittaukset tehtiin navettarakennuksen pääkeskukselle. Mittauksia suoritettiin useana päivänä tulosten tarkastelukelpoisuuden varmistamiseksi.

Kun mittaukset oli suoritettu, aloitettiin mittaustulosten analysointi käyttäen tulkintaohjeistusta. Mitattu suure kerrallaan analysoitiin mittaustulokset ja verrattiin standardin asettamiin raja-arvoihin. Kaikki mittaustulokset olivat hyvin pitkälle odotuksien mukaisia. Mittauksissa jännitetasot ja taajuus pysyivät koko mittauksen ajan hyvällä tasolla. Yliaaltojen määrä verkossa oli hyvin pientä. Mittauksissa havaittiin yksittäinen piikki 6. harmonisessa yliaallossa, joka ylittää standardin vaatimukset. Tämä ei aiheuta toimenpiteitä. Vinokuormitus oli pienellä kuormituksella hieman sallittua korkeampi ja tästä voidaan tehdä johtopäätös, että kuormituksia pitäisi hieman jakaa uudelleen vaiheiden kesken. Virran mittauksessa nähtiin,

kuinka vaiheiden kuormitukset ovat hyvin korkealla jo normaalin päivittäisen kuormituksen aikana. Tähän mahdollinen ratkaisu olisi pääsulakekoon kasvattaminen. Tehomittausten perusteella verkossa kulkeva loistehon määrä on melko suuri. Energiamittausten ja -laskelmien perusteella saatiin selville, että kiinteistö ottaa sähkönsiirtoverkosta merkittävän määrän loistehoa, vaikka pääkeskuksella on käytössä loistehon kompensointi. Näin ollen ehdotettiin, että mahdolliset korjaustoimenpiteet tulisi aloittaa loistehon kompensoinnin uudelleenmitoittamisesta. Tällöin saataisiin sähkönsiirtoverkosta otettu loistehon määrä minimiin ja samalla mahdollisesti korjaten pääsulakkeiden ylikuormittumisongelmat

Jatkomahdollisuutena työn osalta on loistehon kompensoinnin mitoittaminen, jonka asentamisen jälkeen seuraa mittausten uudelleensuorittaminen ja mittaustulosten analysointi. Mittaustulosten analysoinnin jälkeen pystyttäisiin vertaamaan sitä, kuinka verkon tila muuttui ja oliko kompensoinnin mitoittamisesta hyötyä.

Tulkintaohjeistuksen pohjalta mittaustulosten analysoinnin tekeminen onnistui hyvin. Mittaustulosten analysointi ja tulkinta on helpompaa tämän ohjeistuksen avulla kuin, että alkaisi etsimään mittaustulosten analysointiin tarvittavat tiedot erikseen standardista ja muualta.

LÄHTEET

- /1/ Aura, L. & Tonteri, A. J. 1995. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. WSOY. Porvoo
- /2/ Energiateollisuus. 2014. Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje Viitattu 16.3.2016 http://energia.fi/sites/default/files/sahkon_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf
- /3/ Fluke Corporation. 2004. Power quality analyzer uses for electricians. Viitattu 15.1.2016
<http://fluke.informationstore.net/efulfillment.asp?publication=10880-fin>
- /4/ Fluke Corporation. 2005. Applying power quality measurements to predictive maintenance. Viitattu 15.1.2016
<http://fluke.informationstore.net/efulfillment.asp?publication=11602-fin>
- /5/ Imatran Seudun Sähkösiirto Oy. 2016. Lämpöpumput sähköverkossa. Viitattu 7.3.2016. <http://www.issoy.fi/imatran-seudun-sahkonsiirto-oy/sahkoliittymat/lampopumput-sahkoverkossa>
- /6/ Järvisseudun ammatti-instituutti. 2016. Kotisivut. Viitattu 17.3.2016
<http://www.jamin.fi>
- /7/ Kara, O. 2007 Vätkyntämittareiden kalibrointimenetelmän kehittäminen. Viitattu 4.3.2016 <http://lib.tkk.fi/Dipl/2007/urn009663.pdf>
- /8/ Karonen, T. 2010. EPÄSYMMETRISEN KUORMITUKSEN JA YLIAALTOJEN MITTAUKSET Mikkelin ammattikorkeakoulun rakennuksissa. Viitattu 25.2.2016 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/13483/Karonen_Tommi.pdf?sequence=1
- /9/ Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. 2016. Yliaalto-opus. Viitattu 5.2.2016 <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

- /10/ Kymenlaakson Sähköverkko Oy. Seppo Suurinkeroinen. 2012. Välkyntä ja sen aiheuttajia sähköverkossa. Viitattu 4.3.2016
<http://docplayer.fi/683485-Valkynta-ja-sen-aiheuttajia-sahkoverkossa.html>
- /11/ PeakTech Prüf- und Messtechnik GmbH. 2016. PeakTech Operation manual 3-phase Power Analyzer. Viitattu 5.3.2016 http://www.peaktech.de/productdetail/kategorie/leistungs-analysator/produkt/peaktech-4145.html?file=tl_files/downloads/4001%20-%205000/PeakTech_4145_03-2016-1.pdf
- /12/ SONEI S.A. 2014. Sonel Analysis 2 Operating manual. Viitattu 2.2.2016
http://www.sonel.pl/sites/default/files/en/manuals/sonel_analysis2_manual_v1_2_en.pdf
- /13/ Suomen standardisoimisliitto SFS. SESKO Ry. 2010. SFS-EN 50160 Yleistä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet.
- /14/ Sähköinfo Oy. ST-kortisto. 2006. ST 52.51.04. Sähkön laatu. Vinokuormitus, nollajohdin ja transienttiylijännitteet.
- /15/ Tampereen Teknillinen Yliopisto. 2016. SMG-2100: Sähkötekniikka. Viitattu 16.3.2016 <https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-2100/2012/periodi2/luento11.pdf>
- /16/ Verkkonen, V. 2014. Teoreettinen sähkötekniikka 3 Muutosilmiöt ja taajuusanalyysi.
- /17/ Virtuaali Ammattikorkeakoulu. 2016. Loistehonkompensointi. Viitattu 18.2.2016 <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojak-sot/030503/1134045922435/1134046524532/1134046634756/1134046693839.html>
- /18/ Wallin, P. 1991. Sähkömittaustekniikan perusteet. Otatieto Helsinki