

Antti Kinnunen

SÄHKÖVERKON LAADUN JA KAPASITEETIN SELVITYS

SÄHKÖVERKON LAADUN JA KAPASITEETIN SELVITYS

Antti Kinnunen
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka, sähkövoimatekniikka

Tekijä: Antti Kinnunen
Opinnäytetyön nimi: Sähköverkon laadun ja kapasiteetin selvitys
Työn ohjaaja: Ismo Pitkänen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018
Sivumäärä: 36 + 13 liitettä

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Kontinkankaan lääketieteellisen tiedekunnan päärakennuksen sähköverkon tila sekä häiriöherkkyys. Työn tilaajana toimi Suomen Yliopistokiinteistöt Oy.

Työ on rakenteeltaan tutkimusmainen. Työ aloitettiin perehtymällä sähkönlaatua koskevaan standardiin SFS-EN 50160, joka määrittelee rajat tai arvot, joiden sisällä sähkönkäyttäjä voi olettaa jännitteen ominaisuuksien pysyvän. Työ eteni sähkönlaadun mittauksiin, jotka suoritettiin sähköpääkeskuksessa Fluke 435 II -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysaattorilla. Työn loppuvaiheessa analysoitiin saatuja mittaustuloksia ja verrattiin niitä standardin määrittelemiä arvoihin.

Opinnäytetyö eteni aikataulun mukaisesti ja valmistui sovittuna aikana. Työn lopputulokseksi saatiin selvitys kiinteistön sähköverkon nykykunnosta sekä sen laajentamismahdollisuuksista.

Asiasanat: sähkönlaatu, loisteho, yliaallot

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Electrical engineering programme, Electrical power engineering

Author: Antti Kinnunen

Title of thesis: The Quality and Capacity of the Electrical Power System

Supervisor: Ismo Pitkänen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2018

Pages: 36 + 13 appendices

The purpose of this thesis was to find out the state and interference of the electrical power system in the main building at Kontinkangas faculty of medicine.

The thesis is a research type study. The work began with getting acquainted with the power quality standard SFS-EN 50160, which defines the values of the voltage characteristics of electricity. The next phase was to run the measurements of the power quality with the Fluke 435 II -power quality and energy analyzer. In the final phase of the work the results of the measurements were analyzed and compared to the limits of the standard.

The thesis progressed on schedule and was made in time.

Keywords: electrical power quality, reactive power, harmonic voltage

ALKULAUSE

Haluan kiittää Suomen Yliopistokiinteistöt Oy:tä ja Rakennuttajatoimisto Promen Oy:tä haastavasta ja mielenkiintoisesta opinnäytetyöaiheesta, jonka aikana opin hyvin paljon sähköön laatuun vaikuttavista tekijöistä.

Eriyiset kiitokset haluan esittää Rakennuttajatoimisto Promen Oy:n toimitusjohtajalle Petri Harjulle, sähköasiantuntijalle Aulis Romakkaniemelle ja Oulun ammattikorkeakoulun lehtorille Ismo Pitkäselle.

Lämmin kiitos myös perheelleni tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Oulussa 28.4.2018

Antti Matias Kinnunen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	9
2 SÄHKÖN LAATU	10
2.1 Sähkön laadun poikkeamat	10
2.2 Sähkönlaatumittaus	11
3 SÄHKÖN JÄNNITEOMINAISUUDET	12
3.1 Taajuus	12
3.2 Jännitetaso vaihtelut	13
3.2.1 Nopeat jännitetaso vaihtelut	14
3.2.2 Transienttiylijännite	14
3.3 Jännitteen epäsymmetria	15
3.4 Jännitekuoppa	16
4 YLIAALLOT	17
4.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot	17
4.2 Yliaaltojen aiheuttajat	17
4.3 Yliaaltojen jaottelu ja yhteensopivuustasot	18
4.4 Yliaaltojen haittavaikutukset	19
4.5 Yliaaltovirtojen summautuminen nollajohtimeen	19
4.6 Yliaaltosuodattimet	20
4.6.1 Passiivisuodatin	20
4.6.2 Aktiivisuodatin	20
5 LOISTEHON KOMPENSOINTI	21
5.1 Loisteho	21
5.2 Estokelaparisto	21
5.3 Resonointitaajuus	22

6 SÄHKÖANALYSAATTORI JA MITTAUKSET	23
6.1 Sähkötyöturvallisuus	23
6.2 Mittauskytkennät	23
6.3 Sähköanalysaattorin toiminnot	25
7 MITTAUSTULOKSET	26
7.1 Taajuus	26
7.2 Jännitteen vaihtelut	27
7.3 Virtamittaus	28
7.4 Nopeat jännitemuutokset	29
7.5 Epäsymmetria	30
7.6 Harmoniset yliaaltojännitteet	31
8 JOHTOPÄÄTÖKSET MITTAUSTULOISTA	32
9 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	34
LIITTEET	36

LYHENTEET

A	Ampeeri
Hz	Hertsi
kHz	Kilohertsi
ms	Millisekunti
PJ	Pääjännite
P_{lt}	Pitkäaikainen häiritsevyysindeksi
P_{st}	Lyhytaikainen häiritsevyysindeksi
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS ry
THD	Harmoninen kokonaissärö
U	Jännite
U_h	Harmoninen yliaaltojännite

1 JOHDANTO

Työn tavoitteena oli mitata ja analysoida sähkön laadullisten ominaisuuksien toteutumista Kontinkankaan lääketieteellisen tiedekunnan päärakennuksessa. Sähkön laadullisten ominaisuuksien lisäksi kiinteistöstä huomioitiin kuorman ottama teho, josta pystyttiin päättelemään, riittääkö sähköverkon kapasiteetti tulevaisuuden laajennusvaraa ajatellen. Työssä tarkistettiin myös nykyisen kompensoinnin riittävyys ja toimivuus. Työn tilaajana toimi Suomen Yliopistokiinteistöt Oy.

Kontinkankaan päärakennus on 6-kerroksinen kiinteistö, joka on suunniteltu hammaslääketieteen opetuskäyttöön. Kiinteistön kuormitus on hyvin vaihteleva riippuen kerroksesta ja käyttötarkoituksesta. Sähkönlaatua heikentäviä tekijöitä löytyy paljon ja tästä syystä kiinteistölle päätettiin tehdä laatumittaukset.

Sähkön laadun mittaukset suoritettiin sähköpääkeskuksesta, joka sijaitsee päärakennuksen kellarikerroksessa. Virallisen viikon pituisen mittaussajan lisäksi suoritimme pistokoe tyyppisiä mittauksia, joilla haluttiin selvittää yksittäisten keskuk-sien sähkön laadun tila.

Työ on rakenteeltaan tutkimusmainen. Työssä käydään erityisesti läpi eurooppalaista standardia SFS-EN 50160, joka määrittelee rajat tai arvot, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän. Verkos-toanalysaattorilla saatuja mittaustuloksia verrataan standardin määrittelemiin arvoihin ja pohditaan kiinteistön jännitteen laadullisten ominaisuuksien toteutumista.

2 SÄHKÖN LAATU

Sähkön laadun määrittely voidaan jakaa seuraaviin pääkohtiin: sähkön jatkuva saatavuus, jännitetoleranssien ja taajuustoleranssien puitteissa pysyminen sekä puhtaan ja häiriöttömän siniaallon mukaisuus. Sähkön laadun heikkenemisen syynä saattaa olla paikallinen laite tai jakeluverkko. Tyypillisiä vikojen aiheuttajia ovat kuorman äkillinen kytkeminen tai poistaminen, voimalaitoksen äkillinen pysähtyminen, ylikuormitettu linja, salamanku ja generaattorin tai kuorman aiheuttamat harmoniset säröt.

Suomessa ja monessa muussa Euroopan maassa sähkön laatua koskevat standardit pohjautuvat pitkälti SFS-EN 50160 standardiin ja sen kansallisiin sovelluksiin. Standardi jakaantuu kahteen osaan: jännitteen laatuun ja toimitusvarmuuteen. (1.)

2.1 Sähkön laadun poikkeamat

Sähkön laadun ongelmat eivät välttämättä näy pelkästään poikkeamina standardin vaatimissa arvoissa, vaan ne voidaan huomata esimerkiksi jonkin laitteen virheellisenä toimintana. Sähköverkon heikko laatu aiheuttaa elektronisten laitteiden eliniän lyhenemistä sekä viallisesti toimivan laitteen lämpökarkailusta johtuvaa hukkaenergiaa.

Monesti sähkön laadun heikkeneminen ja huonous tulee kuluttajalle esille liian myöhään. Sähkön laatuun on hankala kiinnittää ensisijaisesti huomiota, koska poikkeamista ja laadusta puhutaan enimmäkseen standardeissa. Sähkön laadun heikkous tulee tyypillisesti esille vasta silloin, kun esimerkiksi kiinteistöön hankitut sähkölaitteet eivät toimi odotetulla tavalla. Tällaisissa tapauksissa sähkölaitteet eivät kestä ennestään häiriöherkkää sähköverkkoa ja niissä alkaa esiintyä toimintahäiriöitä. Tyypillisesti vikaa lähdetään etsimään aina ensiksi muualta kuin sähkön laadusta, mikä pitkittää häiriötilanteen kestoaikaa. (2.)

2.2 Sähkönlaatumittaus

Sähkönlaatumittauksen tarkoituksena on pyrkiä selvittämään mahdollisimman tarkasti, kuinka hyvin järjestelmä tukee eri kuormitusryhmiä. Laatumittauksen tarkoituksena ei ole vain paikantaa olemassa olevia vikoja ja häiriöitä, vaan se toimii myös ennakoivana kunnossapitona. Esimerkiksi ennen uusia kuormitusryhmiä ja laitehankintoja suoritettujen laatumittauksen ja niiden jälkeen suoritettujen laatumittauksen avulla saadaan varmistettua, että hankinnasta saatavat hyödyt toteutuvat varmasti sähkönlaadun ja energiansäästön osalta.

Infrapunalämpökuvauksella suoritettavaa lämpökuvausta käytetään uhkaavien vaurioiden paikantamiseen. Lämpökuvausta voidaan käyttää analysaattorin tapaan ennakoivana kunnossapitona. Se paljastaa tyypillisesti heikot liitokset ja ylikuormitetut sulakkeet, koska epätavallisen korkeasta vastuksesta aiheutuva sähkövirran kasvu alkaa tuottamaan ylimääräistä lämpösäteilyä. Lämpökuvauksen etuna analysaattorilla suoritettavaan mittaukseen verrattuna on, että siinä ei jouduta kosketuksiin jännitteellisten osien kanssa.

3 SÄHKÖN JÄNNITEOMINAISUUDET

Jännitteen ominaisuuksia tutkittaessa taajuus ja hitaat jännitetason vaihtelut ovat helpoiten seurattavissa, koska niihin ei vaikuta sähkönkäyttöpaikka ja siihen liitettyt sähkölaitteet. Taajuus määräytyy pohjoismaisen yhteiskäyttöverkon mukaan ja Suomessa sitä valvoo Fingrid Oyj.

Jännitteen ominaisuuksista nopeat jännitemuutokset, epäsymmetria ja harmoniset yliaallot ovat vaikeammin hallittavissa, koska ne johtuvat pääosin sähköverkkoon liitetyistä sähkölaitteista, joten ne joudutaan mittamaan aina erikseen kuluttajan liittymispisteessä. Näiden suureiden tulkintaan käytetään enimmäkseen suositusarvoja.

3.1 Taajuus

Taajuus kuvaa jakelujännitteen perusaallon jaksomäärää mitattuna tietyltä aikaväliltä. Taajuuden vaihtelun tulisi tapahtua mahdollisimman lähellä nimellistaajuutta, joka on pohjoismaisessa yhteiskäyttöverkossa 50 Hz. Taajuuden vaihtelua voidaan havainnollistaa Suomen sähkökulutuksen ja tuotannon vaihteluna. Kun sähköä tuotetaan enemmän kuin kulutetaan, taajuus nousee. Vastaavasti taajuus laskee, kun kulutetaan enemmän kuin tuotetaan. Käytännössä kuitenkin taajuus vaihtelee Suomessa alle 0,1 Hz, eikä siitä aiheudu sähkönkäyttöä haittaavia ilmiöitä. Taulukossa 1 on esitetty taajuuden vaihtelut yhteiskäyttöverkossa. (1.)

TAULUKKO 1. Taajuuden laatuluokittelu (1, s. 2).

Korkea laatu:	50 Hz \pm 0,5 % on 100 % ajasta.
Normaali laatu:	50 Hz \pm 1 % on 100 % ajasta.
Standardin laatu:	50 Hz \pm 1 % (eli 49,5...50,5 Hz) on 99,5 % vuodesta ja 50 Hz + 4 % / - 6 % (eli 47...52 % Hz) on 100 % ajasta.
Mittausaika:	Viikko; 10 sekunnin jaksoissa (keskeytyksiä ei lueta mukaan) yhteiskäyttöverkoissa.

3.2 Jännitetason vaihtelut

Sähköasemalla tuotettu sähkö ei pysy vakiona sähkökäyttäjälle asti, vaan se muodostuu sähköaseman jännitteen ja verkossa tapahtuvan jännitteen aleneman erotuksena. Jännitteen alenemaan vaikuttavat sähkön siirtotien mitoitus, johtimien reaktanssi ja resistanssi, kuormituksen suuruus jne.

Jännitteen taso ja sen vaihtelu vaikuttavat sähkölaitteiden toimintaan. Tästä syystä kiinteistön sähköverkko täytyy suunnitella siten, että jännitteenalenema ei olisi liian alhainen minkään kulutuspuolelta luona. SFS 6000-525 -standardisarja suosittelee seuraavia arvoja jännitteenalenemalle kiinteistön sähköverkon sisällä: ”valaistuksen osalta 3 %:a ja muulle käytölle 5 %:a, yksityisestä tehonlähteestä syötettynä valaistuksen osalta 6 %:a ja muulle käytölle 8 %:a” (3, s. 96).

Sähköaseman jännite pyritään säätämään siten, että asiakkaiden jännitetaso keskimäärin olisi nimellisjännitteen suuruinen. Yleisessä jakeluverkossa käytettävä vaihejännitteen nimellisarvo (U_n) on 230 V. Jännitetason vaihteluilla tarkoitetaan jännitteen tehollisarvon muutoksia, joita ei voida välittömästi havaita laitteiden toiminnassa, kuten valaistuksen vilkkumisena. Sähkönlaatumittauksissa ja sähkön laadun arvioinnissa voidaan huomata, että jännite ei pysy vakiona, vaan se on jatkuvasti muuttuva suure (taulukko 2). Muutokset johtuvat kuormitusvirran vähittäisistä muutoksista pääasiassa runkojohdoissa sekä myös kantaverkon jännitevaihteluista. (3.)

TAULUKKO 2. Jännitetason vaihtelun suositukset pienjänniteverkossa (1, s. 2).

Korkea laatu:	Tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvot ovat välillä 220... 240 V ja 10 minuutin arvojen keskiarvo 225...235 V
Normaali laatu:	Tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvot ovat välillä 207... 244 V.
Standardin laatu:	95 % tehollisarvojen 10 min keskiarvoista välillä 207... 253 V ja 100 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista välillä 195,5...253 V
Mittausaika:	Viikko; 10 minuutin jaksoissa (keskeytyksiä ei lueta mukaan)

3.2.1 Nopeat jännitetason vaihtelut

Yleensä nopeat jännitemuutokset aiheutuvat kuluttajan laitteiden tai järjestelmän kytkennöistä. Jännitevaihteluiden suuruus riippuu kuormitusmuutoksen suuruudesta ja verkon jäykkyydestä. Jännitemuutokset voivat olla jaksollisia tai jaksottomia riippuen niiden aiheuttajasta. Standardissa ei anneta tarkkoja arvoja nopeille jännitteenmuutoksille, mutta niiden tulkitsemiseen käytetään apuna välkynnän häiritsevyyssindeksejä ja niiden rajoissa pysymistä (taulukko 3). Jännitemuutoksen suuruus on hyvin tapauskohtaista, mutta normaaleissa käyttöolosuhteissa se on yleensä $U_n \pm 10 \%$. (4.)

Useasti peräkkäin toistuvat nopeat jännitteen muutokset voivat aiheuttaa lampujen luminanssin muutoksia, mikä havaitaan välkyntänä. Ilmiötä aiheuttavat esimerkiksi sähkömoottoreiden käynnistykset, yksivaiheiset hitsauskoneet ja kompressorit, joilla on hyvin epätasainen kuormitusvirta. Mittaustuloksesta voidaan laskea pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi, joka on esitetty kaavassa 1. (4, s. 15.)

$$P_{lt} = 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3}{12}}$$

KAAVA 1

P_{st} = lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi

P_{lt} = pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi

TAULUKKO 3. Välkynnän häiritsevyyssindeksit (1, s. 2).

Korkea laatu:	$P_{st, 3max} \leq 1$ ja $P_{lt, max} \leq 0,8$.
Normaali laatu:	$P_{lt, max} \leq 1$
Standardin laatu:	95 % P_{lt} -arvoista ≤ 1
Mittausaika:	Viikko; 10 minuutin jaksoissa (keskeytyksiä ei lueta mukaan) yhteiskäyttöverkoissa.

3.2.2 Transienttilylijännite

Transienttilylijännite on lyhytaikainen värähtelevä tai ei-värähtelevä ylijännite. Transienttilylijännitteitä aiheuttavat erilaiset kytkentätapahtumat, salamaniskut tai

sähköstaattiset purkaukset. Transienttiylijännitteiden ominaisuus on se, että niiden nousuaika on alle mikrosekunneista muutamiin millisekunneihin. Kestoltaan ne ovat huomattavasti verkkojännitteen jaksonpituutta (20 ms) lyhyempiä. (4.)

Transienttien mittauksissa ne näkyvät pulssimaisena, radiotaajuisena säteilynä kHz-alueella. Sähköverkossa voi esiintyä jopa tuhansien volttien ylijännitteitä mikrosekuntien aikana. Tästä voi johtua esimerkiksi kondensaattorien ja laitteiden hajoamisia sekä pahimmassa tapauksessa laitteiden palamista. Hetkellisen ylijännitteen lisäksi transientit aiheuttavat myös sähkömagneettisia häiriöitä muihin laitteisiin. Tämä voi näkyä esimerkiksi tietokoneen näytön vilkkumisena tai elektronisen laitteen virhetoimintana. Transienttiylijännitteille ei ole annettu SFS-EN 50160 standardissa mitään laatuluokitusta, koska niiden kesto aika ja esiintyminen ovat hyvin satunnaisia. (5.)

3.3 Jännitteen epäsymmetria

Vaiheiden välille epätasaisesti jaettu kuorma aiheuttaa epäsymmetriaa, eli vino kuormaa vaiheitten kesken. Toinen aiheuttaja vinokuormalle voi löytyä myös sähköverkon komponenttien vikaisuudesta, kuten yhden vaiheen palaneesta sulakkeesta.

Epäsymmetrian haittavaikutus painottuu eniten laitteisiin, jotka on suunniteltu toimimaan symmetrisellä kolmivaiheisella jännitteellä. Tyypillinen esimerkki on moottori, jonka hyötysuhde laskee ja häviöt kasvavat epäsymmetriasta johtuen. Epäsymmetria varaa myös verkon kapasiteettia ja lisää sähköjakelun häviöitä. (4.)

Epäsymmetria määritetään jännitteen vastakomponentin suhteessa myötäkomponenttiin. Myötäkomponentti saadaan symmetrisestä kolmivaihejärjestelmästä, jossa jännitteen tehollisarvot ja kulmat ovat samat. Vastakomponentti johtuu taas epäsymmetrisistä tehollisarvoista ja kulmista. Epäsymmetriaan liittyy myös nollakomponentti, joka vastaa nollajohtimen virtaa. Jännitteen epäsymmetria määritetään kaavan 2 avulla. (4, s. 16.)

$$u_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \text{ missä } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$$

KAAVA 2

U_u = epäsymmetria

β = jännitekerroin

U_{12} = jännite vaiheiden L1 – L2 välillä

U_{23} = jännite vaiheiden L2 – L3 välillä

U_{31} = jännite vaiheiden L3 – L1 välillä

Taulukkoon 4 on laatuluokiteltu jakelujännitteen epäsymmetrian esiintyminen pien- ja keskijänniteverkossa standardin SFS-EN 50160 mukaan. Laatuluokittelussa täytyy kuitenkin huomioida se, että epäsymmetrian esiintymiseen vaikuttavat huomattavasti kuluttajan itse kytkevät sähkölaitteet, joten verkonhaltijan on vaikea taata annettuja tilastoarvoja. (3.)

TAULUKKO 4. Epäsymmetrian laatuluokittelu (1, s. 3).

Korkea laatu:	100 % jakelujännitteen U_{uSh} -arvoista ≤ 1 %
Normaali laatu:	100 % jakelujännitteen U_{uSh} -arvoista $\leq 1,5$ %
Standardin laatu:	95 % jakelujännitteen U_{uSh} -arvoista ≤ 2 %
Mittausaika:	Viikko; 10 minuutin jaksoissa (keskeytyksiä ei lueta mukaan).

3.4 Jännitekuoppa

Jännitekuoppia aiheutuu yleensä jakeluverkon vioista tai suurien kuormien kytkennöistä. Kiinteistöissä kuoppia aiheuttavat suuritehoisten laitteiden kytkennät, jotka ottavat käynnistysvirtaa moninkertaisesti nimellisvirtaan verrattuna. Jännitekuoppa aiheuttaa jännitteen äkillisen tippumisen 1 %:n ja 90 %:n välille nimellisjännitteestä, jonka jälkeen jännite palautuu lyhyen ajan kuluttua takaisin normaalille tasolle. Kuopan kesto aika on 10 millisekunnista 1 minuuttiin. (3.)

4 YLIAALLOT

4.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot

Vuoden 2014 sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohjeessa määriteltiin harmoninen yliaaltojännite seuraavasti: ”Harmoninen yliaaltojännite on sinimuotoinen jännite, jonka taajuus on perusaallon taajuus kokonaisluvulla kerrottuna” (4, s. 16). Yksittäistä harmonista yliaaltojännitettä kuvataan vertaamalla sen suhteellista amplitudia perustaajuiseen jännitteeseen.

Epäharmonisten yliaaltojen erona harmonisiin yliaaltoihin on se, että ne eivät ole kokonaisluvulla kerrottuja. Taajuus on siis harmonisten yliaaltojen välissä.

4.2 Yliaaltojen aiheuttajat

Yliaaltojännitteitä aiheuttavat sähkönkäyttäjien epälineaariset kuormat. Tyypillisiä epälineaarisia kuormia ovat moottorin käynnistimet, nopeussäädetyt käytöt, elektroniset valonsäätimet, tietokoneet, elektroniikkalaitteet, hitsauslaitteet ja UPS-laitteet. Näiden laitteiden tyypillinen ominaisuus on se, että ne eivät käytä koko perustaajuista virta-aaltoa. (6.)

Epälineaariset kuormat aiheuttavat verkkoon yliaaltovirtoja, jotka aiheuttavat verkon impedanssien kanssa yliaaltojännitteitä. Näiden summaa kutsutaan kokonaisjännitesäröksi. Yksittäisiä harmonisia yliaaltojännitteitä voidaan yhdessä kuvata harmonisella kokonaissäröllä, joka lasketaan kaavan 3 avulla. (4, s. 16.)

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

KAAVA 3

THD = harmoninen kokonaissärö

U_h = harmoninen yliaaltojännite

4.3 Yliaaltojen jaottelu ja yhteensopivuustasot

Harmoniset yliaallot voidaan jaotella luokkiin niiden järjestysnumeron perusteella. Järjestysnumero kertoo niiden taajuuden alkaen perustaajuudesta 50 Hz. Toinen järjestysnumero on taajuudeltaan kaksi kertaa perustaajuuden suuruinen ja niin edelleen. Harmonisien yliaaltojen kiertosuunta voi olla joko positiivinen (+), nolla (0) tai negatiivinen (-). Taulukkoon 4 on selvennetty harmonisten yliaaltojen jaottelu ja kiertosuunta. (7.)

TAULUKKO 5. Yliaaltojen jaottelu (8, s. 6).

Yliaalto	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Taajuus	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz
Suunta	+	-	0	+	-	0

Yliaalto	7.	8.	9.	10.	11.	...
Taajuus	350 Hz	400 Hz	450 Hz	500 Hz	550 Hz	...
Suunta	+	-	0	+	-	...

Positiivinen kiertosuunta merkitsee sitä, että harmoniset yliaallot pyrkivät pyörittämään moottoria nopeammin kuin perustaajuus. Negatiivinen kiertosuunta pyrkii taas pyörittämään moottoria hitaammin kuin perustaajuus. Molemmissa tapauksissa moottorin vääntömomentti pienenee ja aiheuttaa moottorin hyötysuhteen heikkenemistä. Ilmiöistä johtuu myös moottorin ylikuumentuminen, joka voi aiheuttaa sen ennenaikaisen rikkoutumisen. (8.)

Standardissa SFS-EN 50160 määritetään, että viikon mittausajalla tulee yliaaltojen 10 minuutin keskiarvojen olla 95 % ajasta pienempiä tai yhtä suuria kuin taulukossa 6 annettu arvo. Yliaaltoja käsitellään 25 kertalukuun asti. (3.)

TAULUKKO 6. Jännitteen harmonisten yliaaltojen yhteensopivuustasot pienjänniteverkoissa prosentteina nimellisjännitteestä (3, s. 98).

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

4.4 Yliaaltojen haittavaikutukset

Sähkönjakeluverkossa yliaaltovirrat varaavat verkon kapasiteettia ja aiheuttavat verkossa ja verkon laitteissa ylimääräistä lämpenemistä. Ylimääräinen lämpeneminen vaikuttaa eristeiden nopeampaan vanhenemiseen. Yliaaltojen aiheuttamasta jännitteen käyrämuodon poikkeamasta voi johtua esimerkiksi erilaisten suojalaitteiden virhetoiminta.

4.5 Yliaaltovirtojen summautuminen nollajohtimeen

Harmonisien yliaaltojen kiertosuunnan ollessa nolla, sen virtayliaallot summautuvat nollajohtimeen. Erityisesti järjestelmässä, jossa on huomattavan paljon epälineaarisia kuormia, voi nollajohtimessa kulkeva kolmas yliaaltovirta olla jopa 1,7-kertainen verrattuna vaihevirtaan. Tästä voi aiheutua nollajohtimen ylikuumentumista ja normaalia suurempia jännitehäviöitä maadoitusnavan ja nollajohtimen välille. (8.)

4.6 Yliaaltosuodattimet

Yliaaltojen suodatuksessa käytetään passiivi- ja aktiivisuodattimia. Passiivista suodatinta käytetään yleensä silloin, kun kuorman synnyttämät yliaallot pysyvät samanlaisina eli verkossa esiintyy vain tiettyjä yliaaltotaajuuksia. Aktiivisuodattimesta saadaan suurin hyöty käyttöön silloin, kun verkossa esiintyy monia eri yliaaltotaajuuksia.

4.6.1 Passiivisuodatin

Passiivisuodattimen nimi tulee siitä, että se ei sisällä elektroniikkaa, joka ohjaisi suodattimen toimintaa, vaan se sisältää vain passiivisia komponentteja. Passiivisuodattimen toiminta perustuu siihen, että sen resonanssitaajuus pyritään asettamaan mahdollisimman lähelle poistettavan yliaallon taajuutta, joka muodostaa yliaaltovirralle pieni-impedanssisen sulkeutumistien. Rakenteeltaan suodatin koostuu kondensaattorin ja kelan sarjaan kytkennästä. (9.)

4.6.2 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodattimet ovat rakenteeltaan säädettäviä tehopuolijohdettuja yliaaltovirtalähteitä. Niiden toiminta perustuu siihen, että ne syöttävät verkon yliaaltoihin nähden vastakkaisessa vaiheessa olevia yliaaltoja, mikä aiheuttaa yliaaltojen kumoutumisen. Aktiivisuodattimen etu passiiviseen suodattimeen on se, että sen toiminta perustuu reaaliaikaiseen mittaukseen ja järjestelmän säätymiseen mitaustuloksien perusteella. Aktiivisuodattimen vaste on hyvin nopea ja se kykenee yhdellä suodattimella suodattamaan useita yliaaltoja. (9.)

5 LOISTEHON KOMPENSOINTI

5.1 Loisteho

Sähköverkkoon kytketyt erilaiset kuormat eivät aina toimi pelkästään pätöteholla, vaan ne vaativat lisäksi loistehoa. Näissä tapauksissa varsinaisen työn tekee pätöteho ja loisteho ylläpitää tarvittavaa magneettikenttää. Tyypillisiä loistehoa käyttäviä kojeita ovat esimerkiksi moottorit ja purkauslamput. Loistehoa voidaan kuvata siten, että se värähtelee edestakaisin sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä. (10.)

Loistehon kompensointi voidaan toteuttaa joko laitekohtaisesti, ryhmäkohtaisesti tai keskitetysti. Laitekohtaista kompensointia käytetään yksittäiselle laitteelle, esimerkiksi oikosulkumoottorille. Ryhmäkohtaisella kompensoinnilla voidaan toteuttaa ryhmäkeskuksen syöttämien laitteiden kompensointi ja keskitettyä kompensointia käytetään silloin, kun kompensoinnin tarvetta ja vaihtelua on paljon. (10.)

Laitekohtaisesta kompensoinnista ollaan vähitellen pyrkimässä eroon johtuen sen hankalasta ylläpidosta ja uusissa rakennuksissa sitä ei tulisi käyttää ollenkaan.

Kuormien tarvitsema loisteho voidaan tuottaa joko generaattorilla tai paikallisesti kompensointikondensaattoreilla. Kondensaattoreilla tuotettu loisteho on huomattavasti parempi ratkaisu, koska generaattorilla tuotettu loisteho joudutaan siirtämään sähköjakeluverkkoa pitkin, mikä aiheuttaa johdoissa ja muuntajissa häviöitä. Sähkönkäyttäjät huomaa myös kompensointikondensaattorilla tuotetun loistehon edun sähkölaskussa, koska sähköjakeluverkossa siirretystä loistehosta peritään loistehomaksu. (11.)

5.2 Estokelaparisto

Estokelaparistoon päädytään yleensä tilanteessa, jossa epälineaarisen kuorman osuus ylittää 20 % keskuksen kokonaiskuormasta. Estokelaparisto sisältää erikokoisia kompensointiportaita, jotka säätyvät kuorman muuttuessa. Säätymistä

ohjaa loistehosäädin, joka ohjaa kontaktorien avulla tarvittavan määrän portaita käyttöön. Porras koostuu sitä ohjaavasta kontaktorista, kondensaattorista ja kuristimesta. Kuristimien tehtävänä on estää yliaaltojen pääsy kondensaattoreihin. Kondensaattorin kapasitanssi on mitoitettu verkkoon siten, että saadaan haluttu perustaajuinen kompensointiteho. Kuvassa 1 on Kontinkankaan sähköpääkeskusta kompensoiva Nokian valmistama PJ-estokelaparisto, jonka teho on 300 kVAr.



KUVA 1. Estokelapariston kytkentä sisältäpäin.

5.3 Resonointitaajuus

Estokelapariston käyttöä suositellaan enemmän kuin tavallista automatiikkaparistoa, koska verkon induktanssi voi automatiikkapariston kapasitanssin kanssa muodostaa rinnakkaisresonanssiin jollakin taajuudella. Resonointitaajuuden osuminen jollekin verkossa esiintyvälle harmoniselle yliaaltotaajuudelle voi aiheuttaa sen, että harmoninen yliaaltovirta moninkertaistuu jopa 20-kertaiseksi. Estokelapariston induktanssin ja kapasitanssin suhde on valittava niin, että sen viritystaajuus osuu jollekin ei-harmoniselle taajuudelle. Yleisesti käytetty viritystaajuus on 189 Hz. (10.)

6 SÄHKÖANALYSAATTORI JA MITTAUKSET

Ennen varsinaisten mittauksien aloittamista kävimme tutustumassa sähköpääkeskukseen ja kehitimme suoritettaville mittauksille toimintasuunnitelman. Suunnitelmassa käy ilmi miten toimitaan jännitteisten osien läheisyydessä ja miten analysaattori kytketään. Virallisen viikon pituisen mittausjakson lisäksi suoritimme myös pistokokeita eri ryhmäkeskuksille. Pistokokeiden kohteina oli yliopiston ruokala sekä kaukaisin keskus sähköpääkeskuksesta johtoreittejä pitkin, joka syöttää ilmastointia. Keskuksien nousujohtokaavio on liitteenä 1.

6.1 Sähkötyöturvallisuus

Sähkötyöturvallisuuden kannalta on erityisen tärkeä suunnitella toiminta sähköpääkeskuksessa niin, että vaaratilanteita ei pääsisi syntymään. Asennuksien edellytyksenä oli myös, että sähkötyöturvallisuus- ja EA1-kortti ovat voimassa. Mittarin jäädessä viikon ajaksi pääkeskukseen täytyy myös huomioida, että ulkopuolisille ei aiheudu vaaratilanteita. Tätä varten kiinnitimme sähköpääkeskuksen oveen huomiolapun varoituskolmiolla, josta ilmeni mittauksien olevan käynnissä.

Sähköanalysaattorin kytkemisessä sähköpääkeskukseen oli vaarana vahingossa koskettaa jännitteisiä osia, joten kytkennän aikana käytettiin eristäviä suojavarusteita ja työkaluja, joista syntyy kaksoiseristys. Lähtökohtaisesti sähkötyöt pitäisi aina pyrkiä tekemään jännitteettömänä, mutta esimerkiksi analysaattori vaatii jännitteisen kohteen, jotta mittauksista saadaan tarvittavia tuloksia.

Kytkenät suoritettiin sähköalan ammattilaisen kanssa, joka toimi myös sähkötyöturvallisuuden valvojana. Jännitetöitä suositellaan tekemään aina työparin kanssa, vaikka sitä ei vaaditakaan. Tämä johtuu siitä, että vaaratilanteen sattuessa ensiapu olisi saatavissa mahdollisimman nopeasti. (12.)

6.2 Mittauskytkennät

Sähköverkon laadun mittauksessa käytettiin Fluke 435 II -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysaattoria. Kaapelit kytkettiin analysaattorin manuaalista löytyvän

asennusohjeen mukaisesti. Kuvassa 2 analysaattori on kytkettynä sähköpääkeskukseen ja suorittaa mittausta. Analysaattorin mittausjohtimien asennuksessa täytyy huomioida se, että johdot eivät jää mihinkään puristuksiin tai ole kulkurei-
tillä lojumassa. Johtojen äkillinen irtoaminen voisi aiheuttaa mittaustuloksien vää-
ristymisen.

Sähköpääkeskuksen syöttö oli toteutettu keskuksen alapuolelta, joten sinne oli varattu huomattavan suuri tila eri kaapeleille. Tämän ansiosta analysaattorin mit-
tausjohtimet pystyttiin syöttämään alakautta keskuksen sisälle, mikä mahdollisti
siistin ja turvallisen reitin mittausjohtimille.



KUVA 2. Sähköanalysaattori kytkettynä pääkeskukseen.

6.3 Sähköanalysaattorin toiminnot

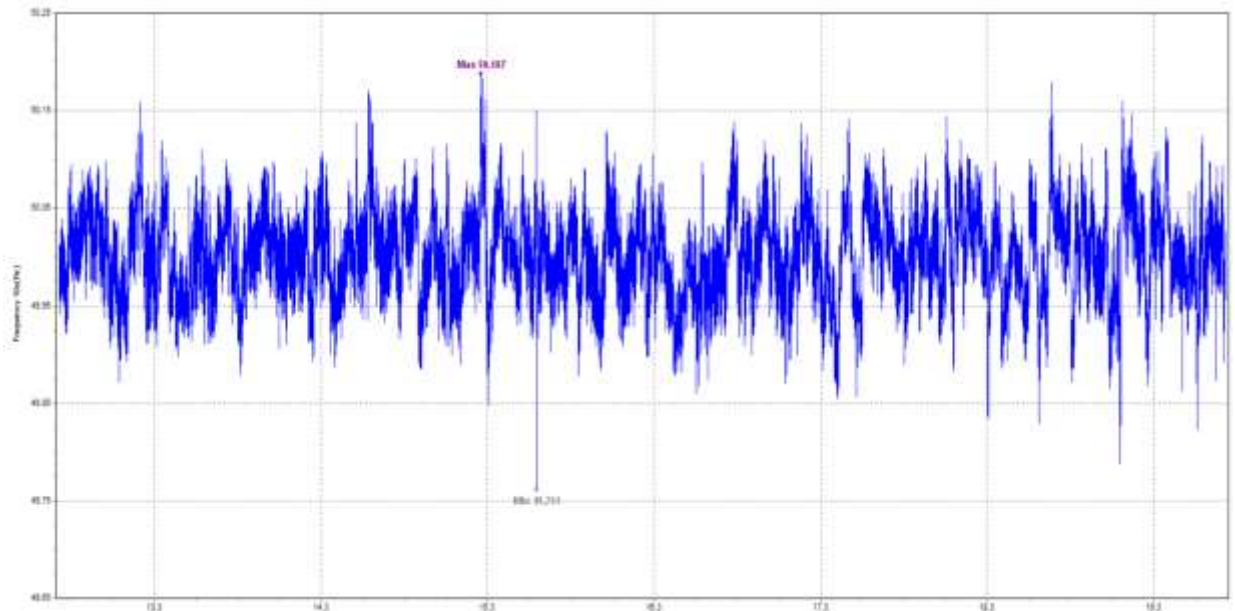
Sähköanalysaattorin käyttöä helpottaa erityisesti sen loggeri- eli tiedonkeruu toiminto ja Power log -sovellus. Loggeri mahdollistaa monien eri suureiden tallentamisen samanaikaisesti suurella erottelukyvällä. Tallennuksien aikavälin pystyy myös itse säätämään sopivaksi.

Power log -sovellus on tietokoneelle ladattava ohjelma, jolla pystytään tarkastelemaan analysaattorin tallentamia mittaustuloksia jälkeenpäin.

7 MITTAUSTULOKSET

7.1 Taajuus

Kuvassa 3 on esitetty taajuuden vaihtelu viikon ajalta 10 sekunnin jaksoissa.

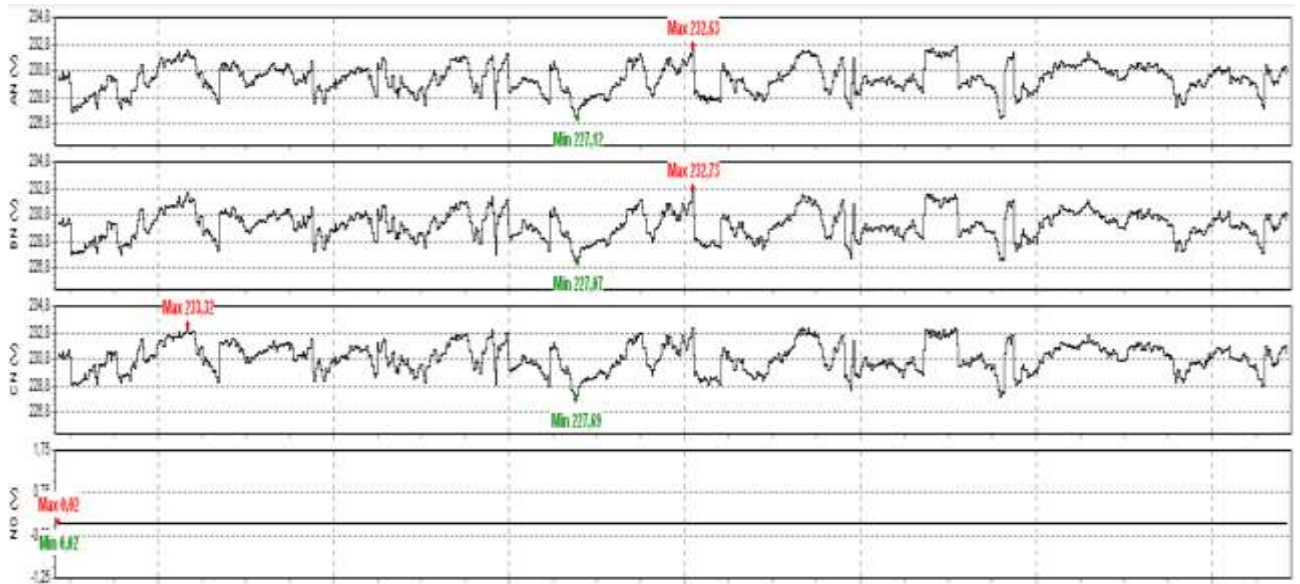


KUVA 3. Taajuuden mittaustulos.

Taajuus vaihteli 49,761 Hz:n ja 50,187 Hz:n välillä. Mittaustuloksesta nähdään, että taajuus täyttää korkean laadun kriteerit taulukon 1 mukaan.

7.2 Jännitteen vaihtelut

Kuvassa 4 on esitetty jännitteen vaihtelut viikon ajalta 10 minuutin jaksoissa.



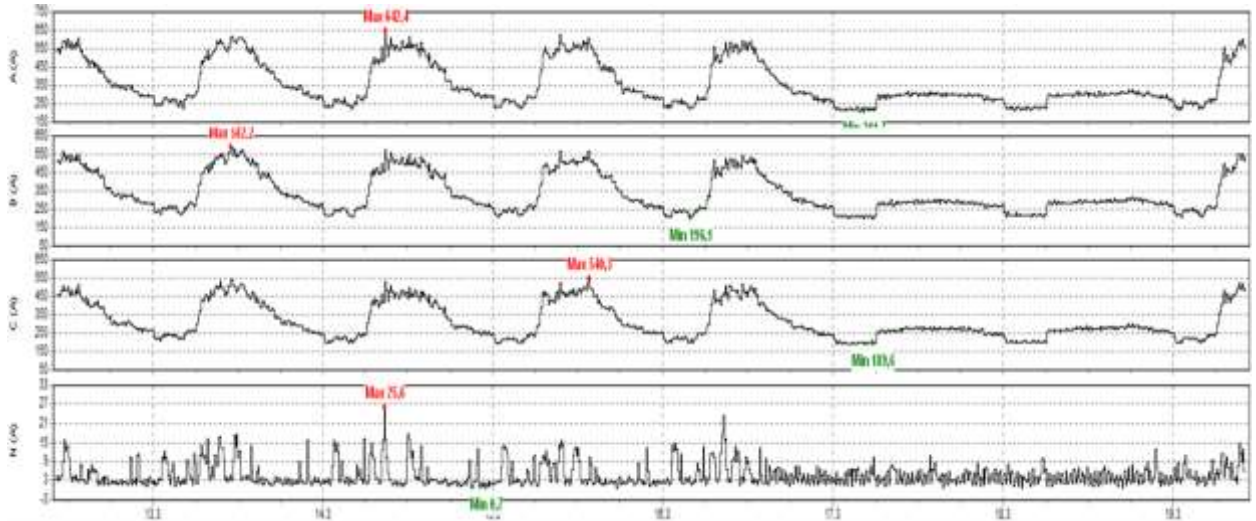
KUVA 4. Jännitteen vaihtelut sähköpääkeskuksesta mitattuna.

Jännitteen vaihteluksi saatiin seuraavat arvot: L1-vaiheen maksimi oli 232,63 V ja minimi 227,12 V. L2-vaiheen maksimi oli 232,73 V ja minimi oli 227,07 V. L3-vaiheen maksimi oli 233,32 V ja minimi oli 227,69 V.

Jännitteen vaihtelun kuvaajasta nähdään, että vaihtelu pysyi hyvin symmetrisenä vaiheiden välillä. Mittaustuloksesta on myös hyvä huomata, miten kuvan oikeassa laidassa jännitteen vaihtelut tasoittuvat viikonlopulle mentäessä, koska sähkökäytön kannalta kiinteistössä pyörii enää välttämätön kuorma. Taulukkoon 2 verrattaessa mittaustulokset täyttävät korkean laadun kriteerit.

7.3 Virtamittaus

Kuvassa 5 on esitetty kuormitusvirtojen vaihtelu viikon mittausajalta.



KUVA 5. Kuormitusvirrat.

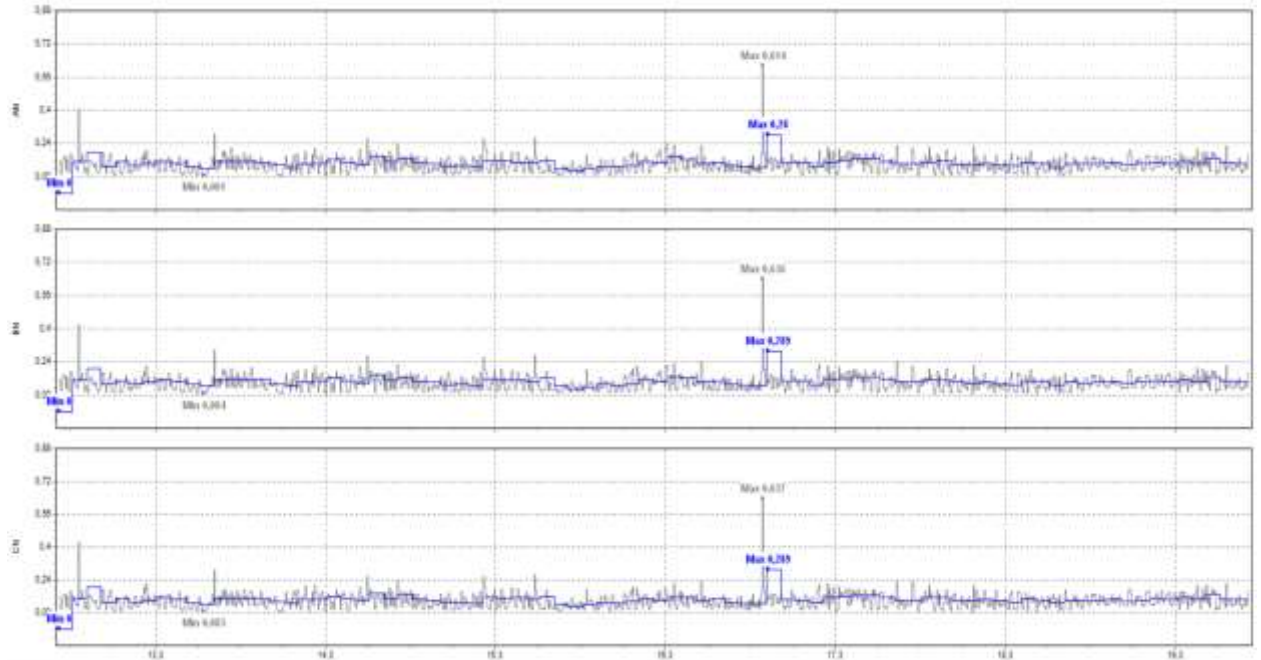
L1-vaiheen maksimi oli 642,4 A ja minimi 211,7 A. L2-vaiheen maksimi oli 582,2 A ja minimi 196,1 A. L3-vaiheen maksimi oli 540,3 A ja minimi oli 189,6 A.

Mittaustuloksesta nähdään, että kiinteistössä esiintyy jonkin verran vinokuormitusta. Tyypillisesti kuitenkin L-1 vaihe kuormittuu aina vähän enemmän kuin muut vaiheet.

Nollajohtimessa esiintyvä yliaaltovirta kertoo siitä, että kiinteistössä on vinokuormitusta tai jonkin verran yliaaltoja. Nollajohtimen kannalta pahimpia ovat kolmannet yliaallot, koska ne summautuvat nollajohtimeen. Yliaaltovirran arvoksi nollajohtimessa mitattiin 25,6 A, mikä on hyvin tyypillinen arvo tämän kokoisissa kiinteistöissä.

7.4 Nopeat jännitemuutokset

Kuvassa 6 on jännitteen nopeasta vaihtelusta aiheutuvan välkyntän häiritsevyyssindeksit.



KUVA 6. Jännitteen lyhyt- ja pitkäaikaiset häiritsevyyssindeksit.

Jännitteen lyhytaikaisen häiritsevyyssindeksin maksimiarvo oli 0,637 ja pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin arvo oli 0,289. Molemmat arvot saatiin L-3 vaiheelta. Mittaustuloksien maksimiarvoja verrattiin taulukkoon 3, jossa on annettu standardin laatuluokat. Tuloksista nähdään, että välkyntää esiintyy hyvin vähän ja tulokset täyttävät korkean laadun kriteerit.

7.5 Epäsymmetria

Kuvassa 7 on viikon mittausajalta saadun jännitteen epäsymmetrian esiintyminen kiinteistön sähköverkossa.

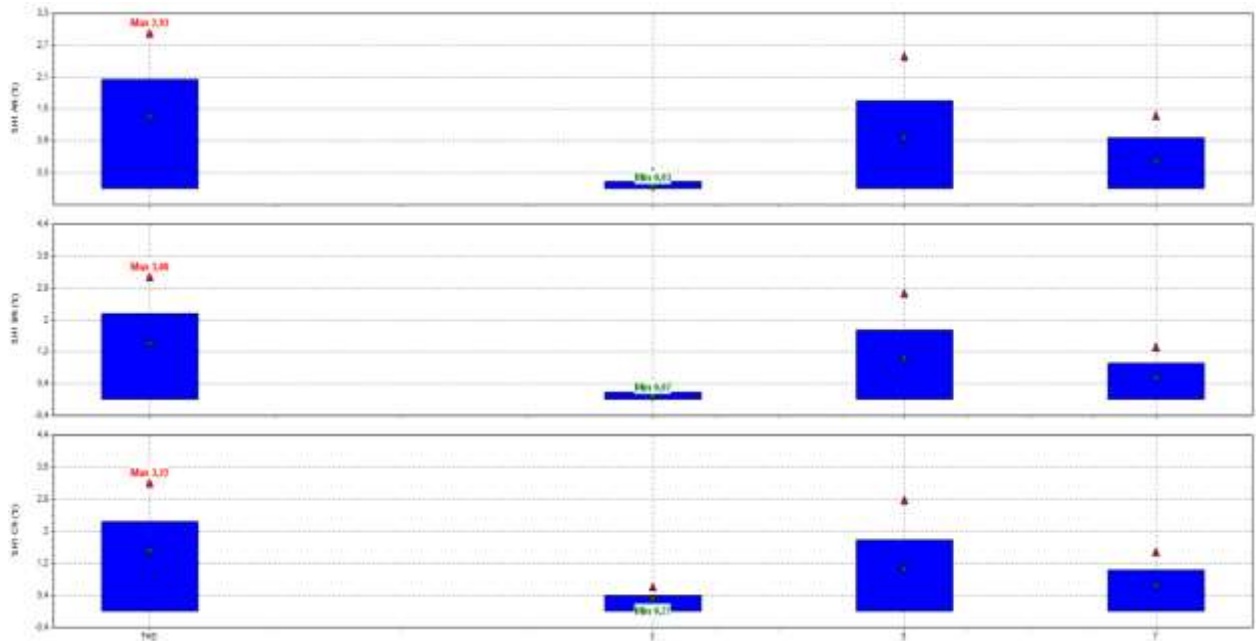


KUVA 7. Jännitteen epäsymmetrian mittaus.

Kolmivaihejärjestelmään syntyy jännite-epäsymmetriaa silloin, kun vaihejännitteiden tehollisarvot tai niiden väliset kulmat eivät ole samat. Mittaustuloksen maksimiarvoksi saatiin 0,17 %, mikä täyttää korkean laadun kriteerit taulukon 4 mukaan.

7.6 Harmoniset yliaaltojännitteet

Kuvassa 8 on esitetty yleisimpien yliaaltojännitteiden esiintyminen viikon mittausajalta sekä kokonaissärökertoimen (THD) arvo.



KUVA 8. Harmonisten yliaaltojännitteiden esiintyminen.

Kokonaissäätökertoimen arvo ilmoitetaan prosentteina esiintyvien yliaaltojen suhteena normaaliin sinimuotoiseen aaltoon. Kokonaissäätökertoimen keskiarvoksi tuli mittauksien mukaan 3,077 %. Standardi SFS-EN 50160 sallii yhteisen THD-arvon maksimiksi jopa 8 %, joten yliaaltojen suodatus toimii oikealla tavalla.

Mittaustuloksia tutkittaessa tuli yllätyksenä se, miten vähän 3. yliaalto esiintyy kiinteistössä, joka toimii oppilaitoksena. Sen maksimiarvo saatiin vaiheelta L-3, joka oli 0,61 %. Taulukon 6 mukaan 3. yliaallon maksimiarvo prosentteina nimellisjännitteestä voi olla 5 %.

5. yliaalto esiintyi kaikista eniten verrattuna muihin yleisimpiin yliaaltoihin. Tämä johtuu siitä, että kiinteistössä on paljon kolmivaihekuormitusta.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET MITTAUSTULOKSISTA

Kiinteistön sähkönkäyttö koostuu hyvin pitkälle suurista kolmivaihekuormista, kuten ilmastoinnin ohjaamisesta, hisseistä sekä ruokalan laitteista. Näiden laitteiden lisäksi on myös yksivaiheisia sähkölaitteita, joiden määrä vaihtelee käyttäjien mukaan. Ruokalan sekä ilmastoinnin syötön mittaustulokset ovat opinnäytetyön liitteenä.

Ideaalisessa tilassa kuormitusvirrat olisivat täysin samat joka vaiheella, jos sähkölaitteet olisi jaettu tasaisesti eri vaiheille. Näin kuitenkin harvoin tapahtuu, koska kuormitusten määrä vaihtelee käytöstä riippuen. Vinokuorman määrälle on suositus, jonka mukaan kunkin vaiheen on oltava 10 %:n sisällä vaihevirtojen keskiarvosta. Vaihevirtojen mittaustuloksista nähdään, että vaihtelut menevät aivan rajoille. Jos kiinteistöön ollaan hankkimassa lisää sähkölaitteita, on suositeltavaa miettiä, pystyttäisiinkö L-1 vaiheelta siirtämään kuormaa L-3 vaiheen perään. Tällä saataisiin tasattua kuormitusvirtojen vaihtelua.

Nykyisen vinokuormituksen taso pystytään huomaamaan jo ruokalan syötön nollajohtimessa, jossa esiintyi mittauksien mukaan 45 A:n virta. Tämä arvo on jo huomattavan suuri ja jatkotoimenpiteitä on syytä harkita virran rajoittamiseksi.

Harmonisien yliaaltojen esiintyminen ja loistehon kompensointi on hyvällä tasolla. Pääkeskusta kompensoivassa PJ-estokelaparistossa ei ollut käytössä kuin maksimissaan kaksi porrasta mahdollisesta seitsemästä, joten loistehon kapasiteetti on hyvin riittävä eikä vaadi tarkempia mittauksia.

Erityisesti nollajohtimelle haitallista 3. yliaaltoa esiintyi hyvin vähän, vaikka kiinteistössä on hyvin paljon yliaaltolähteitä, kuten taajuusmuuttajia ja tietokoneita. Kolmivaihekuorman aiheuttamia 5. ja 7. yliaaltoa esiintyi kiinteistössä eniten, kuitenkin standardin sallimissa rajoissa. Kokonaissärö ylitti keskiarvoltaan 3 % arvon, joten sen laatuluokitustaso on hyvä.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää sähkön laadullisten ominaisuuksien toteutuminen ja kapasiteetin riittävyys Kontinkankaan lääketieteellisen tiedekunnan päärakennuksessa. Sähkön laadun mittaukset suoritettiin Fluke 435 II -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysaattorilla ja saatuja mittaustuloksia verrattiin standardin SFS-EN 50160 vaatimiin ja suosittelemiin arvoihin.

Sähkön laatumittauksista voidaan päätellä, että kiinteistön sähköverkko toimii nykyisellä kuormituksella odotetulla tavalla ja se täyttää standardin vaatimat arvot. Tämä tieto auttaa suunnittelemaan tulevaisuuden lisähankintoja sekä helpottaa sähkölaitteiden vikaisuuden paikantamista, koska sähköverkon laadun aiheuttamat vikaisuudet voidaan laskea pois vaihtoehdoista.

Opinnäytetyön aikana tehdyt tutkimukset liittyen sähkönlaatuun antoivat minulle paljon arvokasta tietoa siitä, miten paljon sähkön jänniteominaisuudet ja sähkön laadun poikkeamat vaikuttavat kiinteistön sähköverkon toimintaan. Työhön liittyi olennaisesti myös sähköanalysaattorin käytön opettelu sekä sen antamien mittaustuloksien tulkinta.

Tämä opinnäytetyö täytti kaikki odotukseni. Oli hyvin mielenkiintoista päästä tutkimaan kiinteistön sähköverkkoa, joka sisältää kuormaltaan hyvin paljon erilaisia mitoituskohhteita. Sähkönlaatumittauksia tullaan suorittamaan myös jatkossa eri kiinteistöille ja tämä työ antaa minulle hyvän pohjan tulevaisuuden haasteita varten.

LÄHTEET

1. ST-kortti 52.50 Sähkön laatu. Käsitteet ja vaatimukset. 2006. Sähkötieto ry. Espoo: Sähköinfo. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi> Hakupäivä: 12.3.2018
2. ABB:n TTT – käsikirja 2000-07. Luku 4: Sähkön laatu. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTT/04_0_S%84hk%94n%20laatu.pdf Hakupäivä: 12.3.2018
3. ST-käsikirja 37 EMC ja rakennusten sähkötekniikka. 2018. Sähkötieto ry. Espoo: Sähköinfo. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi> Hakupäivä: 12.3.2018
4. Energiateollisuus 2014. Sähkön toimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. Saatavissa: https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf Hakupäivä: 12.3.2018
5. Korhonen, Heljä 2009. Ylijännitesuojaus pienjänniteverkossa. Opinnäytetyö. Helsinki: Metropolian ammattikorkeakoulu, talotekniikan koulutusohjelma. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/3529/Ylijannitesuojaus+pienjanniteverkossa.pdf;jsessionid=1D2A674E1FB2AE5F8C324A5B1D39A5D3?sequence=1> Hakupäivä: 28.3.2018
6. ABB:n TTT – käsikirja 2000-07. Luku 6: Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf Hakupäivä: 28.3.2018

7. Fluke Corporation 2012. Fluke 434/435/437 3-vaiheinen energia- ja sähkönlaatuanalysointilaite. Käyttöohje. Saatavissa: http://assets.fluke.com/manuals/F430-II_umfin0100.pdf Hakupäivä: 28.3.2018
8. Korpinen, Leena – Mikkola, Marko – Keikko, Tommi – Falck, Emil. 2008. Yliaalto-opus. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf> Hakupäivä: 9.4.2018
9. ST 52.16. Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. 2014. Sähkötieto ry. Espoo: Sähköinfo. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/> Hakupäivä: 9.4.2018
10. ST 52.15. Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa. 2016. Sähkötieto ry. Espoo: Sähköinfo. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/> Hakupäivä: 9.4.2018
11. ABB Oy TTT-käsikirja 2000. Luku 9: Loistehon kompensointi ja yliaalto suojaus. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTT/09_0_Loistehon%20kompensointi%20ja%20yliaallot.pdf Hakupäivä: 16.4.2018
12. A 21.12.2016/1435. Valtioneuvoston asetus sähkötyöstä ja käyttötyöstä. Valtion säädöstietopankki Finlex. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161435> Hakupäivä: 16.4.2018

LIITTEET

Liite 1 Nousujohtokaavio

Liite 2 Ruokalan taajuuden vaihtelu

Liite 3 Ruokalan jännitteenvaihtelu

Liite 4 Ruokalan kuormitusvirrat

Liite 5 Ruokalan nopeat jännitemuutokset

Liite 6 Ruokalan epäsymmetria

Liite 7 Ruokalan harmoniset yliaallot

Liite 8 Ilmastoinnin taajuuden vaihtelu

Liite 9 Ilmastoinnin jännitteenvaihtelu

Liite 10 Ilmastoinnin kuormitusvirrat

Liite 11 Ilmastoinnin nopeat jännitteenmuutokset

Liite 12 Ilmastoinnin epäsymmetria

Liite 13 Ilmastoinnin harmoniset yliaallot

