

Jani Holmström

SÄHKÖN LAADUN ANALYSOINTI

SÄHKÖN LAADUN ANALYSOINTI

Jani Holmström
Opinnäytetyö
Syksy 2021
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka, sähkötekniikka

Tekijä: Jani Holmström
Opinnäytetyön nimi suomeksi: Sähkön laadun analysointi
Opinnäytetyön nimi englanniksi: Analysis of Power Quality
Työn ohjaaja: Ensio Sieppi
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2021
Sivumäärä: 38

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin jäähallin sähkön laatua. Sähkön laadusta tehtiin laatu-analyysi, jossa mitattuja arvoja verrattiin SFS-EN 50160 -laatustandardeihin. Laatu-analyysissä ilmeneviä epäkohtia verrattiin standardin arvoihin ja laadittiin parannusehdotus.

Työ aloitettiin mittausdatan keräämisellä laatu-analyysiä varten. Laatu-analyysin menetelmänä oli Fluke 435-II-sähkönlaatu- ja energia-analysointilaitteella toteutettava mittaus, josta saatua dataa käsiteltiin Fluke PowerLog -ohjelmistolla. Mittaukset toteutettiin kahtena viikon jaksona. Työssä käsitellään sähkön laatuun liittyvää teoriaa ja määräyksiä, kompensointilaitteistojen rakennetta ja ominaisuuksia sekä laatu-analyysiin liittyvien mittausten toteutustapaa.

Työn tuloksena on laatu-analyysi sekä korjausehdotus. Lisäksi työ auttaa ymmärtämään sähkön laadun standardeja.

Asiasanat: Sähkön laatu ja häiriöt, loisteho, kompensointi, SFS-EN 50160

ALKULAUSE

Kiitän Caverion Suomi Oy:tä opinnäytetyön aiheesta ja työn mahdollistamisesta. Lisäksi osoitan kiitokseni opinnäytetyöni ohjaajalle Ensio Siepille hänen avustaan ja kannustuksesta.

Oulussa 19.11.2021

Jani Holmström

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 SÄHKÖN LAATU	9
2.1 Sähkön laatustandardi	9
2.1.1 Jännitteen taajuus pien- ja keskijänniteverkossa	10
2.1.2 Jännitteen aaltomuoto	10
2.1.3 Jakelujännitteen epäsymmetria pien- ja keskijänniteverkossa	10
2.1.4 Jännitekuopat	11
2.1.5 Sähkön toimitusvarmuus ja sähkönjakelun keskeytykset	11
2.1.6 Transienttiylijännitteet	12
2.2 Sähkön laatuun vaikuttavat tekijät	12
3 LOISTEHO JA HARMOONISET YLIAALLOT	14
3.1 Loisteho	14
3.2 Loistehon kompensointi	15
3.3 Loistehon kustannukset	15
3.4 Yliaallot	16
4 KIINTEISTÖN SÄHKÖVERKON LAADUNMITTAUS	19
4.1 Mittauslaitteisto	19
4.2 Mittausten asentaminen	20
4.3 Mittaustoiminnot	22
5 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI	23
5.1 Fluke PowerLog Classic	23
5.2 Mittaustulokset T1 muuntajalta tulevasta syötöstä	23
5.2.1 Jännitetason vaihtelut	23
5.2.2 Välikynnän häiritsevyyssindeksi (PIt)	24
5.2.3 Harmoniset yliaallot	25
5.2.4 Loisteho	26
5.2.5 Verkkotaajuus	27
5.3 Mittaustulokset T2 muuntajalta tulevasta syötöstä	28
5.3.1 Jännitetason vaihtelut	28
5.3.2 Välikynnän häiritsevyyssindeksi (PIt)	29

5.3.3 Harmoniset yliaallot	30
5.3.4 Loisteho	31
5.3.5 Verkkotaajuus	32
6 KOMPENSOINNIN JA SUODATUKSEN VALINTA	34
6.1 Estokelapariston rakenne	34
6.2 Estokelapariston valinta ja mitoitus	36
7 YHTEENVETO	38
LÄHTEET	

MERKKIEN SELITYKSET

$\cos \varphi$

tehokerroin

Hz

taajuus

I

virta [A]

Q

loisteho [VAr]

THD

harmoninen kokonaissärö

U

jännite [V]

1 JOHDANTO

Työkohteena on jäähalli, jossa on epäilty sähkön laatuun liittyviä ongelmia. Suunnitelmana on toteuttaa kiinteistön sähkön laatuanalyysi ja mahdollinen parannusehdotus, jos sähkön laadussa esiintyy epäkohtia. Epäkohtia voi aiheuttaa esimerkiksi kiinteistön uusittu valaistus tai jäädytyslaitteisto.

Jäähallin sähkönsyöttö on toteutettu kahdelta erilliseltä muuntajalta, joista laadunmittaukset toteutetaan muuntajakohtaisesti kahdelta eri pääkytkimeltä. Mittaukset toteutetaan kahdessa osassa viikon mittausjaksoina pääkytkinkohtaisesti. Laadunmittaukset toteutetaan Fluke 435-II-sähkönlaatu- ja energia-analysaattorilla ja analysaattorin mittausdataa käsitellään Fluken PowerLog classic -ohjelmistolla.

Opinnäytetyössä käsitellään ensin sähkön laatuun vaikuttavia tekijöitä ja laatustandardia. Käsiteltävä standardi on SFS-EN 50160, joka määrittelee kuluttajan sähköliittymän liittymiskohdan rajat ja arvot. Standardissa määritellyjä rajoja verrataan mittauksissa saatuihin arvoihin. Mittausdatasta ilmenneiden epäkohtien takia yliaaltoihin ja loistehoon tutustutaan tarkemmin. Seuraavissa luvuissa paneudutaan mittausten suoritustapaan, tulosten analysointiin ja parannusehdotuksiin.

2 SÄHKÖN LAATU

Yleensä markkinoilta hankittavan hyödykkeen laatu tarkoittaa sitä, että tuote vastaa sitä, mitä toimittaja ja ostaja ovat sopineet. Sähkön hyvä laatu tarkoittaa laajasti sitä, että asiakas saa maksamansa laskun vastineeksi toimituspisteeseensä hyvälaatuisen jännitteen ilman toimituskeskeytyksiä sekä aktiivisen asiakaspalvelun. CEER (The Council Of European Energy Regulators) on määritellyt sähkön laatuun kuuluvat kolme osa-aluetta: asiakaspalvelun (commercial quality, customer service), sähkön toimitusvarmuuden (continuity of supply) ja jännitteen laadun (voltage quality). (Elovaara & Haarla 2011, 419.)

Sähkön laatuun alettiin kiinnittämään huomiota 1970-luvun alussa, kun sähköverkkoon liitettävien elektronisten laitteiden määrä alkoi lisääntymään. Aiemmin sähköverkon laitteet koostuivat sähkömekaanisista kojeista ja laitteista, jotka eivät aiheuttaneet laatuhaittoja, koska ne ottivat verkosta vain sinimuotoista virtaa. Tänä päivänä lähes jokaisessa laitteessa on mukana elektroniikkaa, joka on herkkä verkon laatueroille. (Elovaara & Haarla 2011, 419.)

Kiinteistöjen sähköverkkojen huono sähkön laatu aiheuttaa yhä enemmän sekä yksittäisille sähkö- ja elektroniikkalaitteille että kokonaisille järjestelmille toimintahäiriöitä, laiterikkoja, tuotantokatkoksia ja muita ongelmia. Kiinteistön sähkön laatuun vaikuttavat niin liittymiskohdan jännitteen ominaisuudet kuin kiinteistön sisäverkko ja siihen liitetyt laitteet, näin ollen laadun heikkenemisen syyt ovat moninaisia. (Elovaara & Haarla 2011, 420.)

2.1 Sähkön laatustandardi

Sähkön laatua koskeva standardi SFS-EN 50160 määrittelee jännitteen rajat ja arvot, joiden sisällä sähkökäyttäjä voi olettaa sähköverkon liittymiskohdan jännitteen arvojen pysyvän. Standardi koostuu kahdesta pääosasta: jännitteen laadusta ja sähkön toimitusvarmuudesta. Standardi määrittelee raja-arvot jakeluverkon ominaisuuksille. Jakeluverkon ominaisuuksia pien- ja keskijänniteverkossa ovat jännitteen taajuus, jännitteen suu-

ruus, jännitteen aaltomuoto, nopeat jännitemuutoksien aiheuttamat välkyvät, harmoniset yliaaltojännitteet, signaalijännitteet liittämiskohdassa ja jakelujännitteen epäsymmetria. (ST 52.51.02. 2006, 1.)

2.1.1 Jännitteen taajuus pien- ja keskijänniteverkossa

Jännitteen taajuuden mittauksessa käytetään viikon mittausaikaa 10 sekunnin jaksoissa. Taajuuden tulee olla 99,5 % vuodessa 1 % vaihtelun sisällä ja 100 % ajasta 4 % vaihtelun sisällä. Näin ollen 99,5 % vuodesta taajuuden tulee olla $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$, eli 49,5-50,5 Hz ja 100 % ajasta $50 \text{ Hz} \pm 4 \%$, eli 48-52 Hz. (ST 52.51.02. 2006, 2.)

2.1.2 Jännitteen aaltomuoto

Standardi SFS-EN 50160 määrittää, että pien- ja keskijänniteverkoissa jännitteen aaltomuodon mittaus suoritetaan viikon mittausjaksolla. Mittausarvot mitataan 10 minuutin jaksoissa. (ST 52.51.02. 2006, 2–3.)

2.1.3 Jakelujännitteen epäsymmetria pien- ja keskijänniteverkossa

Jännite-epäsymmetria syntyy kolmivaihejärjestelmään silloin, kun vaihejännitteiden tehollisarvot tai niiden väliset kulmat eivät ole samat. Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon mittausjakson aikana, jokaisen jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0-2 % myötäkomponentista. Kun jollakin alueella on yksivaiheasiakkaita, kolmivaiheasiakkaan liittämiskohdassa epäsymmetria saattaa olla jopa 3 %. (ST 52.51.02. 2006, 3–4.)

2.1.4 Jännitekuopat

Jakelujännitteen alentuessa äkillisesti ja väliaikaisesti välille 1-90 % U_n (230 V: 2,3-207 V) on kyseessä jännitekuoppa. Jännitekuopan kesto on 10 ms-60 s ja se on suuruudeltaan jännitteen alin tehollisarvo. Jännitekuoppia aiheuttavat yleisesti jakeluverkon tai kiinteistön laitteiden kytkennät tai jakeluverkossa tapahtuvat vikatilanteet.

Kiinteistöissä jännitekuopat aiheutuvat yleensä suuritehoisten laitteiden kytkentävirtasysäyksistä. Kytkentävirtasysäykset syntyvät päällekytkentätilanteessa, jossa suuritehoinen laite ottaa moninkertaisen virran nimellisvirtaan verrattuna. Tällaisia laitteita ovat muun muassa kompensointilaitteet, suuret sähkömoottorit, hitsauslaitteet ja muuntajat. (ST 52.51.02. 2006, 4.)

2.1.5 Sähkön toimitusvarmuus ja sähkönjakelun keskeytykset

Sähkönjakelu on keskeytynyt, kun verkon liittämiskohdan jännite on alle 1 % U_n (230 V: 0...2,3V). Sähkönjakelun keskeytyksiä tapahtuu suunniteltuina ja häiriökeskeytyksinä. Suunnitellut keskeytykset ilmoitetaan sähköverkon käyttäjälle etukäteen ja ne voivat johtua jakeluverkon korjaus- ja rakennustöistä. Häiriökeskeytykset ovat ennustamattomia ja satunnaisia tapahtumia. Häiriökeskeytykset aiheutuvat pysyvistä tai ohimenevistä vioista ja liittyvät useimmiten ulkopuolisiin tapahtumiin, laitevikoihin tai -häiriöihin. Ohimeneviksi häiriövioiksi luokitellaan alle kolmen minuutin keskeytykset ja pysyviksi vioiksi yli kolmen minuutin pituiset keskeytykset. (ST 52.51.02. 2006, 4.)

Häiriökeskeytyksen aiheuttavat yleisesti:

- myrskyt
- ilmastolliset ylijännitteet
- laiteviat ja laitteiden toimintahäiriöt
- laitteiden ja kaapeleiden rakenne- ja materiaalivirheet
- ulkopuoliset tekijät kuten maakaivutyöt ja eläimet (ST 52.51.02. 2006, 4).

2.1.6 Transienttilylijännitteet

Transienttilylijännite on joko värähtelevä tai ei-värähtelevä enintään muutaman millisekunnin kestävä voimakkaasti vaimeneva ylijännite. Transienttilylijännitteen aiheuttajana ovat yleensä salamoinnista indusoituneet jännitteet tai järjestelmässä tehdyt kytkentätöimenpiteet. Transienttilylijännitteiden nousuaika vaihtelee alle mikrosekunnista millisekun- teihin. Transienttilylijännitteen energiasisältöön vaikuttaa sen nousuaika. Salaman aiheut- taman ylijännitteen amplitudi on suurempi kuin kytkennästä aiheutuneen ylijännitteen mutta energiasisältö on pienempi. Tämä johtuu kytkentäajan pidemmästä kestoajasta. (SFS-EN 50160:2010, 16–24.)

Kun pienjänniteverkko ja siihen kytkettävät laitteet suunnitellaan standardin EN 60664-1 mukaisesti, ne kestävät transienttilylijännitteet suurimmassa osassa tapauksia. Laitteiden suojaukseen voidaan käyttää standardin IEC 60364-5-53 mukaisia ylijännitesuojia, jotka eliminoivat ilmastolliset ja kytkentäylijännitteet. (SFS-EN 50160:2010, 28.)

2.2 Sähkön laatuun vaikuttavat tekijät

Sähkön laatuun vaikuttavat seuraavat asiat:

- jännitteen taso verkon nimellisjännitteeseen verrattuna sekä jännitteen hitaat vaihtelut ja jännite-epäsymmetriat
- jännitehäiriöt eli jännitteen nopeat vaihtelut
- jännitteen käyrämuodon vääristymät
- taajuuden poikkeamat nimellisarvosta
- sähkötoimituksen keskeytykset
- sähkönkäyttöoikeuden rajoitukset.

Verkkoyhtiön tehtävänä on toimittaa asiakkaille riittävän hyvälaatuista sähköä kustannus- tehokkaasti ja kohtuullisella voitolla. Toimitettavan sähkön ei tarvitse olla mahdollisimman hyvälaatuista, koska se nostaisi sähköntuotannon, -siirron ja -jakelun kustannuksia enemmän kuin käyttäjät olisivat valmiita maksamaan. Toimitettavan sähkön laadussa on

otettava huomioon yhteiskunnan lisääntynyt sähköntarve. Heikossa verkossa sähkönlaatu vaihtelee vahvaa verkkoa enemmän, joten heikossa verkossa olevat laitteet saattavat kokea sähkönlaadullisia ongelmia. Tällaisissa tilanteissa heikkoa verkkoa voidaan käyttää tarkoitukseen, jossa verkon sähkölaitteet pystyvät toimimaan jännitteen laadun vaihdellessa eikä sähköverkkoa tarvitse vahvistaa kalliilla hinnalla. (Elovaara & Haarla 2011, 421–422.)

3 LOISTEHO JA HARMOONISET YLIAALLOT

Tässä luvussa käsitellään loistehoa ja yliaalloja sähköverkon kuormitettavuuden ja haittavaikutuksien kautta. Lisäksi käsitellään erilaisia loistehon kompensointimahdollisuuksia.

3.1 Loisteho

Monet kulutuslaitteet kuten moottorit ja purkauslamput tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi loistehoa. Loisteho ei ole työtä tekevää tehoa, vaan sitä käytetään laitteiden tarvitseman magneettikentän ylläpitämiseen. Loisteho siirretään laitteille sähköverkossa, joka aiheuttaa verkossa siirtyvän sähköön kokonaistehon kasvamista. Loistehon jännitteen ja virran välille muodostuva vaihesiirto kasvattaa jakelu- ja kiinteistöverkossa kulkevaa virtaa, joka lisää syntyviä häviöitä (kuva 1). Kasvavan virran ja häviöiden seurauksena loisteho pitää ottaa huomioon sähköverkon mitoituksessa. (ST 52.15. 2016, 1–2.)

Kuorma	Tehokerroin $\cos \varphi$ [W/VA]	Loistehotarve $\tan \varphi$ [VAR/W]
Moottorit	0,7...0,85	1,0...0,62
Tyristorikäytöt	0,4...0,75	2,3...0,9
Pienjännitehalogeeni- valaisinjärjestelmät	0,5	1,7
Loistepurkausvalaisimet		
– kompensoimattomat	0,5	2
– kompensoidut	0,9	0,5

KUVA 1. Eri kuormitusten tyypillisiä tehokertoimia ja loistehotarpeita (ST 52.15 2016, 2)

3.2 Loistehon kompensointi

Loistehon kompensoinnilla vähennetään kohteen ottamaa virtaa sähköverkosta, kun tarvittava loistehoa tuotetaan kohteessa sähkölaitoksen verkosta ottamisen sijaan. Loistehon kompensointiin käytetään muutamaa erilaista menetelmää. Nämä menetelmät ovat laitekohtainen tai keskitetty kompensointi sekä ryhmäkompensointi. Laite- ja ryhmäkohtaiset kompensoinnit vaikuttavat laitteiden ja ryhmien virta-arvoihin. Keskitetty kompensointi vaikuttaa sähköverkon ja kohteen sisäisen jakeluverkon virtoihin. (ST 52.15 2016, 5–6.)

Laitekohtaista kompensointia käytettäessä tarkoitetaan, että loistehoa tuottava laite sisältää kondensaattorin. Laitekohtaista kompensointia käytetään yleisimmin epätahtimootto-reissa ja purkausvalaisimissa. Tästä kompensointitavasta pyritään eroon työlään ylläpidon vuoksi ja tämän vuoksi uusissa asennuksissa tätä ei tulisi käyttää ollenkaan.

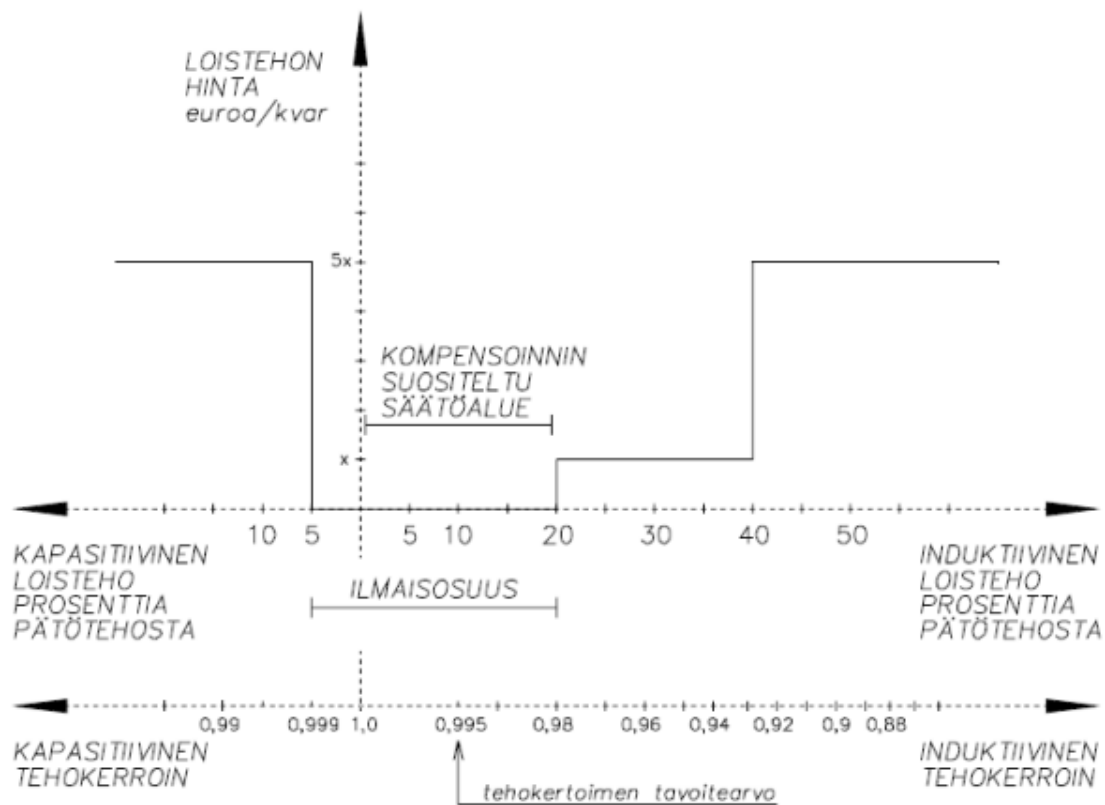
Ryhmäkompensointia käytetään pää- ja ryhmäkeskuksen välimatkan ollessa pitkä. Tällä saadaan pienennettyä jännitehäviöitä sekä kasvatettua keskusten välisten kaapeleiden siirtokykyä työtä tekeväälle päätöteholle. Ryhmäkompensointi toteutetaan automaattiparistolla tai kuorman kanssa kytkeytyvillä yksittäiskompensoinneilla.

Keskitetty kompensointi toteutetaan pääkeskustasolla automaattiparistolla. Automaattipariston oikea mitoitus on oleellinen osa keskitetyn kompensoinnin toimivuutta. Automaattiparistossa tulee olla riittävän suuri kompensointikyky ja oikein mitoitettut porrastukset keskuksen kompensointitarpeen mukaan. Paristo säättää loistehon mukaan portaittain kompensointia ja huolehtii, että ylikompensointia ei tapahdu.

3.3 Loistehon kustannukset

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj velvoittaa paikalliset verkkoyhtiöt huolehtimaan alueensa loistehotasapainosta. Kuluttajia ohjataan huolehtimaan loistehon kompensoinnista loistehomaksuilla. Loissähkön tuottaminen lähellä kulutuslaitteita on kustannustehokasta niin kuluttajalle kuin verkkoyhtiöille. Kuluttajan loissähkön käytön tulisi pysyä

verkkoyhtiön määrittelemällä toiminta-alueella, koska poikkeamat raja-arvoista aiheuttavat ylimääräistä haittaa sähköverkon ja asiakasverkon toiminnalle. Induktiivista loistehoa laskutetaan yleensä kuukauden suurimman mitatun loistehon mukaan, josta vähennetään 20 % laskutuspätötehon lukuarvosta tai vähintään 50 kVAr (kuva 2). Kapasitiivisella loisteholla ei ole maksua, mutta sähköliittymä ei saa olla pysyvästi ylikompensoituna. (Tampereen sähköverkko, 1.)



KUVA 2. Loistehon hinnoitteluperiaate (Tampereen sähköverkko, 2)

3.4 Yliaallot

Yliaallot ovat sähköverkossa esiintyvää signaalia, joka eroaa sähköverkon perustaajuudesta. Suomessa sähköverkon perustaajuus on 50 hertsiä ja yliaaltojännitteille on määritetty liittymiskohdan sallitut raja-arvot (kuva 3). Yliaallot voidaan jakaa harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kerrannaisia: toisen

kertaluvun taajuus on 100 hertsiä ja kolmannen kertaluvun 150 hertsiä. (Electronics Tutorials, Harmonics.) Epäharmonisten yliaaltojen taajuus sijoittuu harmonisten yliaaltojen väliin eli taajuus ei ole kokonaisluvulla kerrannainen (SFS-EN 50160:2010/A3:2019, 22.)

Parittomat harmoniset				Parilliset harmoniset	
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	1,0 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,75 %		
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.

KUVA 3. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittämiskohdassa (SFS-EN 50160:2010/A3:2019, 4)

Yliaallot aiheuttavat sähköverkossa seuraavia haittavaikutuksia ja vääristymiä (kuva 4)

- lisähäviöt johtuen eri verkkokomponenteista
- atk- ja automaatiojärjestelmien häiriöt ja vauriot
- televerkon häiriöt
- suoja- ja mittalaitteiden virhetoiminnot
- nollajohtimen ja -kiskojen ylikuormittuminen
- jännitesärön kasvu (ST 52.16. 2014, 2).



KUVA 4. Kokonaisvirran vääristyminen 5. ja 7. yliaallon vaikutuksesta (ST 52.16. 2014, 2)

4 KIINTEISTÖN SÄHKÖVERKON LAADUNMITTAUS

Sähköverkon laadunmittaus toteutettiin kahdessa seitsemän päivän jaksossa. Kaksi mittausjaksoa toteutettiin kohteen kahden erillisen sähkönsyötön takia. Ensimmäisessä jaksossa mitattiin muuntajalta T1 tuleva syöttö ja toisessa jaksossa muuntajalta T2 tuleva syöttö.

4.1 Mittauslaitteisto

Mittauslaitteena käytettiin Fluke 435-II-sähkönlaatu- ja energia-analysaattoria (kuva 5). Laitteen vakiorajoina käytetään standardia EN50160 (Fluke 434-II/435-II/437-II 2012, 3–2). Analysaattorissa on 4 tuloliitintä virtapihdeille ja 5 tuloliitintä jännitemittauksille (Fluke 434-II/435-II/437-II 2012, 6).



KUVA 5. Fluke 435-II-sähkönlaatu- ja energia-analysaattori (Fluke 434-II/435-II/437-II)

4.2 Mittausten asentaminen

Mittaukset asetettiin jäähallin pääkeskukselle. Pääkeskus on jaettu kahteen lohkoon erillisiltä muuntajilta tulevien sähkönsyöttöjen mukaan, joten mittaukset toteutettiin kahdessa osassa. Mittauksessa käytetään mittapäinä hauenleukaliittimiä ja virtapihtejä. Mittapäät kiinnitetään pääkytkimen virtakiskoihin. Hauenleukaliittimet kytkettiin virtakiskon pultteihin ja virtalenkit virtakiskojen ympärille.

Mittausten kytkentä aloitettiin punaisten virtapihtien kytkennällä virtakiskojen ja nollajohtimen ympärille. Virtapihtejä kytkettäessä on tärkeää tarkastaa, että virtapihdit ovat täysin suljettuina johtimien ympärillä sekä pihteihin merkitty virran kulkusuunta on oikein. Jännitekytkennät aloitetaan maajohtimen kytkemisellä, jonka jälkeen kytketään hauenleukaliittimet eri vaiheille. Kohteen vanha pääkeskus aiheutti ongelmia mittausten asentamisessa (kuva 6). Vanhoissa pääkytkimissä virtakiskot ovat lähellä toisiaan, ja virtapihtien asentaminen virtakiskojen välistä on ahdasta.



KUVA 6. Mittausten kytkentä pääkytkimellä

Mittausten kiinnittämisen jälkeen analysaattorista asetettiin loggeri eli tiedonkeruutoiminto. Loggeri antaa mahdollisuuden tallentaa eri mittaustuloksia suurella erottelukyvyllä. Analysaattorissa on valmiita asetuksia loggeritoiminnon käyttämiseen tai käyttäjä voi tehdä asetukset itse. Tässä kohteessa asetuksia piti muokata itse vähentämällä mittausten tallennusväliä ja mitattavien yliaaltojen kerrannaisten määrää, jotta analysaattorin muistiin mahtui tarvittavat seitsemän päivän mittauksen tulokset.

4.3 Mittaustoiminnot

Fluken 435-II analysaattorin mittaustoiminnoista käytettiin seuraavia:

- vaihekohtaiset jännitteet: aaltomuoto katsotaan skooppipuolelta ja mahdollisia kuoppia ja kohoumia etsitään käyttäen Dips & Swells-toimintoa
- vaihekohtaiset virrat, käytetään Volts/Amps/Hertz- ja Dips & Swells-toimintoja virtojen tarkistamiseen
- huippukerroin: yli 1,8 huippukerroin tarkoittaa säröytynyttä aaltomuotoa, tarkistetaan skooppipuolelta ja yliaaltonäytöltä kokonaissärö ja yksittäiset yliaallot
- harmoniset yliaallot: Harmonics näkymästä nähdään vaihekohtaiset jännite- ja virtayliaallot sekä kokonaissäröt
- välkyntä: Flicker näkymästä nähdään vaihekohtaisesti lyhyt- ja pitkäaikaiset jännitteen välkyntäarvot
- kuopat ja kohoumat: nähdään nopeat vähintään puolen jakson pituiset jännitteen kuopat ja kohoumat
- taajuus: käytetään Volts/Amps/Hertz-toimintoa
- epäsymmetria: jokaisen vaiheen jännite tulisi olla 1 %:n sisällä kaikkien vaiheiden keskiarvosta ja virtojen tulisi olla 10 %:n sisällä; epäsymmetriaa tutkitaan Scope-puolen vektorinäytöltä.

(Fluke 434-II/435-II/437-II 2012, 3–2.)

5 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Mittausdata purettiin Fluken mittarilta tietokoneelle optisella kaapelilla Fluken tiedonpakkaustavan takia. Fluken tallentamaa dataa voidaan lukea joko suoraan mittarista tai PowerLog ja PowerLog Classic -sovellusohjelmistoilla. Suuren mittausdatan lukeminen mittarilta on kuitenkin epäkäytännöllistä, joten tässä tilanteessa päädyttiin PowerLog Classic -ohjelmistoon sen käytettävyyden vuoksi.

5.1 Fluke PowerLog Classic

Fluke PowerLog Classic -sovellusohjelmistolla saadaan luettua mitattua dataa jokaisen mittauspisteen tarkkuudella. Ohjelmistolla voi tehdä data-analyysia joko itse käsittelemällä ohjelmiston antamaa laskentataulukkoa tai hyödyntämällä ohjelmiston valmiiksi käsittelemää dataa. PowerLog Classic jakaa mittausdatan aihealueittain välilehtiin. Välilehtiä ovat yhteenveto, laskentataulukko, jännite ja virta, tilastot, taajuus, teho, energia, näyttökuvat ja harmoniset yliaallot.

5.2 Mittaustulokset T1 muuntajalta tulevasta syötöstä

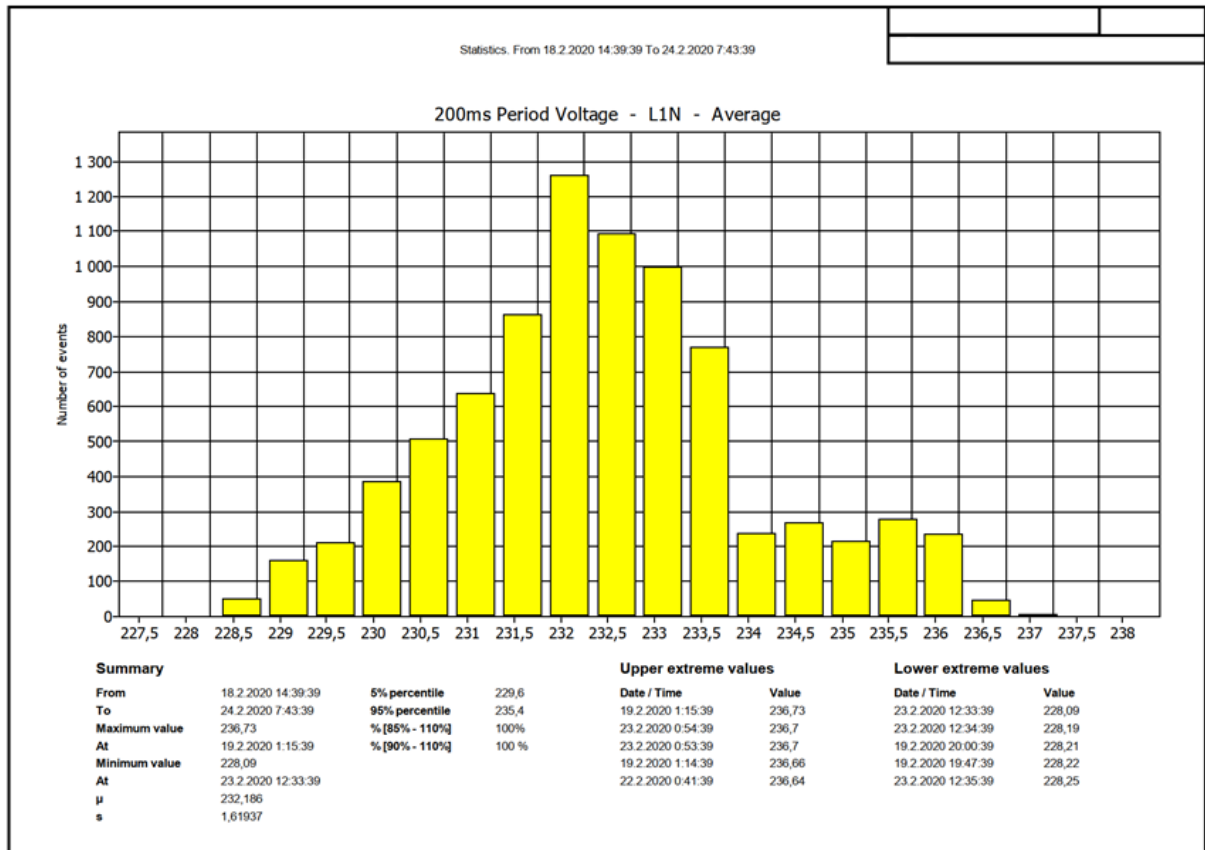
Seuraavissa luvuissa käsitellään ensimmäisen mittausjakson aikana tehtyjä mittauksia. Arvot ovat mitattu T1 muuntajalta tulevasta syötöstä keskuksen pääkytkimeltä.

5.2.1 Jännitetason vaihtelut

ST-kortisto 52.50 määrittelee jännitetason vaihtelun hyväksyttävät arvot. Normaaleissa käyttöolosuhteissa hyväksyttävät arvot ovat seuraavanlaisesti:

- Jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin jaksoilta mitatuista keskiarvoista 95 % tulee olla välillä $U \pm 10 \%$, eli 207-253 V.
- Kaikkien jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä $U \pm + 10 \% / - 15 \%$, eli 195,5-253 V. (ST 52.50. 2006, 2.)

Jännitteen minimiarvon ollessa 228,1 V ja maksimiarvon ollessa 236,7 V on jännitetaso standardin mukaista (kuva 7).

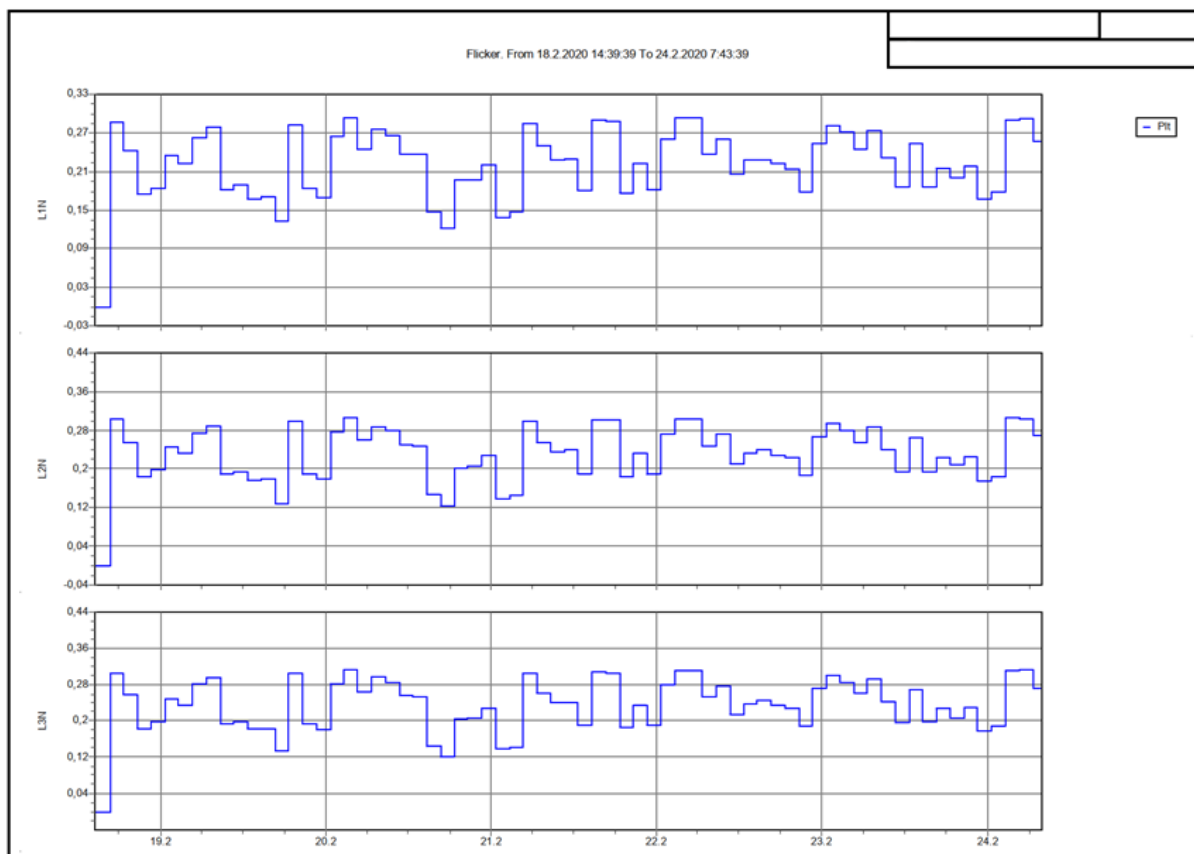


KUVA 7. Jännitetaso vaihtelut muuntajan T1 verkosta

5.2.2 Välikynnän häiritsevyyssindeksi (Plt)

Normaaleissa käyttöolosuhteissa, minkä tahansa viikon pituisen mittausjakson aikana, jännitteen vaihtelun aiheuttaman välikynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin tulisi olla 95 % ajasta $Plt \leq 1$. (ST 52.50. 2006, 2).

Plt-indeksin maksimiarvo mittauksissa on 0,306 (kuva 8), joten kohteessa ei esiinny häiritsevää välikyntää.



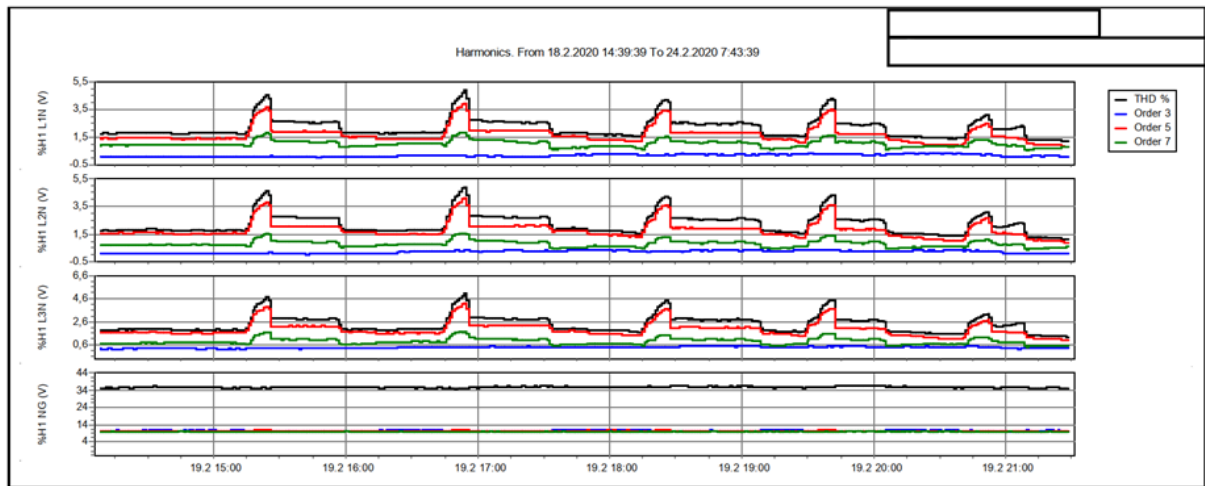
KUVA 8. Välkynnän häiritseväisyysindeksi muuntajan T1 verkosta

5.2.3 Harmoniset yliaallot

ST-kortisto 52.50 määrittelee jännitteen kokonaissärölle laatuluokat. Jännitteen kokonaissärön kolme laatuluokkaa ovat:

- Korkea laatu: Jännitteen kokonaissärö $THD \leq 3 \%$
- Hyvä laatu: Jännitteen kokonaissärö $THD \leq 6 \%$
- Standardin laatu: Jännitteen kokonaissärö $THD \leq 8 \%$ (ST 52.50. 2006, 2.)

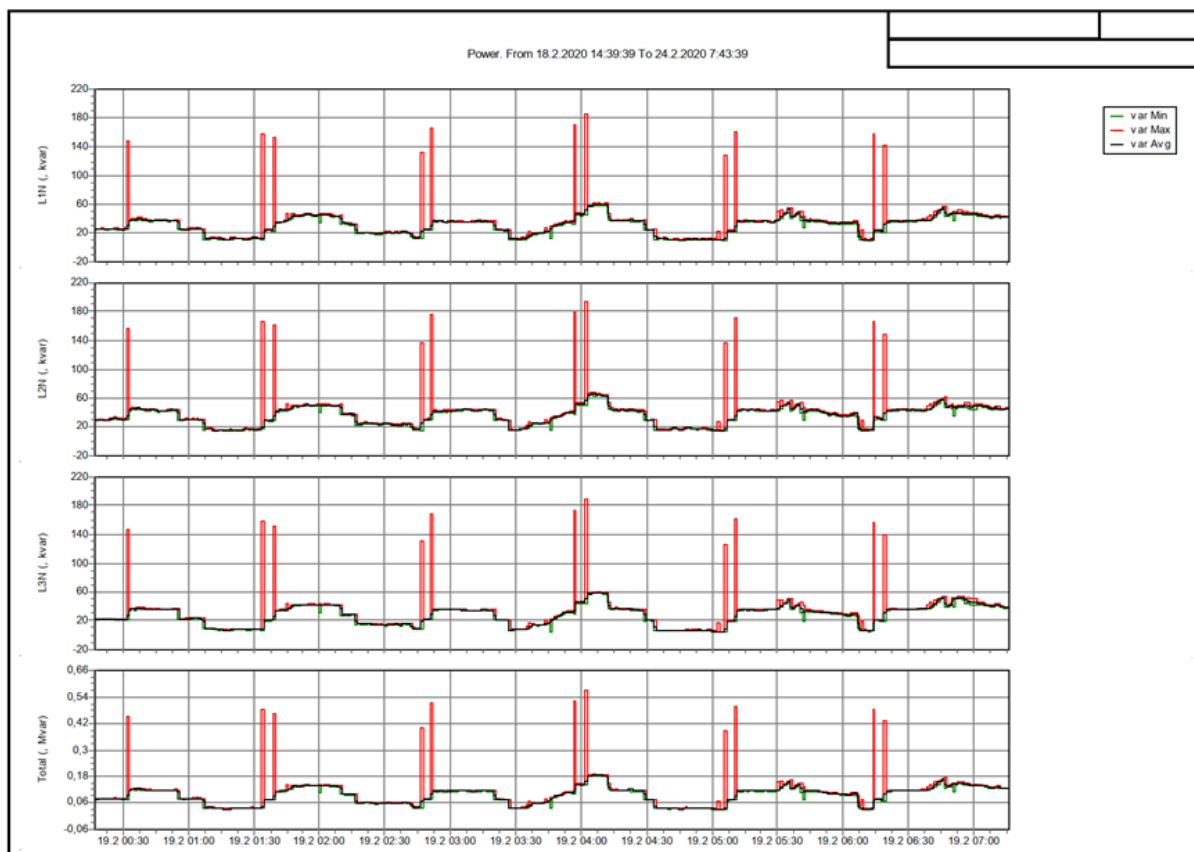
Harmonisten yliaaltojen THD maksimi on 4,6 % (kuva 9). Tämä vastaa hyvää laatua, mutta kohteessa on havaittavissa yliaaltopiikkejä.



KUVA 9. Harmoniset yliaallot muuntajan T1 verkosta

5.2.4 Loisteho

Loisteho vaihtelee maltillisesti 20-200kVAR:n välillä, mutta kohteessa esiintyy noin 1,5 tunnin välein huomattavia 500kVAR:n loistehopiikkejä (kuva 10). Loistehopiikit näkyvät verkossa myös jännitteenalenemana ja harmonisina yliaaltoina.



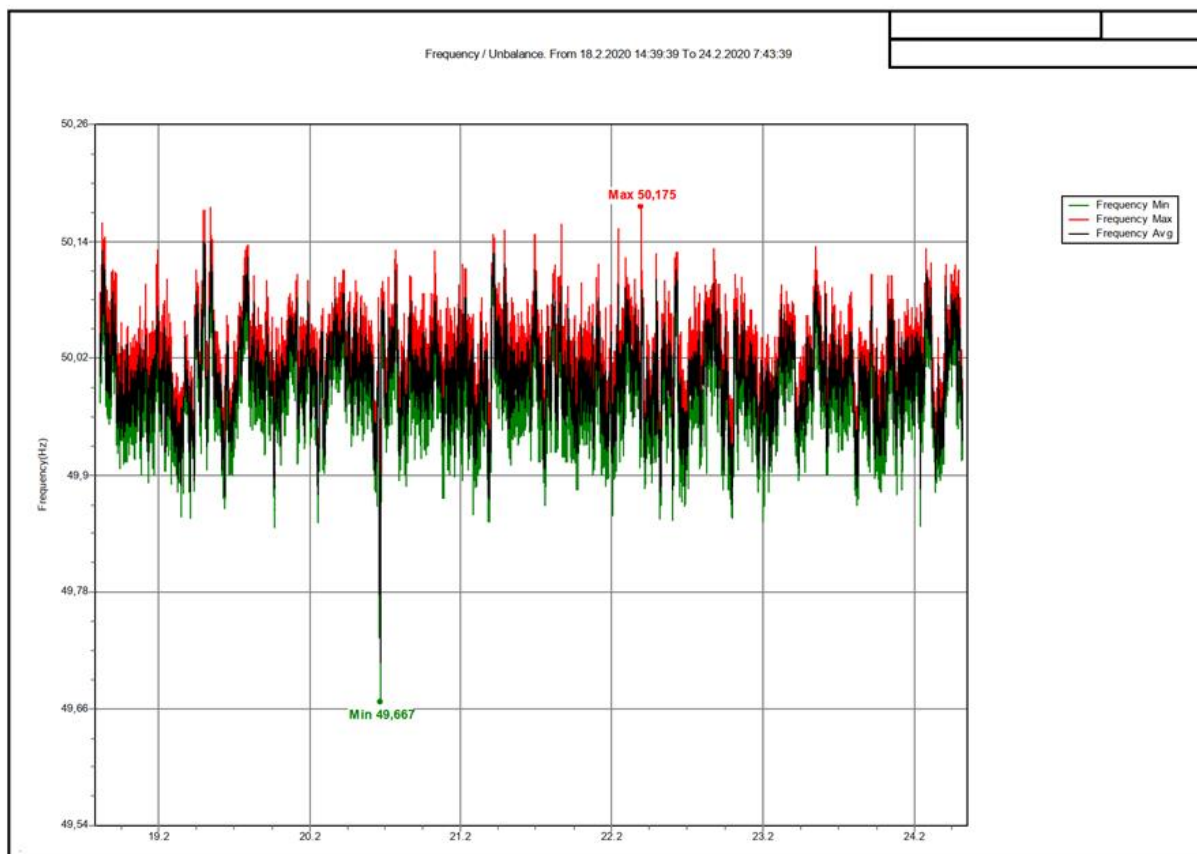
KUVA 10. Harmoniset yliaallot muuntajan T1 verkosta

5.2.5 Verkkotaajuus

Nimellistaajuuden tulee olla 50 Hz. Normaleissa käyttöolosuhteissa perustaajuuden keskiarvon 10 s aikaväliltä mitattuna tulee olla:

- 50 Hz \pm 1 % (eli 49,5 Hz– 50,5 Hz) 99,5 % vuodesta
- 50 Hz \pm 4 % (eli 48 Hz– 52 Hz) 100 % vuodesta (ST
52.50. 2006, 2.)

Taajuuden minimiarvon ollessa 49,67 Hz ja maksimin ollessa 50,18 Hz on taajuus standardin mukaisissa arvoissa (kuva 11).



KUVA 11. Verkkoataajuus muuntajan T1 verkosta

5.3 Mittaustulokset T2 muuntajalta tulevasta syötöstä

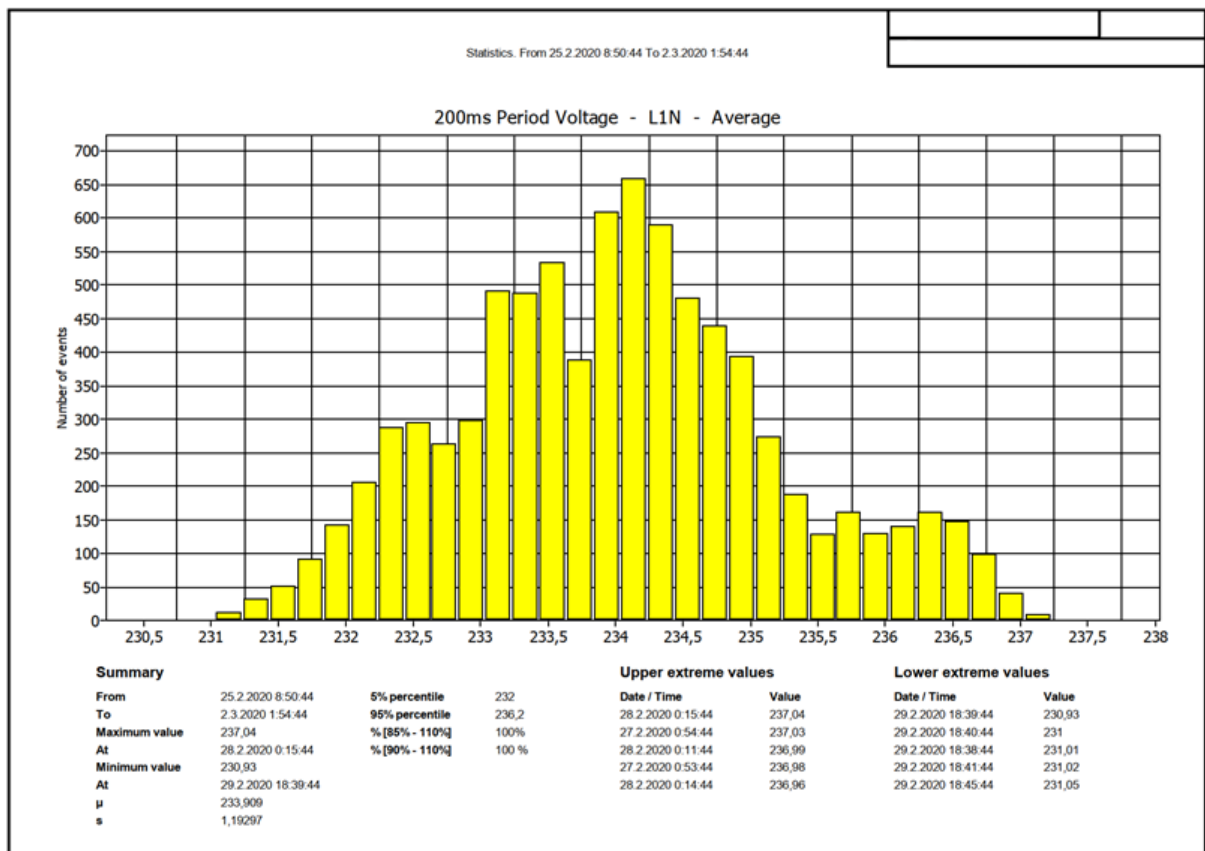
Seuraavissa luvuissa käsitellään toisen mittausjakson aikana tehtyjä mittauksia. Arvot ovat mitattu T2 muuntajalta tulevasta syötöstä keskuksen pääkytkimeltä.

5.3.1 Jännitetason vaihtelut

ST-kortisto 52.50 määrittelee jännitetason vaihtelun hyväksyttävät arvot. Normaaleissa käyttöolosuhteissa hyväksyttävät arvot ovat seuraavanlaisesti:

- Jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin jaksoilta mitatuista keskiarvoista 95 % tulee olla $U \pm 10 \%$, eli 207-253 V.
- Kaikkien jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä $U \pm + 10 \% / - 15 \%$, eli 195,5-253 V. (ST 52.50. 2006, 2.)

Jännitteen minimiarvon ollessa 230,9 V ja maksimiarvon ollessa 237 V on jännitetaso standardin mukaista (kuva 12).

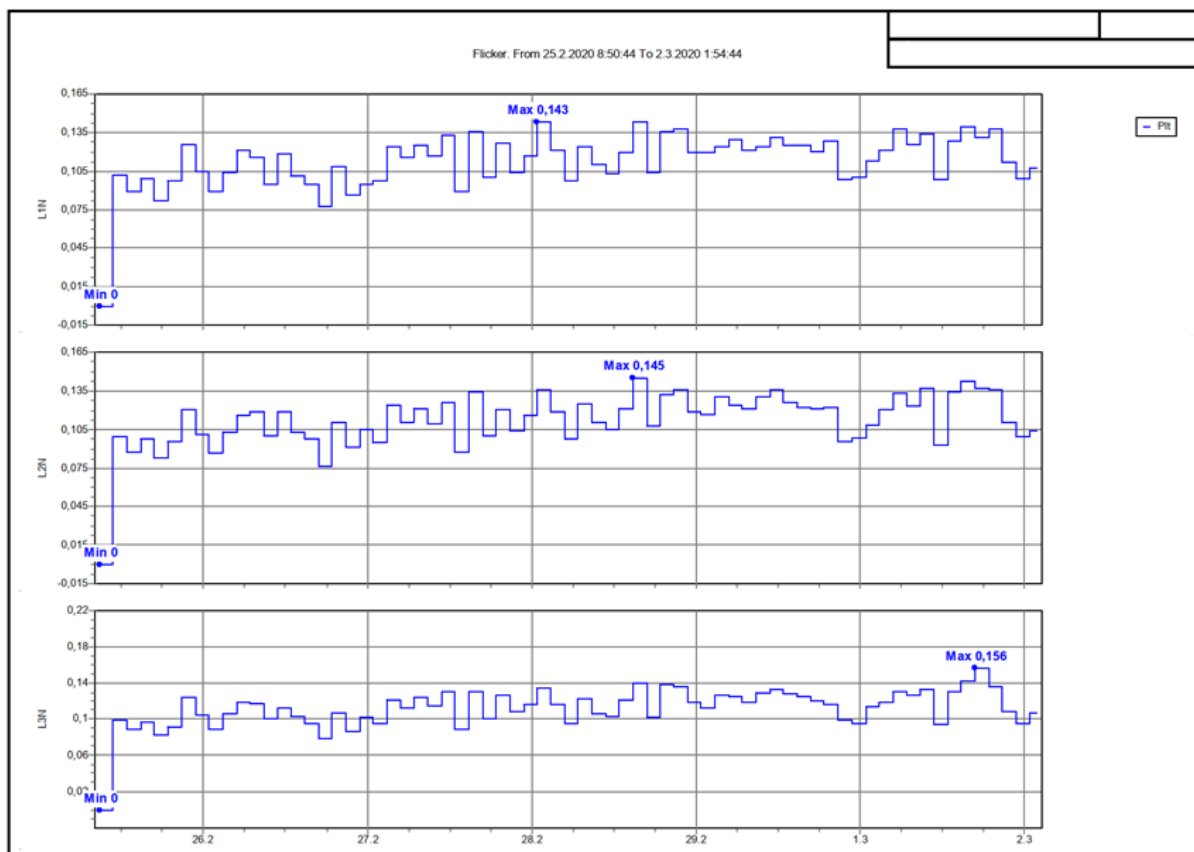


KUVA 12. Jännitetason vaihtelut muuntajan T2 verkosta

5.3.2 Väлкynnän häiritsevyyssindeksi (Plt)

Normaaleissa käyttöolosuhteissa, minkä tahansa viikon pituisen mittausjakson aikana, jännitteen vaihtelun aiheuttaman väлкynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin tulisi olla 95 % ajasta $Plt \leq 1$ (ST 52.50. 2006, 2).

Plt-indeksin maksimiarvo mittauksissa on 0,156 (kuva 13), joten kohteessa ei esiinny häiritsevää väлкyntää.



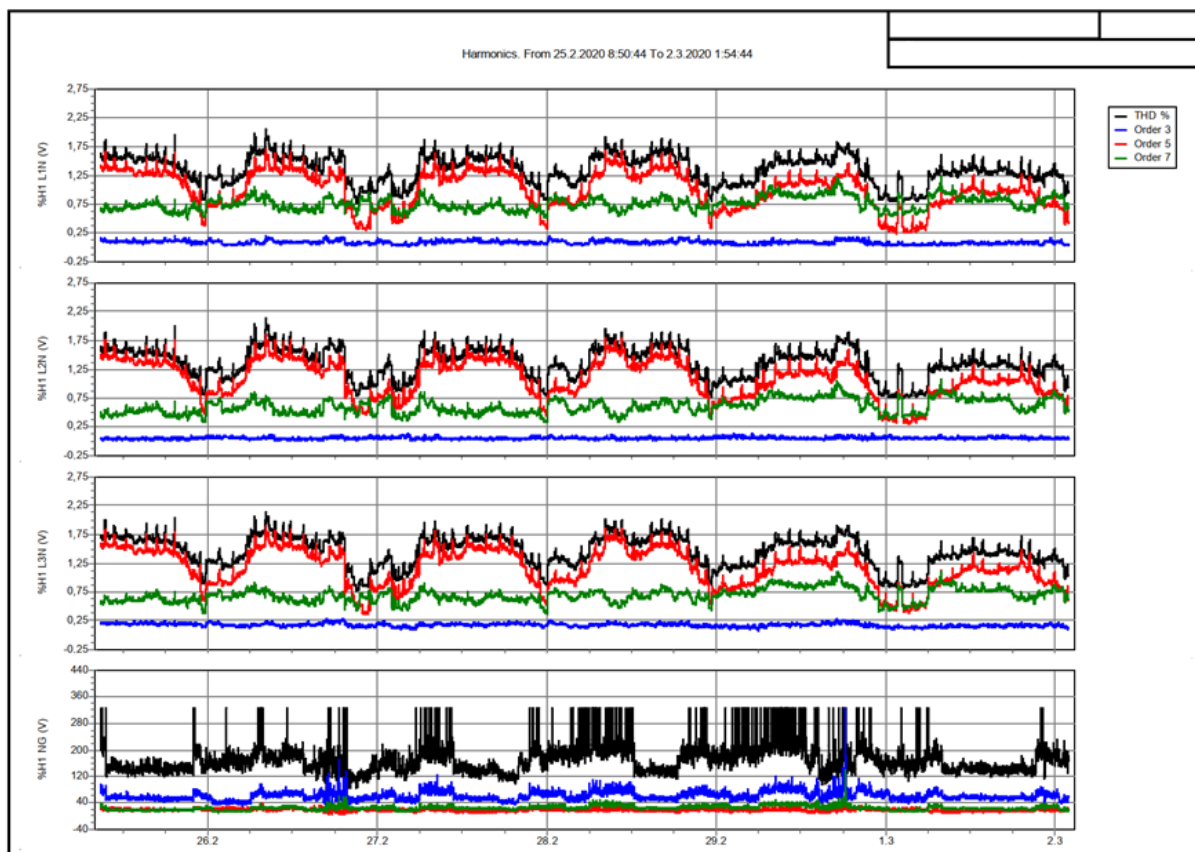
KUVA 13. Välkynnän häiritsevyyssindeksi muuntajan T2 verkosta

5.3.3 Harmoniset yliaallot

ST-kortisto 52.50 määrittelee jännitteen kokonaissärölle laatuluokat. Jännitteen kokonaissärön kolme laatuluokkaa ovat:

- Korkea laatu: Jännitteen kokonaissärö $THD \leq 3 \%$
- Hyvä laatu: Jännitteen kokonaissärö $THD \leq 6 \%$
- Standardin laatu: Jännitteen kokonaissärö $THD \leq 8 \%$ (ST 52.50. 2006, 2.)

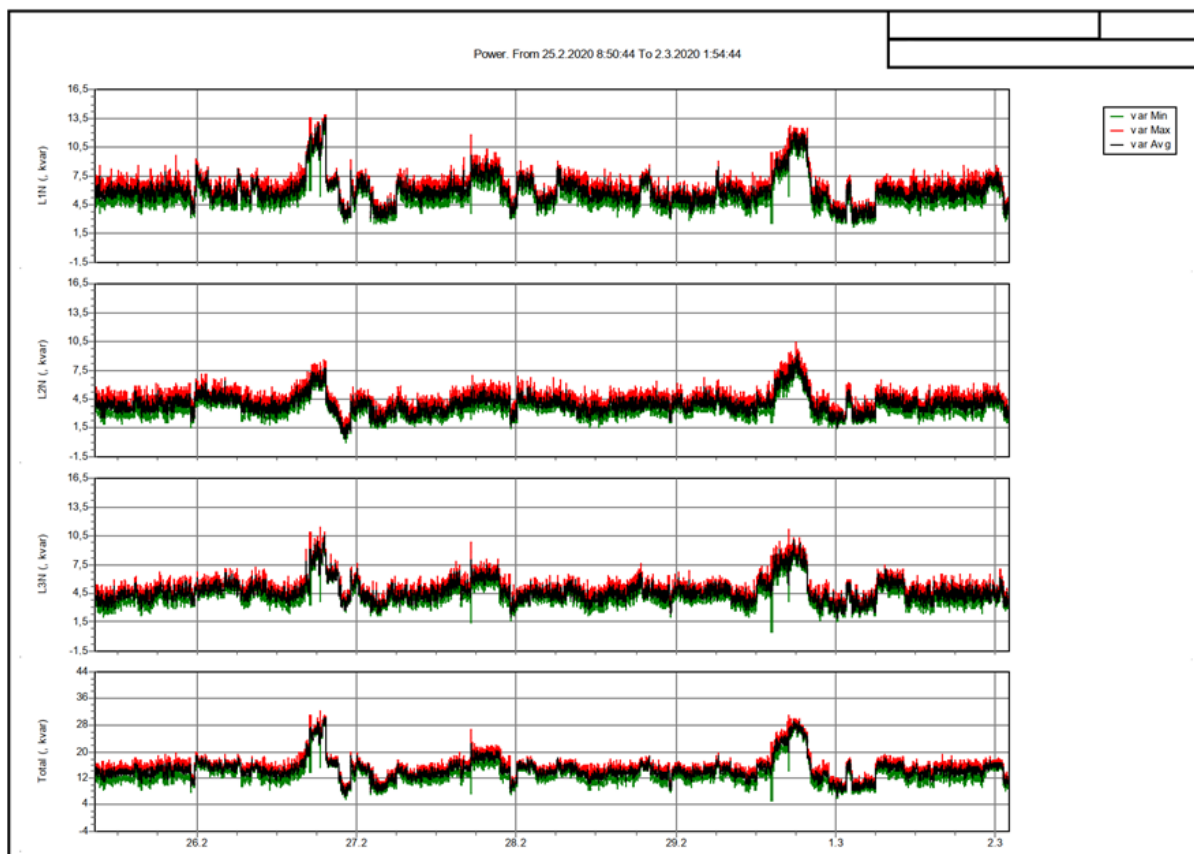
Harmonisten yliaaltojen THD maksimi on 2 % (kuva 14). Tämä vastaa korkeaa laatua, mutta kohteessa on havaittavissa lieviä yliaaltopiikkejä.



KUVA 14. Harmoniset yliaallot muuntajan T2 verkosta

5.3.4 Loisteho

Muuntajan T2 perässä olevassa verkossa loistehohuippu oli 32 kVAr, eli merkityksettömän pientä sähkön laadun kannalta (kuva 15).



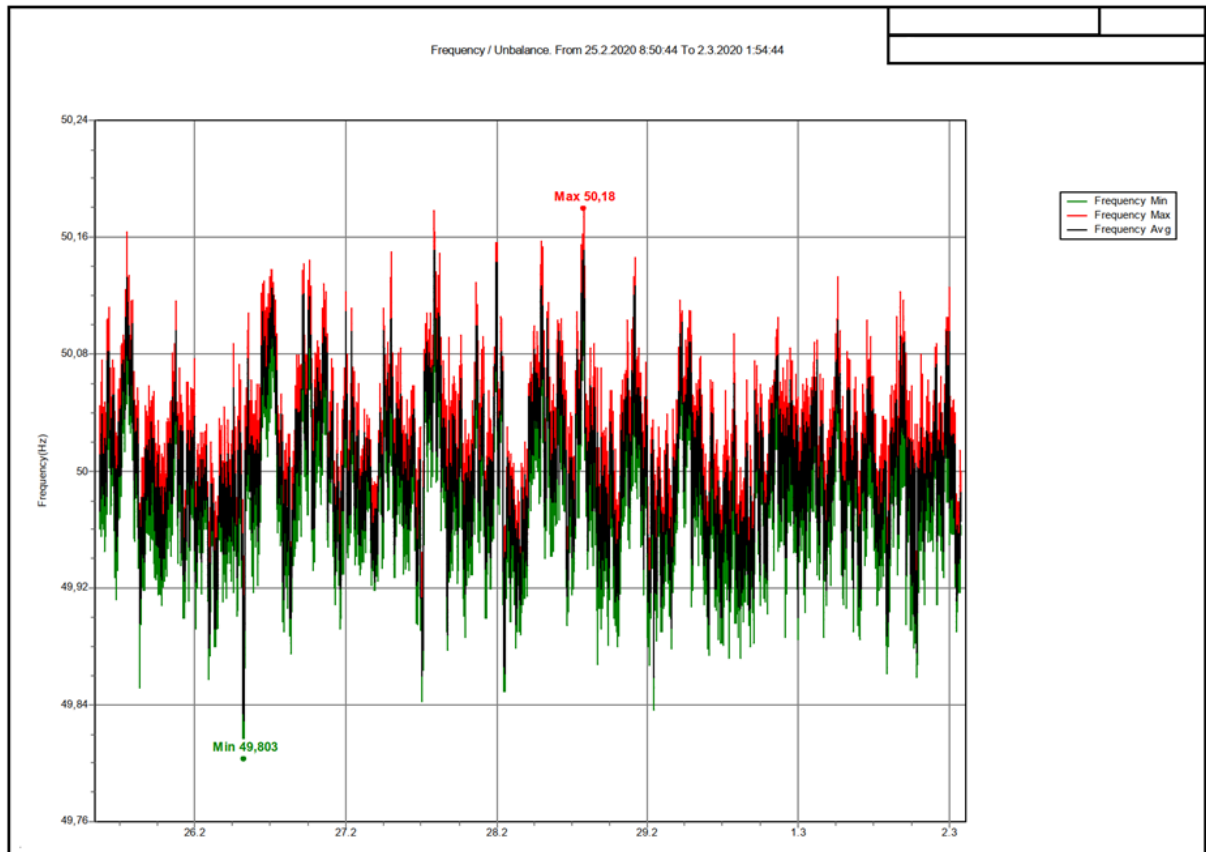
KUVA 15. Loisteho muuntajan T2 verkosta

5.3.5 Verkkotaajuus

Nimellistaajuuden tulee olla 50 Hz. Normaaleissa käyttöolosuhteissa perustaajuuden keskiarvon 10 s aikaväliltä mitattuna tulee olla:

- 50 Hz \pm 1 % (eli 49,5 Hz... 50,5 Hz) 99,5 % vuodesta
- 50 Hz \pm 4 % (eli 48 Hz... 52 Hz) 100 % vuodesta (ST 52.50. 2006, 2.)

Taajuuden minimiarvon ollessa 49,80 Hz ja maksimin ollessa 50,18 Hz on taajuus standardin mukaisissa arvoissa (kuva 16).



KUVA 16. Verkkotaajuus muuntajan T2 verkosta

6 KOMPENSOINNIN JA SUODATUKSEN VALINTA

Mittaustulosten perusteella kohteeseen suositeltiin kompensointia T1 muuntajan perässä olevalle kuormalle. Kompensoinniksi suositeltiin estokelaparistoa, joka vaikuttaisi loistehon lisäksi yliaaltoihin.

6.1 Estokelapariston rakenne

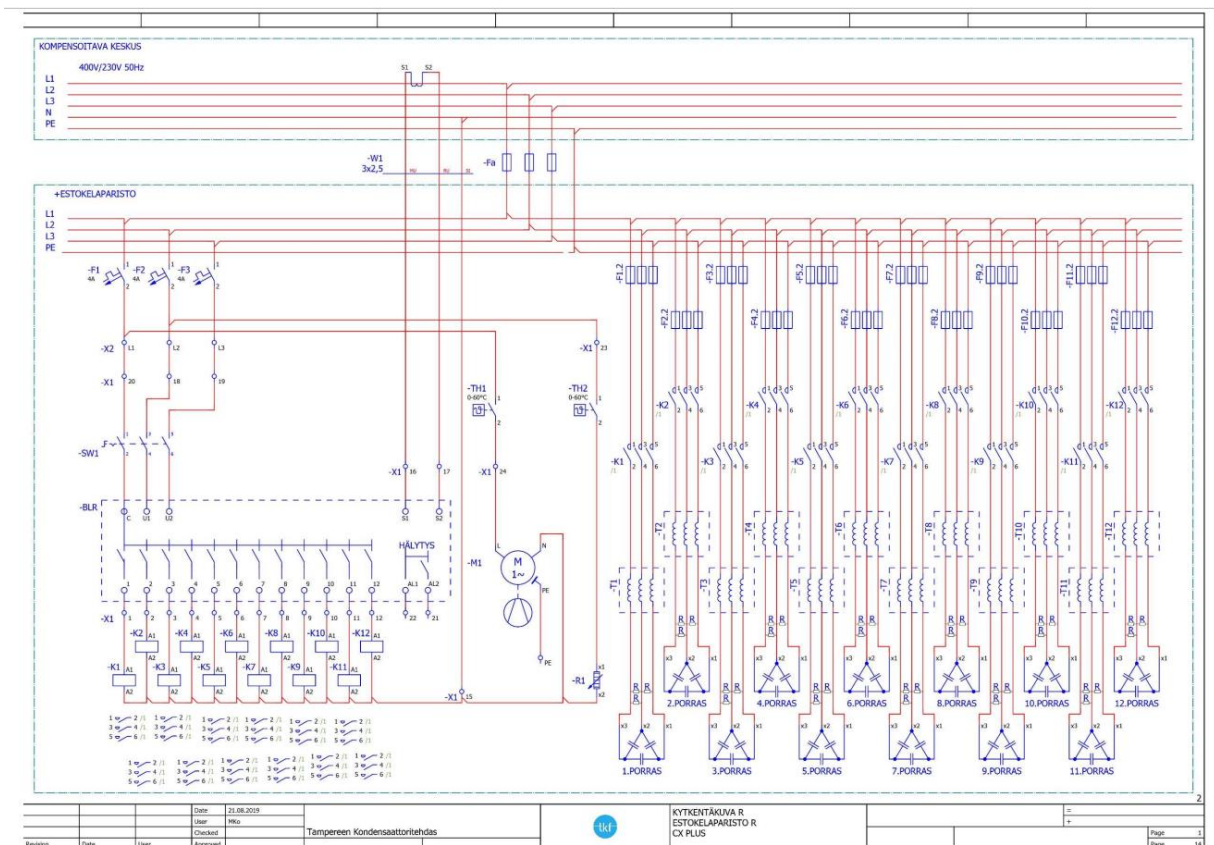
3-vaiheisen kompensointiyksikön perusrakenteen muodostavat kolme kondensaattoria, jotka kytketään kolmioon ja jokaisen vaiheen väliin tulee yksi kondensaattori. Yksikkö varustetaan kontaktoreilla, varokkeilla ja purkausvastuksilla (kuva 17). Estokelaparistoissa kondensaattorin kanssa sarjaan kytketään estokela. Kompensointitehojen ollessa suuria yksiköitä voidaan kytkeä rinnan. Estokelaparisto viritetään verkossa esiintymättömälle taajuudelle, joka on yleensä Suomessa 189 Hz. (ST 52.15. 2016, 6.)



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

KUVA 17. Estokelapariston rakenne (Nokia capacitors pienjännitetuotteiden tuoteopas, 9).

Kontaktoreiden ohjaus toimii loistehosäätimen kautta, joka kytkee tarpeen mukaan yksikön kompensointiportaita käyttöön. Kompensointiportaat valitaan kohteen loistehon mukaan ja niissä on yleensä 6-12 eri kokoista porrasta. Säädin ohjaa kytkentätoimenpiteitä asetetun tehokertoimen ylläpitämiseksi sekä valvoo kompensointiyksikön ja verkon toimintaa ja kuntoa. Estokelapariston porrastus ja kytkennät voidaan toteuttaa kuten kuvassa 18. Loistehosäädin hoitaa lisäksi hälytykset, jotka voivat aktivoitua useista muuttujista, kuten kondensaattorin ylikuormitus ja ylijännite.



KUVA 18. Estokelapariston kytkentäkuvaa (Tampereen Kondensaattoritehdas 2019, 19)

6.2 Estokelapariston valinta ja mitoitus

Kohteeseen ehdotettiin estokelapariston asentamista. Estokelaparistot ovat lähes syrjäyttäneet automatiikkapariston kompensointiratkaisuina sähköverkoissa lisääntyneiden yliaaltojen takia. Lähes kaikki uudet kompensoinnit toteutetaan estokelaparistoilla, sillä

kaikissa kohteissa esiintyy jossain määrin yliaaltoja. Olemassa oleville kompensointiparistoille saadaan korjauksilla useita käyttövuosia, mutta kompensointipariston uusinnat tulee tehdä estokelaparistoilla. (ST 52.15 2016, 1–5.)

Kohteen loisteho vaihtelee pääsääntöisesti 20-200kVAR:n välillä, mutta kohteessa esiintyy noin 1,5 tunnin välein suuria 500kVAR:n loistehopiikkejä. Estokelapariston kompensointiportaita tulisi olla 20-200kVAR:n välillä sekä isompi porras, joka kytkeytyisi päälle loistehopiikin tapahtuessa. Kompensointiportaiden ohjausta voidaan nopeuttaa korvaamalla kontaktorit tyristoreilla. Tämä mahdollistaa kaikkien portaiden päälle ja pois kytke-
misen yhden verkkojakson aikana. Tyristoreiden ohjaus toteutetaan säätimellä tai suoraan kompensoitavalla, jolloin saadaan lähes viiveetön kompensointikyky ja lähes transienttivapaa kytkentähetki. Nopea kompensointi edesauttaa myös kuorman syöttöjännitteen stabiloinnissa. (ST 52.15 2016, 6.)

7 YHTEENVETO

Lähtökohtana tälle opinnäytetyölle oli sähkön laadun analysointi sekä mahdollisen parannusehdotuksen laatiminen jäähalliin, jossa epäiltiin sähkön laatuun liittyviä ongelmia. Analyysin tekemistä varten kohteeseen toteutettiin kaksi viikon mittaista mittausjaksoa käyttäen Fluke 435-II-sähkönlaatu- ja energia-analysaattoria. Mittausjaksot jaettiin erillisiksi viikon jaksoiksi, koska kohteessa oli kaksi pääkytkintä, joiden syötöt tulivat muuntajilta T1 ja T2. Mittausdatan purkamiseen ja analysoimiseen käytettiin Fluke PowerLog -ohjelmistoa.

Analyysiä tehtäessä havaittiin, että kiinteistön sähkön laatu oli yleisesti hyvällä tasolla. Tuloksista erottui kuitenkin muuntajan T1 perässä oleva verkko, jossa ilmenee loistehoa ja yliaalloja. Loisteho ja yliaallot ilmenevät 1,5 tunnin välein muutaman sekunnin piikkeinä. Tästä voidaan päätellä, että piikit johtuvat kiinteistössä olevasta laitteistosta, joka toimii 1,5 tunnin välein. Tehon puolesta tämä sopisi jäähallin suureen kompressoriin, mutta tätä ei päästy varmistamaan mittauksilla.

Parannusehdotuksen osalta ei päästy selkeään ehdotukseen. Vanhan kiinteistön moninaiset laitteistot tarvitsevat lisämittauksia tai korjausehdotusten kokeilua, kuten estokelaparistoa ja laitteistojen käynnistysvirran rajoittamista. Kiinteistö voi myös tarvita parannusehdotusten yhdistelmää, jotta kaikki mittauksissa ilmenneet laatuongelmat saataisiin korjattua.

Opinnäytetyö toimii apuna sähkön laatuun liittyvän mittauksen toteuttamisessa, mittausdatan käsittelyssä ja tulkinnassa sekä yleisen sähkön laatuun liittyvän SFS-EN 50160 -standardin ymmärtämisessä.

LÄHTEET

Electronics Tutorials. Harmonics. Saatavissa: <https://www.electronicstutorials.ws/ac-circuits/harmonics.html>. Hakupäivä 3.5.2020.

Elovaara, Jarmo & Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot I. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatieto Helsinki University Press.

Fluke 434-II/435-II/437-II 2012. Fluke käyttöohje. Saatavissa: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umfin0100.pdf. Hakupäivä 5.9.2021.

Fluke 434-II/435-II/437-II. Saatavissa: <https://www.fluke.com/fi-fi/tuote/sahkotesaus/sahkonlaatu/434-435#>. Hakupäivä 5.9.2021.

Nokia capacitors pienjännitetuotteiden tuoteopas. Saatavissa: <https://www.sahkonumerot.fi/5704580/doc/brochure/>. Hakupäivä 11.9.2021.

SFS-EN 50160:2010 + A1:2015 + A2:2019 + A3:2019. Hakupäivä 6.4.2020. Saatavissa: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/5/875127.html.stx>.

ST 52.15 2016. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/pdfget/537#search=st%2052.15>. Hakupäivä 18.3.2020.

ST 52.16 2014. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/pdfget/519#search=st%2052.16>. Hakupäivä 18.3.2020.

ST 52.50 2006. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/>. Hakupäivä 8.4.2020.

ST 52.51 2006. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/>. Hakupäivä 28.4.2020

ST 52.51.02 2006. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/> Hakupäivä 18.3.2020.

Tampereen Kondensaattoritehdas 2019. Estokelapariston käyttöohje. Saatavissa: https://www.tkf.fi/wp-content/uploads/2019/09/TKF-Estokelapariston-ka%CC%88ytto%CC%88ohje-Ver-190826_web.pdf. Hakupäivä 11.9.2021.

Tampereen sähköverkko. Loistehon hinnoittelu ja kompensointi. Saatavissa:
<https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkoverkko/tsv-ohjepankki/2.sahkonsuunnittelijalle-ja-urakoitsijalle/5.-loisteho-ja-kompensointi/1.-loistehon-kompensointi.pdf>. Hakupäivä 12.9.2021.