Jani Keränen

SÄHKÖVERKON ANALYSOINTI JA MITTAUS TEHDASRAKENNUKSESSA

SÄHKÖVERKON ANALYSOINTI JA MITTAUS TEHDASRAKENNUKSESSA

Jani Keränen
Opinnäytetyö
Syksy 2021
Sähkö- ja automaatiotekniikan
tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma, sähkötekniikka

---

Tekijä: Jani Keränen
Opinnäytetyön nimi: Sähköverkon analysointi ja mittaus tehdasrakennuksessa
Työn ohjaajat: Heikki Kurki OAMK, Jaska Jolma Caverion Suomi Oy, Hannu Väyrynen Kemira Chemicals Oy
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2021
Sivumäärä: 55 + 5 liitettä

Tässä työssä käydään läpi sähkön laadun peruskäsitteitä ja laadun määritelmiä. Käsitellään tavanomaisimpia kompensointi- ja suodatinlaitteita sekä tarkastellaan kyseisten laitteiden valintaan vaikuttavat tekijöitä ja huomioitavia asioita.

Työssä tutustutaan Fluke 435-II -verkkoanalysaattorin käyttöön asennuksineen ja perusparametrointiin, jota käytettiin työn käytännön osuudessa mitattaessa kolmea eri Kemiran vetyperoksiditehtaan sähköpääkeskusta. Mittauksissa tarkasteltiin sähkönlaatua, mittauksen pääkohteina olivat kompensoinnin tarve ja yliaallot. Tulosten perusteella mitoitettiin tarvittavat kompensointilaitteet ja yliaaltojen suodatinlaitteet.

Tulokset käsiteltiin keskuskohtaisesti ja mitoitettiin laitevalinnat perusteluineen. Lopputuloksissa saatiin samat arvot keskuksessa P18 laitetoimittajan kanssa, mutta keskusten P19 ja P20 tuloksissa oli eroja, joiden syitä käytiin läpi työn lopussa.

Asiasanat: sähköverkon analysointi, kompensointi, analysaattori, yliaallot, yliaaltosuodatin

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering, Option of Electrical Engineering

Author: Jani Keränen
Title of thesis: Analysis and Measurement of Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Factory Low Voltage-Network.
Supervisors: Heikki Kurki OAMK, Jaska Jolma Caverion Suomi Oy, Hannu Väyrynen Kemira Chemicals Oy
Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2021
Pages: 55 + 5 appendices

This thesis focuses on the basic concepts and definitions of power quality and addresses the most common compensation and filter devices, the factors influencing the selection of these devices and the issues to be considered.

The work introduces the use of the Fluke 435 network analyzer with its installations and setting of basic parameters, which was used in the practical part of the work to measure the characteristics in three different main switchgears of Kemira's hydrogen peroxide plant power plant. The measurements looked at power quality, the main targets of the measurements being the need for compensation and harmonics. Based on the results, the necessary compensation devices and harmonic filter devices were dimensioned.

The results were processed individually for each distribution board and the equipment choices were dimensioned and assessed. The results obtained the same values at the center P18 as the equipment supplier, but there were differences in the results of P19 and P20. The reasons for the differences are discussed at the end of this thesis.

Keywords: power grid analysis, compensation, analyzer, harmonics, harmonic filter

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 7
2 SÄHKÖN LAATUTEKIJÄT 8
2.1 Standardeissa sekä ohjeissa annetut laatukriteerit ja ominaisuudet 9
2.2 Verkkotaajuus 9
2.3 Jännitetason vaihtelut 10
2.4 Jakelujännitteen symmetria 11
2.5 Harmoninen yliaaltojännite 12
2.6 Harmoniset ja epäharmoniset yliaaltovirrat 13
2.7 Kolmas yliaalto 15
2.8 Jännitehäiriöt 15
3 LOISTEHON KOMPENSOINTI 17
3.1 Rinnakkaiskondensaattoriparisto 18
3.2 Automaattiparisto 18
3.3 Estokelaparisto 20
4 YLIAALTOSUODATTIMET 21
4.1 Passiivinen yliaaltosuodatin 21
4.2 Aktiivisuodatin 22
4.3 Kolmannen yliaallon suodatin 24
5 KOMPENSOINTI JA SUODATINLAITTEEN MITOITUSPERUSTEET 26
6 FLUKE 435-II VERKKOANALYSAATTORI 28
6.1 Mittarin ominaisuudet 29
6.2 i430 Flexi TFII mittapäät ja suora mittaus 29
6.3 i5s mittapäät ja epäsuora mittaus 31
7 KEMIRAN VETYPEROKSIDITEHTAIDEN MITTAUKSET 33
7.1 Mittausten valmistelu 34
7.2 Mittarin kytkentä 35
7.3 Mittauksen käynnistys 38
8 MITTAUSTULOKSET 43
9 TULOSTEN KÄSITTELY SEKÄ RATKAISUT 44
9.1 Vetyperoksiditehdas 1 Pääkeskus P18 46
9.2 Vetyperoksiditehdas 2 A Pääkeskus P19 48

9.3 Vetyperoksiditehdas 2 B Pääkeskus P20 50
10 POHDINTA 52
LÄHTEET 54
LIITTEET 56

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö sai alkunsa, kun Kemira Oy Oulusta teki työnantajalleni Caverion Suomi Oy:lle työtilauksen vetyperoksiditehtaiden sähköverkkojen analysointitarpeesta.

Vetyperoksiditehtaaseen kuuluu kolme rakennusta VP1, VP2A ja VP2B, joilla jokaisella on omat muuntajat sekä sähköpääkeskukset. Kaikissa sähköpääkeskuksissa on ollut vanhat Nokian valmistamat kiinteät tai automaattiset kompensointiparistot ilman estokeloja. Aikojen saatossa kompensointilaitteiden säätöportaita on rikkoutunut ja laitteet on poistettu käytöstä. Työn tavoitteena on, että analysoidaan sähköverkon tilanne yliaaltojen ja loistehon osalta. Analysoinnin jälkeen tehdään suunnitelmat uusien kompensointilaitteiden ja yliaaltosuodattimien tarpeesta.

Tässä työssä keskitytään ensin sähkön laatuun pienjänniteverkossa ja siihen mitä standardeissa määrätään laatuvaatimuksiksi. Seuraavaksi käydään läpi kompensointilaitteiden perusteita ja eroja sekä yliaaltosuodattimia. Työssä käytetään mittalaitteena Fluke 435-II verkkoanalysaattoria, käydään läpi mittalaitteen asennus ja käyttö sekä tärkeimmät parametrit. Työssä analysoidaan mittaustuloksia ja mitoitetaan tarvittavia kompensointi- ja suodatinlaitteita. Esiin tuli tarve kompensointi- ja suodatinlaitteiden asennuksille, mutta laitetilauksia ei ehditty tehdä. Laitteiden asennuksen jälkeisten mittaustulosten perusteella olisi voitu tehdä yhteenveto siitä, saavutettiinko käytännössä standardien mukainen laatutaso.

2 SÄHKÖN LAATUTEKIJÄT

Sähkön laatutekijöiden merkitys korostuu koko ajan, koska verkkoon liitetään jatkuvasti enemmän elektronisia laitteita ja näin häiriöiden määrä kasvaa. Elektroniset laitteet vaativat toimiakseen puhdasta verkkosähköä, mutta tuottavat itse sähköverkkoon aaltomuotojen vääristymiä epälineaarisen kuormituksen takia. Nykyisin sähkökojeiden ohjaukseen käytetään elektronisia teholähteitä kuten taajuusmuuttajia ja tyristorisäätöjä, koska niillä saadaan merkittäviä energiansäästöjä verrattuna aikaisemmin käytössä olleisiin sähkömekaanisiin ohjauksiin kuten kontaktorilähtöihin. Kun sähkön laatu -käsitettä alettiin ottamaan käyttöön, seurattiin lähinnä jännitteiden ja virtojen hetkellisarvoja sekä niiden aaltomuotoja. Nykyään tarkastellaan myös jännitteen sekä taajuuden tasaisuutta. Merkittävimmät sähkön laatuun vaikuttavat seikat ovat sähkökatkot, jännitevaihtelut ja jännitetasot, taajuuspoikkeamat sekä aaltomuotojen vääristymät. (1, s. 421.)

Sähkön laatutekijät vaikuttavat sähkölaitteistojen ja laitteiden toimivuuteen. Yleisimmät ongelmien aiheuttajat ovat jännitetason vaihtelut, virtapiikit ja verkossa liikkuvat yliaallot. Sähkön laadun heikkeneminen havaitaan yleensä vasta kun verkossa alkaa esiintyä sulakkeiden palamisia, kaapeleiden poikkeavaa lämpenemistä tai hurinaa sähkökeskuksissa ja katkaisijoissa. Häiriöt voivat johtua sähköverkossa myös muiden sähkölaitteistojen alueelle ja aiheuttaa ongelmia läheisissä laitteistoissa. Yleisesti ongelmat syntyvät uusien laitehankintojen takia. Olemassa olevassa sähköverkossa saattaa esiintyä niin paljon häiriöitä, että kytkettäessä uusi laite verkkoon se ylittää kriittisen tason verkkohäiriöiden määrässä ja sen seurauksena alkaa esiintyä toimintahäiriöitä ja laitevaurioita. Yliaaltopitoisissa sähköverkoissa häviöt kasvavat, kuormitettavuus heikkenee, mittareihin tulee virhenäyttämiä, suojareleisiin virhetoimintoja sekä erilaisia ylimääräisiä ääniä kuten hurinaa. (2, s. 1, 4.)

Yleisimpiä sähkönlaatuun vaikuttavia laitteita ovat hakkurivirtalähteet, tyristorisäätimet, puolijohdekytkimet, tasasuuntaajat, televisiot ja tietokoneet. UPS-laitteistot ovat yleensä myös yliaaltolähteitä ja saattavat aiheuttaa verkkoon ongelmallisia kuormia siitä huolimatta, että niitä pyritään käyttämään sähkönlaadun parantamiseen. (3, s. 31.)

2.1 Standardeissa sekä ohjeissa annetut laatukriteerit ja ominaisuudet

Sähkön laatukriteereitä ja ominaisuuksia on koostettu standardiin EN 50160. Tämä standardi pyrkii määrittelemään koko Euroopan alueella noudatettavia vaatimuksia jännitteen ominaisuuksille kuluttajan ja verkkoyhtiön liityntäpisteessä. Standardissa käsitellään jännitteen ominaisuuksista taajuutta, suuruutta, aaltomuotoa sekä symmetriaa. Ominaisuudet muuttuvat riippuen ajankodasta sekä mittauspaikasta, joissakin tapauksissa mitatut arvot voivat olla standarditasoa suurempia. (4, s. 10.)

Standardien lisäksi sähkönlaatuun liittyviä ohjeistuksia esitellään myös ST-korteissa ja ABB:n TTT käsikirjoissa 006, 040 sekä 090. Lisäksi Sähköinfon julkaisemassa Yliaallot ja kompensointi -kirjassa käydään laajasti läpi sähkön ominaisuuksia.

2.2 Verkkotaajuus

Normaaleissa olosuhteissa on verkkotaajuus 50 Hz. Taajuus mitataan viikon pituisella mittauksella 10 s keskiarvoina. Tällöin mitatun arvon tulee olla 99,5 % vuodesta 50 Hz ± 1 %. Se tarkoittaa taajuuden vaihteluväliä 49,5−50,5 Hz ja taajuuden on oltava lisäksi aina 50 Hz + 4 − - 6 %, mikä tarkoittaa vaihteluväliä 47−52 Hz. Arvot on koostettu taulukkoon 1. Sähkön jakelun turvaamiseksi poikkeusoloissa suurempi vaihtelu on väliaikaisesti sallittu. (4, s. 17.)

TAULUKKO 1. Taajuuden laatukriteerit (2, s. 8)

Hyvä laatu	95 % mittauksista 50 Hz ± 1 %
Normaalilaatu	95 % mittauksista 50 Hz ± 1 %
Standardilaatu	95 % mittauksista 50 Hz ± 1 % ja kaikki 50 Hz + 4 % − - 6 %
Mittaus	10 s jakson keskiarvoina viikon ajan

Taajuuspoikkeamia ei yleensä tapahdu suurten sähkölaitosten alueella. Yleisempiä ne ovat pienillä jakelualueilla esimerkiksi saaristossa, tai tilapäisesti varavoimakonekäyttöjen aikana. Taajuuspoikkeamia aiheuttavat pääasiassa kuormituksissa tapahtuvat nopeat muutokset ja verkon ylikuormitukset. (2, s. 2.)

2.3 Jännitetason vaihtelut

Jännitetason vaihtelu mitataan jännitteen tehollisarvosta U_n (taulukko 2). Mittaus suoritetaan viikon jaksossa, 10 minuutin pituisten jaksojen keskiarvoilla. Normaaleissa olosuhteissa laatu jaetaan kolmeen eri tasoon. Hyvässä jännitteen laadussa jännite saa poiketa nimellisjännitteestä ± 4 %:a ja keskiarvon tulee olla välillä U_n ± 2,5 %, standardilaadussa 95 % mittaustuloksista tulee olla välillä U_n ± 10 % ja normaalilaadussa kaikkien mittaustulosten on oltava välillä U_n ± 10 %. (4, s. 18.)

TAULUKKO 2. Jännitteen laatukriteerit tehollisarvosta U_n (2, s. 8)

Hyvä laatu	± 4 % ja keskiarvo ± 2,5 %
Normaalilaatu	± 10 %
Standardilaatu	95 % mittaustuloksista välillä ± 10 %
Mittaus	10 min jaksoina viikon ajan

Sähköverkon suunnittelulla ja oikealla käytöllä saadaan pitkäaikaiset jännitetason muutokset hallittua. Lyhytaikaiset eli nopeat jännitemuutokset aiheuttavat välkyntää sekä ongelmia herkille kuormille. Ne aiheutuvat kuormassa muuttuvista tekijöistä kuten suurten kuormitusten käynnistymisistä ja sammumisista, ukkosen aiheuttamista jännitteistä ja vikatilanteista. (2, s. 2, 3.)

Jännitetason äkillisiä alenemisia kutsutaan jännitekuopiksi. Niiden taso on 5–90 % jännitteen tehollisarvosta U_n ja ne palautuvat yleensä aikavälillä 10 millisekunnista muutamaan sekuntiin. Jännitekuopaksi ei lueta tilannetta, jossa jännitetaso ei laske alle 90 %:iin jännitteen tehollisarvosta U_n. (3, s. 14.)

Välkyntää seurataan viikon mittaisella mittausjaksolla, kymmenen minuutin välein mitatulla keskiarvolla. Tulokset jaetaan kolmeen tasoon (taulukko 3), hyvän laadun tasolla koko mittausjakson lyhytaikaisen välkynnän taso $P_{st,3max}$ ≤ 1 ja pitkäaikaisen välkynnän taso $P_{lt,max}$ ≤ 0,74. Normaalilaadun taso tarkoittaa, että koko mittausjakson pitkäaikaisen välkynnän taso $P_{lt,max}$ ≤ 1 ja standardilaatu tarkoittaa sitä kun 95 % mitatuista arvoista, pitkäaikaisen välkynnän taso P_{lt} ≤ 0,74. (4, s. 18.)

TAULUKKO 3. Välkynnän eli nopeiden jännitemuutosten laatukriteerit (2, s. 8)

Hyvä laatu	$P_{st,3max} \leq 1, P_{lt,max} \leq 0{,}74$
Normaalilaatu	$P_{lt,max} \leq 1$
Standardilaatu	95 % mitatuista P_{lt} arvoista $\leq 0{,}74$
Mittaus	10 min jaksoina viikon ajan

2.4 Jakelujännitteen symmetria

Symmetria mitataan viikon mittausjaksolla. Mittauksessa mitataan perustaajuisen vastakomponentin suhdetta myötäkomponenttiin. Vastakomponentin tehollisarvon 10 minuutin keskiarvoista tulee 95 % mittauksista olla 0–2 % myötäkomponentista. Arvot annetaan standardissa ainoastaan vastakomponentille, koska myötäkomponentilla ei ole niin merkittävää vaikutusta laitteiden häiriöiden kannalta. (4, s. 19.)

2.5 Harmoninen yliaaltojännite

Harmoniset yliaaltojännitteet mitataan viikon pituisella mittausjaksolla 10 minuutin keskiarvoina. Mittauksessa verrataan jokaisen eri yliaaltojännitteen tehollisarvoa perustaajuiseen jakelujännitteeseen. 95 %:ssa saaduista mittaustuloksista tulee olla maksimissaan taulukon 4 arvo. Tämän lisäksi kokonaissärökertoimen THD maksimiarvo saa olla 8 %, johon mukaan luetaan kaikki yliaallot 40. aaltoon saakka. (4, s. 19.)

TAULUKKO 4. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittymispisteessä (5, s. 19)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
kolmella jaottomat		kolmella jaolliset			
järjestys-luku	suhteellinen jännite	järjestys-luku	suhteellinen jännite	järjestys-luku	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 %				

Taulukossa 5 nähdään harmonisten yliaaltojen järjestysnumerot sekä sekvenssit eli kiertosuunnat. 50 Hz on ns. sähköverkon perustaajuus, 2. yliaalto on kaksinkertainen perustaajuuden suuruinen, 3. yliaalto on kolminkertainen jne. (6, s. 57.)

TAULUKKO 5. Yliaaltojen järjestysnumerot ja kiertosuunnat (6, s. 57)

Yliaalto	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**
Taajuus Hz	**50**	100	**150**	200	**250**	300	**350**	400	**450**
Suunta	**+**	-	**0**	+	**-**	0	**+**	-	**0**

Yliaallon kiertosuunta voi olla positiivinen, negatiivinen tai nolla. Kun yliaalto yrittää pyörittää kuormitusta nopeammin kuin verkon perustaajuus, se on positiivinen. Negatiivinen taas yrittää pyörittää kuormaa hitaammin. Molemmat tilanteet aiheuttavat varsinkin pyörivien kuormitusten ylikuumenemista, ylikuormittumista ja vääntömomentin heikkenemistä. Kun sähköverkossa ei esiinny symmetriaeroa eikä tasakomponenttia, ei siellä esiinny myöskään parittomia yliaaltoja. Nollajohtimen ylikuumenemista aiheuttavat nollasekvenssin yliaallot, jotka summautuvat nollajohtimeen. (6, s. 57.)

2.6 Harmoniset ja epäharmoniset yliaaltovirrat

Standardissa ei oteta kantaa yliaaltovirtoihin. Yliaaltovirtojen määrittämistä on lähinnä käsitelty Sähköinfon julkaisemassa Yliaallot ja kompensointi -kirjassa. (3.)

Yliaaltovirtojen määritelmissä käytetään liittymän pääsulakkeen nimellisvirtaa referenssivirtana I_{ref}. Jos liittymän pääsulake ei ole tiedossa, voidaan referenssivirta laskea liittymän pätötehon perusteella kaavalla 1. (3, s. 43.)

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3} * U_n} \qquad \textit{KAAVA 1}$$

jossa $P = liittymäsopimuksen\ pätöteho$

$U_n = verkon\ nimellisjännite$

Virtarajat tulee ottaa huomioon varsinkin, jos kiinteistöön ollaan lisäämässä tai päivittämässä kompensointilaitteita. Näin tehdään myös silloin, jos sähköver-

kossa esiintyvät jännitesäröt ovat korkeita. Taulukossa 6 nähdään rajat yliaaltovirroille pienjänniteverkon liittämiskohdassa. Näiden arvojen sisällä sähkön käyttäjä saa syöttää verkkoon ja ottaa verkosta yliaaltovirtaa. (3, s. 44, 45.)

TAULUKKO 6. Suurimmat sallitut yliaaltovirrat verkon liittämiskohdassa (3, s. 44)

<table>
<tr><td>Referenssivirta</td><td colspan="2">Suositeltava raja</td></tr>
<tr><td><= 25 A</td><td colspan="2">Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita</td></tr>
<tr><td>> 25 A - 200 A</td><td colspan="2">Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta</td></tr>
<tr><td>> 200 A</td><td colspan="2">Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta, kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:</td></tr>
<tr><td></td><td>järjestysluku</td><td>sallittu virtasärö</td></tr>
<tr><td></td><td>< 11</td><td>7.0 %</td></tr>
<tr><td></td><td>11 - 16</td><td>3.5 %</td></tr>
<tr><td></td><td>17 - 22</td><td>2.5 %</td></tr>
<tr><td></td><td>23 - 34</td><td>1.0 %</td></tr>
<tr><td></td><td>> 34</td><td>0.5 %</td></tr>
</table>

2.7 Kolmas yliaalto

Symmetrinen kuormitus aiheuttaa samavaiheisten, kolmella jaollisien parittomien yliaaltojen (3., 9., 12. jne.) summautumisen tähtipisteessä nollajohtimeen. Tässä tilanteessa nollajohtimeen voi summautua kaikkien vaiheiden kolmansien yliaaltovirtojen yhteenlaskettu virta. (3, s. 55.)

Kolmas yliaalto aiheuttaa suuria virtoja, ja ne aiheuttavat sähköverkkoon lämpenemistä, tehohäviöitä, häiriöitä ja suuria sähkömagneettisia kenttiä. Lisäksi kolmas yliaalto aiheuttaa maasulkuhälytyslaitteistojen virhetoimintoja, muuntajien ylikuormitusta sekä katkaisijoiden ja johdonsuojien epänormaaleja laukeamisia. (7, s. 2.)

2.8 Jännitehäiriöt

Ylijännitteitä yleensä aiheuttavat kytkentätoimenpiteet sekä suurien kuormien erottaminen sähköverkosta. Jännitekuoppia aiheuttavat yleensä jakeluverkon tai

verkonkäyttäjän asennuksista johtuvat viat. Kummatkin tilanteet tapahtuvat odottamattomasti ja satunnaisesti sekä ne jakaantuvat epäsäännöllisesti ympäri vuoden. Jännitekuopan rajaksi katsotaan nimellisjännitteestä 90 %, ylijännitteen raja nimellisjännitteestä on 110 %. (4, s. 20.)

Transienttiylijännitteitä pääasiassa aiheuttavat salaman iskut ja sähkölaitteistossa suoritetut suurten kuormitusten kytkentätoimet. Nousuajat transienttiylijännitteillä vaihtelevat alle mikrosekunnista muutamiin millisekunteihin. Standardien mukaan suunniteltujen ja valittujen pienjännitelaitteiden kanssa ei yleensä ole transienttiylijänniteongelmia. Laitteistot voidaan tarvittaessa suojata lisäämällä ylijännitesuojia. (4, s. 22.)

Keston perusteella transienttiylijännitteet jaetaan lyhyisiin, keskipitkiin sekä pitkiin transientteihin. Lyhyet alle 1 μs (mikrosekunti) kestävät transientit aiheutuvat laitteiden kytkennästä. Keskipitkät transientit, joiden kesto on 1−100 μs, aiheutuvat yleensä salamaniskuista tai katkaisijoiden aukeamisista. Pitkät yli 100 μs transientit johtuvat sulakkeiden palamisista tai kompensointilaitteiden kytkennöistä. Tietotekniset laitteet ovat yleensä hyvin herkkiä transienttiylijännitteille. (2, s. 3.)

Sähkökatkokset eli jakelun keskeytykset ovat yleisimpiä jännitehäiriöitä, varsinkin avojohtolinjoilla. Jakelun keskeytykset voivat olla joko suunniteltuja tai johtua häiriötilanteesta. Häiriöt, jotka aiheuttavat keskeytyksiä, ovat yleensä puiden kaatuminen avojohtoihin, kaivuutyöt ja laiteviat. (2, s. 2.)

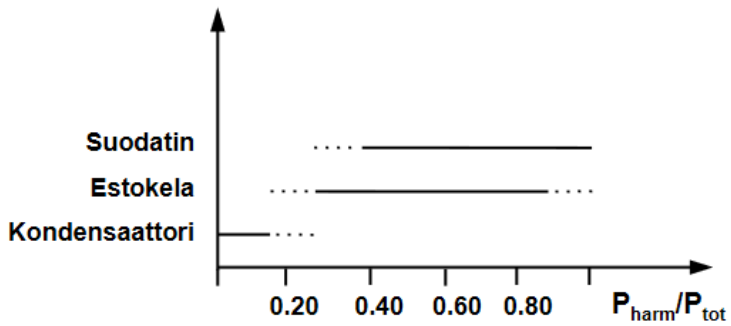
3 LOISTEHON KOMPENSOINTI

Kompensointilaitteita käytetään loistehon tuottamiseen lähellä sen kulutuspistettä. Ilman kompensointilaitetta tarvittava loisteho joudutaan ottamaan energialaitoksen verkosta ja kuljettamaan siirtoverkkoja pitkin muualta. Loistehon siirto sähköverkossa pienentää pätötehon siirtokapasiteettia ja kasvattaa laitteistojen, johtimien ja muuntajien häviöitä sekä aiheuttaa sähköverkon ylimitoitustarvetta. (3, s. 20.)

Kompensointilaitteet laskevat häviöitä pienentämällä verkon kuormitusvirtaa, myös lämpötilat alenevat muuntajissa, kaapeloinneissa sekä keskustiloissa. Tämä vaikuttaa alentavasti myös laitetilojen jäähdytystarpeeseen. (8, s. 5, 6.)

Yleisesti kompensoinnissa käytetään ratkaisuina laitekohtaista, ryhmäkohtaista tai keskitettyä kompensointia. Sähköverkkoja voidaan kompensoida tarvittaessa kaikilla jänniteportailla, edullisinta kompensointi on kuitenkin suorittaa pienjänniteverkossa. Kompensointilaitteen valintaan vaikuttavat useat seikat, kuten tarvitaanko aktiivi- vai passiivilaite, tarvitaanko kapasitiivista- vai induktiivista kompensointia, tai riittääkö pelkkä perustaajuinen kompensointilaite vai tarvitaanko myös yliaaltosuodatusta. (3, s. 47.)

Kun lähdetään suunnittelemaan tarvittavaa laitteistoa, nyrkkisääntönä voidaan käyttää kuvassa 1 esitettyä ohjetta. Kuvassa verrataan yliaaltoja tuottavan kuormituksen määrää P_{harm}, laitteiston kokonaiskuormaan P_{tot}. (1, s. 25.)



KUVA 1. Laitevalinta verkon yliaaltoa tuottavan kuorman mukaan (3, s. 94)

3.1 Rinnakkaiskondensaattoriparisto

Rinnakkaiskondensaattoriparisto on kiinteästi kuorman kanssa rinnakkain verkkoon kytketty paristo (kuva 2), jossa ei ole säädettävyyttä. Tällaista paristoa käytetään yleensä yksittäisten laitteiden kanssa, jotka aiheuttavat huomattavan määrän tasaista loistehoa tuottavaa kuormaa, kuten suuret sähkömoottorit. Tällaista ratkaisua kutsutaan laitekohtaiseksi kompensoinniksi. Kytkentävirtasykäykset ovat huomattavia suurempikapasiteettisilla paristoilla ja ne jo itsessään aiheuttavat jännitteeseen kytkentähäiriöitä ja jännitepiikkejä. (3, s. 48.)

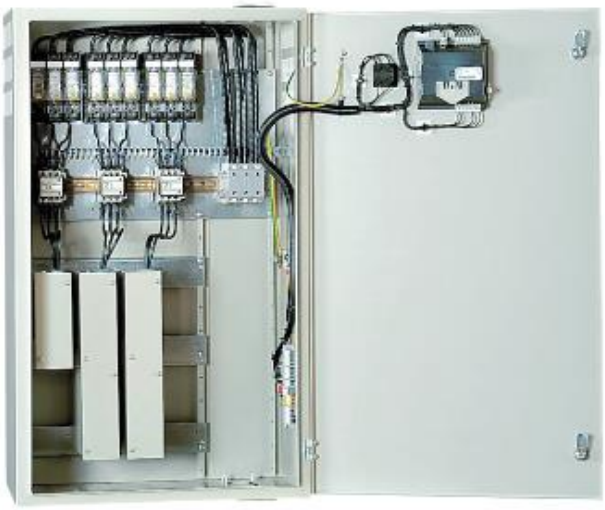
KUVA 2. Esimerkkejä kompensointiparistoista (10, s. 5)

3.2 Automaattiparisto

Automaattiparistoa (kuva 3) käytetään yleensä keskitetyssä kompensoinnissa, jossa kompensointilaite kytketään laitteiston keskukseen. Automaattiparistossa

on useampia portaita, joita ohjataan loistehonsäätimellä. Loistehonsäätäjään ohjelmoidaan halutut induktiiviset ja kapasitiiviset havahtumisrajat, joiden mukaan eritehoisia portaita kytketään päälle ja pois sähköverkossa vallitsevan tilanteen mukaan. (3, s. 48.)

Automaattiparisto on toimiva ratkaisu heikosti yliaaltoiseen verkkoon, jossa sähköverkon kuormituksena on maksimissaan 15 % yliaaltoja tuottavaa kuormaa. Jos yliaaltoja tuottavaa kuormitusta on enemmän, vaarana ovat sarjaresonanssit syöttävän verkon induktanssien ja kompensointilaitteen kapasitanssien kanssa. Sarjaresonanssitilassa, jossa viritystaajuus osuu samalle taajuudelle yliaaltovirran kanssa, värähtelypiirit saattavat aiheuttaa jopa 20-kertaisen yliaaltovirran. Se saattaa aiheuttaa kompensointilaitteen välittömän tuhoutumisen ja muita huomattavia vahinkoja sähköverkon laitteille. Tämän takia yliaaltopitoisessa sähköverkossa on käytettävä estokelaparistoa. (3, s. 51.)



KUVA 3. Näkymä automatiikkapariston sisältä (10, s. 6)

3.3 Estokelaparisto

Estokelapariston (kuva 4) toimintaperiaate on automaattipariston kanssa hyvin samantapainen. Käytännössä laitteiden ero tulee pariston kondensaattorien kanssa sarjassa olevista estokeloista, jotka estävät resonanssipiirien syntymisen yliaaltotaajuuksilla. Estokelaparisto on toimiva ratkaisu silloin, kun laitteiston kuormituksesta yliaaltoja tuottavaa kuormaa on 30–80 %. Estokelaparistolla saadaan myös sopivilla viritystaajuuksilla aikaan yliaaltojen suodatusta. Käytettäessä 189 Hz:n viritystaajuutta, saadaan 5. yliaaltovirrasta suodatettua pois jopa 25–30 %. (11, s. 52.)

KUVA 4. Estokelaparisto (10, s. 8)

4 YLIAALTOSUODATTIMET

Silloin kun lähes kaikki kuormitus muodostuu yliaaltolähteistä, käytetään yliaaltosuodatinta. Suodatintyypin valinta riippuu verkossa esiintyvien eritaajuisten yliaaltojen määrästä. Jos suodatusta vaativia yliaaltoja on yhdestä kolmeen ja yliaallot esiintyvät tarkasti tietyillä aallonpituuksilla, toimii passiivinen suodatin hyvin. Kun verkossa esiintyy useampia yliaaltoja tai aaltojen muoto vaihtuu verkossa taajuudeltaan tai suuruudeltaan, on käytettävä aktiivisuodatinta. (9, s. 32, 33, 35.)

4.1 Passiivinen yliaaltosuodatin

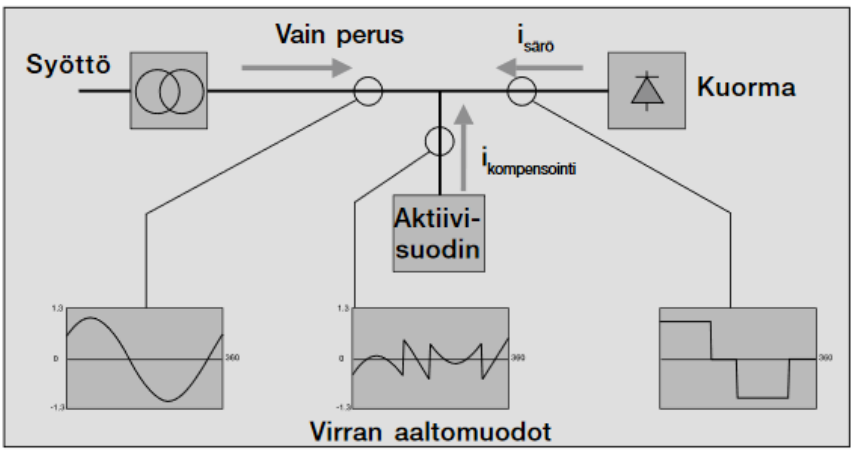
Yliaaltosuodattimet (kuva 5) ovat perusrakenteeltaan lähellä kompensointilaitteita. Yliaaltosuodattimissa on kuristimien kanssa sarjaan kytketyt kondensaattorit. Portaita ohjataan loistehonsäätimellä. Yliaaltosuodattimien kuristimien induktanssit on mitoitettu niin, että tietylle yliaaltotaajuudelle muodostuu ns. kaistanpäästösuodatin, jolloin haluttu yliaalto päätyy suodattimeen. Yleensä yliaaltosuodattimessa on kolme erillistä imupiiriä yleisimmille 5., 7. ja 11. yliaalloille. (10, s. 13.)

KUVA 5. Passiivinen yliaaltosuodatin (10, s. 13)

4.2 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodattimien (kuva 6) toimintaperiaate eroaa täysin passiivisista laitteista. Ne mittaavat reaaliaikaisesti verkon yliaaltovirrat, muodostavat niiden perusteella vastakkaisen virran ja syöttävät sen sähköverkkoon (kuva 7). Tällöin vastakkaisvaiheiset virrat kumoavat toisensa. Aktiivisuodatin voi poistaa sähköverkosta useita eri taajuuksien yliaaltoja, myös 3. yliaallon. Siinä ei ole myöskään vaaraa rinnakkaisresonansseista. Aktiivisuodattimen hyvä ominaisuus on myös kuormituskestoisuus. Se kumoaa maksimissaan vain nimelliskapasiteettinsa verran yliaaltoja, eivätkä ylikuormitus tai sähköverkon ominaisuudet vaikuta sen toimintaan. Aktiivisuodattimen toimintaperiaate on sama kuin taajuusmuuttajissa. Se on hyvin tunnettu ja hallittu, laite toimii kuten ohjattu virtalähde. (3, s. 60.)

KUVA 6. Aktiivinen yliaaltosuodatin (10, s. 14)

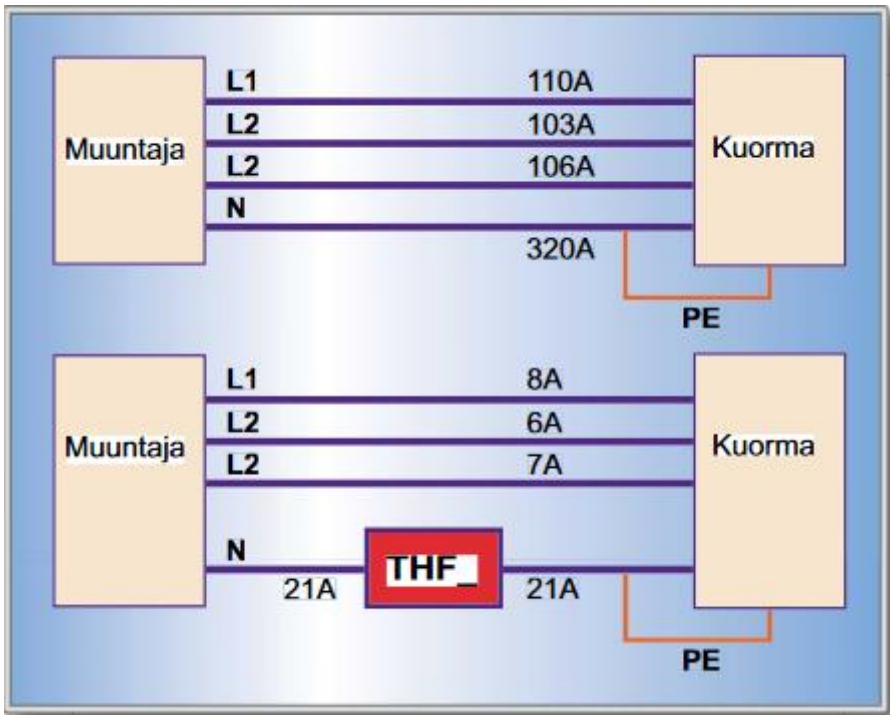


KUVA 7. Aktiivisuodattimen toimintakaavio (5, s. 25)

4.3 Kolmannen yliaallon suodatin

Kaikki muut yliaallot paitsi 3. yliaalto pystytään suodattamaan passiivisilla sarjaan kytketyillä suodattimilla. Tämä johtuu kolmannen yliaallon summautumisesta nollajohtimeen. Kolmannen yliaaltovirran suodattamiseen voidaan käyttää joko aktiivisuodatinta tai passiivista rinnankytkettyä THF-suodatinta (Third Harmonic Filter) (kuva 8), joka kytketään pienjännitesähköverkon nollajohtimeen (kuva 9). THF-suodattimen toiminta perustuu kelan ja kondensaattorin rinnakkaisresonanssipiiriin, jolla estetään yliaaltovirran kulku nollajohtimessa. (11, s. 9.)

KUVA 8. Kolmannen yliaallon suodatin (12, s. 1)



KUVA 9. Kolmannen yliaallon suodattimen vaikutus yliaaltovirtoihin (7, s. 3)

5 KOMPENSOINTI JA SUODATINLAITTEEN MITOITUSPERUSTEET

Kompensoinnin suunnittelussa on tiedettävä kohteessa vallitsevat olosuhteet, kuten sähköverkon sen hetkinen yliaaltopitoisuus ja sen lisäksi verkkoyhtiö antaa tiedot suunnittelun perusteiksi. Näiden tietojen perusteella pystytään tekemään toimivat ja kustannustehokkaat laitevalinnat. Sähkönjakeluverkko vaikuttaa osaltaan kompensointiin ja sen toteutukseen, vastaavasti kompensointi vaikuttaa myös sähkönjakeluverkkoon. Verkkoyhtiöillä on myös ajantasainen tieto sähköverkon tilasta ja ominaisuuksista, sen takia on tärkeää tehdä yhteistyössä jakeluverkon edustajan kanssa. (3, s. 10, 91.)

Kun kompensoinnin mitoitusta aletaan tekemään, tarvitaan sähköverkosta useita perustietoja:

- verkon nimellisjännite
- verkon yliaaltotilanne
- tarvittava peruslaatuinen loisteho
- olemassa olevat kompensointi ja suodatinlaitteet
- verkkoyhtiön ohjeet. (3, s. 91.)

Näiden lisäksi yliaaltosuodattimen mitoitukseen tarvitaan

- yliaaltovirrat (olemassa oleva kompensointi irti kytkettynä)
- suodatusvaatimukset
- verkon oikosulkuteho
- ylemmän jänniteportaan jännitesärö. (3, s. 92.)

Itse kompensointilaitteen valintaan tarvitaan seuraavat tiedot:

- suurin sallittu pariston koko
- suurin sallittu kytkentäporras
- pienin kytkentäporras eli ns. säätötarkkuus
- tavoite tehokerroin. (3, s. 92.)

Kompensointilaitteen koko mitoitetaan yleisesti noin 50 %:iin sähköverkon pätötehohuipusta. Jos kohteen valaisimet on varustettu elektronisilla liitäntälaitteilla tai purkauslampuissa on laitekohtainen kompensointi, kompensointilaitteen tehoksi riittää 35−40 % pätötehohuipusta. (3, s. 86)

Kompensoinnin tarpeen ja tarvittavien laitteiden mitoitus on helpointa selvittää olemassa olevasta sähkölaitteistosta mittaamalla verkon tila verkkoanalysaattorilla. Tarpeen laskemiseen on olemassa myös useita kaavoja, mutta niitä käytetään yleensä uuden laitteiston suunnitteluvaiheessa.

Energialaitokset veloittavat ilmaisosuuden ylittävästä loistehosta. Yleensä sallitaan induktiivista loistehoa maksimissaan 16 % hetkellisestä pätötehohuipusta, kapasitiivinen loisteho eli ylikompensointi on verkkoyhtiöille haastavampaa ja sitä sallitaan yleensä noin 4 %. Ylimääräinen kapasitiivinen loisteho on haitallisempaa nykyisissä verkoissa, koska maakaapelit itsessään tuottavat verkkoon kapasitiivista kuormaa. Sallitut rajat pitää selvittää paikalliselta verkkoyhtiöltä laitteiston suunnitteluvaiheessa.

Mittauksessa tulee ottaa huomioon ajankohta, jolloin kuormitustaso on suurimmillaan ja nähdään todellinen loistehon kulutus. Mittauksen toteutus suoritetaan standardin mukaisella mittausjakson pituudella ja näytteenottovälillä.

6 FLUKE 435-II VERKKOANALYSAATTORI

Tässä työssä mittauksissa käytettiin Fluke 435-II verkkoanalysaattoria (kuva 10). Koska mittari oli uusi, valmistajan ohjeiden mukaisesti mittaria käytettiin testaus-mielessä ensin toisessa kohteessa, jolla varmistettiin laitteen virheetön toiminta.

KUVA 10. Fluke 435-II verkkoanalysaattori

Verkkoanalysaattori on monipuolinen mittalaite, jolla saadaan todellinen kuva sähköverkon tilanteesta ja verkossa liikkuvan sähkön laadusta. Jos verkossa epäillään olevan sähkönlaadullisia ongelmia, analysaattorilla voidaan lyhyelläkin mittauksella kartoittaa, minkälaisesta laatuongelmasta on kyse ja tarvittaessa ottaa ongelmasta riippuen pitempi mittausjakso. Mittausparametrit, mittauksen pituus ja näytteenottotaajuus valitaan haluttujen häiriötekijöiden havaitsemiseksi.

6.1 Mittarin ominaisuudet

Fluke 435-II mittalaitteella saadaan sähköverkosta mitattua seuraavanlaisia mittauksia: vaihekohtaiset jännitteet, vaihekohtaiset virrat, huippukerroin, kokonaissärö, harmoniset yliaallot, välkyntä, jännitteen kuopat ja kohoumat, taajuus, epäsymmetria, energiahävikki, invertterin tehokkuus, verkon signaalijännitteet, sekä oskilloskooppitoiminnot. (6, s. 20.) Yksityiskohtainen taulukko kaikista mittausominaisuuksista ja parametreista on liitteenä 1.

Mittaustulokset voidaan tuoda tietokoneelle ja käsitellä dataa Fluken Power Log -ohjelmistolla. Ohjelmistolla nähdään tarkemmin arvot ja se näyttää suoraan myös tietyt standardeista eroavat poikkeamat ja tapahtumat sekä keskiarvot. Tässä opinnäytetyössä ei käydä tarkemmin läpi ohjelmiston käyttämistä.

6.2 i430 Flexi TFII mittapäät ja suora mittaus

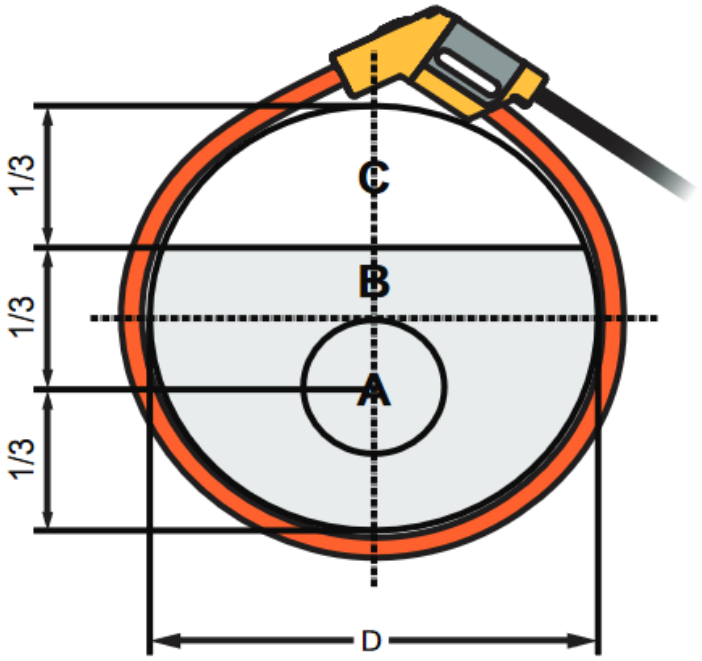
Flexi i430 mittapäät (kuva 11) ovat suoraan mittaukseen käytettävät mittapäät, joissa kapasiteetti riittää 6000 A AC mittausvirroille. Mittapäiden tarkemmat tekniset tiedot löytyvät liitteestä (liite 2). Suorassa mittauksessa kyseiset mittaussilmukat asennetaan suoraan mitattavien johtimien tai kiskojen ympärille. Joustava, punainen, avattava silmukka on mahdollista pujotella ahtaisiin väleihin esimerkiksi pääkytkimellä, jossa normaaleilla pihdeillä ei pystyttäisi mittaamaan.

KUVA 11. Fluke i430 Flexi joustava mittapää

Lenkkimallinen virtamuuntaja toimii Rogowskin kelan periaatteella. Siinä ensiöjohdin kulkee ilmaeristetyn silmukan läpi ja mitattava virta aiheuttaa virran indusoitumisen anturin käämityksen päihin. Häiriötekijät kelan toimintaan suljetaan pois kelan kaksoisrakenteella, jossa kaksi kelan toisiokerrosta on kierretty vastakkaisiin suuntiin, jolloin häiriöjännitteet ovat vastakkaisvaiheiset ja kumoavat toisensa. (13.)

Kyseisen mittapään käytössä on otettava huomioon, että mittaustarkkuus vaihtelee jonkin verran riippuen mitattavan johtimen sijainnista mittauslenkin keskellä. Mitattavan johtimen sijaitessa mittauslenkin silmukan laidassa virheen määrä kasvaa. Kuvassa 12 näkyvät alueet A, B ja C, joissa mittaustarkkuudet ovat:

- Alue A ± 0.5 % mittarilukemasta
- Alue B ± 1.0 % mittarilukemasta
- Alue C ± 2.0 % mittarilukemasta



KUVA 12. Mittapään mittaustarkkuusalueet (14, s. 4)

6.3 i5s mittapäät ja epäsuora mittaus

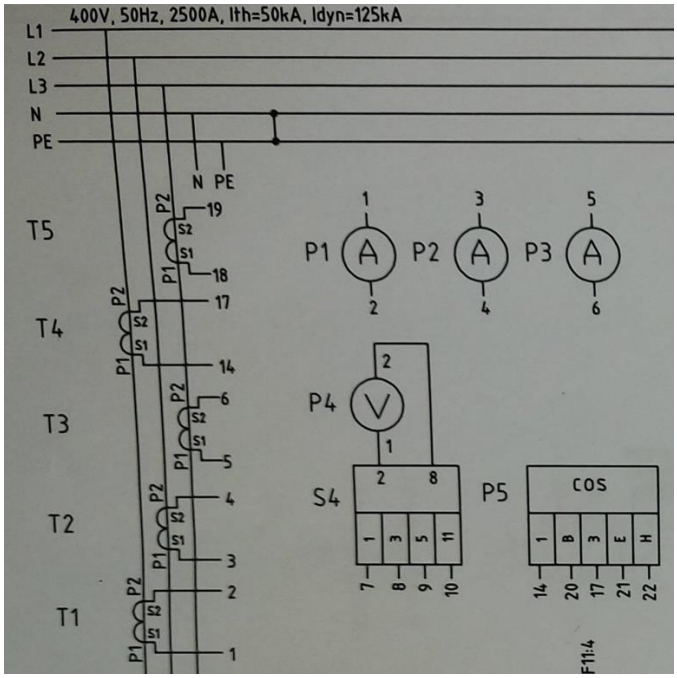
Fluke i5s mittapäitä (kuva 13) käytetään mittausteknisesti haastavissa kohteissa, joissa keskukseen on valmiiksi asennettu kiskoihin tai johtimiin virtamuuntajat esimerkiksi sähkömittaria tai analysaattoria varten.

Virtamuuntaja muuttaa ensiöpiirissä kulkevan suuren virran toisiopiirin kelaan helpommin mittalaitteilla käsiteltävään arvoon. Esimerkiksi ensiöpuolella voi kulkea 1000 A:n virta, joka virtamuuntajalla alennettuna saadaan muutettua maksimissaan 5 A:n tasoon. Virtamuuntajamittausta nimitetään myös epäsuoraksi mittaukseksi toimintaperiaatteensa mukaisesti.

Mittaustarkkuus kyseisellä epäsuoralla mittauksella on todella hyvä kuten liitteenä 3 olevista teknisistä tiedoista näkyy. Käytännössä suurin epätarkkuus mittaukseen tulee jo itse virtamuuntajan tyypistä ja sen mitoituksesta laitteistoon.

KUVA 13. Fluke i5s mittapää

Kuten ohjauspiirikaaviosta (kuva 14) nähdään, nollajohtimessa ei yleensä ole virtamuuntajia, jolloin on pakko käyttää kiskon tai johtimen ympärille tulevaa virtamittauslenkkiä, kuten i430 flexi. PE-johtimen eli suojajohtimen virtaa ei analysaattorimittauksessa mitata.



KUVA 14. Virtamuuntajien T1-T5 kytkentä ohjauspiirikaaviossa

7 KEMIRAN VETYPEROKSIDITEHTAIDEN MITTAUKSET

Laanilan tehdasalueen sähköverkko koostuu alueelle tulevasta 110 kilovoltin (kV) linjasta, kolmesta Laanilan Voiman hallitsemasta 25 MVA:n 110 / 6 kV:n muuntajasta ja 6 kV:n kytkinlaitoksesta, josta teho jaetaan laitosalueella vielä omille pienjännitemuuntajille sekä moottoreille.

Tässä työssä on mitattu sähköverkon tilaa kolmen vetyperoksiditehtaan pääkeskuksista pienjännitepuolelta, heti 6 / 0,4 kV:n muuntajien jälkeen.

Tehtaan VP1 pääkeskuksen numero on P18, sitä syöttää 2 MVA:n muuntaja. Keskuksen ylivirtasuojana toimii katkaisija, jonka laukaisuvirta on aseteltu arvoon 2560 A.

Tehtaan VP2A pääkeskus on P19, sitä syöttää myös 2 MVA:n muuntaja ja ylivirtasuojana toimivan katkaisijan laukaisuvirta on aseteltu arvoon 2560 A.

Tehtaan VP2B pääkeskuksen tunnus on P20, sitä syöttää 1250 kVA:n muuntaja. Keskuksen ylivirtasuojana toimivan katkaisijan laukaisuvirta on aseteltu arvoon 1600 A.

Kohteesta oli jo valmiiksi olemassa keskijännitepuolelta mitattu sähköverkon analysointidata, jossa näkyvät kohonneina arvoina varsinkin virran särö I_{thd} ja voimakkaat yliaaltokomponentit sekä jännitteessä että virrassa. Yliaaltokomponentit näkyvät jännitteessä kertalukujen 13. ja 11. aaltoina, sekä virrassa kertalukujen 5., 7. ja 11. aaltojen kohonneina arvoina.

Tämän takia mittaus haluttiin laajentaa vielä pienjännitepuolelle, että nähdään tarkemmin, mitä sähköverkossa tapahtuu ja mitkä ovat suurimmat ongelmat, jolloin päästään mitoittamaan paremmin mahdollisesti tarvittavat kompensointi- ja suodatinlaitteet.

7.1 Mittausten valmistelu

Pääkeskuksien katkaisijoiden alapuolelle kiskojen eteen asennettiin kosketussuojaukset tehtaiden seisakin aikaan syksyllä 2020. Tämä tehtiin siksi, että mittaukset pystytään tekemään jatkossa turvallisesti joutumatta kosketuksiin jännitteisten virtakiskojen kanssa. Tehtaiden kuormituksen normaalitilassa kiskojen virta on 850–1400 A (kuva 15).

KUVA 15. Keskuksen P18 pääkatkaisijan paikallisnäytössä virta vaiheella L3

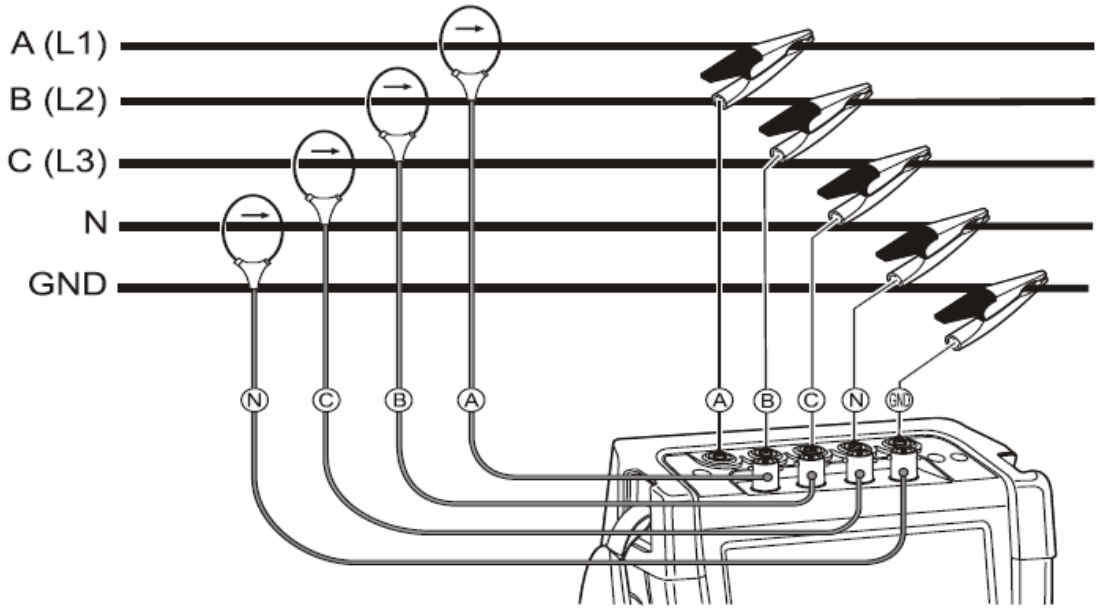
Koska näissä mittauksissa oli tarkoituksena saada selville todellinen tilanne sähköverkon jännitteen ja virran säröarvoista sekä yliaaltopitoisuuksista, mittaukset tehtiin standardin ohjeen mukaisesti viikon mittaisissa jaksoissa käyttämällä mittaustaajuutena 10 minuutin keskiarvoa. Se tarkoittaa, että mittaus tapahtuu aina 10 minuutin jaksoissa, jokaisesta jaksosta lasketaan keskiarvo ja se tallennetaan mittarin muistiin. Mittalaitteen näytölle piirtyy arvoista trendikäyrä, mutta siitä on

vaikea tarkastella arvoja. Kun data siirretään tietokoneelle Fluke Power Log -ohjelmalla, mittausarvoja pystytään tulkitsemaan tarkemmin ja luomaan raportteja.

7.2 Mittarin kytkentä

Analysointimittauksissa on huomioitava, että ne on aina tehtävä parityönä, koska mittausvälineillä yleensä joudutaan tarkoituksella koskettamaan suurivirtaisia kohteita. Sähkötyöturvallisuusstandardin SFS 6002:2015 mukaisesti molempien työntekijöiden on oltava sähköalan ammattilaisia ja on käytettävä tarvittavia jännitetyökaluja sekä suojavälineitä kuten suojavaatetus, kasvovisiiri ja jännitetyökäsineet. Niillä ehkäistään sähköiskun vaaraa sekä suojaudutaan mahdolliselta valokaarelta. (15, s. 63.)

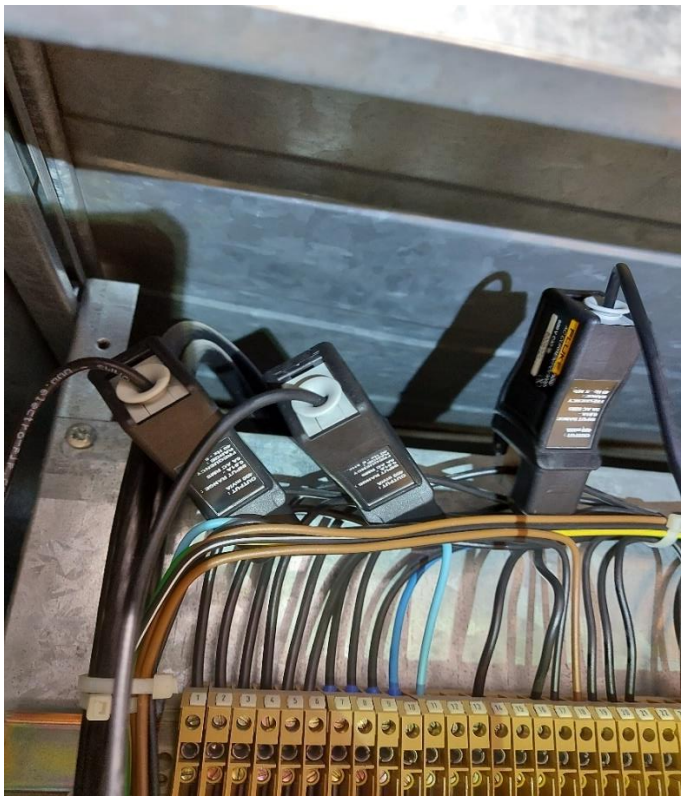
Mittarin kytkentä ja käytettävät mittapäät valitaan kohteen mukaan, kuvassa 16 nähdään suoran mittauksen kytkentä, jota käytetään suurimmassa osassa mittauksia. Yleensä suuremmat keskukset mitataan epäsuorasti virtamuuntajilta.



KUVA 16. Mittarin kytkentäperiaate suorassa mittauksessa (6, s. 36)

Aluksi mittarin Setup-valikosta valitaan mittauksissa käytettävien mittapäiden ja keskuksen nimellisvirran mukaan oikeat asetteluarvot. I5s mittapäitä käytettäessä laitteeseen pitää myös asetella keskuksen virtamuuntajien arvot. Tässä mittauksessa tarkastettiin vielä pääkytkimen arvoista, että kertoimet ovat oikein ja virrat ovat samat pääkatkaisijan paikallisnäytöllä sekä mittalaitteella.

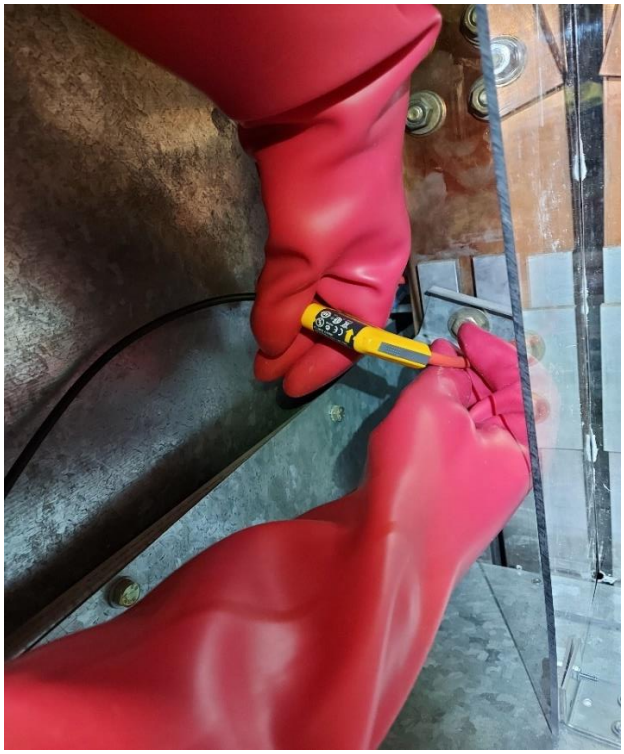
Vaihejohtimien virran mittauksessa käytettiin mittauspaikassa olemassa olevien virtamuuntajien takia i5s mittapäitä (kuva 17). Riviliittimeltä virtamuuntajilta saapuva virtatieto saadaan luettua pienivirtaisista johtimista.



KUVA 17. Fluke i5s mittapäät kytkettynä

Nollajohtimen virta mitattiin PEN- ja N- haaroituspisteestä kiskon ympäriltä Fluke i430-Flexi -mittauslenkillä (kuva 18). Jännitetiedot otetaan yleensä suoraan pääkytkimeltä tai kiskostojen pulteista hauenleukapihdeillä. Tässä tapauksessa kiskot olivat keskuksen perällä noin 60 cm:n syvyydessä. Riski olisi ollut liian suuri

työntää kädet niin syvälle keskuksen sisään pääkytkimen yli, joten jännitetiedot otettiin joko lähimmästä lähdöstä, jossa on tasainen ja todennäköisesti vähiten häiriötä aiheuttava kuormitus, tai varalähdöstä. P18 keskuksella mittauspaikaksi valittiin kenno, josta syötetään valvomorakennusta (kuva 19).



KUVA 18. *Virtamittauslenkin asennus PEN-kiskoon*

KUVA 19. Jännitetieto pihdeillä keskuksen lähdöstä P18

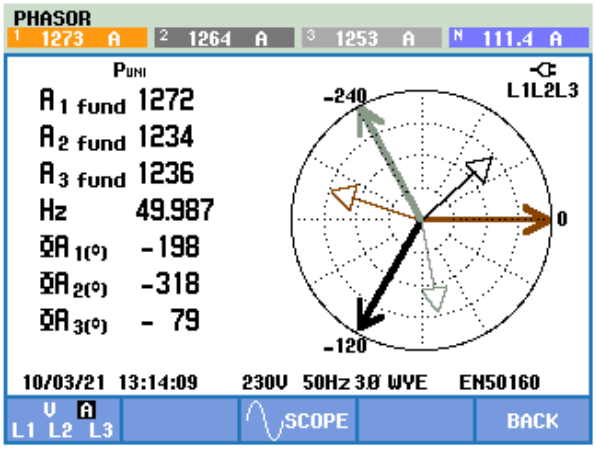
7.3 Mittauksen käynnistys

Kun kaikki tarvittavat mittausjohtimet on saatu kytkettyä, on tärkeää ensimmäiseksi mennä Scope-valikkoon. Sieltä näkee hyvin jännitteiden ja virtojen aaltomuodot sekä Phasor-alavalikosta yksikköympyrään piirrettyjen jänniteosoittimien ja virtaosoittimien suunnat.

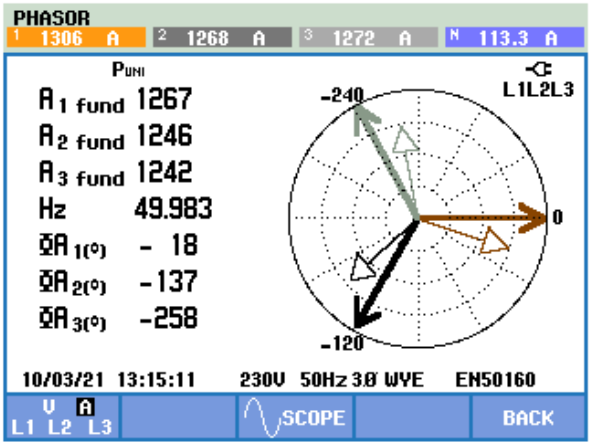
Näillä voidaan varmistaa, että mittarin kytkentä on onnistunut ja virtamittauspäiden suunta on kuormaan päin. Yksikköympyrässä oletuksena on, että osoittimien kiertosuunta on vastapäivään. Pitkänä näkyvät vahvemmat nuolet ovat jänniteosoittimia ja niiden vaihe-ero on 120 astetta. Lyhyemmät ja ohuemmat nuolet taas ovat virtaosoittimia. Normaalissa verkossa virtaosoittimien tulee olla hieman

jäljessä jänniteosoittimia, kun kuormitus on tavanomaiseen tapaan induktiivinen. Kapasitiivisella kuormituksella virtaosoittimet ovat jänniteosoittimien etupuolella.

Kuvassa (20) näkyy, kuinka esimerkiksi jännitteen L1 ruskea nuoli osoittaa oikealle ja virran nuoli lähes vastakkaiseen suuntaan vasemmalle, tällöin on käännettävä virtamittauspäät toisinpäin. Näin saadaan kuvan (21) mukainen tulos, jolloin kaikki on kunnossa.



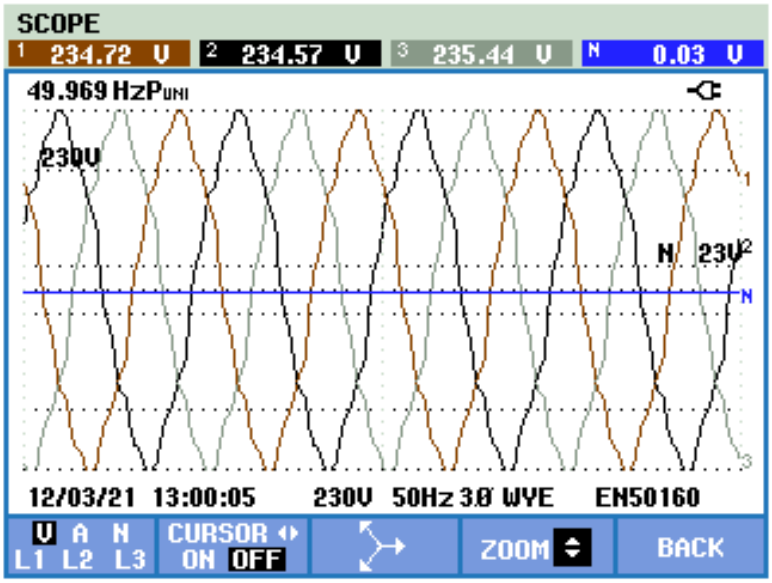
KUVA 20. Virtaosoittimet osoittavat väärään suuntaan



KUVA 21. Virtaosoittimet näyttävät oikeaan suuntaan

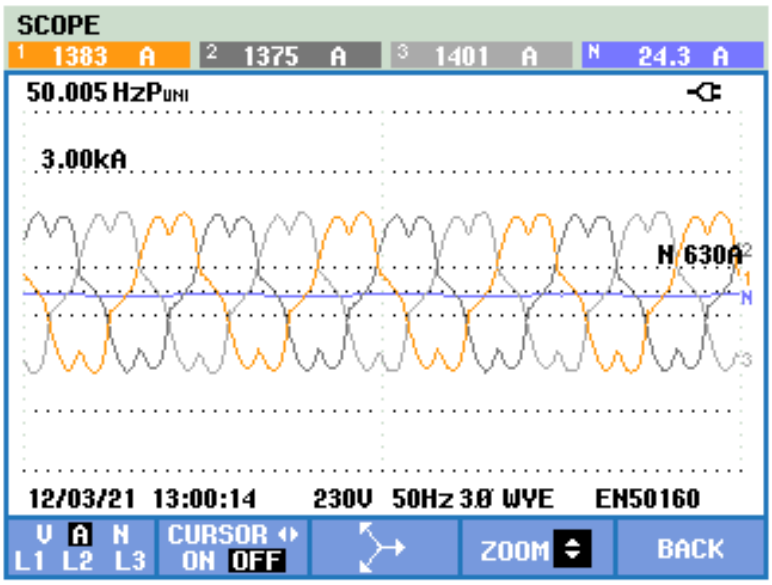
Seuraavaksi palataan Scope-näkymään, josta nähdään jännitteen sekä virran aaltomuodot. Kun kuormassa on käytännössä pelkkää resistiivistä kuormitusta, ovat sekä jännitteen että virran aaltomuodot ideaalisen siniaallon muotoisia. Kuvat molemmista näkymistä on hyvä tallentaa tässä vaiheessa Save screen- painikkeella, jolloin kuvat yhdistyvät mittausdataan tietokoneelle siirrettäessä.

Kuvassa (22) näkyy keskuksen P20 jännitteen aaltomuoto, joka on selvästi tavanomaiseen siniaaltoon verrattuna terävämmän ja epäsymmetrisen muotoista. Se viittaa siihen, että verkon kuormituksessa on säröytymistä aiheuttavia yliaaltoja.



KUVA 22. Keskuksessa P20 jännitteiden aaltomuodossa säröytymää

Kuvassa (23) virran aaltomuoto on pahasti leikkautunutta ja vääristynyttä yliaaltopitoisen kuorman seurauksena. Keskuksen P20 koko kuormitus tulee käytännössä taajuusmuuttajakuormasta.



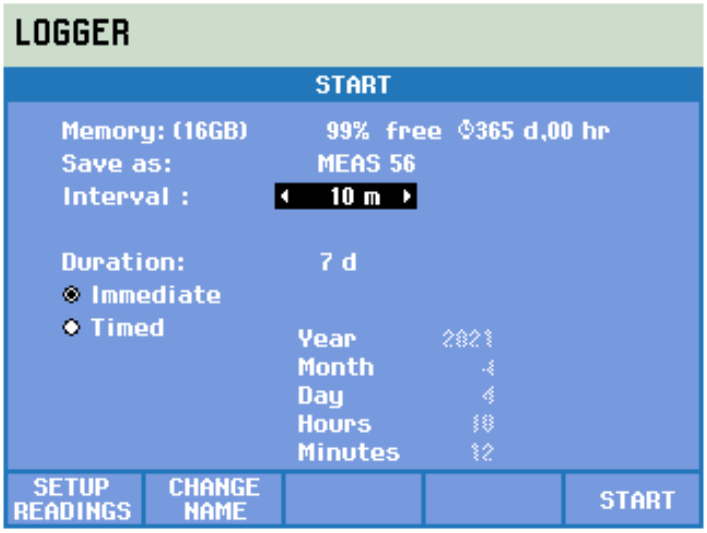
KUVA 23. Keskuksen P20 säröytynyt virran aaltomuoto

Analysaattorin Logger-työkalulla mittausvalikosta valitaan halutut mittaustulokset tilanteesta riippuen. Tässä mittauksessa mitattiin tehot, virrat, jännitteet, tehokertoimet, välkyntä, symmetria, taajuudet, signaalijännitteet, sekä yliaallot 40 harmoniseen yliaaltoon asti. Yliaallot mitattiin niin korkeaan arvoon asti, että saatiin standardin mukainen mittaus ja realistinen kuva kokonaissäröarvoista ja yliaalloista.

Nykyiset mittarit sisältävät reilusti muistia ja datan käsittely on ohjelmallisesti helppoa. Varsinkin jos ei tarkemmin tiedetä, mitä ongelmia verkossa on ja mitä sieltä haetaan, mittari on monesti yksinkertaisinta jättää mittaamaan käytännössä kaikki arvot, joita on mahdollista mitata. Huono puoli tässä on se, että tiedostokoko saattaa kasvaa tarpeettoman suureksi. Varsinkin tiheämmällä tallennusvälillä ja jännitepiikkien, transienttien ja käynnistyspiikkien havaitseminen tarvitsee tiheän näytteenottotaajuuden. Suuri tiedoston koko puolestaan aiheuttaa ongelmia, jos dataa halutaan jakaa esimerkiksi laitevalmistajalle tai asiakkaalle.

Mittauksen tallennusväli ja mitattavan ajan pituus valitaan viimeisinä ennen tallennuksen aloitusta (kuva 24). Tässä vaiheessa mittari kertoo, kuinka kauan kyseistä datamäärää on mahdollista tallentaa. Kun tässä tapauksessa halutaan

pääasiassa mitata kompensoinnin tarvetta ja yliaaltojen määrää, mittauksen pituudeksi valitaan 7 vuorokautta ja tallennusväliksi 10 minuuttia.



KUVA 24. Mittarin tallennusvälin ja ajan valinta

Kun mittaus käynnistetään, mittari alkaa tallentamaan trendikäyrälle mittaustuloksia. Mittauksen alusta odotetaan muutaman tallennusvälin verran, jotta varmistetaan, että tallennus lähtee käyntiin kuten kuuluu ja asetellut arvot ovat oikein. Kun mittauksen kestoksi on määritelty esimerkiksi 7 vuorokautta, mittari pysäyttää mittauksen automaattisesti kyseisen ajan kuluttua.

8 MITTAUSTULOKSET

Tulokset on poimittu mittaustuloksista Fluke Power Log -ohjelmalla ja datasta koostettiin keskuskohtaisesti taulukot. Tuloksissa on korostettu punaisella värillä standardivaatimusten ja suositusten ylitykset. Tässä esimerkkinä on mittaustulokset keskuksesta P20 (taulukko 7). Muiden keskusten mittaustulokset ovat liitteinä (liitteet 4 ja 5).

TAULUKKO 7. Mittaustulokset keskuksesta P20

	Jännitesärö		**Virtasärö**	
Järjestysluku	Vaadittu arvo	Mitattu arvo	Suositeltu arvo	Mitattu arvo
3	< 5 %	0,3 %	< 7 %	2,4 %
5	< 6 %	7,1 %	< 7 %	35,8 %
7	< 5 %	4,4 %	< 7 %	9,4 %
9	< 1,5 %	0,2 %	< 7 %	0,9 %
11	< 3,5 %	3,3 %	< 7 %	5,9 %
13	< 3 %	2,8 %	< 3,5 %	3,2 %
THD	< 8 %	8,9 %	< 8 %	37,8 %
Pätöteho ja loisteho				
	Pätöteho kW	Loisteho kVAr		
Maksimiarvo	633,9	234,0		
Jännitteen vaihtelu				
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo		
95 % välillä	± 10 %	2,0 %		
Hyvä laatu	± 4 %	2,2 %		
Keskiarvo	± 2,5 %	1,4 %		
Normaalilaatu	± 10 %			
Jännitteen symmetria				
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo		
95% ajasta	± 2 %	0,3 %		
	Taajuus			
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo		
99,5% ajasta	± 1 %	0,1 %		
Aina	+4 % / -6 %	0,0 %		
	Cos φ	**PF**		
95% ajasta	0,98	0,93		
Keskiarvo	0.975	0,928		
	Välkyntä Plt			
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo		
95 % välillä	≤ 0,74	0,15		
Hyvä laatu	≤ 0,74	0,18		
Normaalilaatu	≤ 1			

9 TULOSTEN KÄSITTELY SEKÄ RATKAISUT

Kompensointitarpeen määrittelyyn ja mitoitukseen on olemassa useita erilaisia laskutapoja ja mitoitusperiaatteita. Ne toimivat yleensä varmimmin vielä suunnitteluasteella olevissa kohteissa. Ongelmana voi olla, ettei kaikkia tarvittavia tietoja sähköverkosta ole saatavilla ja näin mitoitukseen saattaa jäädä epätarkkuutta.

Tämän työn mittaukset tehtiin jo olemassa oleviin laitteistoihin, eikä asiakkaalla ollut tiedossa ainakaan lähitulevaisuudessa suurempia laitemuutoksia tai laiteinvestointeja. Näin laitemitoituksissa käytetään suoraan saatuihin mittaustuloksiin perustuvia arvoja.

Asiakkaan sekä verkkoyhtiön edustajan kanssa palaverissa määriteltiin, että suurin sallittu loistehon ilmaisosuus on 16 % tuntikohtaisesta maksimipätötehon huippuarvosta.

Näin laskutettavan loistehon määrä saadaan kaavalla 2.

$$Q_L = Q_M - 0{,}16\ x\ P_M \qquad \textit{KAAVA 2}$$

Q_L = laskutettavan loistehon määrä

Q_M = loistehon mitattu huippuarvo

0,16 = ilmaisosuuden määrä prosentteina

P_M = pätötehon mitattu huippuarvo

(16)

Tätä 16 %:n ilmaisosuutta on käytetty suunniteltaessa kompensointipariston tehoa. Koska verkossa liikkuu myös paljon yliaaltoja, suodatinlaitteiden mitoituksessa on oltu yhteydessä myös laitetoimittajaan. Laitevalmistajalla on käytössään laskenta- ja mitoitusohjelmat, joilla laitteiden vaikutus verkon koko tilanteeseen tulee huomioitua.

Kaikista mittaustuloksista on huomioitava yliaaltojännitteet sekä virrat. Niitä tarkastellessa huomataan, että varsinkin 5. yliaaltovirta näkyy todella voimakkaasti jokaisen keskuksen vaikutusalueella. Kun estokelapariston kuristimien viritystaajuudeksi valitaan 189 Hz, saadaan paras suodatusteho myös 5. yliaaltovirralle. Yliaaltovirtojen arvioiduksi alenemaksi valitaan 25 % luvussa 3.3. esitetyn mukaisesti.

Yliaaltovirtojen arvioitu suodatustarve saadaan kaavalla 3.

$$I_{suod.} = I_{yliaalto} - \left(25\ \% * I_{yliaalto}\ /100\right) \qquad \textit{KAAVA 3}$$

$I_{suod.}$ = suodatettavan virran määrä

$I_{yliaalto}$ = mitattu yliaaltovirta

$25\ \%$ = arvoitu suodatusteho

Tarvittava yliaaltosuodattimen kapasiteetti saadaan tehon kaavalla 4.

$$Q_t = \sqrt{3} * U * I \qquad \textit{KAAVA 4}$$

$Q_t =$ tarvittava suodatusteho

$U =$ käyttöjännite

$I =$ suodatettavan yliaaltovirran määrä

9.1 Vetyperoksiditehdas 1 Pääkeskus P18

Mittaustuloksista nähdään (liite 4), että sähkön laatu on hyvin tasaista.

Jännitteen vaihtelu täyttää standardissa määritellyn hyvän laadun. Symmetria on myös erittäin tasainen, taajuusvaihtelua ei ole ollenkaan. Välkyntää on myös ainoastaan yksi seitsemäsosa standardin määrittelemästä hyvästä laadusta.

Loistehoa on piikkeinä 300 kVAr ja huippukulutus keskiarvona tunnin jaksossa on noin 266 kVAr. Verkosta otettava suurin huippupätöteho on 876 kW, jolloin loistehon laskutettava osuus Q_L lasketaan kaavalla 2.

$$Q_L = 266\ kVAr - 0{,}16\ X\ 876\ kW = n.125\ kVAr$$

Tämä 125 kVAr on siis ilmaisosuuden ylimenevä määrä, joka pitää saada kompensointilaitteella poistettua verkosta.

Verkossa on paljon 5. yliaallon virtasäröä, joka johtuu suuresta yliaaltovirran määrästä (taulukko 8). Virtasärö ylittää suositusarvon melkein kolminkertaisesti.

Myös 7. aallon virtasärö on koholla mutta jää alle suosituksen mukaisen enimmäismäärän. Virtasärö aiheuttaa jännitesärön kohoamista, mutta jännitesärö jää kuitenkin standarditason vaatiman rajan alle.

TAULUKKO 8. Yliaaltojen jännitteet ja virrat keskuksessa P18

	Yliaaltojännitteet max		**Yliaaltovirrat max**	
Järjestysluku	L1, L2 tai L3	N	L1, L2 tai L3	N
3	0,61 V	0 V	14,8 A	12,5 A
5	11,7 V	0 V	234 A	17,5 A
7	5,6 V	0 V	62 A	8,7 A
9	0,4 V	0 V	5,3 A	5,9 A
11	6,1 V	0 V	41,6 A	4,8 A
13	4,6 V	0 V	31,9 A	2,8 A

Koska suurin osa kuormasta koostuu yliaaltoja tuottavasta kuormasta, estokelaparisto on ainoa mahdollinen passiivinen ratkaisu. 5. kertaluvun yliaaltovirtojen määrä on niin huomattava, että sitä on suodatettava pois omalla laitteella.

5. yliaallon esiintymisen vuoksi estokelojen viritystaajuudeksi valitaan 189 Hz, näin saadaan samalla laitteella suodatettua 5. yliaaltoa pois mahdollisimman tehokkaasti. Kun oletetaan estokelapariston pudottavan 5. yliaaltovirtoja 25 %, yliaaltovirtojen ollessa 234 A, suodatettava tarve saadaan kaavalla 3.

$$234\ A - (25\ \% * 234\ A\ /100) = n.175\ A$$

Tämän perusteella 5.yliaallon suodatinpariston koko saadaan kaavalla 4.

$$Q_{tarve} = \sqrt{3} * 400\ V * 175\ A = n.121\ kVAr$$

Lopputulos tehtaan VP1 osalta on seuraava:

Asennetaan sähköpääkeskukseen P18 estokelaparisto, jonka viritystaajuus on 189 Hz ja kompensointiteho 125 kVAr.

Lisäksi asennetaan erillinen 5. yliaallon suodatin, jonka viritystaajuus on 250 Hz ja kompensointiteho 121 kVAr.

9.2 Vetyperoksiditehdas 2 A Pääkeskus P19

Pääkeskuksen P19 sähköverkon tila mittauksissa (liite 5) on myös todella hyvä jännitteen tasaisuuden, taajuuden sekä symmetrian kannalta.

5. yliaallon jännitesärö on lähes standardilaadun ylärajalla ja virtasärö ylittää ohjearvot 2,5-kertaisesti. 11. sekä 13. yliaalto menevät jännitesärön osalta standardin määräämistä arvoista yli. Yliaaltojen määrä näkyy suoraan kokonaisjännitesärössä U_{THD}, joka on lähes standardilaadun ylärajalla, mutta vielä kuitenkin rajoissa.

Loistehon hetkelliset kulutuspiikit ovat maksimissaan 439 kVAr ja tunnin keskiarvon maksimikulutus on noin 320 kVAr. Pätötehon huippuarvo on noin 978 kW. Näin laskutettavaksi osuudeksi saadaan kaavalla 2.

$$Q_L = 320 - 0{,}16 * 978) = n.165\ kVAr$$

Tämä 165 kVAr ilmaisosuuden ylimenevä määrä siis pitää saada kompensointilaitteella poistettua verkosta.

Kuten edellisessäkin tapauksessa, kuormituksen takia valitaan estokelaparisto. Myös tässä VP2A laitteistossa 5. yliaaltovirtojen määrä on niin huomattava, että on asennettava lisäksi oma yliaaltosuodatin.

Kun estokelaparisto pudottaa yliaaltovirtoja 25 % ja virrat ovat mittaustuloksissa (taulukko 9) 250,4 A, suodatettava tarve saadaan kaavalla 3.

$$250{,}4\ A - (25\ \% * 250{,}4\ A\ /100) = n.189\ A$$

Tämän perusteella 5. yliaallon suodatinlaitteen teho saadaan kaavalla 4.

$$Q_{tarve} = \sqrt{3} * 400\ V * 175\ A = n.131\ kVAr$$

TAULUKKO 9. Yliaaltojen jännitteet ja virrat keskuksessa P19

	Yliaaltojännitteet max		**Yliaaltovirrat max**	
Järjestysluku	L1, L2 tai L3	N	L1, L2 tai L3	N
3	0,49 V	0 V	18,9 A	17,7 A
5	12,3 V	0 V	250,4 A	8,6 A
7	6,7 V	0 V	82,7 A	12,4 A
9	0,6 V	0 V	6,8 A	6,0 A
11	8,7 V	0 V	64,4 A	11,0 A
13	7,3 V	0 V	31,7 A	14,8 A

Lopputulos tehtaan VP2A osalta on seuraava:

Asennetaan sähköpääkeskukseen P19 estokelaparisto, jonka viritystaajuus on 189 Hz ja kompensointiteho 165 kVAr.

Lisäksi asennetaan erillinen 5. yliaallon suodatin, jonka viritystaajuus on 250 Hz ja kompensointiteho 131 kVAr.

9.3 Vetyperoksiditehdas 2 B Pääkeskus P20

Viimeinen mitatuista keskuksista on P20. Mittausdatan mukaan sähköverkon jännite on vakaa. Symmetria ja taajuus ovat tasaiset kuten muissakin mitatuissa kohteissa.

Loistehoa on vähemmän, mutta sähköverkossa on muihin keskuksiin verrattuna enemmän yliaaltoja. Yliaaltojen suuri määrä näkyy suoraan kokonaisjännitesärössä U_{THD}, joka ylittää standardissa annetun 8 % maksimitason. Myös 5. yliaallon jännitesärön määrä ylittää standarditason ja 7. yliaallon jännitesärö on lähellä ylärajaa. Myös 11. ja 13. yliaaltojännite- sekä virtasäröt ovat ylärajalla, mutta jäävät hieman sen alle.

Virtasärössä 5. yliaaltojen määrä ylittää suositusarvot yli viisinkertaisesti. Myös 7. yliaallon määrä on yli suositustason ja virran kokonaissärö I_{THD}, on lähes viisinkertainen, mitatun arvon ollessa 37,8 %. Yläraja on 8 %.

Loistehon kulutus on noin 130 kVAr tunnin keskiarvon maksimina ja pätötehon huippu 634 kW. Laskutettavan osuuden määrä saadaan kaavalla 2.

$$Q_L = 130\ kVAR - 0{,}16\ X\ 634\ kW = n.29\ kVAr$$

Tarvittava pariston kapasiteetti olisi 29 kVAr. Koska yliaaltojen määrä on korkea, suodatukseen pitää käyttää ainakin 5. yliaallon suodatinta.

Kun lasketaan oletuksella, että estokelaparisto pudottaa 5. yliaallon virtoja 25 % ja virrat ovat mittaustuloksissa (taulukko 10) 250,2 A, saadaan suodatettava tarve kaavalla 3.

$$250{,}2\ A - (25\ \% * 250{,}2\ A\ /100) = n.188\ A$$

Tämän perusteella 5. yliaallon suodatinlaitteen teho saadaan kaavalla 4.

$$Q_{tarve} = \sqrt{3} * 400\ V * 188\ A = n.130\ kVAr$$

TAULUKKO 10. Yliaaltojännitteet ja virrat P20

	Yliaaltojännitteet max		**Yliaaltovirrat max**	
Järjestysluku	L1, L2 tai L3	N	L1, L2 tai L3	N
3	0,7V	0 V	16,4 A	12,4 A
5	16,6 V	0 V	250,2 A	4,6 A
7	10,4 V	0 V	34,3 A	3,1 A
9	0,4 V	0 V	7,6 A	3,0 A
11	7,6 V	0 V	48,2 A	3,3 A
13	6,1 V	0 V	26,9 A	1,3 A

Lopputulos tehtaan VP2B osalta on seuraava:

Asennetaan sähköpääkeskukseen P20 estokelaparisto, jonka viritystaajuus on 189 Hz ja kompensointiteho 29 kVAr.

Lisäksi asennetaan erillinen 5. yliaallon suodatin, jonka viritystaajuus on 250 Hz ja kompensointiteho 130 kVAr.

Laiteasennusten jälkeen on tärkeä tehdä analysointimittaus verkolle uudelleen, että nähdään laitteiden vaikutus 11. ja 13. yliaaltoihin.

10 POHDINTA

Työssä käytiin läpi sähkön laatuun liittyviä, standardeissa ja suosituksissa rajattuja laatutekijöitä. Mielestäni laatutekijöiden ydinkohdat tulivat esiin kohtuullisen tiiviisti ja havainnollisesti.

Itse käytännön mittaaminen onnistui hyvin useiden vuosien kokemuksella, mutta vasta työn edetessä huomasin, että standardin mukaan mittaustuloksiin tulee ottaa huomioon kaikki yliaallot 40. harmoniseen yliaaltoon asti. Ensimmäiset mittaukset otettiin 11. aaltoon asti, joten tehtiin lisämittaukset, jotta saatiin kaikki tarvittavat tulokset mukaan mittausdataan. Tällä on merkitystä THD-arvoihin, jotka ovat merkittävässä asemassa kompensoinnin tarvetta ja yliaaltoja arvioidessa.

Viikon mittauksella ja 10 minuutin tallennuskeskiarvolla saadaan hyvin kartoitettua sähköverkon tapahtumat liittyen jännitteen laatuun. Äkillisiin jännitekuoppiin ja transientteihin ei saada luotettavia tuloksia, niitä varten pitäisi tehdä mittaus tarkemmalla 10 s näytteenottotaajuudella. Toisessa lyhyemmässä mittauksessa, jossa selvitettiin 11. ja 13. yliaallon osuutta, näkyi tapahtumia jännitetasoissa. Ilmeisesti jännitetasojen vaihtelun aiheuttivat isompien 6 kV moottoreiden käynnistymiset, joita käytiin analysoimassa tämän opinnäytetyön ulkopuolella. Ne eivät vaikuta kompensointitarpeisiin vaan aiheuttivat ongelmia taajuusmuuttajille kaasuasemalla.

Mittaustulosten käsittelyn kanssa oli yllättävän paljon haasteita. Fluken ohjelmistossa oli muutamissa kohdissa epäkohtia, jotka mielestäni johtuivat ohjelmistosta. Ongelmia oli esimerkiksi loistehon ja pätötehon summissa, joissa ohjelmisto näytti esimerkiksi tehojen yhteenlaskettuna summana pelkän vaiheen L1 arvoa. Myös yliaaltojännitteiden ja virtojen kanssa ohjelma näytti välillä arvoiksi voltteja ja ampeereita kuten kuuluu, mutta kun valinnoista otettiin pois kokonaissärö THD, osa yliaaltovirta-arvoista muuttui prosenteiksi. Näistä ongelmista olin yhteydessä Fluken tekniseen tukeen, he halusivat esimerkin mittausdatoista ja tarkennuksia ongelmista. Kun opinnäytetyö oli melkein valmis, sain vastaukset Fluken teknikolta Tanskasta. He ovat tutkineet ongelmia ja myönsivät, että vika on heidän ohjelmistossaan. Mielestäni tässä on hyvä esimerkki siitä, että vaikka

puhutaan kansainvälisen huippumittalaitevalmistajan tuotteista, on itse tiedettävä, mitä arvoja ollaan mittaamassa ja mitä arvojen pitäisi näyttää, eikä vain sokeasti luottaa ohjelmistoon.

Lopputulosten käsittelyssä saatiin järkeviltä vaikuttavia tuloksia. Vertailtaessa niitä laitevalmistajan ehdottamiin laitteisiin, huomattiin, että tehtaan VP1 keskuksen P18 kompensointilaite ja yliaaltosuodatin olivat aivan samanlaisia. Mutta P19 ja P20 keskuksissa oli huomattavat erot. Laitevalmistaja mitoitti P19 laitteet noin kolmasosan suuremmaksi. P20 kompensointilatteen mitoitus oli lähes nelinkertainen, kun taas 5. yliaallon suodatin oli hyvin lähellä omia laskelmiani. Laitetoimittajan kanssa keskustellessa selvisi, että yliaaltopitoinen sähköverkko kuormittaa kompensointilaitteiden paristoja ja estokeloja. Myös paristojen jännitetasoa on mitoituksessa jouduttu nostamaan yliaaltokuormituksen takia. Jos paristojen mitoitus on liian tarkka, siitä seuraa, että resistanssi kasvaa ja jännite nousee. Näistä syistä laitteet joudutaan mitoittamaan enemmän kokemusperäisen tiedon varassa. Laitetoimittaja oli samaa mieltä kanssani, että asennuksen jälkeen tulisi tehdä uudelleen analysointimittaus, jolla saadaan tieto asennettujen laitteiden vaikutuksesta yliaaltoihin, varsinkin 5., 11. ja 13. aaltojen määrään sekä siihen, saavutetaanko suositukset ja standardit täyttävä laatutaso.

Tämän työn edetessä olen saanut paljon lisätietoa sähköverkon analysoinnista ja huomannut, että käytännön tietotaitoa tästä asiasta sähkötekniikassa löytyy hyvin vähän. Tietyt toimijat ja laitevalmistajat ovat enemmänkin perehtyneet asiaan, mutta he eivät halua luovuttaa tietojaan muille, koska kyse on erityisosaamisesta, joka vaatii kokemusta, perehtymistä ja mitoitusohjelmistoja.

Työssä saatiin käytyä läpi tavoitteiden mukaiset asiat, lukuun ottamatta raporttipohjaa työnantajalle. Tämä oli siinä mielessä hyvä asia, että nyt ainakin minulla on tieto siitä, että kohteessa tehtävä mittaus on räätälöitävä sen mukaan, mitä parametrejä sähköverkosta halutaan nähdä, joten yksi yleinen raporttimalli ei oikein palvele tarkoitustaan. Huonoksi puoleksi on laskettava, että saadut tulokset erosivat kahden keskuksen osalta laitetoimittajan ehdottamista laitteista. Myöskään laitteita ei ehditty asentaa kohteisiin eikä saatu lopullista mittausdataa kerättyä ja liitettyä tämän opinnäytetyön tuloksiin.

LÄHTEET

1. Elovaara, Jarmo – Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot 1. Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Otatieto.

2. TTT-käsikirja 040 Sähkön laatu 2000-07. ABB.

3. Yliaallot ja kompensointi 2018. Sähköinfo. Sähkö ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.

4. SFS-EN 50160:2010 +A1:2015 +A2:2019 +A3:2019. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

5. ABB tekninen opas 6. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf. Hakupäivä 26.2.2021.

6. Fluke 435. Saatavissa: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umfin0100.pdf. Hakupäivä 20.11.2020.

7. ABB THF 3.yliaallon suodatinlaitteet. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/d78baaff8925a4aac2256d03003b9097/1SCC330002C1801.pdf Hakupäivä 24.1.2021.

8. ST kortti 52.15. 2016. Loistehon kompensointi alle 1000 V verkossa. Sähköinfo Oy.
9. Korpinen, Leena – Mikkola, Marko – Keikko, Tommi – Falck, Emil 2008. YLIAALTO-OPUS. Saatavissa: http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf . Hakupäivä 10.1.2021.
10. Areva. Saatavissa: https://www.sahkonumerot.fi/5705639/doc/technicalinfodoc/. Hakupäivä 27.2.2021.

11. ABB TTT-käsikirja 090 Loistehon kompensointi ja yliaallot. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/09_0_Loistehon%20kompensointi%20ja%20yliaallot.pdf. Hakupäivä 24.1.2021.

12. Pienjännitetuotteiden tuote-opas 2008. Nokia. Saatavissa: https://www.sahkonumerot.fi/5704616/doc/brochure/. Hakupäivä 28.2.2021.

13. Rogowskin mittausperiaate 2021. Phoenix contact. Saatavissa: https://www.phoenixcontact.com/online/portal/fi?1dmy&urile=wcm:path:/fifi/web/main/products/subcategory_pages/Current_transducers_AC_DC_P-14-08-01/414d3de8-b7bb-4acf-b875-70ad304af361/414d3de8-b7bb-4acf-b875-70ad304af361. Hakupäivä 24.2.2021.

14. Fluke i430 flexi. Saatavissa: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/i430flexiseng0300.pdf. Hakupäivä 9.12.2020.

15. SFS 6002:2015. Sähkötyöturvallisuus-standardi. Suomen Standardoimisliitto SFS.

16. Fluke i5s. Saatavissa: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/i5s_____iseng0000.pdf. Hakupäivä 14.2.2020.

LIITTEET

LIITE 1 Fluke 435-II mittausominaisuudet ja parametrit (3, s. 167-170)

LIITE 2 Fluke i430 flexi- mittapäiden tekniset tiedot (6, s. 6)

LIITE 3 Fluke i5s- tekniset tiedot (17, s. 1)

LIITE 4 Mittaustulokset keskuksesta P18

LIITE 5 Mittaustulokset keskuksesta P19

Fluke 435-II mittausominaisuudet ja parametrit (3, s. 167-170)

Overview of available measurements and measurements parameter list (English only)

Function	Unit	Description	Logger	V-A-Hz	Dips&Swells	Harmonics	Power & Energy	Energy Loss	Unbalance	Inrush	Monitor	Flicker	Transients	Power Wave	Mains Signaling
Volt															
VrmsY	V	V rms phase phase	x	x		x	x				x			x	
VrmsΔ	V	V rms phase neutral	x	x		x	x				x			x	
V pk	V	V peak	●	●											
V rms1/2	V	V rms 1/2 cycle	●		●					●	●	●	●		●
V-fund	V	V fundamental	●			●			●						
CF V		Crest Factor V	●	●											
Φ V(°)	°	Phase angle V	●			●			●						
%Over	%	Overdeviation	●												
%Under	%	Underdeviation	●												
Amp															
A rms	A	A rms	●	●		●	●	●			●			●	
A pk	A	A pk	●	●											
A rms1/2	A	A rms-1/2	●		●					●	●	●	●		●
A fund	A	A fund	●			●			●						
CF A		CF	●	●											
Φ A(°)	°	ΦA(°)	●			●			●						

Function	Unit	Description	Logger	V-A-Hz	Dips&Swells	Harmonics	Power & Energy	Energy Loss	Unbalance	Inrush	Monitor	Flicker	Transients	Power Wave	Mains Signaling
Power															
W	W	W full	•				•							•	
W fund	W	W fundamenta	•				•	•							
VA	VA	VA full	•				• c								
VA∑	VA	VA full classic	•				• C								
VA fund	VA	VA fundamenta	•				• c	•							
VA fund∑	VA	VA fund classic	•				• C								
VA harm	VA	VA harmonic	•				•	•							
VA unb	VA	VA unbalance	•				•	•							
var	VA	var	•				• c	•							
var∑	VA	var classic	•				• C								
PF		PF	•				• c								
PF∑		PF classic	•				• C								
DPF		DPF	•				• D C								
DPF∑		DPF classic	•				• D c								
Cos∂		Cos∂	•				• d c								
Cos∂∑		Cos ∂ Classic	•				• d C								
Eff		Efficiency factor	•				•								
Hpoll		Harmonic pollution factor	•												
W unb	W	Active Load unbalance	•												
Φ W unb (°)	°	Active load unbalance angle	•												
var unb	var	Reactive Load Unbalance	•												
Φ var unb (°)	°	Reactive load unbalance angle	•												
VA unb	VA	Total Load Unbalance	•												
Φ VA unb (°)	°	Total Load Unbalance angle	•												
L var unb	var	Inductive Load Unbalance	•												
Φ L var unbr (°)	°	Inductive load unbalance angle	•												
C 'var unb	var	Capacitive Load Unbalance	•												
Φ C var unb (°)	°	Capacitive load unbalance angle	•												
Energy															
Wh	Wh	Wh	•				•								
VAh	VAh	VAh	•				•								
varh	varh	varh	•				•								
Wh forw.	Wh	Wh forward	•				•								
Wh rev.	Wh	Wh reverse	•				•								
Energy Loss															
W R loss	W	Resistive loss due to active power	•					•							

Function	Unit	Description	Logger	V-A-Hz	Dips&Swells	Harmonics	Power & Energy	Energy Loss	Unbalance	Inrush	Monitor	Flicker	Transients	Power Wave	Mains Signaling
W var loss	VA	Resistive loss due to ractive power	•					•							
W Unb loss	VA	Loss due to unbalance power	•					•							
W Harm loss	VA	Loss due to harmonics power	•					•							
W An loss	A	Loss due to netrall current	•					•							
W Total loss	W	Total power loss	•					•							
cost R/h	$	Cost /hr due to active power loss	•					•							
cost var/h	$	Cost /hr due to reactive power loss	•					•							
cost unb/h	$	Cost /hr due to unbalance loss	•					•							
cost harm/h	$	Cost /hr due to harmonics loss	•					•							
cost An/h	$	Cost /hr due to netral current	•					•							
cost tot/y	$	Cost / year due to losses	•					•							
Wh R loss	Wh	Energy loss due resistance	•					•							
Wh varh loss	Wh	Energy loss due to	•					•							
Wh Unb loss	Wh	Energy loss due to unbalance	•					•							
Wh Harm loss	Wh	Energy loss due to harmonics	•					•							
Wh An loss	Wh	Energy loss due to netral currents	•					•							
Wh Total loss	Wh	Total energy loss	•					•							
cost R	$	Cost due to resistive loss activepower	•												
cost var	$	Cost due to resistive loss reactive power	•												
cost unb	$	Cost due to unbalance	•												
cost harm	$	Cost due to harmonics	•												
cost An	$	Cost due to metral currents	•												
cost tot	$	Total cost of energy loss	•												
Volt Harmonic															
Volt THD	%	THD %f, %r or rms (up to 40th or 50th)	•			•					•				
Volt DC	V	DC component %f, %r or rms	•			•					•				
Volt Hn	V	Harmonic n (n=1..50) %f, %r or rms	•			50					25				
Volt Φn	°	Phase angle n (n=1..50)	•												
Volt In	V	Interharmonic n (n=0..50) %f, %r or rms	•			30I									
Amp Harmonic															
Amp THD	%	THD %f, %r or rms (up to 40th or 50th)	•			•									
K-A		K factor Amp	•			•									
Amp A DC	A	DC component %f, %r or rms	•			•									
Amp Hn	A	Harmonic n (n=1..50) %f, %r or rms	•			50									
Amp Φn	°	Phase angle n (n=1..50)	•												
Amp In	A	Interharmonic n (n=0..50) %f, %r or rms	•			30I									
Watt Harmonic															
Watt THD	%	THD %f, %r or rms (up to 40th or 50th)	•			• i									

Function	Unit	Description	Logger	V-A-Hz	Dips&Swells	Harmonics	Power & Energy	Energy Loss	Unbalance	Inrush	Monitor	Flicker	Transients	Power Wave	Mains Signaling
K-W		K factor Watt	•			• i									
Watt DC	W	DC component %f, %r or rms	•			• i									
Watt Hn	W	Harmonic n (n=1..50) %f, %r or rms	•			30 i									
Watt Φn	°	Phase angle n (n=1..50)	•												
Frequency															
Hz	Hz	Hz	•	•		•			•			•	•	•	•
Hz 10s	Hz	Hz 10s	•								•				
Flicker															
Pst(1min)		Pst (1 minute)	•									•			
Pst		Pst (10 minutes)	•									•			
Plt		Plt (2 hr)	•								•	•			
Pinst		Instantaneous Flicker	•									•			
Unbalance															
unbal(%)	%	unbalance	•						•						
Vpos.	V	Positive sequence voltage	•												
Vneg.	V	Negative sequence voltage	•												
Vzero	V	Zero sequence voltage	•												
Apos.	A	Positive sequence current	•												
Aneg.	A	Negative sequence current	•												
Azero	A	Zero sequence current	•												
Mains Signaling															
Sig 1 %	%	Freq. 1 relative signaling voltage	•												•
V3s 1	V	Freq. 1 voltage, 3s average	•								•				•
Sig 2 %	%	Freq. 2 relative signaling voltage	•												•
V3s 2	V	Freq. 2 voltage, 3s average	•								•				•

x (wYe or Delta config)
c Power Classic Method OFF
C Power Classic Method ON
i Interharmonics OFF
I Interharmonics ON
D DPF
d Cos J

Fluke i430 flexi- mittapäiden tekniset tiedot (6, s. 6)

Electrical Specifications

Measuring range	0.5 A ac to 6000 A ac
Maximum non-destructive current	100 kA (50/60 Hz)
Output signal	86.6 mV at 1000 A/50 Hz (on 1 MΩ) 85.0 mV at 1000 A/50 Hz (on 50 kΩ)
Basic accuracy	±1 % of reading at 25 °C, 50 Hz with conductor placed at the center of the probe
Linearity	±0.2 % of reading at 10 % to 100 % of range
Noise	<1 mV rms at 10 Hz to 10 kHz
Additional errors: • temperature coefficient over operating temperature range -for 24 inch model -for 48 inch model • with position of conductor in the probe window (see Figure 1): Zone A Zone B Zone C • 0.5 to 30 A	 0.02 % of reading / °C (0.011 % / °F) 0.035 % of reading / °C (0.02 % / °F) ±0.5 % of reading ±1.0 % of reading ±2.0 % of reading ±1 count or 0.1 A (whichever is greater)
External magnetic field rejection in reference to external current	40 dB (with cable >100 mm from the head coupling and r-coil)
Phase shift (fundamental frequency)	<±1°
Bandwidth (-3 dB)	10 Hz to 10 kHz
Frequency derating	I x f ≤385 kA Hz

Fluke i5s- tekniset tiedot (17, s. 1)

Electrical Specifications

Reference Conditions: 23 ± 5 °C, 20 to 75 % RH; conductor centered in jaw opening; no DC component; no adjacent conductor.

Measurement Range: 10 mA to 6 A

Output: 400 mV/A

Accuracy (48 Hz to 65 Hz):
10 mA to 1 A 1% + 5 mA
1 A to 5 A 1%

Phase Shift (48 Hz to 65 Hz):
10 mA to 100 mA Unspecified
100 mA to 5 A 4 °

Crest Factor: ≤ 3, add 0.7 % to accuracy

Typical Bandwidth: 40 Hz to 5 kHz

Working Voltage: 600 V ac rms, in compliance with EN61010

Common Mode Voltage: 600 V ac rms from earth ground, in compliance with EN61010

Input Load Impedance (of host instrument): >1 M Ω in parallel with up to 47 pF

Maximum Non-destructive Current: 70 A

Duty Cycle: 0.01 A to 6 A continuous

Influence of Adjacent Conductor: ≤ 15 mA/A (@ 50/60 Hz)

Influence of Conductor Position in Jaw Opening: ±0.5 % of reading (@ 50/60 Hz)

Mittaustulokset keskuksesta P18

	Jännitesärö		Virtasärö	
Järjestysluku	Vaadittu arvo	Mitattu arvo	Suositeltu arvo	Mitattu arvo
3	< 5 %	0,2 %	< 7 %	1,2 %
5	< 6 %	4,7 %	< 7 %	19,2 %
7	< 5 %	2,3 %	< 7 %	5,9 %
9	< 1,5 %	0,2 %	< 7 %	0,5 %
11	< 3,5 %	2,6 %	< 7 %	3,2 %
13	< 3 %	2,0 %	< 3,5 %	2,9 %
THD	< 8 %	6,1 %	< 8 %	20,6 %

Pätöteho ja loisteho		
	Pätöteho kW	Loisteho kVAr
Maksimiarvo	876,0	300,0

Jännitteen vaihtelu		
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
95 % jaksoista	± 10 %	1,3 %
Hyvä laatu	± 4 %	1,5 %
Keskiarvo	± 2,5 %	0,7 %
Normaalilaatu	± 10 %	

Jännitteen symmetria		
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
95% ajasta	± 2 %	0,2

	Taajuus	
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
99,5% ajasta	± 1 %	0,0 %
Aina	+4 % / -6 %	0,0 %

	Cos φ	PF
95% ajasta	0,96	0,94
Keskiarvo	0,96	0,93

	Välkyntä Plt	
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
95 % välillä	≤ 0,74	0,16
Hyvä laatu	≤ 0,74	0,11
Normaalilaatu	≤ 1	

Mittaustulokset keskuksesta P19

	Jännitesärö		Virtasärö	
Järjestysluku	Vaadittu arvo	Mitattu arvo	Suositeltu arvo	Mitattu arvo
3	< 5 %	0,2 %	< 7 %	1,4 %
5	< 6 %	5,3 %	< 7 %	17,8 %
7	< 5 %	2,8 %	< 7 %	5,6 %
9	< 1,5 %	0,3 %	< 7 %	0,5 %
11	< 3,5 %	3,7 %	< 7 %	4,4 %
13	< 3 %	3,1 %	< 3,5 %	2,2 %
THD	< 8 %	7,5 %	< 8 %	19,2 %

Pätöteho ja loisteho		
	Pätöteho kW	Loisteho kVAr
Maksimiarvo	977,7	431,8

Jännitteen vaihtelu		
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
95 % välillä	± 10 %	2,0 %
Hyvä laatu	± 4 %	2,2 %
Keskiarvo	± 2,5 %	1,3 %
Normaalilaatu	± 10 %	

Jännitteen symmetria		
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
95% ajasta	± 2 %	0,2

	Taajuus	
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
99,5% ajasta	± 1 %	0,10 %
Aina	+4 % / -6 %	0,03 %

	Cos φ	PF
95% ajasta	0,96	0,94
Keskiarvo	0,96	0,935

	Välkyntä Plt	
	Vaadittu arvo	Mitattu arvo
95 % välillä	≤ 0,74	0,14
Hyvä laatu	≤ 0,74	0,18
Normaalilaatu	≤ 1	