



Kalle Heikkilä

Pienjänniteverkon loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

31.8.2021

Tiivistelmä

Tekijä:	Kalle Heikkilä
Otsikko:	Pienjänniteverkon loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus
Sivumäärä:	57 sivua
Aika:	31.8.2021
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Eero Kupila Työpaikkaohjaaja Tapio Saarijärvi

Insinööriyön tavoitteena oli selvittää loistehon kompensointia ja yliaaltoja sekä niiden vaikutusta pienjänniteverkkoon. Työssä käytiin läpi kirjallisuuteen tukeutuen kolmivaihesähkötekniikan tehojen teoriaa, sekä kompensointiin ja yliaaltoihin liittyviä asioita. Työ antaa selvennyksen miksi loistehoa kompensoidaan ja milloin se on ajankohtaista. Työssä käsiteltiin myös yliaaltoihin liittyviä ominaisuuksia ja näiden haittoja pienjänniteverkossa. Työssä selvennettiin, miten edellä mainittuihin asioihin voidaan vaikuttaa erilaisilla kompensointi- ja suodatinlaitteilla. Pienjänniteverkon ominaisuuksista, sekä laadusta huolehtimalla voidaan saada suuria taloudellisia säästöjä pitkällä tähtäimellä.

Aluksi selvennettiin ja avattiin kolmivaihesähkötekniikan peruselementtejä liittyen tehoihin ja niiden ominaisuuksiin. Loistehon kompensointia ymmärtääkseen täytyy olla perusymmärrys kolmivaihesähkötekniikan tehojen teoriaan. Sähkötekniikantehojen jälkeen avattiin kompensointiin ja yliaaltoihin liittyviä asioita.

Loistehon kompensointiin ja yliaaltoihin liittyviä ominaisuuksia sekä niihin liittyviä seikkoja selvennettiin tukeutuen kirjallisuuteen. Yliaaltojen ominaisuudet ja vaarat selitettiin tapauskohtaisesti. Loistehon kompensointiin sekä yliaaltojen suodattamiseen voidaan vaikuttaa useammalla erilaisella tavalla ja laitteella. Näitä laitteita ja niiden ominaisuuksia avattiin työssä.

Monimutkaiset laskutoimitukset jätettiin pois työstä kokonaan. Pääpainotus pidettiin teorianpuolella ja asioiden avaamisessa alaa tietävälle, sekä alaa opiskelevalle. Sähkönlaatuun liittyviä ilmiöitä on paljon ja työssä viitattiin SFS-EN 50160 -standardiin ja käytiin läpi sen sisältämiä rajoituksia ja viitearvoja.

Lopuksi käsiteltiin Fluke 430 II -sarjan mittalaitteen käyttöä ja sen ominaisuuksia. Työssä esitetyt mittaustulokset ovat Espoossa sijaitsevasta koulusta kesäloman ajalta. Näitä mittaustuloksia avattiin ja selostettiin tapauskohtaisesti. Verkkoanalysaattorin käyttöön liittyvät asiat ja mittaustuloksien tulkinta on tarkoitus jäädä Espoon Tila-palveluille ohjeistukseksi laitteen käyttöön. Työ selvittää pienjänniteverkkoon liittyviä laatuasioita, sekä loistehon kompensointiin ja yliaaltoihin liittyviä asioita. Mittalaitteen ominaisuuksiin perehtymällä, joita työssä selostettiin. Saa hyvät edellytykset mittalaitteen käyttöön sekä sen antamien tulosten ymmärtämiseen.

Avainsanat: loistehon kompensointi, Fluke 430 II -sarja, THD-pitoisuus, yliaallot

Abstract

Author: Heikkilä Kalle
Title: Low-voltage Network Reactive Power Compensation and Harmonic Waves
Number of Pages: 57 pages
Date: 31 August 2021
Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation Engineering
Professional Major: Electrical Power Engineering
Supervisors: Eero Kupila, Senior Lecturer
Tapio Saarijärvi, Workplace Instructor

The aim of the engineering work was to clarify the reactive power compensations and the impact they have on the low-voltage network. The work considered the literature-, on the theory of power in three-phase electric technology, as well as matters related to compensation and harmonic waves. The work provides a clarification of why reactive power is compensated and when it is necessary. The work also addressed properties related to harmonic waves and the disadvantages of these in the low-voltage network. The work clarified how the matters mentioned above can be affected by various compensating and filtering devices. In the long run, large financial savings can be made by taking care of the properties of the low voltage network, as well as quality.

At first the thesis clarifies and explains basic elements of three-phase electric technology related to the power and their properties. To understand the reactive power compensation, there must be a basic understanding of the power theory of three-phase electric power engineering. Later in the thesis, matters related to compensation and harmonic wave are explained.

Properties related to compensation and harmonic waves, as well as related issues, are clarified by reference to literature. The properties and dangers of the harmonic waves are explained on a case-by-case basis. Compensation of the reactive power, as well as filtering of the harmonic waves, can be affected by several different ways and devices. These devices and their features are explained in the work.

Complex calculations were left out from the thesis altogether. Focus was kept on the theory side and clarifying matters to someone who knows the field, as well as for those studying the field. Many phenomena related to electricity quality are handled and the SFS-EN 50160 standard is referred to and the limitations and benchmarks contained in it are explained.

Finally, the use of the Fluke 430 II series measuring device and its features are discussed. The measurement results presented in the work are from a school in Espoo during the summer holidays. These measurement results are explained on a case-by-case basis. Issues related to the use of the network analyzer and the explanations of the measurement results are intended to remain in Espoo Tila-palvelut as an instruction for the use of the device. The work clarifies quality issues related to the low voltage network, as well as matters related to reactive power compensation and harmonic waves. Explanations related to the measuring device will give a good understanding of the device and tools to use it.

Keywords: Fluke 430 II -series, compensation, harmonic (component), THD-concentration

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Vaihtosähkön tehot	2
2.1	Näennäisteho	2
2.2	Pätöteho	3
2.3	Loisteho	3
2.4	Kapasitiivinen ja induktiivinen loisteho	4
2.5	Tehokerroin ja tehokolmio	5
3	Yliaallot	6
3.1	Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot	7
3.2	Yliaaltojen haitat	7
3.2.1	Nollajohtimen kuormittuminen	8
3.2.2	Muita haittavaikutuksia	9
4	Loistehon kompensointi	10
4.1	Kompensointi yleisesti	11
4.1.1	Kompensoinnin tarve	13
4.1.2	Kompensoinnin toteutus	14
4.2	Kompensointilaitteisto	18
4.2.1	Kondensaattoriyksiköt	19
4.2.2	Rinnakkaiskondensaattoriparistot	19
4.2.3	Estokelaparistot	20
4.2.4	Yliaaltosuodatin	21
4.2.5	Kolmannen yliaallon suodatin	22
4.2.6	Tyristorihjattu kondensaattoriparisto	23
4.2.7	Aktiivisuodatin	23
5	Sähkönlaatu	24
5.1	Vaatimukset ja raja-arvot	24
5.2	Yliaallot standardissa	26
5.3	Virtarajat standardissa	26
5.4	Välkyntä	28
6	Sähkönlaatuanalysointilaitteen käyttö	29
6.1	Fluke 430 II -sarjan käyttö ja tulkinta	30

6.1.1	Jännitteet ja virrat	35
6.1.2	Kuopat ja ylijännitteet	35
6.1.3	Yliaallot	36
6.1.4	Tehot ja energia	36
6.1.5	Energiahävikin laskenta	37
6.1.6	Invertterin tehokkuus	38
6.1.7	Epäsymmetria	39
6.1.8	Käynnistysvirta	40
6.1.9	Välkyntä	41
6.1.10	Transienttijännitteet	42
6.1.11	Tehoaallot	42
6.1.12	Verkon signaalit	42
6.1.13	Sähkömoottorin analysointi	42
6.2	Mittaustuloksien tulkinta	44
7	Yhteenveto	50
	Lähteet	51

1 Johdanto

Työssä perehdytään pienjännitesähköverkon laatuun. Pienjänniteverkon laatuun liittyy olennaisesti loistehon määrä sekä jännite- ja virtasärojen osuus verkossa. Näihin liittymän haltija voi vaikuttaa käyttämällä erilaisia kompensointi- ja suodatusratkaisuja hyväksi. Työssä käsitellään loistehonkompensoinnin erilaisia vaihtoehtoja sekä syitä ja seurauksia liittyen kompensointiin. SFS-EN 50160 -standardi asettaa suosituksia ja raja-arvoja liittyen sähkön laatuun, joita myös käydään läpi työn aikana.

Työllä on tarkoitus avata sähkönlaatuun liittyviä asioita kompensoinnin näkökulmasta. Kompensointi ja yliaallot ovat merkittävä osa suurempien kiinteistöjen sähköjärjestelmää ja tämän työn tavoitteena on avata tuota kokonaisuutta ja auttaa ymmärtämään mitä se on ja miksi sitä tehdään.

Lopuksi käsitellään verkon mittaamiseen liittyviä asioita käyttäen Fluke 430 II -sarjan mittalaitetta ja tulkitaan mittaustuloksia. Fluke 430 II -sarjan mittarin käytöstä ja mittaustuloksien tulkinnasta jää ohjeistus Espoon kaupungin Tilapalvelutyksikölle.

Työ rajautuu lähinnä selventämään kompensoinnin tapoja ja tarkoitusta koskien kiinteistöjä. Työssä ei käydä läpi kompensoinnin mitoitus kiinteistöihin, eikä oteta kantaa jakeluverkonpuolella tapahtuviin kompensointiratkaisuihin. Opinnäytetyön aikana ei tehty suurempia laskutoimituksia liittyen aiheeseen, eikä niitä ole käyty tarkemmin läpi.

2 Vaihtosähkön tehot

Vaihtosähkötekniikassa tehojen selvittäminen ei ole yhtä virtaviivaista tasasähkötekniikkaan verrattuna. Tehojen selvittämiseen täytyy olla perusymmärrys eri tehojen ominaisuuksista ja siitä, millaisia vaikutuksia niillä on verkossa tapahtuviin ilmiöihin. Vaihtosähkön jännitteet ja virrat voidaan esittää lähtökohtaisesti sinimuotoisella signaalilla taajuuteen nähden, myös vaihtosähkötehot voidaan esittää samaa signaalikuviota käyttäen. Siinä missä yksivaiheisessa signaalissa esiintyy yksi siniaalto, niin kolmivaihesähkössä signaalia luodaan kolmella aallolla. Nämä kolme eri vaiheista aaltoa seuraavat lineaarisesti toisiaan, kun ensimmäinen aalto laskee huipulta alas, nousee toisen aallon huippu. Toisen aallon huipun laskiessa nousee jälleen kolmas aalto, kunnes ensimmäinen aalto nousee kolmannen jälkeen ja kierros alkaa alusta. Näiden aaltojen positiivisia ja negatiivisia huippuja kutsutaan amplitudeiksi. [1, s.143–156.]

Vaihtosähkön kolmea vaihetta voi ajatella kellotaululle siten, että asetetaan taululle kolme viisaria ja jokaisen viisarin välissä on 120°:n kulma, niin että yhteensä muodostuu 360°:n ympyrä. Viisareiden välissä oleva kulma ilmaisee vaiheiden välissä esiintyvää jännitteiden välistä vaihesiirtoa. Vaiheita kuormittamalla otetaan verkosta tehoa. [1, s.143–156.]

2.1 Näennäisteho

Vaihtosähkötehot voidaan jakaa kolmeen eri osa-alueeseen, jotka ovat näennäisteho, pätöteho ja loisteho. Loistehoa vaihtosähkössä aiheuttavat kapasitanssi ja induktanssi, ja nämä syntyvät jännitteen ja virran välisistä vaihe-eroista. Näennäisteho on lähtökohtaisesti vain laskennallinen suure eikä sillä ole fyysikaalista vastinetta. Näennäistehon laskukaavat 1 ja 2 ovat seuraavanlaisia:

$$S = \sqrt{3} * U_n * I \quad (1)$$

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

Kuten edellinen kaava osoittaa, niin näennäisteho on virran ja jännitteen tulo, ja se ei huomioi niiden välistä vaihe-eroa. Mikäli vaihe-ero ilmenee, on verkossa pätötehon

lisäksi myös loistehoa. Kompensoinnilla pyritään siihen, että jännite ja virta ovat samassa vaiheessa, jolloin näennäisteho ja pätöteho ovat yhtä suuret. [1, s.143–156.]

2.2 Pätöteho

Mikäli vaiheen jännitteen ja virran välissä esiintyy vaihe-eroa ja loistehoa muodostuu piirissä, niin näennäisteho on suurempi pätötehoa. Näennäistehon ja pätötehon eron selittää loistehon osuus. Pätötehon laskukaava 3 on:

$$P = \sqrt{3} * U_n * I * \cos\phi \quad (3)$$

Pätöteho on tehoa mitä kaikki laitteet kuluttavat ja samalla on sitä tehoa mitä energialaitokset laskuttavat asiakkailtaan. Pätöteho on laitteen tuottamaa hyötyä. Riippuen laitteesta se voi olla lämpöä, valoa tai mekaanista työtä. Pätöteho on työtä tekevä teho, jota laitteet hyödyntävät. Pätötehon suhdetta näennäistehoon kuvastaa tehokerroin. [1, s.143–156.]

2.3 Loisteho

Loistehon muodostuminen piirissä on joidenkin laitteiden toiminnan kannalta kriittistä. Esimerkiksi moottorit ja muuntajat tarvitsevat loistehoa pätötehon lisäksi toimiakseen. Pätöteho on laitteistossa työtä tekevä osuus, kun loisteho on välttämätöntä magneettikentän ylläpitämiseksi. Moottoreiden ja muuntajien lisäksi myös jotkin purkauslamput ja kondensaattorit tarvitsevat loistehoa toimintansa ylläpitämiseksi. Loisteho lasketaan kaavalla 4:

$$Q = \sqrt{3} * U_n * I * \sin\phi \quad (4)$$

Virran ja jännitteen välissä esiintyvä vaihe-ero muodostaa aina loistehoa. Vaihe-ero voi olla positiivista tai negatiivista, ja tämä aiheuttaa teholle negatiivisia arvoja, mikä selittää loistehoilmiön. [1, s.143–156.]

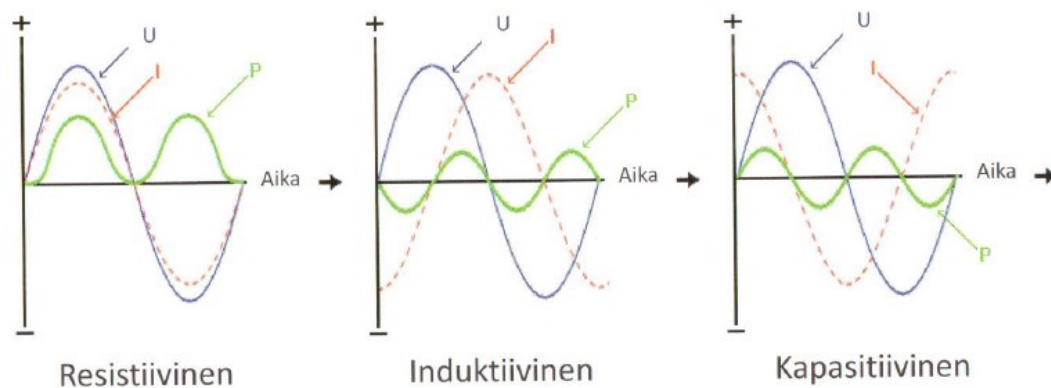
Mikäli loistehoa otetaan suoraan jakeluverkkoyhtiön siirtoverkosta pienentää se pätötehon osuutta verkon siirto kapasiteetista. Mikäli kuluttajat ottavat suuria määriä loistehoa verkosta, kasvattaa se johtojen ja muuntajien teho- ja energiahäviöitä. Tästä

syystä loisteho olisi optimaalista tuottaa mahdollisimman lähellä sitä tarvitsevia laitteita. [1, s.143–156.]

2.4 Kapasitiivinen ja induktiivinen loisteho

Loistehoa esiintyy myös sen ominaisuuksien mukaan kahdenlaista. Kapasitiivinen loisteho on aina ns. negatiivista loistehoa. Kapasitiivisen loistehon pätöteho on nolla, eli se ei kuluta lainkaan pätötehoa. Kapasitiivisen kuorman vaihesiirto jännitteen ja virran välissä on negatiivinen. Kapasitiivisella loisteholla virta on jännitettä edellä 90° . Virran ollessa jännitettä edellä tarkoitetaan, että piiri tuottaa loistehoa ja täten hidastaa jännitteen muutosta piirissä. [1, s.143–156.]

Induktiivinen loisteho verkossa on päinvastainen kapasitiiviseen loistehoon verrattuna. Vaihesiirtokulma on tällöin positiivinen, jolloin piiri ottaa loistehoa. Toisin kuin kapasitiivisessa loistehossa, jossa virta on jännitettä edellä, niin tässä virta on jännitettä jäljessä 90° . Induktiivisessa tilanteessa virran muutos on hidastunut, minkä myötä piiri ottaa loisteho verkosta (kuva 1).

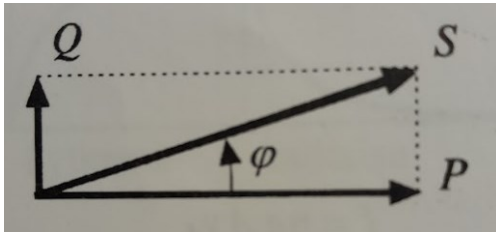


Kuva 1. Loistehon vaikutus siniaallon muotoon. Ensimmäisessä kuvassa on esitetty häviöttömän tehon käyrä, kun kahdessa jälkimmäisessä on loistehon induktiivinen ja kapasitiivinen käyrän muoto. [2, s. 18.]

Täysin resistiivinen kuorma ei tuota eikä vastaanota loistehoa ollenkaan. Verkossa kapasitiivista kuormaa muodostaa erilaiset kondensaattorit ja kaapelit. Kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon vaihesiirtoero on 180° eli päinvastainen toisistaan. Vastakkaiset elementit piirissä voidaan oikealla kompensoinnin mitoituksella kompensoida pois. Siniaallon nousun aikana kapasitanssi ja induktanssi varaavat itseensä energiaa ja purkavat sen siniaallon laskun aikana. Loistehon yksikössä (VAR) kirjain r tulee sanasta reaktiivinen. [3, s. 2; 1, s.143–156.]

2.5 Tehokerroin ja tehokolmio

Vaihtosähkön tehot voidaan sijoittaa suorakulmaiseen kolmioon siten, että jokainen tehoyksikkö vastaa yhtä kolmion sivua. Pätöteho ja loisteho vastaavat kateetteja ja näennäisteho vastaa hypotenuusaa (kuva 2). Tehojen suhteet toisiinsa lasketaan samalla periaatteella, kuin trigonometriassa suorakulmaisen kolmion kaavaa 5 käyttäen seuraavasti.



Kuva 2. Tehokolmio missä (P) on päteho, (Q) on loisteho, (S) on näennäisteho ja (φ) on vaihekulma. [4, s.126.]

$$\cos \phi = \frac{P}{S}, \sin \phi = \frac{Q}{S}, \tan \phi = \frac{Q}{P} \quad (5)$$

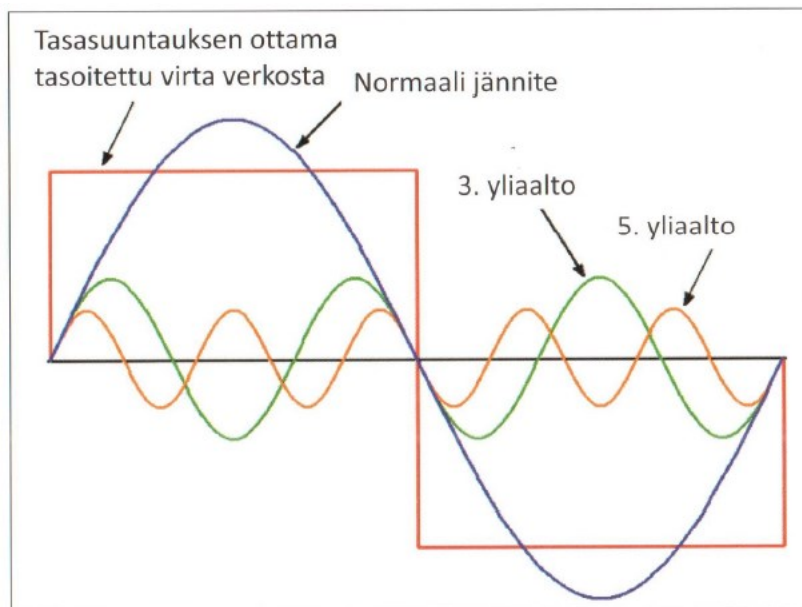
Aiemmin mainittuun kellotauluesimerkkiin viitaten niin jännitteen ja virran osoittimien väliin muodostuvan kulman suuruus määrittelee vaihesiirron kulman. Suurimmillaan oleva vaihesiirtokerroin voi olla yksi, kun jännite ja virta ovat samenvaiheisia, eli silloin kun virran ja jännitteen välinen kulma on nolla. Mikäli kulmaa syntyy virran ja jännitteen väliin, niin tehokerroin on pienimmillään nolla ja silloin vaihesiirtokulma osoittimien välissä on 90° joko jännitettä edellä tai jäljessä. Mikäli tehokerroin on suurempi kuin nolla, on kuorma induktiivinen. Tehokerroinkulman ollessa pienempi kuin nolla, on kuorma kapasitiivista. [3, s. 3; 1, s.143–156.]

Vaihtosähkön tehoja laskettaessa täytyy virran ja jännitteen tulon lisäksi huomioida tehokerroin. Tehokertoimen lisääminen tehon laskukaavoihin tehdään samalla periaatteella kuin kolmion trigonometrisissa kaavoissa. [3, s. 3; 1, s.143–156.]

3 Yliaallot

Lähtökohtaisesti verkosta tulee 50 Hz:n taajuisia siniaaltoja vaihtosähköä. Erilaiset kuormituslaitteet, joita kytketään verkkoon, vaikuttavat tähän puhtaaseen siniaaltokuvioon. Yliaaltoja tuottavia kuormituksia ovat mm. puolijohdetekniikkaa hyödyntävät suuntaajat, hakkuriteholähteet, pehmokäynnistimet, UPS-laitteet, purkaus- ja loisteputkivalaisimet, valokaariuunit, muuntajat ja generaattorit. Yleisimpiä yliaaltoja, joita verkossa esiintyy, ovat kolmas ja viides yliaalto. Kolmas yliaalto on nollaan summautumisen takia haitallisin. [6, s. 26–30; 7, s. 2.]

Säröytyessään vaihtojännite ja vaihtovirta eivät muodosta tasaista siniaaltoa, vaan siniaalto muistuttaa enemmän sahalaitaista kuviota. Yliaaltoja esiintyy tasaisilla- ja epätasaisillakuormituksilla. Yleensä kolmas yliaalto ja sen kerrannaisvaikutukset syntyvät yksivaiheisissa kuormituksissa, kun muut yliaallot syntyvät kolmivaihekuormituksissa. Säröytymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa perustaajuisesta sinikäyrästä poikkeavat virrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä. Verkon tähtipisteeseen osuessa yliaallot kumoutuvat, paitsi kolmas yliaalto, joka summautuu nollajohtimeen ja jatkaa kulku sitä reittiä. Taajuuden kasvu näkyy yliaalloissa pienentäen niiden amplitudia (kuva 3). [6, s. 26–30; 7, s. 2.]



Kuva 3. Tasasuuntauksen aiheuttamat yliaallot. Tasasuuntauksen saavuttamiseksi pilkotaan vaihtosähkö kantiaalloksi. Vaihtosähkö siis pilkotaan pienempiin osiin mistä muodostetaan tasasuuntaus. Tasasuuntaus ottaa siniaallosta ja sen taajuudesta poikkeavaa virtaa ja kantiaallon aikaan saamiseksi tarvitaan kolmatta ja viidettä yliaaltoa. [2, s. 20.]

Yksi tärkeä määrite yliaaltojen tulkinnassa on kokonaissärökerroin (THD: total harmonic distortion). Tämä saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 6,

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_2^n F_n^2}}{F_1} \quad (6)$$

jossa F_n on kertaluvun n harmoninen yliaaltokomponentti ja F_1 on perustaajuuden tehollisarvo. THD kuvaa signaalin säröytyneen osan määrää suhteessa perustaajuuteen. Se antaa hyvän käsityksen perustaajuisen signaalin laadusta. [6, s. 26–30; 7, s. 2.]

3.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot

Perustaajuuden säröytyessä esiintyy siinä silloin perustaajuuteen nähden harmonisia ja epäharmonisia yliaalloja. Harmoniset yliaallot eroavat epäharmonisista siten, että ne ovat perustaajuuteen nähden kokonaislukumonikertoja. Kokonaislukumonikertoimella tarkoitetaan, että perustaajuuden ollessa 50 Hz on silloin toinen yliaalto 100 Hz ja kolmas yliaalto on 150 Hz. Harmonisen yliaallon järjestysluku saadaan selville jakamalla yliaallontaajuus perusaallontaajuudella. Siniaalto harmonisilla yliaalloilla on säännöllinen, mutta se poikkeaa siniaallosta. [6, s. 26–30; 7, s. 2.]

Epäharmoniset yliaallot eivät ole kokonaislukumonikertoja. Epäharmonisten yliaaltojen taajuudet ovat epämääräisellä luvulla kerrottuja. Jolloin niiden taajuuksien arvot jäävät perustaajuuden ja harmonisen yliaallon taajuuden suuruuksien väliin. Epäharmonisten yliaaltojen siniaaltokäyrämuodot ovat epäsäännöllisiä. [6, s. 26–30; 7, s. 2.]

3.2 Yliaaltojen haitat

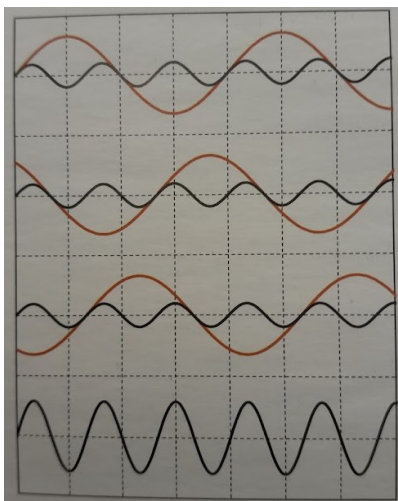
Yliaaltoja tuottavien laitteiden aiheuttamat häiriöt vaikuttavat synty paikkansa lisäksi ongelmia myös muualle verkkoon. Yliaaltojen haitat heijastuvat pidemmälle verkkoon riippuen verkon vahvuudesta. Heikossa verkossa, jossa esiintyy paljon yliaalloja, näkyy niiden vaikutus koko sähköjakelupiirissä laadun heikkenemisenä. Yliaaltojen aiheuttamia haittoja ovat mm. häviöiden kasvu sähköverkossa ja sähkökäyttäjien laitteissa, erilaisten laitteiden kuormitettavuuden alentuminen, mittareiden virhenäyttämiä, automatiikkalaitteissa olevien suojalaitteiden virhetoiminnot sekä ylikuormittuminen joissakin laitteissa. [6, s. 26–30; 7, s. 2.]

Ylikuormittumisen myötä laiterikkojen riski kasvaa. Kuluttajan laitteistossa useimmiten esiintyvät häiriöt ovat kuluttajan omien laitteiden luomien yliaaltojen aiheuttamia häiriöitä. Yliaaltojen voimakkuus on suoraan verrannollinen haittojen laatuun ja määrään. [6, s. 26–30; 7, s. 2.]

Yksi yliaaltojen haitallinen ominaisuus on resonanssin muodostuminen verkkoon. Resonanssi nopeuttaa eristeiden vanhenemista, kasvattaa siirtohäviöitä ja aiheuttaa ylimääräistä lämpenemistä. Mikäli resonanssi-ilmiö syntyy yliaaltopitoisessa verkossa ja osuu samalle taajuudelle yliaallon taajuuden kanssa, voi kyseisen yliaallon yliaaltovirta tai -jännite kasvaa moninkertaiseksi. Resonanssi syntyy piirissä, kun kondensaattorin kapasitanssi ja verkon induktanssi muodostavat rinnakkaisresonanssipiirin, jossa impedanssi on mahdollisimman pieni. [6, s. 26–30; 7, s. 2; 9, s. 22–23.]

3.2.1 Nollajohtimen kuormittuminen

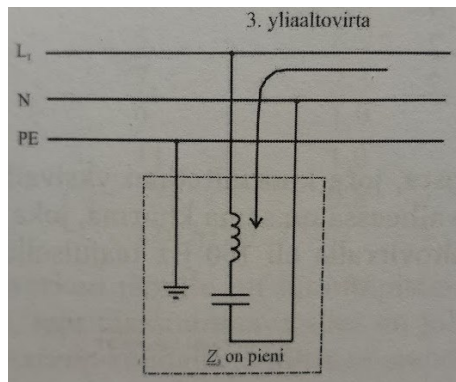
Kolmannen yliaallon summautuminen nollajohtimeen tapahtuu lähinnä yksivaiheisella ja epälineaarilla kuormituksella ja vaatii vielä kolmella jaollisen ja parittoman yliaallon (kuva 4). Perustaajuisella lineaarisella kolmivaihekuormituksella ei esiinny nollajohtimen ylikuormitusta. Kiinteistöissä, joissa ei ole käytetty viisijohdinjärjestelmää asennuksissa ja kiinteistön verkossa, voi pahimmillaan esiintyä tilanteita, joissa nollajohtimeen summautuneet yliaaltovirrat pääsevät nollauksien kautta kulkeutumaan kiinteistön runkorakenteisiin. [6, s. 26–33; 7, s. 2.]



Kuva 4. Kolmen vaiheen kolmannet yliaaltovirrat ovat saman vaiheisia ja summautuvat nollajohtimeen, kertoen sen amplitudin kolminkertaiseksi, vaiheiden virtoihin nähden. [6, s. 33.]

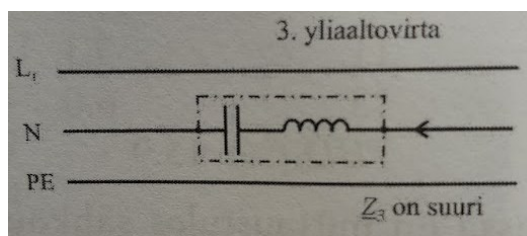
Edellä mainittu ongelma syntyy perustaajuisen virran ja yliaaltovirran yhteisvaikutuksesta, mutta nämä ongelmat ovat vähentyneet huomattavasti viisijohdinjärjestelmään siirtymisen myötä. [6, s. 26–33; 7, s. 2.]

Taajuuden kasvaessa kasvaa johtimien impedanssi eli vaihtovirtavastus, mikä heikentää johtimen kuormitettavuutta. Sarjaresonanssipiirillä voidaan kahdella tapaa suodattaa kolmatta yliaaltoa. Ensimmäisessä luodaan pieni-impedanssinen kulkureitti suodinpiirin kautta (kuva 5). [8, s. 238.]



Kuva 5. Pieni-impedanssinen kulkureitti nollajohtimelle suodattamaan kolmatta yliaaltovirtaa. [8, s. 238.]

Kolmatta yliaaltovirtaa voidaan suodattaa myös asentamalla nollajohtimeen sarjaresonanssisuodatin, jonka impedanssi mitoitetaan sen kokoiseksi, että se estää virran kulkemisen nollajohtimessa (kuva 6).



Kuva 6. Nollajohtimen impedanssin kasvattaminen. [8, s. 238.]

3.2.2 Muita haittavaikutuksia

Yliaaltojen vaikutus moottoreissa voi esiintyä muutamallakin tavalla. Ominaisuudet, jotka näkyvät moottorikäytössä, ovat verrannollisia yliaallon järjestyslukuun. Yliaallot muodostavat magneettikentän moottorissa ja tämä magneettikenttä aiheuttaa

ylikuormittumista, lämpenemistä, eritaajuisia momenteja sekä ääni- ja värähtelyilmiöitä. Edellä mainitut häiriöt vaikuttavat lähinnä pyörimiseen taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Harmonisten yliaaltojen luokitusmalli symmetrisellä kolmivaihekuormalla järjestysluvun mukaan. [6, s. 35.]

Harm. (n)	peruaalto	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus Hz	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Kiertosuunta	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Jos taulukossa esiintyvä harmoninen yliaalto on järjestysluvun mukaan positiivinen kasvattaa se pyörimisnopeutta aiheuttaen lisälämpenemistä. Negatiivinen kenttä jarruttaa moottoria jatkuvasti ja aiheuttaa lisähäviöitä. Kiertosuunnan ollessa taulukon mukaan 0 eivät yliaallot vaikuta pyörimiseen, mutta summautuvat nolajohtimeen. [6, s.33–36; 9, s. 6.]

4 Loistehon kompensointi

Loistehonkompensoinnin tärkeys ja merkitys on sähkösiirron ja sähkön laadun kannalta hyvin merkittävä osa sähkölaitteistoa. Sähkönsiirtoverkoissa pääasiassa siirretään näennäistehoa kuluttajille. Kun siirrettävässä näennäistehossa ei esiinny häviöitä, on näennäisteho yhtenäinen pätötehon kanssa. Tilanteessa, jossa näennäistehon osuudesta osa on pätöteho ja osa on loistehoa, siirtokapasiteetti kärsii. Sähkölaitteisto pääasiassa kuitenkin käyttää vain pätötehoa. [5, s.1; 6, s. 79.]

Loisteho on joillekin laitteille niiden toiminnan kannalta välttämätöntä. Moottoreissa ja muuntajissa loistehoa tarvitaan magneettikentän ylläpitämiseksi, joka on laitteen toimintaan perustuva peruselementti. Laitteistossa varsinaisen työn tekee pätöteho, mutta laite vaatii toimiakseen myös loistehoa. Pätöteho ja perustaajuinen loisteho muodostavat yhdessä näennäistehon. [5, s.1; 6, s. 79.]

Sähköverkon mitoitus tehdään aina näennäistehon mukaan eli näennäistehon vaatiman kokonaisvirran mukaan. Kokonaisvirta näennäistehoon nähden on suurempi, kuin pelkkä pätötehon mitoitus olisi, jos verkossa on paljon loistehokuormaa. Edellä mainitussa tilanteessa loistehon osuuden takia kytkinlaitteistot ja muut verkon

komponentit joutuvat suuremman virtaräskituksen alle, mikä lisää niiden lämpenemistä. [5, s.1; 6, s. 79.]

Mikäli verkkoyhtiöt laskuttavat kuluttajaa suurilla loistehomaksuilla, on selvää, että kuluttajalla on paljon laitteistoa, joka käyttää tai vaatii paljon loistehoa toimiakseen. Loistehon tarve tulisi aina lähtökohtaisesti selvittää sähkösuunnittelu vaiheessa verkkoyhtiön kanssa yhteistyössä. Jakelumuuntajilla voi olla useita erilaisiakompensointiratkaisuja, ja tämän takia on suositeltavaa ottaa verkkoyhtiö mukaan jo suunnitteluvaiheessa. [5, s.1; 6, s. 79.]

Kompensoinnin toteuttamisen kannalta paras ratkaisu olisi, jos kompensointi pystyttäisiin tuottamaan mahdollisimman lähellä loistehoa tarvitsevaa laitteistoa. Paikallisella kompensoinnilla tarkoitetaan, että loisteho tuotetaan mahdollisimman lähellä laitetta tai sen tuotto on jo toteutettu laitteeseen asennetulla kondensaattorilla. Näin ei kuitenkaan tilanne aina ole, koska nämä ratkaisut päätyvät kestävämmän kalliisiin ratkaisuihin. Taloudellisempi ratkaisu on yleensä, että kompensointi toteutetaan yhdellä suurella kompensointiyksiköllä kuluttajan pääkeskuksen rinnalla. [5, s.1; 6, s. 79.]

Laittekohtaista kompensointia esiintyy hyvin vähän, mikä tarkoittaa, ettei suuria erillisiä kompensointiyksiköjä ole asennettu kiinteistöön. Laitteistot, jotka eivät tuota loistehoa verkkoon ovat mm. elektronisilla liitäntälaitteistolla varustetut valaisimet ja taajuusmuuttajakäytöt. Nykyisin yliaaltoja tuottavia laitteistoja kytketään verkkoon enenevässä määrin mikä vuoksi kompensointi on hyvä toteuttaa lähes aina estokelapari- ja taajuusmuuttajakäytöillä. [5, s.1; 6, s. 79.]

4.1 Kompensointi yleisesti

Kompensoinnin tarve tulee ilmi verkkoyhtiön laskuttaessa ilmaisen loistehon ylittävistä osuudesta. Tämä loistehomaksu on yleensä verrattain suurempi kuin pelkästä pätötehosta maksettu osuus. Verkosta otetun ilmaisen loistehon osuus vaihtelee paikkakunta- ja verkkoyhtiökohtaisesti, ja niiden välillä voi olla suuriakin eroja. Laskuttamalla kuluttajaa suuremmalla hinnoittelulla verrattuna pätötehomaksuihin siirtävät verkkoyhtiöt kompensointivastuuta kuluttajille. [3, s. 3; 5, s. 2.]

Suurien laitteiden käyttöihin tehdyt muutokset vaikuttavat verkostoon, kuten sulakekokojen muutokset, kaapeleiden poikkipinta-alojen muutokset tai laitteiden

käynnistysvirroissa tapahtuvat muutokset. Muutoksien myötä täytyy ottaa huomioon kompensointi ja yliaaltojen suodattaminen. Jotkin elektroniset laitteet aiheuttavat harmonisia ja epäharmonisia yliaaltoja verkkoon, mikä voi olla hyvin haitallista tai jopa hengenvaarallisia. [3, s. 3; 5, s. 2.]

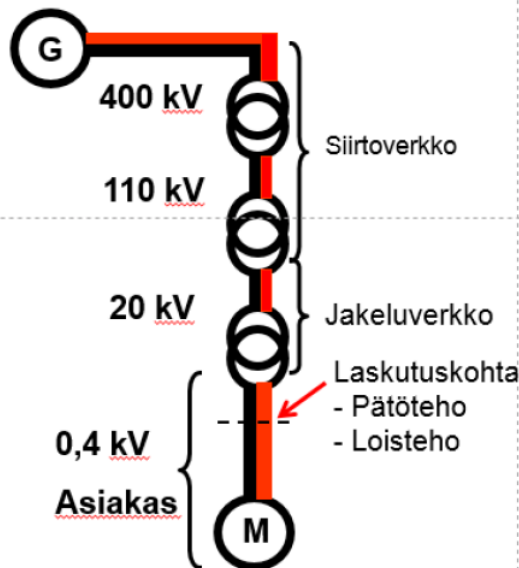
Kompensoinnilla pystytään pienentämään myös jännitteen alenemaa. Jännitteen alenema on verrannollinen tehojen vaatimaan virtaan. Kompensoinnilla voidaan vaikuttaa loistehon vaatimaan virtaan, jolloin jännitteen alenema pienenee suhteessa loistehovirtaan. Suuremmilla kaapelien poikkipinta-aloilla merkitys kasvaa entisestään. Jännitteen alenema on laskettavissa kaavalla 7:

$$U_n = RI_p + XI_q \quad (7)$$

U_n on jännitteen alenema, R on koko verkon resistanssi, X on koko verkon reaktanssi, I_p on pätötehovirta, I_q on loistehovirta.

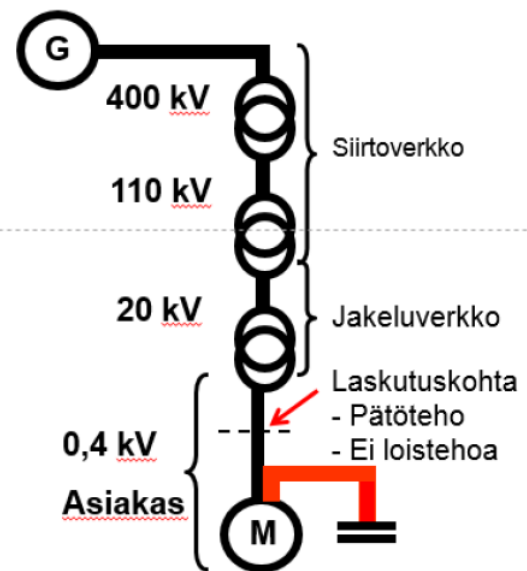
Periaatekuva kompensoimattomasta ja kompensoidusta verkosta

Loisteho tuotetaan voimalaitoksella. Pätösiirto-kapasiteetti pienenee koko siirtoverkossa. Syntyy häviöitä ja lisäkustannuksia



Ei kompensointia

Loisteho tuotetaan siellä missä sitä tarvitaan. Pätösiirto-kapasiteetti kasvaa. Kustannussäästö



Kompensoitu

Kuva 7. Kompensoitu- ja kompensoimatonverkko. [3, s 3.]

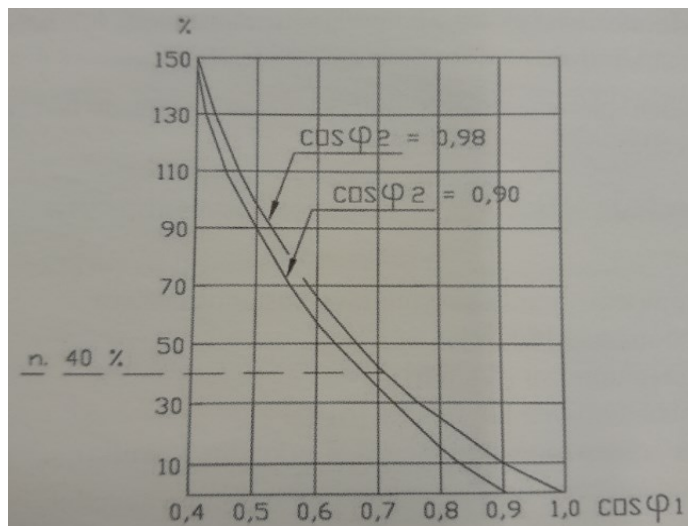
Kuvassa 7 on havainnollistettu tilanne missä loisteho siirretään suoraan voimalaitokselta asti. Loistehon siirtäminen siirtoverkkoa pitkin vie osan päätötehon siirtokapasiteetista ja synnyttää häviöitä verkkoon. Toisessa tilanteessa, jossa loisteho tuotetaan mahdollisimman lähellä sitä tarvitsevaa laitteistoa, ei se ole rasite siirtoverkolle. Tämä on suoraan verrannollinen verkon häviöihin, kustannuksiin kuluttajalle sekä jakeluverkkoyhtiölle. [3, s. 3; 5, s. 2.]

4.1.1 Kompensoinnin tarve

Kompensoinnin tarve voidaan selvittää kahdella tavalla, joista toinen on laskeminen ja toinen on mittaaminen. Laskemiseen pitää selvittää kaikkien verkkoon liitettyjen laitteiden ominaisuudet, mikä osoittautuu usein hyvin työlääksi.

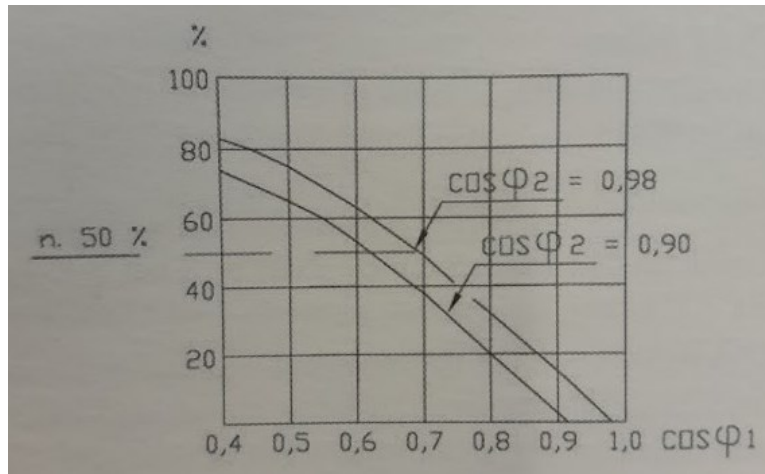
Sähkönlaatuanalysointilla voidaan kuitenkin tehdä tarkkoja mittauksia lyhyemmille ajanjaksoille, tai tarkempaa tietoa tarvittaessa mittaus voidaan suorittaa viikon pituisella jaksolla. Loistehon osuuden mittaaminen olisi hyvä suorittaa ajankohtana, jolloin loistehon kulutus on suurimmillaan. [6, s. 79–81; 5, s. 2.]

Oikein mitoitetulla kompensoinnilla voidaan saavuttaa suuriakin säästöjä siirtoverkon häviöissä, kuten myös kuluttajan loistehomaksuissa. Verkkoyhtiön siirtokapasiteetti pysyy päätötehopainotteisena, kun loistehon osuus pienenee ja laitteiston virtarasitus vähenee (kuva 8).



Kuva 8. Prosentuaalinen kasvu verkon siirtokyvyyssä, kun tehokerroin kasvaa kompensoinnin myötä $\cos \varphi_1$:stä $\cos \varphi_2$:een. [6, s. 81.]

Virtarasiituksen pieneneminen vähentää myös laitteistossa muodostuvaa ylimääräistä lämmön tuottoa (kuva 9).



Kuva 9. Kompensoinnilla saavutettava häviöiden pieneneminen. [6, s. 81.]

Virran määrä, jota kuorma tarvitsee, lasketaan näennäistehosta, jolloin kokonaisvirtaan vaikuttaa myös loisteho. Näennäistehon sisältämä loisteho tarvitsee oman osuutensa virrasta, mutta pätötehon osuus ei pienene. Tämä tarkoittaa käytännössä, että loistehon osuuden kasvaessa kasvaa kokonaisvirran osuus. Virran laskukaavasta 8 voi havaita näennäistehon osuuden olevan pääelementti virran määrään nähden.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (8)$$

Kun virrasta poistetaan loistehon osuus kompensoinnin ansiosta, verkossa pätötehon siirtokapasiteetti kasvaa. Siirtokyvyn parantuessa kasvaa myös tehokerroin. [6, s. 79–81; 5, s. 2.]

4.1.2 Kompensoinnin toteutus

Ennen kompensointia olisi suotavaa olla yhteydessä verkkoyhtiöön mahdollisten sekakompensointien välttämiseksi. Verkkoyhtiö on ainoa taho, josta saadaan tietoa tarvittavista kompensointiratkaisuista sekä jo olemassa olevista kompensoinneista jakelumuuntajan alueella. Mikäli verkkoon kytketään estokelaparistoja ja rinnakkaisparistoja samanaikaisesti aiheuttavat nämä yhdessä suuren resonanssitaajuuden riskin. Resonanssitaajuuden riskin minimoimiseksi täytyy huomioida, että alkuperäisen resonanssitaajuuden yläpuolelle ei pääse muodostumaan

yliaaltoja. Sekakompensoinnin välttämiseksi täytyy käyttää kompensoinnin suunniteluun, mittaamiseen ja verkon ominaisuuksien selvittämiseen aikaa. [6, s. 78.]

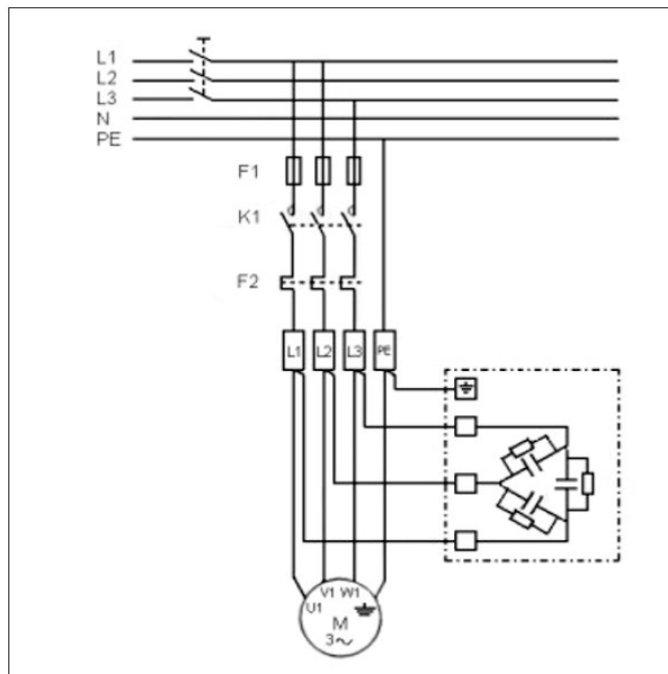
Sähkösiirtoverkossa tapahtuvia kompensointitratkaisuja hoitavat ja hallinnoivat verkkoyhtiöt. Kuluttajan kompensointilaitteistoilla ei kompensoida siirtoverkkoja, vaan ainoastaan kuluttajan omaa loistehon tarvetta. Kuluttaja voi toteuttaa omaa kompensointia muutamallakin erilaisella tavalla. [6, s. 78.]

Laitekohtainen kompensointi

Laitekohtaisella kompensoinnilla tarkoitetaan, että laitteistoon on jo valmistusvaiheessa asennettu kondensaattori. Laitekohtaista kompensointia esiintyy lähinnä purkausvalaisimissa ja epätahtimoottoreissa. Paikallinen kompensointi on tapa, jota käytetään, kun loistehon osuus ei muutu vaan on laitteistossa vakio. Käytännössä kondensaattori kytkeytyy aina päälle laitteen kanssa, jolloin ei tarvita erillisiä ohjauksia. [5, s. 4; 6 s. 87–88.]

Valaisimissa, joissa yliaaltojen tuottaminen on ominaisuus, ei käytetä laitekohtaista kompensointia resonanssin ja yliaaltojen vaaran vuoksi. Jotkin purkausvalaisimet ovat itsessään yliaaltojen lähteitä. Valaisinryhmiä ja niiden kompensointia suunniteltaessa tulee kaapeleiden ja sulakkeiden mitoituksessa ottaa huomioon, että ikääntyessään valaisinkohtainen kondensaattori menettää kapasitanssiaan ja lopuksi hajoaa, jolloin järjestelmän virtasietokyky täytyy mitoittaa ilman kompensointia. [5, s. 4; 6 s. 87–88.]

Moottoreilla, joilla on käytetty laitekohtaista kompensointia (kuva 10), täytyy ottaa huomioon, ettei tehokerroin nouse liian korkealle. Tehokertoimen noustessa yli 0,98 moottorin tyhjäkäyntitehosta voi ylikompensointi aiheuttaa moottorin itseherätyksen. Moottorin itseherätys tarkoittaa sitä, että moottorin sammuttamisen jälkeen moottori jatkaa käyntiä ja täten moottori muuttuu generaattoriksi. [5, s. 4; 6 s. 87–88.]



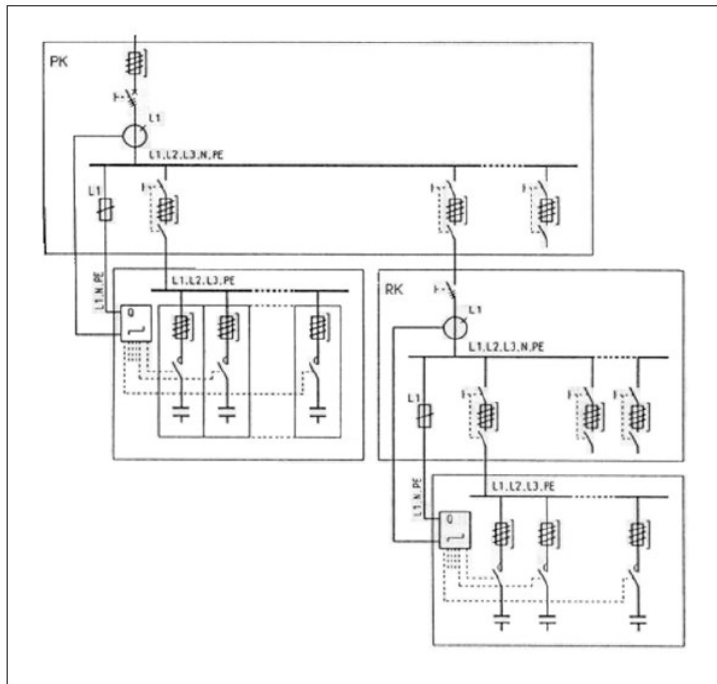
Kuva 10. Laitokohtaisessa kompensoinnissa moottorille on asennettu kondensaattori. [5, s. 4.]

Laitokohtaisessa kompensoinnissa saatetaan päästä tilanteeseen missä ei tarvita kompensointia pääkeskuksessa ollenkaan. Edellä mainittu tilanne saattaa kuitenkin olla kalliimpi vaihtoehto. Kompensoinnin ollessa keskitetty saatetaan ottaa tällöin riski käyttökeskeytyksille mahdollisissa häiriötilanteissa. Laitokohtaisen ja/tai ryhmäkompensoinnin avulla voidaan häviösäästöjen lisäksi saada investointisäästöjä pienjänniteverkon mitoituksessa. [5, s. 4; 6 s. 87–88.]

Keskitetty kompensointi

Keskitetty kompensointi toteutetaan yleensä keskusten yhteydessä, joko pääkeskuksella tai joissain tilanteissa ryhmäkeskuksella (kuva 11). Kompensointiin käytettävä laitteisto sisältää riittävän määrän rinnakkaisparistoja tuottamaan tarvittavan määrän loistehoa. Estokelaparistot ovat korvaamassa rinnakkaisparistoja niiden monipuolisen käytön takia. Estokelaparistoilla voidaan kompensoinnin lisäksi estää yliaaltojen muodostuminen, mikä ei onnistu pelkillä paristoilla. Loistehosäätimillä varustetut paristot kytkevät paristossa eri portaita käyttöön ja pois kuorman vaatimuksien mukaan. Laitteiston nopea reagoiminen kuorman vaatimukseen mahdollistaa tehokertoimen pysyvyyden halutussa arvossa. Erittäin nopeisiin kompensointiratkaisuihin voidaan käyttää tyristöreilla toteutettua

kompensointilaitteista. Tämä mahdollistaa kompensoinnin kytkennän jopa yhden verkkojakson aikana. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi hitsauskoneet. [5, s. 5; 6, s. 86.]



Kuva 11. Keskitetyn kompensointilaitteiston periaatekytkentä. [5, s. 5.]

Rinnakkaisparisto voi verkon kanssa yhdessä muodostaa yliaaltoja, jotka voivat vahvistua jopa 20-kertaisiksi. Mikäli verkossa esiintyy merkittävästi yliaaltoja, voidaan silloin käyttää myös yliaaltosuodattimia. Suodattimella tai estokelalla voidaan suodattaa yliaaltojen vahvistuminen kokonaan pois. Keskitetyssä kompensoinnissa mitoitus on suhteellinen osuus pätötehon huipusta, mikä on yleensä noin puolet. Valaistuksen ollessa kompensoitu voidaan pariston koko pienentää noin 35–45 % pätötehuipusta. [5, s. 5; 6, s. 86.]

Ryhmäkompensointi

Ryhmäkompensointi on yleensä toteutettu kolmivaiheisissa kontaktoriohjaatuissa valaisinryhmissä tai moottorikäytöissä, joissa on paljon laitteita, joita ohjataan samanaikaisesti. Valaisinryhmissä, joissa on toteutettu ryhmäkompensointi, tulisi ajan saatossa päästä eroon niiden hankalan ylläpidon vuoksi. Ryhmäkompensoinnissa kompensointi asennetaan yleensä ryhmäjohtoon tai ryhmäkeskukseen. Tällä pyritään pienentämään jännitehäviöitä ja kasvattamaan pätötehuippua, etenkin pitkillä

kaapelointimatkoilla. Mikäli ryhmäkompensointia käytetään, pitää huomioida, että kaapeleissa voi kondensaattorin jälkeen kulkea suurempia virtoja kuin mitä ennen kondensaattoria on. [5, s. 5; 6, s. 88.]

Moottorikäytössä ryhmäkompensointia voidaan käyttää, mikäli useampaa oikosulkumoottoria käytetään samanaikaisesti. Moottorikohtainen kompensointiteho lasketaan jokaiselle koneelle erikseen ja lopuksi summataan yhteen käyttäen mahdollista tasauskerrointa. Moottoreille tarkoitettua kompensointilaitetta voidaan ohjata samalla ohjauksella kuin moottoreita. Tämä mahdollistaa kompensoinnin ja moottoreiden yhteiskäytön yhtäaikaisesti. [5, s. 5; 6, s. 88.]

4.2 Kompensointilaitteisto

Kompensoinnissa käytettävät ratkaisut vaihtelevat muun muassa kompensoitavien laitteiden ja verkon yliaaltopitoisuuden mukaan. Yksi tapa valita kompensointilaitteisto on tehdä verkolle yliaaltoanalyysi, jossa verkko kuvataan sijaiskytkennällä. Se koostuu komponentteja kuvaavista resistansseista, induktansseista ja kapasitansseista. Kokonaiskuva säröistä verkon eri osista saadaan, kun suoritetaan kaikille yliaaltotaajuuksille virranjakolaskenta. Edellä mainitun simuloinnin tekee yleensä sille suunniteltu tietokoneohjelma. [6, s. 46.]

4.2.1 Kondensaattoriyksiköt

Pienjänniteyksikkö on yleensä kolmivaiheinen ja koostuu useasta rinnankytketystä elementistä, jotka on sisäisesti kytketty tähteen tai kolmioon. Yksikkökoot vaihtelevat tyypillisesti 3,25–75 kvar ja nimellisjännitteet ovat tyypillisesti 525 V tai 890 V.

Laitteistossa käytetään yleensä sisäisiä purkausvastuksia. Nämä mahdollistavat jännitteen nopean purkautumisen noin 50 volttiin häiritsemättä laitteiston toimintaa (kuva 12). [6, s. 47.]



Kuva 12. Pienjännitekondensaattoriyksikkö. [6, s. 47.]

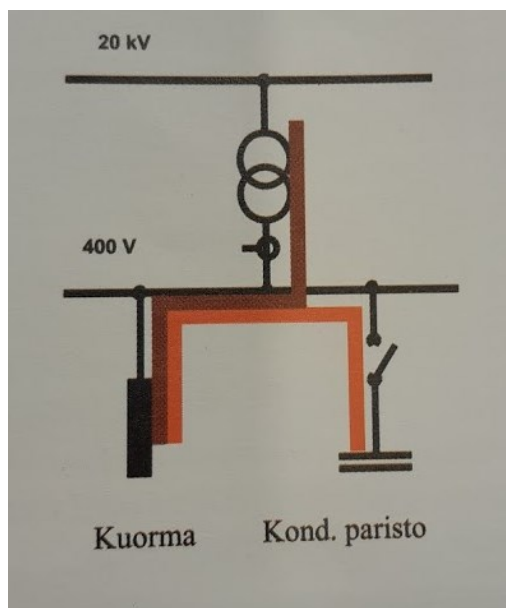
4.2.2 Rinnakkaiskondensaattoriparistot

Rinnakkaiskondensaattoriparistoja on kahta eri ryhmää, kiinteät ja säädettävät paristot. Mikäli kompensointitarve on yksikäsitteinen ja muuttumaton voidaan silloin käyttää kiinteätä paristoa, joka on kytketty suoraan verkkoon, eikä sisällä mitään säätimiä.

Automatiikkaparistot ovat säädettäviä kompensointiyksiköitä, jotka sisältävät portaallisen säätimen. Automatiikkaparistojen loistehosäätimet kytkevät kuorman vaatimuksien ja asetettujen havahtumisrajojen ja parametrien mukaan kondensaattoriportaita verkkoon päälle ja pois. Automatiikkaa on hyvä käyttää suurempiin käyttöihin, esim. pääkeskukseen (kuva 13).

Rinnakkaiskondensaattoriparisto sopii hyvin tilanteisiin, joissa ei esiinny merkittävästä yliaaltoja. Yliaaltojen takia estokelaparistojen käyttö on yleistynyt suuresti.

Estokelaparistolla voidaan varmistua, ettei resonanssia pääse muodostumaan yliaaltovirtojen kanssa. [6, s. 48–49.]

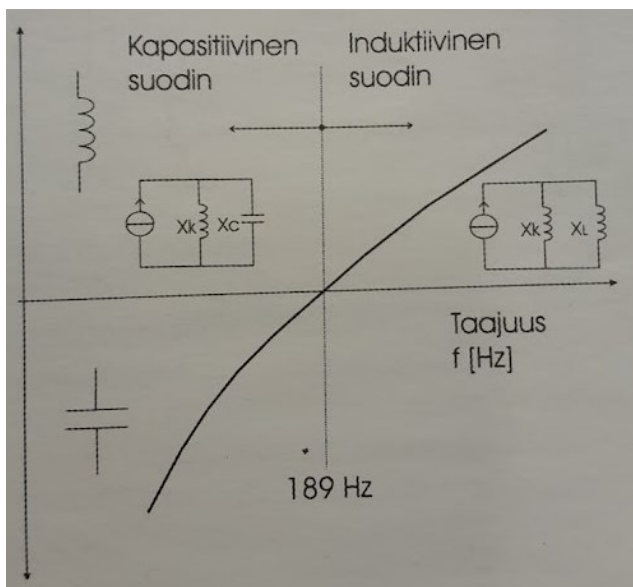


Kuva 13. Rinnankompensoinnin periaate, pätöteho otetaan verkosta ja loisteho kompensoinnin kautta. [6, s. 49.]

4.2.3 Estokelaparistot

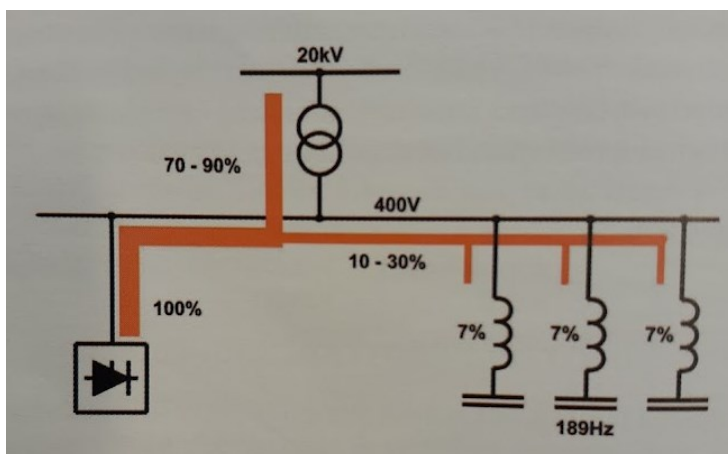
Mikäli kompensointi olisi toteutettu rinnakkaiskondensaattorilla ja verkko olisi yliaaltopitoinen, voisi tämä johtaa siihen, että kapasitanssi ja verkon induktanssi muodostaisivat rinnakkaisresonanssipiirin. Rinnakkaisresonanssipiirissä viritystaajuuden osuessa olemassa olevan yliaallon taajuudelle voisivat tämän taajuuden virrat kasvaa jopa 20-kertaiseksi. Resonanssi kasvattaa myös jännite- ja virtasäröä verkossa. [6, s. 51.]

Estokelaparistolla voidaan suodattaa yliaaltojen vahvistuminen pois samalla, kun saadaan tuotettua kompensointia loisteholle. Estokelaparisto on rakenteeltaan sarjaan kytkettyjä keloja ja kondensaattoreita. Estokelaparistojen sarjaresonanssiipiiri voidaan virittää sellaiselle taajuudelle, ettei se osu verkossa esiintyvillä yliaaltotaajuuksille. Estokelaparistojen viritystaajuus on yleensä 189 Hz ja sitä säätämällä alas voidaan kompensoida joko kapasitiivista, tai säätämällä ylös induktiivista kuormaa (kuva 14). 189 Hz:n taajuus suuntautuu kolmannen ja viidennen yliaallon väliin eikä tämän ansioista aiheuta resonanssia. [6, s. 51.]



Kuva 14. Estokelapariston impedanssi taajuuden funktiona. [6, s. 51.]

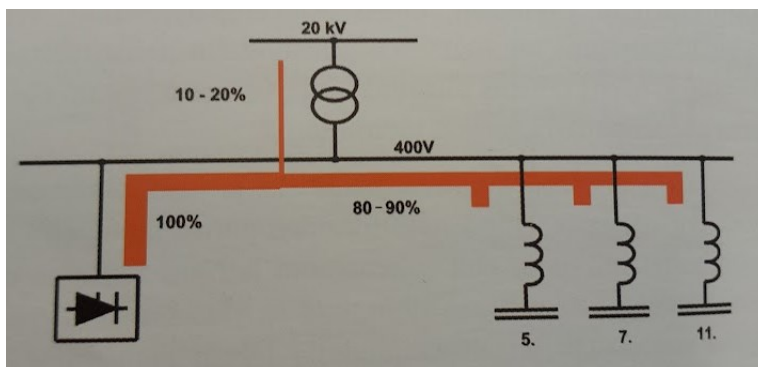
Estokelapariston viritystaajuudella voidaan vaikuttaa yliaaltopitoisuuden suodatuksen. Yleensä suodatus on noin 10–30 % viidennen yliaaltovirran määrästä (kuva 15), kun taajuus on asetettu 189 Hz:lle. Kompensointi teho ja viritystaajuus vaikuttaa suodatus ominaisuuksiin. [6, s. 51.]



Kuva 15. Estokelapariston suodatusvaikutus. [6, s. 52.]

4.2.4 Yliaaltosuodatin

Yliaaltopitoisissa verkoissa voidaan estokelapariston sijaan käyttää myös yliaaltosuodatinta. Yliaaltosuodatin tuottaa tarvittavan loistehon sekä poistaa yliaaltovirtoja verkosta ja pienentää jännitesäröä (kuva 16).



Kuva 16. Yliaaltosuodattimen toimintaperiaate. [6, s. 54.]

Estokelapariston tavoin yliaaltosuodatin koostuu myös kondensaattoreista ja niiden kanssa sarjaan kytketyistä keloista. Suodattimen loistehon tuotto mitoitetaan kondensaattoreiden tuottaman loistehon mukaan. Kelojen ja kondensaattoreiden yhdessä muodostama resonanssiipiiri mitoitetaan tarpeeksi pieni impedanssiseksi yliaallon taajuuteen nähden. Tällä tavoin suurin osa syntyvistä yliaalloista kulkeutuu suodattimeen. Resonanssiipiirejä suodattimessa on yleensä kolmelle yleisimmälle yliaaltotaajuudelle viidennelle, seitsemännelle ja yhdennelletoista harmoniselle yliaallolle. [6, s. 53.]

4.2.5 Kolmannen yliaallon suodatin

Kolmas yliaalto on sen ominaisuuksiltaan poikkeava muihin kolmella jaollisiin parittomiin yliaaltoihin. Symmetrisessä ja lineaarisessa kolmivaihekuormituksessa vaihevirtojen kolmella jaolliset parittomat yliaallot ovat yhtä suuria ja saman vaiheisia. Saman vaiheisten yliaaltojen summautuessa tähtipisteessä nollajohtimeen, voi kolmas yliaaltovirta kasvaa jopa kolminkertaiseksi vaiheissa esiintyvään yliaaltovirtaan nähden. Kolmannen yliaaltovirran ominaisuuksien takia nollajohtimen ylikuormittuminen on vaarana. Sen lisäksi TN-C-S -järjestelmissä kolmas yliaaltovirta muodostaa magneettikenttää johtimen ympärille. [6, s. 55–56; 7, s. 3.]

Kolmannen yliaallon yliaaltovirtaa ja sen kerrannaisvaikutuksia tuottavat yksivaiheiset vaiheen ja nollan välille kytketyt epälineaariset kuormat. Edellä mainittuja laitteita on purkausvalaisimien elektroniset liitäntälaitteet ja yksivaiheiset tasasuuntaajat. Kolmella jaolliset yliaallot voidaan vaimentaa asentamalla nollajohtimeen rinnakkaisresonanssiipiiri ns. estopiiri. Piiri muodostaa suuren impedanssin 150 Hz:n taajuudelle ja tämä ei päästä kolmatta yliaaltoa kulkemaan nollajohtimessa. [6, s. 55–56; 7, s. 3.]

Kolmannen yliaallon suodatin koostuu aiempien laitteistojen tavoin sarjaan kytketyistä keloista ja kondensaattoreista. Suodattimen kondensaattorit tuottavat perustaajuudella halutun määrän loistehoa. Kelojen matala impedanssi on mitoitettu muodostamaan sarjaresonanssiipiirin kolmannelle harmoniselle yliaaltotaajuudelle. Edellä mainitulla mitoituksella varmistetaan valtaosa kolmannen yliaallon päätyemisestä suodattimeen. [6, s. 55–56; 7, s. 3.]

4.2.6 Tyristorihjattu kondensaattoriparisto

Tilanteissa, joissa kompensointi on tarpeen kytkeä päälle ja pois nopeasti, ei voida käyttää perinteisiä mekaanisia kytkimiä. Nopeaan kompensoinnin kytkentään on suunniteltu tyristorikytketyt kondensaattoriparistot. Ohjaus näille laitteille yleensä toteutetaan suoraan kompensoitavalta laitteelta, jolloin saavutetaan lähes viiveetön päällekytkentä. Nopealla ohjauksella saadaan kytkettyä kaikki yksikön ohjaamat paristot verkkoon minimissään yhden verkkojakson aikana. [6, s. 58.]

Tyristorihjatun kondensaattoripariston etuja ovat sen pitkäikäisyys kulumattomuuden takia, äänetön toiminta ja lähes transienttivapaa kytkentä. Muiden kompensointilaitteiden tavoin, myös tyristori ohjattu kondensaattoriparisto koostuu kondensaattorin ja kelan sarjaan kytkennästä ja toiminta perustuu sarjaresonanssiipiiriin. Sarjaresonanssiipiiri viritetään taajuudelle mikä on alempi kuin verkossa esiintyvä alin yliaaltotaajuus. [6, s. 58.]

4.2.7 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodattimen etuna passiiviseen suodattimeen on sen kyky reagoida muuttuvien yliaaltojen mukana. Passiivinen suodatin on nimensä mukaan asetettu suodattamaan passiivisesti tiettyjä yliaaltoja, eikä se mittaa ja reagoi muuttuviin tilanteisiin. Aktiivisuodatin mittaa yliaaltokomponentit ja tuottaa niille vastakkaista 180° vaihesiirrossa olevaa yliaaltovirtaa, jolla saadaan kumottua alkuperäinen yliaaltovirta. Aktiivisuodattimen kuormansietokyky on myös huomattavasti parempi passiiviseen suodattimeen verrattuna. Mikäli aktiivisuodattimen suodatuskapasiteetti ylittyy, jättää se yli menevän osuuden kompensoimatta, eikä näin ollen pääse ylikuormittumaan. Passiivisuodatin ei sisällä vastaavaa ominaisuutta, jolloin ylikuormittumisen riski on suurempi. [6, s. 60.]

Aktiivisuodatin sisältää myös muita hyviä ominaisuuksia verraten passiiviseen suodattimeen esim. suodattaminen ilman loistehon tuotantoa, rinnakkaisresonanssivaaran välttäminen, pienempi tilan tarve sekä useamman yliaallon suodattamainen. Aktiivisuodattimen voi kytkeä suodattamaan myös kolmella jaolliset parittomat yliaallot mukaan lukien nollajohtimeen summautuvan kolmannen harmonisen yliaallon. Aktiivisuodattimet eivät ole yleistyneet niiden yleensä korkean hinnan takia. [6, s. 60.]

5 Sähkönlaatu

Sähkönlaatu on jakeluverkkoyhtiöiden vastuulla liittymispisteeseen asti, kun taas kiinteistössä tapahtuvista sekä verkkoon heijastuvista ilmiöistä on vastuussa kiinteistön haltija. SFS-EN 50160-standardissa on määritelty erilaisia määräyksiä ja suosituksia liittyen sähkönlaatuun eri tilanteissa ja verkon pisteissä. Verkossa esiintyviä säröjä ja yliaalloja tarkastellaan kuluttajan sähköliittymän liittämiskohdassa. [6, s. 42.]

5.1 Vaatimukset ja raja-arvot

Standardissa esitetyissä vaatimuksissa on ennen otettu kantaa lähinnä verkon rakentamiseen liittyvissä asioissa, sekä verkon turvallisuuteen liittyviä asioita. Nykyään kun laitteisto muuttuu ja sillä on suuri vaikutus verkon sähkönlaatuun, niin on standardiinkin lisätty kohtia, joissa otetaan kantaa sähkönlaatuun verkossa.

Sähkönlaatuun liittyviä kohtia, joita standardi käsittelee ja joilla on merkitystä sähkön käyttäjiin, ovat jakelujännitteen taajuus, suuruus, aaltomuodot ja komivaiheen symmetrisyys. Verkosta saatavan jännitteen laatuun vaikuttavat käyttäjien laitteet ja niiden luomat häiriöt, toki ulkoisiakin tekijöitä esiintyy. Jakelujännitteen katkoksiin ja jännitekuoppiin sekä muihin seikkoihin vaikuttavat ulkoiset tekijät niin paljon, että niille on asetettu muista poikkeavia lisäehtoja. Monet standardeissa esitetyt asiat ovat sovellettavissa erilaisten taulukoiden ja raja-arvojen kesken. Tämä tarkoittaa, ettei tietyille tapahtumalle tai ilmiölle ole annettu yksittäistä vaatimusta, vaan jokaiseen seikkaan, joita standardit käsittelevät, on olemassa useamman tekijän yhteisvaikutuksen tuoma lopputulos. [10, s. 7]

Vinokuormitus kiinteistöissä on myös otettu huomioon standardeissa, ja sitä esiintyy lähinnä keskuksien kytkennässä, jossa on yleensä ensimmäinen vaihe

ylikuormitettuna. Ylikuormitusta yhdeltä vaiheelta voidaan jakaa muille vaiheille siirtämällä kytkentöjä keskuksessa. Vinokuormituksille annetaan 10 %:n toleranssi vaihevirtojen keskiarvosta. [11, s. 1–2.]

SFS-EN 50160 määrittelee taajuudelle seuraavat arvot.

Yhteiskäyttöverkossa taajuuden tulee olla 50 Hz, 10 s:n aikavälillä keskiarvon tulee olla:

50 Hz +/- 1 % eli 49,5 Hz – 50,5 Hz 99,5 % vuodesta

50 Hz + 4 % / - 6 % eli 47 Hz – 52 Hz 100 % vuodesta

Jännitetason vaihtelu normaaleissa käyttöolosuhteissa:

Kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin jaksoilta mitatuista keskiarvoista 95 % tulee olla välillä $U_n \pm 10 \%$ (taulukko 2).

Kaikkien jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä $U_n + 10 \%$ / - 15 %.

Taulukko 2. Jännitteen laatukriteerit [12, s. 8.]

Hyvä laatu:	$U_n \pm 4 \%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5 \%$.
Normaalilaatu:	$U_n \pm 10 \%$
Standardilaatu:	95 % välillä $U_n \pm 10 \%$
Mittaus:	10 min jaksoina viikon ajan

Jakelujännitteessä esiintyvä epäsymmetria normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon mittausjakson aikana on kymmenen minuutin tehollisarvon keskiarvon oltava 0–2 %, 95 % ajasta. Joillain alueilla voi kuitenkin esiintyä epäsymmetriaa 3 %:iin asti, kun kuluttajille menee yksi-, kaksi- ja kolmivaihejärjestelmiä. [10, s. 14–16.]

5.2 Yliaallot standardissa

Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 3 annettu arvo. Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen (THD) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. [10, s. 16.]

Taulukko 3. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittämiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustaajuisesta jännitteestä. [10, s. 16.]

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

5.3 Virtarajat standardissa

On suositeltavaa, että sähkökäyttäjällä sallitaan liittämiskohdassaan, jossa liitytään yleiseen jakeluverkkoon, enintään taulukoiden mukaiset yliaaltovirrat. Mikäli virtarajat ylittyvät, on sähkökäyttäjän joko pienennettävät yliaaltovirtoja tai sovittava verkonhaltijan kanssa suuremmasta siirtokapasiteetista. [6, s. 44]

Yliaaltotaajuuksilla verkon impedanssi voi myös resonanssien vaikutuksesta poiketa olennaisestikin keskimääräisistä arvoista, jolloin yksittäisessä tilanteessa käytettävien virtarajojen ja ensisijaisesti määräävän jännitestandardin välistä yhteyttä on tarkasteltava tapauskohtaisesti. Jännitesäröjen ollessa tavanomaista korkeampia on huomioita virtarajat erityisesti kondensaattori hankinnoissa (taulukko 4).

Referenssivirralla on laskukaava 9. [6, s. 44]

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (9)$$

Kaavassa P on liittymän sopimusteho ja U_n on liittymän nimellisjännite.

Taulukko 4. Pienjänniteverkkoon liittyneen sähkökäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittämiskohdassa tarkasteltuna. [6, s. 44.]

Referenssi- virta	Suositeltava raja	
≤ 25 A	Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita.	
> 25A ... 200A	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssi- virrasta.	
> 200A	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivir- rasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:	
	järjestysluku n	sallittu arvo referenssivirrasta
	<11	7,0 %
	11-16	3,5 %
	17-22	2,5 %
	23-34	1,0 %
>34	0,5 %	

Ongelmien välttämiseksi tulee kondensaattorien hankinnan yhteydessä varmistaa, että mahdollisesti syntyvät resonanssipiirit eivät vahvistaisi yliaaltoja liikaa.

Kondensaattoritehon ylittäessä 15 % liittymän koosta on suositeltavaa selvittää verkonhaltijalta kondensaattorin liittämiseen liittyvät kriteerit. [6, s. 43–44]

Taulukko 5. Keski-jänniteverkkoon liittyneen sähkökäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittämiskohdassa tarkasteltuina. [6, s. 44.]

Referenssi- virta	Suositeltava raja	
kaikki	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivir- rasta. Lisäksi eri yliaaltojen osalta:	
	järjestysluku n	sallittu arvo referenssivirrasta
	<11	7,0 %
	11-16	3,5 %
	17-22	2,5 %
	23-34	1,0 %
	>34	0,5 %

Taulukoissa 4 ja 5 on annettu rajat yliaaltovirroille, jotka sähkökäyttäjä liittämiskohdastaan saa normaalissa tilanteessa syöttää verkkoon tai ottaa verkosta. Sähkökäyttäjä saadaan tasapuoliseen asemaan sitomalla osuudet referenssivirtoihin. Mikäli paikalliset verkko olosuhteet sallivat voidaan tietyissä tapauksissa poiketa taulukon antamista arvoista. Kompensointilaitteiden hankintojen yhteydessä tulee varmistaa, että tilanne pysyy jännitesärön suhteen hyväksyttävän 5. ja 7. yliaallon osalta. Nykyiset jännitesäröt, yliaaltojen vahvistuminen ja tulevaisuuden tarpeet täytyy ottaa myös huomioon. [6, s. 43]

5.4 Välkyntä

Useat peräkkäin tapahtuvat nopeat jännitteen muutokset aiheuttavat lamppujen luminanssin muutoksia, jotka voivat näkyä lamppujen välkyntänä. Normaaleissa käyttöolosuhteissa, minkä tahansa viikon pituisen mittausjakson aikana, jännitevaihtelun aiheuttaman välkynnän pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin (P_{lt}) tulisi olla 95 % ajasta enintään 1 ($P_{lt} \leq 1$). Jännitteen laskiessa alle 90 % U_n :stä lasketaan jännitekuopaksi. Standardi sallii jännitemuutoksen 5–10 % U_n :stä. [10, s. 23.]

P_{lt} tarkoittaa pitkäaikaista häiritsevyyssindeksiä ja P_{st} tarkoittaa lyhytaikaista häiritsevyyssindeksiä. Nämä lasketaan seuraavassa kaavassa 10 kahdentoista tunnin ajalle:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (10)$$

6 Sähkönlaatuanalysoijan käyttö

Sähköverkon laadun mittausmenetelmän tulisi olla vastaava kuin mitattaessa standardissa SFS-EN 50160 esitettyjä vaatimuksia jännitteelle. Ensimmäiseksi tulisi käyttää laitteita, jotka mittaavat standardin IEC 61000-4-30 luokan A mukaisesti kolmivaiheisia jännitteitä ja virtoja (kuva 17). Mittausjakson pituus on laitteissa yleensä aseteltavissa, ja jos käytetään lyhyempää kuin 10 minuutin jaksoa, on 10 minuutin keskiarvolaskenta tehtävä mittaustiedoista myöhemmin.

Jo yhden 10 minuutin jakson keskiarvosta lasketun tuloksen ylittäessä annetut raja-arvot katsotaan tämän merkitsevän puutteellista liittymän verkon ja jakeluverkon yhteensopivuutta ja riittäväksi näytöksi sallitun rajan ylittämistä.

Sähkönlaatua ei mitata laskutusmittareilla, vaan näiden mittaaminen on pääasiassa sähkön käyttäjän vastuulla. Mittaustuloksista tehtyjä havaintoja pidetään osapuolia velvoittavina impulsseina kulloinkin tarpeellisten muutosten tekemiseen. Kustannukset vikojen korjaamiseen on aina tapauskohtaisia. Jos jänniteraja alittuu, mutta virtaraja ylittyy, on sähkönkäyttäjä vastuussa. Mikäli virtaraja alittuu ja jänniteraja ylittyy, on silloin vastuussa verkonhaltija.

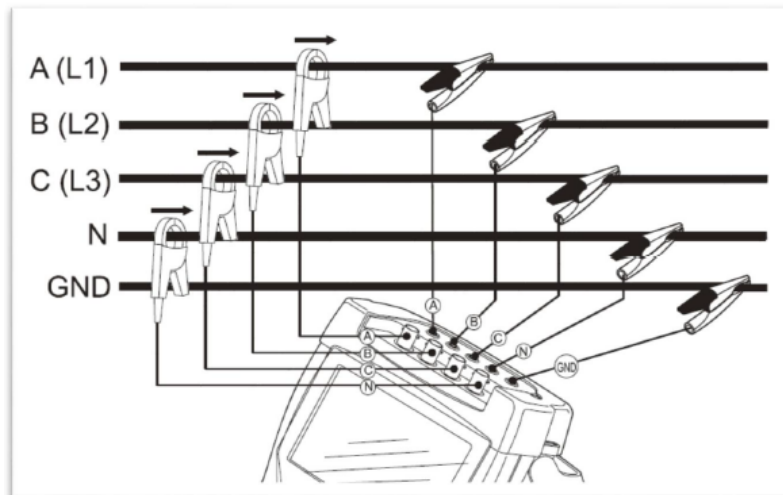


Kuva 17. Fluke 430 II -sarjan sähkölaatuanalysoija. [14, s. 9.]

6.1 Fluke 430 II -sarjan käyttö ja tulkinta

Tässä osiossa käydään läpi pääpiirteittäin mittausmenetelmät käyttäen Fluke 430 II -sarjan sähkönlaatuanalysointia. Tästä jää ohjeistus Espoon kaupungin Tilapalveluliikelaitoksen käyttöön.

Sähkönlaatuanalysointilaitteella mitataan jännitteen ja virran kaikki arvot jokaista vaihetta kohden erikseen tarkoitettulla mittajohdolla (kuva 18). Jännite saadaan mitattua vaiheen ja nollan väliltä, kuin myös vaiheiden väliltä. Mittalaite antaa myös sinikäyrät jännitteille kaikille vaiheille erikseen samaan näyttöön. Samat arvot ja siniaallot saadaan myös virroille. Ohessa kuva mittalaitteen asentamisesta.



Kuva 18. Periaatekuva analysointilaitteen liittämistä 3-vaihejärjestelmään [13, s. 36.]

Mittalaite ottaa käyttöjännitteensä mukana olevan AC-muuntajan kautta suoraan pistorasiasta. Kytkevien jälkeen, kun mittalaite käynnistetään ensimmäistä kertaa, pyytää laiteasetukset seuraaville parametreille: kieli, hertsit, käyttöjännite, vaihejärjestys ja päivämäärä. Valikkoa käytetään nuolinäppäimistöllä ja enter-napilla (kuva 19).

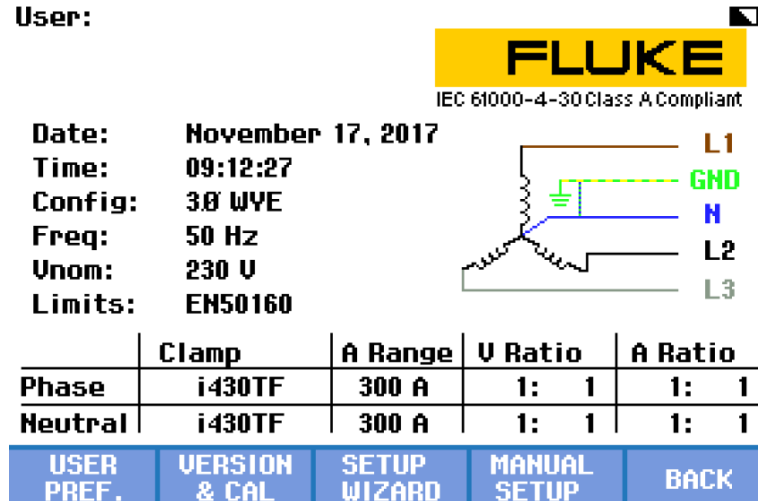
Asetettujen parametrien jälkeen päästään päänäyttöön. Päänäytöstä päästään takaisin asetusvalikkoon mistä voidaan muuttaa vielä asetettuja arvoja myöhemminkin.



Kuva 19. Käyttöpaneeli [14, s. 11]

Asetusvalikosta päästään muuttamaan myös taajuutta mitä mittari käyttää. Suomessa käytössä on 50 Hz taajuus, mutta mittalaite antaa asettaa myös 60 Hz taajuuden.

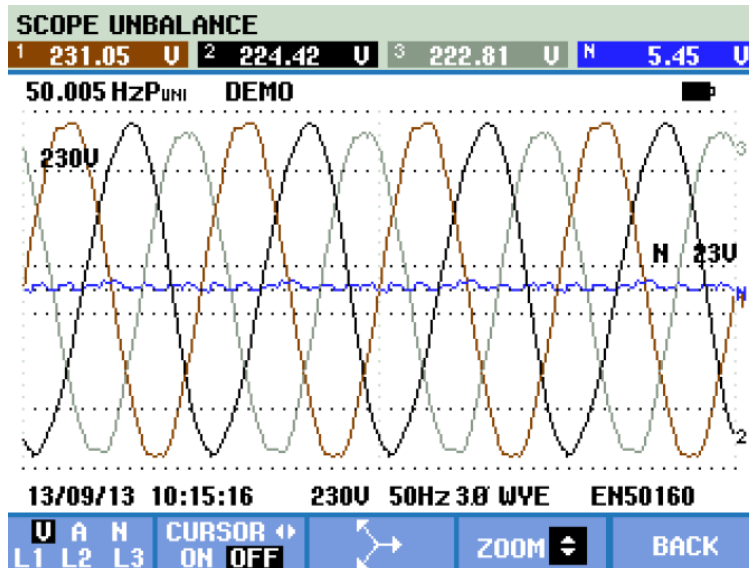
User:



Kuva 20. Mittalaitteen päänäyttö [14, s. 13.]

Päänäytössä nähdään aina käynnistyksen yhteydessä vaihe- ja värijärjestys (kuva 20). Asetusvalikosta asetetut taajuus ja käyttöjännite näkyvät myös listassa päänäytön keskellä. Vaihe- ja värijärjestys pystytään vaihtamaan asetusvalikosta erilaisiin vaihejärjestykseen tai kytkentään, esim. kolmioon tai tähteen kytkettyyn variaatioon.

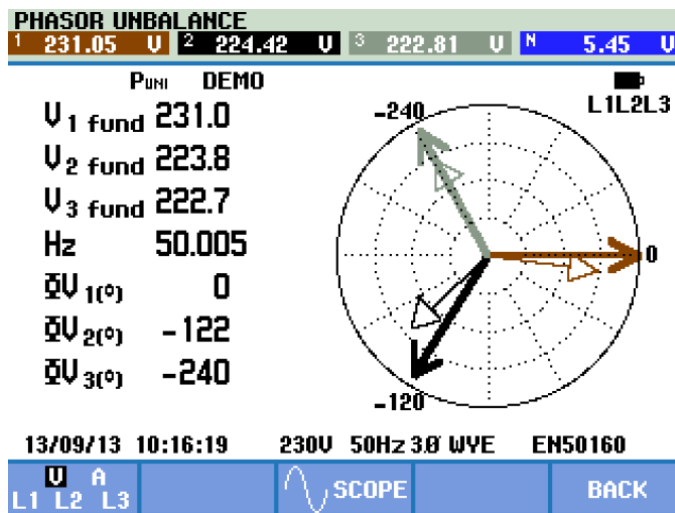
Edellä mainittujen parametrien asettaminen täytyy tehdä vain ensimmäisellä käyttöönottokerralla tai tehdasetusten palauttamisen jälkeen. Parametrien asettamisen jälkeen ennen mittaamisen aloittamista päästään scope-toimintoa käyttämällä näkemään mitattavan kohteen siniaaltomuodot sekä jännitteiden ja virtojen väliset mahdolliset vaihe-erot.



Kuva 21. Jännitteiden ja virtojen siniaaltomuodot [14, s. 30.]

Kuvasta 21 nähdään mahdolliset eroavaisuudet siniaalloissa, mistä nähdään jo ennen mittaamisen aloittamista, onko jollakin vaiheella merkittävästi enemmän säröä kuin jollain toisella vaiheella. Toimintonapeilla pääsee myös vaihtamaan jännitteiden siniaallot virta-aaltoihin, nollajohtimen aaltokäyrään tai yksittäisen vaiheen näyttämään siniaaltokuvioon.

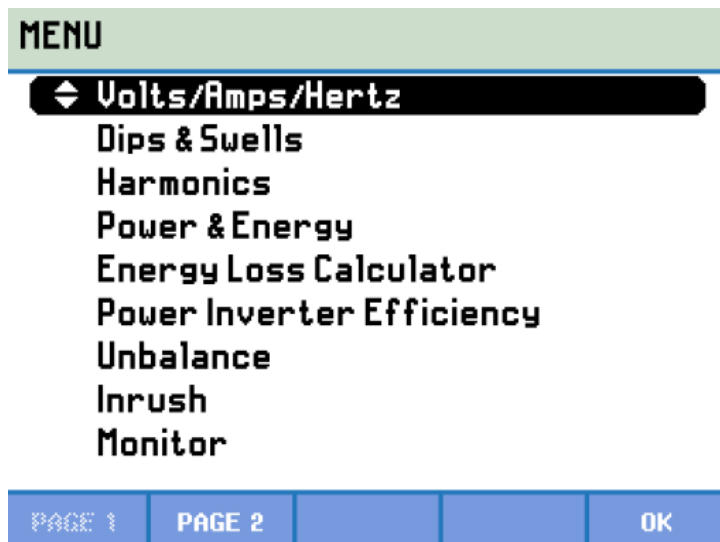
Vaiheosoitinkaavion näytöstä nähdään mahdolliset vaihe-erot jännitteen ja virran välissä. Valikosta päästään muuttamaan näytön asetusta siten, näytetäänkö yhden vaiheen arvoja vai useampaa kerrallaan. Näytöllä paksummat nuolet esittävät jännitteen arvoja, kun ohuemmat nuolet näyttävät virran arvoja. Nuolien osoittamista suunnista verrattuna jännitteen nuoliin nähdään värien perusteella vaiheiden välissä esiintyvät vaihesiirtoerot.



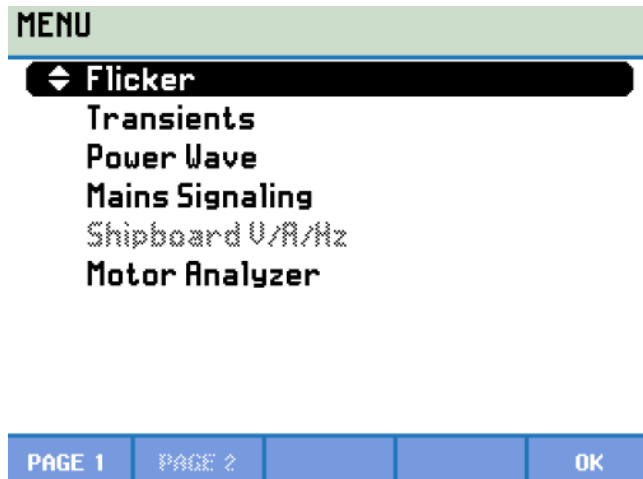
Kuva 22. Vaiheosoitinkaavio kertoo virtojen ja jännitteiden väliset vaihe-erot [14, s. 30]

Siniaaltokaaviosta ja vaihesiirtokaaviosta voi tarkistaa ennen mittaamisen aloittamista, onko vaihejärjestys oikea ja esiintyykö järjestelmässä suuriakin poikkeamia (kuva 22).

Kun kytkennät on tarkistettu ja todettu järjestelmän olevan kunnossa ja vaihejärjestyksen olevan haluttua vastaava, voidaan palata valikossa takaisin. Seuraavaksi valikosta aukeaa lista useasta vaihtoehdosta, joita mittalaitteella voidaan mitata (kuva 23 ja 24).



Kuva 23. Valikosta esiin tuleva valikko mittausvaihtoehdoista [14, s. 33.]



Kuva 24. Valikosta esiin tuleva valikko mittausvaihtoehtoista [14, s. 33]

Kuvissa 28 ja 29 näkyy valikko, joista löytyvät vaihtoehdot mittauksille. Mittausohjelma kannattaa valita harkitusti ennen mittaamisen aloittamista. Kaikissa mittausohjelmissa on valmiit parametrit, joita ohjelma mittaa. Mittaohjelman nimi viittaa siihen, mitä parametrejä ohjelmassa on valmiina.

Monitor-nappia painamalla voidaan valita tietty ajanjakso, jota mittalaite mittaa. Aluksi valitaan mittausjakson pituuden kesto sekä intervallit, joista mittaustulokset tallennetaan laitteiston muistiin.

Logger-nappia painamalla voidaan valita useasta parametrasta, mitä mitataan kaiken kaikkiaan. Ohjelman valitsemisen jälkeen päädytään parametrien asetusvalikkoon, josta valitaan mitattavat parametrit. Tämä mittausohjelmisto sisältää eniten mitattavia vaihtoehtoja kerrallaan. Parametrien jälkeen asetetaan mittauksen kesto ja intervallien pituus.

Mittausohjelman alettua näytön oikeaan ylälaitaan ilmestyy pieni logo esittämään nauhoituksen aloitusta. Mittausohjelmat tallentuvat laitteen muistiin, josta ne voidaan myöhemmin purkaa tietokoneelle. Mittalaite myös tallentaa kaikkien asetettujen mitattavien arvojen aaltomuodot.

Kaikissa mittausohjelmissa on *event-valikko*, josta löytyy tapahtumat mittausjakson aikana. Tapahtumiin tallentuu poikkeamat sähköjärjestelmässä myöhempää tarkastelua varten.

6.1.1 Jännitteet ja virrat

Jännitteen- ja virranmittausohjelma mittaa jännitteen tehollisarvot sekä nimellisarvot vaihekohtaisesti. Nämä ovat lähtökohtaisesti Suomessa 230 V ja 400 V. Samalla näytöllä näkyy myös taajuuden määrä ja virrat vaihekohtaisesti.

Mittari näyttää myös huippuarvot virroille ja jännitteelle seuraavalla logiikalla. CF-merkintä (Crest Factor on huippukerroin) etuliitteenä on huippu- ja tehollisarvon suhde, joka on 1,424 puhtaalle siniaallolle. Mitä lähempänä ollaan edellä mainittua numeroa, ei verkossa esiinny säröä; jos luku on 1,8 tai yli, on silloin kyse suuresta säröstä. [14, s. 34–45.]

6.1.2 Kuopat ja ylijännitteet

Standardissa on määritelty rajat, joiden sisällä jännitteiden vaihtelut saavat muuttua. Alenema, ylijännite ja keskeytys määritellään tapahtuman keston, koon ja esiintymisajan avulla. Häiriö alkaa kun, jonkin vaiheen jännite menee sallitun marginaalin ulkopuolelle. Kun kaikkien vaiheiden jännite on taas normaaleissa rajoissa, loppuu häiriö. [14, s. 49–54.]

Mittaustuloksien tutkimiseen on olemassa nyrkkisääntö. Silloin kun jännitteessä esiintyy alenemaa samaan aikaan kun virta nousee, on todennäköistä, että häiriötä esiintyy kuorman puolella. Mikäli jännitteen alenema aikaansaa virran aleneman, on silloin häiriötä syötössä. [14, s. 49–54.]

Selityksiä mittaustuloksien lyhenteille.

DIP on jännitekuoppa

SWL on ylijännite (kohouma)

INT on jännitekatkos

TRA on jännitepiikki

CHG on nopea jännitemuutos

AMP on virta-arvon ylitys.

6.1.3 Yliaallot

Harmoniset yliaallot ovat perusaallon taajuuden kokonaislukukertoimia. Epäharmoniset yliaallot eivät ole kokonaisluvulla kerrottuja perustaajuuden osia, vaan jäävät perustaajuuden ja harmonisten aaltojen väliin. Nollajohtimeen kolmannen yliaallon kerrannaisia tuottavat yleensä 1-vaiheiset kuormalaitteet ja epälineaariset kuormat. [14, s. 55–58.]

Mittausohjelma mittaa joko pylväs- tai mittarinäytöllä tuloksia. Yliaaltojen mittaus voidaan mitata joko suhteessa koko taajuusalueeseen %r, tai suhteessa perusaaltoon %f. Yliaallot voidaan myös mitata rms-arvona. Edellä mainitut vaihtoehdot asetetaan asetuksista halutulle skaalalle. [14, s. 55–58.]

6.1.4 Tehot ja energia

Tehojenmittausohjelmalla mitataan kaikkien tehojen arvot yksityiskohtaisesti. Mittauslaitteisto myös laskee tehokertoimen arvon mitatuista tehoista. Tehojen mittaamisessa on tärkeää kiinnittää huomiota mitattavan kuorman laatuun. Mitatusta loistehon määrästä voidaan päätellä kuorman olevan induktiivista tai kapasitiivista. Taulukossa 6 on esitetty mittalaitteen antamia arvoja. [14, s. 60–61.]

Taulukko 6. Tehot ja energia mittaohjelman antamat arvot ja yksiköt. [14, s. 60.]

Pätöteho (kW)	kilowatteja
Näennäisteho (kVA)	kilovolttiampeeri
Loisteho (kvar)	kilovari
Tehokerroin (PF)	power factor
Harmoninen teho (kVA harm)	harmoninen kilovolttiampeeri
Epäsymmetrinen loisteho (kVA)	kilovolttiampeeri
Perustaajuinen pätöteho (kW fund)	fundamentaalin kilowatti
Perustaajuinen näennäisteho (kVA fund)	fundamentaalin kilovolttiampeeri
Kosini ($\cos\varphi$)	tehokulma
Jännitteen rms-arvot (V_{rms})	voltti
Virran rms-arvot (A_{rms})	ampeeri
Pätöteho kulutus (kWh)	kilowattitunti

näennäisteho kulutus (kVAh)	kilovolttiampeeritunti
Loisteho kulutus (Kvarh)	kilovaritunti
Positiivinen kulutettu energia (kWh forw)	kilowattitunti
Negatiivinen syötetty energia (kWh rev)	kilowattitunti

6.1.5 Energiahävikin laskenta

Mittalaitteesta löytyy myös suoraan mittausohjelma, jonka avulla saadaan suoraan mitattua rahallista arvoa energiahävikille. Ohjelman asetuksista asetetaan kaapelien ja sulakkeiden koot sekä muita arvoja. Ohjelma mittaa tehoarvot, joita piirissä kulutetaan, loistehon osuuden piirissä, epäsymmetrian, särötehon sekä nollavirran. Edellä mainituista mittauksista laite laskee häviöiden arvon ja niiden rahallisen arvon. Näistä tulee lopuksi vielä yhteenveto. [14, s. 62–66.]

ENERGY LOSS CALCULATOR			
DEMO 0:02:37			
		Loss	Cost/yr
Due to Load Current			
Effective	144 kW	163 W	147EUR
Reactive	18.7 kvar	2.77 W	2.49EUR
Unbalance	29.2 kVA	4.18 W	7.07EUR
Distortion	23.2 kVA	3.79 W	5.26EUR
Neutral	19.7 kA	0.36 W	6.40EUR
Line loss		174 W	168EUR

07/06/15 09:22:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160

SETUP ANALYZER METER STOP START

Kuva 25. Energiahävikin mittaukset kuormasta. [14, s. 64]

Edellä olevasta kuvasta 25 nähdään ylhäältä alaspäin listattuna

- tehonkulutus
- käyttökelvoton loisteho
- epäsymmetrian hyödyttömäksi tekemä teho
- käyttökelvoton säröteho
- nollavirta.

Kaikista mittauksista näkyy mitatun arvon jälkeen siihen arvoon liittyvät häviöt ja laskennallinen hinta-arvio (kuva 26). Lopuksi viivan alle tulee summa kuormista

johtuvien, tuhlattujen, kilowattituntien vuosikustannus, joka perustuu annettuun kilowattituntihintaan. [14, s. 62–66.]

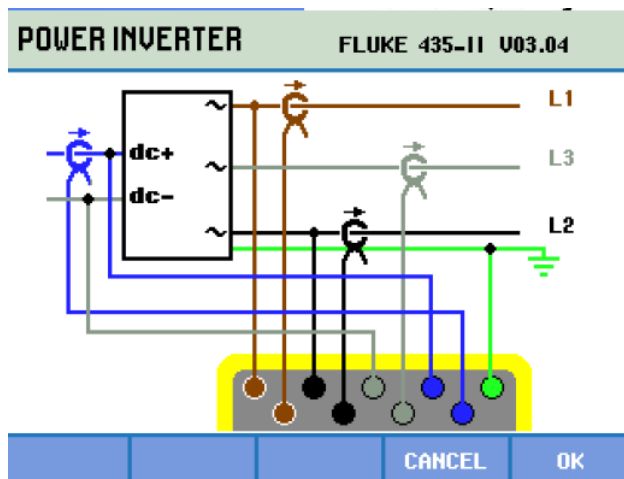
ENERGY LOSS CALCULATOR		
DEMO 0:02:50		
Due to Source Voltage	Loss	Cost/yr
Unbalance	2.20 kW	1.65kEUR
Distortion	93.5 W	90EUR
Source loss	2.29 kW	1.74kEUR
Combined Losses	Loss	Cost/yr
Total losses	2.47 kW	1.91kEUR
07/06/15 09:23:06 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160		
SETUP	ANALYZER	METER
		STOP START

Kuva 26. Energiahävikin mittaukset syötöstä. [14, s. 66.]

Syötöstä voidaan myös mitata siitä aiheutuvat häviöt ja siihen liittyvät mahdolliset kustannukset. [14, s. 62–66.]

6.1.6 Invertterin tehokkuus

Aurinkosähköjärjestelmissä olennaisena osana laitteistoa on invertteri. Invertterin tehtävänä piirissä on vastaanottaa kennojen tuottamaa tasasähköä ja muuttaa se muualle verkkoon vaihtosähköksi. Mikäli invertteriä sekä koko aurinkokennojärjestelmää ei ole konfiguroitu oikein, ei ole laitteisto yhtä tehokas ja tuottoisa, kuin se voisi olla. [14, s. 67–70.]



Kuva 27. Mittalaite mittaa samanaikaisesti jännitettä kummaltakin puolelta invertteriä. [14, s. 69.]

Mittalaite asetetaan mittaamaan jännitteitä ja virtoja jokaiselta vaiheelta erikseen vaihtosähköpuolelta (kuva 27). Laite mittaa myös nollajohtimessa kulkevia virtoja ja jännitteitä. Invertterin toiselta puolelta mitataan tasasähkön osuus, ja näiden kaikkien yhteenlaskusta saadaan invertterin tehokkuus. Invertterin tehokkuuteen liittyy myös olennaisesti käyttölämpötila, tuleva energiamäärä ja lähdön kuormitus. [14, s. 67–70.]

6.1.7 Epäsymmetria

Verkossa esiintyy epäsymmetrisiä kuormia useastakin eri syystä. Jakeluverkon osuus epäsymmetriaan voi olla, kun siirto- ja jakeluverkossa esiintyvät impedanssit ovat epätasaiset. Verkossa esiintyvä epäsymmetria on yleensä kuluttajan puolelta esiintyvää, ja se johtuu laitteistosta tai kytkennöistä. [14, s. 71–75.]

Epäsymmetriaa ja vaihesiirtoa aiheuttavat suuret yksivaiheiset kuormat verkossa. Vaiheiden väliset kuormat, kolmivaiheverkon epäsymmetriset kuormat sekä vialliset sulakkeet keskuksissa tai kompensointi laitteissa. [14, s. 71–75.]

Mikäli kiinteistössä oleva verkko on valmiiksi epäsymmetrinen ja siihen kytketään symmetrinen kuorma kiinni, niin kuorman ottama virta muuttuu myös epäsymmetriseksi.

UNBALANCE				
	U _{neg.}	U _{zero}	A _{neg.}	A _{zero}
unbal (%)	1.8	0.7	9.0	7.3
	L1	L2	L3	N
U _{fund}	230.9	223.8	222.6	0.8
	L1	L2	L3	N
φ V(°)	0.0	-121.4	-240.3	-115.3
	L1	L2	L3	N
A _{fund}	287	277	286	4
17/11/17 10:58:29 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
UP DOWN	BACK	TREND	EVENTS 0	STOP START

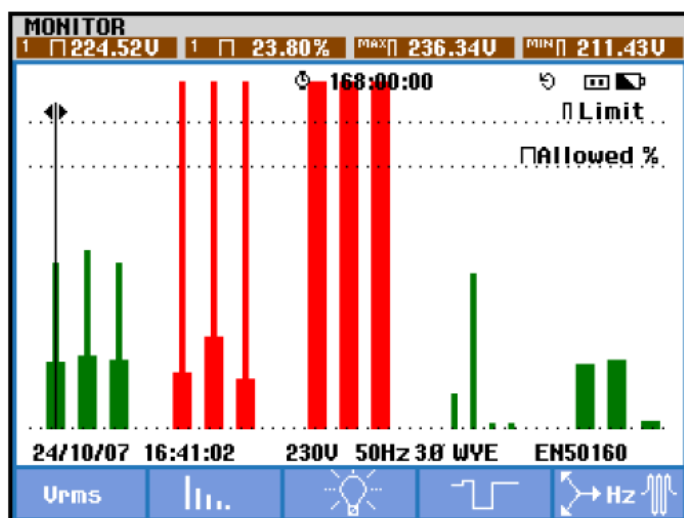
Kuva 28. Epäsymmetrinen kuormitus. [14, s. 73.]

Kuvassa 28 jännitteen epäsymmetria on 9 % ja virran lähes 16 %. Mikäli vaiheet ovat täysin symmetrisiä, ovat nolla- ja negatiivinen komponentti nolliä. [14, s. 71–75.]

6.1.8 Käynnistysvirta

Mittausohjelman alussa asetetaan mitattavan järjestelmän käynnistykseen vaadittavat parametrit. Asetettavia raja-arvoja on moottorin käynnistysvirta, moottorin käyntivirta ja käynnistysaika. Mittausnäyttöön tulee näkymään RMS-jännite arvot, harmoniset yliaallot, välkyntä, jännitteessä ja taajuudessa esiintyvät muutokset esim. kuopat, kohoumat yms. [14, s. 76–78.]

Näytössä esiintyvä palkkigrafiikka esittää mitattuja arvoja (kuva 30). Jännitteelle on annettu arvoja minkä sisällä sen pitäisi pysyä, esim. Nimellisjännitteen ollessa 230 V ja 95 % ajasta pitäisi olla +/- 10 %, 100 % ajasta pitäisi olla +10 % ...-15 % ja 5 % ajasta pitäisi olla -10 % ... -15 %. [14, s. 76–78.]



Kuva 29. Monitoroinnin mittausnäyttö. [14, s. 82.]

Kuvassa 29 vasemmalta alhaalta lukien ensimmäisenä on jännitteen rms-arvot, toisena on yliaallot, kolmantena on välkyntä, neljäntenä jännitteessä esiintyvät tapahtumat (kuopat, kohoumat, keskeytykset ja nopeat jännitemuutokset) ja lopuksi epäsymmetria, taajuus ja signaalijännite. Pylväs on sitä korkeampi, mitä enemmän mittausarvo poikkeaa nimellisarvostaan. Pylväs muuttuu vihreästä punaiseksi, mikäli sallitut raja-arvot ylittyvät. [13, s. 16–2.]

Analysaattorin käyttöohjeissa sanotaan:

Jokaisella pylväällä on leveä alaosa (kuvaava säädettyä raja-arvoa, esim. 95 %:n arvoa) ja kapea yläosa (kuvaamassa 100 %:n raja-arvoa). Pylväs muuttuu vihreästä punaiseksi, mikäli jompikumpi raja-arvo ylitetään. [13, s. 85.]

6.1.9 Välkyntä

Välkyntä on verkossa esiintyviä nopeita jännitemuutoksia, jotka aikaan saavat valoissa vilkkumista. Hitsauskoneet, valokaariuunit ja moottorikuormat voivat aikaan saada välkyntää. Välkyntälle on määritelty standardissa raja-arvot, joita sen tuottama häiritsevyyssindeksi saa olla. Viidestä kahdeksaan jännitemuutosta sekunnissa voi aiheuttaa näkyvää vilkkumista valoissa. [14, s. 86–88.]

FLICKER			
P _{UNI}	DEMO	0:10:50	
	L1	L2	L3
Pinst	0.00	0.28	0.05
	L1	L2	L3
Pst(1min)	0.03	0.38	0.16
	L1	L2	L3
Pst	15.1	15.2	15.2
	L1	L2	L3
Plt	-.--	-.--	-.--
17/11/17 11:25:25 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160			
UP DOWN		TREND	EVENTS 40
			STOP START

Kuva 30. Ohjelma mittaa muutamia arvoja liittymän välkyntään. [14, s. 88.]

Fluken käyttöohjeissa mainitaan seuraavasti:

Käytä hetkellisen välkyntän (Pinst) trendiä ja puolen jakson jännite/virtatrendejä löytääksesi välkyntän aiheuttaja (kuva 30). Vaihda trendiä nuolinäppäinten avulla. 10 minuutin välkyntämittaus (Pst) käyttää pitkää mittausaikaa tasaamaan satunnaisten jännitevaihteluiden vaikutusta mittaustuloksiin. Mittausaika on myös riittävän pitkä, jotta voidaan havaita yksittäisen, hitaan kuorman aiheuttamat vaikutukset (esim pumppu tai kodinkone). 2 tunnin mittaussjakso (Plt) on hyödyllinen, kun häiritseviä kuormia on useita ja niiden työsyklit ovat epäsäännöllisiä. Tällaisia laitteita voivat olla esimerkiksi hitsauslaitteet ja valssit. EN50160 asettaa 95 %:n raja-arvoksi välkyntälle $Plt \leq 1.0$. [13, s. 89.]

6.1.10 Transienttijännitteet

Mittausohjelma etsii ja erottelee suurella erottelu kyvyllä verkon häiriötilanteiden tapahtumia ja muutoksia. Mikäli verkossa esiintyy häiriöitä, mittalaite tallentaa jännitteiden ja virtojen aaltomuodot sekä tallentaa mitatut arvot. Tämän ansiosta voidaan tarkastella aaltomuotoja tietyillä ajan hetkillä häiriön sattuessa, jopa mittauksen aikana, tai jälkikäteen. Piikit ja kohoumat erotellaan 10 ms:n tarkkuudella. [14, s. 90–93.]

6.1.11 Tehoaallot

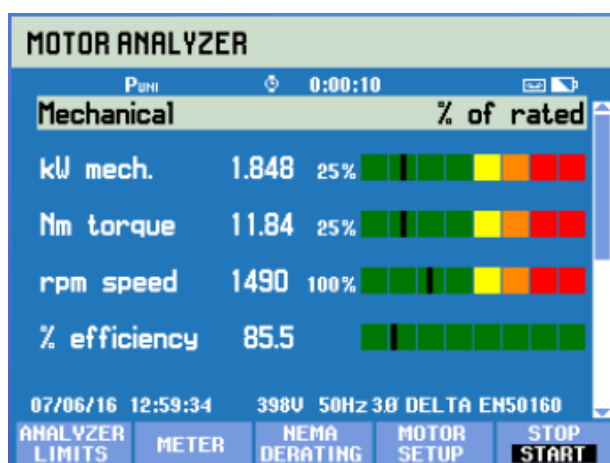
Ohjelmalla voidaan tallentaa tarkasti aaltomuodot useamman minuutin ajan. Ohjelma tallentaa kahdeksankanavaisen oskilloskoopin tavoin aaltomuotoa jännitteille, virroille, taajuudelle ja hetkellisteholle. Näistä tarkoin erotelluista aaltomuodoista pystytään tulkitsemaan mahdolliset kuormien aiheuttamat häiriöt, jännitekuopat sekä yleisesti mitä tahansa mitä verkossa tapahtuu jännitteen tai virran arvoille. Jakeluverkon vahvuus selviää mahdollisista poikkeamista. [14, s. 95–97.]

6.1.12 Verkon signaalit

Verkon signaaleilla tarkoitetaan perustaajuudesta poikkeavia taajuuksia, näitä ovat yleisesti verkkoyhtiön lähettämät etäohjaus- tai etälukusignaalit. Perustaajuinen verkontaajuus on 50 Hz, mutta verkkoyhtiön käyttämä taajuudet voivat olla jopa 3 kHz. Tällä ohjelmalla voidaan mitata kaikkia näitä taajuuksia 70 Hz...3000 Hz ja 60 Hz järjestelmissä rajat ovat 60 Hz...2500 Hz. Korkeammilla taajuuksilla on perustaajuuteen verraten hyvin paljon pienempi amplitudi. [14, s. 98–100.]

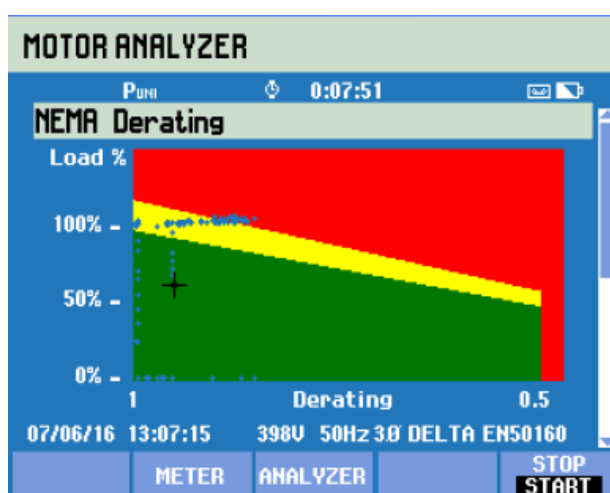
6.1.13 Sähkömoottorin analysointi

Sähkömoottorin analysointiohjelmalla saadaan mitattua tarkkoja tietoja moottorin toiminnasta, ja sen myötä voidaan tehdä päätelmiä moottorin oletetusta eliniästä. [14, s. 102–108.]



Kuva 31. Moottorin analysointi antaa tiedot moottorin tehosta, väännöstä, nopeudesta ja hyötysuhteesta. [14, s. 106.]

Analysaattori mittaa moottorin toimintaa hyvin tarkasti kertoen moottorin kuormituskerroimen, josta nähdään moottorin yli- tai alimitoitus. Moottorille tuleva sähkönlaatu on myös merkittävä tekijä, jonka analysaattori näyttää. [14, s. 102–108.]

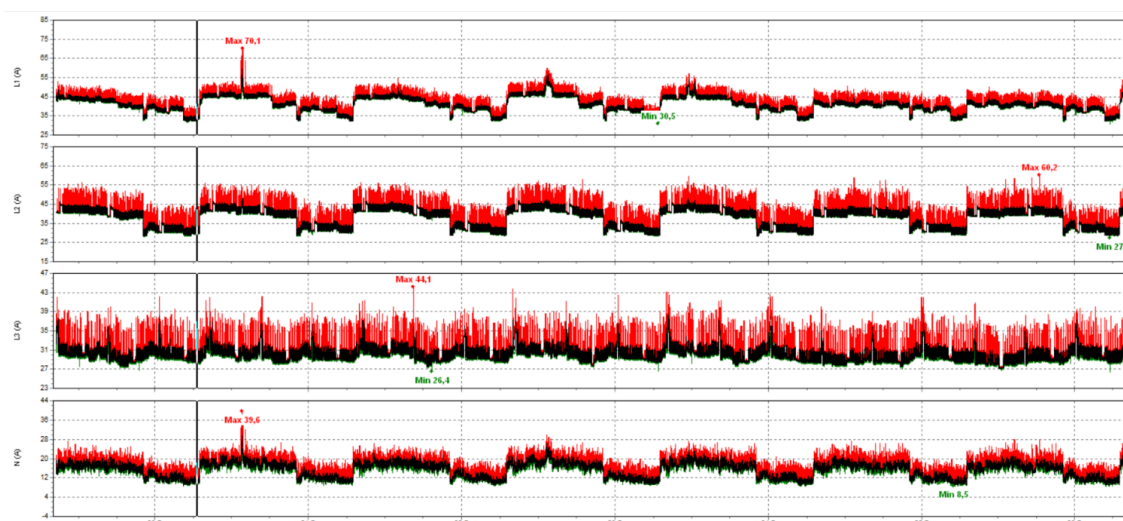


Kuva 32. Moottorin toiminnasta ja tehokkuudesta tulee värillinen kaavio. [14, s. 108]

Analysaattorin antamissa kaavioissa värit ilmaisevat moottorin hetkellistä tilaa (kuva 31 ja 32). Punaisella alueella olevat pisteet kertovat, jos moottori on alimitoitettu ja täten ylikuormituksen alla tai tilaneteen aiheuttaa harmoniset yliaallot tai epäsymmetria. Vihreällä alueella olevat pisteet ilmaisevat kaiken olevan kunnossa ja moottori toimii suunnitelmien mukaisesti. Mikäli pisteet ovat enemmän keskellä tai oikealla, on silloin häiriötä sähkönsyötössä. Kyseisellä analysointiohjelmalla voidaan tehdä suuriakin säästöjä välttyessä laiterikoilta, kun saadaan tarkkaa analyysia moottorien toiminnasta. Moottorien optimoimisella voidaan säästää kustannuksissa. Samoin kustannuksia voidaan pienentää, kun moottorit pystytään optimoimaan mahdollisimman tarkasti ennen laiterikoista johtuvia keskeytyksiä. [14, s. 102–108.]

6.2 Mittaustuloksien tulkinta

Espoossa sijaitsevan peruskoulun sähköpääkeskukselle asennettiin sähkönlaatuanalysointilaite aikavälille 19.8–26.8. Koulu on tietenkin kesälomalla, ja koulussa on vain pientä kulutusta, mutta mittauksilla saadaan jo suuntaa antavaa tietoa. Mittauspiste koululla toteutettiin pääkytkimeltä, jolloin kompensointilaitteisto on ohitettuna ja saadaan mittaustulokset suoraan syöttävältä verkolta. Koulun loistehon kompensointia hoitava kondensaattoriparisto oli huollon tarpeessa ja huollon yhteydessä todettiin laiteen olevan uusinnan tarpeessa. Pariston kondensaattoreiden kapasitanssit olivat heikentyneet merkittävästi, ja tämä vaikuttaa siihen, miten hyvin laite pystyy kompensoimaan verkkoa.

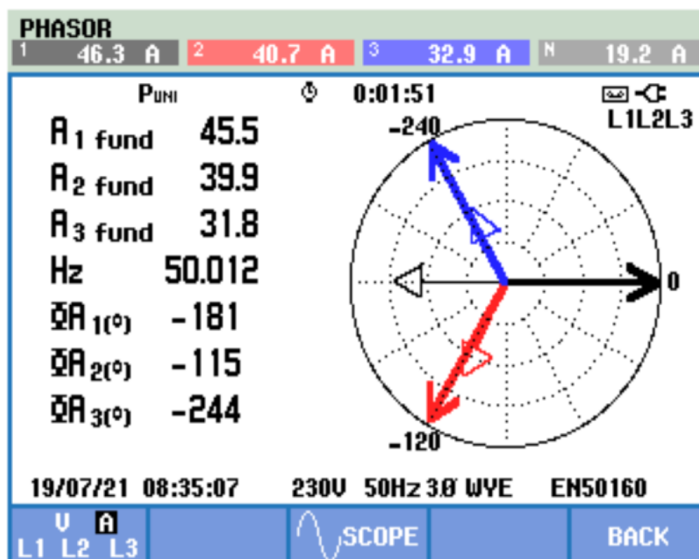


Kuva 33. Koululta mitatut maksimivirta-arvot kaikilta johtimilta. (L1 on 70,1 A L2 on 60,2 A L3 on 44,1 A ja noljavirta on 39,6 A)

Mitatuista virta-arvoista voidaan heti huomata epätasainen kuormitus vaiheiden välillä (kuva 33). Ensimmäisen vaiheen virtapiikki näkyy myös nollassa. Ensimmäisen vaiheen keskiarvokuormitus on 30 A–50 A, kun toisella vaiheella oleva kuormitus on 30 A–40 A ja kolmannella vaiheella on 27 A–35 A. Nollajohtimessa kulkevan virran keskiarvo on 10 A–22 A ja parhaimmillaan melkein 40 A. Tämä jo kertoo epätasaisesta kuormituksesta tai viallisesta kompensoinnista. Harmoniset yliaallot, etenkin kolmas yliaalto, aiheuttavat myös nollassa summatuvan virran.

Linearisella kuormituksella vaiheiden jännitteet ja virrat ovat samassa vaiheessa ja 120° asteen vaihesiirrossa. Analysointilaitekaapista kuvasta voidaan havaita

ensimmäisen vaiheen virran olevan jännitettä jäljessä. Jännitteiden osoitinpiirroksessa jännitteiden välissä esiintyy tasan 180° :n vaihe-ero (kuva 35).

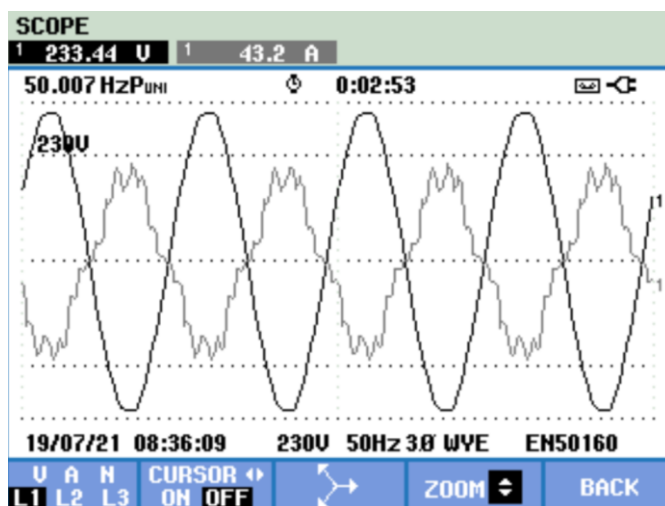


Kuva 34. Vaihevirtojen osoitinpiirros.

Virran ollessa jännitettä jäljessä on kuorma silloin kapasitiivista ja ottaa loistehoa verkosta. Mikäli kompensointipatteri olisi kunnossa pystyttäisiin vastaavanlaiset tilanteet välttämään. Kuvan 34 yläosassa nähdään myös virta-arvot vaihekohtaisesti.

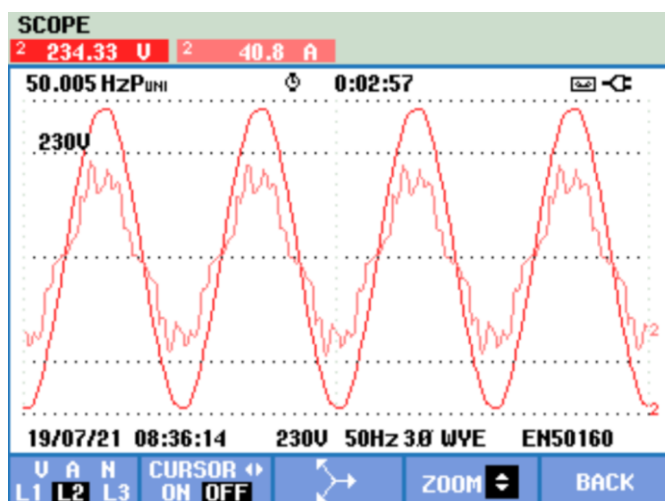
Virtasilmukan asentaminen

Huomioon otettava asia aina mittalaitteen kanssa toimiessa on tarkastettava, että virtasilmukat asennetaan oikeinpäin johtimen ympärille. Mikäli virtasilmukka asennetaan väärinpäin, antaa analysaattori silloin tasan 180° :n vaihe-eron. Kyseisessä kohteessa on ensimmäisen vaiheen virtasilmukka ollut väärinpäin, ja tästä johtuu kuvissa oleva vaihesiirto.



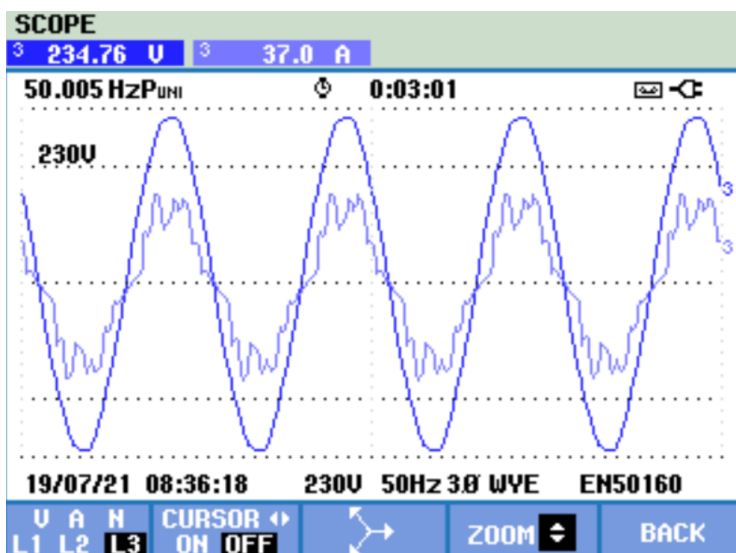
Kuva 35. Jännitteen ja virran siniaaltokäyrä on 180°:n erossa toisistaan. Tämä on syntynyt virheellisestä mittarin asentamisesta.

Virran ja jännitteen aaltokäyrästä voidaan havaita vaihesiirron lisäksi, myös virrankäyrän muoto (kuva 35). Verrattuna jännitteen tasaiseen siniaaltokuvioon on virran aaltokuvio rikkiäisempää. Rikkiäinen virta-aaltokuvio syntyy, kun kuormitukset pilkkovat ottamaansa virtaa, mutta kuvio noudattaa siniaallon muotoa.



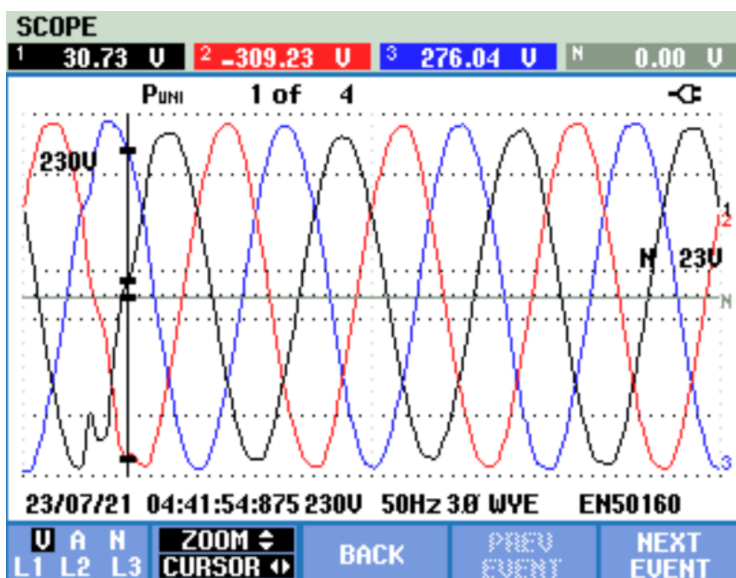
Kuva 36. Toisen vaiheen virta- ja jänniteaaltokuvio.

Toisella ja kolmannella vaiheella ei esiinny samanlaista muutosta virran- ja jänniteaaltokuvioon (kuva 36 ja 37). Ensimmäisellä vaiheella esiintyy selvästi enemmän kuormitusta ja todennäköisesti myös vaihtelevampaa kuormitusta verrattuna muihin vaiheisiin.



Kuva 37. Kolmannen vaiheen virta- ja jänniteaaltokuvio.

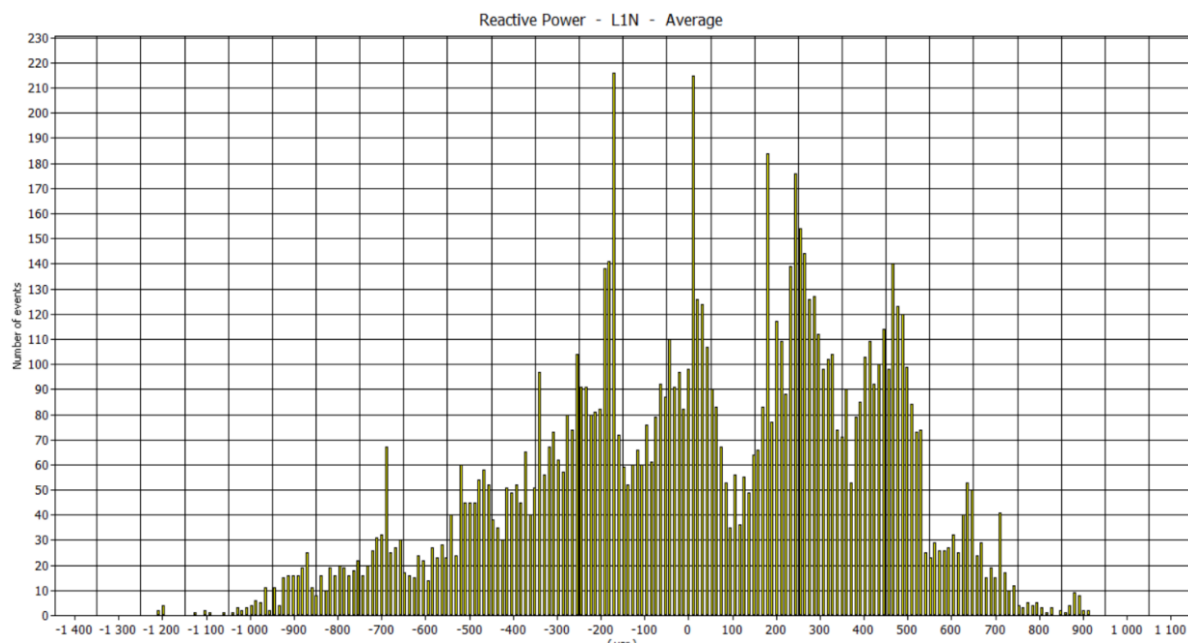
Jänniteaaltokuviossa on myös löytynyt tapahtuma (events), johon analysoijan piirturi on reagoinut (kuva 38). Tässä ilmiössä on tapahtunut jännitekuoppa ensimmäisellä vaiheella, mutta sekin on ollut lyhytkestoinen ja yksittäinen tapahtuma viikon mittausjakson aikana ja tämä on standardin rajojen sisäpuolella.



Kuva 38. Ensimmäisen vaiheen jännitekuoppa, ja toisella vaiheella esiintyy jännitealenema.

Virran ja jännitteen suhteen molemmissa näkyy alenema. Virranarvo on minimikohdassa tuolla hetkellä, kun jännitekuoppa ilmenee ja juuri ensimmäisellä vaiheella. Tästä yhtäläisyydestä voidaan päätellä vian olleen syötössä, eli verkon puolella on ollut lyhyt jännitekuoppa. Mikäli jännite olisi laskenut ja virranarvo olisi noussut, olisi tällöin syynä ollut häiriö kuormassa.

Mitatut arvot osoittavat kiinteistön kuluttavan loistehoa. Loistehon kaaviot saadaan mittarista näkymään pylväsdiagrammina, ja niistä voidaan nähdä vaihekohtainen kulutus kapasitiivisella ja induktiivisella loisteholla. Loistehon kulutus kiinteistössä on osittain selitettävissä ehjän kompensoinnin puutteella, mutta mittauksen perusteella saadaan varmuus laitteiston epäkunnosta ja sen uusimisen tarpeesta. Mikäli kompensointi olisi kunnossa, ei tästä mittauspisteestä pitäisi saada vastaavia arvoja.



Kuva 39. Ensimmäisen vaiheen loisteho pylväsdiagrammi y-akselilla on tapahtumien määrä ja x-akselilla on loistehon määrä vareina.

Pylväsdiagrammista näkee tapahtumien määrän (kuva 39). Diagrammissa alapuolella esitetty arvo on mitattu niin monta kertaa, kuin pystyakselin tapahtumat antavat lukuarvon. Näiden keskiarvo on ensimmäisellä vaiheella 32,22 kvar. Kolmen vaiheen välissä esiintyy suuria eroja toisiinsa. Toisella ja kolmannella vaiheella esiintyy enemmän negatiivista loistehoa, kun ensimmäisellä esiintyy enemmän positiivista. Tämä ei kuitenkaan ole hälyttävä tilanne, mutta se voi muuttua äkkiä, kun koulu alkaa taas ja kuormitukset kasvavat. Jos kompensointilaitteisto hajoaisi kokonaan, olisi tilanne huolestuttavampi.

Kohteesta mitattu loistehon kulutus saatiin myös aaltokuviona näkymään, minkä perusteella voitiin todeta, että kapasitiivisen ja induktiivisen loistehon kulutus kiinteistössä kesäloman aikana on jonkin verran kulutuksen puolella. Mikäli kiinteistö kuluttaa loistehoa kuten tässä tilanteessa, on syytä tarkistaa laitteistoa tai kompensointia.

LOGGER				
P _{UNI} 0:10:45				
Volt	L1	L2	L3	N
H1%f	100.0	100.0	100.0	100.0
Volt	L1	L2	L3	N
H3%f	0.4	0.4	0.7	6.1
Volt	L1	L2	L3	N
H5%f	0.7	0.8	0.9	3.1
Volt	L1	L2	L3	N
H7%f	1.3	1.1	1.3	6.9
19/07/21 08:44:01 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
UP DOWN	TREND	EVENTS 0	STOP START	

Kuva 40. Analysaattorin antamat tiedot yliaalloille.

Analysaattorin logger-ohjelmaa käyttämällä pystytään taltioimaan kaikki tarvittava data, jota mitattavasta kohteesta tarvitaan. Kuvasta 40 voidaan tuloksista päätellä, ettei kohteessa esiinny merkittäviä määriä yliaaltoja. Kolmatta yliaaltoa, joka yleisesti on haitallisin, esiintyy noin puolen prosentin verran, eikä viides tai seitsemäs yliaaltokaan ole merkittävän suuri.

Yliaaltojen osuus kohteessa voi muuttua merkittävästi, kun koulu tulee taas käyttöön syksyllä. Isoissa kiinteistöissä on kuitenkin ilmastointikoneita, jotka sisältävät moottoreita ja mahdollisesti taajuusmuuttajakin. Taajuusmuuttajat ovat lähinnä viidettä ja seitsemättä yliaaltoa tuottavia laitteita. Koulussa on käsityökonesaleja, ja keittiön laitteisto on ollut myös kesän aikana tauolla ja tästä syystä yliaalloissa voi esiintyä kasvamista.

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää loistehon kompensointia pienjänniteverkossa sekä siihen liittyviä asioita. Loistehon kompensointi on oleellinen osa pienjänniteverkon laatua. Loistehon kompensointia voidaan toteuttaa usealla erilaisella laitteella, näitä laitteita esiteltiin työssä. Kompensoimaton pienjänniteverkko aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia kuluttajalle sekä energialaitokselle. Yliaaltojen suodattaminen on myös hyvin oleellinen verkon laatuun sekä kustannuksiin liittyvä asia. Yliaaltojen suodattaminen, loistehon kompensointi sekä sähkönlaatuun liittyviä asioita ja ilmiöitä avattiin työssä monipuolisesti.

Työhön kerättiin kirjallisuutta ja muuta lähdeainestoa, joita käytettiin hyväksi työn kirjoittamiseen. Teksteistä, laitteisiin tutumisesta sekä työpaikkaohjaajan opastuksista tehdystä yhteenvedosta onnistuttiin luomaan tämä kokonaisuus.

Nykyään kun sähkölaitteiden määrä kasvaa kiinteistöissä, tulevat sähkönlaatuasiat enemmän ja enemmän esille. Vanhoja laitteita, moottoreita ja valaistuksia on vielä paljon suurissa kiinteistöissä ja näitä päivitetään esim. ledeiksi jatkuvasti. Uusien valaistuksien elektronisten liitäntälaitteiden myötä laitekohtainen kompensointi vähenee, mutta kiinteistökohtainen kompensointi ei. Tästä syystä on hyvä olla ymmärrystä loistehon kompensoinnin tärkeydestä ja sen merkityksestä.

Loistehon kompensointiin ja sähköverkkoon liittyvät laatuasiat tulivat minulle suurimmaksi osaksi uusina asioina ja tästä syystä työ oli mielenkiintoinen toteuttaa. Työn aloittaminen oli alussa tahmeaa, koska asia oli uusi ja opetettavaa ja ymmärrettävää oli paljon. Työ antoi minulle haasteita koko aiheen alalta alusta loppuun. Haasteita tuotti suurimmaksi osaksi asioiden omaksuminen ja niiden ymmärtäminen. Olihan kaikki asiat opetettava ja tutkittava läpi niin, että ymmärrys kasvaa siitä, mitä kirjoittaa ja mistä puhuu. Kesän aikana tietoja haaliessani ja mittalaitteen käyttöä opetellessani riitti tekemistä.

Kehittämistä tulevaisuutta ajatellen voisi olla kompensoinnin mitoittamiseen liittyvät asiat. Kompensoinnin mitoittamiseenkin liittyy monia asioita, joita täytyy ottaa huomioon mittaamisen lisäksi. Kompensointilaitteiden käyttöä käytännössä voisi myös opetella, minkä myötä saisi uutta perspektiivi laitteen toiminnasta. Vertailun vuoksi mittaukset voisi suorittaa uudelleen, kun koulu on täydellä kapasiteetilla käytössä.

Lähteet

- 1 Valtonen, Martti ja Lehtovuori, Anu. 2011. Piirianalyysi osa 1 tasa- ja vaihtovirtapiirien analyysi. Helsinki: Unigrafia Oy.
- 2 Orrberg, Matti. 2020. Loistehon kompensointi on kiinteistölle hyvä investointi. Sähköalan-lehti 1–1/2020, s. 18–21.
- 3 Mäkelä, Mikko; Soininen, Lauri; Tuomola, Seppo ja Öistämö, Juhani. 2019. Tekniikan kaavasto. Tampere: Tammertekniikka / Amk-kustannus Oy.
- 4 Loistehon kompensointi ohje. 2018. Verkkoaineisto. Kymenlaakson sähköverkko Oy.
<<https://www.ksoy.fi/content/download/4298/48684/file/Loistehon+kompensointiohje.pdf>>. 7.10.2018. Luettu 29.6.2021
- 5 ST-kortisto 52.15. 2016. Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa 15.12.2016. Espoo: Sähköinfo ry.
- 6 Eronen, Mikko; Hietalahti, Lauri ja Pakonen, Pertti. 2018. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo ry.
- 7 ST-kortisto 52.16. 2014. Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 1000 V:n pienjänniteverkossa 15.9.2014. Espoo: Sähköinfo ry.
- 8 Hietala, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Vantaa: Hansaprint Oy Direct.
- 9 Korpinen, Leena; Mikkola, Marko; Keikko, Tommi ja Falck, Emil. Yliaalto-opus.
<<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>>. Luettu 14.7.2021
- 10 SFS-EN 50160. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 2010. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry
- 11 ST-kortisto 52.51.04. 2006. Sähkön laatu, vinokuormitus, nollajohdin ja transienttiylijännitteet. 15.5.2006. Espoo: Sähköinfo ry.

- 12 ABB. 2000. TTT-käsikirja. Sähkönlaatu.
<http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/04_0_S%84hk%94n%20laatu.pdf>. Luettu 12.7.2021.
- 13 430 II-sarjan käyttöohje. 2012. 3-vaiheinen energia- ja sähkönanalysaattori.
Fluke Oy. Luettu 20.7.2021.
- 14 430 II-sarjan käyttöopas. 2016. Käyttökoulutus. Fluke Oy. Luettu 28.7.2021.