

Henri Aunola

Teollisuuskiinteistön loistehonkompensointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

27.5.2013

Tekijä Otsikko	Henri Aunola Teollisuuskiinteistön loistehonkompensointi
Sivumäärä Aika	30 sivua 27.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkövoimatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähköinsinööri
Ohjaajat	Lehtori Sampsa Kupari Sähköasentaja Harri Aunola
<p>Insinööriyössä suoritettiin teollisuuskiinteistön loistehon kompensointia varten tehtävät mittaukset. Mittauksissa selvitettiin loistehon kulutuksen määrä ja yliaaltojen suuruudet sekä vanhan käyttämättömän kompensointijärjestelmän kunto. Kompensointilaitteen asentamisen jälkeen mitattiin toteutunut loistehon kompensointi ja yliaaltojen suuruuksien muutokset.</p> <p>Työssä todettiin kompensointijärjestelmän hankinnan kannattavuus loistehon kompensoinnin osalta sekä yliaaltojen vähenemisen vaikutus. Vanhan kompensointijärjestelmän käytämisen kannattamattomuus tuli todettua mittauksien avulla. Loistehon kulutus pienentyi huomattavasti järjestelmän asennuksen jälkeen, eikä sähköyhtiö laskuttanut loistehon kuluksesta työn jälkeen. Yliaaltojen suuruudet pienentyivät entisestään estokelaparistojen asennuksen myötä. Yliaaltojen vaikutuksia ei ole havaittu kiinteistössä aiemmin, eikä mittauksien perusteella jatkossakaan tule ongelmia.</p> <p>Lopputuloksena työn suorittamisesta tuli toimiva ja taloudellisesti kannattava järjestelmä, jonka laajennus mahdollisuuden on otettu huomioon. Työn päätavoitteen oli loistehomaksuista eroon pääseminen ja tämä tavoite toteutui.</p>	
Avainsanat	Loisteho, Kompensointi, Yliaalto

Author Title	Henri Aunola Compensation of the Reactive Power in Industrial Property
Number of Pages Date	30 pages 27 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Sampsa Kupari, Senior Lecturer Harri Aunola, Electrician
<p>In the thesis, measurements about the reactive power compensation in industrial property were performed. In the measurements, consumption of the reactive power and dimension of the harmonics were clarified. Also the condition and how the old compensation system works was tested. Following the compensation appliance installation, real compensation of reactive power and changes of the harmonics were measured.</p> <p>The cost-effectiveness of acquiring compensation systems concerning reactive power compensations and the effect of the reduced harmonics was discovered. Based on the measurements, it was discovered that the old compensation systems is not cost-effective whit the new systems. When the compensation system had been installed, consumption of the reactive power decreased and the electric utility did not invoice about the reactive power. The extent of the harmonics was lower with filtered capacitor banks. The effect of the harmonics has not been observed before and based on measurements, there should not be any problems with it in future.</p> <p>The result of the thesis is a practical and cost-effective system. The solutions take into account the possibility of extensions. The primary aim was to get rid of paying for reactive power and this target was accomplished.</p>	
Keywords	reactive power, compensating, harmonics

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Loisteho	2
2.1	Loistehon käsitteet	2
2.2	Induktiivinen loisteho	2
2.3	Kapasitiivinen loisteho	3
2.4	Loistehomaksut	3
3	Yliaallot	4
3.1	Yliaaltojen käsitteet	4
3.2	Yliaaltojen muodostuminen	5
3.3	Yliaaltojen vaikutukset	6
4	Kompensointi	7
4.1	Kompensoinnin tarkoitus	7
4.1.1	Loistehon kompensointi	7
4.1.2	Yliaaltojen suodattaminen	8
4.2	Kompensoinnin vaihtoehdot	8
4.2.1	Tahtigeneraattori	8
4.2.2	Sarjakompensointi	8
4.2.3	Rinnankompensointi	8
5	Ilman kompensointia	11
5.1	Lähtötilanne ilman kompensointia	11
5.2	Mittaukset ilman kompensointia	11
5.2.1	Sähkötehon kulutus	12

5.2.2	Yliaaltojen määrä	13
5.3	Yhteenveto alkuperäisestä järjestelmästä	14
6	Kompensointi teollisuuskiinteistössä	14
6.1	Teollisuuskiinteistön sähköjärjestelmä	14
6.2	Vanha kompensointijärjestelmä	15
6.2.1	Vanhan kompensointijärjestelmän mittaukset	15
6.2.2	Päätelmät vanhasta kompensointijärjestelmästä	16
6.3	Uusi kompensointijärjestelmä	16
6.3.1	Tarvittavan loistehon kompensoinnin laskenta	16
6.3.2	Kompensointiparistot	17
6.3.3	Kompensointijärjestelmän valinta	17
6.3.4	Loisteho mittaukset	20
6.3.5	Yliaaltomittaukset	21
6.3.6	Loistehon kompensoinnin toteutuminen	23
6.3.7	Yliaaltojen suodattamisen toteutuminen	25
6.3.8	Jännitteen ja virran muutokset	26
7	Takaisinmaksuaika	29
8	Yhteenveto	29
	Lähteet	30

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä esitellään toteutettu loistehonkompensointi teollisuuskiinteistöön, jonka toiminta on laajentunut vuosien varrella, ja tästä syystä myös sähkökulutus on kasvanut. Kiinteistöön on toiminnan laajennuttua lisääntynyt sähkökulutuksen kannalta erityisesti oikosulkumoottoreita, joiden pätötehon kulutuksen lisäksi loistehon kulutus on kasvanut. Näin ollen sähkölaitoksen veloittamat loistehomaksut ovat kohonneet huomattavasti.

Työ on toteutettu yhteistyössä Erikoishöyläys Oy:n kanssa. Yritys on erikoistunut puu- alateollisuuteen. Yrityksellä on kaksi toimipaikkaa, joista kyseinen tehtävä on suoritettu Lapinjärvellä sijaitsevalla entisen Käkikosken Saha Oy:n kiinteistössä. Sähköasennus Harri Aunola Tmi suoritti kiinteistöön kohdistuneen sähköasennustyön. Työssä selvitetiin vanhan kompensointijärjestelmän nykykunto ja kompensoinnin riittävyys. Kompensoinnin uusimisen myötä tehtiin sähkönlaatu mittaukset kompensointia ennen ja jälkeen.

Sähkölaitos veloittaa suuresta loistehonkulutuksesta, koska se aiheuttaa ylimääräistä kuormitusta sähkönjakeluverkkoon ja näin ollen pienentää voimalinjojen ja muuntajien siirtokapasiteettia.

Kompensointijärjestelmällä voidaan kompensoida tarvittava loisteho sähkölaitteille siten, ettei sähköverkosta tarvitse kuluttaa loistehoa eikä näin ollen maksaa loistehomaksuja. Onnistuneen kompensoinnin ansiosta voi järjestelmän takaisinmaksu hoitua ajallisesti hyvinkin nopeasti.

Kiinteistön sähköjärjestelmässä saattaa esiintyä yliaaltoja, jotka voivat johtaa sähkölaitteiden vaurioitumiseen. Tästä syystä yliaaltojen mittaaminen ja niiden vaimentaminen kompensointijärjestelmän sisältämällä estokelapariistoilla on suotavaa. Yliaaltoja muodostuu elektroniikkalaitteiden määrän suuren kasvun takia. Kyseisessä kiinteistössä tämä tarkoittaa taajuusmuuttajien lisääntymistä moottorikäytöissä.

2 Loisteho

2.1 Loistehon käsitteet

Loisteho on matemaattinen käsite, joka käytännössä katsoen muodostuu jännitteen U ja virran I vaihe-erosta φ . Puhtaasti resistiivisellä kuormalla vaihe-eroa ei ole, vaan jännitteen ja virran sinimuotoinen suuruus on samalla tasolla toisiinsa nähden. Puhtaasti resistiivinen kuorma tarkoittaa esim. sähkövastuksen kuormaa, joka on puhdasta pätötehoa P . Todellisuudessa sähkökulutuksessa esiintyy aina loistehon Q kulutusta, johtuen mm. nykyaikana enenevässä määrin käytettävistä elektronisista laitteista ja led-valaistuksesta sekä jakeluverkon sähkömagneettisesta induktiosta. Ylivoimaisesti suurin osa loistehon kulutuksesta Suomessa aiheutuu oikosulkumoottoreiden käytöstä, etenkin teollisuudessa.

Loistehon kulutus aiheuttaa jakeluverkossa siirtohäviöitä, koska se lisää kaapeleiden ja muuntajien kuormitusta pätötehon kulutuksen lisäksi. Näin ollen jakeluverkon rakennuskustannukset nousevat kun joudutaan huomioimaan loistehon kulutus kaapeleiden mitoituksessa. Lisäksi loistehon kulutus aiheuttaa sähkölaitteistoissa tarpeetonta lämpenemistä, joka saattaa lyhentää niiden elinikää. Myös jännitteen alenema johtuu osaksi loistehon kulutuksesta, joka saattaa aiheuttaa ongelmia sähkölaitteistoille, jotka ovat herkkiä jännitteen vaihteluille.

2.2 Induktiivinen loisteho

Loistehoa on kahdenlaista, induktiivista Q_{ind} ja kapasitiivista Q_{kap} loistehoa. Induktiivinen loisteho muodostuu induktiivisesta kuormasta, jota aiheutuu käämien ja muiden kela-komponenttien luomasta magneettikentästä. Induktiivinen loisteho aiheuttaa virran muutoksen hidastumista ja näin ollen virta jää jännitteestä jälkeen, jolloin virran ja jännitteen välille muodostuu vaihe-ero. Vaihe-eron aiheuttama induktiivisen loistehon kulutus joudutaan ottamaan siirtoverkosta tai tuottamaan paikallisesti kulutuspuolelta läheisyydessä.

Induktiivista loistehoa kuluu sähkömoottoreissa käämien magnetointiin, jolla muodostetaan tarvittava magneettikenttä pätötehon siirtoa varten. Käämien magnetointi kattaa suurimman osan induktiivisen loistehon kulutuksesta teollisuuskiinteistöissä.

Kotitalouksissa esiintyvä loistehonkulutus on myös suurelta osin induktiivista loistehoa, jota esim. elektroniset laitteet tarvitsevat, joskin huomattavasti pienemmässä mittasuhteessa verrattuna teollisuuteen. [1.]

2.3 Kapasitiivinen loisteho

Kapasitiivinen loisteho on induktiivisen loistehon käänteinen suure. Kapasitiivinen loisteho muodostuu kapasitiivisesta kuormasta, jota aiheuttaa sähköverkkoon kytkettävien kondensaattoreiden muodostaman jännitekentän vaikutuksesta. Kapasitiivinen loisteho aiheuttaa jännitteen muutoksen hidastumista, ja näin ollen jännite on virrasta jäljessä, jolloin virran ja jännitteen välille muodostuu vaihe-ero. Kapasitiivisen loistehon suuruus on normaalisti sähkökuluttajalla hyvin pieni, ja sen vaikutukset ovat olemattomia jakeluverkon vaikutuksiin nähden.

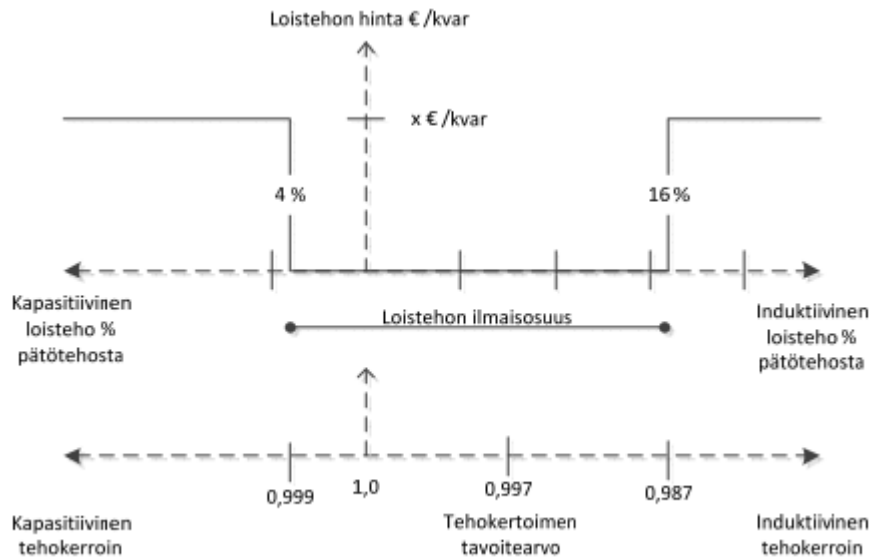
Kapasitiivista loistehoa kuluttavat laitteet kotitalouksissa sisältyvät lähinnä elektroniikan komponentteihin, joiden kondensaattorit kuluttavat kapasitiivista loistehoa. Yleisesti ottaen loisteho kompensoituu laitteen sisäisesti eikä aiheuta jakeluverkkoon ylimääräistä kuormitusta. Teollisuudessa käytettävien kompensointi kondensaattoreiden väärin tehdyt mitoitus ovat suurin syy liialliseen kapasitiiviseen loistehoon. [1.]

2.4 Loistehomaksut

Loistehomaksu on tyypiltään sanktiomaksu, jonka avulla jakeluverkkoyhtiö ohjaa asiakkaitaan kompensoimaan loistehonsa silloin, kun se on kokonaistaloudellisesti järkevää. Maksulla pyritään ohjaamaan asiakkaita siten, että liittymiskohdan loisteho pysyisi verkkoyhtiön määrittämällä optimaalisella toiminta-alueella (kuva 1). Yleinen tavoite loistehon kulutukseen, on hieman alikompensoitu verkko, jolloin tehokerroin $\cos \varphi = 0,98$.

Loistehon hinnoittelun määrää jakeluverkkoyhtiö (kuva 1), joka määrittää induktiivisen ja kapasitiivisen loistehon ilmaisosuuden. Ilmaisosuuden määrittämän loistehon määrän jakeluverkko on velvollinen toimittamaan kuluttajalle, mutta rajan yli menevän loistehon kulutuksen jakeluverkkoyhtiö voi veloittaa asiakkaalta sähkölaskussa kuukausittain. Loistehon kulutusta mitataan ja laskutetaan käyttöpaikkakohtaisesti, ja sen

suuruus määräytyy kuukausittain kuukauden suurimmasta tunnin jaksossa mitatusta loistehohuipusta. Mitatusta loistehohuipusta vähennetään loistehon ilmaisosuus. Loistehomaksua voidaan periä, kun liittymän pääsulake on vähintään 63 A. [2.]



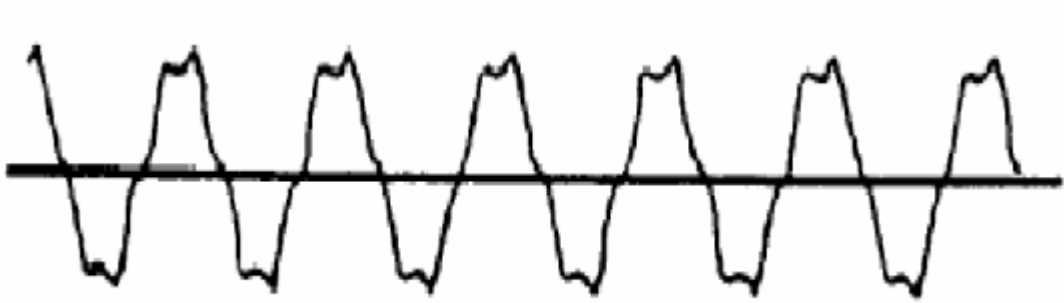
Kuva 1. Loistehon hinnoitteluperiaate [2.]

Vapaan induktiivisen loistehon osuus Kymenlaakson Sähkö Oy:llä on 20 % laskutuspä-
tötehosta.

3 Yliaallot

3.1 Yliaallojen käsitteet

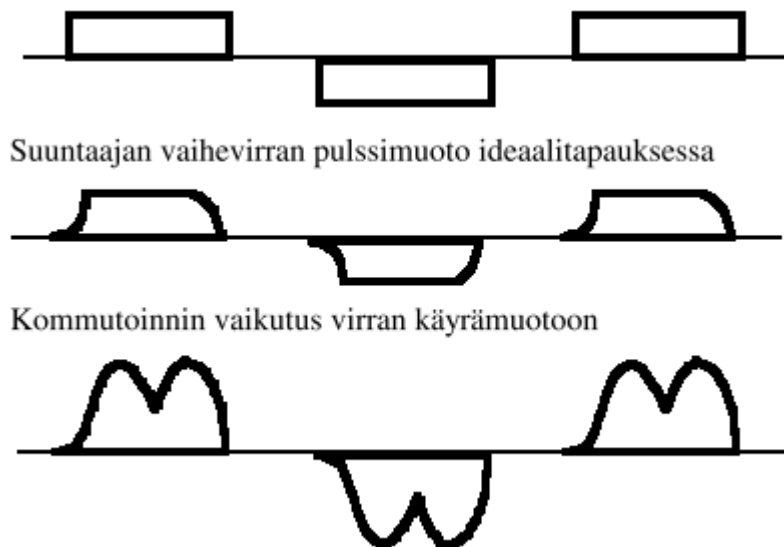
Yliaallot ovat sinimuotoisen vaihtojännitteen ja -virran monikertoja, jotka muodostuvat epälineaaristen kuormitusten vaikutuksista. Epälineaariset kuormat käsittävät pääosin elektroniset laitteet, joiden verkosta ottama virta on epäsinimuotoista. Vaihtojännitteen ja -virran monikerrat ovat korkeammilla taajuuksilla olevia siniaaltoja, jotka summautu-
essaan 50 Hz:n taajuudella olevaan sinimuotoiseen jännitteeseen ja virtaan, aiheuttavat epätasaisuuksia sähköverkkoon (kuva 2). [3.]



Kuva 2. Yliaaltojen vaikutukset sinijännitteeseen [5.]

3.2 Yliaaltojen muodostuminen

Yliaallot ovat ajan myötä lisääntyneet, mikä johtuu pääosin elektroniikkalaitteiden lisääntymisestä. Elektroniikassa käytetään puolijohdekomponentteja, joiden toiminnan perusedellytys on virran kulkemisreittien ohjaaminen komponentilta toiselle. Tätä toimenpidettä kutsutaan kommutoinniksi (kuva 3). Kommutoinnin hetkellä verkossa tapahtuu pieniä pulssimaisia sykäyksiä, joiden seurauksena muodostuu sähköverkon taajuutta suurempia taajuuksia, jotka käsitellään yliaaltoina.



Kuva 3. Kommutoinnin vaikutus pulssimuotoon [3]

Suurimpia yliaaltojen tuottajia ovat taajuusmuuttajat, joissa käytetään tehoelektronikan komponentteja. Taajuusmuuttajissa kulkevien virtojen määrät ovat huomattavasti suurempia kuin tavallisessa kotitaloudessa käytössä olevilla yksivaiheisilla elektroniikan laitteilla.

Yksivaiheisista elektroniikan laitteista mm. tietokone on verkon kannalta vaikea laite, koska sen ottama virta on hyvin epälineaarinen ja se aiheuttaa suuria käynnistysvir-tasäyksiä. Tietokoneen käyttämä tasasähkö tasasuunnataan tavallisesti yhdestä vaiheesta ja sen harmonisten komponenttien määrä on suuri. [3.]

3.3 Yliaaltojen vaikutukset

Sähkökuluttajan yliaaltoja tuottavat laitteet saattavat vaikuttaa oman sähköverkon lisäksi myös muiden sähkökäyttäjien sähköjärjestelmiin. Yliaallot aiheuttavat sinimuotoisen vaihtojännitteen vääristymiä, mikä saattaa vahingoittaa erityisesti herkempiä laitteita, jotka vaativat mahdollisimman puhdasta vaihtojännitettä. Yliaaltojen muodostuminen vaikuttaa myös kaapeleiden ja komponenttien liialliseen lämpenemiseen.

Yliaallot vaikuttavat myös jakeluverkon muuntajissa ja siirtolinjoissa. Muuntajien tyhjäkäyntihäviöt lisääntyvät yliaaltojen vaikutuksesta, ja virrassa mahdollisesti esiintyvien tasakomponenttien vaikutuksesta muuntajan magneettinen kyllästyminen on mahdollista. Muuntajan kuormitushäviöihin vaikuttaa suuresti kuormitusvirran yliaallot, jonka takia muuntajan resistanssin virtalämpöhäviöt kasvavat. Käämien resistanssi suurenee korkeammilla taajuuksilla aiheutuvasta virranahdosta.

Oikosulkumoottoreihin kohdistuvat yliaallot vaikuttavat merkittävästi moottoreiden virtalämpöhäviöiden kasvuun etenkin tyhjäkäynnillä, jolloin moottoreiden hyötysuhde laskee häviöiden kasvaessa. Yliaaltojen vaikutukset aiheuttavat myös heilurimomentin muodostumista ja tällöin voi syntyä mekaanisia vaurioita ja käytön häiriöitä.

Yksivaiheisten laitteiden muodostamat yliaallot voivat olla suuri rasite liittymiskaapelin nollajohtimelle. Symmetrisen kolmivaihekuormituksen tapauksessa nollajohtimessa ei kulje virtaa. Jos järjestelmässä on paljon yksivaiheista kuormitusta, nollajohtimessa kulkeva yliaaltovirta saattaa olla jopa 1,7 kertainen vaihevirtaan verrattuna.

3. Yliaaltojen summautuminen nollajohtimeen aiheuttaa nollajohtimen kuormituksen kasvamista ja eristeiden vaurioitumista. [3.]

4 Kompensointi

4.1 Kompensoinnin tarkoitus

Kompensoinnin pääasiallisena tarkoituksena on poistaa sähköntilaajalle tulevat loistehomaksu. Kompensoinnilla pystytään vähentämään verkkoyhtiölle aiheutuvia siirtohäviöitä loistehon tarpeen laskettua, ja näin ollen jakeluverkon kuormitus ei ole niin suurta. Kompensointijärjestelmän ominaisuuksia hyödyntämällä voidaan järjestelmästä poistaa myös haitallisia yliaaltoja, jotka aiheutuvat epälineaarisista kuormituksista esim. tietokoneet ja tasasuuntaajat.

4.1.1 Loistehon kompensointi

Loistehon kompensoinnissa on pääperiaate saada induktiivisen loistehon kulutus kompensoitua vastaavalla määrällä kapasitiivista loistehoa. Ideaalitulannetta on lähes mahdotonta toteuttaa kuormituksen vaihtelun seurauksena, mutta mahdollisimman hyvin suunnitelluilla ja laadukkailla ratkaisuilla päästään tarvittavan lähelle tavoitetta. Suunnittelussa tärkeintä on loistehon kulutuksen selvittäminen maksimitilanteessa ja mahdollisesti tulevaisuudessa kasvavan kulutuksen huomioiminen. Loistehon kulutuksen suuruuden huomattavat vaihtelut ovat hyvin hankalia ottaa huomioon kompensointijärjestelmää suunniteltaessa, jolloin on suositeltavaa panostaa kompensointijärjestelmän toiminnan monipuolisuuteen.

Monipuolisessa kompensointijärjestelmässä automaattiohjaus huolehtii kompensoinnin suuruudesta. Moniportaisen automatiikan avulla pienetkin loistehon muutokset huomioidaan usean eri kondensaattoripariston suuruuden muodostamien kombinaatioiden yhteisvaikutuksella.

4.1.2 Yliaaltojen suodattaminen

Kompensoimalla voidaan toteuttaa myös yliaaltojen suodattamista. Yliaaltojen suodattaminen tapahtuu joko estokelaparistoilla, suodatinparistoilla tai aktiivisuodattimilla. Estokelaparistot on kompensoinnin perusratkaisu, kun verkossa on loistehon kulutusta ja yliaaltoja aiheuttavia sähkölaitteita. Suodatinparistojen käyttämistä suositetaan erityisesti verkossa, jossa yliaaltopitoisuus on suuri ja aktiivisuodattimia silloin, kun verkon kuormitukset ja yliaaltopitoisuudet vaihtelevat nopeasti. [2.]

4.2 Kompensoinnin vaihtoehdot

4.2.1 Tahtigeneraattori

Kompensointi voidaan toteuttaa tahtigeneraattorilla, jolla säädetään magnetointivirtaa loistehon tarpeen mukaisesti. Suurentamalla tahtigeneraattorin magnetointivirtaa saadaan tuotettua enemmän loistehoa ja vastaavasti vähentämällä magnetointivirtaa loistehon tuottaminen pienenee. Tahtigeneraattorin käyttö loistehon tuotantoon on kannattavaa, jos kiinteistön sähköjärjestelmässä on käytössä tahtimoottori.

4.2.2 Sarjakompensointi

Sarjakompensointi on tarkoitettu suurjännitelinjoille. Se toteutetaan kytkemällä kondensaattoreita suurjännitelinjojen kanssa sarjaa, ja näin ollen saadaan pienennettyä johdon reaktanssia, jännitehäviöitä ja siirtohäviöitä. Sarjakompensointi on mekaanisesti hyvin vaativan suuren kokonsa vuoksi, eikä sen käytännöllinen tarkoitus ole loistehon kompensointi.

4.2.3 Rinnankompensointi

Kompensoinnin yleisin käytössä oleva tapa on rinnankompensointi. Rinnankompensointi toteutetaan kytkemällä kondensaattoriparistoja kuormituksen rinnalle tuottamaan kapasitiivista loistehoa sähkölaitteen tarvitsema määrä. Rinnankompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti kompensoimalla koko kiinteistön sähköjärjestelmä jakelupisteestä tai paikallisesti kompensoitavan laitteen yhteydessä. Paikallinen kompensointi on käytännöllinen erityisesti silloin, kun sähköjärjestelmässä ei ole muita loistehoa tarvitsevia

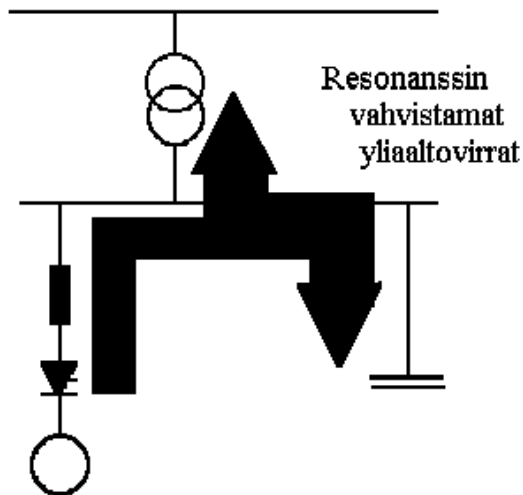
sähkölaitteita mm. loisteputkivalaisimet. Paikallisen kompensoinnin huono puoli on erityisesti kytkentäpiikit, jotka voivat aiheuttaa ongelmia kuormituksen äkillisen muutoksen takia.

Käytännöllisin tapa toteuttaa rinnankompensointi suuren loistehon kulutuksen omaavassa sähköjärjestelmässä, on asentaa kondensaattoriparistoja kiinteistön sähkönjakelun yhteispisteeseen. Tällöin on huomioitava tarvittavan loistehon määrä mahdollisimman tarkasti, jottei verkkoon aiheudu ylikompensointi ja näin ollen verkkoyhtiöllä on mahdollisuus veloittaa kapasitiivisen loistehon kulutuksesta.

Rinnankompensoinnissa on useita toteutusvaihtoehtoja:

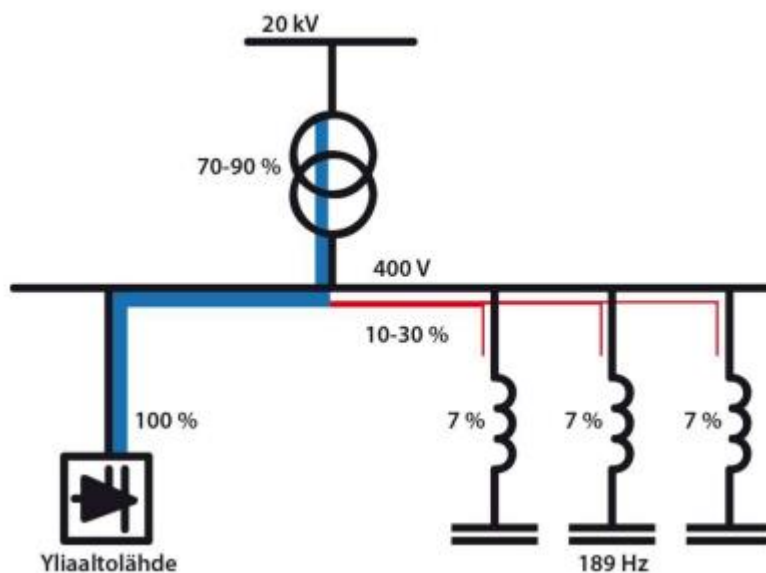
- kondensaattoriparistot
- estokelaparistot
- aktiivisuodatin.

Tavallisten kondensaattoriparistojen käyttäminen nykyaikaisissa kompensointijärjestelmissä ei ole suotavaa. Sähköverkossa käytössä olevien elektronisien järjestelmien kuten taajuusmuuttajien aiheuttamat virtayliaallot vahvistuvat kondensaattoreiden ja kuorman induktanssien välille syntyvässä resonanssipiirissä (kuva 4). Vaikka järjestelmässä ei olisi käytössä yliaaltojen aiheuttajia, niitä voi tulevaisuuden myötä tulla käytäntöön ja kompensointijärjestelmä ei välttämättä enää ole käyttökelpoinen. Jos kompensointijärjestelmä käsittää vain paikallisesti jonkin loistehoa tarvitsevan koneen tai koneryhmän, kondensaattoriparistojen käyttö on ymmärrettävää.



Kuva 4. Kondensaattoreilla kompensointi yliaaltoja sisältävässä verkossa [3]

Estokelaparistot ovat perusvarma ratkaisu loistehon kompensointiin kun kuormituksessa ilmenee loistehon tarvetta ja sähköjärjestelmässä esiintyy yliaaltoja. Estokelaparistot käsittävät kondensaattoreiden sarjaan kytkettävät rautasydämiset kuristimet, joiden induktanssin suuruus määritetään valmistajan toimesta niin, että se muodostaa resonanssitaajuuden kondensaattorin kapasitanssin kanssa (kuva 5). Estokelaparistot vähentävät myös päälle kytkennässä aiheutuvien virtapiikkien suuruutta kuristimien ansiosta.



Kuva 5. Kompensointi estokelaparistoilla, viritystaajuus 189 Hz [6]

Aktiivisuodattimen pääasiallinen käyttötarkoitus on kompensoida verkon yliaaltoja. Sähkökäyttäjä, jolla on suuri määrä elektroniikalla toimivia laitteita, mutta ei niin suurta loistehonkulutusta, on suositeltavaa ottaa käyttöön aktiivisuodattimien avulla toteutettavan yliaaltojen kompensoinnin. Yliaaltojen kompensointi tapahtuu verkossa esiintyvien yliaaltojen vastakkaissuuruisien yliaaltojen tuottamisella. [4.]

5 Ilman kompensointia

5.1 Lähtötilanne ilman kompensointia

Ilman kompensointia tehdyt mittaukset toteutettiin sähköverkon kuormituksen ollessa hieman tavallista pienempi, koska osa kiinteistön toiminnasta ei ollut käytössä. Maksimiarvon saavuttamiseksi tarvitaan monien sähkölaitteiden yhtäaikaista kuormittamista, mikä on kyseisessä kiinteistössä harvinainen tilanne.

5.2 Mittaukset ilman kompensointia

Mittauksissa käytettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun Fluke 434 Analysointia (kuva 6). Mittaukset suoritettiin pääkeskuksen nousukaapelin johtimiin kytkettävillä virtamittausmuuntajilla ja jännitemittauspihdeillä. Mittauksissa kuormitus vaihteli hieman, pääosin kolmivaihemootoreiden käyttämisen seurauksena. Mittaushetkellä yksivaiheista kuormitusta ei ollut käytössä kuin purkausvalaisimien osalta. Mittauksissa saatiin selville kuitenkin tärkeimmät kompensoinnin toteuttamisen tarpeellisuutta puoltavat tulokset.



Kuva 6. Mittalaitteen virtamittausmuuntajien asentaminen nousukaapeliin

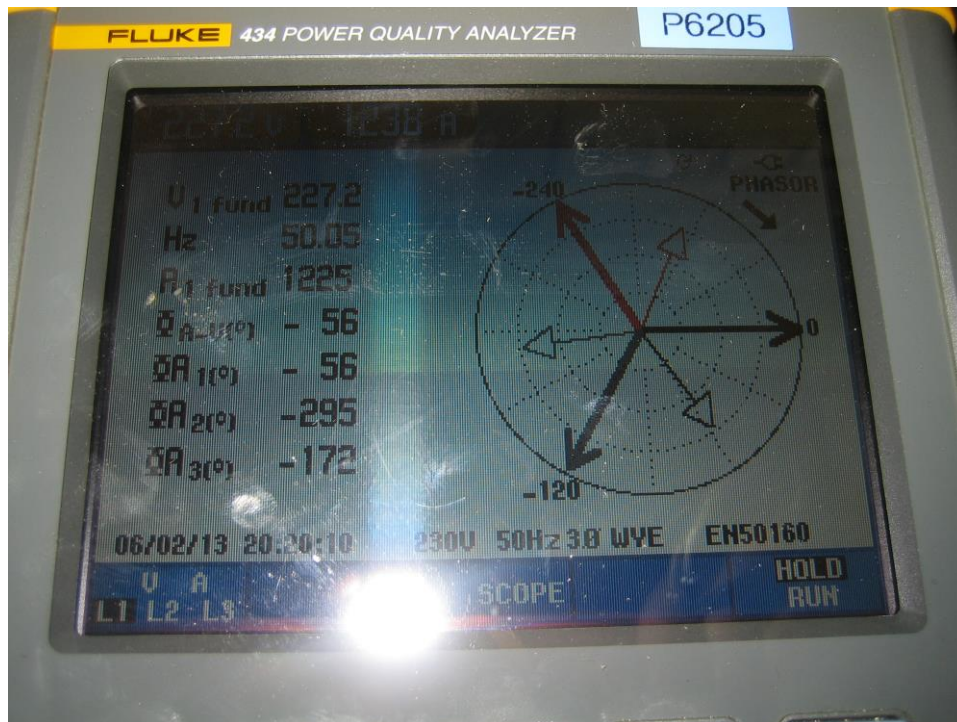
5.2.1 Sähkötehon kulutus

Mittauksissa havaittiin kulutuksen olevan hieman yli puolet päiväsaikaan tapahtuvaan maksimikuormitukseen verrattuna (taulukko 1). Loistehon kulutus on huomattavan suurta, mikä johtuu siitä, että käytössä on vanhoja kolmivaihemoottoreita. Jännitteen alenema on syytä huomioida, sillä kuormituspisteessä jännitteen alenema on mahdollisesti vielä suurempi kuin pääkeskuksessa.

Taulukko 1. Sähkötehot ennen kompensointia

	L1	L2	L3	TOTAL
kW	15,49	16,29	16,88	48,67
kVA	27,74	27,86	27,53	83,12
kVAr	23,01	22,59	21,74	67,34
PF	0,55	0,58	0,61	0,58
cos φ	0,56	0,58	0,61	
Arms	123,7	125	123,4	
Vrms	226,7	225,4	225,5	

Kuvasta 7 voidaan selkeästi havaita jännitteen ja virran vaihe-erot kun loistehon kulutus on suurta. Virta-arvo on suhdemuutoksen takia väärä, kuvan 7 tilanteessa.



Kuva 7. Jännitteen ja virran vektorisuureet

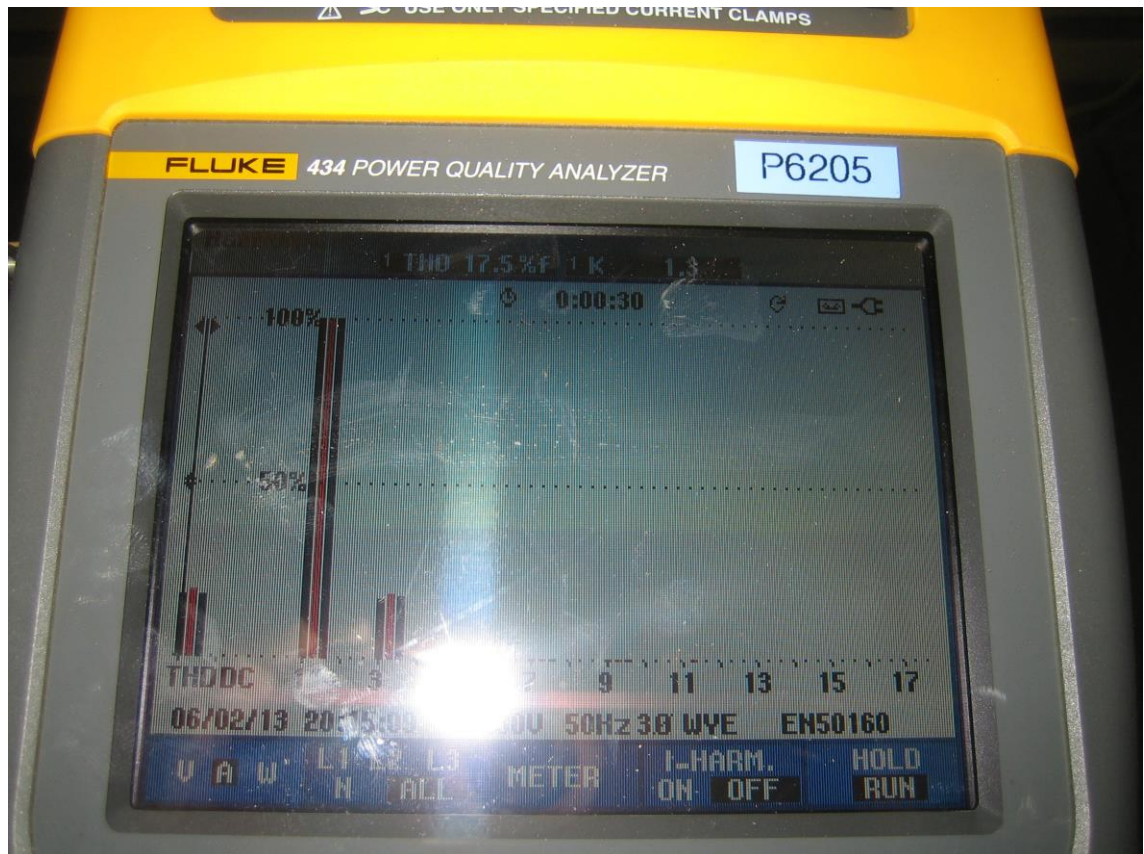
5.2.2 Yliaaltojen määrä

Yliaaltojen mittaukset toteutettiin virtayliaaltojen osalta vaihe- ja nollajohdin kohtaisesti pääkeskuksen nousukaapelista. Havaittiin pääosin 3. yliaallon muodostumista verkkoon (taulukko 2).

Taulukko 2. Virtayliaallot ennen kompensointia

	L1	L2	L3	N
3 yliaalto/%f	15,3	16,9	13,8	62,2
THD DC/%f	17,5	18,7	15,2	68

Kuvassa 8 nähdään virtayliaaltojen muodostuminen verkon vaiheiden osalta.



Kuva 8. Virtayliaallot ilman kompensointia

5.3 Yhteenveto alkuperäisestä järjestelmästä

Kiinteistön pääjakelujärjestelmä on osittain ylimitoitettu nykyiseen sähkönkulutukseen nähden. Järjestelmästä on poistunut käytöstä monia laitteistoja alkuperäisen toiminnan loputtua. Nykyinen järjestelmä on keskitetty pieneen osaan kiinteistön tiloista, mutta toiminta on laajentunut vuosien varrella ja kompensoinnin vaatimukset tulivat aiheelliseksi, kasvaneiden loistehomaksujen takia.

6 Kompensointi teollisuuskiinteistössä

6.1 Teollisuuskiinteistön sähköjärjestelmä

Kiinteistön sähkösyöttö on toteutettu jakeluverkkoyhtiö Kymenlaakson Sähkö Oy:n omistamasta muuntajasta, joka sijaitsee kiinteistön piha-alueella. Muuntajan syöttö on

kytketty 3 * 315 A sulakkeiden taakse, josta syötetään sen alapuolella sijaitsevaa jakokeskusta. Jakokeskuksesta on jaettu kiinteistöön kuuluvien rakennuksien nousut. Varsinaista teollisuuskiinteistön pääkeskusta lukuun ottamatta, muut nousut ovat hyvin pienikulutteisia, eikä niiden loistehonkulutus ole huomiotavan arvoista.

Pääkeskuksen nousukaapeli on AXMK 4 * 185 ja se on suojattu 3 * 250 A pääsulakkeilla. Pääkeskuksesta on aikaisemman toiminnan aikana syötetty huomattavasti suurempia kuormituksia ja tästä syystä keskuksen nimellisvirta $I_N = 2000 \text{ A}$.

Pääkeskuksesta on toteutettu sähkönsyöttö alakerrassa sijaitsevaan metallikoneistushalliin, jonka sähkönkulutus painottuu metallityöstökoneiden kolmivaihemootoreihin sekä loisteputkivalaisimiin. Yläkerrassa sijaitsevassa puuntyöstö hallissa on pääosin 80-luvulla valmistettuja kolmivaihemootoreita höylille ja ketjukuljettimille. Valaistus on toteutettu purkaus- ja loisteputkivalaisimilla.

6.2 Vanha kompensointijärjestelmä

Kiinteistössä sijaitsee vanha kompensointijärjestelmä, jonka kunnosta ei ollut tarkkaa tietoa. Kompensointijärjestelmää on käytetty puunkuivatushallin kuivausjärjestelmän tuottaman loistehon kompensointiin. Vanha järjestelmä oli Nokian kondensaattorit yhtiön valmistama ja sen viimeinen käyttöajankohta on arviolta vuonna 2007. Järjestelmä käsitti 2 * 25 + 50 kvar kondensaattoriparistot, jotka ohjautuivat päälle automaattisesti loistehon kulutuksen suuruuden perusteella.

6.2.1 Vanhan kompensointijärjestelmän mittaukset

Vanhojen kompensointiparistojen kunnan tarkistaminen toteutettiin Fluke 280 sarjan true-rms yleismittariin liitettävällä pihtivirtamittarilla. Vertailuarvot saatiin Nokia Capacitorsin asiantuntijalta, jolla oli vanhan kompensointijärjestelmän tiedot käytössä. Mittaukset toteutettiin jokaisen kondensaattoripariston virtamittauksilla, ja joiden tulokset näkyvät taulukossa 3.

Taulukko 3. Vanhat kompensointi kondensaattorit

	L1/(A)	L2/(A)	L3/(A)
25 kvar (1)	12,47	11,37	11,22
25 kvar (2)	12,29	12,16	12,24
50 kvar (3)	29,65	13,39	29,1
100 kvar (tot)	53,85	36,6	51,7

6.2.2 Päätelmät vanhasta kompensointijärjestelmästä

Mitatut virta-arvot eivät vastanneet lähellekään valmistajan antamia arvoja, jolloin kompensointiparistot todettiin huonokuntoisiksi. Vanhan kompensointijärjestelmän kondensaattoreiden uusiminen ei ole kustannustehokasta, sillä nykyisen sähköjärjestelmän kompensointitarve on suurempi kuin vanha kompensointijärjestelmä pystyisi tuottamaan. Vanha järjestelmä ei sisältänyt estokelaparisitoja, joiden hankkiminen on kannattavaa, koska sähköverkon mittauksissa havaittiin yliaaltoja.

6.3 Uusi kompensointijärjestelmä

6.3.1 Tarvittavan loistehon kompensoinnin laskenta

Tarvittavan kompensointijärjestelmän suuruus pystytään laskemaan ennen kompensointia suoritettujen mittaustulosten avulla (taulukko 1).

Kuormituksen ollessa suhteellisen vähäistä mittausten aikana, arvioidaan pätehtehon huippuarvoksi sähkölaskusta saadun pätehtehomaksun perusteella $P=110\text{ kW}$ ja tehokertoimeksi mitattu $\cos \varphi=0,58$.

$$\text{Näennäisteho: } S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{110\text{ kW}}{0,58} = 189,66\text{ kVA}$$

$$\text{Loisteho: } Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{189,66^2 - 110^2}\text{ kVA} = 154,49\text{ kvar}$$

$$\text{Loistehon ilmaisosuus: } Q_i = P * 0,2 = 110\text{ kW} * 0,2 = 22\text{ kVA}$$

$$\text{Kompensointi tarve: } Q_c = Q - Q_i = 154,49\text{ kvar} - 22\text{ kvar} = 132,49\text{ kvar}$$

6.3.2 Kompensointiparistot

Nokia Capacitorsille lähetettyjen sähkölaskujen perusteella saatiin tarjous kompensointijärjestelmien suositeltavista vaihtoehdoista, jotka näkyvät taulukossa 4.

Taulukko 4. Kompensointijärjestelmien vaihtoehdot

	Pos1	Pos2	Pos3
Tyyppi	D150	D150	D143
Teho	150 kvar/400 V/50 Hz	150 kvar/400 V/50 Hz	143 kvar/400 V/50 Hz
Portaat	2*25+2*50 kvar	2*12,5+25+2*50 kvar	6,25+12,5+25,2*50 kvar
Viritystaajuus	189 Hz	189 Hz	189 Hz
Nimellisvirta	253 A	253 A	242 A
Sulake	3*315 A	3*315 A	3*250 A
Kaapelisuositus	2*(3*70+35mm ²) Cu	2*(3*70+35mm ²) Cu	2*(3*70+35mm ²) Cu
Kaapin koko (l*s*k)	600*600*1800 mm	800*600*1800 mm	800*600*1800 mm
Kotelointiluokka	IP20C	IP20C	IP20C
Massa	265 kg	265 kg	280 kg
Säädin	NC-12	NC-12	NC-12
Tariffi	Ind.20 % ilmaista	Ind.16 % ilmaista	Ind.16 % ja cap.4 % ilmaista

6.3.3 Kompensointijärjestelmän valinta

Kiinteistön kompensointijärjestelmäksi valittiin estokelaparistoilla ja automaattisella loistehon kompensoinnin ohjauksella varustettu järjestelmä. Estokelaparistoilla pystytään poistamaan haitallisia yliaaltoja, joita havaittiin ennen kompensointia toteutetuissa mittauksissa.

Kompensointijärjestelmä sijoitettiin pääkeskuksen yhteyteen, jolloin pystyttiin toteuttamaan keskitetysti, vaihtelevan kuormituksen myötä muuttavan kompensointitarpeen vaatimukset. Uusi kompensointijärjestelmä on Nokia Capacitorsin valmistama pienjännite-estokelaparisto, tyyppiä D143,75 (kuva 9). Järjestelmän mitoitusteho on 143,75 kvar, mitoitusvirta 243 A ja viritystaajuus 189 Hz. Estokelapariston tariffi on määritetty niin, että automatiikka hoitaa kompensoinnin 16 % induktiivisen ja 4 % kapasitiivisen loistehon välillä. Tällöin sähköverkosta otettavan loistehon kulutus pysyy verkkoyhtiön tarjoaman ilmaisosuuden alueella.



Kuva 9. Kompensointijärjestelmän asennus alkamassa

Kompensointijärjestelmä sisältää viisi kappaletta kondensaattoreita (kuva 10), jotka ovat kytketty sarjaan kondensaattorikohtaisilla rautasydäнкäämeillä (kuva 11). Kompensointiparitot ovat suojattu kahvasulakkeilla ja kondensaattoreita ohjataan käyttöön kontaktoreilla. Järjestelmän rakenne on hyvin suunniteltu ja komponenttien sijoitukset ovat toteutettu niin, että niiden uusiminen on mahdollista tulevaisuudessa. Kaapin sisäilman vaihtuminen on toteutettu tuulettimella, jota ohjaa lämpötila-anturi.



Kuva 10. Kondensaattorit



Kuva 11. Rautasydän käämit

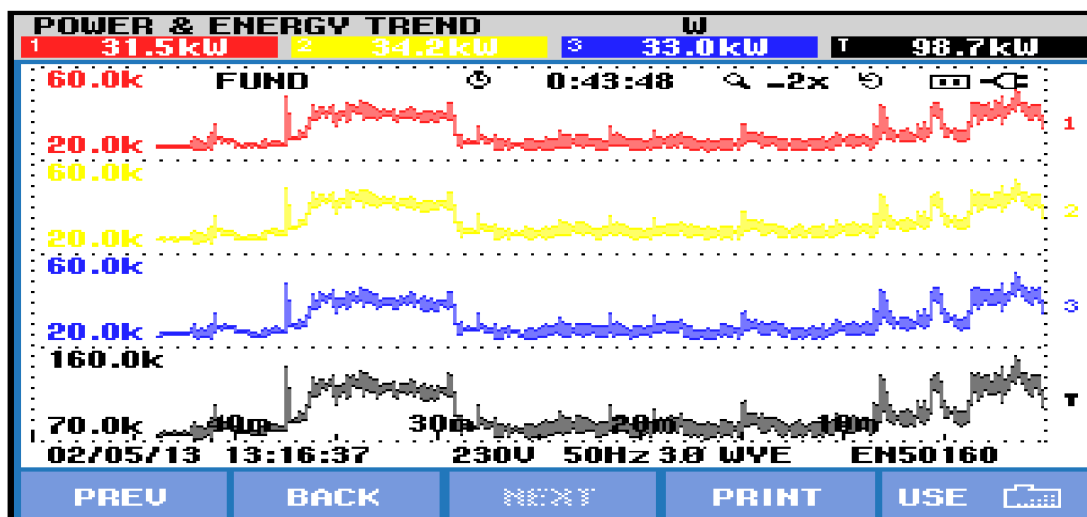
6.3.4 Loisteho mittaukset

Loistehon mittaukset toteutettiin samalla tavalla kuin ennen kompensointia tehdyt mittaukset (kuva 6). Mittalaitteena mittauksissa käytettiin Fluke 435 Analyysaattoria (kuva 12).

Mittaus suoritettiin 4 tunnin aikana, jolloin kuormituksen vaihtelu oli suurta ja verkon muutokset olivat hyvin havaittavissa.



Kuva 12. Fluke 435 Analyysaattori

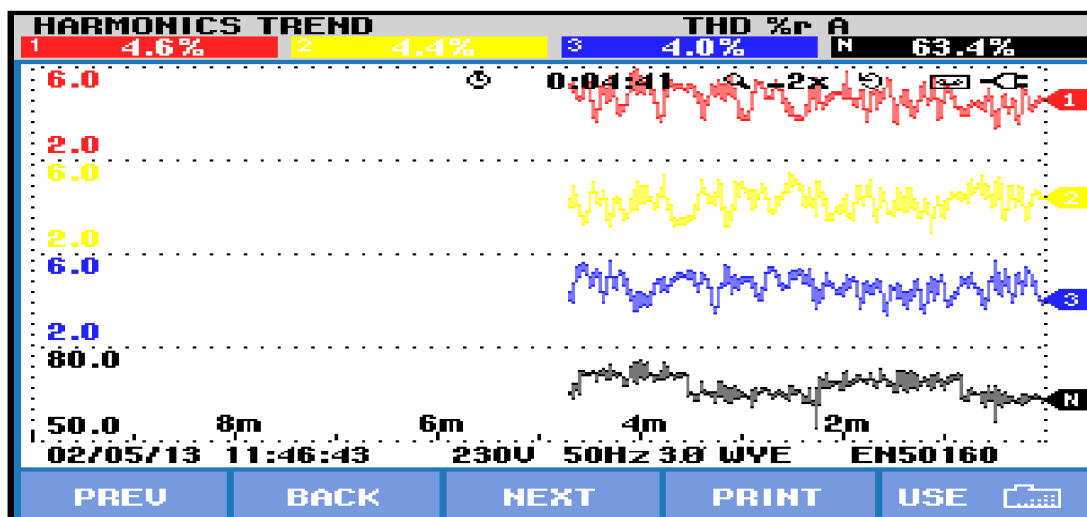


Kuva 13. Pätötehon mittaus

Kuvasta 13 havaitaan kuormituksen muutokset noin 45 min aikana. Kuormituksen muutoksista nähdään, että kuormituspiikit jäävät alle 160 kW:n normaalin työkäytön aikana ja keskimääräinen kulutus on noin 100kW paikkeilla.

6.3.5 Yliaaltomittaukset

Yliaaltomittaukset toteutettiin kuvan 12 mukaisella mittarilla, jolla pystyttiin havaitsemaan verkon jännite- ja virtayliaallot, vaihe- ja nollajohtimista. Mittarilla havaittiin yliaaltojen muodostuminen kuormituksen suuruuden vaihtelun vaikutuksesta.



Kuva 14. Virtayliaaltojen vaihtelut

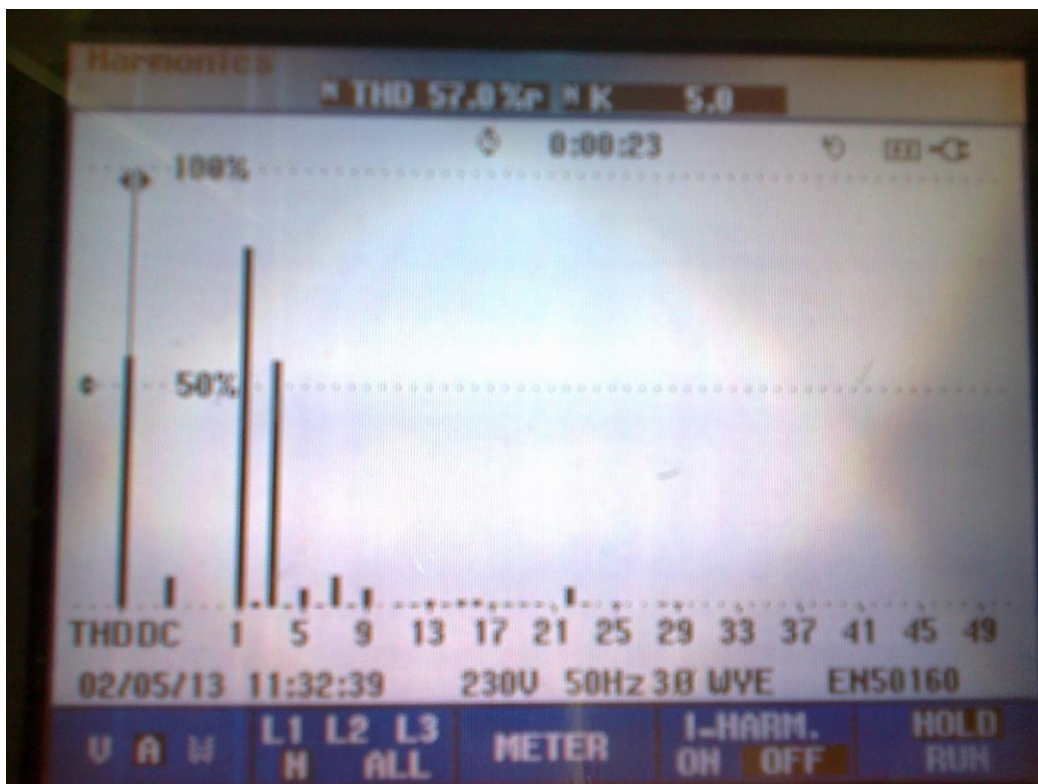
Kuvasta 14 nähdään virtayliaaltojen vaihtelut muutaman minuutin ajalta. Jännite- ja virtayliaaltoja tarkkailtiin koko mittausjakson ajan, jonka perusteella pystyttiin kohdentamaan suuret yliaaltojen muutokset sähkölaitteiden käynnistämiseen.

	L1	L2	L3	N
Volt				
THD%r	1.0	1.1	0.9	57.4
H3%r	0.6	0.5	0.3	28.4
H5%r	0.3	0.3	0.3	5.4
H7%r	0.6	0.6	0.5	6.0
Amp				
H3%r	2.8	3.0	2.2	58.4
H5%r	1.1	1.0	1.0	4.4
H7%r	2.0	1.6	1.7	7.3

02/05/13 11:34:55 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160

Kuva 15. Yliaaltojen suuruudet hetkellisesti

Kuvan 15 mittaushetkellä kiinteistön sähkönkulutus oli suurta ja yliaaltojen määrä keskimääräisellä tasolla.



Kuva 16. Nollajohtimen virtayliaallot

Nollajohtimen kolmas yliaalto oli huomattavasti muita yliaaltoja suurempia. Tämä johtuu todennäköisesti yksivaiheisten purkausvalaisimien ja tietokoneiden tuottamista yliaalloista, joita nähdään kuvassa 16.

6.3.6 Loistehon kompensoinnin toteutuminen

Ennen kompensointia loistehoa kului ajoittain enemmän kuin pätötehoa, joka aiheutuu vanhojen oikosulkumoottoreiden alhaisesta tehokertoimesta. Kompensoinnin toteutuksen myötä loistehon hankinta verkkoyhtiöltä on saatu pienentymään lähtötilanteeseen nähden huomattavasti.



Kuva 17. Sähkötehon kulutus hetkellisesti

Kuvasta 17 nähdään tilanne, jossa kuormitus on lähellä maksimi arvoa ja induktiivisen loistehon kulutus on vain 6,7 kvar. Loistehon kulutus vaihteli ajoittain kapasitiivisen loistehon osuudelle, jolloin kiinteistön sähköjärjestelmä tuottaa loistehoa verkkoon. Kapasitiivisen loistehon osuus jäi kuitenkin hyvin pieneksi, eikä sillä ole vaikutusta loistehon kulutuksen laskutukseen.

Jännitteiden ja virtojen vaihe-erot pienenevät kompensoinnin myötä kuvan 18 mukaisesti.



Kuva 18. Jännitteen ja virran vektorisuureet

6.3.7 Yliaaltojen suodattamisen toteutuminen

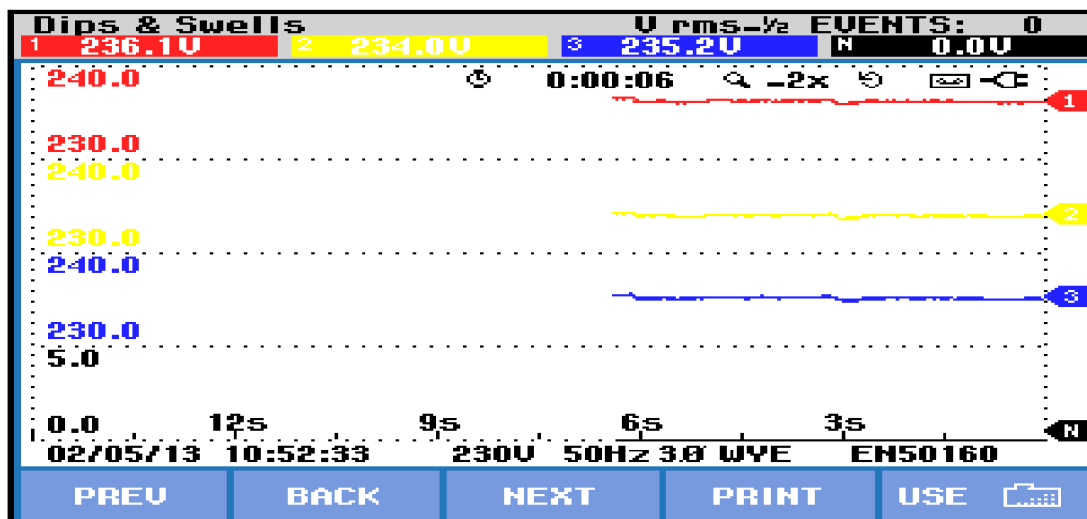
Yliaaltoja havaittiin ilman kompensointijärjestelmää tehdyissä mittauksissa kohtuullisesti, joiden seurauksena estokelapariistoilla toimivan järjestelmän hankinta oli suotavaa.

Mittauksissa todettiin jännite- ja virtayliaaltojen laskeneen vaihejohtimissa kuvan 15 mittaustuloksien mukaisesti. Nollajohtimen yliaallot pysyivät yhtä suurina mittausten aikana. Nollajohtimen kolmas yliaalto oli koko mittaustyön aikana kohtalaisen suuri. Nollajohtimeen summautuvat kolmannen yliaallon vaikutukset saattavat olla ongelma epäsymmetrisen kuormituksen suuruuden noustessa korkeaksi ja nollajohtimen lämpenemä saattaa nousta liian korkeaksi yliaaltojen vaikutuksesta.

Kuvan 16 mittaustuloksista nähdään nollajohtimen virran suuruuden olevan 13 A. Nollajohtimen virrankulutus on suhteellisen pientä, jolloin yliaaltojen vaikutusten kertaantuminen ei tule aiheuttamaan ongelmia lämpenemisen suhteen.

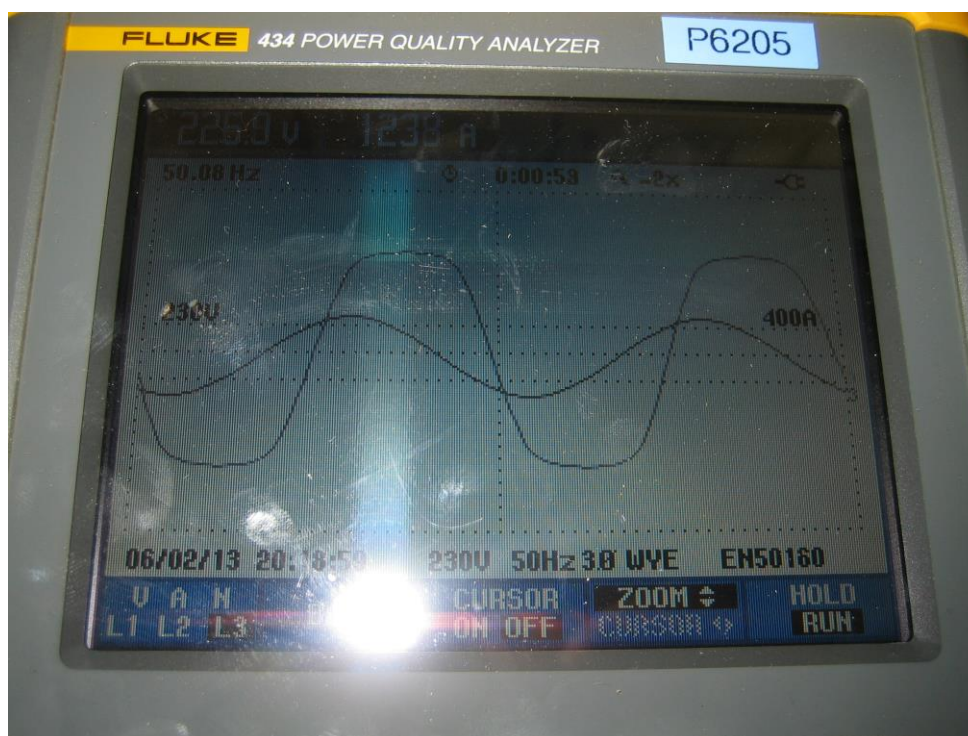
6.3.8 Jännitteen ja virran muutokset

Ennen kompensointia suoritetuissa mittauksissa havaittiin kuormituksen noustessa jännitteen laskua. Kompensoinnin jälkeen jännitteen suuruus nousi halutulle tasolle (kuva 19).



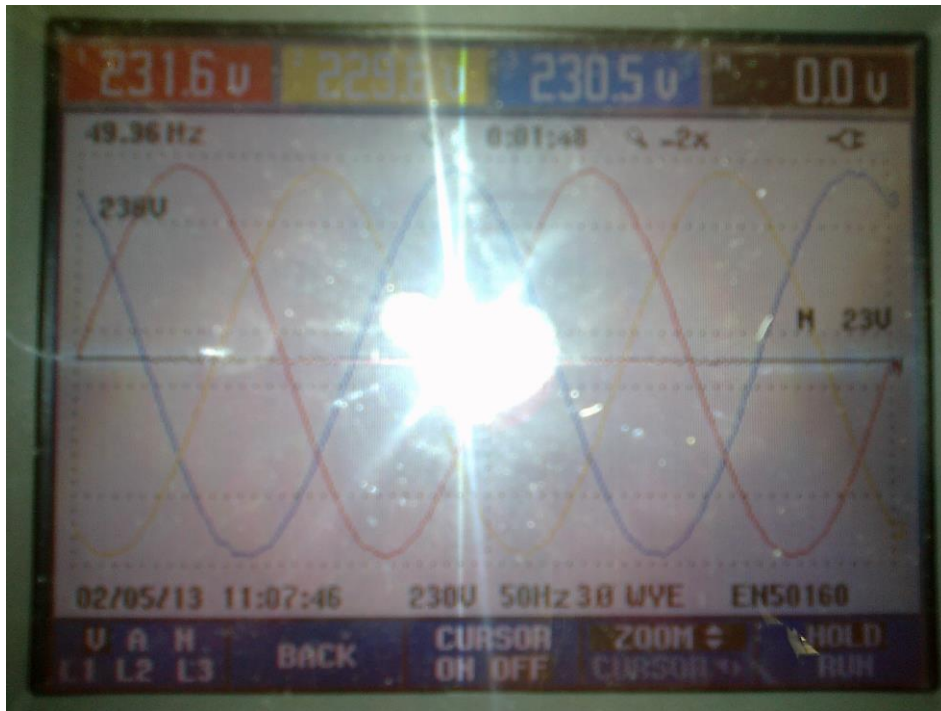
Kuva 19. Jännitteen vaihtelu ajan funktiona

Jännitteen ja virran sinimuodon muutoksia aiheuttavia yliaaltoja pystyttiin vähentämään estokelaparistoilla. Ennen kompensointia suoritetuissa mittauksissa havaittiin virran sinimuodossa kantiaaltoisuutta (kuva 20), jonka esiintyminen saattaa johtua virtayliaaltojen vaikutuksesta.

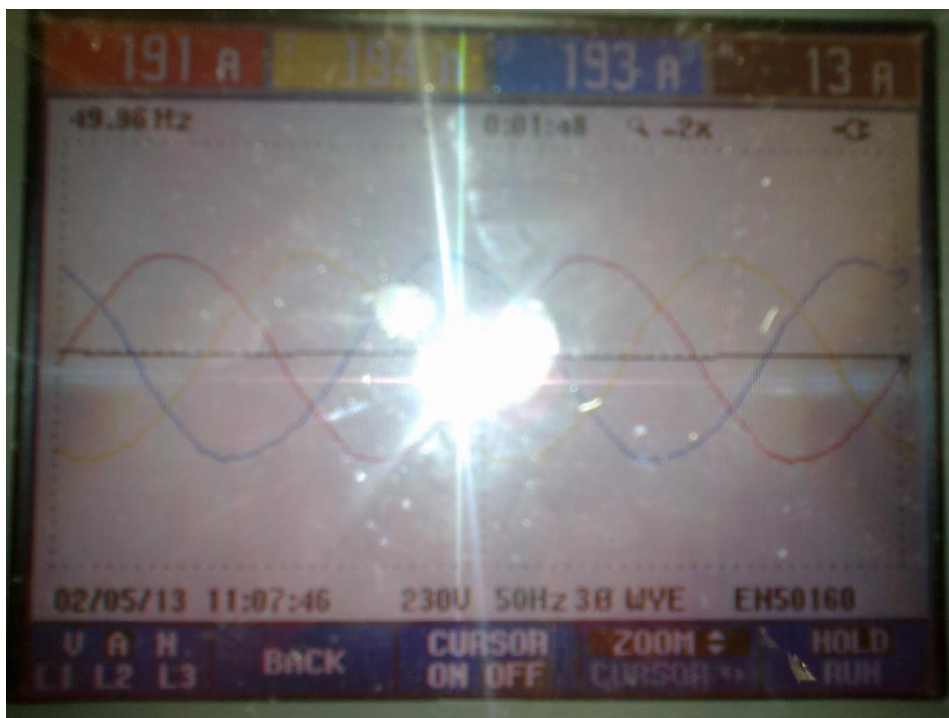


Kuva 20. Kolmannen vaiheen jännitteen ja virran siniaallot

Kompensoinnilla saatiin jännitteen ja virran aaltomuodot enemmän sinimuotoiseksi ja näin ollen sähkön laatua pystyttiin parantamaan. Siniaallossa havaittiin pientä säröä, mikä on normaalia verkon kuormituksen yhteydessä. Puhdas sinijännite on sähkölaitteiden kuormitusten kannalta tärkeä asia, erityisesti elektronisien laitteiden osalta. Nykyaikana elektronisien laitteiden suuren määrän takia on jännitemuotojen laadun tarkastaminen suositeltavaa (kuvat 21 ja 22).



Kuva 21. Kompensoinnin jälkeen kolmivaihejännitteen sinimuodot



Kuva 22. Kompensoinnin jälkeen kolmivaihevirran sinimuodot

7 Takaisinmaksuaika

Kompensointijärjestelmän hankinnan ja asennuksen kustannukset olivat asennustyön suorittajan mukaan noin 3000 €.

Vuoden 2012 elo- ja lokakuun välisenä aikana loistehomaksut olivat keskimäärin 733,87 € / kk.

$$t = \frac{3000\text{€}}{733,87\text{€}/\text{kk}} = 4,088\text{kk}$$

Kompensointijärjestelmän takaisinmaksu t on hoidettu noin neljässä kuukaudessa. Todellisuudessa sähkönkulutus on kasvanut vuoden 2012 syksyyn verrattuna, joten takaisinmaksuaika on vieläkin nopeampaa.

8 Yhteenveto

Teollisuuskiinteistön loistehon kulutuksen kasvun seurauksena hankittu kompensointijärjestelmä osoittautui kannattavaksi sijoitukseksi. Kompensointijärjestelmän tilaus tehtiin asennusyrityksen ja asiakkaan toimesta jo ennen ensimmäisten mittauksien suorittamista. Nokia Capacitorsin asiantuntija selvitti sopivan järjestelmän hankinnan kiinteistön kulutustietojen perusteella. Työssä toteutetut mittaukset vahvistivat kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen tarpeen, minkä perusteella estokelaparistoilla varustettu järjestelmä hankittiin.

Kiinteistössä oli suuri loistehon kulutus ja kohtalainen määrä yliaaltoja, joiden kompensointi onnistui hyvin estokelaparistoilla. Ensimmäisissä mittauksissa havaittu jännitteen alenema johtui suuren kulutuksen ja pitkien siirtomatkojen yhteisvaikutuksesta. Kompensointijärjestelmän liittämällä verkkoon todettiin jännitetason nousevan hieman.

Kompensointijärjestelmässä on myös mahdollisuus suurentaa kondensaattoreiden kokoa, mikäli kiinteistön loistehon kulutus kasvaa suuremmaksi. Järjestelmän yliaaltojen mittaaminen säännöllisin väliajoin on suositeltavaa erityisesti elektroniikkaa sisältävien laitteiden lisäyksien yhteydessä.

Lähteet

- 1 Pulkkinen J. Teollisuusvalaistuksen kompensointi ja yliaaltosuodatus. Metropolia Ammattikorkeakoulu 2012. Luettu 14.5.2013.
- 2 E.ON KSV. Loistehon kompensointi. Verkkodokumentti. 2012.
<http://www.eon.fi/SiteCollectionDocuments/Loistehon-kompensointi.pdf>. Luettu 15.5.2013.
- 3 Korpinen L. Yliaalto-opus. Verkkodokumentti.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>. Luettu 15.5.2013.
- 4 Pienjännitetuotteiden tuoteopas. Verkkodokumentti. ALSTOM.
<http://www.alstom.com/Global/Finland/Resources/Documents/Pienj%C3%A4nnitetuotteiden%20tuoteopas.pdf>. Luettu 15.5.2013.
- 5 Karonen T. Epäsymmetrisen kuormituksen ja yliaaltojen mittaukset. Mikkelin Ammattikorkeakoulu 2010. Luettu 16.5.2013.
- 6 Väisänen P. Loistehon kompensointi jakeluverkkoyhtiössä. Tampereen teknillinen yliopisto 2012. Luettu 16.5.2013.