



# **LOISTEHON KOMPENSOINTI- LAITTEIDEN ASENNUS JA KUN- NOSSAPITO**

Mikko Lagus

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2014  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

LAGUS, MIKKO:

Loistehon kompensointilaitteiden asennus ja kunnossapito

Opinnäytetyö 63 sivua, joista liitteitä 6 sivua  
Huhtikuu 2014

---

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli luoda ohje Micora Oy:n asentajille ja työnjohtajille, jossa kerrottiin kompensointilaitteiden asentamisesta ja huoltamisesta. Lisäksi opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää loistehon kompensoinnin kannattavuutta taloudellisesti.

Loisteho on yksi sinimuotoiseen vaihtosähköön liittyvistä suureista. Loistehoa tarvitaan esimerkiksi pyörivissä sähkökoneissa magneettikentän synnyttämiseen. Loistehon siirto ei kuitenkaan ole mielekäästä, minkä vuoksi loistehon kompensoinnilla pyritään tuottamaan tarvittu loisteho mahdollisimman lähellä kulutuskohdetta. Kompensointiin liittyy myös oleellisesti sähkön laatu ja se, miten kompensoinnilla voidaan parantaa sitä.

Kompensointiin käytettyjä ratkaisuja ovat esimerkiksi tahtikoneet, kompensointiparisot, estokelaparisot ja suodattimet. Uusimmissa kompensointilaitteissa kontaktorit on korvattu tyristöillä, joilla saavutetaan merkittäviä etuja perinteiseen kontaktoriin verrattuna.

Kompensointilaitteiden kunnossapito on oleellinen osa laitteiden käyttöä ja verkkoyhtiöillä on määräyksensä laitteistojen ominaisuuksille. Säännöllisillä mittauksilla pystytään valvomaan kompensointilaitteiden kuntoa ja arvioimaan pariston käyttöikä. Tällä määritetään, koska kannattaa uusita laitteistoa ja mitä sen toteuttaminen maksaa. Työn aikana huolletuista kompensointilaitteista yli puolet on ollut jollain tavalla viallisia tai käyttöikänsä päässä.

Uuden kompensointilaitteiston asennuksessa huomioitavia asioita ovat esimerkiksi ilmanvaihto ja loistehosäätimen asettelu. Lisäksi on tarpeellista tarkastella, onko loistehotarve muuttunut.

Loistehoa kuluttavia kohteita on pelkästään Tampereen Sähköverkko Oy:n jakelualueella tuhansia, joiden loistehokulutukset voivat olla jopa MVAr -luokkaa. Näiden kohteiden loistehomaksut voivat olla jopa tuhansia euroja.

---

Asiasanat: loisteho, kompensointi, estokelaparisot

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Electrical Power Engineering

LAGUS, MIKKO:

Installation and Maintenance of Reactive Power Compensators

Bachelor's thesis 63 pages, appendices 6 pages

April 2014

---

The purpose of this thesis was to create guide for electricians and foremen of Micora Oy about installing and maintenance of reactive power compensators. The purpose was also to explain the financial benefits of reactive power compensation.

Reactive power is one component of sine form alternating currents. Reactive power is needed for example in induction motors to create magnetic field. Large scale distribution of reactive power is not realistic. This is why reactive power is produced as near as possible to a final user. One essential part of reactive power compensation is the way how reactive power compensation affects supplying voltage characteristics and how these characteristics can be improved.

Solutions for reactive power compensation are for example direct current motors, capacitor banks and filters. The latest capacitor banks and filters are equipped with thyristors. Thyristors have a significant advantage compared to traditional contactors.

The maintenance of reactive power compensators is important through their entire lifetime. A local electric power transmission grid owner has usually regulations for reactive power compensation. The condition and lifetime expectancy of capacitor banks can be assessed by regular measurements. Measurements are done to determine when it is time to renew the current capacitor banks and how much this will cost. During fall 2013 and winter 2014 over half of the capacitor banks served were somehow defect or at the end of their service life.

When installing a new capacitor bank one must take care of ventilation and the settings of the power factor controller. It is also necessary to find out if the reactive power consumption has changed.

Within the distribution area of Tampereen Sähköverkko Oy the number of reactive power users who pay for their consumption is in thousands. The largest consumers can have up to tens of MVAr reactive power peak usages. For this category user, the reactive power payments can be up to thousands of euros.

---

Key words: compensation, reactive power

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	KOMPENSOINNIN TEORIA .....	8
2.1	Loisteho yleisesti .....	8
2.2	Yliaallot .....	10
2.3	Kokonaissärö .....	13
2.4	Säröteho .....	14
2.5	Sopivan kompensointilaitteiston määrittäminen.....	15
2.6	Kompensointitavat .....	18
2.7	Estokelaparistot.....	21
2.8	Suodattimet .....	23
2.9	Tyristorikytketyt kondensaattoriparisto .....	25
2.10	Staattinen kompensointilaitteisto.....	25
3	KOMPENSOINTILAITTEIDEN KUNNOSSAPITO.....	26
3.1	Verkkoyhtiön määräykset ennen vuotta 1993 valmistetuista kompensointilaitteista .....	26
3.2	Ylikompensointi Tampereen Sähköverkko Oy:n alueella 2014 alkaen.....	26
3.3	Kompensointilaitteiden huolto.....	29
3.4	Mittaukset .....	32
3.4.1	Virta.....	32
3.4.2	Kapasitanssi .....	33
3.5	Lämpökuvaus.....	38
3.6	Säätäjän huoltotoimenpiteet.....	39
3.7	Huoltoaikaväli.....	40
3.8	Pariston käyttöikä .....	41
3.9	Budjetti-arvio huollosta.....	41
3.10	Kompensointilaitteiden uusiminen .....	42
3.10.1	Vanhon pariston paloturvallisuus.....	43
3.10.2	Vanhon pariston vaihto uuteen.....	43
4	ESTOKELAPARISTON ASENNUS .....	45
4.1	Huomioitavat seikat .....	45
4.1.1	Ilmanvaihto .....	45
4.1.2	Virta- ja jännitemuuntaja.....	47
4.1.3	Loistehosäätimen havahtumisrajat.....	48
4.2	Asennuksen hinta.....	49
4.3	Investoinnin kannattavuus .....	49
5	PIRKANMAAN KOMPENSOINTILAITTEIDEN KUNTO .....	50

5.1 Tampereen Sähköveikko Oy:n alueen loistehoa kuluttavat kohteet .....	50
5.2 Paljonko keskimäärin asiakas maksaa loistehosta .....	51
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	54
LÄHTEET .....	55
LIITTEET .....	58
Liite 1. Kerroin f.....	58
Liite 2. Estokelapariston huoltotarjous.....	59
Liite 3. Yksikköhintaluettelo.....	60
Liite 4. Tarjous uuden estokelapariston asennuksesta.....	61

## LYHENTEET JA TERMIT

<i>C</i>	kapasitanssi, F
<i>D</i>	säröteho
<i>DPF</i>	tehoeroin, Displacement Power Factor
<i>f</i>	taajuus, Hz
<i>I</i>	virta, A
<i>L</i>	induktanssi, H
<i>n</i>	kokonaisluku
<i>P</i>	pätöteho, W
<i>Q</i>	loisteho, VAr
<i>R</i>	resistanssi, $\Omega$
<i>S</i>	näennäisteho, VA
<i>s<sub>k</sub></i>	oikosulkuteho, VA
<i>SVC</i>	staattinen kompensattori, Static VAr Compensator
<i>t</i>	aika, s
<i>TCR</i>	tyristoriohjattu reaktori, Thyristor Controlled Reactor
<i>THD</i>	harmoninen kokonaissärö, Total Harmonic Distortion
<i>THD-F</i>	harmonisten yliaaltojen määrä suhteessa perustaajuisen komponentin tehollisarvoon
<i>THD-R</i>	harmonisten yliaaltojen määrä suhteessa koko signaalin tehollisarvoon
<i>TSC</i>	tyristorikytketty kondensaattori, Thyristor Switched Capacitor
<i>TSR</i>	tyristorikytketty reaktori, Thyristor Switched Reactor
<i>U</i>	jännite, V
<i>X</i>	reaktanssi, $\Omega$
$\varphi$	vaihekulma
$\omega$	kulmataajuus

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kertoa loistehon kompensoinnista, kompensoinnin teoriasta, sähkön laadusta, kompensointilaitteiden käytöstä ja kunnossapidosta ja uuden kompensointilaitteiston asennuksesta ja asennuksessa huomioitavista asioista.

Työssä tutustutaan ensin loistehoon, yliaaltoihin, jännitteen sekä virran säröön ja niiden kompensointiin. Kompensointia käsitellään pienjännitetasossa, joka on tyypillisesti 400 voltia. Lisäksi tarkastellaan ylikompensointia Tampereen Sähköverkko Oy:n jakelualueella. Työssä käsitellään kompensointilaitteiden kunnossapitoa ja kunnossapitoon liittyviä mittauksia ja otetaan kantaa kompensointilaitteiden huoltoaikaväliin. Työssä otetaan kantaa uuden kompensointilaitteiston asennukseen, asennuksessa huomioitaviin seikkoihin ja uuden kompensointilaitteiston asennuksen kannattavuuteen.

Työ on tehty Micora Oy:lle, joka tuottaa monialaisesti teollisuuden projekti-, valmistus-, osaamis- ja suoritepalveluita. Micora Oy:n palveluihin kuuluvat myös monipuoliset sähköalan palvelut, kuten keskijännitelaitteiston muuntamohuollot, relekoestukset, sähkön asiantuntijapalvelut, teollisuuden sekä uudis- että saneerauskohteiden sähköasennukset ja niiden suunnittelu ja dokumentointi.

## 2 KOMPENSOINNIN TEORIA

### 2.1 Loisteho yleisesti

Sinimuotoiseen vaihtosähköön liittyy oleellisesti neljä suuretta: pätöteho  $P$ , loisteho  $Q$ , näennäisteho  $S$  ja vaihekulma  $\varphi$ . Tietyt sähkökoneet, esimerkiksi moottorit, purkauslamput ja muuntajat, kuluttavat pätötehon lisäksi loistehoa. Pätötehoa tarvitaan varsinaisen työn tekemiseen ja loistehoa laitteen tarvitseman magneettikentän ylläpitämiseen. (ST 52.15 2004, 2.)

Sähköverkossa vallitsee jatkuva tasapaino tuotetun ja kulutetun tehon kesken, joka koskee sekä pätö- että loistehoa. Pätötehon tehotasapainon muutokset näkyvät ensiksi pyörivien koneiden liike-energiassa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että sähköverkon tahti pyrkii muuttumaan. Verkon pyörimisenergia on kuitenkin niin suuri, että merkittävää muutosta taajuudessa ei normaaleissa muutostilanteissa tapahdu. Muutos loistehotasapainossa puolestaan näkyy muutoksena jännitetasossa. (Elovaara & Laiho, 1988, 107.)

Tarvittava loisteho voidaan tuottaa joko laitteiden välittömään läheisyyteen sijoitettavilla kondensaattoreilla tai loisteho voidaan siirtää jakelujärjestelmää pitkin. Sähköverkot mitoitetaan näennäistehon perusteella. Siirrettäessä suuria määriä loistehoa, pienenee verkon kapasiteetti siirtää varsinaiseen työhön tarvittavaa pätötehoa. Sähköverkossa suurjännitejohdoilla reaktanssi on suurempi kuin resistanssi. Tämä vaikuttaa siten, että pitkillä siirtojohdoilla johtojen induktanssi saa aikaan jännitteen ja virran vaihesiirtokulman kasvun, joka huomataan pienentyneestä pätötehon siirtokapasiteetista. Tämän takia loistehon siirtäminen sähköverkossa ei ole mielekästä. (Jaatinen 1990, 20–21, 49; Väisänen 2012, 13; Karri 2013, 34.)

Siirrettäessä loistehoa verkon yli, liittymän pääsulakekoko saattaa kasvaa, koska jos siirretään loisteho, on liittymän kaikki sähkölaitteet mitoitettava näennäisen virran mukaan. Tämä virta on sitä suurempi mitä enemmän pätö- ja loiskomponenttia virrassa on. Tämä nostaa liittymismaksua ja pääsulakekoosta riippuvaa perusmaksua. Kompensoinnilla voidaan liittymän pääsulakekoko saada pienennettyä ainakin yhdellä portaalla. Pääsulakekoon pienentämisellä voidaan saavuttaa liittymismaksun puoliintuminen ja huomattavat vuosittaiset säästöt sähkölaskussa. Tämän takia loistehoa pyritään kompen-



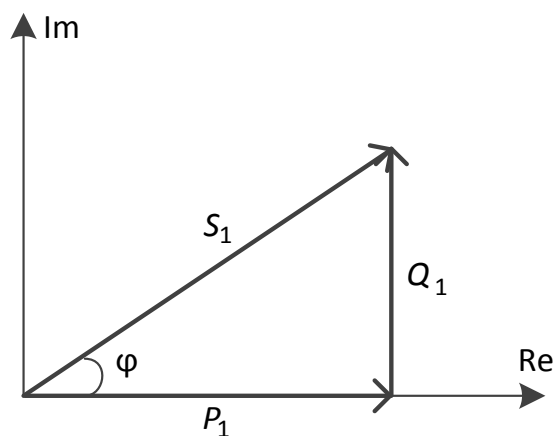
soimaan mahdollisimman lähellä kulutuskohdetta. (Jaatinen 1990, 52; STUL ry 2006, 21.)

Loistehon kompensoinnin hyötynä on myös jännitteenaleneman pieneminen. Tämä havaitaan pitkillä siirtoetäisyyksillä. Alle  $16 \text{ mm}^2$  poikkipinnoilla ja lyhyillä siirtoetäisyyksillä johdinten reaktanssi on pieni eli kompensoinnilla ei saavuteta merkittävää hyötyä. Jakelumuuntajien jännitteenalenemassa havaitaan merkittävä pienentyminen kompensoitaessa loistehoa. (STUL ry 2006, 85.) Jännitteenaleneman itseisarvo voidaan laskea likimääräisesti kaavalla 1. Kaavasta 1 huomataan kuinka loisvirran pienentyessä, pienenee jännitteenalenema.

$$U_h = R \cdot I_p + X \cdot I_q \quad (1)$$

, missä  $U_h$  on jännitteenalenema  
 $R$  on koko siirto johdon resistanssi  
 $I_p$  on pätövirta  
 $X$  on koko siirto johdon reaktanssi  
 $I_q$  on loisvirta

Laitteen sähköverkosta ottama näennäisteho  $S_1$  perustaajuisella sinimuotoisella jännitteellä ja virralla muodostuu pätötehosta  $P_1$  ja induktiivisesta loistehosta  $Q_1$ . Tätä riippuvuutta on havainnollistettu kuviossa 1. (ST 52.15 2004, 2.)



KUVIO 1. Tehokolmio.

Kuvioista 1 voidaan muodostaa perustaajuiselle näennäisteholle kaavan 2 mukainen yhtälö. Kuviossa 1 on suorakulmainen kolmio ja kaava 2 on idealtaan sama kuin Pythagoraan lause.

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (2)$$

, missä  $S_1$  on perustaajuinen näennäisteho

$P_1$  on perustaajuinen pätöteho

$Q_1$  on perustaajuinen loisteho

Kuvioissa 1 esiintyvä kulma  $\varphi$  on vaihesiirtokulma, josta voidaan kaavalla 3 määrittää tehokerroin  $\cos \varphi$ . (ST 52.15 2004, 2.)

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (3)$$

, missä  $\varphi$  on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma

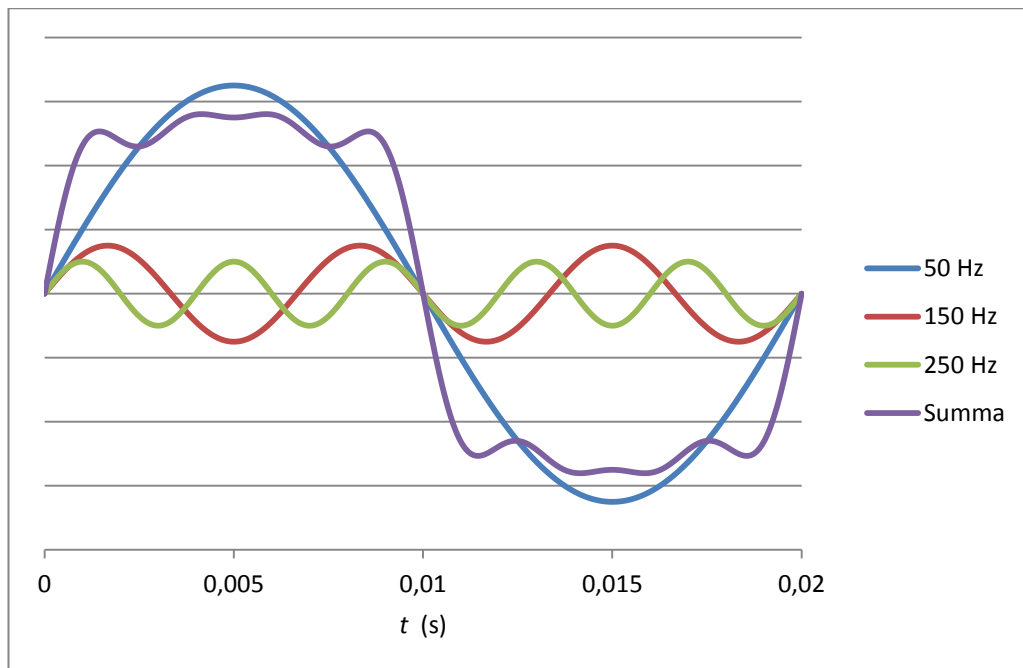
$P_1$  on perustaajuinen pätöteho

$S_1$  on perustaajuinen loisteho

Kaavassa 3 esitetty tehokerroin pätee vain perustaajuiselle pätö- ja loisteholle. Tästä käytetään myös lyhennettä *DPF* (Displacement Power Factor). (ST 52.15 2004, 2.)

## 2.2 Yliaallot

Kompensointilaitteita ei voi käsitellä yksinään, vaan on huomioitava myös sähkön laatuun liittyvät kysymykset. Yliaallot voivat olla perustaajuisen jännitteen tai virran monikertoja, jolloin puhutaan harmonisista yliaalloista. Sähköverkossa voi esiintyä myös epäharmonisia yliaaltoja, jotka eivät ole perusaallon taajuuden monikertoja. Yliaalloista on esitetty esimerkki kuviossa 2, johon on piirretty perusaalto, 3. ja 5. yliaalto. Huomattavaa on, että yliaallot eivät ole piirretty mittakaavaan, vaan ovat havainnollistamisen takia jätetty suuremmiksi kuin todellisuudessa. Tämä aiheuttaa myös summa-aallon kanttiaaltoa muistuttavan muodon. (STUL ry 2006, 2, 26.)



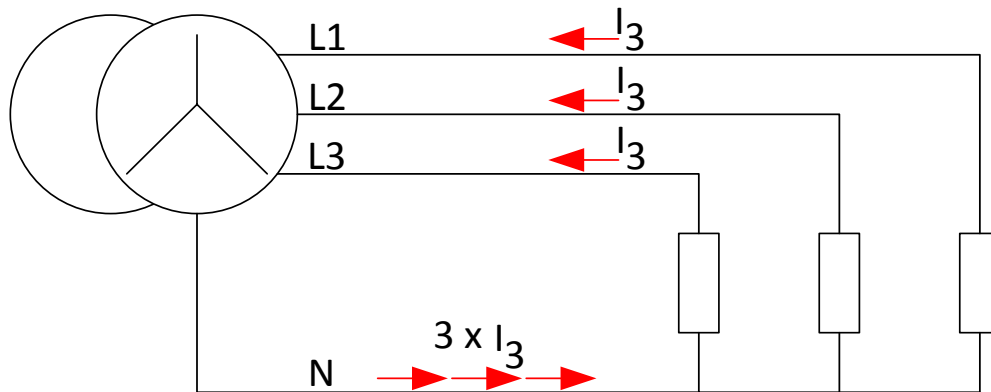
KUVIO 2. Esimerkki yliaalloista.

Yleisessä sähköjakoverkossa yliaaltojännitteet eli jännitesärö on jatkuvassa kasvussa. Ilmiö on selitettävissä epälineaaristen kuormitusten lisääntymisenä. Jännitteen säröytymisellä tarkoitetaan ilmiötä, jossa verkosta otetut tai verkkoon syötetyt epäsinimuotoiset virrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä. Kuitenkin säröytynyt jännite aiheuttaa epäsinimuotoisia virtoja lineaarisissakin kuormissa. (ST 52.15 2004, 2; STUL ry 2006, 26.)

Yliaaltoja synnyttäviä laitteita ovat esimerkiksi tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, kodin ja toimistotilojen elektroniikka, energiansäästölamput ja UPS-laitteistot. Yliaaltoja voivat vahvistaa kompensointiin tarkoitetut rinnakkaiskondensaattoriparistot. Nämä niin sanottu ”tavalliset kondensaattorit” voivat muodostaa verkon induktanssien kanssa haitallisia resonanssipiirejä, jotka vahvistavat yliaaltoja. (STUL ry 2006, 30.)

Käytännössä yliaaltokomponentteja on ääretön määrä. Perustajuisella ja symmetrisellä kuormalla nollajohdin ei kuormitu lainkaan. Epäsymmetrisessä kuormassa nollajohtimessa kulkee korkeintaan samansuuruinen virta kuin eniten kuormitetussa vaiheessa. Yliaaltojen tapauksessa kolmella jaottomat yliaallot kuormittavat nollajohdinta samalla tavalla kuin virran perusaalto. Erityisesti kolmannella jaolliset yliaaltovirrat summautuvat vaihejohtimista nollajohtimeen ja ne voivat levitä verkon nollausten kautta rakennuksen runkorakenteisiin. Tämä voi aiheuttaa nollajohtimen ylikuormittumista (esimer-

kiksi lämpeneminen ja eristeiden vanheneminen) tai suojalaitteen toimimisen. Jos PEN-johdin on jaettu pääkeskuksessa PE- ja N-johtimiksi, vain N-johtimessa kulkee edellä mainittu virta. Kolmella jaollisten yliaaltojen summautumista nollajohtimeen on havainnollistettu kuviossa 3. (Korpinen ym. 22–30; STUL ry 2006, 31–32; Hietalahti 2011, 55.)



KUVIO 3. Vaiheiden kolmansien yliaaltojen summautuminen. (STUL ry 2006, muokattu)

Yliaalloksi luetaan myös verkossa esiintyvä tasakomponentti joko kuormitusvirrassa tai syöttöjännitteessä. Tasakomponentin aiheuttajia ovat esimerkiksi puolialtotasasuuntaus, puoliksi ohjatut puolijohdesillat, siltojen ohjauskulmavirheet ja vioittuneet puolijohdekäytöt. Tasavirtakomponentti on sähkönjakelulle merkittävä häirtatekijä, koska se vaikuttaa muuntajien kuormitettavuuteen. Jos tasavirtakomponentti on 2 % toisioin nimellisvirrasta, kasvavat rautahäviöt noin 10 %. (STUL ry 2006, 35.)

Standardin SFS-EN 50160 mukaan yliaaltopitoisuutta laskettaessa huomioidaan yliaaltokomponentteja 40:een termiin saakka (STUL ry 2006, 21). Vaikka jännitteen tai virran käyrämuoto on säröytynyttä, esimerkiksi kanttiaaltoa, voidaan sitä edelleen käsitellä jaksollisesti vaihtelevana suureena. Matemaattisesti tämä voidaan esittää niin sanottuna Fourier'n sarjana (kaava 4). Fourier'n sarjassa oletetaan säröytyneen virran tai jännitteen syntyvän useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta komponentista. Kaavassa 4 on esitetty Fourier'n sarja jännitteelle ajan funktiona. (Korpinen ym. , 3.)

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) \quad (4)$$

, missä  $U_0$  on jännitteen tasakomponentti  
 $a_n$  on Fourier'n sarjan kerroin parillisille komponenteille  
 $b_n$  on Fourier'n sarjan kerroin parittomille komponenteille  
 $n$  on kokonaisluku  
 $\omega$  on kulmataajuus  
 $t$  on aika

Kaava 4 pätee yhtäläillä virralle, mutta jännitteen tasakomponentti  $U_0$  vaihtuu virran tasakomponenttiin  $I_0$ .

### 2.3 Kokonaissärö

Harmonisella kokonaissäröllä *THD* (Total Harmonic Distortion) kuvataan jännitteen tai virran poikkeamaa sinimuodosta. Harmonisten yliaaltojen määrää voidaan kuvata joko suhteessa perustaajuisen komponentin tehollisarvoon (*THD-F*) tai koko signaalin tehollisarvoon (*THD-R*). *THD-F* määritelmä on esitetty jännitteelle kaavassa 5. (STUL ry 2006, 29; Hietalahti 2011, 56; Karri 2013, 38.)

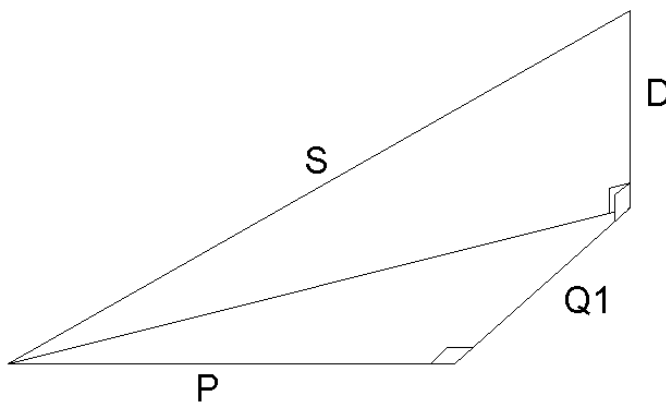
$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (5)$$

, missä  $U_1$  on perustaajuisen jännitteen tehollisarvo  
 $U_n$  on n:nen yliaaltojännitteen tehollisarvo

Sähkötekniikassa käytetään yleisesti määritelmää *THD-F*, koska sillä saavutetaan esimerkiksi parempi mittaustarkkuus. Kaava 5 pätee yhtäläillä virralle, mutta perustaajuisen jännitteen tehollisarvon  $U_1$  tilalle tulee perustaajuisen virran tehollisarvo  $I_1$  ja n:nen yliaaltojännitteen  $U_n$  tilalle tulee n:nen yliaaltovirran tehollisarvo  $I_n$ . (STUL ry 2006, 29; Hietalahti 2011, 56; Karri 2013, 38.)

## 2.4 Säröteho

”Yliaaltopitoisessa verkossa esiintyy pätö- ja loistehon lisäksi yliaaltojen muodostama säröteho  $D$ .” (STUL ry 2006, 36.) Säröteho ei loistehon lailla tee työtä ja sitä ei voida kompensoida perustaajuudelle tarkoitetuilla kompensointilaitteilla. Käytännössä voidaan sähköverkon olettaa olevan jäykkä, jolloin jännite pysyy sinimuotoisena, vaikka virta olisi epäsinimuotoinen. Lisäksi särötehon oletetaan sisältävän vain yliaaltoiloistehoa, joka johtuu verkon jäykkyydestä. Särötehon summautuminen on esitetty kuviossa 4. (Ruppa 2001, 9–10; Karri 2013, 38.)



KUVIO 4. Tehojen summautuminen. (ST 52.15 2004, 2)

Kuviosta 4 nähdään, kuinka perinteiseen tehokolmioon tulee tasoon nähden pystysuora komponentti  $D$  eli säröteho. Säröteho voidaan laskea kaavalla 6. Huomattavaan kaavassa 6 on, että  $P$  on kokonaispätöteho, eikä vain perustaajuinen pätöteho. (ST 52.15 2004, 2.)

$$D = \sqrt{S^2 + P^2 + Q_1^2} \quad (6)$$

, missä

- $D$  on säröteho
- $S$  on kokonaispätöteho
- $P$  on kokonaispätöteho
- $Q_1$  on perustaajuinen loisteho

Särötehon määritelmästä ei ole päästy kansainvälisesti yhteisymmärrykseen, joten muitakin määritelmiä on olemassa. Myöskään tässä ei näennäistehoja saa aritmeettisesti

summata yhteen, vaan ainoastaan samansuuntaisia tai vastakkaissuuntaisia komponentteja, eli pätötehoa, perusaaltoista loistehoa ja särötehoa. (Ruppa 2001, 10.)

## 2.5 Sopivan kompensointilaitteiston määrittäminen

Sopivan kompensointilaitteiston määrittäminen on yleensä tehtävä koko kiinteistön, tai jos mahdollista koko muuntopiirin, loistehotarpeet ja kompensointiratkaisut huomioiden. Käytännössä koko muuntopiirin kompensointiratkaisut on hankala määrittää, koska lopputulokseen vaikuttaa muiden muuntopiirissä olevien liittyjien kompensointilaitteet, joihin ei yleensä pääse vaikuttamaan. Peruseriaate loistehon kompensoinnissa on, että tarvittava loisteho tuotetaan mahdollisimman lähellä kulutuspistettä. Tämä johtaa useasti kalliisiin ratkaisuihin, joten loisteho pyritään kompensoimaan kuluttajan pääkeskuksessa yhdellä kompensointiyksiköllä. Kuitenkin sähkökuluttajan näkökulmasta joskus myös nousu-, ryhmä- tai laitekeskuksiin on järkevää asentaa kompensointia. Tällöin saadaan kevennettyä pää- tai nousukaapeleiden virtakuormitusta. (STUL ry 2006, 81, 85.)

Kondensaattoriyksikköä tai -paristoa mitoitettaessa on huomioitava, että kondensaattoriyksikön tai -pariston on kestävä jatkuva 1,3-kertainen nimellisvirta ilman, että se lämpenisi liikaa. Kapasitansseille sallitaan lisäksi  $\pm 10\%$ :n toleranssi. Tämä tarkoittaa, että kondensaattoriyksikön ja -pariston kytkentälaitteiden on kestävä 1,5-kertaa yksikön nimellisvirta. Lisäksi kytkentälaitteiden on kestävä oikosulkuvirta ja kytkentävirtasysäys. Yksittäisen pariston verkkoonkytkennän aiheuttama kytkentävirtasysäys voidaan laskea kaavalla 7. (Jaatinen 1990, 89; ABB TTT-Käsikirja 2000-07.)

$$I_{\text{sys1}} = \sqrt{2} \cdot I_N \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_N}} \quad (7)$$

, missä  $I_{\text{sys1}}$  on yksittäisen pariston sysäysvirta  
 $I_N$  on pariston nimellisvirta  
 $S_k$  on verkon oikosulkuteho  
 $Q_N$  on kondensaattoripariston nimellisloisteho

Jos verkossa on rinnakkain useampi paristo, kytkentävirtasysäys on huomattavasti voimakkaampi. Jos katkaisijan virtakestoisuus ei riitä, voidaan sysäysvirtaa rajoittaa vaimennuskuristimilla. Rinnakkaisten paristojen sysäysvirta voidaan laskea kaavalla 8. (Jaatinen 1990, 90.)

$$I_{\text{sys2}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot \sqrt{\left(\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{L_1 + L_2}\right)} \quad (8)$$

, missä  $I_{\text{sys2}}$  on rinnakkaisten paristojen sysäysvirta  
 $U$  on verkon pääjännite  
 $C_1$  ja  $C_2$  ovat kondensaattoreiden kapasitanssit  
 $L_1$  ja  $L_2$  ovat kondensaattoriparistojen liitäntäjohtojen ja mahdollisten vaimennuskuristimien induktanssit

Kompensointia suunniteltaessa on huomioitava myös kondensaattorin verkkoonkytkennästä aiheutuva jännitteenmuutos. Ylimitoitettun kondensaattorin aiheuttama jännitteenousu näkyy esimerkiksi valojen äkillisenä kirkastumisena. Jännitteenousu pyritään rajoittamaan 3 %:iin. Päällekytkennän aiheuttama jännitteenousu voidaan laskea kaavalla 9. (Jaatinen 1990, 89.)

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{1}{1 - \frac{Q_N}{S_k}} \quad (9)$$

, missä  $U_1'$  on jännite kytkennän jälkeen  
 $U_1$  on jännite ennen kytkentää  
 $Q_N$  on pariston nimellisoisteho  
 $S_k$  on verkon oikosulkuteho kondensaattorin kytkentäpisteessä

Kondensaattorikokoa määritettäessä on huomioitava kaavalla 10 laskettu resonanssitaajuus. Tämä taajuus ei saa osua parittomien kolmella jaollisten yliaaltojen tai mahdollisen verkkokäskyohjaustaajuuden läheisyyteen. Käytännössä verkon kytkentätilanne muuttuu hyvin usein, joten myös resonanssitaajuus muuttuu kytkentätilanteen muuttuessa. Tämän takia oikean kondensaattorikoon määrittäminen on hankalaa. Kaavalla 10 voidaan kuitenkin laskea esimerkiksi normaaliin käyttötilanteeseen sopivan kondensaattorin



torin koko. Lisäksi uutta laitteistoa suunniteltaessa ei todennäköisesti tiedetä todellisia kulutuksia, joten kaavalla 10 saatua tulosta voidaan pitää suuntaa-antavana. (Jaatinen 1990, 90.)

$$f_{\text{res}} = f_0 \cdot \sqrt{\frac{Q_N}{S_k}} \quad (10)$$

, missä  $f_{\text{res}}$  on verkon resonanssitaajuus  
 $f_0$  on verkon perustaajuus  
 $Q_N$  on pariston nimellisloisteho  
 $S_k$  on verkon oikosulkuteho kondensaattorin kytkentäpisteessä

Kompensointi vaikuttaa koko sähkönjakelujärjestelmään ja yhtälailla muu verkko vaikuttaa kompensointilaitteiden toimivuuteen. Tämän takia kompensointi tulee suunnitella yhteistyössä paikallisen jakeluverkkoyhtiön kanssa. Jakeluverkkoyhtiö suorittaa sähköverkon loistehotarpeen ja kompensointitarpeen seuranta, esimerkiksi verkostolaskentaohjelmalla. Verkostolaskentaohjelmalla voidaan laskea kompensoinnin vaikutus verkon erilaisissa kytkentätilanteissa ja muilla taajuuksilla kuin verkon perustaajuudella. Jos tiedetään kompensointikohteen pätöteho, tämänhetkinen tehokerroin ja haluttu tehokerroin, voidaan loistehotarve laskea kaavalla 11. (Jaatinen 1990, 91; STUL ry 2006, 93–94.)

$$Q_{\text{tarv}} = P \cdot f \quad (11)$$

, missä  $Q_{\text{tarv}}$  on tarvittava loisteho  
 $P$  on pätöteho kilowatteina  
 $f$  on halutun  $\cos\varphi$ :n kerroin

Kaavassa 11 kerroin  $f$  saadaan liitteen 1 taulukosta.

## 2.6 Kompensointitavat

70-luvulle asti loistehoa on tuotettu lähes yksinomaan generaattoreilla ja tuotettu loisteho on siirretty sähköverkossa kuten pätötehokin. Teollisuudessa on käytetty tavallisesti tahtimoottoreita, jotka kehittävät tarvitsemansa loistehon itse. Tahtimoottorit ovat hankittu ylimagnetointimahdollisuudella, jotta on voitu kehittää muille laitteille niiden tarvitsemaa loistehoa. Mitä enemmän loistehoa on haluttu kehittää, sitä suuremmaksi ovat muodostuneet koneiden hankintahinnat. Lisäksi kun loistehoa kehitetään pyörivillä koneilla, joudutaan jakeluverkko mitoittamaan suuremmaksi, kuin mitä pelkkä pätöteho-siirto vaatisi. (Jaatinen 1990, 50–51, 20–21.)

Tahtikoneilla tuotettu loisteho aiheuttaa myös lähäviöitä, jotka ovat suuruusluokkaa 10...30 W/kVAr. Häviöiden suuruus riippuu esimerkiksi koneen fyysisistä ominaisuuksista ja kehitettävän loistehon määrästä. Nostamalla koneen tehokerrointa lähemmäs yhtä, pienenevät häviöt, mutta samalla myös kehitetty loisteho pienenee. Pyörivällä kompensoinnilla voidaan kompensoida vain symmetrisiä loistehon muutoksia ja kompensoinnin nopeutta rajoittaa kompensointin magnetointikään suuri induktanssi. Tahtikoneilla toteutettu kompensointi on mielekäästä jos tahtikonetta voidaan tehokkaasti hyödyntää itse teollisuusprosessissa. (Jaatinen 1990, 50; STUL ry 2006, 63–64.)

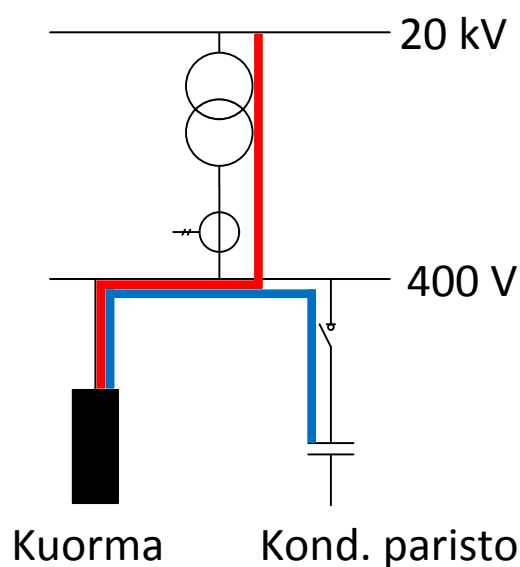
70-luvulla tapahtui voimakas energian hinnan nousu ja verkon rakentamiskustannusten sekä kondensaattoreiden hankintahinta ja käyttökustannukset kehittyivät siihen suuntaan, että loistehoa ei ollut enää kannattavaa tuottaa pyörivillä koneilla. Tämä on johtanut tilanteeseen, jossa tarvittava loisteho kehitetään kondensaattoreilla. Pienjännitteellä käytetyt kondensaattorit valmistetaan itseparantuvasta metalloidusta polypropyleenikalvosta. Itseparantuvuudella tarkoitetaan, että kondensaattorissa tapahtuva läpilyönti ei aiheuta pysyvää oikosulkua, vaan läpilyöntipaikan ympäriltä höyrystyy ohut metallikalvo pois. Lisäksi tällaisten kondensaattorien häviöt ovat suuruusluokkaa 0,2 W/kVAr, eli hyvin pienet. (Jaatinen 1990, 50, 80; STUL ry 2006, 48.)

Kompensointiin käytettävät ratkaisut vaihtelevat esimerkiksi kompensoitavien laitteiden ja verkon yliaaltopitoisuuden mukaan. Yhtä oikeaa vaihtoehtoa kompensointiin ei ole, vaan kompensointitarve on katsottava tapauskohtaisesti. Tämä saattaa johtaa, että joudutaan käyttämään useita eri kompensointimenetelmiä. Kondensaattoreilla toteutettu

kompensointi voidaan jakaa esimerkiksi STUL ry:n mukaan seuraavasti: (Jaatinen 1990, 66; STUL ry 2006, 48.)

- laitekohtainen, ryhmäkohtainen tai keskitetty kompensointi
- pien-, keski- tai suurjänniteverkon kompensointi
- induktiivisen tai kapasitiivisen loistehon kompensointi
- pelkkä kompensointi tai kompensointi ja yliaaltojen suodattaminen (tai rajoittaminen)
- sarja- tai rinnankytketyt paristot
- passiivi- tai aktiivilaitteet

Laitekohtainen kompensointi tarkoittaa, että jokaiselle laitteelle sijoitetaan erikseen omat kondensaattorit. Loisteho tai osa siitä tuotetaan mahdollisimman lähellä kulutuspaikkaa eli loistehon kompensoinnin vaikutus verkon mitoittukseen, jännitehäviöön ja loistehon säätöön on huomioitu parhaalla mahdollisella tavalla. Käytettäessä kojekoh- taista kompensointia tuotetaan loistehoa vain tarvittava määrä ja vain silloin kun laite on käytössä eli ylikompensointia ei voi tapahtua. Tätä kompensointia käytetään yleisimmin moottoreilla sekä valaisimilla ja se voidaan toteuttaa joko rinnan- tai sarjakompensoin- tina. Kuviossa 5 on esitetty rinnakkaiskompensoinnin periaate. Kuvion 5 punainen väri kuvaa pätötehoa ja sininen väri kuvaa loistehoa. (Jaatinen 1990, 66.)



KUVIO 5. Rinnakkaiskompensoinnin periaate. (STUL ry 2006, 50 muokattu)

Rinnakkaiskompensoinnilla tarkoitetaan, että kondensaattorit kytketään kuorman rinnalle ja sarjakompensointi tarkoittaa, että kondensaattorit ovat sarjassa kuorman kanssa. Rinnakkaiskompensointia käytetään pienjännitepuolella joko ryhmä- tai pääkeskuksessa, eli kompensointikondensaattorit ovat keskitetysti yhdessä paikassa. Rinnakkaiskompensointia käytetään myös laitekohtaisessa kompensoinnissa, jossa kompensointikondensaattorit ovat välittömästi laitteen rinnalla. Tällöin ne ovat käytössä vain silloin kun laitettakin käytetään. Sarjakompensointia käytetään lähinnä sen jännitettä nostavien ominaisuuksien takia pitkillä (kantaverkko) siirtolinjoilla. Sarjakompensoinnilla voidaan nostaa johdon tehonsiirtokapasiteettia 30–50 %. Uuden siirto johdon rakentaminen on kuitenkin halvempi vaihtoehto jos tehonsiirtotarve on pysyvästi suurempi, kuin nykyisten johtojen kapasiteetti. (Elovaara & Laiho 1988, 122; Repo 2000, 21; STUL ry 2006, 49–52.)

Moottoreiden rinnankompensoinnissa on huolehdittava, että tehokerroin ei nouse yli 0,98–0,99:ään. Jos tehokerroin nousee tämän yli, on mahdollista, että tapahtuu itseherätys. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi pumppuna toimiva moottori jatkaakin toimintaansa generaattorina poiskytkennän jälkeen huimamassan vaikutuksesta. Generaattorina toimiva moottori voi synnyttää käämiinsä ylijännitteen. (STUL ry 2006, 89.)

Ryhmäkompensoinnilla tarkoitetaan yksittäisen kolmivaihe ryhmän, esimerkiksi loisteputkivalaisinryhmän tai usean moottorin, kompensointia. Kompensointiin tarkoitettut kondensaattorit ovat sijoitettuna joko pää- tai ryhmäkeskukseen joten voidaan puhua myös keskitetystä kompensoinnista. (Jaatinen 1990, 72; Harsia 2009.)

Keskitetty kompensointi voidaan toteuttaa esimerkiksi kiinteillä kondensaattoriyksiköillä tai -paristoilla tai säädettävillä kondensaattoriparistoilla. Pienjänniteyksikkö koostuu useasta rinnankytketystä kondensaattorielementistä, jotka ovat varustettu yleensä sisäisellä suojalla ylivirtaa, ylipainetta ja ylipainetta vastaan. Yksiköt ovat yleensä kolmivaiheisia ja sisäisesti kytkettyinä joko kolmioon tai tähteen. Yksikkökoot ovat väliltä 2,5...100 kVAr ja nimellisjännite on yleensä 400 V, 525 V tai 690 V. Pienjännitteellä käytetään yleensä ulkoista purkausvastusta, jonka tarkoitus on laskea kondensaattorin jäännösjännite turvalliselle tasolle. Aikaisemmin sähköturvallisuusmääräykset määrittivät tämän siten, että alle 660 V:n nimellisjännitteisen kondensaattorin oli purkauduttava minuutissa 50:een volttiin. Pienjännitesähkösäätöstandardi SFS 6000 ei ota tähän kantaa, mutta koneiden sähköasennuksia koskevan standardin SFS-EN 60204-1 mukaan

jäännösjännitteen ollessa yli 60 V syötön katkaisun jälkeen, on se purettava 60 V:iin tai sen alle enintään 5 sekunnin kuluessa syötön katkaisusta, jos se ei häiritse laitteiston toimintaa. (STUL ry 2006, 48–49.)

Kiinteällä kondensaattoriyksiköllä tarkoitetaan, että kondensaattorit ovat jatkuvasti kiinni sähköverkossa ilman minkäänlaista säätöä. Loistehoa kehitetään, vaikka kulutuspaikka ei sitä tarvitsisikaan, eli loistehoa syötetään oman verkon ulkopuolelle. Kiinteän kompensoinnin riskinä ovat mahdolliset käyttökeskeytykset kompensoinnin vikaantumisessa ja verkon ylikompensointi. Tämän takia pelkkä kiinteä kompensointi ei ole mielekäs vaihtoehto. Lisäksi pelkkiä rinnakkaiskompensointiparistoja ei enää saa asentaa sähköverkkoon, mutta vanhat laitteistot voidaan käyttää elinikänsä loppuun. (Jaatinen 1990, 76; STUL ry 2006, 88; Tampereen Sähköverkko Oy 2012, 4.)

Säädettävät eli automatiikkaparistot puolestaan koostuvat kondensaattoriyksiköistä sekä kytkin- ja suojalaitteista. Kondensaattoriyksiköt ovat varustettu kontaktoreilla ja varokkeilla ja kontaktoreiden päälle- ja poiskytkennästä huolehtii loistehonsäädin. Säätimelle on asetettu havahtumisrajat induktiiviselle ja kapasitiiviselle puolelle ja kulloinkin loistehontarve saadaan kuorman syöttökaapelin virtamuuntajan mittaustiedoista. Automatiikkaparistoja ei kuitenkaan saa käyttää yliaaltopitoisessa verkossa resonanssivaaran vuoksi. (Jaatinen 1990, 77; STUL ry 2006, 49–50; Ketola 2009, 2.)

## 2.7 Estokelaparistot

Yliaaltojen lisääntyminen sähköverkossa on johtanut siihen, että nykyään kompensointiin käytetään automatiikkaparistojen sijaan estokelaparistoja kompensoinnin perusratkaisuna. Suositus on, että estokelaparistoa käytetään jos verkon jännitteen harmoninen kokonaissärö on yli 3 %. Esimerkiksi Tampereen Sähköverkko Oy, Helen Sähköverkko Oy ja E.ON Kainuun Sähköverkko Oy ovat määritelleet estokelaparistot perusratkaisuksi kompensointiin ja muista kompensointitavoista on sovittava erikseen paikallisen siirtoverkkoyhtiön kanssa. (ST 52.16 2004, 7; Helen Sähköverkko Oy 2009, 3; E.ON Kainuun Sähköverkko Oy 2012, 3; Tampereen Sähköverkko Oy 2012, 4.)

Estokelaparistossa kolmioon kytkettyjen kondensaattoreiden kanssa sarjassa on kelat. Kelojen tarkoitus on estää yliaaltojen aiheuttamat resonanssit, jotka voivat syntyä kon-

densaattorien kapasitanssien ja verkon induktanssin välille. Ilman kela on mahdollista, että kondensaattorin kapasitanssi ja verkon induktanssi muodostavat rinnakkaisresonanssiin jonkin olemassa olevan yliaallon taajuudelle. Tämä voi johtaa viritystaajuudelle osuvien virtojen vahvistumiseen jopa 20-kertaiseksi. Kun kytketään sarjaan kondensaattori ja kela, saadaan sarjaresonanssiin. Tämän piirin viritystaajuus asetetaan alemmalle taajuudelle, kuin mitä verkossa esiintyvä harmoninen yliaaltotaajuus on. Verkon taajuuden ollessa alle viritystaajuuden, paristo on kapasitiivinen ja tuottaa loistehoa. Vastaavasti viritystaajuuden yläpuolella paristo on induktiivinen ja ei vahvista tyypillisiä yliaaltotaajuuksia. Yleisesti Suomessa käytetyt viritystaajuudet ovat 189 Hz, 141 Hz ja 134 Hz. Näitä taajuuksia käytetään, jotta mahdollisille verkkokäskyohjaussignaaleille muodostuu riittävän suuri impedanssi vaimenemisen estämiseksi. Viritystaajuus vaikuttaa estokelan yliaaltojen suodatuskykyyn, joka tyypillisesti on 10...50 % viidennen yliaaltovirran määrästä. (ST 52.16 2004, 7; STUL ry 2006, 52–53; Sähköinfo Oy 2009, 81; Tampereen Kondensaattoritehdas Oy 2013,1.)

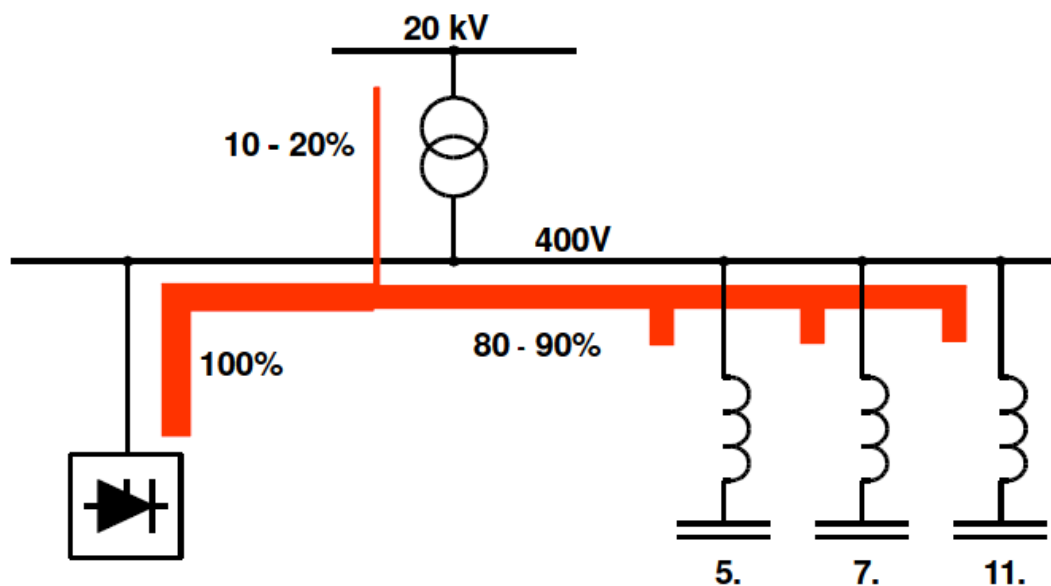
Estokelaparistojen viritystaajuutta määritettäessä on huomioitava paikallisen sähköverkkoyhtiön määräykset liittyen verkkokäskyohjaussignaaleihin. Väärin määritetty viritystaajuus voi joko oikosulkeutua ja täten kuormittaa verkonhaltian verkkokäskyohjausjärjestelmää tai estää sen toiminnan. Jos estokelan viritystaajuus on lähellä verkkokäskyohjaustaajuutta, voidaan käyttää erillistä estopiiriä signaalin vaimentumisen estämiseen. Joissain tapauksissa myös signaalitason nosto voi vähentää ohjaussignaalien vaimentumista. (STUL ry 2006, 53,77; Helen Sähköverkko Oy 2009, 3.)

Estokelapariston toimintaa ohjaa loistehonsäädin, joka kytkee päälle ja pois tarvittavan määrän kompensointiportaita. Säädin vaatii toimiakseen virta- ja jännitemittaukset kompensoitavasta verkosta sekä aseteltavat parametrit. Nykyisissä loistehosäätimissä on tehokaskennan lisäksi sähkönsäädin laadun mittaussäädinmahdollisuuksia, kuten jännitteen ja virran kokonaissärö sekä harmoniset komponentit. Lisäksi säätimestä saadaan luettua häilytykset ja laitteisto voidaan kytkeä pois verkosta kompensointilaitteiston oman häiriön tai kompensoitavan verkon häiriön aiheuttamasta syystä. (Ketola 2009, 6–7.)

## 2.8 Suodattimet

Yliaaltopitoisissa verkoissa voidaan käyttää kompensointiin yliaaltosuodattimia. Ne tuottavat tarvittavan loistehon samalla tavalla kuten esimerkiksi estokelaparisto ja suodattavat samalla verkon yliaaltovirtoja, jolloin verkon jännitesäro pienenee ja sähkölaatu paranee. (STUL ry 2006, 55; Seesvuori 2011, 15.)

Yliaaltosuodatin koostuu kelan ja kondensaattorin sarjakytkennästä. Kondensaattorit mitoitetaan niin, että ne tuottavat perustaajuudella halutun kompensointiasteen. Kelojen induktanssi puolestaan määritetään siten, että kondensaattorit yhdessä kelojen kanssa muodostavat yliaaltotaajuudella hyvin pieni-impedanssisen sarjaresonanssipiirin. Tällöin suurin osa yliaalloista kulkeutuu suodattimeen. Piirit viritetään yleensä 5. 7. ja 11. yliaallon taajuudelle. Suodatinpariston periaate on esitetty kuvioissa 6. (STUL ry 2006, 55; Seesvuori 2011, 12–13.)



KUVIO 6. Suodatinpariston periaate. (Seesvuori 2011,4)

Kolmas yliaalto on erityisen hankala sen nollajohtimeen summautumisensa vuoksi. Lisäksi TN-C-S järjestelmässä 3. yliaalto aiheuttaa nollajohtimen ympärille 150 Hz:n magneettikentän. Nollajohdin on perinteisesti ollut pinta-alaltaan puolet äärijohtimen pinta-alasta ja yliaaltojen aiheuttaman suuren virran takia on joskus aiheutunut nollajohdinten ylikuormittuminen ja poikkipalaminen. Kolmannen yliaallon määrään voidaan vaikuttaa niin sanotulla estopiirillä eli rinnakkaisresonanssipiirillä, suodattimella eli yksivaiheisella nollan ja vaiheen väliin kytkettävällä sarjaresonanssipiirillä tai aktiiv-

visuodattimella. Estopiiri muodostaan nollajohtimen kanssa sarjaan kytkettynä suuren impedanssin 3:nen yliaallon taajuudelle, jolloin yliaaltovirta ei pääse enää kulkemaan nollajohtimessa. Suodatin puolestaan muodostaa pieni-impedanssisen kulkureitin, jonka kautta kolmas harmoninen yliaaltovirta kulkee. Suodatin tuottaa myös halutun määrän loistehoa ja pienentää jännitesäröä. (STUL ry 2006, 57–58.)

Edellä mainitut suodattimet ovat niin sanottuja passiivisuodattimia, joiden rinnalle ovat tulleet puolijohdetekniikalla toteutetut aktiivisuodattimet. Passiivisten suodattimien huono puoli on niiden kyky vastata verkon yliaaltotilanteiden muutoksiin. Passiiviset suodattimet suodattavat vain ennalta määritellyt yliaallot, kun aktiiviset suodattimet puolestaan mittaavat virran yliaaltokomponentit ja tuottavat niiden kanssa 180° vaihe-siirrossa olevan virran. Tämä virta summautuu yliaaltovirtaan, jolloin alkuperäinen yliaaltovirta kumoutuu. (STUL ry 2006, 62; Seesvuori 2011, 18.)

Aktiivisuodattimen toiminta on verrattavissa taajuusmuuttajan toimintaan. Kompensoitavan verkon lataamat kondensaattorit tuottavat tarvittavan energian ja invertterillä tuotetaan haluttu virta verkkoon pulssinleveysmodulaatiolla. Invertterissä käytetään yleensä IGBT-transistoreita, mutta myös GTO ja MOSFET transistorit ovat mahdollisia. (STUL ry 2006, 62.)

Aktiivisuodattimen etuja ovat esimerkiksi mahdollisuus valita useampia suodatettavia taajuuksia, mahdollisuus yliaaltojen suodattamiseen ilman loistehon tuotantoa, pienempi rinnakkaisresonanssivaara ja lähes viiveetön kytkentä. Aktiivisuodatin ei voi myöskään ylikuormittua, vaan jos kapasiteetti ylitetään, suodatin jatkaa toimintaansa normaalisti ja jättää kapasiteettinsa ylittävän osan kompensoimatta. Kolmella jaolliset parittomat yliaallot voidaan myös kompensoida aktiivisuodattimella, jolloin nollajohtimeen ei summaudu yliaaltovirtoja. Kompensoitavan virran suunnalla, käyrämuodolla ja virtamuutoksen dynamiikalla ei myöskään ole vaikutusta aktiivisuodattimeen, vaan virta voi olla joko induktiivista tai kapasitiivista ja kuorma voi olla epäsymmetrinen. (STUL ry 2006, 62; Seesvuori 2011, 18.)



## 2.9 Tyristorikytetyt kondensaattoriparisto

Nopeasti muuttuvilla kuormilla, esimerkiksi suuret hitsauskoneet ja valokaariuunit, ei kompensointitehoa voida ohjata mekaanisilla kytkinlaitteilla. Nopeasti muuttuvalle kuormalle pienjännitteellä voidaan käyttää tyristorikytettyä kondensaattoriparistoa (Thyristor Switched Capacitor, TSC), jonka etuina on esimerkiksi mekaaninen kulumat- tomuus, äänetön toiminta, lähes transienttivapaa kytkentä ja suuri kytkentänopeus. Li- säksi kompensoitavat laitteet voivat olla joko symmetrisiä tai epäsymmetrisiä ja pää- tai vaihejännitteeseen kytkettyjä. (STUL ry 2006, 60.)

Tyristorikytetylle paristolle tuodaan ohjaussignaali (yleensä virta- ja jännitesignaali) kompensoitavalta laitteelta, jolloin voidaan saavuttaa lähes viiveetön loistehon kompen- sointi. Tarvittaessa pariston kaikki portaat saadaan kytkettyä verkkoon minimissään yhdessä verkkojaksossa. Portaot koostuvat kondensaattorin ja kelan sarjakytkennästä, joka on viritetty alemmas kuin verkon alin yliaaltotaajuus. (STUL ry 2006, 60.)

## 2.10 Staattinen kompensointilaite

Nopeasti tapahtuviin jännitteen ja loistehon muutoksiin käytetään sähköverkossa ja teol- lisuudessa staattista kompensointilaitea (Static VAR Compensator, SVC). Esimerkiksi terästehtaiden valokaariuunit aiheuttavat nopeita muutoksia jännitteeseen ja loistehotar- peeseen. Tällaisen kuorman kompensointiin SVC on ainut ratkaisu. SVC koostuu tyris- torikytetystä kondensaattoriparistosta ja joko tyristorikytetystä reaktorista (Thyristor Switched Reactor, TSR) tai tyristoriohjatusta reaktorista (Thyristor Controlled Reactor, TCR). Ero tyristorikytetyn ja -ohjatun välillä on, että kytketty (TSR) toimii joko pääl- le-pois -menetelmällä, mutta ohjatusta (TSR) saadaan mikä tahansa haluttu arvo. (STUL ry 2006, 60; Siemens AG 2010, 8.)

### **3 KOMPENSOINTILAITTEIDEN KUNNOSSAPITO**

#### **3.1 Verkkoyhtiön määräykset ennen vuotta 1993 valmistetuista kompensointilaitteista**

Tampereen Sähköverkko Oy:llä ei ole varsinaista erillistä vaatimusta ennen vuotta 1993 valmistetuille kompensointilaitteille. Uusittaessa kompensointia Tampereen Sähköverkko Oy:n jakeluverkkoalueella, on otettava yhteyttä verkonsuunnitteluun. TSV Oy:n verkkoon ei saa enää liittää uusia rinnakkaiskondensaattoriparistoja, mutta vanhat paristot saavat olla verkossa käyttökänsä loppuun. (Tampereen Sähköverkko Oy 2012, 4; Marttila 2013.)

Ennen vuotta 1993 valmistetuissa kondensaattorielementeissä ei välttämättä ole sisäisiä sulakkeita, vaan suojana on käytetty pulverimaista vermikuliittia, joka on periaatteessa palamaton aine. Kuitenkin jos kompensointiyksikön kondensaattorielementin sisällä syttyy valokaari, joka ei sammuu, saattaa paine elementin sisällä kasvaa. Paineen kasvu voi aiheuttaa elementin hajoamisen, joka on joissain tilanteissa aiheuttanut tulipalon. Tämä ongelma on vain pienjännitepuolen kompensoinnissa, sillä TSV Oy:n verkossa on keskijännitepuolella ollut sisäiset sulakkeet kompensoinnissa jo vuodesta 1985. (Nerto 2013; Marttila 2013.)

Tähän asiaan ei TSV Oy:llä ole otettu kantaa, koska asia ei ole ollut laajemmin tiedossa, eikä yksittäisen asiakkaan kompensointilaitteiston vikaantuminen aiheuta ongelmia verkon käytettävyydelle. Tärkeämpänä asiana TSV Oy pitää, että kompensointi ei aiheuta verkkoon häiriöitä. (Marttila 2013.)

#### **3.2 Ylikompensointi Tampereen Sähköverkko Oy:n alueella 2014 alkaen**

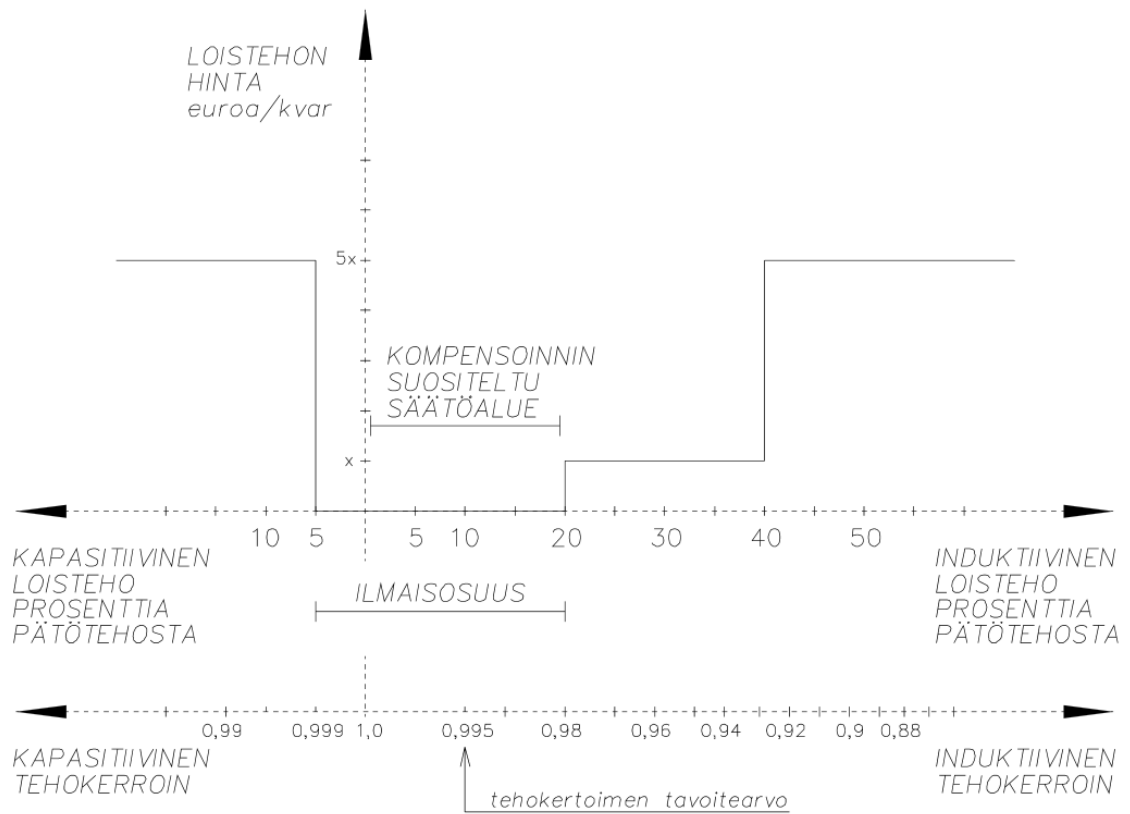
Kun kompensoidaan loistehoa, siirtyy tehokerroin kohti arvoa 1. Kun tämä arvo ylittää, siirrytään ylikompensointiin, jolla tarkoitetaan, että liittymän tehokerroin on kapasitiivinen ja se syöttää loistehoa verkkoon. Erityisesti kiinteät kompensointilaitteet ovat ongelmallisia, sillä ne tuottavat kevyen kuorman aikana enemmän loistehoa, kuin mitä on kulutusta. Jos kompensointipariston säätäjä on rikki tai väärin aseteltu, voi konden-

saattoriparisto tuottaa verkkoon ylimääräistä loistehoa. Lisäksi kaupunkiverkoissa, missä kaapelointi on runsasta, on verkon ominaiskapasitanssi valmiiksi suuri, joka yhdistettynä ylikompensointiin, näkyy esimerkiksi jännitteenousuna. Kompensoinnin aiheuttama jännitteenousu muuntajalla voidaan likimain laskea kaavalla 12. (Jaatinen 1990, 76; STUL ry 2006, 77–78; Tampereen Sähköverkko Oy 2012, 4.)

$$\Delta U(\%) = \frac{Q_c}{S_N} \cdot X_k(\%) \quad (12)$$

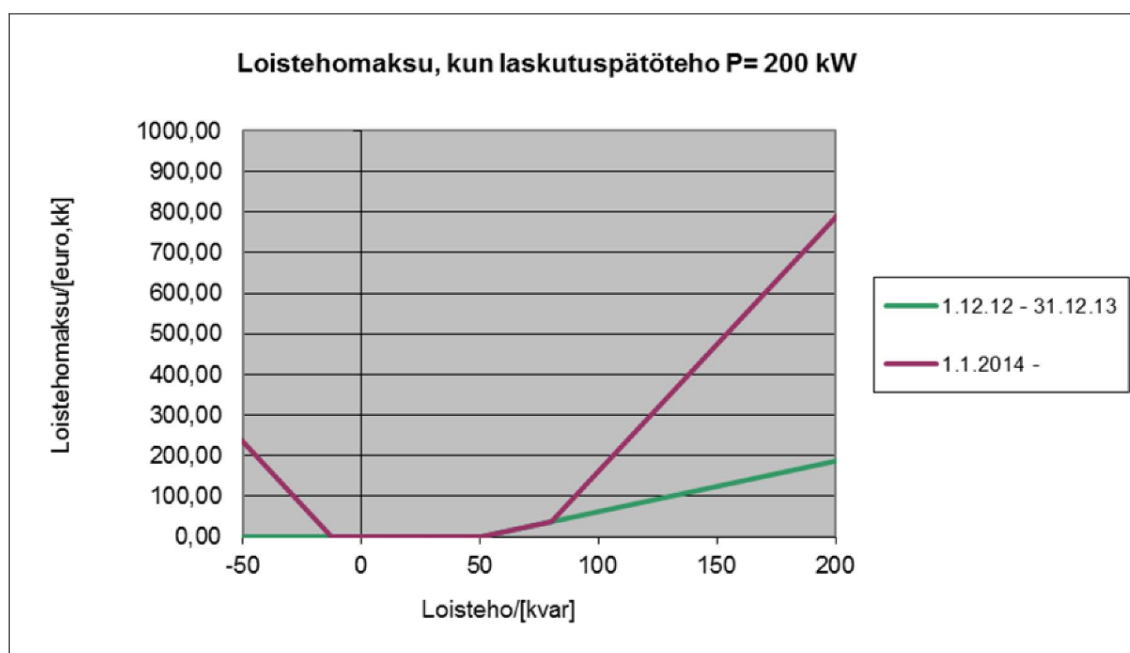
, missä  $\Delta U(\%)$  on jännitteen nousu prosentteina  
 $Q_c$  on kompensointiteho  
 $S_N$  on muuntajan nimellisteho  
 $X_k(\%)$  on muuntajan suhteellinen oikosulkureaktanssi

Tampereen Sähköverkko Oy:n alueella oleva liittymä ei saanut olla pysyvästi ylikompensoitu, mutta myöskään ylikompensoinnista ei joutunut maksamaan. Kuitenkin 1.1.2014 astui voimaan uusi hinnoittelumääritelmä, jolloin myös ylikompensoinnista tuli maksullista. Ylikompensoinnin ilmaisosuus on myös huomattavasti pienempi, kuin mikä on induktiivisella tehokertoimella (kuvio 7).



KUVIO 7. Loistehon hinnoitteluperiaate Tampereen Sähköverkko Oy:n alueella 1.1.2014 alkaen. (Tampereen Sähköverkko Oy 2012, 3)

Kuvion 7 ja Tampereen Sähköverkko Oy:n loistehomaksujen vaikutus käytännössä näkyy havainnollisesti kuviossa 8. Kuviossa 8 vihreä väri kuvaa vanhaa hinnoittelujärjestelmää ja violetti kuvaa 1.1.2014 alkanutta hinnoittelua. (Tampereen Sähköverkko Oy 2012, 4.)



KUVIO 8. Esimerkki loistehomaksuista. (Tampereen Sähköverkko Oy 2012, 7)

Kuvion 8 esimerkkitapauksessa laskutuspätöteho on 200 kW ja loistehon ilmaisosuus on  $-12,5 \dots 50$  kVar. Kuviossa 8 y-akselin vasemmalla puolella tehokerroin on kapasitiivinen, eli verkkoon syötetään loistehoa. Vastaavasti kuvion 8 oikealla puolella tehokerroin on induktiivinen ja verkosta otetaan loistehoa.

### 3.3 Kompensointilaitteiden huolto

Kompensointilaitteiston huolto tulisi suorittaa säännöllisin väliajoin. Kuitenkin yleensä sähkö tarkastuksissa kompensointilaitteistot ovat yleensä todettu olevan vailla minkäänlaista huoltoa ja laitteiston vikaantuminen on todettu vasta loistehomaksuista tai kun on aiheutunut savu- tai palovahinkoja. Yksittäisen portaan vikaantuminen on vaikea havaita, koska sen vaikutus kokonaisuuteen on pieni. Eli jos loistehomaksuissa tapahtuu äkillinen muutos, on hyvinkin mahdollista, että laitteisto on vikaantunut. Yleensä huollosta aiheutuvat kustannukset jäävät alle 10 %:iin laitteiston hankintahinnasta. (Jaatinen 1990, 199; SÄTY ry 2002, 29; STUL ry 2006, 106.)

Kompensointilaitteiston huolto aloitetaan silmämääräisellä tarkistamisella, jolla pyritään havaitsemaan mahdolliset ulkoisesti näkyvät vauriot. Näitä voivat olla esimerkiksi rikkiänen astia, palaneet sulakkeet, irronneet kaapeliliitokset tai pariston muodonmuutos. Myös ympäristön lämpötila on syytä ottaa huomioon, koska kondensaattorit ovat herk-

kiä kuumuudelle. Kuvassa 1 on havainnollistava esimerkki siitä mitä silmämääräisessä tarkistuksessa voidaan havaita. Kuvan 1 vasemmanpuoleinen kondensaattoriyksikkö on pullistunut ja näkyvissä on myös itsestään sammuneen tulipalon jälkiä. (STUL ry 2006, 108.)



KUVA 1. Vikaantunut kondensaattoriyksikkö. (Kuva: Arto Vitkala 2013)

Kompensointilaitteiden takuuaikainen huoltaminen on myös tärkeää. Kuvassa 2 on yhden vaiheen johto sulanut poikki, joka havaittiin vasta takuuajan umpeuduttua.



KUVA 2. Kontaktori, jonka yhden vaiheen johto on sulanut. (Kuva: Arto Vitkala 2014, muokattu)

Huoltotoimenpiteet voidaan listata Jaatisen mukaan esimerkiksi seuraavasti: (Jaatinen 1990, 120.)

- paristojen puhdistus
- eristimien puhdistus
- säätäjän asetteluarvojen tarkistus
- pariston koon tarkistus loistehohuippua tarkkailemalla
- paristojen astian vuotojen tarkistus käyttö- ja huoltokäyntien yhteydessä
- kapasitanssiarvojen tarkistus esimerkiksi mittaamalla yksikön virta pihtivirtamittarilla ja vertaamalla sitä kilpiarvon mukaiseen nimellisvirtaan
- kaapeliliitosten tarkistus ja tarvittaessa kiristys
- kontaktoreiden kunnan tarkistus ja mahdollinen huolto

Edellä mainittuun listaan voidaan lisätä ilmansuodattimen puhdistus tai vaihto, ohjaussähkön riviliittimien tarkistus ja tarvittaessa kiristys sekä hälytysten toiminnan tarkistus. Lisäksi on hyvä tarkistaa kompensointilaitteiston termostaatin toiminta ja ennen varsinaisia huoltotoimenpiteitä suositellaan tehtäväksi kohteelle lämpökamerakuvaus. (Mico-ra 2013, 2.)

### 3.4 Mittaukset

Ylläpitomittauksia on hyvä suorittaa aika ajoin, millä todetaan pariston ja sulakkeiden kunto. Muuten ylläpitoon liittyvät mittaukset ovat lähinnä kompensoinnin riittävyyden tarkastelua ja säätäjän toiminnan tarkastamista. Myös virta- ja jänniteylijältojen määrää on hyvä tarkkailla jos on aihetta olettaa niiden aiheuttavan häiriötä muuhun verkkoon tai niiden oletetaan kasvavan verkossa. (STUL ry 2006, 106.)

Kompensointilaitteistoa huollettaessa tarvittavat mittarit ovat pihtiampeerimittari, yleismittari ja kapasitanssimittari. Yleismittareissa on yleensä kapasitanssimittausominaisuus, mutta erillinen kapasitanssimittari on hyvä olla, jotta voidaan vertailla saatuja mittaustuloksia. (STUL ry 2006, 109)

#### 3.4.1 Virta

Virtamittaus on yksinkertaisin tapa tutkia onko kompensointilaitteisto kunnossa. Mittauksessa kyseisen portaan on oltava käytössä ja pihtiampeerimittarilla mitataan joka vaiheen virta ja verrataan sitä portaan tyyppikilvessä ilmoitettuun nimellisvirtaan. Kondensaattorilaitteiston nimellisvirta voidaan laskea kaavalla 15. (STUL ry 2006, 109.)

$$I_N = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (15)$$

, missä  $I_N$  on kondensaattorilaitteiston nimellisvirta  
 $Q$  on kompensointiteho  
 $U$  on pääjännite

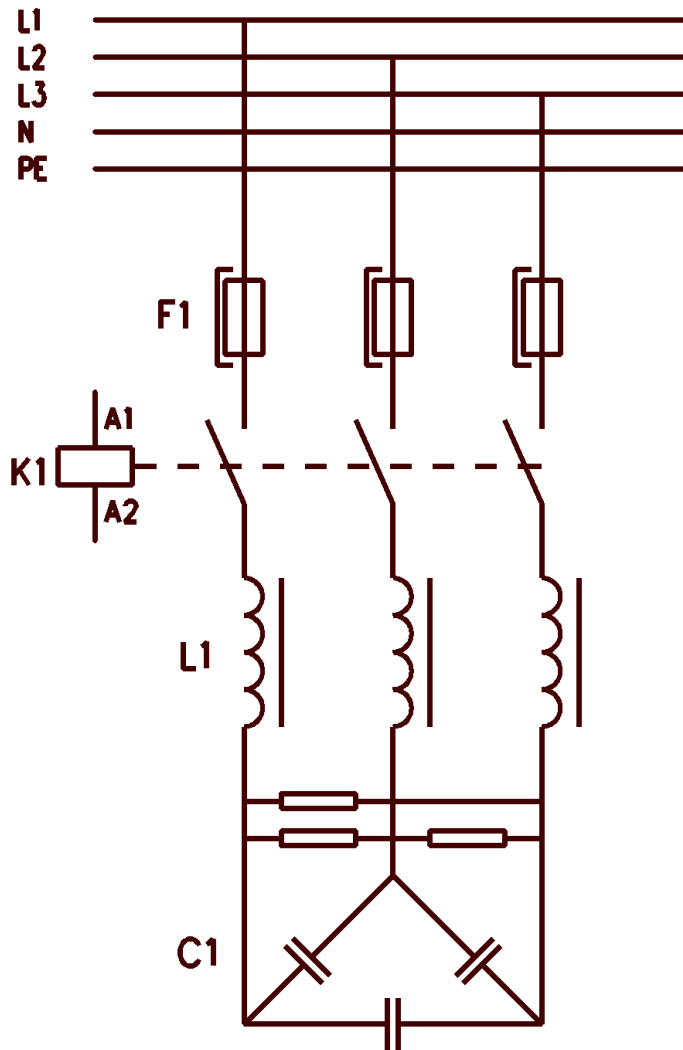


Jos portaan virta poikkeaa muiden vastaavankokoisten portaiden virrasta, se ilmaisee portaan tehon olevan laskenut. Eri vaiheiden virtoja on hyvä vertailla keskenään, jotta nähdään toimiiko kompensointi symmetrisesti. (STUL ry 2006, 109.)

### **3.4.2 Kapasitanssi**

Kapasitanssi on varmempi tapa mitata kondensaattorin kunto. Pihtiampeerimittauksen tulos voi muuttua esimerkiksi sen mukaan, missä asennossa mittari on kaapeliin nähden. Kapasitanssit mitataan jännitteettömästä kompensointilaitteesta joko yleismittarilla tai kapasitanssimittarilla. Jos kapasitanssiarvo on laskenut merkittävästi nimellisestä arvostaan, on kyseinen porras vioittunut ja sitä ei saa kytkeä käyttöön. Jännitteettömyys on todettava huolellisesti, sillä vaikka laitteistosta olisikin katkaistu jännite, jää kondensaattoreihin varaus joksikin aikaa. Purkautuminen kestää erityisen kauan jos kondensaattorielementistä puuttuvat purkausvastukset. (STUL ry 2006, 109.)

Kuviossa 9 on havainnollistettu, kuinka kondensaattorit ovat tyypillisesti estokelaparis-tossa jokaisessa portaassa kytketty kolmioon. Kuvion 9 muut komponentit ovat kahvasulakkeet F1, kontaktori K1, kelat L1 ja vaiheiden välissä olevat purkausvastukset.



KUVIO 9. Estokelapariston yhden portaan periaatekuva.

Mittauksissa on myös syytä kiinnittää huomiota kilpiarvoihin kondensaattoriparistossa ja yksittäisessä kondensaattorielementissä, koska pariston oven tyyppikilven arvot voivat olla 400 V jännitetasossa ja yksittäisen elementin arvot puolestaan 525 V jännitetasossa. Jännitteen vaikutus kompensointitehoon näkyy kaavassa 13. On syytä huomata, että kaava 13 antaa tulokseksi kolmivaiheisen kompensointitehon.

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \quad (13)$$

, missä  $Q$  on kompensointiteho  
 $f$  on taajuus  
 $C$  on kapasitanssi  
 $U$  on pääjännite

Tästä nähdään kuinka jännitteen nousu nostaa myös kompensointitehon arvoa, jos muut arvot pysyvät vakiona. Vastaavasti kapasitanssi voidaan esittää kaavalla 14.

$$C = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2} \quad (14)$$

, missä  $Q$  on kompensointiteho  
 $f$  on taajuus  
 $C$  on kapasitanssi  
 $U$  on pääjännite

Kaavan 14 kapasitanssi on kolmivaiheinen kapasitanssi. Yhden vaiheen kapasitanssia on käsitelty kaavassa 16.

Tarkastellaan seuraavaksi erästä huollettua 50 kVAr kondensaattoriyksikköä. Jos nimellisloistehoksi on ilmoitettu 400 V jännitteellä 50 kVAr, niin kaavan 14 perusteella kolmivaiheinen nimelliskapasitanssi on:

$$C = \frac{50 \text{ kVAr}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 400 \text{ V}^2} = 995 \text{ } \mu\text{F}$$

Yleensä mittauksessa tarvitaan yhden vaiheen kapasitanssia. Schneider Electricin mukaan kaavalla 16 voidaan laskea haluttu yhden vaiheen kapasitanssi. (Schneider Electric 2011, 70.)

$$C_v = \frac{Q_N}{4 \cdot \pi \cdot f_N \cdot U_N^2} \quad (16)$$

, missä  $C_v$  on yhden vaiheen kapasitanssi  
 $Q_N$  on nimellisloisteho  
 $f_N$  on nimellistaajuus  
 $U_N$  on nimellijännite

Tällöin 50 kVAr portaalle yhden vaiheen kapasitanssi on kaavan 16 perusteella:

$$C_v = \frac{50 \text{ kVar}}{4 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 400 \text{ V}^2} = 0,000497359 \text{ F} \approx 497,4 \mu\text{F}$$

Schneider Electricin mukaan mitatuista kapasitanssiarvoista voidaan laskea kolmivaiheisen kolmiokytketyn kompensointiportaan tuottama loisteho. Tämä on esitettyä kaavassa 17. (Schneider Electric 2011, 70.)

$$Q_M = \frac{2}{3} \cdot (C_{12} + C_{23} + C_{31}) \cdot U_N^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N \quad (17)$$

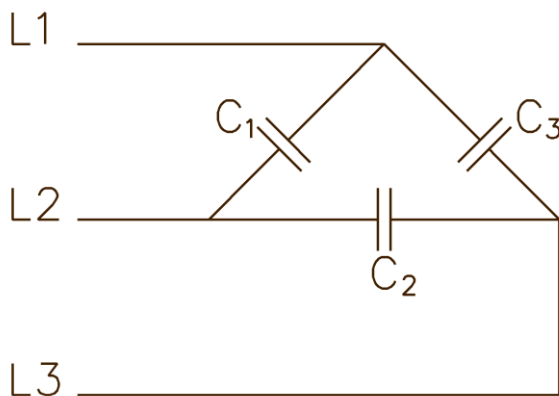
, missä  $Q_M$  on kompensointiportaan tuottama loisteho  
 $C_{12}$  on vaiheiden L1–L2 välinen kapasitanssi  
 $C_{23}$  on vaiheiden L2–L3 välinen kapasitanssi  
 $C_{31}$  on vaiheiden L3–L1 välinen kapasitanssi  
 $U_N$  on nimellisjännite  
 $f_N$  on nimellistaajuus

Kaava 17 voidaan johtaa seuraavalla tavalla (Mäkinen 2014). Kolmivaiheinen loisteho voidaan laskea jännitteen ja kapasitiivisen reaktanssin avulla kaavalla 18:

$$Q = 3 \cdot \frac{U_N^2}{X_c} \quad (18)$$

, missä  $X_c$  on kapasitiivinen reaktanssi

Mäkisen mukaan vaiheiden välistä mitattu kapasitanssi voidaan esittää kuvion 10 mukaisella mittauskytkennällä (Mäkinen 2014.):



KUVIO 10. Mittauskytkentä. (Kuva: Mäkinen 2014, muokattu)

Kuvion 10 mukaisen mittauskytkennän vaiheiden välistä mitatut kapasitanssit voidaan olettaa likimain yhtä suuriksi, jolloin vaiheiden välinen kapasitanssi  $C_m$  saadaan kaavalla 19. Kaavassa kapasitanssi  $C_{12}$  on mitattu vaiheiden L1 ja L2 välistä, kapasitanssi  $C_{23}$  vaiheiden L2 ja L3 sekä kapasitanssi  $C_{31}$  vaiheiden L3 ja L1 välistä (Mäkinen 2014):

$$C_m = \frac{C_{12} + C_{23} + C_{31}}{3} \quad (19)$$

Mäkisen mukaan vaiheiden välistä mitattu kapasitanssi voidaan kirjoittaa kaavan 20 muotoon (Mäkinen 2014.):

$$C = \frac{2}{3} \cdot C_m \quad (20)$$

, missä  $C_m$  on vaiheiden välistä mitattu kapasitanssi

Kaavan 18 kapasitiivinen reaktanssi voidaan kirjoittaa kaavan 21 muotoon (Mäkinen 2014.):

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (21)$$

, missä  $f$  on taajuus

$C$  on kapasitanssi

Kun sijoitetaan kaavaan 18 kaavojen 19, 20 ja 21 lausekkeet saadaan (Mäkinen 2014.):

$$Q = 3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{2}{3} \cdot C_m \cdot U_N^2$$

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{C_{12} + C_{23} + C_{31}}{3} \cdot U_N^2$$

$$Q = \frac{2}{3} \cdot (C_{12} + C_{23} + C_{31}) \cdot U_N^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_N$$

Tämä saatu kaava on sama, kuin Schneider Electricin antama kaava.

Kaavalla 16 on laskettu taulukkoon 1 nimelliset kapasitanssit ja niitä on verrattu erään huonokuntoisen kompensointipariston mittaustuloksiin. Kapasitanssit olivat laskeneet äärimmäisen mataliksi ja yksikkö poistettiin välittömästi käytöstä palovaaran takia.

TAULUKKO 1. Huonokuntoisen kompensointipariston mittauspöytäkirja.

Porras	Kond- yksikön sarjanumero	Tyyppi	Nimellisarvot			Mitattu virta tai kapasitanssi		
			$Q /$ (kVAr)	$U /$ (V)	$C_n /$ ( $\mu$ F)	L1 / (A) L1-L2 / ( $\mu$ F)	L2 / (A) L1-L3 / ( $\mu$ F)	L3 / (A) L3-L2 / ( $\mu$ F)
1	C9900002	SCDX	50	400	497	176	71	53,5
2	C9900003	SCDX	50	400	497	138	174	175
3	C9900004	SCDX	50	400	497	133	136	91,6
4	C9900005	SCDX	50	400	497	152	150	123
5	C9900006	SCDX	50	400	497	373	404	318
6	C9900007	SCDX	50	400	497	215	392	203

Esimerkiksi taulukon 1 arvoista voidaan laskea kaavalla 17 sen tuottama loisteho seuraavasti:

$$Q_M = \frac{2}{3} \cdot (176 \mu\text{F} + 71 \mu\text{F} + 53,5 \mu\text{F}) \cdot 400 \text{ V}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} = 10069,6 \text{ VAR}$$

Huomataan, kuinka tuotettu loisteho on pudonnut viidesosaan alkuperäisestä. Voidaan siis todeta tämän portaan olevan selvästi epäkunnossa.

### 3.5 Lämpökuvaus

Lämpökuvauksella kompensointilaitteiston huollossa voidaan helposti löytää sellaisia vikoja tai alkavia vikoja, joita ei paljaalla silmällä välttämättä näe tai jos jokin kohta on unohtunut tarkastaa. Esimerkiksi kuvassa 3 on eräästä huoltokohteesta löytynyt löysä riviliitin, jonka lämpötila on 61,5 °C.



KUVA 3. Löysä riviliitin. (Kuva: Arto Vitkala 2013)

Riviliittimen kiristäminen palautti lämpötilan samaksi kuin muissa riviliittimissä. Tämä näkyy kuvassa 4.



KUVA 4. Kiristetty riviliitin. (Kuva: Arto Vitkala 2013)

Nyt kuvan 4 kiristetyn liittimen lämpötila on noin 18 °C.

### 3.6 Säätäjän huoltotoimenpiteet

Säätäjän toiminnan tarkastaminen voidaan tehdä joissain malleissa säätäjän itsensä kautta, kuten esimerkiksi Nokian Capacitors N12 Power Factor Controllerilla. Kyseisestä

säätäjistä löytyy ominaisuus testaus, jolla laite itse tarkistaa kaikkien portaiden ja kytkentäyhdistelmien toiminnan. (Nokian Capacitors, 18.)

Jos säätäjässä ei ole edellä mainittua ominaisuutta, voidaan säätäjän toiminta tarkistaa myös niin, että pariston pääsulakkeet ovat irti, mutta säätäjän sulakkeen tulee olla paikallaan. Käsiäjolla voidaan pakottaa kontaktorit kiinni, eli saadaan selville ovatko kontaktorit ehjiä. Tässä tilassa voidaan tarkistaa mahdollisten hälytyskoskettimien toiminta ja tarkistaa ja tarvittaessa muokata säätäjän arvoja. Säätäjistä on hyvä katsoa esimerkiksi porrastustapa, tavoiteteherroin, virtamuuntajan muuntosuhde ja jos mahdollista, niin lämpötila (anturi on yleensä kompensointilaitteiston sisällä). Lisäksi kun pariston pääsulakkeet ovat paikallaan, voidaan pakko-ohjauksella laittaa portaita päälle ja tarkistaa, korjaako säädin tilanteen. Säätäjä on ehjä jos kaikki toimii halutulla tavalla. (STUL ry 2006, 109.)

### **3.7 Huoltoaikaväli**

Kompensointilaitteiston huoltoaikavälille ei ole olemassa virallista sääntöä, mutta laitteisto on asiakkaan vastuulla, joten huolto on hyvä sisällyttää kiinteistön huolto- ja kunnossapitosuunnitelmaan. Lisäksi Kauppa ja teollisuusministeriön päätöksen 517/10 § mukaan: ”Sähkölaitteiston haltijan on huolehdittava siitä, että laitteiston kuntoa ja turvallisuutta tarkkaillaan ja että havaitut puutteet ja viat poistetaan riittävän nopeasti.” Lisäksi KTMP 510/11 § mukaan: ”Luokkien 2 ja 3 sähkölaitteistoille on laadittava ennalta sähköturvallisuuden ylläpitävä kunnossapito-ohjelma. Muiden sähkölaitteistojen osalta ohjelma voidaan korvata laitteiden ja laitteistojen käyttö- ja huolto-ohjeilla.” Lisäksi jos sähkölaitteiston liittymisteho on yli 1600 kVA, tai siihen kuuluu yli 1000 V nimellisjännitteisiä osia, on sähkölaitteistolle nimettävä käytön johtaja. Käytönjohtajan on esimerkiksi huolehdittava, että sähkölaitteiston kuntoa ja turvallisuutta tarkkaillaan ja havaitut viat ja puutteet korjataan riittävän nopeasti. Joten vaikka virallista sääntöä ei ole, laitteistosta on silti huolehdittava asianmukaisesti. (KTMP 517/1996; Ketola 2013; Tukes 2013.)

ST-kortin 52.15 mukaan käyttöönoton jälkeen tehtävä huolto tulisi suorittaa 2–3 kuukauden kuluttua käyttöönotosta. Jatkossa tehtävä huolto tulisi suorittaa vuoden välein tai laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti. Ilmansuodattimet tulisi vaihtaa kaksi kertaa vuo-



nessa. Muuten kondensaattorit vaativat verraten vähän huoltoa. (ST 52.15 2004, 7; Ketola 2013.)

### **3.8 Pariston käyttöikä**

Pariston käyttöikä riippuu suuresti siitä, minkälaiseen ympäristöön se on asennettu ja minkälaisessa käytössä se on. Esimerkiksi liian korkea käyttölämpötila kuluttaa kondensaattoreita huomattavasti. Käyttöiällä on suuri vaihteluväli, joissakin tapauksissa paristo voi olla jopa 20 vuotta vanha ja varaukset ovat silti hyväksyttävissä rajoissa. Toisaalta esimerkiksi teollisuusympäristössä, missä tapahtuu paljon loistehotarpeen muutoksia, voi paristojen virrat pudota viidessä vuodessa 95...80 %:iin alkuperäisestä virrastaan. Kokemusperäisesti voidaan sanoa, että koko laitteiston käyttöikä on noin 15...20 vuotta ja yksittäisen yksikön käyttöikä noin 10 vuotta. Toisena kokemusperäisenä käyttöiän määrittelijänä voidaan pitää mittauksia, eli kun kompensointipariston virta tai kapasitanssi on laskenut noin 10 %:iin nimellisestä, on käyttöikä tullut täyteen. (STUL ry 2006, 108; Ketola 2013.)

### **3.9 Budjettiarvio huollosta**

Micora Oy:n tarjous estokelapariston perushuollosta on liitteessä 2. Perushuolto perustuu ST-kortin 95.60.03 kohtaan S2224, johon on tehty muutama lisäys. ST-kortin mukaiset huoltotoimenpiteet ovat listattuna taulukkoon 2, josta käy ilmi tehtävät toimenpiteet, aikavälit ja kuka toteuttaa kyseisen huoltotoimenpiteen. (ST 95.60.03 2010, 6.)

TAULUKKO 2. ST 95.60.30 mukaiset huoltotoimenpiteet. (ST 95.60.30 2010, 6.)

<b>Koje, Tyyppi / toimenpide</b>	<b>Aikaväli</b>	<b>Suorittaja</b>
1. Määräaikaistarkastus	10a	V/KJ
2. Eristimien puhdistus	6a	U
3. Muut toimenpiteet	3a	U
– kaapeliliitosten tarkastus ja tarvittaessa kiristys	3a	U
– pariston puhdistus	3a	U
– pariston astian vuotojen tarkistus ja tarvittaessa korjaus	3a	U
– kontaktoreiden tarkastus	3a	U
– säätäjän asetteluarvojen tarkistus	3a	U
– hälytyksen toiminnan tarkastus ja kokeilu	3a	U
– kapasitanssiarvojen tarkastus mittaamalla yksikön virta ja vertaamalla sitä nimellisvirtaan	3a	U
4. Sulakkeiden tarkistus	a	KH
5. Kompensoinnin riittävyyden tarkistus tilaajan kulutusseurannasta	a	KJ

Taulukossa 2 a tarkoittaa vuotta, V tarkoittaa valtuutettua tarkastajaa, KJ tarkoittaa käytönjohtajaa, U tarkoittaa ulkopuolista huoltoliikettä ja KH tarkoittaa kiinteistön sähköhuollosta vastaavaa. (ST 95.60.30 2010, 6.)

Huollon yksikköhintaluettelo on liitteessä 3. Yksikköhinnoista käy ilmi, kuinka paljon on varattu aikaa kullekin huoltotoimenpiteelle ja mitä sen toteuttaminen maksaa asiakkaalle. Yksikköhintaluettelo sisältää myös ST-kortin 95.60.03 pohjalle lisätyt huoltotoimenpiteet hintoineen.

### 3.10 Kompensointilaitteiden uusiminen

Kompensointilaitteistoa uusittaessa on hyvä ottaa huomioon, riittääkö jos vain vaihdetaan vastaavankokoinen uusi kompensointilaitteisto vai onko loistehotarve kasvanut. Jos kompensointilaitteiston kokoa kasvatetaan, tulee ottaa huomioon esimerkiksi sitä syöttävän kaapelin riittävyys ja sulakekoon soveltuvuus. Uusi kompensointilaitteisto voi olla myös fyysisiltä mitoiltaan erilainen kuin vanha, joten laitteiston sijoituspaikkaa saatetaan joutua vaihtamaan. (Aunola 2013, 16.)

Erityisesti jos uusitaan vanhaa laitteistoa estokelaparistoksi, on huomioitava, että estokelaparistoille kaapelisuositukset ovat suuremmat kuin rinnakkaiskondensaattoriparis-

toille. Suurempi kaapelikoko johtuu kelojen ottamasta virrasta. Käytännössä kompensointilaitteistoa uusittaessa on syytä uusida myös sen syöttö. (Vitkala 2014.)

### **3.10.1 Vanhojen paristojen paloturvallisuus**

Tyypillisesti palovaaran kompensointilaitteistossa aiheuttaa kontaktoreiden, sulakkeiden tai johtimien ylikuumentuminen. Normaalisissa käyttötilanteissa edellä mainittujen komponenttien lämpötila on noin 40 °C...50 °C, joka edesauttaa johtimien vanhenemista, rasittaa kontakteja ja niiden johdinliitoksia. (SÄTY 2002, 29.)

Kompensointilaitteiston eristeiden vikaantumiset tai johdinten eristeiden heikkeneminen voi johtaa sisäisiin oikosulkuihin, sisäisiin johdinpaloihin ja valokaariin. Tämä aiheuttaa erityisesti ongelmaa vanhemmissa kompensointilaitteissa, missä portaissa ei ole sisäisiä sulakkeita, vaan eristeenä on käytetty palamatonta vermikuliittia (SÄTY ry 2002, 29.)

Kompensointilaitteiston kapasitanssi ja kompensointia syöttävän verkon impedanssi muodostaa aina rinnakkaisresonanssipiirin. Jos tämän piirin resonanssitaajuuden lähellä esiintyy yliaaltoja, voivat nämä virrat kasvaa moninkertaisiksi. Tämä näkyy sähkön laadun heikkenemisenä, häiriöiden ja vikatilanteiden todennäköisyyden kasvuna sekä mahdollisena palovaarana. (SÄTY ry 2002, 29.)

### **3.10.2 Vanhan pariston vaihto uuteen**

Jos uusitaan vain osa kompensoinnista, on otettava huomioon, että vanhat kompensointilaitteet saattavat kuluttaa uusien laitteiden käyttöikä. Lisäksi verkkoyhtiöillä on omat vaatimuksensa verkkoon kytkettäville kompensointilaitteille. Teknisestä näkökulmasta paras vaihtoehto olisi uusida koko laitteisto jos on olemassa vaara, että vanhat kuluttavat uusien käyttöikä. Yleensä kompensointilaitteiston ensimmäiset portaat ovat vain kulu- neet ja viimeiset ovat säilyttäneet varauksensa, joten taloudellisesti katsottuna vain rik- koutuneen portaan vaihto on kannattavaa. (Ketola 2013; Nerto 2013.)

Alle 10 vuotta vanhoissa kompensointilaitteistoissa, joissa on vielä käyttöikä jäljellä, on taloudellisesti järkevää uusida vain portaita. Portaiden uusinnalla ei toisin voida vai- kuttaa kompensoinnin kokonaistehoon. Tapauksia, joissa kompensointitehoa ei ole tar-

vinnut kasvattaa, mutta portaita on pitänyt vaihtaa, on tullut jonkin verran vastaan ja myös Micora Oy on tehnyt näitä muutoksia, kuten kuvasta 5 nähdään (punainen ympyrä). (Vitkala 2014.)



Kuva 5. Kompensointilaite, johon on uusittu kaksi porrasta. (Kuva: Vitkala 2014)

Kuvan 5 kaltainen muutos maksaa noin viidesosan koko kompensointilaitteiston uusimisesta. Kuvan 5 mukaisessa tilanteessa säästö on syntynyt, kun alkuperäiset koteloidut kondensaattoriyksiköt ovat korvattu sylinterikondensaattoreilla. Sylinterikondensaattorit ovat noin puolet halvempia, kun alkuperäiset koteloidut kondensaattorit. (Vitkala 2014.)

## 4 ESTOKELAPARISTON ASENNUS

### 4.1 Huomioitavat seikat

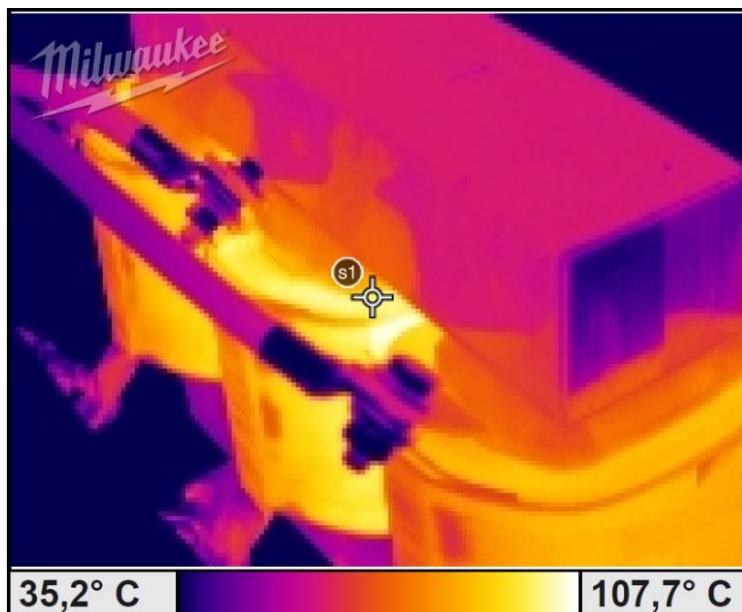
Kompensointilaitteiston asentaminen ja kytkeminen on tehtävä noudattaen sähkötyöturvallisuusstandardia SFS 6002 ja työ on tehtävä valmistajan toimittaman asennusohjeen mukaisesti. Kompensointilaitteiston asennuksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota Jaatisen mukaan seuraaviin asioihin. (Jaatinen 1990, 116; SFS 6002 2005, 6.)

- kotelointiluokan sopivuus sijoituspaikkaan (esimerkiksi pölyn ja kosteuden huomiointi)
- riittävät kulutiet (laitteiden toimitus)
- kompensointilaitteiston tilantarve (huolto, käyttö)
- sijoituspaikan lämpötila (jäähdytystarve)
- asennustavan valinta (seinälle vai lattialle)
- riittävät kaapeleiden asennustiet (arinat, hyllyt ja kanavat)
- riittävät kytkentätilat

Edellä mainitut seikat on syytä huomioida asennettaessa uutta kompensointilaitteistoa. Lisäksi seuraavissa luvuissa on käsitelty kaikkein oleellisimpia asennukseen liittyviä asioita tarkemmin.

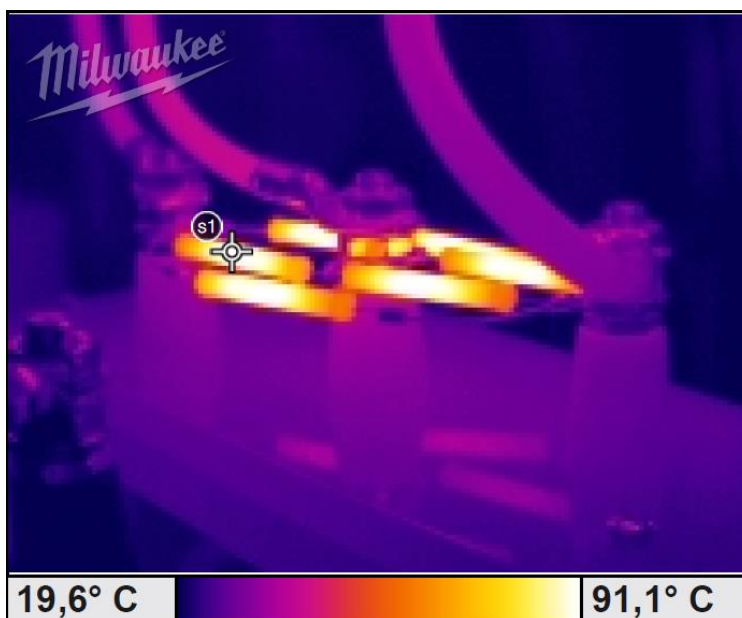
#### 4.1.1 Ilmanvaihto

Estokelapariston asennuksessa ilmanvaihto on hyvin oleellinen osa, sillä kompensointilaitteisto tuottaa todella paljon hukkalämpöä. Tätä on havainnollistettu kuvissa 6...8. Kuvassa 6 on lämpökamerakuva estokelapariston yhdestä kelasta, jonka lämpötila kuvan 6 kohdassa s1 on 104,3 °C.



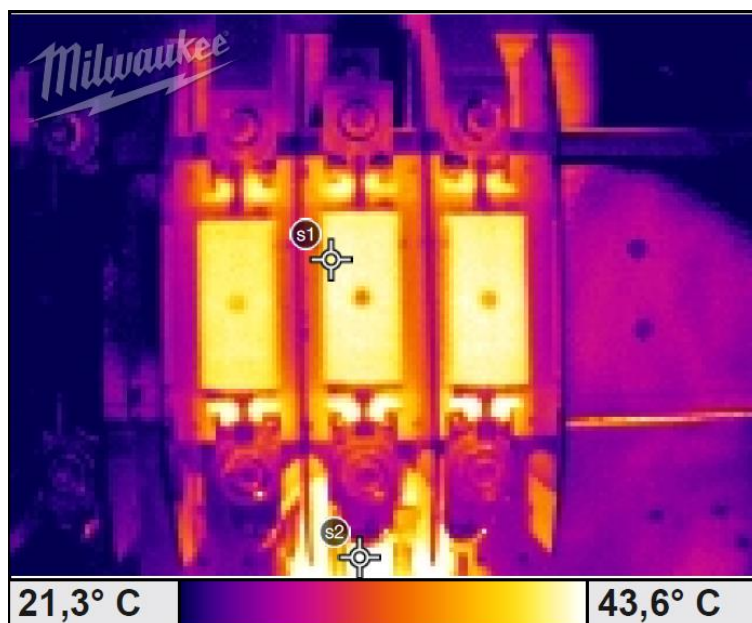
KUVA 6. Estokelapariston kelan lämpökuva. (Kuva: Arto Vitkala 2013)

Kuvassa 7 on yhden portaan purkausvastukset, jotka ovat kuvan 7 kohdistimen s1 kohdassa 98,3 °C lämpöiset. Nämä ovat perinteiset vastukset, jotka voidaan nykyään korvata myös häviöttömällä elektronisilla purkausvastuksilla. Purkausvastukset voivat olla myös portaan sisällä. (Alstom Grid 2013, 5.)



KUVA 7. Purkausvastusten lämpökuva. (Kuva: Arto Vitkala 2013)

Kuvassa 8 on estokelapariston yhden portaan kahvasulakkeet, joiden lämpötila (kuvassa 6 kohta s1) on 42,6 °C. Kuvassa 6 kohdassa s2 on kaapelilähtö, jonka lämpötila on 54,4 °C. Lämpötilat ovat sallituissa rajoissa. (SÄTY ry 2002, 29.)



KUVA 8. Kahvasulakkeiden lämpökuva. (Kuva: Arto Vitkala 2013)

Lämpökamerakuvat 6...8 ovat otettu ennen huoltotoimenpiteitä, joten lämpötilat ovat todellisia käyntilämpötiloja. Tämä on huomioitu kompensointilaitteistossa siten, että niissä on valmiina poistoilmapuhaltimet yleensä laitteiston päällä ja alla on ilmanottoaukot, joissa sijaitsevat ilmansuodattimet. Käyttäjän on vain huolehdittava, että ilmansuodattimet eivät ole tukossa ja poistoilmapuhaltimien päälle ei ole esimerkiksi kasattu tavaraa.

#### 4.1.2 Virta- ja jännitemuuntaja

Loistehon säädin tarvitsee virta- ja jännitetiedot, jotta se pystyy määrittämään kulloinkin tarvittavan loistehon määrän. Molemmat mittaustiedot ovat otettava säätimeen samasta vaiheesta ja ennen kondensaattoripariston syöttöä. Nykyisissä säätäjissä pystytään asetelemaan mistä vaiheesta mitattu virta ja jännite ovat. Lisäksi joissain tapauksissa virtamuuntajan muuntosuhde on aseteltava säätimelle. Tehtäessä muutoksia kytkentöihin on muistettava, että virtamuuntajan toision navat tulee oikosulkea ja jännitemuuntajan toision navat tulee olla auki, jos laitteisto on muutosten aikana käytössä. Jos käytössä olevan virtamuuntajan toision navat aukaistaan, nousee toision jännite niin suureksi, että se voi rikkoa toision eristyksen. Vastaavasti jos jännitemuuntajan toisio on käytön aikana kiinni, kulkee siinä virta, joka voi olla hengenvaarallinen. (Jaatinen 1990, 117; Aura & Tonteri 1998, 293–296; STUL ry 2006, 101–102; Nokian Capacitors, 16.)

### 4.1.3 Loistehosäätimen havahtumisrajat

Jotta kompensointi toimisi oikein, on loistehosäätimelle asetettava havahtumisrajat. Rajat voidaan asettaa säätimelle manuaalisesti tai nykyisissä loistehosäätimissä havahtumisrajojen asettelu onnistuu myös automaattisesti. Automaattisella asettelulla toimittaessa on kuitenkin hyvä tarkistaa rajat laskemalla. Havahtumisrajat voidaan asettaa esimerkiksi joko symmetrisiksi tai epäsymmetrisiksi. (STUL ry 2006, 102; Kompensointiparistot, 7.)

Symmetrinen säätö tarkoittaa, että havahtumisrajat ovat yhtä suuret sekä kapasitiivisella että induktiivisella puolella. Tällöin on mahdollista, että verkko on ylikompensoitu kapasitiivisella puolella. Muuten tämä säätö on riittävä, jos kondensaattoripariston portaat ovat käyttöön oikean kokoiset. Epäsymmetrisessä säädössä havahtumisrajat ovat erilaiset induktiivisella ja kapasitiivisella puolella. Tätä säätöä käytetään jos kompensointipariston porras on liian suuri tai ei haluta kompensoida kapasitiiviselle puolelle loistehotariffien takia. (STUL ry 2006, 102.)

Jos säätöalue asetellaan liian pieneksi, voi kondensaattoriparisto pumpata eli säädin kytkee portaita päälle ja pois asetellun toimintaviiveen mukaan. Säätöalueen tulee olla suurempi kuin pienin kondensaattoriporras, jotta pumppaamiselta vältytään. Pienimmän kondensaattoriporras ja havahtumisrajojen välillä on kaavan 22 mukainen yhteys (STUL ry 2006, 103.)

$$K_{kap} + K_{ind} > k \cdot \frac{I_2}{I_1} \cdot Q_{c1} \quad (22)$$

, missä

$K_{kap}$  on kapasitiivinen havahtumisraja

$K_{ind}$  on induktiivinen havahtumisraja

$k$  on kerroin 1,2...1,5 (STUL ry 2006, 103)

$I_1$  on virtamuuntajan ensiövirta

$I_2$  on virtamuuntajan toisiovirta

$Q_{c1}$  on pienimmän kondensaattoriporras koko [kVAr]

Kaavan 22 havahtumisrajat voivat olla esimerkiksi -10...10 %, jolloin kyseessä on symmetrinen säätö tai esimerkiksi -4...10 %, jolloin puhutaan epäsymmetrisestä säädöstä. (STUL ry 2006, 103.)



## 4.2 Asennuksen hinta

Micora Oy:n tarjous uuden estokelapariston asennuksesta on liitteessä 4. Asennukseen sisältyvät työt määritellään aina tapauskohtaisesti. Suuntaviivana voidaan karkeasti ajatella, että asennukseen kuuluvat ainakin mahdollisen vanhan laitteen poisvienti, uuden laitteen asennus, syöttökaapelin uusiminen ja mahdolliset muutokset kaapelointiin, esimerkiksi virtamuuntajan uusiminen ja virtamuuntajan mittaustiedon kaapelin uusiminen. Lisäksi laitteisto otetaan käyttöön ja laitteistolle tehdään käyttöönottotarkastus. (Vitkala 2013.)

## 4.3 Investoinnin kannattavuus

Investoinnin kannattavuutta voidaan tarkastella takaisinmaksuajan kautta. Kun tiedetään kompensointipariston käytöstä saatava rahallinen hyöty, kompensointilaitteiston investointikustannus ja pääoman vuosikorko, voidaan kaavalla 23 laskea takaisinmaksuaika  $\tau$ . (Mäkihannu 2011, 34.)

$$K_0 = T_1 \cdot \frac{100}{p} \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha^\tau}\right) \quad (23)$$

, missä  $K_0$  on investointikustannus  
 $T_1$  on kompensointipariston käytöstä saatava vuosittainen rahallinen hyöty  
 $p$  on vuotuinen korko  
 $\tau$  on takaisinmaksuaika

Kaavassa 23 esiintyvä  $\alpha$  saadaan kaavasta 24 seuraavasti:

$$\alpha = 1 + \frac{p}{100} \quad (24)$$

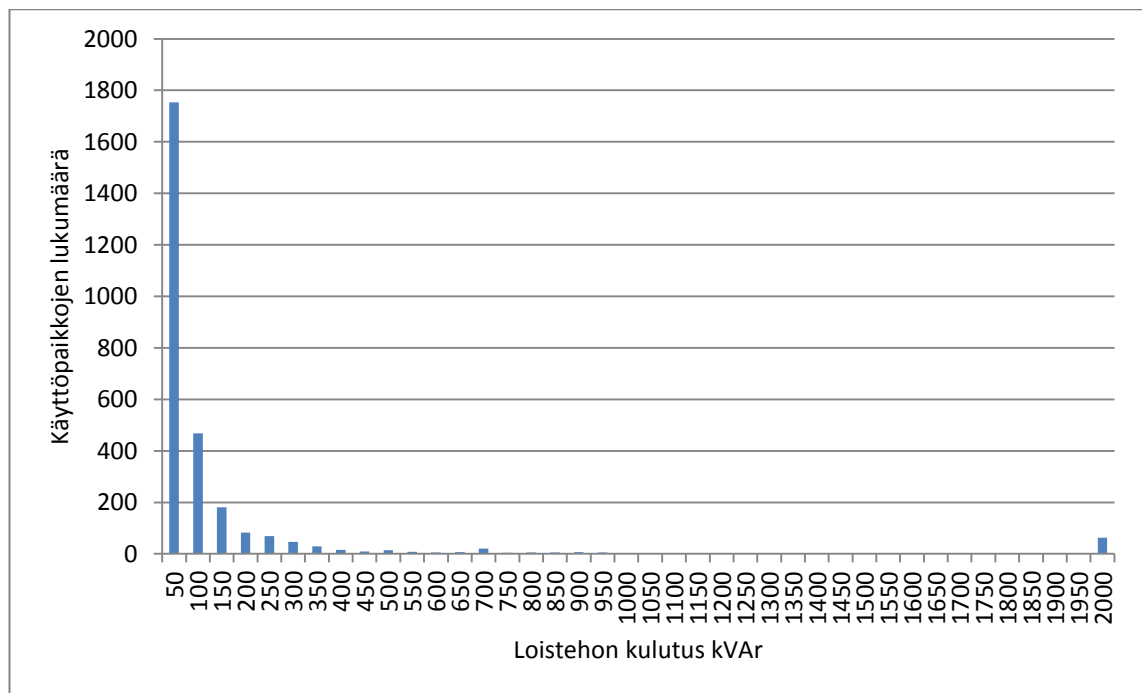
Mäkihannun 2011 tekemän opinnäytetyöhönsä liittyvän selvityksen perusteella voidaan sanoa, että kompensointilaitteisto pienjännitepuolella maksaa itsensä takaisin suunnitteen kahdessa vuodessa. Loistehon kompensointilaitteisiin investointia voidaan siis pitää erittäin kannattavana taloudellisesti. (Mäkihannu 2011, 34.)

## 5 PIRKANMAAN KOMPENSOINTILAITTEIDEN KUNTO

### 5.1 Tampereen Sähköverkko Oy:n alueen loistehoa kuluttavat kohteet

Tampereen Sähköverkko Oy:n jakelualueella on noin 300 pienjännitepuolen tehosiirto-asiakasta, joiden kompensointi on oletusarvoisesti kunnossa. Yleissiirtoasiakkailla, joita on noin 4000, voi myös olla kompensointilaitteistoa, mutta Tampereen Sähköverkko Oy ei laskuta heitä siitä. (Mäkelä 2014.)

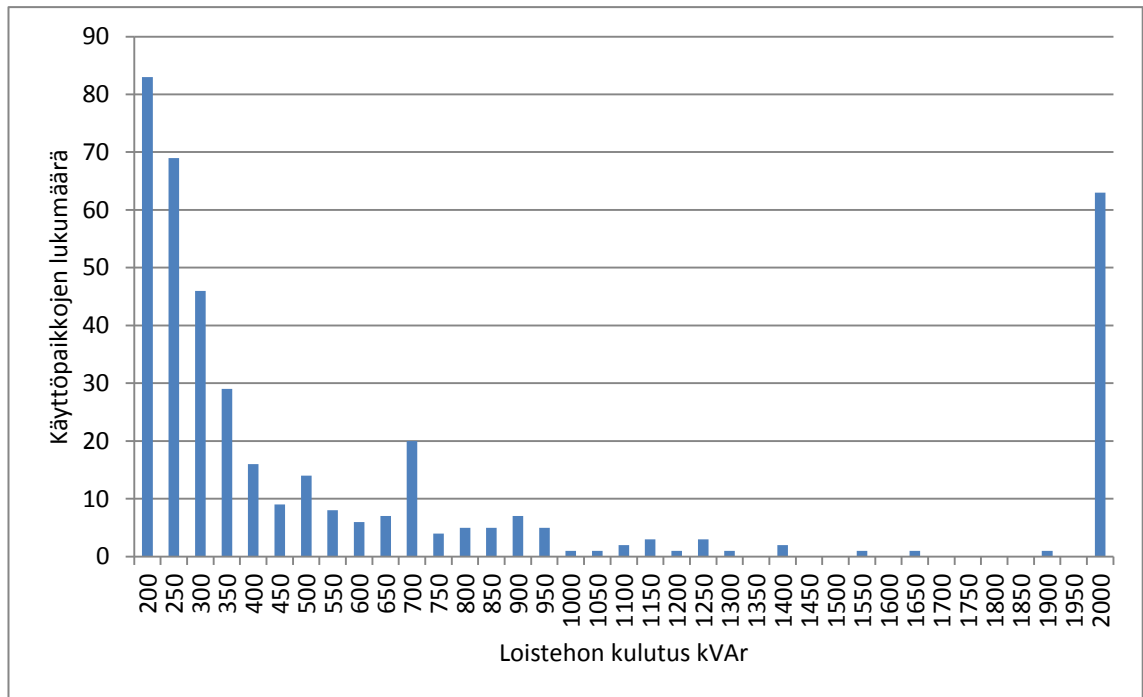
Tässä työssä on tarkasteltu Tampereen Sähköverkko Oy:n yli 63 A kohteiden loistehon kulutuksen kuukausihuippuja vuodelta 2013. Tarkasteltavia käyttöpaikkoja on 4080 kappaletta. Kuviossa 11 on loistehoa kuluttavien kohteiden suuruuksia ja lukumääriä.



KUVIO 11. Loistehon keskipulutuskuksia vuonna 2013.

Kuviosta 11 nähdään, kuinka suurin osa tarkasteltavista loistehoa kuluttavista kohteista on suuruudeltaan suurempi kuin 50 kVAr, mutta pienempi kuin 100 kVAr. Huomattavaa on, että yhteenlaskettu käyttöpaikkamäärä ei ole 4080, vaan 2815. Tämä tarkoittaa, että 1265:llä käyttöpaikalla ei joko ole loistehon kulutusta tai heidän kompensointi toimii. Loistehon kulutuksen puuttuminen voi myös aiheutua siitä, että kyseessä on uusi käyttöpaikka, jolla ei ole vielä mitään kulutusta. (Mäkelä 2014.)

Kuviossa 12 on esitetty vastaavia tietoja, kuin kuviossa 11. Kuitenkin kuviossa 12 on tarkastelu aloitettu käyttöpaikoista, joiden loistehon kulutus on suurempi kuin 200 kVAr.

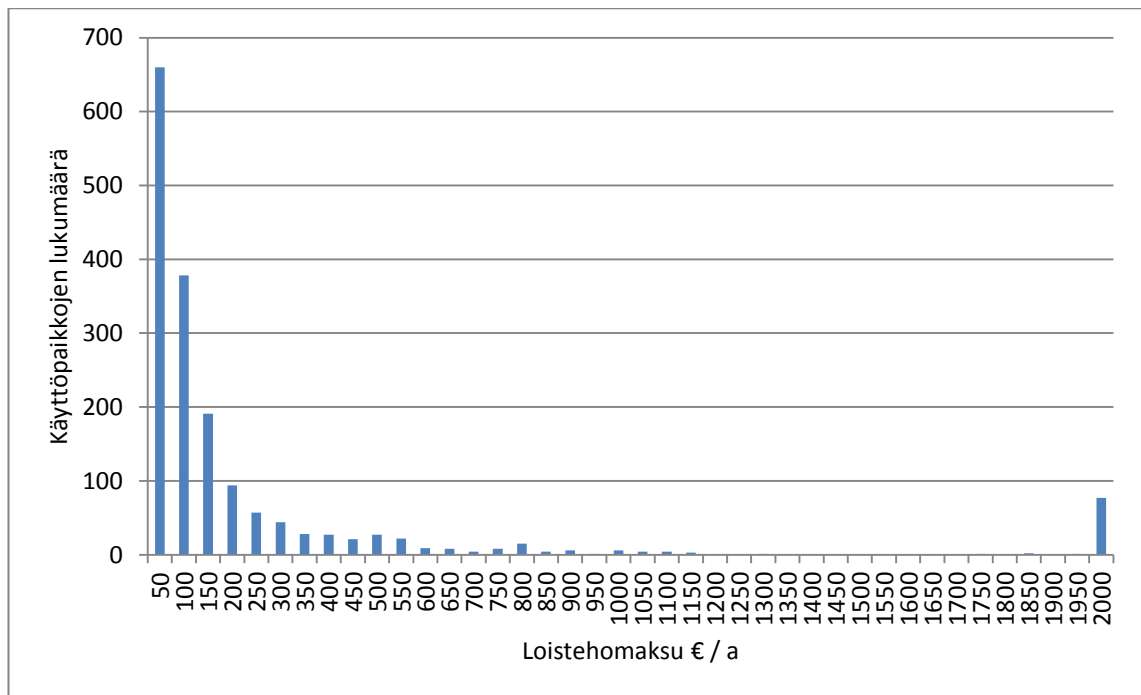


KUVIO 12. Yli 200 kVAr käyttöpaikkojen loistehon keskimukutuksia vuonna 2013.

Edelleen eniten loistehon kulutusta on suuruusalueella 200...950 kVAr, mutta myös 2 MVar kuluttavia paikkoja on yli 60 kappaletta. Näillä kohteilla on myös pätötehon kulutus megawattiluokkaa, mutta loisteho on huomattavasti suurempi. Tällaisessa käyttöpaikassa olisi syytä tarkistaa onko kompensointi hoidettu asianmukaisesti.

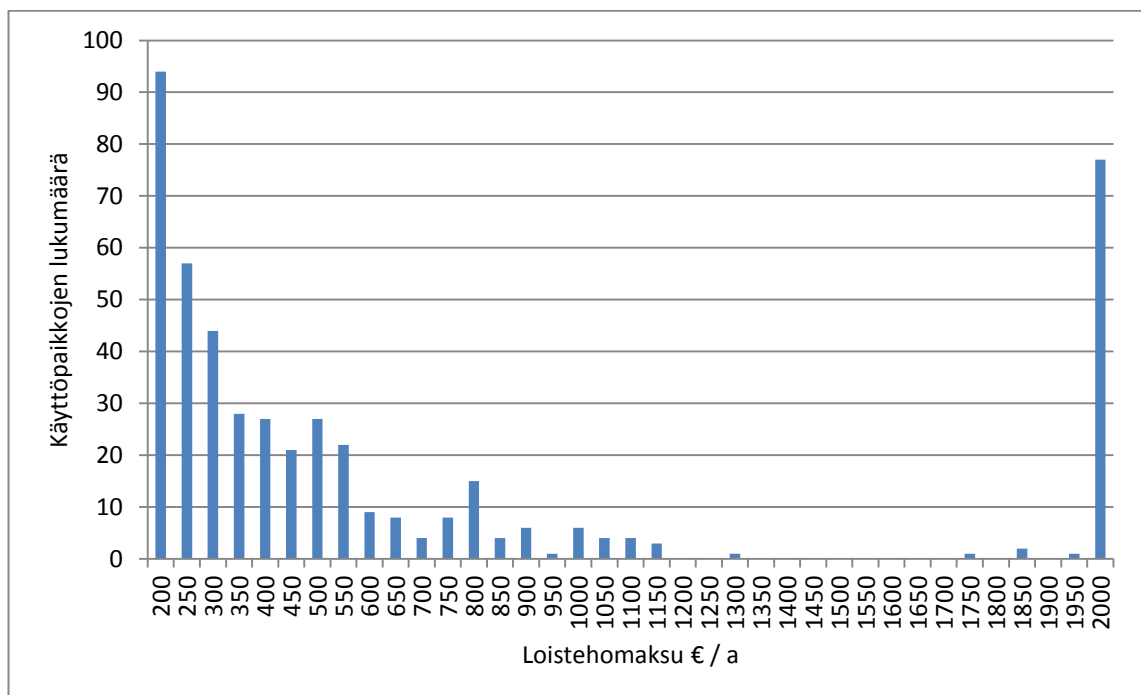
## 5.2 Paljonko keskimäärin asiakas maksaa loistehosta

Tarkastelluista käyttöpaikkatiedoista laskettiin, paljonko loistehomaksuja keskimäärin käyttöpaikalla on. Keskimääräinen vuosittainen loistehomaksu on 932,59 € ja keskimääräinen kuukausittainen loistehomaksu on 77,72 €. Kuvioon 13 on koottuna loistehomaksuja maksavien kohteiden lukumääriä.



KUVIO 13. Keskimääräisiä loistehomaksuja vuodelta 2013.

Kuviosta 13 voidaan päätellä, että keskimääräiset loistehomaksut eivät ole suuria. Valtaosa käyttöpaiikoista maksaa loistehosta yli 50 €, mutta alle 200 €. Kuvioon 14 on kootuna samoja tietoja kuin kuvioon 13, mutta tarkastelu on aloitettu käyttöpaiikoista, joiden loistehomaksu on suurempi kuin 200 €.



KUVIO 14. Yli 200 € maksavien käyttöpaiikkojen lukumääriä vuodelta 2013.

Kuviosta 14 nähdään, että jakelualueelta löytyy myös kohteita, joiden loistehomaksut ovat yli 2000 €. Mittaustietojen tarkastelusta paljastui, että suurin yksittäisen käyttöpaikan kuukauden loistehon kulutushuippu oli 14,41 MVar. Eli suuretkin loistehomaksut voivat olla mahdollisia, joten kompensointi olisi syytä tarkistaa näissä kohteissa. Tietysti ei voida täysin sulkea pois sitä mahdollisuutta, että mittaustiedoissa on virhe. Esimerkiksi saman käyttöpaikan, jonka loisteho vaihteli välillä 0...14,41 MVar, vaihteli pätöteho välillä 0...2,58 MW.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työssä tutkittiin loistehon kompensointia pienjännitetasossa. Työssä esiteltiin kompensointiin liittyvää teoriaa, erilaisia kompensointiratkaisuja ja perusteltiin kompensoinnin kannattavuutta.

Työn aihepiiriin kuului myös vanhojen kompensointilaitteiden kunto, huoltaminen ja uusiminen. Työn aikana huolletuista laitteista karkeasti sanottuna puolet laitteistoista oli jollain tavalla viallisia tai tulleet käyttöikänsä päähän. Osa laitteista oli niin huonossa kunnossa, että ne otettiin pois käytöstä heti palovaaran takia.

Työ esitteli uuden kompensointilaitteiston asennuksessa huomioitavia asioita ja tämän työn avulla pitäisi pystyä toteuttamaan kompensointilaitteiston huolto ja osittainen uusiminen työssä esitellyt asiat huomioon ottaen. Työssä on pyritty perustelemaan, miten kompensoinnin käytöstä on hyötyä kompensointilaitteiston omistajalle ja jakeluverkon haltijalle. Työn aikana paljastui, että hyvin suurella osalla sähkökäyttäjiä ei ole juurikaan tietoa loistehosta ja sen aiheuttamista kustannuksista.

Tulevaisuudessa voidaan olettaa kompensoinnin merkityksen kasvavan. Epälineaaristen kuormien määrä tulee lisääntymään, joten tulevaisuudessa loistehontarve tulee myös kasvamaan ja sähkön laatuvaatimukset tulevat entistä ajankohtaisemmaksi. Lisäksi loistehontarve voi vaihdella nopeasti, joten kontaktoreiden käyttö ei välttämättä enää riitä. Myös sähköverkon lisääntynyt kaapelointi voi johtaa tilanteeseen, missä verkko onkin ylikompensoitu matalan kuorman aikana. Tämä aiheuttaa omat huomionsa kompensoinnin suunnittelulle tulevaisuudessa.

Opinnäytetyötä tehdessä olisi ollut mielenkiintoista päästä selvittämään, miten laajan sähköverkon kompensointi voitaisiin toteuttaa ja miten eri kompensointilaitteet toimivat keskenään. Esimerkiksi jos laajassa sähköverkossa on pääkeskuksella, nousukeskuksella ja ryhmäkeskuksella omat kompensointilaitteet, miten saataisiin toteutettua kompensointi mahdollisimman lähinnä kulutuskohdetta, esimerkiksi aikaselektiivisyydellä.

## LÄHTEET

- ABB Oy. Kompensointiparistot. Esite. Luettu 29.12.2013.  
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/DEE904E4BD8A5EF8C1256FCE003F09BA/\\$File/1SCC011008C1801.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/DEE904E4BD8A5EF8C1256FCE003F09BA/$File/1SCC011008C1801.pdf)
- ABB Oy. TTT-Käsikirja 2000-07. Luku 9 Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus. luettu 20.11.2013.  
<http://cna.mikkeli.amk.fi/Public/JormPekk/ABB/TTT-KIR-JA%202000/LOISTEHON%20KOMPENSOINTI%20JA%20YLIAALTOSUOJAUS.pdf>
- Alstom Grid. 2013. Pienjännitetuotteiden tuoteopas. Luettu 27.12.2013.  
<http://www.alstom.com/Global/Finland/Resources/Documents/Pienj%C3%A4nnitetuotteiden%20tuoteopas.pdf>
- Aunola, H. 2013. Teollisuuskiinteistön loistehon kompensointi. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Aura, L & Tonteri, A. 1998. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki: WSOY.
- Elovaara, J. & Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto Oy.
- E.ON Kainuun Sähköverkko Oy. 2012. Loistehon hinnoittelu ja kompensointi. Luettu 9.11.2013  
<http://www.eon.fi/SiteCollectionDocuments/Loistehon-kompensointi.pdf>
- Harsia, P. 2009. Kompensointitavat. Luettu 3.11.2013.  
<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1134045922435/1134046524532/1134047263593/1134047404815.html>
- Helen Sähköverkko Oy. 2009. Jakeluverkon sähkönkäyttöpaikkojen loistehon kompensointiohje. Luettu 9.11.2013.  
<http://www.helen.fi/Documents/Suunnittelijat%20ja%20urakoitsijat/HSV/HSV-yleist%C3%A4-loisteteho-SU40209.pdf>
- Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammermekniikka.
- Karri, T. 2013. Valaistuskuormien verkkovaikutukset. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Kauppa ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä 5.7.1996/517.
- Ketola, J. Kouluttaja. 2014. Kompensointilaitteiston uusiminen. Sähköpostiviesti. janne.ketola@takk.fi. Luettu 2.1.2014.

- Ketola, J. Kouluttaja. 2013. Lisää kysyttävää. Sähköpostiviesti. [janne.ketola@takk.fi](mailto:janne.ketola@takk.fi). Luettu 28.11.2013.
- Ketola, J. 2009. Kompensointiparistot, sähkön laadun ja häiriöiden mittaukset sekä loistehon kompensointi. Tampereen Vera Oy. Seminaari. 29–30.10.2009. Jyväskylä.
- Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. Yliaalto-opus. Luettu 2.3.2014. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
- Marttila, M. Sähköasemasuunnittelija. 2013. Kysyttävää loistehon kompensoinnista. Sähköpostiviesti. [mika.marttila@sahkolaitos.fi](mailto:mika.marttila@sahkolaitos.fi). Luettu 4.12.2013.
- Micora Oy. 2013. Tarjous – estokelapariston perushuolto. Luettu 27.12.2013.
- Mäkelä, T. Erikoissuunnittelija. 2014. Kysyttävää loistehosta. Sähköpostiviesti. [timo.makela@sahkolaitos.fi](mailto:timo.makela@sahkolaitos.fi). Luettu 5.2.2014.
- Mäkinen, E. Lehtori. 2014. Päätötyön kaavaongelma. Sähköpostiviesti. [heikki.tarkiainen@tamk.fi](mailto:heikki.tarkiainen@tamk.fi). Luettu 10.3.2014.
- Mäkihannu, T. 2011. Porraselementtitehtaan pääkeskuksen suunnittelu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Nerto, E. Markkinointipäällikkö. 2013. Kysyttävää kompensoinnista. Sähköpostiviesti. [eero.nerito@tkf.fi](mailto:eero.nerito@tkf.fi). Luettu 11.12.2013.
- Nokian Capacitors Ltd. Power Factor Controller N-6 / N-12 User's Manual. Käyttöohje. Luettu 21.12.2013. [http://castlepowersolutions.biz/Components/Nokian/Nokian\\_N-6\\_%20N-12\\_Users\\_%20Manual.pdf](http://castlepowersolutions.biz/Components/Nokian/Nokian_N-6_%20N-12_Users_%20Manual.pdf)
- Repo, S. 2000. Sähkönsiirtoverkon jännitestabiilisuusmarginaalin approksimointi. Luettu 3.11.2013. <http://butler.cc.tut.fi/~repo/Julkaisut/raportti2.pdf>
- Ruppa, E. 2001. Yliaallot. Luettu 19.10.2013. <http://salabra.tp.samk.fi/er/siirto/yliallot.doc>
- Schneider Electric Industries SAS. 2011. Guide for the Design and Production on LV Power Factor Correction Cubicles – Panel Builder Guide. Luettu 16.1.2014. [http://www2.schneider-electric.com/documents/panelbuilders/en/shared/application-solutions/LV\\_PFC\\_PB\\_Guide.pdf](http://www2.schneider-electric.com/documents/panelbuilders/en/shared/application-solutions/LV_PFC_PB_Guide.pdf)
- Seesvuori R. 2011. Kompensointi ja yliaaltojen suodatus, sähkön laadun ja häiriöiden mittaukset sekä loistehon kompensointi. Tampereen Sähköverkko Oy / Adato Energia Oy. Seminaari. 31.3–1.4.2011. Tampere.
- Siemens AG. 2010. Discover the World of FACTS Technology. Luettu 25.11.2013. [http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/FACTS/FACTS\\_Technology.pdf](http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/FACTS/FACTS_Technology.pdf)



Suomen standardoimisliitto SFS. 2010. SFS-EN 50160 Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. 4. painos.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2005. SFS 6002 Sähkötyöturvallisuus. 2. painos.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2006. SFS-EN 60204-1 Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset. 3. painos.

Sähköinfo Oy. 2009. Sähköasennukset 3. Helsinki: Sähköinfo oy.

Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.

Sähkötarkastusyhdistys SÄTY ry. 2002. Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta. Luettu 27.12.2013.

[http://www.tukes.fi/tiedostot/sahko\\_ja\\_hissit/sahkopeto/s%C3%A4hkiset%20paloriskit%20ja%20niiden%20hallinta.pdf](http://www.tukes.fi/tiedostot/sahko_ja_hissit/sahkopeto/s%C3%A4hkiset%20paloriskit%20ja%20niiden%20hallinta.pdf)

Sähkötieto ry. 2004. ST-kortisto. ST 52.15 Loistehon kompensointi pienjänniteverkossa.

Tampereen Kondensaattoritehdas Oy. 2013. Estokelaparistot. Luettu 9.11.2013.  
<http://www.tkf.fi/estokelaparistot.php>

Tampereen Sähköverkko Oy. 2012. Loistehon hinnoittelu ja kompensointi. Luettu 9.11.2013.

[https://www.tampereensahkolaitos.fi/sahkoverkkopalvelut/sahkoverkkoonliittyminen/TSV-urakoitsijalle/Documents/Loistehon%20hinnoittelu%20ja%20kompensointiohje%20TSV\\_01-12-2012\\_internet.pdf](https://www.tampereensahkolaitos.fi/sahkoverkkopalvelut/sahkoverkkoonliittyminen/TSV-urakoitsijalle/Documents/Loistehon%20hinnoittelu%20ja%20kompensointiohje%20TSV_01-12-2012_internet.pdf)

Tukes. 2013. Sähkölaitteiston käytön johtaja. Luettu 22.12.2013.

<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkoalan-vastuuhenkilot-ja-urakointi/Sahkolaitteiston-kayton-johtaja/>

Vitkala, A. Sähkö- ja koestusinsinööri. 2014. Uuden kompensointilaitteen asennus. Sähköpostiviesti. arto.vitkala@micora.fi. Luettu 2.1.2014.

## LIITTEET

### Liite 1. Kerroin f.

Lähde: ABB TTT-käsikirja 2000-07, 2.

cos $\varphi_1$ , nykyinen tehokerroin	cos $\varphi_2$ , haluttu tehokerroin							
	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,80
0,30	3,18	3,04	2,98	2,93	2,85	2,70	2,56	2,43
0,32	2,96	2,82	2,76	2,71	2,63	2,48	2,34	2,21
0,34	2,77	2,62	2,56	2,52	2,44	2,28	2,15	2,02
0,36	2,59	2,45	2,39	2,34	2,26	2,11	1,97	1,84
0,38	2,43	2,29	2,23	2,18	2,11	1,95	1,81	1,68
0,40	2,29	2,15	2,09	2,04	1,96	1,81	1,67	1,54
0,42	2,16	2,02	1,96	1,91	1,83	1,68	1,54	1,41
0,44	2,04	1,90	1,84	1,79	1,71	1,56	1,42	1,29
0,46	1,93	1,79	1,73	1,68	1,60	1,45	1,31	1,18
0,48	1,83	1,69	1,62	1,58	1,50	1,34	1,21	1,08
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,40	1,25	1,11	0,98
0,52	1,64	1,50	1,44	1,39	1,31	1,16	1,02	0,89
0,54	1,56	1,42	1,36	1,31	1,23	1,07	0,94	0,81
0,56	1,48	1,34	1,28	1,23	1,15	1,00	0,86	0,73
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,62	1,27	1,12	1,06	1,01	0,94	0,78	0,65	0,52
0,64	1,20	1,06	1,00	0,95	0,87	0,72	0,58	0,45
0,66	1,14	1,00	0,94	0,89	0,81	0,65	0,52	0,39
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,46	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,72	0,96	0,82	0,76	0,71	0,64	0,48	0,34	0,21
0,74	0,91	0,77	0,71	0,66	0,58	0,42	0,29	0,16
0,76	0,86	0,71	0,65	0,60	0,53	0,37	0,24	0,11
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,82	0,70	0,56	0,49	0,45	0,37	0,21	0,08	
0,84	0,65	0,50	0,44	0,40	0,32	0,16	0,03	
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,14	0,07			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							

Liite 2. Poistettu salassapitosopimuksen vuoksi.

Liite 3. Poistettu salassapitosopimuksen vuoksi.

Liite 4. Poistettu salassapitosopimuksen vuoksi.