



# Teollisuuslaitoksen loistehon kartoitus

Sami Elmaci

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2021

Sähkö- ja automaatiotekniikan insinööritutkinto  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan insinööritutkinto  
Sähkövoimatekniikka

ELMACI, SAMI:  
Teollisuuslaitoksen loistehon kartoitus

Opinnäytetyö 75 sivua, joista liitteitä 1 sivu  
Huhtikuu 2021

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa Stora Enson Varkauden sahan loistehon kompensoinnin ja yliaaltojen suodatuksen tarve. Varkauden sahalla on pitkä historia, jonka aikana sähkömoottoreiden ja säädettyjen käyttöjen määrä on lisääntynyt huomattavasti. Tästä huolimatta loistehon kompensointi on jäänyt lähes täysin huomiotta, joten työn toimeksiantaja halusi kattavan selvityksen sahan sähkönlaadun nykytilasta ja korjaavista toimenpiteistä.

Opinnäytetyössä selvitettiin sahan nykyisten kompensointilaitteistojen kunto, analysoitiin sahan kokonaisloistehon ja yliaaltojen määrä ja annettiin suositeltavat toimenpiteet sähkönlaadun parantamiseksi. Mittaukset suoritettiin verkkoanalyysaattoreilla sahan keskijännitesyötöstä sekä kaikista sahan pienjännitekeskuksista. Näin saatiin selkeä kokonaiskuva sahan loistehon ja yliaaltojen määrästä, jotka kuormittavat sahan yhteydessä olevan Stora Enson pakkauskartonkitehtaan keskijännitejakelua. Pienjännitekeskuksien mittauksilla saatiin tarkasti selville, missä loistehoa kulutetaan ja siten pystyttiin keskuskohtaisesti esittämään korjaavat toimenpiteet, jotta sahan kokonaisloistehon määrä pienenee. Mittausten lisäksi sahan olemassa oleville kompensointilaitteistoille tehtiin kuntotarkastukset ja huoltotoimet niiltä osin kuin ilman varaosia oli mahdollista tehdä.

Mittausten analysoinnista selvisi, että sahan loistehomäärät ovat huolestuttavalla tasolla niin teknisten kuin taloudellistenkin syiden vuoksi. Osalla pienjännitekeskuksista ei ole kompensointia ollenkaan, vaikka kompensoinnin tarve on ilmeinen. Sahan nykyisistä kompensointilaitteistoista kaikki olivat kokonaan tai osittain rikkoutuneita, jolloin lähes kaikki sahan laitteiden vaatima loisteho otetaan suoraan pakkauskartonkitehtaan keskijännitekompensoinnista ja Fingridin suurjänniteverkosta. Sahan yliaallot ovat pääosin hyvällä tasolla.

Mittaustulosten ja kompensointilaitteistojen tarkastusten perusteella sahalle on erittäin suositeltavaa lisätä uusia estokelaparistoja ja huoltaa olemassa olevat kompensointilaitteistot. Näillä toimilla sähköverkossa siirrettävät loistehot saadaan huomattavasti paremmalle tasolle ja pääosa sahan loistehosta tuotettaisiin lähellä loistehon kulutusta.

---

Asiasanat: loisteho, kompensointi, yliaallot, teollisuus

## **ABSTRACT**

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

ELMACI, SAMI:  
Reactive Power Analysis in an Industrial Plant

Bachelor's thesis 75 pages, appendices 1 page  
April 2021

---

The purpose of this thesis was to evaluate the need for compensating reactive power and filtering harmonics in Stora Enso's Varkaus sawmill. Varkaus sawmill has a long history of significant increase in the number of electrical motors and controlled electrical motor drives over the years. Despite this, reactive power compensation has been ignored almost completely.

The thesis aimed to give the client a comprehensive study of the current state of power quality which included inspecting the condition of existing compensation devices, analyzing the sawmill's total reactive power and the number of harmonics, and recommended actions to improve the power quality. The power quality measurements were done with network analyzers from the sawmill's medium-voltage supply and low voltage electrical centers. This provided a clear overview of the amounts of reactive power and harmonics of the sawmill. The sawmill gets its medium-voltage supply from Stora Enso's packaging board factory, which means the sawmill's reactive power loads the medium-voltage distribution of the packaging board factory. Measurements of the low voltage electrical centers showed exactly where the reactive power is consumed and so it was possible to give specific measures to reduce the total reactive power of the sawmill. Furthermore, the existing compensation devices were inspected and maintained without spare parts.

The analysis of the measurements revealed that the reactive power levels of the sawmill are at a critical state for both technical and economic reasons. Some low voltage electrical centers have no compensation at all although the need for compensation is obvious. All of the sawmill's existing compensation devices are completely or partially broken so almost all of the reactive power required by the sawmill is taken from the medium voltage compensation of the packaging board factory, and Fingrid's high voltage network. The harmonics in the sawmill are generally at a good level.

Based on analyses and the inspections of the existing compensation devices, it is highly recommended to add new compensation devices and to maintain the existing ones. These measures bring the total reactive power to a much better level so that the sawmill's reactive power production is as close as possible to the consumption.

---

Key words: reactive power, compensation, harmonics, industry

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	VAIHTOSÄHKÖN TEHO .....	6
	2.1 Näennäisteho .....	6
	2.2 Pätöteho.....	8
	2.2.1 Pätöteho resistanssissa.....	8
	2.2.2 Pätöteho induktanssissa ja kapasitanssissa.....	10
	2.2.3 Pätöteho impedanssissa .....	11
	2.3 Loisteho.....	12
	2.4 Kolmivaihejärjestelmän tehot .....	13
3	LOISTEHON KOMPENSOINTI.....	15
	3.1 Loistehon kompensoinnin tarkoitus .....	15
	3.2 Kompensoinnista saavutettavat hyödyt.....	19
	3.3 Kompensointitavat.....	21
	3.4 Kompensointilaitteet.....	25
4	YLIAALLOT JA NIIDEN VAIKUTUS SÄHKÖVERKKOON .....	28
	4.1 Yliaallot.....	28
	4.2 Yliaaltojen aiheuttajat .....	32
	4.3 Yliaaltojen vaikutukset sähköverkossa .....	33
	4.4 Yliaaltojen suodatus .....	34
	4.5 Säröteho.....	37
5	STORA ENSON VARKAUDEN SAHAN MITTAUKSET .....	38
	5.1 Sähkönjakelujärjestelmä .....	38
	5.2 Mittausten suorittaminen ja mittauslaitteistot.....	40
	5.3 Sähkökeskusten teho- ja yliaaltomittaukset.....	42
	5.4 Tulosten analysointi ja suositellut toimenpiteet .....	65
6	POHDINTA .....	71
	LÄHTEET.....	73
	LIITTEET.....	75
	Liite 1. Sahan sähkönjakelun pääkaavio (muokattu).....	75

## 1 JOHDANTO

Loisteho on erityisesti teollisuudessa välttämätön teho, jota esimerkiksi oikosulkumoottorit tarvitsevat toimiakseen. Loisteho on nimensä mukaisesti sähköverkossa värähtelevää tehoa, jota ei pystytä hyötykäyttämään. Sen sijaan loisteho aiheuttaa sähköverkon komponenteissa ylimääräistä kuormittumista, josta joh-tuen sähköverkon pätötehon siirtokapasiteetti pienenee, kaapelit ja muuntajat ylikuormittuvat helpommin ja niiden häviöt kasvavat. Suuret loistehomäärät ovat näin ollen teknisten ja taloudellisten syiden vuoksi syytä kompensoida.

Tekniikan kehittymisen myötä taajuusmuuttajat ovat yleistyneet teollisuudessa. Taajuusmuuttajien verkosta ottama virta on luonteeltaan yliaaltopitoista, jolloin useat verkkoon kytketyt taajuusmuuttajat voivat aiheuttaa laitoksen sähkönjake-lujännitteen liiallisen säröytymisen. Jännitteen säröytyminen voi aiheuttaa useita ongelmia kaukanakin yliaaltolähteistä, jolloin vikojen selvittäminen on haasteel-lista. Tämän vuoksi verkon yliaaltopitoisuus on syytä pitää standardien mukai-sissa rajoissa siihen tarkoitettujen suodattimien avulla.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Stora Enson Varkauden sahan sähkönlaatua loistehon ja yliaaltojen osalta. Työn toimeksiantaja on Efora Oy, joka on Stora Enso Oyj:n täysin omistama kunnossapitopalveluita tarjoava tytäryhtiö. Saha sijaitsee Stora Enson Varkauden pakkauskartonkitehtaan yhteydessä ja on siten yhdistyneenä kartonkitehtaan sähkönjakeluun, jolloin sahan kompensoimaton loisteho kuormittaa myös kartonkitehtaan sähkönjakelua.

Sahan pitkän historian myötä sen moottorikäyttöjen ja taajuusmuuttajakäyttöis-ten moottoreiden määrä on kasvanut huomattavasti. Tästä huolimatta loistehon kompensointi on jäänyt vähälle huomiolle. Tämän työn tarkoituksena on selvit-tää sahan kompensoimattoman loistehon määrä sekä yliaaltojen nykyinen taso, jotta sahan sähkönlaadun nykytilanteesta saadaan kattava kuva ja pystytään esittämään toimenpiteet tilanteen parantamiseksi. Työhön sisältyy myös ole-massa olevien kompensointilaitteistojen kuntotarkastukset.

## 2 VAIHTOSÄHKÖN TEHO

### 2.1 Näennäisteho

Vaihtosähkön aaltomuotoisen luonteen vuoksi tehon määrittäminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin tasasähkön tehon laskeminen. Koska siniaaltomainen vaihtojännite ja -virta eivät ole vakioita vaan niiden hetkellisarvot vaihtelevat positiivisen ja negatiivisen huippuarvon välillä, täytyy vaihtosähkön suureiden laskemista varten ottaa käyttöön jännitteen ja virran tehollisarvot. Sinimuotoisen jännitteen ja virran huippu- ja tehollisarvon suhde on  $\sqrt{2}$ . Tehollisarvoja käyttämällä saadaan selville todellinen laitteen käyttämä teho. Huippuarvoja ei laskennassa voi käyttää, koska huippuarvo ei kuvaa todellista tehollista vaikutusta. (Ahoranta, Lesch & Sundell 1986, 263–266)

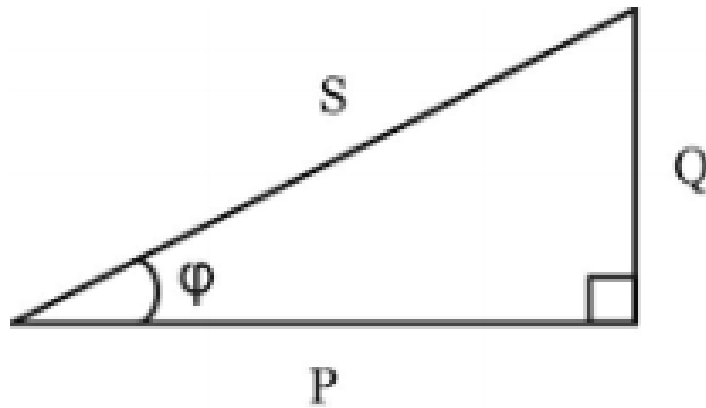
Vaihtosähkön teho riippuu järjestelmää kuormittavan laitteen luonteesta. Koska kuormitus voi olla resistiivistä, kapasitiivista tai induktiivista, ei vaihtosähköjärjestelmässä esiintyvä teho ole pelkkää pätötehoa. Kuormitustyypistä riippuen jännitteen ja virran välillä voi esiintyä vaihe-eroa, josta johtuen vaihtosähkön tehon laskennassa on otettava huomioon myös vaihesiirtokulma. Vaihtosähkön teho jaotellaan yleensä kolmeen eri tehoon, joita ovat näennäis-, pätö- ja loisteho. (Ahoranta ym. 1986, 333)

Näennäisteho on järjestelmää kuormittavaa kokonaistehoa, joka sisältää pätö- ja loistehokomponentit. Näennäistehon tunnus on  $S$  ja sen itseisarvo saadaan yksivaiheisessa vaihtosähköpiirissä laskettua jännitteen ja virran tehollisarvoista kaavalla

$$S = UI, \quad (1)$$

jossa  $U$  on jännitteen tehollisarvo ja  $I$  on virran tehollisarvo. (Aura & Tonteri 1994, 198) Näennäistehon SI-järjestelmän mukainen yksikkö on voltiampeeri eli VA (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2019, 51).

Vaihtosähkön tehon laskennassa esiintyy usein kuviossa (1) esitetty tehokolmio. Tehokolmion avulla on hyvä havainnollistaa, kuinka perustajuinen näennäisteho muodostuu pätö- ja loistehokomponenttien vaikutuksesta.



KUVIO 1. Tehokolmio (Silvonen 2009, 232).

Kuten kuvion (1) tehokolmiosta nähdään, on kolmion kateetteina pätöteho  $P$  ja loisteho  $Q$ . Kolmion hypotenuusana on näennäisteho  $S$ . Näennäistehon ja pätötehon välinen kulma  $\varphi$  kertoo jännitteen ja virran välisen vaihe-eron. Vaihesiirtokulman  $\varphi$  ollessa nolla, on järjestelmän kuormitus puhtaasti resistiivistä, jolloin näennäisteho koostuu ainoastaan pätötehosta, eikä loistehoa esiinny. Kun kulma on  $90^\circ$  tai  $-90^\circ$ , on kuormitus puhtaasti induktiivista tai kapasitiivista, joten näennäisteho koostuu ainoastaan loistehosta, eikä pätötehoa siirry. Muissa tapauksissa kuormituksen impedanssi koostuu resistiivisestä ja induktiivisesta tai kapasitiivisesta komponentista, jolloin näennäisteho koostuu pätö- ja loistehosta. Tehokolmion perusteella näennäisteho koostuu pätö- ja loistehokomponenteista, jolloin Pythagoraan lauseella on ratkaistavissa mikä tahansa näistä tehoista kaavalla

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

jossa  $S$  on näennäisteho,  $P$  on pätöteho ja  $Q$  on loisteho. Tehokolmiosta on myös trigonometrian avulla ratkaistavissa vaihesiirtokulma  $\varphi$ . (Silvonen 2009, 232; Ahoranta ym. 1986, 336–337)

## 2.2 Pätöteho

Pätöteho on se tehon osa, jonka laite pystyy todellisesti hyötykäyttämään. Tämä tarkoittaa samalla sitä, että pätöteho edustaa myös tehohäviöitä, koska esimerkiksi sähkökiukaan vastukseen kuluva pätöteho häviää lämmöksi. (Silvonen 2009, 233)

Pätötehon tunnus on  $P$  ja se saadaan vaihtosähköpiirissä laskettua kaavalla

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi = \frac{1}{T} \int_0^T (p) dt, \quad (3)$$

jossa  $\cos \varphi$  on vaihtosähkön tehokerroin,  $T$  on vaihtosähkön jakson aika ja  $p$  on pätötehon hetkellisarvo (Aura & Tonteri 1994, 197; Voipio 1976, 143). Vaihtosähkön tehokerroin saadaan ottamalla kosini tehokolmiossa esiintyneestä vaihesiirtokulmasta  $\varphi$  ja se kertoo näin ollen pätötehon ja näennäistehon välisen suhteen. Kaavan (3) mukaisesti pätötehon voi laskea usealla eri tavalla, mutta lopputulos on jokaisella tavalla aina sama. Kaavan mukaan pätötehon todellinen hyötykäyttävä tehollisarvo on vaihtojännitteen ja -virran tehollisarvojen sekä tehokerroimen tulo. Tämän lisäksi pätötehon tehollisarvon voi laskea myös pätötehon hetkellisarvojen vaihtelun keskiarvona jakson aikana. Pätötehon SI-järjestelmän mukainen yksikkö on watti eli W (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2019, 51).

### 2.2.1 Pätöteho resistanssissa

Pätöteho käyttäytyy eri tavoin riippuen kuormituksen luonteesta. Kuviossa (2) on esitetty taulukkolaskentaohjelmistolla luotu pätötehon hetkellisarvokuvaaja, kun kuormitus on täysin resistiivistä. Kuvion vaihtojännitteen hetkelliskuvaaja on laskettu vaihtojännitteen hetkellisarvon lausekkeella

$$u = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_u), \quad (4)$$

jossa  $u$  on vaihtojännitteen hetkellisarvo,  $\hat{u}$  on vaihtojännitteen huippuarvo,  $\omega$  on kulmataajuus,  $t$  on ajan hetki ja  $\varphi_u$  on jännitteen nollavaihekulma. Vastaavasti



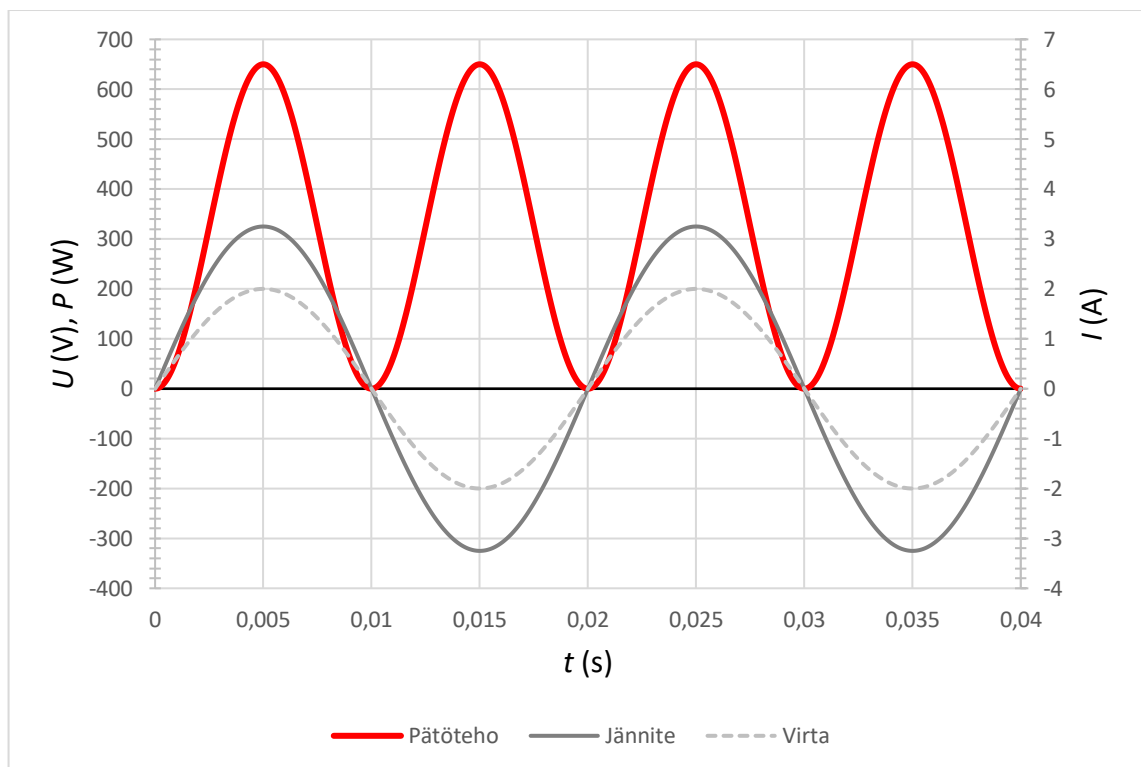
kuvion virran hetkellisarvokuvaaja on laskettu vaihtovirran hetkellisarvon lausekkeella

$$i = \hat{i} \cdot \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (5)$$

jossa  $i$  on virran hetkellisarvo,  $\hat{i}$  on virran huippuarvo ja  $\varphi_i$  on virran nollavaihekulma. Hetkellispätötehon kuvaaja on saatu kaavalla

$$p = ui, \quad (6)$$

jossa  $p$  on pätötehon hetkellisarvo. (Voipio 1976, 132)



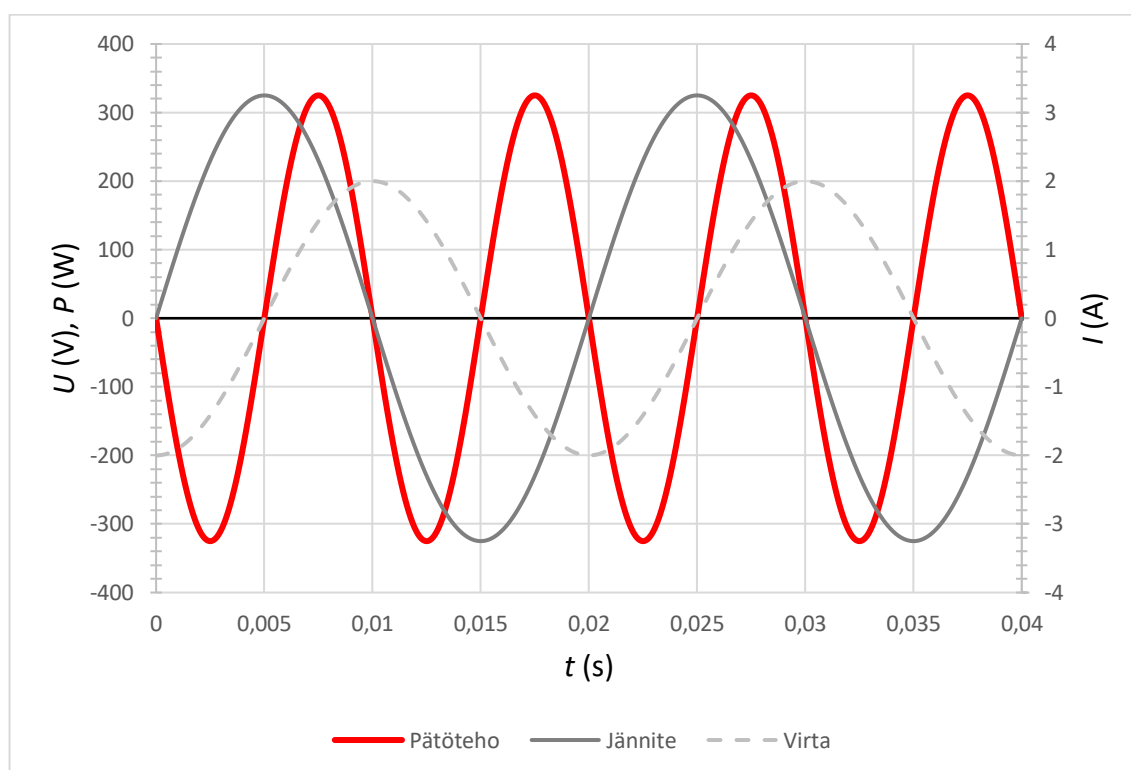
KUVIO 2. Hetkellisen pätötehon kuvaaja, kun kuormitus on puhtaasti resistiivistä.

Kuviosta (2) nähdään, että kuorman ollessa täysin resistiivistä, on jännitteen ja virran vaihe-ero nolla astetta eli molemmat kulkevat samanvaiheisesti. Koska jännite ja virta ovat yhtä aikaa joko positiivisella tai negatiivisella ajanjaksolla, on pätöteho aina positiivinen. Tästä johtuen puhtaasti resistiivisessä kuormituksessa kaikki energia kuluu jokaisella ajan hetkellä kuormaan ja muuttuu siellä lämmöksi (Ahoranta ym. 1986, 334). Koska kaikki energia siirtyy kuormaan, ei

loistehoa kulu lainkaan. Huomioitavaa on, että pätötehon hetkellisarvo ei suoraan kerro paljonko kuormalla on tehoa käytettävissään vaan hyötykäytettävän tehon määrä on hetkellisarvojen vaihtelun keskiarvo jakson aikana, joka on esitetty kaavassa (3) (Ahoranta ym. 1986, 334–335).

## 2.2.2 Pätöteho induktanssissa ja kapasitanssissa

Kuviossa (3) on esitetty pätötehon kuvaaja, kun kuormitus on puhtaasti induktiivista. Kuvaajien piirtämiseen on käytetty kaavoja (4), (5) ja (6).



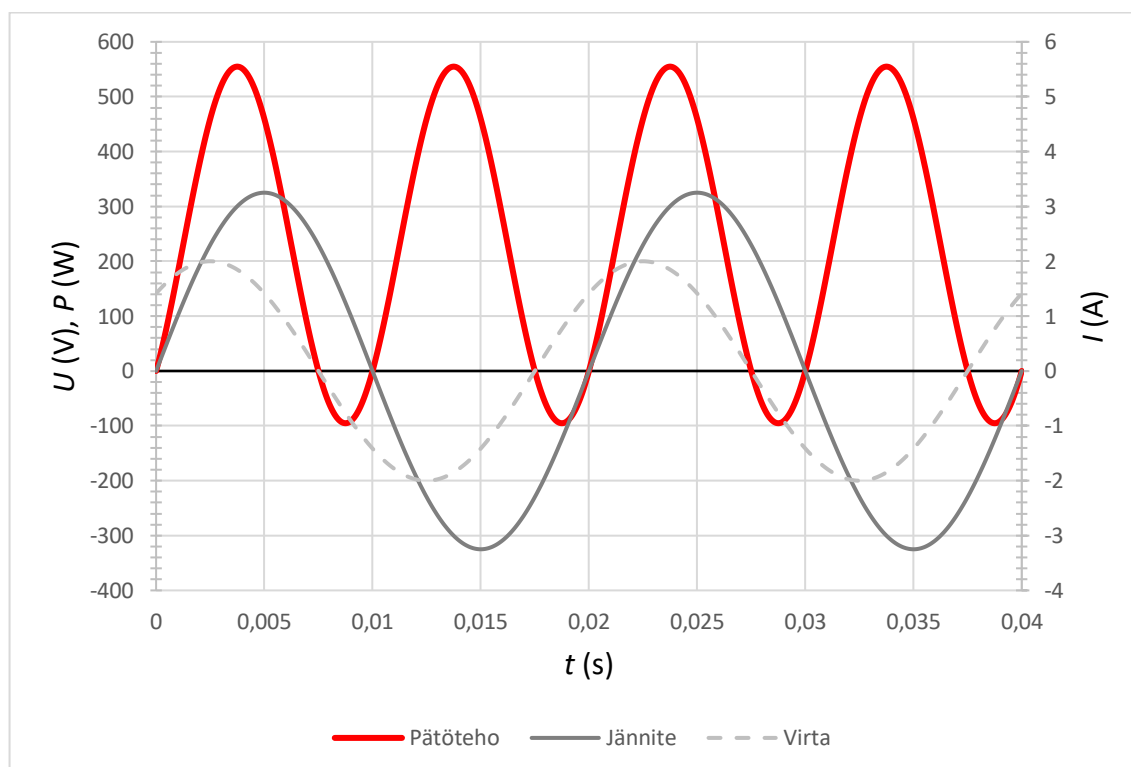
KUVIO 3. Hetkellisen pätötehon kuvaaja, kun kuormitus on puhtaasti induktiivista.

Kuviosta (3) nähdään, että edelliseen tilanteeseen poiketen virta tulee nyt 90 astetta jännitettä jäljessä. Kuormituksen ollessa puhtaasti kapasitiivista, olisi virta 90 astetta jännitettä edellä. Tämä luo tilanteen, että pätötehon kuvaaja vaihtelee tasaisesti nolla-akselin molemmin puolin. Aiemmin määriteltiin, että hyödynnettävän pätötehon määrä on hetkelliskuvaajan huippuarvojen keskiarvo, joten pätötehoksi tulee nolla wattia.

Pätötehon käyttäytyminen puhtaasti induktiivisessa tai kapasitiivisessa kuormassa on selitettävissä siten, että induktiivisella kuormituksella teho kulkee ja varastoituu positiivisella ajanjaksolla kelan magneettikenttään ja purkautuu takaisin syöttävään järjestelmään negatiivisella ajanjaksolla. Kapasitiivisen kuormituksen tilanteessa teho kulkee ja varastoituu kondensaattorin sähkökenttään ja purkautuu sieltä takaisin verkkoon. (Ahoranta ym. 1986, 336–337) Näissä tilanteissa kuormitus ei saa tehoa käytettäväkseen, joten pätötehoa ei kulu.

### 2.2.3 Pätöteho impedanssissa

Kuviossa (4) on esitetty pätötehon hetkelliskuvaaja tilanteessa, jossa kuormituksen on resistanssin ja kapasitanssin yhdistelmä. Kuvaajien piirtämiseen on käytetty kaavoja (4), (5) ja (6).



KUVIO 4. Hetkellisen pätötehon kuvaaja, kun kuormitus on resistanssin ja kapasitanssin yhdistelmä.

Kuviosta (4) nähdään, että kuormituksessa olevan kapasitanssin vuoksi virta tulee jännitettä edellä. Kyseisessä tilanteessa jännitteen ja virran vaihe-ero on 45 astetta eli tehokerroin  $\cos\varphi$  on 0,5. Tehokerroimen ollessa muuta kuin nolla

(puhtaasti kapasitiivinen tai induktiivinen kuorma) tai yksi (puhtaasti resistiivinen kuorma), esiintyy pätötehon kuvaajassa kuvion (4) mukainen tilanne, jossa teho on epätasaisesti molemmiin puolin nolla-akselia. Tässä tilanteessa suurin osa tehosta päätyy kuorman hyödynnettäväksi, mutta osa siitä palaa negatiivisella ajanjaksolla takaisin verkkoon. (Ahoranta ym. 1986, 338) Huomioitavaa on kuitenkin, että kuormituksen kapasitiivisuuden vuoksi hyödynnettävä pätöteho jää pienemmäksi kuin kuvion (2) tilanteessa, jossa kuormitus oli puhtaasti resistiivistä.

### 2.3 Loisteho

Kun piirissä on induktanssia tai kapasitanssia, varastoituu verkosta syötettävä energia kelan magneettikenttään tai kondensaattorin sähkökenttään ja purkautuu sieltä takaisin verkkoon. Tällaista tehoa, jota kuormitus ei saa hyödynnettäväksi kutsutaan loistehoksi. (Silvonen 2009, 233) Loistehon tunnus on  $Q$  ja se saadaan yksivaiheisessa vaihtosähköpiirissä laskettua kaavalla

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi, \quad (7)$$

jossa  $\sin \varphi$  on vaihtosähkön loistehokerroin (Aura & Tonteri 1994, 198; Voipio 1976, 140–143). Loistehokertoimen saa ottamalla sinin vaihtojännitteen ja -virran vaihesiirtokulmasta  $\varphi$ . Loistehon SI-järjestelmän mukainen yksikkö on varielei VAR (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2019, 51).

Loisteho voi olla induktiivista tai kapasitiivista riippuen kuormituksen luonteesta. Kuviossa (3) on esitetty tilanne, jossa kuormitus on puhtaasti induktiivista. Tällöin energian siirtymisestä huolimatta pätötehon osuus on nolla, joten kaikki siirtyvä energia on kelan magneettikenttään varastoituvaa induktiivista loistehoa. Induktiivinen reaktanssi vastustaa virran muutosta ajan suhteen, jonka vuoksi ideaalisessa induktiivisessa kuormituksessa virta kulkee 90 astetta jännitettä jäljessä (Aura & Tonteri 1994, 201).

Todellisuudessa harva kuormitus on pelkkää induktiivista tai kapasitiivista reaktanssia, vaan kuormitukseen liittyy myös resistanssia. Esimerkiksi sähkömoottori koostuu staattorikäameistä, joiden synnyttämän pyörivän magneettikentän ansiosta roottori alkaa pyöriä. Moottorin käämit on tehty pitkistä kuparijohtimista, jolloin käämillä on myös resistanssia. Näin ollen sähkömoottori vaatii toimiakseen induktiivista loistehoa ja akselin pyörittämiseen kuluvaan pätötehoa. (Hietalahti 2011, 59)

## 2.4 Kolmivaihejärjestelmän tehot

Teollisuudessa kolmivaihejärjestelmää kuormittavat pääasiassa sähkömoottorit ja muuntajat, jotka ovat symmetrisiä kuormituksia. Symmetrisellä kolmivaiheisella kuormituksella tarkoitetaan kuormaa, jonka kaikkien vaiheiden impedanssit ovat yhtä suuret. Tällöin jokaisessa vaiheessa kuluu yhtä suuri teho, jolloin kuorman kokonaisnäennäis-, pätö- ja loistehon itseisarvot voidaan laskea kuormituksen pääjännitteen ja -virran avulla kaavoilla

$$S = \sqrt{3}UI, \quad (8)$$

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi, \quad (9)$$

$$Q = \sqrt{3}UI\sin\varphi, \quad (10)$$

joissa  $U$  on pääjännite ja  $I$  on päävirta. (Ahoranta 2014, 316; Aura & Tonteri 1994, 244)

Kaavoja (8), (9) ja (10) voidaan käyttää ainoastaan silloin, kun kuormitus on symmetristä. Esimerkiksi kiinteistöjen yksivaiheiset kuormat, kuten valaistus, kodin sähkölaitteet ja ilmalämpöpumput jakautuvat epätasaisesti eri vaiheille, jolloin kokonaiskuormitus on epäsymmetristä. Epäsymmetrisen kuormituksen jokaisen vaiheen tehot on laskettava erikseen kaavoilla

$$S_v = U_v I_v, \quad (11)$$

$$P_v = U_v I_v \cos \varphi, \quad (12)$$

$$Q_v = U_v I_v \sin \varphi, \quad (13)$$

jossa  $U_v$  on vaihejännite ja  $I_v$  on vaihevirta. Epäsymmetrisen kuormituksen saman tyyppisten tehojen, kuten pätötehon ja loistehon, kokonaiskolmivaiheteho on kaavojen (12) ja (13) avulla laskettujen vaihetehojen aritmeettinen summa. Kokonaissäännäisteho on tällaisessa tapauksessa vain laskennallinen suure, eikä siitä voida määrittää vaihekohtaisia tehosuureita lainkaan. (Ahoranta ym. 1986, 370)

### 3 LOISTEHON KOMPENSOINTI

#### 3.1 Loistehon kompensoinnin tarkoitus

Kuten edellä on mainittu, sähkömagnetismin perustuvat laitteet tarvitsevat toimiakseen loistehoa, jonka tehtävä on ylläpitää laitteen toiminnalle välttämätöntä magneettikenttää. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi muuntajat, sähkömoottorit ja purkauslamput. Myös pitkissä kaapeleissa ja siirtojohdoissa esiintyy aina pientä induktanssia ja kapasitanssia, jonka seurauksena myös näissä kuluu loistehoa. (Sähkötieto ry 2016, 1)

Loistehon kompensoinnin periaatteena on kytkeä induktiivisen kuorman, kuten moottorin rinnalle kapasitiivista kuormaa eli kondensaattoreita, jolloin sähköverkon näkökulmasta moottorin aiheuttama huono tehokerroin saadaan kytkennässä paremmaksi ja sähköverkosta otettava virta pienemmäksi (Ahoranta 2014, 215). Kondensaattori kytketään laitteen rinnalle, koska tällöin se ei sähkötekniikan lakien mukaan vaikuta kuorman jännitteeseen, kuten sarjaan kytkettynä vaikuttaisi (Silvonen 2009, 240). Tiedetään, että induktiivisen reaktanssin aiheuttama virta on 90 astetta jännitettä jäljessä, kun taas kapasitiivisen reaktanssin aiheuttama virta on 90 astetta jännitettä edellä. Tällöin loisvirtojen välinen vaiheero on 180 astetta ja ne kumoavat toisensa, jolloin loistehon vaikutus sähköverkkoon pienenee. (Ahoranta 2014, 215–216)

Kun loistehoa kuluttavan moottorin rinnalle kytketään kondensaattori, alkaa loisteho sykkiä moottorin magneettikentän ja kondensaattorin sähkökentän välillä. Ideaalitulanteessa, jossa kompensoinnin mitoittamisessa on onnistuttu saamaan kondensaattorin virta ja moottorin loisvirta yhtä suuriksi, on kytkennän tehokerroin  $\cos\varphi$  arvossa 1,0. Tässä tilanteessa sähköverkosta ei jouduta ottamaan loistehoa yhtään. Alikompensoinnilla tarkoitetaan tilannetta, jossa moottorin loisvirta on suurempi kuin kondensaattorin virta, ja tällöin puuttuva induktiivinen loisteho joudutaan ottamaan sähköverkosta. Ylikompensoinnissa taas kondensaattorin virta on suurempi kuin moottorin loisvirta, ja tällöin kondensaattori työntää kapasitiivista loistehoa sähköverkkoon. (Ahoranta 2014, 217)

Kompensoimattomana laitteiden tarvitsema loisteho kehitetään voimalaitoksella generaattoreilla, jolloin se siirtyy sähkönjakeluverkon kautta laitteelle. Kaavasta (2) nähdään, että loistehon siirtäminen sähköverkossa aiheuttaa suurempaa näennäistehoa ja tällöin myös sähköverkkoa kuormittava virta on suurempi. Kasvanut kuormitusvirta aiheuttaa sähköverkon mitoituksessa teholtaan suurempien muuntajien ja johtimen poikkipinta-alaltaan paksumpien kaapeleiden tarvetta, mikä lisää huomattavasti investointikustannuksia. Muuntajien kuormitettavuus ilmoitetaan näennäistehona, joten kaikki siirrettävä ylimääräinen loisteho vähentää pätötehon määrää, jonka muuntaja pystyy syöttämään ylikuormittumatta. Vastaavasti kaikki ylimääräinen generaattorilla tuotettava loisteho vähentää generaattorin pätötehon tuottokykyä. (Jaatinen 1991, 49, 52–54)

Sähkötehon siirtäminen kaapeleissa lämmittää niitä. Lämmöksi muuttuva teho on tällöin pätötehohäviötä, joka on laskettavissa kaavalla

$$P_h = 3 \cdot (I_p^2 + I_q^2) \cdot R, \quad (14)$$

jossa  $P_h$  on pätötehohäviöt,  $I_p$  on pätötehon siirrosta aiheutuva virtakomponentti,  $I_q$  on loistehon siirrosta aiheutuva virtakomponentti ja  $R$  on siirtoverkon resistanssi. (Jaatinen 1991, 56) Kaavan (14) perusteella nähdään, että pätötehon lisäksi myös loisteho aiheuttaa pätötehohäviöitä kaapeleissa. Näin ollen loistehon siirtäminen ei ole taloudellisesti järkevää, koska loistehoa ei pystytä hyödyntämään todellisena tehona.

Koska loistehon siirtäminen sähköverkossa aiheuttaa hyödynnettävän pätötehon siirtämiskapasiteetin pienentymistä, kaapeleiden ja muuntajien jännite- ja tehohäviöiden kasvamista sekä ylikuormittumista, kompensoidaan loisteho teknistaloudellisuutta ajatellen mahdollisimman lähellä loistehoa kuluttavaa laitetta. Tällöin laitteiden vaatima loisteho kehitetään kondensaattoreilla, jotka voidaan sijoittaa esimerkiksi keskitetysti pääkeskukseen, jolloin kompensoidaan yhdellä kompensointilaitteistolla kaikki kyseisessä keskuksessa kytkettynä olevat laitteet. Tässä tilanteessa loistehon aiheuttamat haitat rajoittuvat vain pääkeskuksen ja moottorin välille, jolloin muuntopiirin muuntaja sekä muuntajaa syöttävän sähköverkon kuormitettavuus paranee ja häviöt pienenevät. (Männistö ym. 2006, 20, 48–50).



Kunnollisesti hoidettu loistehon kompensointi voi tulla ratkaisevaksi tekijäksi, kun tuotantolaitosta kehitetään ja esimerkiksi prosessin tuotannon kasvattamiseksi halutaan lisätä uusia isoja moottoreita. Ilman kompensointia voi uusien moottoreiden lisäyksen aiheuttama loistehon kasvu sähköverkossa johtaa alimitoitettuihin syöttökaapeleihin ja jopa muuntajiin, kun taas hyvin kompensoidussa tilanteessa laitoksen uusien moottoreiden vaatima loisteho ei näy syöttöverkon kaapeleissa ja muuntajissa. Tällöin huonosti kompensoidussa laitoksessa uuden investoinnin toteuttaminen voi pahimmillaan vaatia, ainoastaan kompensoinnin puutteen vuoksi, syöttökaapeleiden ja muuntajien uusimista, mikä johtaa investoinnin kokonaiskustannusten huimaan nousuun. (Männistö ym. 2006, 88; Sähkötieto ry. 2016)

Loistehon kompensoinnin vaikutusten havainnollistamiseksi lasketaan yksinkertainen esimerkki kompensoimisesta siten, että kompensointi suoritetaan pääkeskuksessa, johon on kytketty yksi suoraan verkkoon kytketty moottorilähtö. Esimerkissä on käytetty ABB:n 315 kW:n oikosulkumoottoria, jonka nimellisjännite  $U$  on 400 V, nimellisvirta  $I$  on 550 A ja tehokerroin  $\cos\varphi$  on 0,85, jolloin vaiheerokulma on 31,79 astetta (ABB Oy 2016, 24).

Kompensoimattomana sähkömoottori kuormittaa pääkeskusta syöttävää muuntajaa ja syöttökaapelia nimellisvirrallaan 550 A:lla ja kaavan (8) perusteella näennäisteholla

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 550 \text{ A} = 381 \text{ kVA.}$$

Kompensoidaan tehokerroin arvoon 0,995, jolloin vaihe-erokulmaksi tulee 5,73 astetta. Huomioitavaa on, että kompensointi ei vaikuta verkosta otettavan pätötehon määrään, vaan vaikutus näkyy ainoastaan verkosta otettavassa loistehon määrässä, joka kompensoinnin jälkeen otetaan rinnan kytketyiltä kondensaattoreilta. Kompensoinnin jälkeen moottori ottaa edelleen kaavan (9) mukaisesti sähköverkosta pätötehon

$$P = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 550 \text{ A} \cdot 0,85 = 324 \text{ kW.}$$

Kaavan (10) mukaisesti sähköverkosta otettavan loistehon määrä ennen kompensointia on

$$Q_1 = P \cdot \tan(31,79^\circ) = 201 \text{ kVAr}$$

ja kompensoinnin jälkeen

$$Q_2 = P \cdot \tan(5,73^\circ) = 33 \text{ kVAr.}$$

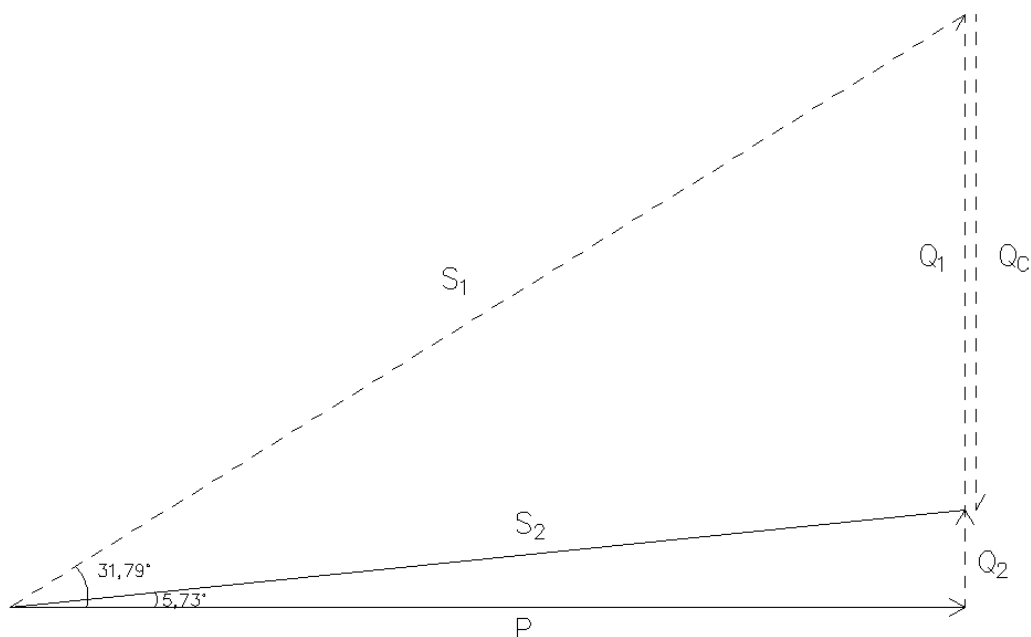
Tällöin kaavan (2) mukaan sähkömoottorin verkosta ottaman näennäistehon määrä on kompensoituna

$$S_2 = \sqrt{(324 \text{ kW})^2 + (33 \text{ kVAr})^2} = 326 \text{ kVA}$$

ja verkosta otettava virta pienenee kaavaa (8) soveltaen arvoon

$$I = \frac{326 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 471 \text{ A.}$$

Edellä olevan laskennan perusteella kompensoinnin vaikutus on huomattava, sillä jo yhden suuren moottorin kompensoinnilla saatiin esimerkin mukaisessa tilanteessa muuntajalta 55 kVA:a kuormitusta pois, mikä vastaa esimerkiksi kahta teollisuudessa yleisen kokoista 22 kW:n moottoria. Tämän lisäksi muuntajan ja pääkeskuksen välisen syöttökaapelin kuormitusvirta pienenee 79 A:a, joka tarkoittaa huomattavasti pienempiä lämpöhäviöitä. Kuviossa (5) on esitetty tehokolmio laskennasta.



KUVIO 5. Tehokolmio laskennan tuloksista.

Kuten kuviosta (5) nähdään, kompensointi ei vaikuta moottorin ottamaan pätötehoon, mutta kapasitiivinen loisteho  $Q_C$  kumoaa verkosta otettavaa induktiivista loistehoa  $Q_1$ , koska näiden välinen kulma on  $180$  astetta. Tällöin pääkeskuksen kokonaisteho lähentyy vastaamaan pelkkää pätötehoa, joka on edellä mainittujen loistehon haittojen vuoksi järkevämpää.

### 3.2 Kompensoinnista saavutettavat hyödyt

Edellä mainituista kompensoinnin syistä voidaan vetää yhteenveto saavutettavista hyödyistä. Kuten esimerkein on näytetty, erityisesti teollisuudessa loistehon kompensointi on välttämätöntä suurien moottorikuormien vuoksi.

Loistehon kompensoinnilla voidaan saavuttaa taloudellista hyötyä, koska kompensoinnilla vältetään loistehomaksuita. Paikalliset verkkoyhtiöt on veloitettu huolehtimaan oman vastualueensa loistehotasapainosta. Siitä johtuen esimerkiksi suurille teollisuusasiakkaille, jotka ovat liittyneenä valtakunnalliseen sähkönjakeluverkkoon, on määritetty induktiivisen ja kapasitiivisen loistehon toiminta-alue. Kapasitiivinen loisteho on sähköverkon kannalta haasteellisempaa kuin induktiivinen loisteho, jonka vuoksi pysyvästi ylikompensoitu verkko voi olla

kielletty ja toiminta-alueen kapasitiivisen loistehon raja-arvo on huomattavasti lähempänä 0 kVAR:a kuin induktiivisen loistehon raja-arvo. Raja-arvojen ylittäminen aiheuttaa loistehomaksuja, joiden tarkoituksena on saada asiakkaat huolehtimaan loistehomääristä itse. (Tampereen Sähköverkko n.d.)

Loistehon kompensoinnilla voidaan parantaa sähköverkon pätötehon siirtokapasiteettia, joka on verkon ensisijainen päätehtävä. Sähköverkon komponenteilla, kuten kaapeleilla ja muuntajilla, on tietty kuormitettavuus. Kuorman ottamaan kokonaisvirtaan vaikuttaa pätötehon lisäksi loisteho, joten poistamalla virrasta kompensoinnin avulla loiskomponentti, voidaan verkossa siirtää enemmän pätötehoa ennen kuin verkon laitteistot ylikuormittuvat. (Jaatinen 1991, 52–54; Männistö ym. 2006, 82–83) Tällöin kompensoidussa verkossa voi sama muuntaja syöttää useampia moottoreita kuin kompensoimattomassa verkossa. Tällä on suuri taloudellinen merkitys teollisuuslaitoksissa, joita kehitetään jatkuvasti ja moottoreita lisätään jo olemassa oleviin muuntopiireihin.

Loistehon kompensoinnilla voidaan pienentää häviöitä. Loistehosta aiheutuva kasvanut kuormitusvirta voi aiheuttaa liiallista lämpenemistä sähköverkon komponenteissa, kuten kaapeleissa ja muuntajissa sekä keskuksissa, jolloin niiden häviöt kasvavat. Verkon pätötehohäviöt ovat verrannollisia verkon komponenttien resistanssin ja kokonaisvirran neliön tuloon ( $R I^2$ ), joten kompensoinnista saavutettava kokonaisvirran pieneneminen vaikuttaa suuresti pätötehohäviöihin. Saavutettavat säästöt häviöiden pienentämisestä kompensointilaitteiden häviöihin verrattuna ovat moninkertaiset, joten kompensoinnista hyödytään tässäkin tapauksessa taloudellisesti. (Männistö ym. 2006, 83–85; Sähkötieto ry 2016, 2)

Loistehon kompensointi pienentää myös jännitteenalenemaa, koska jännitteenalenema riippuu kuormituksen kokonaisvirrasta, jota kompensoinnilla saadaan pienemmäksi. Alle 16 mm<sup>2</sup>:n johtimen poikkipinta-aloilla jännitteenaleneman merkitys on mitätön, mutta teollisuudessa johtimet voivat olla jopa 300 mm<sup>2</sup>:n poikkipinta-alaisia ja kuormitus- sekä käynnistysvirrat suuria, jolloin jännitteenaleneman merkitys voi kasvaa suureksi. Muuntajilla loistehon siirtäminen näkyy aina suurena jännitteenalenemana, koska muuntajien oikosulkureaktanssi on suuri. (Sähkötieto ry 2016, 2–3) Liiallinen jatkuva jännitteenalenema ei ole sähköverkon toiminnallisuuden kannalta hyväksi. Esimerkiksi oikosulkumoottorit

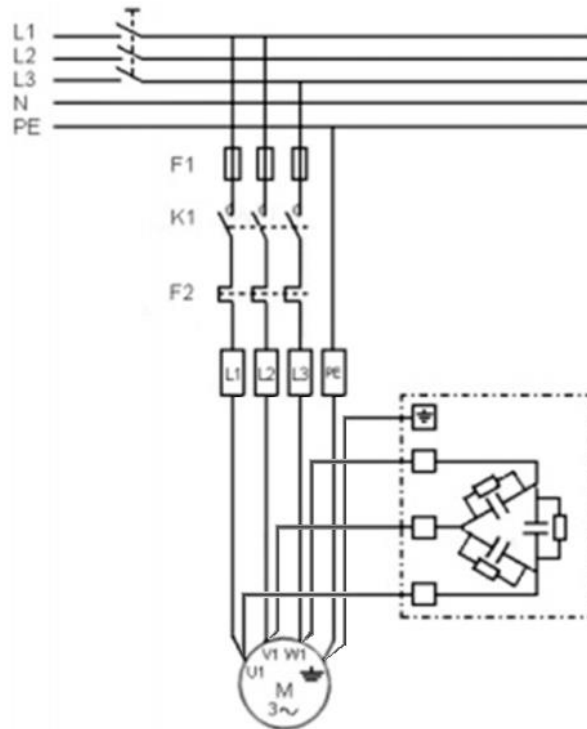
voivat suoraan verkkoon käynnistyessään ottaa nimellisvirtaan verrattuna jopa 7-8-kertaisen käynnistysvirran, jolloin järjestelmän jännite alenee hetkellisesti. Jos jännitetaso on jo valmiiksi alhainen, esimerkiksi juuri loistehon siirtämisen vuoksi, voi suurien moottoreiden yhtäaikainen käynnistäminen aiheuttaa niin alhaisen jännitetason, että kaikki kyseisen muuntopiirin moottorit pysähtyvät.

### 3.3 Kompensointitavat

Loistehon kompensointi voidaan toteuttaa muutamalla eri tavalla riippuen kompensoitavasta kohteesta. Näitä ovat laitekohtainen, ryhmäkohtainen ja keskitetty kompensointi. Jokaista kohdetta on tutkittava tapauskohtaisesti, sillä sopivan kompensointitavan valintaan vaikuttaa esimerkiksi missä loisteho tuotetaan, laitteiston käytettävissä olevat tilat ja tilojen siisteys. (Sähkötieto ry. 2016, 4)

Teollisuudessa kompensointi toteutetaan suurimmaksi osaksi keskitetysti pienjänniteverkossa, jolloin päästään teknisesti ja taloudellisesti hyvään lopputulokseen. Kompensoinnin toteuttaminen pienjänniteverkossa mahdollistaa loistehon tuottamisen mahdollisimman lähellä kulutusta, jolloin keskijännitejakelun komponentit eivät kuormitu loistehosta. Kompensointilaitteistoja sijoitetaan myös hajautetusti tehtaan keskijännitejakeluverkkoon, jolloin pienjänniteverkon kompensoinnin häiriö- ja huoltotilanteissa pystytään tehtaan kokonaisloisteho pitämään hallinnassa ennen loistehomaksujen laskutus pistettä. Keskijännitekompensointilaitteistot ovat kuitenkin yleensä suuritehoisia ja yksiportaisia, jolloin pelkästään niiden avulla ei pystytä toteuttamaan riittävän tarkkaa kompensointia. Tällöin ongelmaksi muodostuu myös keskijänniteverkon kuormittuminen loistehosta. Hyvin toteutettu kompensointi on yhdistelmä pien- ja keskijänniteverkon kompensointia, jolloin ensisijaisesti loisteho kompensoidaan pienjänniteverkossa lähellä kulutusta, mutta keskijänniteverkon kompensoinnilla luodaan varmuutta loistehon hallintaan. (Männistö ym. 2006, 85–88)

Laitekohtainen kompensointi toteutetaan asentamalla erikseen jokaisen loistehoa tuottavan laitteen, kuten purkausvalaisimen tai moottorin rinnalle kondensaattori. Kuviossa (6) on esitetty piirikaavio laitekohtaisen kompensoinnin periaatteesta.



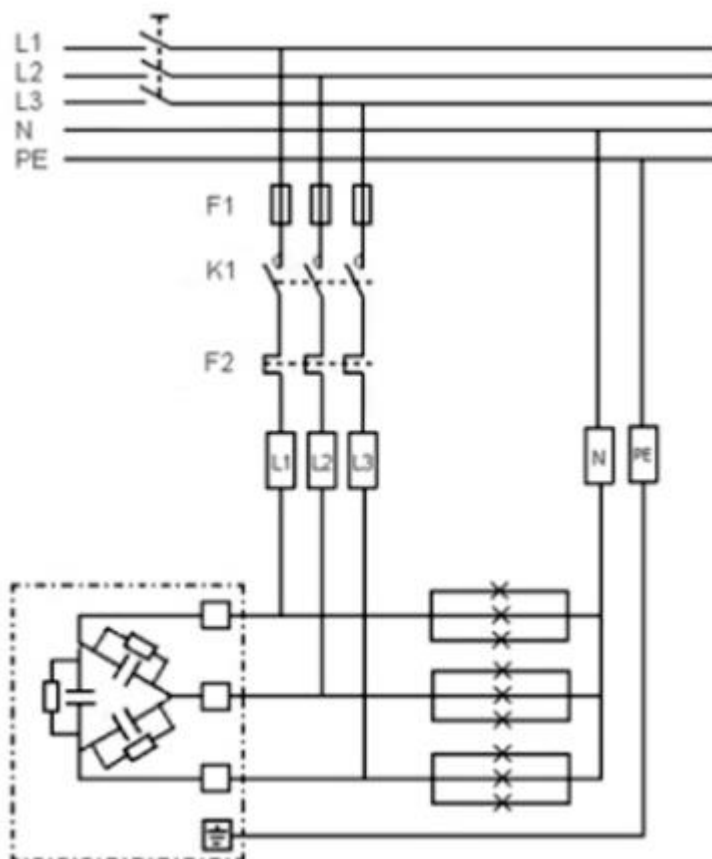
KUVIO 6. Laitekohtaisen kompensoinnin periaatekuva (muokattu) (Sähkötiety ry 2016, 4).

Kuvion (6) piirikaaviosta nähdään, kuinka laitekohtainen kompensointi toteutetaan moottoripiireissä. Kompensointilaitteisto voi olla sijoitettu kentälle moottorin läheisyyteen ja se kytketään rinnan moottorin liittimiin. Tällä tavalla loisteho tulee kompensoiduksi niin lähellä loistehoa vaativaa laitetta kuin mahdollista ja loistehon aiheuttamat haitat rajoittuvat vain laitteelle, jolloin myös laitteen syöttökaapeli välttyy loistehon haitoilta. Laitekohtainen kompensointi ei myöskään tarvitse erillistä säätöä, koska loistehoa tuottava kondensaattori on verkossa ainoastaan silloin kuin loistehoa kuluttava laitekin on. Näin ollen ei ole mahdollisuutta, että sähköverkko ylikompensoituisi. (Jaatinen 1991, 66; Sähkötiety ry 2016, 4)

Laitekohtaista kompensointia ei nykypäivänä suositella uusissa asennuksissa käytettäväksi ja vanhoissakin asennuksissa niistä on tilaisuuden tullen hyvä pyrkiä eroon (Sähkötiety ry 2016, 4). Esimerkiksi vanhan purkausvalaisimen hajotessa on nykypäivänä hyvä vaihtoehto korjaamisen sijaan vaihtaa tilalle LED-valaisin, jolloin myös valaistustehon kulutus pienenee. Laitekohtainen kompensointi ei erityisesti teollisuudessa ole taloudellisesti järkevää suurien moottori-

määrien vuoksi, jolloin myös kompensointilaitteita tulee olla suuria määriä. Tällöin kysymykseen tulee myös kunnossapidollinen näkökulma, kun verkossa olevien laitteiden määrä kasvaa ja niiden ylläpito on hankalaa.

Ryhmäkohtaista kompensointia voidaan käyttää, kun syötetään 3-vaiheista ryhmää, jonka kuormia käytetään samanaikaisesti, jolloin loistehon määrä ryhmässä pysyy lähes vakiona. Tällaisia ryhmiä ovat esimerkiksi purkauslamppuvalaisinryhmät, joihin kyseinen kompensointitapa sopii parhaiten. Ryhmäkohtaisessa kompensoinnissa kompensointilaitteisto sijoitetaan ryhmäkeskukseen tai ryhmäjohtoon, jolloin se on usein huomattavasti paremmissa olosuhteissa kuin laitekohtaisessa kompensoinnissa. Tätä kompensointitapaa ei voi käyttää, kun ryhmän kuormana on eri aikaan toimivia laitteita. Kuviossa (7) on esitetty ryhmäkohtaisen kompensoinnin periaatekuva.

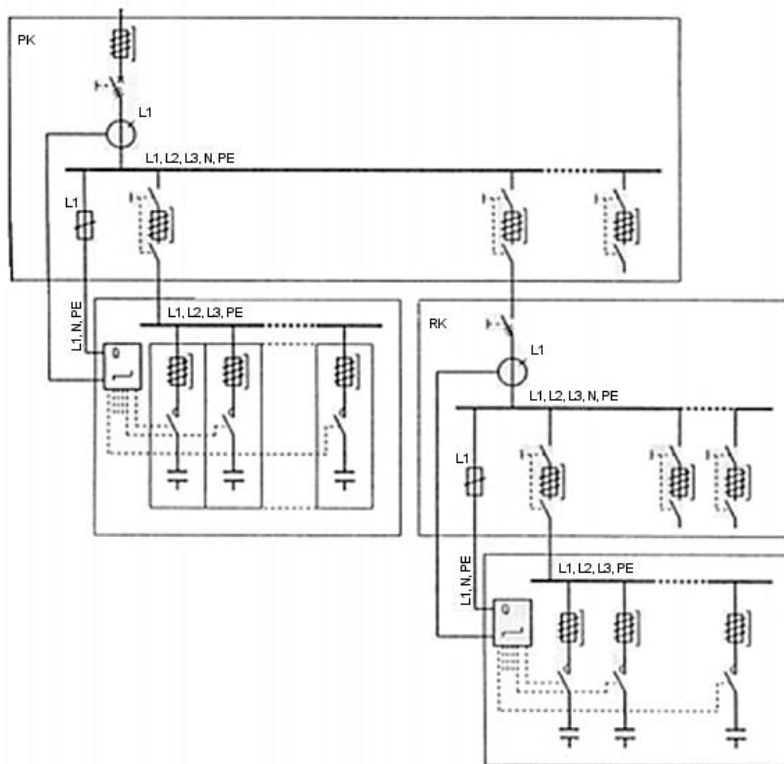


KUVIO 7. Ryhmäkohtaisen kompensoinnin periaate (Sähkötieto ry 2016, 5).

Kuten kuviossa (7) nähdään, on kompensointilaitteisto kytketty rinnan 3-vaiheisen valaisinryhmän kuormien kanssa. Tällöin purkauslamput eivät tarvitse omia

kondensaattoreita, vaan yhdellä laitteistolla saadaan kompensoitua ryhmän kaikki valaisimet. Myös ryhmäkohtaista kompensointia on, hankalan ylläpidon vuoksi, syytä olla käyttämättä uusissa asennuksissa ja vanhoissa asennuksissa tilaisuuden tullen siitä on pyrittävä eroon (Sähkötieto ry 2016, 5).

Keskitetyssä kompensoinnissa kompensointilaitteisto kytketään pää- tai ryhmäkeskukseen, jolloin kaikki keskuksen ja sen mahdollisten alakeskusten kuormien vaatima loisteho tuotetaan yhdellä laitteistolla. Keskitetty kompensointi toteutetaan verkon yliaaltopitoisuudesta riippuen nykyään joko automatiikkaparis-toilla, estokelaparis-toilla tai yliaaltosuodattimilla (Sähkötieto ry. 2016, 5). Nämä laitteistot vaativat toimiakseen loistehonsäätimen, koska tällä kompensointitavalla kompensoidaan useita eriaikaisesti toimivia laitteita, jolloin myös loistehomäärät vaihtelevat paljon. Kuviossa (8) on esitetty periaatekuva keskitetystä kompensoinnista.



KUVIO 8. Keskitetyn kompensoinnin periaate (Sähkötieto ry 2016, 5).

Kuvion (8) periaatekuvasta nähdään, että keskitetty kompensointi voidaan sijoittaa pääkeskukseen, ryhmäkeskukseen tai tarpeen vaatiessa molempiin. Kom-



pensointilaitteisto koostuu useasta kondensaattoriportaasta, joita loistehonsäädin ohjaa päälle keskuksen loistehotilanteen mukaan. Loistehonsäädin saa mitaustiedot keskuksen virta- ja jännitemittauksista, jonka perusteella se laskee keskuksen loistehotilanteen ja ohjaa kontaktoreiden avulla tarvittavan määrän kondensaattoriportaita käyttöön.

Keskitetty kompensointi on teollisuudessa paras tapa kompensoida isoja muuntopiirejä. Teollisuudessa on tyypillisesti keskuksia, joiden kuormitusilanteet voivat vaihdella paljon useiden eri tehoisten moottoreiden vuoksi. Tällöin ryhmäkohtainen kompensointi ei ole mahdollinen ja kuten laitekohtaisesta kompensoinnista mainittiin, ei ole taloudellisesti eikä kunnossapidollisesti mielekästä asentaa jokaiselle tehtaan laitteelle omaa kompensointiyksikköä. Keskitetty kompensointi on suurien teollisuuslaitosten mittakaavassa taloudellisesti tehokkain tapa kompensoida ja laitteiden vähäisen määrän vuoksi myös niiden kunnossapitokustannukset ovat pienet. Keskitetyn kompensoinnin hyvänä puolena esiin tulee myös laitteiston sijoitus. Huonojen kenttäolosuhteiden sijaan kompensointiyksiköt sijoitetaan usein sähkötiloihin, joissa myös sähkökeskukset sijaitsevat. Nämä tilat ovat ideaalipaikkoja niiden puhtauden ja hyvän ilmaston vuoksi.

### **3.4 Kompensointilaitteet**

Loistehon kompensointi voidaan suorittaa useilla eri laitteilla. Kompensointia suunniteltaessa on huomioon otettava sähköverkon yliaaltopitoisuus, koska suurilla yliaaltopitoisuuksilla tietyt laitteistot eivät sovellu käytettäväksi. Kaikilla kompensointiratkaisuilla on kuitenkin sama perusperiaate, eli kytkeä kompensoitavaan verkkoon riittävä määrä kapasitanssia kondensaattoreilla. (Sähkö-tieto ry. 2016)

Kondensaattoriparistot voidaan jakaa kiinteisiin paristoihin ja säädettyihin eli automatiikkaparistoihin. Kiinteä kondensaattori on yksinkertaisesti kondensaattori, joka kytketään sähköverkkoon tuottamaan tietty määrä kapasitiivista loistehoa. Kiinteää kondensaattoriparistoa ei voida säätää, jolloin vaihtelevassa kuormituk-

sessä on suuri vaara ylikompensoida verkko. Näin ollen kiinteä kondensaattoriparisto ei sovellu käytettäväksi keskitetyssä kompensoinnissa. (Männistö ym. 2006, 49)

Automatiikkaparisto koostuu kondensaattoreista, joita kytketään loistehonsäätimen avulla portaittain sähköverkkoon loistehontarpeen mukaan. Loistehonsäätimelle parametroidaan halutut induktiiviset ja kapasitiiviset havahtumisrajat, joiden perusteella säädin kytkee, kontaktoreiden avulla, tietyn määrän kompensointitehoa verkkoon. Automatiikkaparistot soveltuvat käytettäväksi keskitetyssä kompensoinnissa kohteisiin, joissa yliaaltoja ei esiinny merkittävästi. Todellisuudessa erityisesti teollisuudessa esiintyy lukuisten taajuusmuuttajakäyttöjen vuoksi aina yliaaltoja, jolloin kompensointi on toteutettava estokelaparistoilla. (Männistö ym. 2006, 49–50)

Estokelapariston toimintaperiaate on sama kuin automatiikkaparistolla. Loistehonsäädin ohjaa portaita päälle loistehon tarpeen mukaan. Automatiikkapariston ja estokelapariston ero tulee portaiden komponenteista. Kun automatiikkaparistolla porräs koostuu pelkästä kondensaattorista, on estokelapariston porräs kondensaattorin ja kuristimen eli estokelan sarjankytkentä. Estokelaparistoa on syytä käyttää, kun verkon jännitteen harmoninen kokonaissärö ylittää arvon 3 %, koska kompensoinnista verkkoon tuleva kapasitanssi ja verkon induktanssit voivat muodostaa rinnakkaisresonanssiin. Jos verkossa on yliaaltoja, voi resonanssiin viritystaajuus ja yliaallon taajuus osua kohdakkain. Tällöin kyseisen taajuuden virrat voivat vahvistua jopa 20-kertaiseksi, mikä voi rikkoa verkossa olevia laitteita. Automatiikkaparistolla tätä tilannetta ei voi estää, mutta estokelapariston kondensaattorin ja oikein mitoitetun kuristimen muodostaman sarjaresonanssiin ansiosta rinnakkaisresonanssia ei voi syntyä verkon kanssa, joten paristo ei vahvista yliaaltoja. (ABB Oy 2000, luku 9, 6; Männistö ym. 2006, 52)

Estokelaparisto ei juurikaan suodata yliaaltoja verkosta, vaan kela toimii kondensaattorin suojana yliaalloilta (ABB Oy 2000, luku 9, 6). Estokelan viritystaajuudella kuitenkin voidaan vaikuttaa jonkun verran yliaaltojen suodattumiseen. Käytämällä esimerkiksi 189 Hz:n viritystaajuutta, voidaan suodattaa noin 10-30 %:a viidennen yliaallon virrasta. Viritystaajuus valitaan verkossa esiintyvien merkittä-

vimpien yliaaltojen mukaan, eikä sillä voida suodattaa tehokkaasti kaikkia esiintyviä yliaaltotaajuuksia. Tästä johtuen voimakkaasti yliaaltopitoisissa verkoissa on kompensointiin käytettävä estokelapariston sijaan yliaaltosuodatinta. (Männistö ym. 2006, 53)

## 4 YLIAALLOT JA NIIDEN VAIKUTUS SÄHKÖVERKKOON

### 4.1 Yliaallot

Sähköenergiaa sähköverkossa kuluttavat laitteet ovat suunniteltu toimimaan esimerkiksi Suomessakin käytettävällä 50 Hz:n perustaajuisella täysin sinimuotoisella jännitteellä ja virralla. Tekniikan kehittymisen myötä liittyy sähköverkkoon yhä enemmän laitteita, jotka ottavat tai syöttävät epälineaarista sinimuotoisesta aallosta poikkeavaa virtaa. (Männistö ym. 2006, 26; Jaatinen 1991, 20) Esimerkki tällaisesta laitteesta on taajuusmuuttaja, joita havaintojeni perusteella varsinkin teollisuudessa lisätään uusiin moottorikäyttöihin lähes poikkeuksetta ja vanhoja suorakäyttöisiä moottoreita muutetaan säädettäviksi käytöiksi.

50 Hz:n perustaajuisesta siniaallosta poikkeava kuormitusvirta aiheuttaa erityisesti muuntopiirin muuntajan reaktanssissa jännitehäviöitä eri taajuuksilla, jotka näkyvät kuormajännitteen säröytymisenä. Säröytynytkin jännite on puhtaan sinimuotoisen aallon mukaisesti jaksollisesti vaihtelevaa, joten se on mahdollista esittää koostuvan useasta eritaajuisesta komponentista Fourier'n sarjakehittelällä, joka on saatettu muotoon, jossa jokainen esiintyvä taajuuskomponentti saadaan laskettua amplitudinsa ja nollavaihekulmansa avulla yhtälöllä

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{u}_n \cdot \sin(n2\pi f_1 t + a_n), \quad (15)$$

jossa  $U_0$  on jännitteen tasakomponentti,  $n$  on yliaallon järjestysluku,  $\hat{u}_n$  on kyseisen yliaallon huippuarvo,  $f_1$  on perustaajuus ja  $a_n$  kyseisen yliaallon nollavaihekulma. Näitä taajuuskomponentteja kutsutaan perusaallon monikerroiksi. Harmonisiksi yliaalloiksi kutsutaan sellaisia yliaaltoja, joiden taajuudet ovat perusaallon kokonaislukumonikertoja. Harmonisten yliaaltojen lisäksi voi esiintyä epäharmonisia yliaaltoja, jotka eivät ole perustaajuuden kokonaislukumonikertoja. (Männistö ym. 2006, 26–27, 38)

Harmonisen yliaallon taajuuden saa laskettua kaavalla

$$f_n = n \cdot f_1. \quad (16)$$

Taulukossa (1) on esitetty teollisuudessa yleisimmin esiintyvien harmonisten yliaaltojen monikerrat ja niitä vastaavat taajuudet. (Männistö ym. 2006, 26)

TAULUKKO 1. Perustaajuus (50 Hz) ja teollisuudessa yleisimmin esiintyvät yliaallot.

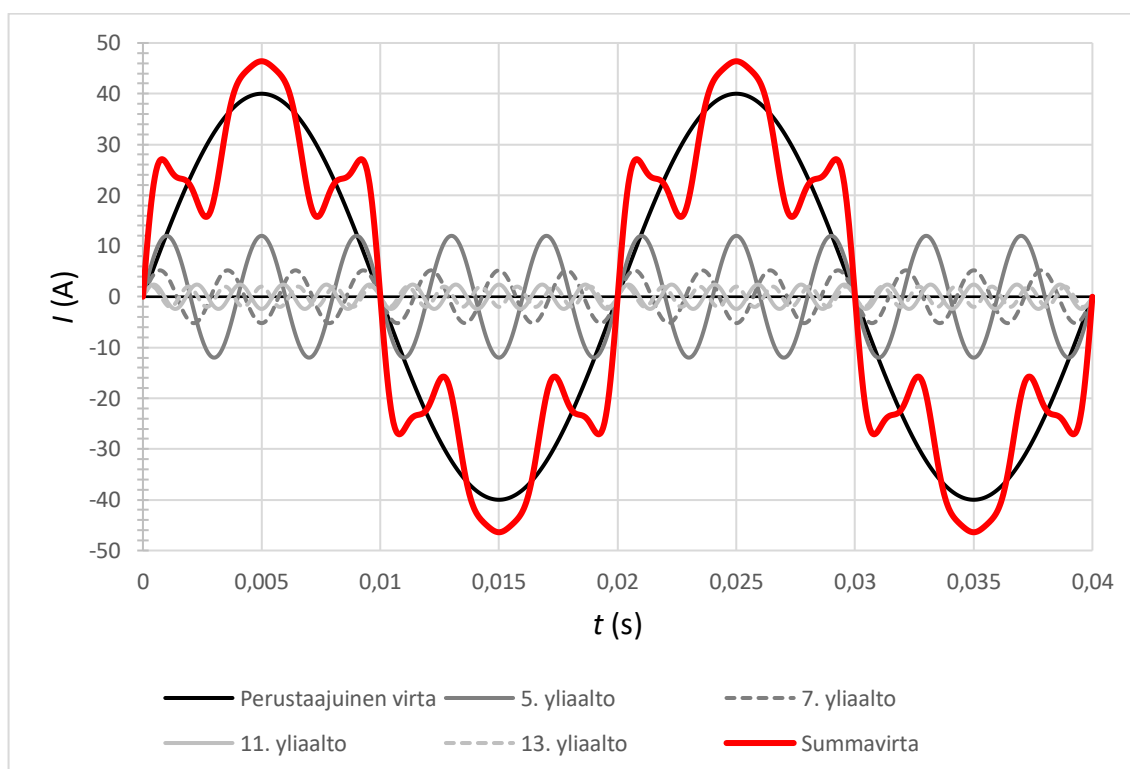
Yliaallon monikerta	1.	5.	7.	11.	13.
Taajuus	50 Hz	250 Hz	350 Hz	550 Hz	650 Hz

Taulukon (1) yliaalloista 5. ja 7. ovat merkittävimmät taajuusmuuttajien yleisimmin käytetyn 6-pulssitasasuuntauksen verkosta ottaman virran luonteen vuoksi. Teollisuudessa käytännössä lähes kaikki kuormitus on symmetristä kolmivaiheista taajuusmuuttajakuormaa, jolloin esiintyy vain parittomia, kolmella jaottomia yliaaltoja. Tämän vuoksi esimerkiksi 2. ja 4. yliaaltoa ei esiinny. Kolmella jaolliset kuten 3., 6. ja 9. yliaallot esiintyvät vain yksivaiheisessa kuormituksessa, jolloin yliaaltovirratt summautuvat nollajohtimeen. (Sähkötieto ry. 2014, 1) Yksivaiheista kuormitusta on teollisuudessa suhteessa kolmivaiheiseen kuormitukseen erittäin vähän, eikä näistä mahdollisesti aiheutuvat yliaallot kasva merkittävän suuriksi verrattuna kolmivaihekuormasta johtuviin yliaaltoihin. Koska yleisimmin käytetyt passiiviset yliaaltosuodattimet voidaan virittää vain tietyille yliaalto-taajuuksille, on parempi keskittyä suodattamaan kolmivaiheisestä kuormasta aiheutuvia yliaaltoja. Taulukossa (2) on esitetty tyypillisen 6-pulssitasasuuntaajasillan tuottamien yliaaltovirtojen osuudet perustaajuisesta virrasta.

TAULUKKO 2. 6-pulssitasasuuntaajan tuottamien yliaaltovirtojen osuus perustaajuisesta virrasta (Sähkötieto ry. 2014, 2).

Yliaallon monikerta	Taajuus (Hz)	Virra (%)
1	50	100
5	250	30
7	350	13
11	550	6
13	650	5

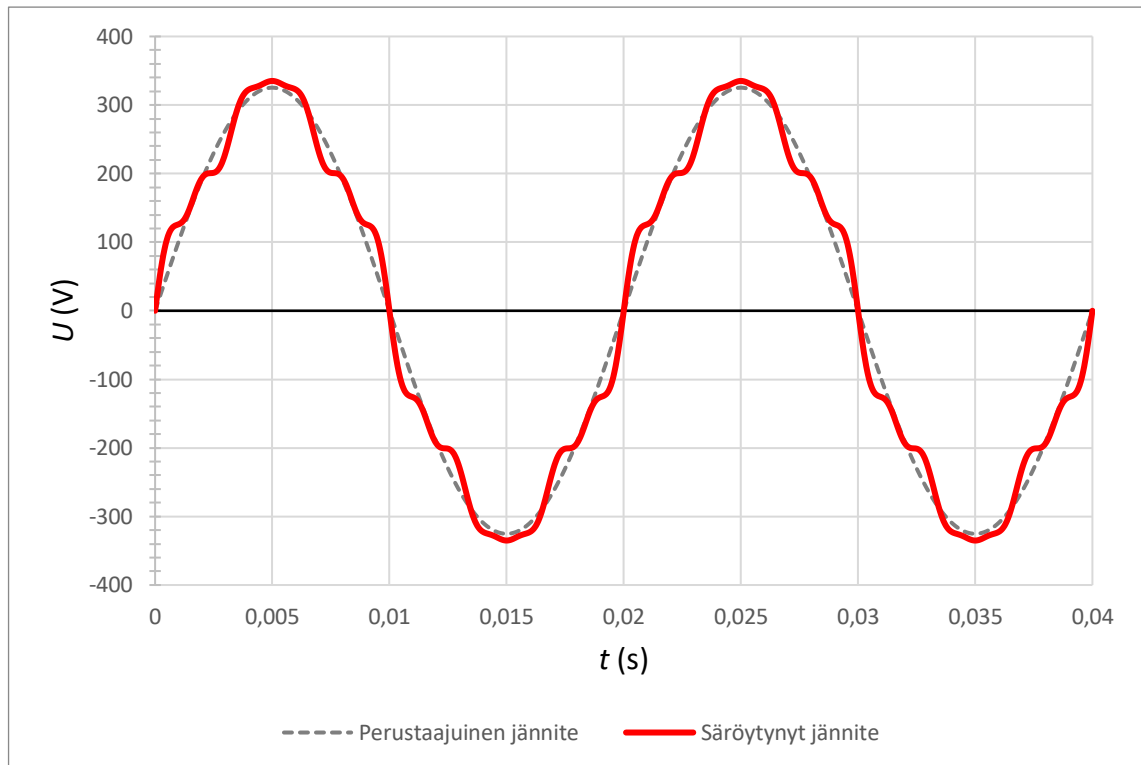
Taulukon (2) tietojen perusteella pystytään piirtämään esimerkkikuvaaja, kuinka yliaaltovirrat vaikuttavat kokonaisvirtaan. Kuviossa (6) on esitetty punaisella värillä summavirran käyrämuoto, kun kohteessa on taulukon (2) mukaiset yliaallot nollavaihekulmien ollessa nolla.



KUVIO 6. Yliaaltojen vaikutus kokonaisvirtaan.

Kuten kuviossa (6) nähdään, ei yliaaltovirtojen vuoksi kuorman ottama virta ole perustaajuisen virran mukaista siniaaltoa vaan hyvinkin epälineaarista. Nähdään, että yliaaltotaajuuksien virrat eivät kulje kuormalle omanaan vaan summautuvat perustaajuisen virtaan säröyttäen sen. Kuviossa (6) esitetyt yliaaltovirrat aiheuttavat kyseisillä taajuuksilla jännitehäviöitä kulkiessaan verkon reaktanssien läpi.

Tällöin kaikki yliaaltojen jännitteet summautuvat perustaajuiseen jännitteeseen ja verkossa näkyvä jännite on kuvion (7) mukaista. (Jaatinen 1991, 32; Männistö ym. 2006, 39–41)



KUVIO 7. Yliaaltovirtojen aiheuttamien jännitehäviöiden näkyminen säröytyneenä jännitteenä.

Kuviosta (7) nähdään, että säröytynyt jännite ei enää vastaa puhdasta sinimuotoista aaltoa. Kyseinen kuvaaja on vain yksi esimerkki siitä, miltä säröytynyt jännite voi näyttää. Verkon eri reaktansseilla ja yliaaltovirtojen vaihesiirtokulmilla säröytyneen jännitteen luonne voi olla erilainen. Yllä esitetystä kuvaajasta on nähtävissä, että suuret yliaaltopitoisuudet voivat nostaa jännitteen huippuarvoa, jolloin vaarana on laitteen rikkoutuminen.

Kun verkko sisältää useita eri yliaaltoja, on helpoin tapa kuvata harmonisten yliaaltovirtojen ja -jännitteiden määrää harmonisella kokonaissäröllä THD:lla (Total Harmonic Distortion). THD pystytään esittämään kahdella tavalla riippuen tutkitavasta kohteesta. THD-F vertaa yliaaltojen määrää perustaajuisen jännitteen tai virran tehollisarvoon, jolloin nähdään kokonaissäröprosentti yliaallottomaan tilanteeseen nähden. THD-R vertaa yliaaltojen määrää jännitteen tai virran tehollisar-

voon, jolloin THD-R ottaa huomioon yliaaltojen aiheuttaman tehollisarvon muutoksen. (Männistö ym. 2006, 29.) Normaalisti verkon yliaaltotilanteita selvittäessä käytetään THD-F-arvoja, joihin myös laatustandardit viittaavat.

Jännitteen harmonisen kokonaissärön THD-F:n saa matemaattisesti laskettua kaavalla

$$\text{THD} - \text{F}\%_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (17)$$

jossa  $U_n$  on kyseisen yliaallon jännitteen tehollisarvo ja  $U_1$  on perustaajuisen jännitteen tehollisarvo. Vastaavasti virran harmonisen kokonaissärön saa laskettua kaavalla

$$\text{THD} - \text{F}\%_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (18)$$

jossa  $I_n$  on kyseisen yliaallon virran tehollisarvo ja  $I_1$  on perustaajuisen virran tehollisarvo. (Männistö ym. 2006, 29) Kaavojen (17) ja (18) mukaan kuvioden (6) ja (7) tilanteessa järjestelmän virran THD%<sub>I</sub> on 33,6 % ja jännitteen THD%<sub>U</sub> on 10,4 %.

## 4.2 Yliaaltojen aiheuttajat

Edellä mainittiin, että teollisuudessa yleisimmin esiintyvät yliaallot ovat kolmella jaottomat ja parittomat kolmivaihekuormituksesta johtuvat yliaallot. Näitä aiheuttavia laitteita ovat taajuusmuuttajakäytöt, tasavirtakäytöt ja purkauslamppuvalaisimet. Myös teollisuudessa usein esiintyvät UPS-varasyöttölaitteet (Uninterruptible Power Supply) ja sähkösuotimet aiheuttavat yliaaltoja verkkoon. (Sähkötieto ry. 2014, 1)



Yksivaiheisesta kuormituksesta johtuvat kolmella jaolliset yliaallot aiheutuvat teollisuudessa erityisesti tietokoneista, toimistolaitteista, kuten tulostimista, hitsauslaitteista, varavoimakoneista ja yksivaiheisista tasasuuntaajista. (Sähkötieto ry. 2014, 1) Kyseisten laitteiden määrä ja tehot eivät kuitenkaan ole merkittäviä esimerkiksi taajuusmuuttajakäyttöihin nähden, jonka vuoksi yksivaiheisesta kuormituksesta aiheutuvat yliaallot eivät usein aiheuta merkittäviä muutoksia järjestelmän kokonaissäröissä.

### 4.3 Yliaaltojen vaikutukset sähköverkossa

Yliaaltojen aiheuttamat häiriöt voivat olla hankalia, koska yliaaltojen lähde ei aiheuta ongelmia pelkästään omassa muuntopiirissään, vaan vaikutukset näkyvät myös muualla sähköjakeluverkossa huonontuneena sähkönlaatuna. Yliaaltojen haitat voivat esiintyä kaukanakin niiden aiheuttajasta, joten sähköverkossa voi esiintyä täysin selittämättömiä ongelmia paikoissa, joissa yliaaltoja ei pitäisi olla. (Jaatinen 1991, 32; Sähkötieto ry. 2014, 2)

Yliaallot aiheuttavat ylimääräisiä häviöitä sähköjakeluverkon komponenteissa, kuten muuntajissa ja kaapeleissa. Lisähäviöt ovat särötehoa, jota syntyy, kun yliaaltovirrat kohtaavat verkon komponenttien impedansseja ja näin aiheuttavat jännitehäviöitä. Tällöin laitteiden kuormitettavuus pienenee ja ylikuormittumisen mahdollisuus kasvaa. Esimerkiksi nimellisarvoltaan 500 kVA:n muuntajaa pystyy kuormittamaan 500 kVA:n näennäisteholla vain silloin, kun jännitteen ja virran aaltomuodot ovat sinimuotoisia. Säröytynyt virta ja jännite aiheuttavat muuntajan kuormitettavuuden pienenemistä, koska yliaallot aiheuttavat muuntajissa suurentuneita kuormitushäviöitä. Muuntajien liiallinen ylikuormittaminen voi aiheuttaa esimerkiksi muuntajan käämien eristeaineiden haurastumista, jolloin ajan myötä muuntaja vaurioituu. Moottoreissa yliaallot aiheuttavat ylikuormittumista ja ylimääräistä lämpenemistä. Myös normaalista poikkeavat äänet ja värähtelyt voivat johtua yliaalloista. (Hietalahti 2011, 30–31; Männistö ym. 2006, 30)

Yliaallot voivat aiheuttaa selittämättömiä virhetoimintoja järjestelmän suojauslaitteissa sekä automaatiojärjestelmissä. Tämän lisäksi yliaallot voivat vääristää

energiamittaustuloksia, koska yliaaltojen vaihekulmat voivat poiketa perusaaltoon nähden. (Männistö ym. 2006, 31; Sähkötieto ry. 2014, 2)

Yksivaiheisesta kuormituksesta aiheutuvat kolmella jaolliset harmoniset yliaallot summautuvat nolajohtimeen. Yliaaltovirtojen suuret taajuudet aiheuttavat nolajohtimen kuormitettavuuden pienenemistä, jolloin on vaarana ylikuormittaa nolajohdin. (Sähkötieto ry. 2014, 2)

#### 4.4 Yliaaltojen suodatus

Suomen standardoimisliitto SFS:n julkaisemassa eurooppalaisessa standardissa SFS-EN 50160 määritellään rajat ja arvot, joiden sisällä kuluttajan jännitteen laadun tulee pysyä. Yhtenä laatuominaisuutena standardi määrittelee yliaaltojännitteiden sallitut raja-arvot. Taulukossa (3) on esitetty jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen suurimmat sallitut arvot pien- ja keskijänniteverkoissa.

TAULUKKO 3. Harmonisten yliaaltojen suurimmat sallitut arvot (muokattu) (Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2010, 16, 24).

Parittomat harmoniset				Parilliset harmoniset	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite $u_h$	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite $u_h$	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite $u_h$
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	1,0 (0,5) %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,75 (0,5) %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				
Keskijänniteverkon arvot suluissa					

Standardinmukainen yliaaltojännitteiden mittausta kestää vähintään viikon ja mitausdata kerätään 10 minuutin keskiarvoina. 95 % mittausjakson ajasta täytyy yliaaltojännitteiden tehollisarvojen olla pienempiä tai yhtä suuria kuin taulukossa (3) esitetyt arvot. Näin ollen pieniä ylityksiä saa mittausjakson aikana tapahtua.

Rajoittavana tekijänä on harmoninen kokonaissärö THD, jonka on oltava aina pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. (Suomen standardoimisliitto SFS ry. 2010, 16) ST-kortti 52.16 määrittää laatuluokat harmoniselle jännitteen kokonaissärölle perustuen standardiin SFS-EN 50160. Taulukossa (4) on esitetty harmonisen jännitteen kokonaissärön raja-arvot laatuluokille.

TAULUKKO 4. Harmonisen jännitteen kokonaissärön laatuluokat (Sähkötieto ry. 2014, 2).

Laatuluokka	Harmoninen jännitesärö (%)
Hyvä	≤ 3
Normaali	≤ 3-6
Standardi	≤ 6-8 (95 % arvoista)

Siinä tapauksessa, että verkon yliaaltojännitteet eivät pysy standardin asettamissa rajoissa, on yliaaltoja suodatettava. Kuten aiemmin on mainittu, aiheuttaa loistehon kompensointiin käytettävät kondensaattorit verkon induktanssien kanssa rinnakkaisresonanssipiirejä, jolloin yliaaltovirrat voivat osuessaan resonanssitaajuudelle moninkertaistua ja aiheuttaa esimerkiksi kompensointikondensaattoreiden vaurioitumisen. Tämän vaaran vuoksi kiinteää tai automaattista kondensaattoriparistoa ei voida käyttää yliaaltopitoisessa verkossa. Estokelaparisto luo sarjaresonanssipiirin kondensaattorin ja kelan sarjankytkennästä, jolloin resonanssia verkon kanssa ei voi syntyä. Estokelaparistolla on kuitenkin vain vähäinen vaikutus verkon yliaaltopitoisuuteen, joten voimakkaasti yliaaltopitoisissa verkoissa on käytettävä yliaaltosuodattimia. (Sähkötieto ry. 2014; Sähkötieto ry. 2016)

Yliaaltosuodattimella eli imupiirillä pystytään tuottamaan tarvittava loisteho, jonka lisäksi myös yliaallot saadaan suodatettua pois verkosta. Yliaaltosuodattimia käytetään, kun verkon yliaaltopitoisuus on niin suuri, että estokelaparistolla ei enää voida riittävästi parantaa verkon suurista yliaaltovirroista johtuvaa jännitesäröä. Yliaaltosuodatinta käytetään pien- ja keskijänniteverkossa keskitetyssä kompensoinnissa. (ABB Oy 2000, luku 9, 6–8).

Yliaaltosuodattimen ja estokelapariston rakenteet ovat samanlaisia; myös yliaaltosuodatin koostuu kondensaattoreiden ja kuristimien sarjakytkennöistä. Kondensaattoreiden kapasitanssit mitoitetaan tuottamaan tarvittava perustaajuinen loisteho ja kuristimien induktanssit siten, että kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkennän muodostaman sarjaresonanssiipiirin impedanssi on hyvin pieni tietyllä yliaaltotaajuudella, jolloin kyseisen taajuuden yliaaltovirta kulkeutuu suodatimeen eikä enää vaikuta muualla sähköverkossa. Näin ollen yliaaltosuodatin toimii passiivisesti ja kykenee suodattamaan vain tietyt yliaaltotaajuudet, joille se on viritetty edellä mainittujen sarjaresonanssiipiirien avulla. Jotta yliaaltosuodattimen mitoitus tehdään oikein, on verkon yliaaltotaajuuksien pitoisuudet tunnettava. Yleensä yliaaltosuodatin on viritetty suodattamaan 5., 7. ja 11. harmonista yliaaltoja, jotka ovat teollisuudessa yleisimmin esiintyvät yliaallot. Tätä suuremmat yliaallot suodatetaan yleensä yhteisellä laajakaistaisella suodatinpiirillä. (Jaatinen 1991, 84–88; Männistö ym. 2006, 55)

Aktiivisuodattimilla voidaan tuottaa tarvittavaa perustaajuista loistehoa portaattomasti, mutta sen päätehtävä on suodattaa verkon yliaaltoja. Yliaaltosuodatimeen nähden aktiivisuodattimen toimintaperiaate on mitata verkon yliaaltokomponenttien virrat ja tuottaa yhtä suurta, mutta 180 °:n vaihesiirrossa olevaa virtaa, jolloin kyseinen yliaaltokomponentti kumoutuu. Aktiivisuodattimen hyötynä yliaaltosuodatimeen nähden on kyky suodattaa samanaikaisesti jopa 20 harmonista yliaalloa ja suuren taajuusalueen vuoksi se pystyy suodattamaan hyvin suuria yliaaltotaajuuksia. (Männistö ym. 2006, 62; Sähkötieto ry. 2014, 4)

Aktiivisuodattimia valmistetaan 17-100 kVA:n kokoluokassa, joka on usein riittämättömän suurissa teollisuuslaitoksissa. Tällöin yliaaltosuodattimia huomattavasti kalliimpia aktiivisuodattimia pitäisi kytkeä useampia rinnan saavuttaakseen vaadittu kompensointiteho, eikä se ole useinkaan taloudellisesti järkevää. (Männistö ym. 2006, 62)

## 4.5 Säröteho

Yliaaltojen yhteydessä esiin tulee säröteho, joka syntyy, kun yliaaltovirrat aiheuttavat verkossa jännitehäviöitä. Särötehon tunnus on  $D$  ja sen yksikkö on voltiampeeri eli VA. Särötehoa ei pystytä kompensoimaan perustaajuisista loistehoa kompensoivalla laitteistolla, koska säröteho siirtyy yliaaltokomponenttien mukaisilla taajuuksilla. Kun verkossa on särötehoa, muuttuu näennäistehon kaava (2) muotoon

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (19)$$

jossa  $D$  on säröteho. (Männistö ym. 2006, 36.) Säröteho aiheuttaa näin ollen näennäistehon kasvamista, joka loistehon tavoin pienentää muuntajien ja kaapeleiden kuormitettavuutta.

Särötehon vuoksi mittalaitteet esittävät kaksi eri tehokerrointa, DPF (Displacement Power Factor) ja PF (Power Factor). DPF esittää perustaajuisen pätötehon ja perustaajuisen näennäistehon suhteen, jolloin DPF on perustaajuisen tehokerroin. PF esittää kokonaispätötehon ja -näennäistehon suhteen, jolloin PF on tehokerroin, joka ottaa huomioon yliaalloista aiheutuvan särötehon. (Männistö ym. 2006, 16–17)

## 5 STORA ENSON VARKAUDEN SAHAN MITTAUKSET

### 5.1 Sähkönjakelujärjestelmä

Varkauden Stora Enson sähkönjakelun pääkaavio sahan osuudesta on esitetty liitteessä (1). Varkauden tehtaita syötetään Fingrid Oy:n omistamista kahdesta 110 kV:n suurjännitelinjasta, jotka tuodaan Pajaniemeen suurjännitekiskostoon 110V01. Pajaniemi on tehtaan 110 kV:n kytkinasema ja siellä sijaitsee myös yksi tehtaan päämuuntajista (T07), jolla suurjännite muunnetaan Pajaniemessä sijaitsevalle 6 kV:n keskijännitekojeistolle 6V01 sopivalle tasolle. Tehtaalla sijaitsee myös vastapainehöyryturbiineja ja vesivoimaturbiineja, joilla pystytään tuottamaan osa tehtaan sähköntarpeesta. Varkauden tehtailla kaikkien laitosten keskijännitejakelun jännitetaso on 6 kV.

Tehtaan loistehon kompensointia ja yliaaltojen suodattamista varten on jokaisen laitoksen pienjännitejakelun kompensoinnin lisäksi myös keskijännitejakeluverkossa yhteensä seitsemän keskijännitekompensointilaitetta, joiden yhteenlaskettu kompensointiteho on 35 MVar. Myös tehtaan turbiineilla HV5 ja HV6 pystytään tuottamaan loistehoa tehtaan tarpeisiin. Keskijänniteverkossa hajautetusti sijaitsevia kompensointilaitteita kytketään verkkoon tai otetaan pois verkosta tehtaan kokonaisloistehon mittaukseen perustuen. Kyseinen mittaus kertoo tehtaan kokonaisloistehon määrän, joka vielä kompensoinnin jälkeen otetaan Fingridin verkosta. Fingrid on määrännyt tehtaalle loistehon raja-arvot, joiden ylittäminen aiheuttaa loistehomaksuja. Induktiivisen loistehon raja-arvo on 10,47 MVar ja kapasitiivisen loistehon raja-arvo on 2,62 MVar. Nykyisin Varkauden tehtaiden Fingridin verkosta ottama loisteho on prosessin käydessä keskimäärin 4 MVar, kun seitsemästä keskijännitekompensointilaitteesta viisi on kytkettynä verkkoon.

Sahan keskijännitesyöttö tuodaan Pajaniemen 6 kV:n kojeistosta vanhan kuorimon kojeiston 6K01 kautta sahalle kojeistoon 6S01. Sahan kojeistosta syötetään myös tukkikuorimon kojeistoa 6S03 sekä jälkikäsitteilyn kahteen osaan jaettua kojeistoa 6S04 ja 6S02. Sahalle on järjestetty myös varasyöttö meesauunin kojeistosta 6C08, johon syöttö tulee eri päämuuntajan (T02) kautta. Tällöin sahan

varasyötön voi olettaa toimivan tilanteissa, joissa sahan keskijännitejakelussa tapahtuu häiriöitä.

Sahalle kuuluu myös Muuraissaaren toiminta, jossa tukit otetaan vastaan ja lajitellaan sekä kuljetetaan tukkikuorimoon. Muuraissaaren syöttö tulee LVL-1:llä (lämpövoimalaitos 1) sijaitsevan päämuuntajan T02 keskijännitekojeiston 6V10 kautta vanhan kuorimon kojeistoon 6K02. Vanhan kuorimon kojeistosta viedään syöttö Ämmänkosken kojeistoon 6A04, ja sen kautta Muuraissaaren kojeistoon 6S05. Muuraissaaren varasyöttö on toteutettu siten, että eri päämuuntajan (T07) takana olevasta vanhan kuorimon kojeistosta 6K01 saadaan kytkettyä yhteys kojeistoon 6K02.

Varkauden tehtailla pienjännitejakelu on suurimmaksi osaksi toteutettu 690 V:n ja 400 V:n järjestelmillä, mutta sahalla on vielä tänäkin päivänä pienjännitejakelu toteutettu suurimmilta osin 500 V:n ja 400 V:n järjestelmillä, jonka lisäksi uudemmalla tukkikuorimolaitoksella on käytössä 690 V:n järjestelmä. 500 V:n järjestelmä on nykypäivänä harvinainen, jonka vuoksi esimerkiksi varaosia on vaikeampi löytää ja tehtaan yhteisen moottorivaraston moottoreita ei pystytä hyödyntämään sahalla.

Sahan keskijännitekojeistosta 6S01 syötetään muuntajia SA, SD, SVA ja SVH. Tukkikuorimon kojeistosta 6S03 syötetään muuntajaa SB. Jälkikäsitteilyn kojeisto on jaettu kahteen osaan, joista 6S04 syöttää muuntajaa SVB ja 6S02 muuntajaa SC. Muuraissaaren kojeisto 6S05 syöttää muuntajaa SVE. Taulukossa (5) on esitetty kaikki sahan toimintaan liittyvät pienjännitekeskukset sekä niiden jännitetaso ja syöttävän muuntajan nimellisteho.

TAULUKKO 5. Sahan pienjännitekeskukset.

Nimi	Jännitetaso	Muuntajan nimellisteho	Kojeisto	Osasto
SA	500 V	1600 kVA	6S01	Saha
SB	690 V	2000 kVA	6S03	Tukkikuorimo
SC	500 V	1600 kVA	6S02	Jälkikäsittely
SD	500 V	2000 kVA	6S01	Saha
SVA	400 V	1000 kVA	6S01	Saha
SVB	400 V	500 kVA	6S04	Jälkikäsittely
SVE	400 V	1000 kVA	6S05	Muuraisaari
SVH	400 V	2000 kVA	6S01	Hiomo

Taulukosta (5) nähdään, että sahalla käytetään prosessilaitteiden pienjännitejatkkelussa pääasiassa vanhanaikaista 500 V:n järjestelmää. Poikkeuksena on uudempi tukkikuorimon pienjännitekeskus, jonka nimellisjännite on 690 V. Taulukosta (5) huomataan myös, että Varkauden tehtailla on käytössä nimeämisyjärjestelmä, jossa kaksikirjaiminen keskuksen nimi tarkoittaa 690 V:n tai 500 V:n keskusta ja kolmikirjaiminen nimi 400 V:n keskusta.

## 5.2 Mittausten suorittaminen ja mittauslaitteistot

Mittauksien tarkoituksena oli selvittää sahan loistehomäärät ja yliaaltopitoisuudet. Tätä varten mittaukset suoritettiin koko sahan syötöstä vanhan kuorimon kojeiston lähdöstä 6K0107. Lisäksi suoritettiin mittaukset erikseen kaikista taulukossa (5) esitetyistä sahan pienjännitekeskuksista, jotta nähdään tarkasti, missä loistehoa kulutetaan ja sen perusteella pystytään esittämään korjaavat toimenpiteet tarkemmin.

Mittauksissa käytetty mittauslaitteisto oli Fluke 435-II -verkkoanalysaattori. Vaihevirratt mitattiin sähkötyöturvallisuuden vuoksi virtamuuntajien toisioista Fluke i5s -virtapihdeillä aina, kun mahdollista. Tällöin on tärkeää mittalaitteen asetuksissa ilmoittaa virtamuuntajien arvot, jotta mittaustulokset vastaavat todellisuutta. Keskuksissa SC ja SVB ei pystytty virtamittauksia suorittamaan virtamuuntajien toisioista, jolloin vaihevirratt mitattiin Fluke i430TF -virtapihdeillä keskuksen syöttökaapeleista/-kiskostosta. Jännitteet mitattiin pienjännitekeskuksista sellaisesta



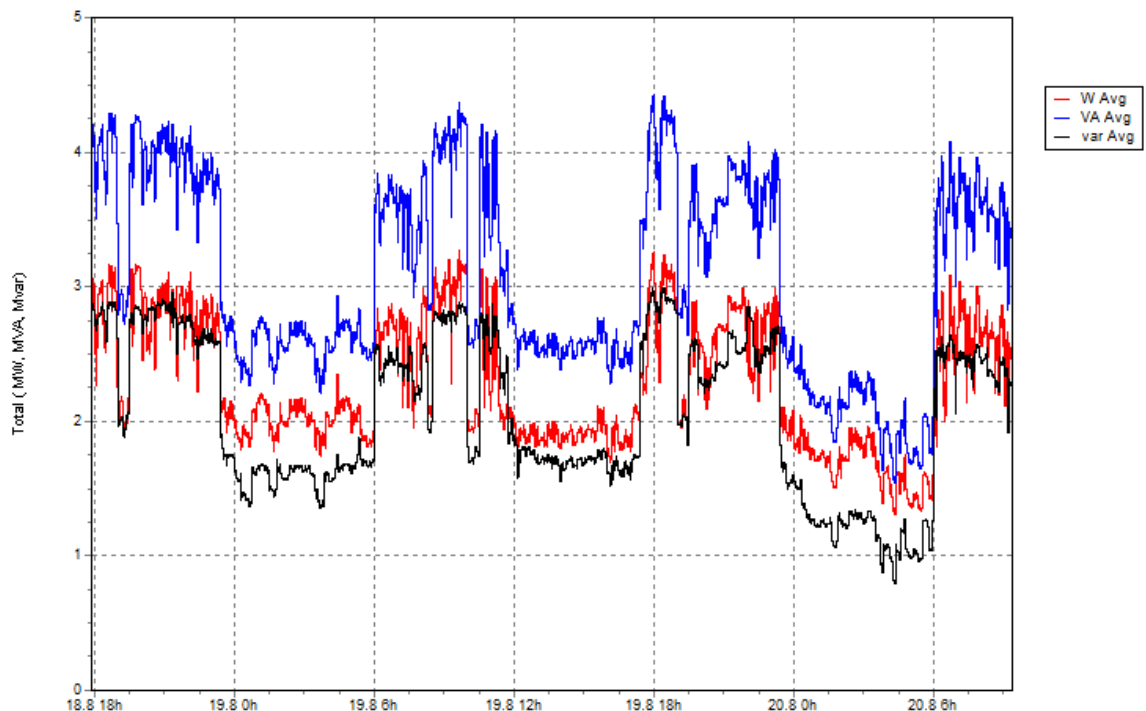
keskuslähdöstä, josta jännitteet olivat helposti saatavilla. Sahan keskijännitesyötön mittauksessa jännite mitattiin jännitemuuntajien toisioista.

Kaikissa mittauskohteissa mittaus pidettiin käynnissä vähintään vuorokauden ajan ja mittausten keruuväliksi aseteltiin yksi minuutti. Standardin SFS-EN 50160 mukaisessa mittauksessa keruuvälinä on 10 minuuttia, joten suoritettavat mittaukset eivät täysin vastaa standardinmukaista mittausasetelmaa. On kuitenkin huomiotava, että yhden minuutin keruuvälillä suoritettavat mittaukset ovat huomattavasti tarkempia kuin 10 minuutin keruuvälillä, joten mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina. Mittaustulosten käsittelyyn on käytetty Fluke Power Log 5.6 -ohjelmistoa.

Mittausten ohella olemassa oleville kompensointilaitteistoille tehtiin vuosihuolto niiltä osin kuin mahdollista. Joillekin keskuksille kompensointia saatiin lisättyä siirtämällä ehjiä kondensaattoreita toisiin portaisiin ja muuttamalla säätimen asetteita. Suurimmaksi osaksi sahan nykyisessä kompensoinnissa kondensaattorien kapasitanssit olivat laskeneet nimellisarvostaan liikaa, jolloin kondensaattorin tuottaman kompensointitehon huomattavan pienentymisen ja laitteiston mahdollisen suuremman vaurioitumisen vuoksi ne kytkettiin irti verkosta.

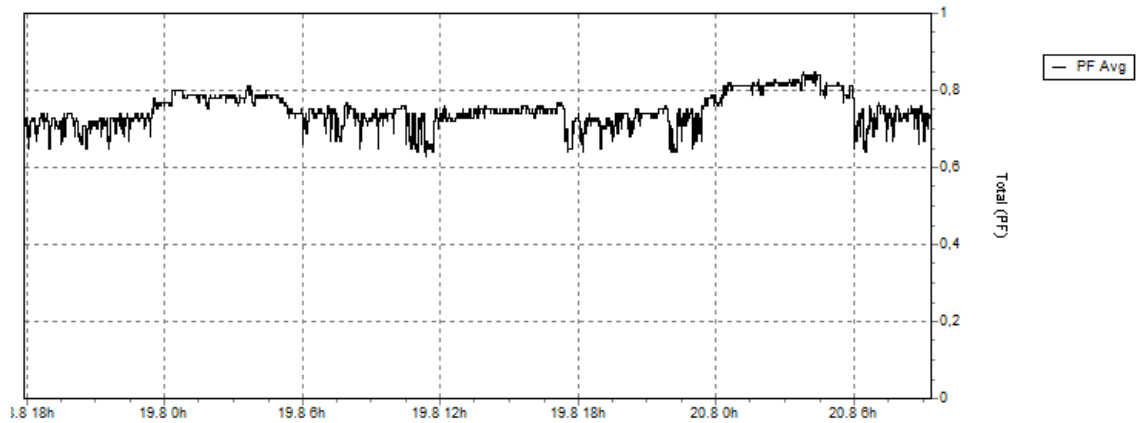
### 5.3 Sähkökeskusten teho- ja yliaaltomittaukset

Jokaisen pienjännitekeskuksen lisäksi mittaukset suoritettiin myös sahan keskijännitelähdöstä, jotta saadaan hyvä käsitys sahan kokonaistilanteesta. Kaikissa seuraavissa kolmivaihetehoja käsittelevissä kuvioissa sininen kuvaaja on näennäistehoa, punainen kuvaaja on pätötehoa ja musta kuvaaja on loistehoa. Kuviossa (8) on esitetty sahan keskijännitelähdön 6K0107 kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.



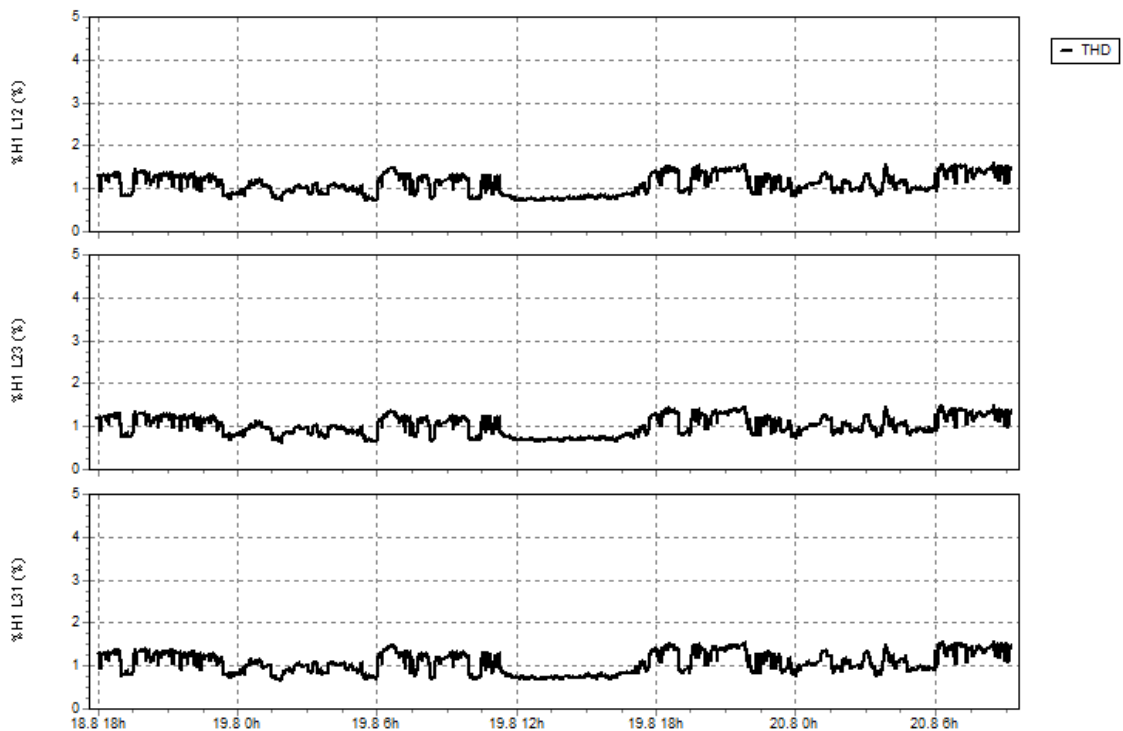
KUVIO 8. Sahan lähdön 6K0107 kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (8) nähdään, että sahan näennäistehon minuutin keskiarvot ovat suurimmillaan sahan käydessä noin 4,4 MVA ja pätöteho on suurimmillaan noin 3,3 MW. Tämän mittauksen perusteella havaitaan, että sahan loistehot ovat huolestuttavalla 3 MVA<sub>r</sub> tasolla, joka on lähes yhtä paljon kuin pätötehon osuus näennäistehosta. Kuviosta on nähtävissä selkeä tehotasojen pienentyminen yöaikaan. Tämä johtuu sahan aiheuttamasta meluhaitasta kaupungille, jonka seurauksena saha pysäytetään yöksi. Mittausjakson aikana myös päivällä tapahtui poikkeuksellisen pitkä sahan pysähtyminen, kun sahan toiminnalle tärkeä tietoliikennelaite rikkoontui. Kuviossa (9) on esitetty lähdön tehokertoimen minuutin keskiarvot.



KUVIO 9. Sahan lähdön 6K0107 tehokertoimen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (9) havaitaan, että sahan kokonaistehokerroin on parhaimmillaan yöaikaan, kun saha on pysähtynyt. Tällöin tehokerroin jää noin arvoon 0,83. Tämän perusteella myös yöaikaan sahalla on käynnissä induktiivista kuormaa, kuten puhaltimia. Sahan käydessä tehokerroin heittelee paljon jatkuvasti muuttuvan kuormitusilanteen ja moottoreiden käynnistymisten myötä. Sahan käydessä tehokerroin vaihtelee 0,64 ja 0,75 välillä. Tehokertoimen arvo todistaa aiemmin kuviossa (8) nähtyjä pätö- ja loistehojen määriä, jonka perusteella ne ovat lähes yhtä suuret. Kuviossa (10) on esitetty sahan lähdön kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

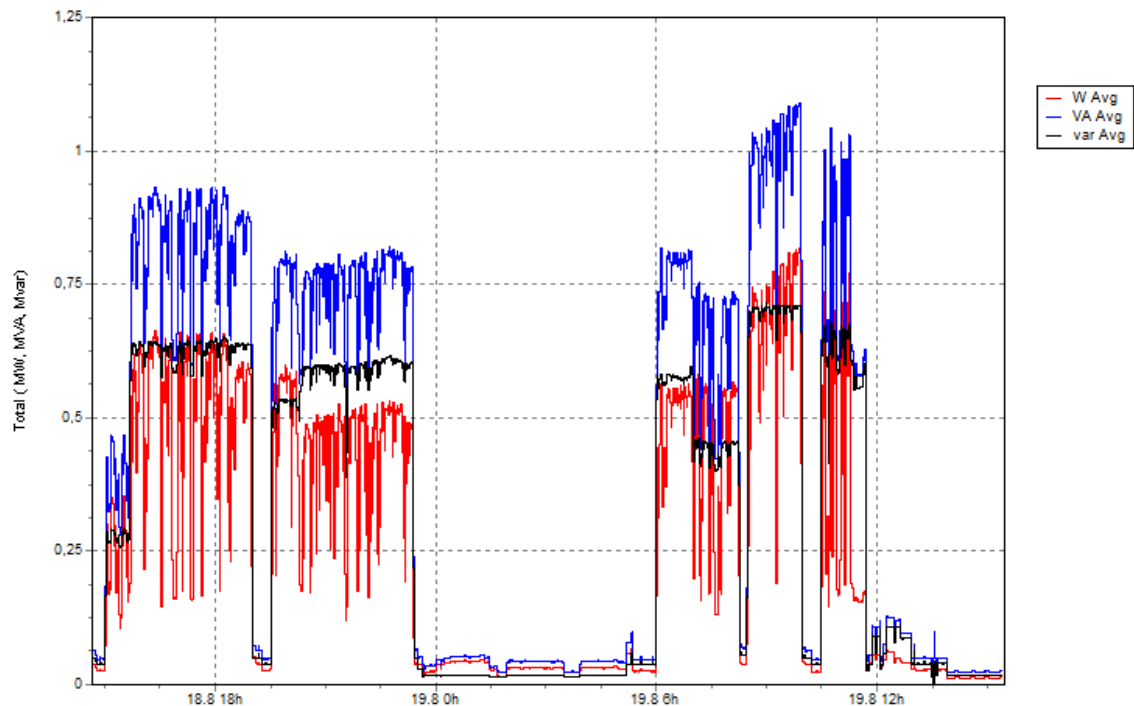


KUVIO 10. Sahan lähdön 6K0107 kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuviosta (10) nähdään, että kaikilla pääjännitteillä jännitesärö on koko mittauksen ajan 0,72-1,5 %, joka on vähemmän kuin standardissa SFS-EN 50160 määritetty 8 %. Myös mikään yksittäinen yliaallon monikerta ei ylitä taulukossa (3) esitettyjä raja-arvoja, joten kyseessä on standardin mukainen jännite. Taulukon (4) mukaan jännitteen laatu on hyvä.

### Keskus SA

Pienjännitekeskus SA on sahan toimintaan liittyvä keskus, josta syötetään useita sahan prosessilaitteita. Suurin osa keskuksen kuormituksesta tulee kuljettimilta, joilla tukkeja kuljetetaan kohti sahaa. Kuviossa (11) on esitetty keskuksen SA kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.



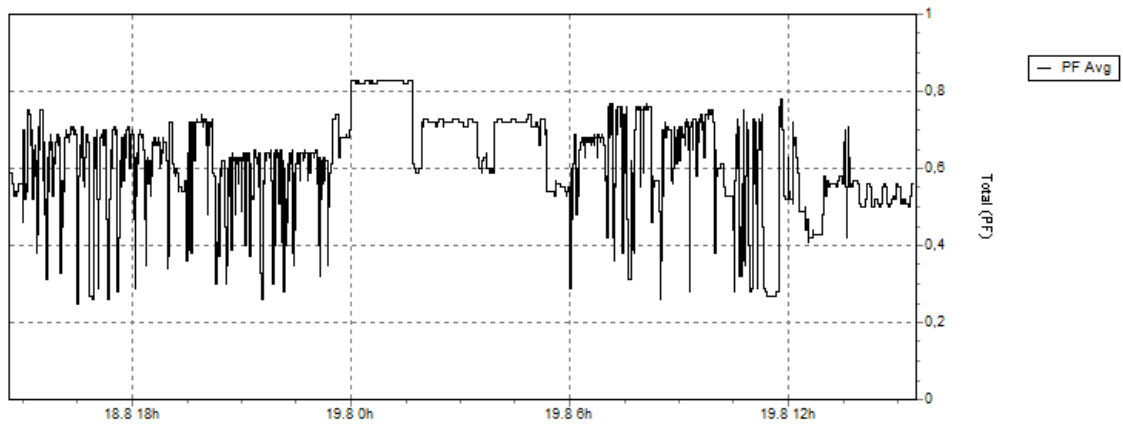
KUVIO 11. Pienjännitekeskuksen SA kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (11) huomataan, kuinka näennäisteho vaihtelee voimakkaasti käyden suurimmillaan noin 1,1 MVA:ssa. Myös pätöteho vaihtelee näennäistehon kanssa samaan tahtiin, mutta loisteho näyttää pysyvän melko vakiona heilunnan aikana. Näennäis- ja pätötehon heilunta on selitettävissä keskuksen kuormituksen luonteesta, joka on kuljetinpainotteinen. Kuljettimet pysähtyvät ja käynnistyvät jatkuvasti koko prosessin ajan, koska kuljettimet pystyvät tuomaan tukkeja nopeammin kuin saha kykenee käsittelemään niitä. Myös loistehon tulisi

tällöin pienentyä, mutta kuvion (11) perusteella se pysyy vakiona ja osan mitausjaksosta on selkeästi suurempaa kuin pätöteho. Keskuksen SA keskuslähtöluettelosta ei selvinnyt mitään yksittäisiä induktiivisia kuormituksia, jotka selittäisivät loistehon pysymisen vakiona ja osittain suurempana kuin keskuksen pätöteho, vaikka moottorikuormat pienenevät. Keskus ei myöskään näytä syöttävän mitään suuritehoisia resistiivisiä kuormituksia. Pelkän keskuslähtöluettelon tiedolla ei pystytä suoraan määrittämään, mistä kyseinen loistehon käyttäytyminen johtuu, joten tälle keskukselle olisi vastauksen saamiseksi tehtävä lisäselvitystä. Tehomittauksen uusiminen lyhyemmällä keruuvälillä varmistaisi, että loisteho todellakin on kuvion (11) mukaisesti melko vakio, jolloin epävarmuus siitä, että ehtikö loistehon mittaus mukaan nopeaan tehojen heiluntaan jäisi pois.

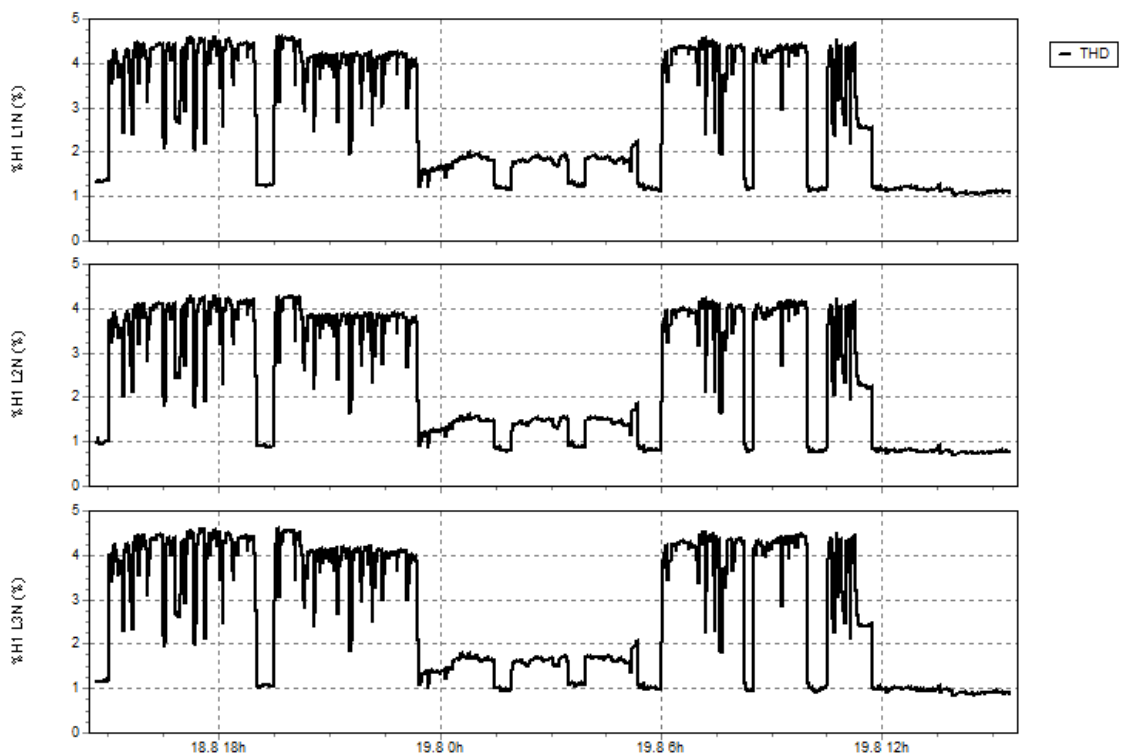
Keskuksen SA loisteho on noin 700 kVAr ja hetkellisesti suurin verkosta otettava loistehon määrä suurten moottoreiden käynnistyshetkillä oli 2,1 MVar. Tämän perusteella keskuksen SA kompensointitilanne on äärimmäisen huono aiheuttaen lähes kolmanneksen koko sahan loistehosta. Loistehon määrää kuvastaa hyvin teollisuudessa yleensä suurimpien käytettyjen kompensointilaitteistojen koko, joka on 300 kVAr. Suurimmat valmistettavat pienjänniteverkon kompensointilaitteet ovat 400 kVAr (Tampereen Kondensaattoritehdas, 2021).

Keskuksessa SA on olemassa olevaa kompensointia ABB:n APCR L7% -estoke-laparisto, joka ohjaa myös kahta FALICON automatiikkaparistoa. Keskuksen kokonaiskompensointiteho on 600 kVAr (portaat 12x50 kVAr), josta ei ollut käytössä yhtään porrasta. Mittausten jälkeisillä huoltotoimilla havaittiin viidessä portaassa kondensaattoreiden kapasitanssien laskeneen yli 10 % nimellisarvostaan, joten niitä ei otettu käyttöön koko laitteiston vaurioitumismahdollisuuden vuoksi. Tämän lisäksi lämpökuvauksilla havaittiin neljässä muussa portaassa kontaktoreiden liittimien olevan erittäin kuumia, joten niitä ei otettu käyttöön tulipalovaaran vuoksi. Yhdestä tällaisesta portaasta otettiin ehjä kondensaattori toimintakykynsä menettäneen kondensaattorin tilalle, jolloin lopulta saatiin viisi porrasta (250 kVAr) heti käyttöön. Kuviossa (12) on esitetty keskuksen tehokertoimen minuutin keskiarvot.



KUVIO 12. Pienjännitekeskuksen SA tehokertoimen minuutin keskiarvot.

Kuvion (12) perusteella keskuksen SA tehokerroin heiluu huomattavasti kuviossa (11) nähdyn tehojen heilunnan mukaisesti. Tehokerroin käy pahimmillaan jopa arvossa 0,26. Yöaikaan sahan ollessa pysähdyksissä tehokerroin jää arvoon 0,83. Tämän perusteella myös yöaikaan sahalla on jotakin moottorikuormaa päällä, keskuslähtöluettelon perusteella oletettavasti puhaltimia. Erittäin huonon kompensointitilanteen vuoksi edes yöaikaan loistehoa ei saada kompensoitua ja tehokerroin jää melko pieneksi. Kuviossa (13) on esitetty keskuksen SA kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

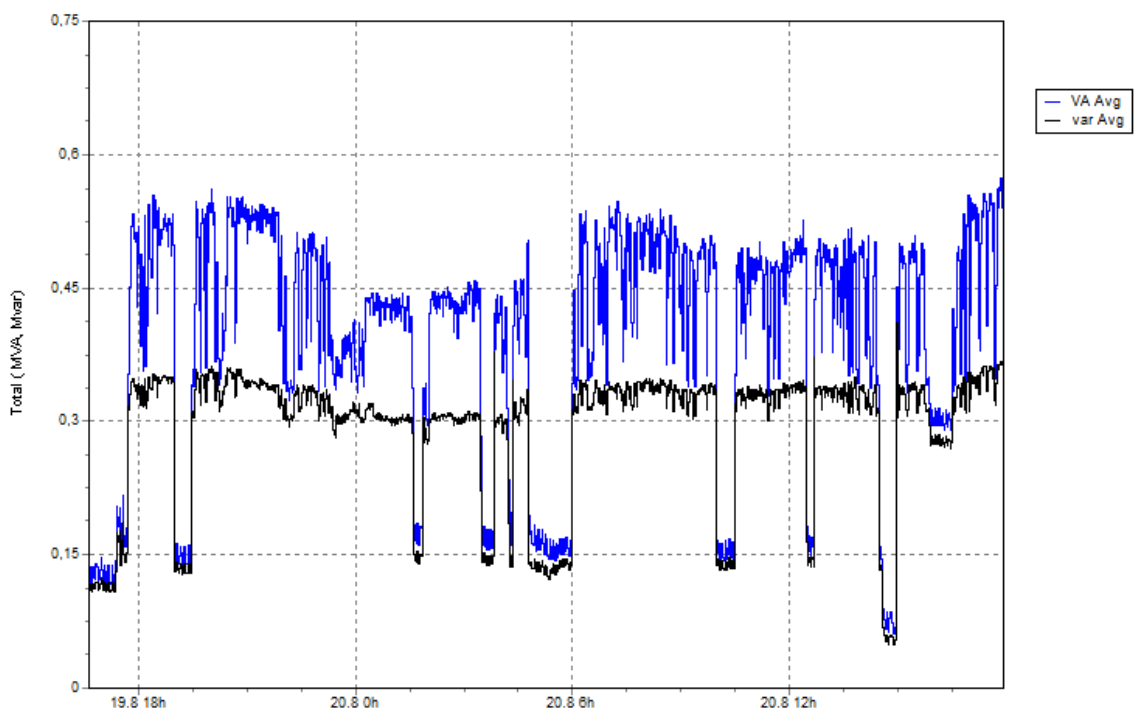


KUVIO 13. Pienjännitekeskuksen SA kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuvion (13) mukaan päivällä sahan käydessä jännitesärö on noin 4,5 % kaikilla pääjännitteillä. Keskuksessa SA on käytössä automatiikkaparistoja, joiden käyttöä ei suositella jännitesärön ollessa yli 3 %, joten tämän keskuksen kohdalla on arvioitava, korjataanko vanhat kompensointilaitteet vai vaihdetaanko ne esteke-laparistoon. Koska jännitesärö pienentyy kuormituksen pienentyessä, voidaan todeta jännitesärön aiheutuvan keskuksen syöttämistä kuormista syöttävän verkon sijaan. Kaikki yksittäiset yliaaltojen monikerrat pysyvät alle taulukossa (3) esitetyjä raja-arvoja, joten taulukon (4) mukaan jännitteen laatu on normaali.

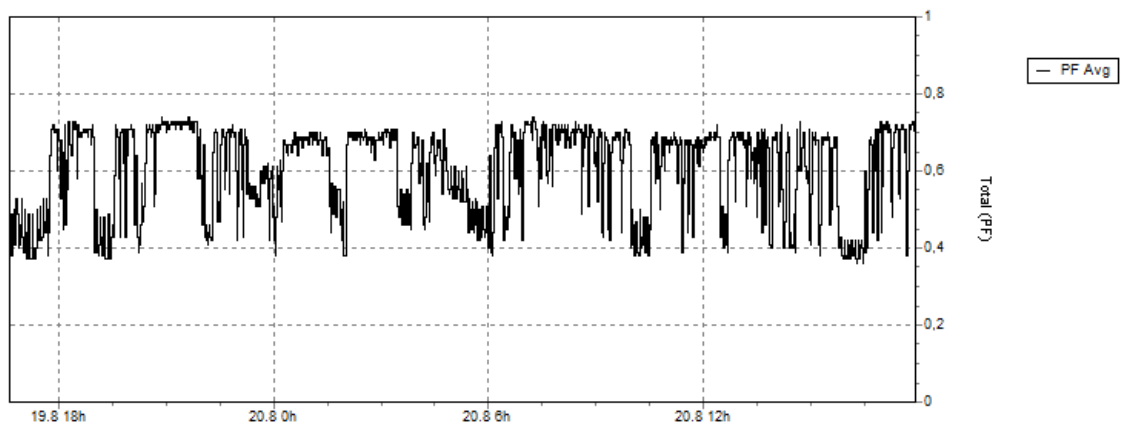
### Keskus SB

Pienjännitekeskuksella SB syötetään kaikkia tukkikuorimon toimintaan liittyviä laitteita. Tukkikuorimolla on paljon kuljettimia ja laitoksen toimintaan tärkeä kuorintarumpu. Kuviossa (14) on esitetty keskuksen SB kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot. Kuvioista puuttuu kokonaispätötehon kuvaaja, koska mittaustulosten käsittelyyn käytetyn ohjelmiston rajoitusten vuoksi sitä ei saa näkyviin samaan kuvioon. Mittausdata tallentui näennäis- ja loistehon osalta MVA:na ja MVAR:na, mutta pätötehon osalta kW:na. Mittausdatan kymmenpotenssijärjestelmän suuruusluokkaa ei pysty ohjelmistolla jälkikäteen muokkaamaan, joten loistehon kuvaajaa ei saada järkevästi näkyviin jättämättä pätötehon kuvaajaa pois.



KUVIO 14. Pienjännitekeskuksen SB kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

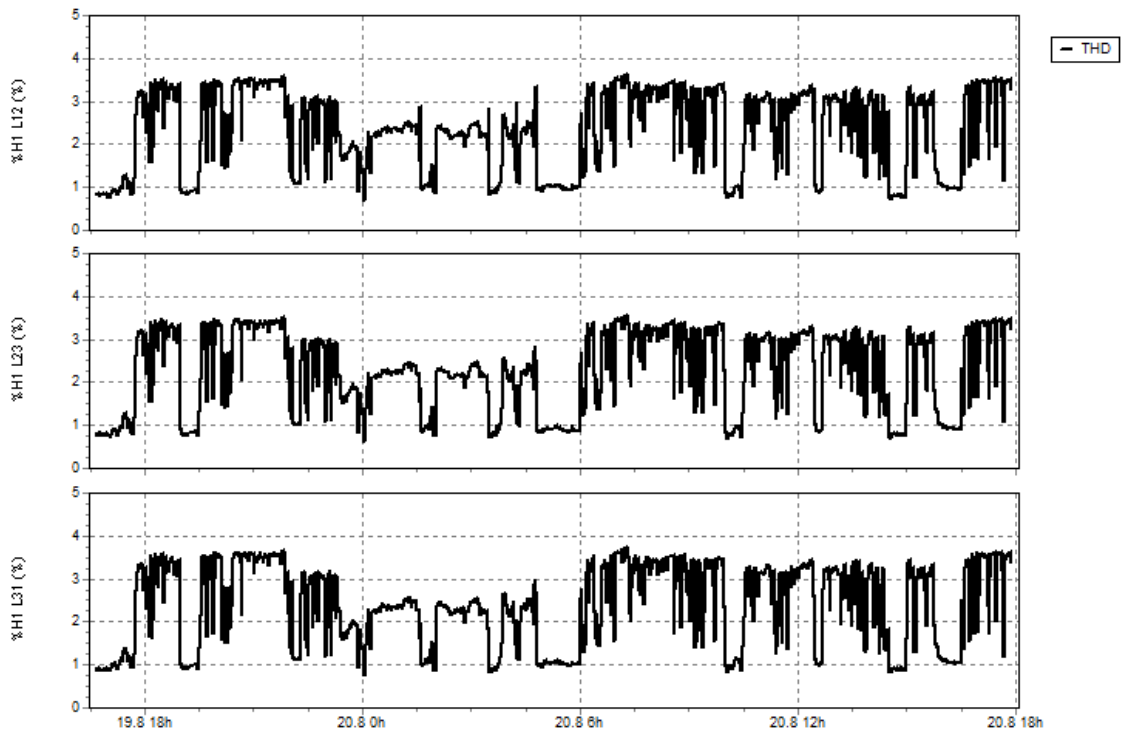
Kuvion (14) mukaisesti myös keskuksen SB näennäistehon minuutin keskiarvot heiluvat melko voimakkaasti johtuen useista kuljettimista. Tukkikuorimolla ei ole nähtävissä yöaikaan tapahtuvaa laitoksen pysähtymistä, koska tukkeja kuori-taan öisin Varkauden tehtailla olevan levyvanerilaitoksen käyttöön seuraavaksi päiväksi. Näennäistehot ovat suurimmillaan sahan käydessä noin 570 kVA. Kuviossa (14) ei ole pätötehon kuvaajaa, mutta suurimmillaan keskuksen pätöteho on noin 420 kW. Loistehoa tukkikuorimolla on kuvion perusteella enimmillään 370 kVAr. Kuviossa (15) on esitetty keskuksen SB tehokertoimen minuutin keskiarvot.



KUVIO 15. Pienjännitekeskuksen SB tehokertoimen minuutin keskiarvot.

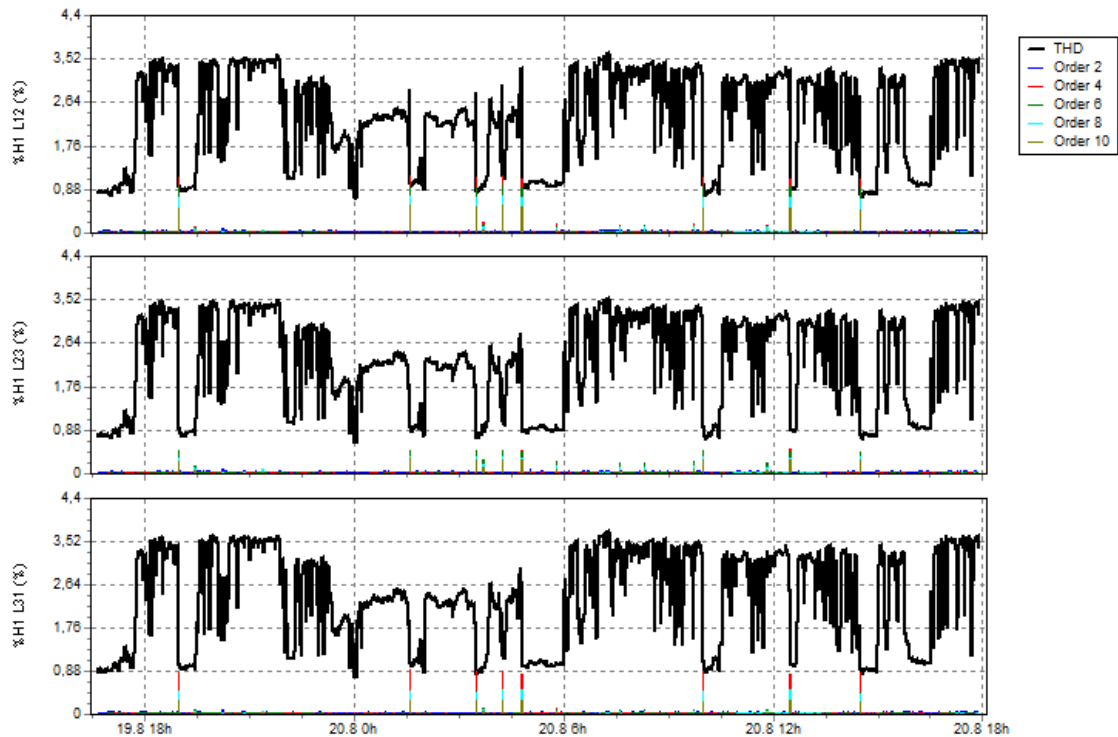
Kuviosta (15) nähdään, että keskuksen SB tehokerroin on koko mittauksen ajan huono, ollen pienimmillään 0,37 ja suurimmillaan 0,74. Huono tehokerroin johtuu siitä, että keskuksella SB ei ole olemassa kompensointia, vaikka loistehomäärät ovat erittäin suuret. Näiden tietojen perusteella keskukseseen on lisättävä kompensointia, jotta sahan kokonaisloistehoa saadaan pienennettyä. Kuviossa (16) on esitetty keskuksen SB kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.



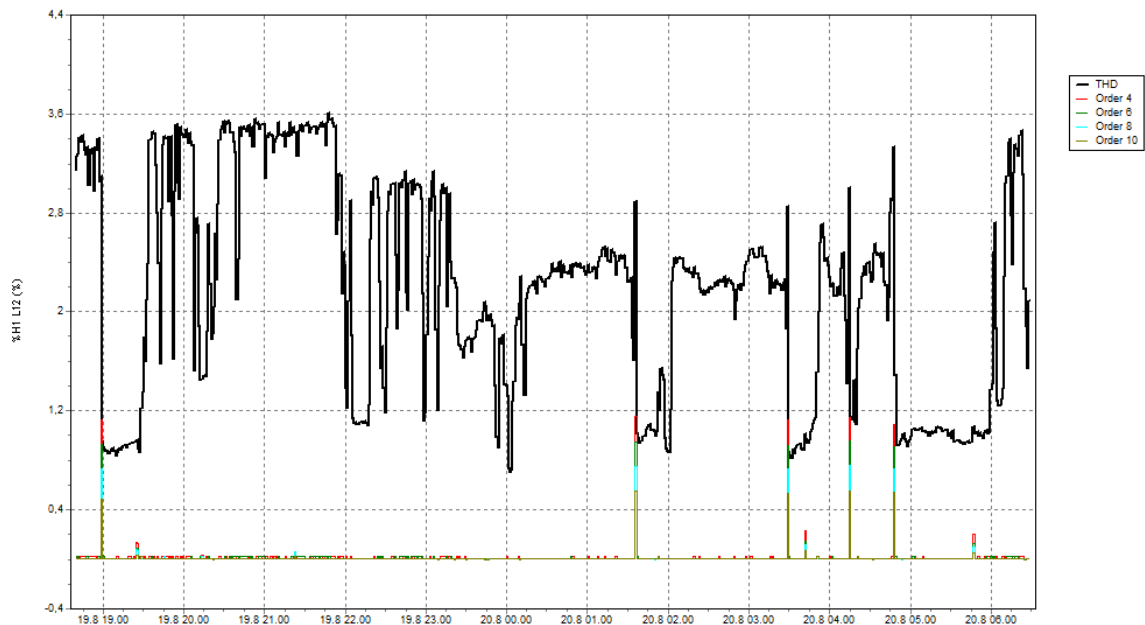


KUVIO 16. Pienjännitekeskuksen SB kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuviosta (16) voidaan huomata, että kaikilla pääjännitteillä jännitesärö on koko mittauksen ajan pienimmillään 0,9 % ja suurimmillaan 3,6 %. Standardi SFS-EN 50160 määrittää suurimmaksi sallituksi jännitesäröksi 8 %, joten jännite on tämän osalta standardinmukaista. Taulukon (4) mukaan jännitteen laatu on normaali. Mittauksen aikana osa parillisista yliaalloista (4., 6., 8. ja 10.) ylitti taulukossa (3) esitetyt raja-arvot. Mittauksessa kuitenkin yli 95 % ajasta nämäkin yliaallot olivat sallituissa rajoissa, joten kyseessä on standardin mukainen jännite. Kyseiset yliaallojen piikitykset on esitetty kuviossa (17), johon on vertailun vuoksi lisätty näkyviin kokonaisjännitesärö. Kuviossa (18) on esitetty suurennettu kuva piikityksistä lyhyeltä ajanjaksolta.



KUVIO 17. Keskuksen SB parillisten yliaaltojen raja-arvojen ylitykset.



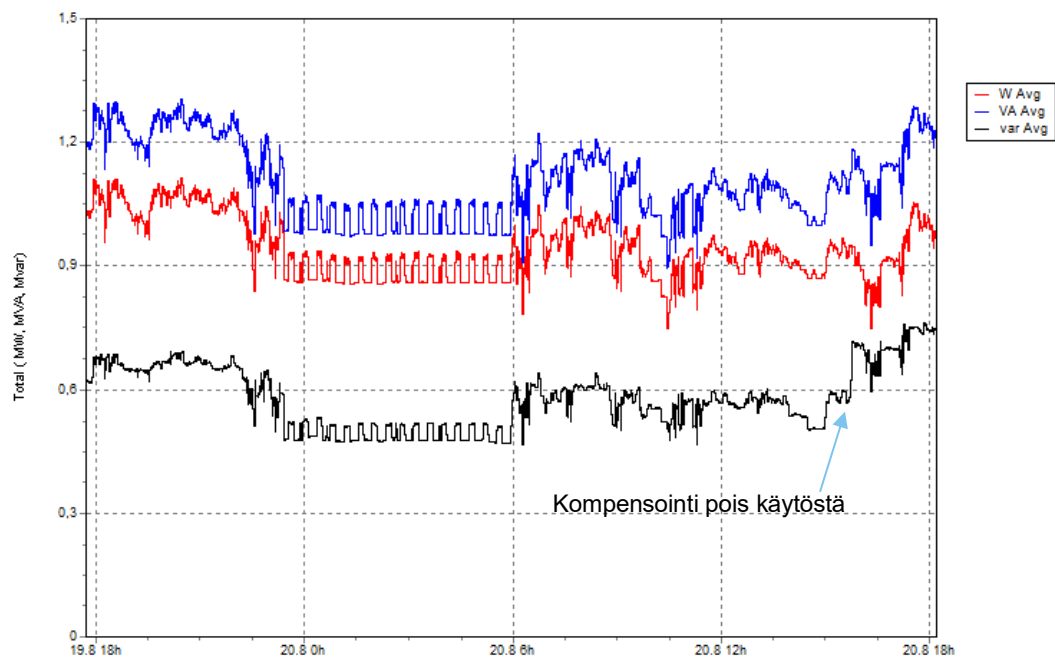
KUVIO 18. Suurennettu kuva keskuksen SB parillisista yliaalloista

Kuvioista (17) ja (18) nähdään, että raja-arvojen ylityksiä tapahtuu muutamia kertoja päivän aikana ja parillisten yliaaltojen piikitykset näyttävät ajoittuvan hetkiin, kun kokonaisjännitesäro romahtaa eli tukkikuorimo oletettavasti pysähtyy. Parilliset yliaallot tarkoittavat, että kuormitusvirran positiivinen ja negatiivinen puoli-

jakso ovat epäsymmetrisiä. Ne voivat johtua useasta eri syystä, mutta tyypillisimmin aiheuttaja on viallinen tasasuuntauspiiri, esimerkiksi yksi taajuusmuuntajan tasasuuntaussillan ylä- tai alapuolen diodeista ei toimi. Tällöin kuitenkin parilliset yliaallot ovat jatkuvia. Pysäytyshetkiin ajoittuvat parillisten yliaaltojen piikit voivat viitata tyristoritasasuuntaussiltaa käyttävän taajuusmuuttajan tyristorien ohjauksen epäsymmetriaan sammutuksen yhteydessä, jolloin kuormitusvirrasta voi tulla epäsymmetristä. Tasasuuntauspiirien häiriöiden lisäksi myös mahdolliset moottoreiden tasakenttävuojarrutuksella toimivat pysäytyslaitteistot voivat aiheuttaa voimakasta kuormitusvirran epäsymmetriaa toimiessaan. Kolmantena mahdollisena syynä parillisten yliaaltojen piikitykselle pysäytyshetkellä on keskusta syötävässä muuntajassa tapahtuva kyllästymisen kuormitusvirran katkaisun yhteydessä, jolloin muuntajaan voi aiheutua epäsymmetrinen vaimeneva vuo, joka näkyy tasakomponenttina ja parillisina yliaaltoina. (Hietalahti 2021)

### Keskus SC

Pienjännitekeskus SC on sahan jälkikäsittelyn toimintaan liittyvä keskus, josta syötetään jälkikäsittelyn prosessilaitteita. Kuviossa (19) on esitetty keskuksen SC kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot. Mittausten aikana keskuksen kompensointilaitteisto otettiin pois käytöstä. Kuvioon on merkattu nuolella hetki, jolloin kompensointi poistettiin käytöstä.



KUVIO 19. Pienjännitekeskuksen SC kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

Kuvion (19) perusteella keskuksen SC loisteho on noin 750 kVAr, joka on kaikista sahan kahdeksasta keskuksesta suurin määrä kompensoimatonta loistehoa. Yhdessä keskuksen SA kanssa nämä kaksi keskusta aiheuttavat lähes puolet koko sahan verkosta ottamasta loistehosta. Keskuksen näennäisteho on suurimmillaan noin 1,3 MVA ja pätöteho on suurimmillaan 1,1 MW.

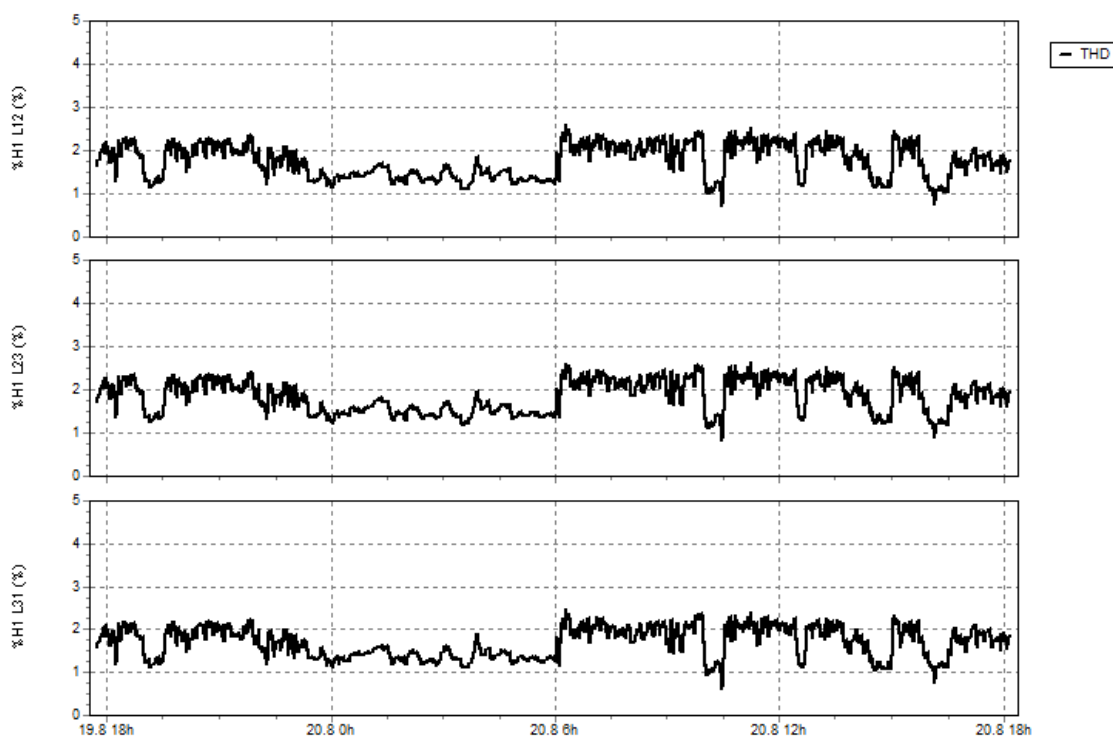
Keskuksessa SC on kompensointia varten kaksi yhdessä toimivaa Nokian Capacitorsin 6TCDTR -estokelaparistoa. Keskuksen kokonaiskompensointiteho on 744 kVAr (portaat 12x62 kVAr). Laitteisto oli häiriöllä ja se otettiin kokonaisuudessaan pois käytöstä, kun havaittiin kaikkien portaiden olevan viallisia. Kompensoinnin irti kytkeminen lisäsi keskuksen loistehon määrää ainoastaan noin 150 kVAr. Kompensointilaitteiston tarkistuksissa havaittiin, että jokaisen portaalan kondensaattoreiden kapasitanssit olivat laskeneet yli 10 % nimellisarvostaan. Tämän lisäksi kuudessa portaassa olivat porrassulakkeet palaneet, joista yhdessä myös kontaktori oli viallinen sekä varokepohjan ja kontaktorin välinen L1-vaiheen johdin käynyt kuumana. Todella huonon kunnon saattaa selittää laitteiston kahden viallisen tuulettimen ja todella lämpimän sijainnin yhteisvaikutus. Laitteisto sijaitsee pienessä muuntajakopissa nimellisteholtaan 1600 kVA:n muuntajan kanssa. Korkeat lämpötilat lyhentävät kondensaattoreiden käyttöikä. Kuviossa (20) on esitetty keskuksen tehokerroimen minuutin keskiarvot ja nuolella osoitettu hetki, jolloin kompensointilaitte otettiin pois käytöstä.



KUVIO 20. Pienjännitekeskuksen SC tehokerroimen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (20) nähdään, että keskuksen SC tehokerroin on suurista loistehomäärästä huolimatta lähes koko mittausajan arvojen 0,85 ja 0,88 välillä, mutta mittausjakson lopussa tehokerroin laskee äkillisesti arvoon 0,8. Tehokerroimen

pienentymisen selittää olemassa olevan kompensoinnin pois käytöstä ottaminen tässä vaiheessa mittausta, kun laitteiston huollon yhteydessä havaittiin sen olevan pahasti viallinen. Suurista loistehoista huolimatta tehokerroin on yllättävän hyvä, koska keskuksen pätötehot ovat myös suuret, jolloin näennäisteho on melkein kokonaan pätötehoa. Kuviossa (21) on esitetty keskuksen SC kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

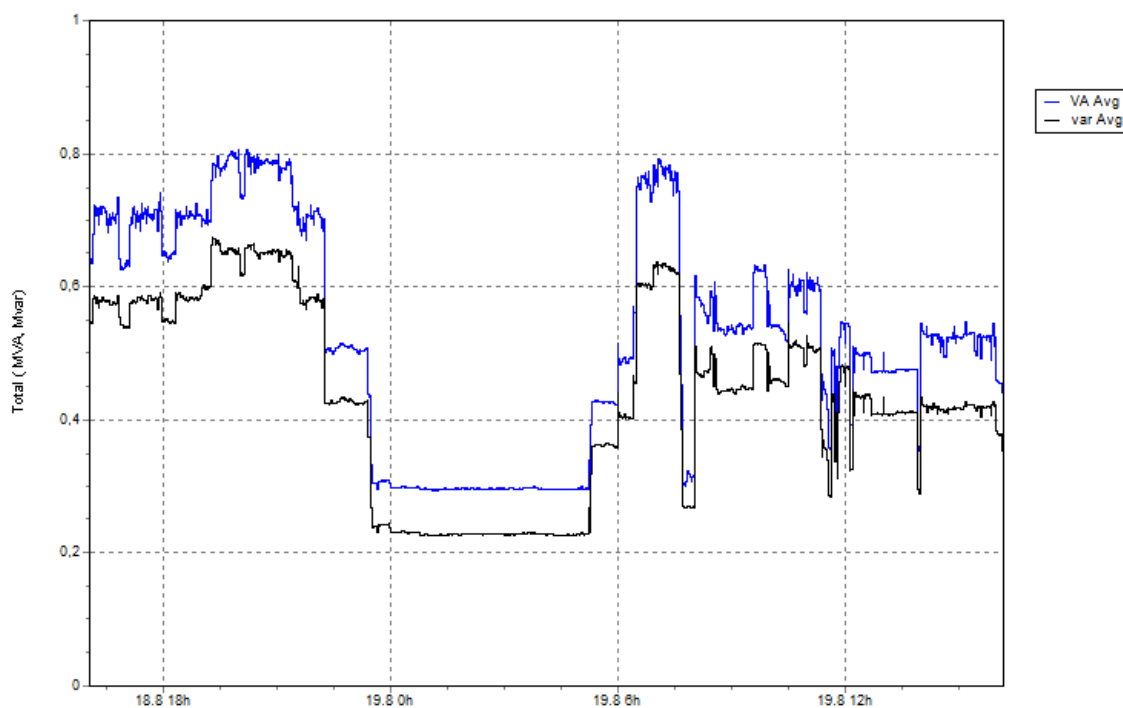


KUVIO 21. Pienjännitekeskuksen SC kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuviosta (21) nähdään, että kaikilla pääjännitteillä jännitesärö on koko mittauksen ajan enintään 2,5 %. Tällä keskuksella myös kaikki yksittäiset yliaaltojen monikerrat pysyvät sallituissa rajoissa, joten keskuksen tilanne on yliaaltojen suhteen hyvä, eikä vaadi toimenpiteitä. Taulukon (4) mukaan jännitteen laatu on hyvä.

### Keskus SD

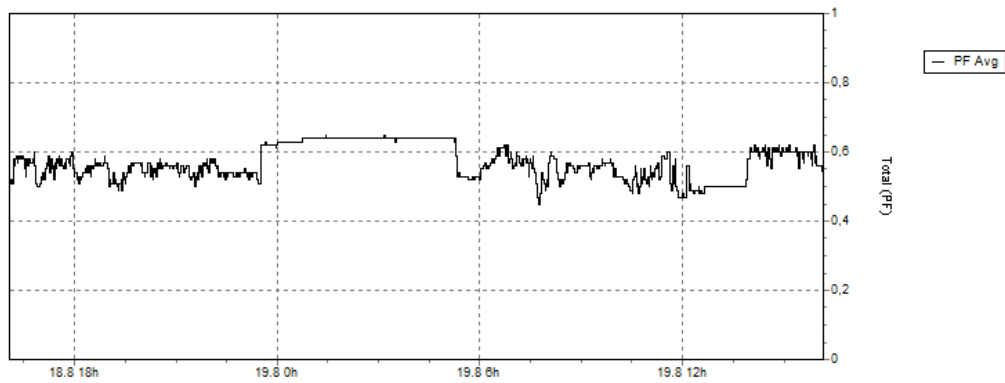
Pienjännitekeskus SD on keskuksen SA lisäksi toinen sahan toimintaan liittyvä prosessikeskus, josta syötetään sahan toimintaan liittyviä moottoreita. Kuviossa (22) on esitetty keskuksen SD kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot. Kuviosta puuttuu kokonaispätötehon kuvaaja samasta syystä kuin kuviossa (14).



KUVIO 22. Pienjännitekeskuksen SD kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

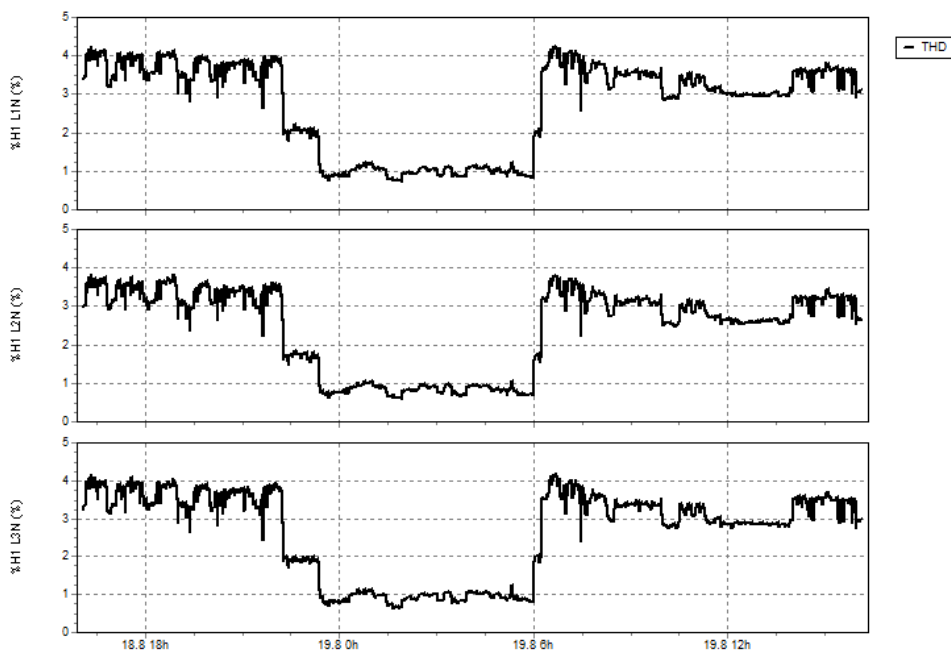
Kuviosta (22) nähdään, että keskuksen SD näennäistehon minuutin keskiarvot ovat suurimmillaan noin 800 kVA ja pienimmillään yöaikaan noin 300 kVA. Tämän keskuksen kohdalla loisteho on koko mittausajan suurempi kuin pätöteho. Keskuslähtöluettelon perusteella suurin osa keskuksen kuormituksesta on kuljettimia ja purkuruuveja, mutta keskus syöttää myös yhtä raudanerotukseen käytettävää sähkömagneettia, joka voisi nostaa keskuksen loistehoa. Vaatisi kuitenkin lisäselvitystä, jotta selviäisi, vaikuttaako tämä kyseinen magneetti niin merkittävästi keskuksen loistehoon. Loistehon minuutin keskiarvo on mittausjakson aikana suurimmillaan noin 650 kVA ja pätötehon 480 kW. Suurten moottoreiden käynnistyshetkillä verkosta otetaan hetkellisesti jopa 2,4 MVA loistehoa.

Keskuksessa SD on kompensointia yksi ABB:n APCR L7% -estokelaparisto, jonka kompensointiteho on 300 kVA (portaat 6x50 kVA). Laitteisto oli otettu pois käytöstä aiemmin sattuneen tulipalon vuoksi, jonka seurauksena laitteiston sisäinen johdotus on joiltain osin palanut. Tämän lisäksi kahden portaan kondensaattoreiden kapasitanssit ovat laskeneet yli 10 % nimellisarvostaan, ja toisessa näistä myös porrassulakkeet ja kondensaattorin johtimet ovat palaneet. Kuviossa (23) on esitetty keskuksen tehokertoimen minuutin keskiarvot.



KUVIO 23. Pienjännitekeskuksen SD tehokertoimen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (23) nähdään, että keskuksen SD tehokerroin on lähes koko mittausajan huono, keskimäärin noin 0,55 ja huonoimmillaan 0,45. Huonon tehokertoimen selittää suuret kompensoimattomat loistehomäärät, jotka johtuvat keskuksen kuormana olevista moottoreista ja mahdollisesti sähkömagneetista. Keskuksessa SD on kompensointilaitteisto, mutta se on otettu pois käytöstä sisäisten johtimien palamisen vuoksi. Kuviossa (24) on esitetty keskuksen SD kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.



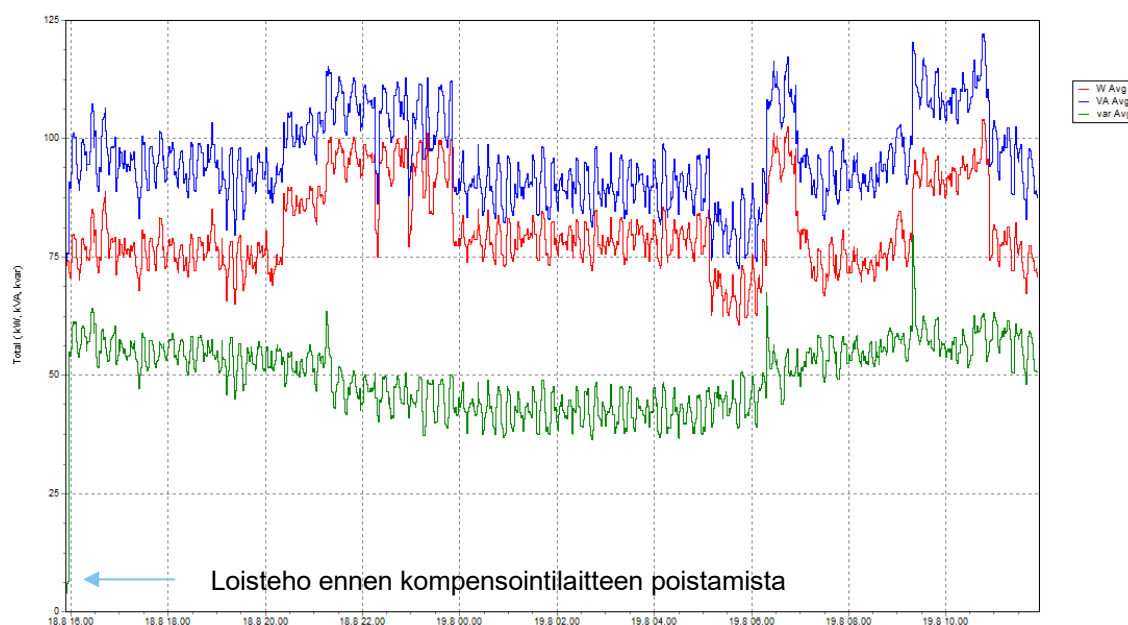
KUVIO 24. Pienjännitekeskuksen SD kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuvion (24) kuvaajasta huomataan, että kaikilla pääjännitteillä jännitesärö on koko mittauksen ajan 0,7-4,2 %. Keskuksen kompensointilaitte on estokelapari, joten sen puolesta kohonneet yliaaltojen jännitesäröt eivät ole vaaraksi.

Näin ollen kompensointilaitteen huoltaminen riittää. Myös mikään yksittäinen yliaallon monikerta ei ylitä taulukossa (3) esitettyjä raja-arvoja, joten kyseessä on standardin mukainen jännite. Taulukon (4) mukaan jännitteen laatu on normaali. Jännitesärö aiheutuu keskuksen syöttämistä kuormista, koska kuviosta (24) on nähtävissä, että jännitesäröt laskevat kuorman pienentyessä.

### Keskus SVA

Pienjännitekeskus SVA on sahan toimintaan liittyvä keskus, josta syötetään sahan kiinteistösähköjä ja osa 400 voltin prosessilaitteista. Kuviossa (25) on esitetty keskuksen SVA kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot. Kuvion loistehon kuvaaja on muista kuvioista poiketen piirretty vihreällä, jotta loistehon alkutilanne erottuu selkeämmin. Kuvioon on merkattu nuolella loistehon taso ennen kompensointikondensaattorin käytöstä poistamista.

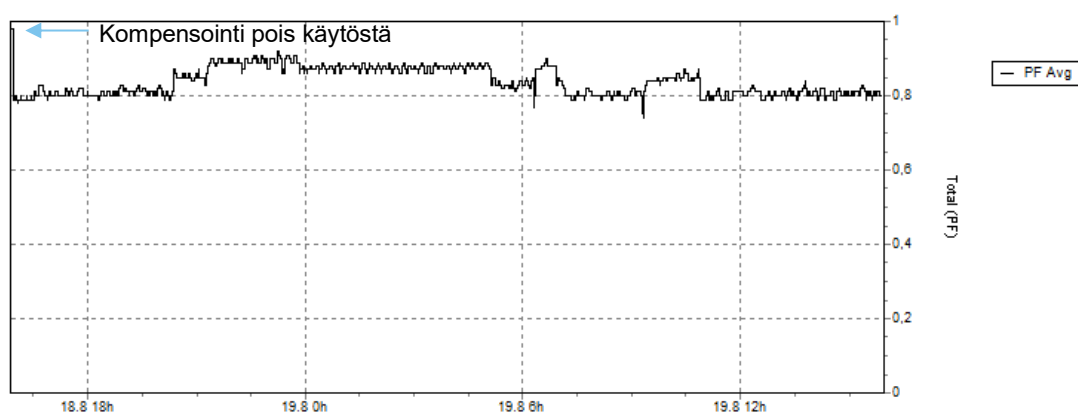


KUVIO 25. Pienjännitekeskuksen SVA kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (25) nähdään, että keskuksen SVA kuormitukset ovat edellä esitettyihin prosessikeskuksiin nähden varsin pienet. Näennäistehon minuutin keskiarvot ovat suurimmillaan noin 120 kVA, pätöteho on suurimmillaan noin 100 kW ja loisteho keskimäärin noin 50 kVAR, mutta muutaman kerran mittausjakson aikana loisteho nousee 70-80 kVAR:n tasolle. Keskuksessa SVA on kompensointilaitteena yksi Nokian Capacitorsin tyyppin 2 ADK kiinteä kondensaattori, jonka ni-

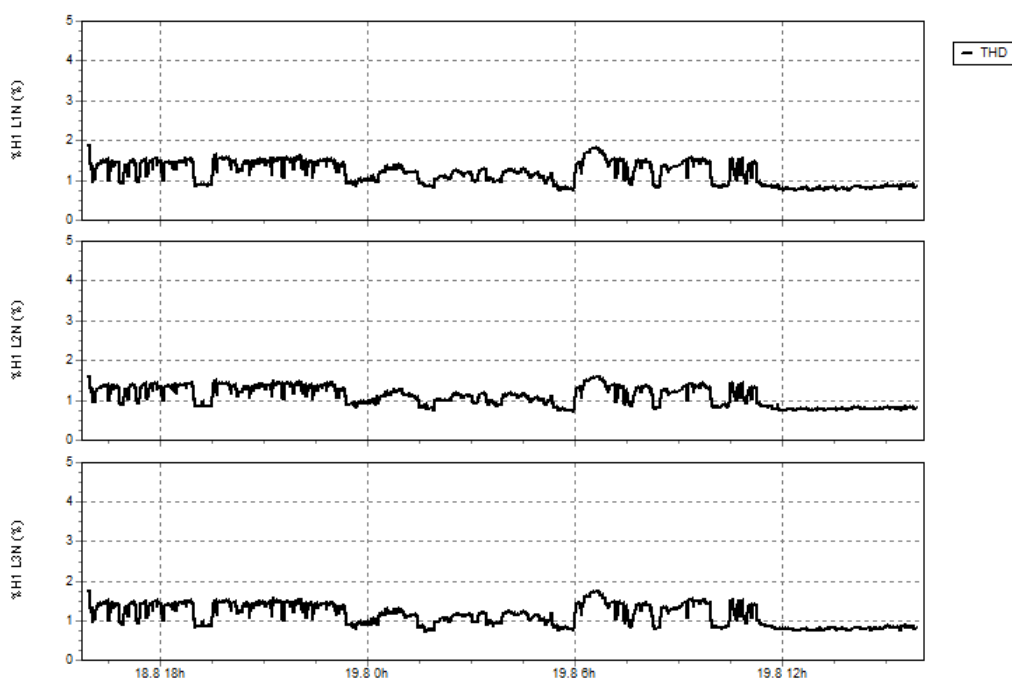


mellinen kompensointiteho on 100 kVAR. Kondensaattorin kapasitanssi oli laskenut yli 10 % nimellisestään, joten se otettiin pois käytöstä suuremman vaurioitumismahdollisuuden vuoksi. Kuvion (25) vasemmasta reunasta nähdään, että keskuksen loisteho kasvoi 10 kVAR:sta noin 50 kVAR:in, kun kompensointi otettiin pois käytöstä. Näin ollen kondensaattori kykeni kompensoimaan vain 40 kVAR, vaikka sen nimellisteho on 100 kVAR. Tämän perusteella sen kompensointiteho oli yli puolittunut. Kyseistä kondensaattoria ei ole kannattavaa huoltaa, koska täysin toimintakykyisenä se aiheuttaisi keskuksen loistehon menemisen 50 kVAR kapasitiiviselle puolelle, koska kiinteitä kondensaattoreita ei voida säätää. Niitä ei myöskään suositella nykyään käytettäväksi ollenkaan ja keskuksen pienen loistehon vuoksi se on suositeltavaa purkaa pois turhana palokuorimana sähkötilassa. Kuviossa (26) on esitetty keskuksen tehokertoimen minuutin keskiarvot. Kuvioon on merkattu nuolella hetki, jolloin kompensointikondensaattori poistettiin käytöstä.



KUVIO 26. Pienjännitekeskuksen SVA tehokertoimen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (26) nähdään, että keskuksen SVA tehokerroin on mittausten alussa lähes arvossa 1,0, mutta kompensoinnin poistamisen jälkeen se asettuu arvojen 0,8 ja 0,9 välille. Kompensoinnin poistamisesta huolimatta keskuksen tehokerroin on hyvällä tasolla, kun huomioon ottaa keskuksen loistehon määrän. Kuviossa (27) on esitetty keskuksen SVA kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

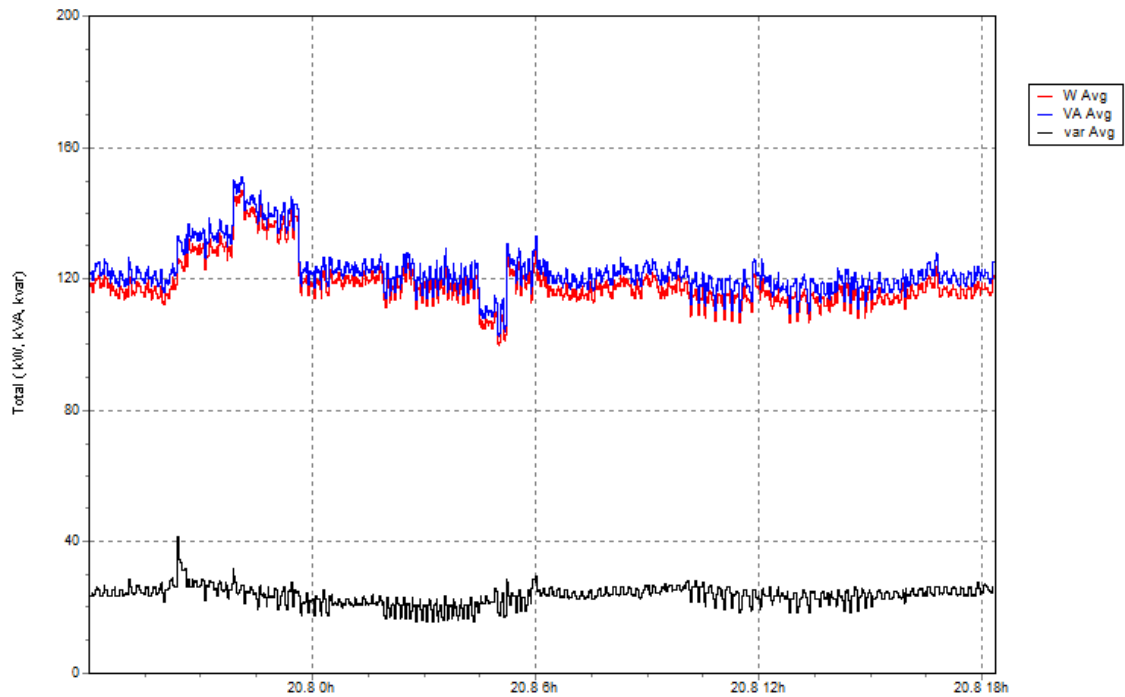


KUVIO 27. Keskuksen SVA kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuvion (27) perusteella keskuksen SVA jännitesäröt ovat hyvällä tasolla, eikä keskus vaadi laitteistoa, jolla niitä rajoitettaisiin. Keskuksen kiinteä kondenssaattori poistettiin käytöstä, joten vaaraa rinnakkaisresonanssiin syntymiselle ei ole. Koko mittauksen ajan jännitesäröt ovat suurimmillaan 1,85 % ja yli puolet mittausjakson ajasta noin 1,0 %:n tasolla, käyden pienimmillään 0,75 %:ssa. Taulukon (4) mukaan jännitteen laatu on hyvä.

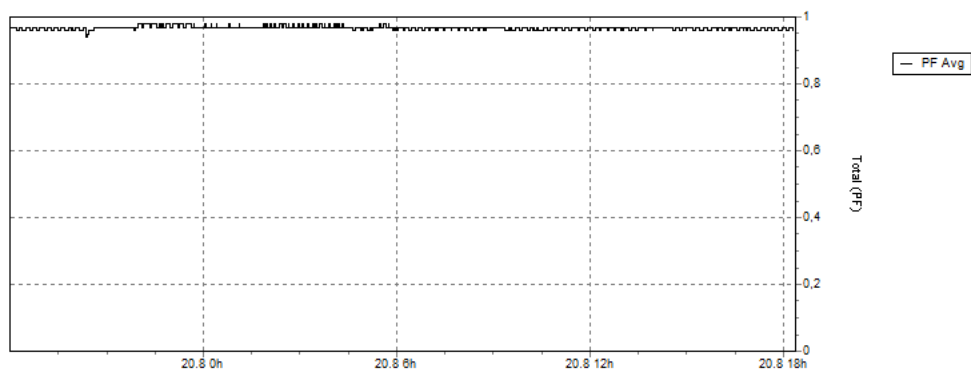
### Keskus SVB

Pienjännitekeskus SVB on 400 voltin keskus, jolla syötetään jälkikäsitteilylaitoksen kiinteistösähköjä, kuten valaistusta ja pistorasiakeskuksia. Seuraavalla sivulla kuviossa (28) on esitetty keskuksen SVB kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.



KUVIO 28. Pienjännitekeskuksen SVB kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

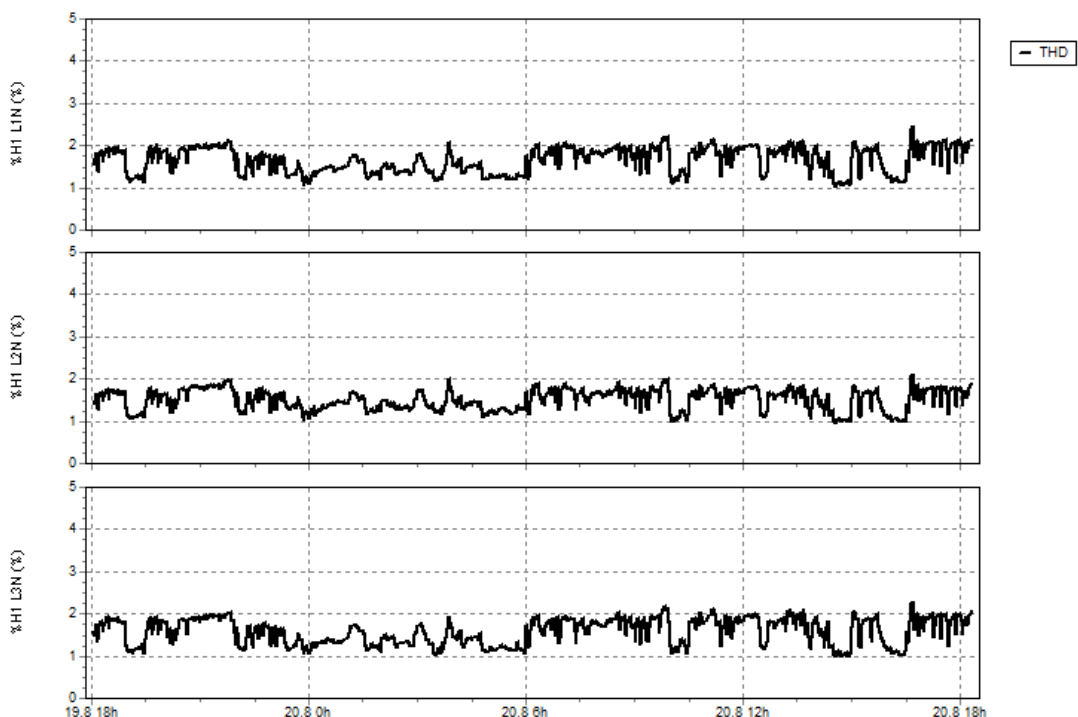
Kuviosta (28) nähdään, että keskuksen SVB näennäistehon minuutin keskiarvot ovat suurimmillaan noin 150 kVA. Suurin osa näennäistehosta koostuu pätötehosta, joka on suurimmillaan noin 147 kW. Keskuksen loisteho on suurimmillaan vain noin 20 kVar. Mittauksen aikana loisteho nousi kerran noin 40 kVar:in. Kuvion perusteella kyseessä on normaali kiinteistö sähkökeskus, jossa ei ole suurissa määrin isoja loistehoa kuluttavia laitteita, kuten moottoreita. Tällöin loistehot pysyvät pieninä ja näennäisteho koostuu pääasiassa pätötehosta. Kuviossa (29) on esitetty keskuksen tehokerroimen minuutin keskiarvot.



KUVIO 29. Pienjännitekeskuksen SVB tehokerroimen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (29) nähdään, että keskuksen SVB tehokerroin pysyttelee koko mittauksen ajan 0,94-0,98 välillä. Saman voi nähdä kuviosta (28), josta nähtiin, että

näennäis- ja pätötehot ovat lähestulkoon päällekkäin. Keskuksella ei ole loistehon kompensointia, eikä sitä mittausten perusteella tarvita. Kuviossa (30) on esitetty keskuksen SVB kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

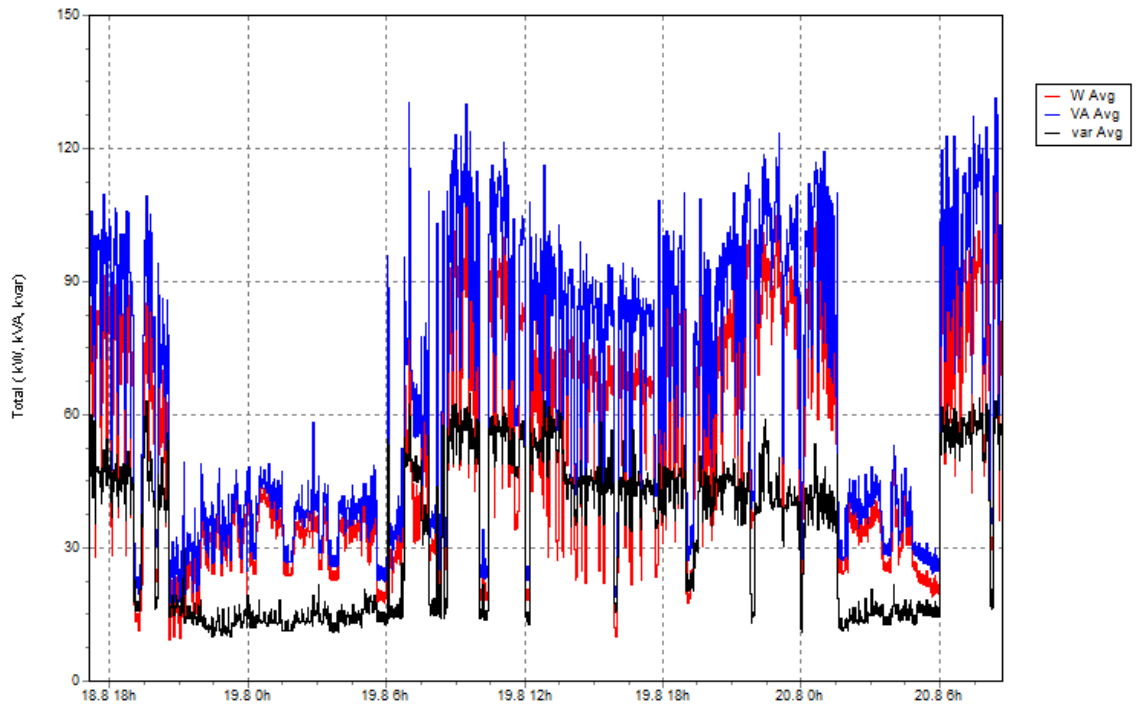


KUVIO 30. Keskuksen SVB kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuviosta (30) nähdään, että kaikilla vaihejännitteillä jännitesärö on koko mittauksen ajan 0,98-2,25 %, joka on huomattavasti vähemmän kuin standardissa SFS-EN 50160 määritetty 8 %. Myös mikään yliaallon monikerta ei ylitä taulukossa (3) esitettyjä raja-arvoja, joten kyseessä on standardin mukainen jännite, joka on taulukon (4) mukaan laadultaan hyvä. Keskuksella ei ole yliaalloille alttiita kompensointilaitteita, joten keskuksen tilanne on kokonaisuudessaan hyvä.

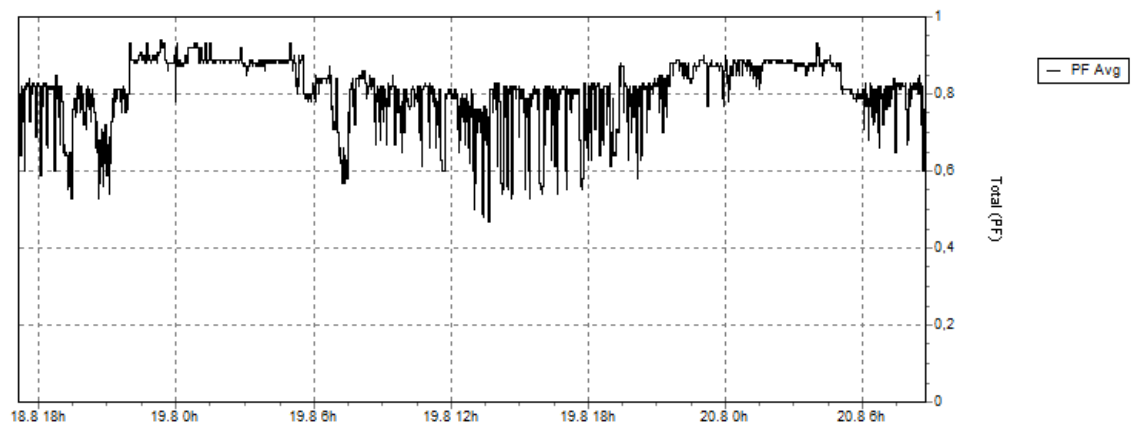
### Keskus SVE

Pienjännitekeskus SVE on Muuraisaaren toimintaan liittyvä keskus, josta syötetään kaikki Muuraisaaren kiinteistöjen ja laitteiden sähköt. Muuraisaari on yksi sahan tukkien vastaanottopaikoista, josta tukit siirretään kuljettimien avulla tukki-kuorimoon. Kuviossa (31) on esitetty keskuksen SVE kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.



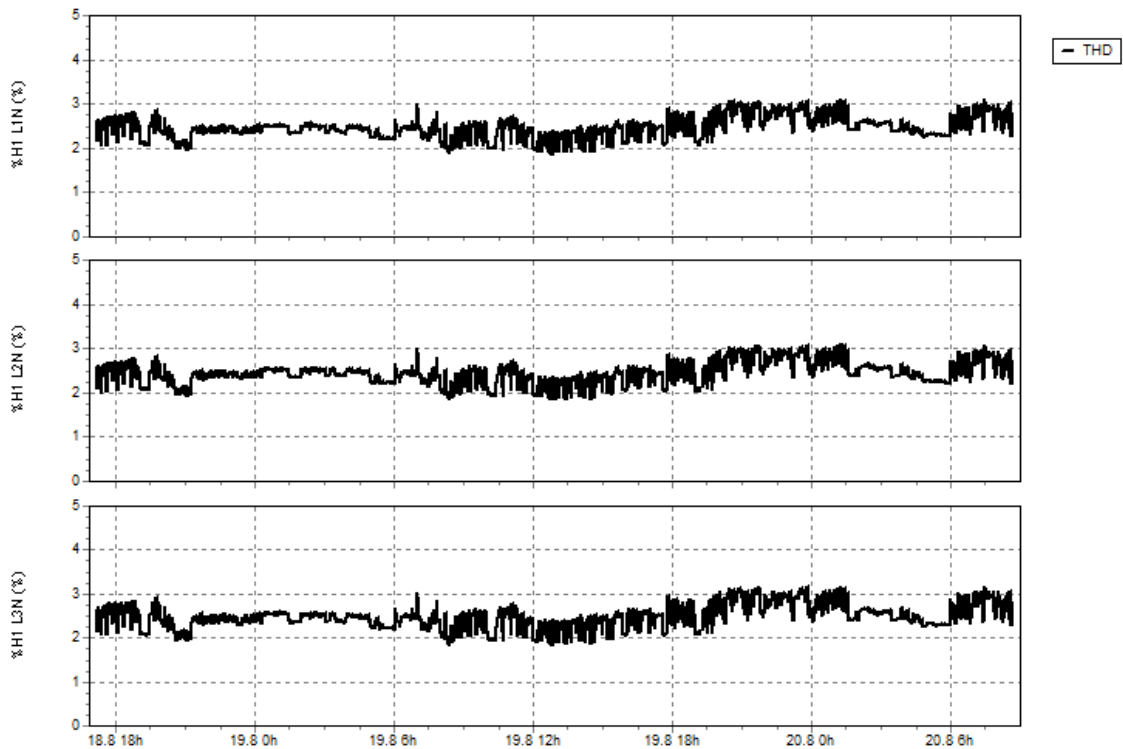
KUVIO 31. Pienjännitekeskuksen SVE kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (31) nähdään, että keskuksen SVE näennäistehon minuutin keskiarvot ovat suurimmillaan noin 130 kVA, pätöteho on suurimmillaan noin 110 kW ja loisteho noin 60 kVA. Pienimmillään keskuksen loisteho on vain noin 15 kVA. Kuviosta on nähtävissä voimakasta tehojen heiluntaa, joka johtuu siitä, että suurin osa keskuksen kuormituksesta on kuljettimia. Muuraissaarella ei tehdä muuta, kuin lajitellaan tukit koon perusteella omiin pinoihin, joista ne kuljetetaan useiden kuljettimien avulla tukkikuorimoon. Kuviossa (32) on esitetty keskuksen tehokertoimen minuutin keskiarvot.



KUVIO 32. Pienjännitekeskuksen SVE tehokertoimen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (32) nähdään, että keskuksen SVE tehokerroin vaihtelee mittausten ajan melko voimakkaasti laitteiden jatkuvien käynnistyksien ja pysäytyksien vuoksi. Tehokerroin vaihtelee mittausten aikana 0,5–0,88 välillä. Keskuksella ei ole loistehon kompensointia, eikä loistehon määrien vuoksi ole välttämätöntä lisätä. Kuviossa (33) on esitetty keskuksen SVE kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

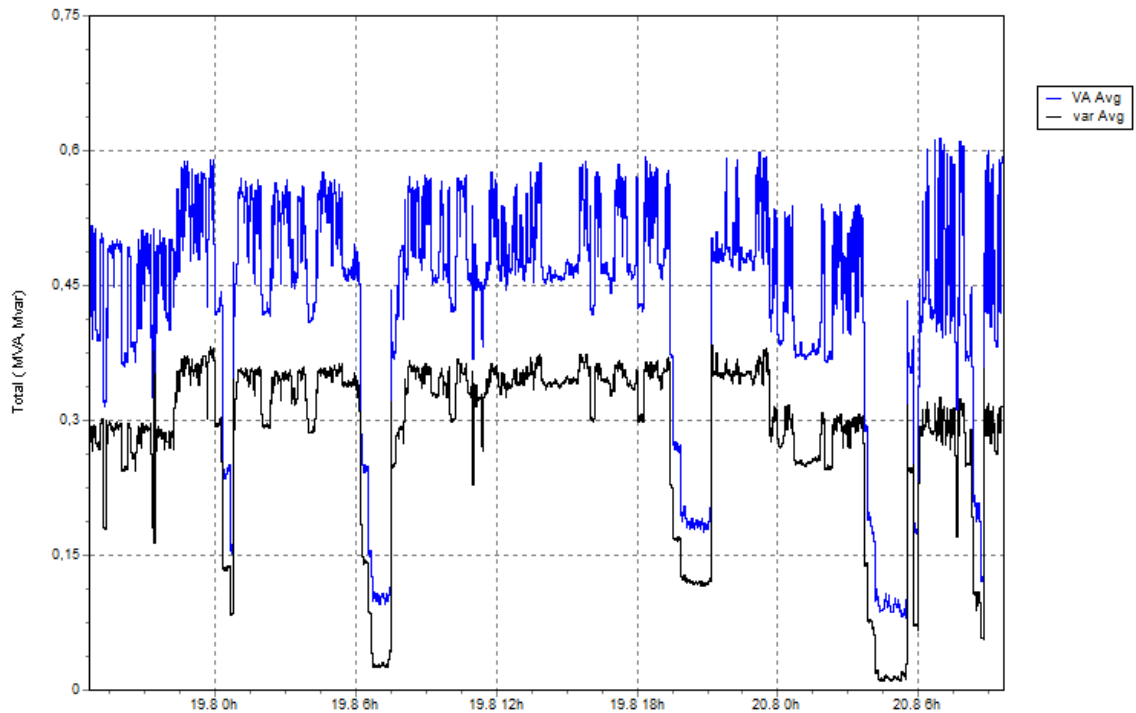


KUVIO 33. Keskuksen SVE kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuviosta (33) nähdään, että kaikilla vaihejännitteillä jännitesärö on koko mittauksen ajan 2,0–3,2 %. Jännitesäröjä nostaa keskuksen pienistä kuormituksista huolimatta useat kuljettimien taajuusmuuttajat. Keskuksen yksittäisten yliaaltojen raja-arvot eivät ylity, joten jännite on standardinmukaista ja laadultaan normaalia.

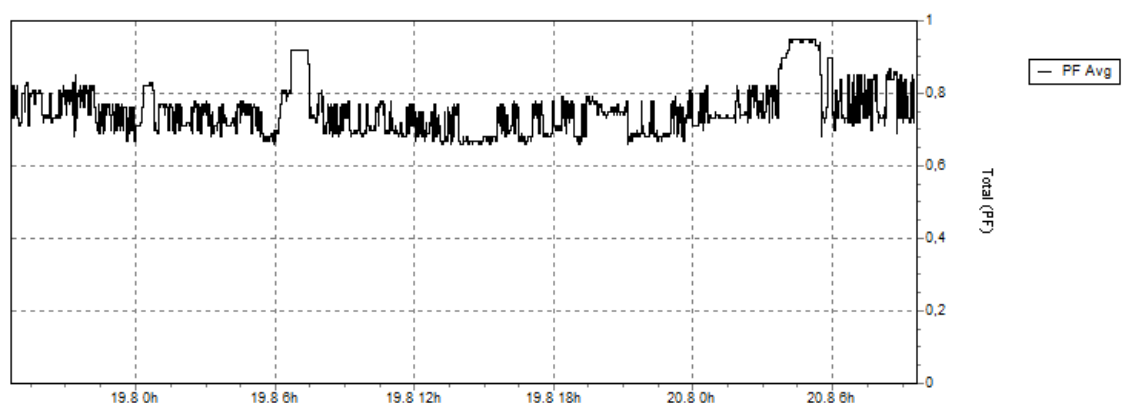
### Keskus SVH

Pienjännitekeskus SVH on hiomon toimintaan liittyvä keskus, josta syötetään hiomon kiinteistön ja laitteiden sähkö. Kuviossa (34) on esitetty keskuksen SVH kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot. Kuviosta puuttuu kokonaispätötehon kuvaaja samasta syystä kuin kuvioissa (14) ja (22).



KUVIO 34. Pienjännitekeskuksen SVH kolmivaihetehojen minuutin keskiarvot.

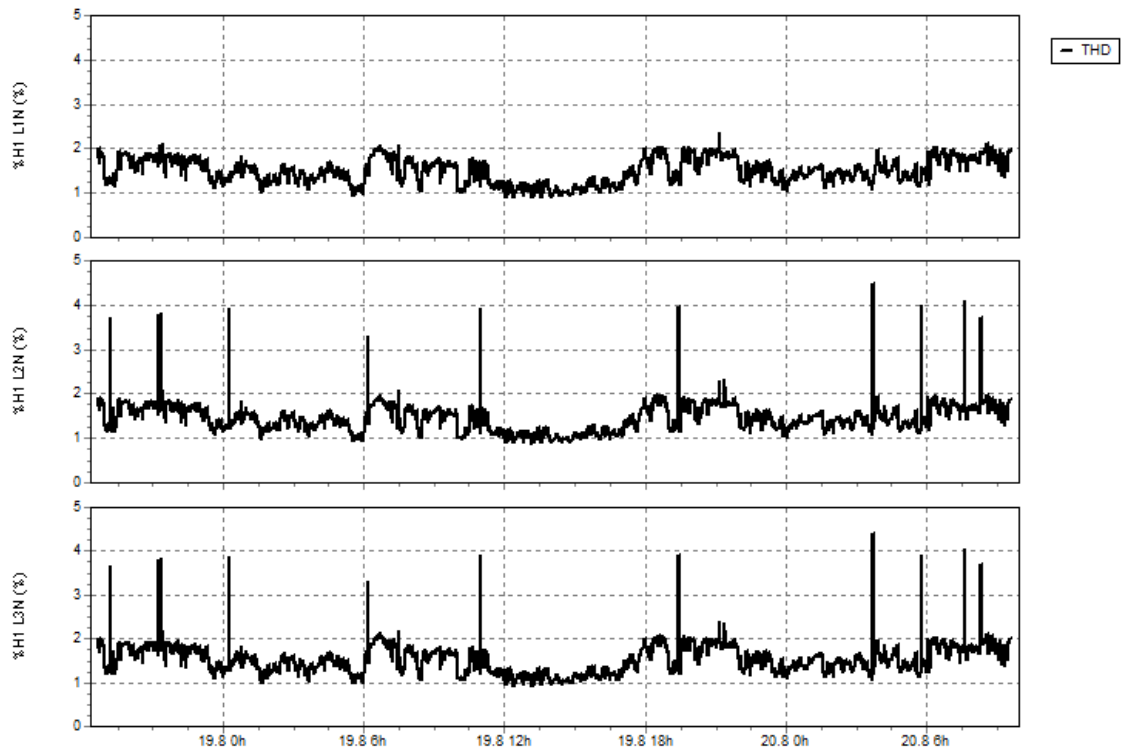
Kuviosta (34) nähdään, että keskuksen SVH näennäistehon minuutin keskiarvot ovat suurimmillaan noin 600 kVA ja pienimmillään hiomon pysähtyessä noin 70 kVA. Keskuksen pätöteho on suurimmillaan noin 520 kW ja loisteho noin 350 kVAr. Suurten moottoreiden käynnistysten aikana verkosta otetaan hetkellisesti 1,4 MVA loistehoa, jolloin keskuksen näennäisteho oli hetkellisesti 1,6 MVA. Vastaavia suuria käynnistystä tapahtui mittausjakson aikana kymmenen. Kuviossa (35) on esitetty keskuksen tehokertoimen minuutin keskiarvot.



KUVIO 35. Pienjännitekeskuksen SVH tehokertoimen minuutin keskiarvot.

Kuviosta (35) nähdään, että keskuksen SVE tehokerroin vaihtelee mittauksen aikana 0,65-0,85 välillä. Keskuksella ei ole loistehon kompensointia, mikä selittää

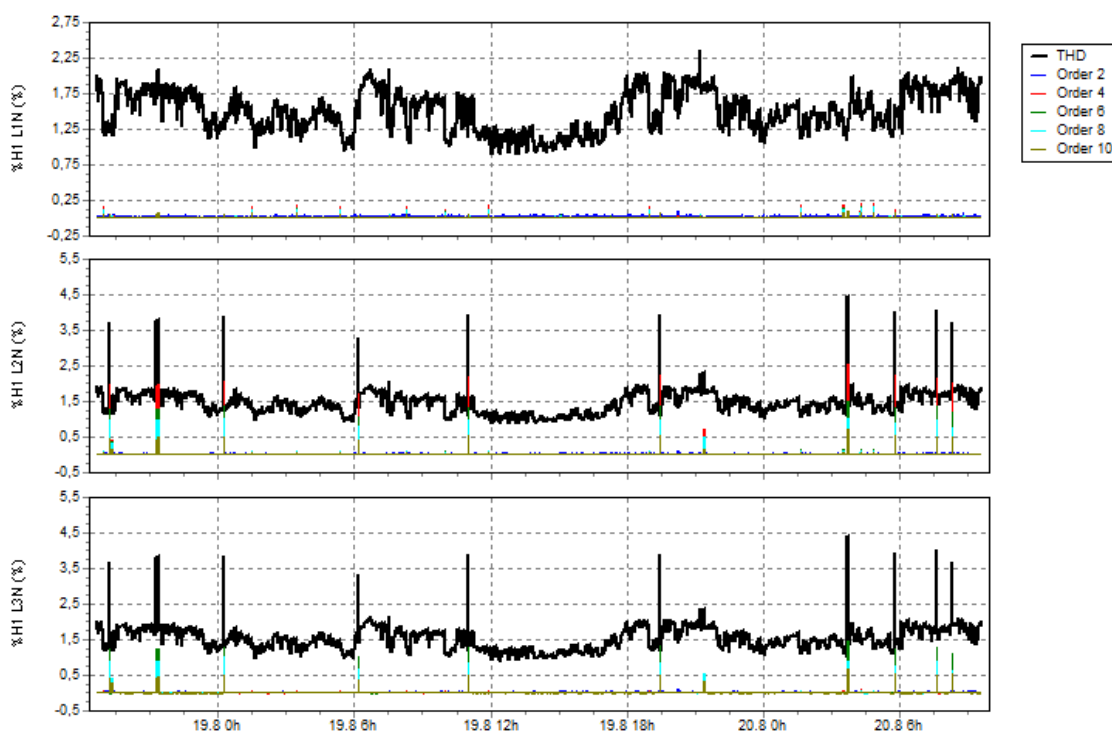
huonoa tehokerrointa. Keskuksen loistehot ovat 350 kVAr, joten tälle keskukselle olisi syytä lisätä uusi kompensointilaitteisto. Kuviossa (36) on esitetty keskuksen SVH kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.



KUVIO 36. Keskuksen SVH kokonaisjännitesärön minuutin keskiarvot.

Kuviosta (36) nähdään, että kaikilla vaihejännitteillä jännitesärö on pääosin koko mittauksen ajan 1,1-2,0 %, joka on vähemmän kuin standardissa SFS-EN 50160 määritetty 8 %. L2- ja L3-vaiheilla jännitesärö nousee muutamia kertoja hetkellisesti yli 3 %, suurien moottoreiden käynnistysten yhteydessä. Taulukon (4) mukaan jännitteen laatu on näiden hetkellisten nousujen vuoksi normaali. Kuten keskuksessa SB, myös keskuksen SVH mittausten aikana osa parillisista yliaalloista (4., 6., 8. ja 10.) ylittivät taulukossa (3) esitetyt raja-arvot. Yli 95 % mittausjaksosta nämäkin yliaallot olivat kuitenkin sallituissa rajoissa, joten kyseessä on standardin mukainen jännite. Kyseiset yliaaltojen piikitykset on esitetty kuviossa (37), johon on vertailun vuoksi lisätty näkyviin kokonaisjännitesärö.





KUVIO 37. Keskuksen SVH parillisten yliaaltojen raja-arvojen ylitykset.

Kuviosta (37) nähdään, että raja-arvojen ylityksiä tapahtuu muutamia kertoja päivän aikana ja parillisten yliaaltojen piikitykset ajoittuvan hetkiin, kun myös kokonaisjännitesärössä tapahtuu piikki. Näinä ajanhetkinä myös vaihevirratt kasvavat hetkellisesti suuriksi, eli jonkin ison moottorin käynnistyminen aiheuttaa yliaaltojen hetkellisen kasvun. Parilliset yliaallot voivat olla merkki muuntajan rautasydämessä tapahtuvasta kyllästymisestä, joka johtuu suurien moottoreiden käynnistyksen aiheuttamasta kytkentävirtasysäyksestä. Toinen mahdollinen syy parillisille yliaalloille on viallinen tasasuuntaajapiiri, mutta tässä tapauksessa se vaikuttaa epätodennäköiseltä, koska yliaallot eivät ole jatkuvia.

#### 5.4 Tulosten analysointi ja suositellut toimenpiteet

Tässä kappaleessa käydään kootusti läpi kaikkien pienjännitekeskusten loistehojen mittaustulokset. Taulukossa (6) on esitetty kaikkien pienjännitekeskusten suurimmat mitatut loistehojen minuutin keskiarvot ja keskuksessa olemassa oleva kompensointiteho.

TAULUKKO 6. Pienjännitekeskusten loistehot ja olemassa olevat kompensoinnit.

Keskus	Suurin mitattu loisteho	Kompensointi	Käytössä
SA	700 kVAr	600 kVAr	250 kVAr (mittaus- ten aikana 0 kVAr)
SB	370 kVAr	Ei kompensointia	-
SC	750 kVAr	744 kVAr	0 kVAr
SD	650 kVAr	300 kVAr	0 kVAr
SVA	70 kVAr	100 kVAr (poistettu)	-
SVB	20 kVAr	Ei kompensointia	-
SVE	60 kVAr	Ei kompensointia	-
SVH	350 kVAr	Ei kompensointia	-

Taulukosta (6) nähdään, että kaikkien pienjännitekeskusten yhteenlaskettu loisteho käytössä olevat kompensoinnit huomioon otettuna on noin 2,66 MVA. Kuvioista (8) nähdään, että sahan keskijännitelähdöstä mitattu loisteho on samaa luokkaa. Keskukset SA, SC ja SD ottavat verkosta todella suuren määrän loistehoa, mutta näiden keskuksien olemassa olevista kompensointilaitteista ei ole pidetty riittävästi huolta, joten ne ovat päässeet vioittumaan käyttökelvottomiksi jättäen sahan lähes kokonaan kompensoimattomaksi. Myös keskukset SB ja SVH ottavat suuren määrän loistehoa, mutta näillä keskuksilla ei ole olemassa olevaa kompensointia lainkaan. Taulukon perusteella voidaan todeta, että sahan loistehon kompensointi on äärimmäisen huonossa tilassa.

Keskuksen SA suositeltu toimenpide on korjata olemassa olevat kompensointilaitteistot. Kokonaan korjattuna kompensointitehoksi saadaan 600 kVAr ja kompensoimatta jää vain 100 kVAr.

Keskuksen SB suositeltu toimenpide on lisätä uusi estokelaparisto. Keskuksesta löytyy vapaita 630 A:n lähtöjä, jonka lisäksi kyseisen keskuksen kytkemötilassa on vapaata tilaa laitteistolle, joten kaapelipituudet jäävät lyhyiksi. Kytkemötilan luo on pääsy kuorma-autolla, joten laitteisto saadaan helposti kohteeseen. Näin ollen uuden laitteiston asennus ei ole vaativa, joten asennukseen ei tule tämän osalta lisähintaa. Esimerkiksi lisäämällä keskukseseen TKF:n 300 kVAr:n estokelapariston, jää keskukseseen kompensoimattomaa loistehoa vain 70 kVAr. TKF:n laite-

katalogin mukaan 400 kVAr:n laitteisto vaatii 3x800 A:n sulakelähdön, joten kyseisen laitteiston valitseminen vaatii keskuslähdön muokkausta ja aiheuttaa siten hieman lisäkuluja, mutta toisaalta mahdollistaa keskuksen lähes täydellisen kompensoinnin. (Tampereen Kondensaattoritehdas, 2021).

Keskuksen SC suositeltu toimenpide on korjata olemassa olevat kompensointilaitteistot. Kokonaan korjattuna kompensointitehoksi saadaan noin 740 kVAr, joten kompensoimatta jää noin 10 kVAr. Kyseiset kompensointilaitteistot sijaitsevat lämpimässä ilmastoimattomassa muuntajakopissa. Tilan ilmanvaihtoa on suositeltavaa parantaa mahdollisuuksien mukaan, jotta kompensointilaitteistojen käyttöikä pidentyy.

Keskuksen SD suositeltu toimenpide on korjata olemassa oleva kompensointilaitteisto, jolloin keskuksen loisteho saataisiin pienentymään noin 350 kVAr:in. Jäljelle jäävän suuren loistehomäärän vuoksi keskukseseen olisi lisättävä uusi kompensointilaitteisto. Keskuksessa SD ei kuitenkaan ole yhtään vapaana olevaa keskuslähtöä, joten uuden laitteiston asennus ei ole mahdollista. Keskuksessa on kuitenkin yksi kokoluokaltaan sopiva keskuslähtö, jonka laite on ollut viimeiset kaksi vuotta pois käytöstä, joten mahdollisuuksien mukaan sitä voisi hyödyntää uuden kompensointilaitteiston lisäämisessä. Tämän lisäksi kyseisen keskuksen kytkemötilassa ei ole vapaata tilaa kompensointilaitteistolle, joten uuden laitteiston asennus vaatii tarkempaa suunnittelua ja oletettavasti asennuskulut ovat korkeat kohteen hankaluuden vuoksi.

Keskuksen SVA kompensoimaton teho on suuruudeltaan 50-70 kVAr. Keskuksen nykyinen kiinteä kondensaattori otettiin pois käytöstä reilusti huonontuneen kompensointitehon sekä kasvaneen vaurioitumismahdollisuuden vuoksi. Kiinteitä kondensaattoreita ei nykypäivänä suositella käytettäväksi, joten suositeltava toimenpide on korjaamisen sijaan purkaa kondensaattori pois kytkemötilasta, jolloin myös palokuormitus paranee. Kompensoimattoman loistehon määrän vuoksi keskukseseen ei ole tarpeellista asentaa uutta laitteistoa kiinteän kondensaattorin tilalle.

Keskuksien SVB ja SVE kompensoimattomat loistehot ovat 20 kVAR ja 60 kVAR. Kummallakaan keskuksella ei ole kompensointia. Loistehon vähäisien määrien vuoksi ei ole tarpeellista asentaa uusia laitteistoja kyseisille keskuksille.

Keskuksen SVH suositeltu toimenpide on lisätä uusi estokelaparisto. Keskuksella on kaksi kompensoinnille varattua keskuslähtöä, ja kytkemötilassa on hyvin tilaa laitteistolle. Kytkemön ovelle on pääsy kuorma-autolla, joten laitteiston saa helposti kohteeseen. Näin ollen uuden laitteiston asennus ei ole kovin vaativa, joten asennuksen hintaan ei tule asennuksen vaikeudesta lisäkuluja. Esimerkiksi lisäämällä keskukseseen TKF:n valmistaman 300 kVAR:n estokelapariston, jää keskukseseen kompensoimatonta loistehoa vain 50 kVAR. TKF:n 400 kVAR:n laitteisto vaatisi suuremman sulakelähdön kuin keskuksessa on vapaana, joten kyseisen laitteiston valitseminen vaatisi keskuslähdön muokkausta ja aiheuttaisi siten hieman lisäkuluja. (Tampereen Kondensaattoritehdas, 2021).

Toteuttamalla kaikki suositellut toimenpiteet, lukuun ottamatta keskuksen SD uuden laitteiston lisäystä, ja valitsemalla 400 kVAR:n kompensointilaitteistot keskuksille SB ja SVH, jää koko sahalle kompensoimatonta loistehoa vain noin 610 kVAR. Tämä on huomattava parannus, kun nykyisellään sahan ottama loisteho on pahimmillaan 3000 kVAR. Mikäli keskukselle SD saadaan järjestettyä vapaa keskuslähtö ja uuden 400 kVAR:n estokelapariston lisäys, jää sahalle kompensoimatonta loistehoa ainoastaan noin 260 kVAR.

Keskuksien harmoniset kokonaisjännitesäröt ovat pääosin hyvällä tasolla, joten niihin ei tarvitse puuttua esimerkiksi yliaaltosuodattimien avulla. Keskuksilla SB ja SVH esiintyy parillisten yliaaltojen piikittelyä muutamia kertoja päivässä, joka voi viitata viallisiin taajuusmuuttajiin tai muuntajien rautasydämien kyllästymiseen. Asian selvittäminen vaatii kuitenkin tarkempaa tutkintaa.

Edellä esitettyjen kompensointien korjaamissuunnitelman toteuttaminen tarkoittaa noin 40 000–50 000 euron investointia. Uusi estokelaparisto 300-400 kVAR:n kokoluokassa asennuksineen maksaa arviolta noin 10 000 euroa ja korjaussuunnitelmassa uusia estokelaparistoja asennetaan 2-3 riippuen keskuksen SD lähtötilanteesta. Vanhat kompensointilaitteet ovat niin huonossa kunnossa, että korjaaminen kokonaisuudessaan varaosineen ja asennuksineen maksaa arviolta noin 20 000 euroa. (ABB Oy 2021) Jotta kompensointilaitteiston hankinnasta

saatuja säästöjä vuositasolla voidaan arvioida, on investointikustannuksissa otettava huomioon korkoprosentti kaavalla

$$K = \left( \frac{p}{100} + \frac{\frac{p}{100}}{\left(1 + \frac{p}{100}\right)^n - 1} \right) \cdot H, \quad (20)$$

jossa  $K$  on investoinnin vuosikustannus,  $p$  on korkokanta,  $n$  on poistoaika vuosina ja  $H$  on hankintahinta asennettuna (Sähkötieto ry. 2016, 4). Oletetaan kompensointilaitteiden uusimisen ja korjaamisen hankintahinnaksi asennettuna 50 000 €, korkokannaksi 5 % ja poistoaikaksi 3 vuotta, tällöin investoinnin kokonaiskustannukset vuositasolla ovat kaavan (21) perusteella

$$K = \left( \frac{5}{100} + \frac{\frac{5}{100}}{\left(1 + \frac{5}{100}\right)^3 - 1} \right) \cdot 50\,000 \text{ €} = 18\,360 \text{ €,} \quad (21)$$

jolloin kokonaisuudessaan investoinnin kustannukset kasvavat kolmen vuoden takaisinmaksun aikana.

Arvioidaan kompensointilaitteiston hankinnasta saatavia vuotuisia säästöjä siten, että Varkauden saha olisi itsenäinen laitos, jolla olisi oma Fingrid Oy:n suurjänniteliittymä tai Savon Voiman keskijänniteliittymä. Fingrid veloittaa loistehomaksua vuonna 2021 asiakkailtaan 1000 euroa kuukaudessa jokaisesta raja-arvot ylittävästä MVAR:sta (Fingrid Oy 2021). Sahan kokoiselta teollisuuslaitokselta voidaan olettaa, että loistehot pysyvät kohtuullisissa rajoissa. Tällöin on mahdollista, että loistehoa sallivia loistehorajoja ei ole tai ne eivät ole suuret, jolloin loistehomaksut alkavat jo ensimmäisestä ylittävästä MVAR:sta. Sahan loisteho on nykyisin pahimmillaan 3 MVAR, joten ilman loistehoa sallivia rajoja loistehomaksut ovat jopa 36 000 euroa vuodessa. Induktiivisen loistehorajan ollessa esimerkiksi 1 MVAR, veloitetaan loistehomaksua 2 MVAR:sta, jolloin vuodessa maksua kertyy 24 000 euroa.

Savon Voima laskuttaa keskijänniteasiakkaitaan loistehosta siten, että 40 %:n osuus kuukauden päätötehohipusta on maksutonta kuukauden loistehohuipusta.

Jäljelle jäävästä osuudesta loisteho maksaa 1,62 €/kVAr/kk. (Savon Voima Oy 2021) Sahan pätötehon huippuarvo mittausjakson aikana oli 3,3 MW ja loistehohuippu 3 MVar. Tällöin laskutettava loistehon osuus olisi 1,68 MVar, jolloin Savon Voiman hinnaston mukaisesti vuositasolla loistehomaksuja tulisi 32 700 euroa.

Toteuttamalla kompensoinnin korjaamissuunnitelman kokonaisuudessaan, laskee sahan loisteho selvästi alle 1 MVar:n, jolloin Fingridiltä loistehomaksuja ei tulisi vuoden aikana yhtään. Myöskään Savon Voimalta loistehomaksuja ei tulisi vuoden aikana yhtään, koska laskutettava loistehon määrä menisi negatiiviseksi, jos siitä vähennetään 40 % kuukauden pätötehohipusta.

Edellä esitettyjen loistehomaksujen ja kaavassa (21) lasketun kompensointilaitteistojen hankinnan todellisten vuosikustannusten perusteella voidaan arvioida, että kolmen vuoden takaisinmaksuajalla vuosittainen säästö on Fingridin suurjänniteasiakkaana loistehorajoista riippuen 5 640–17 640 € ja Savon Voiman keskijänniteasiakkaana 14 340 €. Investoinnin takaisinmaksun jälkeen kompensointilaitteistojen hankinnasta saavutettava säästö on edellä esitettyjen loistehomaksujen verran, koska loistehomaksuja ei enää ole parantuneen loistehotilanteen vuoksi. Pienimmillään takaisinmaksuaika voisi esimerkiksi Savon Voiman asiakkaana olla 20 kuukautta, jolloin investoinnin vuosikustannukset ja saavutettavat säästöt ovat takaisinmaksun ajan tasan. Taloudellisten hyötyjen lisäksi loistehon kompensoinnilla saavutetaan lukuisia aiemmin työssä mainittuja teknisiä hyötyjä tehtaan sähköverkkoon.

## 6 POHDINTA

Opinnäytetyöhön lähdetessä oli tiedossa, että sahan olemassa olevissa kompensointilaitteistoissa on vikaa ja nykyinen loistehon kompensointi on riittämätön kasvaneen tuotannon ja laitemäärien vuoksi. Mittausten perusteella tämä tieto osoittautui todeksi, sillä sahalla on useampia pienjännitekeskuksia, joiden kompensoimattoman loistehon määrä kasvaa yli 300 kVAr:in ja pahimmillaan jopa yli 700 kVAr:in. Kokonaisuudessaan saha ottaa kartonkitehtaan keskijännitekompensoinnista sekä Fingridin suurjänniteverkosta yhteensä jopa 3 MVAr loistehoa. Tämä ei ole toivottua, koska sahan loisteho joudutaan tuottamaan erittäin kaukana sen kulutuspisteestä. Pahimmillaan loisteho tuotetaan sellaisella keskijännitekompensointilaitteistolla, että loisteho joudutaan kuljettamaan jonkin päämuuntajan kautta 110 kV:n kiskostoon ja sieltä toisen päämuuntajan kautta Pajaniemen keskijännitekojeistoon ja edelleen koko keskijännitejakelun matkan sahalle, jossa loisteho vielä menee kaikkien pienjännitemuuntajien läpi. Tässä tapauksessa tarpeettoman moni sähköverkon komponentti kuormittuu ylimääräistä ja voi aiheuttaa esimerkiksi komponenttien käyttöiän pienentymistä.

Parhaassa tilanteessa loisteho tuotetaan kompensointilaitteiden avulla niin lähellä kulutuspistettä kuin mahdollista, jolloin sähkönjakeluun käytetyt komponentit eivät kuormitu. Opinnäytetyössä annettiin suositeltavat toimenpiteet, jotka toteuttamalla sahan loisteho tulee pääosin kompensoiduksi lähellä kulutuspistettä.

Fingrid Oy:n tehtaalle asettamat loistehorajat ovat 10,47 MVAr induktiivista ja 2,62 kapasitiivista loistehoa. Nämä rajat ylittämällä Fingrid veloittaa Stora Ensolta loistehomaksuja, joista aiheutuisi merkittäviä kustannuksia. Tehtaan kokonaisloisteho on nykyisin keskimäärin 4 MVAr, kun tehtaan seitsemästä keskijännitekompensointilaitteesta viisi on kytkettynä verkkoon. Tehtaan keskijännitekompensoinnin kokonaisteho on 35 MVAr, josta käytössä on 26 MVAr. Kuten mittaus tuloksista nähdään, nykyisellä kytkentätilanteella tehtaan kokonaisloisteho laskee noin 1 MVAr:in, jos sahan kompensointi kunnostetaan. Tämä mahdollistaa yhden keskijännitekompensointilaitteen irti kytkemisen verkosta ilman, että tehtaan loistehotilanne juurikaan muuttuu nykyisestä. Näin saadaan Fingridin aset-

tamien rajojen puolesta tehtaen sähköverkko entistä varmemmaksi, kun yhä useampi kompensointilaite on käytön sijaan varalla. Kompensointilaitteiden käyttöä saadaan myös pidennettyä tällä tavalla toimien.



## LÄHTEET

ABB Oy. 2000. TTT-käsikirja 2000–07. Luku 9. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus. Helsinki: ABB Oy

ABB Oy. 2016. Low voltage process performance motors catalog. Luettu 5.11.2020. [https://library.e.abb.com/pub-lic/8b08bf36a95844a8a275e5883223736b/PPM\\_catalog\\_13042016.pdf](https://library.e.abb.com/pub-lic/8b08bf36a95844a8a275e5883223736b/PPM_catalog_13042016.pdf)

ABB Oy. 2021. Kompensointilaitteiden hinta-arvio. Sähköpostiviesti. Luettu 13.1.2021

Ahoranta, J. 2014. Sähkötekniikka. 1.-13. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy

Ahoranta, J., Lesch, K-B. & Sundell, L. 1986. Yleisjakson sähkötekniikka. Porvoo: WSOY

Aura, L. & Tonteri, A. 1994. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-4. painos. Helsinki: WSOY

Fingrid Oy. 2021. Kantaverkkopalvelumaksut. Luettu 14.1.2021. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kantaverkkopalvelumaksut/#kantaverkkopalvelumaksut>

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka

Hietalahti, L. lehtori 2021. Parillisten yliaaltojen piikittely. Sähköpostiviesti. Luettu 6.1.2021

Jaatinen, J. 1991. Pienjänniteverkon kompensointi. Espoo: Sähköurakoitsijaliiton Koulutus ja Kustannus Oy

Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori R., Seesvuori V. & Wilén T. 2006. YLIAALLOT JA KOMPENSOINTI. Tampere: Tammer-Paino Oy

Savon Voima Oy. 2021. Hinnastot ja sopimusehdot. <https://savonvoima.fi/hinnastot-ja-sopimusehdot/>

Silvonen, K. 2009. Sähkötekniikka ja piiriteoria. Helsinki: Otatieto Oy

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2010. SFS-EN 50160:2010. 5. painos. Helsinki: SFS ry

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2019. SI-opas : 2019 : kansainvälinen suure- ja yksikköjärjestelmä. 7. painos. Helsinki: SFS ry

Sähkötieto ry. 2014. ST 52.16 YLIAALTOSUODATINLAITTEET JA NIIDEN SIJOITUS ALLE 1000 V:N PIENJÄNNITEVERKOSSA. Espoo: Sähköinfo Oy

Sähkötieto ry. 2016. ST 52.15 LOISTEHON KOMPENSOINTI JA KOMPENSOINTILAITTEET ALLE 1000 V:N PIENJÄNNITEVERKOSSA. Espoo: Sähköinfo Oy

Tampereen kondensaattoritehdas. 2021. Estokelaparistot. <https://www.tkf.fi/estokelaparistot/>

Tampereen Sähköverkko. n.d. LOISTEHON HINNOITTELU JA KOMPENSOINTI. Luettu 12.11.2020. <https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkoverkko/tsv-ohjepankki/2.sahkon suunnittelijalle-ja-urakoitsijalle/5.-loisteho-ja-kompensointi/1.-loistehon-kompensointi.pdf>

Voipio, E. 1976. VIRTAPIIRIT JA VERKOT. 19. muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto Oy

## LIITTEET

Liite 1. Sahan sähkönjakelun pääkaavio (muokattu)

