



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

YLIAALTOJEN SUODATUS JA LOISTEHON KOMPENSOINTI TEOLLISUUSVERKOSSA

Opinnäytetyö

Eero Koivuniemi

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Sähkövoimatekniikka

KOIVUNIEMI EERO:

Yliaaltojen suodatus ja loistehon kompensointi teollisuusverkossa

Opinnäytetyö 83 sivua, joista liitteitä 3 sivua

Toukokuu 2018

Teollisuudessa, julkisella sektorilla sekä kotitalouksissa käytettävät useat elektroniset laitteet aiheuttavat niitä syöttävään sähköverkkoon häiriöitä, jotka johtuvat niiden ottaman sähkövirran muutoksesta. Tällaisia laitteita kutsutaan epälineaariseksi virtapiirin osiksi, koska ne muuttavat verkosta otettua sinimuotoista virtaa esimerkiksi tasasuuntaamalla sitä. Epälineaariset kuormat aiheuttavat häiriöitä sähköverkkoon säröyttämällä jännitettä. Jännitesärö haittaa verkon muiden laitteiden ideaalista toimintaa ja pahimmissa tapauksissa rikkoo niitä.

Tässä opinnäytetyössä tehtiin Metsä Fibren Rauman sellutehtaan kunnossapitoyrityksen, Botnia Mill Service Oy:n, toimeksiannosta selvitys tehtaan taajuusmuuttajakeskusten yliaaltojen sekä loistehon määrästä. Tehtaalla käytössä olevia taajuusmuuttajia on sekä vanhoja Siemensin että uusia ABB:n valmistamia. Käytössä olevat yliaaltosuodattimet ovat asennettu samoihin aikoihin kuin Siemensin taajuusmuuttajat, ja ne eivät ole suurimmaksi osaksi yhteensopivia ABB:n uusien taajuusmuuttajien kanssa muuttuneen sähkönsäädön laadun takia. Opinnäytetyön tavoitteena oli sähkönsäädön laatumittauksien perusteella mitoittaa sellutehtaan taajuusmuuttajakeskuksille uudet yliaaltosuodatus- ja loistehokompensointilaitteistot.

Tämän opinnäytetyön alussa käydään läpi sähkötekniikan perussuureita, yliaaltoteoriaa ja kompensointivaihtoehtoja. Tämän jälkeen käsitellään mittauksien periaatteet Metsä Fibren tehtaalla. Työn lopussa tarkastellaan sähkönsäädön laadun mittaustuloksia, esitetään kompensointiratkaisuja ja tehdään johtopäätelmät sekä ehdotetaan jatkotutkimuksia.

Tässä opinnäytetyössä ehdotettujen suositusten avulla Botnia Mill Service Oy voi päivittää sellutehtaan yliaaltosuodattimet uusiin laiteratkaisuihin ja näin parantaa koko sellutehtaan säädettyjen moottorikäyttöjen tehokerrointa ja elinikää. Tätä työtä voidaan myös käyttää tehtaan sisäisenä oppaana yliaalloista, yliaaltojen suodatuksesta, loistehosta ja loistehon kompensoinnista.

Asiasanat: yliaallot, yliaaltojen suodatus, loisteho, loistehon kompensointi

ABSTRACT

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

KOIVUNIEMI EERO:

Harmonic filtering and reactive power compensation for industrial distribution network

Bachelor's thesis 83 pages, appendices 3 pages
May 2018

Many electrical appliances in industrial and public sectors as well as in households cause disturbance in the electrical grid that supplies them. These appliances change the grid's current waveform in a way that it differs from the voltage's sinusoidal waveform. In electrical engineering these kinds of appliances are called nonlinear loads. The change in the current's waveform is caused for example by the way of rectification. The disturbance, also known as harmonics, distort the voltage. This has negative effects on the ideal operation of the grid's other applications, and in the worst case scenario, can damage them.

This bachelor's thesis was made by the commission of Botnia Mill Service Oy, the maintenance company of the Rauma pulp mill of Metsä Fibre Oy. The purpose of this thesis was to make a report on the level of harmonics and reactive power of frequency converter centers of the pulp mill using electric power quality measuring. Currently there are frequency converters from two different manufacturers in the pulp mill. Harmonic filtering equipment were initially installed at the same time as the old frequency converters, but because of the upgrade to the new frequency converters, the old filtering equipment is not compatible anymore due to the changes to the quality of the electricity in the pulp mill's electrical grid.

The objective of this thesis was to make suggestions, with the power quality measurements as basis, to change the old harmonic filtering components to new ones as well as to add compensation equipment to reduce the levels of reactive power in the electrical grid of the pulp mill.

Key words: harmonics, harmonic filtering, reactive power, reactive power compensation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	SÄHKÖTEHO.....	8
2.1	Tehon komponentit.....	8
2.1.1	Näennäisteho.....	8
2.1.2	Pätöteho.....	8
2.1.3	Loisteho ja tehokertoimet.....	9
2.2	Loistehon kompensointi teollisuudessa.....	13
3	YLIAALLOT.....	18
3.1	Fourier-sarja.....	18
3.1.1	Spektriesitys.....	18
3.2	Yliaaltojen määritelmä sähkötekniikassa.....	19
3.3	Yliaaltojen lähteet teollisuudessa.....	22
3.3.1	Suuntaajat.....	22
3.3.2	Valokaariuuni.....	23
3.3.3	Muuntaja.....	23
3.3.4	Epätahtimoottori ja generaattori.....	24
3.4	Yliaaltojen häiritseminen.....	25
3.4.1	Resonanssi.....	26
3.5	Yliaaltojen suodattaminen.....	29
3.5.1	Passiivinen suodatin.....	29
3.5.2	Estokelaparisto.....	32
3.5.3	Aktiivisuodatin.....	33
3.6	Yliaaltojen vähentäminen rakenteellisilla muutoksilla.....	34
3.6.1	Kuristinkelan käyttö.....	35
3.6.2	Suuntaajien pulssiluvun kasvattaminen.....	37
4	SÄHKÖN LAATU JA VAATIMUKSET.....	39
4.1	Harmoniset yliaaltojännitteet.....	39
4.2	Harmoniset yliaaltovirrat.....	40
5	NYKYISET LAITTEET.....	42
5.1	Yliaaltosuodatinkondensaattoriparisto.....	42
5.2	Taajuusmuuttajat.....	44
6	MITTAUKSET.....	47
6.1	Mittauksen suorittaminen.....	47
6.2	Soodakattila.....	51
6.2.1	Keskus 40AE01.....	53
6.2.2	Keskus 40AH03.....	54

6.2.3	Keskus 40AH01	56
6.2.4	Keskus 42AH01	57
6.3	Haihduuttamo.....	59
6.3.1	Keskus 41AH01	60
6.4	Massatehdas	61
6.4.1	Keskus 20AH01	63
6.4.2	Keskus 20AH03	64
6.5	Kuivaamo.....	65
6.5.1	Keskus 31AH01	66
6.5.2	Keskus 31AH02	68
6.6	Jäähdytysvesitorni.....	69
6.6.1	Keskus 68AE01.....	70
6.7	Kuorimo	72
6.7.1	Keskus 12AH01	73
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	75
7.1	Olellaisimmat päätelmät	75
7.2	Mittaus tuloksien luotettavuus	75
7.3	Jatkotutkimukset	76
	LÄHTEET	78
	LIITTEET	81
	Liite 1. Mittauspöytäkirja	81
	Liite 2. Virtamittauspaikka piirikaaviossa.....	82
	Liite 3. Jännitemittauspaikka piirikaaviossa	83

LYHENTEET JA TERMIT

BMS	Botnia Mill Service Oy
DFT	Diskreetti Fourier'n muunnos
DPF	Displacement power factor eli perustaajuinen tehokerroin
GTO	Gate turn off thyristor eli hilalta sammutettava tyristori
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PF	Power factor eli todellinen tehokerroin
PWM	Pulse-width modulation eli pulssinleveysmodulaatio
Rsc	Oikosulkusuhde
THD	Total Harmonic Distortion eli harmoninen kokonaissärö
a_v	Fourier-sarjan kerroin tasakomponentille
a_n	Fourier-sarjan kerroin kosinimuotoiselle komponentille
b_n	Fourier-sarjan kerroin sinimuotoiselle komponentille
f_0	resonanssitaajuus, Hz
I_p	kuormitusvirran pätökomponentti, A
I_q	kuormitusvirran loiskomponentti, A
I_{rms}	virran tehollisarvo, A
I^*	virran kompleksikonjugaatti eli liittoluku, A
j	imaginaariyksikkö
K_p	yliaaltojen suhde perusaaltoon
Q_{ind}	induktiivinen loisteho, var
Q_k	kompensointitarve, var
Q_{kap}	kapasitiivinen loisteho, var
U_{rms}	jännitteen tehollisarvo, V
X	reaktanssi, Ω
X_C	kondensaattorin reaktanssi, Ω
X_L	kelan reaktanssi, Ω

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä mittauksien avulla selvitys Metsä Fibre Oy:n Rauman sellutehtaalla käytettävien taajuusmuuttajien aiheuttamista yliaalloista sähköverkossa. Lisäksi tarkoituksena oli mitata taajuusmuuttajakeskusten loistehon määrät. Tehtaalla käytetään paljon eri kokoisia moottoreita pumppu-, puhallin- ja kuljetinkäytöissä, joista monet toimivat säädetysti taajuusmuuttajien avulla. Tehtaalla on päivitetty vanhoja taajuusmuuttajia uusiin, minkä takia vanhoille taajuusmuuttajille mitoitettut yliaaltosuodattimet ovat joko vioittuneet käytössä tai muuten yhteen sopimattomia uusien taajuusmuuttajien kanssa siten, että yliaaltosuodatus ei toimi suunnitellusti. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli sähköön laatumittauksien perusteella joko päivittää vanhat laitteistot uusiin, jotka voitaisiin asentaa esimerkiksi tehtaan seisokissa, tai soveltaa vanhojen laitteiden asennuksia uusien vaatimuksien mukaisiksi.

Opinnäytetyön alussa käydään läpi sähkötekniisiä perussuureita, jotka ovat olennaisia työn aiheen ymmärtämisen kannalta, ja tutustutaan loistehon kompensointiin. Lisäksi esitellään yliaaltojen lähteitä, torjumista ja suodatinlaitteita sekä sähköön laadun suosituksia. Opinnäytetyön empiirisen osan alussa käydään läpi suoritettujen mittauksien periaatteita. Samalla esitellään mittaustulosten eli sellutehtaan osastojen tarkoitus sellutuotantoprosessissa. Tämän jälkeen käydään läpi opinnäytetyön keskeiset mittaustulokset tutkimuskohteiden osalta. Saatua tuloksia vertaillaan myös standardissa määriteltäviin raja-arvoihin ja ehdotetaan laiteratkaisuja sähköön laadun parantamiseksi. Opinnäytetyön lopussa tehdään johtopäätöksiä keskeisimmistä mittaustuloksista ja pohditaan mittaustulosten luotettavuutta sekä ehdotetaan tehtaalla suoritettavia jatkotutkimuksia.

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Botnia Mill Service Oy, joka on vuonna 1997 perustettu Metsä Fibren ja Caverion Industriain omistama kunnossapidon palveluyhtiö. Botnia Mill Service (BMS) toimii seitsemässä toimipaikassa Suomessa: Vantaalla, Joutsenossa, Kemissä, Kuopiossa, Raumalla, Tampereella ja Äänekoskella. BMS työllistää noin 370 henkilöä. Tätä opinnäytetyötä voidaan käyttää BMS:n Rauman yksikön sisäisenä ohjeena yliaaltoteorian ja siihen liittyvien laitteiden sekä loistehon kompensoinnin perehdyttämiseen.

2 SÄHKÖTEHO

2.1 Tehon komponentit

2.1.1 Näennäisteho

Sähköteho voidaan jakaa kolmeen peruskomponenttiin: näennäistehoon, pätötehoon ja loistehoon. Näennäisteho on kompleksisten pätötehon ja loistehon summa ja sen yksikkö on voltiampeeri VA. Näennäisteho on yhtä suuri kuin pätöteho, jos jännite ja virta ovat samassa vaiheessa, mutta niiden ollessa eri vaiheessa jää saatava hyötyteho pienemmäksi kuin virran ja jännitteen tehollisarvojen tulo. Näennäisteho tunnetaan myös nimellä kompleksinen teho. Näennäisteholla tarkoitetaan usein kompleksisen tehon itseisarvoa. Kompleksinen teho voidaan laskea kaavalla (1):

$$S = U \cdot I^* = P + jQ, \quad (1)$$

jossa S on näennäisteho, U on jännite, I^* on virran kompleksikonjugaatti eli liittoluku, P on pätöteho, j on imaginaariyksikkö ja Q on loisteho (Silvonen 2017, 5–6).

2.1.2 Pätöteho

Pätöteho on kompleksisen tehon reaaliosa, jota voidaan käyttää työn tekemiseen. Pätötehoa siis siirretään energialähteestä sähkölaitteeseen, jossa sitä voidaan käyttää esimerkiksi mekaanisen vääntömomentin tai lämmön tuottamiseen. Pätötehon tehollisarvo voidaan laskea kaavalla (2):

$$P = U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \varphi, \quad (2)$$

jossa U_{rms} on jännitteen tehollisarvo, I_{rms} on virran tehollisarvo, φ on virran ja jännitteen vaihe-erokulma (Mäkelä ym. 2014, 128).

Ideaalisessa puhtaasti resistiivisessä kuormassa virran ja jännitteen välinen vaihe-ero on 0, joten tehokerroin $\cos \varphi$ voidaan tällöin jättää pois laskuista.

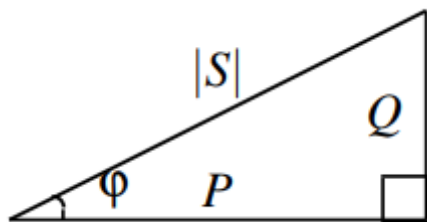
2.1.3 Loisteho ja tehokertoimet

Loisteho eli reaktiivinen teho on kompleksisen tehon imaginaariosa, jota ei voida käyttää työn tekemiseen kuten pätötehoa. Loisteho voidaan jakaa vielä kahteen komponenttiin: induktiiviseen ja kapasitiiviseen loistehoon. Loistehoa syntyy energian heilahdellessa edestakaisin virtapiirissä. Teho sykkii energialähteiden ja energiaa varastoivien komponenttien (kela ja kondensaattori) välillä. Resistiivinen vastus ei kuluta loistehoa. Loisteho on usein haitallista verkon ideaalisen toiminnan kannalta. Teollisuudessa loistehoa käytetään pääasiassa vaihtovirtakäytöissä oikosulkumoottoreiden käämien ja muuntajien magnetoimiseen sähkövirran avulla, joten se on kuitenkin välttämätön osa teollisuusverkkoa. Loistehon tehollisarvo voidaan laskea kaavalla (3):

$$Q = U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin \varphi, \quad (3)$$

(Mäkelä ym. 2014, 126).

Sähköisen tehon perussuureet voidaan esittää tehokolmiona, joka havainnollistaa pätö- ja loistehon välistä riippuvuutta ja niiden vaikutusta näennäistehoon, kuten kuvassa 1.



KUVA 1. Perustaajuinen tehokolmio (Silvonen 2017, 7)

Koska pätö- ja loistehon välinen vaihesiirtokulma on 90 astetta, voidaan johtaa myös Pythagoraan lauseen avulla näennäisteholle kaava (4):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4)$$

(Mäkelä ym. 2014, 126).

Virran ja jännitteen välistä vaihe-erokulmaa kuvataan symbolilla ϕ ja se voidaan laskea kaavalla (5):

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{Q}{P}. \quad (5)$$

(Mäkelä ym. 2014, 126).

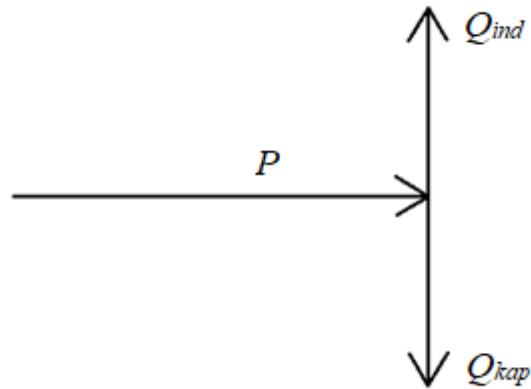
Sähköisien komponenttien kuten oikosulkumoottoreiden loistehon tarvetta kuvataan tehokertoimella $\cos \phi$, joka määritellään myös pätötehon suhteena näennäistehoon. Toinen nimitys perustaajuiselle tehokertoimelle on DPF eli displacement power factor. Perustaajuisen sähköverkon tehokerroin voidaan laskea kaavalla (6):

$$\text{DPF} = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (6)$$

(Mäkelä ym. 2014, 126).

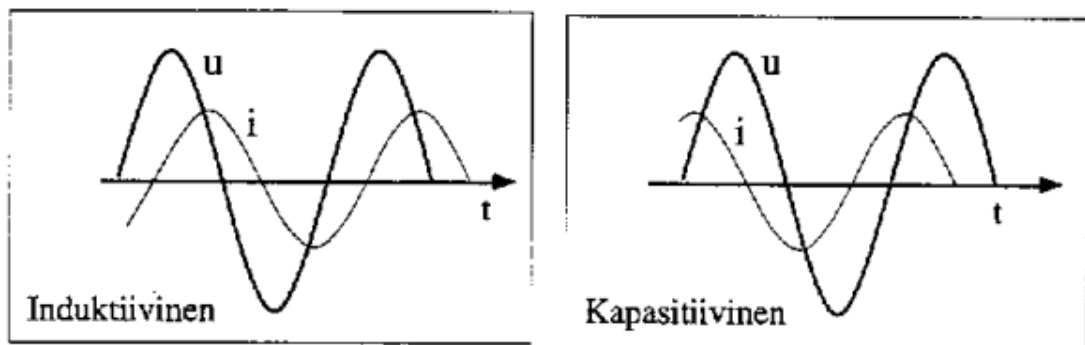
Kaava (6) on voimassa verkkojännitteelle, joka on riittävän sinimuotoista eli sen $\text{THD}_F(U) \leq 2\%$ (Hietalahti 2011, 56).

Tehokolmiosta (kuva 1) havaitaan myös, että puhtaasti resistiivisessä verkossa, jossa ei ole lainkaan loistehoa, virran ja jännitteen välinen kulma $\varphi = 0^\circ$, mikä tarkoittaa, että virta ja jännite ovat samassa vaiheessa. Puhtaasti induktiivisessa verkossa $\varphi = 90^\circ$, jolloin pätötehon osoitin on äärettömän lyhyt eli verkossa ei ole lainkaan pätötehoa, ja virta on 90° astetta jännitettä jäljessä. Puhtaasti kapasitiivisessa verkossa $\varphi = -90^\circ$, jolloin ei myöskään verkossa ole lainkaan pätötehoa ja virta on 90° astetta jännitettä edellä. Loistehon komponenttien ja pätötehon riippuvuutta toisistaan voidaan havainnollistaa kuvalla 2.



KUVA 2. Induktiivinen ja kapasitiivinen loisteho

Kuvassa 2 Q_{ind} on induktiivinen loisteho ja Q_{kap} kapasitiivinen loisteho. Loistehon induktiivista osaa tuottaa sähkötekniikan peruskomponentti kela. Laskennassa kela mallinnetaan ideaalisena, jolloin se muodostuu pelkästään induktiivisesta reaktanssista. Todellisessa kelassa on kuitenkin hieman johtimien aiheuttamaa resistanssia. Kapasitiivista loistehoa tuottaa kondensaattori. Kuvassa 3 on esitetty virran ja jännitteen aaltomuodot käämissä ja kondensaattorissa.



KUVA 3. Käämin tuottama loisteho on induktiivista ja kondensaattorin kapasitiivista (Nieminen n.d., 2)

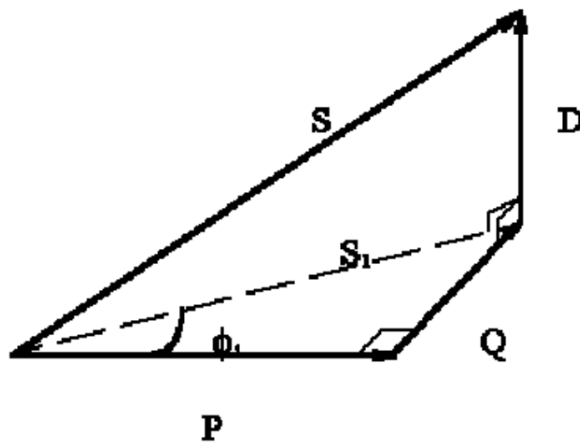
Kuvasta 3 voidaan todeta puhtaasti induktiivisessa sekä puhtaasti kapasitiivisessa verkossa tapahtuva virran ja jännitteen 90 asteen vaihe-erot.

Yliaaltopitoisissa verkoissa on perustaajuisen loistehon lisäksi yliaaltojen aiheuttamaa loistehoa. Tätä kutsutaan säröloistehoksi D , joka voidaan laskea kaavalla (7):

$$D = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2}, \quad (7)$$

jossa S on kokonaisnäennäisteho, P_1 on perustaajuinen pätöteho ja Q_1 on perustaajuinen loisteho (Korpinen 2008, 29).

Säröloisteho käyttäytyy sähköverkossa samoin kuin loisteho. Kokonaisvaltainen sähkötehokomponenttien vektoridiagrammi yliaaltoja sisältävässä sähköverkossa on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Sähkötehon vektoridiagrammi yliaaltoja sisältävässä verkossa (Korpinen 2008, 28)

Kuvasta 4 nähdään, että perustaajuiset pätö- ja loisteho sekä säröloisteho muodostavat yhdessä kokonaisnäennäistehon S .

Yliaaltopitoisen verkon tehokerroin poikkeaa siis DPF:stä, koska sähköverkon särön takia virran aaltomuoto ei ole tarpeeksi sinimuotoista. Tällaisen tilanteen todellista tehokerrointa merkitään tunnuksella PF, joka on lyhenne sanoista power factor. PF on verkon todellinen tehokerroin, jos jännite on riittävän sinimuotoista ja virta epäsinimuotoista (Hietalahti 2011, 56).

PF voidaan laskea kaavalla (8):

$$\text{PF} = \frac{I_{1,\text{rms}} \cdot \cos \varphi}{I_{\text{rms}}} = K_p \cos \varphi, \quad (8)$$

jossa $I_{1,rms}$ on virran perustaajuinen tehollisarvo ja K_p on yliaaltojen suhde perusaaltoon (Hietalahti 2011, 56).

Taulukossa 1 on esitetty tyypillisiä tehokertoimia erilaisille kuormituksille.

TAULUKKO 1. Kuormitusten tyypillisiä tehokertoimia (ABB 2000, 1)

Kuorma	$\cos \varphi$ tehoeroin (W / VA)	$\tan \varphi$ loistehon tarve (VAr / W)
Moottorit	0,7 ... 0,85	1,0 ... 0,62
Loisteputkivalaisimet		
-kompensoimattomat	0,5	2
-kompensoidut	0,9	0,5
Tyristorikäytöt	0,4 ... 0,75	2,3 ... 0,9
Resistiivinen kuorma	1	0

Taulukon tehokertoimet ovat suuntaa antavia. Tarkat laitteiden tehokertoimet löytyvät yleensä laitteen tuoteoppaasta. Esimerkiksi pienjännitemoottoreiden tehoeroin on monilla 3000 rpm –moottoreilla yli 0,90 (ABB 2005, 10).

2.2 Loistehon kompensointi teollisuudessa

Suuret liittymispisteet valtakunnan verkossa kuten Metsä Fibren sellutehtaat voivat ottaa verkosta loistehoa niin paljon, että verkkoyhtiö laskuttaa myös siitä. Laskutus perustuu valtakunnallisen kantaverkkoyhtiön, Fingrid Oyj:n, asettamaan velvoitteeseen, että paikalliset verkkoyhtiöt huolehtivat alueensa loistehotasapainosta. Tämä on yksi syy, miksi liittymispisteen asiakas kompensoi loistehoa; tehdään taloudellista säästöä, kun vältetään loistehomaksuilta. Hinnoittelu riippuu verkkoyhtiöittäin, mutta yleisesti kapasitiivinen loisteho on kalliimpaa asiakkaalle ja sille asetetut rajat ovat myös pienemmät (Tampereen Sähköverkko n.d., 1).

Esimerkiksi Tampereen Sähköverkko laskuttaa pien- ja keskijänniteverkon tehosiirtoasiakkailta induktiivisesta loistehosta kuukauden suurimman mitatun arvon mukaan, josta on vähennetty 20 % laskutuspätötehon lukuarvosta tai vähintään 50 kVar. Induktiivisen loistehon hinta määräytyy välillä 20-40 % laskutuspätötehon lukuarvosta kaavalla (9):

$$x/\text{kVar} \quad (9)$$

(Tampereen Sähköverkko n.d., 1)

ja yli menevältä osalta kaavalla (10):

$$5 \cdot x/\text{kVar}. \quad (10)$$

(Tampereen Sähköverkko n.d., 1).

Kaavoissa (9) ja (10) x on hinnaston mukainen loistehomaksu, joka määräytyy taulukon 2 mukaan.

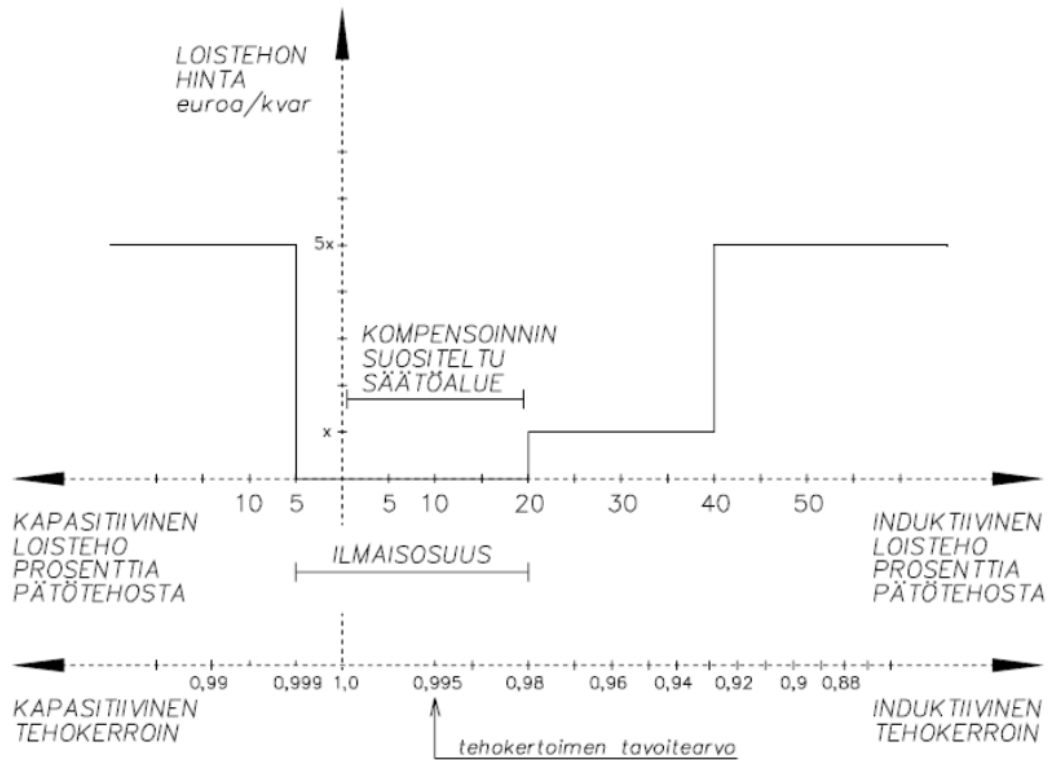
TAULUKKO 2. Tampereen Sähköverkon verkkopalveluhinnasto 1.10.2017 keskijännitetehosiiroasiakkaille (Tampereen Sähköverkko 2017, 2).

KESKIJÄNNITE- TEHOSIIRO 2

on tarkoitettu asiakkaille, jotka ovat liittyneet 20 kV keskijännitejakoalueeseen ja joiden vuotuinen sähkönkäyttö yli 10 000 MWh. Keskijänniteverkkoon liittyminen edellyttää, että asiakkaalla on oma muuntamo.

		alv 0 %	alv 24 %
Perusmaksu	(€/kk)	1810,00	2244,40
Päätötehomaksu	(€/kW/kk)	2,76	3,42
Loistehomaksu	(€/kVar/kk)	1,25	1,55
Päiväenergiamaksu	(snt/kWh)	0,5800	0,7192
Yöenergiamaksu	(snt/kWh)	0,3900	0,4836
Sähkövero, luokka 1	(snt/kWh)	2,2530	2,79372

Kapasitiivisesta loistehosta Tampereen Sähköverkko laskuttaa kuukausittain sen suurimman mitatun arvon mukaan, josta on vähennetty 5 % tai vähintään 12,5 kVar laskutuspäätötehon lukuarvosta. Tämän yli menevän osan laskutus tapahtuu kaavalla (10). Kuvassa 5 on esitetty hinnoitteluperiaate.



KUVA 5. Tampereen Sähköverkon hinnoitteluperiaate 1.1.2019 alkaen (Tampereen Sähköverkko 2018, 2).

Taloudellisen säästön lisäksi loistehoa kompensoidaan teollisuusverkoissa, jotta vältetään sen aiheuttamilta ongelmilta. Ylimääräinen loisteho esimerkiksi kasvattaa jännitteenalenemaa. Tämä voidaan perustella kaavalla (11):

$$U_h = I \cdot R \cdot \cos \varphi + I \cdot X \cdot \sin \varphi = I_p \cdot R + I_q \cdot X, \quad (11)$$

jossa U_h on jännitteenalenema kaapelissa, I on kuormittava sähkövirta, I_p on kuormitusvirran pätökomponentti, I_q on kuormitusvirran loiskomponentti, R on kaapelin kokonaisresistanssi per vaihe ja X on kaapelin kokonaisreaktanssi per vaihe (Hietalahti 2013, 220).

Kaavassa (11) kuormitusvirran loiskomponentti, loisvirta, kasvattaa suoraan kaapelissa syntyvää jännitteenalenemaa. Kaava (11) on yksinkertaistettu likimääräislauseke, mutta se on riittävän tarkka jakeluverkkojärjestelmien laskelmissa. Siirtojohtojen tehonsiirrossa on jännitteiden itseisarvojen erotuksen lisäksi merkitystä myös jännitteiden välisellä kulmalla, joten siirtoverkkolaskelmissa käytetään osoitinlaskentaa (Korpinen 1997, 2).

Loisteho myös kuormittaa kaapeleita, mikä aiheuttaa lämpöhäviöitä, jotka näkyvät verkossa tehohäviönä. Tämä ilmenee kaavasta (12):

$$P_h = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3(I_p^2 + I_q^2) \cdot R, \quad (12)$$

jossa P_h on pätötehohäviö (Korpinen 1997, 3).

Kaavasta (12) nähdään, jos jännite ja pätöteho pidetään vakiona, loistehon suurentaminen piirissä suurentaa piirissä kulkevaa virtaa, jolloin energian siirtohäviöt kasvavat. Sähkövirta aiheuttaa siis kolmivaihejohtimessa sen neliöön verrannollisen pätötehohäviön. Täten loistehon määrällä on suora vaikutus verkon pätötehon siirtokykyyn. Koska loisteho vaikuttaa sekä tehohäviöiden ja jännitteenaleneman suuruuteen, voidaan sen kompensointia pitää teknillis-taloudellisesti järkevänä.

Kompensointi perustuu loistehon luonteeseen: loistehoa on sekä induktiivista että kapasitiivista. Kelat, joita käytetään esimerkiksi sähkömoottoreissa, tuottavat induktiivista loistehoa. Kondensaattorit vastaavasti tuottavat kapasitiivista loistehoa. Nämä kaksi loistehon komponenttia ovat vastakkaisuuntaisia eli ne kumoavat toisensa. Liittymän loistehon tarvetta voidaan kuvata tehokertoimen, $\cos \phi$, avulla. Kun tehokerroin on induktiivinen, liittymä ottaa verkosta loistehoa. Kompensoinnilla pyritään saamaan tehokertoimen arvo kohti lukua 1. Ylikompensointitilanne on myös mahdollinen. Tällöin liittymästä syötetään verkkoon päin loistehoa ja tehokertoimen arvo on kapasitiivinen. Ylikompensoidun eli kapasitiivisen verkon ja induktiivisen verkon ero on käytännössä asiakkaalle ainoastaan se, että yleisesti kapasitiivisen verkon loistehomaksu on suurempi. Sille ei ole yksiselitteistä vastausta, kumpi tilanne on parempi. Usein valitaan kuitenkin, että verkko pidetään induktiivisena, jos tällainen valinta joudutaan tekemään (Tampereen Sähköverkko n.d., 3; Eronen 2018).

Kompensointitarve voidaan laskea kaavalla (13):

$$Q_k = \frac{P}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2), \quad (13)$$

jossa Q_k on loistehon tarve, η on kuormituksen hyötysuhde, ϕ_1 on tehokulma ennen kompensointia ja ϕ_2 on tehokulma kompensoinnin jälkeen (ABB 2000, 1).

Moottorit kompensoidaan yleensä $\cos \phi$:n arvoon 0,98. Suuret moottorit kompensoidaan siten, että kompensointiteho on korkeintaan 90 % moottorin tyhjäkäyntitehosta (ABB 2000, 3).

Teollisuudessa käytettävät pienjänniteverkot ovat yleisesti induktiivisia, jolloin loistehoa voidaan kompensoida erilaisilla kondensaattoreilla. Mikäli tehtaan sähköverkossa on yliaaltoja, käytetään kompensointikondensaattoreiden sijaan estokelaparistoja. Teoreettinen ideaalitalanne on sellainen, jossa tehtaan pienjänniteverkossa tuotetaan laitteiden vaatima loisteho erilaisilla kompensointilaitteilla, jolloin verkosta joudutaan ostamaan vain pätehoa. Loistehon määrälle ei ole asetettu rajoja, mutta voidaan yksinkertaisesti todeta, että mitä vähemmän sen parempi. Käytäntöjä loistehon kompensoinnille on kaksi. Ensimmäisen perusteena on, että loisteho kompensoidaan kokonaan pois, minkä avulla pyritään lähestymään teoreettista ideaalitalannetta, jossa verkossa ei ole lainkaan ylimääräistä loistehoa. Toinen ratkaisu on, että selvitetään, kuinka paljon paikallinen sähköverkkoyhtiö laskuttaa loistehosta, ja kompensoidaan sen verran, että loisteholaskutusta ei enää tule. Loisteholaskutuksen tarkkailuun perustuva kompensointi on kuitenkin haastavampaa mitoituksen kannalta erityisesti, jos kompensoitavan kohteen kuorma on muuttuva tai jos on mahdollista, että se tulevaisuudessa kasvaa merkittävästi (Eronen 2018).

Sellutehtaat ovat tuotantolaitoksina poikkeuksellisia, koska niiden prosessi perustuu suljettuun kiertoon. Usein sellutehtaissa tuotetaan sähköä enemmän kuin sitä kulutetaan. Tällaisista laitoksia kutsutaan yliomavaraisiksi sähkössä, koska sähköä voidaan myydä myös verkkoon. Sellu- sekä paperitehtaat tarvitsevat kuitenkin energiaa ympäri vuoden, joten tehtaiden omien tuotantolaitoksien lisäksi yhtiöt hankkivat energiaa myös sähkömarkkinoilta. Sellu- ja paperitehtaat tuottavat arvioilta noin 40 % tarvitsemastaan sähköstä (Metsäteollisuus 2010, 4).

3 YLIAALLOT

3.1 Fourier-sarja

Ranskalainen matemaatikko ja fyysikko Joseph Fourier (1768–1830) esitti vuonna 1822 teoksessaan Analyyttinen lämpöteoria, että jokainen jaksollinen funktio voidaan esittää trigonometristen sini- ja kosinifunktioiden summana eli sarjakehitelmänä. Kunkin termin taajuus on funktion perustaajuuden kokonainen monikerta. Täten voidaan sähkötekniikassa esittää säröytyneitä jännitteen ja virran aaltomuotoja sini- ja kosinimuotoisten komponenttien summana kaavalla (14):

$$f(t) = a_v + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t), \quad (14)$$

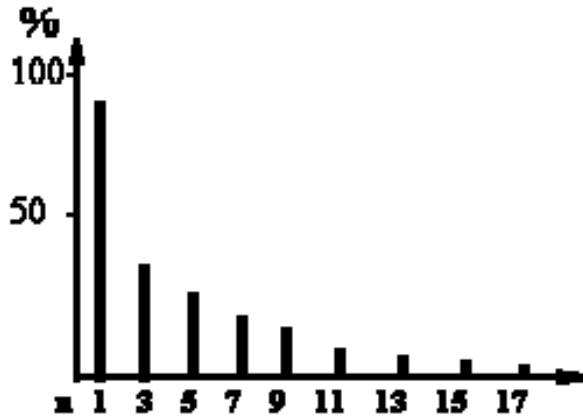
jossa n on kokonaisluku eli yliaallon järjestysluku, a_v , a_n ja b_n ovat Fourier-sarjan kertoimia, ω_0 on perustaajuuden komponentin kulmanopeus ja t on aika (Jauhiainen 2006, 6).

Perustaajuuden komponentin kulmanopeus on ω_0 , jonka kokonaiset monikerrat ovat harmonisien yliaaltojen kulmanopeuksia. Fourier-sarjaa käytetään halutun aaltomuodon approksimoimiseen. Ensin lasketaan sarjalle sopivat kertoimet, minkä jälkeen summataan niillä painotettuja sini- ja kosiniaaltoja riittävä määrä, jotta saadaan sarjakehitelmä, joka mahdollisimman hyvin vastaa kohteena olevaa aaltomuotoa (Jauhiainen 2006, 6–7).

3.1.1 Spektriesitys

Funktiota kuvaavien komponenttien joukkoa sanotaan taajuusspektriksi. Jaksollisen funktion, kuten sähköverkon jännitteen tai virran, spektri on diskreetti- eli viivaspektri. Jaksolliselle funktiolle pätee yleisesti, että komponentteja esiintyy vain perustaajuuden kerrannaisina eli harmonisina yliaaltoina (Korpinen 2008, 4).

Viivaspektriesityksessä pystyakselilta luetaan komponentin suhteellisarvo, jolla tarkoitetaan yliaallon ja perusaallon suuruuksien suhdetta, ja vaaka-akselilta komponentin järjestysluku (kuvio 1).

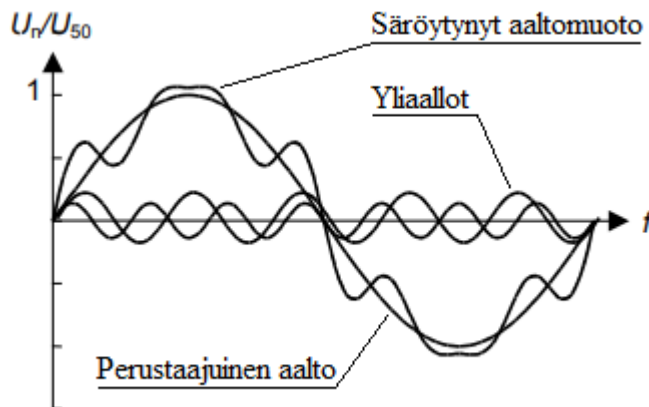


KUVIO 1. Diskreetti- eli viivaspektriesitys (Korpinen 2008, 4)

Sähkötekniikassa viivaspektriesitystä käytetään yleisesti harmonisten yliaaltojen esittämisessä.

3.2 Yliaaltojen määritelmä sähkötekniikassa

Sähköverkossa yliaaltoja syntyy, kun kuorma on epälineaarinen eli se muuttaa virran aaltomuotoa suhteessa syöttöjännitteeseen. Yliaaltovirta aiheuttaa syöttävässä verkossa jännitteen säröytymistä, jolloin jännitteen käyrämuoto poikkeaa perustaajuisesta aallosta (kuvio 2).



KUVIO 2. Yliaaltojen summautuminen perustaajuuteen (ABB 2000, muokattu)

Kuvio 2 havainnollistaa, miten suurempi taajuiset yliaallot summautuessaan perustaajuisen aaltoon, muuttavat sen muotoa.

Yliaallot ovat jännitteen tai virran perustaajuuden kerrannaisia. Esimerkiksi 50 Hz:n järjestelmässä 5. yliaalto on 250 Hz ja 7. yliaalto on 350 Hz eli järjestysluku on perustaajuuden aallon monikerta. Harmonisen yliaallon taajuus voidaan siis laskea kaavalla (15):

$$f_n = n \cdot f_0, \quad (15)$$

jossa n on yliaallon järjestysluku, joka on kokonaisluku ja f_0 on perustaajuus.

Erilaiset yliaaltolähteet aiheuttavat järjestysluviltaan eri yliaaltoja. Sähkötekniikassa yleiset yliaaltojen aiheuttajat, suuntaajat, tuottavat järjestysluviltaan sellaisia yliaaltoja, mitkä niiden pulssiluvut määrittävät. Yliaallon järjestysluku voidaan siis laskea kaavalla (16):

$$n = k \cdot p \pm 1, \quad (16)$$

jossa k on kokonaisluku ja p on suuntaajan pulssiluku (Korpinen 2008, 5).

Kolmivaiheiset suuntaajat tuottavat siis parittomia yliaaltoja: 5., 7., 11., jne. Parillisia yliaaltoja ei esiinny, jos aaltomuodot ovat symmetrisiä eli sähköverkossa ei ole tasakomponenttia, jolloin sinimuotoinen aalto alkaa origosta (Korpinen 2008, 7).

Yliaaltojen summautuessa perustaajuiseen siniaaltoon, aiheuttavat ne sen vääristymisen eli säröytymisen. Harmonisten yliaaltojen määrää perustaajuisesta aallosta kuvataan harmonisella kokonaissäröllä, särökertoimella, THD (Total Harmonic Distortion). THD voidaan määrittää esimerkiksi suhteessa jännitteen perustaajuiseen komponenttiin kaavalla (17):

$$\text{THD}_F(U) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}, \quad (17)$$

jossa U_n on n :s yliaaltojännite ja U_1 on perustaajuinen jännitekomponentti (Shmilovitz 2005, 1).

THD voidaan myös määrittää suhteessa jännitteen tehollisarvoon kaavalla (18):

$$\text{THD}_R(U) = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}} \quad (18)$$

(Shmilovitz 2005, 1).

Kaavassa (17) käytetään jännitteiden arvojen amplitudeja ja kaavassa (18) jännitteiden tehollisarvoja. Sähkötekniikassa suositaan THD_F :n käyttöä harmonisten yliaaltojen laskennassa. THD_R :n tarkkuus on huonompi, koska se ei ikinä voi ylittää arvoa 100 %. Korkeat särökertoimet ovat kuitenkin yleisiä elektronisilla kuormilla, jonka vuoksi THD_R on epätarkka laskentatapa yliaaltopitoisuuksille. Modernit tehoanalyysointit käyttävät diskreettiin Fourier'n muunnokseen (DFT) perustuvia algoritmeja THD-laskennassa (Shmilovitz 2005, 1–2).

Yliaallot voidaan jakaa harmonisiin sekä epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoniset yliaallot ovat edellä mainittuja, järjestysluvuiltaan kokonaislukuja. Epäharmoniset yliaallot sijoittuvat näiden väliin eli niiden taajuus ei ole kokonaisluvulla kerrottu perusaallon taajuus. Epäharmonisia yliaaltojännitteitä, joiden taajuudet ovat lähellä toisiaan, voi esiintyä samanaikaisesti muodostaen laajan spektrikaistan. Epäharmonisista yliaalloista ei ole tehty kattavia tutkimuksia, mutta niitä aiheuttavat hyvin epälineaariset kuormitukset kuten taajuusmuuttajat ja valokaariuunit. Epäharmonisten yliaaltojännitteiden on joissakin tapauksissa havaittu aiheuttavan välkyntää tai häiriöitä verkkokäskylaitteissa (SFS-EN 50160 2010, 10, 22).

Harmonisten yliaaltojen sekvenssi eli kiertosuunta voi olla positiivinen, nolla tai negatiivinen (taulukko 3). Positiivinen sekvenssi tarkoittaa, että yliaallot pyörittävät moottoria nopeammin kuin perustaajuus. Negatiivisen sekvenssin yliaallot pyrkivät hidastamaan moottorin pyörimistä. Molemmat aiheuttavat moottorin vääntömomentin pientymisen sekä moottorin ylikuumentumisen. Nollasekvenssin yliaallot kuten 3. harmonisen yliaalto summautuvat nollajohtimeen, joka voi ylikuumentua tämän takia (Fluke 2012, 57).

TAULUKKO 3. Harmonisten yliaaltojen sekvenssi (Fluke 2012, 57)

Yliaalto	1	2	3	4	5	6
Taajuus	60 Hz 50 Hz	120 Hz 100 Hz	180 Hz 150 Hz	240 Hz 200 Hz	300 Hz 250 Hz	360 Hz 300 Hz
Suunta	+	-	0	+	-	0

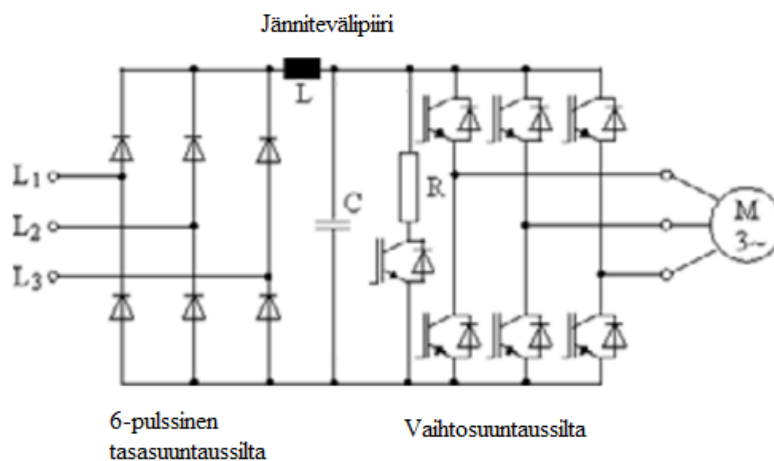
Yliaalto	7	8	9	10	11	...
Taajuus	420 Hz 350 Hz	480 Hz 400 Hz	540 Hz 450 Hz	600 Hz 500 Hz	660 Hz 550 Hz	...
Suunta	+	-	0	+	-	...

Taulukossa 3 on esitetty yliaaltojen järjestyslukuja ja niiden vastaavat taajuudet ja sekvenssit sekä 50 Hz:n järjestelmässä että 60 Hz:n järjestelmässä, joka on käytössä Pohjois- ja Keski-Amerikassa sekä läntisessä Japanissa.

3.3 Yliaaltojen lähteet teollisuudessa

3.3.1 Suuntaajat

Teollisuudessa yleisiä epälineaaraisia kuormia ovat suuntaajakäytöt eli taajuusmuuttajat, tasasuuntaajat, vaihtosuuntaajat ja tasasähkökatkojat. Kolmivaiheisissa järjestelmissä jännitettä tasasuunnataan yleisesti 6-pulssisillalla, jonka jälkeen sitä muokataan esimerkiksi hakkuriteholähteellä sähkölaitteella sopivaksi. Lisäksi tasasuunnattua jännitettä käytetään vaihtosuuntaukseen taajuusmuuttajissa (kuva 6).



KUVA 6. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajakäytön päävirtapiiri (Tuusa 1998, muokattu)

Suuntaajissa käytettävät puolijohdetekniikat aiheuttavat virran aaltomuodon muutosta suhteessa jännitteeseen. Suuntaajasilloissa voidaan käyttää esimerkiksi diodeja, transistoreja ja tyristörejä. Tasasasuuntaussilta toteutetaan usein tyristöreillä ja vaihtosuuntaus joko tyristöreillä tai GTO (Gate Turn Off thyristor) komponenteilla, joita ohjataan kanttiaalto-ohjauksella tai matalataajuisella PWM (Pulse-Width Modulation) modulaatiolla. Virtavälipiirillisiä taajuusmuuttajia käytetään tyypillisesti suuritehoisissa järjestelmissä (Hietalahti 2011, 95).

Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja voidaan toteuttaa myös IGBT –komponenteilla. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) –komponentit mahdollistavat nopean ohjauksen, mutta niiden alhaisen estojännitekestoisuuden takia, on niiden kanssa kytkettävä sarjaan diodit. Virtavälipiirillisen IGBT-komponenteilla toteutetun taajuusmuuttajan verkkosuuntaajan tehtävänä on pitää välipiirin virta sille annettussa ohjearvossaan. Ohjearvon säätö tapahtuu verkon puoleisen sillan välipiirin jännitettä säätämällä. Kuormalaitteen puoleisen sillan tarkoituksena on toteuttaa moottorin vaihevirtaohjeet. Tällaisessa järjestelmässä pyritään pitämään moottorin ja verkon virta mahdollisimman sinimuotoisena käyttämällä suodattimia (Hietalahti 2011, 96).

3.3.2 Valokaariuuni

Yliaaltoja synnyttävät metalliteollisuudessa käytettävät valokaariuunit. Sähköverkkoon ne aiheuttavat häiriöitä muun muassa kuorman epäsymmetrian ja taajuusvaihtelun takia. Valokaariuunin ottama sähkövirta on erittäin säröytynyttä, ja sen analysoiminenkin on vaikeaa. Muut teollisuudessa käytettävät uunit kuten vastusuunit eivät tuota yliaaltoja, koska ne käyttäytyvät verkon kannalta resistanssikuormana. Myöskään induktiouunit eivät aiheuta pahoja häiriöitä, koska niiden toimintaperiaate perustuu pyörrevirtoihin eli ne käyttäytyvät verkon kannalta samoin kuin suorat moottorilähdöt. (Korpinen 2008, 15).

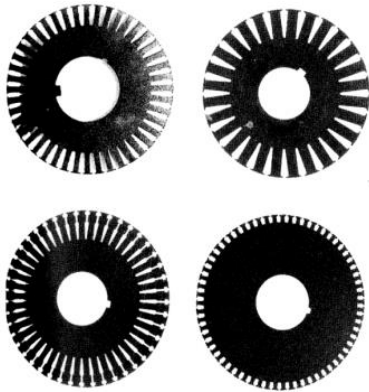
3.3.3 Muuntaja

Muuntajat ovat myös yliaaltolähde, mutta niiden tuottamat yliaallot ovat yleensä merkityksettömiä, jos niitä käytetään normaaliolosuhteissa. Jos muuntajan syöttöjännitettä nostetaan yli nimellisen, sen aiheuttamat yliaallot kuitenkin suurenevät

merkittävästi. Tämä perustuu muuntajan rautasydämen magneettiseen epälinearisuuteen. Rautasydämen magneettivuon tiheys ei kasva suoraan verrannollisesti magneettikentän voimakkuuteen nähden, jolloin magnetointivirta ei noudata syöttöjännitteen käyrämuotoa. Toisin sanoen muuntajan rautasydän kyllästyy. Täten muuntaja käyttäytyy selvästi epälineaarisenä kuormana, jolloin se tuottaa yliaaltoja (Korpinen 2008, 16–19).

3.3.4 Epätahtimoottori ja generaattori

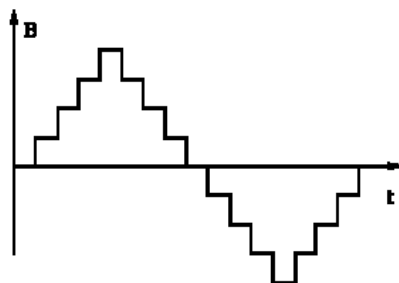
Epätahtimoottoreissa kuten oikosulkumoottoreissa käytetään urakäämityksiä sähkömotorisen voiman aikaansaamiseksi (kuva 7).



KUVA 7. Oikosulkumoottoreiden tyypillisiä urituksia (Halmesmäki 2010, muokattu)

Urakäämitykset moottorin roottorissa aiheuttavat yliaaltoja epätasaisen permeanssin eli magneettisen johtavuuden takia. Rauta on jakautunut epätasaisesti urien päällä sijaitsevalle levypaketin pinnalle. Permeanssi ja vuontiheys laskevat aina uran kohdalla ja kasvavat ”hampaan” kohdalla. Permeanssiin vaikuttaa myös urien raudan kyllästyminen sekä roottorin mahdollinen epäkeskeisyys liikkeessä sekä staattisessa tilassa. Permeanssin ja vuontiheyden epätasainen jakaantuminen roottorissa aiheuttaa urayliaaltoja, jotka synnyttävät vääntömomenteja, joita kutsutaan yliaaltovääntömomenteiksi. Nämä momentit aiheuttavat moottorissa hitaampaa kiihtymistä nimellispyörimisnopeuteen sekä tärinää ja ääntä. Yliaaltomomenttien vähentäminen perustuu moottorin tarkkaan suunnitteluun ja rakentamiseen. Yleinen tapa on esimerkiksi asettaa roottoriurat vinoon staattoriuriin nähden (Halmesmäki 2010, 20–23).

Myös staattorin käämitys vaikuttaa yliaaltojen syntymiseen. Koska se on jakaantunut erillisiin käämeihin, aiheuttaa se magnetomotorisen voiman, joka on portaallinen (kuvio 3).



KUVIO 3. Tyypillisen urakäämityksen vaikutus magneettivuon tiheyteen ajan funktiona (Korpinen 2008, 20)

Lähdejännitteen aaltomuoto johtuu epätasaisesti käämityksen jakaantumisesta staattorissa (Halmesmäki 2010, 20).

Generaattoreiden aiheuttamat yliaallot johtuvat samoista syistä kuin epätahtimoottoreidenkin. Niiden kehittämä jännite ei ole täysin sinimuotoista johtuen navan ja sen ilmvälän rakenteesta (Korpinen 2008, 21).

Asiakas ei voi suoraan vaikuttaa moottoreiden ja generaattoreiden yliaaltojen torjumiseen, mutta esimerkiksi sähkölaitteiston käytön johtajan on hyödyllistä ymmärtää näiden laitteiden aiheuttamat yliaaltojen haitat. Normaaleissa käyttöolosuhteissa generaattoreiden ja epätahtimoottoreiden aiheuttamat yliaallot ovat merkityksettömiä niin kuin muuntajienkin, mutta ongelmia syntyy, kun näitä laitteita käytetään ylikuormassa tai väärillä syöttöjännitteillä (Korpinen 2008, 18).

3.4 Yliaaltojen haitat

Yliaalloilla on verkon ideaalisen toiminnan kannalta haittavaikutuksia. Ne kasvattavat häviöitä voimansiirrossa ja verkon komponenteissa aiheuttaen ylimääräistä lämpenemistä, jonka seurauksena muun muassa eristeet vanhenevat nopeammin. Jännitteen aaltomuodon vääristyminen aiheuttaa myös laitteiden virhetoimintoja sekä mahdollisesti pahimmassa tapauksessa käyttökatkoja. Julkisella sektorilla yliaallot aiheuttavat häiriöitä puhe- ja radiotaajuudella tapahtuvaan viestiliikenteeseen sekä

elektronisiin laitteisiin. Resonanssi-ilmiöt ovat pahin yliaalloista johtuva sähköverkon häiriö. Esimerkiksi kuorman kapasitanssi ja muuntajan induktanssi voivat muodostaa vaarallisen rinnakkaisresonanssipiirin, jonka avulla yliaaltovirrat voivat kasvaa jopa 20-kertaisiksi piirin nimellisvirtaan nähden (Korpinen 2008, 22).

3.4.1 Resonanssi

Värähtelypiiri on sellainen sähköpiiri, jolla on ominainen resonanssitaajuus. Piiri voidaan rakentaa kelan ja kondensaattorin sarjaan- tai rinnankytkennällä. Tällaiset kytkennät viritetään tietylle taajuudelle, minkä takia niitä kutsutaan myös virityspiireiksi.

Resonanssilla tarkoitetaan sähköisessä värähtelypiirissä sellaista tilannetta, jossa piiriin syötetyn virran ja jännitteen välinen vaihe-ero on nolla. Toisin sanoen induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi kumoavat toisensa, jolloin piiriin jää pelkkä resistanssi. Kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi määritellään kaavalla (19):

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}, \quad (19)$$

jossa f on piirin taajuus ja C on kondensaattorin kapasitanssi (Mäkelä ym. 2014, 126).

Kelan induktiivinen reaktanssi puolestaan määritellään kaavalla (20):

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L, \quad (20)$$

jossa L on kelan induktanssi (Mäkelä ym. 2014, 126).

Reaktanssien määritelmistä on olennaista ymmärtää, miten taajuus vaikuttaa niihin. Taajuuden ollessa suuri kondensaattorin reaktanssi on pieni, ja kun lähestytään äärettömän suurta taajuutta, voidaan kondensaattori mallintaa matemaattisesti oikosulukuksi kaavalla (19):

$$X_C = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \lim_{f \rightarrow \infty} \frac{1}{\infty} = 0 \Omega.$$

Toisaalta taajuuden lähestyessä nollaa, kondensaattorin paikka voidaan mallintaa aukoksi virtapiirissä, koska reaktanssi kasvaa kohti ääretöntä. Asian ymmärryksessä auttaa muistaa, että kondensaattori tasavirtapiireissä, joissa taajuus on luonnollisesti 0, voidaan mallintaa avoimena kytkimenä.

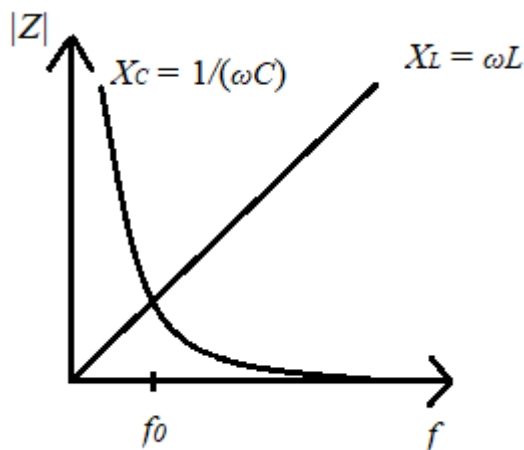
Kelan induktiivinen reaktanssi käyttäytyy päinvastoin eli taajuuden kasvaessa myös reaktanssi kasvaa. Täten, kun taajuus lähestyy ääretöntä, voidaan kela mallintaa matemaattisesti avoimena kytkimenä tai aukkona virtapiirissä kaavalla (20):

$$X_L = \lim_{f \rightarrow \infty} 2\pi \cdot f \cdot L = \lim_{f \rightarrow \infty} 2\pi \cdot \infty \cdot L = \infty \Omega.$$

Sarja- ja rinnakkaisresonanssien ehtona on siis, että värähtelypiirin induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret:

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Kuviossa 4 on havainnollistettu, miten taajuus vaikuttaa kelan ja kondensaattorin reaktansseihin.



KUVIO 4. Resonanssi- ja impedanssi taajuuden funktiona

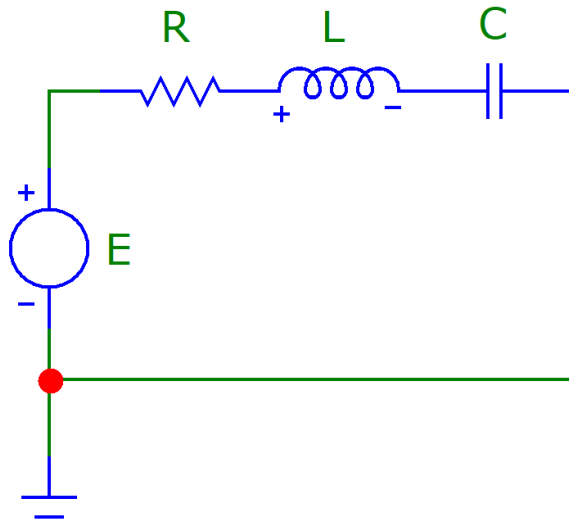
Kuviosta voidaan myös todeta resonanssiehto, joka on edellä mainittu värähtelypiirin induktiivisen ja kapasitiivisen reaktanssin yhtäsuuruus. Värähtelypiirin, jota voidaan nimittää myös RCL-piiriksi, resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla (21):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (21)$$

(Mäkelä ym. 2014, 127).

Kaavasta voidaan todeta, että verkon induktanssin pienentyessä resonanssitaajuus suurenee. Resistiivinen kuorma ei täten vaikuta resonanssitaajuuteen, mutta se pienentää muun muassa resonanssista johtuvien virtojen suuruutta.

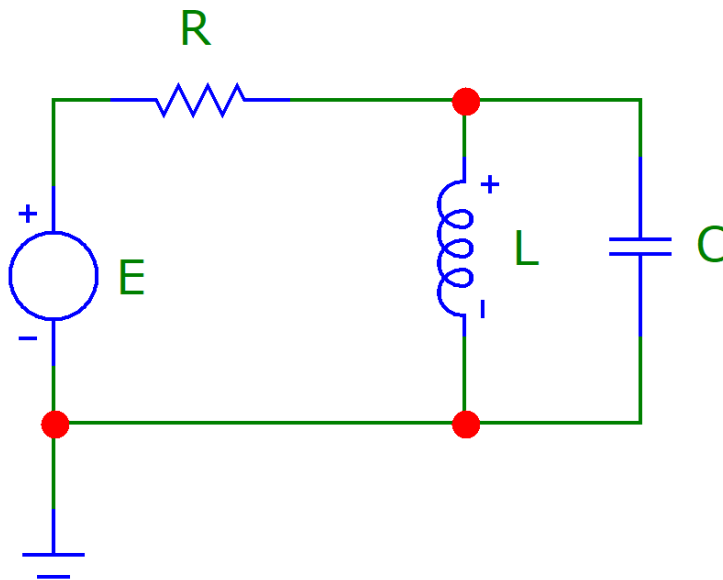
Sarjaresonanssi- eli jänniteresonanssipiiri on kelan ja kondensaattorin sarjaankytkentä eli kelan induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi ovat sarjassa (kuva 9).



KUVA 8. Sarjaresonanssipiirin simulaatiokytkentä

Sarjaresonanssissa piirin jännitteet voivat kasvaa moninkertaisiksi lähdejännitteeseen nähden. Sarjaresonanssipiirejä käytetään yliaaltosuodattimissa sekä estokelaparistoissa loistehon kompensointiin. Värähtelypiirissä viritetyn taajuinen jänniteyliaalto imeytyy pieni-impedanssisen reitin kautta maihin.

Rinnakkaisresonanssi- eli virtaresonanssipiirissä kelan induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi ovat rinnan (kuva 10).



KUVA 9. Rinnakkaisresonanssiin simulaatiokytkentä

Rinnakkaisresonanssi-ilmiö on sarjaresonanssia vaarallisempi. Se voi syntyä suuntaajan rinnalle kytketyn kompensointikondensaattorin ja syöttömuuntajan tai kuormien induktanssin välille. Resonanssiin impedanssi resonanssissa on suuri, jolloin jännite säröytyy. Käytännössä rinnakkaisresonanssi havaitaan piirissä kulkevan suuren virran takia. Normaalitylannetta paljon suurempi virta vioittaa kondensaattoreita ylikuumentamalla niitä (Korpinen 2008, 24).

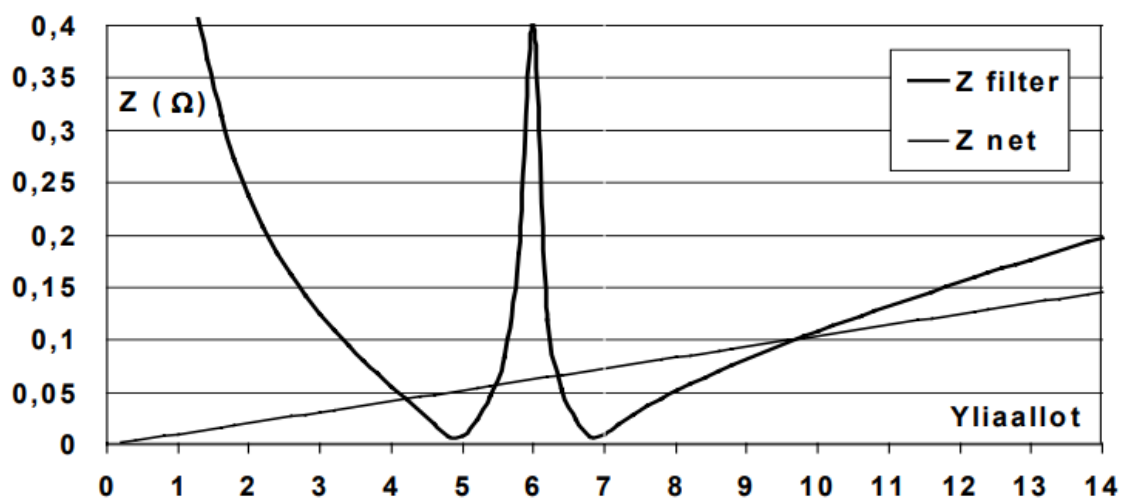
3.5 Yliaaltojen suodattaminen

Yliaaltoja voidaan vähentää kahdella eri tavalla: tekemällä rakenteellisia muutoksia vaihtovirtakäyttöisiin laitteisiin, millä voidaan estää yliaaltojen syntyminen, tai käyttämällä ulkoista suodatusta, jolla saadaan poistettua syntyneet yliaallot.

Yliaaltojen aiheuttamia haittoja torjutaan erilaisilla laitteilla, jotka asennetaan yleensä samaan pääkeskukseen kuin kompensoitava syöttö. Suodatinlaitteita on erilaisia, ja tehtäessä tehtäisiin kokonaisratkaisuja, on jokainen suodatusta tarvitseva keskus mitoitettava erikseen, koska yliaaltojen määrään vaikuttaa keskuksien perässä oleva epälineaarisen kuorman koko. Yliaaltohaittojen vähentämisessä on suositeltavaa valita ratkaisu teknillis-taloudellisesti järkevimmällä tavalla (Eronen 2018).

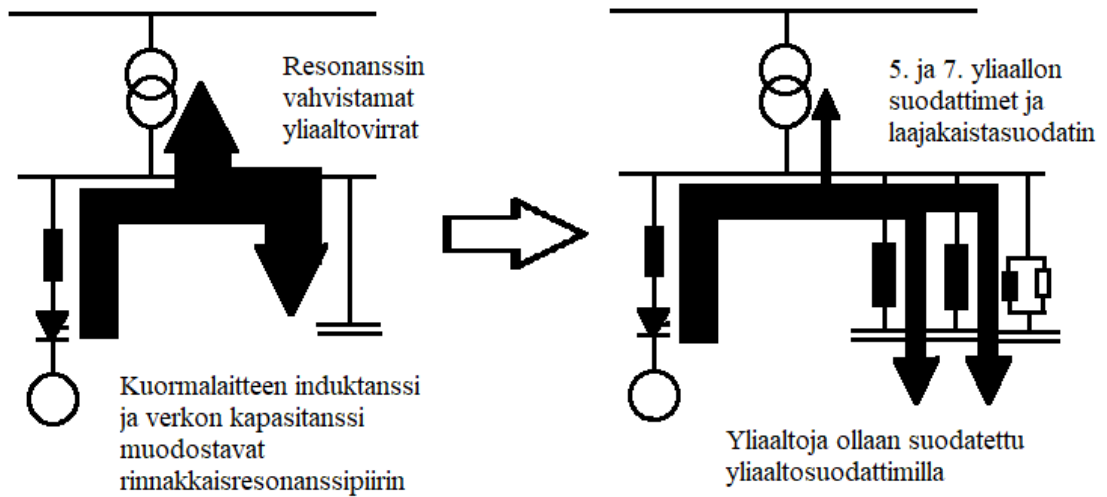
3.5.1 Passiivinen suodatin

Yleinen yliaaltojen kompensointitapa on passiivinen suodatin. Yksinkertaisin malli on sellainen, joka on viritetty vain yhdelle taajuudelle. Tällöin laite toimii imupiirinä. Imupiirit ovat sarjaresonanssipiirejä, jotka luovat sille yliaaltovirralle pieni-impedanssisen reitin, mille ne ovat suunniteltuja. Muilla taajuuksilla, etenkin perustaajuudella, imupiiri on järkevä suunnitella suuri-impedanssiseksi, jotta pätötehohäviöitä syntyy mahdollisimman vähän. Imupiirit kompensoivat myös suuren osan perusaallon loistehosta, koska ne ovat perustaajuudellaan kapasitiivisia, jolloin ne tuottavat verkkoon kapasitiivista loistehoa kumoten verkossa olevaa induktiivista loistehoa. Imupiirin toimintaa voidaan havainnollistaa kuviolla 5 (ABB 2000, 8–9).



KUVIO 5. 5. ja 7. yliaaltosuodattimen impedanssikäyrä (ABB 2000, 9)

Kuviosta 5 nähdään 5. ja 7. yliaaltosuodattimen, jotka ovat yleisimpiä tehdasympäristöissä käytettyjä suodattimia, impedanssikäyrä. Y-akselilla on impedanssin määrä ja x-akselilla on yliaallon järjestysluku. 5. ja 7. yliaallon kohdalla impedanssi on siis lähellä nollaa, jolloin sen taajuiset yliaallot ”imeytyvät” suodattimeen ja sitä kautta maahan pieni-impedanssisen reitin takia. Yliaaltosuodattimien toimintaa on havainnollistettu kuvassa 12.

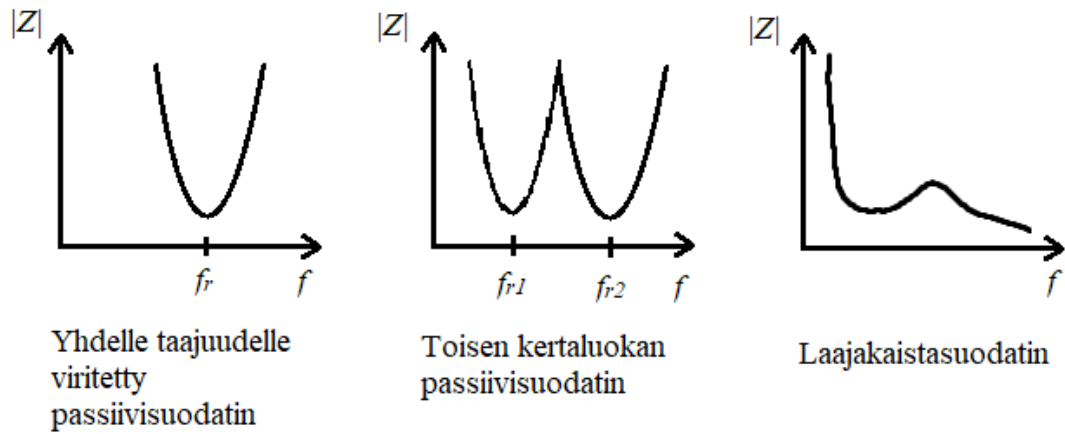


KUVA 10. Yliaaltosuodattimien vaikutus resonanssin vahvistamiin yliaaltovirtoihin (Korpinen 2008, muokattu)

Suodattimet kytketään samaan pääkeskukseen yliaaltoja aiheuttavan kuorman kanssa. Viritetyn taajuuden yläpuolella olevat taajuudet vaimenevat ja sen alapuolella olevat taajuudet vahvistuvat. Yleisesti passiivisia suodattimia kytketään useampi rinnan, joko vahvistamaan suodatusta yhdellä taajuudella tai suodattamaan useampaa eri yliaaltoa esimerkiksi 5.:n ja 7.:n yliaallon suodattimet (ABB 2001, 24).

Lisäksi voidaan käyttää useammalle taajuudelle viritettyjä yliaaltosuodattimia. Passiivinen yliaaltosuodatin voidaan viritellä toimimaan kolmen eri kertaluvun yliaallon suodatusta varten, mutta jos suodatettavia yliaaltoja on enemmän, täytyy käyttää laajakaistasuodatinta, joita on eri tyyppisiä. Laajakaistasuodattimen peruserätyksenä on kuitenkin vähentää kaikkia tiettyä taajuutta suurempia yliaaltotaajuuksia. Taloudellisesti järkevin kokonaisratkaisu on yleensä hankkia 250–550 Hz:n taajuuksille omat suodattimet ja suuremmille taajuuksille laajakaistasuodatin (Korpinen 2008, 33).

Kuviossa 6 on vielä esitetty eri passiivisuodattimien impedanssikäyrien erot.



KUVIO 6. Eri tyyppisten passiivisuodattimien impedanssikäyriä

Kuviossa 6 f_r on suodattimelle viritetty resonanssitaajuus.

Passiivisen, imupiirinä toimivan, yliaaltosuodattimen tehoa voidaan laajentaa kytkemällä laitteita rinnan. Passiivisten yliaaltosuodattimien vaarana on ylikompensoituminen syöttötaajuudessa ja itse verkossa. Tällaisen yliaaltosuodattimen valintaa täytyy harkita, koska sen tuomat uudet resonanssit voivat vahvistaa muiden taajuisia yliaaltoja. Kiinteän suodatinpariston heikkoutena on myös sen toiminnan jäykkyys; laite voidaan vain kytkeä päälle tai pois, eikä siinä ole säädintä ohjaamassa toimintaa (UTU Oy n.d., 3; ABB 2001, 24–25).

3.5.2 Estokelaparisto

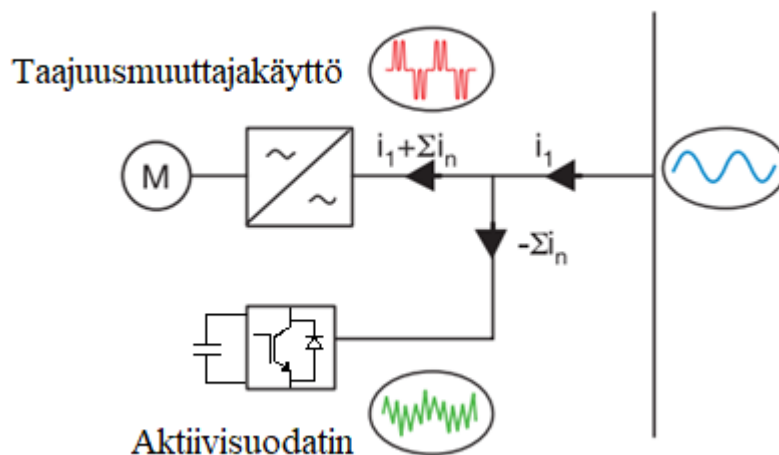
Estokelaparistoja käytetään sellaisissa sähköverkoissa, joissa esiintyy kompensoitavaa loistehoa sekä yliaaltoja, jossa jännitteen harmoninen kokonaissärö on yli 1 %. Estokelaparisto ei ole varsinaisesti yliaaltosuodatin, mutta sillä voidaan kuitenkin pienentää verkon jännitesäröä hieman (Eronen 2018).

Estokelaparistot sisältävät automaattisesti ohjaimella toimivia portaita, joilla verkkoon kytkeytyy tarvittava määrä loistehon kompensointia. Portaat ovat rautasydämisen kuristimen ja kondensaattorin sarjaresonanssiipiirejä, jotka viritetään sellaiselle taajuudelle, että sitä suuremmat taajuudet ovat induktiivisia ja sitä alemmat taajuudet kapasitiivisia. Kondensaattorin kapasitanssi on mitoitettu siten, että saadaan haluttu perustaajuinen kompensointiteho. Kuristimen induktanssi puolestaan sillä tavalla, että se muodostaa resonanssitaajuuden kondensaattorin kapasitanssin kanssa jollakin ei-

harmonisella taajuudella. Yleisesti resonanssitaajuutena käytetään epäharmonista taajuutta 189 Hz. Koska estokelaparistoissa käytetään kuristinta sarjassa kondensaattorin kanssa, kytkentävirtapiikit ovat huomattavasti pienempiä, noin 10-kertaisia, kuin pelkissä kondensaattoriparistoissa, joissa ne ovat noin 100-kertaisia (Areva 2009, 2, 10).

3.5.3 Aktiivisuodatin

Tehoelektroniikan kehittymisen seurauksena on markkinoille tullut laajenevissa määrin yliaalto-ongelmiin kehitettyjä aktiivisia suodattimia. Näiden toiminta perustuu aaltomuotojen tarkkailuun. Jos verkossa havaitaan yliaaltoja, suodattimen aktiiviohjaus säättää yliaaltosäröä syöttämällä verkkoon päin saman taajuisia, vastakkaissuuntaisia, yliaaltoja. Kun nämä eri vaiheessa olevat yliaallot summautuvat verkossa, syntyy perustaajuinen siniaalto (kuva 13).



KUVA 11. Nokian Capacitors Oy:n MaxSine aktiivisuodattimen toimintaperiaatekuva (Nokian Capacitors Oy 2008, 17, muokattu).

Kuvan 13 mukaista aktiivisuodatinta kutsutaan rinnakkaisaktiivisuodattimeksi, koska se on kytketty kuormalaitteen rinnalle. Tällaisella suodattimella voidaan myös kompensoida loistehoa sekä vaimentaa jo olemassa olevista passiivisuodattimista ja verkon impedansseista aiheutuvia resonansseja (Hietalahti 2011, 121).

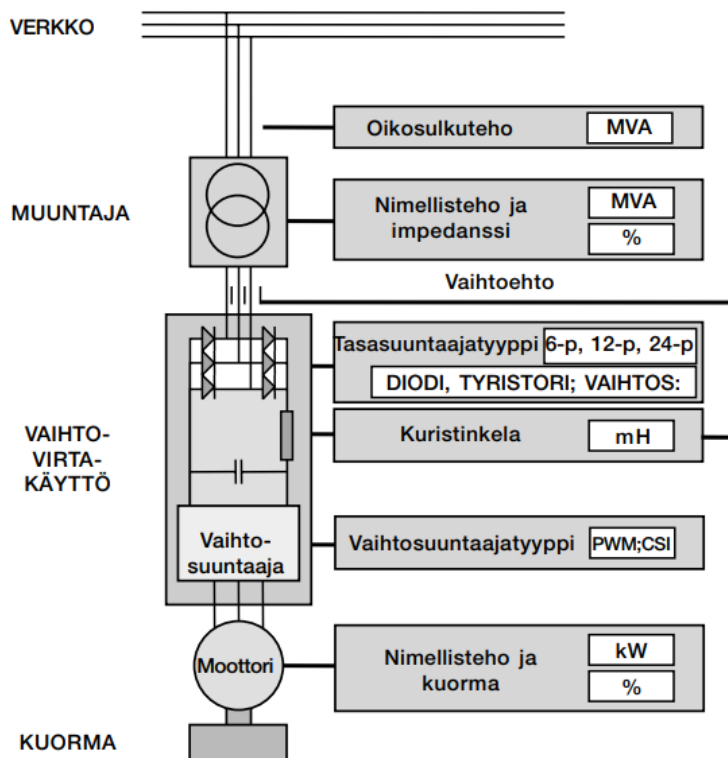
Aktiivisuodattimet ovat kalliita ratkaisuja tehoelektroniikan käytön vuoksi, eivätkä ne yleisesti sovellu taloudelliseksi vaihtoehdoksi suuriin teollisuusympäristöihin kuten

tässä opinnäytetyössä tarkasteltaviin taajuusmuuttajakeskuksiin, vaan niiden tyypillisiä käyttökohteita ovat nopeiden kuormitusvaihteluiden sovelluksissa sekä esimerkiksi tuulivoimaloissa ja hissi- sekä moottorikäytöissä (Areva 2009, 1).

3.6 Yliaaltojen vähentäminen rakenteellisilla muutoksilla

Yliaaltoja voidaan torjua tekemällä laitteisiin rakenteellisia muutoksia. Vaihtovirtakäytön syöttöä voidaan vahvistaa eli sen oikosulkukestoisuutta kasvattaa, suuntaajarakenteisiin voidaan tehdä muutoksia tai lisätä käytön sisälle suodatusta (ABB 2001, 17).

Kuvassa 14 on esitetty yliaaltoihin vaikuttavat vaihtovirtakäytön ominaisuudet.



KUVA 12. Yliaaltoihin vaikuttavat ominaisuudet tyypillisessä säädetyssä moottorikäytössä (ABB 2001, 17).

Oikosulkutehon kasvattaminen verkon puolella, suuremman muuntajan hankkiminen sekä tasasuuntaajakäytön pulssiluvun kasvattaminen kaikki pienentävät yliaaltoja. Kuorman puolella yliaaltoihin vaikuttaa moottorin nimellisteho ja kuorman suuruus suhteessa nimellisvääntömomenttiin. Suurempi moottori ja kuormasuhde molemmat saavat aikaan suurempia yliaaltoja (ABB 2001, 18).

3.6.1 Kuristinkelan käyttö

Yksi ratkaisu on lisätä suuntaajakäyttöihin kuristinkela eli käämi, joka lisää piiriin induktanssia. Kuristin voidaan kytkeä taajuusmuuttajien välipiiriin, jolloin se toimii DC- eli tasajännitevälipiirin kuristimena. Toisaalta kuristin voidaan myös asentaa verkosta otetun syötön puolellekin (ABB 2001, 21).

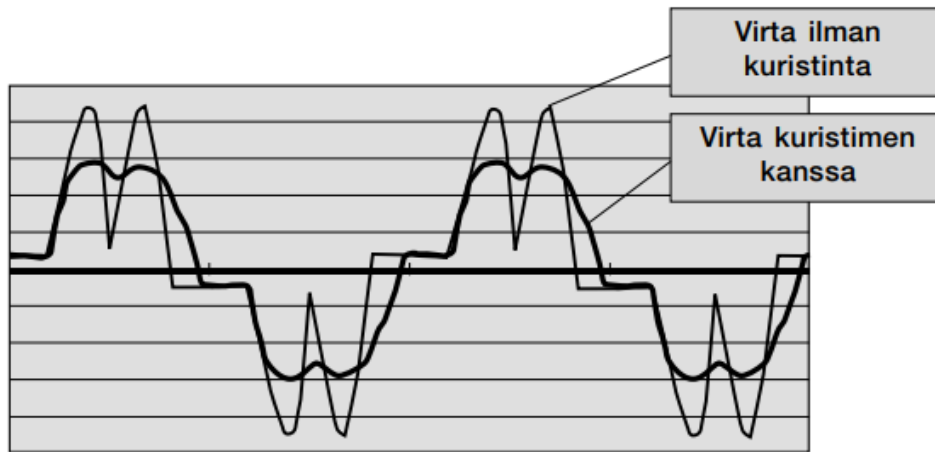
Kuristinkelan toimintaperiaate voidaan perustella Faradayn induktiolain sekä Lenzin lain avulla. Faradayn induktiolain mukaan johtimen ympäristössä muuttuva magneettikenttä indusoi johtimeen jännitteen, jonka virta on Lenzin lain mukaan suunnaltaan sellainen, että se pyrkii estämään muutoksen. Tätä ilmiötä kutsutaan itseinduktioksi, joka ilmenee myös virtapiireissä siten, että virta ei koskaan kytkeydy tai katkea täysin hetkellisesti. Itseinduktio korostuu, kun virtapiirissä on käämi, koska silloin piirin induktanssi on käytännössä sama kuin käämin induktanssi (Koskinen & Viljanen 2002, 84, 87).

Toisin sanoen käämissä syntyvä magneettikenttä pyrkii vastustamaan virran muutosta kaavan (22) mukaisesti:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt} \quad (22)$$

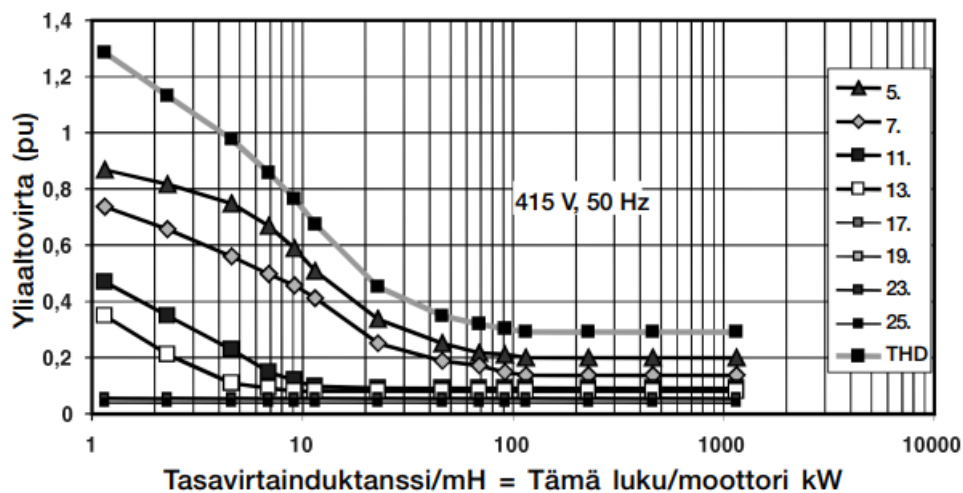
jossa ε on käämin itseinduktion jännite ja dI/dt on virran muutosnopeus (Mäkelä ym. 2014, 124).

Täten nopeat muutokset taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorin varausvirrassa voidaan hidastaa. Tätä ilmiötä voidaan havainnollistaa kuvion 7 avulla.



KUVIO 7. Kuristimen vaikutus taajuusmuuttajan ottamaan virtaan (ABB 2001, 21)

Tasasuuntaajan ottama virta on siis tasaisempaa kuristinkelaa käyttäessä, jolloin virtapiikit leikkaantuvat ja yliaaltovirrat pienenevät. Kuvioista 8 nähdään, miten kuristimen koko vaikuttaa harmonisiin yliaaltoihin.



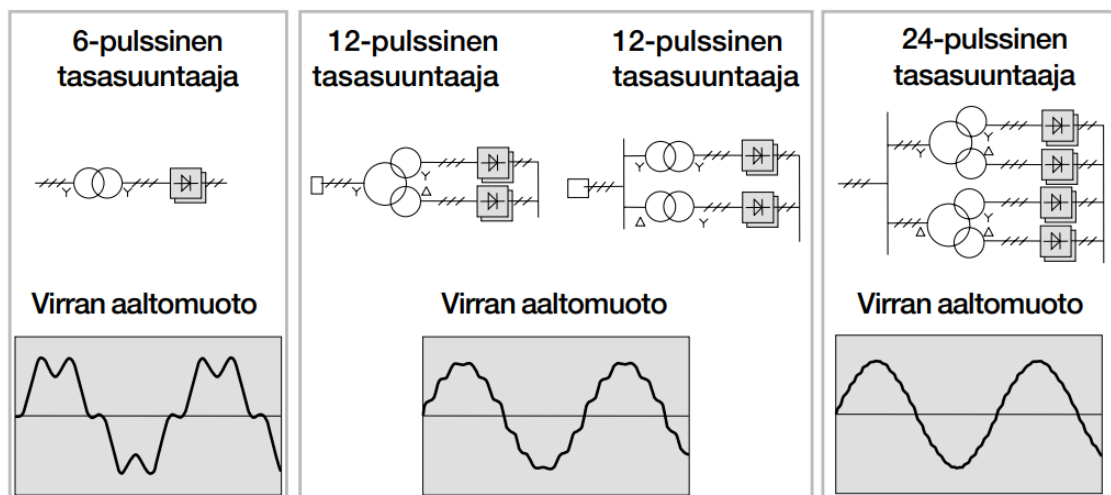
KUVIO 8. Yliaaltovirta tasavirtainduktanssin funktiona (ABB 2001, 22)

Ensimmäisten 25 yliaaltokomponentin teoreettinen harmonisen kokonaissärön minimiarvo on 29 %, joka saavutetaan, jos kuristinkelan induktanssi on 100 mH jaettuna moottorin kW:lla. Esimerkiksi 100 kW moottorissa tasakuristimen koko olisi 1 mH. Käytännössä kuristinkelan mitoittamisessa on järkevämpää pyrkiä harmonisen kokonaissärön arvoon 45 %, jolloin induktanssi on noin 25 mH jaettuna moottorin kW:lla. Tällöin 100 kW moottorissa se on 0,25 mH (ABB 2001, 22).

3.6.2 Suuntaajien pulssiluvun kasvattaminen

Toinen ratkaisu yliaaltojen vähentämiseen rakenteellisilla muutoksilla on lisätä suuntaajien pulssilukua. Tyypillinen 6-pulssisilta suuntaajaa koostuu 6 diodista eli jokaiselle vaiheelle on kaksi diodia. Tämä on vähimmäismäärä, jotta saadaan toimiva kokoaaltotasasuuntaaja. Siltoja voidaan myös lisätä. Esimerkiksi kaksi 6-pulssisiltaa rinnan muodostavat 12-pulssisillan. Rinnankytketyillä 6-pulssisilloilla on sama tasajännitevälipiiri, mutta niitä syötetään eri muuntajista tai yhdestä kolmikäämisestä muuntajasta.

Käytännössä nostamalla suuntaajien pulssilukua, saadaan suodatettua pienemmän kertaluvun yliaaltoja kuten 5. ja 7. yliaaltoa. Tämä voidaan perustella kaavalla (16). Myös 24-pulssin tasasuuntaajia voidaan käyttää. Ne ovat kalliita ratkaisuja ja vaativat aina erikoismuuntajien käytön (kuva 17), mutta soveltuvat hyvin suuritehoisiin käyttöihin. 24-pulssisen tasasuuntaajan etuna on, että lähes kaikki pienitaajuiset yliaallot saadaan torjuttua. Kuvassa 17 on esitetty tasasuuntaajan pulssiluvun vaikutus virran aaltomuotoon.




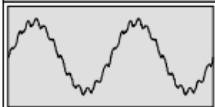
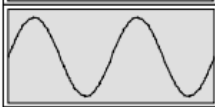
KUVA 13. Eri pulssisia tasasuuntaajia (ABB 2001, 18)

Kun käytetään kolmikäämistä muuntajaa, sen toisiot kytketään siten, että järjestelmän välillä syntyy 30 asteen vaihe-erokulma, joka toteutetaan käyttämällä toisessa toisiossa tähtikytkentää ja toisessa kolmiokytkentää. Kalliin rakenteen vuoksi kolmikäämisiä tai kahden muuntajan tasasuuntaajia käytetään lähinnä suuritehoisissa järjestelmissä kuten

laivakäytöissä, joissa verkon yliaaltopitoisuus olisi muuten kohtuuttoman suuri (Hietalahti 2011, 71).

Suuntaajissa voidaan myös käyttää diodien sijaan tyristoreja tai transistoreja, jolloin tehoa voidaan siirtää myös toiseen suuntaan. IGBT-transistorisillan tai lyhemmin IGBT-sillan etuna on säätömahdollisuus. Koska transistoreja voidaan syyttää halutulla tavalla, jolloin voidaan saavuttaa lähes sinimuotoinen syöttövirta vain pienillä yliaalloilla. Moottorille syötettävää jännitettä voidaan myös pitää korkeampana kuin syöttöjännite sellaisissa tapauksissa, joissa syöttävän verkon jännite jostain syystä putoaa. Tällä tavoin voidaan välttyä mahdollisilta tuotantokatkoksilta prosessiteollisuudessa. Tällaisten suuntaajakäyttöjen suurimpana haittana pidetään niiden korkeita kustannuksia (ABB 2001, 20–21).

Eri tyyppisten suuntaajien aiheuttamat virran ja jännitteen säröt on esitelty kuvassa 18.

Syöttö	Virta TDH (%)	Jännite TDH (%) RSC=20	Jännite TDH (%) RSC=100	Virran aaltomuoto
6-pulssinen tasasuuntaaja	30	10	2	
12-pulssinen tasasuuntaaja	10	6	1,2	
IGBT-syöttöyksikkö	4	8	1,8	

Särö on %:eina RMS-arvoista

KUVA 14. Ohjeelliset suuntaajien aiheuttamat säröt (ABB 2001, 20)

Kuvassa 18 nimitys Rsc tarkoittaa verkon oikosulkusuhdetta, joka on syötön oikosulkuteho yhteiskytkenäpisteessä suhteessa nimelliseen näennäistehoon. Kuten kuvasta 18 havaitaan, mitä suurempi suhde on sitä pienempi on jännitesärö (ABB 2001, 22, 28).

4 SÄHKÖN LAATU JA VAATIMUKSET

Suomessa ja muissa eurooppalaisissa maissa noudatetaan standardia SFS-EN 50160, jossa määritellään, kuvataan ja spesifioidaan jännitteen pääominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa yleisiin pien- keski- ja suurjännitteisiin vaihtosähköjakeluverkkoihin normaaleissa käyttöolosuhteissa. Standardin on vahvistanut Suomessa Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi myös määrittelee rajat tai arvot, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän eurooppalaisen yleisen jakeluverkon alueella. Standardi ei päde epänormaaleissa käyttöolosuhteissa, joiksi määritellään muun muassa tilapäiset syöttöjärjestelyt, tapaukset, joissa verkonkäyttäjän asennukset tai laitteet eivät täytä voimassa olevia standardeja, ja poikkeukselliset tapaukset kuten luonnonkatastrofit, ulkopuolisten aiheuttamat häiriöt ja työtaistelut (SFS-EN 50160 2010, 6).

Standardissa määritellään vaatimukset sähkön neljään ominaisuuteen: taajuus, suuruus, aaltomuoto ja kolmivaiheisen jännitteen symmetrisyys. Sähkön laadulla tarkoitetaan siis sähkön puhtautta. Pahimmassa tapauksessa huono sähkön laatu voi aiheuttaa prosessin katkeamisen, mutta usein häiriötekijöiden vaikutukset kerääntyvät hiljalleen, jolloin sähkön laadun heikkous on vaikeaa havaita. Yleinen syy teollisuuden pienjänniteverkoissa on uusien laitteiden hankinta, jolloin verkkoon voi tulla häiriöilmiötä niin, että sen laadulle asetetut raja-arvot ylitetään, ja aletaan havaita tuotantoprosessissa ongelmia kuten moottoreiden vajaatoimintaa, valojen välkyntää tai virheitä verkkokäskylaitteissa. Laatumittauksilla kuten tässä opinnäytetyössä tehdyillä yliaalto- ja loistehomittauksilla saadaan tietoa sähköverkon laadusta.

4.1 Harmoniset yliaaltojännitteet

Standardissa SFS-EN 50160 määritellään vaatimukset harmonisille yliaaltojännitteille järjestyslukuun 25 saakka. Harmonisten yliaaltojännitteiden raja-arvot on esitelty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. SFS-EN 50160 –standardissa määritellyt harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
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	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssilanteiden vuoksi.

Standardissa on myös määritelty, että jakelujännitteen harmonisen kokonaissärökertoimen, jonka laskemisessa on otettu huomioon kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvulle 40 asti, tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 % (SFS-EN 50160 2010, 22).

Vaikka standardi salliikin 8 % jännitesärön, verkossa voi olla myös tätä suurempiakin säröjä, eikä se ole niin sanotusti kiellettyä. On olemassa myös kohteita, joissa jännitesärö ylittää 12 %, eikä asiakas koe, että se tuottaisi ongelmia, joten myöskään yliaaltoja ei ole suodatettu pois. Usein halutaan kuitenkin, että sähkö on virallisten rajojen puitteissa. Jännitesärö 8 % on myös monien verkossa olevien sähkölaitteiden valmistajien lupaama yläraja, jonka ylityksessä saattaa sulakkeita laueta ja laitteita rikkoontua, eivätkä ne enää ole takuun piirissä, koska vika on tällöin sähkön laadussa eikä itse laitteissa. Prosessiteollisuudessa kuten sellutehtaalla on sähkön laatu järkevää pitää standardin rajoissa, koska laitteiden mahdollinen hajoaminen särön takia voi pahimmassa tapauksessa keskeyttää tehtaan tuotannon, jolloin puhutaan, tuotantolaitoksesta riippuen, jopa satojen tuhansien eurojen tappioista per vuorokausi. (Eronen 2018).

4.2 Harmoniset yliaaltovirrat

Yliaaltovirtoja tarkastellaan niiden absoluuttisilla ampeeriarvoilla. Virran kokonaissäröprosentti ei ole niin tärkeä kuin jännitteellä. Yliaaltovirroille ei ole olemassa yhtä laajasti ohjeellisia raja-arvoja kuin harmonisille yliaaltojännitteille, mutta

niille on määritelty suosituksia kirjallisuudessa. Voidaankin todeta, että verkon jännitesärön ollessa standardin SFS-EN 50160 määrittelemissä rajoissa, yliaaltovirtoja ei ole tarpeellista huomioida (Eronen 2018).

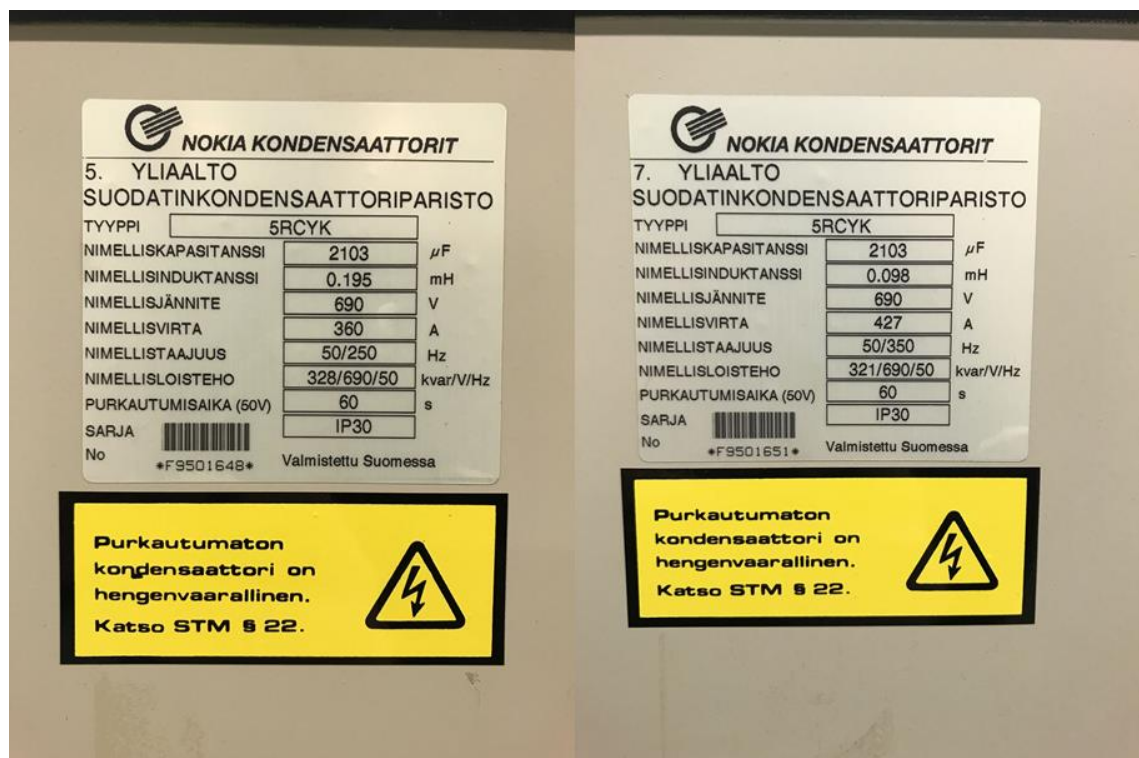
Standardissa IEC 61000-3-2 on määritelty harmonisille yliaaltovirroille raja-arvoja, mutta standardi pätee vain alle 16 A syöttövirroille vaihetta kohdin. Standardissa virrat on jaettu neljään ryhmään. Ryhmään A kuuluu muun muassa kolmivaiheiset laitteet kuten kodinkoneet sekä laitteet, jotka eivät kuulu muihin ryhmiin. Ryhmään B luokitellaan esimerkiksi sähköiset siirrettävät työkalut. Ryhmään C kuuluu valaistuslaitteet ja Ryhmään D elektroniset laitteet kuten tietokoneet, televisiot ja näyttöpaneelit, joiden tehot ovat pienempiä tai yhtä suuria kuin 600 W. Standardi IEC 61000-3-2 ei päde ammattilaitteille, joiden teho ylittää 1 kW (EPSMA 2010, 3–6).

Tässä opinnäytetyössä ei siis vertailtu harmonisia yliaaltovirtoja standardiin IEC 61000-3-2.

5 NYKYISET LAITTEET

5.1 Yliaaltosuodatinkondensaattoriparisto

Tehtaalla käytettävät yliaaltosuodattimet ovat Nokian Capacitors Oy:n, nykyisen General Electricin, valmistamia. Laitteet oltiin suunniteltu vanhoille Siemensin taajuusmuuttajakäyttöille, ja niillä suodatettiin 5. ja 7. yliaaltoa. Yliaaltosuodatin koostuu kelan ja kondensaattorin sarjaankytkennästä, jotka muodostavat sarjaresonanssipiirin. Kondensaattoriyksiköitä oli yhteensä 5 per kaappi, ja ne oltiin kytketty rinnan. Yliaaltosuodattimia oli 690 V:n ja 400 V:n jännitteille. Kuvassa 19 on esitetty 690 V:n yliaaltosuodattimien kilpiarvot. Yliaaltosuodattimen kilvessä ilmoitetaan laitteen nimellinen kapistanssi, induktanssi, jännite, virta, taajuus ja loisteho sekä purkautumisaika, kotelointiluokka, tyyppikoodi ja sarjanumero.



KUVA 15. 690 V -jännitetason yliaaltosuodattimien kilpiarvot

Kuvassa 20 on esitetty 400 V:n yliaaltosuodattimen kilpiarvot, ja kuvassa 21 on yliaaltosuodatinkaappi, jonka ovi on avattu.



KUVA 16. 400 V -jännitetason yliaaltosuodattimien kilpiarvot



KUVA 17. Yliaaltosuodattimen ovi avattuna

Kuvasta 21 nähdään, että yliaaltosuodattimen peruskomponentteihin kuuluu kontaktori, joka on sijoitettu kaapissa kelojen päälle. Kondensaattoreiden jäähdyttämistä varten on kaapin oveen asennettu tuuletin. Kontaktorin alle on kytketty lämpörele, jolla suojataan kondensaattoriyksiköitä ylikuumentumiselta. Kontaktorin vieressä on laitteen apujännitepaneeli, jossa sijaitsee muun muassa sulake sekä apureleitä (kuva 22).



KUVA 18. Yliaaltosuodattimen kontaktori, lämpörele sekä apujännitepaneeli

Laitteet olivat yhdelle taajuudelle suunniteltuja passiivisuodattimia eli imupirejä. Useassa keskuksessa 5. yliaallon suodatusta oltiin vahvistettu kytkemällä 5. yliaallon suodattimia kaksi tai kolme kappaletta rinnakkain. Tarkat nykyisten laitteiden lukumäärät on esitetty mittaustuloksien tarkastelussa.

5.2 Taajuusmuuttajat

Opinnäytetyössä tutkittujen keskuksien kuormana oli ABB:n ja Siemensin valmistamia taajuusmuuttajakäyttöjä. Tässä työssä on esitelty ABB:n taajuusmuuttajia, koska Siemensin laitteet, joiden malli on 6SE70, on tarkoitus purkaa pois ja asentaa tilalle uudet ABB:n valmistamat laitteet. Tästä kohtaa eteenpäin, kun työssä mainitaan tehtaan taajuusmuuttajat, tarkoitetaan ABB:n uusia laitteita, jollei erikseen mainita toisin.

Tehtaan taajuusmuuttajat ovat suurimmaksi osaksi ABB:n ACS800- ja ACS880-malliston taajuusmuuttajia. ACS880-07 on ABB:n ACS880 –tuotemalliston kaappiin asennettavat taajuusmuuttajat, jotka ovat kooltaan 2,8 MW:iin asti. Suuritehoiset mallit on asennettava lattialla seisoviin kaappeihin, mutta tehtaalla on myös käytössä pienempiä ACS880-01 –taajuusmuuttajia, jotka ovat seinälle asennettavia malleja, joiden suurin mahdollinen koko 250 kW. Lisäksi tehtaalla on käytössä vanhempia ACS800 –malliston kaappiin asennettavia taajuusmuuttajia, joiden suurin mahdollinen koko on myös 2,8 MW. Mittaustuloksien käsittelyssä on esitetty tarkemmin jokaisessa keskuksessa käytettävät laitteet (ABB 2008, 2015, 2017).

Taajuusmuuttajan koko määrittyy sen verkkojännitteen ja valmistajan ilmoittaman tehon perusteella, jos se mitoitetaan käyttöön, jossa ei ole ylikuormitustilanteita. Vaihtelevan kuormitusmomentin käytöissä taajuusmuuttaja täytyy mitoittaa siten, että lasketaan kuormitustilanteiden vastaavat moottorin virrat. Taajuusmuuttajan terminen ylikuormitettavuus on moottoriin nähden pienempi, joten se joudutaan mitoittamaan suurimman käytössä esiintyvän moottorin virran perusteella. Täten taajuusmuuttajan teho määräytyy siis suurimman tarvittavan virran perusteella (Hietalahti 2012, 39).

Taajuusmuuttajan tyyppikoodi sisältää tietoa taajuusmuuttajan teknisistä ominaisuuksista ja kokoonpanosta. Ensimmäiset merkit, esimerkiksi ACS880-01-12A6-3, ilmaisevat peruskokoonpanon. Seuraavaksi koodissa käyvät ilmi valitut lisävarusteet eroteltuna. Alla olevassa taulukossa 5 on esitelty tehtaan taajuusmuuttajissa käytettäviä lisävarusteita. Huomioitavaa on, että kaikkia moduuleita ei voida käyttää kaikissa taajuusmuuttajissa (ABB 2017, 35).

TAULUKKO 5. Tehtaalla käytettäviä taajuusmuuttajien lisävarusteita

Koodi	Kuvaus
E205	du/dt –suodin
E208	Common mode –suodin
H359	Lisäkaappi moottorikaapeloinnille
L500	FIO-11 analoginen I/O –laajennusmoduuli
L525	FAIO-01 analoginen I/O –laajennusmoduuli
L504	Ylimääräinen riviliitin
F250	Pääkontaktori
F260	Sisäiset vaihtovirtasulakkeet
F253	Ohjauskytkin
Q951	Hätäpysäytys –painike

6 MITTAUKSET

Sähkön laatumittauksilla voidaan todeta keskuksen kiskostossa oleva jännite- ja virtasärö sekä harmonisten yliaaltojen suhteelliset arvot. Tärkeimpiä tuloksia sähkönlaadun kannalta tämän työn mittauskohteissa ovat harmoninen kokonaissärö, harmonisten yliaaltojen suhteelliset arvot sekä keskuksen loistehon määrä. Mittauksissa käytettiin Fluke 435 II –sähkönlaatu ja energia-analysaattoria.

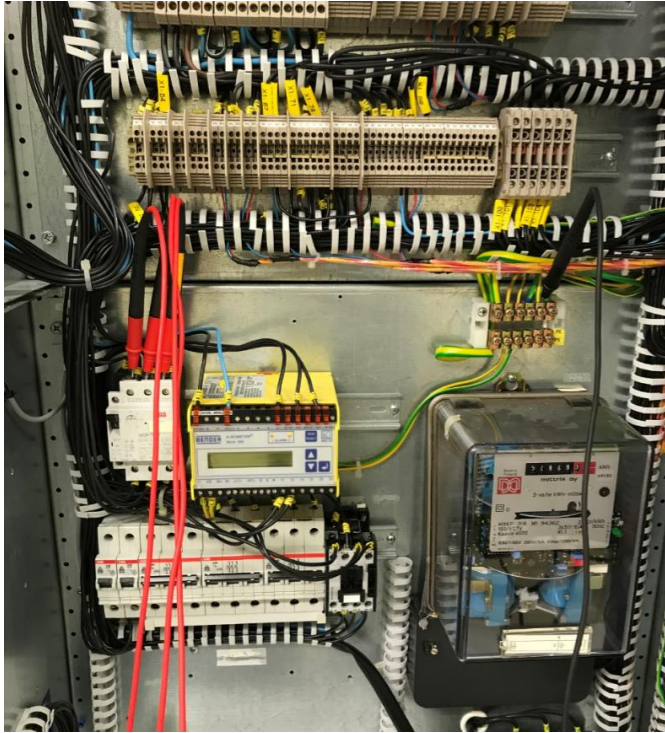
Taajuusmuuttajakeskuksia oli 690 V:n ja 400 V:n jännitetasoissa. Taajuusmuuttajakeskukset 690 V:n jännitetasossa olivat rakennettu identtisesti toisiinsa nähden, joten mittauskytkentä oli aina samanlainen. Vaihejännitteiden mittauspaikat olivat eri 400 V:n keskuksissa, mistä ne otettiin sulakkeiden liittymispisteistä. Keskuksien kuormat ovat tasaisia riippumatta tehtaan tuotantotavoitteesta, joten mittaustulosten saamiseksi riitti 5-10 minuutin keräys.

6.1 Mittauksen suorittaminen

Mittauksien suorittamisessa piti noudattaa yleistä sähkötyöturvallisuutta standardin SFS 6002 mukaisesti. Ennen sähkötiloihin käyntiä oli ilmoitettava osaston valvomoon suoritettavasta työstä. Tämä on osa Metsä Fibren turvallisuusvaatimuksia, ja sen avulla valvomo pystyy paremmin tarkkailemaan työturvallisuutta sekä minimoimaan mahdollisia työtapaturmia. Tämän lisäksi oli noudatettava varustemääräyksiä. Tehtaalla vaaditut vähimmäissuojavarusteet työskentelyä varten ovat suojakypärä ja –lasit sekä turvakengät ja rikkivetymittari.

Sähkötiloissa työskentelyssä ei vaadita suojalaseja, mutta on huomioitava sähkötyöturvallisuus. Keskuksen oven avaamisen jälkeen tehtiin aina aistinvarainen tarkastelu mahdollisten paljaiden johtimien tai muiden riskitekijöiden varalta. Sähkön laatumittaukset voidaan tehdä joko ensiö- tai toisiomittauksina. Keskuksien kiskostojen asettelun takia mittauksia ei päästy suorittamaan ensiöpuolelta, joten mittaukset otettiin toisiosta. Toisiopuolen mittaukset piti huomioida myös analysaattorin asetuksissa; virtamuuntosuhde piti asettaa oikeaksi, jotta saatiin oikean mittaluokan tuloksia. Virtamuuntosuhde voitiin tarkistaa keskuksen virtamittareiden tauluista tai keskuksen kilpiarvoista.

Mittariin kytkettiin mitattavan keskuksen vaihejännitteet ja –virrat sekä maajohdin. Vaihejännitteet saatiin mitattua maasulun valvontareleen liittimistä ja virrat virtamittareiden johtimista. Maadoitusjohdin voitiin kytkeä mihin vain maadoituspisteeseen. Kuvassa 23 on esitetty vaihejännitteiden ja maan mittauspaikat.



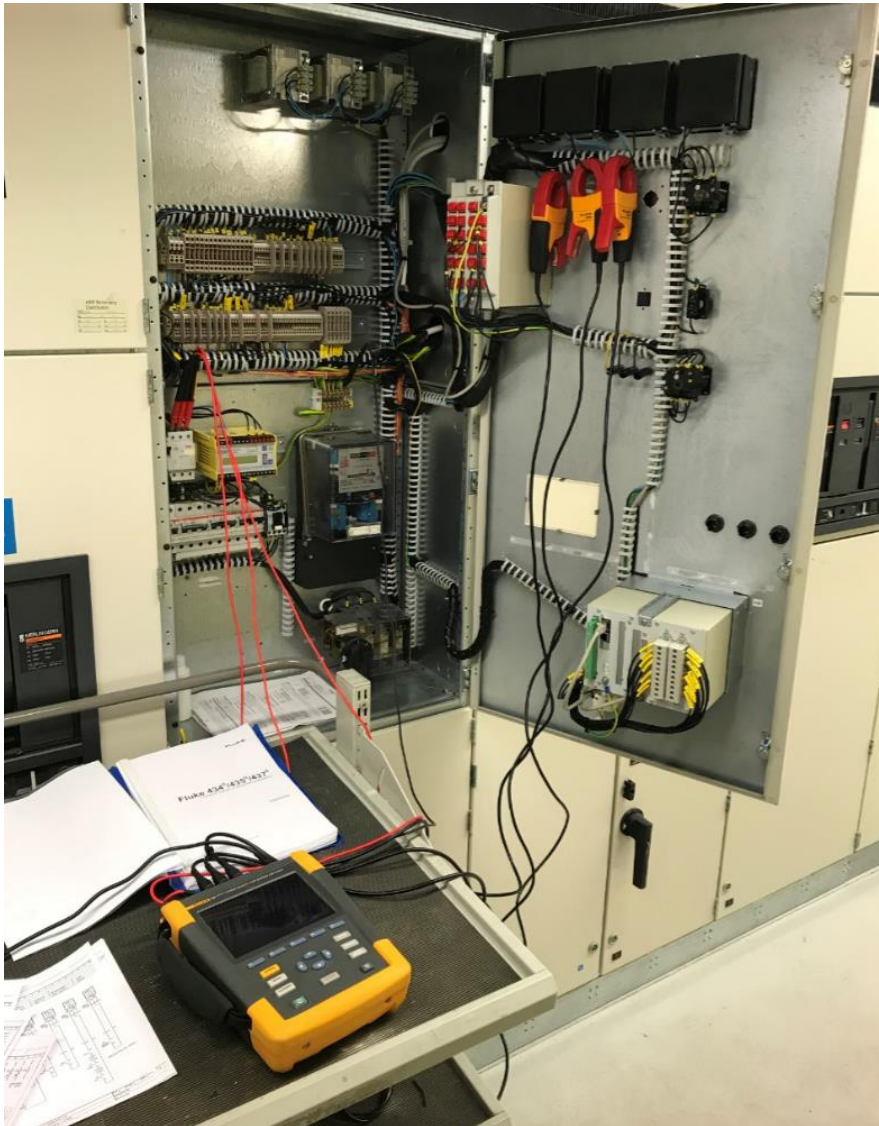
KUVA 19. Vaihejännitteiden ja maan mittauspaikat

Kuvassa 24 on virtamittarien tulojohtimiin asetettu virtapihtimittaukset.



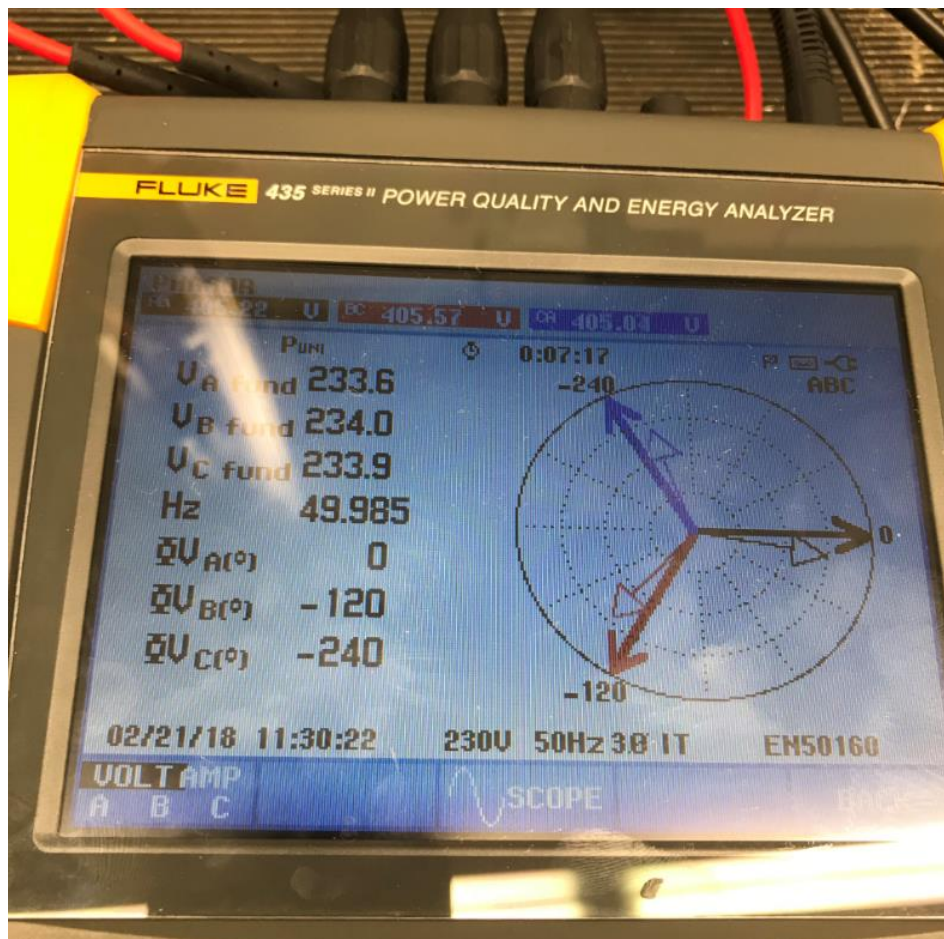
KUVA 20. Virtapihtien sijoitus

Kytkemisjärjestys ei vaikuttanut mittaustuloksiin, mutta oli sähkötyöturvallisuuden takia järkevää kytkeä ensin maajohdin, jonka jälkeen virtapihdit ja lopuksi jännitteet. Sähkön laatumittaukset suoritettiin kuvan 25 mukaisesti.



KUVA 21. Sähkön laatumittauksien mittauskytkentä

Vaihejännitteiden ja –virtojen mittauspaikat piirikaaviossa on esitelty liitteissä 2 ja 3. Fluke 435 II –analysointilaitteella voidaan tarkistaa vaihejärjestys ja virtojen suunta vektoriesityksen avulla (kuva 26).



KUVA 22. Fluke 435 II -analysoitsattorin virtojen ja jännitteiden vektoriesitys

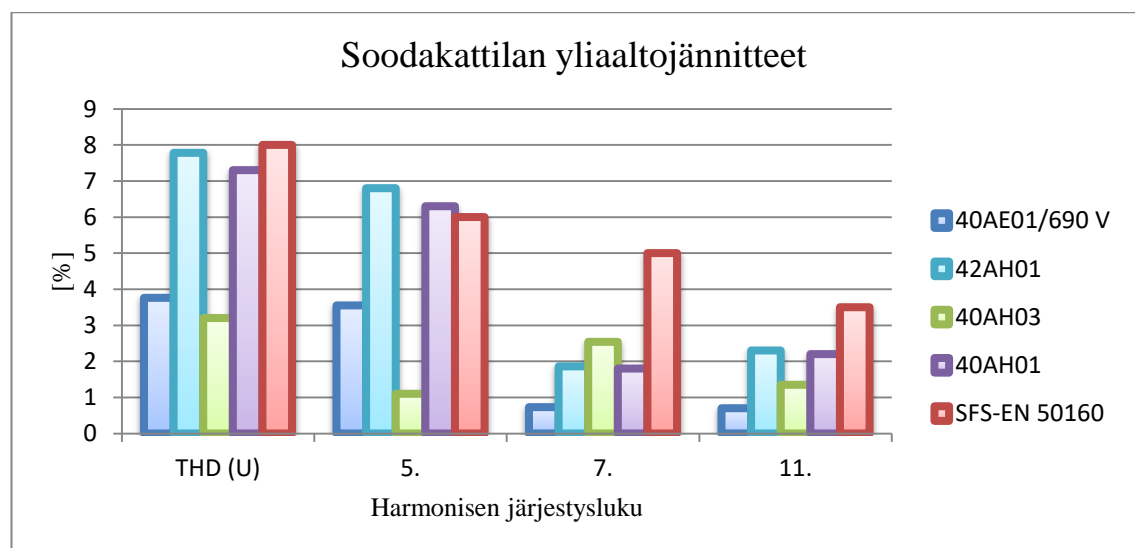
Pidemmät nuolet kuvaavat jännitteitä ja lyhyemmät, ohuemmat, nuolet ovat virtoja. Kuvassa 26 keskuksen pääjännite on 400 V, ja virta on jäljessä jännitettä eli kyseessä on induktiivinen piiri.

Mittauksissa käytettiin hyödyksi mittarin logger –toimintoa, jonka avulla voitiin valita, mistä suureista kerättiin dataa, mittauksen kestoaiika sekä mittauksien aikaväli. Mittaustuloksia voitiin tarkastella Fluken Power log –ohjelmalla interaktiivisesti. Tähän työhön on kerätty mittaustuloksista olennaisimmat tulokset eli harmonisten yliaaltojännitteiden ja –virtojen suhteelliset arvot sekä loistehon määrä jokaiselta osastolta. Lisäksi mittaustuloksista on laadittu spektriesitykset havainnollistamaan saatuja tuloksia verrattuna standardin SFS-EN 50160 suosittelemiin raja-arvoihin. Spektriesityksissä on esitetty viidennen, seitsemännen ja yhdennentoista komponentin arvot sekä harmoninen kokonaissäröprosentti. Suuremman taajuisia harmonisia yliaaltojännitteitä ja –virtoja ei ole esitetty, koska niiden osuus suurimmassa osassa mitattuja kohteita oli merkityksetön ja koska siten kuviot olivat helpommin luettavissa.

Kokonaisvaltaiset mittaustulokset ja päätelmät on koottu keskuksien omiin alaotsikoihin, joissa on myös listattu kohteissa käytössä olevat taajuusmuuttajilla säädetyt käytöt sekä mahdolliset kompensointilaitteet. Keskuksien mittaustuloksien jälkeen on esitetty suositellut laiteratkaisut, joiden avulla kohteiden sähköverkon laatu saadaan parannettua standardin SFS-EN 50160 mukaiseksi ja saadaan kohteiden loistehoa kompensoitua taloudellisesti järkevällä tavalla. Laitteiden valinnassa oli tässä opinnäytetyössä mukana General Electric Grid Solutions Oy:n Tampereen yksikön laitesuunnittelijat sekä myynti-insinööri Mikko Eronen. Suositeltujen uusien laitteiden tarkat tekniset tiedot sekä tarjoushinta on jätetty tästä opinnäytetyöstä pois. Suunniteltujen kompensointilaitteiden nimellistehot ja porrastukset on kuitenkin esitetty lyhyesti kohteiden alaotsikoissa.

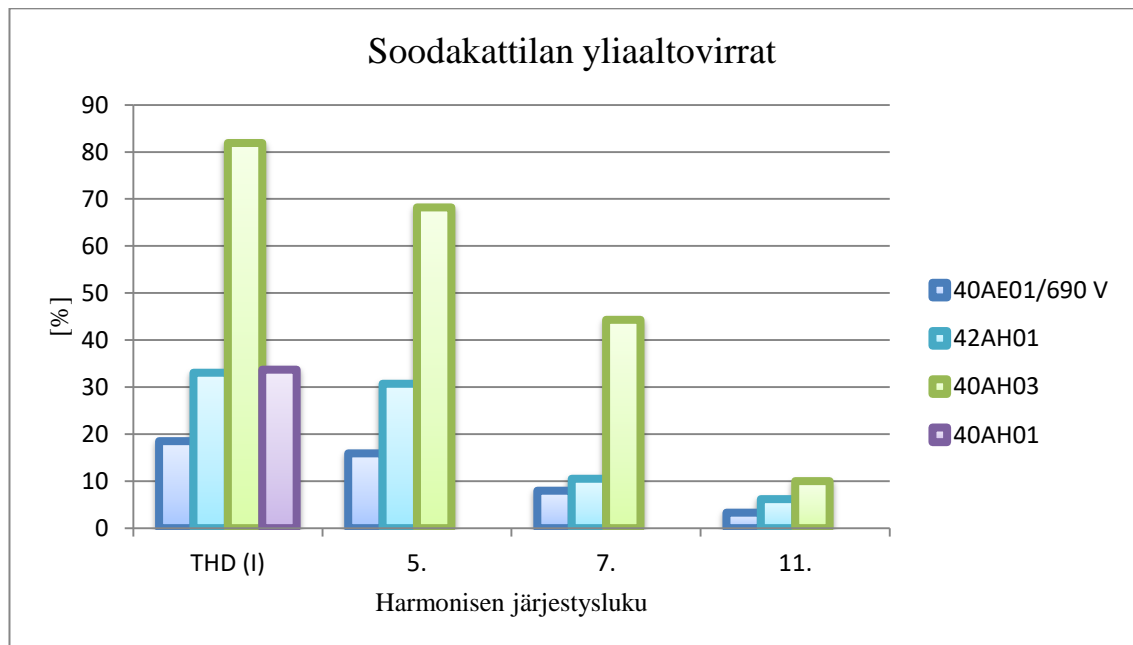
6.2 Soodakattila

Jokainen sellutehtaan osasto on riippuvainen toisistaan, mutta soodakattilaa voidaan pitää tärkeimpänä siinä mielessä, että se on kallein yksittäinen osa tehtaalla. Kattilan ikä vastaa yleensä tehtaan ikää. Soodakattilan tarkoituksena on ottaa talteen tuotantoprosessin kemikaalit ja muodostaa niistä uudelleen käytettäviä. Soodakattilalla poltetaan mustalipeää, mikä tuottaa lämpöä, joka otetaan talteen, minkä jälkeen sitä voidaan hyödyntää prosessissa höyrynä tai sillä voidaan tuottaa turbiinin avulla sähköä. Soodakattilalla taajuusmuuttajakeskuksia on neljä. Soodakattilan harmonisten yliaaltojännitteiden spektriesitys on kuviossa 9.



KUVIO 9. Soodakattilan taajuusmuuttajakeskuksista mitatut yliaaltojännitteet

Kuviosta 9 voidaan havaita, että keskuksien 40AH01 ja 42AH01 jännitteen 5. yliaallon suhteellinen arvo ylittää standardissa SFS-EN 50160 määritellyn 6 % raja-arvon. Kuviossa 10 on esitetty soodakattilan taajuusmuuttajakeskuksien yliaaltovirtojen spektriesitys.



KUVIO 10. Soodakattilan taajuusmuuttajakeskuksista mitatut yliaaltovirrat

Kuviossa 10 on huomionarvoista suuri virran 5. yliaallon suhteellinen arvo keskuksella 40AH03, jonka syy on todennäköisesti jonkin laitteen virheellinen toiminta joko mitoitusvirheen tai vian takia. Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan ollut mahdollista tutkia, mikä on korkean särökertoimen aiheuttaja. Kyseinen yliaaltovirta ei kuitenkaan aiheuta selvää haittaa tuotannossa, koska sen absoluuttinen arvo, joka voidaan todeta keskukselta otetuista mittaustuloksista alaotsikossa 40AH03, on melko pieni. Esimerkiksi tyypilliset yliaaltovirtojen aiheuttamat riskit kuten kiskoston ja liittimien lämpeneminen ovat pieniä tässä tapauksessa.

Jännitesärö pysyy kuitenkin maltillisena kyseisellä keskuksella (kuvio 9). Tämä voidaan selittää sillä, että keskuksen syöttävän verkon oikosulkusuhte on suuri. Jännitesärö tietyllä virtasäröllä riippuu verkon oikosulkusuhteesta R_{sc} . Tätä on myös havainnollistettu kuvassa 18.

Muiden keskuksien yliaaltovirrat noudattavat hyvin teoreettista suuntaajakäyttöjen aiheuttamaa virran säröytymistä.

6.2.1 Keskus 40AE01

Keskuksen 40AE01 säädetyt käytöt on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Keskuksen 40AE01 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
ACS800	30 kW	1 kpl
ACS800	55 kW	2 kpl
ACS880	75 kW	3 kpl
ACS880	110 kW	3 kpl
ACS880	132 kW	1 kpl
ACS800	160 kW	2 kpl
ACS880	315 kW	1 kpl
ACS880	400 kW	Varalla
5. Yliaaltosuodatin	328 kvar	2 kpl, käytössä
7. Yliaaltosuodatin	321 kvar	1 kpl, käytössä

Keskuksen 40AE01 mittaustulokset on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Soodakattilan keskuksen 40AE01 mittaustulokset

40AE01 690 V							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	UI	L12	L23	L31			
		690	690	690	(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	II	L1	L2	L3			
		746	749	746	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (U)	L12	L23	L31			
		3,7	3,8	3,7	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (I)	L1	L2	L3			
		17,6	18,2	18,5	(%)		
Hammoniset yliaaltojännitteet (%)	Uh	3	5	7	9	11	13
	L12	0,19	3,48	0,68	0,06	0,68	0,52
	L23	0,18	3,55	0,63	0,09	0,65	0,53
	L31	0,19	3,48	0,68	0,06	0,68	0,52
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,04	0,48	0,33	0,03	0,2	0,21
	L23	0,04	0,47	0,33	0,03	0,2	0,21
	L31	0,04	0,48	0,33	0,03	0,2	0,21
Hammoniset yliaaltovirrat	Ih	3	5	7	9	11	13
	L1	2,04	15,5	7,24	0,26	3,24	2,02
	L2	1,38	15,9	7,96	0,3	3,1	1,9
	L3	1,18	16,2	7,92	0,22	3,29	1,96
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,15	1,3	0,85	0,14	0,42	0,36
	L2	0,19	1,16	0,81	0,16	0,36	0,34
	L3	0,17	1,3	0,84	0,09	0,41	0,37
Kokonaispätöteho	P	847	(kW)				
Kokonaisloisteho	Q	226	(kVar)				

Taulukon 7 arvoista voidaan todeta, että keskuksessa 40AE01 harmonisten yliaaltojännitteiden ja –virtojen kokonaissäröt ovat tarpeeksi hyviä sähkön laadun kannalta, mutta keskuksessa on loistehoa 226 kVar, joka on järkevää kompensoida. Lisäksi keskuksessa on käytössä yliaaltosuodattimia, joten uusien laitteiden valitsemisessa on tämä huomioitava.

Keskukseen suositellaan yliaaltosuodattimia, jos vanhat käytössä olevat laitteet puretaan. Vanhojen laitteiden purkamisen jälkeen keskuksen kokonaisloisteho on noin 1200 kvar. Uusia 5. yliaallon suodattimia tarvitaan kolme, jotka ovat nimellisteholtaan 295 kvar. Uusi 7. yliaallon suodatin, joka tarvitaan on nimellisteholtaan 289 kvar. Keskukseen suositellaan asennettavaksi siis yhteensä neljä yliaaltosuodatinta.

6.2.2 Keskus 40AH03

Keskuksen 40AH03 säädetyt käytöt on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Keskuksen 40AH03 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
15MRE	0,18 kW	4 kpl
15MRE	0,37 kW	3 kpl
15MRE	3,0 kW	4 kpl
37MRE	30 kW	1 kpl
37MRE	37 kW	1 kpl

Taulukossa 9 on esitelty keskuksen 40AH03 mittaustulokset.

TAULUKKO 9. Soodakattilan keskuksen 40AE01/400 V mittaustulokset

40AH03							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	<i>UI</i>	L12	L23	L31			
		400	400	400	(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	<i>II</i>	L1	L2	L3			
		256	251	247	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (<i>U</i>)	L12	L23	L31			
		3,18	3,07	3,18	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (<i>I</i>)	L1	L2	L3			
		79,9	81	81,9	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	<i>Uh</i>	3	5	7	9	11	13
	L12	0,21	0,98	2,54	0,08	1,35	0,86
	L23	0,17	1,07	2,44	0,09	1,3	0,85
	L31	0,21	0,98	2,54	0,08	1,35	0,86
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,09	0,47	0,67	0,05	0,56	0,31
	L23	0,06	0,45	0,61	0,06	0,53	0,27
	L31	0,09	0,47	0,67	0,05	0,56	0,31
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	<i>Ih</i>	3	5	7	9	11	13
	L1	1,99	65,7	44,3	1,1	9,41	3,18
	L2	1,5	67,1	43,9	0,64	10	2,85
	L3	1,46	68,15	44,1	0,82	9,94	2,76
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,4	3,17	2,6	0,25	1,28	1,07
	L2	0,33	3,03	2,21	0,31	1,33	0,86
	L3	0,33	3,12	2,07	0,27	1,39	0,95
Kokonaispäteho	<i>P</i>	147	(kW)				
Kokonaisloisteho	<i>Q</i>	27	(kVar)				

Kohteen 40AH03 korkea virran harmoninen kokonaissärö oletetaan johtuvat jonkin laitteen virhetoiminnasta tai mitoitusvirheestä. Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan tutkittu, mikä on korkean särökertoimen aiheuttaja. Keskuksen jännitteen harmoninen kokonaissärö on kuitenkin alhainen, eikä vaadi toimenpiteitä sen parantamiseksi. Suurin harmonin yliaaltojännite on 7. yliaalto, mutta sen suhteellinen osuus ei myöskään ylitä

standardin SFS-EN 50160 asettamia raja-arvoja. Keskukselle ei ole täten tarvetta mitoittaa kompensointilaitteita.

6.2.3 Keskus 40AH01

Kohteen 40AH01 säädettyt käytöt on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Keskuksen 40AH01 säädettyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
ACS800	30 kW	2 kpl
ACS880	90 kW	1 kpl
ACS880	110 kW	1 kpl
ACS800	132 kW	2 kpl
ACS880	315 kW	1 kpl
ACS880	400 kW	1 kpl
ACS800	800 kW	2 kpl
5. Yliaaltosuodatin	328 kvar	3 kpl, käytössä
7. Yliaaltosuodatin	321 kvar	1 kpl, käytössä

Keskukseen 40AH01 tehtiin mittauksia kahtena eri päivänä yhteensä 4 kertaa, mutta joko analysaattorin ohjelmistovirheen tai jonkin muun syyn takia, mittaustuloksia ei saatu tarkasteltavaksi Fluken ohjelmistolla. Täten päädyttiin ottamaan tärkeimmistä mittaustuloksista kuvankaappaukset analysaattorin näytöltä. Olennaisimmat mittaustulokset kohteesta 40AH01 on esitetty kuvassa 27.

LOGGER					LOGGER				
P _{UNI} 0:05:26					P _{UNI} 0:05:26				
	A	B	C		Volt	AB	BC	CA	
kA _{rms}	0.97	0.94	0.92		THD% _f	7.2	7.2	7.3	
	A	B	C	Total	Volt	AB	BC	CA	
MW	0.348	0.341	0.330	1.020	H1% _f	100.0	100.0	100.0	
	AB	BC	CA		Volt	AB	BC	CA	
V _{rms} Δ	675.01	674.98	674.21		H3% _f	0.1	0.1	0.2	
Amp	A	B	C		Volt	AB	BC	CA	
THD% _f	32.4	33.7	33.6		H5% _f	6.2	6.3	6.3	
03/07/18 09:16:41 693V 50Hz 3Ø IT EN50160					03/07/18 09:16:41 693V 50Hz 3Ø IT EN50160				
UP	DOWN	TREND	EVENTS	STOP	UP	DOWN	TREND	EVENTS	STOP
			0	START				0	START
LOGGER					LOGGER				
P _{UNI} 0:05:26					P _{UNI} 0:05:26				
	AB	BC	CA			A	B	C	
Volt	AB	BC	CA		K-factor	0.6	0.6	0.6	
H5% _f	6.2	6.3	6.3			A	B	C	N
	AB	BC	CA		V _{rms} Δ	389.41	389.86	389.40	95.82
H7% _f	1.7	1.6	1.8			A	B	C	Total
	AB	BC	CA		MVA	0.376	0.367	0.358	1.101
H9% _f	0.1	0.1	0.0			A	B	C	Total
	AB	BC	CA		Mvar	0.070	0.058	0.066	0.194
H11% _f	2.1	2.1	2.2						
03/07/18 09:16:41 693V 50Hz 3Ø IT EN50160					03/07/18 09:16:41 693V 50Hz 3Ø IT EN50160				
UP	DOWN	TREND	EVENTS	STOP	UP	DOWN	TREND	EVENTS	STOP
			0	START				0	START

KUVA 23. Soodakattilan keskuksen 40AH01 mittaustulokset

Keskuksen 40AH01 mittaustuloksista voidaan todeta, että jännitteen kokonaissärö on suurimmillaan 7,3 %. Keskuksen kokonaisloisteho on 194 kVar. On myös huomioitava, että keskuksessa oli mittauksien aikana käytössä yliaaltosuodattimia, jotka on listattu taulukossa 9.

Keskuksen kokonaisloisteho vanhojen laitteiden purkamisen jälkeen olisi noin 1500 kvar. Uusia 295 kvar:n nimellistehon 5. yliaallon suodattimia tarvitaan neljä. Lisäksi suositellaan uutta 7. yliaallon suodatinta, jonka nimellisteho on 289 kvar.

6.2.4 Keskus 42AH01

Kohteen 42AH01 säädetyt käytöt on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 11. Keskuksen 42AH01 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
ACS800	200 kW	1 kpl
ACS880	315 kW	1 kpl
ACS800	500 kW	1 kpl
ACS800	800 kW	2 kpl
5. Yliaaltosuodatin	328 kvar	3 kpl, ei käytössä
7. Yliaaltosuodatin	321 kvar	1 kpl, ei käytössä

Keskuksen 42AH01 mittaustulokset on esitetty taulukossa 12.

TAULUKKO 12. Soodakattilan keskuksen 42AH01 mittaustulokset

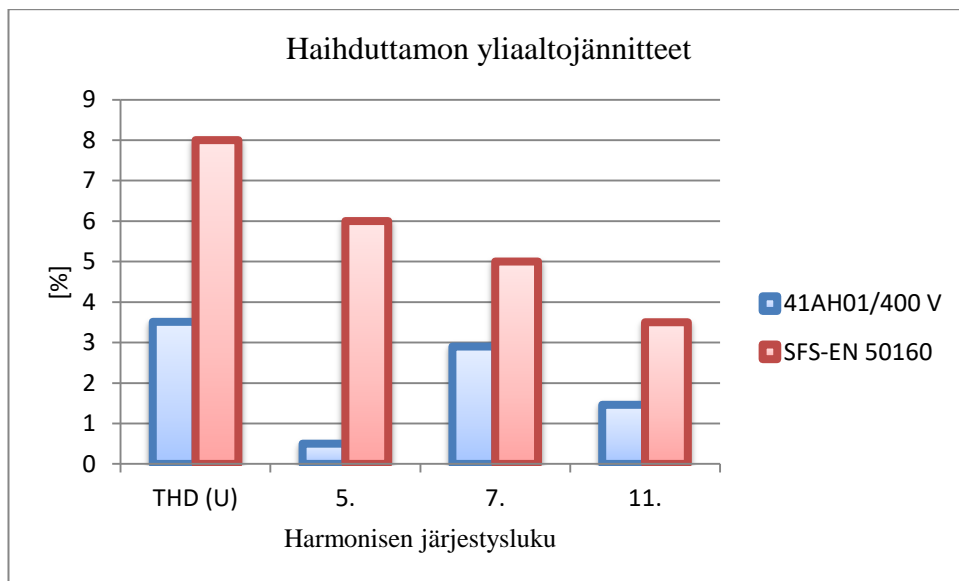
42AH01							
Perustaajuuden jännitteen tehollisarvo	<i>U_I</i>	L12	L23	L31			
		673	674	674	(V)		
Perustaajuuden virran tehollisarvo	<i>I_I</i>	L1	L2	L3			
		1105	1113	1093	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (<i>U</i>)	L12	L23	L31			
		7,65	7,68	7,65	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (<i>I</i>)	L1	L2	L3			
		32,4	33	33,1	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	<i>U_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L12	0,17	6,68	1,86	0,07	2,19	1,42
	L23	0,19	6,74	1,74	0,09	2,23	1,41
	L31	0,17	6,68	1,86	0,07	2,19	1,42
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,05	1,04	1,04	0,05	0,53	0,64
	L23	0,05	1,06	1,01	0,05	0,54	0,59
	L31	0,05	1,04	1,04	0,05	0,53	0,64
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	<i>I_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L1	1,47	30	10	0,22	5,85	3,08
	L2	0,61	30,4	10,5	0,19	5,8	3,23
	L3	1,36	30,7	9,71	0,27	6,17	3
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,13	1,97	1,45	0,12	0,79	0,72
	L2	0,09	1,86	1,56	0,07	0,74	0,85
	L3	0,14	2	1,49	0,09	0,83	0,71
Kokonaispätöteho	<i>P</i>	1251	(kW)				
Kokonaisloisteho	<i>Q</i>	261	(kVar)				

Keskuksen kokonaisloisteho on noin 260 kvar. Jännitesärö on kuitenkin melkein 8 %, joten keskukselle voitaisiin suositella yliaaltosuodattimia. Kohteella on kuitenkin ongelmana, että kompensointitehoa tarvitaan vain 260 kvar, minkä takia yliaaltosuodatuksen myötä verkko ylikompensoituisi. Täten keskukselle suositellaan

estokelaparistoa, jonka särömitoitus on 12 %. Pariston porrastus toteutettaisiin 2x25 kvar + 5x50 kvar portailla, joten suositellun estokelapariston kokonaisteho on 300 kvar.

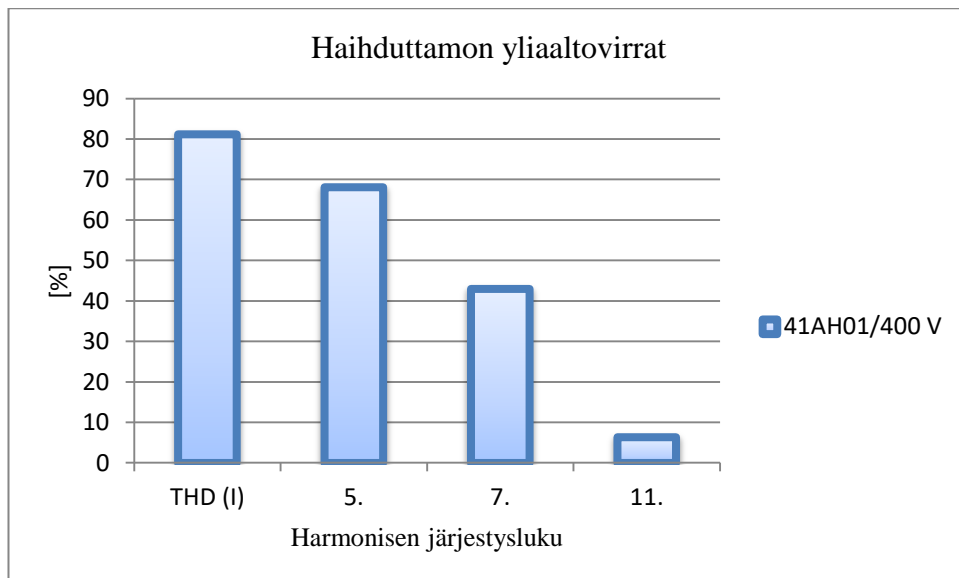
6.3 Haihduttamo

Haihduttamalla poistetaan mustalipeästä vettä, minkä jälkeen sen polttaminen on helpompaa ja saavutetaan parempi hyötysuhde energian tuotannossa. Haihduttamon taajuusmuuttajakeskuksen yliaaltojännitteiden spektriesitys on esitetty kuviossa 11.



KUVIO 11. Haihduttamon taajuusmuuttajakeskuksesta mitatut yliaaltojännitteet

Kuviosta 11 voidaan lyhyesti todeta, että yliaaltojännitteiden suhteelliset arvot sekä jännitteen harmoninen kokonaissärö ovat standardin SFS-EN 50160 mukaiset. Vastaavasti yliaaltovirtojen spektriesitys on esitetty kuviossa 12.



KUVIO 12. Haihduttamon taajuusmuuttajakeskuksesta mitatut yliaaltovirrat

Kuviosta 12 havaitaan, että keskuksen virran harmoninen kokonaissärö on poikkeuksellisen suuri eli yli 80 %. Suuren virran särökertoimen syyksi oletetaan joko laitteen virhe- tai vajaatoiminta tai mitoitusvirhe. Haihduttamalla on käytössä vielä vanhoja pienitehoisia Siemensin taajuusmuuttajia. Voidaan olettaa, että vanhat taajuusmuuttajat eivät enää toimi suunnitellusti, minkä takia ne aiheuttavat sähköverkkoon huomattavan paljon häiriöitä.

6.3.1 Keskus 41AH01

Kohteen 41AH01 säädetyt käytöt on esitetty taulukossa 13.

TAULUKKO 13. Keskuksen 41AH01 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
ACS880	2,2 kW	1 kpl
6SE70	4,0 kW	1 kpl
6SE70	7,5 kW	1 kpl
6SE70	11 kW	1 kpl
6SE70	15 kW	1 kpl
6SE70	37 kW	1 kpl
6SE70	45 kW	1 kpl

Keskuksen 41AH01 mittaustulokset on esitetty taulukossa 14.

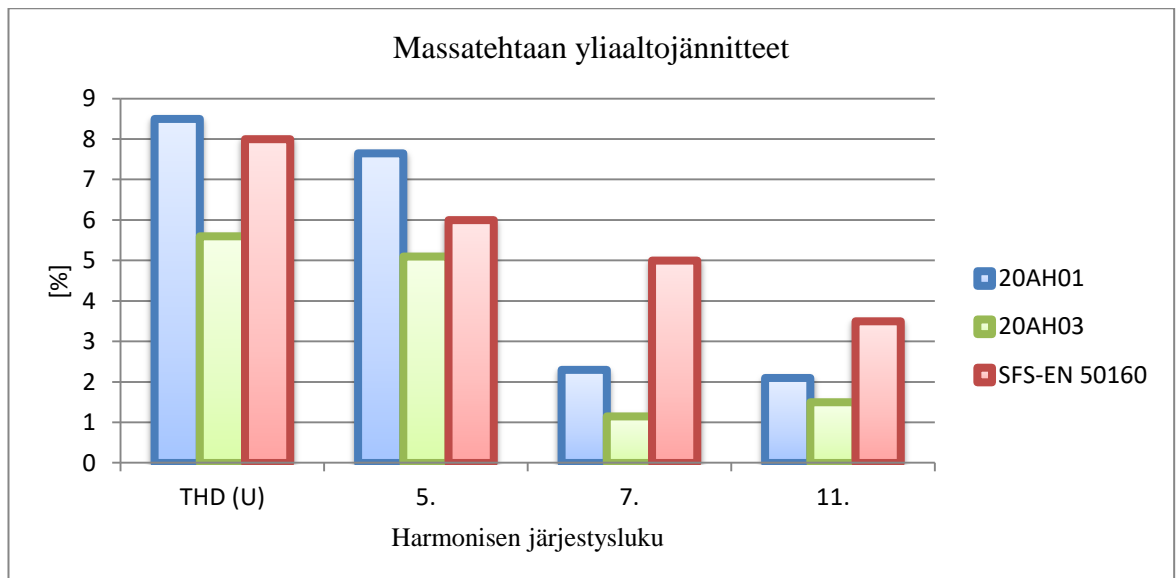
TAULUKKO 14. Haihdukkamon keskuksen 41AH01 mittaustulokset

41AH01							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	UI	L12	L23	L31			
		402	403	402	(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	II	L1	L2	L3			
		113	112	109	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (U)	L12	L23	L31			
		3,48	3,51	3,48	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (I)	L1	L2	L3			
		79,8	79,7	81,2	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	Uh	3	5	7	9	11	13
	L12	0,21	0,5	2,9	0,08	1,44	0,62
	L23	0,18	0,51	2,91	0,14	1,46	0,66
	L31	0,21	0,5	2,9	0,08	1,44	0,62
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,09	0,53	0,78	0,05	0,52	0,15
	L23	0,07	0,54	0,73	0,08	0,57	0,12
	L31	0,09	0,53	0,78	0,05	0,52	0,15
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	Ih	3	5	7	9	11	13
	L1	2,99	65,9	43	1,03	6,36	6,32
	L2	3,6	65,6	43,3	1,78	5,93	6,42
	L3	2	68,1	42,1	2,02	7,13	6,41
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,57	6	4,45	0,48	3,31	3,33
	L2	0,24	6,16	4,28	0,28	3,53	3,04
	L3	0,56	6,6	3,94	0,56	3,81	2,96
Kokonaispäteho	P	59,7	(kW)				
Kokonaisloisteho	Q	11,4	(kVar)				

Keskuksen 41AH01 mittaustuloksista voidaan todeta, että jännitteen harmoninen kokonaissärö on maltillinen eikä vaadi toimenpiteitä. Loistehon määrä on myös vähäinen. Keskuksessa on kuitenkin havaittavissa erittäin paljon 5. yliaaltovirtakomponenttia, joka on suurimmillaan 68,1 % vaiheessa L3. Virran harmoninen kokonaissärö on täten noin 80 %. Kokonaisyliaaltovirran absoluuttinen arvo on suurimmillaan vaiheessa L1 noin 90 A. Keskukselle ei ole näiden mittaustuloksien perusteella tarvetta mitoittaa kompensointilaitteita.

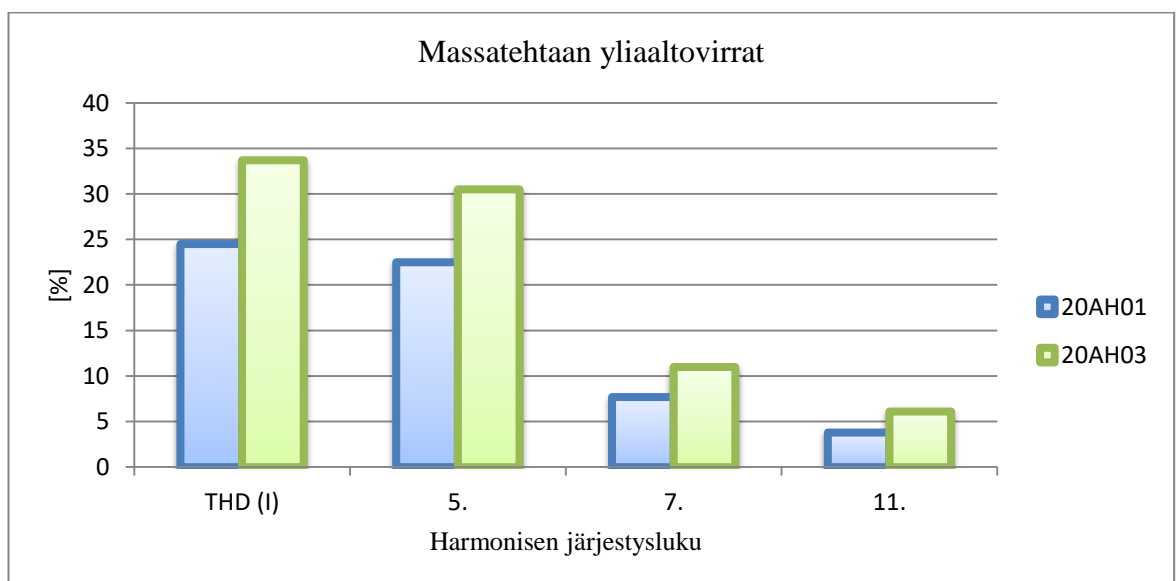
6.4 Massatehdas

Massatehtaalla keitetään hakettu puuaines kemikaaleilla, minkä avulla saadaan poistettua puun kuituja sitova ligniini. Keiton jälkeen massa pestään ja valkaistaan. Massatehtaalla on kaksi taajuusmuuttajakeskusta. Kuviossa 13 on esitetty massatehtaan taajuusmuuttajakeskusten yliaaltojännitteiden spektriesitys.



KUVIO 13. Massatehtaan taajuusmuuttajakeskuksista mitatut yliaaltojännitteet

Kuviosta 13 voidaan todeta, että kohteen 20AH01 jännitteen harmoninen kokonaissärö sekä 5. yliaalto ylittävät standardin SFS-EN 50160 raja-arvot. Kuviossa 14 on esitetty vastaavasti virtojen spektriesitys.



KUVIO 14. Massatehtaan taajuusmuuttajakeskuksista mitatut yliaaltovirrat

Massatehtaan taajuusmuuttajakeskuksien yliaaltovirrat noudattavat hyvin teoreettista suuntaajakäyttöjen aiheuttamaa virtojen säröytymistä. Huomionarvoista oli, että keskuksella 20AH01 virtasärö oli pienempi kuin keskuksella 20AH03, mutta sen jännitesärö oli kuitenkin suurempi. Toisin sanoen katselemalla kuvioita 14 ja 15 vaikuttaisi siltä, että suuri virtasärö johtaa pienempään jännitesäröön, mutta tämä johtuu

todellisuudessa siitä, että keskuksen 20AH03 syöttävän verkon oikosulkusuhde on suurempi kuin keskusta 20AH01 syöttävän verkon.

6.4.1 Keskus 20AH01

Kohteen 20AH01 säädettyt käytöt on esitetty taulukossa 15.

TAULUKKO 15. Keskuksen 20AH01 säädettyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
6SE70	5,5 kW	1 kpl
ACS800	200 kW	3 kpl
ACS880	400 kW	2 kpl
ACS800	630 kW	2 kpl
5. Yliaaltosuodatin	328 kvar	3 kpl, ei käytössä
7. Yliaaltosuodatin	321 kvar	1 kpl, ei käytössä

Keskuksen 20AH01 mittaustulokset on esitetty taulukossa 16.

TAULUKKO 16. Massatehtaan keskuksen 20AH01 mittaustulokset

20AH01							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	<i>U_I</i>	L12	L23	L31			
		687	687	687	(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	<i>I_I</i>	L1	L2	L3			
		1570	1590	1530	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (<i>U</i>)	L12	L23	L31			
		8,19	8,31	8,19	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (<i>I</i>)	L1	L2	L3			
		23,9	24,4	24,6	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	<i>U_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L12	0,15	7,36	2,16	0,05	1,95	1,57
	L23	0,42	7,43	2,28	0,19	1,94	1,64
	L31	0,15	7,36	2,16	0,05	1,95	1,57
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,06	1,14	1	0,05	0,49	0,5
	L23	0,14	1,09	1,07	0,13	0,48	0,52
	L31	0,06	1,14	1	0,05	0,49	0,5
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	<i>I_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L1	1,38	22,2	7,25	0,23	3,81	2,5
	L2	1,26	22,5	7,72	0,49	3,6	2,73
	L3	2,25	22,9	7,04	0,55	3,8	2,54
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,2	1,54	1,18	0,17	0,55	0,45
	L2	0,19	1,41	1,23	0,11	0,51	0,52
	L3	0,22	1,54	1,17	0,16	0,56	0,48
Kokonaispätöteho	<i>P</i>	1854	(kW)				
Kokonaisloisteho	<i>Q</i>	483	(kVar)				

Keskuksen 20AH01 mittaustuloksista voidaan todeta, että jännitteen kokonaissärö ylittää standardissa SFS-EN 50160 määritellyn 8 % raja-arvon sekä 5. yliaaltojännite ylittää 6 % raja-arvon. Kohteessa on myös loistehoa noin 480 kvar. Keskukseen suositellaan siis kaksi 5. yliaallon suodatinta, joiden nimellistehot ovat 225 kvar.

6.4.2 Keskus 20AH03

Kohteen 20AH03 säädetyt käytöt on esitetty taulukossa 17.

TAULUKKO 17. Keskuksen 20AH03 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
ACS880	90 kW	1 kpl
ACS880	200 kW	1 kpl
ACS880	400 kW	1 kpl
ACS880	500 kW	1 kpl

Keskuksen 20AH03 mittaustulokset on esitetty taulukossa 18.

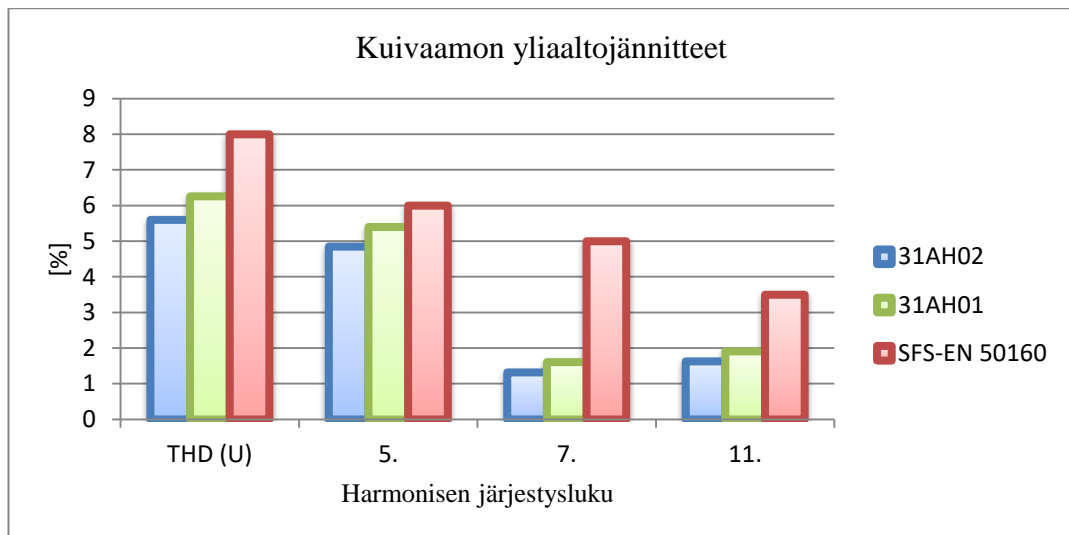
TAULUKKO 18. Massatehtaan keskuksen 20AH03 mittaustulokset

20AH03							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U_I	L12	L23	L31			
		678	678	678	(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I_I	L1	L2	L3			
		631	636	625	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (U)	L12	L23	L31			
		5,56	5,59	5,56	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (I)	L1	L2	L3			
		32,8	32,9	33,8	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	U_h	3	5	7	9	11	13
	L12	0,18	5,04	0,91	0,06	1,4	0,87
	L23	0,18	5,05	1,14	0,09	1,41	0,88
	L31	0,18	5,04	0,91	0,06	1,4	0,87
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,05	0,66	0,64	0,05	0,44	0,47
	L23	0,05	0,66	0,65	0,04	0,45	0,47
	L31	0,05	0,66	0,64	0,05	0,44	0,47
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	I_h	3	5	7	9	11	13
	L1	2,83	30,2	10,5	0,49	5,67	3,19
	L2	1,89	30	11	0,37	5,89	3
	L3	2,46	31,1	10,4	0,56	6,11	2,91
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,19	1,88	1,5	0,12	1,06	0,82
	L2	0,17	1,86	1,83	0,15	1,04	1,07
	L3	0,25	1,91	1,58	0,2	1,12	0,89
Kokonaispäteho	P	726	(kW)				
Kokonaisloisteho	Q	144	(kVar)				

Kohteessa 20AH03 on jännitteen harmoninen kokonaissärö noin 5,6 %, joista selvästi suurin osa aiheutuu 5. yliaallosta, jonka suhteellinen arvo on noin 5 %. Keskuksen voitaisiin asentaa yliaaltosuodatin, mutta samoin kuin kohteessa 42AH01, sille suositellaan kuitenkin estokelaparistoa, jonka porrastuksella päästään taloudellisempaan ratkaisuun. Estokelaparistoa suositellaan 2x25 kvar + 3x50 kvar –porrastuksella, joka on hieman ylimitoitettu, jotta kelojen käyttöikä olisi pidempi.

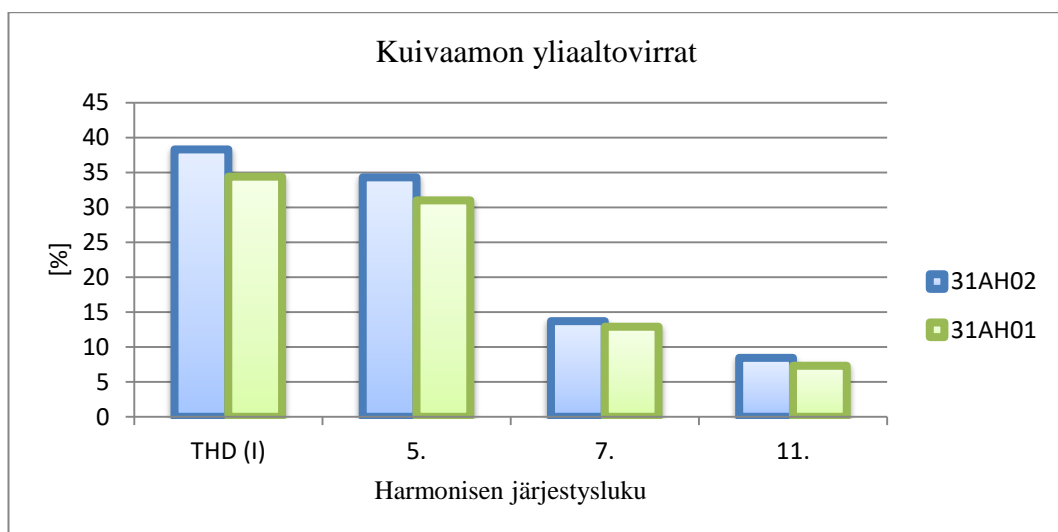
6.5 Kuivaamo

Kuivaamolle viedään massatehtaalta sellumassaa kuivatusta varten. Kuivaamon tehtävänä on lisäksi puristaa massa ohuiksi levyiksi sekä leikata ja pakata selluarkit toimitusta varten. Kuivaamolla taajuusmuuttajakeskuksia oli kaksi, joiden yliaaltojännitteiden spektriesitys on esitetty kuviossa 15.



KUVIO 15. Kuivaamon taajuusmuuttajakeskuksista mitatut yliaaltojännitteet

Kuviosta 15 voidaan todeta, että molempien kohteiden yliaaltojännitteet ovat standardin SFS-EN 50160 mukaisia. Vastaavasti kohteiden yliaaltovirtojen spektriesitys on esitetty kuviossa 16.



KUVIO 16. Kuivaamon taajuusmuuttajakeskuksista mitatut yliaaltovirrat

Kuivaamon taajuusmuuttajakeskuksien yliaaltovirrat noudattavat hyvin teoreettisten suuntaajakäyttöjen aiheuttamaa virtojen säröytymistä. Kuten massatehtaan keskuksissa 20AH01 ja 20AH03, myös kuivaamon taajuusmuuttajakeskuksilla 31AH01 ja 31AH02 on huomionarvoista virta- ja jännitesärön niin sanottu päinvastaisuus, joka johtuu niitä syöttävien verkkojen oikosulkusuhteiden erosta.

6.5.1 Keskus 31AH01

Kohteen 31AH01 säädetyt käytöt on esitelty taulukossa 19.

TAULUKKO 19. Keskuksen 31AH01 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
ACS800	11 kW	1 kpl
ACS800	30 kW	1 kpl
ACS880	55 kW	2 kpl
ACS880	110 kW	3 kpl
ACS880	132 kW	4 kpl
6SE70	160 kW	1 kpl
ACS880	160 kW	1 kpl
ACS880	200 kW	2 kpl
ACS880	315 kW	1 kpl
ACS880	400 kW	2 kpl
5. Yliaaltosuodatin	328 kvar	3 kpl, ei käytössä
7. Yliaaltosuodatin	321 kvar	1 kpl, ei käytössä

Keskuksen 31AH01 mittaustulokset on esitetty taulukossa 20.

TAULUKKO 20. Kuivaamon keskuksen 31AH01 mittaustulokset

31AH01							
Perustaajuuden jännitteen tehollisarvo	<i>UI</i>	L12	L23	L31			
		693	694	694	(V)		
Perustaajuuden virran tehollisarvo	<i>II</i>	L1	L2	L3			
		826	809	802	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (<i>U</i>)	L12	L23	L31			
		6,2	6,25	6,2	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (<i>I</i>)	L1	L2	L3			
		33	34,4	34,3	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	<i>Uh</i>	3	5	7	9	11	13
	L12	0,2	5,36	1,5	0,06	1,86	1,1
	L23	0,16	5,4	1,55	0,08	1,86	1,13
	L31	0,2	5,36	1,5	0,06	1,86	1,1
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,05	1,07	0,89	0,05	0,57	0,64
	L23	0,03	1,07	0,91	0,03	0,56	0,67
	L31	0,05	1,07	0,89	0,05	0,57	0,64
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	<i>Ih</i>	3	5	7	9	11	13
	L1	2,15	29,6	11,73	0,3	7,08	3,48
	L2	2,03	30,6	12,9	0,3	7,24	3,84
	L3	1,29	30,1	11,7	0,34	7,31	3,81
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,17	2,46	2,04	0,14	1,02	1,1
	L2	0,16	2,83	2,03	0,11	1,09	1,13
	L3	0,15	2,81	2,01	0,13	1,1	1,06
Kokonaispätöteho	<i>P</i>	910	(kW)				
Kokonaisloisteho	<i>Q</i>	132	(kVar)				

Keskuksen 31AH01 yliaaltojen pitoisuus sekä loistehon kompensoinnin tarve ovat samoja kuin keskuksissa 12AH01 ja 20AH03. Kohteeseen suositellaan siis samanlaista 200 kvar:n nimellistehon estokelaparistoa 2x25 kvar + 3x50 kvar –porrastuksella.

6.5.2 Keskus 31AH02

Kohteen 31AH02 säädetyt käytöt on esitetty taulukossa 21.

TAULUKKO 21. Keskuksen 31AH02 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
6SE70	1,1 kW	3 kpl
6SE70	2,2 kW	2 kpl
6SE70	22 kW	1 kpl
5. Yliaaltosuodatin	181 kvar	2 kpl, käytössä
7. Yliaaltosuodatin	179 kvar	1 kpl, käytössä

Keskuksen 31AH02 mittaustulokset on esitetty taulukossa 22.

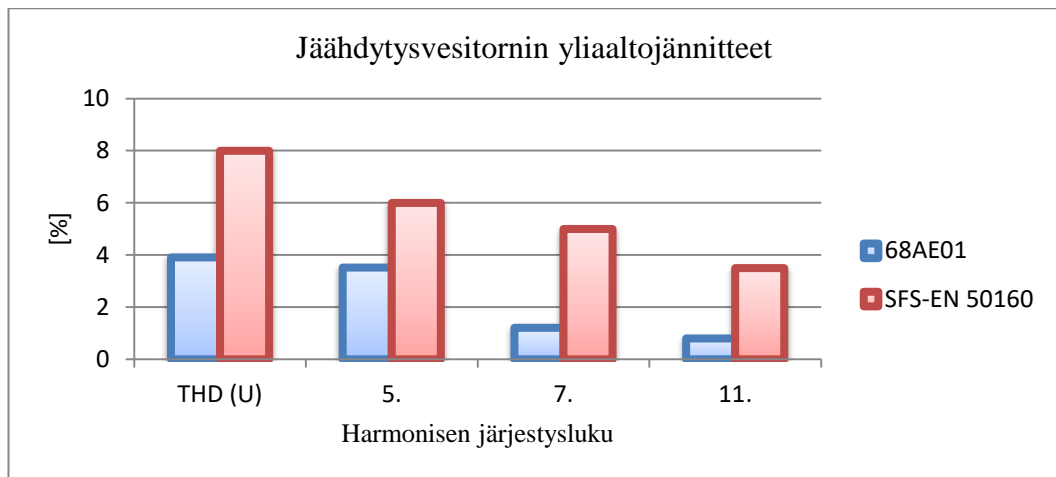
TAULUKKO 22. Kuivaamon keskuksen 31AH02 mittaustulokset

31AH02							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	<i>U_I</i>	L12	L23	L31			
		403	402	403	(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	<i>I_I</i>	L1	L2	L3			
		641	640	644	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (<i>U</i>)	L12	L23	L31			
		5,56	5,59	5,56	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (<i>I</i>)	L1	L2	L3			
		36,7	38,3	37,3	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	<i>U_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L12	0,1	4,85	1,18	0,11	1,61	0,79
	L23	0,19	4,85	1,32	0,15	1,57	0,86
	L31	0,1	4,85	1,18	0,11	1,61	0,79
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,06	1,04	0,71	0,05	0,7	0,6
	L23	0,09	0,98	0,77	0,09	0,64	0,66
	L31	0,06	1,04	0,71	0,05	0,7	0,6
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	<i>I_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L1	1,75	33,1	12,7	0,51	7,82	3,44
	L2	1,94	34,3	13,7	0,78	8,44	3,54
	L3	2,32	33,7	12,7	0,64	7,97	3,42
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,17	3,36	1,93	0,1	1,7	1,29
	L2	0,42	3,29	2,41	0,26	1,72	1,62
	L3	0,32	3,15	2,19	0,24	1,48	1,48
Kokonaispäteho	<i>P</i>	426	(kW)				
Kokonaisloisteho	<i>Q</i>	72	(kVar)				

Taulukon 22 mittaustuloksista voidaan todeta, että kohteelle 31AH02 ei suositella toimenpiteitä loistehon kompensointiin tai yliaaltojen suodattamiseen.

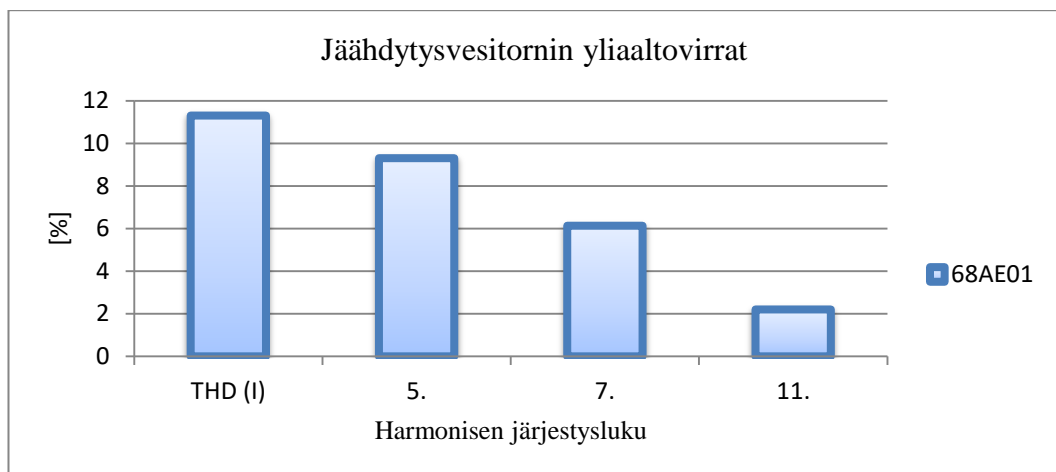
6.6 Jäähdytysvesitorni

Jäähdytysvesitorneissa tuotantoprosessissa käytetty vesi jäähdytetään haluttuun lämpötilaan, jolla sitä voidaan käyttää uudelleen. Jäähdytysvesitornin yliaaltojännitteiden spektriesitys on kuviossa 17.



KUVIO 17. Jäähdytysvesitornin taajuusmuuttajakeskuksesta mitatut yliaaltojännitteet

Kuviosta 17 havaitaan, että jännitteen säröytyminen on vähäistä, eikä standardin SFS-EN 50160 raja-arvoja ylitetä. Vastaavasti yliaaltovirtojen spektriesitys on kuviossa 18.



KUVIO 18. Jäähdytysvesitornin taajuusmuuttajakeskuksesta mitatut yliaaltovirrat

Jäähdytysvesitornin säädettyjen käyttöjen aiheuttama virran säröytyminen on hyvin vähäistä.

6.6.1 Keskus 68AE01

Kohteen 68AE01 säädetty käytöt on esitetty taulukossa 23.

TAULUKKO 23. Keskuksen 68AE01 säädetyt käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
ACS880	110 kW	1 kpl
ACS880	132 kW	3 kpl
ACS880	315 kW	1 kpl
ACS880	500 kW	1 kpl
5. Yliaaltosuodatin	328 kvar	2 kpl, ei käytössä
7. Yliaaltosuodatin	321 kvar	1 kpl, ei käytössä

Keskuksen 68AE01 mittaustulokset on esitetty taulukossa 24.

TAULUKKO 24. Jäähdytysvesitornin keskuksen 68AE01 mittaustulokset

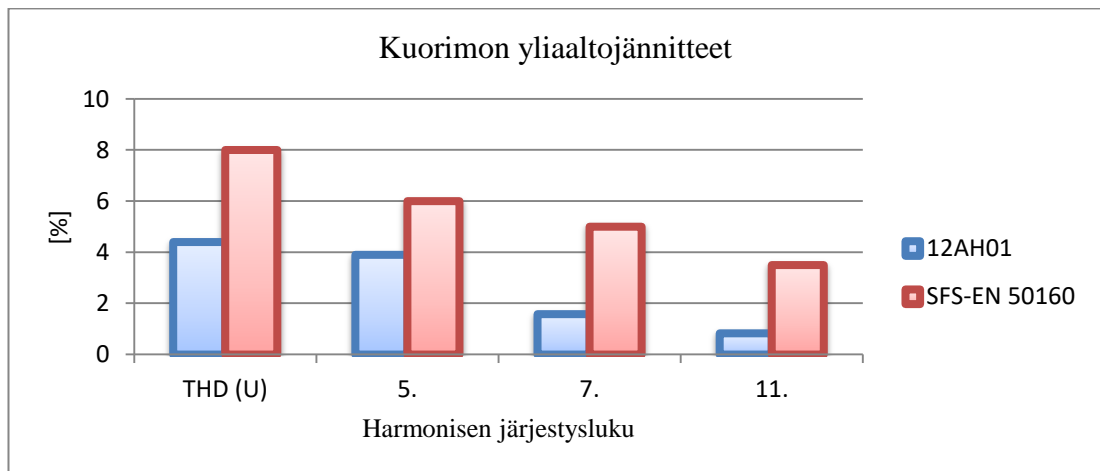
68AE01							
Perustaajuisten jännitteen tehollisarvo	U_I	L12	L23	L31			
		669	667	669	(V)		
Perustaajuisten virran tehollisarvo	I_I	L1	L2	L3			
		1110	1100	1050	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (U)	L12	L23	L31			
		3,77	3,91	3,77	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (I)	L1	L2	L3			
		10,7	11,1	11,3	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	U_h	3	5	7	9	11	13
	L12	0,26	3,44	1,05	0,07	0,73	0,52
	L23	0,23	3,52	1,21	0,11	0,8	0,54
	L31	0,26	3,44	1,05	0,07	0,73	0,52
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,08	0,4	0,33	0,07	0,25	0,23
	L23	0,05	0,46	0,34	0,04	0,3	0,24
	L31	0,08	0,4	0,33	0,07	0,25	0,23
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	I_h	3	5	7	9	11	13
	L1	2,25	8,54	5,4	0,62	1,94	1,36
	L2	1,24	8,81	6,13	0,31	2,14	1,48
	L3	1,71	9,28	5,49	0,56	2,21	1,39
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,19	0,71	0,57	0,15	0,39	0,26
	L2	0,09	0,67	0,59	0,11	0,25	0,39
	L3	0,24	0,84	0,5	0,18	0,37	0,31
Kokonaispätöteho	P	1149	(kW)				
Kokonaisloisteho	Q	498	(kVar)				

Jäähdytysvesitornin taajuusmuuttajakeskuksen yliaaltopitoisuus ei vaadi toimenpiteitä, mutta loistehon määrä on huomattavan suuri eli noin 500 kvar. Keskukselle suositellaan estokelaparistokokonaisuutta, jonka nimellinen kokonaisteho on 550 kvar. Koska jatkuva loisteho on 500 kvar, suositellaan 2x25 kvar + 5x50 kvar –porrastusta

isäntäparistolle ja 5x50 kvar –porrastusta orjaparistolle. Porrastuksella pyritään pidentämään kelojen elinikää.

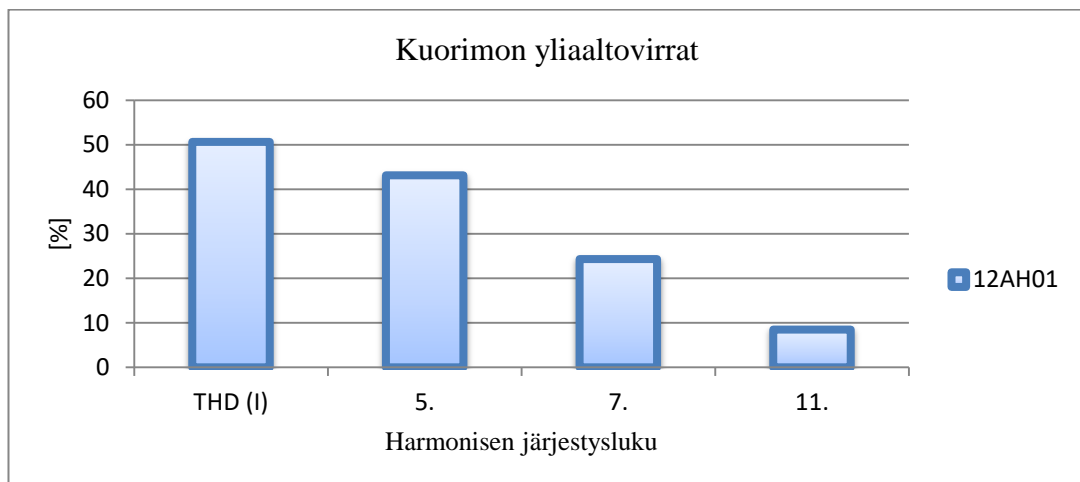
6.7 Kuorimo

Kuorimolle tuodaan junilla tai laivoilla puita, jotka haketetaan suuritehoisen hakun avulla pieniksi lastuiksi, minkä jälkeen hake viedään ulos kuorimolta tehtaan pihalle hakekasoille, joista ne kuljetetaan massatehtaan keittämölle. Kuorimon taajuusmuuttajakeskuksen yliaaltojännitteiden spektriesitys on kuviossa 19.



KUVIO 19. Kuorimon taajuusmuuttajakeskukselta mitatut yliaaltojännitteet

Kuorimon kohteen jännitteen säröytyminen on vähäistä mittaustuloksien perusteella, eikä standardin SFS-EN 50160 raja-arvoja ylitetä. Vastaavasti kohteen yliaaltovirtojen spektriesitys on kuviossa 20.



KUVIO 20. Kuorimon taajuusmuuttajakeskukselta mitatut yliaaltovirrat

Kuviosta 20 havaitaan, että virta on hyvin säröytynyttä, mutta mittauksien aikana tapahtui suuritehoisen taajuusmuuttajan käynnistys, joten voidaan olettaa sen aiheuttaneen mittaustuloksien poikkeamista todellisesta jatkuvan tilan arvoista.

6.7.1 Keskus 12AH01

Kohteen 12AH01 säädetty käytöt on esitetty taulukossa 25.

TAULUKKO 25. Keskukseen 12AH01 säädetty käytöt

Laite	Teho	Lisätiedot
6SE70	90 kW	2 kpl
ACS800	1400 kW	2 kpl
5. Yliaaltosuodatin	328 kvar	3 kpl, ei käytössä
7. Yliaaltosuodatin	321 kvar	1 kpl, ei käytössä

Keskukseen 12AH01 mittaustulokset on esitetty taulukossa 26.

TAULUKKO 26. Kuorimon keskuksen 12AH01 mittaustulokset

12AH01							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	<i>U_I</i>	L12	L23	L31			
		693	693	692	(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	<i>I_I</i>	L1	L2	L3			
		312	311	310	(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (<i>U</i>)	L12	L23	L31			
		4,32	4,4	4,32	(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (<i>I</i>)	L1	L2	L3			
		46,51	50,7	47,3	(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	<i>U_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L12	0,2	3,9	1,42	0,09	0,77	0,52
	L23	0,2	3,91	1,54	0,09	0,82	0,48
	L31	0,2	3,9	1,42	0,09	0,77	0,52
		15	17	19	21	23	25
	L12	0,07	0,45	0,34	0,08	0,34	0,28
	L23	0,05	0,51	0,3	0,05	0,4	0,23
	L31	0,07	0,45	0,34	0,08	0,34	0,28
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	<i>I_h</i>	3	5	7	9	11	13
	L1	4,53	38,5	23,7	1,55	7,38	5,51
	L2	3,94	43,1	24,3	2,22	8,47	5,68
	L3	3,31	40,1	22,7	1,12	7,86	5,1
		15	17	19	21	23	25
	L1	0,92	3,16	2,71	0,92	1,62	1,69
	L2	0,93	3,74	2,6	0,85	2,01	1,59
	L3	0,66	3,32	2,26	0,67	2,04	1,46
Kokonaispätöteho	<i>P</i>	387	(kW)				
Kokonaisloisteho	<i>Q</i>	126	(kVar)				

Kuorimon taajuusmuuttajakeskuksen yliaaltopitoisuus ei vaadi toimenpiteitä, mutta loistehoa suositellaan kompensoitavan näiden mittaustuloksien perusteella. Kohteeseen suositellaan estokelaparistoa $2 \times 25 \text{ kvar} + 3 \times 50 \text{ kvar}$ –porrastuksella, joka on hieman ylimitoitettu, jotta kelojen käyttöikä on pidempi.

Kuorimolla on kaksi puunkäsittely-linjaa: kuusi- ja mäntylinja. Mittaustulokset kuorimolla tehtiin vain yhden linjan ollessa ajolla. Kun molemmat linjat ovat ajolla sekä maksimikuormituksella, voidaan taajuusmuuttajakeskuksen ottama virta kaksinkertaistaa verrattuna yhden linjan ajomalliin. Täten saadut mittaustulokset eivät ole riittävän luotettavia, jotta voitaisiin mitoittaa kokonaisvaltainen kompensointiratkaisu, joka toimisi jokaisella ajotilanteella. Toisaalta maksimikuormitusta ei käytetä kuin kuorimolla suoritettavissa kapasiteettiajoissa, joten on mahdollista, että kompensointi suunnitellaan vain yhden linjan ajolle, jolloin investoinnista tulee myös taloudellisesti edullisempää.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Olennaisimmat päätelmät

Tässä opinnäytetyössä tehtyjen sähkön laatumittauksien pohjalta voidaan todeta johtopäätöksenä, että Metsä Fibren Rauman sellutehtaan tämän hetkisistä 11:sta taajuusmuuttajakeskuksista kahdeksaan suositellaan tehtävän toimenpiteitä yliaaltojen suodatuksen ja loistehon kompensoinnin parantamiseksi. Harmonisten yliaaltojännitteiden suhteellinen osuus ei missään keskuksessa ollut niin suuri, että se olisi aiheuttanut huomattavia keskeytyksiä tuotantoprosessiin. Merkittävimmät jännitteen yliaaltokomponentit olivat 5., 7. ja 11. yliaalto. Havaittavissa oli yli 1 % suhteellisarvon yliaaltoja 17. komponenttiin saakka joissakin tapauksissa, mutta niiden suhteellinen osuus perustaajuisesta aallosta oli mittauskohteissa kuitenkin niin pieni, että niillä ei ole merkitystä tuotantoprosessiin.

Huomionarvoista oli, että nykyiset tehtaalla suurimmaksi osaksi käytöstä poistetut yliaaltosuodattimet olivat kaikki saman kokoisia nimellistehoiltaan, vaikka kohteiden loistehon määrät sekä yliaaltopitoisuudet olivat hyvinkin vaihtelevia. Suodattimet oltiin suunniteltu siis vain yhdelle käyttötilanteelle ja teholle. Tämä ei ole mielekästä tehtaassa, jossa eri keskuksien väliset kuormitukset ja yliaaltopitoisuudet vaihtelevat laajasti. Tämä tukee ajatusta, että kaikki vanhat kompensointilaitteet eivät ole yhteensopivia keskuksien kuorman kanssa ja aiheuttavat sen takia ongelmia tuotantoprosessissa muuttuneen sähköverkon laadun takia.

Koska suurimpaan osaan taajuusmuuttajakeskuksista suositellaan tehtävän sähkön laadun parantamista, voidaan todeta, että säädettyjen moottorikäyttöjen tehokerrointa koko tehtaalla saadaan parannettua merkittävästi laiteinvestoinneilla. Lisäksi kun uusilla laitteilla saadaan vähennettyä loistehon määrää, säästytään ylimääräisiltä loisteholaskuilta.

7.2 Mittaustuloksien luotettavuus

Tutkittavien kohteiden sähköverkkojen yliaalto- sekä loistehomittaukset suoritettiin niin, että on mahdollista olettaa saatujen mittaustuloksien sisältävän häiriöitä muista

kohteista. Mahdollisilla häiriöillä tarkoitetaan, että tehtaan muista yliaaltolähteistä, jotka eivät ole tutkittavissa keskuksissa, on voinut kulkeutua mittauksien aikana yliaaltoja mittauspisteisiin. Myös useita taajuusmuuttajakeskuksia sisältävät osastot voivat saada ylimääräisiä häiriöitä toisistaan, koska nykyiset yliaaltosuodattimet ovat suurimmalta osin pois käytöstä.

Kohteissa, joissa yliaaltosuodatus oli pois päältä eli keskuksissa 12AH01, 68AE01, 31AH01, 20AH01 ja 42AH01, ei voitu kytkeä suodattimia päälle, mikä olisi mahdollistanut mittaustuloksien vertailun suodattamattoman ja suodatetun sähköverkon välillä. Täten oltaisiin voitu tehdä parempia johtopäätöksiä tutkittujen kohteiden sähkön laadusta. Lisäksi kohteissa, joissa oli käytössä yliaaltosuodatusta eli keskuksissa 40AH01, 40AE01 ja 31AH02, ei voitu sitä ottaa pois päältä, jotta oltaisiin saatu luotettavampia mittaustuloksia yliaaltojen tilasta sekä loistehon määrästä suodattamattomassa verkossa uusien laitemitoitusten vuoksi.

Opinnäytetyössä on myös oletettu, että käytössä olevat yliaaltosuodattimet ovat täysin toimintakäykyisiä. Laitteille tehtiin aistinvaraisia tarkastuksia, eikä havaittu ulkoisia vahinkoja, mutta kondensaattoreiden kapasitanssiarvoja ei voitu mitata. Mikäli laitteet ovat sähkötekniisesti vioittuneet tai niiden kapasitanssiarvot ovat laskeneet yli 10%, vaikuttaa se kyseisten kohteiden mittaustuloksien perusteella mitoitettujen uusien laitteiden sopivuuteen.

Mittauksissa käytetyn Fluke 435-II sähkönlaatu ja energia-analysaattorin jännitteen ja virran mittaustarkkuus on 0,1 %, jota voidaan pitää standardin IEC 61000-4-30 mukaan hyvänä A-luokan mittaustarkkuutena. Voidaan todeta, että työssä käytetyn analysaattorin suorituskyky on hyvin luotettava (Fluke 2012, 19; Neumann 2007, 1).

7.3 Jatkotutkimukset

Opinnäytetyössä mitattiin Metsä Fibren Rauman sellutehtaan taajuusmuuttajakeskuksien yliaaltoja sekä loistehoa. Mittaustuloksien perusteella voidaan taajuusmuuttajakeskuksille tehdä investointiehdotus uusien yliaaltosuodattimien ja estokelaparistojen hankintaa varten. Mikäli päädytään investoimaan ehdotettuihin laitteisiin, asennuksien jälkeen suositellaan mittausten uusiminen, jotta voidaan todeta vähentyneet harmoniset yliaallot sekä loistehon määrä

taajuusmuuttajakeskuksissa. Lisäksi suositellaan suorittamaan sähkön laatumittaukset, kun loput vanhoista taajuusmuuttajista vaihdetaan uusiin.

Tässä työssä ei päästy perehtymään tehtaan suorien moottorikäyttöjen keskuksien sähkön laatuun. Suorien moottorikäyttöjen tehokerrointa säädellään automaattisilla loistehon kompensointilaitteilla, jotka ovat Nokian Capacitors Oy:n valmistamia portaisia kondensaattoriparistoja. Jatkotutkimuksia tehtaan sähkön laatuun liittyen voidaan tehdä näiden keskuksien loistehon tilaan. Mittaustuloksilla voidaan siten selvittää, ovatko nykyiset kompensointilaitteet suorien moottorikäyttöjen keskuksissa riittäviä.

LÄHTEET

- ABB. 2000. TTT-käsikirja. Luku 9. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus. Tulostettu 8.4.2018.
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/09_0_Loistehon%20kompensointi%20ja%20yliaallot.pdf
- ABB. 2001. Tekninen opas nro 6. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Tulostettu 29.3.2018.
https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf
- ABB. 2005. IEC Low voltage Induction Motors 400 V 50 Hz. Motors for all applications. Tulostettu 14.4.2018. http://www.bj-gear.com/fileadmin/filer/dokumenter/comboination_20400v_2050hz_gb_2006_2005_1_.pdf
- ABB. 2008. ACS800. ACS800-07 Drives (500 to 2800 kW). Hardware Manual. Tulostettu 2.4.2018. <http://www.clrwr.com/PDF/ABB-Drives/ABB-ACS800-07-500-2800.pdf>
- ABB. 2015. Pienjännitteiset taajuusmuuttajat. ABB:n teollisuustaajuusmuuttajat. ACS880-taajuusmuuttajat. 0,55-3200 kW. Tuoteluettelo. Tulostettu 2.4.2018.
https://library.e.abb.com/public/cb0da58246ba4a62aaae948d808fcc7d/FI_ACS880_single_drives_3AUA0000124140_RevJ.pdf
- ABB. 2017. Laiteopas. ACS880-01-taajuusmuuttajat. (0,55...250 kW, 0,75...350 hv). Tulostettu 2.4.2018.
https://library.e.abb.com/public/df4cb762fe544faeb53aa32b8679f832/FI_ACS880_01_HW_M_A5_screen.pdf
- Areva T&D. 2009. Tuoteopas. Pienjännitetuotteiden tuoteopas. Tulostettu 9.4.2018.
<http://www.sahkonumerot.fi/5705639/doc/technicalinfodoc/>
- Eronen, M. Myynti-insinööri. GE Grid Solutions. 2018. Metsä Fibre Rauma yliaaltosuodatus. Sähköpostiviesti. Luettu 30.3.2018. mikko.eronen@ge.com
- European Power Supply Manufacturers Association. EPSMA. 2010. Harmonic Current Emissions. Guidelines to the standard EN 61000-3-2. Tulostettu 30.3.2018.
http://www.epsma.org/PFCver100406_b.pdf
- Fluke. 2012. Fluke 434/435/437 3-vaiheinen energia- ja sähkönlaatuanalysointilaite. Käyttöohje.
- Halmesmäki, W. 2010. Oikosulkumoottorin laatuvirheiden jäljittäminen koestustulosten perusteella. Vaasan yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Sähkötekniikka. Diplomityö.
- Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy. Tammertekniikka.

- Hietalahti, L. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy. Tammertekniikka.
- Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy. Tammertekniikka.
- Jauhiainen, J. 2006. TL908Z Signaaliteoria. Osa I: Fourier-sarja. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Tekniikan yksikkö. Tulostettu 28.3.2018.
<http://www.oamk.fi/~jjauhi/opedus/signaaliteoria/Signaaliteoria.pdf>
- Korpinen, L. 1997. Sähköverkko-opus. Jännitteenalenema ja tehohäviöt. Tulostettu 9.4.2018.
http://www.leenakorpinen.fi/archive/sahkoverkko/jannitteenalenema_tehohaviot.pdf
- Korpinen, L. 2008. Yliaalto-opus. Tulostettu 29.3.2018.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
- Koskinen, H. & Viljanen, A. 2002. Elektrodynamiikka. Luentomoniste. Tulostettu 14.4.2018. <http://space.fmi.fi/~viljanea/ed2002/ED2002.pdf>
- Metsäteollisuus. 2010. Metsäteollisuus ja energia. Tulostettu 8.4.2018.
<https://www.metsateollisuus.fi/uploads/2017/03/30041711/880.pdf>
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J. 2014. Tekniikan kaavasto. 13. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy. Tammertekniikka.
- Neumann, R. 2007. The importance of IEC 61000-4-30 Class A for the Coordination of Power Quality Levels. 9th International Conference. Electrical Power Quality and Utilization. 9–11.10.2007. Barcelona.
- Nieminen, AJ. N.d. Työ 54. Vaihe-ero ja resonanssi. Tulostettu 15.4.2018.
<http://www.kotiposti.net/ajnieminen/sa18.pdf>
- Nokian Capacitors Oy. 2008. Pienjännitetuotteiden tuote-opas. Tulostettu 14.4.2018.
<https://www.sahkonumerot.fi/5704580/doc/brochure/>
- SFS-EN 50160. 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Luettu 14.4.2018. Vaatii käyttöoikeuden.
<https://online.sfs.fi.elib.tamk.fi/fi/index/tuotteet/SFSSahko/CENELEC/ID2/5/166055.html.stx>
- Shmilovitz, D. 2005. On the Definition of Total Harmonic Distortion and Its Effect on Measurement Interpretation. Tulostettu 27.3.2018.
<http://www.eng.tau.ac.il/~shmilo/10.pdf>
- Silvonen, K. 2017. Sähkötekniikka ja elektroniikka. Tulostettu 9.4.2018.
<https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/481824/course/section/95538/spe-ste-osa4.pdf>
- Tampereen Sähköverkko. 2017. Verkkopalveluhinnasto. Tulostettu 29.3.2018.
<https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkoverkko/hinnastot-ja-sopimusehdot/2017-10-01---verkkopalveluhinnasto--tehopohjaiset-tuotteet.pdf>

Tampereen Sähköverkko. 2018. Loistehon hinnoittelu ja kompensointi. Tulostettu 29.3.2018. <https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkoverkko/tsv-ohjepankki/2.sahkonsuunnittelijalle-ja-urakoitsijalle/5.-loisteho-ja-kompensointi/1.-loistehon-kompensointi.pdf>

Tuusa, H. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. Luku 11. Sähkömoottorikäytöt. Tulostettu 9.4.2018. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/11sahkomoottorikaytot.pdf

UTU Oy. N.d. Loistehon kompensointi. Yliaallojen suodatus. Tulostettu 30.3.2018. https://www.utu.eu/sites/default/files/attachments/loisteho_yliaallot_sahkoverkoissa_id_73304.pdf

LIITTEET

Liite 1. Mittauspöytäkirja

Keskuksen nimi							
Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U_I	L12	L23	L31			
					(V)		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I_I	L1	L2	L3			
					(A)		
Jännitteen kokonaissärö	THD-F (U)	L12	L23	L31			
					(%)		
Virran kokonaissärö	THD-F (I)	L1	L2	L3			
					(%)		
Harmoniset yliaaltojännitteet (%)	U_h	3	5	7	9	11	13
	L12						
	L23						
	L31						
		15	17	19	21	23	25
	L12						
	L23						
	L31						
Harmoniset yliaaltovirrat (%)	I_h	3	5	7	9	11	13
	L1						
	L2						
	L3						
		15	17	19	21	23	25
	L1						
	L2						
	L3						
Kokonaispätöteho	P		(kW)				
Kokonaisloisteho	Q		(kVar)				

