

Janne Kujansuu

LOISTEHON JA YLIAALTOJEN KOMPENSOINTI
SÄHKÖVERKOSSA

Sähkötekniikan koulutusohjelma
2014

LOISTEHON JA YLIAALTOJEN KOMPENSOINTI SÄHKÖVERKOSSA

Kujansuu, Janne
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Joulukuu 2014
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 44
Liitteitä: 1

Asiasanat: loisteho, yliaallot, kompensointi, sähkö, sähkön laatu

Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää mitä loisteho ja yliaallot tarkoittavat sähkön loppukäyttäjän kannalta sekä miten niitä voisi hallita.

Työ on suoritettu, koska on herännyt epäily yliaaltojen ilmenemisestä loppukäyttäjän verkossa. Tämän lisäksi on haluttu saada kokonaiskuva loistehokompensoinnin riittävydestä.

Työssä käytettiin Metrel Power Q4, MI2592 energia-analysaattoria loistehojen ja yliaaltojen mittauksessa.

Tutkittavaan pienjänniteverkkoon syötetään sähköä kahdella 1 MVA 20/0,4 kV muuntajilla joiden toisiopuolelta mittaukset on suoritettu.

Työn tilaaja ei halua esiintyä nimellään tässä opinnäytetyössä, joten tästä syystä tilaajan nimeä tai heidän toimintaansa viittaavia asioita ei työssä mainita.

COMPENSATION OF REACTIVE POWER AND HARMONICS IN TRANSMISSION SYSTEM

Kujansuu, Janne

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical engineering

December 2014

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 44

Appendices: 1

Keywords: reactive power, harmonic, electric, power quality

The purpose of this thesis was to find out what power quality means and what causes reactive power and harmonics in transmission system.

Main idea of this thesis was also to find answers how to reactive power and harmonics can be eliminated or how to reduce them.

Metering has been made with Metrel Power Q4, MI2592 energy analyser.

Two 1 MVA transformers feed internal transmission system that we research and metering have been made by secondary side of transformer.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	VAIHTOSÄHKÖN TEHO	6
2.1	Näennäisteho.....	6
2.2	Pätöteho ja vaihesiirtokulma.....	7
2.3	Taajuus	8
3	LOISTEHO	8
3.1	Mitä loisteho on	8
3.1.1	Induktiivinen loisteho.....	10
3.1.2	Kapasitiivinen loisteho.....	10
3.2	Loistehosta aiheutuvat kustannukset	10
3.3	Loistehosta aiheutuvat häiriöt ja häviöt	11
3.4	Loistehon kompensointi.....	12
3.4.1	Loistehokompensoinnin mitoittaminen mittaamalla.....	13
3.4.2	Loistehokompensoinnin mitoittaminen laskemalla.....	13
3.4.3	Loistehokompensoinnin mitoittaminen taulukon arvoilla.....	14
3.5	Loistehon kompensoinnin hyödyt.....	15
4	YLIAALLOT	16
4.1	Mitä yliaallot ovat.....	16
4.1.1	Harmoninen ja epäharmoninen yliaalto	17
4.1.2	Yliaaltojänniteiden sallitut raja-arvot liittymispisteessä	18
4.1.3	Yliaaltovirtojen sallitut raja-arvot liittymispisteessä.....	18
4.2	Yliaaltoja aiheuttavia laitteita	19
4.2.1	Resonanssipiirin syntyminen.....	20
4.3	Yliaaltojen aiheuttamat ongelmat	21
4.4	Yliaaltojen suodattaminen	22
4.4.1	Estokelaparisto	23
4.4.2	Aktiivisuodatin	23
4.4.3	Passiivinen yliaaltosuodatin	23
4.4.4	Staattinen kompensattori	24
4.4.5	Kolmannen yliaallon suodattaminen.....	24
4.5	Yliaaltojen suodattamisen hyödyt.....	25
5	LOISTEHON JA YLIAALTOJEN MITTAUS	25
5.1	Mittalaite	26
5.2	Käytännön mittaukset	27
6	TULOKSET	28
6.1	Loistehomittausten tulokset	28

6.1.1 Pääkeskus 1	28
6.1.2 Pääkeskus 2	29
6.2 Yliaaltomittaukset.....	31
6.2.1 Pääkeskus 1	31
6.2.2 Pääkeskus 2	35
7 TOIMENPITEET JA PÄÄTELMÄT	40
7.1 Loisteho	40
7.2 Yliaallot	41
LÄHTEET.....	43
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Jokainen meistä osaa kuvitella mielessään, miten sähkö kulkee monitorin näytöllä piirtäen tasaista sinimuotoista aaltoa silmiemme eteen. Näin myös insinöörikunnan edustajat sen näkevät, kun heille kerrotaan alkeita sähkötekniikan ja vaihtovirran teoriasta.

Todellisuus on kuitenkin toisenlainen. Käyttämämme sähkökoneet ja -laitteet on suunniteltu toimimaan puhtaasti siniaaltoa mukailevalla jännitteellä ja virralla. Sähkön laadussa ilmenevät ongelmat saattavat aiheuttaa meille tutuissa laitteissa selittämättömiä ongelmia ja rikkoutumisia, joille emme osaa määritellä näkyvää ja järjestyvä selitystä.

Tällöin ongelmat saattavat juontaa juurensa sähkön laadullisiin ongelmiin ja vialle voidaan ehkä esittää, jokin järjellinen selitys.

2 VAIHTOSÄHKÖN TEHO

2.1 Näennäisteho

Näennäisteho on se sähkötehon muoto, joka sisältää pätötehon ja loistehon. Näennäistehon yksikkö on voltiampeeri eli VA ja tunnus S .

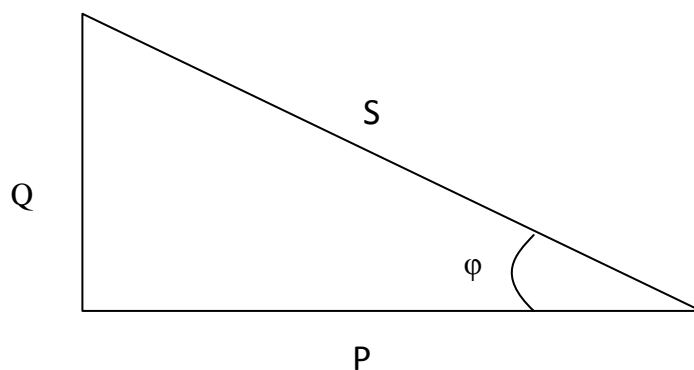
Näennäistehon, pätötehon ja loistehon suhdetta kuvataan seuraavalla yhtälöllä ja tehokolmiolla (Kuva 1):

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

Missä: $S = \text{Näennäisteho}$

$P = \text{Pätöteho}$

$Q = \text{Loisteho}$

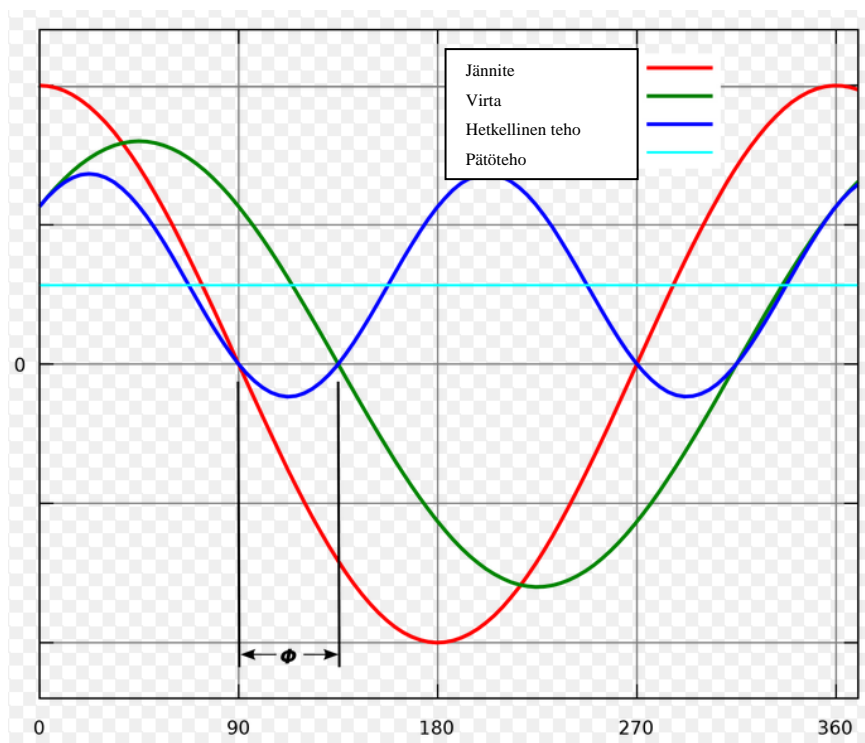


Kuva 1. Perustaajuinen tehokolmio

2.2 Pätöteho ja vaihesiirtokulma

Pätöteho on vaihtosähkön keskimääräistä tehoa, joka impedanssin resistanssissa muuttuu lämmöksi. Pätöteho siis tekee työtä eli se siirtyy sähkölähteestä pysyvästi sähkölaitteeseen ja sen yksikkö on Watti eli W ja tunnus P.

Vaihesiirtokulmalla (φ) kuvataan vaihe-eroa, jonka kuormitusimpedanssi on synnyttänyt jännitteen ja virran välille (Kuva 2). Mitä enemmän vaihesiirtoa virrassa on, niin sitä enemmän tarvitaan virtaa tuottaakseen sama määrä pätötehoa.



Kuva 2. Vaiheensiirtokulman esitys käytännössä.

Pätöteho määritellään seuraavalla yhtälöllä:

$$P = UI \cos \varphi$$

Missä: $P = \text{Pätöteho}$

$I = \text{Virta}$

$\cos \varphi = \text{Vaihtosähkön tehokerroin}$

/5/

Kuormituksen ollessa puhtaasta resistanssia eli kun vaihesiirtokulma on 0° ja tehokerroin 1, niin pätötehon yhtälö yksinkertaistuu muotoon.

$$S = P = UI$$

/11/

2.3 Taajuus

Suomen sähköjakeluverkon taajuus on 50 Hz. /2/

Säätämällä taajuutta voidaan säätää pätötehoa. Sähköverkon moitteeton toiminta edellyttää taajuuden pysymistä lähellä nimellisarvoa. /1/

3 LOISTEHO

3.1 Mitä loisteho on

Sähköä käyttävät kulutuslaitteet ottavat sähköverkosta pätötehon lisäksi myös loistehoa eli reaktiivista tehoa, jota kutsutaan myös loissähköksi. Loisteho sykkii edestakaisin sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä. Loistehosta puhuttaessa puhutaan yleensä induktiivisesta loistehosta. Loistehon yksikkö on kVAr. /5/

Loisteho aiheuttaa ongelmia erityisesti teollisuuslaitoksissa. Kotisähköverkoissa syntyy myös loistehoa, mutta niin pieniä määriä, etteivät sähköyhtiöt ole kiinnostuneita siitä. /4/

Pelkkää pätötehoa eli resistiivistä tehoa kuluttavat lämmitysvastukset ja hehkulamput, jolloin loistehoa ei kuluteta eikä synnytetä eli tehokerroin on tällöin 1. /5/

Loistehokuormat aiheuttavat häviöitä sähköverkossa ja lisäävät komponenttien mitoitusarvetta suuremmaksi niin jakeluverkossa, kuin myös loppukäyttäjänkin sähköverkossa. Lisäksi kompensoimattomana loisteho aiheuttaa sähkön loppukäyttäjille ylimääräisiä loistehomaksuja. /2/

Taulukko 1 esittää teollisuudessa käytettävien laitteistojen tyypillisiä loistehoarvoja verrattuna niiden tehokertoimeen.

Kuorma	cos φ Tehokerroin (W/VA)	tan φ 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

Taulukko 1. Vertailu eri kuormien tehokertoimista ja loistehon tarpeesta. /7/

Kuorman vaatima loistehon tarve voidaan päätellä tehokertoimen cos φ avulla.

$$\cos\varphi = P/S \rightarrow \tan\varphi = Q/P$$

Missä: $Q = \text{Loisteho}$

$S = \text{Näennäisteho}$

$P = \text{Pätöteho}$

$\cos\varphi = \text{Tehokerroin}$

/6/

3.1.1 Induktiivinen loisteho

Induktiivinen loisteho tarkoittaa, että vaihesiirtokulma on positiivinen eli loistehoa kulutetaan. Tällöin virta on jännitettä 90° jäljessä.

Induktiivista loistehoa syntyy, kun magnetointienergiaa siirretään sähkölaitteessa. Esimerkiksi oikosulkumoottori tarvitsee magnetointienergiaa, jotta se saadaan pyörimään. Induktiivista loistehoa kuluttavat myös muuntajat, oikosulkumoottorit ja puolijohdekuormat. /5/

Kaikilla sovelluksilla, jotka sisältävät käämityksen ja joissa käytetään magneettikenttää hyväksi, on toimintaedellytyksenä se, että magnetointienergiaa siirretään. Tällöin kulutetaan loistehoa. ”Magnetointienergian siirtäminen kuormituksen ja generaattorin välillä tarkoittaa loistehon siirtoa.” /4/

3.1.2 Kapasitiivinen loisteho

Kapasitiivinen loisteho tarkoittaa, että vaihesiirtokulma on negatiivinen eli loistehoa synnytetään. /5/

Tällöin virta on jännitettä 90° edellä. Kapasitiivista loistehoa synnytetään kondensaattoreilla. /6/

3.2 Loistehosta aiheutuvat kustannukset

Loistehosta laskutetaan siirtoyhtiön toimesta, kun pääsulakekoko on 80 A tai suurempi 400 V pienjännitejärjestelmissä. Yli 1000 V eli keskijännitejärjestelmissä loistehokomponentti on aina mukana riippumatta sulakekoosta. Sähkyhtiö laskuttaa kuukausittain korkeimman tuntikohtaisen keskiarvon mukaan. /3/

Sähkön käyttäjällä on ilmaisosuus loistehon laskutuksessa, joka on 20 % pätötehon määrästä eli maksettavaa loistehomaksua tulee vain jos ylitetään ilmaisosuuden määrä. Loistehomaksun määräytymisen päättää kuitenkin jakeluyhtiö ja sen hinnoittelussa on suuriakin eroja eri yhtiöillä. /6/

Laskutettava loisteho määräytyy seuraavan yhtälön mukaan:

$$Q_{LASK} = Q_{MAX} - k * P_{MAX}$$

Missä: $Q_{LASK} = \text{Laskutettava loisteho (kVAr)}$

$Q_{MAX} = \text{Loistehon mitattu huippuarvo tunnin keskiarvolla}$

$P_{MAX} = \text{Pätötehon mitattu huippuarvo}$

$k = \text{Ilmaisosuus}$

/8/

Loistehon kulutukseen pyritään vaikuttamaan hinnoittelulla, jolloin kuluttajien olisi taloudellisesti kannattavampaa investoida loistehon kompensointilaitteisiin kuin maksaa loistehon käytöstä. Loistehon lisääntyvä käyttö saattaa kasvattaa myös pääsulakkeen kokoa, siitä johtuvaa perusmaksua ja liittymismaksua. /2/

Loistehomaksu Caruna Oy:llä on 4,55 €/kVar/kk alv 0%. Loistehomaksu on sama riippumatta siitä kuluttaako vai tuottaako loistehoa. Caruna Oy on tämän opinnäytteen sähkönkäyttäjän sähkönsiirtoyhtiö. /9/

3.3 Loistehosta aiheutuvat häiriöt ja häviöt

Loisteho aiheuttaa erinäisiä ongelmia sähköön loppukäyttäjille, joita ovat:

- sähköliittymän häviöt kasvavat ja liittymän kyky siirtää pätötehoa pienenee
- pääsulakkeen, liittymismaksun ja perusmaksun kasvaminen suuremmaksi
- kustannukset kulutetusta induktiivisesta loistehosta ja joissain tapauksissa myös tuotetusta kapasitiivisesta loistehosta
- kasvanut sähkölasku, koska loppukäyttäjä maksaa näennäistehosta
- mahdolliset uudet investoinnit alentuneesta pätötehon siirtokyvystä

/2/15/

Loisteho aiheuttaa virtalämpöhäviöitä johdoissa ja seuraavan yhtälön mukaisesti.

$$P_h = 3(I_p^2 + I_q^2)R$$

Missä: $P_h =$ Häviöteho
 $I_p =$ Virran pätökomponentti
 $I_q =$ Virran loiskomponentti
 $R =$ Johdon resistanssi

Johtuen yllä olevasta yhtälöstä on perusteltua kompensoida kuormaa niin, että loistehokomponentti olisi mahdollisimman pieni ja täten myös tehohäviöt pienenisivät. /4/

3.4 Loistehon kompensointi

Loistehoa ei ole kannattavaa siirtää pitkiä matkoja, koska se lisää johtojen, muuntajien sekä muiden sähkölaitteiden häviöitä ja sitä on helppo tuottaa tai kuluttaa lähellä loistehon kulutuspiistettä. Kompensointi olisi hyvä suorittaa mahdollisimman lähellä sitä piistettä, jossa loistehoa syntyy. Tämä saattaa johtaa kalliisiin laiteinvestointeihin, minkä takia usein päädytään kompensoimaan kuormaa pääkeskuksiin liitetyillä kompensointiyksiköillä (liite 1). /1/2/

Erilaisia loistehokompensointilaitteita ovat:

- estokelapariistot
- kondensaattoriyksiköt
- rinnakkais- tai sarjakondensaattoripariistot
- reaktori
- staattinen kompensattori
- tyristorikytketty kondensaattoripariisto
- yliaaltosuodatin
- pyörivät kompensointilaitteet

/2/

Loistehon kompensointi tapahtuu rinnakkaiskompensoinnilla ja on perusteltua tutkia myös kompensoitavan verkon yliaaltopitoisuutta, jotta vältetään ikäviltä rinnakkaisresonanssi-ilmiöiltä. Yliaaltopitoisessa verkossa onkin syytä käyttää estokelaparistoa loistehon kompensoinnissa tai muuta yliaaltoja suodattavaa kompensointilaitetta. /2/4/

Erilaisia kompensointitapoja teollisuuslaitoksissa on:

- laitekohtainen kompensointi
- ryhmäkohtainen kompensointi
- keskitetty kompensointi

Liiallinen loistehon kompensointi saattaa aiheuttaa ongelmia jakeluverkkoyhtiöille, kun verkon kuormitus on pientä. Tämä johtuu tyhjänäkäyvien johtojen kapasitanssista, jolloin jännite saattaa nousta liian korkeaksi. Suositeltavaa onkin, että kompensointilaitteet olisi aina automaattisesti säätyviä eikä vakio kuormalla toimivia. /2/

3.4.1 Loistehokompensoinnin mitoittaminen mittaamalla

Mitoitettaessa kompensointilaitteita on hyvä suorittaa loistehojen mittaus energia-analysointilaitteilla sellaisena ajankohtana, kun oletettua kompensointikuormaa on eniten. Tällöin päästään luotettavaan tulokseen kompensoitavasta loistehon määrästä. Tätä tapaa käytetään erityisesti, kun mitoitetään olemassa olevan laitoksen loistehokompensointilaitteita. /8/

3.4.2 Loistehokompensoinnin mitoittaminen laskemalla

Kompensointiyksikön laite tai tapauskohtainen mitoittaminen voidaan päätellä myös alla olevasta yhtälöstä, kun tunnetaan tehokerroin ennen kompensointia ja osataan määrittellä haluttu tehokerroin.

$$Q = \frac{P_n}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Missä: $Q =$ Loistehon tarve, $kVAr$

$P_n =$ Kuormituksen nimellisteho, kW (akseliteho)

$\eta =$ Kuormituksen hyötysuhde

$\varphi_1 = \text{Tehokerroin ennen kompensointia}$

$\varphi_2 = \text{Tehokerroin kompensoinnin jälkeen}$

/7/

3.4.3 Loistehokompensoinnin mitoittaminen taulukon arvoilla

Loistehon kompensointi voidaan päätellä myös taulukon 2 arvoista. Tämä tapahtuu niin, että mitataan tai päätellään nykyinen tehokerroin $\cos \varphi_1$ ja katsotaan taulukosta haluttu $\cos \varphi_2$ arvo ja kerrotaan tällä kertoimella olemassa oleva pätöteho. Laskelma antaa tarvittavan loistehokompensointi tarpeen kVAr:ina.

$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$							
	1	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,80
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,40	1,25	1,11	0,98
0,53	1,60	1,46	1,40	1,35	1,27	1,12	0,98	0,85
0,55	1,52	1,38	1,32	1,27	1,19	1,03	0,90	0,77
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,63	1,23	1,09	1,03	0,98	0,90	0,75	0,61	0,48
0,65	1,17	1,03	0,97	0,92	0,84	0,68	0,55	0,42
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,46	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,73	0,94	0,79	0,73	0,69	0,61	0,45	0,32	0,19
0,75	0,88	0,74	0,68	0,63	0,55	0,40	0,26	0,13
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,83	0,67	0,53	0,47	0,42	0,34	0,19	0,05	
0,85	0,62	0,48	0,42	0,37	0,29	0,14		
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,87	0,57	0,42	0,36	0,32	0,24	0,08		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,89	0,51	0,37	0,31	0,26	0,18	0,03		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,14	0,07			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							

Taulukko 2. Kompensointitarpeen määrittäminen kVAr/kW, kun tehokerrointa nostetaan tavoitearvoon. /8/

Esimerkkilaskelma:

$$\cos\phi_1 = 0,8 \text{ ja } P = 100 \text{ kW}$$

Haluamme päästä arvoon $\cos\phi_2 = 0,98$

Taulukko antaa tällöin kertoimen 0,55

$$Q(\text{Loistehontarve}) = P * 0,55 = 100 \text{ kW} * 0,55 = 55 \text{ kVAr}$$

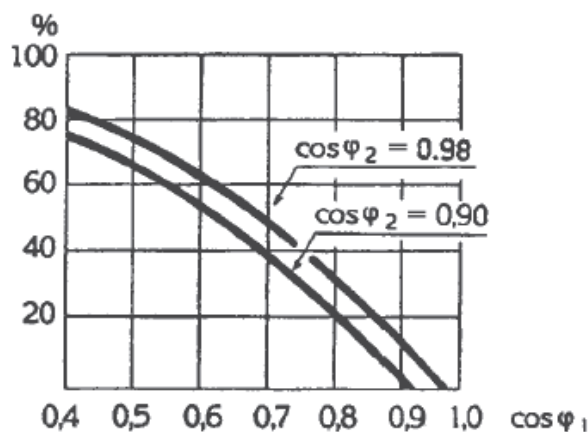
3.5 Loistehon kompensoinnin hyödyt

Loistehon kompensoinnilla saavutetaan seuraavaa hyötyä:

- kokonaisvirta pienenee ja tällöin myös sähköverkossa käytettävien siirto- ja jakelulaitteiden vahvistamistarve häviää
- loistehomaksut pienenevät tai poistuvat
- tehohäviöt ja lämpötilat pienenevät
- jännitealenema pienenee
- liittymän kokoa ei tarvitse suurentaa

/2/15/

Kuva 3 kertoo meille, miten kokonaishäviöt pienenevät, kun kompensoidaan $\cos\phi_1$:nen $\cos\phi_2$:een.

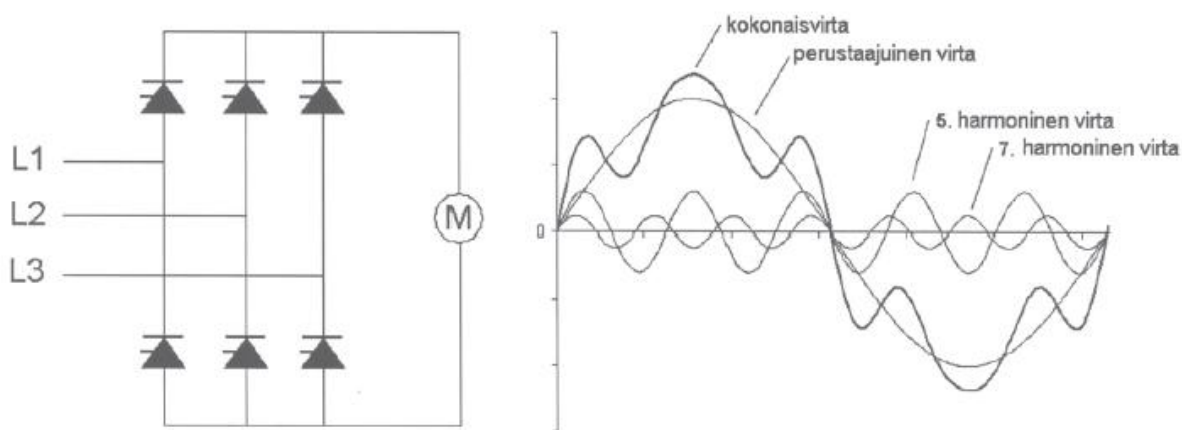


Kuva 3. Loistehon kompensoinnilla saavutettava häviöiden pienentyminen. /8/

4 YLIAALLOT

4.1 Mitä yliaallot ovat

Yliaallot ovat harmonisia ja epäharmonisia 50 Hz perustaajuuden virran tai jännitteen monikertoja, jotka johtuvat niiden säröytymisestä. Säröytyminen tarkoittaa jännitteen tai virran poikkeamaa normaalista siniaallosta. Yleensä jännite säröytyy epälinearisista virtakuormista, mutta myös lineaariset kuormat voivat säröyttää jännitettä. Jännitesäröä voidaan hallita, kun pystytään hallitsemaan virtasärö verkossa. Jännitteen laatumääritykset on esitetty standardissa SFS-EN 50160. /2/



Kuva 4. Yliaaltojen syntyperiaate tasasuuntaajakäytössä. /16/

Taajuus/ Hz	Virta / %
50	100
250	25
350	12
550	6
650	5

Taulukko 3. 6-pulssisen tasasuuntaussillan virtaspektri. /7/

Verkon sisältämien yliaaltojen pitoisuutta kuvataan särökertoimella, jota merkitään lyhenteellä THD (total harmonic distortion). THD-arvo kertoo sen kuinka paljon virrassa tai jännitteessä on yliaaltoja suhteessa perustaajuiseen komponenttiin tai suhteessa komponentin tehollisarvoon. /2/

Harmoninen jännitesärö voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$THD U = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2}$$

Missä: $THD U =$ Harmoninen jännitesärö

$U_i =$ Yliaaltojännite

$U_{50} =$ Perustaajuinen jännite

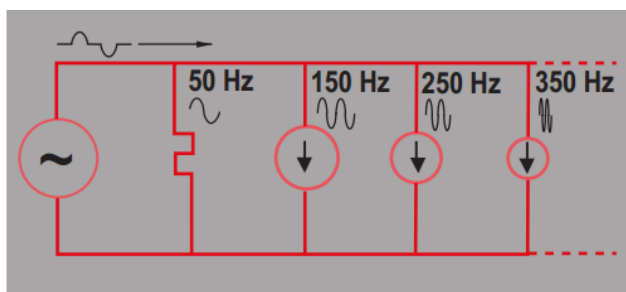
Vastaavalla tavalla voidaan laskea virtasärö eli THD I. /2/

Virran laatua käsittelevää standardia ei ole, mutta sähkönjakeluyhtiö antaa suosituksen sallituista särövirroista pyydetessä. Myös kirja ”Yliaallot ja kompensointi”, jonka on kirjoittanut Sähkö- ja teleurakoitsijoiden liitto STUL ry antaa viitteellisen ohjeistuksen sallituista yliaaltovirroista. /2/

Yleisesti ottaen jakeluverkkoyhtiö vastaa jännitteen laadusta liittymispisteessä ja sähkönkäyttäjä virran laadusta. /6/

4.1.1 Harmoninen ja epäharmoninen yliaalto

Harmoninen yliaalto tarkoittaa taajuutta, joka on 50 Hz kokonaislukumonikerta. Harmoniset yliaallot voidaan tunnistaa järjestyslukunsa perusteella eli 7-yliaalto on virta tai jännite, jonka taajuus on 350 Hz.



Kuva 5. Sähköverkkoa kuormittavat yleisimmät harmoniset yliaalto taajuudet.

Epäharmoninen yliaalto tarkoittaa sellaista yliaaltoa, joka ei ole perustaajuuden monikerta.

Jännitteitä ja virtoja voidaan tutkia energia-analysointilaitteilla ja täten päästä niiden sisältämiin yliaaltotaajuuksiin käsiksi tarkemmin.

Yliaaltopitoiset jännitteet ja virrat voidaan myös mallintaa matemaattisesti Fourier'n sarjakehitelmällä sekä näin päästä tarkemmin käsiksi yliaaltopitoisuuksiin.

4.1.2 Yliaaltojännitteiden sallitut raja-arvot liittymispisteessä

Taulukko 4 antaa harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittymispisteessä standardin SFS-EN 50160 mukaan. Kokonaissärö THD U eli jännitteen kokonaissärö ei saa olla yli 8% perustaajuisesta jännitteestä. Kuitenkin jo 3 % jännitesärö saattaa aiheuttaa ongelmia laitteiden toimintavarmuudessa.

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
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 resonanssitilanteiden vuoksi.

Taulukko 4. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut rajat liittämiskohdassa. /2/

4.1.3 Yliaaltovirtojen sallitut raja-arvot liittymispisteessä

Taulukko 5 esittää suositukset liittymän liityntäpisteessä esiintyville yliaaltovirroille. Referenssivirtana toimii sulakepohjaisen liittymän pääsulakkeen nimellisvirta ja tehohajaisessa liittymässä käytetään referenssivirtana alla olevasta yhtälöstä saatavaa virtaa.

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3}U_n}$$

Missä: $I_{ref} =$ Referenssivirta

$P =$ Liittymäsopimuksen pätöteho, (tilausteho)

$U_N =$ Verkon nimellisjännite

Referenssivirta	Suositeltava raja	
	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta. Lisäksi eri yliaaltojen osalta:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
Kaikki	< 11	7,0 %
	11-16	3,5 %
	17-22	2,5 %
	23-34	1,0 %
	> 34	0,5 %

Taulukko 5. Yli 1000 V keskijänniteverkon suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittämiskohdassa. /2/

4.2 Yliaaltoja aiheuttavia laitteita

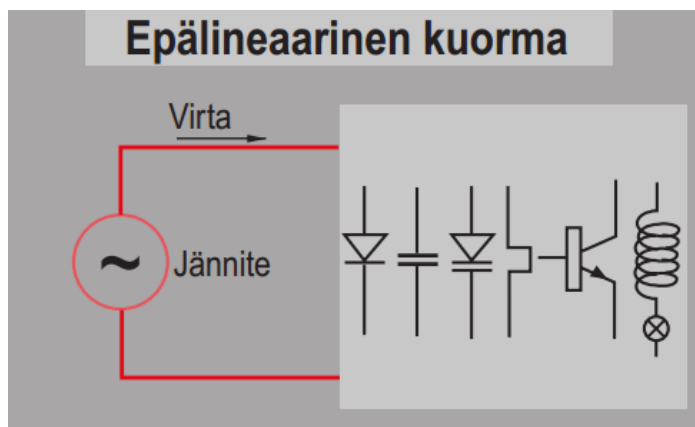
Yliaaltoja eli epälineaarisia kuormia aiheuttavat seuraavat laitteet:

- tasa- ja vaihtosuuntaajat
- hakkuriteholähteet
- puolijohdekytkimet
- energiansäästöloistelamput ja purkauslamput
- tyristorisäätimet
- televisiot ja tietokoneet
- tyhjiökatkaisijat
- hitsauslaitteet
- purkauslamput
- valokaariuunit
- vikaantuneet magneettipiirit mm. muuntajilla ja moottoreilla
- UPS-laitteet

Virran THD arvo on näillä laitteilla yleensä 10-30 %.

Määrittelyn mukaan 1-vaiheiset epälineaariset kuormat aiheuttavat kolmatta yliaaltoa ja loput yliaaltotaajuudet syntyvät epälineaarisista kolmivaiheisista kuormista.

/2/8/12/13/



Kuva 6. Yliaaltoja aiheuttavia epälineaarisia kuormia. /13/

Yliaallot voivat vahvistua resonanssiin kautta. Yliaaltojen vahvistuminen ei kuitenkaan ole mahdollista estokelaparistoja käytettäessä, koska jokaiseen vaiheeseen on liitetty kela, joka estää yliaaltojen vahvistumisen eli yliaaltotaajuuksien resonanssin. Vahvistuminen voi tapahtua, kun käytetään pelkkää kondensaattoriyksikköä ilman sarjankytkettyjä kuristimia. /2/16/

4.2.1 Resonanssiin syntyminen

Resonanssiin syntyy, kun verkon induktanssi yhdessä loistehokompensointi kondensaattorin kapasitanssin kanssa muodostaa resonanssiin. Mikäli resonanssiin taajuus osuu yliaaltotaajuuden kanssa samalle taajuudelle voi yliaaltovirrat kasvaa jopa 20-kertaisiksi.

Resonanssitaajuuden voi laskea alla olevalla kaavalla.

$$n = \sqrt{\frac{S_{SC}}{Q_C}}$$

Missä: $n = \text{Resonanssitaajuuden järjestysluku}$

$S_{SC} = \text{Verkon oikosulkuteho (kVA)}$

$Q_C = \text{Kondensaattorin kompensointiteho (kVAr)}$

/2/16/

4.3 Yliaaltojen aiheuttamat ongelmat

Yliaallot aiheuttavat verkon jännitteen ja virran säröytymisen. Sähkönjakeluyhtiö ei veloita yliaalloista sähkön kuluttajalta maksua, mutta edellyttää sähkön loppukäyttäjältä suunnitelmallisuutta ja standardien mukaisia toteutuksia laiteinvestoinneissa sekä laitteita käytettäessä. Mikäli standardin mukaista ratkaisua ei voida käyttää, niin laitteen käytöstä tulee sopia sähkönjakeluyhtiön kanssa. /2/

Yliaallot aiheuttavat seuraavia ongelmia:

- häviöiden lisääntyminen sähköverkossa ja siihen liitetyissä laitteissa virran tehollisarvon kasvusta
- kuormitettavuuden pieneneminen
- laitevauriot
- sähkölaitteiden lämpeäminen (pienitaajuisilla yliaalloilla)
- atk- ja ohjauslaitteiden ongelmat
- ongelmia ääni- ja radiotaajuisille jännitteillä (korkeataajuiset yliaallot)
- nollajohtimen ylikuormittuminen
- epätahtimoottorien lämpeäminen, häviö- ja momenttiongelmat
- energiakulutusmittareiden ja induktiivisten mittareiden häiriöt

Kolmannet yliaallot summautuvat nollajohtimeen ja ne voivat nostaa nollajohtimessa kulkevan virran yli nollajohtimen sallitun mitoituksen. Tämä nostaa tulipaloriskiä odottomattomasti, koska nollajohdinta ei ole suojattu johdonsuojalaitteilla ja kirjallisuudessa esiintyvien tapausten mukaan on mitattu jopa 3-kertaisia virtoja nollajohtimessa vaihevirtaan nähden. Tästä syystä olisi johtimet mitoitettava standardin SFS 6000-5-52 mukaisesti.

Kolmannet yliaallot myös pienentävät johtimen kuormittamista, koska virran taajuuden kasvaessa johdon vaihtovirtaresistanssi kasvaa.

Moottorit kärsivät myös erilaisista yliaaltojen aiheuttamista ongelmista. Näitä ovat moottorien lämpeneminen, pyörimistä vastustavat tai edistävät yliaallot tai nollajohtimeen summautuvat virrat. Kolmella jaolliset yliaallot summautuvat tässäkin tapauksessa nollajohtimeen. 200 ja 350 Hz yliaaltovirrat edistävät pyörimistä ja lisäävät

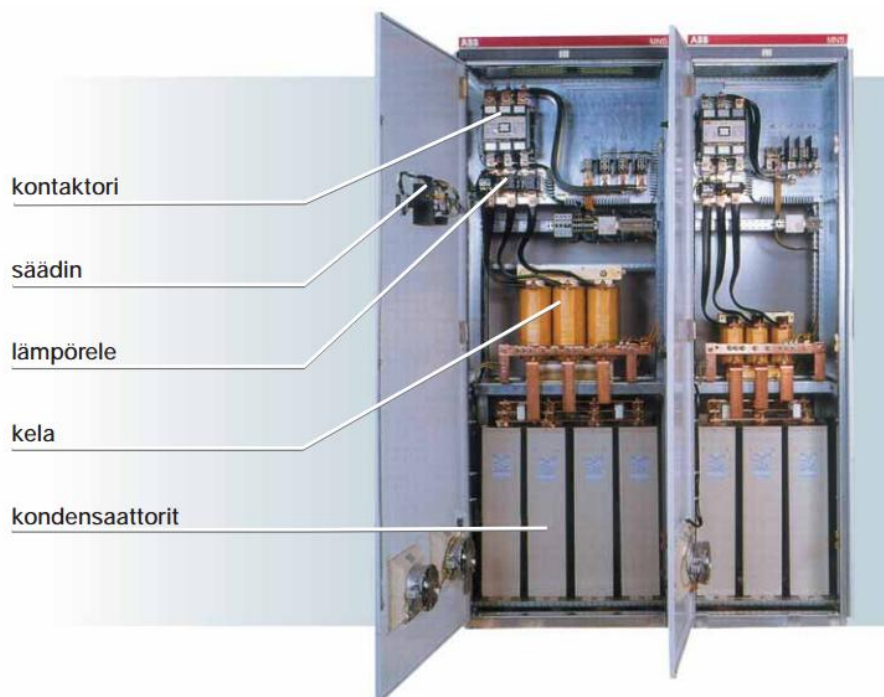
näin lämpenemisiä, kun taas 100, 250 ja 400 Hz yliaaltovirrat jarruttavat moottoria aiheuttaen lisähäviöitä. /13/17/

Myös muuntajien kuormitettavuus saattaa pienentyä verkossa, jossa esiintyy yliaaltovirtoja. /12/

4.4 Yliaaltojen suodattaminen

Yliaaltoja voidaan suodattaa:

- estokelapariustolla
- aktiivisuodattimella
- yliaaltosuodattimella
- staattisella kompensatorilla
- ylirajoittamalla sähköverkko



Kuva 7. Yliaaltosuodattimen rakenne.

4.4.1 Estokelaparisto

Estokelaparistoa ei ole varsinainen yliaaltosuodatin, mutta sitä voidaan käyttää sähköverkoissa suodattimena, joissa esiintyy yli 3 % jännitteen harmonista kokonaissäröä. Estokelaparistoa käytettäessä on tärkeää, että induktanssin ja kapasitanssin suhde valitaan niin, että se muodostaa resonanssitaajuuden jollekin ei-harmoniselle taajuudelle, jotta kompensoitaessa loistehoa ei vahvistettaisi yliaaltoja. Yleisin viritystaajuus estokelaparistolle on 189 Hz. Estokelaparisto viritystaajuus on hyvä valita verkon merkittävimpien yliaaltojen mukaan.

189 Hz taajuudelle viritetty estokelaparisto suodattaa noin 10 - 30 % viidennen yliaallon kokonaismäärästä. /2/

4.4.2 Aktiivisuodatin

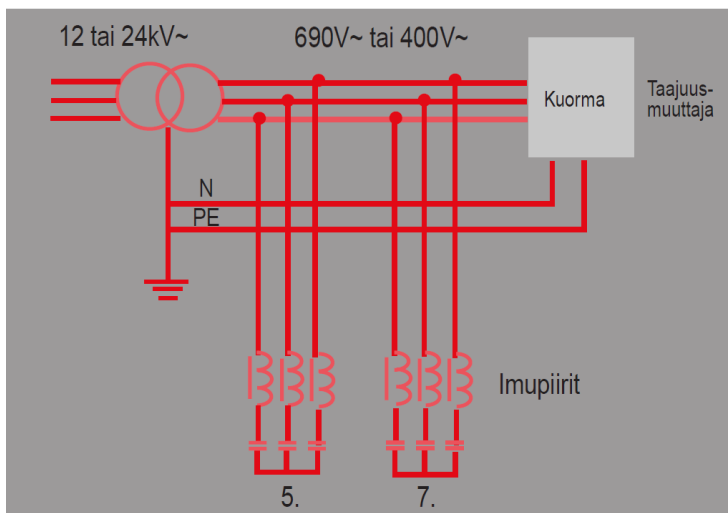
Aktiivisuodatin suodattaa useampia yliaaltotaajuuksia ja se voi toimia pelkästään yliaaltojen suodatuslaitteena. Aktiivisuodattimella voidaan suodattaa myös 3. yliaallot ja sen kerrannaiset.

Aktiivisuodatin on puolijohteilla toteutettu suodatin, toisin kuin passiivinen suodatin. Se reagoi yliaaltotilanteen muutoksiin ja suodattaa yliaallot tuottamalla 180° vaihe-siirrossa olevaa virtaa. Aktiivisuodatin on ohjattu laiteyksikkö, jonka toimintatyyli mukailee taajuusmuuntajan toimintaperiaatetta.

Aktiivisuodatin on kallis laiteratkaisu verrattuna tavallisempaan passiiviseen yliaaltosuodattimeen. /2/

4.4.3 Passiivinen yliaaltosuodatin

Yliaaltosuodatin toimii kuten loistehon kompensointilaite, mutta sillä voidaan suodattaa myös yliaaltoja. Yliaaltosuodattimen induktanssi valitaan niin, että se kondensaattoreiden kanssa muodostaa pieni-impedanssisen resonanssipiirin. Tällä tavalla muodostetaan tehokas imupiiri halutuille yliaaltotaajuuksille.



Kuva 8. 5. ja 7. yliaallon imupiirin havainnekuva. /13/

Teollisuusverkoissa, joissa yliaaltoja esiintyy paljon on suositeltavaa käyttää yliaaltosuodattimia, jotka viritetään yleisimmille yliaaltotaajuuksille, kuten 5., 7. ja 11. yliaallolle. /2/

4.4.4 Staattinen kompensattori

Staattisella kompensattorilla voidaan kompensoida nopeasti ilmeneviä loistehoja ja halulta taajuudelta yliaaltoja, lisäksi laitteella voidaan kompensoida jännitteen muuttosta. Teollisuudessa staattisia kompensattoreita käytetään paikoissa, joissa loisteho ja yliaallot on vaikeimmin hallittavissa.

Kompensaattorilla voidaan poistaa myös jännitteen epäsymmetriaa. Staattisen kompensattorin vasteaika on maksimissaan 10 ms 50 Hz:n verkossa. /2/

4.4.5 Kolmannen yliaallon suodattaminen

Kolmatta yliaaltoa voidaan suodattaa estopiirillä, joka toteutetaan nollajohtimen kanssa sarjaan kytketyllä 150 Hz rinnakkaisresonanssipiirillä. Tällöin kolmas harmoninen yliaaltovirta ei pääse kulkemaan nollajohtimessa. /16/

3. yliaaltoa ei voida suodattaa imupiirillä, kuten voidaan tehdä 5. ja 7. yliaallolle. /7/

4.5 Yliaaltojen suodattamisen hyödyt

Yliaaltojen suodattamisesta saadaan seuraavaa hyötyä:

- sähkön laatu paranee
- vikaantumisherkyys pienenee
- ei resonanssi tai mittausvirheitä
- releiden, sulakkeiden ja muiden sähkölaitteiden selittämättömät toimintahäiriöt poistuvat
- melu pienenee

/15/

5 LOISTEHON JA YLIAALTOJEN MITTAUS

Loistehoa ja yliaaltoja mitattiin teknologiateollisuuslaitoksen pääkeskuksen nousukaapeleista. Laitoksen sähkölaitteisto koostuu kahdesta yhteisteholtaan 2 MVA öljymuuntajasta, jotka syöttävät erikseen sisäistä 400 V pienjänniteverkkoa. Sähkönjakelu suoritetaan muuntajien jälkeen siten, että pääkeskus 1 ja pääkeskus 2 syöttävät alakeskuksia tai isompitehoisia yksittäisiä tuotantolaitteita.

Pääkeskus 1:stä kompensoidaan rinnankytketyllä 12 portaisella Falicon Oy:n FC ALXZO tyyppisellä automaattisella estokelaparistolla, joka on mitoitettu 600 kVarin kuormalle. Tehokerroin on säädetty arvoon $\cos \phi = 1,0$ ja viiveaika portaiden välillä on 40 – 60 sekuntia.

Pääkeskus 2:sta kompensoidaan pääkeskuksen kanssa rinnan kytkettyyn Alpes technologiesin kuusi portaisella automaattisella estokelaparistolla, joka on mitoitettu 200 kVarin kuormalle ja tehokerroin on asetettu arvoon $\cos \phi = 1,0$.

Pääkeskus 2:sen perässä olevaa isompaa loistehokuormaa kompensoidaan tyristoriohjatulla automaattisella ja nopealla estokelaparistolla. Kompensointilaitteen valmistaja on Icar ja tyyppi Multimatic FH20S. Estokelapariston kapasitetti on 440

kVAria ja se reagoi nopeisiin loistehokuormiin 60 ms aikavakiolla ja sen tehokerroin on asetettu arvoon $\cos \phi = 1,0$.

Loistehoa on käytetty yrityksen sähköverkossa ja siitä on maksettu kompensointimaksun muodossa vuonna 2013 noin 1500 € sähkönsiirtoyhtiölle.

Yliaaltoja ei suodateta laitoksen sähköverkossa, kuin sen mitä estokelapariot suodattavat yliaaltoja. Yliaaltoja ei ole tutkittu noin kymmeneen vuoteen mittaamalla. Jännite- ja virtakäyrien on todettu olevan säröytynyttä. Yliaaltojen ei ole voitu todeta aiheuttaneen mitään ongelmia laitoksen laitteistoissa. Tuotantokoneet sisältävät kuitenkin epälineaarisia kuormia käyttäviä komponentteja ja on hyvin ilmeistä, että niitä esiintyy ja että ne aiheuttavat ongelmia, koska laitos käyttää taajuusmuuttajia, tassauntaajia ja tyristorisäätimiä.

5.1 Mittalaite

Työssä tehdyt mittaukset on suoritettu Metrelin Power Q4, MI2592 energia-analysointilaitteella (Kuva 9). Mittari oli yksinkertainen ja helppokäyttöinen sekä käytön tueksi oli laaja ja kattava ohjevihko.

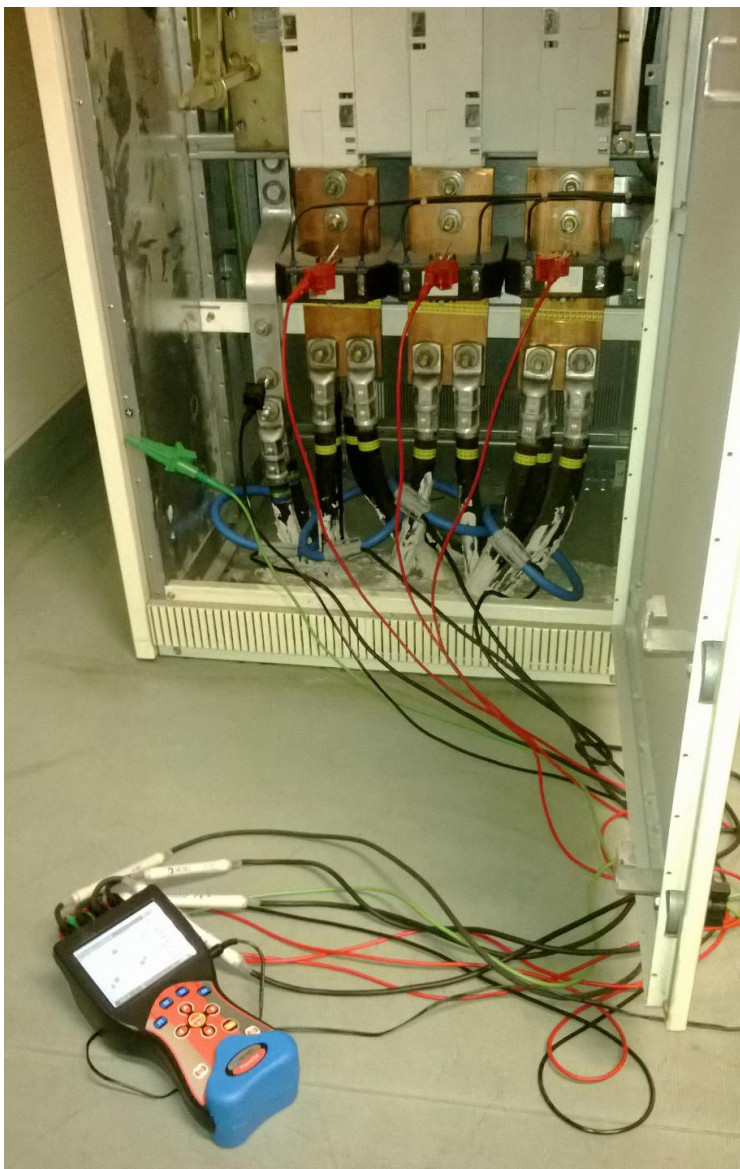


Kuva 9. Metrel Power Q4, MI2592 energia-analysointilaitteella.

Mittaustulokset saatiin siirrettyä mittalaitteesta tietokoneelle Metrel PowerView ohjelmaan USB-kaapelin avulla. Ohjelman avulla voitiin analysoida ja tallentaa mittaustuloksia haluttuun muotoon.

5.2 Käytännön mittaukset

Mittaukset suoritettiin pääkeskusten nousukaapeleista. Työ suoritettiin SFS 6002 turvallisuusohjeita noudattaen ja parityönä yhdessä sähköalan ammattilaisen kanssa. Virtasilmuksia asennettaessa käytettiin kumisia suojahanskoja, joilla eliminoitiin mahdollinen sähköiskun vaaraa. /10/



Kuva 10. Mittauskytkentä pääkeskuksen nousukaapeleilla.

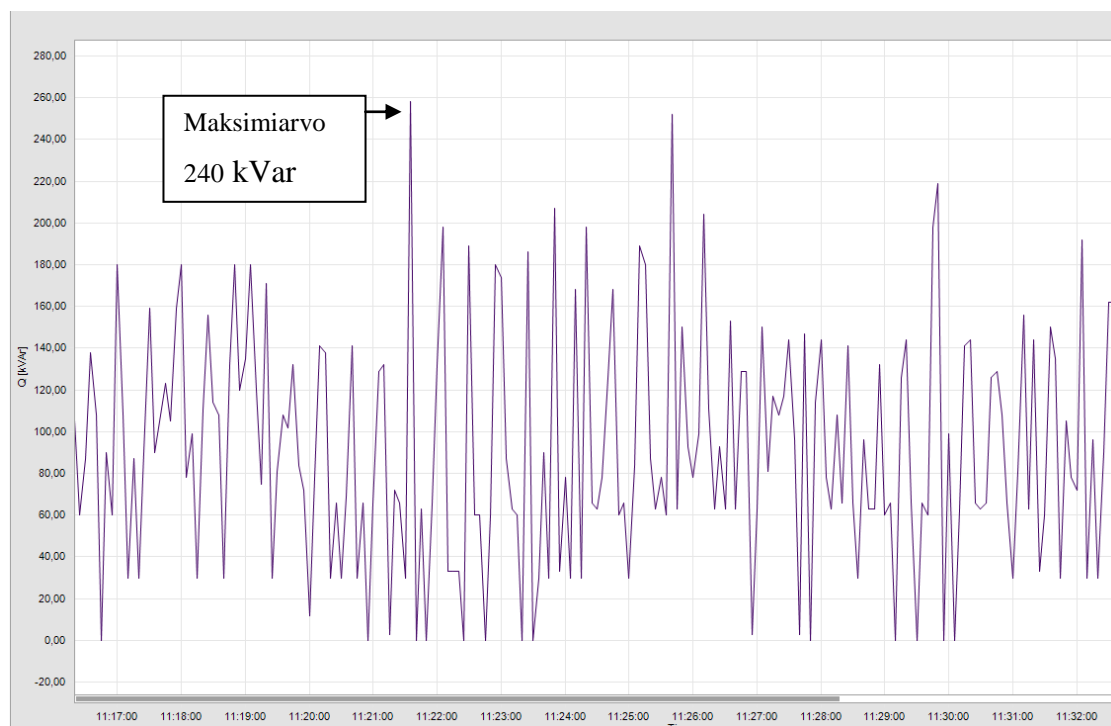
Mittaukset suoritettiin puolen tunnin ajanjaksoina pääkeskuksilla ja energia-analysaattori tallensi tuloksia viiden sekunnin välein.

Kulutus tehtaalla ei ollut huipussaan mittausten aikana, koska tehdas kävi vajaalla kuormalla. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää luotettavina, koska tehdas kävi 600 kW teholla mittausten aikaan.

6 TULOKSET

6.1 Loistehomittausten tulokset

6.1.1 Pääkeskus 1



Kuva 11. Pääkeskus 1. Loisteho mittaus.

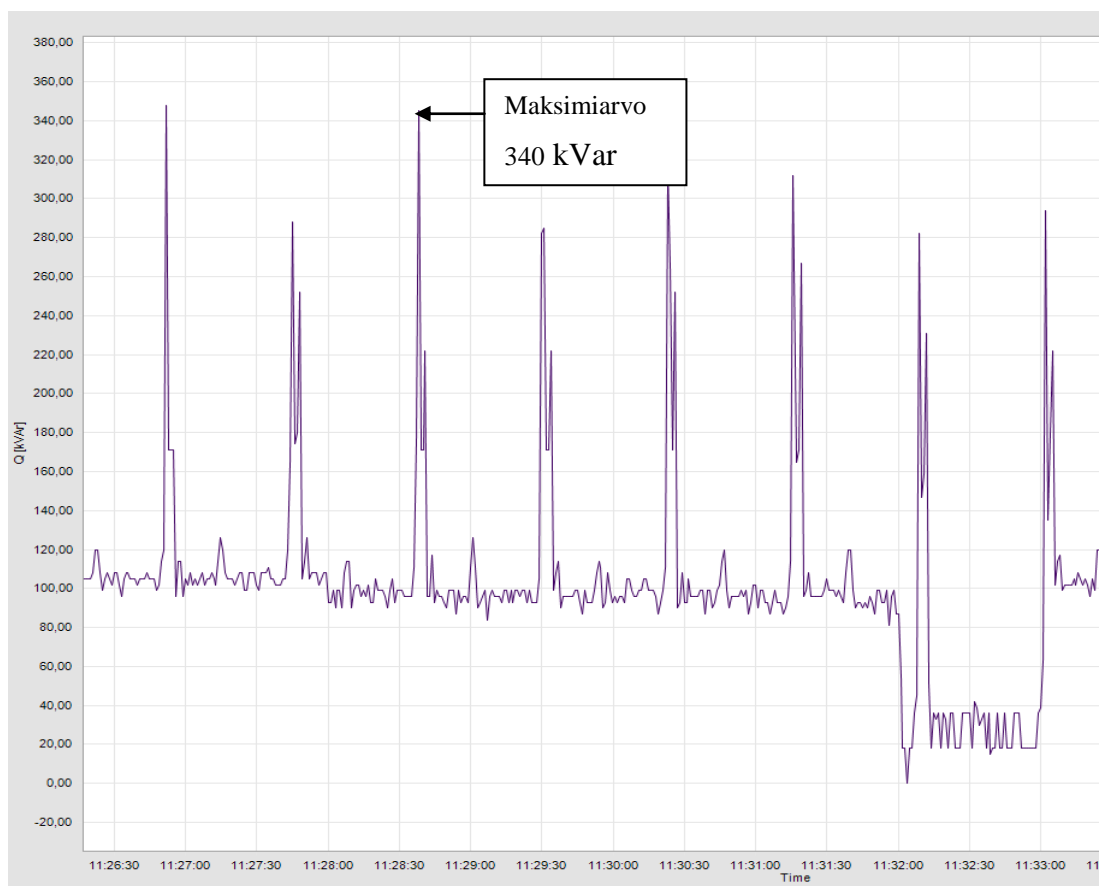
Pääkeskus 1:llä loistehoa esiintyy maksimissaan 240 kVARin piikkeinä pätötehon ollessa noin 550 kW. Keskiarvollisesti induktiivista loistehoa kulutetaan 100 – 200 kVARin kuormilla. Pääkeskusta kompensoidaan 600 kVARin automaattisella paristol-

la, jonka kapasiteetti riittää mainiosti tämän kuorman hallintaan ja maksettavaa loistehomaksua ei synny tällä pääkeskuksella.

Loistehopiikit johtuvat laitoksen tuotantolaitteiden käyttämästä kuormasta. Tuotannossa synnytetään voimakkaita magneettikenttiä kuparikeloilla, joihin jännite ensin tasasuunnataan. Loistehoa syntyy myös tyristorisäätimillä ohjatuista lämmityksiä. Tämänkaltaiset kuormat ovat myös yliaaltopitoista.

Tasaista loistehokuormitusta aiheuttaa tuotantotilojen valaisu, joka on toteutettu purkauslamppuilla eli halogeenilampuilla ja sähkömoottorit sekä niiden ohjaukset.

6.1.2 Pääkeskus 2



Kuva 12. Pääkeskus 2. Loistehon mittaus.

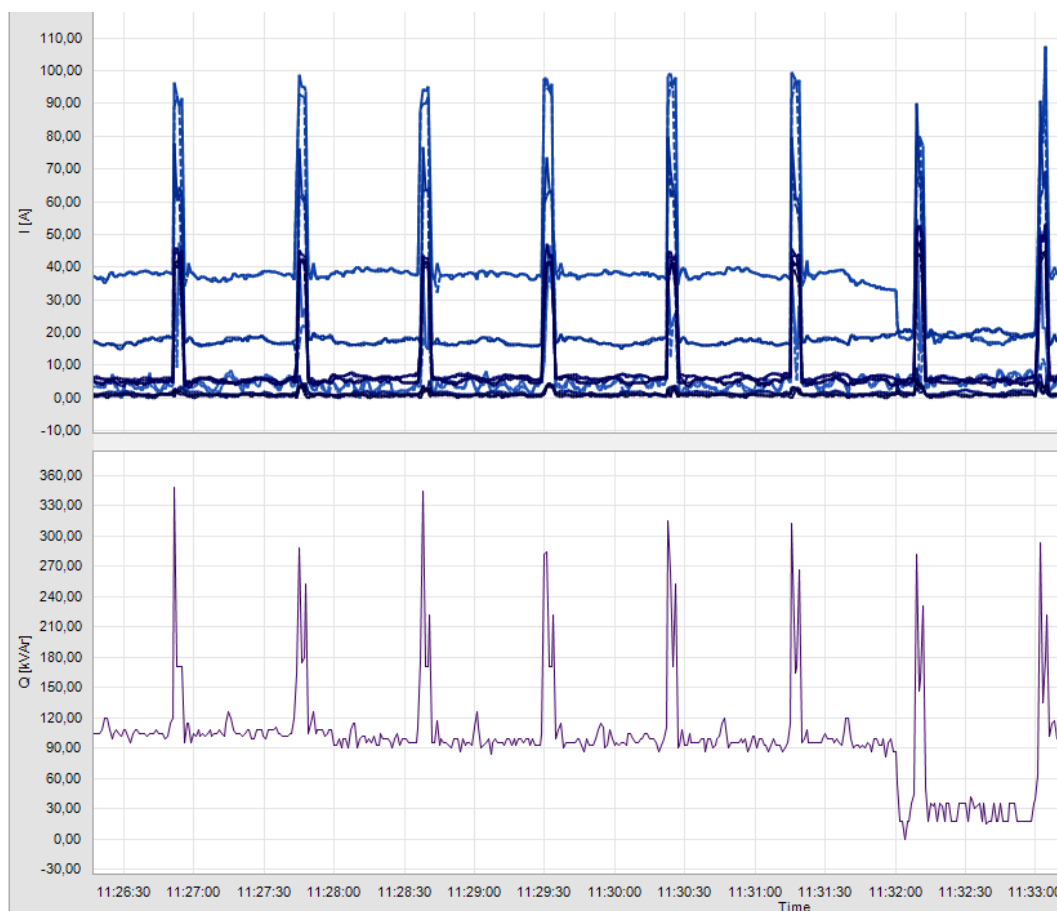
Loistehoa esiintyy pääkeskus 2:lla maksimissaan 340 kVArin piikkeinä ja tasaisena kulutuksena loistehoa käytetään noin 100 kVArina. Laskutettavaa määrää loistehoa ei

kuluteta ja osa syntyvästä loistehosta sisältyy laitoksen ilmaisosuuteen, koska kuu-
kauden pätöteho oli 750 kW ja tällöin ilmaisosuus loisteholle on 150 kVAria.

Peruskuormaa loistehon osalta pääkeskus 2:lla aiheuttaa sähkömoottorit ja niiden oh-
jauslaitteet.

Loistehopiikit johtuvat laitoksen tuotantolaitteiden käyttämästä kuormasta. Tuotan-
nossa synnytetään voimakkaita magneettikenttiä kuparikeloilla, joihin jännite ensin
tasasuunnataan. Loistehoa syntyy myös tyristorisäätimillä ohjatuista lämmityksistä.

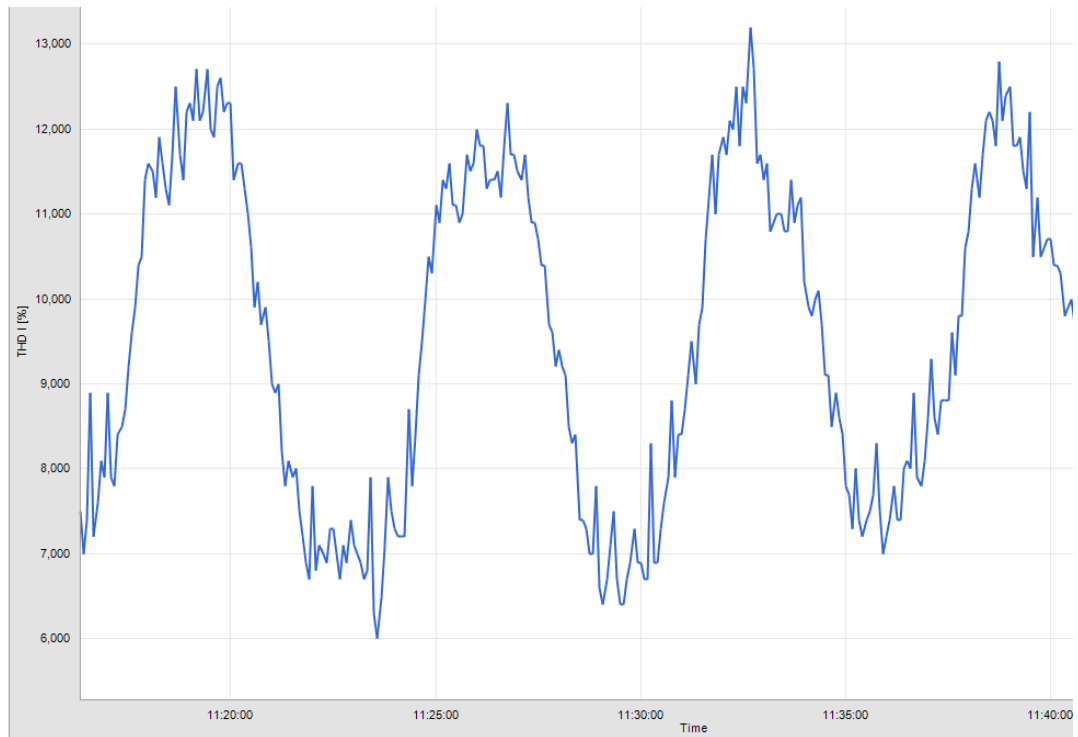
Loistehopiikkien jyrkkä nousu huolestuttaa. On hyvin ilmeistä, että tämänlainen
kuorma synnyttää yliaaltovirtoja. Pääkeskus 2:sen tuloksissa näkyikin melko voima-
kasta yliaaltojen syntyä näiden loistehopiikkien kohdalla, kuten kuvasta 13 käy ilmi.
Tämä on seurausta jännitteen tasasuuntauksesta ja tyristorisäätimistä.



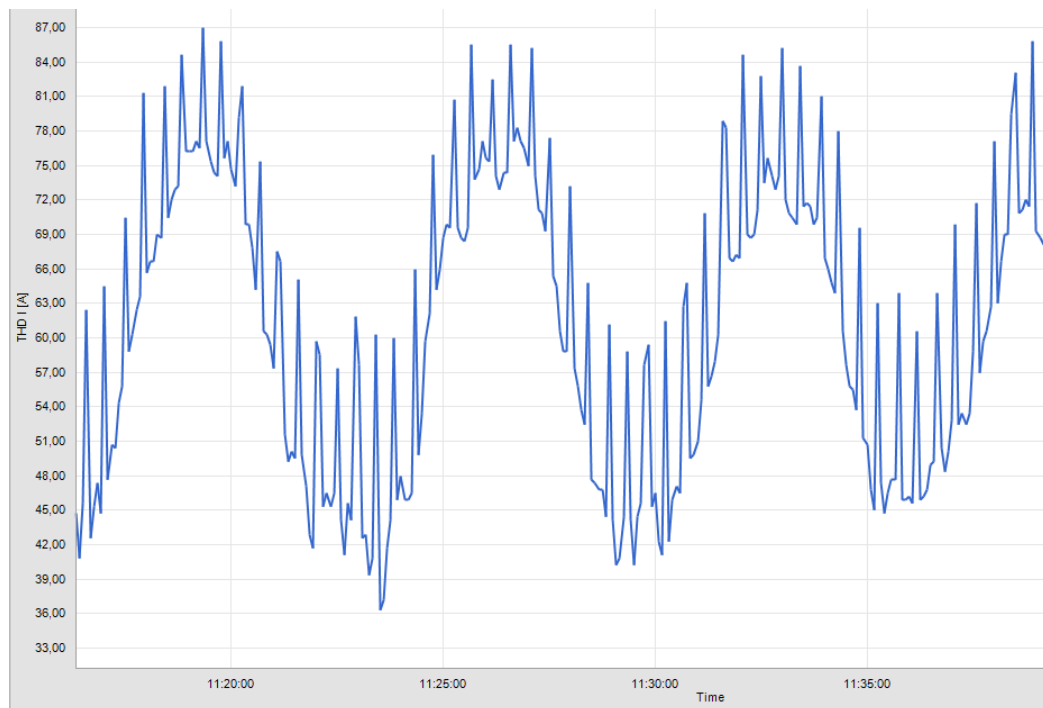
Kuva 13. Pääkeskus 2. Loistehon ja yliaaltojen ilmeneminen samanaikaisesti.

6.2 Yliaaltomittaukset

6.2.1 Pääkeskus 1



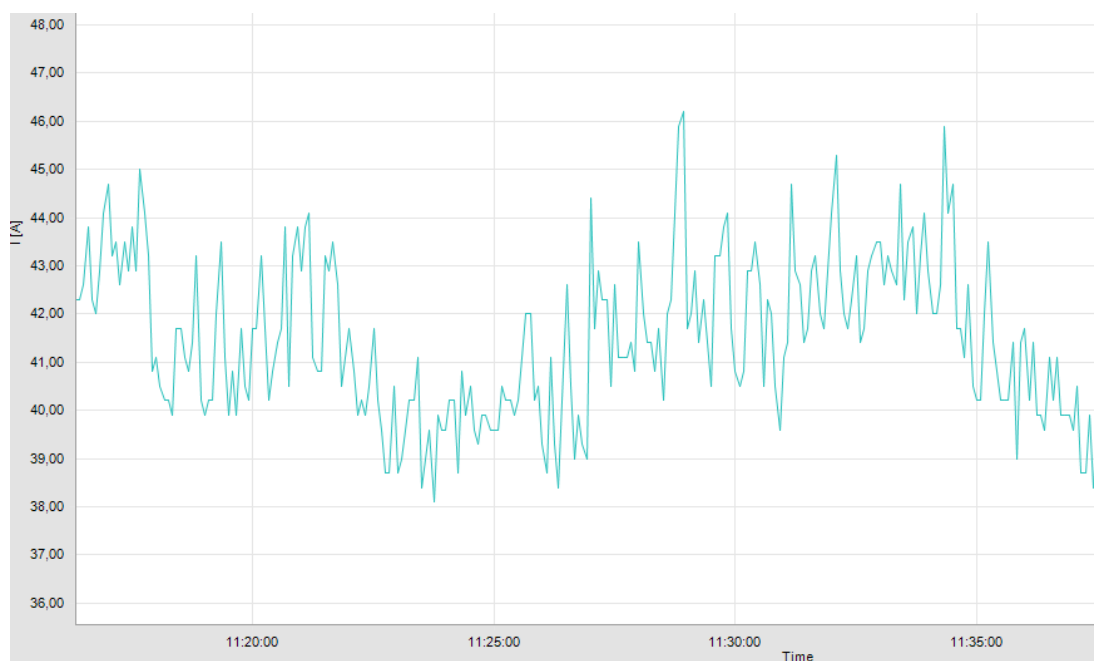
Kuva 14. Pääkeskus 1. Virtasäro THD I (%).



Kuva 15. Pääkeskus 1. Virtasäro THD I (A).

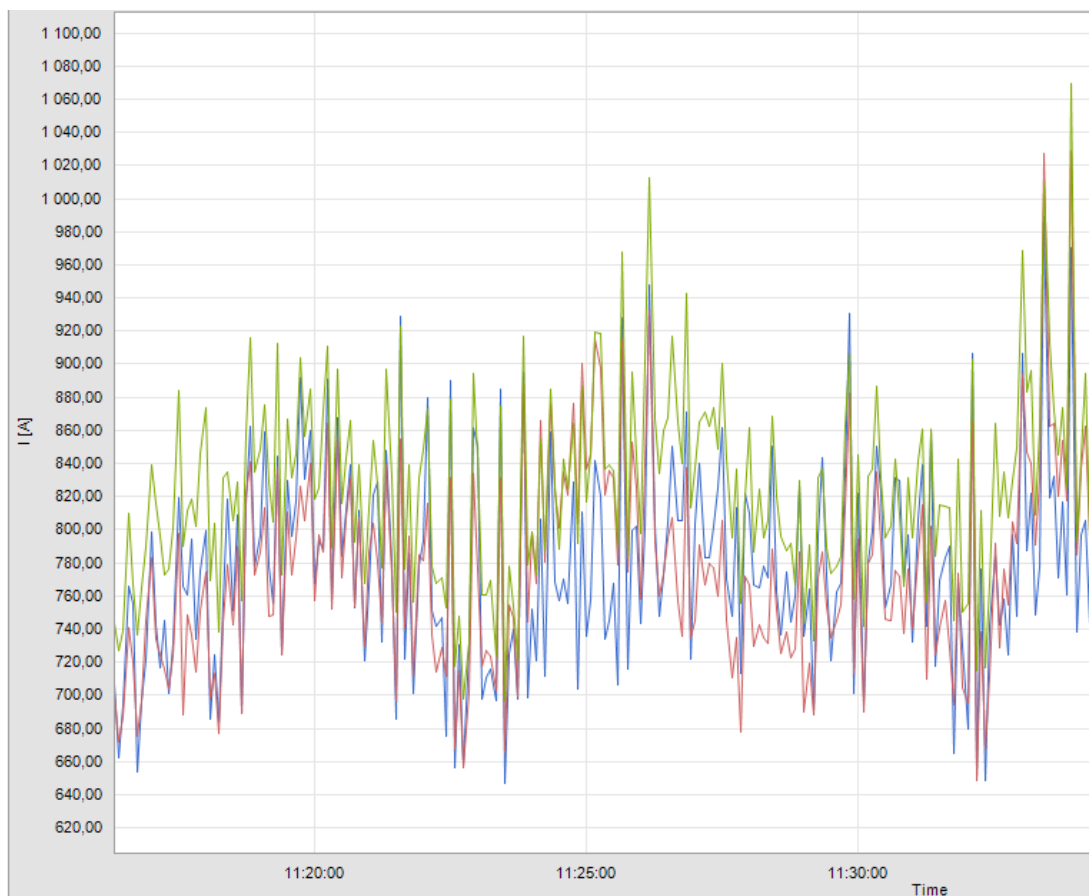
Virtasäröä esiintyy pääkeskuksella maksimiarvolla THD 13 %. Virtasäröä esiintyy jatkuvasti keskiarvolla 9,5 %, joten virtasäröä on kappaleessa 4.1.2 esitetyn taulukon mukaan liikaa, koska sitä saisi olla 8 % referenssivirrasta. Referenssivirta tässä tapauksessa on 1150 A ja sallittu 8 % tästä on 80 A.

Virtasärö ylittää juuri ja juuri suositetut raja-arvot ja siksi mielestäni yliaaltovirtoja tulisi alkaa suodattamaan. Kokonaissärön kasvamista aiheuttavat epälineaariset kuormat, jotka synnyttävät eritaajuisia harmonisia yliaaltovirtoja. Näitä epälineaarisia kuormia ovat tyristorisäätimet, purkausvalaisimet ja tasasuuntaus.

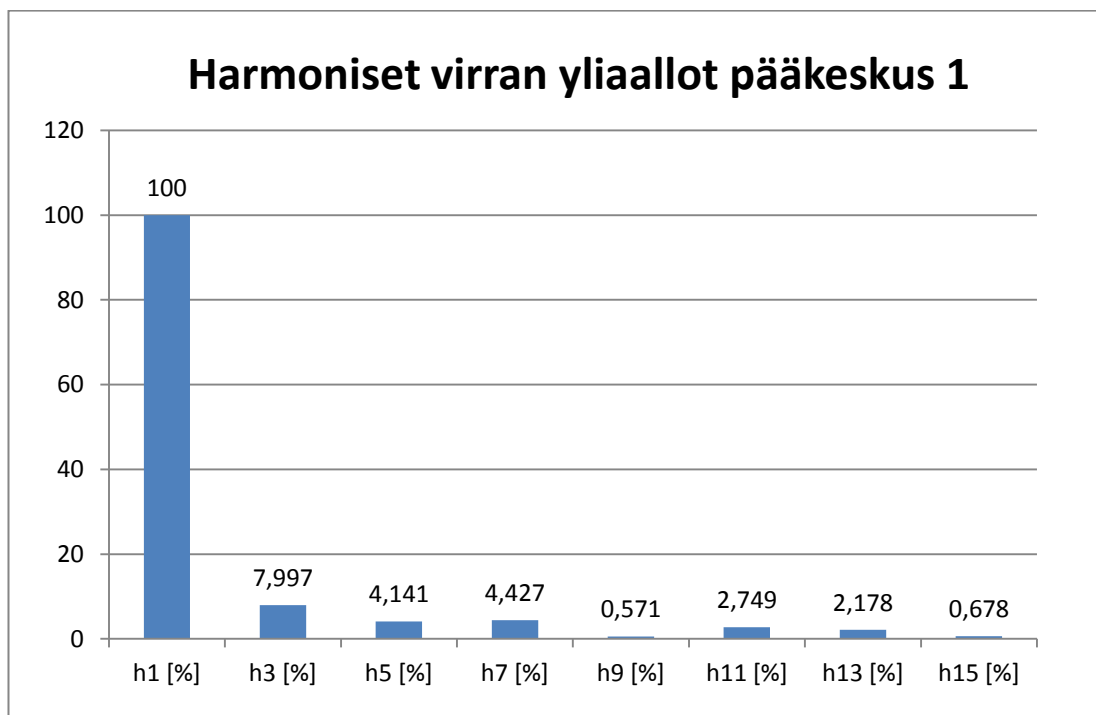


Kuva 16. Pääkeskus 1. Nollajohtimen kuormittuminen.

Nollajohdin kuormittuu liikaa 3. yliaallon takia. Nollajohtimessa kulkeva virta on jatkuvasti noin 40 A. Näin voimakas nollajohtimen kuormittuminen saattaa johtaa kaapeleiden ennenaikaiseen vanhenemiseen tai tulipaloon.



Kuva 17. Pääkeskus 1. Yliaaltopitoisen verkon virtakäyrät L1, L2 ja L3.



Kuva 18. Pääkeskus 1. Virran yliaallot ja niiden prosentuaaliset osuudet perustaajuisesta 50 Hz virrasta.

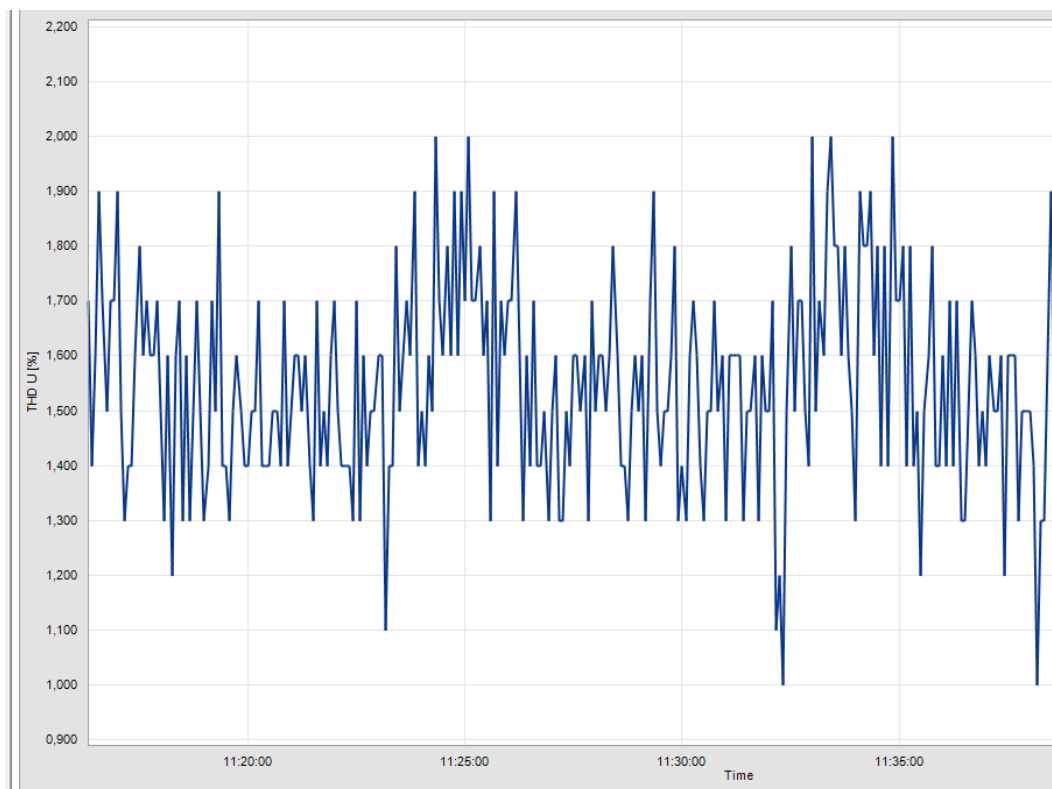
Pääkeskus 1:llä esiintyy yliaaltoja kuvan 18 pylväsdiagrammin mukaisesti. 50 Hz virta on tässä 840 A ja muiden harmonisten virtojen tehollisarvot voidaan laskea prosenttilaskulla.

3. yliaaltovirran tehollisarvo on tällöin $0,07997 \times 840 \text{ A} = 67 \text{ A}$.

3. yliaaltoa ei ole kappaleen 4.1.2 taulukon mukaan liikaa, mutta selvää on, että se rasittaa nollajohdinta liikaa. Pääkeskus 1:llä 3. yliaaltoa synnyttävät tietokoneet, UPS-laitteet, tyristorisäätimet, diodit ja tyristorit, tasasuuntaukset ja valaisuryhmät. Suositeltavaa olisi kompensoida tällainen haitallinen kuorma pois kolmatta yliaaltoa suodattavalla ratkaisulla.

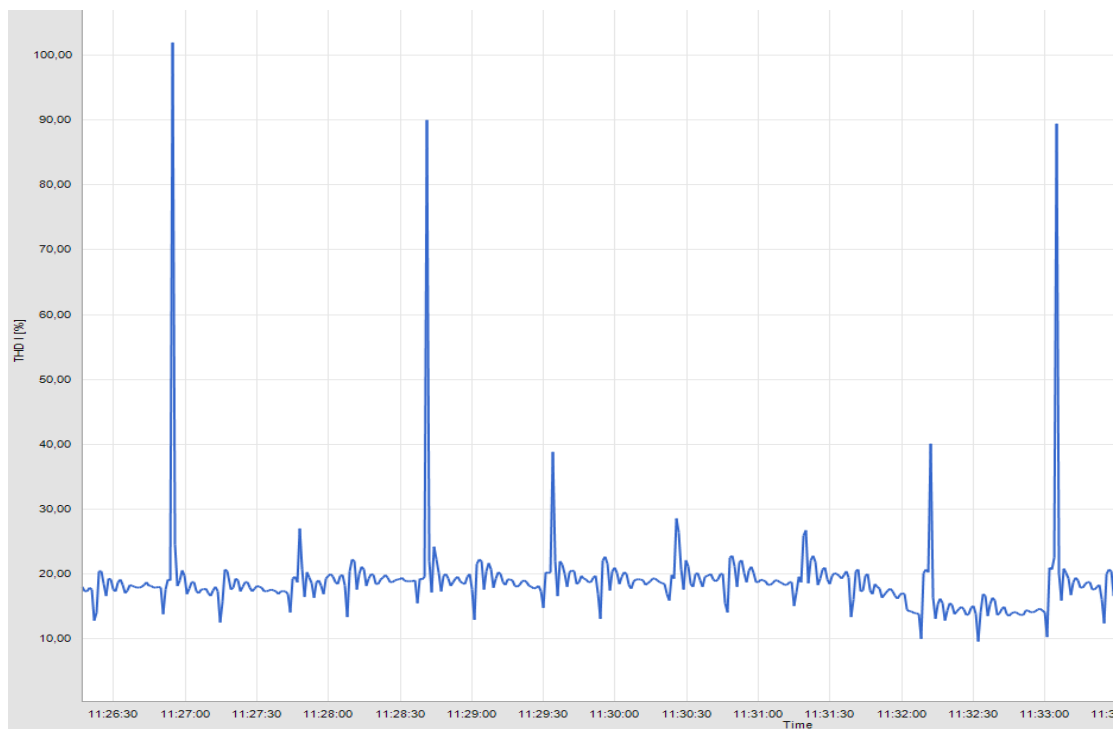
5. ja 7. yliaaltoa esiintyy myös mittaustuloksissa ja niiden suodattamiseen ei ole tarvetta, koska niitä syntyy alle raja-arvojen. Estokelaparisto suodatti 5. yliaallosta pois jopa 30 %, joten osa yliaalloista suodattuu jo näillä laitteilla pois. 5. ja 7. yliaaltoa synnyttävät samat laitteet kuin synnytti kolmatta yliaaltoakin eli jännitteen tasasuuntaajat, tyristorisäätimet ja tietokoneet.

Jännitteen kokonaissäröä ei esiinny mittauksissa paljoa (kuva 19) ja se saadaan hallintaan, kun hallitaan virran yliaallot. Jännitesäröä esiintyi mittauksissa alle 2 %, mikä on standardin SFS-EN 50160 mukaan alle suositusrajan.

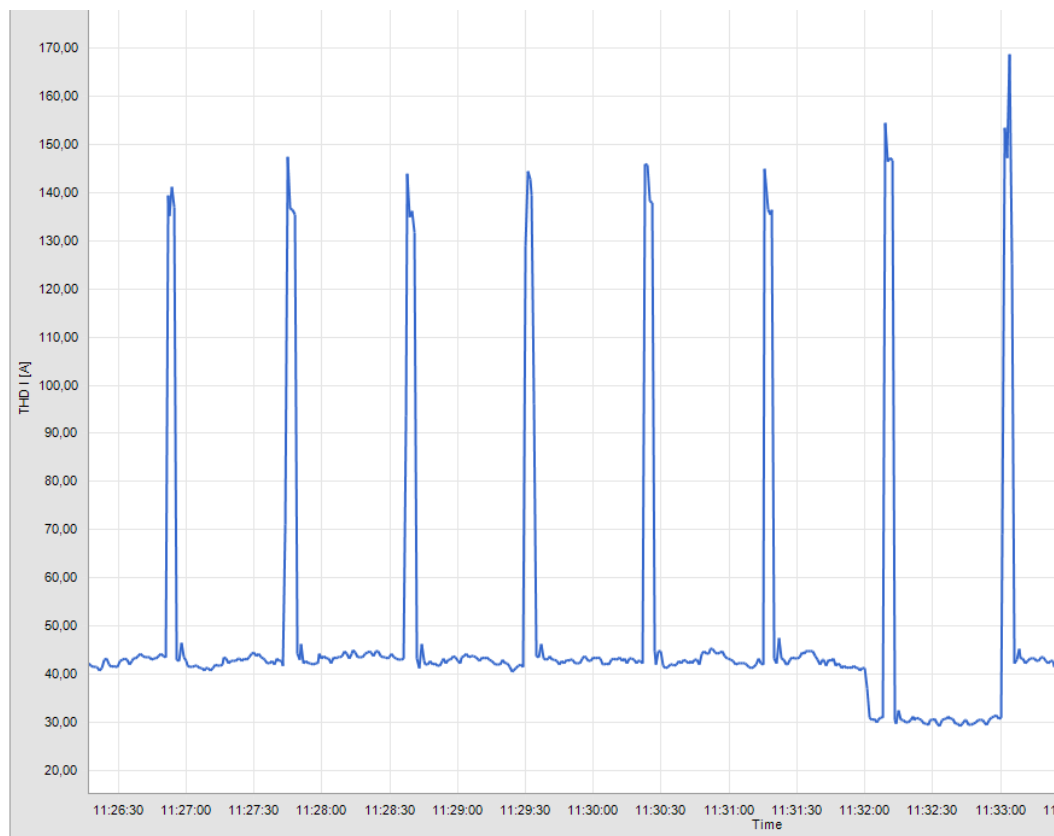


Kuva 19. Pääkeskus 1. Jännitesärö THD U (%).

6.2.2 Pääkeskus 2



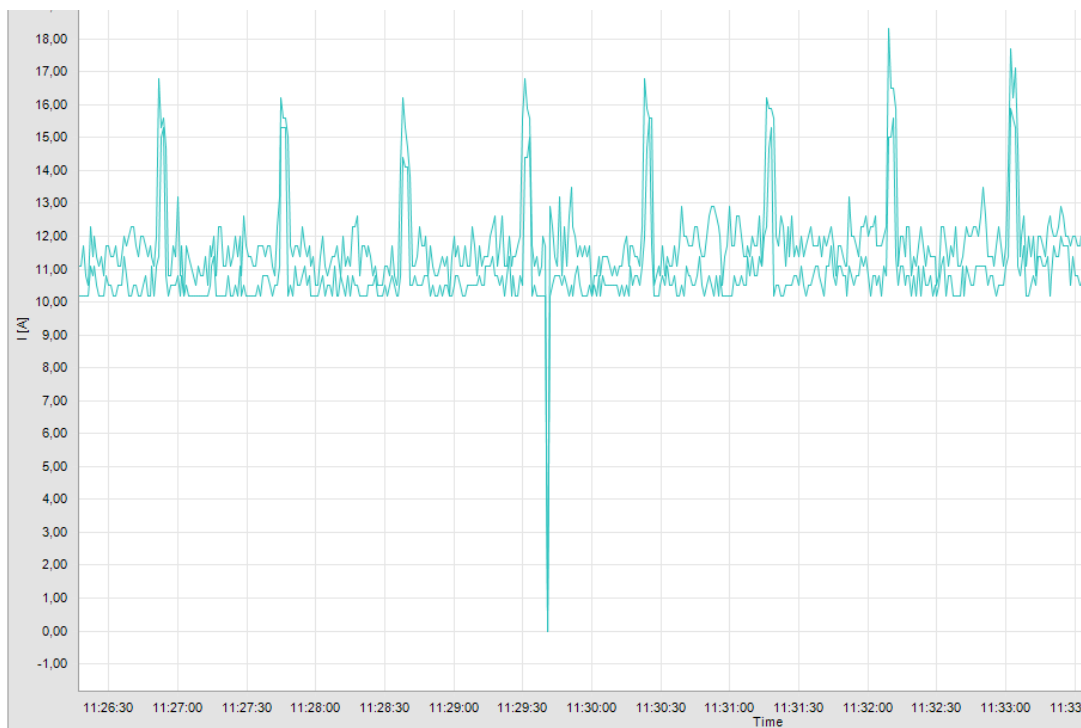
Kuva 20. Pääkeskus 2. Virtasärön mittaus THD I (%).



Kuva 21. Pääkeskus 2. Virtasärön mittaus THD I (A).

Pääkeskus 2:lla esiintyy loistehopiikkien yhteydessä voimakasta virtasäröä. Kokonaisvirtasärön tehollisarvo on pahimmillaan 150 A ja virtasäröä THD I = 20 % jatkuvasti. Nämä arvot ylittävät selvästi kappaleessa 4.1.2 esitetyt sallitut arvot, koska referenssivirta laskettaessa 800 kW pätötehon mukaan on 1150 A ja sallittu kokonaisvirtasärö saisi olla vain 8 % eli 92 A. Nyt tuo kokonaissärön tehollisarvo on 12,5 % referenssivirrasta, mikä on selvästi yli raja-arvon.

Virtasäröä tulisi pienentää alle raja-arvojen suodattamalla yliaaltoja. Virtasärö johtuu epälineaarisista kuormista, joita pääkeskus 2 syöttää.



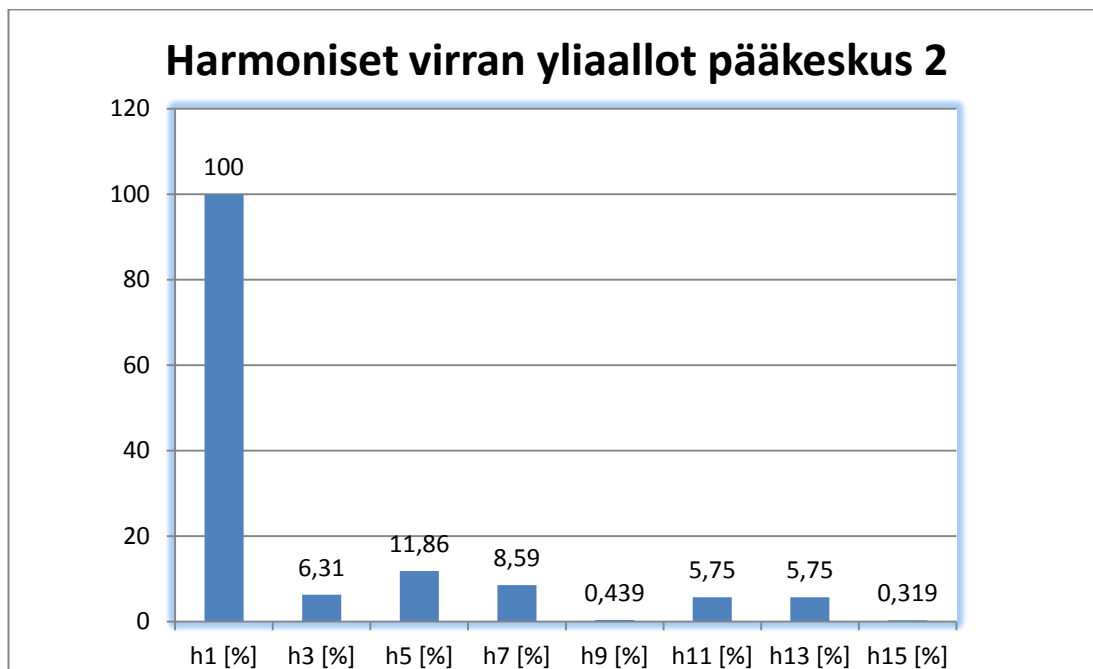
Kuva 22. Pääkeskus 2. Nollajohtimen kuormittuminen.

Nollajohdin kuormittuu tällä kuormalla hyvin vähäisesti ja sen mitattu arvo on keskiarvollisesti 12 A. Tästä syystä on oletettavaa, että nollajohtimen liiallinen kuormittuminen ei ole riskinä pääkeskus 2:lla, vaikka 3. yliaaltoa esiintyy 6,3 % kuvan 24 mukaan.



Kuva 23. Pääkeskus 2. Yliaaltopitoisen verkon virtakäyrät L1, L2 ja L3.

Vaiheiden virtakäyrät on esitetty kuvassa 23. Virtapiikit ovat hyvin voimakkaasti nousevia, kuten loistehosta ja syntyvistä yliaalloista voidaan päätellä. Kuormitus ei missään tapauksessa noudata sinikäyrää vaan se heilahtelee hyvin rajusti edestakaisin johtuen epälineaarista kuormista. Kaikki virtapiikit ovat hyvin samanlaisesti sykkiviä, joten laitos ottaa kuormaa tasaisesti eri vaiheiden väliltä.



Kuva 24. Pääkeskus 2. Virran yliaallot ja niiden prosentuaaliset osuudet perustaajuisesta 50 Hz virrasta.

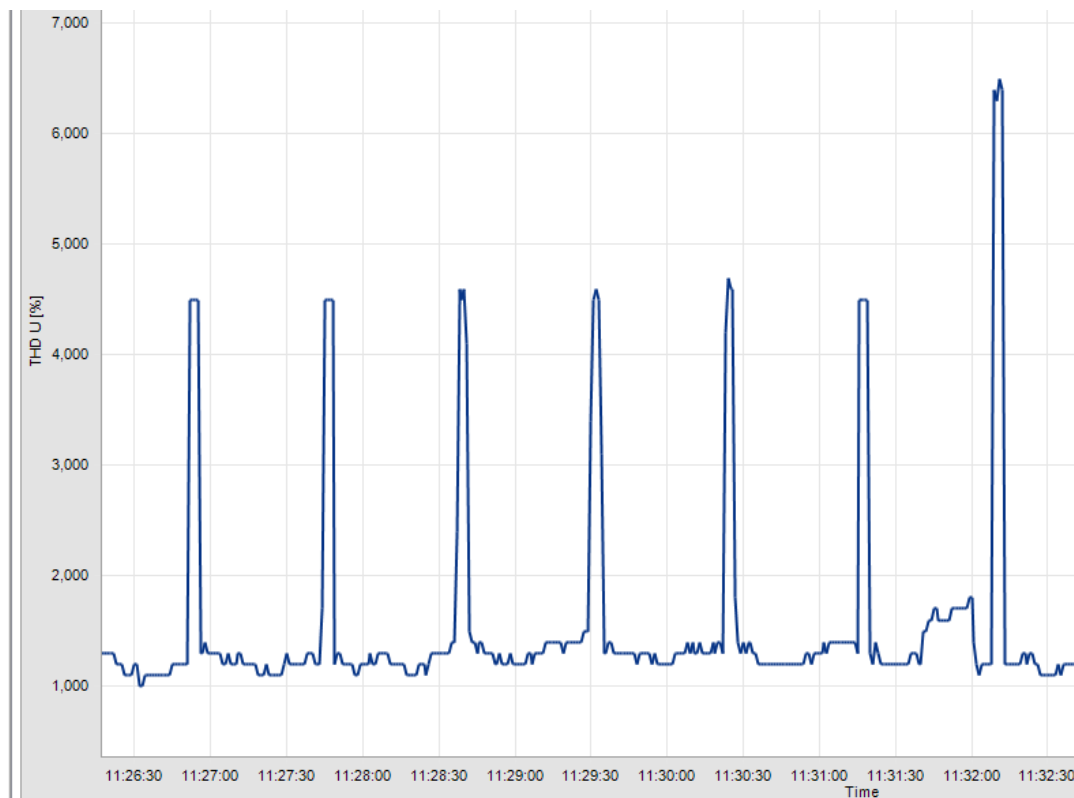
Pääkeskus 2:lla esiintyy yliaaltoja pylväsdiagrammin (kuva 24) mukaisesti. 50 Hz virta on tässä 935 A ja muut harmonisten virtojen tehollisarvot voidaan laskea prosenttilaskulla.

5. yliaaltovirran tehollisarvo on tällöin $0,1186 \times 935 \text{ A} = 111 \text{ A}$.

Yliaallot johtuvat pääkeskus 2:lla tyristorisäätimistä, jännitteen tasasuuntauksesta ja UPS-laitteista. 5. ja 7. yliaaltoa esiintyy mittauksissa enemmän kuin muita yliaaltoja ja voimme sen todeta myös pylväsdiagrammista kuvasta 24. Niitä olisi syytä suodattaa yliaaltosuodattimella. Myös 11. ja 13. yliaaltoa esiintyy melko paljon tällä keskuksella. Niiden suodattamista olisi myös syytä miettiä.

Yliaaltoja esiintyy tällä keskuksella enemmän luultavasti siitä syystä, että kuormat ovat suurempia kuin pääkeskus 1:llä.

Nämä yliaallot aiheuttavat varmasti ongelmia tuotantolaitteiden ohjauslaitteissa.



Kuva 25. Pääkeskus 2. Jännitesärö THD U (%).

Jännitesäröä esiintyy hyvin vähän pääkeskus 2:lla. Raja-arvot pysyvät 10 minuutin keskiarvolla hyvin alitettuina, mutta kuten kappaleessa 4.1.1 on todettu, niin jopa 3 % jännitesärö voi aiheuttaa laitteissa odottamattomia häiriöitä.

7 TOIMENPITEET JA PÄÄTELMÄT

7.1 Loisteho

Loistehoa syntyy mittausten mukaan molemmilla pääkeskuksilla, mutta sen kompensointi on hallittu hyvin käyttäjän verkossa eli kompensointilaitteisto on mitoitettu hyvin syntyvään induktiiviseen loistehoon nähden. Pääkeskus 1:sen kompensointilaitte tuntuu jopa ylimitoitetulta mittaustuloksiin verrattuna, koska sen kompensointikapasiteetista jää osa käyttämättä tällä kuormalla.

Ylikompensointia ei synny, koska pääkeskuksia kompensoidaan automaattisilla estokelaparistoilla.

Loistehokuormitus on hyvin epätasaista etenkin pääkeskus 1:llä. Kompensointilaitte ei nopeisiin piikkeihin ehdi mukaan, mutta nämä piikit eivät myöskään näy sähkölaskussa mitenkään, koska laskutuksessa huomioidaan tunnin keskiarvon mukainen lukema.

Pääkeskus 2:lla syntyy loistehoa tasaisesti ja siellä esiintyy nopeasti nousevia ja laskevia loistehokuormia, jotka eivät kuitenkaan myöskään näy sähkölaskussa.

Kuukausittainen kompensointimaksu pysyy hyvin maltillisena 20 % ilmaisosuuden ylittävältä osalta tai sitä ei esiinny lainkaan. Vuonna 2013 kompensointimaksu oli noin 1500 € ja vuoden 2014 lukema jää noin 500 €.

Lisäkompensointilaitteistoihin ei ole syytä investoida ellei voida todeta, että nyt syntyvä loisteho on niin nopeasti ilmenevää ja aiheuttaa ongelmia, että se vaatii tyristorihjattuja nopeita loistehokompensointilaitteita.

Kompensointilaitteiston huoltoon ja ylläpitoon tulee kiinnittää huomiota entistä enemmän. Kompensointilaitteiston tarkkailusekvenssi tulisi olla puoli vuotta ja sen toimintakomponentteja tulisi tarkkailla sähköisin mittauksin kuin myös aistiperusteisen havainnoinnin kautta.

Induktiivista loistehoa käyttävien laitteistojen ylläpitoon tulee myös kiinnittää huomiota, jotta vikaantuvat laitteistot eivät tuottaisi loistehoa hyvin hallittuun sähköverkkoon.

Uusia laitteistoja hankittaessa tulisi varmistua siitä, että olemassa oleva loistehokapasiteetti riittää uuden loistehokuorman kompensointiin tai että syntyvään lisäkuormaan osattaisiin myös investoida hankintahetkellä.

Kompensointilaitteita tai muita isompia laitteita hankittaessa kannattaisi keskustella myös sähköyhtiön edustajan kanssa.

7.2 Yliaallot

Pääkeskus 1:llä esiintyy 3. yliaaltoa 8 %. Tämä olisi hyvä suodattaa estopiirillä pois. Kolmannen yliaallon suodattimia myyvät mm. ABB, UTU ja Alstom Grid.

Kolmas yliaalto saattaa aiheuttaa tulipalon tai kaapeleiden ylimääräistä lämpenemistä ja siten niiden haurastumisen. Estokelaparisto suodattaa tällä keskuksella osan 5. yliaallosta pois ja uskon, että siksi 5. yliaaltoa ei näy niin paljoa mittauksissa.

Pääkeskus 2:lla esiintyy yliaaltoja hyvin paljon ja 5., 7. ja 11. yliaaltoa varten tulisi hankkia yliaaltosuodatin, jotta keskuksen kokonaissärö saataisiin pienennettyä alle 8 %:iin. Tämä toteutettaisiin imupiireillä, jotka ovat viritettyjä 5., 7. ja 11. yliaaltoa poistaville taajuuksille. Samalla laitteella voitaisiin kompensoida loistehokuormaa. Yliaaltoja synnyttäviä lähteitä ei ole mahdollista poistaa. Yliaaltosuodattimia myyvät mm. ABB, UTU ja Alstom Grid.

Yliaallot saattavat aiheuttaa laiterikkoja ja automaatiolaitteiden ohjausongelmia pääkeskus 2:lla. Tähän olisi syytä kiinnittää huomiota tulevaisuudessa.

Vuonna 2004 on tehty loisteho- ja yliaaltomittauksia tehtaan sähköverkossa ja tällöin on todettu se, että kompensointikondensaattorit ovat vioittuneet sähköverkon yliaaltopitoisuuden takia. Luultavammin syy on ollut rinnakkaisresonanssiin aiheutta-

mat vauriot. Vioittuneiden kondensaattoreiden takia loistehokompensointi ei toiminut halutusti ja loistehomaksu nousi 5500 €.

Tämän jälkeen tehtaaseen on asennettu automaattinen estokelaparisto ja loisteho on saatu selvästi pienemään tämän investoinnin kautta. Estokelaparisto on suodattanut osan syntyneistä yliaalloista ja rinnakkaisresonanssiipiiriä ei ole päässyt syntymään oikean laiteinvestoinnin takia.

Yliaaltoja tulisi alkaa seuraamaan säännöllisesti, koska niitä esiintyy loppukäyttäjän sähköverkossa ja näin ollen ne heikentävät sähkön laatua sekä aiheuttavat mahdollisesti ongelmia tuotantolaitteissa. Ennakkohuolto-ohjelmaan tulisi lisätä puolivuositainen tarkkailusekvenssi yliaaltomittauksia varten.

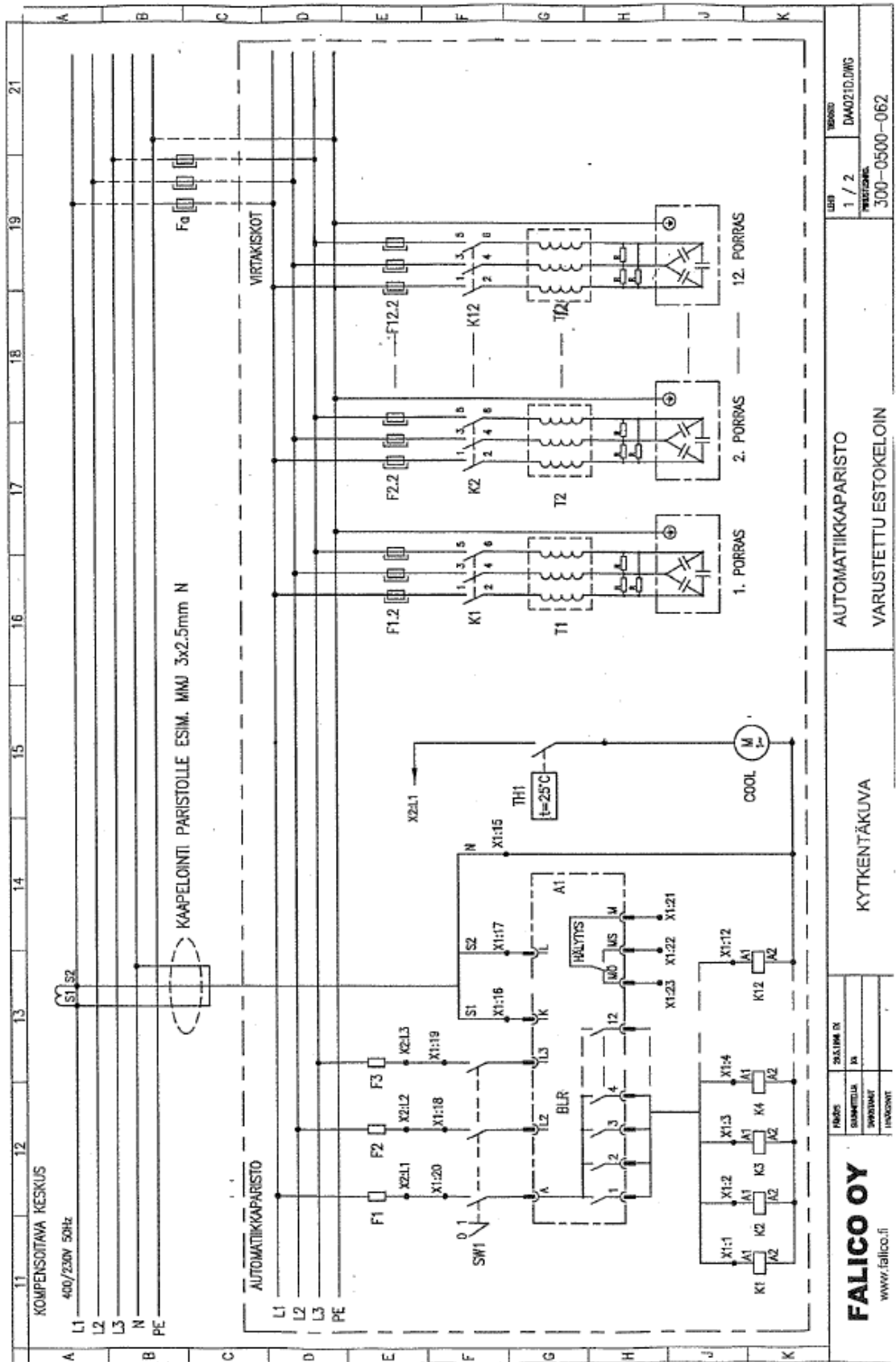
Tulevaisuudessa tulisi enemmän keskustella sähköjakeluyhtiön kanssa, kun tehdään investointeja, jotta jakeluyhtiö on tietoinen mahdollisista sähkön laatua heikentävistä laitekannoista.

LÄHTEET

- 1 Sähköverkot 1, järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta: Otatieto, 2011, ISBN 978-951-672-360-3, s. 88-89, 247-
- 2 Yliaallot ja kompensointi: Sähkö- ja teleurakoitsijoiden liitto STUL ry, 2006, ISBN-952-5600-19-X, s. 20-36, 40-85
- 3 Lassi Vuokko, Team Manager, Fortum Sähkönsiirto Oy, Sähköpostikirjeenvaihto 10.2.2014, Vuokko – Kujansuu
- 4 Sähkölaitostekniikka, WSOY, 1993, ISBN 951-0-18558-2, s.69, 92, 122-124
- 5 Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, WSOY, 2000, ISBN 951-021385-3, s. 177-179, 197-202
- 6 Sähkön laatu ja loistehon kompensointi, Opiks-koulutusohjelma luentomoniste, 15.10.2014, Pertti Rytönen
- 7 ABB:n TTT-käsikirja, Luku 9: Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus
- 8 ST-kortti 52.15, Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000 V:n pienjänniteverkossa
- 9 https://www.fortum.fi/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Sahkon-siirto-ja-liitty-mat/Carunan%20hinnastot/WEB_Caruna_FSS_Verkkopalveluhinnasto_2014_FI.pdf , Luettu 12.11.2014
- 10 SFS 6002 Käytännössä, Sähköinfo, ISBN-978-952-231-021-7, s. 50-60
- 11 www.sahkoturva.info/sahkon_kaytto_kotona/sahkoa_monessa_muodossa/fi_FI/loisteho_mita_se_on/, luettu 27.9.2013
- 12 Muuntajat ja sähkökoneet, Lauri Hietalahti ja Amk Kustannus Oy Tammermekniikka, ISBN 978-952-5491-72-2, s.100
- 13 Kolmannen yliaallon opas, ABB Control Oy, Luettu 24.11.2014.
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/\\$File/THFOP-FI.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/$File/THFOP-FI.pdf)
- 14 Nollajohtimen mitoitus, Virtuaali ammattikorkeakoulu,
<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/030503/1132057231100/1132058013949/1132059294498/1132130231076.html>, Luettu 24.11.2014
- 15 Alstom Grid, Miksi kompensointia tarvitaan? , tuoteopas

- 16 ST-kortti 52.16, Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 1000 V:n pienjänniteverkossa
- 17 SFS-käsikirja 600-1, Sähköasennukset, osa 1: SFS 6000 pienjänniteasennukset 2012, ISBN 978-952-242-201-9, s. 259-261

Pääkeskuksen kanssa rinnankytketyn automaattisen estokelapariston kytkentäkuva



LEHTI
1 / 2
PÄIVÄMÄÄRÄ
300-0500-062

AUTOMATIikkAPARISTO
VARUSTETTU ESTOKELAIN

KYTKENTÄKUVA

PIKIS	RAAJAMA N
OMAVÄLITÄ	IX
AVOINVAI	
ILMOITUS	

FALICO OY
www.falico.fi