

Kimmo Lindström

TASASUUNTAAJIEN MUODOSTAMAT YLIAALLOT

Sähkötekniikan koulutusohjelma

2014

TASASUUNTAAJIEN MUODOSTAMAT YLIAALLOT

Lindström, Kimmo
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2014
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 42
Liitteitä: 1

Asiasanat: yliaallot, tasasuuntaaja, yliaaltojen torjunta

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin tasasuuntaustekniikan muodostamia yliaaltoja sekä niiden vaikutuksia sähköverkkoon ja verkon muihin laitteisiin. Työssä vertailtiin sähköanalysointilaitteilla mitattuja yliaaltopitoisuuksia eri lähteistä löydettyihin määräksiin ja suosituksiin. Työn tarkoituksena on selvittää, miten paljon voimalaitoksen sähkösuodattimien tasasuuntaajat aiheuttavat syöttävään pienjänniteverkkoon yliaaltoja. Lisäksi haluttiin selvittää yliaaltojen merkitystä sähkölaatuun sekä niiden mahdollisia haittavaikutuksia.

Teoriaosassa selvitetään yliaaltojen perusteet ja kerrotaan miten yliaallot muodostuvat. Lisäksi tuodaan esille yliaaltojen haittavaikutuksia. Yliaaltoja ja tässä työssä tutkittavaa sähköverkkoa koskevat tärkeimmät standardit ja suositukset esitellään työn seuraavissa osissa. Näiden teoriaosuuksien perusteella pyrittiin luomaan selkeä kuva siitä, mitä mittauksia sähköverkossa tulisi tehdä, jotta työn tarkoituksenmukaiset yliaaltopitoisuudet ja niiden vaikutukset saataisiin selvitettyä.

Mittaukset syöttävässä sähköverkossa osoittivat sähkösuodattimien tasasuuntaajien aiheuttavan merkittäviä yliaaltoja. Yliaaltojännitteet eivät mittausten perusteella ylittäneet standardien määrittämiä raja-arvoja, mutta yliaaltovirrat sen sijaan olivat huomattavat ja suositellut yliaaltovirran arvot ylittyivät. Koska yliaaltojännitteen muodostuminen on riippuvaista yliaaltovirroista ja sähköverkon impedanssista, todettiin sähköverkko pieni-impedanssiseksi. Vahva syöttävä verkko on jo sinällään yksi yliaaltojen torjuntakeino, mutta yliaaltovirrat saattavat silti aiheuttaa ongelmia muissa verkon osissa ja laitteissa. Vaikka tällä hetkellä yliaallot eivät aiheuta tutkittavassa verkossa ongelmia, tässä työssä suositellaan silti yliaaltojen suodatuksen lisäämistä ehkäisykeinona tulevaisuuden mahdollisille yliaalto-ongelmille.

HARMONICS CREATED BY RECTIFIERS

Lindström, Kimmo

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Electrical Engineering

May 2014

Supervisor: Nieminen, Esko

Number of pages: 42

Appendices: 1

Keywords: harmonics, rectifier, compensation of harmonics

In this Bachelor's thesis harmonics created by rectifiers and their downsides in supplying electrical network and to network's other equipment were studied. Research is done to compare measured harmonics towards regulations and recommendations. The main goals in this research were to measure how much power station's electric precipitator rectifiers create harmonics to supplying low voltage network as well as to get understanding of its importance to quality of electricity and possible drawbacks.

Literature part of this thesis deals with basics of harmonics, how harmonics are created and their drawbacks. Regulations and recommendations concerned harmonics and electrical network under research are studied. Harmonic values to be measured were determined based on this knowledge in order to achieve goals of this research.

Results from measurements done in the electrical network showed that electrical precipitator rectifiers create significant amount of harmonics. Based on the measurements harmonic voltage does not exceed regulations, but harmonic currents however did exceed recommended limitations. Due to the fact that harmonic voltage depends on harmonic currents and network impedance, it was concluded that network has low impedance, which on its own is one method of compensating harmonics. Nevertheless, harmonic currents can still create problems in other parts of the electrical network and in other equipment. Despite the fact that for the time being the harmonics do not create any problems in the network, it is - based on this research - recommended that compensate filter for harmonics is applied to prevent possible future problems.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	YLIAALLOT	7
2.1	Yliaallot käsitteenä.....	7
2.2	Jännitteen ja virran yliaaltojen muodostuminen	9
2.3	Yliaaltojen teoriaa.....	9
3	TASASUUNTAAJAT YLIAALTOLÄHTEINÄ	12
3.1	Tasasuuntaajatyypit.....	12
3.2	Suuntaajien muodostamat yliaallot.....	13
4	YLIAALTOJEN HAITTAVAIKUTUKSET	15
4.1	Yliaaltojen vaikutukset muuntajiin.....	15
4.2	Yliaaltojen vaikutukset oikosulkumoottoreihin.....	17
4.3	Resonanssi.....	17
5	HARMONISTEN YLIAALTOJEN MÄÄRÄYKSET JA SUOSITUKSET PIENJÄNNITEVERKOSSA.....	19
5.1	Yliaaltojännitteiden sallitut raja-arvot	19
5.2	Yliaaltovirtojen sallitut ohjeelliset raja-arvot	20
6	YLIAALTOJEN TORJUNTA	22
6.1	Rakenteelliset ratkaisut.....	22
6.2	Suodatus.....	22
7	VOIMALAITOKSEN PIENJÄNNITEVERKKO	25
7.1	Verkon kokoonpano.....	25
7.2	Sähkösuodattimen tasasuuntaajat.....	26
8	VOIMALAITOKSEN SÄHKÖVERKON YLIAALTOJEN MITTAUKSET	28
8.1	Mittausjärjestelyt.....	28
8.2	Mittaustulosten tarkastelun menetelmät	28
9	MITTAUSTULOKSET.....	30
9.1	Yliaaltovirtojen summautuminen.....	30
9.2	Yliaaltovirtojen esiintyminen verkon eri kohdissa	31
9.3	Yliaaltojännite.....	32
9.4	Yliaaltovirta	33
9.5	Muuntajan kuormittuminen	35
10	TULOSTEN TARKASTELU	36
10.1	Yliaaltovirtojen summautumisen tarkastelu	36
10.2	Yliaaltovirtojen esiintymisen tarkastelu	37
10.3	Yliaaltojännitteiden mittaustulosten tarkastelu.....	37

10.4 Yliaaltovirtojen mittaustulosten tarkastelu	38
10.5 Muuntajan kuormittumisen tarkastelu	39
11 YHTEENVETO	40
LÄHTEET	42
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että sähkölaitteiden määrä on jatkuvassa kasvussa ja että sähkölaitteet sisältävät enenevässä määrin tehopuolijohdetekniikkaa. Perinteisiin analogisiin sähkölaitteisiin verrattuna puolijohdetekniikalla toteutetut sähkölaitteet aiheuttavat syöttävään sähköverkkoon huomattavasti enemmän sähkösaasteita. Nämä uuden tekniikan laitteet asettavat haasteita sähkölaadun hyväksyttävien tasojen saavuttamiseksi. Kehityksen suunta on ollut saman tyyppinen myös teollisuudessa, jossa esimerkiksi uudet moottorikäytöt ovat suurelta osin taajuusmuuttajalla varustettuja. Myös muut suuntaajatekniikkaan perustuvat laitteet ovat nykypäivänä teollisuudessa yleisiä. Yksi näiden uusien tekniikoiden aiheuttama sähkösaasteen muoto on yliaallot, joita tässä opinnäytetyössä tarkemmin tutkitaan.

Tämä työ on jatkoa vuoden 2013 suunnittelutyölle, jossa Turun seudun energiantuotanto Oy:n omistaman Naantalın voimalaitoksen laitoksen 3 sähkösuodattimen tasasuuntaajat päivitettiin nykyaikaisiin suurtaajuustasasuuntaajiin. Uusien tasasuuntaajien käyttöönoton yhteydessä havaittiin erilaisia sähkölaatuongelmia, joista kehittyi ajatus selvittää myös miten paljon tasasuuntaajat aiheuttavat yliaaltoja ja onko niillä merkitystä sähkölaadullisesti.

Ensimmäisissä kappaleissa käsitellään yliaaltojen teoriaa, niiden lähteitä ja yliaaltojen haittavaikutuksia. Erityisen kiinnostuksen kohteita ovat teollisuuden sähköverkoissa tavallisesti esiintyvien sähkölaitteiden synnyttämät yliaallot, niiden kulkeutuminen verkossa ja vaikutukset muihin laitteisiin. Tästä siirrytään esittämään määräyksiä ja suosituksia yliaaltojen esiintymiselle sähköverkoissa sekä niiden torjuntamenetelmiä.

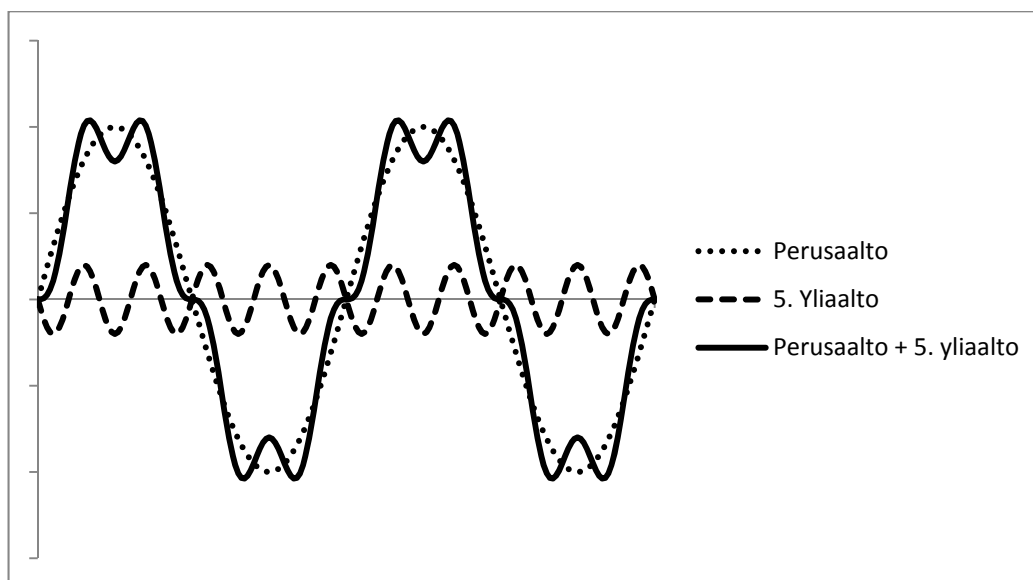
Tässä työssä pyritään luomaan selkeä kuva sähkölaadusta yliaaltojen kannalta voimalaitoksen sähkösuodattimien tasasuuntaajia syöttävässä pienjänniteverkossa sekä selvittää yliaaltojen aiheuttamista mahdollisista haittavaikutuksista. Yliaaltojen määrää syöttävässä verkossa mitattiin sähkölaatuanalysoijan avulla verkon eri pisteistä. Mittaustuloksia vertailtiin kirjallisuudesta löydettyihin määräyksiin, suosituksiin sekä muihin raja-arvoihin kyseiseen verkkoon sovellettuna.

2 YLIAALLOT

2.1 Yliaallot käsitteenä

Kun verkkojännite tai -virta poikkeaa sinimuodosta, esiintyy verkossa yliaaltoja ja se katsotaan säröytyneeksi. Sinimuodosta poikkeavan jännitteen tai virran käyrämuoto voidaan muodostaa useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta komponentista. Verkon perusaaltotaajuutta 50 Hz suurempia jännitteen tai virran taajuuskomponentteja kutsutaan yliaalloiksi. Eritaajuuskomponentit summautuvat perustaajuiseen jännite- tai virtakomponenttiin ja vääristävät perustaajuisen sinimuotoisen komponentin muotoa kuvan 1 esittämällä tavalla. Tätä perustaajuisen komponentin käyrämuodon vääristymistä kutsutaan säröytymiseksi.

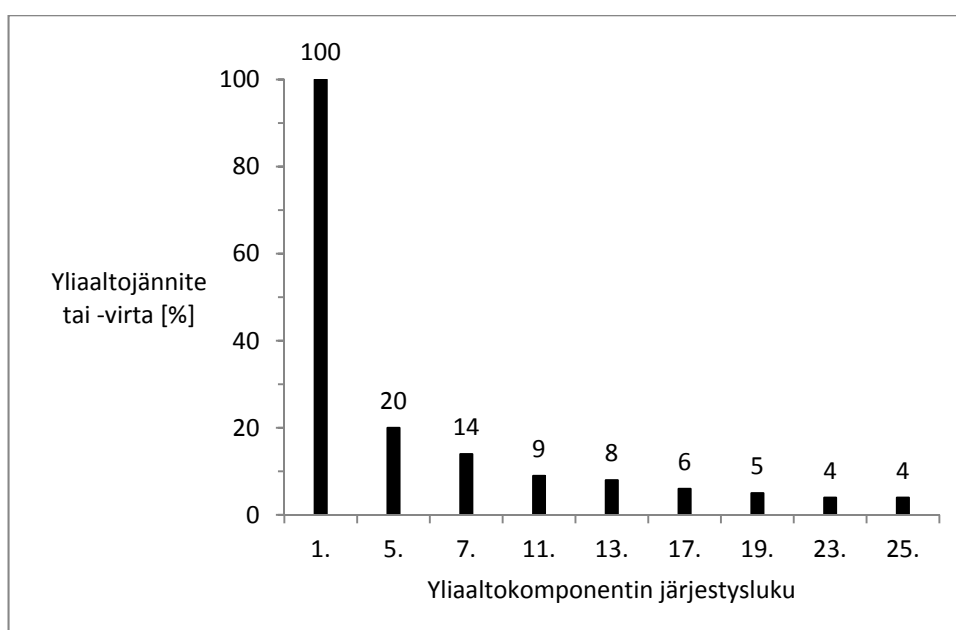
Harmoniset yliaallot ovat taajuudeltaan peruskomponentin taajuuden kokonaislukukerrannaisia. Taajuuskomponentteja nimitetään sen järjestyslukunsa n mukaisesti, joka on taajuuden kokonaislukukerroin verrattuna perustaajuiseen komponenttiin. Tasajännitteelle tai -virralle $n=0$, peruskomponentille eli 50 Hz $n=1$ ja esimerkkinä 100 Hz yliaaltotaajuus $n=2$, joka on toinen yliaalto. /7/



Kuva 1. Jännitteen tai virran käyrämuoto perustaajuisen ja viidennen yliaallon summana. /12/

Sähköverkossa esiintyy myös epäharmonisia yliaaltoja, jotka eivät ole perustaajuuden kokonaislukumonikertoja. Näiden merkitys on kuitenkin pieni verrattuna harmonisiin yliaaltoihin. Tässä työssä keskitytään harmonisten yliaaltojen teoriaan ja tutkimiseen, joten jatkossa yliaalloilla tarkoitetaan harmonisia yliaaltoja.

Jännitteen tai virran taajuuskomponenttien joukkoa kutsutaan taajuusspektriksi. Taajuusspektri esitetään useasti kuvan 2 mukaisesti koordinaatistossa, jossa x-akseli määrittää komponentin järjestysluvun tai taajuuden ja y-akseli puolestaan komponentin amplitudin. Yleensä amplitudi esitetään prosentteina perusaallon amplitudista. /7/



Kuva 2. Yliaaltopitoisen jännitteen tai virran taajuusspektri. Kuvassa esimerkkinä teoreettisen 6-pulssisen tasasuuntaajan virta. /12/

Yliaallon komponenttiluokitus kertoo yliaaltokomponentin pyörimissuunnan perusaaltoon nähden. Komponenttiluokituksen mukaan yliaaltokomponentit voidaan jakaa positiivisiin, negatiivisiin ja nollakomponentteihin. Taulukossa 1 on esitetty komponenttiluokittelu järjestyslukuun yhdeksän saakka.

Taulukko 1. Yliaaltokomponenttien taajuudet ja komponenttiluokittelu. /7/

Järjestysnumero	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Taajuus [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Komponenttiluokka	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Positiivisten komponenttien osoittimet pyörivät perusaallon suuntaan ja negatiiviset vastaavasti vastasuuntaan. Nollakomponenttien osoittimet eivät puolestaan pyöri lainkaan sillä niillä ei ole vaihekulmaeroa keskenään. Nollakomponentteja kutsutaan kolmansiksi yliaalloiksi. /7/

2.2 Jännitteen ja virran yliaaltojen muodostuminen

Yliaaltoja synnyttävät sähköverkkoon epälineaariset verkon osat. Epälineaariset kuormat eivät johda virtaa koko siniaallon jakson ajan, vaan vain osan aikaa siitä. Tällöin laitteen verkosta ottama virta poikkeaa sinimuotoisesta ja voidaan katsoa muodostuvan perustaajuisesta sekä yliaaltokomponenteista. Epälineaariset verkon osat voidaan jakaa joko virta- tai jännitelähteiksi. Merkittävin yliaaltoja sähköverkkoon synnyttävä kuormitus on suuntaajat, jotka voidaan luokitella yliaaltovirtalähteiksi. Generaattoreita ja muuntajia voidaan taas sen sijaan pitää yliaaltojännitelähteinä.

Pääsääntöisesti puhuttaessa yliaaltojen muodostumisesta sähköverkkoon, tarkoitetaan kuormituksen aiheuttamia yliaaltovirtoja. Yliaaltovirrat aiheuttavat yliaaltojännitteitä verkon yliaaltoimpedanssien muodostamien jännitehäviöiden kautta. On kuitenkin aina tärkeää selvittää tarkoitetaanko virran vai jännitteen yliaaltoja.

Vaikka yliaaltovirrat ja -jännitteet ovatkin toisistaan riippuvaisia, voivat niiden suuruudet erota toisistaan huomattavastikin. Yleensä jännitesärö on virransäröä pienempi, johtuen verkon pienestä impedanssista. /7/

2.3 Yliaaltojen teoriaa

Jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltokomponentin sekä perustaajuisen komponentin käyrämuoto on sinimuotoista, jolloin taajuuskomponentin tehollisarvon ja huipparvon suhde virralle ja jännitteelle on seuraava:

$$I_n = \frac{\hat{i}_n}{\sqrt{2}} \text{ ja } U_n = \frac{\hat{u}_n}{\sqrt{2}}, \quad (1), (2)$$

joissa I_n on järjestysluvultaan n taajuisen virran tehollisarvo,

\hat{u}_n on järjestysluvultaan n taajuisen virran huippuarvo,

U_n on järjestysluvultaan n taajuisen jännitteen tehollisarvo ja

\hat{u}_n on järjestysluvultaan n taajuisen jännitteen huippuarvo.

Yliaaltosisältöisen jännitteen tehollisarvo muodostuu perustaajuisesta jännitteestä ja yliaaltojännitteistä seuraavasti:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_H^2} = \sqrt{\sum_n^{\infty} U_n^2}, \quad (3)$$

jossa U_1 on perustaajuisen jännitteen tehollisarvo ja

U_H on yliaaltotaajuisen jännitteiden tehollisarvo.

Samoin virrantehollisarvo muodostuu perustaajuisesta virrasta ja yliaaltoisista virroista, kuten seuraava kaava esittää:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}, \quad (4)$$

jossa I_1 on perustaajuisen virran tehollisarvo ja

I_H on yliaaltotaajuisen virtojen tehollisarvo.

Aiemmin mainittu säröytyminen on siis perustaajuisen sinimuotoisen komponentin vääristymistä. Särökerroin THD eli harmoninen kokonaissärö määritetään suhteessa joko virran tai jännitteen perustaajuiseseen komponenttiin (THD-F) tai kokonaisvirran tai -jännitteen tehollisarvoon (THD-R). Säröytyminen ilmoitetaan yleensä särökerroimen sijaan prosentteina. Alla olevissa kaavoissa esitetään jännitteen THD prosentteina, joka samaan tapaan voidaan esittää virralle korvaamalla jännitteen suuret virran vastaavilla tehollisarvoilla.

$$\text{THD-F}\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} 100\% \text{ ja} \quad (5)$$

$$\text{THD-R}\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U} 100\%. \quad (6)$$

Useamman yliaaltolähteen virtojen summa lasketaan seuraavasti:

$$\bar{I}_n = \bar{I}_{n1} + \bar{I}_{n2} + \dots + \bar{I}_{nN}, \quad (7)$$

jossa I_{ni} on yliaaltolähteestä i tuleva virran n :s yliaalto ja

N on yliaaltolähteiden määrä.

Monen yliaaltolähteen yliaaltojen summaa on hankala laskennallisesti selvittää edellä mainitun kaavan avulla, koska yliaaltoimpedansseja ja vaihekulmia ei tiedetä tarkasti. Kun tarkempaa tietoa yliaaltovirtojen vaihekulmista ei ole, voidaan silti summavirtaa arvioida seuraavalla kaavalla:

$$I_n = \sqrt[a]{ \sum_{i=1}^N I_{ni}^a }, \quad (8)$$

jossa a on 1 kun $n \leq 10$,

1,4 kun $10 < n < 14$,

2 kun $n \geq 14$. /7/

3 TASASUUNTAAJAT YLIAALTOLÄHTEINÄ

Tässä kappaleessa esitetään tarkasteltavan pienjänniteverkon kuormina olevien tasasuuntaajien aiheuttamia yliaaltoja ja niiden syntyä. Kappaleessa 2.2 mainittiin jo yliaaltolähteinä suuntaajat, generaattorit ja muuntajat. Näiden lisäksi tulee nostaa esille myös oikosulkumoottorit. Oikosulkumoottorit, generaattorit sekä muuntajat aiheuttavat kuitenkin normaalitilanteissa hyvin vähän yliaaltoja ja siksi niitä ei käsitellä tässä työssä tarkemmin. /6/

3.1 Tasasuuntaajatyypit

Yleisesti suuntaajat voidaan jakaa neljään eri tyyppiin niiden toimintaperiaatteen mukaisesti:

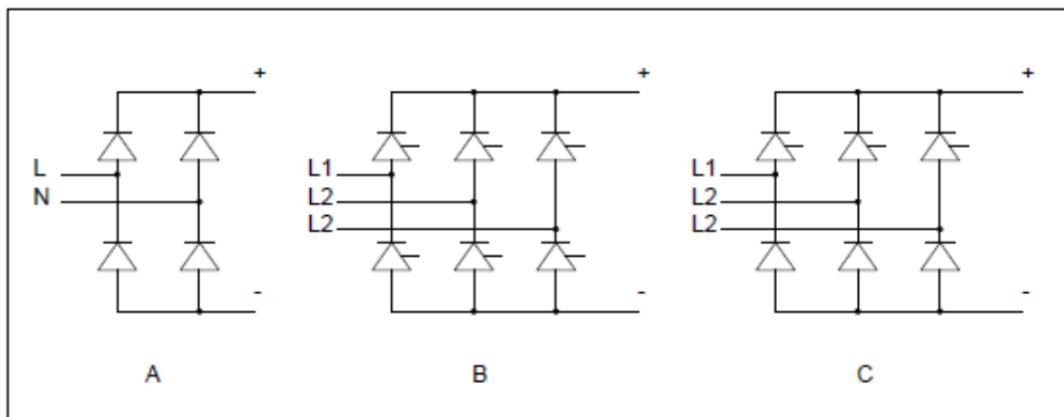
- tasasuuntaajat muuntavat vaihtojännitteen tasajännitteeksi,
- vaihtosuuntaajat muuntavat tasajännitteen vaihtojännitteeksi,
- toistosuuntaajat puolestaan muuntavat vaihtojännitteen toisen taajuiseksi vaihtojännitteeksi ja
- hakkuritehonlähteet tasajännitteen erisuuruiseksi tasajännitteeksi.

Näistä suuntaajatyypeistä tarkastellaan tässä työssä lähemmin tasasuuntaajia. /4/

Puolijohdetekniikalla toteutetut tasasuuntaajat voivat olla ohjaamattomia, ohjattuja tai puoliksiohjattuja. Tyypillisiä tasasuuntaajakytkentöjä on esitetty kuvassa 3. Yksinkertaisimmillaan tasasuuntaaja muodostuu diodikytkennästä, jossa diodit johtavat virtaa, kun niiden anodi-katodi-jännite on positiivinen. Tällainen pelkästään diodeista rakennettu tasasuuntaaja on ohjaamaton. Tyristoreilla tai vastaavilla kytkinkomponenteilla varustettu tasasuuntaaja on puolestaan ohjattavissa ja tyristori toimii piirissä sähkökytkimenä, joka johtaa virtaa aina kun sen hilalle annetaan ohjauspulssi. Puoliksiohjatussa tasasuuntaajassa puolestaan osa diodeista on korvattu tyristoreilla. Puoliksiohjatturakenne on tasasuuntaajassa yksinkertaisempi ja edullisempi.

Tasasuuntaajan pulssiluvulla tarkoitetaan suuntaajan kehittämän suodattamattoman tasajännitteen jännitepulssien lukumäärää syöttävän vaihtojännitteen yhden jakson aikana. Suurempi pulssiluku tarkoittaa, että suodattamaton tasajännite on lähempänä

puhdasta tasasähköä ja vaihtosähkökomponenttien määrä on tällöin vähäisempi. Tasasuuntaajan pulssiluku on riippuvainen käytetystä suuntaajan sekä syöttävän muuntajan kytkennästä. Teollisuudessa käytetyt tasasuuntaajat ovat tyypillisesti kolmivaiheisia 6-pulssisuuntaajia. /2, 7/



Kuva 3. Tyypillisiä tasasuuntaajakytkentöjä. Piiri A on yksivaiheinen 2-pulssinen ohjaamaton dioditasasuuntaajapiiri. Piiri B on ohjattu kolmivaiheinen 6-pulssinen tyristoritasasuuntaajapiiri. Piiri C on puoliksi ohjattu 6-pulssinen tasasuuntaajapiiri.

3.2 Suuntaajien muodostamat yliaallot

Peruskomponenttina suuntaajassa on aina puolijohdekytkin, joka katkoo virtapiiriin virtaa halutulla tavalla. Puolijohdekytkimen toimintajakso ja taajuus määräytyy valitun kytkennän perusteella. Suuntaajan virran katkominen aiheuttaa verkossa virran, joka poikkeaa sinimuodosta ja sisältää yliaaltokomponentteja. /2/

Teoreettinen suuntaajien synnyttämien yliaaltojen tutkinta perustuu yksinkertaistettuun yliaaltoteoriaan, jossa oletetaan verkon jännite täysin symmetriseksi ja sinimuotoiseksi, verkon impedanssi on nolla, verkossa ja suuntaajassa ei ole yliaaltosuodattimia sekä suuntaajan tasavirta on täysin tasaista. Teoreettisesti suuntaaja aiheuttaa verkkovirtaan yliaaltojen komponentteja seuraavan kaavan mukaisesti:

$$n = kp \pm 1, \quad (9)$$

jossa

p on suuntaajan pulssiluku

k 1,2,3... (kokonaisluku).

Aiemmin kuvassa 2 on esitelty teoreettisen 6-pulssisen tasasuuntaajan yliaaltospektri. Käytännössä teoreettisten yliaaltokomponenttiesiintymien lisäksi verkossa, johon suuntaaja on kytketty, esiintyy myös pieniä määriä parillisia ja kolmansia yliaaltoja. Tämä johtuu verkon impedanssista, kommutoinnista ja tasavirran epätasaisuudesta.

Teorian ja käytännön tyypilliset tehollisarvot yliaaltokomponenteille 6- ja 12-pulssisuuntaajalle on esitetty taulukossa 2. Suuntaajan aiheuttamien yliaaltovirtojen komponenttien teoreettiset tehollisarvot voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (10)$$

Taulukko 2. Kolmivaiheisen suuntaajasillan tyypilliset yliaaltopitoisuudet I_n/I_1 prosentteina. /12/

Yliaallon järjestysluku	Teoreettinen 6-pulssi-suuntaaja	Käytännön 6-pulssi-suuntaaja	Käytännön 6-pulssi-suuntaaja kuristin-suodattimella	Teoreettinen 12-pulssi-suuntaaja	Käytännön 12-pulssi-suuntaaja
5.	20	63	30	-	4
7.	14	54	12	-	3
11.	9	10	9	9	8
13.	8	6	6	8	5
17.	6	7	4	-	1
19.	5	5	4	-	1

Taulukosta 2 nähdään, että käytännössä ilman yliaaltosuodatuksia 6-pulssisen suuntaajan yliaallot ovat huomattavasti suuremmat kuin mitä teoria esittää. Tasasuuntaajan suodatinkuristimella saadaan verkkoon syntyviä yliaaltoja huomattavasti vähennettyä. Lisäksi taulukosta voidaan huomata, että 12-pulssisen suuntaajan aiheuttamat yliaallot ovat merkittävästi alhaisemmat kuin 6-pulssisen vastaavat.

4 YLIAALTOJEN HAITTAVAIKUTUKSET

Yliaallot aiheuttavat monenlaisia haittailmiöitä verkon eri komponentteihin. Ne aiheuttavat lähinnä häviöiden kasvua ja kuormitettavuuden alenemaa, mutta myös mittavirheet ja virhetoiminnot eri laitteissa ovat mahdollisia. Hankalimpia tapauksia ovat resonanssi-ilmiöt, jotka saattavat aiheuttaa jopa laiterikkoja. /6/

Seuraavissa kappaleissa käsitellään yliaaltojen vaikutuksia voimalaitoksen tarkastelun alla olevan pienjänniteverkon komponenteista tärkeimpiin, eli muuntajaan ja oikosulkumoottoreihin, sekä tarkastellaan lähemmin resonanssi-ilmiöiden syntyä.

4.1 Yliaaltojen vaikutukset muuntajiin

Muuntajan häviöt koostuvat tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöistä. Yliaallot vaikuttavat molempien häviöiden suuruuteen.

Tyhjäkäyntihäviöt ovat riippumattomia kuormituksen suuruudesta, mutta ne riippuvat sen sijaan jännitteestä ja taajuudesta. Tyhjäkäyntihäviöt muodostuvat pääasiassa rautahäviöistä. Jännitteenyliaallot lisäävät pyörrevirta- sekä hystereesihäviöitä rautasydämessä ja siten suurentavat tyhjäkäyntihäviöitä.

Pääosa kuormitushäviöistä on virtalämpöhäviöitä. Virtalämpöhäviöistä taas suurin osa syntyy yliaaltovirtojen aiheuttamina muuntajan käämien resistansseissa. Virranahdosta johtuen käämien resistanssi suurenee korkeammilla taajuuksilla. Virran synnyttämät hajavuot aiheuttavat virtalämpöhäviöitä myös muuntajan rautaosissa ja öljysäiliössä. Muuntajan kuormitushäviöt ovat moninkertaiset tyhjäkäyntihäviöihin verrattuna, joten tavallisesti tyhjäkäyntihäviöitä, tiettyjä poikkeuksia lukuun ottamatta, ei tarvitse ottaa huomioon.

Tavallisesti muuntajan mitoitus tehdään perustaajuiselle sinimuotoiselle kuormitukselle. Yliaaltosisältöinen virta aiheuttaa muuntajan suuremman kuormittumisen ja lämpenemisen. Muuntajan kuormitushäviöt kasvavat 10-20 %, jos muuntajaa kuormitetaan nimellisteholla pelkästään suuntaajakäyttöillä. Tätä lisähäviötä vastaa muun-

tajan 4-10 °C lämpötilan nousu. Käytännössä kuitenkin muuntajan kuormitusta tulisi vähentää 20-30 % nimellisestä kuormitettavuudesta, yliaaltopitoisuuden ollessa suuri, jotta vältetään muuntajan ylikuumentuminen.

Kuormitusvirran tehollisarvosta ei voida suoraan laskea yliaaltojen aiheuttamaa muuntajan lisälämpenemistä. Yliaaltoja sisältävä virta tulee muuntaa perustaajuisiksi ekvivalenttivirraksi, joka aiheuttaisi yhtä suuret häviöt syöttävässä muuntajassa. /1,7/

Standardi EN 50464-3 "Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2 500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 3: Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents" määrittää muuntajien yliaaltopitoisen kuormituksen ekvivalenttikuormituksen perustaajuisena kuormana. Standardi esittelee kertoimen K, jolla voidaan arvioida yliaaltojen aiheuttamien lisähäviöiden määrää muuntajassa. Kertomalla yliaaltopitoisen kuormituksen kertoimella K voidaan kuormitus muuntaa perustaajuisiksi kuormaksi. Kerroin K on määritetty standardissa seuraavasti:

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^N n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

jossa e on perustaajuisen virran aiheuttamat pyörrevirtahäviöt jaettuna perustaajuisen sinimuotoisen kuormitusvirran tehollisarvoa vastaavan ekvivalentti tasavirran aiheuttamilla häviöillä ja q on vakio, joka on riippuvainen muuntajan käämityksestä ja taajuudesta.

Standardi esittää vakiolle q arviona ja ohjeellisena arvona seuraavaa:

- 1,7 muuntajille, joilla pyöreät tai nelikulmaiset käämilangat molemmissa ylä- ja alajännitteen käämityksissä ja
- 1,5 muuntajille, joissa alajännitepuolella on foliokäämitys.

Vastaavasti, jos muuntaja on käytössä kuormitettuna yliaaltopitoisella kuormalla, voidaan muuntajan kuormitettavuus kyseisillä yliaalloilla määrittää jakamalla muuntajan kuormitettavuuden nimellisarvo kertoimella K.

Standardissa mainitaan, että yli viiden prosentin virrankokonaissärön (THD-F%) ylitys aiheuttaa ylimääräistä tehon häviötä muuntajan lämpenemisen muodossa ja on otettava huomioon muuntajan mitoituksessa. /3/

4.2 Yliaaltojen vaikutukset oikosulkumoottoreihin

Pyörivät koneet muodostavat yliaaltovirroille oikosulun ja suodattavat niitä tehokkaasti. Yliaallot aiheuttavat epätahtikoneelle toimintahäiriöitä, koska ne saavat aikaan tahti- ja epätahtimomenteja sekä värinä- ja ääni-ilmiöitä. /2/

Oikosulkumoottorin syöttöjännitteen ja virran yliaallot aiheuttavat myös lisääntyneitä virtalämpöhäviöitä samoin kuin muuntajassakin. Nämä puolestaan lisäävät koneen lämpenemää ja kiihdyttävät eristeiden vanhenemisnopeutta sekä huonontavat koneen hyötysuhdetta. Virtalämpöhäviöiden lisäksi myös rautahäviöt kasvavat, vaikka näillä ei yleensä ole mainittavaa merkitystä. /1/

Yliaaltojen komponenttiluokituksen mukaisesti positiiviset yliaallot pyörivät perusaallon kanssa samaan suuntaan ja synnyttävät lisälämpenemistä. Negatiiviset yliaallot puolestaan jarruttavat moottoria ja aiheuttavat lisähäviöitä. /2/

4.3 Resonanssi

Resonanssitapauksia syntyy, kun verkon jonkin osan resonanssitaajuus osuu lähelle yliaaltokomponentin taajuutta. Resonanssi-ilmiöt voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin, sarja- ja rinnakkaisresonanssiin.

Sarjaresonanssissa resonanssitaajuudella piirin reaktanssi on nolla ja yliaaltokomponentille muodostuu pieni impedanssinen sulkeutumistie. Tätä ilmiötä käytetään hyväksi esimerkiksi yliaaltosuodattimissa, jolloin yliaaltokomponenttien virrat voidaan suodattaa pois verkosta.

Rinnakkaisresonanssi puolestaan muodostaa resonanssitaajuudelle suuri-impedanssisen piirin, joka aiheuttaa jännitteen voimakkaan säröytymisen. Samalla

resonanssiipiiri synnyttää kiertovirran, joka voi kasvaa moninkertaiseksi verrattuna alkuperäiseen yliaaltokomponentin virtaan. Koska tavallisimmin rinnakkaisresonanssiipiiri muodostuu piirissä olevan kompensointikondensaattorin ja verkon impedanssien yhteisvaikutuksena, aiheuttaa resonanssivirta helposti kondensaattorin ylikuormittumisen. /1/

5 HARMONISTEN YLIAALTOJEN MÄÄRÄYKSET JA SUOSITUKSET PIENJÄNNITEVERKOSSA

Sähkönjakeluverkkojen sähkönlaatuun liittyviä raja-arvoja määritetään standardissa SFS-EN 50160 "Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet". Standardi ottaa kantaa sähkönlaadun raja-arvoihin vain sähkönkuluttajan ja yleisen jakeluverkon liittymäkohdassa. Sähkönkuluttaja voi kuitenkin tarvittaessa käyttää tätä standardia oman verkkonsa sähkölaadun arvioinnissa.

Tämä standardi määrittelee vain yliaaltojännitteiden osalta suurimmat sallitut raja-arvot. Yliaaltovirtojen raja-arvoille suosituksia on sen sijaan laatinut Energiateollisuus ry (aiemmin Sähköenergialiitto SENER ry). /8/

5.1 Yliaaltojännitteiden sallitut raja-arvot

Standardin SFS-EN 50160 mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon aikana 95 %:n jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvon 10 min keskiarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 3 määritetty arvo.

Yksittäisen yliaaltojännitekomponenttien esiintymisen lisäksi jakelujännitteen harmonisen kokonaissärön (THD-F%), mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40:een saakka, tulee olla enintään 8 %. Käytännössä kuitenkin jo noin 3 %:n jännitesäro saattaa aiheuttaa ongelmia joidenkin laitteiden toiminnassa. /8,10/

Taulukko 3. Standardin SFS-EN 50160 mukaiset raja-arvot yliaaltojännitekomponenttien pitoisuudelle jakeluverkon liityntäkohdassa. Yliaaltojännitekomponenttien osuudet ilmoitettu prosentteina perustajuisesta jännitteestä. /10/

Parittomat yliaallot, kolmella jaottomat		Parittomat yliaallot, kolmella jaolliset		Parilliset yliaallot	
Järjestys- luku n	Yliaalto- jännite %	Järjestys- luku n	Yliaalto- jännite %	Järjestys- luku n	Yliaalto- 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				

5.2 Yliaaltovirtojen sallitut ohjeelliset raja-arvot

Energiateollisuus ry on laatinut suosituksen myös yliaaltovirtojen sallituista raja-arvoista, jotka on esitetty taulukossa 4. Perustana tälle suositukselle on, että jännitteen säröytyminen riippuu verkon eri osien yliaaltovirroista sekä niiden impedansseista. Yliaaltojännitteet saattavat olla yliaaltovirtalähteen liittymiskohdassa hyväksyttävällä tasolla, mutta aiheuttavat muissa verkonosissa liiallisen jännitteen säröytymisen. Virtasuositusten perustana on käytetty määräävää standardia SFS-EN 50160 ja tavoitteena suosituksilla on, että standardin vaatimukset täytetään tarkoituksenmukaisella tavalla, mikäli virtasuositus täytetään.

Ohjeelliset arvot yliaaltovirroille ovat suhteellisia sähkökuluttajille varattuun siirtokapasiteettiin. Raja-arvojen laskennan perusteena käytetään referenssivirtaa I_{ref} , joka sulakepohjaisessa liittymässä vastaa pääsulakkeen koko ja tehopohjaisessa liittymässä pätöteho muutettuna virraksi. Referenssivirta lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3}U_n}, \quad (12)$$

jossa P on liittymissopimuksen pätöteho ja

U_n on verkon nimellisjännite. /6/

Taulukko 4. Energiäteollisuus ry:n suosittelemat rajat yliaaltovirralle. /6/

Referenssivirta I_{ref}	Suositeltava raja	
$\leq 25 \text{ A}$	Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita.	
$25 \text{ A} < I_{ref} \leq 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta.	
$> 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan.	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	< 11	7,0 %
	11- 16	3,5 %
	17- 22	2,5 %
	23- 34	1,0 %
> 34	0,5 %	

6 YLIAALTOJEN TORJUNTA

Yliaaltoja voidaan vähentää sähköverkosta suodattamalla tai toteuttamalla laitteisto siten, että yliaaltoja ei muodostu merkittävästi. Se miten yliaaltojen vähentäminen toteutetaan, valitaan usein voimassa olevien määräysten pohjalta, teknisin sekä taloudellisin perustein. /7/

6.1 Rakenteelliset ratkaisut

Rakenteellisilla ratkaisuilla pyritään vähentämään yliaaltojen muodostumista tai poistamaan eniten ongelmia aiheuttavia yliaaltokomponentteja. Tasasuuntaajien osalta rakenteelliset ratkaisut tarkoittavat esimerkiksi pulssiluvun valintaa. Pulssiluvun vaikutusta yliaaltojen esiintymiseen käsiteltiin aiemmin jo kappaleessa 3.1. Jos kuormana on pääosin 6-pulssi tasasuuntaajia, syöttävän muuntajan on oltava ylimitoitettu ja monesti standardien mukainen sähkölaadun vaatimus on hankala täyttää ilman suodatusta. Suuremmalla pulssiluvulla voidaan vähentää varsinkin alempitaajuisten yliaaltojen esiintymistä. Kuitenkaan pulssiluvultaan yli 12-pulssisen tasasuuntaajan käyttäminen ei tuota enää merkittävää muutosta yliaaltojen torjumiseen, kun otetaan huomioon myös taloudelliset näkökulmat. /7,12/

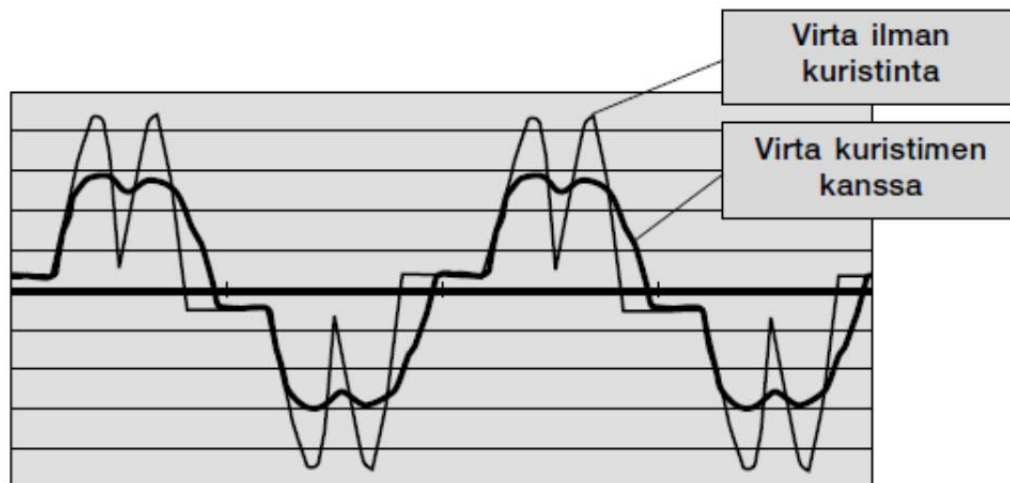
Toisena esimerkkinä rakenteellisista yliaaltojen vähennyskeinoista on verkon vahvistaminen. Yliaaltojännitteiden esiintyminen on riippuvainen verkon impedanssista ja pienempi impedanssissa verkossa yliaaltovirrat muodostavat vähemmän yliaaltojännitteitä. /12/

6.2 Suodatus

Tasasuuntaajissa voidaan käyttää sisäisiä tai ulkoisia suodattimia. Suodattimet voidaan jakaa toiminnallisuudeltaan passiivisiin ja aktiivisiin suodatintyyppeihin.

Tasasuuntaajien sisäiset suodattimet ovat yleensä passiivisia kuristimia tasasuuntaajan tulo-, välipiirissä tai molemmissa. Kooltaan kuristin tulee olla riittävän suuri, jot-

ta suodatus olisi tehokasta. Useasti kuitenkin suodattimen kokoa on pienennetty tai sitä ei ole lainkaan. Kuva 4 esittää virran käyrän muodot suuntaajakäytölle kuristimella ja ilman. Kuristin rajoittaa virran muutosta ja tasoittaa virran käyrämuodossa esiintyviä piikkejä. Taulukossa 2 puolestaan vertaillaan käytännön tasasuuntaajan muodostamia yliaaltoja kuristimella ja ilman. Taulukosta nähdään, että alemmpitaajuisten yliaaltojen määrää voidaan vähentää kuristimella huomattavasti.



Kuva 4. Tyypilliset tasasuuntaajan virran käyrämuodot kuristimella ja ilman. /12/

Ulkoisia suodattimia voidaan käyttää ratkaisuinä yliaalto-ongelmiin uusissa ratkaisuissa, mutta myös vanhoihin järjestelmiin voidaan lisätä ulkoisia suodattimia vähentämään yliaaltoja, jotka ovat lisääntyneet verkossa vähitellen verkossa tehtyjen muutoksien yhteydessä. /12/

Ulkoinen passiivinen suodatin koostuu sarjaan kytketyistä kondensaattorista ja kuristimesta. Suodin muodostaa yliaaltotaajuuksille hyvin pieni-impedanssisen sarjaresonanssipiirin, jolloin yliaaltolähteen virrat kulkeutuvat suodattimen kautta, eivätkä kulkeudu syöttävään verkkoon. Suotimen kondensaattorin kapasitanssi ja kuristimen induktanssi mitoitetaan siten, että saavutetaan haluttu kompensointiaste viritettynä tietylle yliaaltotaajuudelle. Suodattimia käytetään viritettynä yhdelle taajuudelle, teollisuuden verkoissa yleensä 5. yliaallon taajuudelle, jolloin viritetyn taajuuden yläpuolella yliaallot vaimenevat ja alapuolella taas saattavat vahvistua. Useasti passiivisuodattimena käytetään kuitenkin monelle taajuudelle viritettyä suodatinta ja tyypilliset viritystaajuudet ovat 5., 7. ja 11. yliaallot. Usean taajuuden passiivisuodattimet muodostetaan rinnakkain viritetyistä kondensaattori- ja kuristinsarjaresonanssi-

piireistä. Passiiviset suodattimet suositellaan asennettavan aina mahdollisimman lähelle yliaaltolähteitä. /8,12/

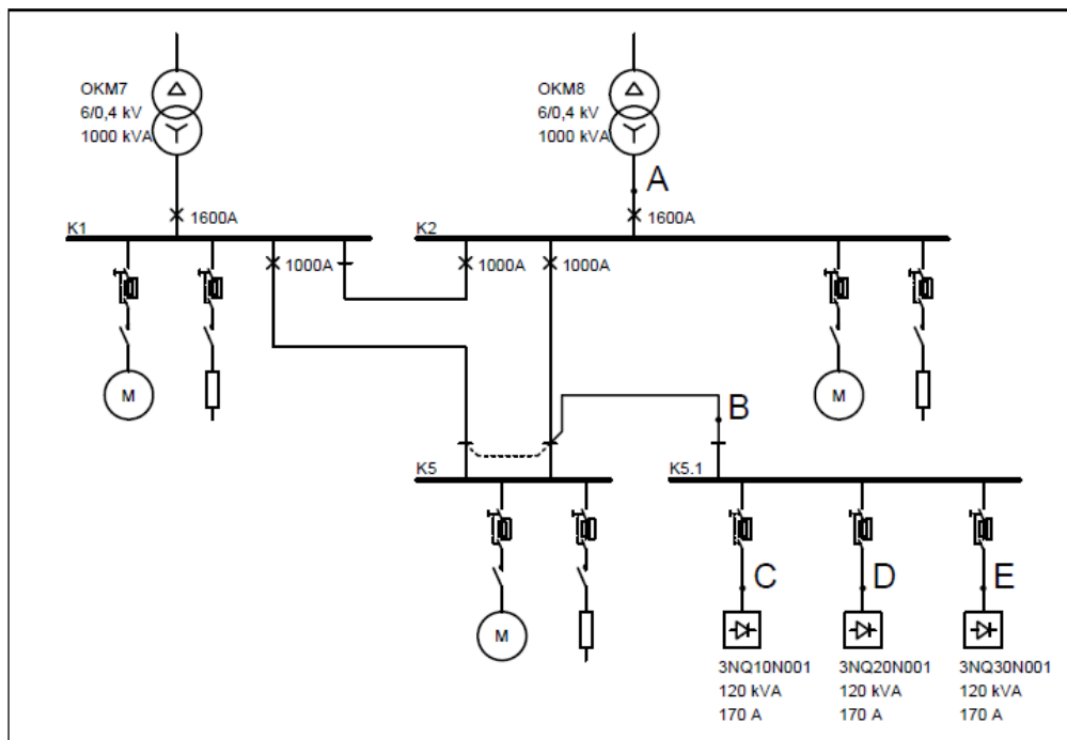
Ulkoiset aktiiviset suodattimet ovat puolijohdetekniikalla toteutettuja säädettäviä virtalähteitä. Niiden toiminta perustuu suodattimen syöttämään virtaan, joka on vastakaisessa vaiheessa verkon yliaaltovirtoihin nähden. Aktiivinen suodatin kytketään yliaaltolähteen kanssa rinnan ja suodattimen syöttämä kompensointivirta muuttaa verkon syöttämän virran käyrämuodon perustaajuiseksi puhtaan sinimuotoiseksi. Aktiivisella suotimella pystytään suodattamaan myös taajuuksiltaan ja suuruudeltaan muuttuvia yliaaltoja, sillä aktiivisuodattimen vaste muuttuviin olosuhteisiin on hyvin nopea. /7/

7 VOIMALAITOKSEN PIENJÄNNITEVERKKO

7.1 Verkon kokoonpano

Sähkösuodattimien tasasuuntaajia syötetään normaalikäytössä omakäyttömuuntajalta OKM8, kuten yksinkertaistettu pienjänniteverkon pääkaavio kuva 5 esittää. Muuntajan kilpiarvot ovat 6/0,4 kV ja 1000 kVA. OKM8:n syöttö on kytketty turbogeneraattorikeskuksen K2 kiskostoon, josta virransyöttö voidaan jakaa keskuksen kuormille sekä alakeskuksille K5 ja K5.1. Kuormien tasaamiseksi muuntajien OKM7 ja OKM8 kesken, keskuksen K5 syöttö on kuitenkin normaalisti ohjattu keskuksen K1 kiskostoon. /5/

Keskuksen K2 ja siten myös OKM8:n kuormia ovat keskuksen K2 kytketyt kuormat sekä keskuksen K5.1 sähkösuodattimen tasasuuntaajat. Keskuksen K2 syöttävän kiskoston virta on 750 A kiskoston virtamittareilta luettuna, joka vastaa noin puolta muuntajan OKM8 nimellisestä kuormitettavuudesta.

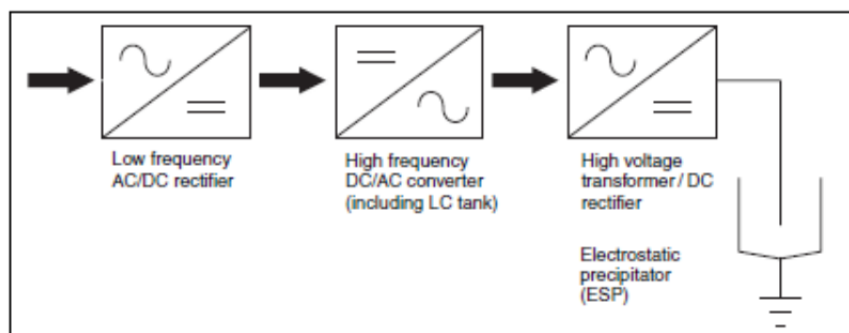


Kuva 5. Voimalaitoksen pienjänniteverkon yksinkertaistettu pääkaavio.

7.2 Sähkösuodattimen tasasuuntaajat

Sähkösuodattimen tasasuuntaajat päivitettiin Naantalın voimalaitos 3:n vuoden 2013 muutostöissä ja toimittajana suuntaajille oli Alstom. Laitos 3:n sähkösuodatin on jaettu kolmeen savukaasujen virtaussuunnassa sarjassa olevaan lohkokon, joille jokaiselle on oma tasavirtaa syöttävä tasasuuntaajansa. Virtaussuunnassa ensimmäisellä lohkokolla on normaalitilanteissa aina suurin kuorma, johtuen suuremmasta hiukkaspitoisuudesta. Sähkösuodattimen lohkojen kuormat siis vähenevät virtaussuunnassa sitä mukaa, kun savukaasut puhdistuvat matkalla suodattimen läpi. /5/

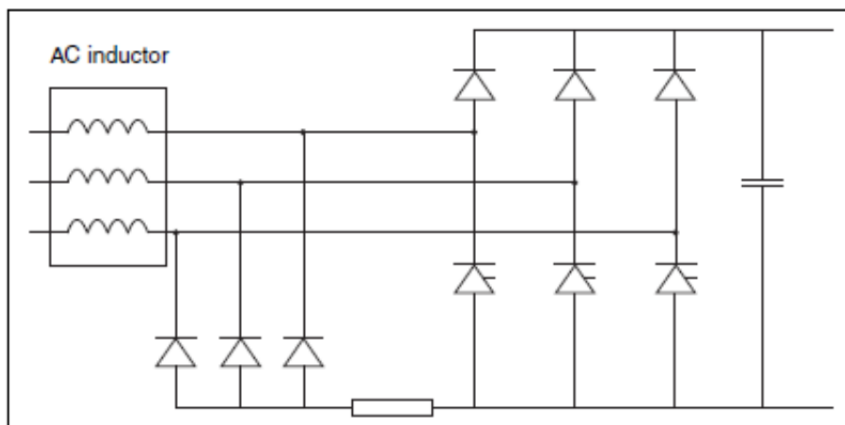
Alstomin tasasuuntaajat ovat tyyppimerkinnältään SIR4 102 ja niiden tehollisarvo on 102 kW sekä tehokerroin 0,9. Tasasuuntaajan nimellisärvot ovat ensiöpuolella 400 V/ 170 A ja toisiopuolella 85 kV/1200 mA. Nämä tasasuuntaajat ovat niin kutsuttuja suurtaajuustasasuuntaajia, jotka muodostuvat kuvan 6 mukaisesti matalataajuus-tasasuuntaus-, korkeataajuusmuuntaja- sekä korkeajännite- ja korkeataajuustasasuuntauslohkoista. /11/



Kuva 6. Sähkösuodattimen tasasuuntaajan lohkokaavio. /11/

Kuvassa 7 on esitetty matalataajuustasasuuntauslohkon piirikaavio. Lohkossa, joka on puoliksi ohjattu 6-pulssi tasasuuntaaja, muunnetaan perustaajuinen syöttöjännite tasajännitteeksi. Lohkon sisääntulossa on kuristimet, joilla pyritään vähentämään suuntaajan aiheuttamia yliaaltoja syöttävään verkkoon. Tämän jälkeen tasasuunnattu jännite muunnetaan seuraavassa lohkokossa vaihtosuuntaajalla korkeataajuiseksi vaihtojännitteeksi. Korkeataajuustasasuuntaajalohkossa muuntajalla jännite nostetaan korkeajännitteiseksi ja se tasasuunnataan. Tällä kokoonpanolla pystytään vähentä-

mään tasajännitteen rippeliä, jonka suuruus näkyy sähkösuodattimen suodatustehossa. /5,11/



Kuva 7. Matalataajuustasasuuntauslohkon yksinkertaistettu piirikaavio. /11/

Tasasuuntaajien ohjaus on kytketty laitoksen automaatiojärjestelmään, jonka lisäksi laitos 3:n relehuoneessa on etäohjauspäätte, jolla voi muuttaa tasasuuntaajien parametreja, ohjaustapaa tai lukea laitteiden diagnostiikkaa. Tasasuuntaajilla on valittavissa erityyppisiä ohjaustapoja, kuten toisiopuolen virtarajoitus tai tehon optimoiva asetus. Naantalin voimalaitoksen 3 sähkösuodattimien ohjaustapana käytetään normaalisti virtarajoitusta, jolloin toisiopuolen virta on asetettu tasolle 500 mA jokaiselle tasasuuntaajalle. Tämä on käytännössä osoittautunut toimivaksi ohjaustavaksi ja on sähkökulutuksen sekä suodatustehon kannalta hyvä malli. Laitteistolle olisi valittavissa myös tehon optimoinnin ohjaustapa, jolloin laite itse määrittää suodattimelle syötettävän jännitteen ja virran määrää erityisen algoritmin avulla. Käytännössä tämän ohjaustavan käytössä on kuitenkin ilmentynyt erilaisia ongelmia, eikä se jatkossa tule olemaan laitoksella 3 käytössä. /5/

8 VOIMALAITOKSEN SÄHKÖVERKON YLIAALTOJEN MITTAUKSET

8.1 Mittausjärjestelyt

Mittauksilla todennetaan tasasuuntaajien aiheuttamien yliaaltojen määrää voimalaitoksen 0,4 kV verkossa. Mittapisteiksi on kuvan 5 mukaisesti valittu verkkoa syöttävän muuntajan OKM8 alajännitepuolen keskuksen K2 syöttökisko (Piste A), tasasuuntaaja keskuksen K5.1 syötön liityntäpiste (Piste B) sekä verkon kuormanpään sähkösuodattimen lohkojen tasasuuntaajien syöttöpisteet (Pisteet C, D ja E). Mittaukset suoritetaan käyttämällä sähkönlaatuanalysointia Fluke 434 II. Poiketen standardin SFS-EN 50160 esittämästä mittausmenetelmästä, mittaustulokset luetaan analysointilaitteesta hetkellisarvoina, koska oletettavasti yliaaltojen määrä verkossa on verrannollinen tasasuuntaajan tehoon, joka taas pysyy vakiona sähkösuodattimen ajotavan mukaisesti.

Mittauksista kirjataan ylös vaiheiden väliset yliaaltojännitteiden komponenttien suhteelliset jännitteet järjestyslukuun 25 saakka, perustaajuisen jännitteen tehollisarvot sekä jännitteen kokonaissäröt (THD-F%). Lisäksi kirjataan mittaustuloksiin jokaisen vaiheen virran yliaaltojen suhteelliset arvot kokonaisvirtaan nähden, perustaajuisen yliaaltovirran tehollisarvo ja virran kokonaissärö (THD-F%).

Mittaukset toteutetaan tasasuuntaajien kahdella eri toisiopuolen virtarajoituksen asetuksella. Ensin mitataan pisteet tasasuuntaajien 500 mA:n virralla, joka vastaa nykyistä normaalia käyttötilannetta. Tämän jälkeen tasasuuntaajat asetetaan syöttämään sähkösuodatinta täydellä 1200 mA:n virralla ja uusitaan samat mittaukset.

8.2 Mittaustulosten tarkastelun menetelmät

Mittaustuloksia verrataan standardin SFS-EN 50160 määrittämiin suurimpiin sallittuihin yliaaltojännitteiden arvoihin sähköverkon liityntäpisteessä. Standardia sovelletaan voimalaitoksen sisäisen verkon sähkönlaadun arvioimiseen.

Tuloksia verrataan myös Energiateollisuus ry:n laatimiin suositukseen virran yliaaltojen esiintymiselle.

Mittauksilla pyritään selvittämään miten yliaallot esiintyvät verkon eri kohdissa. Eri-tyisesti tarkastellaan miten tasasuuntaajien yliaallot summautuvat syöttävän keskuk-
sen kiskostossa ja lisäksi miten ne mahdollisesti vaimenevat verkon muiden kuormi-
en kautta.

Muuntajan yliaaltojen aiheuttamaa lisäkuormitusta, ja tarkemmin tarvetta ottaa ne huomioon muuntajan mitoituksissa, arvioidaan mittaustulosten ja standardin EN 50464-3 määrittelemän virran kokonaissärön 5%-rajan mukaisesti. Tarkempaa tarkastelua esimerkiksi kertoimen K määrittämiseksi muuntajalle ei tämän työn puitteis-
sa tehdä.

9 MITTAUSTULOKSET

Seuraavissa alaluvuissa on esitetty edellisessä kappaleessa esiteltyjen mittaussuunnitelmien mukaisesti toteutettujen mittausten tulokset. Tuloksissa tulee ottaa huomioon, että mittauksia ei tehty eri mittauspisteissä samanaikaisesti. Kuormituksen arvot ovat täten saattaneet muuttua hieman mittausten välillä, vaikkakin mittausten aikana kuormitus vaikutti hyvin tasaiselta.

Mittaustuloksissa, jotka on nähtävillä mittauspöytäkirjojen muodossa liitteessä 1, on selkeästi havaittavissa 6-pulssi tasasuuntaajan tyypilliset yliaaltotaajuudet sekä -virrat. Näiden tyypillisten yliaaltokomponenttien arvot ovat selkeästi suuremmat kuin muiden taajuuksien, joita esiintyy melko pienissä määrissä. Yliaaltovirrat tasasuuntaajien syötössä vastaavat melko lähelle taulukossa 2 esitettyjä virta-arvoja käytännön 6-pulssitasasuuntaajalle kuristinsuodattimella. Tulosten yhteenvedon ja tarkastelun osalta keskitytään näiden tyypillisten 6-pulssitasasuuntaajan yliaaltokomponenttien tarkasteluun.

9.1 Yliaaltovirtojen summautuminen

Tasasuuntaajien virtojen summautumista tarkastellaan vertaamalla yksittäisten sähkösuodattimen lohkojen tasasuuntaajien summavirtaa keskuksen K5.1 syöttävän kaapelin virtaan nähden. Summautumista tarkastellaan aiemmin esiteltyjen kaavojen 7 ja 8 avulla sekä arvioidaan näiden kaavojen soveltuvuutta käytännön yliaaltosummavirtojen laskemiseen vertailemalla niistä saatuja tuloksia mitattuihin summavirtoihin. Kaavaa 7 käytettäessä ei huomioida vaihekulmia, koska niitä ei tiedetä mittausten perusteella. Taulukossa 5 on yhteenvedona mitattujen keskuksen yliaaltovirtojen ja laskettujen yliaaltovirtojen arvot 6-pulssi tasasuuntaajan tyypillisille yliaaltotaajuuksille. Taulukossa on lisäksi vertailua helpottamaan merkitty laskettujen arvojen prosentuaalinen erotus mitattuihin arvoihin.

Taulukko 5. Tasasuuntaajien ylivirtakomponenttien mitatut ja lasketut summavirrat keskuksen K5.1 syötössä sekä laskentojen erotusprosentit mitattuihin virta-arvoihin nähden tasasuuntaajan 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Virta-arvot on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Toisio- virta	Järjestys- luku	Mitattu arvo In [A]	Kaava 7		Kaava 8	
			In [A]	Erotus [%]	In [A]	Erotus [%]
500 mA	5	78,4	77,7	-0,8	77,7	-0,8
	7	39,3	39,1	-0,7	39,1	-0,7
	11	10,5	10,3	-1,3	7,5	-27,9
	13	8,4	8,4	0,1	6,2	-26,8
	17	5,1	4,9	-4,4	2,8	-44,7
	19	3,4	3,5	2,0	2,0	-41,0
	23	3,5	3,3	-5,6	1,9	-45,4
	25	2,0	2,0	0,6	1,2	-41,9
1200 mA	5	134,6	134,1	-0,4	134,1	-0,4
	7	37,1	36,9	-0,6	36,9	-0,6
	11	23,4	23,2	-0,5	17,0	-27,3
	13	12,3	12,3	-0,4	9,0	-27,2
	17	8,5	8,5	-0,1	4,9	-42,3
	19	7,8	7,7	-1,2	4,5	-43,0
	23	4,1	4,2	0,9	2,4	-41,7
	25	4,5	4,5	-0,9	2,6	-42,7

9.2 Yliaaltovirtojen esiintyminen verkon eri kohdissa

Mittauksilla haluttiin muodostaa käsitys siitä, kuinka yliaaltovirrat etenevät K5.1 keskukselta omakäyttömuuntajalle OKM8 ja miten virrat mahdollisesti kulkeutuvat muiden verkon kuormien kautta tai vahvistuvat verkon mahdollisten resonanssien myötä. Taulukossa 6 on esitetty rinnakkain keskuksen K2 syöttökiskoston ja keskuksen K5.1 syöttävän kaapelin yliaaltovirrat 6-pulssitasasuuntaajan tyypillisille yliaaltotaajuuksille.

Taulukko 6. Keskuksen K2 ja tasasuuntaajia syöttävän keskuksen K5.1 yliaaltovirrat ja niiden vaimentuminen tasasuuntaajan 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Virta-arvot on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Toisio- virta	Järjestys- luku	K2 In [A]	K5.1 In [A]	Vaimentuminen In[A]
500 mA	5	66,3	78,4	12,0
	7	34,5	39,3	4,8
	11	8,8	10,5	1,7
	13	8,6	8,4	-0,1
	17	4,4	5,1	0,7
	19	3,6	3,4	-0,2
	23	3,8	3,5	-0,3
	25	2,7	2,0	-0,6
1200 mA	5	110,7	134,6	23,9
	7	32,0	37,1	5,2
	11	19,9	23,4	3,4
	13	10,7	12,3	1,7
	17	8,2	8,5	0,3
	19	7,4	7,8	0,4
	23	4,9	4,1	-0,8
	25	3,8	4,5	0,7

9.3 Yliaaltojännite

Standardin SFS-EN 50160 raja-arvot yliaaltojännitekomponenteille ja kokonaissärölle on aiemmin esitelty taulukossa 3. Taulukkoon 7 on yhteenvetona mittauspöytäkirjoista kirjattu tyypilliset suuntaajien aiheuttamat yliaaltokomponenttien suhteelliset jännitteet kaikille mittauspisteille. Taulukkoon on myös tulkintaa helpottamaan kirjattu standardin määrittämät raja-arvot yliaaltotaajuuskomponenteille. Taulukkoon 8 on puolestaan kerätty kaikkien mittapisteiden jännitesäröt standardin määrittämine raja-arvoineen.

Taulukko 7. Kaikkien mittapisteiden yliaaltojännitekomponenttien suhteelliset osuudet tasasuuntaajan 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Osuudet on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Toisiovirta	Järjestysluku	K2 Un [%]	K5.1 Un [%]	Lohko 1 Un [%]	Lohko 2 Un [%]	Lohko 3 Un [%]	Raja-arvo Un [%]
500 mA	5	1,7	2,5	2,7	2,7	2,7	6,0
	7	1,0	1,6	1,7	1,7	1,7	5,0
	11	0,7	0,9	1,0	1,0	1,0	3,5
	13	0,4	0,6	0,7	0,7	0,6	3,0
	17	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	3,0
	19	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
	23	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	1,5
	25	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	1,5
1200 mA	5	2,8	4,4	4,7	4,6	4,7	6,0
	7	0,9	1,5	1,6	1,6	1,6	5,0
	11	1,2	1,7	1,9	1,8	1,8	3,5
	13	0,7	1,0	1,1	1,1	1,1	3,0
	17	0,8	1,1	1,2	1,2	1,2	3,0
	19	0,6	0,9	1,0	1,0	1,0	1,5
	23	0,5	0,7	0,7	0,8	0,7	1,5
	25	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	1,5

Taulukko 8. Kaikkien mittapisteiden jännitesärö tasasuuntaajan 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Osuudet on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Toisiovirta	K2 THD-F [%]	K5.1 THD-F [%]	Lohko 1 THD-F [%]	Lohko 2 THD-F [%]	Lohko 3 THD-F [%]	Raja-arvo THD-F [%]
500 mA	2,3	3,5	3,7	3,7	3,6	8,0
1200 mA	3,5	5,5	5,9	5,8	5,9	8,0

9.4 Yliaaltovirta

Tarkasteltaessa yliaaltovirtoja ja vertailtaessa niitä Energiateollisuus ry:n suosittelemiin arvoihin käytetään referenssivirtoina nimellisiä muuntajan, keskuksen ja suuntaajien virta-arvoja. Tämä johtaa tasasuuntaajien osalta nimellisvirralla 170 A suosituksen mukaisesti tarkastelemaan virtasäröä, jolloin suositeltu raja-arvo on 10 %. Taulukko 9 esittää yhteenvedona virtasäröarvot suhteessa referenssivirtaan tasasuuntaajien syötössä suositeltuine raja-arvoineen. Muuntajan kiskoston ja tasasuuntaajia syöttävän keskuksen nimellisvirta-arvoilla 1440 A ja 1000 A suosituksen mukaan tarkastellaan yksittäisten yliaaltovirtakomponenttien suhteellisiä osuuksia. Taulu-

koissa 10 ja 11 on laskettu Energiateollisuus ry:n suosittelemien raja-arvojen ja referenssivirran avulla suositeltu virta-arvo kullekin yliaaltovirtakomponentille keskuksilla K2 ja K5.1.

Taulukko 9. Virtasäro referenssivirtaan nähden tasasuuntaajien syötössä 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Arvot on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Referenssi- virta	Toisio- virta	Lohko 1 Ih THD [%]	Lohko 2 Ih THD [%]	Lohko 3 Ih THD [%]	Raja-arvo Ih THD [%]
170 A	500 mA	16,6	17,8	17,7	10,0
	1200 mA	27,3	28,1	28,3	10,0

Taulukko 10. Mitatut ja suositellut yliaaltovirta-arvot keskuksen K2 syöttävässä kiskostossa tasasuuntaajien 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Mitatut arvot on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Referenssi- virta	Toisio- virta	Järjestys- luku	K2 In [A]	Raja-arvo In[A]
1440 A	500 mA	5	66,3	100,8
		7	34,5	100,8
		11	8,8	50,4
		13	8,6	50,4
		17	4,4	36,0
		19	3,6	36,0
		23	3,8	20,0
		25	2,7	20,0
	1200 mA	5	110,7	100,8
		7	32,0	100,8
		11	19,9	50,4
		13	10,7	50,4
		17	8,2	36,0
		19	7,4	36,0
		23	4,9	20,0
		25	3,8	20,0

Taulukko 11. Mitatut ja suositellut yliaaltovirta-arvot keskuksen K5.1 syötössä tasasuuntaajien 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Mitatut arvot on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Referenssi- virta	Toisio- virta	Järjestys- luku	K5.1 In [A]	Raja-arvo In[A]
1000 A	500 mA	5	78,4	70,0
		7	39,3	70,0
		11	10,5	35,0
		13	8,4	35,0
		17	5,1	25,0
		19	3,4	25,0
		23	3,5	20,0
		25	2,0	20,0
		1200 mA	5	134,6
	7		37,1	70,0
	11		23,4	35,0
	13		12,3	35,0
	17		8,5	25,0
	19		7,8	25,0
	23		4,1	20,0
	25		4,5	20,0

9.5 Muuntajan kuormittuminen

Standardi EN 50464-3 määrittää virrankokonaissärön raja-arvon, jota suuremmilla virtasäröillä yliaaltovirratt tulisi ottaa huomioon muuntajan mitoituksessa. Taulukossa 12 on esitetty mitatut arvot virtasärölle keskuksen K2 kiskostossa, jota OKM8 syöttää. Poiketen standardista taulukossa on laskettu virtasärö myös muuntajan nimellisvirtaan verrattuna, joka antaa paremman kuvan muuntajan yliaaltovirtojen kuormittavuudesta. Mittaushetkellä muuntajan kuorma on alhainen ja mitatut virtasäröarvot eivät suoraan kuvaa tarvetta ottaa yliaaltovirratt mitoituksessa huomioon.

Taulukko 12. Yliaaltovirtasärö keskuksen K2 kiskostossa mitattuna perustaaajuiseen virtaan ja laskettuna nimellisvirtaan nähden tasasuuntaajien 500 ja 1200 mA toisiovirroilla. Mitatut arvot on esitetty vaiheiden keskiarvoina.

Referenssi- virta	Toisio- virta	K2	K2	Raja-arvo
		Ih THD-F [%]	Ih THD (REF) [%]	Ih THD [%]
1440 A	500 mA	13,3	5,3	5,0
	1200 mA	14,4	8,2	5,0

10 TULOSTEN TARKASTELU

Tulosten tarkastelussa pyritään antamaan kuva pienjänniteverkon yliaaltopitoisuuksista ja niiden vaikutuksista verkon toiminnallisuuteen ja sähkönlaatuun.

10.1 Yliaaltovirtojen summautumisen tarkastelu

Summavirtoja tarkastellaan tyypillisten 6-pulssitasasuuntaajan muodostamien yliaaltokomponenttien osalta. Taulukosta 5 voidaan nähdä, että käyttämällä kaavaa 7 eli summaamalla yliaaltovirtakomponentit keskenään, huomioimatta vaihekulmia, saadaan laskennasta hyvin saman suuruisia arvoja kuin mitä mitatut arvot keskuksen K5.1 syötöstä ovat. Kaava 8 puolestaan eroaa tuloksiltaan mitatuista arvoista alkaen järjestysluvusta 11.

Kaavaa 8 tarkasteltaessa huomataan, että yksittäisten yliaaltokomponenttien summavirta lasketaan summaamalla eri virtalähteiden yliaaltokomponenttivirrat järjestyslukuun 10 saakka, joten järjestyslukuun 10 saakka kaavat 7 ja 8 ovat identtiset, kun vaihekulmat lähteiden yliaaltokomponenttien välillä eivät eroa toisistaan. Tästä järjestysluvultaan suurempien yliaaltovirtakomponenttien summan laskenta poikkeaa toisistaan näillä kaavoilla.

Yksittäisien suuntaajien yliaaltovirrat summautuvat lähes kokonaisuudessaan keskuksen K5.1 syötössä. Koska tasasuuntaajien virta-arvojen summaaminen antaa selkeästi mitattuja arvoja lähemmän tuloksen, voidaan yliaaltokomponenttien eri yliaaltolähteiden välillä tulkita olevan vaihekulmiltaan lähellä toisiaan. Mittaustilanteessa kuormitus on kaikille kolmelle tasasuuntaajille lähes sama, mutta jos kuormitusta muutettaisiin tasasuuntaajien välillä siten, että kuormitukset tasasuuntaajien välillä eroaisivat huomattavasti, eroaisivat tällöin myös yliaaltovirtakomponenttien vaihekulmat todennäköisesti toisistaan ja yliaaltovirtojen tehollisarvon suora summaaminen ei enää antaisi yhtä tarkkoja tuloksia. Tässä kuormituksen eroavaisuustilanteessa kaava 8 saattaisi antaa paremman arvion virtojen summautumisesta suuremmilla yliaaltotaajuuksilla kuin virtojen summaaminen.

10.2 Yliaaltovirtojen esiintymisen tarkastelu

Tulosten tulkinnan oletuksena on, että verkossa ei ole muita merkittäviä yliaaltolähteitä. Tämä oletus voidaan hyväksyä, koska verkon muut tiedossa olevat kuormitus-tyypit eivät muodosta merkittävästi yliaaltovirtoja.

Taulukosta 6 voidaan nähdä, että yliaaltovirtojen vaimeneminen keskusten K2 ja K5.1 syöttöjen välillä alemmpitaajuisilla suurempivirtaisilla yliaaltokomponenteilla on noin 15 %:n tasolla. Tämä vaimeneva osuus yliaaltovirroista kulkeutuu verkon muiden kuormien kautta. Kun virrat jakaantuvat melko tasaisesti kuormien esim. oikosulkumoottoreiden kesken, eivät virrat ole merkittäviä. Tasasuuntaajat eivät myöskään muodosta juurikaan kolmansia yliaaltoja, jotka saattaisivat aiheuttaa esimerkiksi nollajohtimen kuormitusta. Huomionarvoista on myös, että osa yliaaltokomponenteista ei vaimennu vertailussa keskuksien K2 ja K5.1 välillä. Osa yliaaltovirtakomponenteista vahvistuu vähäisessä määrin verkon resonansseissa tai näitä komponentteja muodostuu myös verkon muissa kuormissa.

10.3 Yliaaltojännitteiden mittaustulosten tarkastelu

Liitteen 1 mittauspöytäkirjoista nähdään, että minkään yksittäisen yliaaltojännitekomponentin arvo ei ylitä standardin raja-arvoja, kun mittaustuloksia vertaillaan taulukon 2 standardin SFS-EN 50160 määrittämiin raja-arvoihin.

Yhteenvedona taulukosta 7 nähdään, että pääjännitteiden yliaaltopitoisuuksien keskiarvot 1200 mA:n toisiovirralla keskuksella K5.1 ja tasasuuntaajien syötössä ovat melko lähellä raja-arvoja.

Taulukosta 8 huomataan myös, että jännitesärö ei missään mittauksissa ylittänyt standardin määrittämää sallittua rajaa, mutta särö suuntaajien täydellä teholla on huomattava keskuksella K5.1 sekä tasasuuntaajien syötössä. Aiemmin mainittu jännitesärön 3 %:n raja, joka saattaa aiheuttaa ongelmia joissakin laitteissa, ylittyy kaikissa muissa mittauksissa paitsi suuntaajien 500 mA:n toisiovirralla keskuksen K2 syöttävässä kiskostossa.

10.4 Yliaaltovirtojen mittaustulosten tarkastelu

Yliaaltovirtoja tarkasteltaessa tasasuuntaajien syötössä taulukosta 9 huomataan, että virtasäro ylittää kaikissa mittauksissa suositellun raja-arvon. Toisiovirralla 1200 mA:n virtasäro on lähes kolminkertainen suositeltuun verrattuna.

Keskuksen K2 kiskostoissa suositellut yliaaltovirta-arvot ylittyvät tasasuuntaajien 1200 mA:n toisiovirralla järjestysluvun 5 yliaaltovirtakomponentin osalta, kuten taulukko 10 esittää. Keskuksen K5.1 mittauksissa puolestaan komponentti 5 ylittää suositellun rajan molemmilla mittauksien toisiovirroilla, joka on nähtävissä taulukossa 11. Toisiovirralla 1200 mA mitattu virta-arvo on kyseiselle yliaaltovirtakomponentille lähes kaksinkertainen suositeltuun rajaan verrattuna. Muuten molemmissa mittapisteissä virta-arvot pysyvät alle suositeltujen raja-arvojen.

Standardin määrittelemät raja-arvot yliaaltojännitteelle eivät ylity, kuten edellisessä kappaleessa todettiin, mutta suositellut arvot yliaaltovirroille sen sijaan ylittyvät huomattavasti. Se että yliaaltojännitteen arvot ovat sallituissa rajoissa, johtuu osaltaan siitä, että kyseinen voimalaitoksen pienjänniteverkko on jännitejäykkä sekä yliaaltojännitteen aiheuttama impedanssi on verkossa hyvin pieni. Mitatuilla yliaaltovirroilla toisessa pienjänniteverkossa saattaisi esiintyä huomattavia ongelmia yliaaltojännitteen kanssa.

Keskuksen K5.1 yliaaltovirrat ovat huomattavan suuret ja onkin suositeltavaa, että ilman lisäsuodatusta keskukseen ei jatkossa kytketä lisää kuormia tasasuuntaajien rinnalle, koska keskuksessa esiintyvät virrat saattaisivat kulkeutua lisäkuormitusten kautta aiheuttaen vikoja toiminnallisuudessa tai lisäkuormittumista. Myös keskuksen K5 kytkeminen samaan syöttöön keskuksen K5.1 kanssa on arveluttavaa, koska yliaaltovirrat saattavat aiheuttaa huomattavaa ylikuormitusta keskuksen K5 muissa kuormissa, kuten esimerkiksi pienempitehoisissa oikosulkumoottoreissa.

Jotta syöttävän pienjänniteverkon yliaallot keskuksilla K2 ja K5.1 saataisiin suositellulle tasolle, tulisi keskukseen K5.1 asentaa ulkoinen suodatin. Koska yliaaltovirrat ylittävät suositellut arvot vain yliaaltokomponentin 5 osalta, passiivinen suodatin viritettynä kyseiselle taajuudelle riittävällä kompensointiasteella olisi riittävä ratkaisu.

10.5 Muuntajan kuormittumisen tarkastelu

Omakäyttömuuntajan syöttämän keskuksen K2 kiskoston virtasärö ylittää standardin EN 50464-3 määrittämän raja-arvon. Tämä raja-arvo määrittää, tuleeko yliaaltopitoisuus verkossa ottaa huomioon muuntajan mitoituksessa. Taulukosta 12 nähdään, että mitattu virtasärö ylittää huomattavasti raja-arvon, kun muuntajan nimelliseen kuormitukseen laskettu särö on puolestaan huomattavasti lähempänä raja-arvoa. Tämän muuntajan nimelliseen kuormitukseen verrattu virtasärö antaa paremman kuvan yliaaltojen kuormittavuudesta, mutta johtuen muuntajan tämänhetkisestä alhaisesta kuormituksesta, ei yliaaltovirroilla kuitenkaan ole merkitystä. Jos kuormitusta kasvatettaisiin nimelliseen kuormitukseen, olisi näillä mitatuilla yliaaltovirroilla merkitystä muuntajan ylikuormitukseen ja lämpenemiseen. Tässä tapauksessa muuntajan mitoituksessa tasasuuntaajien yliaaltokuorma olisi huomioitava ja kymmenien prosenttien ylimeritys olisi muuntajalle perusteltua.

11 YHTEENVETO

Yliaaltoja synnyttävät sähköverkkoon verkon epälineaariset osat. Näitä ovat lähinnä verkonkuormana olevat laitteet, joiden kautta kulkeva virta ei ole tasaisen sinimuotoista, vaan laite katkoo virran kulkua. Tasasuuntaajat ovat hyvin tyypillisiä yliaalto-lähteitä, sillä niiden toiminta perustuu puolijohdekytkimiin.

Yliaallot aiheuttavat häirtailmiöitä verkon muissa laitteissa. Näitä häirtailmiöitä ovat yleisesti laitteiden kuormittuminen sekä virhetoiminnot. Lisäksi myös laiterikot ovat mahdollisia, mikäli yliaallot pääsevät vahvistumaan verkon resonansseissa. Muuntajissa yliaallot aiheuttavat lisääntyneitä tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöitä, ja sitä kautta muuntajan lisälämpenemisen. Muuntajaa mitoitettaessa yliaallot tulisi ottaa huomioon ja muuntaa yliaaltopitoinen kuormitusvirta vastaamaan perustaajuisista kuormitusta. Myös oikosulkumoottoreilla yliaallot aiheuttavat koneen lämpenemistä ja huonontavat sen hyötysuhdetta. Verkon yliaaltovirrat kulkeutuvat oikosulkumoottoreiden kautta ja siten vähentävät verkon säröä.

Sähköverkon suodattaminen ja rakenteelliset ratkaisut ovat keinoja vähentää yliaaltoja. Suodattaminen voidaan toteuttaa sisäisesti yliaalтолähteeseen lisättyllä suodattimella tai ulkoisesti asennetuilla passiivi- tai aktiivisuodattimilla lähellä yliaalтолähdettä. Rakenteelliset ratkaisut ovat pääasiassa verkon vahvistamista ja yliaalтолähteen laiterakenteen muutoksia.

Standardeissa ja suosituksissa on määritetty arvoja yliaaltopitoisuuksille ja säröille. Standardi SFS-EN 50160 määrää verkon liityntäpisteessä esiintyvien yliaalтоjännitteiden suurimman sallitun pitoisuuden. Yliaaltovirtojen esiintymiselle puolestaan löytyy kirjallisuudesta vain suosituksia. Muuntajan mitoitukseen ja kuormituksen arviointiin löytyy standardista EN 50464-3 raja-arvo virran särölle ja menetelmät yliaaltopitoisen virran muuntamiseen perustaajuisiksi kuormitukseksi.

Mittauksilla todennettiin sähkösuodattimien tasasuuntaajien aiheuttamia yliaaltoja voimalaitoksen syöttävään pienjänniteverkkoon. Mittaustuloksia vertailtiin edellä mainittuihin määräyksiin ja suosituksiin. Tuloksista huomattiin, että tasasuuntaajien

yliaaltovirrat summautuivat syöttävässä keskuksessa sekä vaimenivat osittain verkon osissa. Vaimeneminen tarkoittaa virtojen kulkua muiden kuormien kautta, mutta näiden virtojen osuus on merkityksetön muiden laitteiden toiminnalle ja kestoisuudelle. Yliaaltojännitteiden todettiin olevan standardin määräysten mukaisia, mutta yliaaltovirrat puolestaan ylittivät tietyllä yliaaltotaajuudella suositellut arvot huomattavasti. Tämä johtuu verkon jännitejäykkyudesta ja tällöin jänniteyliaaltoja ei pääse muodostumaan verkon pienissä impedansseissa. Muuntajan kuormituksen tarkasteluissa todettiin virtasärön olevan muuntajan alajännitekiskostossa yli standardin raja-arvon, jolloin yliaallot tulee ottaa huomioon muuntajan kuormituksen mitoituksessa. Muuntajan mittausten aikainen kuormitus oli kuitenkin alhainen ja muuntaja ei ollut ylikuormittunut.

Voimalaitoksen sähkösuodattimen tasasuuntaajia syöttävässä keskuksessa todettiin korkeita yliaaltovirtapitoisuuksia. Tässä työssä suositellaankin keskukseseen ulkoista suodatusta. Verkon sähkönlaatu yliaaltojen kannalta pystytään saamaan suositellulle tasolle vähentämällä suurimman yliaaltopitoisuuden yliaaltotaajuuden virtoja. Ilman suodatusta ei tämän työn perusteella kannata kytkeä muita kuormia tasasuuntaajia syöttävään keskukseseen tai sen rinnalle.

LÄHTEET

1. Anttila, I. & Saransaari, P. 1981. Katsaus sähköverkon yliaaltoihin ja niiden aiheuttamiin lisähäviöihin ja häiriöihin. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. Raportti 1 - 81.
2. Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.
3. EN 50464-3. Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2 500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV - Part 3: Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents. 2007. CENELEC.
4. Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Vantaa: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.
5. Keskustelut Turun seudun energiatuotanto Oy:n Naantalinvuonon voimalaitoksen kunnossapitohenkilökunnan kanssa. Kevät 2014.
6. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen. 1999. Helsinki: Sähköenergialiitto ry SENER. Julkaisusarja 1 / 99.
7. Mikkola, M. & Korpinen, L. 1996. Sähköverkossa esiintyvät yliaallot. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköenergiajärjestelmät. Raportti 13 - 96.
8. Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R. & Wilén, T. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.
9. Ruppala, E. 2001. Yliaallot. Sähkönsiirtotekniikan luentomoniste. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
10. SFS-EN 50160. Jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 2010. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki: SFS. SFS-käsikirja 600-2, Sähköasennukset. Osa 2: Säädökset, sähkötyöturvallisuus, erityisasennukset ja liittyvät standardit. s. 281-312.
11. SIR4 Operator's and Installation Manual. n.d. Alstom Power Thermal Services.
12. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. 2001. ABB Industry Oy.

LIITE 1

1 (20)

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste A, Muuntajan alajännitekiskosto K2		
Mittaus: Yliaallot - K2 virtarajoitus 500 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		395,6	396,3	395,7			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		568,0	577,0	570,1			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		2,3	2,3	2,3			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		13,4	13,3	13,3			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,0	0,0	0,0	1,6
		L2	100,0	0,0	0,0	0,0	1,7
		L3	100,0	0,1	0,0	0,0	1,7
		6	7	8	9	10	
		L1	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0
		L2	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0
		11	12	13	14	15	
		L1	0,7	0,0	0,4	0,0	0,1
		L2	0,7	0,0	0,4	0,0	0,0
		L3	0,7	0,0	0,4	0,0	0,1
		16	17	18	19	20	
		L1	0,0	0,5	0,0	0,3	0,0
		L2	0,0	0,5	0,0	0,3	0,0
		L3	0,0	0,5	0,0	0,3	0,0
		21	22	23	24	25	
		L1	0,1	0,0	0,4	0,0	0,4
		L2	0,0	0,0	0,4	0,0	0,3
		L3	0,1	0,0	0,5	0,0	0,4

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste A, Muuntajan alajännitekiskosto K2	
Mittaus: Yliaallot - K2 virtarajoitus 500 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta $I_h = I_n / I_1$	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,2	0,5	0,1	11,6
	L2	100,0	0,1	0,8	0,1	11,6
	L3	100,0	0,2	0,1	0,1	11,6
L2	6	7	8	9	10	
	L1	0,0	6,1	0,1	0,1	0,0
	L2	0,0	5,9	0,0	0,1	0,0
L3	L3	0,1	6,1	0,0	0,2	0,0
	11	12	13	14	15	
	L1	1,6	0,0	1,5	0,0	0,1
L2	L2	1,5	0,0	1,5	0,0	0,1
	L3	1,5	0,0	1,5	0,0	0,1
	16	17	18	19	20	
L1	L1	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0
	L2	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0
	L3	0,0	0,7	0,0	0,7	0,0
L2	21	22	23	24	25	
	L1	0,1	0,0	0,7	0,0	0,5
	L2	0,1	0,0	0,7	0,0	0,4
L3	L3	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste A, Muuntajan alajännitekiskosto K2		
Mittaus: Yliaallot - K2 1200 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		392,1	394,3	393,2			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		816,0	826,2	817,5			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		3,5	3,5	3,5			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		14,4	14,5	14,4			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,1	0,1	0,0	2,7
		L2	100,0	0,1	0,0	0,0	2,8
		L3	100,0	0,1	0,1	0,0	2,8
			6	7	8	9	10
		L1	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0
		L2	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	1,2	0,0	0,7	0,0	0,0
		L2	1,2	0,0	0,7	0,0	0,0
		L3	1,2	0,0	0,7	0,0	0,0
			16	17	18	19	20
		L1	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0
		L2	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0
		L3	0,0	0,8	0,0	0,7	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5
		L2	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
		L3	0,1	0,0	0,5	0,0	0,6

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste A, Muuntajan alajännitekiskosto K2	
Mittaus: Yliaallot - K2 1200 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/I1	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,1	0,5	0,1	13,5
	L2	100,0	0,1	0,7	0,1	13,5
	L3	100,0	0,1	0,1	0,1	13,5
L2	L1	6	7	8	9	10
	L2	0,1	3,9	0,0	0,2	0,0
	L3	0,1	3,9	0,0	0,1	0,0
L3	L1	0,1	3,9	0,0	0,1	0,0
	L2	0,1	3,9	0,0	0,1	0,0
	L3	0,1	3,9	0,0	0,1	0,0
L4	L1	11	12	13	14	15
	L2	2,5	0,0	1,3	0,0	0,1
	L3	2,4	0,0	1,3	0,0	0,0
L5	L1	2,4	0,0	1,3	0,0	0,0
	L2	2,4	0,0	1,3	0,0	0,0
	L3	2,4	0,0	1,3	0,0	0,0
L6	L1	16	17	18	19	20
	L2	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0
	L3	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0
L7	L1	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0
	L2	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0
	L3	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0
L8	L1	21	22	23	9	25
	L2	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5
	L3	0,1	0,0	0,6	0,0	0,4
L9	L1	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5
	L2	0,1	0,0	0,6	0,0	0,4
	L3	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste B, Sähkösuodattimen tasasuuntajien syöttäväkeskus K5.1		
Mittaus: Yliaallot - K5.1 virtarajoitus 500 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		394,0	395,0	393,8			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		155,2	149,1	164,2			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		3,4	3,4	3,6			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		57,5	58,0	56,1			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,0	0,1	0,0	2,5
		L2	100,0	0,0	0,0	0,0	2,5
		L3	100,0	0,0	0,1	0,0	2,6
			6	7	8	9	10
		L1	0,0	1,6	0,0	0,1	0,0
		L2	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	0,9	0,0	0,6	0,0	0,1
		L2	0,9	0,0	0,6	0,0	0,0
		L3	1,0	0,0	0,6	0,0	0,1
			16	17	18	19	20
		L1	0,0	0,6	0,0	0,5	0,0
		L2	0,0	0,7	0,0	0,4	0,0
		L3	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,1	0,0	0,5	0,0	0,4
		L2	0,0	0,0	0,6	0,0	0,4
		L3	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste B, Sähkösuodattimen tasasuuntajien syöttäväkeskus K5.1	
Mittaus: Yliaallot - K5.1 virtarajoitus 500 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/I1	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,4	2,7	0,4	50,3
	L2	100,0	0,4	2,5	0,4	51,0
	L3	100,0	0,4	1,1	0,3	49,3
L2	L1	6	7	8	9	10
	L2	0,3	25,8	0,1	0,4	0,1
	L3	0,7	25,3	0,1	0,3	0,1
L3	L1	0,7	24,5	0,1	0,3	0,1
	L2	11	12	13	14	15
	L3	6,9	0,1	5,6	0,1	0,1
L4	L1	6,8	0,1	5,3	0,1	0,1
	L2	6,4	0,1	5,3	0,1	0,2
	L3	16	17	18	19	20
L5	L1	0,1	3,3	0,1	2,3	0,1
	L2	0,1	3,5	0,1	2,1	0,1
	L3	0,1	3,0	0,1	2,2	0,1
L6	L1	21	22	23	24	25
	L2	0,2	0,1	2,2	0,1	1,3
	L3	0,2	0,1	2,5	0,1	1,2
L7	L1	0,2	0,1	2,1	0,1	1,4
	L2					
	L3					

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste B, Sähkösuodattimen tasasuuntajien syöttäväkeskus K5.1		
Mittaus: Yliaallot - K5.1 1200 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		389,6	391,0	389,5			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		396,1	380,9	417,9			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		5,4	5,4	5,6			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		35,8	36,5	35,3			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,0	0,1	0,0	4,3
		L2	100,0	0,0	0,1	0,0	4,4
		L3	100,0	0,0	0,1	0,0	4,5
			6	7	8	9	10
		L1	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0
		L2	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	1,7	0,0	1,0	0,0	0,0
		L2	1,7	0,0	1,0	0,0	0,0
		L3	1,8	0,0	1,1	0,0	0,0
			16	17	18	19	20
		L1	0,0	1,1	0,0	0,9	0,0
		L2	0,0	1,1	0,0	0,9	0,0
		L3	0,0	1,1	0,1	1,0	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7
		L2	0,0	0,0	0,7	0,0	0,6
		L3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste B, Sähkösuodattimen tasasuuntajien syöttäväkeskus K5.1	
Mittaus: Yliaallot - K5.1 1200 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/I1	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,8	1,5	0,1	33,7
	L2	100,0	0,7	1,5	0,1	34,4
	L3	100,0	0,7	0,4	0,1	33,3
		6	7	8	9	10
L1	L1	0,2	9,6	0,0	0,3	0,1
	L2	0,1	9,4	0,1	0,2	0,1
	L3	0,1	9,0	0,0	0,1	0,0
		11	12	13	14	15
L1	L1	5,9	0,1	3,2	0,0	0,2
	L2	5,9	0,1	3,2	0,0	0,1
	L3	5,8	0,1	2,9	0,0	0,1
		16	17	18	19	20
L1	L1	0,0	2,2	0,0	2,0	0,1
	L2	0,1	2,1	0,0	2,0	0,1
	L3	0,0	2,1	0,0	1,9	0,0
		21	22	23	24	25
L1	L1	0,2	0,0	1,1	0,1	1,2
	L2	0,1	0,0	1,0	0,0	1,2
	L3	0,1	0,0	1,0	0,0	1,0

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste C, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 1		
Mittaus: Yliaallot - 3NQ10N001 virtarajoitus 500 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		392,0	393,0	391,8			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		48,7	48,5	50,0			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		3,6	3,6	3,8			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		58,3	57,4	57,2			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,1	0,1	0,0	2,6
		L2	100,0	0,1	0,0	0,0	2,7
		L3	100,0	0,0	0,1	0,0	2,7
			6	7	8	9	10
		L1	0,0	1,7	0,0	0,1	0,0
		L2	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	0,9	0,0	0,7	0,0	0,1
		L2	1,0	0,0	0,7	0,0	0,0
		L3	1,0	0,0	0,7	0,0	0,0
			16	17	18	19	20
		L1	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0
		L2	0,0	0,7	0,0	0,4	0,0
		L3	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,1	0,0	0,5	0,0	0,4
		L2	0,0	0,0	0,6	0,0	0,4
		L3	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		2/2
Kohde:	Piste C, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 1	
Mittaus:	Yliaallot - 3NQ10N001 virtarajoitus 500 mA	
Päiväys:	23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt:	Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta $I_h = I_n / I_1$	Ih [%]	1	2	3	4	5
		L1	100,0	0,4	3,6	0,4
	L2	100,0	0,4	2,7	0,3	49,9
	L3	100,0	0,4	1,2	0,3	50,2
		6	7	8	9	10
	L1	0,1	25,7	0,2	0,3	0,1
	L2	0,1	25,3	0,3	0,5	0,1
	L3	0,1	24,9	0,1	0,4	0,1
		11	12	13	14	15
	L1	7,0	0,1	5,6	0,1	0,2
	L2	6,6	0,1	5,4	0,1	0,2
	L3	6,5	0,1	5,5	0,1	0,2
		16	17	18	19	20
	L1	0,1	3,3	0,1	2,3	2,4
	L2	0,1	3,2	0,1	2,4	0,1
	L3	0,1	2,9	0,1	2,2	0,1
		21	22	23	24	25
	L1	0,2	0,1	2,2	0,1	1,4
	L2	0,2	0,2	2,4	0,1	1,2
	L3	0,2	0,1	2,0	0,1	1,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste C, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 1		
Mittaus: Yliaallot - 3NQ10N001 1200 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		386,9	388,5	386,8			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		130,5	129,5	132,9			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		5,8	5,8	6,1			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		35,5	35,0	35,8			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,1	0,1	0,0	4,6
		L2	100,0	0,1	0,0	0,0	4,7
		L3	100,0	0,1	0,1	0,0	4,9
			6	7	8	9	10
		L1	0,1	1,6	0,0	0,1	0,0
		L2	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	1,9	0,0	1,1	0,0	0,0
		L2	1,8	0,0	1,1	0,0	0,0
		L3	1,9	0,0	1,2	0,0	0,0
			16	17	18	19	20
		L1	0,0	1,2	0,0	1,0	0,0
		L2	0,0	1,2	0,0	1,0	0,0
		L3	0,0	1,2	0,0	1,1	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,0	0,0	0,8	0,0	0,7
		L2	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7
		L3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,8

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste C, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 1	
Mittaus: Yliaallot - 3NQ10N001 1200 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/I1	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,1	2,1	0,2	33,3
	L2	100,0	0,1	1,7	0,2	32,9
	L3	100,0	0,2	0,6	0,3	33,7
		6	7	8	9	10
L1	L1	0,1	9,2	0,1	0,1	0,1
	L2	0,1	9,2	0,1	0,2	0,1
	L3	0,0	9,0	0,1	0,2	0,1
		11	12	13	14	15
L1	L1	5,9	0,0	3,1	0,1	0,1
	L2	5,8	0,1	3,2	0,0	0,1
	L3	5,8	0,0	3,0	0,0	0,0
		16	17	18	19	20
L1	L1	0,1	2,2	0,0	1,9	0,1
	L2	0,1	2,0	0,0	2,0	0,1
	L3	0,0	2,1	0,1	1,9	0,0
		21	22	23	24	25
L1	L1	0,1	0,0	1,1	0,0	1,1
	L2	0,1	0,0	1,0	0,0	1,2
	L3	0,0	0,0	1,1	0,0	1,0

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste D, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 2		
Mittaus: Yliaallot - 3NQ20N001 virtarajoitus 500 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		392,0	393,1	392,0			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		53,1	53,5	54,7			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		3,6	3,6	3,8			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		55,8	57,3	55,9			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,1	0,1	0,0	2,6
		L2	100,0	0,1	0,0	0,0	2,7
		L3	100,0	0,1	0,1	0,0	2,8
			6	7	8	9	10
		L1	0,0	1,7	0,0	0,1	0,0
		L2	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,7	0,0	0,1	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	0,9	0,0	0,7	0,0	0,1
		L2	1,0	0,0	0,7	0,0	0,0
		L3	1,0	0,0	0,7	0,0	0,0
			16	17	18	19	20
		L1	0,1	0,6	0,0	0,5	0,0
		L2	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0
		L3	0,0	0,7	0,0	0,5	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,1	0,0	0,5	0,0	0,4
		L2	0,0	0,0	0,6	0,0	0,4
		L3	0,1	0,0	0,6	0,0	0,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste D, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 2	
Mittaus: Yliaallot - 3NQ20N001 virtarajoitus 500 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/I1	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,3	2,9	0,2	48,6
	L2	100,0	0,3	3,5	0,3	50,7
	L3	100,0	0,4	0,8	0,3	49,6
L2	6	7	8	9	10	
	L1	0,2	25,4	0,1	0,4	0,1
	L2	0,1	24,5	0,2	0,2	0,1
L3	L3	0,1	23,9	0,1	0,3	0,1
	11	12	13	14	15	
	L1	6,6	0,1	5,6	0,2	0,2
L4	L2	6,8	0,2	5,1	0,1	0,1
	L3	6,5	0,2	5,2	0,2	0,2
	16	17	18	19	20	
L5	L1	0,1	3,1	0,1	2,3	0,1
	L2	0,1	3,3	0,1	2,1	0,1
	L3	0,1	3,0	0,1	2,2	0,1
L6	21	22	23	24	25	
	L1	0,2	0,1	2,0	0,1	1,4
	L2	0,1	0,1	2,3	0,1	1,2
L7	L3	0,2	0,1	2,1	0,1	1,3

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde:	Piste D, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 2	
Mittaus:	Yliaallot - 3NQ20N001 1200 mA	
Päiväys:	23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt:	Kli	Kommentit:

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		386,6	387,5	386,3			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		132,5	133,4	135,2			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		5,6	5,7	6,0			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		35,0	36,0	36,0			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,1	0,2	0,0	4,5
		L2	100,0	0,1	0,1	0,0	4,6
		L3	100,0	0,1	0,1	0,1	4,8
			6	7	8	9	10
		L1	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
		L2	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	1,8	0,0	1,1	0,0	0,0
		L2	1,8	0,0	1,1	0,0	0,0
		L3	1,9	0,0	1,2	0,0	0,0
			16	17	18	19	20
		L1	0,0	1,2	0,0	1,0	0,0
		L2	0,0	1,2	0,0	1,0	0,0
		L3	0,0	1,2	0,0	1,1	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,0	0,0	0,8	0,0	0,7
		L2	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7
		L3	0,0	0,0	0,8	0,0	0,8

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste D, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 2	
Mittaus: Yliaallot - 3NQ20N001 1200 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/I1	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,2	1,7	0,1	32,9
	L2	100,0	0,1	2,3	0,1	34,5
	L3	100,0	0,1	0,7	0,1	33,9
L2	L1	6	7	8	9	10
	L2	0,1	9,5	0,0	0,3	0,0
	L3	0,1	9,2	0,0	0,1	0,0
L3	L1	0,1	8,9	0,1	0,2	0,0
	L2	11	12	13	14	15
	L3	5,7	0,0	3,2	0,0	0,2
L4	L1	5,9	0,1	3,1	0,0	0,1
	L2	5,9	0,0	2,9	0,1	0,1
	L3	16	17	18	19	20
L5	L1	0,0	2,1	0,1	2,0	0,1
	L2	0,1	2,1	0,1	2,0	0,0
	L3	0,1	2,2	0,0	1,9	0,0
L6	L1	21	22	23	24	25
	L2	0,2	0,0	1,0	0,0	1,2
	L3	0,1	0,0	1,0	0,0	1,2
L7	L1	0,1	0,0	1,1	0,0	1,0
	L2					
	L3					

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde: Piste E, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 3		
Mittaus: Yliaallot - 3NQ30N001 virtarajoitus 500 mA		
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II	
Tehnyt: Kli	Kommentit:	

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31		
		391,9	393,0	392,0		
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3		
		51,5	51,4	53,1		
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31		
		3,5	3,6	3,8		
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3		
		59,1	58,4	56,4		
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5
		L1	100,0	0,0	0,1	0,0
		L2	100,0	0,1	0,0	2,7
		L3	100,0	0,0	0,1	2,7
		6	7	8	9	10
		L1	0,0	1,7	0,0	0,1
		L2	0,0	1,7	0,0	0,0
		L3	0,0	1,8	0,0	0,0
		11	12	13	14	15
		L1	0,9	0,0	0,6	0,1
		L2	1,0	0,0	0,6	0,0
		L3	1,0	0,0	0,7	0,0
		16	17	18	19	20
		L1	0,0	0,6	0,0	0,5
		L2	0,0	0,7	0,0	0,4
		L3	0,0	0,7	0,0	0,5
		21	22	23	24	25
		L1	0,1	0,0	0,5	0,4
		L2	0,0	0,0	0,6	0,4
		L3	0,1	0,0	0,6	0,5

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste E, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 3	
Mittaus: Yliaallot - 3NQ30N001 virtarajoitus 500 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/I1	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,4	2,1	0,2	51,7
	L2	100,0	0,4	2,1	0,3	51,1
	L3	100,0	0,3	2,0	0,2	49,3
L2	6	7	8	9	10	
	L1	0,1	26,3	0,1	0,7	0,1
	L2	0,3	25,8	0,1	0,6	0,1
L3	L3	0,2	25,4	0,1	0,2	0,1
	11	12	13	14	15	
	L1	7,0	0,2	5,7	0,1	0,1
L2	L2	6,8	0,1	5,4	0,2	0,1
	L3	6,2	0,1	5,6	0,2	0,1
	16	17	18	19	20	
L1	L1	0,1	3,3	0,1	2,4	0,1
	L2	0,1	3,4	0,1	2,1	0,1
	L3	0,1	2,8	0,1	2,4	0,1
L2	21	22	23	24	25	
	L1	0,2	0,1	2,1	0,1	1,3
	L2	0,2	0,1	2,4	0,1	1,2
L3	L3	0,1	0,1	1,9	0,1	1,4

MITTAUSPÖYTÄKIRJA		1/2
Kohde:	Piste E, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 3	
Mittaus:	Yliaallot - 3NQ30N001 1200 mA	
Päiväys:	23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt:	Kli	Kommentit:

Perustaajuisen jännitteen tehollisarvo	U1 [V]	L12	L23	L31			
		386,6	388,0	386,3			
Perustaajuisen virran tehollisarvo	I1 [A]	L1	L2	L3			
		132,2	131,8	134,9			
Jännitteen kokonaissärö (Yliaaltojännitteen komponentit 40 saakka)	U THD-F [%]	L12	L23	L31			
		5,8	5,8	6,1			
Virran kokonaissärö (Yliaaltovirran komponentit 40 saakka)	I THD-F [%]	L1	L2	L3			
		36,8	36,7	35,2			
Suhteellinen jännite Uh=Un/U1	Uh [%]	1	2	3	4	5	
		L1	100,0	0,1	0,1	0,0	4,6
		L2	100,0	0,1	0,1	0,0	4,7
		L3	100,0	0,1	0,1	0,0	4,8
			6	7	8	9	10
		L1	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
		L2	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
		L3	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
			11	12	13	14	15
		L1	1,8	0,0	1,1	0,0	0,0
		L2	1,8	0,0	1,1	0,0	0,0
		L3	1,8	0,0	1,2	0,0	0,0
			16	17	18	19	20
		L1	0,0	1,2	0,0	1,0	0,0
		L2	0,0	1,1	0,0	1,0	0,0
		L3	0,0	1,2	0,0	1,1	0,0
			21	22	23	24	25
		L1	0,0	0,0	0,8	0,0	0,7
		L2	0,0	0,0	0,7	0,0	0,7
		L3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,8

MITTAUSPÖYTÄKIRJA	2/2
Kohde: Piste E, Sähkösuodattimen tasasuuntaja lohko 3	
Mittaus: Yliaallot - 3NQ30N001 1200 mA	
Päiväys: 23.4.2014	Mittalaite: Fluke 434 II
Tehnyt: Kli	Kommentit:

Suhteellinen virta Ih=In/11	Ih [%]	1	2	3	4	5
L1	L1	100,0	0,2	1,1	0,1	34,6
	L2	100,0	0,2	1,3	0,2	34,5
	L3	100,0	0,2	1,2	0,2	33,1
L2	6	7	8	9	10	
	L1	0,1	9,7	0,1	0,4	0,0
	L2	0,1	9,6	0,1	0,4	0,0
L3	L3	0,1	9,3	0,1	0,0	0,0
	11	12	13	14	15	
	L1	6,0	0,0	3,1	0,0	0,2
L2	L2	5,9	0,0	3,2	0,0	0,2
	L3	5,7	0,1	3,0	0,0	0,1
	16	17	18	19	20	
L3	L1	0,1	2,3	0,1	1,9	0,0
	L2	0,1	2,1	0,1	2,0	0,0
	L3	0,1	2,1	0,1	1,9	0,0
L1	21	22	23	24	25	
	L1	0,2	0,0	1,1	0,1	1,1
	L2	0,2	0,1	1,0	0,1	1,2
L2	L3	0,1	0,0	1,0	0,0	1,1