

Yliaaltohäiriöt konesaliympäristössä

Pontus Steffansson

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen
Utbildningsprogrammet för automationsteknik och IT
Raseborg 2016



OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Pontus Steffansson

Koulutusohjelma ja paikkakunta: Automaatio ja IT, Raasepori

Suuntautumisvaihtoehto: Sähkösuunnittelu

Ohjaajat: Sami Söderström (Granlund Oy), Kim Roos (Ammattikorkeakoulu Novia)

Nimike: Yliaaltohäiriöt konesaliympäristössä

Päivämäärä 8.4.2016 Sivumäärä 30 Liitteet 6

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia konesalissa esiintyviä yliaaltoja, selvittää mistä yliaallot muodostuvat, mitkä ovat niiden haitat ja miten niitä voidaan torjua. Työssä perehdytään aluksi kirjallisuuden avulla konesalin rakenteeseen ja siihen, mitä sähkönjärjestelmiä konesalitoiminta edellyttää. Näiden tietojen avulla saadaan käsitys siitä, mistä järjestelmistä yliaallot voivat muodostua sekä mihin järjestelmiin ne voivat tuottaa ongelmia.

Konesalien rakenteen jälkeen perehdytään yliaaltoihin kirjallisuuden sekä yliaaltoteorian avulla. Työssä selvitetään, mitä yliaalto on, miten ne muodostuvat, mitkä ovat niiden haittavaikutukset sekä miten niistä pääsee eroon.

Opinnäytetyössä suoritettiin kaksi sähkönlaatumittausta kahdessa erikokoisessa konesalissa. Mittaukset suoritettiin HIOKI 3196 -tehoanalysaattorilla. Mittaustulokset jännitteen osalta täyttivät SFS-EN 50160 -sähkönlaatustandardin asettamat rajat konesalissa 1 mutta konesalissa 2 ylitettiin standardin asettamat rajat yksittäisen yliaallon kohdalla.

Mittaustuloksia analysoitaessa huomattiin, että yliaaltovirtoja oli konesaleissa runsaasti. Yliaaltovirroille ei ole laadittu standardeja, ainoastaan suosituksia ja nämä ylitettiin molemmissa konesaleissa.

Kieli: Suomi

Avainsanat: Konesali, Yliaalto, Sähkönlaadunmittaus

EXAMENSARBETE

Författare: Pontus Steffansson

Utbildningsprogram och ort: Automationsteknik och IT, Raseborg

Inriktningsalternativ: El-planering

Handledare: Sami Söderström (Granlund Oy), Kim Roos (Yrkeshögskolan Novia)

Titel: Övertonsstörningar i datacenteromgivning

Datum 8.4.2016 Sidantal 30 Bilagor 6

Abstrakt

Examensarbetets syfte är att ta reda på övertonernas uppkomst i datacenter, vilka är övertonernas källor, vad kan de göra för skada samt hur kan man bekämpa övertoner. I början av arbetet bekantar man sig med hjälp av litteratur hur datacenter är uppbyggda samt vilka eldrivna anläggningar som behövs för att driva ett datacenter. Med hjälp av den här informationen får man en överblick över vilka anläggningar/apparater det kan vara som åstadkommer övertoner samt vad som kan ta skada av för mycket övertonsstörningar i nätet.

Efter att vi bekantat oss med datacenter fördjupar vi oss, med hjälp av litteratur samt teori, i övertoner. Vad är en överton, hur bildas övertoner, vad kan de åstadkomma för problem samt hur man kan bekämpa dem.

I examensarbetet utfördes två mätningar på elnätets kvalitet vid två olika stora datacenter. Mätningarna gjordes med hjälp av HIOKI -3196 elförsörjningsanalysator. Mätresultaten för spänningens del hölls inom SFS-EN 50160 standardens ramar i datacentret 1. I datacenter 2 överskreds standardens gräns för enskilda övertoner.

Under analysen av mätresultaten märktes det att det förekommer en stor del strömövertoner i datacenters elnät. För strömövertoner finns det ingen standard som för spänningsövertoner utan det finns endast rekommendationer. De här rekommendationerna överskreds i de båda datacentren.

Språk: Finska

Nyckelord: Datacenter, Övertton, El kvalitetsmätning

BACHELOR'S THESIS

Author: Pontus Steffansson

Degree Programme: Automation Engineering and IT

Specialization: Electrical Engineering

Supervisors: Sami Söderström (Granlund Oy), Kim Roos (Novia University of Applied Sciences)

Title: Harmonic Disturbance in a Data Center Environment

Date 8.4.2016

Appendices 6

Number of pages 30

Summary

The aim of this final project is to study the harmonics in data centers, how they are produced, what harm they can do and how one can get rid of them. In the first section of this thesis data centers are examined, how they are built and what electrical systems are needed. With that knowledge we can get an overview of which systems can cause the harmonics and which systems are the most vulnerable to harmonics. After this harmonics are studied, how they are produced and how they can be removed from the electrical system.

In this thesis two measurements of the quality of the electricity grid in two different sized data centers were performed. The measurements were performed with the HIOKI 3196 power quality analyzer. The results of the measurements of voltage stayed within the SFS-EN 50160 standard limits at data center 1. At data center 2 the harmonics exceeded the individual voltage harmonic limits.

As the measurements were analysed a substantial amount of current harmonics were noticed in the data center's electricity. For the current harmonics there is no standard to go by only recommendations. Both data centers exceeded these recommendations.

Language: Finnish Key words: Data center, Harmonics, Electric quality measurement

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
2	Konesalit.....	2
3	Konesalin rakenne.....	3
3.1	Muuntaja.....	4
3.2	Konesalin sähkönjakelu.....	5
3.3	Varavoimakone	6
3.4	UPS-Järjestelmät.....	6
3.4.1	Staattiset UPS-laitteet.....	6
3.4.2	Dynaaminen UPS-laite.....	8
3.4.3	CPS-laite	9
4	Yliaalto.....	10
4.1	Harmoninen yliaaltojännite ja yliaaltovirta.....	13
4.2	Yliaaltojen haittavaikutukset.....	15
4.3	Yliaaltojen torjunta	16
4.3.1	Yksivaiheiset passiiviset suodattimet.....	17
4.3.2	Kolmivaiheiset passiiviset suodattimet.....	18
4.3.3	Aktiivisuodatin	18
5	Yliaaltojen esiintyminen konesaliympäristössä	18
5.1	Konesalien sähkönlaadun mittaus.....	19
5.2	Mittauslaite	19
5.3	Mittaustulokset konesali 1:ssä	21
5.3.1	Jänniteyliaallot.....	22
5.3.2	Virtayliaallot	23
5.4	Mittaustulokset konesali 2:ssa	23
5.4.1	Jänniteyliaallot.....	25
5.4.2	Virtayliaallot	26
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	27
	Lähdeluettelo.....	29

- LIITE 2.** Konesali 1. Vaiheiden sekä nollajohtimen yksittäisten jännitteiden sekä virtojen yliaaltopitoisuudet.
- LIITE 3.** Konesali 1. Jännitteiden ja virtojen aaltomuodot.
- LIITE 4.** Konesali 2. Mittaustulokset.
- LIITE 5.** Konesali 2. Vaiheiden sekä nollajohtimen yksittäisten jännitteiden sekä virtojen yliaaltopitoisuudet.
- LIITE 6.** Konesali 2. Jännitteiden ja virtojen aaltomuodot.

1 Johdanto

Konesalien tarve kasvaa koko ajan tieto- ja viestintäteknologia-alan kovan kasvun rinnalla. Tiedostoja tallennetaan ja katsellaan yhä enemmän verkon kautta, mikä vaatii tallennusjärjestelmiä sekä tietoliikennettä ohjaavia laitteita. Nämä laitteet tarvitsevat fyysisen tilan, joita kutsutaan konesaleiksi.

Konesaleissa säilytettävät IT-laitteet sekä niiden toimintaan tarvittavat sähköjärjestelmät aiheuttavat häiriötä sähköverkkoon ja sähkölaatuun. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia konesaleissa muodostuvia yliaaltoja sekä niiden tuottamia haittavaikutuksia.

Opinnäytetyön aihe saatiin insinööritoimisto Granlund Oy:n data center -ryhmän ryhmäpäälliköltä Jari Innaselta. Aihe sai alkunsa kun eräässä Granlund Oy konesaliprojektissa oli ongelmia johdonsuojatkaisimien kuumenemisessä, jonka arveltiin johtuvan yliaalloista. Haluttiin tutkia yliaaltojen esiintymistä konesaliympäristössä hieman laajemmin.

Opinnäytetyö on jaettu kolmeen eri osaan. Ensimmäisessä osassa käydään läpi konesalin käyttötarkoitusta sekä toimintaan tarvittavia sähköjärjestelmiä ja niiden rakennetta. Toisessa osassa perehdytään yliaaltoihin. Työssä käydään läpi, mikä yliaalto on ja miten se muodostuu. Esitetään, mitkä sähköjärjestelmät tuottavat yliaaltoja ja mitkä järjestelmät vahingoittuvat eniten yliaalloista. Esitetään myös, miten voi poistaa tai pienentää yliaaltoja sähköverkossa. Kolmannessa osassa perehdytään konesaleissa muodostuviin yliaaltoihin sekä niiden haittavaikutuksiin. Tässä osassa tehdään myös kaksi sähkönlaatumittausta kahdessa erisuuruudessa konesalissa ja analysoidaan mittaustuloksia sekä esitetään jatkotoimenpiteitä.

Opinnäytetyön tavoite on saada näkemys konesalien tuottamista yliaaltohäiriöistä sekä oppia tekemään sähkönlaatumittauksia ja analysoimaan mittaustuloksia. Työn tuloksia voidaan hyödyntää suunniteltaessa uusia konesaleja, sekä laadittaessa selvityksiä yliaaltojen vähentämiseksi konesaleissa.

2 Konesalit

Tiedostojen käsittely verkossa ja tallennus pilvipalveluihin lisääntyvät koko ajan. Nämä digitaaliset tiedostot pitää tallentaa johonkin, ja se tapahtuu konesaleissa. Aina kun lataa videon, lähettää sähköpostia tai jakaa kuvan verkossa, on verkkoselain yhteydessä konesaliin. Verkon käytön kasvamisen ohessa tallennustila jää riittämättömäksi, mikä tarkoittaa sitä, että konesaleja tarvitaan koko ajan lisää.

”Koko ICT -alan markkina-arvo Suomessa oli vuonna 2010 noin 8,8 miljardia euroa. Konesalitoiminnan osuus tästä oli jo tuolloin noin 35 %, eli noin kolme miljardia euroa, joten konesaliliiketoimintaa voidaan hyvästä syystä pitää omana varteenotettavana teollisuudenalanaan.” (Motiva Oy, 2011)

Konesalilla tarkoitetaan tilaa missä säilytetään IT-laitteita, jotka koostuvat palvelimista, tallennusjärjestelmistä ja tietoliikennelaitteista. Isompia konesaleja kutsutaan myös data centereiksi ja pienempiä kutsutaan laiteloiksi. Konesaliin kuuluu myös IT-laitteiden vara- ja suojausjärjestelmät. (Motiva Oy, 2011)

Konesaliin pitää myös varata tilaa varavoima- ja UPS-laitteistoille, koska IT-laitteiden käyntikatkot voivat tuottaa paljon ongelmia palvelimien omistajille sekä käyttäjille. Palvelimien tuottama lämpö lämmittää konesalitilaa niin että tila täytyy olla varustettu tehokkaalla jäähdytysjärjestelmällä, mikä on iso energiansyöppö konesaleissa.

Suomessa on hyvät olosuhteet konesalien rakentamiseen. Suomen sähköverkko on luotettava ja sähköön hinta Euroopan hintoihin verrattuna suhteellisen edullinen. Suomen ilmasto on viileä ja mahdollistaa vapaajäähdytyksen, mikä säästää runsaasti energian kulutuksessa.

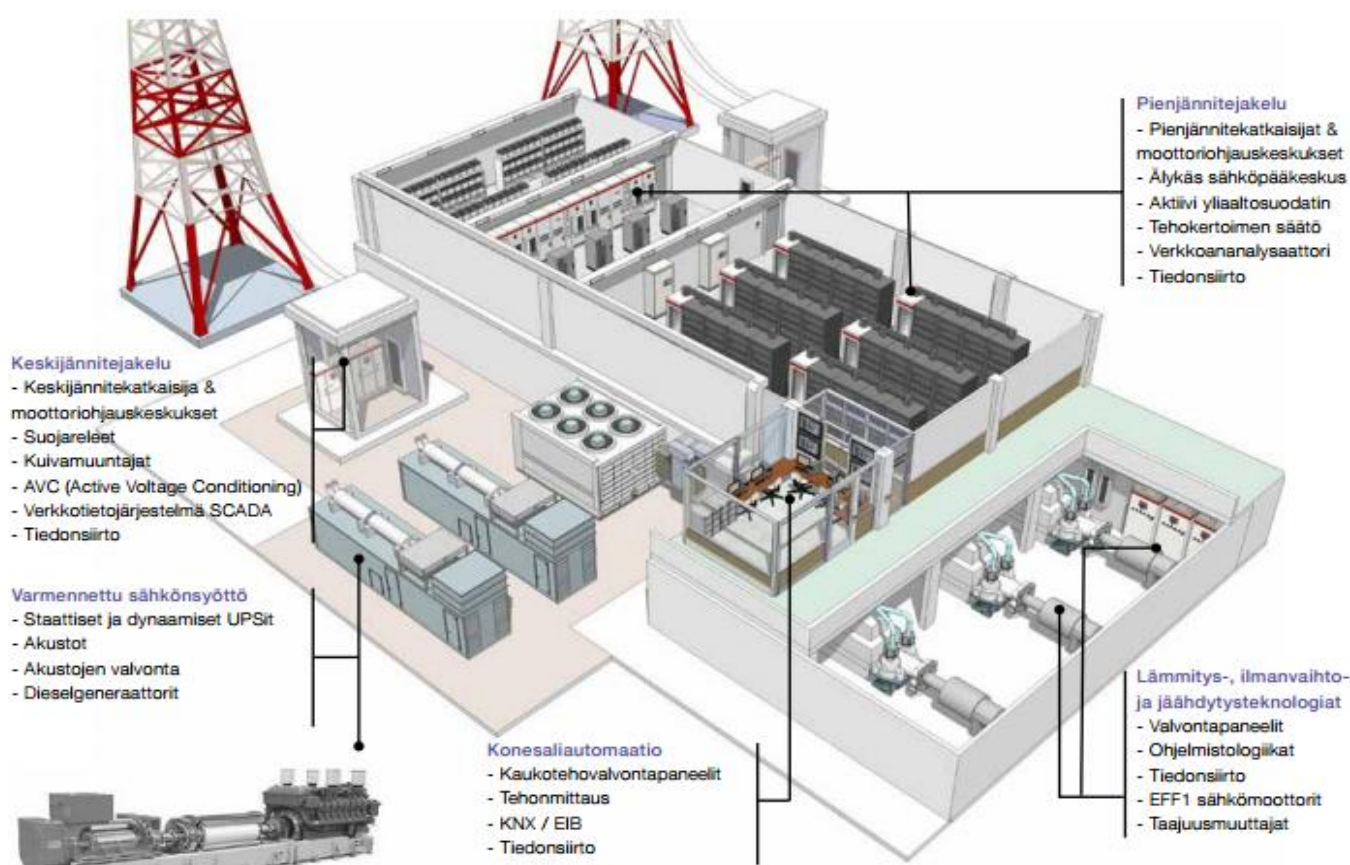
Suomeen on jo tullut isompiakin tieto- ja viestintäteknologia-alan nimiä, kuten Google, joka rakensi oman konesalin Haminaan, vanhaan paperitehtaaseen. Tämä konesali on yksi maailman energiatehokkaimmista konesaleista. Konesalien energiatehokkuutta mitataan PUE -mitta-asteikolla (*Power Utilization Effectiveness*). Luku saadaan jakamalla konesalin käyttämä kokonaissähköenergia IT-laitteiden käyttämällä sähköenergialla. Konesalin käyttämä kokonaissähköenergia sisältää IT-laitteiden, valaistuksen, jäähdytyksen ja muihin konesalin toimintoihin käytetyn sähköön. Ideaali konesali on PUE 1.0 jolloin kaikki energian käyttö menee IT-laitteistoon. Suurin osa konesaleista on PUE asteikolla 2.0 - 3.0. Haminaan rakennettu Googlen konesali on PUE asteikolla 1,14. Se on saanut näin

poikkeuksellisen alhainen PUE arvo johtuu siitä, että konesali käyttää jäähdytykseen merivettä Suomenlahdesta ja se säästää huomasti energiankulutuksessa. (Smalley, 2011)

3 Konesalin rakenne

Konesaliympäristö on iso kokonaisuus monista eri järjestelmistä. Konesalin sähkönjakelu pitää olla luotettava ja varmennettu koska pienikin sähkökatko merkitsee laitteiden sammumista ja uudelleen käynnistymistä. Tämä aiheuttaa käyttökatkon konesalitoimintaan. Kuvassa 1 näkyy konesalin periaate.

Konesalin suunnittelussa täytyy varata tilaa riittävälle jäähdytys-, varavoima- ja UPS-järjestelmälle. Konesaleissa säilytetään yleensä tiedostoja ja palvelimia, joihin kukaan ulkopuolinen ei saa päästä käsiksi. Siksi konesalin paloturvallisuuteen, kulunvalvontaan ja tietoturvallisuuteen pitää panostaa.



Kuva 1. Konesalin rakenne. (ABB, 2014)

3.1 Muuntaja

Konesaliin menevä sähkökuorma on vuorokauden ympäri suuri mikä asettaa isoja vaatimuksia muuntajaan. Muuntaja on mitoitettava oikein, jotta se ei ylikuormitu ja rikkoonnu. Konesaleihin joihin halutaan korkeampi tier taso, 3 tai 4, tarvitsevat sähköjakeluun toinenkin muuntajan varmennukseksi. (UptimeInstitute, 2014)

Jakelumuuntajia on olemassa öljyeristeisiä ja kuivaeristeisiä. Öljyeristeisiä muuntajia löytyy erillisellä paisuntasäiliöllä tai hermeettisesti suljettuna. Kuivamuuntajia voi valmistaa valuhartsieristeisenä tai ilmaeristeisenä. Pääosin niitä valmistetaan valuhartsieristeisenä koska ilmaeristeisen muuntajan ylijännitekestoisuus on pienempi. (Ylikulju, 2009)

Öljeristeinen muuntaja	Hartsieristeinen muuntaja
<ul style="list-style-type: none"> + Lämmönvaihtelun kesto + Ylikuorman sietokyky + Eliniästä kokemusta + Häviökustannukset + Muuntajan hinta + Globaalit ympäristövaikutukset 	<ul style="list-style-type: none"> + Itsestään sammuvuus + Lähes huoltovapaa + Öllyvahinko ei mahdollista + Korroosion kesto + Muuntajan sijoitus vapaampaa, koska palovaaraa ei ole
<ul style="list-style-type: none"> - Palokuorma - Öllyn kierrätys ei onnistu - Öllyvahingon mahdollisuus - Huolto - Öllyn keräysallas tarvitaan sisällä - Kiinteistömuuntamon rakennuskustannukset nousevat öljyn vuoksi 	<ul style="list-style-type: none"> - Sähkömagneettinen säteily - Melu suurempi - Eliniästä ei vielä kokemusta - Globaalit ympäristövaikutukset - Muuntajan hinta - Ylikuormitettavuus ilman tuuletinta - Ulkoasennuskoteloinnin hinta

Kuva 2. Öljeristeisen ja hartsieristeisen muuntajan vertailu. (Ylikulju, 2009)

Kuvassa 2 on vertailtu öljeristeistä muuntajaa valuhartsieristeiseen muuntajaan. Öljeristeisiä muuntajia on käytetty jo kauan ja ne ovat halvempia valmistaa mutta ne vaativat enemmän huoltoa. Hartsieristeinen muuntaja sen sijaan on lähes huoltovapaa ja paloturvallisempi. Tämä tarkoittaa että se sopii paremmin konesaliympäristöön koska sen voi sijoittaa lähemmäksi kuormaa ilman palovaaraa ja sen huoltotarve on hyvin pieni. Muuntajan vähäinen huolettavuus on konesalissa tärkeää. Muuntajan huolto voi olla hyvin hankala koska konesalin sähkönsyöttö ei saa katkea. Ja tämä voi vaatia isoja tilapäisiä varavoimajärjestelmiä.

3.2 Konesalin sähköjakelu

Konesaliympäristö muodostuu monista erillisistä sähköä vaativista järjestelmistä, jotka vaativat luotettavaa sähköjakelua. Konesalin sähköjakelun tärkeimmät osat ovat muuntaja, pääkeskus, tarvittavat ryhmä- sekä jakokeskukset. Korkeampi tier-luokituksen vaativat konesalit tarvitsevat myös toisen jakelumuuntajan varmistukseksi. Normaalin sähköjakelun lisäksi konesali tarvitsee myös varmennuksen sähkökatkon tapahtuessa, IT-laitteille sekä jäähdytyslaitteille. Varmennettu verkko muodostuu UPS-järjestelmästä sekä varavoimakoneesta.

3.3 Varavoimakone

Varavoimakoneena käytetään yleensä dieselmoottoria, joka generaattorin kautta tuottaa sähköä varmennettuun verkkoon. Varavoimakone on tarpeellinen osa konesaliympäristöä koska pitkäkestoisen sähkökatkoksen sattuessa, konesalin UPS-järjestelmät ovat riittämättömät. (Torri, 2008)

Konesalin suunnittelussa on otettava varavoimakone huomioon koska se on paljon tilaa vievä kone. Varavoimakone tarvitsee myös jäähdytystä ja mahdollisuuden pakokaasujen poistoon.

Varavoimakoneen mitoituksessa konesalissa on otettava huomioon UPS-järjestelmät. Mitoitus perustuu UPS-järjestelmän koon lisäksi järjestelmän tasasuuntaajan rakenteesta johtuvasta harmonisesta säröstä. (Källi, 2012)

3.4 UPS-Järjestelmät

UPS (Uninterruptable Power System) on keskeytymättömän tehon järjestelmä. Sitä käytetään kriittisissä järjestelmissä kuten konesaleissa missä sähkö katko ei saa vaikuttaa toimintaan. UPS-laitteiden toiminto perustuu vaihtosähköstä muuttaminen tasasähköksi ja tasasähkön muuttaminen vaihtosähköksi puolijohdin siltoja käyttäen. Sekä tarvitaan myös ohitustoiminto huolto ja vikatilanteita varten. (Sähkötieto ry, 2010)

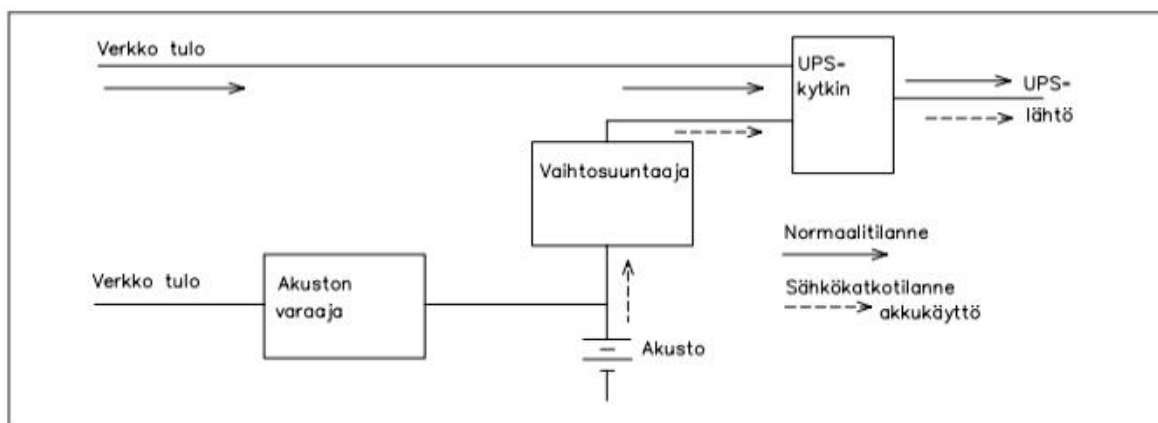
UPS-järjestelmät jakaantuvat kahteen eri luokkaan: dynaamiset ja staattiset. Staattiset UPS-laitteiden perustoiminnot ovat vaihtosähkön muuttaminen tasasähköksi ja tasasähkön muuttaminen vaihtosähköksi. Dynaamiset UPS-laitteet joiden perustana ovat samalle akselille kytketyt moottori-generaattoriyhdistelmät. (Sähkötieto ry, 2010)

UPS-laitteiden päätoiminto konesaleissa on syöttää kriittistä kuormaa niin kauan että muu varavoimajärjestelmä ehtii käynnistyä.

3.4.1 Staattiset UPS-laitteet

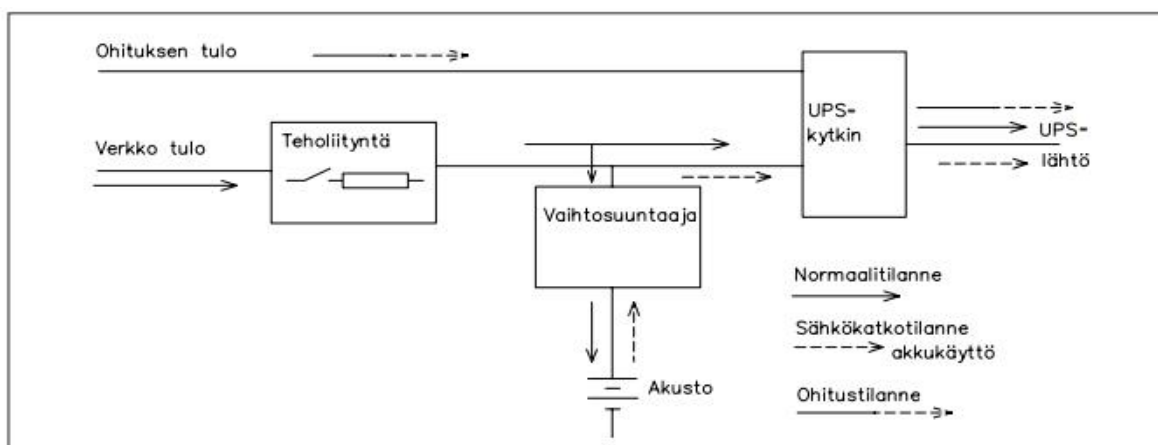
Staattisista UPS-laitteista löytyy erilaisia laiteratkaisuja ja -luokkia. Esimerkiksi Stand-by operation -laite jonka luokituskoodi on VFD (output Voltage and Frequency Dependant

from mains supply). Stand-by operation UPS-laitteet kutsutaan myös epävirallisesti “Off-Line UPS-laitteeksi”. Nämä laitteet ovat riippuvaisia syöttävän verkon taajuudesta ja jännitteestä. Off-Line UPS-laitteet syöttävät varmennettua verkkoa vain silloin kun verkkojännitteen arvot ovat vaihtelurajojen ulkopuolella. (Sähkötieto ry, 2010)



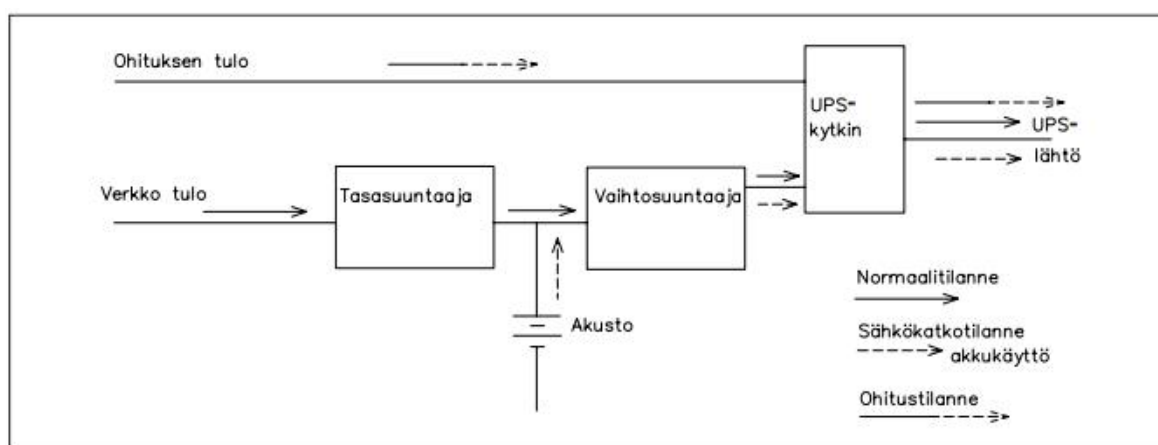
Kuva 3. Stand-by UPS-laitteiden rakenne. (Sähkötieto ry, 2010)

Toinen esimerkki on Line interactive operation –laite jonka luokituskoodi on VI (output Voltage Independant from mains supply). Nämä laitteet ovat riippuvaisia syöttävän verkon taajuudesta mutta riippumattomia verkon jännitevaihtelusta. Näitä laitteita kutsutaan epävirallisesti ”yhden muunnoksen UPS-laitteeksi” ja toiminta perustuu muuntajasiltaan, joka toimii rinnakkaissäätimenä syöttävän verkon rinnalla. Muuttajasilta toimii verkkokatkon aikana vaihtosuuntaajana ja verkon normaali tilassa tasasuuntaajana. (Sähkötieto ry, 2010)



Kuva 4. Line interactive UPS-laitteiden rakenne. (Sähkötieto ry, 2010)

Kolmas esimerkki staattisista UPS-laitteista on Double conversion –laite jonka luokituskoodi on VFI (output Voltage and Frequency Independent from mains supply). Nämä UPS-laitteet ovat riippumattomia verkon taajuus- ja jännitevaihteluista. Double conversion – laitteet jotka kutsutaan epävirallisesti ”On-line UPS-laitteiksi” käyttävät tasasuuntaajaa ja vaihtosuuntaajaa minkä läpi verkko syöttää kriittistä kuormaa. Verkkokatkon tapahtuessa akusto jatkaa kriittisen kuorman syöttämistä ilman katkoa. (Sähkötieto ry, 2010)



Kuva 5. Double conversion UPS-laitteiden rakenne. (Sähkötieto ry, 2010)

Konesalien IT – laitteisto ei siedä yhtään katkoa sähköverkossa. On-line UPS on siis paras ratkaisu staattisista UPS-laitteista koska sähkökatkon aikana On-line UPS-järjestelmä siirtyy suoraan akkukäyttöön ilman katkoa.

3.4.2 Dynaaminen UPS-laite

Dynaamisen UPS-laitteen perustana on samalle akselille kytketty moottori – generaattori yhdistelmä. Dynaaminen UPS-laite toimii niin että verkko syöttää moottoria joka pyörittää generaattoria joka tuottaa jännitettä kuormalle. Energiavarastona voidaan käyttää akustoa ja sen lisäksi myös huimamassaa, joka on kiinnitetty akseliin. (Sähkötieto ry, 2010)

Moottorigeneraattoriyhdistelmiä on monta erilaista.

- Moottori ja generaattori, riippumattomia toisistaan.
- Moottori ja generaattori, riippuvaisia toisistaan.

- Yhdistelmään on kytketty huimamassa jäykästi samalle akselille kun moottori ja generaattori.

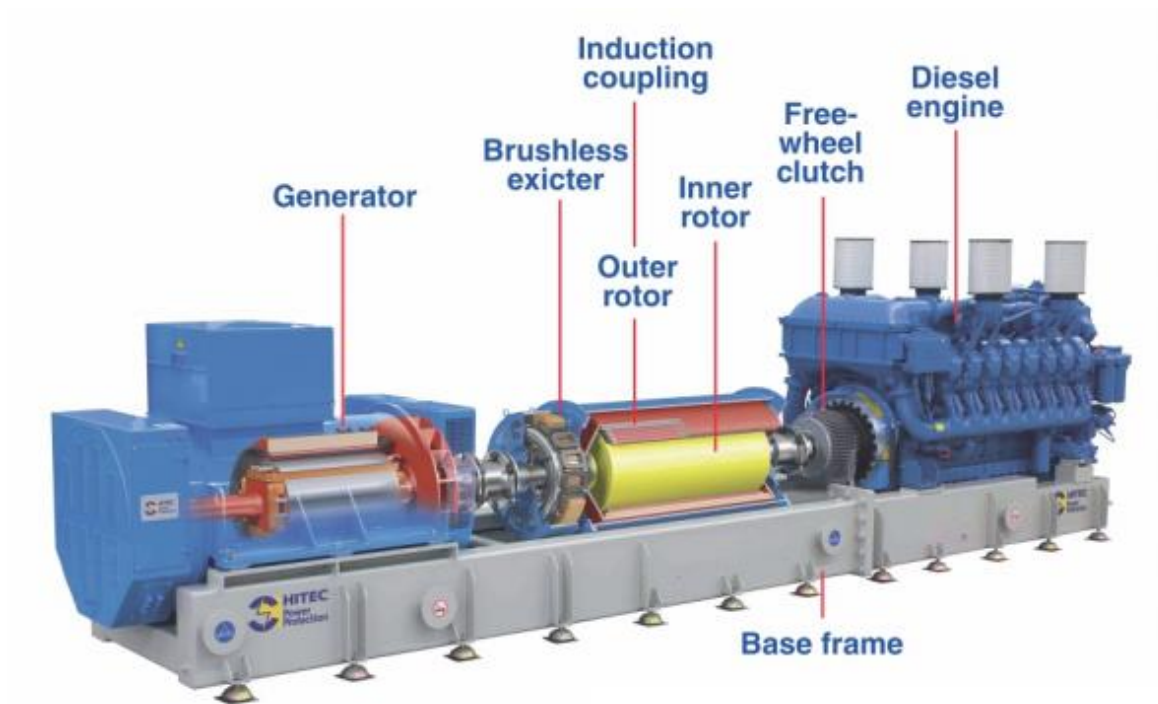
Dynaamisen ja staattisen UPS-järjestelmän yhdistelmä toimii niin että verkon normaalitilassa verkko syöttää vaihtovirtamoottoria ja verkkokatkon aikana akusto syöttää vaihtovirtamoottoria vaihtosuuntaajan kautta. (Sähkötieto ry, 2010)

Dynaaminen UPS-laitteisto tarvitsee varavoimakoneen toimiakseen luotettavasti sähkökatkoksen tapahtuessa. Huimamassa- ja akustoratkaisut eivät ole pitkäkestoisia mutta syöttävät kriittistä kuormaa niin kauan kunnes varavoimakone käynnistyy.

3.4.3 CPS-laite

CPS-laite (Continuous Power System) toimii kuin dynaaminen UPS-laite eli verkko syöttää moottoria joka pyörittää generaattoria joka tuottaa jännitettä kuormalle. Laite poistaa samalla verkossa olevat häiriöt ja syöttää kriittistä laitteistoa hyvänlaatuisella sähköllä. CPS-laitteessa on huimamassan, moottorin ja generaattorin lisäksi liitetty varavoimakone ja nämä muodostavat yhden laitteen.

Varavoimakone on kytketty kiinni vapaakytkimeen, joka mahdollistaa että varavoimakone voi verkon normaalitilassa olla pyörimättä. Vapaakytkimen jälkeen tulee huimamassa joka sähkökatkon tullessa kierrättää generaattoria kunnes varavoimakone on käynnistynyt ja saavuttanut samat kierrokset kun huimamassa. Varavoimakoneen saavuttua samoille kierroksille kuin huimamassa niin vapaakytkin kytkee varavoimakoneen syöttämään varmenettua verkkoa. (Hitachi Hi-Rel power electronics pvt. Ltd., ei pvm)



Kuva 6. CPS – järjestelmän rakenne. (Hitachi Hi-Rel power electronics pvt. Ltd., ei pvm)

4 Yliaalto

Tehoelektroniikan käyttö lisääntyy koko ajan. Tehoelektroniikan mukana tulee niiden sivuvaikutukset. Ikävimmät näistä ovat yliaallot jotka huonontavat verkon jännitettä ja virtaa. Muita yliaaltoja aiheuttavia laitteita ovat tasa- ja vaihtosuuntaajat, hakkuriteholähteet, energiasäästölamput, puolijohdekytkimet, tyristorisäätimet, UPS-laitteet, vikaantuneiden moottoreiden ja muuntajien magneettiipiirit. Yliaalloiksi kutsutaan verkon jännitteitä ja virtoja joiden taajuudet ylittävät normaali verkon taajuuden joka on 50 Hz (Suomessa). Yliaallot ovat useimmiten harmonisia, eli verkonnimellistaajuuden moninkertoja. Harmonisille yliaalloille on annettu järjestysluvut jotka perustuvat yliaallon taajuuteen jaettuna verkon normaalitaajuudella (50Hz). Eli 150 Hz harmoninen yliaalto jaettuna verkonnimellistaajuudella 50 Hz on 3. yliaalto. (Karonen, 2010)

Voidaan yleisesti määrittää, 3- vaihe verkossa, että yksivaiheiset kuormat muodostavat 3. yliaaltoja ja sen kerrannaisia. Symmetriset kolmevaiheiset kuormat muodostavat parittomia kolmella jaottomia harmonisia yliaaltoja esimerkiksi 5., 7., 11. yliaaltoja. Yleisimmät yliaallot sähkönjakeluverkossa ovat kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto. (Sähkötieto ry, 2014)

Yliaallot voivat aiheuttaa erilaisia vikoja ja häiriöitä. Yliaallon erilaisia haittoja:

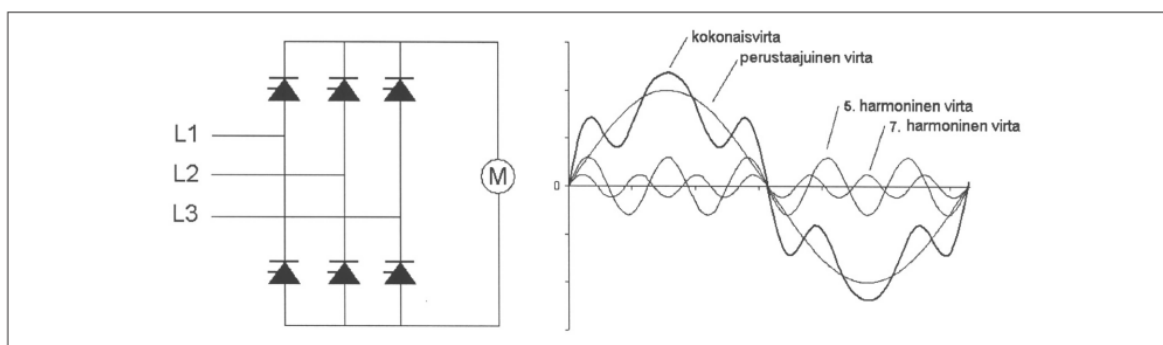
- Nollajohtimessa kulkee virta ja se voi ylikuormittua.
- Loistehonkompensointilaite voi ylikuormittua.
- Yliaaltoiset johtimet muodostavat magneettikentät ja voivat tuottaa häiriötä tiedonsiirrossa tele sekä ohjaus kaapeleissa.
- Muuntajien kuormitettavuus pienenee.
- Varavoimakoneen kuormitettavuus pienenee.
- Hyvää sähkönlaatua vaativat laitteet voivat toimia virheellisesti.
- Kaapelien kuormitettavuudet pienenevät.

Yliaallot voivat myös aiheuttaa verkkojännitteen säröytymistä. Jännitesärö tarkoittaa että vaihtojännitteen käyrämuoto säröytyy eikä ole sinimuotoinen niin kun puhtaassa vaihtojännitteessä. Jännitesärö voi aiheuttaa ongelmia laitteissa joilla on korkeat vaatimukset jännitteen laadusta. (Karonen, 2010)



Kuva 7. Esimerkki säröytyneen jännitteen käyrämuodosta. (Karonen, 2010)

Puolijohdintekniikalla toteutetut pulssisuuntaajat voivat aiheuttaa yliaaltoja verkkoon. Puolijohdinsuuntaajat käytetään muun muassa kotitalouselektronikkalaitteissa ja UPS-laitteissa. Tasasuuntaaja muodostaa verkkoon kolmella jaottomia parittomia yliaaltoja suuntaajan muodostama yliaaltojen periaate kuvassa 8. (Sähkötieto ry, 2014)



Kuva 8. Suuntaajan periaate ja kokonaisvirran vääristyminen. (Sähkötieto ry, 2014)

Tasasuuntaajien muodostamat yliaaltovirtojen järjestysluvut voi laskea teoreettisesti kaavalla (1).

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

Kaavassa k on kokonaisluku ja p on suuntaajan pulssiluku.

Tasasuuntaajan pulssiluvulla tarkoitetaan suuntaajan kehittämä jännitepulssien lukumäärä syöttävään vaihtojännitteen yhden jakson aikana. (Lindström, 2014)

Suuntaajan muodostama yliaaltovirtojen komponenttien teoreettiset tehollisarvot voi laskea seuraavalla kaavalla (2).

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (2)$$

Kaavassa I_1 on perusaallon tehollisarvo ja n yliaallon järjestysluku.

Taulukko 1. Kolmivaiheisen pulssisuuntaajan tyypilliset yliaaltopitoisuudet I_n/I_1 prosentteina.

Yliaallon järjestysluku	Teoreettinen 6-pulssisuuntaaja	Käytännön 6-pulssisuuntaaja	Käytännön 6-pulssisuuntaaja kuristinsuodattimella	Teoreettinen 12-pulssisuuntaaja	Käytännön 12-pulssisuuntaaja
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

(Lindström, 2014).

Taulukossa 1 näkee että pulssisuuntajan muodostamat yliaallot ovat käytännössä paljon suurempia kuin teorian avulla laskettuna. Taulukossa 1 näkee myös sen, mitä suurempi pulssiluku suuntaajalla on, niin sen pienempi on yliaaltojen muodostuminen. (Kimmo Lindström. 2014)

4.1 Harmoninen yliaaltojännite ja yliaaltovirta

Harmoninen yliaaltojännite on verkon normaalitaajuuden kokonaisia moninkertoja. Laskettaessa harmonista kokonaissäröä otetaan laskussa huomioon yliaallot 40. yliaaltoon asti. Harmonisen yliaaltojännitteen kokonaissärö (THD) lasketaan kaavalla (3).

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2} \quad (3)$$

Jossa U_h on yksittäisiä harmonisia yliaaltojännitteitä. ”Standardin SFS-EN 50160 mukaan viikon tarkastelujaksolla 95 % yksittäisten yliaaltojännitteiden 10 minuutin tehollisarvoista u_h tulee olla pienempiä tai yhtä suuria kuin taulukossa 2 annetut arvot. Lisäksi jakelujännitteen harmonisen kokonaissärön THD 10 minuutin tehollisarvon tulee olla 95 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %, kun huomioidaan kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka”. (Energiateollisuus, 2014)

Taulukko 2. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittämiskohdassa.

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku n	Suhteellinen jännite	Järjestysluku n	Suhteellinen jännite	Järjestysluku n	Suhteellinen jännite
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,50 %	4	1 %
11	3,50 %	15	0,50 %	6.....24	0,50 %
13	3 %	21	0,50 %		
17	2 %				
19	1,50 %				
23	1,50 %				
25	1,50 %				

(Energiateollisuus, 2014).

Yliaaltovirroille on muodostettu suositusarvoja liittämiskohdassa pienjänniteverkossa ja keskijänniteverkossa. Yliaaltovirtojen suositusrajat pienjänniteverkossa ja keskijänniteverkossa on annettu referenssivirtana. Sulakepohjaisella liittymällä referenssivirta on pääsulakkeen nimellisvirta ja tehopohjaisessa liittymässä lasketaan referenssivirta seuraavalla kaavalla (4). (Pesonen, 2012)

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3}U_n} \quad (4)$$

Kaavassa 4 P on liittymän sopimusteho ja U_n nimellisjännite. Alla olevasta taulukoista (Taulukko 3 ja 4) on liittymien yliaaltovirtojen suositusarvot

Taulukko 3. Suositusarvot harmonisille yliaaltovirroille pienjänniteverkossa.

Referenssivirta	Suositeltava raja	
25 A tai alle	Laitestandardien mukaiset laitteet	
Yli 25 A-200 A	Virran harmoninen kokonaissärö enintään 10% referenssivirrasta	
Yli 200 A	Virran THD enintään 8% referenssivirrasta, kuitenkin vähintään 20 A sallittu. Yksittäisten aaltojen osalta:	
	Järjsetysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta:
	< 11	7,0 %
	11...16	3,5 %
	17...22	2,5 %
	23...34	1,0 %
	>34	0,5 %

(Pesonen, 2012).

Taulukko 4. Suositusarvot harmonisille yliaaltovirroille keskijänniteverkossa.

Referenssivirta	Suositeltava raja	
Kaikki	Virran THD enintään 8% referenssivirrasta, kuitenkin vähintään 20 A sallittu. Yksittäisten aaltojen osalta:	
	Järjsetysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta:
	< 11	7,0 %
	11...16	3,5 %
	17...22	2,5 %
	23...34	1,0 %
	>34	0,5 %

(Pesonen, 2012)

4.2 Yliaaltojen haittavaikutukset

Nollajohtimeen muodostuva virta on 3. yliaallon suurin haittavaikutus. Ongelmana on se että vaihejohtimen poikkipinnan ollessa yli 16 mm² kuparia tai yli 25 mm² alumiinia niin sallitaan pienempi nollajohdin (puolet minimissään). Kolmella jaottomat yliaallot kuormittavat nollajohdinta, kuten perusaalto. Kolmella jaolliset yliaallot summautuvat nollajohtimeen mikä muodostaa ison virran nollajohtimeen. Yliaaltovirta nollajohtimessa voi kasvaa jopa 2-3-kertaiseksi vaihejohtimien virtaan verattuna. Tällöin nollajohdin voi ylikuormittua ja lämmetä, palovaaran riski suurenee sekä aiheuttaa johtimen eristeen nopean vanhentumisen. (Kontturi & Ålander, 2008)

Yliaallot lisäävät muuntajan häviöitä ja laskevat muuntajan kuormitettavuutta. Yliaaltoinen virta lisää virtahäviöitä muuntajan käämityksissä ja rautasydämessä. Jännitteen yliaallot lisäävät pyörrevirta- ja hystereesihäviöitä rautasydämessä. Muuntajan alenemakerroin voi laskea likimääräisesti seuraavalla menetelmällä. Lasketaan muuntaja kuormitettavuuden alenemakerroin THDF. THDF Tarkoittaa harmonisten yliaaltojen määrä suhteessa perustaajuiseen komponenttiin (5). (Ruppa, 2001)

$$THDF = \frac{\sqrt{2} \cdot \text{vaihevirran todellinen tehollisarvo}}{\text{vaihevirran huippuarvo}} \quad (5)$$

Vaihevirran todellinen tehollisarvo ja huippuarvo saadaan mittaamalla liittymiskohdalta. Jos muuntajan kuorma on puhdasta 50 Hz virtaa, sen näennäistehon voi laskea seuraavalla kaavalla (6).

$$S_1 = U_1 I_1 \quad (6)$$

Kaavassa (3) S_1 on perustaajuinen näennäisteho, I_1 on perustaajuinen virta ja U_1 on perustaajuinen jännite. Yliaaltojen muodostama alenemakerroin huomioidaan näennäistehoon seuraavalla tavalla (7).

$$S_2 = \frac{S_1}{THDF} \quad (7)$$

Näillä laskelmilla voi todeta miten paljon muuntajan kuormitettavuus yliaaltoisella virralla laskee. Jos verkossa on suuri yliaaltopitoisuus kannattaa muuntajan kuormitusta vähentää noin 20-30% sen nimellisestä, niin ettei muuntaja ylikuumentaisi.

Yliaaltoihin liittyvistä haitoista haitallisimmiä ilmiö on resonanssi. Resonanssi syntyy, kun kondensaattorin kapasitanssi ja verkon induktanssi muodostavat

rinnakkaisresonanssiin. Jos rinnakkaisresonanssiin aiheuttama resonanssitaajuus osuu samalle taajuudelle kuin verkossa oleva yliaalto niin tämä yliaalto voi vahvistua moninkertaiseksi. Resonanssitaajuuden järjestysluvun voi laskea seuraavalla kaavalla(8). (Sähkötieto ry, 2014)

$$n = \sqrt{\frac{S_{SC}}{Q_C}} \quad (8)$$

Kaavassa n on resonanssitaajuuden järjestysluku, S_{SC} on verkon oikosulkuteho (KVA) ja Q_C on kondensaattorin kompensointiteho (kvar). Resonanssin aiheuttama yliaaltoisen jännitteen vahvistuminen voi aiheuttaa voimakasta säröytymistä verkkojännitteeseen. Tämä voi aiheuttaa muuntajien ylikuormitusta, toimintahäiriöitä hyvän sähkönlaatua vaativiin laitteisiin ja suuntaajien virheellinen toiminta. Resonanssin muodostumiseen voi suojautua hankkimalla estokelapariestolla varustettu kompensointilaite mikä estää resonanssin muodostumista. (Ruppa, 2001)

4.3 Yliaaltojen torjunta

Yliaaltojen torjuntaan voi käyttää erilaisia kompensointilaitteita ja yliaaltosuodattimia. Paras vaihtoehto yliaaltojen torjunnassa on kuitenkin kartoittaa yliaaltojen lähteitä ja poistaa lähteet kokonaan. Jos kuitenkin yliaaltolähdettä ei löydy tai voida poistaa niin löytyy erilaisia kompensointilaitteita sekä suodattimia yliaaltojen pienentämiseksi.

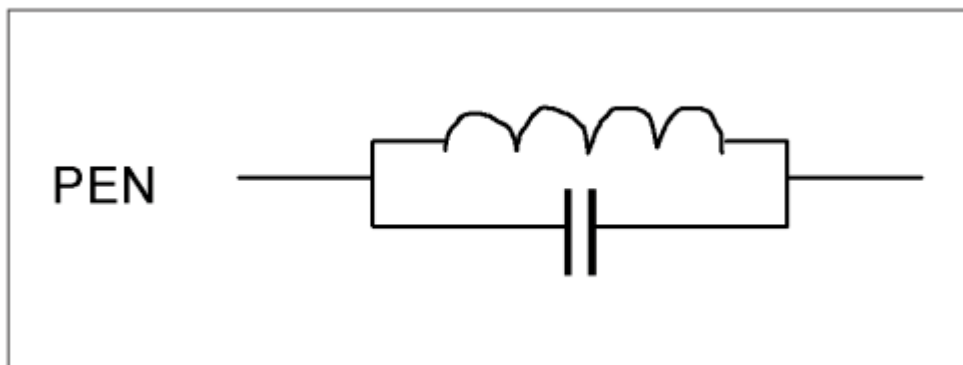
Jakeluverkossa, jossa on vähän yliaaltolähteitä, voidaan käyttää estokelapariestolla varustettu kompensointilaitetta yliaaltojen suodatukseen. Estokelaa mitoitetaan jakeluverkkoon niin, että valitaan induktanssin ja kapasitanssin suhde siten että se muodostaa resonanssitaajuuden ei-harmoniselle taajuudelle. Jakeluverkoissa, joissa on paljon yliaaltolähteitä käytetään yliaaltosuodattimia. Yliaaltosuodatin mitoitetaan verkossa olevien yliaaltovirtojen suodattamiseksi. (Sähkötieto ry, 2014)

Yliaaltosuodattimia on kaksi erilaista, passiivinen ja aktiivinen. Passiivisuodatin muodostuu kondensaattorista ja kelasta jotka ovat joko rinnakkaisytkettyinä tai sarjaytkettyinä riippuen yliaalloista. Aktiivisuodattimien toiminta perustuu reaaliaikaiseen mittaukseen ja säättävät kompensointivirrat mittaustuloksien perusteella. (Sähkötieto ry, 2014)

4.3.1 Yksivaiheiset passiiviset suodattimet

Kolmella jaolliset parittomat yliaallot syntyvät yksivaiheisista kuormista ja näiden moninkerrat ovat 3., 9., 15... . Nämä yliaallot ovat keskinäisesti samanvaiheisia joten ne summautuvat nollajohtimeen ja voivat aiheuttaa nollajohtimen ylikuormitusta. (Sähkötieto ry, 2006)

Kolmannen yliaallon passiivinen suodatin (THF) on rakennettu kondensaattorin ja kelan rinnakkaiskytkentänä (kuva 9). Kolmannen yliaallon suodatin poistaa kolmannen yliaallon verkosta lähes kokonaan. Kolmannen yliaallon suodattimen sijoitus määräytyy käytetyn sähkönjakelujärjestelmän mukaisesti. TN-S järjestelmässä, jossa on erillinen nolla, sijoitetaan THF suodattimet nollajohtimeen. TN-C järjestelmässä, jossa on yhdistetty nolla ja suojajohdin, sijoitetaan suodattimet muuntajan tähtipisteeseen. TN-C-S, missä on alkupäässä TN-C järjestelmä ja loppupäässä TN-S järjestelmä, sijoitetaan suodatin joko muuntajan tähtipisteeseen tai TN-S järjestelmän nollajohtimeen. (Sähkötieto ry, 2006)



Kuva 9. Kolmannen yliaallon passiivisen suodattimen rakenne. (Sähkötieto ry, 2006)

Parittomille kolmella jaollisille yliaalloille käytetään suodatinta joka muodostuu kondensaattorin ja kelan sarjakytkennällä. Nämä muodostavat sarjaresonanssiin, jonka resonanssitaajuus säädetään halutulle yliaaltotaajuudelle jonka haluaa suodattaa. (Sähkötieto ry, 2006)

4.3.2 Kolmivaiheiset passiiviset suodattimet

Parittomille kolmella jaottomille yliaalloille jotka muodostuvat kolmevaiheisella kuormalla eli 5., 7., 11... yliaallot. Nämä suodattimet ovat rakenteeltaan samanlaisia kuin parittomille kolmella jaollisille yliaalloille eli kelan ja kondensaattorin sarjakytkentä. Suodatin mitoitetaan siten että sen yliaallon, minkä haluaa suodattaa sen taajuudelle mitoitetaan suodatin siten että impedanssi on pienin mahdollinen ($X_L=X_C$). Tämä muodostaa helpoimman reitin virran kululle eli imupiirin. (Sähkötieto ry, 2006)

4.3.3 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodatin käyttää reaaliaikaista mittaustietoa ja näillä tiedoilla laite säätää itsensä generoimaan vastakkaisia yliaaltovirtoja jotka summautuvat verkossa olevien yliaaltovirtojen kanssa sinimuotoiseen virtaan. Aktiivisuodatin pystyy samanaikaisesti suodattamaan jopa 20 eri yliaaltoja sekä ylijäävällä kapasiteetillä myös kompensoida loistehoa. (Sähkötieto ry, 2014)

5 Yliaaltojen esiintyminen konesaliympäristössä

Konesaliympäristössä on paljon yliaaltoja muodostavia laitteita. Konesaleissa löytyy erilaisia IT-laitteiden sekä UPS-järjestelmien suuntaajia sekä muuntajia. Suurin IT-laitteista on yksivaiheisia laitteita, jotka muodostavat parittomia kolmella jaollisia yliaaltoja. Nämä voivat tuottaa ongelmia konesaleissa, koska kuorma voi olla suuri ja näiden haittavaikutus on, että ne summantuvat nollajohtimeen.

Konesalin jäähdytysjärjestelmä voi myös tuottaa ongelmaa, jos jäähdytysjärjestelmä on varustettu taajuusmuuttajaohjauksella. Taajuusmuuttajat tuottavat parittomia kolmella jaottomia yliaaltoja jakeluverkkoon.

Yliaaltojen haitat konesaleissa

- Yliaallot voivat aiheuttaa johdonsuojakatkaisijoiden tai vikavirtasuojien virheellisiä laukeamia, jotka voivat sammuttaa tärkeitä IT-laitteita.

- Nollajohtimen ylikuormitus ja lämpeneminen, mikä voi tuottaa magneettikenttää sekä sulamis vaaraa.
- Muuntajan ylikuormitus, johtuen yliaaltovirroista ja yliaaltojännitteistä aiheuttavista häviöistä.

5.1 Konesalien sähkönlaadun mittaus

Mittausten tarkoituksena on selvittää konesaliympäristöissä olevia yliaaltoja sekä niiden vaikutuksia. Mittaukset on tehty kahdessa eri konesalissa, kutsutaan näitä konesali 1:ksi ja 2:ksi, koska kohteista ei voida antaa tarkempia tietoja. Nämä konesalit on sijoitettu kiinteistöihin joissa on muita toimintoja, ja tämän vuoksi jännitteiden yliaallot voivat myös muodostua kiinteistön muissa sähkönjakeluosissa.

5.2 Mittauslaite

Mittauslaitteena käytettiin HIOKI 3196-tehoanalysointilaitetta (kuva 10). Analysointilaitteella on mahdollista mitata sähkön laatua joko yksi- tai kolmevaiheisella kytkennällä. Analysointilaitteella on oma akku sekä mahdollisuus kytkeä verkkojännitteeseen. Laitteessa on oma muisti sekä mahdollisuus lisätä muistikortti mittaus tulosten tallentamista varten. Analysointilaitteella on mahdollista saada kauko-ohjaus sekä mahdollista tehdä kuukauden kestoinen mittaus.

HIOKI 3196-tehoanalysointilaitteella on mahdollista mitata:

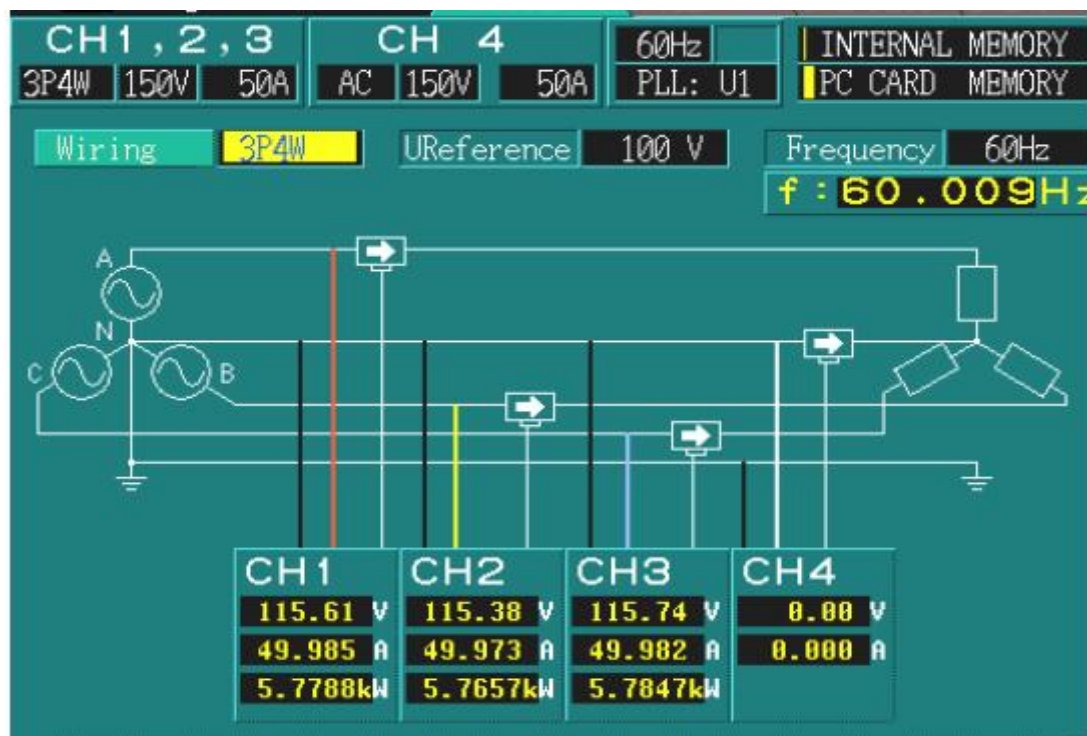
- Jännitteen transientit,
- RMS Jännitteen laatu,
- Sähkön laatu,
- 3- vaiheen jännitteen ja virran epäsymmetria,
- Harmoniset yliaallot 50. yliaaltoon saakka,
- K-kerroin sekä jännitteenvälkyntä.

Mittauslaitteessa on valmiiksi ohjelmoitu ohjelma SFS-EN-50160-mukaiseen mittaukseen, mihin on ohjelmoitu standardin raja-arvot. (Hioki e.e. corporation, 2005)



Kuva 10. HIOKI 3196-tehoanalysaattori. (Hioki e.e. corporation, 2005)

Mittaukset on mitattu kaikissa vaiheissa sekä, nollajohtimessa 3P4W-kytkenällä analysaattorin näyttämällä ohjeilla (kuva 11).

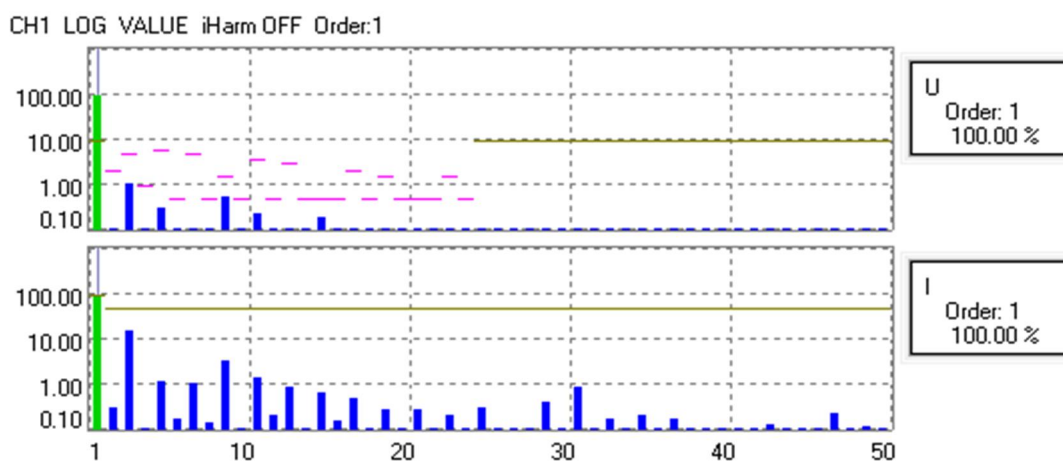


Kuva 11. 3P4W kytkentä. (Hioki e.e. corporation, 2005)

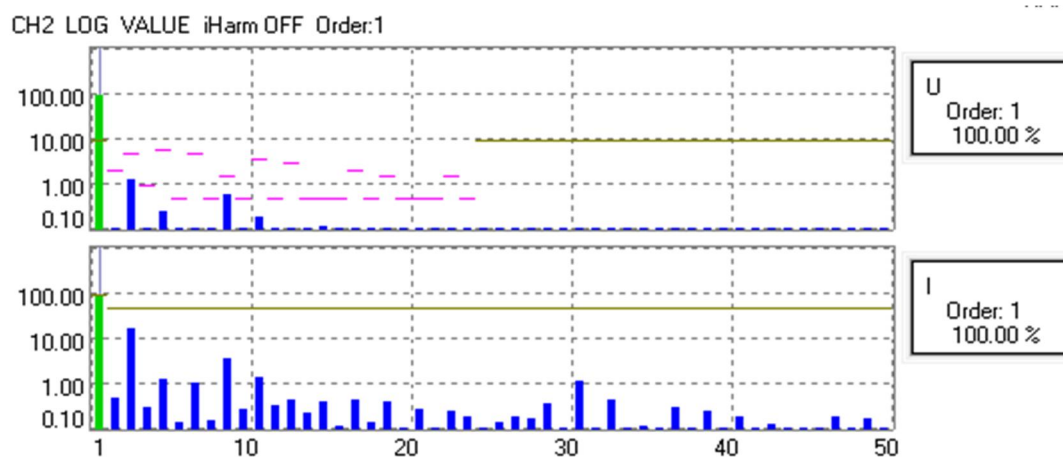
5.3 Mittaustulokset konesali 1:ssä

Konesali sijaitsi isossa kiinteistössä, jossa oli paljon muu toimintaa. Konesalissa oli mittauksen aikana tekeillä palvelimien uusinta ja sähkönjakelun muutoksia. Osa palvelimista oli jo uusittu ja osa vanhoista oli vielä käytössä. Konesalin ottama kuorma oli noin 50 kW, mikä muodostui noin 25:stä IT -laitekaapeista. Mittaus suoritettiin 8.3.2016 ja mittauksen kesto oli noin 1 tunti. Mittauskohtana oli palvelimia syöttävä keskuksen syöttökaapeli.

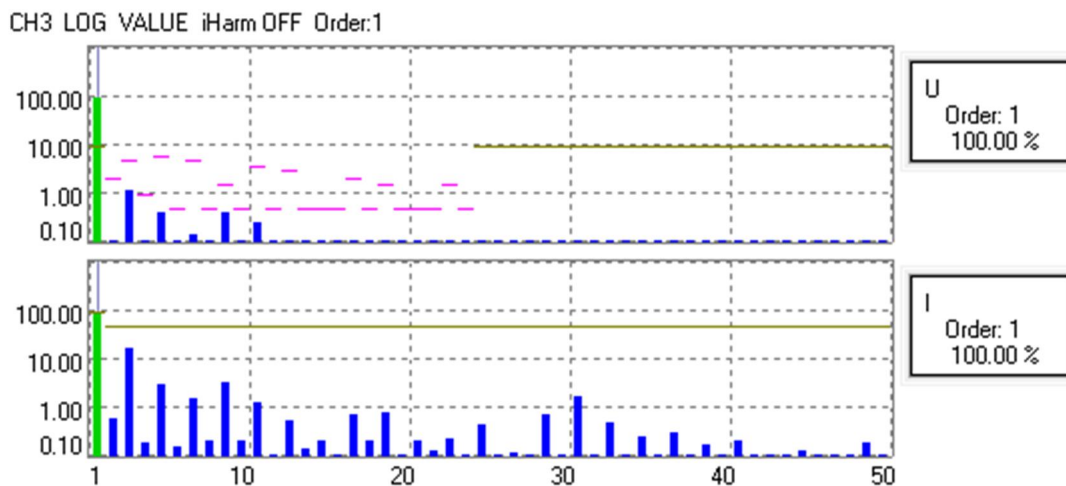
Konesalin jännite- sekä virtayliaaltopitoisuudet vaihejohtimissa L1-L3 sekä nolajohtimessa on esitelty kuvissa 12–15. Pystyakselilla on prosentuaalinen yliaallon osuus jännitteestä sekä virrasta, ja vaaka-akselilla on yliaallon järjestysluku.



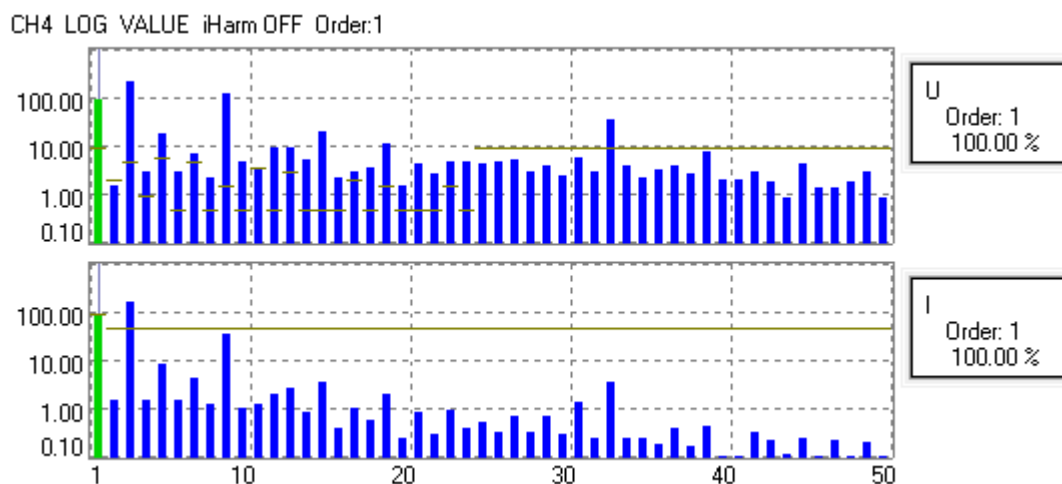
Kuva 12. L1 vaiheen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.



Kuva 13. L2 vaiheen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.



Kuva 14. L3 vaiheen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.



Kuva 15. Nollajohtimen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.

5.3.1 Jänniteyliaallot

Yksittäisiä jänniteyliaaltoja löytyi konesalin sähköjakeluverkossa. Jänniteyliaallot olivat kuitenkin SFS-EN-50160-standardin asettelemien rajojen sisällä. Standardin rajat yksittäisille jänniteyliaalloille on esitelty taulukossa 2.

Jännitteen kokonaissärö (THD) vaiheissa:

- L1 THD oli 1,27 %
- L2 THD oli 1,42 %
- L3 THD oli 1,31 %

Pylväsdiagrammit (kuvat 12-14) osoittavat, että konesalissa esiintyvät yliaaltopitoisuudet ovat sallittujen rajojen sisällä. Jakelujännitteen kokonaissärö oli kaikissa vaiheissa alle 3 %, mikä on senerin (sähköenergialiitto) luokituksella hyvä laatu. (Alanen & Hätönen, 2006)

5.3.2 Virtayliaallot

Virtayliaalloille ei ole vielä määritelty standardia mutta suosituksia on olemassa. Taulukossa 3 on esitelty virran yksittäisien yliaaltojenpitoisuuden suosituksia sekä virran kokonaissärö suositus.

Virran kokonaissärö (THD) vaiheissa sekä nollajohtimessa:

- L1 THD oli 16,66 %
- L2 THD oli 17,82 %
- L3 THD oli 17,80 %
- N THD oli 181,58 %

Pylväsdiagrammit (kuvat 12-15) osoittavat, että konesalin käyttämä virta on hyvin yliaaltopitoinen. Vaiheissa sekä nollajohtimessa kulkevassa virrassa on suuri osuus 3. ja 9. yliaaltoja ja nollajohtimessa 3. yliaaltoa on jopa enemmän kuin normaalitajuista virtaa. Kaikkien vaiheiden kokonaissärö on yli suositusrajan, mikä on 10 % keskuksen referenssivirran ollessa välillä 25-200 A.

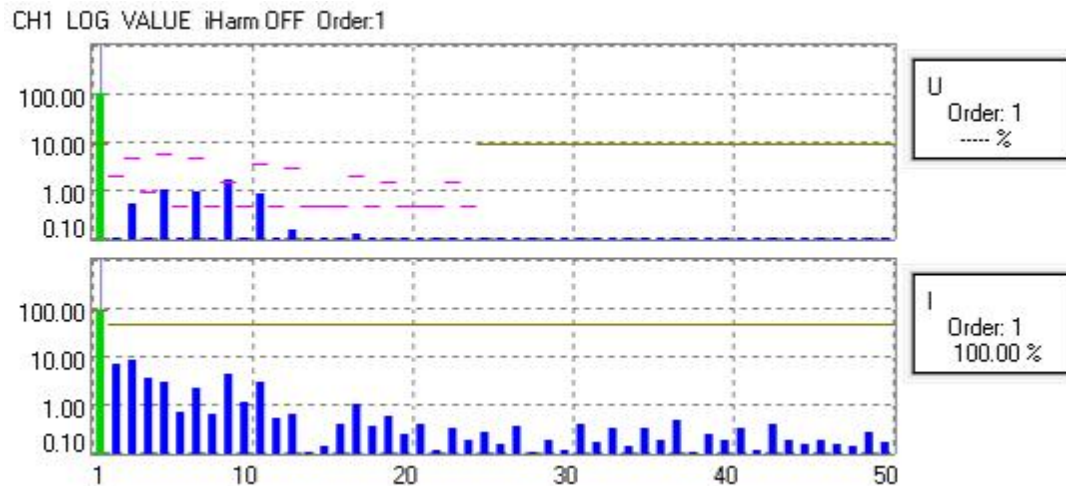
Liitteessä 3 näkyy konesalin jännitteen sekä virtojen aaltomuodot. Liitteestä voi todeta, että jännitteiden aaltomuodot ovat todella lähellä sinimuotoista aaltoa. Virtojen aaltomuodoissa näkyy kuitenkin hiukan säröytymistä.

5.4 Mittaustulokset konesali 2:ssa

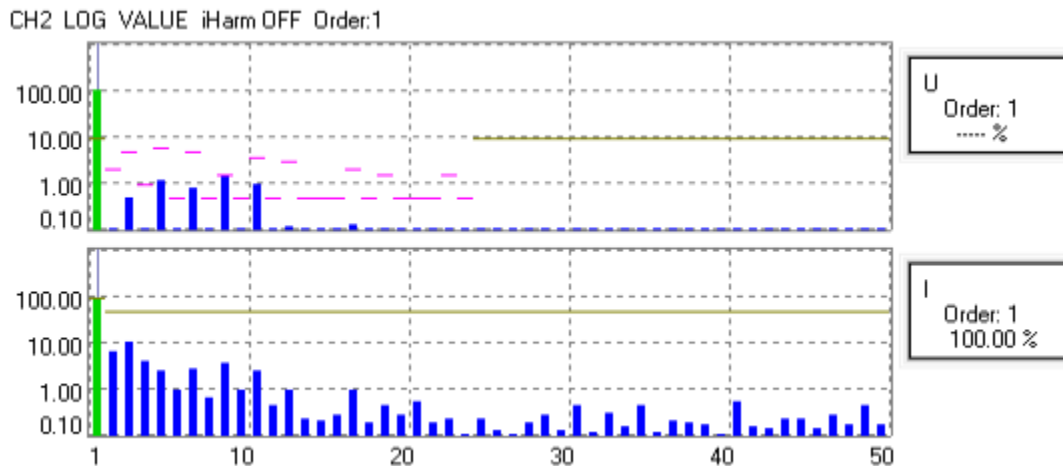
Konesali sijaitsi kiinteistössä, jota käytettiin pääosin toimistotilana. Konesali oli pieni konesali sisältäen muutamia palvelinlaitteita sekä 2 pientä UPS-laitetta. Mittaus

suoritettiin konesalia syöttävältä keskukselta, syöttökaapelilta. Mittauksen ajankohta oli 7.3.2016 ja mittauksen kesto oli noin kolme tuntia.

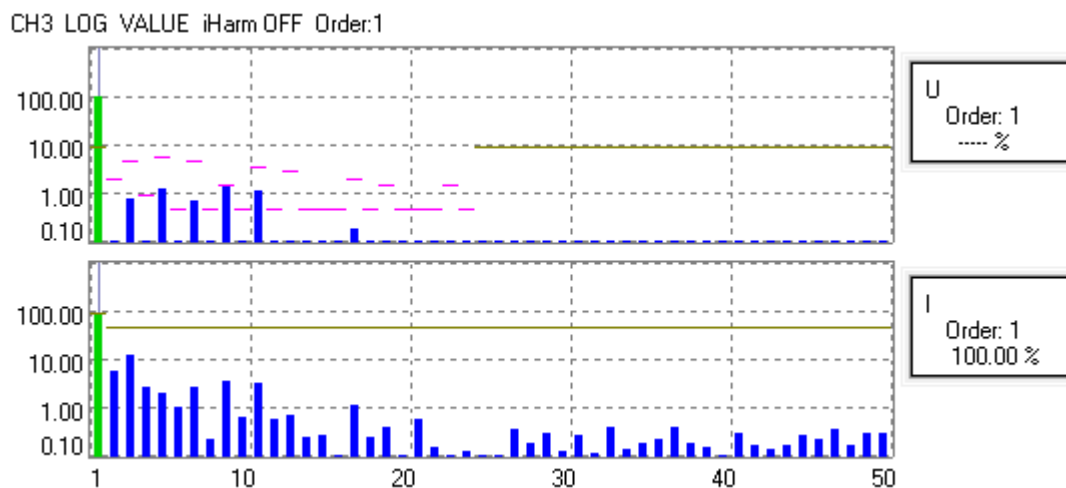
Konesalin jännite- sekä virtayliaaltopitoisuudet vaihejohtimissa L1-L3 sekä nolajohtimessa on esitelty kuvissa 16–19. Pystyakselilla on prosentuaalinen yliaallon osuus jännitteestä sekä virrasta ja vaaka-akselilla on yliaallon järjestysluku.



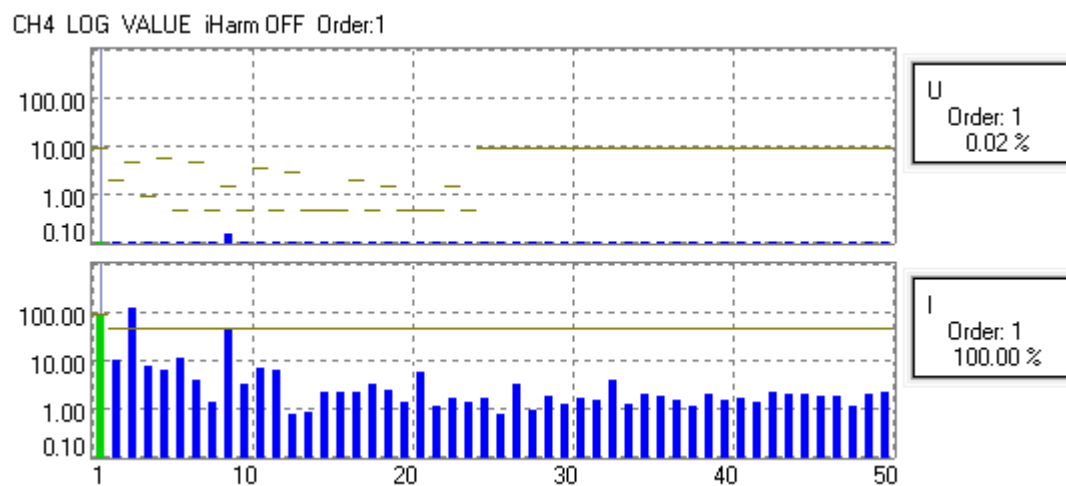
Kuva 16. L1 vaiheen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.



Kuva 17. L2 vaiheen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.



Kuva 18. L3 vaiheen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.



Kuva 19. Nollajohtimen yliaaltopitoisuudet jännitteestä sekä virrasta.

5.4.1 Jänniteyliaallot

Yksittäisiä jänniteyliaaltoja löytyi konesalin sähkönjakeluverkossa. Yksittäisten yliaaltojen osalta SFS-EN-50160-standardin asettelemia rajoja ylitettiin 9. yliaallon kohdalla. SFS-EN-50160 yksittäisien jänniteyliaaltojen rajat on esitelty taulukossa 2.

Jännitteen kokonaissärö (THD) vaiheissa:

- L1 THD oli 2,43 %
- L2 THD oli 2,28 %
- L3 THD oli 2,53 %

Pylväsdiagrammit (kuvat 16-18) osoittavat, että 9. yliaalto ylittää standardin asetteleman yksittäisen yliaallon rajan, joka on 9. yliaallolle 1,5 %. Tarkemmat yliaaltojen pitoisuudet löytyvät liitteessä 5 olevista taulukoista. Jakelujännitteen kokonaissärö oli kaikissa vaiheissa alle 3 % mikä on senerin (sähköenergialiitto) luokituksella hyvä laatu. (Alanen & Hätönen, 2006)

5.4.2 Virtayliaallot

Virtayliaalloille ei ole vielä määritelty standardia mutta suosituksia on olemassa. Taulukossa 3 on esitelty virran yksittäisien yliaaltojenpitoisuuden suosituksia sekä virran kokonaissärön suositus.

Virran kokonaissärö (THD) vaiheissa sekä nollajohtimessa:

- L1 THD oli 13,39 %
- L2 THD oli 14,19 %
- L3 THD oli 15,99 %
- N THD oli 143,95 %

Pylväsdiagrammit (kuvat 16-19) osoittavat, että konesalin käyttämä virta sisältää yliaaltoja. Virrassa esiintyy parittomien yliaaltojen lisäksi myös parillisia yliaaltoja, mitkä voi merkitä että konesalissa on viallinen laite. Virran kokonaissärö kaikissa vaiheissa on yli suositellun rajan.

Liitteessä 6 näkee konesalin jännitteiden sekä virtojen aaltomuodot. Liitteestä voi todeta, että jännitteen aaltomuodot ovat hyvin lähellä sinimuotoista aaltoa. Virtojen aaltomuodoista sen sijaan voi todeta, että aaltomuodot ovat hiukan säröytyneet. Virran säröisyys johtuu korkeasta kokonaissäröstä ja aiheuttaa häviöitä sähkönjakelujärjestelmässä.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin konosalin sähkönlaatua yliaaltojen osalta. Sähkönlaatua mitattiin kahdessa erisuuruudessa konesalissa. Mittauksien tavoitteena oli selvittää konesalien jakeluverkon yliaaltopitoisuutta. Mittaukset suoritettiin HIOKI 3196 – tehoanalysointilaitteella.

Konesali 1:n sähkönlaatumittaukset osoittavat, että konesalin käyttämä virta on hyvin yliaaltopitoinen. Vaiheiden virran kokonaissärö (THD) on kaikissa vaiheissa 17 % molemmin puolin. Virran THD on suosituksen mukaan oltava alle 10 %. Eniten yliaaltoja virroissa oli parittomia kolmella jaollisia yliaaltoja ja näistä suurin osa oli 3. ja 9. yliaalto. Näiden yliaaltojen muodostuminen voi johtua konesalissa olevista yksivaihe kuormista jotka ottavat verkosta virtaa epäsinimuotoisesti. Konesalia syöttävä keskus oli myös hyvin vinokuormitettu, mikä näkyy mittaustuloksissa, liitteessä 1. Vinokuormitettu verkko voi muodostaa yliaaltoja sekä virtaa nollajohtimeen. Nollajohtimessa kulkevassa virrassa oli 3. ja 9. yliaaltovirta jopa suurempi kuin normaalitajuinen virta.

Konesali 1:n jännitteen yksittäiset harmoniset yliaallot olivat kaikissa vaiheissa standardin SFS-EN-50160 asettelemien rajojen sisällä. Jännitteen kokonaissärö oli mittauksen aikana kaikissa vaiheissa jopa alle 1,5 %, mikä tarkoittaa hyvää sähkönlaatua.

Konesalissa 1 oli käynnissä mittauksen aikana muutostöitä. Ehdotan kuormien jakoa tasaisemmin vaiheiden välille vinokuormituksen poistamiseksi. Töiden valmistuttua ehdotan uutta sähkönlaadun mittausta.

Konesali 2:n mittaustuloksesta voi nähdä, että konesalin ottama virta on hyvin yliaaltopitoinen. Vaiheiden virran kokonaissärö on 13-16 % välissä joka vaiheessa. Virran THD on vaiheissa yli suositusrajan mikä on referenssivirran perusteella 10 %. Vaiheiden virroissa oli eniten 3. yliaaltoja sekä muita parittomia yliaaltoja. Virroissa oli myös korkeita pitoisuuksia parillisista yliaalloista, mikä voi olla merkki viallisesta laitteesta. Vaiheiden virroissa löytyvät kolmella jaottomat parittomat yliaallot voivat johtua konesalissa olevista UPS-laitteiden suuntaajista. Kolmella jaolliset parittomat yliaallot ovat luultavasti muodostuneet konesalin IT-laitteista ja niiden epäsinimuotoisesta virrankulutuksesta. Nollajohtimessa kulkevassa virrassa oli eniten 3. ja 9. yliaaltoja mutta myös parillisia yliaaltoja jonkin verran.

Konesalissa 2 ylitettiin standardin asettelema raja jännitteen yksittäisten harmonisten yliaaltojen kohdalla. Vaiheissa oli 9. yliaalto yli sallitun rajan, mikä on standardin mukaan

oltava alle 1,5%. Standardien asettelema raja jännitteen kokonaissäröstä ei ylittynyt mittauksen aikana.

Konesalissa 2 ehdotan paikantamaan parillisien yliaaltojen lähteen/lähteet ja poistamaan tai uusimaan laitteen/laitteet. Ehdotan myös selvitystä siitä, mistä 9. jänniteyliaalto muodostuu, ja jos selvityksessä häiriönlähdettä ei löydy niin on hankittava suodatin.

Molemmista mittaustuloksista näkee, että konesaleissa olevat laitteet tuottavat suuria määriä yliaaltovirtoja. Kaapelit, jotka syöttävät laitekaappeja, voivat tuottaa magneettikenttiä, mikä voi olla haitallista, jos ne ovat lähellä tiedonsiirtokaapeleita. Magneettikentät voivat tuottaa häiriötä tiedonsiirrossa, mikä tuottaa ongelmia palvelimien käyttäjille.

Konesalien yliaaltojen poistamiseksi on mahdollista hankkia myös suodatin. Konesaleista on mahdollista poistaa yliaaltoja melkein kokonaan aktiivisuodattimella. Aktiivisuodattimella pystyy parantamaan sähkön laatua kokonaisvaltaisesti jopa sähkökuormien muuttuessa. Aktiivisuodatin poistaa yliaaltoja tuottamalla verkkoon samansuuruisia yliaaltoja, mutta 180 asteen vaihesiirrolla yliaallot summautuvat toisiinsa ja muodostavat siniaaltoisen virran. Aktiivisuodatin käyttää reaaliaikaista mittausta yliaaltojen tuottamiseen, joten yliaaltojen vaihtelu ei vaikuta suodatukseen.

Yliaaltojen suodatukseen löytyy myös passiivisuodattimia, jotka ovat aktiivisuodattimia halvempia. Passiivisuodattimen rakenne on sarjaan tai rinnan kytketyt kela ja kondensaattori. Passiivisuodattimet pystyvät poistamaan yliaaltoja tehokkaasti, mutta nämä suodattimet viritetään poistamaan ainoastaan yhden yliaallon. Tämä tarkoittaa sitä, että konesaleissa tarvittaisiin useita passiivisuodattimia, jotka viritetään haitallisimpiin yliaaltojen poistamiseksi. Passiivisuodattimen huono puoli on, että suodatin ei sovellu järjestelmään, jossa yliaaltojen suuruus vaihtelee. Useampien passiivisuodattimien hankinta voi tulla jopa kalliimmaksi kuin aktiivisuodattimen hankinta.

Lähdeluettelo

ABB, 2014. *Konesaliratkaisut ABB:ltä*. [Online]
[http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb251.nsf/0/1de721c76a7ec9dec12577310021d689/\\$file/Konesaliratkaisut+ABBIta+low+res.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb251.nsf/0/1de721c76a7ec9dec12577310021d689/$file/Konesaliratkaisut+ABBIta+low+res.pdf) [Haettu 1.3.2016].

Alanen, R. & Hätönen, H., 2006. *Sähkön jakelun luotettavuuden hallinta State of art -selvitys*. [Online]
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/w52.pdf> [Haettu 15.3.2016].

Energiateollisuus, 2014. *Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje*. [Online]
http://energia.fi/sites/default/files/sahkon_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf [Haettu 4.3.2016].

Hioki e.e. corporation, 2005. *Hioki 3196 power quality analyzer*. s.l.:Hioki e.e. corporation.

Hitachi Hi-Rel power electronics pvt. Ltd., ei pvm *Diesel rotary UPS systems (DRUPS)*. [Online]
<http://www.hitachi-hirel.com/gallery/catalogues/get?id=53faffec2865a> [Haettu 4.3.2016].

Karonen, T., 2010. *Epäsymmetrisen kuormituksen ja yliaaltojen mittaukset*. [Online]
<http://publications.theseus.fi/handle/10024/13483> [Haettu 4.3.2016].

Kontturi, M. & Ålander, J., 2008. *Energiasäästölamppujen verkkovaikutukset*. [Online]
http://energia.fi/sites/default/files/energiasaastolamppujen_verkkovaikutukset_pkamk.pdf [Haettu 4.3.2016].

Källi, S., 2012. *Varavoimajärjestelmän suunnitteluohje*. [Online]
<http://publications.theseus.fi/handle/10024/39500> [Haettu 2.3.2016].

Lindström, K., 2014. *Tasasuuntaajien muodostamat yliaallot*. [Online]
<http://publications.theseus.fi/handle/10024/78445> [Haettu 8.3.2016].

Motiva Oy, 2011. *Energiatehokas konesali*. [Online]
http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf [Haettu 29.2.2016].

Pesonen, N., 2012. *Sähköverkon sähkön laatu Pankkosken kartonkitehtaalla*. [Online]
<https://www.theseus.fi/handle/10024/41497> [Haettu 6.3.2016].

Ruppa, E., 2001. *Yliaallot*. [Online]

<http://salabra.tp.samk.fi/er/siirto/yliaallot.doc> [Haettu 6.3.2016].

Smalley, E., 2011. *The year data centers turned green*. [Online]

<http://www.wired.com/2011/12/green-data-centers-of-2011/> [Haettu 1.3.2016].

Sähkötieto ry, 2006. *ST 52.51.03: Sähkön laatu. Harmoniset yliaallot*, Espoo: Sähkötieto ry.

Sähkötieto ry, 2010. *ST 52.35.01: UPS-laitteet ja -järestelmät*, Espoo: Sähkötieto ry.

Sähkötieto ry, 2014. *ST 52.16: Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 1000V:n pienjänniteverkossa*, Espoo: Sähkötieto ry.

Torri, J., 2008. *Varavoimakoneen vikaantuminen ja luotettavuuden parantaminen*. [Online]

http://www.medifast-tekniikka.fi/artikkelit/Varavoimakoneiden_vikaantuminen.pdf [Haettu 2.3.2016].

UptimeInstitute, 2014. *Explaining the uptime institute's Tier classification system*. [Online]

<https://journal.uptimeinstitute.com/explaining-uptime-institutes-tier-classification-system/> [Haettu 1.3.2016].

Ylikulju, J., 2009. *Varamuuntajaselvitys*. [Online]

http://www.cou.fi/opinnaytetyot/julkaistut/Ylikulju_Jukka.pdf [Haettu 1.3.2016].

LIITE 1.

Kuvassa näky konesali 2 mittauksentulokset tehon, jännitteen ja virran ominaisuuksista.

POWER		VOLTAGE		CURRENT	
Freq	50.047 Hz				
P1	19.52kW	U1	230.12 V	I1	89.98 A
P2	16.62kW	U2	231.23 V	I2	78.14 A
P3	13.65kW	U3	231.62 V	I3	64.02 A
Psum	0.0498MW	U4	0.00 V	I4	45.258 A
S1	20.71kVA	THD-U1	1.27 %	THD-I1	16.66 %
S2	18.07kVA	THD-U2	1.42 %	THD-I2	17.82 %
S3	14.83kVA	THD-U3	1.31 %	THD-I3	17.80 %
Ssum	0.0536MVA	THD-U4	----- %	THD-I4	181.58 %
Q1	- 6.90kvar	Upk+1	0.3223kV	lpk+1	0.1447kA
Q2	- 7.09kvar	Upk+2	0.3242kV	lpk+2	0.1284kA
Q3	- 5.79kvar	Upk+3	0.3243kV	lpk+3	0.1056kA
Qsum	-0.0198Mvar	Upk+4	0.0026kV	lpk+4	86.62 A
PF1	-0.9429	Upk-1	-0.3214kV	lpk-1	-0.1420kA
PF2	-0.9199	Upk-2	-0.3238kV	lpk-2	-0.1263kA
PF3	-0.9205	Upk-3	-0.3234kV	lpk-3	-0.1047kA
PFsum	-0.9289	Upk-4	-0.0017kV	lpk-4	- 86.94 A
		Uave	230.99 V	KF1	1.48
		Uunb	0.14 %	KF2	1.62
				KF3	1.78
				KF4	9.96
				Iave	77.38 A
				Iunb	8.62 %

Kuva 1. Kuvassa näky konesali 1 mittauksen tulokset.

LIITE 2. 1(4)

Konesali 1. Vaiheiden sekä nollajohtimen yksittäisten jännitteiden sekä virtojen yliaaltopitoisuudet.

Taulukoissa 1-3 on esitetty yksittäisten jännityliaaltojen pitoisuudet.

Taulukoissa 4-7 on esitetty yksittäisten virtayliaaltojen pitoisuudet.

Taulukko 1. L1 Vaiheen jännitteen yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	0.01	35	0.01
2	0.04	19	0.07	36	0.00
3	1.05	20	0.01	37	0.01
4	0.02	21	0.06	38	0.00
5	0.30	22	0.01	39	0.01
6	0.04	23	0.02	40	0.00
7	0.07	24	0.00	41	0.00
8	0.05	25	0.06	42	0.00
9	0.53	26	0.00	43	0.00
10	0.04	27	0.03	44	0.00
11	0.22	28	0.00	45	0.00
12	0.06	29	0.05	46	0.00
13	0.05	30	0.00	47	0.01
14	0.03	31	0.10	48	0.00
15	0.19	32	0.00	49	0.01
16	0.03	33	0.03	50	0.00
17	0.10	34	0.00	THD	1.27

Taulukko 2. L2 Vaiheen jännitteen yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	0.02	35	0.03
2	0.06	19	0.02	36	0.01
3	1.24	20	0.01	37	0.02
4	0.06	21	0.05	38	0.00
5	0.24	22	0.00	39	0.01
6	0.05	23	0.04	40	0.01
7	0.07	24	0.01	41	0.01
8	0.04	25	0.04	42	0.00
9	0.57	26	0.01	43	0.01
10	0.06	27	0.03	44	0.00
11	0.20	28	0.01	45	0.01
12	0.06	29	0.04	46	0.00
13	0.04	30	0.00	47	0.00
14	0.03	31	0.09	48	0.00
15	0.12	32	0.01	49	0.01
16	0.01	33	0.03	50	0.00
17	0.03	34	0.01	THD	1.42

LIITE 2. 2(4)**Taulukko 3. L3 Vaiheen jännitteen yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.**

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	0.01	35	0.01
2	0.05	19	0.05	36	0.00
3	1.13	20	0.01	37	0.01
4	0.02	21	0.06	38	0.01
5	0.39	22	0.01	39	0.01
6	0.02	23	0.04	40	0.00
7	0.13	24	0.00	41	0.01
8	0.03	25	0.06	42	0.01
9	0.40	26	0.00	43	0.01
10	0.03	27	0.01	44	0.00
11	0.25	28	0.01	45	0.01
12	0.03	29	0.05	46	0.00
13	0.05	30	0.01	47	0.01
14	0.02	31	0.11	48	0.00
15	0.09	32	0.00	49	0.01
16	0.01	33	0.04	50	0.00
17	0.06	34	0.00	THD	1.31

Taulukko 4. Vaihe L1 virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.0	18	0.06	35	0.21
2	0.29	19	0.28	36	0.05
3	16.11	20	0.06	37	0.17
4	0.06	21	0.27	38	0.04
5	1.17	22	0.05	39	0.10
6	0.16	23	0.21	40	0.06
7	1.07	24	0.05	41	0.02
8	0.15	25	0.31	42	0.07
9	3.24	26	0.07	43	0.13
10	0.09	27	0.10	44	0.05
11	1.42	28	0.09	45	0.05
12	0.21	29	0.39	46	0.02
13	0.85	30	0.04	47	0.22
14	0.07	31	0.87	48	0.02
15	0.65	32	0.06	49	0.11
16	0.15	33	0.17	50	0.03
17	0.49	34	0.04	THD	16.66

LIITE 2. 3(4)

Taulukko 5. Vaihe L2 virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.0	18	0.13	35	0.12
2	0.51	19	0.40	36	0.10
3	17.18	20	0.09	37	0.30
4	0.29	21	0.28	38	0.04
5	1.27	22	0.06	39	0.24
6	0.14	23	0.24	40	0.09
7	1.08	24	0.19	41	0.18
8	0.15	25	0.04	42	0.05
9	3.77	26	0.14	43	0.12
10	0.26	27	0.18	44	0.06
11	1.38	28	0.17	45	0.02
12	0.34	29	0.37	46	0.03
13	0.46	30	0.04	47	0.19
14	0.23	31	1.20	48	0.03
15	0.40	32	0.06	49	0.17
16	0.12	33	0.44	50	0.07
17	0.44	34	0.11	THD	17.82

Taulukko 6. Vaihe L3 virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.0	18	0.20	35	0.24
2	0.59	19	0.76	36	0.04
3	16.96	20	0.10	37	0.31
4	0.19	21	0.21	38	0.06
5	3.00	22	0.13	39	0.17
6	0.15	23	0.23	40	0.07
7	1.50	24	0.08	41	0.21
8	0.20	25	0.45	42	0.08
9	3.18	26	0.05	43	0.09
10	0.20	27	0.12	44	0.09
11	1.28	28	0.09	45	0.13
12	0.09	29	0.69	46	0.05
13	0.51	30	0.06	47	0.08
14	0.13	31	1.66	48	0.05
15	0.20	32	0.07	49	0.19
16	0.10	33	0.47	50	0.08
17	0.72	34	0.03	THD	17.80

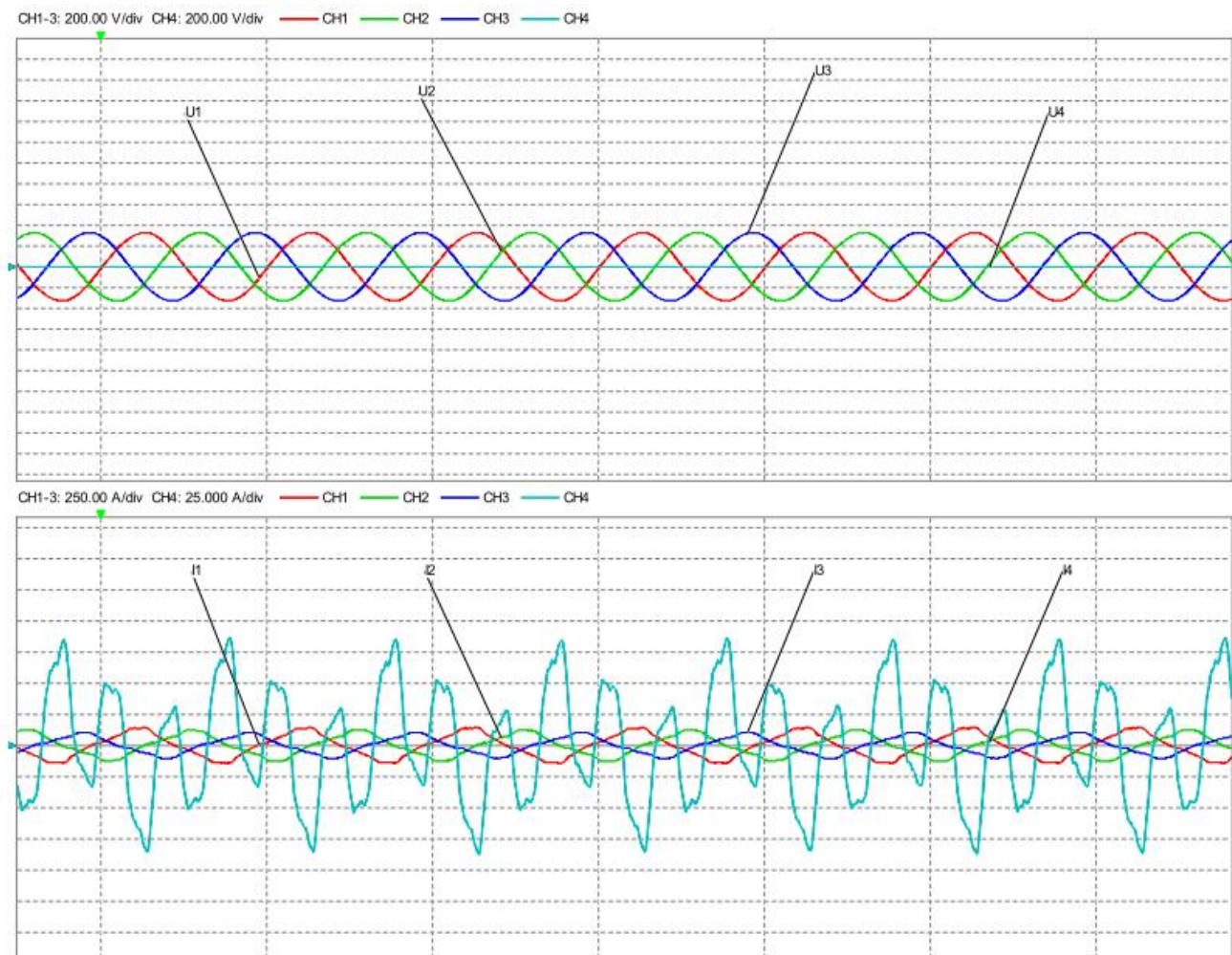
LIITE 2. 4(4)

Taulukko 7. N-johtimen virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	0.62	35	0.26
2	1.53	19	2.08	36	0.19
3	-----	20	0.25	37	0.39
4	1.48	21	0.88	38	0.17
5	8.97	22	0.30	39	0.45
6	1.57	23	0.99	40	0.09
7	4.55	24	0.40	41	0.08
8	1.25	25	0.54	42	0.33
9	35.80	26	0.32	43	0.22
10	1.03	27	0.73	44	0.12
11	1.24	28	0.32	45	0.25
12	2.05	29	0.73	46	0.06
13	2.69	30	0.31	47	0.22
14	0.90	31	1.42	48	0.05
15	3.77	32	0.26	49	0.21
16	0.40	33	3.58	50	0.09
17	1.01	34	0.26	THD	181.58

LIITE 3.

Kuvassa näkyy konesali 1 mittauksen aikana esiintyvät jännitteen sekä virran aaltomuodot.



Kuva 1. Konesali 1 Jännitteiden ja virtojen aaltomuodot.

LIITE 4.

Kuvassa näkyy konesali 2 mittauksentulokset tehon, jännitteen ja virran ominaisuuksista.

POWER		VOLTAGE		CURRENT	
Freq	50.027 Hz				
P1	2.921kW	U1	231.08 V	I1	13.187 A
P2	2.442kW	U2	230.41 V	I2	11.071 A
P3	2.393kW	U3	231.02 V	I3	10.816 A
Psum	7.76kW	U4	0.00 V	I4	4.791 A
S1	3.047kVA	THD-U1	2.43 %	THD-I1	13.39 %
S2	2.551kVA	THD-U2	2.28 %	THD-I2	14.19 %
S3	2.499kVA	THD-U3	2.53 %	THD-I3	15.99 %
Ssum	8.10kVA	THD-U4	----- %	THD-I4	143.95 %
Q1	- 0.868kvar	Upk+1	0.3242kV	Ipk+1	20.09 A
Q2	- 0.736kvar	Upk+2	0.3238kV	Ipk+2	16.32 A
Q3	- 0.718kvar	Upk+3	0.3256kV	Ipk+3	15.66 A
Qsum	- 2.32kvar	Upk+4	0.0019kV	Ipk+4	10.04 A
PF1	-0.9586	Upk-1	-0.3234kV	Ipk-1	- 18.64 A
PF2	-0.9575	Upk-2	-0.3228kV	Ipk-2	- 15.95 A
PF3	-0.9578	Upk-3	-0.3247kV	Ipk-3	- 15.58 A
PFsum	-0.9580	Upk-4	-0.0010kV	Ipk-4	- 10.16 A
		Uave	230.83 V	KF1	1.71
		Uunb	0.26 %	KF2	1.67
				KF3	1.76
				KF4	18.53
				Iave	11.691 A
				Iunb	6.23 %

Kuva 1. Kuvassa näkyy konesali 2 mittauksen tulokset.

LIITE 5. 1(4)

Konesali 2. Vaiheiden sekä nollajohtimen yksittäisten jännitteiden sekä virtojen yliaaltopitoisuudet.

Taulukoissa 1-3 on esitetty yksittäisien jännityliaaltojen pitoisuudet.

Taulukoissa 4-7 on esitetty yksittäisin virtayliaaltojen pitoisuudet.

Taulukko 1. L1 Vaiheen jännitteen yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	-----	18	0.01	35	0.02
2	0.03	19	0.05	36	0.00
3	0.53	20	0.01	37	0.04
4	0.04	21	0.08	38	0.00
5	1.07	22	0.00	39	0.01
6	0.02	23	0.03	40	0.01
7	0.93	24	0.01	41	0.02
8	0.01	25	0.03	42	0.00
9	1.68	26	0.01	43	0.01
10	0.03	27	0.04	44	0.01
11	0.87	28	0.00	45	0.01
12	0.01	29	0.02	46	0.01
13	0.16	30	0.00	47	0.01
14	0.01	31	0.03	48	0.00
15	0.04	32	0.01	49	0.01
16	0.01	33	0.01	50	0.01
17	0.13	34	0.00	THD	2.43

Taulukko 2. L2 Vaiheen jännitteen yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	-----	18	0.01	35	0.05
2	0.04	19	0.06	36	0.00
3	0.51	20	0.00	37	0.01
4	0.03	21	0.11	38	0.00
5	1.19	22	0.00	39	0.01
6	0.02	23	0.06	40	0.01
7	0.78	24	0.01	41	0.04
8	0.03	25	0.02	42	0.00
9	1.42	26	0.00	43	0.01
10	0.03	27	0.02	44	0.01
11	0.92	28	0.00	45	0.01
12	0.01	29	0.04	46	0.01
13	0.12	30	0.00	47	0.02
14	0.00	31	0.04	48	0.00
15	0.06	32	0.00	49	0.01
16	0.01	33	0.03	50	0.01
17	0.12	34	0.00	THD	2.28

LIITE 5. 2(4)

Taulukko 3. L3 Vaiheen jännitteen yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	-----	18	0.01	35	0.02
2	0.05	19	0.04	36	0.01
3	0.82	20	0.00	37	0.02
4	0.02	21	0.11	38	0.00
5	1.26	22	0.01	39	0.02
6	0.04	23	0.02	40	0.00
7	0.70	24	0.01	41	0.01
8	0.01	25	0.01	42	0.00
9	1.51	26	0.00	43	0.02
10	0.02	27	0.04	44	0.00
11	1.16	28	0.00	45	0.01
12	0.02	29	0.04	46	0.01
13	0.11	30	0.00	47	0.01
14	0.01	31	0.04	48	0.01
15	0.06	32	0.00	49	0.02
16	0.01	33	0.02	50	0.01
17	0.18	34	0.01	THD	2.53

Taulukko 4. Vaihe L1 virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	0.37	35	0.35
2	6.83	19	0.58	36	0.18
3	8.36	20	0.24	37	0.49
4	3.63	21	0.41	38	0.08
5	3.05	22	0.11	39	0.25
6	0.73	23	0.32	40	0.19
7	2.28	24	0.19	41	0.32
8	0.67	25	0.26	42	0.12
9	4.47	26	0.15	43	0.42
10	1.13	27	0.35	44	0.19
11	2.90	28	0.08	45	0.15
12	0.54	29	0.18	46	0.19
13	0.63	30	0.12	47	0.15
14	0.10	31	0.41	48	0.14
15	0.14	32	0.17	49	0.27
16	0.41	33	0.32	50	0.17
17	1.02	34	0.14	THD	13.39

LIITE 5. 3(4)

Taulukko 5. Vaihe L2 virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	0.18	35	0.43
2	6.40	19	0.44	36	0.12
3	10.30	20	0.26	37	0.21
4	3.85	21	0.51	38	0.19
5	2.46	22	0.19	39	0.17
6	0.96	23	0.24	40	0.10
7	2.68	24	0.08	41	0.52
8	0.66	25	0.24	42	0.16
9	3.54	26	0.13	43	0.14
10	0.99	27	0.11	44	0.22
11	2.61	28	0.19	45	0.22
12	0.44	29	0.27	46	0.14
13	0.96	30	0.12	47	0.29
14	0.22	31	0.44	48	0.17
15	0.20	32	0.12	49	0.44
16	0.27	33	0.29	50	0.17
17	0.91	34	0.16	THD	14.19

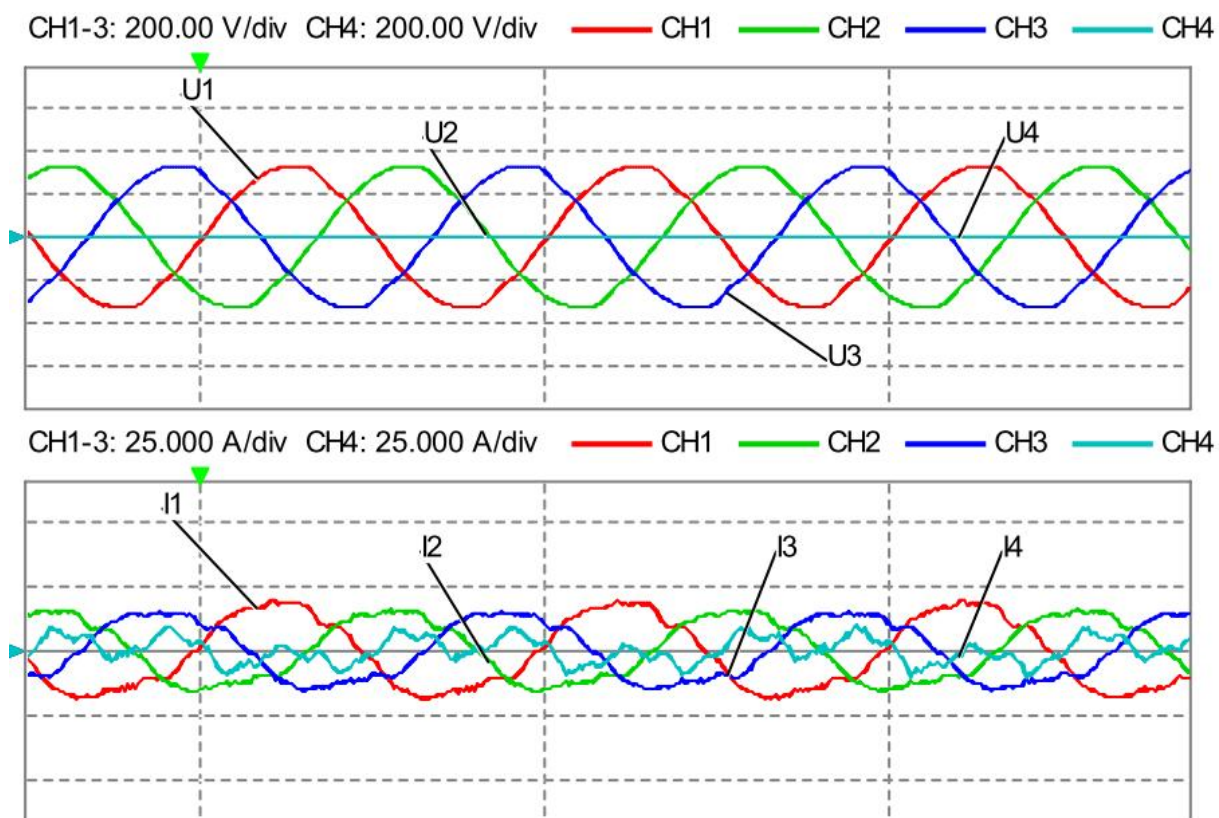
Taulukko 6. Vaihe L3 virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	0.26	35	0.18
2	5.83	19	0.41	36	0.22
3	13.02	20	0.09	37	0.39
4	2.87	21	0.59	38	0.18
5	2.10	22	0.15	39	0.16
6	1.03	23	0.09	40	0.09
7	2.77	24	0.13	41	0.29
8	0.22	25	0.11	42	0.18
9	3.79	26	0.09	43	0.14
10	0.64	27	0.36	44	0.17
11	3.44	28	0.19	45	0.27
12	0.57	29	0.31	46	0.22
13	0.69	30	0.12	47	0.37
14	0.25	31	0.27	48	0.17
15	0.27	32	0.11	49	0.31
16	0.09	33	0.39	50	0.29
17	1.14	34	0.14	THD	15.99

Taulukko 7. N-johtimen virran yksittäisten yliaaltojen yliaaltopitoisuudet prosentteina.

Order	(%)	Order	(%)	Order	(%)
1	100.00	18	3.31	35	2.09
2	10.17	19	2.60	36	1.92
3	-----	20	1.36	37	1.50
4	7.80	21	6.19	38	1.14
5	6.62	22	1.21	39	2.03
6	11.23	23	1.73	40	1.49
7	3.88	24	1.43	41	1.68
8	1.45	25	1.67	42	1.38
9	50.42	26	0.77	43	2.32
10	3.34	27	3.48	44	2.09
11	7.05	28	0.97	45	2.06
12	6.34	29	1.94	46	1.87
13	0.77	30	1.28	47	1.86
14	0.85	31	1.75	48	1.12
15	2.31	32	1.50	49	2.03
16	2.29	33	4.10	50	2.31
17	2.20	34	1.32	THD	143.95

Kuvassa näkyy konesali 2 mittauksen aikana esiintyvät jännitteiden sekä virran aaltomuodot.



Kuva 1. Konesali 2 Jännitteiden ja virtojen aaltomuodot.