



YLIAALTOJEN SUODATUS LABORATORIO- JA TOIMISTORAKENNUKSESSA

Ella Sievä

Opinnäytetyö
Toukokuu 2013
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia opinnäytetyöni etenemisessä myötävaikuttaneita henkilöitä toimeksiantajalla, tutkimuskohteessa, oppilaitoksessani ja muissa tukiverkostoissani. Haluan osoittaa erityiskiitokset Timolle ja Mikolle suurenmoisesta tuesta koko projektin aikana ja ohjaamisesta oikeisiin suuntiin. Suurkiitos asiantuntijaneuvoista ja opinnäytetyöni ohjaamisesta Janne Kivirannalle ja Jari Kotiniitylle Alstom Gridillä ja Heikki Ylirämille Tampereen ammattikorkeakoulussa. Lisäksi haluaisin esittää kiitokset tutkimuskohteen henkilökunnalle, joka mahdollisti mittaustutkimusten järjestämisen.

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

ELLA SIEVÄ:

Yliaaltojen suodatus laboratorio- ja toimistorakennuksessa

Opinnäytetyö 62 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Toukokuu 2013

Yliaallot heikentävät sähkön laatua ja vääristävät sähkölaitteiden saamaa jännitettä epäsinimuotoiseksi. Epälineaariset sähköjärjestelmän ja -verkon osat tuottavat yliaaltoja käyttämäänsä sähköjärjestelmään. Ilmiöstä käytetään myös nimitystä särö, sillä sinimuotoinen aalto vääristyy eli säröytyy yliaaltojen vaikutuksesta.

Yliaallot yleistyvät jatkuvasti kaikissa sähköverkoissa ja ikäännyttävät sähkölaitteita. Vaihtosähköllä toimivat sähkölaitteet on suunniteltu käytettäväksi sinimuotoisella jännitteellä, minkä vuoksi yliaallot voivat aiheuttaa ongelmia. Lisäksi on huomattava, että erilaiset ohjaus- ja viestisignaalit saattavat häiriintyä yliaalloista. Joissakin tapauksissa yliaallot ovat myös läsnä oleville ihmisille häiriöksi: sähkölaitteiden mekaaniset osat voivat resonoidessaan aiheuttaa melua ja valonlähteissä voi ilmetä silmin nähtävää välkyntää.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään yliaaltoihin liittyvä teoria, selvitetään yliaaltojen haittavaikutuksia ja tarkastellaan erilaisia suodatusratkaisuja. Työn edetessä tuodaan esille kuhunkin osa-alueeseen liittyvät standardit ja säädökset.

Tutkimuskohteena toimi Tampereella sijaitseva laboratorio- ja toimistorakennus. Rakennuksessa oli ennen työn aloittamista havaittu sähkölaitteista peräisin olevaa häiritsevää särinää, jonka arveltiin johtuvan heikkolaatuisesta sähköstä. Johtopäätöksenä syntyi tarve kartoittaa sähkön laatu rakennuksen sähköjärjestelmässä. Räätelöidyn ratkaisun etsimistä käsittelevä prosessi esitetään vaihe vaiheelta tässä opinnäytetyössä. Vian kohdentamismenettelyjä ja laskelmia voidaan soveltaa yleisesti yliaaltojen hallintaan kuluttajan päässä.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

ELLA SIEVÄ:
Filtering Harmonics in a Laboratory and Office Building

Bachelor's thesis 62 pages, appendices 5 pages
May 2013

Distortion in the field of electrical engineering is a concept that weakens the quality of electrical power. Some electrical equipment generate wave overtones that corrupt both current and voltage waveforms. AC voltage is supposed to be as close to sine wave form as possible to ensure good power quality. The overtones are also called harmonics.

Harmonics are getting more and more common in all electrical grids due to the increased unlinear loads and the use of power electronics. Distorted voltage strains electrical equipment, corrupts and disturbs electrical control signals and causes resonance and flickering that may disturb the personnel working in the area.

This thesis includes theory on harmonics, study on the harmful effects caused by distortion and possible solutions on how to filter these overtones. All applicable standards and regulations are brought up in the thesis.

A laboratory and office building was used as a research subject during this thesis. The personnel had asked for a power quality analysis due to some abnormal behavior of electrical devices. The goal was to measure and analyze power quality in the mentioned building's electrical network and find a filtering solution if needed.

The whole process from analyzing power quality to finding an applicable filtering solution is presented step by step in this thesis. The procedure can be applied to manage harmonics at the end users' facilities in common power supply systems.

Key words: harmonics, distortion, power quality, filtering

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	YLIAALTOJEN SYNTY.....	11
	2.1 Suuntaajat.....	17
	2.2 Tyristorikytkimet	20
	2.3 Hakkuriteholähteet	20
	2.4 Purkaus- ja loistelamput.....	20
	2.5 Vinokuormitus	21
	2.6 Oikosulkumoottorit	23
	2.7 Valokaariuunit	23
	2.8 Muut yliaaltojen lähteet	23
3	KOKONAISSÄRÖ	24
	3.1 Jännitteen kokonaissäröprosentin esimerkkilaskenta yliaaltovirroista	24
	3.2 Jännitteen kokonaissäröprosentin esimerkkilaskenta yliaaltojännitteistä.....	28
	3.3 Virran kokonaissärö	28
4	SUODATINTYYPIÄ	30
	4.1 Passiivisuodattimet	30
	4.1.1 Kapeakaistasuodatin.....	32
	4.1.2 Leveäkaistasuodatin	32
	4.2 Aktiivisuodattimet	33
	4.3 Yhdistetyt suodatusratkaisut	34
5	HENKILÖKUNNAN HAASTATTELUT.....	35
6	MITTAUKSET	37
	6.1 Mittausajankohta.....	37
	6.2 Mittauksiin osallistuneet henkilöt	37
	6.3 Mittauskalusto.....	38
	6.4 Mittausmenetelmät.....	38
	6.5 Mittaustulokset.....	38
7	MITTAUSTULOJEN ANALYSOINTI	39
8	MITTAUSRAPORTTI.....	48
9	SÄHKÖN LAADUN PARANNUSTOIMENPIDE-EHDOTUKSET.....	49
	9.1 Resonoivan äänihaitan eliminoiminen.....	49
	9.2 Harmoniset yliaallot.....	49
	9.3 Laitehankinnat ja laitekannan uusiminen	51
10	SÄHKÖN LAADUN VARMISTAMINEN PITKÄLLÄ TÄHTÄIMELLÄ	52
	10.1 Tarkastuslista	52
	10.1.1 Erot vaihekuormissa.....	52

10.1.2 Virtamittaukset.....	53
10.1.3 Välkyntä	53
10.1.4 Resonanssit.....	53
11 POHDINTA.....	55
LÄHTEET.....	57
LIITTEET	58
Liite 1. Mittausraportti	58
Liite 2. MaxSine Compact tuote-esite.....	61

LYHENTEET JA TERMIT

AC	tasasähkö
CELMA	Federation of National Manufacturers Associations for Luminaires and Electrotechnical Components for Luminaires in the European Union
DC	vaihtosähkö
harmoniset	kokonaisluvulla jaolliset yliaallot (jaollisuus: ks. kertaluku)
imupiiri	yliaallolle viritetty pieni-impedanssinen sulkeutumistie
kerrannainen	yliaaltotaajuuden ja perustaajuuden suhdeluku ($2 \dots \infty$)
kertaluku	yliaaltojen järjestysluku (ks. kerrannainen)
kokonaissärö	yliaaltosuureen osuus perusaaltosuureesta
L1	vaiheenjohtimen yksi tunnus
L2, L3	ks. L1
N	nolla- eli paluujohtimen tunnus
nollavaihekulma	aallon kulma ajanhetkellä nolla, origokeskeisillä nolla
origokeskeinen	aaltomuoto tai funktio, joka on symmetrinen origon suhteen
perusaalto	virran tai jännitteen 50 Hz taajuinen komponentti
perustaajuus	Suomen sähkönjakelujärjestelmän taajuus, 50 Hz
RMS	Root Mean Square, tehollisarvo
sähköjärjestelmä	pienjännitejakelujärjestelmä kuluttajan kiinteistössä
sähköverkko	keski- tai suurjänniteverkko, jonka omistaa yritys tai valtio
THD	Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö
UPS	keskeyttämätön sähkönsyöttöjärjestelmä
vaihesiirtokulma	funktion tai aallon siirtymä aika-akselilla
väliharmoniset	yliaallot, jotka eivät ole jaollisia kokonaisluvulla
yliaalto	perustaajuutta korkeataajuisempi aalto

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön lähtökohtana oli tutustua perusteellisesti yliaaltojen suodatukseen ja nykyaikaisiin suodatintekniikoihin sekä soveltaa hankittua tietoa tutkimuskohteessa esiintyvien yliaalto-ongelmien ratkaisemiseksi. Tutkimuskohteena toimi tamperelainen laboratorio- ja toimistokiinteistö. Tutkimuskohde on rakennettu vaiheittain 1990- ja 2000-luvuilla, joten kohteesta on selvitettävä myös jälkikäteen tehtyjen muutosten vaikutukset sähkön laatuun.

Tässä työssä ei salassapitovelvollisuuden vuoksi käsitellä erityisen yksityiskohtaisia kohdetietoja. Tutkimusten eri vaiheissa on hyödynnetty mm. nousujohto- ja keskuskaavioita, vaikka sähköpiirustuksia ei olekaan esitetty yhdessäkään luvussa. Työssä käsitellään ainoastaan tutkimustulosten esittämisen ja analysoinnin kannalta välttämättömiä kohdetietoja. Kohdetiedot on esitetty mahdollisimman yleisellä tasolla, mikäli niiden käsitteleminen tässä työssä on välttämätöntä.

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan tutkimuskohderakennuksessa työskentelevän henkilökunnan haastatteluita yliaalto-ongelmien ilmenemistavan, arveltujen sijaintien ja ilmenemisajankohtien selvittämiseksi. Lisäksi käydään läpi mahdolliset aiemmat selvitykset, joita kohteessa on tehty sähkön laadun kartoittamiseksi. Nousujohtokaavio toimii haastattelujen tukena, jotta voidaan varmistua koko rakennuksen läpikäymisen esitietoja kerätessä. Haastattelujen pohjalta tehdään mittaussuunnitelma.

Toisessa vaiheessa suoritetaan ammattihenkilöiden avustuksella sähkön laadun mittauksia mittaussuunnitelman mukaisesti. Mittaukset tehdään riittävän kattavasti ja pyritään paikantamaan mahdolliset yliaaltoja tuottavat sähköjärjestelmän osat mahdollisimman tarkasti. Tarkka yliaaltolähteiden paikannus mahdollistaa suodatuksen tehontarpeen minimoinnin, mikä puolestaan vaikuttaa suodatuskustannuksiin hintaa alentavasti.

Kolmannessa vaiheessa analysoidaan tallennetut mittaustulokset ja verrataan saatuja tuloksia haastatteluissa esille tulleisiin käyttäjänäkölmiin. Kun mittaustulokset on käyty läpi, voidaan niitä verrata standardeihin ja suorittaa tarvittavat päätelmät. Lopulta voidaan mallintaa, millä tasolla sähkön laatu on tutkimuskohteessa erityisesti yliaaltojen osalta.

Analysoinnin jälkeen selvitetään mahdolliset jatkotoimenpiteet ja pyritään löytämään teknis-taloudellisesti järkevin keino parantaa sähkön laatua ja suodattaa yliaallot. Tässä tarkastelussa on otettava huomioon, että yliaaltojen määrä voi vaihdella ajan funktiona. Tietyllä ajanhetkellä tarkasteltuna teknisesti erinomainen suodatusratkaisu voi toisella ajanhetkellä jopa heikentää sähkön laatua, mikäli suodatus ei mukaudu muuttuviin tarpeisiin.

Yliaaltojen suodatuksessa joudutaan aina tekemään kompromisseja ratkaisun hinnan ja parhaan mahdollisen suodatuksen välillä. Liian tarkka suodatus on kallis toteuttaa ja edullisimman ratkaisun suodatustarkkuus ei välttämättä riitä. On valittava sellainen suodatustaso, joka kohtuullisesti parantaa sähkön laatua tulematta liian kalliiksi laitteiston tilaajalle.

Laajassa teknis-taloudellisessa tarkastelussa tulee ottaa huomioon myös se, että yliaallot kuluttavat liiketoimitiloissa käytettäviä kalliita sähkölaitteita, jotka ikääntyvät ja voivat hajota enneaikaisesti huonolaatuisen sähkön vuoksi. Laitteiston korjaaminen ja korvaavat hankinnat tulevat kalliiksi pitkällä aikavälillä, joten riittävän laadukas yliaaltojen suodatus maksaa itsensä takaisin ajan myötä. Lisäksi tarkkuutta vaativat mittaukset, suojalaitteiden toiminta ja syöttöjännitteen, tehon tai taajuuden suhteen tarkat prosessit saattavat vääristyä tai olla epäluotettavia yliaaltojen vaikutuksesta.

Nykytekniikalla pystytään toteuttamaan suodatusratkaisuja, jotka kykenevät suodattamaan vaihtelevia yliaaltotaajuuksia ja mukautuvat suodatustarpeeseen. Tällaisia suodattimia kutsutaan aktiivisuodattimiksi. Lisäksi on olemassa passiivisuodattimia, joilla kyetään suodattamaan vain rajallinen määrä ennalta määrättyjä taajuuksia. Erilaisia suodatinratkaisuja käydään tarkemmin läpi luvussa 4, Suodatintyypit. (Alstom Grid Ltd. - verkkosivut)

Opinnäytetyön toimeksiantaja Alstom Grid on erikoistunut loistehon kompensointiin ja harmonisten yliaaltojen suodatukseseen. Alstom Gridin Tampereen tehtaalla suunnitellaan, kehitetään ja valmistetaan kompensointi- ja suodatinlaitteita ja Grid-liiketoiminta työllistää Suomessa noin 300 työntekijää. Loisteho ja yliaallot ovat osittain toisiinsa nivoutuneita käsitteitä ja siksi kattava yliaaltojen tarkastelu vaatii myös loistehon tuntemusta. Erityisesti loistehon kompensointiin käytetyt kondensaattorit saattavat muodostaa verkkoimpedanssien kanssa resonanssiipiirejä, jotka vahvistavat yliaaltoja. Mah-

dolliset loistehon kompensointilaitteet on syytä selvittää ennen yliaaltotarkastelua, jotta voidaan arvioida resonanssi-ilmiöiden todennäköisyys ja vaikutukset sähkön laatuun. (Alstom Grid-verkkosivut)

Sähkön laatua käsittelee eurooppalainen standardi EN 50160, jonka uusin, eli 4. painos on vahvistettu 22.11.2010. Suomenkielinen julkaisu on toteutettu Suomen Standardisoimisliitto SFS ry:n toimesta. Standardi määrittelee, kuvaa ja spesifioi ”jännitteen pääominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa yleisiin pien-, keski- ja suurjännitteisiin vaihtosähköjakeluverkkoihin normaaleissa käyttöolosuhteissa. Tämä standardi määrittelee rajat ja arvot, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän eurooppalaisen yleisen jakeluverkon alueella. Standardi ei kuvaa yleisesti tavallisen jakeluverkon kuluttajan keskimääräistä tilannetta.” (SFS-EN 50160:2010, 1.1 Soveltamisala.)

Asiaankuuluvissa luvuissa viitataan kyseiseen jännitestandardiin. Tässä opinnäytetyössä on otettava huomioon, että mainittu EN-standardi määrittelee vain jännitteeltä vaadittuja laatukriteereitä ja standardin vaikutusalue on rajattu kuluttajan liityntäpisteeseen. Kuluttajan kiinteistön sähköjärjestelmää ei käsitellä standardissa. On kuitenkin järkevää perustella kuluttajan sähköjärjestelmän jännitteen ominaisuuksille asetettuja laatuvaatimuksia standardin asettamien rajojen valossa. Sähkön laatua kuluttaja sähköjärjestelmässä on tarkasteltava aina tapauskohtaisesti, sillä eri sähkölaitteet asettavat erilaisia laatuvaatimuksia kuluttamalleen vaihtosähköenergialle.

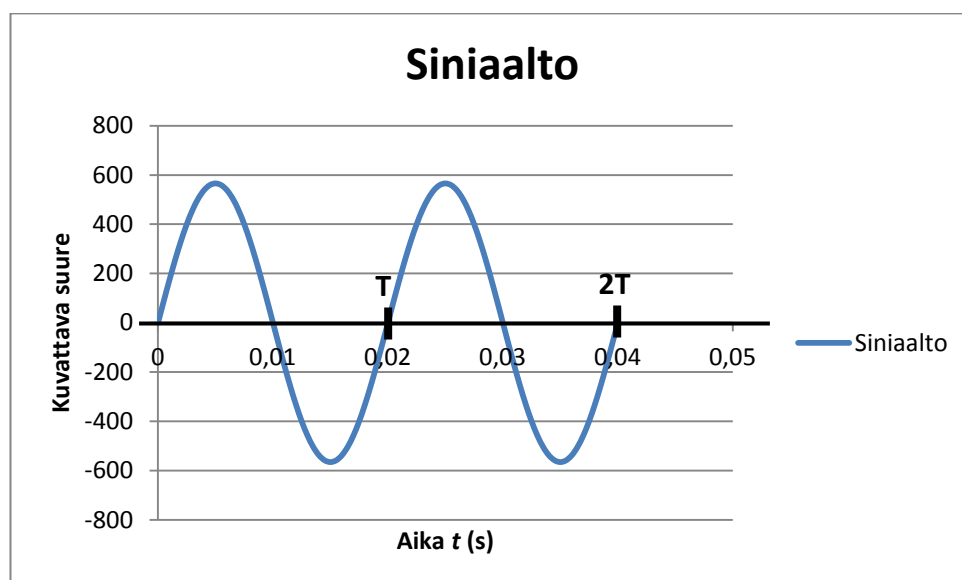
Yliaallot jakautuvat harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmonisten yliaaltojen taajuus on verkkojännitteen perustaajuuden monikerta, eli jaollinen luvulla 50. Epäharmonisten yliaaltojen taajuudet ovat harmonisten taajuuksien välistä. Lisäksi sähkön laatuun vaikuttaa ns. tasakomponentti, joka nimensä mukaisesti on vaihtosähköjännitteen tasoa nostava tasajännitekomponentti. Erilaisista jännitekomponenteista kerrotaan lisää luvussa 2 Yliaaltojen suodatus.

2 YLIAALTOJEN SYNTY

Vaihtovirran- ja jännitteen käyrämuodot ovat ideaalitalanteessa täysin sinimuotoisia. Suomen sähköjakelujärjestelmä toimii 50 hertsin (Hz) taajuudella, mikä tarkoittaa että yhden sekunnin aikana sinimuotoisen aallon identtiset jaksot toistuvat 50 kertaa. (Yliaallot ja kompensointi, s. 26-27.)

Yliaallot jaetaan edelleen harmonisiin ja väliharmonisiin yliaaltoihin. Harmoniset yliaallot ovat taajuudeltaan perusaallon, eli 50 hertsin taajuuden monikertoja. Väliharmonisten yliaaltojen taajuudet jäävät harmonisten taajuuksien väliin, eli eivät ole perustaajuuden kokonaislukumonikertoja.

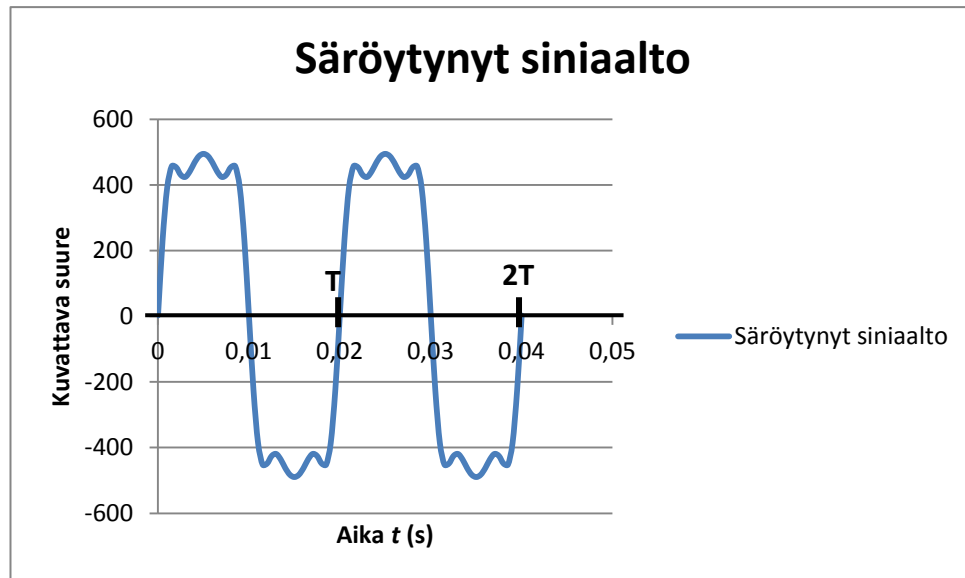
Kuvassa 1 on esitetty puhdas 50 hertsin taajuinen siniaalto, joka muodostaa kaksi identtistä jaksoa. T kuvaa jaksonaikaa ja sen yksikkö on sekunti. Jaksonaika T ja taajuus f ovat toistensa käänteissuureita, mistä seuraa että 50 hertsin taajuisen aallon jaksonaika on 20 millisekuntia. Kuvatun funktion positiiviseksi huippuarvoksi on valittu 565 ja tehollisarvoksi 400. Kuvan 1 siniaalto on origokeskeinen.



Kuva 1 Siniaalto

Kuvassa 2 on esitetty säröytynyt eli yliaaltojen vääristämä siniaalto. Tästä kuvasta huomataan, että aalto ei ole enää sinimuotoinen. Sekä positiivinen että negatiivinen puolijakso sisältää useamman positiivisen ja negatiivisen derivaatan. Yliaallot ovat perus-

taajuista aaltoa korkeataajuisempia siniaaltoja, jotka summautuessaan perusaaltoon muodostavat yhden, epäsinimuotoisen aallon. Kuvassa 2 on esitetty vain esimerkki yliaaltojen korruptoimasta aaltomuodosta.



Kuva 2 Säröytynyt siniaalto

Erilaiset yliaaltopitoisuudet muovaavat siniaaltoa eri tavoin. Joissain tapauksissa osa kummastakin puolijaksosta saattaa muuttua tai amplitudi pienentyä aallon harjan leikkautuessa pois kokonaan tai osittain. Läheskään aina yliaallot eivät käyttydy niin säännönmukaisesti, että aaltomuoto pysyisi jaksosta toiseen samanlaisena. Mitä enemmän yliaallot vaihtelevat, sitä vaikeampi niitä on suodattaa. Moderneilla aktiivisuodattimilla tämä on kuitenkin mahdollista. (Alstom Grid Ltd. -verkkosivut)

Kaikkissa sähköjärjestelmissä on osia, jotka vääristävät jännitteen ja virran aaltomuotoa. Virta ja jännitte voidaan aina esittää matemaattisesti funktiona. Ideaaltilanteessa jännitteen käyrämuoto on esitettävissä yhdellä, kaavan 1 mukaisella sinifunktiolla, joka pätee kaikkina ajanhetkinä.

$$U = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (\text{Kaava 1})$$

, jossa

U on jännitteen tehollisarvo [V]

\hat{u} on jännitteen huippuarvo [V]

ω on kulmataajuus $\left[\frac{1}{s}\right]$

φ on vaihesiirtokulma asteina

Vastaavasti ideaalitalanteessa virran käyrämuoto on esitettävissä yhdellä, kaavan 2 mukaisella sinifunktiolla.

$$I = \hat{i} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (\text{Kaava 2})$$

, jossa

I on jännitteen tehollisarvo [A]

\hat{i} on jännitteen huippuarvo [A]

Lisäksi kulmataajuus ω on esitettävissä kaavalla 3.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (\text{Kaava 3})$$

, jossa

f on taajuus [Hz]

Ideaalitalanteesta poikkeava, säröytynyt virta tai jännite voidaan jakaa komponentteihin: perustaajuiseen komponenttiin ja perustaajuudesta poikkeaviin komponentteihin. Jakamalla säröytynyt siniaalto tekijöihin voidaan matemaattisesti mallintaa aallon säröytymää ja ymmärtää paremmin sen vaikutuksia sähköverkkoon. Säröytynyt jännite ja virta koostuu kaavoilla 1 ja 2 kuvatun perusaallon lisäksi tapauskohtaisesti yhdestä tai useammasta seuraavista komponenteista:

- harmonisista yliaalloista
- väliharmonisista yliaalloista
- tasakomponentista

Kun perusaalto summautuu yhteen minkä tahansa tai useamman edellä mainitun kolmen komponentin kanssa, syntyy ideaalitalanteesta poikkeava aaltomuoto. Tasakomponentti nostaa jännitteen tai virran tasoa jännite/aika- tai virta/aika –kuvaajassa ja yliaallot muuttavat aallon muotoa eri tavoin.

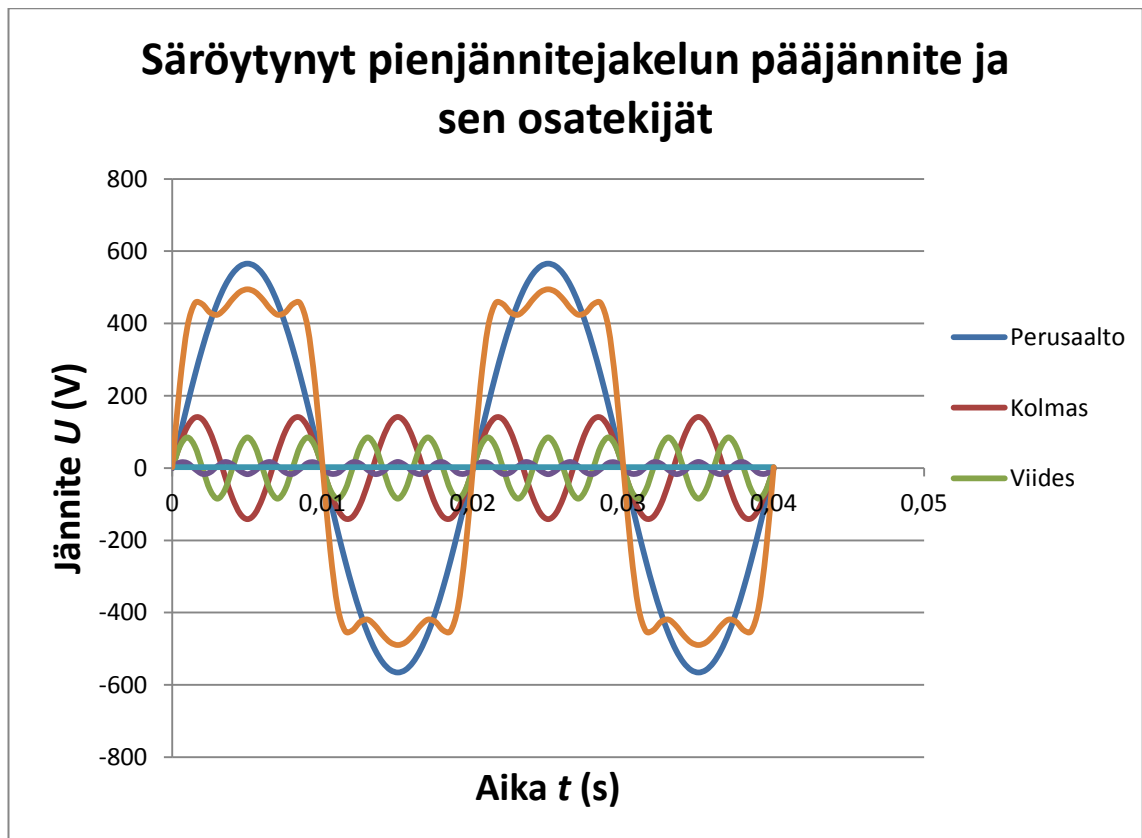
Yliaallot erotellaan toisistaan ns. järjestysluvun perusteella. Järjestysluku saadaan jakamalla yliaaltotaajuus (> 50 Hz) perustaajuudella (50 Hz). Erityisesti moottorikäyttöihin ja niiden magneettikenttiin liittyen yliaallot jaetaan negatiivisiin, positiivisiin tai nolaluokituksiin sen mukaan, mikä yliaallon vaihejärjestys on perustaajuuteen nähden. Posi-

tiivisella luokituksella magneettikentän pyörimissuunta on eteenpäin, eli sama kuin perusaallolla, mikä aiheuttaa mm. moottoreiden lisälämpenemistä. Negatiivisella luokituksella magneettikentän pyörimissuunta on päinvastainen kuin perusaallolla, mistä johtuen yliaallot aiheuttavat lisähäviöitä sähkökäytöissä. Nollaluokituksen omaavilla yliaalloilla vaihejärjestys on kaikilla vaiheilla sama, joten yliaallon eivät pyöri, mutta summautuvat nollajohtimeen ja kuormittavat sitä. Taulukossa 1 on havainnollistettu yliaaltojen nimeämiskäytäntöä ja ominaisuuksia. (Yliaallot ja kompensointi, s. 35)

Taulukko 1 Yliaaltojen nimeäminen (Yliaallot ja kompensointi, taulukko 4.2)

Yliaallon nimi:	(Perustaajuus)	toinen	kolmas	neljäs	viides	kuudes	...	yhdeksäs	n:nnes
Yliaallon järjestysluku:	1	2	3	4	5	6	...	9	n
Yliaallon taajuus:	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz	...	450 Hz	n · 50 Hz
Komponenttijako:	+	-	0	+	-	0	...	0	...

Tasakomponentti on matemaattisessa mielessä luku, joka summataan sellaisenaan kaavaan 1 tai 2. Yliaaltokomponenteista muodostetaan kaavan 1 ja 2 kaltainen funktio, jonka kulmataajuus eroaa perusaallon kulmataajuudesta. Kuvassa 3 on esitetty jännitteen aaltomuoto, kun se sisältää perusaallon lisäksi kolmatta (150 Hz), viidettä (250 Hz) ja seitsemättä (350 Hz) yliaaltoa sekä pienen tasakomponentin. Tilanteen havainnollistamiseksi samaan kuvaan on piirretty kaikki edellä mainitut tekijät, jotka summautuneena muodostavat säröytyneen jännitteen. Summattu kokonaisjännite erottuu perusaallosta ja yliaalloista aaltomuotonsa perusteella.



Kuva 3 Säröytynyt jännite ja sen osatekijät

Esimerkkikuvassa 3 yliaaltokomponenttien amplitudit on valittu satunnaisina prosentiosuuksina perusaallon amplitudista siten, että taajuuden kasvaessa yliaallon amplitudi pienenee. Myös todellisissa tilanteissa yliaaltojen suhteellinen arvo perusaaltoon nähden pienenee taajuuden kasvaessa. Hyvin suuritaajuisien yliaaltojen amplitudit ovat tavallisesti vain murto-osan suuruisia perusaallon amplitudiin verrattuna. Kuvan 3 perusaallon amplitudi on 566 ja tehollisarvo 400 voltia, mikä vastaa Suomessa pienjännitejärjestelmien pääjännitteen ominaisuuksia. Tämänkaltaisessa yleisessä pienjännitejärjestelmässä vaihejännitteen tehollisarvo on 230 voltia. Kuvan 3 harmonisilla yliaalloilla ei ole vaihesiirtoa φ perusaaltoon nähden, joten ne ovat origokeskeisiä. Kuvan 3 käyrien funktiot ovat seuraavanlaisia:

Perusaalto:

$$U_1 = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t) = 400 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot t) \text{ V} \quad (1)$$

Kolmas yliaalto:

$$U_3 = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t) = 0,25 \cdot 400 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 150 \text{ Hz} \cdot t) \text{ V} \quad (1)$$

Viides yliaalto:

$$U_5 = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t) = 0,15 \cdot 400 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 250 \text{ Hz} \cdot t) \text{ V} \quad (1)$$

Seitsemäs yliaalto:

$$U_7 = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t) = 0,06 \cdot 400 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 350 \text{ Hz} \cdot t) \text{ V} \quad (1)$$

Tasajännitekomponentti:

$$U_0 = 2,5 \text{ V}$$

Yliaaltoja syntyy minkä tahansa tarkastellun sähköverkon tai -järjestelmän epälineaarisissa osissa. Tällaisia verkon osia ovat mm. tehoelektroniikkaa hyödyntävät moottori-käynnistimet ja säädetyt sähkökäytöt. (Yliaallot ja kompensointi, 4 Yliaallot ja sähkön laatu.)

Puhtaan resistiivisessä sähköjärjestelmässä jännite ja virta ovat samanvaiheisia. Puhtaan resistiivisiä sähköjärjestelmiä ei kuitenkaan käytännössä ole olemassa mm. sen vuoksi, että johtimet eivät ole pistemäisiä. Kaikilla johtimilla on jokin pituus, jolloin esiintyy resistanssin lisäksi myös induktanssia. Pääasiassa induktiiviset sähköjärjestelmät ja loistehon kompensoinnissa käytetyt kondensaattoriparistot saattavat muodostaa haitallisia resonanssipiirejä, joilla on potentiaalia vahvistaa yliaaltoja moninkertaisiksi. (Yliaallot ja kompensointi, 4 Yliaallot ja sähkön laatu.)

Yleisimpiä yliaallolähteitä ovat puolijohdetekniikkaa hyödyntävät suuntaajat, tyristori-kytkimet, tietokoneissa käytetyt hakkuriteholähteet, purkaus- ja loistelamput, oikosulkumoottorit, valokaariuunit sekä vinokuormitus, eli kuormitusero vaiheiden välillä. Lisäksi muuntajat ja generaattorit ovat yliaaltojen lähteitä, mistä johtuen kaikissa sähköverkoissa jännitteen aaltomuoto poikkeaa hieman siniaallosta. (Yliaalto-opus)

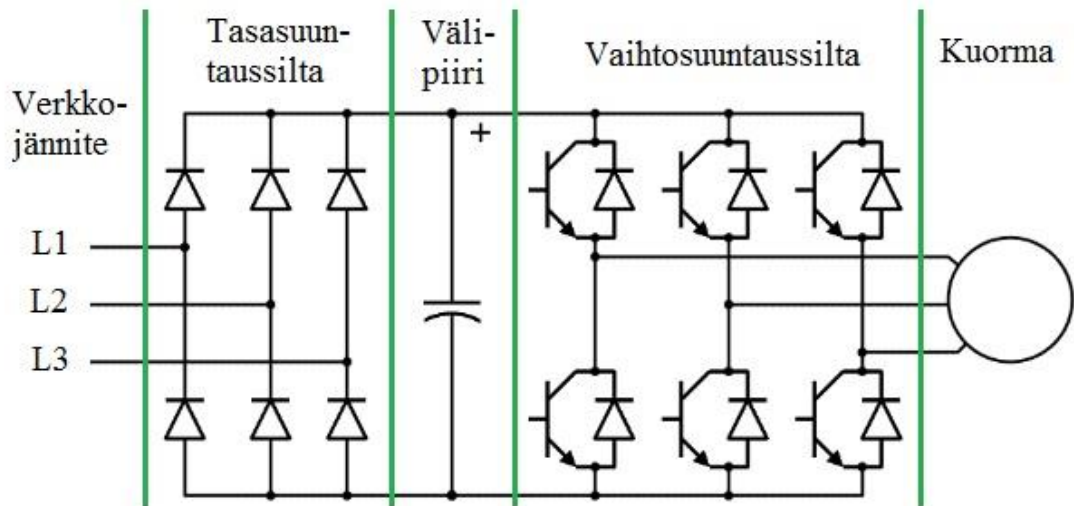
Seuraavissa luvuissa on selitetty tarkemmin yliaallolähteitä ja arvioitu niiden osuutta kohderakennuksen yliaallolähteinä. Myös muita kuin tässä työssä mainittuja yliaallolähteitä on olemassa, mutta kaikkia ei ole työn laajuuden ja tavoitteiden kannalta järkevää käsitellä erikseen.

2.1 Suuntaajat

Suuntaaja on yleisnimitys taajuusmuuttajista, joita käytetään jännitteen, virran tai taajuuden muuttamiseen. Vaihtosuuntaajan ulostulosta saadaan vaihtosähköä ja vastaavasti tasasuuntaajan ulostulosta tasasähköä. Suuntaajissa käytetään mm. puolijohdetekniikkaa, jolle on ominaista tuottaa yliaaltoja. Suuntaajat aiheuttavat verkkosuureiden säröytymistä, koska ne ottavat verkosta epäsinimuotoista virtaa. Tämä aiheuttaa verkkoimpedanssien vuoksi myös jänniteyliaaltoja eli jännitteen vääristymistä sinimuodosta. (Yliaalto-opus, 2 Yliaaltojen lähteet.)

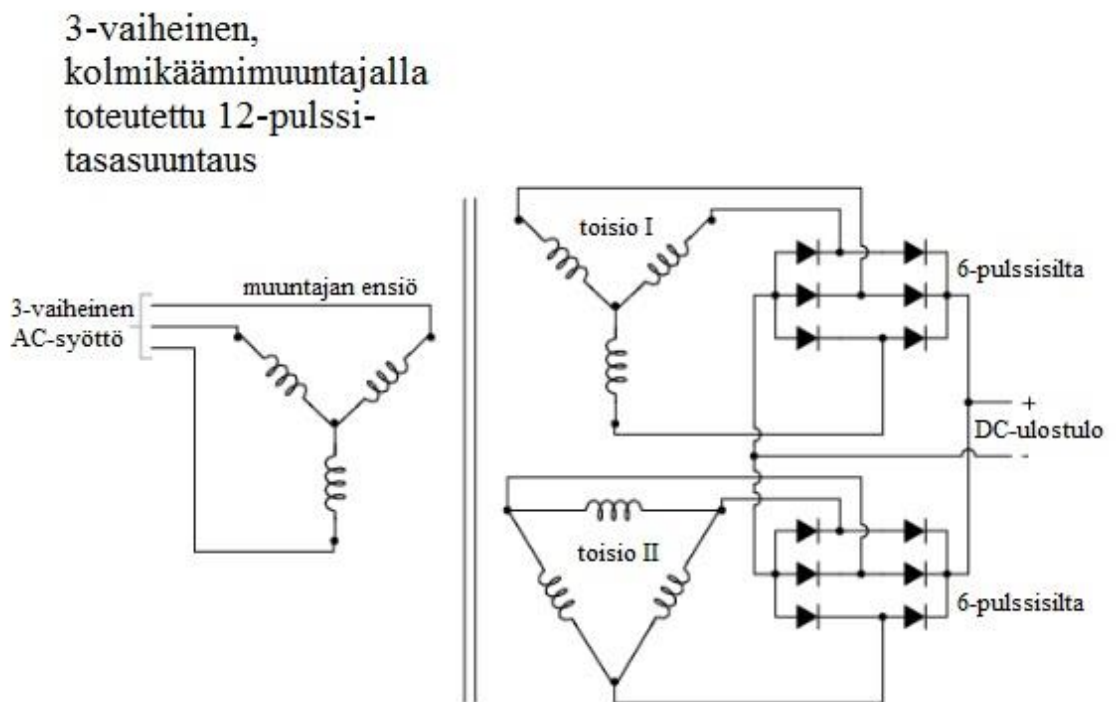
Taajuusmuuttaja koostuu yleensä tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. On olemassa myös suoria taajuusmuuttajia, joissa välipiiriä ei ole lainkaan. Taajuusmuuttajien yleisempiä komponentteja ovat mm. diodit, IGBT -transistorit, kelat, kondensaattorit sekä vastukset. (Taajuusmuuttajat, ABB, Antti Hedman 2009.)

Tasasuuntaaja voidaan toteuttaa diodisillalla, jonka tehtävänä on tehdä AC/DC-muunnos. Välipiirin tehtävä on toimia energiavarastona ja tasoittaa tasajännitteen muutoksia. Välipiirillinen taajuusmuuttaja voi olla joko jännite- tai virtavälipiirillinen. Virtavälipiirissä energiavarastona toimii induktanssi eli kela, kun taas jännitevälipiiri on yleisesti toteutettu kondensaattoripatterilla. Edellä mainittujen komponenttien lisäksi välipiirissä voidaan käyttää vastusta, mikäli kytkentä sitä vaatii. Vaihtosuuntaaja toteutetaan yleisesti IGBT -transistoreilla, joiden muodostama silta tekee DC/AC-muunnoksen. Suuntaajien yleisrakenne on esitetty kuvassa 4. (Taajuusmuuttajat, ABB, Antti Hedman 2009.)



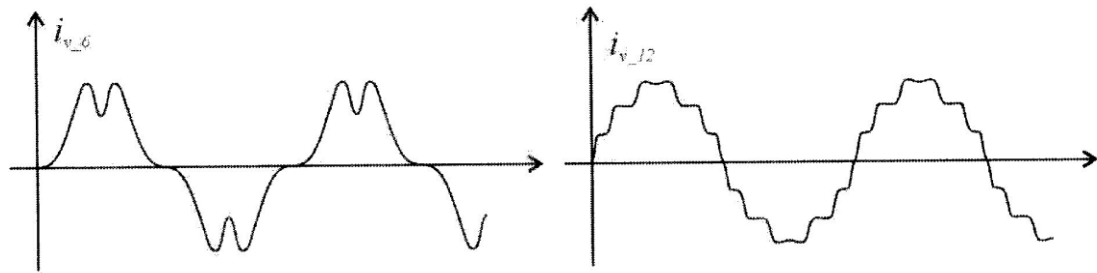
Kuva 4 Taajuusmuuttajan yleisrakenne (Taajuusmuuttajat, ABB, Antti Hedman 2009.)

Kuvan 4 taajuusmuuttaja on toteutettu 6-pulssisillalla. Mikäli halutaan minimoida taajuusmuuttajan aiheuttamat yliaaltorasitukset, tulee taajuusmuuttajan pulssilukua kasvattaa. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi käyttämällä useampaa kuusipulssisillaa, joita syötetään kolmekäämimuuntajilla kuvan 5 mukaisesti. Muuntajan toisiot kytketään siten, että järjestelmien välillä on 30° vaihe-ero. (Teollisuuden sähkökäytöt, s. 243)



Kuva 5 12-pulssitasasuuntaus kolmikäämimuuntajalla ja 6-pulssisilloilla (ABB, Antti Hedman 2009)

Kuvan 5 mukaisen 12-pulssitasasuuntaajan tuottaa huomattavasti vähemmän yliaaltoja kuin 6-pulssinen tasasuuntaus, sillä kytkentätaajuus on korkeampi. Kuvassa 6 on esitetty 6-pulssisillan ja 12-pulssisillan verkosta ottamat virrat. Huomataan, että 12-pulssisillan ottama virta on huomattavasti 6-pulssisillan verkkovirtaa sinimuotoisempi, vaikka porrastusta on edelleen jonkin verran.



Kuva 6 6-pulssisillan (vas.) ja 12-pulssisillan (oik.) verkosta ottama virta (Teollisuuden sähkökäytöt, kuva 10.22)

Diodit ovat sillassa johtavassa tilassa vuorotellen ja mitä enemmän diodeja on tasasuuntaussillassa, sitä korkeampi on kytkentätaajuus ja edelleen sinimuotoisempi verkkovirta. Mikäli yliaaltoja halutaan vähentää entisestään 12-pulssisillan tapauksesta, voidaan käyttää 24-pulssitasasuuntausta. Tämä toteutetaan siten, että 12-pulssikytkennän rinnalle kytketään toinen vastaava kolmikäämimuuntaja 12-pulssitasasuuntauksella, mutta jälkimmäisen muuntajan ensiö kytketään kolmioon. Ensimmäisen muuntajan ensiö kytketään tähteen, kuten kuvassa 5.

Kohderakennuksessa on runsaasti taajuusmuuttajakäyttöjä eri puolilla verkkoa, kuten teollisuudelle ja laboratorioille on tyypillistä. Taajuusmuuttajia käytetään, jos halutaan esimerkiksi muuttaa jännite sähkölaitteelle sopivaan tasoon tai säätää moottorin pyörimisnopeutta portaattomasti. Lisäksi suuntaajilla voidaan toteuttaa vaihto- tai tasasuuntausta. Suuntaajilla on erilaisia ominaisuuksia ja ne eroavat toisistaan rakenteellisesti, mistä johtuen suuntaajien tuottamat yliaallot vaihtelevat runsaasti.

2.2 Tyristorikytkimet

Tyristorit ovat kytkimiä, joita ohjataan johtavaan tilaan ohjauskulmaa muuttamalla. Tyristoreita käytetään mm. säätämään tasavirtamoottorien nopeutta ja resistiivisiä kuormia, kuten lämpövastuksia ja suuria kuivaimia. Tyristorisilloilla on mahdollista toteuttaa tasa- ja vaihtosuuntaus. Tyristorisillat koostuvat useammasta tyristorista, joiden ohjauskulmaa pyritään säätämään samanaikaisesti. Suuntaajissa käytetään tyristorisiltoja, joten niitä on runsaasti myös analysoitavassa sähköverkossa. (Yliaalto-opus, 2 Yliaaltojen lähteet.)

2.3 Hakkuriteholähteet

Hakkuriteholähteiden suurin käyttökohde on sähköön muuntaminen sopivaksi tietokoneelle. Tietokoneen sisäiset virtapiirit toimivat tasasähköllä, joten verkosta otettava vaihtosähkö on muunnettava hakkuriteholähteellä tasasähköksi. Tietokoneet ottavat virtaa, jonka perusaalto, eli 50 Hz taajuinen jännitekomponentti, on pienentynyt ja aaltomuoto sisältää runsaasti yliaaltoja. (Yliaalto-opus, 2 Yliaaltojen lähteet.)

Kohderakennuksessa työskentelee enimmillään tuhansia ihmisiä, joten kiinteistön verkkoon on kytkettyneenä erittäin paljon tietokoneita. Tekniikan alalla kannettavat tietokoneet ovat yleisiä liikkuvan työ vuoksi, joten tietokoneet kuormittavat verkkoa eri aikoina eri tavalla. Näin ollen myös hakkuriteholähteiden aiheuttama yliaaltopitoisuus muuttuu jatkuvasti. Muutokset ovat haasteellisia, mikäli halutaan saada eri ajanhetkien kesken vertailukelpoisia mittaustuloksia. Hypoteesini on, että pistorasiaryhmät, joihin on yhdistettynä paljon tietokoneita, ovat merkittävä yliaaltojen syntyisija.

2.4 Purkaus- ja loistelamput

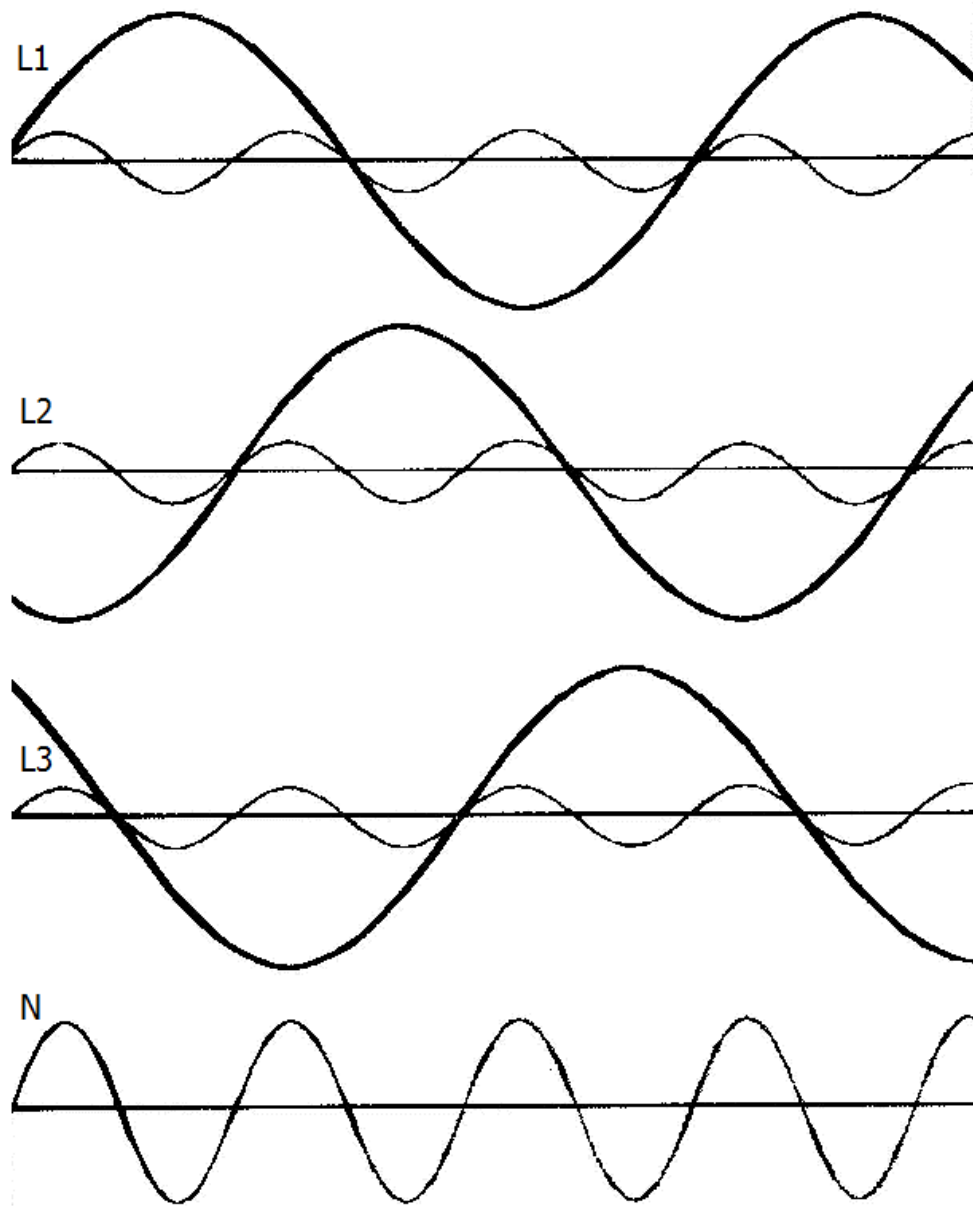
Kohderakennuksen valaistus muodostuu sadoista, ellei tuhansista valaisimista. Kiinteistössä suorittamieni haastattelujen aikana kiinnitin huomiota, että rakennuksessa on käytetty paljon loistevalaisimia. Loistevalaisinten virtaa tulee rajoittaa ja nykyaikaisissa valaisintuotteissa se toteutetaan yleensä elektronisilla liitäntälaitteilla. Liitäntälaitteet toimivat vaihtosuuntauksella, joka aiheuttaa runsaasti yliaaltoja. Tämä on yleisesti tun-

nustettu ilmiö ja siksi standardit vaativat, että tuotteisiin liitetään paikallinen yliaaltojen suodatus. Loistevalaisinten tuottamista yliaalloista säädetään standardissa IEC 555-2. Loistevalaisimia koskevat standardit eivät kuitenkaan säätele millään tavalla ns. pienoiskoistevalaisimia. Kohderakennuksessa tätä standardivapaata valaisintyyppiä on käytetty runsaasti. (Yliaalto-opus, 2 Yliaaltojen lähteet.)

Hypoteesini mukaan rakennuksessa yliaaltoja aiheuttaa merkittävästi myös valaisinryhmät, sillä pienoiskoistelamppujen käyttö on melko yleistä. Pienoiskoistelampuissa ei välttämättä ole lainkaan yliaaltojen suodatusta, koska standardit eivät sitä vaadi. Pienessä kiinteistössä suodattamattomat pienoiskoistevalaisimet liitännälaitteineen eivät välttämättä säröytä verkkosuureita merkittävästi, mutta mittauskohteenani toimiva liiketoimirakennus on suuri ja valaisinten määrä saattaa nostaa pienoiskoistevalaisinten yliaalto-tilasituksia.

2.5 Vinokuormitus

Kolmivaiheisen sähköverkon epäsymmetrinen kuormitus synnyttää kolmannen järjestyksluvun yliaaltoja. Kolmella jaolliset yliaallot lisäävät nollajohtimen kuormitusta, mikä on selitettävissä kolmivaihejärjestelmän vaiheiden välisellä 120 asteen vaihesiirrolla. Normaalin verkkotaajuuden (50 Hz) omaavat siniaallot kumoavat toisensa, eivätkä summaudu nollajohtimeen, mutta kolminkertaisella nopeudella aaltoileva yliaalto kertaantuu nollajohtimeen. Tämä johtuu siitä, että kolmella jaolliset yliaallot ovat kaikki samanvaiheisia, kuten kuvasta 7 näkyy. (Yliaallot ja kompensointi, 4.3.2 Nollajohtimen kuormittuminen.)



Kuva 7 Kolmannen yliaallon summautuminen nollajohtimeen (Yliaallot ja kompensointi, kuva 4.6)

Yliaalloilta ei siis voida välttyä pelkästään suodattamalla jokaisen kuormalaitteen tuottamat yliaallot ja huolehtimalla verkkoa syöttävän muuntajan tuottamasta aaltomuodosta, mikäli kolme vaihetta kuormitetaan epätasaisesti. Kohderakennuksen sähköverkon mittauksissa tullaan tästä syystä kiinnittämään erityistä huomiota myös vaihejärjestelmän symmetriaan. (Yliaallot ja kompensointi, 4.3.2 Nollajohtimen ylikuormittuminen.)

2.6 Oikosulkumoottorit

Saamieni tietojen mukaan kohderakennuksessa on melko vähän moottorikäyttöjä. Tähän yliaaltolähteeseen en tule siksi kiinnittämään paljoa huomiota opinnäytetyössäni. Täydellistä laitelistausta minulla ei ole kohderakennuksen sähköverkkoon liitetyistä laitteista, mikä johtuu rakennuksen käyttötarkoituksesta. Rakennuksen sähköverkkoon kytetään kiinni ja siitä irrotetaan laitteita jatkuvasti, eikä tiettyä säännönmukaisuutta ole olemassa. Lisäksi rakennuksessa on tutkimus – ja tuotekehitystoimintaa, minkä vuoksi tieto on salaista ja tarkoin säänneltyä.

2.7 Valokaariuunit

Valokaariuuneja ei saamieni tietojen mukaan käytetä tutkimuskohteenani toimineessa rakennuksessa. En tule tähän yliaaltolähteeseen kiinnittämään paljoa huomiota opinnäytetyössäni samoista syistä kuin kohdassa 2.6 on selitetty oikosulkumoottoreista.

2.8 Muut yliaaltojen lähteet

Kohderakennuksen muuta kuormitusta käsitellään tarpeen mukaan myöhemmissä osi-
oissa. Tässä kohtaa on kuitenkin jo järkevää mainita, että rakennuksessa on runsaasti
testikäyttöjä ja mittausprosesseja, jotka on erotettava muun rakennuksen sähköverkosta
häiriöiden minimoimiseksi. Tähän tarkoitukseen käytetään mm. alipäästösuodattimia,
jotka rakentuvat kondensaattoreista ja vastuksista. Alipäästösuodattimien kapasitanssit
voivat aiheuttaa resonanssi- ja muun sähköverkon impedanssin kanssa ja voimistaa
yliaaltovirtoja ja -jännitteitä. (Yliaallot ja kompensointi, 4.2 Yliaaltojen aiheuttajia.)

3 KOKONAISSÄRÖ

Jännitteen säröytymistä on järkevää tarkastella kokonaissärönä. Kokonaissärö ilmoitetaan usein prosentteina perusaallosta, koska suhteellisia arvoja on helppo verrata standardeihin ja olemassa oleviin mittaustuloksiin riippumatta absoluuttisista arvoista. Kokonaissäröprosentti on mahdollista mitata tai laskea. Mittalaitteella voidaan tarkastella kokonaissärön lisäksi myös yksittäisten yliaaltotaajuuksien suuruusluokkia.

Kokonaissärö voidaan määrittää laskennallisesti, mikäli sähköjärjestelmän yliaaltokomponentit saadaan ensin selvitettyä riittävän tarkasti. Yliaaltokomponenttien selvittäminen vaatii sähköjärjestelmän tuntemista. (Yliaallot ja kompensointi, s. 29.)

Tässä opinnäytetyössä kokonaissäröprosentti on mitattu, sillä kohderakennuksen sähköjärjestelmää on erittäin haastavaa mallintaa riittävän tarkasti. Kohderakennuksessa on tuhansia sähkölaitteita, kymmeniä sähkökeskuksia ja verkon kuormitus vaihtelee koko ajan. Kohteessa harjoitettava liiketoiminta vaatii lisäksi erittäin suuren määrän erityyppisiä sähkölaitteita.

Teorian selventämiseksi käsittelen kuitenkin laskentamallin, jolla kokonaissäröprosentti voidaan laskea tunnetuista yliaaltokomponenteista. Olipa sähköjärjestelmästä tiedossa yliaaltovirrat tai -jännitteet, jännitteen kokonaissäröprosentin laskenta on mahdollista suorittaa tietyin ehdoin: yliaaltovirtojen lisäksi tarvitaan tieto sähköjärjestelmän reaktanssista, yliaaltojännitteillä laskenta voidaan suorittaa ilman lisätietoja. (Yliaallot ja kompensointi, 4.4 Yliaaltojen määrittäminen laskennallisesti.)

3.1 Jännitteen kokonaissäröprosentin esimerkkilaskenta yliaaltovirroista

Ensin tulee selvittää tarkasteltavan sähköjärjestelmän osan, kuten laitetta/laitteita syöttävän kiskoston tai kaapelin perustaajuinen virta. Tämä voidaan mitata esimerkiksi riittävän kapasiteetin omaavalla virtamittarilla. Seuraavaksi täytyy selvittää kunkin vaikuttavan virtayliaallon suuruus esimerkiksi mittaamalla sähkön laatumittauksiin tarkoitetulla laitteella. Virtayliaalloista halutaan tietää absoluuttiset tehollisarvot, mutta ne voidaan laskea myös virtayliaallon ja perusaallon suhteesta. Mittauslaitteistosta riippuen mitta-

ustulokset saattavat olla sekä absoluuttisia että suhteellisia arvoja. (Yliaallot ja kompensointi, 4.4 Yliaaltojen määrittäminen laskennallisesti.)

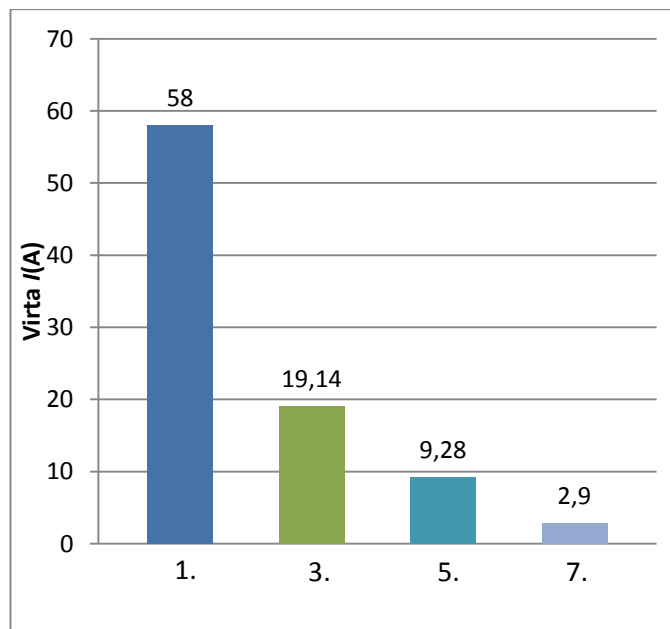
Kaikki tämän kappaleen laskuesimerkissä käytetyt sähköisten suureiden, kuten virran tai reaktanssin arvot ovat satunnaisesti valittuja esimerkkiarvoja, ellei toisin mainita. Arvot on valittu mittauksissa ja kirjallisuuslähteissä esiintyvien arvojen suuruusluokkaa vastaavaksi, jotta ne olisivat suuntaa antavia todellisen tilanteen laskentaa varten.

Laitteen/laitteiden ottama verkkotaajuinen virta I_l on 58,0 A.

Lisäksi tiedetään, että kyseisen sähköjärjestelmän osassa on kolmatta, viidettä ja seitsemättä virtayliaaltoa seuraavasti:

- 3. virtayliaallon suhteellinen arvo: 33%
- 5. virtayliaallon suhteellinen arvo: 16 %
- 7. virtayliaallon suhteellinen arvo: 5 %

Virrat on piirretty kuvaan 8.



Kuva 8 Perustaajuinen virta ja yliaaltovirrat

Lasketaan virtayliaallojen suuruudet kertomalla perustaajuista virtaa edellä mainituilla prosentiosuuksilla:

$$3. \text{ virtayliaallon absoluuttinen arvo: } I_3 = 0,33 \cdot I_1 = 0,33 \cdot 58,0 \text{ A} = 19,1 \text{ A}$$

$$5. \text{ virtayliaallon absoluuttinen arvo: } I_5 = 0,16 \cdot I_1 = 0,16 \cdot 58,0 \text{ A} = 9,3 \text{ A}$$

$$7. \text{ virtayliaallon absoluuttinen arvo: } I_7 = 0,05 \cdot I_1 = 0,05 \cdot 58,0 \text{ A} = 2,9 \text{ A}$$

Virtayliaalto saa aikaan jänniteylian, kun se kulkee tietyn reaktanssin läpi. Virtayliaallolle ominainen reaktanssi on tarkastellun sähköjärjestelmän osan reaktanssin X_l monikerta tai osa. Kertojan tai jakajan suuruus määräytyy tarkastellun virtayliaallon taajuuskerrannaisen mukaan, sillä ainoa muuttuva tekijä reaktanssissa on taajuus. Mikäli tarkastellun sähköjärjestelmän osan reaktanssi on induktiivinen, jänniteyliaaltoja virtayliaallon vaikutuksesta tuottava reaktanssiarvo saadaan laskettua kertomalla tarkastellun sähköjärjestelmän osan reaktanssia yliaallon kerrannaisluvulla. Induktiivisen reaktanssin laskenta on esitetty kaavassa 4 ja siitä näkyy, että taajuuden kasvaessa reaktanssiarvo kasvaa.

$$X = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (\text{Kaava 4})$$

, jossa

X on reaktanssi (Ω)

L on induktanssi (H)

Mikäli tarkastellun sähköjärjestelmän osan reaktanssi on kapasitiivinen, jänniteyliaaltoja virtayliaallon vaikutuksesta tuottava reaktanssiarvo saadaan laskettua jakamalla tarkastellun sähköjärjestelmän osan reaktanssia yliaallon kerrannaisluvulla. Kapasitiivisen reaktanssin laskenta on esitetty kaavassa 5 ja siitä näkyy, että taajuuden kasvaessa reaktanssiarvo pienenee.

$$X = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (\text{Kaava 5})$$

, jossa

C on kapasitanssi (F)

Esimerkkilaskennan sähköjärjestelmän osan reaktanssi X_l on $0,25 \Omega$ induktiivista. Koska kyseessä on induktiivinen kuorma, reaktanssia X_l kerrotaan yliaallon kerrannaisella. Jänniteylian synnyttävät reaktanssit on laskettu alla.

3. yliaallon kanssa vaikuttava reaktanssi: $X_3 = 3 \cdot X_1 = 3 \cdot 0,25 \Omega = 0,75 \Omega$

5. yliaallon kanssa vaikuttava reaktanssi: $X_5 = 5 \cdot X_1 = 5 \cdot 0,25 \Omega = 1,25 \Omega$

7. yliaallon kanssa vaikuttava reaktanssi: $X_7 = 7 \cdot X_1 = 7 \cdot 0,25 \Omega = 1,75 \Omega$

Kun on tiedossa yliaaltovirran ja niitä vastaavat reaktanssit, voidaan jänniteyliaallot laskea ohmin lain mukaan seuraavasti:

3. jänniteyliaalto: $U_3 = I_3 \cdot X_3 = 19,1 \text{ A} \cdot 0,75 \Omega = 14,3 \text{ V}$

5. jänniteyliaalto: $U_5 = I_5 \cdot X_5 = 9,3 \text{ A} \cdot 1,25 \Omega = 11,6 \text{ V}$

7. jänniteyliaalto: $U_7 = I_7 \cdot X_7 = 2,9 \text{ A} \cdot 1,75 \Omega = 5,1 \text{ V}$

Kun jänniteyliaallot on selvitetty, voidaan laskea kokonaissäröprosentti THD%.

$$THD\% = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100 \% \quad (\text{Kaava 6})$$

, jossa

$THD\%$ on kokonaissäröprosentti (%)

n on yliaallon kertaluku väliltä $2 \dots \infty$

U_n on yliaaltojännite

U_1 on perustaajuinen jännite

Sijoittamalla jännitearvot kaavaan 6 saadaan laskettua kokonaissäröprosentti esimerkkitapauksessa.

$$\begin{aligned} THD\% &= \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100 \% = \sqrt{\frac{U_3^2 + U_5^2 + U_7^2}{U_1^2 / \sqrt{3}^2}} \cdot 100 \% \\ &= \sqrt{\frac{(14,3 \text{ V})^2 + (11,6 \text{ V})^2 + (5,1 \text{ V})^2}{(400 \text{ V})^2 / \sqrt{3}^2}} \cdot 100 \% = 8,3 \% \quad (6) \end{aligned}$$

3.2 Jännitteen kokonaissäröprosentin esimerkkilaskenta yliaaltojännitteistä

Mikäli tiedossa on yliaaltojännitteet, voidaan kappaleessa 3.1 esitetyn laskennan alkuvaiheet jättää väliin ja laskea suoraan kokonaissäröprosentti kaavalla 6. Tällöin säästetään ylimääräiseltä työltä.

3.3 Virran kokonaissärö

Kokonaissäröprosentti lasketaan yleensä vain jännitteelle, koska standardit eivät puutu virtayliaaltoihin. Merkittävä sähkön laatua käsittelevä standardi on nimeltään EN 50160 ja sen suomenkielisestä julkaisusta vastaa SFS. Virtayliaallot eivät ole yksinään kovin merkityksellisiä. Vaikka niitä esiintyy melko paljon, vain osa niistä muodostaa jänniteyliaaltoja verkkoimpedanssien vaikutuksesta. Mikäli ei erikseen ole määritelty syytä selvittää kokonaissäröprosenttia myös virroille, sitä ei ole syytä laskea.

Laskentakaava virran kokonaissärölle on kuitenkin kaavan 8 mukainen.

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100 \% \quad (\text{Kaava 7})$$

, jossa

$THD\%$ on kokonaissäröprosentti (%)

n on yliaallon järjestysluku väliltä $2 \dots \infty$

I_n on yliaaltovirta prosentteina perustaajuisesta virrasta

I_1 on perustaajuinen virta prosentteina perustaajuisesta virrasta, eli 100

Mikäli yliaaltovirtoja esiintyy, kuten kuvassa 7, virran kokonaissäröprosentti olisi seuraavan laskennan tuloksen mukainen.

$$\begin{aligned} THD\% &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2}}{I_1} \cdot 100 \% \\ &= \frac{\sqrt{33^2 + 13^2 + 5^2}}{100} \cdot 100 \% = 37,0 \% \end{aligned} \quad (7)$$

Vertailemalla kaavoilla 6 ja 7 laskettuja kokonaissäröjä huomataan, että virran kokonaissärö samassa tilanteessa on huomattavasti suurempi kuin jännitteen kokonaissärö. Tästä ilmiöstä johtuen virran ja jännitteen säröä tulee käsitellä aina erillään toisistaan ja on tärkeää tehdä selväksi, kummasta puhutaan missäkin tilanteessa. Muuten voi aiheutua suuria väärinkäsityksiä.

4 SUODATINTYYPIT

Suodatintekniikka on kehittynyt nopeasti muutaman vuosikymmenen aikana. Siitä huolimatta, että yliaaltojen haittavaikutukset on tiedostettu jo vuosikymmeniä ja suodatinratkaisut kehittyvät jatkuvasti, moni kuluttaja ei tule ajatelleeksi tarvitsevänsä yliaaltojen suodatusta kiinteistössään joko kustannussyistä tai tietämättömyyttään. (Yliaallot ja kompensointi, 1 Johdanto)

Yliaallot on vieras käsite maallikolle ja kuluttajat odottavat ostamansa sähkön olevan laadukasta. Todellisuudessa ostettu sähkö onkin yleensä laadukasta, mutta yliaallot ovat peräisin kiinteistön sähkölaitteista ja sähköjärjestelmän rakenteesta. Tarvittaessa sähkölaitosta voi pyytää mittaamaan heidän verkkonsa sähkön laadun ja mikäli jännitteen kokonaissäröprosentti ylittää 8 % kuluttajan liityntäpisteessä, yhtiö on standardin EN 50160 asettamien rajojen nojalla velvollinen kustantamaan parannustoimenpiteet. (SFS-EN 50160, 4.2.5 Harmoninen yliaaltojännite)

Sähköä myyvät tahot ovat velvoitettuja kiinnittämään kauppaamansa sähkön laatuun jatkuvasti huomiota ja siksi kuluttajan liityntäpisteeseen tulee yleisesti ottaen lähes moitteettoman laatuista sähköä. Verkon ollessa jäykkä, eli riittävän suuritehoinen ja stabiili, kuluttajan päässä tapahtuvat muutokset, vikatilanteet tai heikentynyt sähkön laatu ei usein edes näy sähköyhtiön verkossa saakka vaan ongelmat pysyvät kuluttajan sähköjärjestelmässä. Kuluttajan sähköjärjestelmästä peräisin olevat yliaalto- tai muut sähkön laatuongelmat katsotaan yleisesti olevan kuluttajan vastuulla ja kustannettavana, ellei toisin todeta. (Yliaallot ja kompensointi, 1 Johdanto)

4.1 Passiivisuodattimet

Passiivisuodatin koostuu nimensä mukaisesti passiivikomponenteista, kuten kondensaattoreista ja keloista ja vastuksista. Passiivinen suodatusratkaisu ei sisällä elektroniikkaa, eikä siksi ole kykenevä mukautumaan muuttuviin yliaaltopitoisuuksiin. Passiivisuodatin koostuu yleensä yhden tai useamman kondensaattorin ja kelan rinnan- tai sarjakytkennästä ja niiden kanssa sarjaan kytketystä resistanssista. Passiivisuodatus kyt-

ketään yleensä kuorman tai sähköjärjestelmän osan rinnalle. (Yliaallot ja kompensointi, 6 Loistehon kompensoinnissa ja yliaaltojen suodatuksessa käytettävät laiteratkaisut.)

Passiivisuodatuksen hyvä puoli on pieni alkuinvestointi. Haittapuolia on useita:

- passiivisuodatin ei suodata tehokkaasti muuttuvataajuisia yliaaltovirtoja
- suodatusominaisuudet riippuvat järjestelmän ja komponenttien ominaisuuksista, kuten impedanssista ja taajuudesta
- saattaa aiheuttaa resonansseja ja siten vahvistaa tiettyjä taajuuksia
- passiivisuodatus on aina yliaaltokohtainen
- passiivisuodatuksessa on ylikuormitusvaara
- riittävän tehokkaat passiivisuodattimet vievät paljon tilaa
- saattaa aiheuttaa ylijännitteitä, mikäli kuorma ei syö tuotettua loistehoa
- passiivisuodatus heikentää ulostulojen vastetta ja hidastaa sähköisiä muutoksia

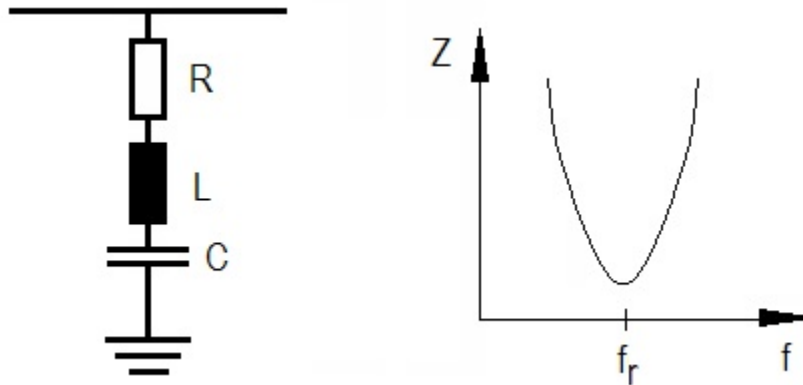
(Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

Yliaallot eivät koskaan esiinny pysyvästi samantaajuidina ja –suuruksina sähköjärjestelmissä. Lisäksi yliaaltoja tuottava tehoelektronikka yleistyy jatkuvasti, joten passiivisuodatuksen mitoitus saattaa vaatia päivitystä jo lyhyenkin ajan kuluttua. Tästä johtuen passiivisuodatuksen kustannukset saattavat kasvaa pitkällä aikavälillä arvaamattomasti. (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

Passiivisuodattimen toiminta perustuu siihen, että se muodostaa yliaaltovirralle pieni-impedanssisen sulkeutumistien, jota kutsutaan myös imupiiriksi. Passiivisuodatin voi joko poistaa kokonaan tietyn taajuisen yliaaltovirran tai vähentää tiettyä suurempitaajuisia yliaaltovirtoja. Tiettyä pienempitaajuisia yliaaltovirtoja vähentäviä passiivisuodattimia ei voida käyttää, koska ne vähentäisivät myös perustaajuisista virtaa. (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

4.1.1 Kapeakaistasuodatin

Kapeakaistasuodatin on yleensä RLC –sarjapiiri, joka on kytketty kuorman rinnalle maapotentiaalin ja sähkönsyötön välille. Tämä suodatinmalli poistaa tehokkaasti tietyn taajuuden, mutta kaikki muut taajuudet jäävät yhä sähköjärjestelmään. Kuvassa 4 on esitetty kapeakaistasuotimen imupiiri ja sen impedanssikäyrä. (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

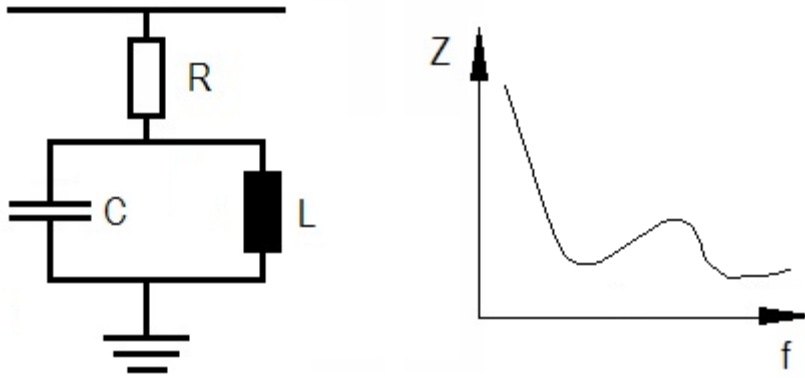


Kuva 9 Kapeakaistasuotimen imupiiri ja impedanssikäyrä (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

Mikäli kapeakaistasuodattimella halutaan saavuttaa usean eritaajuisen yliaallon suodatus, täytyy käyttää useita eri taajuuksille viritettyjä suodattimia. (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

4.1.2 Leveäkaistasuodatin

Leveäkaistasuodatin koostuu rinnan kytketyistä kondensaattorista ja kelasta sekä vastuksesta. Tämä suodatinmalli vähentää tiettyä rajataajuutta suurempitaajuisia yliaaltovirtoja, mutta suodatusteho jää kaikilla taajuuksilla alhaiseksi. Kuvassa 5 on esitetty leveäkaistasuodattimen imupiiri ja sen impedanssikäyrä. (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)



Kuva 10 Leveäkaistasuodattimen imupiiri ja impedanssikäyrä (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

Leveäkaistasuodattimen haasteet ilmenevät suodatustarkkuudessa. Tämä suodatintyyppi viritetään vähentämään valittua suurempitaajuisia yliaaltovirtoja, ei poistamaan niitä. Leveäkaistasuodattimen hyvä puoli on, että sillä voidaan vähentää useita yliaaltoja yhdellä suodattimella, mutta yksikään yliaalto ei poistu kokonaan. (Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle, 2.2.3.1 Passiivisuodatin.)

4.2 Aktiivisuodattimet

Aktiivisuodatin on eräänlainen virtalähde. Sillä tuotetaan täsmälleen samat yliaaltovirrat, joita korjattavassa sähköjärjestelmässä tai verkossa esiintyy, mutta 180° vaihesiirrolla. Vastakkaisissa vaiheissa olevat virrat kumoavat toisensa ja yliaalto-ongelma on näin ratkaistu. (Yliaallot ja kompensointi, 6.10 Aktiivisuodatin.)

Aktiivisuodattimen etu passiivisuodattimeen nähden on, että se kykenee mukautumaan muuttuviin yliaaltopitoisuuksiin. Tämä on erityisen hyvä ominaisuus, mikäli kyseessä on laaja sähköjärjestelmä, jossa kuormitus vaihtelee ja prosessit eivät ole säännönmukaisia. Lisäksi aktiivisuodattimet voidaan ohjelmoida toimimaan käyttäjän haluamalla tavalla, ne ovat nykyään pieniä ulkomitoiltaan, niillä voidaan parantaa myös tehokerointia ja samanlaisilla laitteilla voidaan toteuttaa suodatus eri käyttökohteissa. Aktiivisuodatin ei ylikuormitu: mikäli kuorman yliaaltovirrat kasvavat suodattimen kapasiteettia korkeammiksi, aktiivisuodatin jättää kapasiteettinsa ylittävän osan yliaaltoja suodattamatta. (Yliaallot ja kompensointi, 6.10 Aktiivisuodatin.)

Aktiivisuodattimen asettelut tehdään nykyään esimerkiksi ethernetin välityksellä miltä tahansa lähiverkkoon liitetyltä laitteelta. Suomesta löytyy suodatinvalmistajia: Tampe-reella toimiva Alstom Grid julkaisi juuri Verkosto 2013 –messuilla uuden MaxSine Compact –aktiivisuodattimen, jonka esite löytyy tämän opinnäytetyön liitteestä 2. (Alstom Grid Ltd. -verkkosivut)

4.3 Yhdistetyt suodatusratkaisut

Mikäli suodatuskohde sitä vaatii, voidaan yliaaltojen suodatus suunnitella myös aktiivi- ja passiivisuodattimien yhteiskäytöllä. Käytännössä tällaisessa ratkaisussa yliaaltolähteiden rinnalle mitoitetaan passiivisuodattimia (yksi tai useampi, riippuen eritaajuisten yliaaltojen määrästä) pienentämään aktiivisuodattimen tehontarvetta. Kun osa yliaalloista on saatu suodatettua passiivisuodattimilla, kytketään jakelukiskostoon tai sähkökeskuksen yhteyteen aktiivisuodatin, joka suodattaa pois loput yliaallot halutulla tarkkuudella. Yhdistetty suodatusratkaisu sopii kohteisiin, joissa suodatus pelkällä aktiivisuodattimella tulisi suodatuksen tehontarpeen vuoksi liian kalliiksi ja passiivisuodattimet eivät kykene suodattamaan riittävästi yliaaltoja laajan yliaaltospektrin tai laitteille varatun tilanpuutteen vuoksi. (Alstom Grid –verkkosivut.)

Paras tapa olisi kuitenkin löytää riittävän monta yliaaltoja tuottavaa sähköjärjestelmän osaa, kytkeä aktiivisuodattimet kyseisiin ongelma-kohtiin ja toteuttaa suodatus usealla aktiivisuodattimella. Näin verkon muuttuvat yliaaltopitoisuudet saadaan pysymään kurissa, eikä suodatuksen mitoitus vanhene. Välttämällä passiivisuodattimien käyttöä vähennetään lisäksi resonanssi- ja harmoni-ilmiöiden muodostumista. (Alstom Grid –verkkosivut.)

5 HENKILÖKUNNAN HAASTATTELUT

Tutkimustyöni lähti liikkeelle kohderakennuksessa toimivien henkilöiden haastatteluilla. Ennen mittauksia tapasin liiketoiminnan turvallisuusasioista vastaavan henkilön, laboratorioista vastaavan henkilön, sähkökäytön johtajan ja aiemmin sähköurakoinnista vastanneen henkilön, joka oli yhdessä kollegoidensa kanssa suorittanut aiemmin sähkön laadun mittauksia kohteessa.

Haastatteluissa kävi ilmi, että rakennuksen sähkön laatuun oli alettu kiinnittämään huomiota vuosia aiemmin. Tarkkaa ajankohtaa ei kuitenkaan ollut tiedossa. Toimistossa työskentelevä henkilökunta oli raportoinut sähkölaitteiden synnyttämästä voimakkaasta särinästä, joka häiritsi työskentelyä. Melu oli ollut jatkuvaa, korkeataajuisista särinää ja niin voimakasta, että se vaikutti merkittävästi keskittymiskykyyn ja stressitasoon.

Henkilökunnan havaintojen perusteella melu oli peräisin koteloiduista häiriösuodattimista, joiden kautta eräänlaiset testikopit saavat sähkönsyöttönsä. Kyseisten testikoppien käyttö oli jouduttu toistaiseksi keskeyttämään, kunnes melu saataisiin poistettua. Samanlaisia testikoppeja ja häiriösuodattimia on eri puolilla laajaa rakennusta, mutta vain yhdessä rakennuksen osassa ne aiheuttivat melua.

Meluongelmaan oli reagoitu mittaamalla meluongelmaisen rakennuksen osan sähkön laatua. Mittauksista vastanneen henkilön kertomuksen mukaan mittauksissa oli havaittu merkittäviä yliaaltopitoisuuksia ja nollajohtimen kuormittumista. Mittauksia oli suoritettu järjestelmällisesti myös muissa rakennuksen osissa. Heikentynyt sähkön laatu oli onnistuttu rajaamaan mittauksien perusteella meluongelman syntyperän osaan rakennusta.

Luonnollisena johtopäätöksenä suodattimien arveltiin olevan viallisia, koska muualla rakennuksessa vastaavissa olosuhteissa mitään ongelmia ei ollut. Suodatinvalmistajalta oli tilattu uusi, vastaava tuote ja sitä oli testattu eniten meluavan suodattimen tilalla. Ongelma ei kuitenkaan ollut poistunut, vaan myös uusi laite säräsi häiritsevästi. Uutta suodatinta kierrätettiin eri puolilla rakennusta ja kytkettiin sähköverkkoon eri pisteissä. Etsimällä havaittiin, että lähellä alkuperäistä särinän lähdettä uusi suodatin säräsi myös muissa kulutuspisteissä ja kauempana rakennuksessa särinä oli vähäistä tai olematonta.

Tämä havainto tuki mittauksissa selvinneitä tuloksia heikentyneen sähkön laadun sijainnista rakennuksen sähköjärjestelmässä.

Sähkölaitokselta oli pyydetty henkilö mittaamaan rakennusta syöttävän keskijännitepuolen sähkön laatu, jotta selviäisi ovatko laatuongelmat peräisin sähkölaitoksen toiminnasta vai rakennuksen pienjännitejärjestelmän sisäisestä toiminnasta. Sähkölaitos oli suorittanut mittaukset ja tulokset osoittivat keskijännitepuolen sähkön olevan erittäin hyvänlaatuista. Sähkölaitoksen mittausraportista kävi ilmi, että yliaaltopitoisuus keskijännitepuolella oli häviävän pieni, kuten jäykän verkon tapauksessa kuuluukin olla.

Jäykkä verkko on käsite, jolla tarkoitetaan ylemmän jänniteportaan olevan riippumaton pienemmän jänniteportaan muutoksista, vikatilanteista ja sähkön laatuongelmista. Tässä tapauksessa sähkölaitoksen hallinnoiman keskijänniteverkon voitiin katsoa olevan jäykkä, koska pienjännitepuolella ilmenneet sähkön laatuongelmat eivät näkyneet keskijännitepuolella. Jäykän keskijänniteverkon tapauksessa sähkön laatua rakennuksen pienjännitejärjestelmässä voidaan parantaa ainoastaan pienjännitejärjestelmään kohdistuvilla muutoksilla, eikä sähkölaitos ole velvollinen kustantamaan sellaisia toimenpiteitä.

Jotta testikopit saatiin mahdollisimman pian takaisin käyttöön niin, että toimistohenkilökunta pystyi työskentelemään niiden läheisyydessä, kyseisiä testikoppeja syöttävän nousukeskuksen perään kytkettiin kokeilumielessä UPS -laite. UPS -laite ei erota syötämäänsä sähköjärjestelmän osaa galvaanisesti muusta sähköjärjestelmästä, mutta suuntaajatekniikan ansiosta sillä voidaan tehdä syötettävä sähköjärjestelmän osa riippumattomaksi syöttävän sähköjärjestelmän osan taajuudesta, jännitetasosta ja samalla näiden suureiden muutoksista. Tämä UPS -laitetekoilu tuotti tulosta ja meluhaitta lieveni riittävästi testikoppien käytön jatkamisen kannalta.

Haastattelujen aikana kävi useaan otteeseen ilmi, että myös valaisimien kanssa oli ilmennyt ongelmia jo pitkään. Rakennuksen päävalaistukseen käytettyjä pienoisloistevalaisimia oli jouduttu jo pitkään vaihtamaan tiheään tahtiin niiden hajoamisen vuoksi. Usein itse valaisimen käyttöikä oli ollut lyhyempi kuin loisteputkien. Myös loisteputkia oli mennyt henkilökunnan mielestä huomiota herättävät määrät pitkään jatkuneen ajan.

6 MITTAUKSET

6.1 Mittausajankohta

Mittaukset suoritettiin torstaina 28.2.2013 laboratorio- ja toimistokäytössä olevassa rakennuksessa Tampereella. Mittauspäivä valittiin hiihtolomaviikolle, jolloin rakennuksessa oli mahdollista tehdä käyttökatkoksia eri puolilla rakennuksen sähköjärjestelmää.

Tuloksia analysoitaessa on otettava huomioon, että hiihtolomaviikon vuoksi mittauskohteessa ei ollut yhtä paljon henkilökuntaa töissä kuin tavallisina viikkoina. Tämä saattaa vaikuttaa sähkön laatuongelmien ilmenemiseen. Rakennuksen henkilökuntaan kuuluva taho valitsi mittauspäivän siten, että mittaushetki vastaisi kuitenkin mahdollisimman tavallista työpäivää. Näin ollen poissaolevan henkilökunnan määrän voidaan olettaa olleen melko pieni. Päivän aikana rakennuksessa näkyi runsaasti henkilökuntaa, joten mittausajankohta vaikutti sopivalta. Mittaukset kestivät 7 tuntia sisältäen yhden lounastauon. Mittaukset aloitettiin aamulla kello 9.00 ja lopetettiin iltapäivällä klo 16.15.

6.2 Mittauksiin osallistuneet henkilöt

Lisäksi mittauksiin osallistui kolme henkilöä:

- rakennuksessa harjoitettavan liiketoiminnan laboratorioista vastaava henkilö, joka tunsi rakennuksen ja jolla oli pääsy kaikkiin tarvittaviin tiloihin
- opinnäytetyöni ohjaaja Janne Kiviranta Alstom Gridiltä, joka toi mukanaan mittalaitteita
- aiemmista sähkön laadun mittauksista vastanneen yrityksen henkilö, joka tunsi aiempien mittausten annin ja kohderakennuksen sekä toi mukanaan mittalaitteita.

Mittauksiin osallistui useita ammattihenkilöitä, jotta pystyimme optimoimaan ajankäytön ja suorittamaan mittaukset laadukkaasti ja kokemuksen tuomalla varmuudella. Kokemusta edustivat pitkään alalla työskennelleet ammattilaiset, jotka on mainittu yllä olevassa listassa.

6.3 Mittauskalusto

Mittauksissa käytettiin kahta sähkön laatua mittaavaa laitetta:

- Topas 1000 Power Quality Analyzer, joka nykyisin tunnetaan nimellä Fluke 1760
- Fluke 435 Power Quality and Energy Analyzer

Mittalaitteet olivat erilaisia, sillä ne tulivat kahdesta eri yrityksestä, joiden henkilöitä osallistui mittauksiin. Molemmilla mittalaitteilla suoritettiin keskenään mahdollisimman samanlaisia mittauksia mittaustulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi.

6.4 Mittausmenetelmät

Mittalaitteita käyttivät ammattihenkilöt, jotka tunsivat laitteet ja menetelmät. Roolini mittauksissa oli suunnitella, auttaa mittauksissa ja tehdä muistiinpanoja.

Mittasimme sähkön laatua pääjakelukiskoston kaikista vaihekiskoista ja nollakiskosta. Lisäksi suoritimme mittauksia nousukeskusten kaikista vaiheista ja nollasta. Mittaukset suoritettiin jännitteisten osien läheisyydessä, joten kytkennöissä käytettiin erityisiä jännitetyöhanskoja ja muita asianmukaisia suojavälineitä.

6.5 Mittaustulokset

Mittalaitteet tallensivat mm. oskilloskooppikuvaajia, välkyntä-, yliaalto- ja tehollisarvo-tietoja sekä ajallisesti lyhyinä ottoina että useita minutteja kestäneiltä ajanjaksoilta. Tulokset ovat luettavissa Fluken PQ Analyze ja Fluke View -ohjelmilla, jotka sain käyttööni opinnäytetyötäni varten.

Mittaustuloksia on analysoitu seuraavassa luvussa.

7 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Mittaukset suoritettiin Alstom Gridin ammattihenkilön johdolla torstaina helmikuun 28. päivänä 2013. Mittalaitteena toimi Topas 1000, joka nykyisin tunnetaan nimellä Fluke 1760. Kyseisellä mittauslaitteella on mahdollista Fluke PQ Analyze –ohjelman avulla tulostaa EN 50160 –standardin mukaisia raportteja ja tarkastella mm. harmonisia yliaaltoja (eng. harmonics), välkyntää (eng. flicker), hitaita jännitevaihteluita, nopeita jännitevaihteluita sekä perusaallon taajuusvaihteluita. Lisäksi PQ Analyzesta saa tulostettua tapahtumatietokannan (eng. event database), oskilloskooppikuvaajia sekä muita erilaisia raportteja. Ohjelmalla on mahdollista tulostaa mittauksien tulokset tekstitiedostona, Exceliin, Wordiin sekä mm. erilaisina diagrammeina. PQ Analyze on hyödyllinen sähkön laadun mittaajan työkalu, jolla mittauksien analysointia saa tehostettua. Standardin mukaiset raportit ovat erittäin käytännöllisiä, sillä niistä näkee suoraan mittauksien standardien asettamien rajojen valossa.

PQ Analyze tarjoaa tulostettavaksi mm. kuvan 11 mukaisen listauksen jänniteylialloista järjestysluvuiltaan 2...25. Kuvassa 11 esitetty raportti ilmoittaa, kuinka monta prosenttia mitattujen johdinten harmonisista jänniteylialloista pysyi mittausaikana raportissa esiteltyjen standardin mukaisten maksimirajojen sisällä.

EN50160 - Harmonics

Results

Statistics - Tolerance 95% 95%-Values Maximal Values

Total quantity of values

hXX	Tolerance	L1	L2	L3
THD	0.00 - 8.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h02	0.00 - 2.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h03	0.00 - 5.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h04	0.00 - 1.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h05	0.00 - 6.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h06	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h07	0.00 - 5.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h08	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h09	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h10	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h11	0.00 - 3.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h12	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h13	0.00 - 3.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h14	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h15	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h16	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h17	0.00 - 2.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h18	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h19	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h20	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h21	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h22	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h23	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h24	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h25	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%

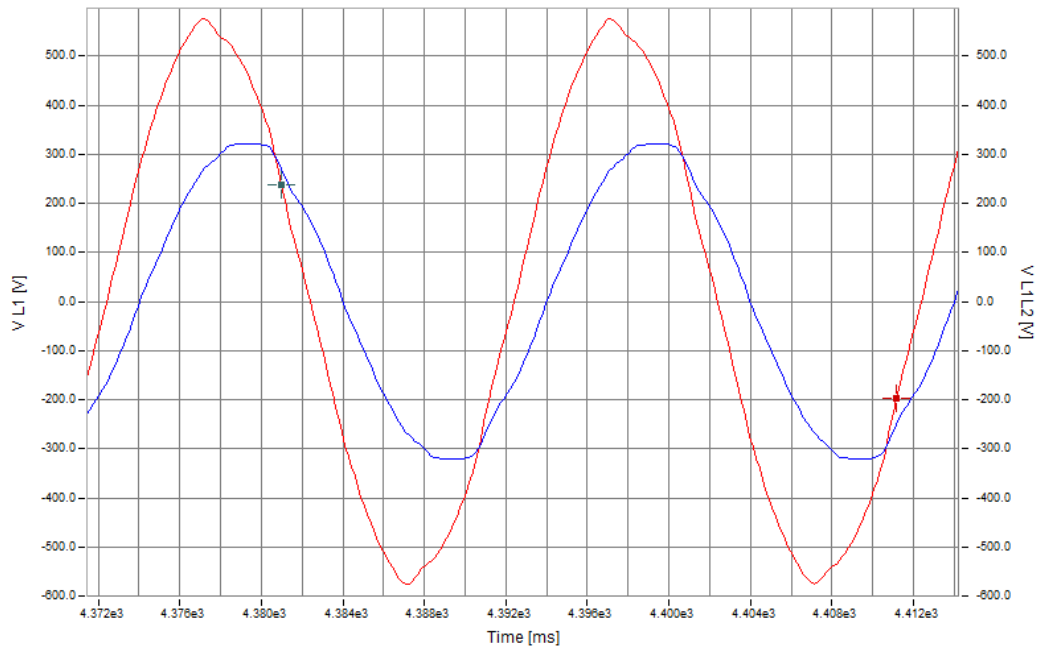
Analysis period: 1 Week = 1008 values
At least 95% of values must be within the tolerance range.

Close

Kuva 11 Harmoniset yliaallot 2...25 rakennuksen pääjakelukiskoston kolmesta vaiheesta raja-arvoineen

Kuvasta 11 käy ilmi, että kyseinen mittaus on suoritettu kolmelle vaihejohtimelle (L1, L2 ja L3) ja kaikki järjestysluvultaan 2...25 kerrannaiset yliaallot pysyivät standardin EN 50160 rajoissa. Raja-arvot kullekin yliaaltotaajuudelle näkyy kuvan 11 jokaisella rivillä yliaaltokohtaisesti, sillä eri taajuisille yliaalloille on erisuuruiset maksimirajat. Kyseinen mittaus on suoritettu kohderakennuksen pääjakelukiskostolta aamupäivällä, kun rakennuksen sähköjärjestelmän kuormitus oli mahdollisimman tavanomainen.

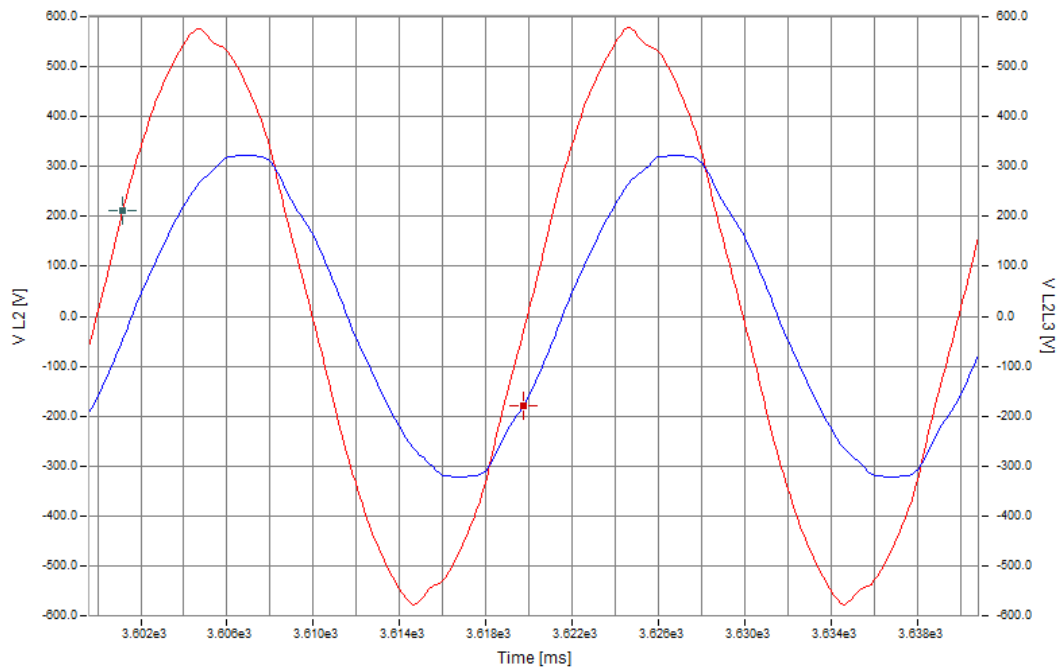
Samoista mittauksista otettu pää- (L1-L2) ja vaihejännitteen (L1) oskilloskooppikuvaaja on esitetty kuvassa 12. Kuvaaja on rajattu noin kahden jaksonajan mittaiseksi.



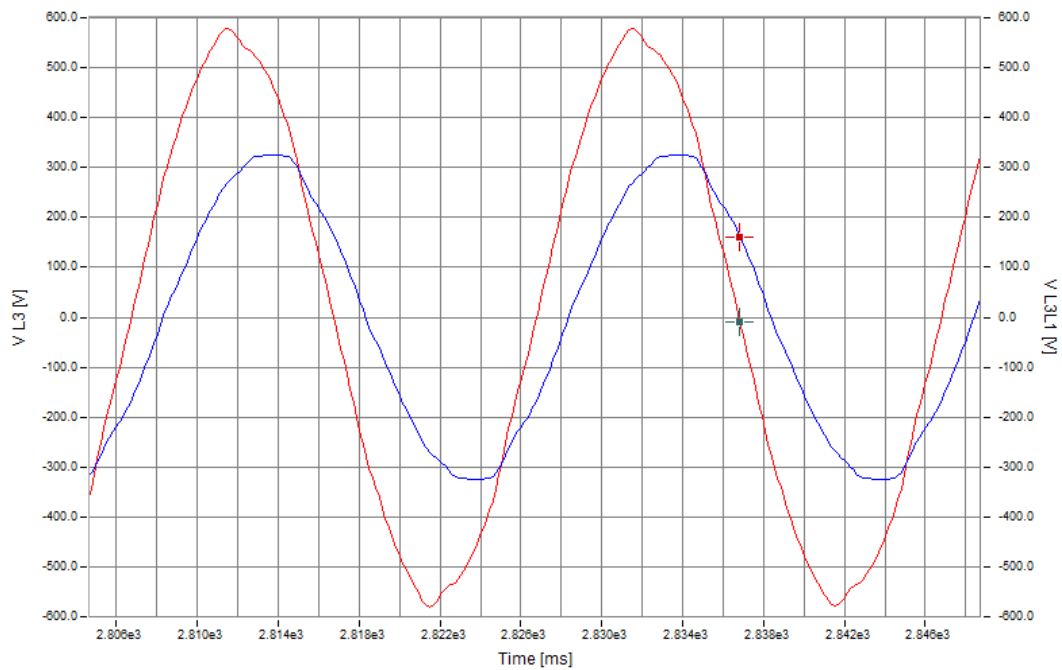
Kuva 12 Pääjännitteen (L1-L2) ja vaihejännitteen (L1) kuvaajat ajan funktiona

Kuvan 12 kuvaajat osoittavat graafisen tarkastelun perusteella, että pää- ja vaihejännitte ovat melko sinimuotoisia. Kummankin huipusta on leikkautunut pieni osa pois. Mitään suurta yliaalto-ongelmaa ei kuvaajien perusteella ole ja kuvassa 11 esitetty yliaalto-analyysi tukee tätä käsitystä. Eri ajanhetkillä tämän mittaussarjan oskilloskooppikuvaajat vaikuttivat samantlaisilta, joten niitä ei ole syytä esitellä enempää kuin yksi vaihetta kohti.

Vertailun vuoksi esitetään myös vaiheiden L2 ja L3 jännitekuvaajat ajan funktiona yhdessä pääjännitteen kuvaajan kanssa. Nämä kuvaajat on esitetty kuvissa 13 ja 14.



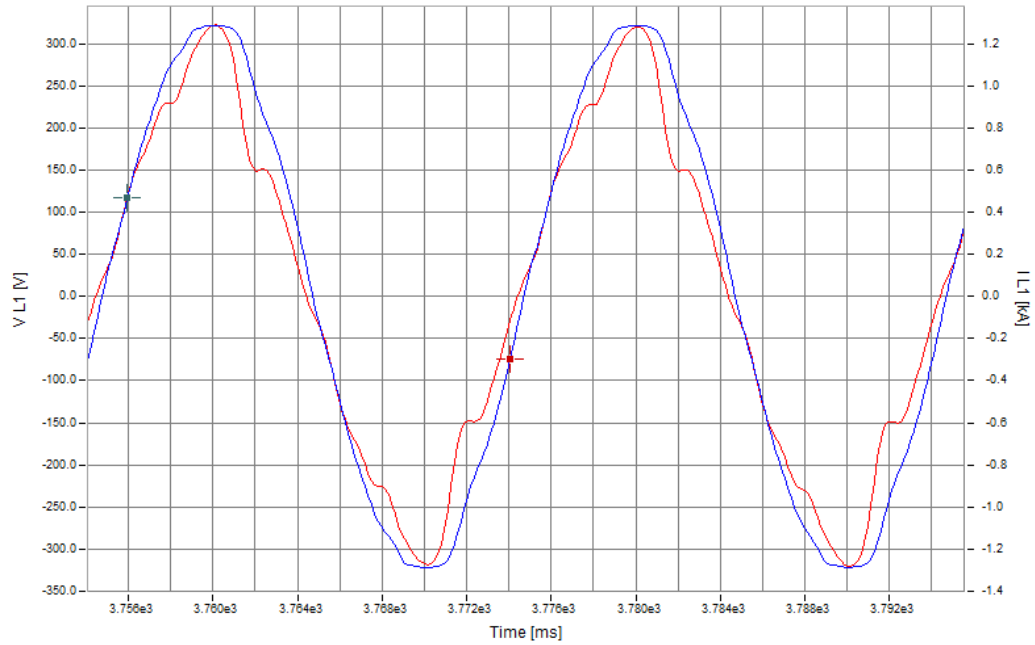
Kuva 13 Pääjännitteen (L2-L3) ja vaihejännitteen (L2) kuvaajat ajan funktiona



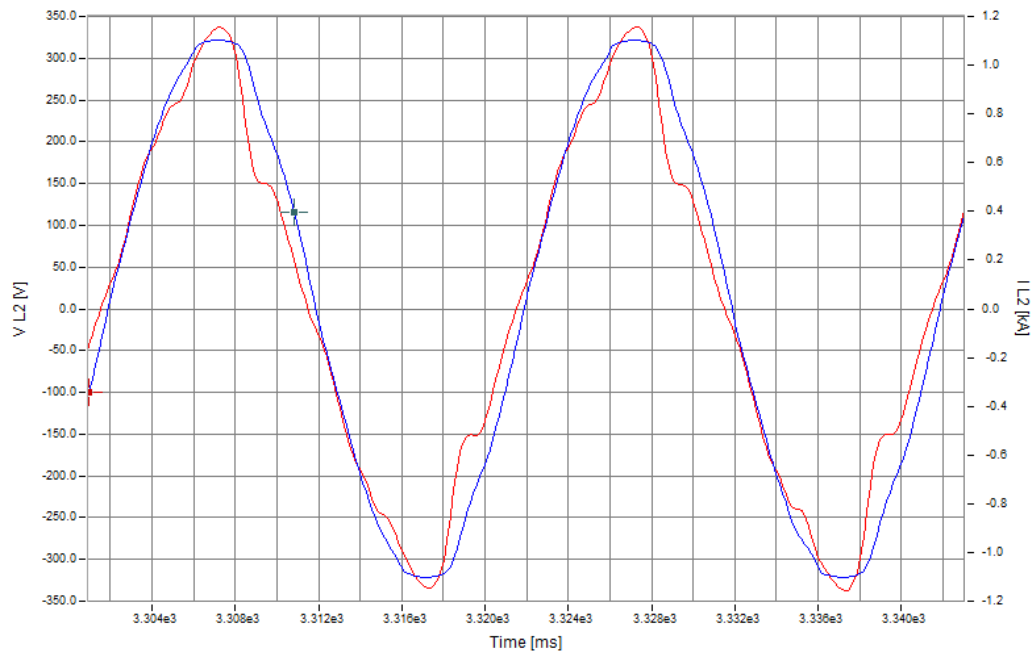
Kuva 14 Pääjännitteen (L3-L1) ja vaihejännitteen (L3) kuvaajat ajan funktiona

Kuvien 12-14 jännite/aika-kuvaajat ovat keskenään melko samanlaisia. Kaikkiin vaiheisiin kohdistuu graafisen tarkastelun perusteella hyvin samantyyppiset jännitteen laatua heikentävät tekijät ja suuria jännitteen laadun heikentymiä ei ole havaittavissa.

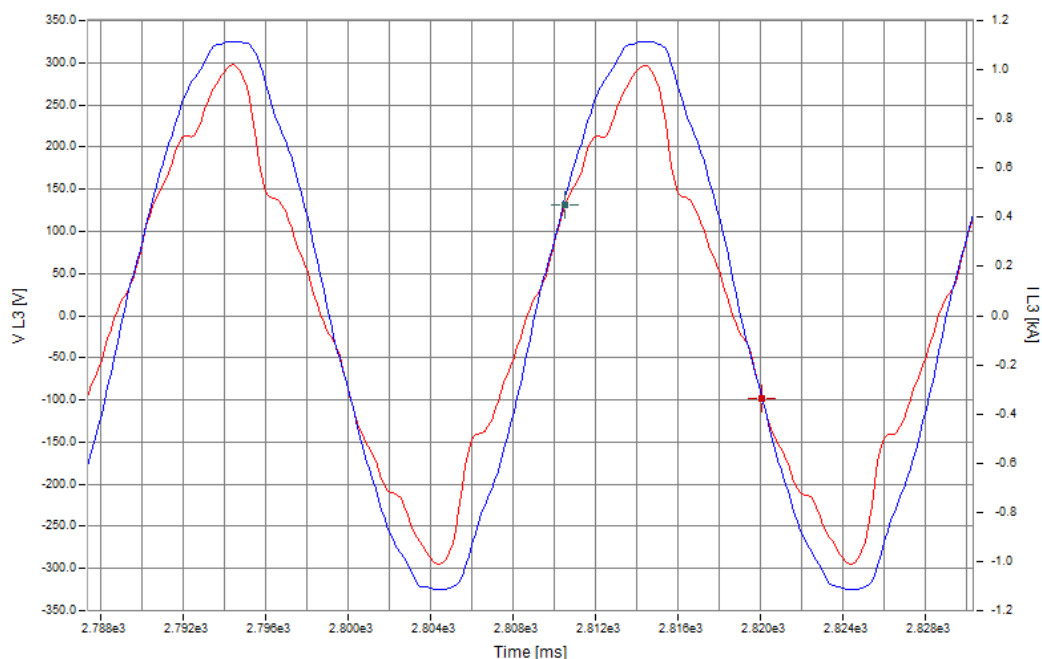
Seuraavaksi esitellään samoista tilanteista vaihevirran ja –jännitteen kuvaajat ajan funktiona. Vaiheännitteet on esitetty kuvaajissa 15-17 sinisellä ja vaihevirrat punaisella värillä.



Kuva 15 Vaihejännite ja -virta ajan funktiona vaiheesta L1



Kuva 16 Vaihejännite ja -virta ajan funktiona vaiheesta L2



Kuva 17 Vaihejännite ja -virta ajan funktiona vaiheesta L3

Kuvista 15-17 huomataan, että virta ja jännite ovat täsmällisesti samanvaiheisia. Vaihe-siirtoa ei siis ole juuri lainkaan. Kaikkien kolmen vaiheen osalta huomataan myös, että kuvaajat ovat vaiheiden kesken lähes identtisiä. Vaikka muoto on vaihevirroilla hyvin samanlainen kuvissa 15-17, niiden amplitudeissa on havaittavissa eroa. Suurin ero kuormituksessa on vaiheiden 1 ja 3 välillä. Kaikissa vaiheissa virta on enemmän säröytynyt kuin jännite. Tämä johtuu siitä, että yliaaltolähteet tuottavat pääsääntöisesti virtayliaaltoja ja vain osa virtayliaalloista muodostaa jänniteyliaaltoja virratessaan verkkoimpedanssien läpi. (Yliaallot ja kompensointi, 4.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot.)

Mittauksia suoritettiin pääjakelukiskostossa ja nousukeskuksilla. Mittaustulokset olivat kaikissa mittauspisteissä kuvien 12-17 kaltaisia, joten tuloksia ei kannata esittää erikseen jokaisesta mittauspisteestä. Mittauksissa havaittiin yliaaltoja merkittävästi ainoastaan kytkentätilanteissa, mikä on varsin normaalia sähkön käyttäytymistä.

Haastatteluissa esille tullutta ongelma-aluetta syöttävällä keskuksella suoritettiin useita mittauksia erilaisilla kuormituksilla sekä UPSin kanssa että ilman. UPSin sijainti oli ongelma-aluetta syöttävän keskuksen perässä silloin, kun se oli kytkettynä. Tämän keskuksen lähtöjä mitattiin ensin UPS kytkettynä ja myöhemmin ilman UPS -laitetta. Särinä oli huomattavasti voimakkaampaa ilman UPSia, mutta merkittäviä yliaalto-ongelmia ei sähkönsyötöstä löytynyt missään tilanteessa.

Seuraavassa kuvassa 18 on vielä erikseen esitetty kuvan 11 kaltainen EN 50160-raportti harmonisista yliaalloista keskukselta, joka syöttää ongelma-alueita. Raportti on tilanteesta, jossa UPS ei ole kytkettynä, eli mikään ei suodata mahdollisia yliaalto-ongelmia. Raportti on koko mittauksen kattavalta ajalta.

EN50160 - Harmonics

Results

Statistics - Tolerance 95% 95%-Values Maximal Values

Total quantity of values

hXX	Tolerance	L1	L2	L3
THD	0.00 - 8.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h02	0.00 - 2.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h03	0.00 - 5.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h04	0.00 - 1.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h05	0.00 - 6.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h06	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h07	0.00 - 5.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h08	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h09	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h10	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h11	0.00 - 3.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h12	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h13	0.00 - 3.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h14	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h15	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h16	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h17	0.00 - 2.00%	100.00%	100.00%	100.00%
h18	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h19	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h20	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h21	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h22	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h23	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h24	0.00 - 0.50%	100.00%	100.00%	100.00%
h25	0.00 - 1.50%	100.00%	100.00%	100.00%

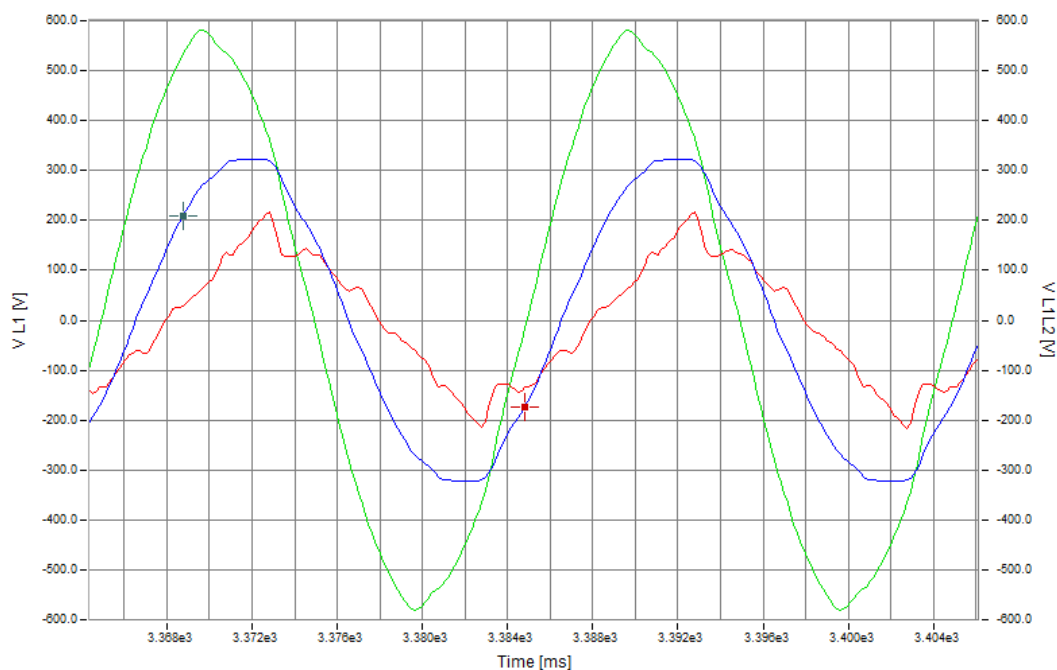
Analysis period: 1 Week = 1008 values
At least 95% of values must be within the tolerance range.

Close

Kuva 18 Standardin EN 50160 mukainen raportti harmonisista yliaalloista

Jälleen on huomattavissa, että kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvuiltaan 2...25 pysyvät mittausten ajan standardin EN 50160 asettamissa rajoissa.

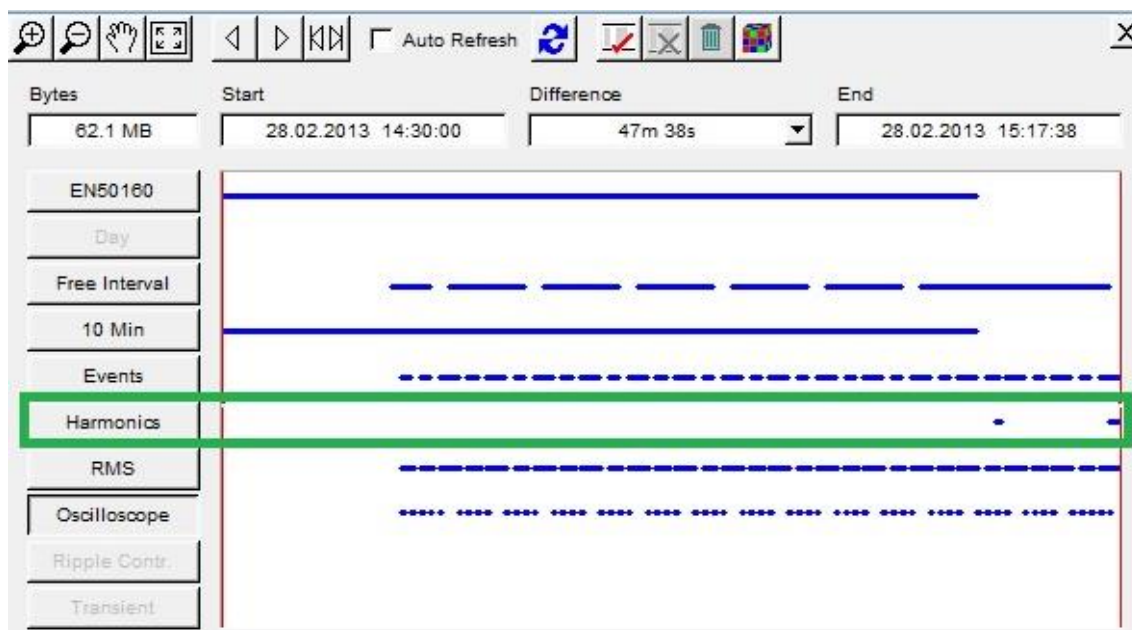
Jotta sähkön laadun taso selviäisi paremmin tilanteesta, jossa UPS on kytketty pois verkosta, vaihejännite, vaihevirta ja pääjännite ajan funktiona on esitetty samaan kuvaajaan kuvassa 19. Kuvassa vaihejännite on jälleen sinisellä, vaihevirta punaisella ja pääjännite vihreällä värillä.



Kuva 19 Pää- ja vaihejännite sekä vaihevirta ajan funktiona ongelma-aluetta syöttävän keskuksen lähdöstä mitattuna

Kuvan 19 kuvaajista huomataan, että eniten on säröytynyt virta (punainen). Virta ja vaihejännite ovat lähes samanvaiheisia, kuten aiemmissakin esitellyissä mittaustuloksissa. Pää- ja vaihejännitteestä sekä virrasta on hieman leikkautunut aallon huippukohdan toiselta puolta.

Kuvassa 20 näkyy PQ Analyzen valintaikkuna, jossa on aika-akselilla kuvattu kunkin sähkön ominaisuuden ilmeneminen mittausten aikana. Harmoniset yliaallot eli ”Harmonics” on korostettu listalla. Kuvasta nähdään, että harmonisia ei juuri esiinny tämän mittaussarjan aikana ja sama ilmiö koskee myös muissa kytkentäpisteissä suoritettuja mittaustauksia. Ainoat ajanhetket, joissa harmonisten rivillä on sinistä viivaa (osoittaa ilmeneishetken), on mittaussarjan loppupuolella ja nuo ajanhetket pystyttiin identifioimaan kytkentähetkiksi. Näinollen mittausten aikana ei ole havaittavissa lainkaan merkittäviä yliaalto-ongelmia.



Kuva 20 PQ Analyzen valintaikkuna, josta näkyy harmonisten ilmenemisen vähäisyys

Kuvan 20 tarkoitus on näyttää toteen kokonaisen mittaussarjan aikana esiintyvien harmonisten yliaaltojen esiintymistiheys.

Mittauksista on myös huomioitavaa, että pääkeskuksen jakelukiskostossa ilmenee jonkin verran vinokuormitusta ja nollajohtimen kuormitusta. Vaikkeivät nämä tekijät suoraan koske opinnäytetyöni aihetta, on sähköjärjestelmää järkevää tarkastella jonkun verran myös laajemmin. Osittain laajempi tarkastelu on eduksi myös siksi, että sähkön laatuun ja sähköjärjestelmän tilaan vaikuttavat tekijät ovat yhteydessä toisiinsa. Esimerkiksi vinokuormitus aiheuttaa kolmatta yliaalloa ja kuormittaa nollajohdinta. Edellä mainitun esimerkin kautta on helppo ymmärtää, että yksikin pielessä oleva asia voi vaikuttaa jatkuvasti useaan eri sähkön laatua heikentävään tekijään (vrt. vinokuormituksen aikaansaamat kolmannen järjestysluvun yliaallot, jotka puolestaan johtavat nollajohtimen kuormittumiseen). Mittauksissa havaittiin myös jonkin verran välkyntää, mitä olisi syytä tarkastella tarkemmin, vaikka välkyntän analysointi ei tähän työhön sisällykään.

8 MITTAUSRAPORTTI

Mittausraportti on kokonaisuudessaan liitteenä 1. Mittausraportin on tarkoitus olla ytimekäs kuvaus mittaustuloksista johtopäätöksineen, joita rakennuksen haltija tai omistaja voi käyttää työvälineenä jatkotoimenpiteiden suunnittelussa. Raportista selviää sähkön laadun parantamisen kannalta olennaiset asiat ja tämän opinnäytetyön yhteydessä erityinen painoarvo on yliaaltokartoituksessa ja läheisesti yliaaltoihin vaikuttavissa tekijöissä, kuten vinokuormituksessa, nollajohtimen kuormituksessa ja välkynnässä.

9 SÄHKÖN LAADUN PARANNUSTOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Tässä luvussa käsitellään vaiheittain kaikkia mittauksissa ilmenneitä sähkön laadun ongelma-kohtia ja pyritään ehdottamaan mahdollisia jatkotoimenpiteitä sähkön laadun parantamisen tueksi. Varsinaiset jatkotoimenpiteet jäävät rakennuksen haltijan tai omistajan päätettäväksi.

9.1 Resonoivan äänihaitan eliminoiminen

Työn aiemmissa luvuissa on mainittu meluhaitta, joka on peräisin kohderakennuksessa sijaitsevien laboratoriotilojen häiriösuodatukseen käytetyistä koteloituista alipäästösuodattimista. Alipäästösuodattimissa käytetään kondensaattoreita, jotka muodostavat resonanssipiirejä tietynsuuruisten induktanssien kanssa. Resonanssi-ilmion aikana voi syntyä ääntä, joka selittäisi rakennuksen henkilökuntaa häiritsevän, melko voimakkaan särinän. Särinä voidaan saada poistumaan muuttamalla alipäästösuodattimen komponenttien resonanssipistettä.

Koska alipäästösuodattimen kytkentään ei tässä tapauksessa kiinteän koteloinnin vuoksi voida vaikuttaa, on suunniteltava suodattimen kanssa sarjakytkentään yksinkertainen passiivikomponenteista rakentuva piiri, joka impedanssinsa vaikutuksesta muuttaa resonanssipistettä. Tämä ei ole täysin ongelmaton ratkaisu, sillä uusi resonanssipiste voi myös aiheuttaa äänihaittoja ja kuten tässä opinnäytetyössä on kerrottu, vahvistaa resonanssitilanteessa yliaaltoja. Siksi passiivikomponenttien valinnan yhteydessä tulee suorittaa mittauksia tai ainakin seurata lisätyn kytkennän vaikutuksia rakennuksen sähköjärjestelmässä.

9.2 Harmoniset yliaallot

Mittauksissa ei havaittu suuria määriä yliaaltoja. Standardin EN 50160 asettamat rajat eivät ylittyneet mittausten aikana muulloin, kuin kytkentätilanteissa. Kytkentätilanteissa taajuuden ja amplitudin vaihteluita ilmenee hyvin usein, eikä kytkentätilanteiden muu-

tosilmiöt varsinaisesti luo tarvetta jatkotoimenpiteille, sillä ne ovat yksittäisiä tapauksia ja erittäin lyhytkestoisia.

On kuitenkin selvää, että jo pieni määrä yliaaltoja kasvattaa häviöitä sähköjärjestelmässä ja sähkökäyttäjien laitteissa sekä alentaa laitteiden kuormitettavuutta. Lisäksi yliaallot voivat johtaa ylikuormitustilanteisiin, jotka voivat vaurioittaa erityisesti kondensattoreita sisältäviä sähkölaitteita. Lisäksi yliaallot voivat aikaansaada mittareiden virhenäyttämiä ja automaatiolaitteiden ja suojareleiden virhetoimintoja. Pienilläkin yliaaltomäärillä on potentiaalia aiheuttaa suuria aineellisia vaurioita, mikäli verkkoimpedanssin muuttuminen johtaa resonanssi-ilmioihin. Resonanssit vahvistavat yliaaltoja moninkertaisiksi, mikä saattaa johtaa vaurioihin sähköjärjestelmässä ja sen kulutuslaitteissa. (Yliaallot ja kompensointi, 4.3 Yliaaltojen haitat.)

Yliaaltovirrat aikaansaavat magneettikenttiä, jotka saattavat aiheuttaa välkyntää mm. monitoreissa ja näytöissä. Suuritaajuiset häiriöt (ääni-, radio- ja tv-taajuudet) leviävät säteilemällä kaikkialle ympäristöön ja niitä on erityisen hankala paikantaa. Suuritaajuisia häiriöitä ei välttämättä löydy sähkön laadun mittauksella, joka tallentaa tuloksia 25. yliaaltoon saakka jättäen yli 1250 hertsin taajuiset yliaallot havaitsematta. Suuritaajuisiakin yliaaltoja on mittalaitteiden puutteista huolimatta mahdollista suodattaa aktiivisuodattimella. (Yliaallot ja kompensointi, 4.3 Yliaaltojen haitat.)

Myös kolmas yliaalto, jota esimerkiksi vinokuormituksesta aiheutuu, on erityisen ongelmallinen. Tämä johtuu siitä, että kolmas yliaalto summautuu nollajohtimeen ja leviää sähköjärjestelmän nollausten kautta rakennuksen johtaviin runkorakenteisiin ja sitä kautta arvaamattomankin pitkien matkojen päähän. Lisäksi nollajohdinta voi kuormittaa vain rajoitetusti ja kolmannen yliaallon aikaansaamat kuormitukset voivat nousta vaihevirtojakin suuremmiksi summautumisen vuoksi. (Yliaallot ja kompensointi, 4.3 Yliaaltojen haitat.)

Kaikkien muiden haittojen lisäksi yliaallot saattavat nostaa energiakustannuksia. Rakennuksen laskutusmittauksessa saattaa esiintyä muutoksia pätö- ja loisteholukemissa sekä energiamittauksissa. Siksi onkin syytä huomioida, että yliaalloilla voi olla hyvin arvaamattomia vaikutuksia kustannuksiin. Mittareissa saattaa esiintyä myös värähtelyä, joka on omiaan vääristämään mittareiden näyttämiä. (Yliaallot ja kompensointi, 4.3.1 Yliaaltojen haitat energiamittauksessa.)

Yliaaltojen aikaansaamat haitat ovat riippuvaisia taajuudesta. Suuritaajuiset yliaallot aikaansaavat ääni- ja radiotaajuisia häiriöitä, kun taas pienitaajuiset yliaallot aiheuttavat mm. lämpenemistä ja lisähäviöitä sähkölaitteissa ja virhetoimintoja suojalaitteissa. Resonanssi-ilmiöiden mahdollisuuden vuoksi olisi hyvä suodattaa pienetkin yliaaltopitoisuudet sähköjärjestelmästä. (Yliaallot ja kompensointi, 4.3 Yliaaltojen haitat.)

9.3 Laitehankinnat ja laitekannan uusiminen

Tutkimuskohteena toimineessa rakennuksessa on erittäin paljon erilaisia sähkölaitteita. Kiinteistökuorma, kuten valaisimet ja ilmanvaihto muodostaa merkittävän kuormituksen ja siihen on syytä kiinnittää huomiota erityisesti uusien laitteiden hankinnan suunnittelun yhteydessä.

CELMA on viimekuukausina julkaissut tiedotteita uusista kohdelamppujen energiatehokkuusvaatimuksista (Energy Efficiency Requirements for reflector lamps). Niitä ei tässä työssä erityisesti käsitellä, mutta valaisinkannan uusimisessa on syytä huomioida, että nykylampuista ainoastaan riittävän tehokkaat LEDit, pienoisjännitteiset halogeenilamput sekä monimetallilamput (suurpainaiset purkauslamput) tulevat läpäisemään energiatehokkuusvaatimukset kolmen vuoden päästä. (CELMA, ELC ranges.) Tästä johtuen on syytä hankkia paitsi sähkön laatua häiritsemättömiä valaisimia, myös sellaisia valaisimia, joiden lamppujen tuotanto ei tule energiatehokkuusvaatimusten vuoksi loppumaan.

Kohderakennuksessa olisi erittäin suotavaa pyrkiä eroon pienoisloistevalaisimista, sillä EN 61000 -standardi ei säätele niiden sähköverkkoon aiheuttamia häiriöitä. Muiden loistelamppujen osalta standardi asettaa maksimipäästörajat. (EN 61000-3-2, Controlling Harmonic Emissions in Lighting Applications)

10 SÄHKÖN LAADUN VARMISTAMINEN PITKÄLLÄ TÄHTÄIMELLÄ

Jotta voitaisiin välttyä turhilta ylikuormitustilanteilta, ylimääräisiltä häviöiltä, laitteiden vaurioitumiselta ja mittareiden virhenäyttämiltä, on syytä huolehtia sähköjärjestelmästä kokonaisvaltaisesti. Laadukkaasti toteutettu sähköjärjestelmäkin vaatii jatkuvaa huolenpitoa, jotta voidaan varmistua sähkön laadusta. Tämä johtuu siitä, että kuormitukset vaihtelevat ja tehoelektroniikka yleistyy jatkuvasti kuormalaitteissa. (Yliaallot ja kompensointi, 1 Johdanto.)

10.1 Tarkastuslista

Yliaaltojen hallinta vaatii säännöllistä tarkkailua ja tilanteisiin reagoitua. Siksi yliaaltojen seuranta tulee sisällyttää jokaisen kohteen huoltosuunnitelmaan. Mikäli mitään ei ajan kuluessa tehdä, voi tilanne riistäytyä käsistä. Huonontunut sähkön laatu voi aiheuttaa jopa tulipalon vaaran, joten seuranta ei tulisi laiminlyödä mistään syystä. Huoltosuunnitelmaan olisi hyvä sisällyttää tarkastuslista, jonka avulla huoltomiehien olisi helppo tehdä tarvittavat mittaukset ja silmämääräiset tarkastukset määräajoin. Tarkastuslistassa olisi hyvä olla ainakin seuraavissa luvuissa esitellyt asiat. (Yliaallot ja kompensointi, 1 Johdanto.)

10.1.1 Erot vaihekuormissa

Kiinteistön sähköjärjestelmä suunnitellaan toteutusvaiheessa siten, että vaiheita voitaisiin kuormittaa mahdollisimman tasaisesti. Vinokuormitusta, eli vaiheiden välistä kuormituseroa pääsee syntymään, mikäli myöhempiä muutoksia ei tehdä suunnitellusti. Etenkin laajassa rakennuksessa vinokuormitusta pääsee helposti syntymään, mikäli yksi vaihe on pääasiallisesti varattu pistorasiakäyttöön. Kuormitusta onkin tärkeää tarkkailla esimerkiksi kuukausittain. Suurten rakennusten sähkökeskuksissa on usein paikalliset mittaukset, jotka on varustettu näytöillä. Nämä keskuskohtaiset, jatkuvat virta- ja jännitemittaukset helpottavat kuormitusten seuranta.

10.1.2 Virtamittaukset

Yliaaltoja mitattaessa olisi hyvä tarkastaa myös eri vaiheiden virrat, jolloin selviää myös mahdollinen vinokuormitus. Etenkin, jos yliaaltospektri sisältää runsaasti kolmatta yliaaltoa, on syytä mitata myös nollajohtimen virta. Kolmas yliaalto tyypillisesti kuormittaa nollajohdinta ja rakennuksen nollausten kautta saattaa eri puolille sähköjärjestelmää aiheutua ei-toivottuja magneettikenttiä nollavirran vaikutuksesta. Lisäksi on hyvä mitata kaapeleiden ympäriltä summavirtoja ja selvittää, missä mahdolliset puuttuvat ampeerit virtaavat. Mikäli summavirtamittauksen lukema eroaa vaihevirtojen summasta, saattaa olla että rakennuksen johtavissa putkistoissa ja raudoituksissa kiertää jopa kymmenien ampeerien virrat. (Yliaallot ja kompensointi, 10.2 Liitännäismittaukset.)

10.1.3 Välkyntä

Vaikka yliaaltoja ei mittauksissa löytyisi runsaasti, voi ongelmia ilmetä välkyntän vuoksi. Välkyntä on valonlähteen luminanssin eli pintakirkkauden tai spektrijakautuman muutosten aikaansaamaa näköaistimuksen vaihtelua ajan suhteen. Välkyntää voi ilmetä valaisinten valonlähteissä silminnähtävänä välkkymisenä jännitevaihteluiden vuoksi tai magneettikenttien seurauksena monitoreiden ja näyttöjen välkkymisenä. Välkyntästä on säädetty standardissa EN 50160 ja sitä on mahdollista mitata esimerkiksi tämän opin- näytetyön mittauksissa käytetyllä mittauskalustolla (ks. 6.3 Mittauskalusto). (EN 50160, 3.3 Välkyntä.)

10.1.4 Resonanssit

Rakennuksissa, joissa on käytössä kapasitiivisia loistehon kompensointilaitteita tai muuta kapasitiivista kuormaa, on syytä tiedostaa resonanssipiirien muodostuminen. Sähköjärjestelmän impedanssi on usein induktiivinen, joten siihen liitettävä kapasitiivinen kuorma- tai toimilaite muodostaa rinnakkais- ja sarjaresonanssi- ja kapasitanssin ja induktanssin yhteisvaikutuksesta. Resonanssitilanteessa yliaallot voivat moninkertaistua. Vähäisetkin yliaallot olisi syytä suodattaa pois sähköjärjestelmästä resonanssinai- kaisten moninkertaistumisten vuoksi. Yliaallot voivat käyttäytyä resonanssien vuoksi arvaamattomasti, joten mukautumiskykyinen aktiivisuodatin on ainoa toimiva ratkaisu

vahvistuneiden yliaaltojen suodatukseen. (Yliaallot ja kompensointi, 7.1 Kompensointilaitteet ja resonanssit.)

Resonanssin aiheuttamaan vahvistumiseen vaikuttaa resonanssitaajuuden ja yliaaltotaajuuden läheisyys sekä sähköjärjestelmän reaktanssi- tai resistanssisuhteet. Voimakkaan resistiivinen sähköjärjestelmä vaimentaa yliaaltojen vahvistumista. (Yliaallot ja kompensointi, 7.1 Kompensointilaitteet ja resonanssit.)

11 POHDINTA

Yliaaltoja esiintyy joissain määrin kaikissa sähköjärjestelmissä tehoelektroniikan ja epälineaaristen kuormien vuoksi. Yleisen sähköjakeluverkon yliaaltojen hallinnasta vastaa jakeluverkon haltija, jolla on velvollisuus toimittaa kuluttajille hyvänlaatuista sähköä. Näin yleensä tapahtuukin, joten kuluttajan päässä esiintyvät yliaalto-ongelmat ovat yleensä peräisin kuluttajan omasta toiminnasta. Laajoissa sähköjärjestelmissä kulutuslaitteita on useita, joten yksittäisen laitteen tuottamat yliaallot ovat vain osa kokonaiskuvaa. Tästä syystä suodatuksen sijoittaminen on usein hankalaa. Yksittäistä yliaalto-lähdettä ei välttämättä ole ja suodattimelle olisi silti löydettävä sijoituspaikka mahdollisimman lähellä yliaaltolähdettä tehontarpeen minimoimiseksi.

Yliaaltojen hallinnasta olisi syytä tehdä osa jokapäiväistä toimintaa. Uusien laitehankintojen suunnittelulla, kuormitusmuutosten listaamisella, toistuvalla sähkön laadun mittaamisella, vaihekuormien tasaamisella ja resonanssi-ilmiöiden minimoimisella voidaan vaikuttaa rakennuksen sähköjärjestelmän sähkön laatuun myös tulevaisuudessa. Kun tiedostetaan, että yliaaltotaajuudet ja määrät vaihtelevat, voidaan tilanne pitää hallinnassa esimerkiksi mukautumiskykyisellä aktiivisuodattimella.

Aktiivisuodatus on nykyaikainen ja kehittynyt sähkön laadun parannuskeino. Yhdellä toimilaitteella voidaan hallita sähkön laatua kokonaisvaltaisesti, vaikka tilanne muuttuisi ajan kuluessa. Lisäksi aktiivisuodatin vähentää resonanssi-ilmiöiden riskiä ja seurauksia. Aktiivisuodattimen toiminta ei perustu kondensaattorin ja kelan muodostamiin pieni-impedanssisiin imupiireihin kuten passiivisuodattimen toiminta vaan virtalähdeperiaatteeseen. Aktiivisuodatin tuottaa esiintyviin yliaaltoihin nähden 180 asteen vaihesiirrossa olevia yliaaltoja, jotka kumoavat sähköjärjestelmässä esiintyvät yliaallot. Lisäksi sen toimintaa voidaan säätää vastaamaan käyttäjän toiveita. Passiivisuodattimien komponentit saattavat pahimmassa tapauksessa lisätä resonanssin vaaraa reaktanssinsa vuoksi, mikä voidaan välttää valitsemalla aktiivisuodatin. Passiivisuodatin toimii lisäksi vain ennalta määrättyjen yliaaltojen suodatukseen, eikä mukaudu millään tavalla muutuneisiin yliaaltoihin.

Suodatuslaitteiston hankintakustannukset saattavat olla kynnyksysymys monelle sähkökäyttäjälle. Yliaallot heikentävät ja vaurioittavat sähköjärjestelmää hitaasti, joten

aina ei nähdä tarvetta suodatukselle. Etenkin arvokkaita laitteita sisältävissä rakennuksessa yliaaltojen suodatus olisi syytä ottaa käyttöön jo varhaisessa vaiheessa, jotta ikäviltä lisäkustannuksilta voitaisiin välttyä. Aktiivisuodatin maksaa itsensä takaisin monella tapaa. Laitteita ei vaurioidu turhaan, kun yliaallot saadaan hallintaan. Suodatusmenetelmää ei tarvitse uusia, sillä se mukautuu muuttuviin tilanteisiin. Laskutusmittaukset ovat luotettavia eikä kuluttajalta peritä ylihintaa yliaaltojen vääristämien mittarilukemien vuoksi. Herkät laboratorioprosessit pysyvät luotettavina ja ikäviltä ääni- ja välkyntäilmiöiltä voidaan parhaassa tapauksessa välttyä. Aktiivisuodattimen säätöjä on helppo muuttaa käyttöliittymän kautta, mikäli esimerkiksi halutaan alentaa tai nostaa suodatustasoa tai valita, mitä yliaaltoja suodatetaan. Lisäksi aktiivisuodattimissa on toiminto, joka mahdollistaa suodatuksen kaikille, myös väliharmonisille taajuuksille.

LÄHTEET

Alstom Grid-verkkosivut. Luettu 23.4.2013. <http://www.alstom.com/grid/>.

EN 50160 (2010). Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks

EN 61000-3-2. Controlling Harmonic Emissions in Lighting Applications

Hedman, A. 2009. Taajuusmuuttajat (ABB). Luettu 22.4.2013
<http://www.pkky.fi/Resource.phx/pkky/projektit/taitaja-osaaminen/sahko.htx.i2025.pdf>

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt (1. painos). Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T., Falck, E. Yliaalto-opus. Luettu 15.4.2013.
www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere: Tammer-Paino Oy.

Virtanen, T. 2005. Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koekentälle. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201003064687>

CELMA ELC ranges. Kohdelamppujen energiatehokkuusvaatimukset. Luettu 23.4.2013
<http://bit.ly/10bFmsY>

LIITTEET

Liite 1. Mittausraportti

1 (3)

Paikka:	Laboratorio- ja toimistorakennus Tampereella
Päivämäärä:	28.2.2013
Mittauksen suorittivat:	Janne Kiviranta, Alstom Grid Oy, aiemmista sähkön laatumittauksista vastannut henkilö, Ella Sievä
Mittauslaite:	Fluke 1760 (Topas 1000)
Kirjoittaja:	Ella Sievä

Johdanto

Kohteessa toimii teknologiayritys, jonka toimeksiannosta kohderakennusta on 1990-luvulta eteenpäin saneerattu ja laajennettu. Kohteen sähköjärjestelmää syöttää kaksi muuntajaa. Toisen muuntajan syöttämässä sähköjärjestelmässä on havaittu korkea-taajuisia särinää, jonka arvellaan olevan peräisin testilaboratorioiden häiriönsuodatuksessa käytetyistä koteloituista alipäästösuodattimista. Mittaukset tehdään sähkön laadun arvioimiseksi ja samalla pyritään löytämään aiheuttaja meluhaitoille. Mittausten tarkoituksena on tuottaa tarvittavat tiedot yliaaltojen suodatuksen ja muiden sähkön laadun parannustoimenpiteiden suunnitteluun. Kohteessa ei mitaushetkellä ole käytössä minkäänlaista loistehon kompensointilaitteistoa.

Mittaukset

Mittaukset suoritettiin pää- ja nousukeskuksilta kattavasti kaikista vaiheista ja nolla-johtimista rakennuksen kellarikerrokseen sijoitetuissa sähkötiloissa. Mittaustuloksia tallennettiin UPS -laitteen ollessa ensin kytkettynä sarjaan meluongelmia tuottavia sähkölaitteita syöttävän keskuksen lähtöön ja myöhemmin UPS -laitteen ollessa irti-kytketty.

2 (3)

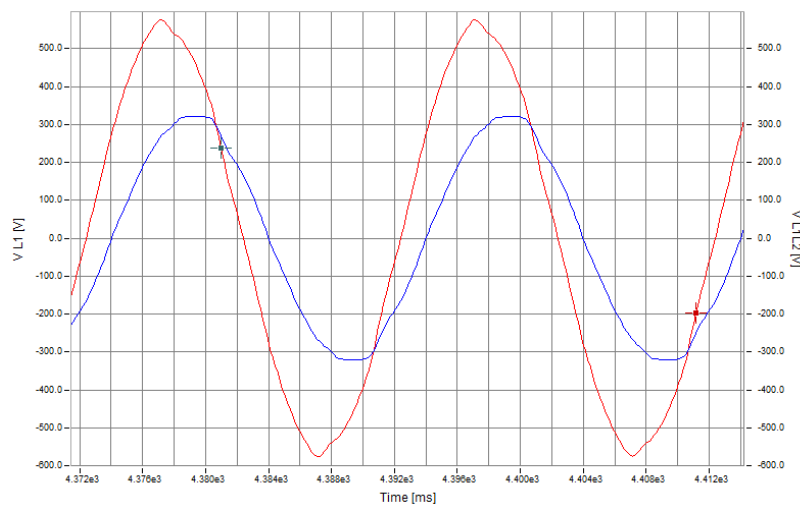
Mittaustulokset osoittivat, että jännitteet eivät ole säröytyneet erityisen paljoa. Kaikkien vaiheiden osalta särö oli samaa suuruusluokkaa, joten mittaustulokset esitellään ainoastaan vaiheen 1 osalta. UPS-laitteen irtikytkeminen ei vaikuttanut merkittävästi jännite- tai virtasäröön, vaan sillä saatiin alipäästösuodatinten melutasoa madallettua.

Taulukossa 1 on esitetty mittaustulokset.

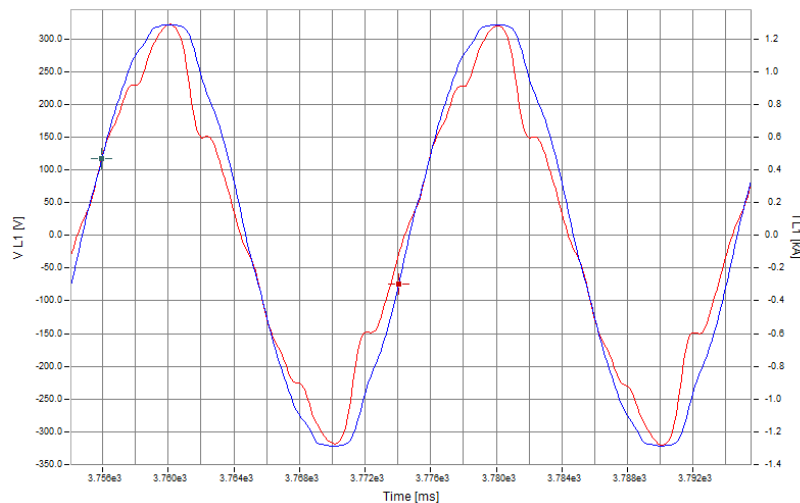
Taulukko 1 Mittaustulokset

Vaihe	L1	L2	L3
Jännitteet	231,12 V	230,97 V	232,78 V
Virran max. arvot	871,11 A	789,40 A	676,23 A
Jännitesärö	2,41 %	2,46 %	2,21 %
Virtasärö	12,93 %	13,98 %	14,08 %
Tehokerroin	-0,99	-0,99	-0,99

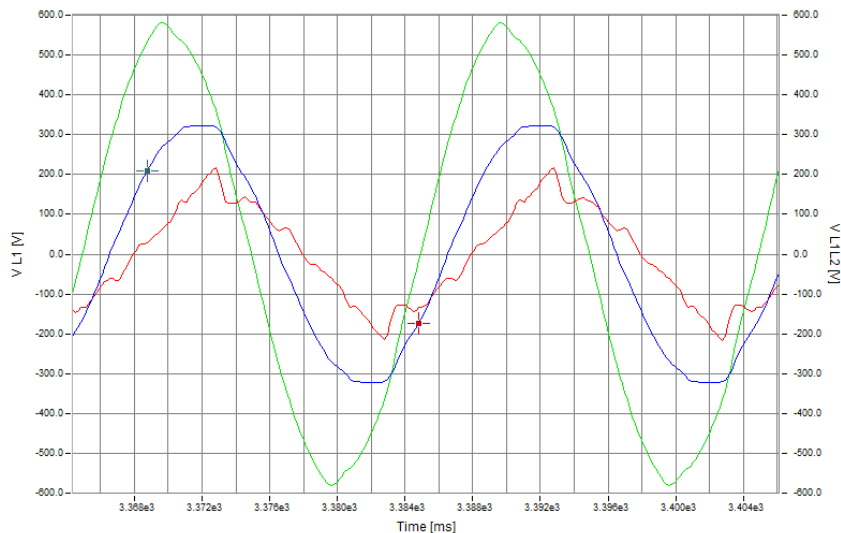
Tärkeimmät mittaukset on esitetty seuraavaksi graafisesti:



Kuva 1 Pääjännitteen (L1-L2) ja vaihejännitteen (L1) oskilloskooppikuva



Kuva 2 Vaihejännitteen ja -virran (L1) oskilloskooppikuva



Kuva 3 Pääjännitteen (L1-L2), vaihejännitteen (L1) ja vaihevirran (L1) oskilloskooppikuva

Johtopäätös

Yliaallot eivät mittaushetkellä olleet hälyttävällä tasolla. Jännitesärö oli melko pieni, mutta virtasäröä oli havaittavissa jonkin verran. Mittausajankohta oli viikolla, jolloin osa henkilökunnasta oli lomalla, joten mittauksia voidaan pitää ainoastaan suuntaa-antavina. Suosittelen uusintamittausten järjestämistä henkilökunnan paikallaolosten ollessa korkeampi, sillä vaiheiden kuormituksen oletetaan olevan silloin suurempi ja yliaaltojen aiheuttajia mahdollisesti enemmän kytkettynä sähköjärjestelmään.

Suosittelen yliaaltojen reaaliaikaista suodatusta esimerkiksi MaxSine Compactilla tai muulla aktiivisuodattimella. Samalla suodatinlaitteella voidaan vaikuttaa myös loistehotason. Yhdellä tai useammalla suodattimella voidaan oikealla sijoittelulla saavuttaa hyväksyttävä häiriötaso. Kytkemällä useampi MaxSine Compact -aktiivisuodatin rinnan voidaan suodattaa huomattavan tehotason omaavan järjestelmän yliaaltoja reaaliaikaisesti. Aktiivisuodatin kykenee suodattamaan yliaaltoja ja kompensoimaan loistehoa taajuus- ja huippuarvovaihteluista huolimatta mukautuen kuhunkin tilanteeseen. Pienetkin yliaaltopitoisuudet on syytä suodattaa laajassa sähköjärjestelmässä, jossa resonanssi-ilmiöt eivät ole ennakoitavissa. Resonanssin aikana yliaallot voivat vahvistua jopa moninkertaisiksi.

Liite 2. MaxSine Compact tuote-esite

1 (2)



Alstom power compensation equipment helps customers improve performance with energy savings and better power quality. Our products and solutions save customers money and reduce the environmental impact of their operations.

For active compensation of harmonic currents and reactive power

There is an increasing amount of electrical equipment with non-linear voltage-current characteristics connected to the network. The harmonic currents they produce cause harmonic voltages in network impedances, which add to the fundamental system voltage and result in voltage distortion.

This voltage distortion is experienced by all electrical equipment connected to the network, leading to higher thermal loading of motors, transformers, capacitors, switchgear and cabling. Some of the electrical equipment develops more audible noise when supplied with distorted voltage. Sensitive electronic protection, control and ripple control systems are not likely to operate properly when supplied with distorted voltage.

The most effective way to eliminate harmonics is the MaxSine active harmonic filter.

Main compensation features

- Two compensation modes: fast mode for selectable harmonics (1st-50th) or ultra fast mode for global compensation
- Devices available for 3-wire as well as 3-wire + neutral (4-wire)
- Priority settings for harmonics and/or fundamental reactive compensation
- Total power factor can be forced to 1
- Ability to balance line currents
- Ability to eliminate neutral current
- Adjustable amplitude and phase of individual compensation harmonics currents
- Excellent dynamics: response time < 1ms in ultra fast mode and adjustable from 1 network period to 50 network periods in fast mode
- Multiple CT-circuits (open loop, closed loop, CT-additions, etc.)
- Selectable dual parameter page setting e.g. for emergency generator supply

Why MaxSine Compact?

- Modular construction
- Power adaption by increasing the number of modules
- Improved compensation capacity
- Compact size
- Directly wall-mounted or floor mounted in cubicle
- Basic module 100 A line current and 300 A neutral current
- 208-480 V
- Informative display
- Web browser for device settings and displaying measurements

MaxSine features

- Small size enables customised modular cabinet construction.
- Ethernet connection and web server for monitoring, setting and control
- User interface: PC or optional HMI
- Several languages
- Relay output for run indication
- Standby in case of small load current
- Electronic overload protection
- Auxiliary temperature probe (optional)
- Clock



MaxSine Compact module



Applications

- Office buildings
- Hospitals
- Companies with fast-changing loads (welding machines, lifts)
- Wind farms
- All users with fast variable loads

Customer benefits:

- Real time filtering and power compensation
- Compact modular construction
- Improved usability
- Money savings
- Improved power quality

GRID

ALSTOM

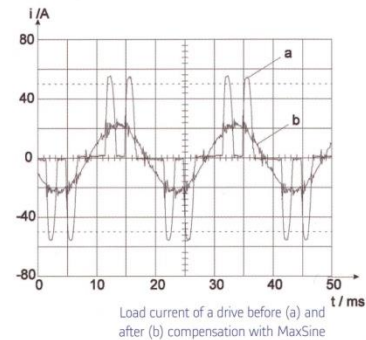
We are shaping the future

(ALSTOM Grid Oy, Tampere)

Extended power meter functions

- Network voltages
- Load, network and compensation currents, network-phases and neutral
- RMS, fundamental, harmonic currents and crest factors
- Active, reactive, apparent and harmonics power, cos phi
- THD(u), THD(i), current harmonics spectrum up to 50th harmonics
- Waveforms of currents
- Cabinet temperature
- Uploading of measurements for reporting

ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001-certified management programs govern the entire development and production process for power compensation products and ensure a high-quality product.

**Technical characteristics**

	MaxSine 100AV6C	MaxSine 100AV6CE
Rated output	100 Arms	100 Arms
Phases:	60 Arms	100 Arms
Neutral:	60 Arms	300 Arms
	All integer multiples of the above values (200 A, 300 A, 400 A etc.)	
Mains voltage:	3*208 VAC (-15% ... +10%) 3*400 VAC (-15% ... +10%) 3*480 VAC (-15% ... +10%) MaxSine 100AV6C	
Frequency:	45-65 Hz	
Switching frequency:	10 kHz nominal	
Overload capability:	1.1 x I RMS (1 min/10 min)	
Response time:	Ultra fast mode: <1 ms Fast mode: 1 - 50 periods, adjustable	
Current measurements:	6 x 100-10000 A/5A CT inputs, class 0.5 6 x 10 V inputs for Rogowski coils or Hall sensors	
Power dissipation:	< 3% of the rated power of the device	
Potential free output contact:	RUN, 24 VDC 1 A	
LED indications:	Errors, Run	
Digital input:	Dual parameter setting Remote ON/OFF	
Communications interface:	Ethernet web server for monitoring, setup and control	
Noise level:	< 80 dB (Value is related to 100 A fundamental reactive current only)	
Ambient temperature:	-10° ... +40°C	
Temperature of storage:	-40° ... +70°C	
Atmospheric humidity:	0 - 90 % (no dew)	
Elevation of installation:	< 1000 m above sea level (in case of deviation please contact your supplier)	
Degree of protection:	IP20	
Enclosure:	MaxSine 100AV6C 241x394x880 mm WxDxH 57 kg	MaxSine 100AV6CE 241x394x1129 mm WxDxH 65 kg
Enclosure material:	1 mm sheet iron, colour RAL 7035	
Cooling:	Forced air cooled	
EMC immunity:	EN 61000-6-2	
EMC emissions:	EN 61000-6-3, EN 55011B	
Electrical safety:	IEC 61800-5-1	

Alstom Grid Worldwide Contact Centre

www.alstom.com/grid/contactcentre/

Tel: +44 (0) 1785 250 070

www.alstom.com

ALSTOM

Grid-PPA13-MaxSine Compact 7/2020-2022, 10-EN © ALSTOM 2022. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited. Printed on paper made with pure ECF (Elemental Chlorine Free) ecological cellulose produced from trees grown in production forests under responsible management, and selected recycled three-layer fibres.

(ALSTOM Grid Oy, Tampere)