

Jesse Jaanila

Sähkön laatu toimistoverkossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

14.2.2013



Tekijä Otsikko	Jesse Jaanila Sähkön laatu toimistoverkossa
Sivumäärä Aika	48 sivua + 1 liite 14.2.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	projektinhoitaja Tero Kasurinen markkinointijohtaja Pasi Kujala lehtori Tuomo Heikkinen
<p>Tässä insinöörityössä tutkittiin Helsingin Messukeskuksen toimistotalon sähkön laatua. Kiinteistöä huoltava Lemminkäinen Talotekniikka Oy oli kiinnostunut selvittämään, esiintyykö toimistotalon pienjänniteverkossa sähkön laatua heikentäviä häiriöilmiöitä.</p> <p>Työssä seurattiin valitun toimistotalon kulutuspisteen jännitteen laatua viikon ajan ja arvioitiin, onko verkon häiriötaso hyväksyttävä ja olisiko häiriöiden suodattaminen pois kannattava investointi. Työn painopisteenä oli jännitteen käyrämuotoa vääristävät verkon nimellistaajuudesta poikkeavat virrat eli harmoniset yliaallot. Yliaalloja toimistotalon verkkoon aiheuttaa esimerkiksi hissien ja ilmastointilaitteen nopeussäädetty käyttö, tietokoneiden hakuriteholähteet sekä loistelamppuvalaisimet, jotka ottavat virtaa ja jännitettä epälineaarisesti.</p> <p>Työssä on kuvailtu käsitteellisesti häiriöitä, jotka vaikuttavat sähkön laatuun sekä käytiin läpi, mitkä sähkölaitteet tuovat häiriöitä verkkoon. Lisäksi työhön on kerätty menetelmiä, joilla sähkön käyttäjä voi vähentää verkon jännitesäröä.</p> <p>Työssä esitetyt mittaustulokset osoittavat, että Helsingin Messukeskuksen toimistotalon sähkön laadullinen tila on hyvä. Verkko ei nykyisessä tilassaan vaadi lisämittauksia, mutta esimerkiksi kuormien kasvaminen saattaa aiheuttaa tarpeen uusille tarkasteluille.</p>	
Avainsanat	sähkön laatu, yliaallot, jännitesärö

Author Title	Jesse Jaanila Power Quality in Office Network
Number of Pages Date	48 pages + 1 appendix 14 February 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical engineering
Specialisation option	Electrical power engineering
Instructors	Tero Kasurinen, Project Manager Pasi Kujala, Marketing Manager Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to monitor the power quality in the Helsinki Exhibition & Convention Centre's office building. Lemminkäinen Talotekniikka Oy maintains the property and was interested in investigating the occurrence of disturbance phenomena in the low-voltage network that deteriorate power quality.</p> <p>This study analyzed the voltage quality at the office building's power entrance for one-week period and evaluated, whether the degree of disturbances was acceptable. Whether the filtering of the disturbances would be an economically viable investment, was also considered. The area of focus in this study was waveform-distorting currents with abnormal frequency, called harmonics. Sources for current harmonics in the office building are equipment with non-linear current/voltage characteristics such as adjustable speed drives in elevators and air conditioner, computers' switched mode power supplies and fluorescent lamps.</p> <p>This study conceptually describes disturbances that have an effect on power quality, and reviews which equipment are sources for disturbances. This study also includes methods for voltage distortion reduction.</p> <p>Measurements referred to in this study indicate, that the power quality in the Helsinki Exhibition & Convention Centre's office building is good. The office building's network does not require additional measurements in its current state, but for example rise of loads might create the need for remeasurements.</p>	
Keywords	power quality, harmonics, voltage distortion

Sisällys

Tiivistelmä

Abstarct

Sisällys

Symbolit ja lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkön laatu	2
2.1	Jännitteen laatu	2
2.2	Huonosta sähkön laadusta aiheutuvat kustannukset	3
2.3	Sähkön laatustandardi	4
2.4	Jännitetaso	5
2.5	Ylijännite	7
2.6	Jännitekuopat	9
2.7	Välkyntä	12
2.8	Epäsymmetria	13
2.9	Signaalijännitteet	14
2.10	Yliaallot	15
2.11	Verkkotaajuus	21
3	Loistehon kompensointi	23
4	Helsingin Messukeskuksen toimistotalo	26
4.1	Messukeskuksen toimistotalon kuormat	26
4.1.1	Hakkuriteholähde	26
4.1.2	Loistelamppu	28
4.1.3	Ilmastoinnin ja hissien nopeussäädetyt käytöt	29
5	Jännitesärön pienentäminen	30



5.1	Verkon yliaaltoherkkyys	30
5.2	Laitevalinnat	31
5.3	Reaktori (kuristinkela)	32
5.4	Yliaaltojen suodatus	32
5.4.1	Sarjaresonanssiipiiri	32
5.4.2	Rinnakkaisresonanssiipiiri	34
6	Sähkön laadun mittaukset	34
6.1	Mittalaite	35
6.2	Mittaustulosten tallennus ja analysointi	36
6.3	Mittauskohde ja kytkentä	36
7	Mittaustulokset ja kommentit	36
7.1	Jännite- ja virtatasojen vaihtelut	36
7.2	Jännitteen ja virran THD-tasot	39
7.3	Verkon resonanssit	43
7.4	Välkynnän häiritsevyyssindeksin P_{it} arvo	44
7.5	Jännitteen epäsymmetria	44
7.6	Mittaustulosten yhteenveto	45
7.7	Vertailu vastaavaan tutkimukseen	46
8	Yhteenveto	47
	Lähteet	48
	Liitteet	
	Liite 1. Energian- ja tehonkulutuksen mittaustulokset	



Lyhenteet ja symbolit

C	kondensaattori
$\cos \varphi$	tehokerroin
D	säröteho; VA
f	taajuus; Hz
f_r	resonanssitaajuus; Hz
h	harmonisen yliaallon moninkerran järjestysluku
I	koko virran tehollisarvo; A
I_h	harmonisen yliaaltovirran tehollisarvo; A
K	epäsymmetriakerroin; %
L	kela
P	pätöteho; W
P_{sti}	lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi
P_{lt}	pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi
Pj-verkko	pienjänniteverkko
Q	loisteho; Var
Q_C	kompensointiteho; Var
Q-arvo	resonanssipiirin hyvyysluku
R	resistanssi; Ω
S	näennäisteho; VA
smv	sähkömotorinen voima; V
S_k	oikosulkuteho; VA
S_N	muuntajan nimellisteho; VA
THD	kokonaissärökerroin (<i>Total Harmonic Distortion</i>); %
U	koko jänniteen tehollisarvo; V
U_C	sopimuksen mukainen jakelujännite; V
U_h	harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvo; V
u_k	muuntajan oikosulkujännite; %
X	reaktanssi; Ω
Z	impedanssi; Ω



1 Johdanto

Sähkön laadun ongelmat koskettavat nykyään sähkönkäyttäjiä sekä teollisuudessa että talouksissa. Sähköinsinööreille sähkön laatu on yleinen huolenaihe ja ongelmien ehkäisyyn käytetään paljon resursseja. Termi *sähkön laatu* käsittää useita sähköverkossa esiintyviä häiriöilmiöitä, jotka on Eurooppalaiseen SFS-EN 50160 -standardiin määritelty yksityiskohtaisesti.

Sähkön laadun ylläpitämisestä on tullut haastavaa ja ajankohtaista monesta syystä. Markkinoilla olevat mikroprosessoriohjatut sähkölaitteet ja tehoelektronikan komponentit ovat elektronimekaanisia edeltäjiään paljon herkempiä sähkön laadun muutoksille. Nämä laitteet voivat myös aiheuttaa uusia häiriöitä verkkoon. Teollisuudessa ovat yleistyneet nopeussäädetyt käytöt, kompensointikondensaattorit ja muut epälineaariset kuormat, joilla pyritään tehostamaan tuotantoprosessien suorituskykyä. Tämä on lisännyt teollisuusverkoissa harmonisia yliaalloja. Tavalliset sähkönkuluttajat ovat nykyään paremmin tietoisia sähkön laadun häiriöistä, ja heille ovat tulleet ongelmaksi kohonneet loistehomaksut, laitevauriot ja toimintahäiriöt. Nykyään myös monet sähköverkon osat on integroitu suuremmaksi kokonaisuudeksi, jolloin yhden laitteen toimintahäiriö voi pahimmassa tapauksessa kaataa koko verkon toiminnan. Isot automatisoidut prosessit tulevat näin erittäin herkiksi sähkön laadun vaihteluille.

Tämä insinööryö käsittelee Helsingin Messukeskuksen toimistotalon sähkön laatua. Helsingin Messukeskuksen kiinteistön sähköjärjestelmiä hoitava Lemminkäinen Talotekniikka Oy oli kiinnostunut kartoittamaan toimistotalon kulutuspisteen sähkön laadullista tilaa, koska tutkimuksia ei oltu aikaisemmin tehty.

Työn painopisteenä ovat harmoniset yliaallot ja niiden pienentäminen, koska verkko sisältää suuren määrän komponentteja, jotka ovat luonteeltaan yliaaltolähteitä. Työn tavoitteena on tutkia esiintyykö toimistotalon pienjänniteverkossa sähkömagneettisia häiriöitä ja selvittää mitä niiden ehkäisyksi voitaisiin tehdä.

2 Sähkön laatu

Sähkön laatu on laaja käsite, joten sen määritelmästä on näkemuseroja. Sähkövoimala voi määrittää tuottamansa sähkön laadukkaaksi, koska heidän järjestelmänsä on 99,98 % ajasta toimintavarma. Sähkölaitteiden valmistajille sähkön laatu määrittää ne raja-arvot, joilla laite toimii luotettavasti. Kuluttajien perspektiivistä sähkön laadun ongelmat ovat poikkeamat jännitteessä, virrassa tai taajuudessa, jotka johtavat kuluttajan laitteen rikkoutumiseen tai vialliseen toimintaan. [1, s. 3.]

2.1 Jännitteen laatu

Sähkön laadulla tarkoitetaan yleensä jännitteen laatua. Jännitelähde voi kontrolloida vain sen tuottaman jännitteen laatua, koska virta on aina verrannollinen siihen kytkettyyn kuormaan. Tämän takia sähkön laadun standardit ovat keskittyneet jännitteen muutoksissa tapahtuviin ongelmiin.

Vaihtovirtasähkölaitteet toimivat sinimuotoisella jännitteellä, kun jännitteen taajuus (50 Hz Suomessa) ja suuruus ovat laitteelle määriteltyjen kilpiarvojen toleranssissa. Vaikka syötettävä jännitteen taajuus ja suuruus olisivatkin täysin kohdallaan, virta voi muodostaa häiriöitä, jotka estävät sähkölaitteen toimintavarmun käytön. Sähkölaitteen impedanssien läpi kulkeva virta voi aiheuttaa monia häiriöitä jännitteelle, esimerkiksi

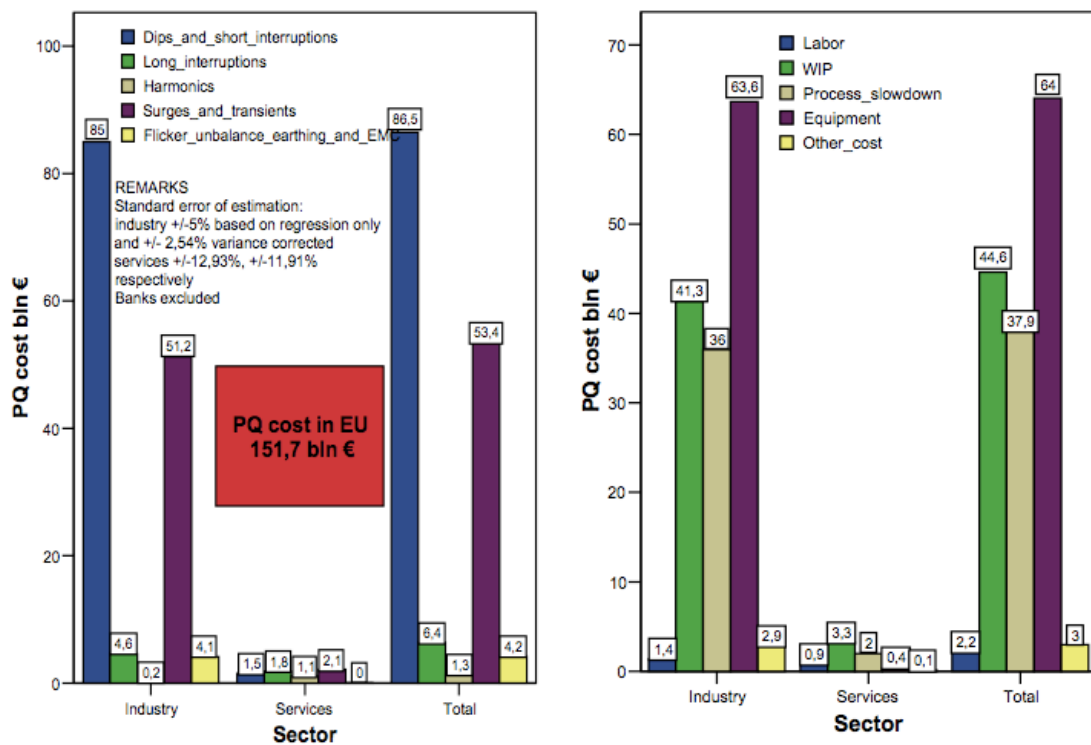
- oikosulkuvirta voi aiheuttaa jännitekuopan tai jännitteen katoamisen kokonaan
- salaman iskusta aiheutuva syöksyvirta muodostaa hetkellisen ylijännitteen, joka johtaa häviöihin ja voi vahingoittaa herkkiä sähkölaitteita. Ylijännite voi myös läpäistä kaapelin eristemateriaalin ja kytkeytyä sähköisesti viereiseen johtimeen, aiheuttaen oikosulun
- harmonisia yliaaltoja tuottava kuorma synnyttää säröytynyttä virtaa, joka kulkee järjestelmän impedanssien läpi ja aiheuttaa säröytynyttä jännitettä. [1, s. 6; 2, s. 87, 209, 267.]

Näistä esimerkeistä huomataan, että vaikka generaattorien muodostama sähkömotorinen voima on käytännössä puhtaasti sinimuotoinen, syntyy jännitteeseen häiriöitä kuluttajien sähkölaitteista ja häiriöilmiöistä. [1, s. 6.]

2.2 Huonosta sähkön laadusta aiheutuvat kustannukset

Taloudellisen hyödyn vuoksi sähkön laatuun on alettu kiinnittää enemmän huomiota ja käyttämään enemmän resursseja. Heikentynyt sähkön laatu aiheuttaa Euroopassa merkittävästi kustannuksia teollisuus- ja palvelusektorilla. [3, s. 1.]

Kuvasta 1 nähdään *European Copper Institute*:n suorittaman tutkimuksen tulokset heikentyneen sähkön laadun aiheuttamista kustannuksista Euroopassa. Tutkimus arvioi, että kustannukset ovat yli 150 mrd. € vuodessa, josta 90 % syntyy teollisuussektorilla. Jännitekuopat ja lyhyet syöttökeskeytykset aiheuttavat noin 57 % kokonaiskustannuksista. [3, s. 3]



Kuva 1. Heikentyneestä sähkön laadusta aiheutuvat kustannukset teollisuus- ja palvelusektorilla Euroopassa. Kustannukset on eritelty eri häiriömuodoille ja kustannuspaikoille [3, s. 3.]

Sähkölaitemarkkinoilla kilpailu on kovaa, ja asiakas haluaa saada tuotteen mahdollisimman edullisesti. Tämän takia laitevalmistajilla ei ole suurta halua lisätä laitteisiinsa erityisiä suoja sähkön laadun häiriöitä vastaan, ellei asiakas itse niitä vaadi. Euroopassa laitevalmistajilta vaaditaan joka tapauksessa laitteille perussuoja EMC-direktiivissä määritellyille sähkömagneettisille häiriöille. Laitteiden EMC-standardisointi on kuitenkin

myös laitevalmistajille eduksi, koska se säästää kuluja muilta alueilta. Sähkön laadun häiriöille herkkä tuote voi saada huonon maineen kuluttajien keskuudessa ja siten laskea myyntiä. Laitevalmistaja voi myös joutua palkkaamaan enemmän henkilökuntaa käsittelemään vikailmoituksia, palautuksia ja suorittamaan laitehuoltoja. [1, s. 7, 8.]

2.3 Sähkön laatustandardi

Sähkö on laadullisesti standardisoitu, kuten muutkin tuotteet ja palvelut Euroopassa. Kuluttajien turvallisuuden ja laitteiden toimivuuden takaamiseksi Euroopassa sähkönjakelijoille on asetettu viitteellinen standardi, jotta asiakkaan kulutuspiisteeseen tuotaisiin laadukasta sähköä.

Eurooppalaisessa standardissa *SFS-EN 50160 Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet* määritellään, kuvataan ja spesifioidaan jännitteen pääominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa yleisiin pien-, keski- ja suurjännitteisiin vaihtosähköjakeluverkkoihin normaaleissa käyttöolosuhteissa. Standardi antaa rajat tai arvot, joiden sisällä sähkökäyttäjä voi olettaa liittämiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän. [4, s. 6.]

Standardissa esitetään seuraavat sähkön laatuun vaikuttavat tekivät:

- jännitetaso
- ylijännite
- jännitekuopat
- välkyntä
- epäsymmetria
- signaalijännitteet
- jännitesäro
- verkkotaajuus. [4, s. 4.]

2.4 Jännitetaso

Sähkökäyttäjälle tärkeä sähkön laatutekijä on toimitetun jännitteen taso. Sähkölaitteet voivat toimia viallisesti, jos jännitetaso on liian alhainen tai liian suuri. Jännitetason merkitys siis korostuu, kun ollaan lähellä sähkökäyttäjää. Jännitetason ylläpitäminen eli jännitestabiilius tarkoittaa voimajärjestelmän kykyä ylläpitää vakaat jännitteet kaikissa solmuissa jatkuvassa tilassa ja häiriöiden jälkeen. Jännitetason vaihtelua aiheuttavia häiriöitä on esimerkiksi oikosulku tai generaattorin irtoaminen. Siirtoverkon jännite ja loisteho liittyvät myös läheisesti yhteen. Jännitetaso laskee jos verkon komponentit sekä johdot kuluttavat enemmän loistehoa kun mitä verkko tuottaa ja päinvastoin. [5, s. 38; 6, s. 246.]

Jännitetason korjaamiseksi löytyy monta käytännön vaihtoehtoa:

- Siirtojohtoon voidaan lisätä rinnakkaiskondensaattori, rinnakkaisreaktori tai staattinen loistehon kompensointilaite. Rinnakkaiskompensointi siirtää virtaa kapasitiiviseen suuntaan. Tällöin virta siirtyy lähemmäksi jännitteen U_1 vaihekulmaa (kuva 2, ks. seur. s.).
- Siirtojohtoon voidaan lisätä sarjakondensaattori. Sarjakompensointi supistaa induktiivista reaktanssia eli lyhentää johdon sähköistä pituutta.
- Verkon jännitettä voidaan säätää generaattoreilla tai muuntajien käännyksillä. [6, s. 368, 370, 373, 374.]

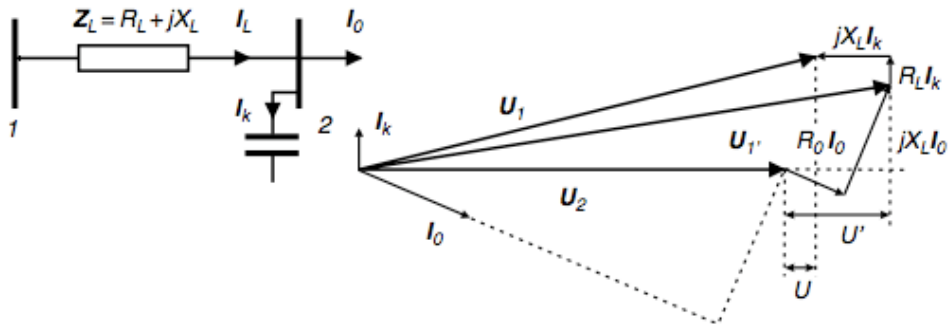
Mitoittaessa verkkoa on tärkeää tietää johdon loppupäässä maksimikuormituksella valitseva jännitteen itseisarvo U_2 sekä johdon jännitteenalenema eli alku- ja loppupään jännitteiden itseisarvojen erotus ($U_1 - U_2$). Jännitteenalenema U' voidaan laskea kuvan 2 (ks. seur. s.) mukaisesti kompensoimattomalle johdolle virran I_0 pätö- ja loiskomponenttien I_{0p} ja I_{0q} sekä johdon reaktanssin X_L ja resistanssin R_L avulla. Tässä tilanteessa rinnakkaiskondensaattoria ei ole kytketty johtimeen.

$$U' = R_L \cdot I_{0p} + X_L \cdot I_{0q} \quad (1)$$

Rinnakkaiskompensoidun johdon jännitteenalenema U voidaan kuvan 2 (ks. seur. s.) mukaisesti kirjoittaa samalla tavalla. Voidaan olettaa, että kuorman virta I_0 on kummasakin tapauksessa yhtä suuri. Tällöin kummankin tilanteen virran pätökomponentti I_{0p} on yhtä suuri. Kompensoidussa tilanteessa virran loiskomponentti saadaan, kun kom-

pensoimattoman tilanteen virran loiskikomponentista I_{0q} vähennetään kondensaattorin virta I_K . [5, s. 38; 6, s. 369.]

$$U = R_L \cdot I_{0p} + X_L \cdot (I_{0q} - I_K) \quad (2)$$



Kuva 2. Rinnakkaiskompensoidun johdon jänniteenaleneman pienentyminen [2, s. 72]

Sähkön laadun kannalta stabiili jännitetaso on tärkeä myös sähkönjakelijalle. Liian pieni jännite pienentää johtimien siirtokapasiteettia, jolloin käyttövarmuus voi vaarantua. Liian suuri jännite ei ole myöskään sallittua, koska verkon eristysrakenteet on mitoitettu tietyille jännitteelle. Jännitetason pitäminen tasaisena vähentää häviötä eli sähkönjakelija pystyy siirtämään sähköä taloudellisemmin. [6, s. 374.]

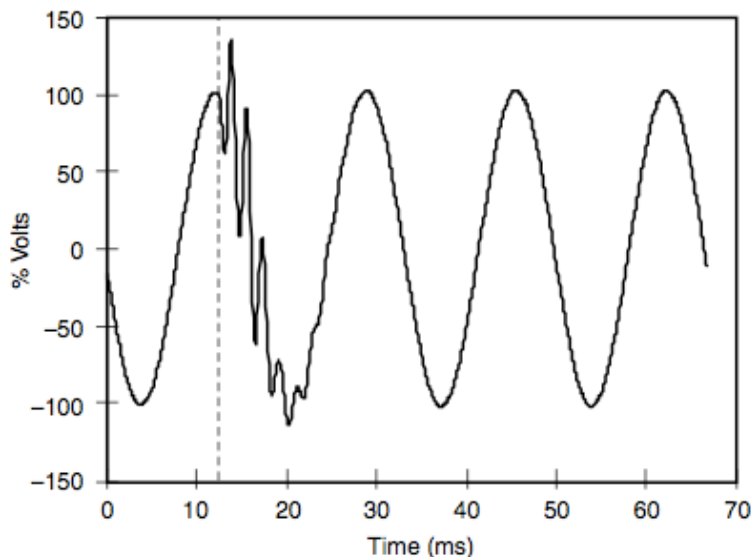
Jännitetason vaihteluille on SFS-EN 50160 -standardissa määritellyt tietyt rajat seuraavasti:

Pienjänniteverkoissa jokaisena viikkona 95 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla 207...253 V ja 100 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla 195,5...253 V. Keskijänniteverkoissa jokaisena viikkona 99 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla $U_C \pm 10\%$ ja 100 % tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla $U_C \pm 15\%$. Suurjänniteverkoille ei esitetty standardissa jännitteen vaihteluiden raja-arvoja, koska kuluttajien määrä on sen verran alhainen ja jänniterajat ovat sopimuskohtaisia. [4, s. 20, 32, 42.]

2.5 Ylijännite

Ylijännitteitä syntyy yleensä sähköverkon sisäisistä komponenteista, kuten kondensaattorien kytkeytymisestä tai luonnonilmiöistä, kuten salamaniskusta. Lisäksi monet elektroniset sähkölaitteet muodostavat ylijännitteitä, kun ne kytketään kuluttajan verkkoon. Ylijännite voi johtaa sähkölaitteiden rikkoutumiseen, jos niiltä suojautumiseen ei olla varauduttu. Lyhytaikaisia ylijännitteitä kutsutaan transienttiylijännitteiksi. Transienttiylijännite on lyhytaikainen impulsiivinen tai värähtelevä ylijännite, jonka kestoaika on maksimissaan muutama millisekunti. Impulsiivisen ja värähtelevän transientin ero on, että impulsiivisen transientin jännitteen polariteetti on joko positiivinen tai negatiivinen, kun taas värähtelevän transientin jännitteen arvo vaihtelee nopeasti polariteetin molemmiin puolin. [1, s. 14–16, 111; 4, s. 16.]

Transienttiylijännitteet on luokiteltu kolmeen kategoriaan niiden keston mukaan. Lyhyet transientit ($<1 \mu\text{s}$) syntyvät paikallisten kuormien kytkeytymisestä. Keskipitkät transientit ($1 \dots 100 \mu\text{s}$) aiheutuvat katkaisijan toiminnasta tai sen läheisyyteen iskeytyneestä salamasta. Pitkiä transientteja (yli $100 \mu\text{s}$) syntyy esimerkiksi sulakkeen palamisesta tai kompensaaatiokondensaattorin kytkeytymisestä (kuva 3). Transientteja syntyy myös ylijännitesuojan toiminnasta ja eristeen tai eristimen läpilyönnistä. [7, s. 3.]

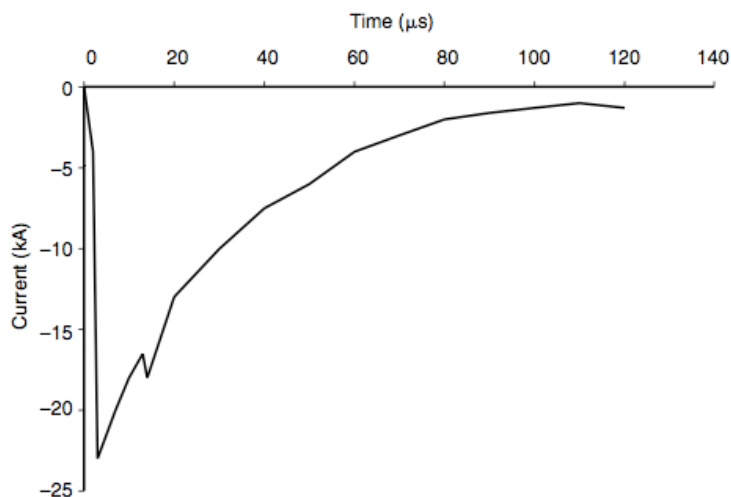


Kuva 3. Kondensaattorin kytkeytymisestä aiheutuva värähtelevä transienttiylijännite [1, s. 113]

Salamaniskusta aiheutunut impulsiivinen transientti on ylijännitteistä vaarallisin sähkölaitteistoille (kuva 4, ks. seur. s.). Yleinen tapa kytkeytymiselle on suora salamanisku

vaihejohtimeen muuntajan tosiossa tai ensiossa. Tästä syntyy suuri ylijännitepiikki, joka voi johtaa sähkölaitteiden rikkoutumiseen. Salama voi myös kytkeytyä sähköverkkoon epäsuorasti induktiivisesti tai kapasitiivisesti. [1, s. 117, 118.]

Värähtelevät transientit syntyvät yleensä sähköverkon komponenttien normaaleista toiminnoista. Taajuudeltaan yli 500 kHz transienttia, joka kestää muutaman millisekunnin, kutsutaan korkeataajuisiksi transientiksi. Korkeataajuisia transientteja syntyy yleensä kytkentätoimenpiteistä tai impulsiivisen transientin sivuvaikutuksena. Transientit joiden taajuus on 5...500 kHz ja joiden kesto mitataan kymmenissä millisekunneissa, kutsutaan keskitaajuisiksi transientiksi. Keskitaajuisia transientteja aiheutuu yleensä kondensaattorien varautuessa ja purkautuessa. Matalataajuinen transientti on alle 5 kHz ja kestoaltaan 0,3...50 ms. Matalataajuisia transientteja syntyy monen sähköverkon komponentin toiminnasta. [8, s. 8, 9.]



Kuva 4. Salamaniskusta aiheutuva Impulsiivinen transientti [1, s. 16]

Pienitaajuisia (< 5 kHz) ylijännitteitä ei luokitella transienteiksi. Niiden taajuus-sisältö ja amplitudi ovat transientteja pienempiä, mutta niiden kestoaika on pidempi. Pienitaajuisia ylijännitteitä syntyy esimerkiksi kytkinoperaatioista, ferresonanssista ja kuorman kytkemisestä pois verkosta. Pienitaajuisen ylijännitteen keston ja amplitudiin vaikuttavat merkittävästi generaattoreiden pyörimisnopeudensäätö ja muut jännitesäätöön osallistuvien komponenttien säätöominaisuudet. Yleisin pienitaajuisen ylijännitteen aiheuttaja on yksivaiheinen maasulku, joka saa aikaan muiden terveiden vaiheiden jännitteen nousun. Maasulkuylijännite on perustaajuinen ja esiintyy normaalisti vain vaihe-

maa -eristysvälissä. Taulukkoon 1 on kerätty erilaisten johtovikojen esiintymistiheydet Suomessa vuosina 1983 – 1992. [9, s. 243–245.]

Taulukko 1. Vikatiheys Suomen kantaverkossa vuosina 1983 – 1992. Johtojen vikatiheydet on 1000 km ja vuotta kohden [9, s. 246 lähde mukailen]

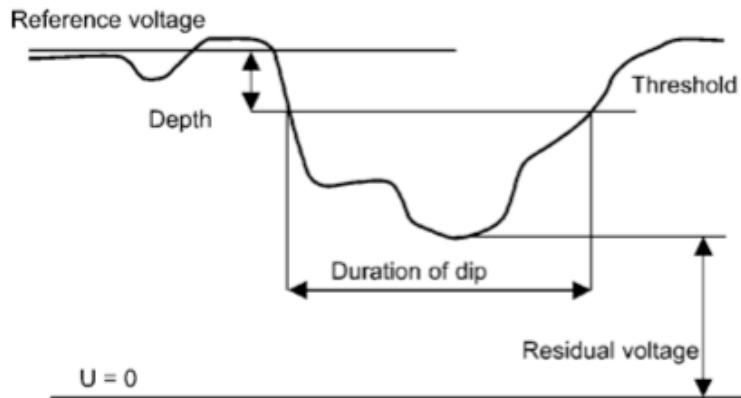
Verkko	420 kV	245 kV	123 kV ositt. maad.	123 kV sammut.
johtopituus / km	3790	2418	11780	896
Vikatiheys / 1/Mm·a	2,9	7,5	28,7	20,1
Ohimenevät viat / %	98	96	98	99
3-v. oikosulku	3	8	5	
2-v. oikosulku	3	4	2	
2-v. maasulku	15	14	11	
1-v. maasulku	79	74	82	78
Pysyvät viat / %	2	4	2	1
Laiteviat / 1/a	5,8	5,9	28,2	

SFS-EN 50160 -standardissa todetaan, että pienjänniteverkoissa muuntajan yläjännitepuolella tapahtuva vika saattaa aiheuttaa vikavirran ajaksi ylijännitteen pienjännitepuolelle. Nämä ylijännitteet eivät ole yleensä suuruudeltaan yli 1,5 kV tehollisarvoa. Keskijännitejärjestelmissä tällaisten ylijännitteiden suuruus riippuu järjestelmän tähtipisteen maadoitustavasta. Jäykästi maadoitetuissa tai impedanssin kautta maadoitetuissa järjestelmissä ylijännite ei yleensä kasva yli arvoa $1,7 \cdot U_C$ suuremmaksi. Maasta erotetuissa tai sammutetuissa järjestelmissä ylijännite ei yleensä nouse yli arvoa $2,0 \cdot U_C$ suuremmaksi. [4, s. 60.]

2.6 Jännitekuopat

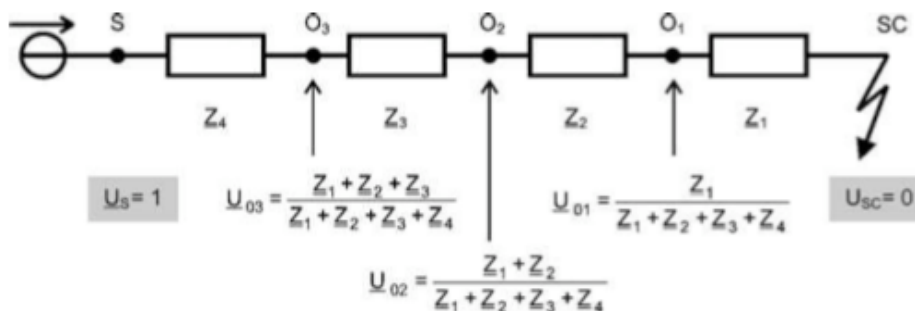
Jännitekuoppa on SFS-EN 50160 -standardin mukaan odottamaton ja nopea, 10...99 % lasku nimellisjännitteen alapuolelle. Kesto aika jännitekuopalle on yleensä 10 ms:sta jopa kymmeneen minuuttiin asti, jonka jälkeen jännite palautuu nimellisarvoon. Jännitekuoppia syntyy pääasiallisesti verkon oikosuluista. Oikosulku saa aikaan suuren virran, joka muodostaa suuria jännitehäviöitä eli jännitekuoppia verkon impedansseissa. [2, s. 87; 4, s. 16.]

Kuva 5 esittää jännitekuoppien kuvaamisessa käytettyä terminologiaa. Jännitekuopan alkamisarvo eli havahtumisjännitteen arvo (threshold) on Suomessa 90 % (*depth*) vertailujännitteestä (*reference voltage*). Jännitekuopan kestoaika (*duration of dip*) on niiden hetkien välinen aika, jolloin jakelujännitteen tehollisarvo laskee havahtumisjännitteen alapuolelle ja nousee takaisin havahtumisjännitteen arvoon. Jännitekuopan jäänsjännite (*residual voltage*) on jännitteen tehollisarvon minimiarvo, joka mitataan jännitekuopan kestoaikana. [4, s. 16.]



Kuva 5. Jännitekuoppa ja sen kuvaamiseen liittyvät termit [2, s. 80]

Jännitekuoppa voi esiintyä monessa kohtaa sähköverkkoa ja sen vaikutus jännitteeseen riippuu sähköisestä etäisyydestä tarkastelupisteeseen. Mitä lähempänä tarkastelupiste on viasta tehon tulosuuntaan päin, sitä suurempi on jännitekuopan vaikutus. Verkon impedanssit siis vaimentavat etenevän vian aiheuttamaa jännitteen laskua (kuva 6). [2, s. 83, 84; 4, s. 16.]



Kuva 6. Suhteelliset jännitteet (U_{01} , U_{02} ja U_{03}) oikosulkukohdasta SC nähden kolmella etäisyydellä (O_1 , O_2 ja O_3), kun lähdejännite S syöttää nimellisjännitteen U_s (1 pu) [2, s. 84]

Jännitekuopan keston vaikuttaa sähköverkon suojaavien komponenttien, kuten sulakkeiden ja katkaisijoiden toiminta-aika. Periaatteessa sähköverkon vika pitäisi saada kytkettyä pois verkosta mahdollisimman nopeasti, ennen kuin sen ehtii aiheuttamaan vaurioita. [2, s. 82.]

Jännitekuopat voivat aiheuttaa suuria määriä ongelmia sähköverkossa. Sähkölaitteiden toimintakyky heikentyy ja pahimmassa tapauksessa voi tulla toimintakatoja. Jännitekuoppa voi sammuttaa katuvalaistuksessa käytettyjä purkauslamppuja. IT- ja automaatiojärjestelmissä jännitekuoppa tuottaa häiriöitä tietoverkon signaaliin, jolloin siirretty data voi vääristyä. Sähkökäytöissä käytettävät kontaktorit ja releet voivat avautua väärään aikaan jännitekuopan takia. Yleensä 30...50 % lasku nimellisjännitteessä yhden jakson aikana voi aiheuttaa kontaktorin tai releen toimintahäiriön. Teollisuudessa nämä ongelmat voivat johtaa suuriin taloudellisiin menetyksiin, koska suuren prosessin keskeytyminen ja uudelleenkäynnistäminen on hidasta ja kuluttaa paljon energiaa. [2, s. 89–92, 94.]

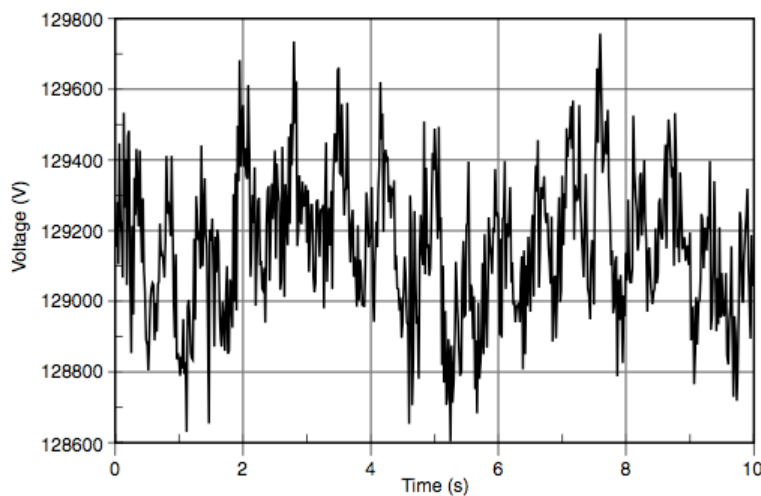
Teollisuudessa on myös käytössä paljon induktiomootoreita, jotka ovat alttiita jännitekuopille. Pyörivät koneet ovat luonnostaan suojattu lyhyille muutoksille lähdejännitteessä, mutta eivät suurille ja pitkille jännitekuopille. Jännitekuoppa laskee moottorin vääntömomenttia, jolloin pyörimisnopeus hidastuu. Pyörimisnopeuden hidastuminen on suhteessa sekä jännitekuopan suuruuteen ja keston, roottorin vastamomentin suuruuteen ja koneen inertian määrään. Jännitekuopan aikana koneen tuottama teho laskee ja samalla moottoriin kytketyn käytön tehokkuus. [2, s. 92, 93; 10, s. 110, 111.]

SFS-EN 50160 -standardi määrittää jännitekuopat odottamattomiksi ja erittäin satunnaisiksi ilmiöiksi. Sähköjakeluverkon ominaisuudet ja havaintopaikka vaikuttavat suuressi vuotuiseen esiintymistäajuuteen ja niitä esiintyy eri vuodenaikoina hyvin epäsäännöllisesti. [4, s. 24, 36, 46.]

Standardin mukaan jännitekuoppa on yleensä kestoajaltaan alle sekunnin, jonka aikana nimellisjännite ei laske yli 60 % tehollisarvosta. Jännitekuoppia jotka laskevat nimellisjännitettä yli 60 % tehollisarvosta ja jotka ovat kestoltaan yli sekunnin, saattaa esiintyä satunnaisesti. Joillakin alueilla saattaa esiintyä pienempiä jännitekuoppia, jotka ovat suuruudeltaan 10...15 % sopimuksen mukaisesta jakelu jännitteestä U_C hyvinkin usein. [4, s. 58.]

2.7 Välkyntä

Välkyntä on nimitys elektromagneettiselle ilmiölle, joka on valolähteen luminanssin (pintakirkkauden) muutoksen aiheuttamaa näköaistimuksen ajallista vaihtelua. Välkyntä aiheuttaa nopeaa jännitteen vaihtelua polariteetin molemmin puolin ja siksi lamppujen kirkkauden vaihtelua (kuva 7). Välkyntää aiheuttavat kuormat, kuten valokaariuuni, teollisuudessa käytetyt isot hitsaus- ja keitinlaitteet sekä kondensaattoripatterit, koska näiden laitteiden ottama virta vaihtelee suuruuttaan nopeasti. [1, s. 28, 316; 2, s. 135, 152–155.]



Kuva 7. Valokaariuunin aiheuttama jännitetason välkyntä [1, s. 29 lähde mukailen]

SFS-EN 50160 -standardissa on välkyntälle määritelty häiritsevyyssindeksit. Lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi P_{st} mitataan 10 min aikavälein. Pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi P_{lt} mitataan kahden tunnin aikana saaduista P_{st} arvoista yhtälöllä:

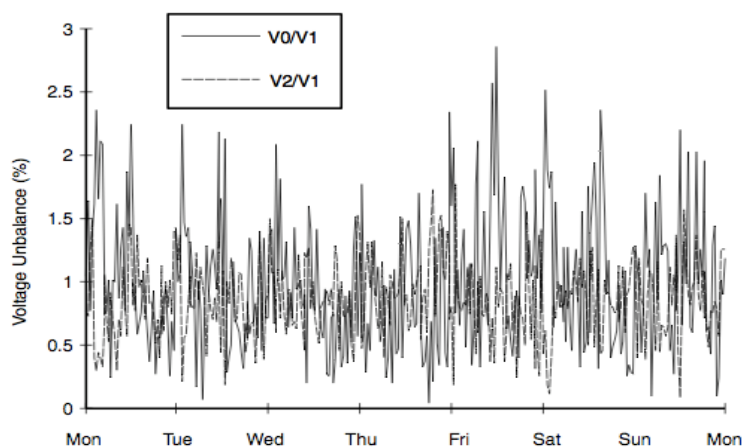
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (3)$$

Standardin mukaan normaaleissa olosuhteissa pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin tulisi olla 95 % ajasta $P_{lt} \leq 1$. Välkyntän häiritsevyys on kuitenkin subjektiivista ja joskus $P_{lt} = 1$ ja suuremmilla arvoilla ei esiinny havaittavia häiriöitä. [4, s. 10, 22.]

2.8 Epäsymmetria

Jännitteen epäsymmetria syntyy kolmivaiheverkossa vaiheiden vinokuormituksesta eli kun vaiheiden kuormat ovat erisuuruiset. Kolmivaiheverkossa vaiheiden välinen kulma on 120° ja suuruus lähes identtinen, kun vaiheet on kuormitettu symmetrisesti. Epäsymmetrisellä kuormituksella vaiheiden välinen jännitteen suuruus ja kulma vääristyvät. [9, s. 8.]

Jännitteen epäsymmetriaa (kuva 8) aiheuttavat kantaverkossa valokaariuunit, kolmivaiheverkkoon kytketyt yksivaiheiset kuormat, kondensaattoripatterin yhden vaiheen sulakepalo sekä kaapelien geometriset erot. [1, s. 24; 2, s. 163, 174.]



Kuva 8. Viikon ajalta mitattu jännite-epäsymmetria taloussyötössä. Jännite-epäsymmetria on esitetty prosentuaalisesti [2, s. 25]

Nolla- ja vastakomponenttivirran aiheuttama jännite-epäsymmetria voi aiheuttaa erisuuruisia ongelmia. Yleisimpiä ongelmia ovat teho- ja energiahäviöt, alentunut virran myötäkomponentti kohonneen lämpenemän takia ja erisuuruiset jännitteet verkon jakelupisteissä. Jännite-epäsymmetria voi myös vahingoittaa herkkiä laitteita, kuten tietokoneita, epätahtimoottoreita ja tahtigeneraattoreita. [2, s. 174.]

Epäsymmetrian suuruus ilmaistaan tyypillisesti nolla- ja vastakomponentin suhteena myötäkomponenttiin. SFS-EN 50160 -standardissa jännite-epäsymmetrialle lasketaan arvoja vain kolmivaihejärjestelmän vastakomponentista. Jännitteen epäsymmetrian suuruus voidaan laskea yhtälöstä:

$$K_{2U} = \frac{|U_{2(1)}|}{|U_{1(1)}|} \cdot 100\% \quad (4)$$

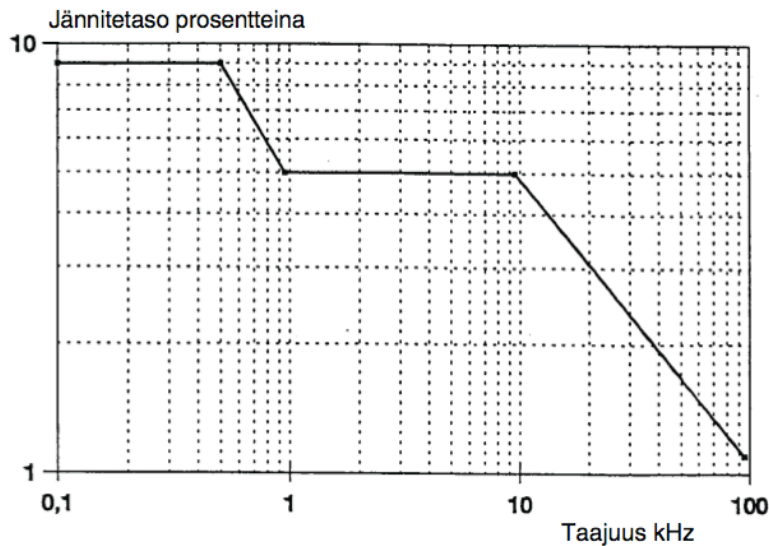
- U_2 on jännitteen vastakomponentti tehollisarvo
 U_1 on jännitteen myötäkomponentti tehollisarvo
 (1) on merkintä perustaajuiselle jännitteelle ($h = 1$)

Standardi määrittää, että normaaleissa olosuhteissa viikon pituisella mittausjaksolla, jokaisen jakelujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % myötäkomponentista. Pitää kuitenkin huomioida, että joillakin alueilla, joissa asiakkaan liittynöissä on yksi- tai kaksivaiheisia kytkentöjä, voi esiintyä kolmivaiheverkon liittymiskohdassa epäsymmetriaa 3 % asti. [4, s. 18, 22, 32, 42; 8, s. 25, lähdettä mukaillen.]

2.9 Signaalijännitteet

Nykyään Euroopassa verkko-operaattorit voivat käyttää yleistä jakeluverkkoa siirtämään viestejä liittämällä jännitteeseen signaalin. Signaalijännitteellä voidaan viestiä käskyjä kaukana oleville jakeluverkon järjestelmille käyttäen siirtojohtoja. Yleisesti käytössä olevat signaalijännitteet on jaettu kolmeen eri tyyppiin taajuuden suuruuden mukaan. Verkonkäskyignaali on sinimuotoinen ja taajuudeltaan 110...3000 Hz. Sähköverkon kantoaaltoignaali on sinimuotoinen ja taajuudeltaan 3...148,5 kHz ja merkinantognaali on lyhytaikainen transientti halutussa kohtaa jänniteaaltoa.

Standardi SFS-EN 50160 määrittää signaalijännitteelle laadulliset rajat, jotka eivät saa ylittyä kytkentäpisteessä. Standardissa mainitaan, että yli 99 % vuorokaudesta signaalijännitteen kolmen sekunnin keskiarvon tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin kuvan 9 (ks. seur. s.) annetut arvot. [4, s. 12, 24.]



Kuva 9. Yleisessä Pj-jakeluverkossa käytettävien signaalitaajuuksien jännitetasot prosentteina nimellisjännitteestä U_n . Keskijänniteverkossa kuvan signaalitaajuuksien jännitetasot suhteutetaan sopimuksen jakelujännitteeseen U_C [4, s. 24, 36]

HUOM. Sähköverkon kantaaltosignaaleja taajuudeltaan välillä 95 kHz...148,5 kHz voidaan käyttää verkon käyttäjän asennuksissa. Vaikka yleisen järjestelmän käyttö viestinsiirtoon asiakkaiden välillä ei ole sallittua, on yleisessä pienjänniteverkossa otettava tällä taajuusalueella huomioon jännitteet 1,4 V saakka. Koska viereiset viestinsiirtojärjestelmät voivat aiheuttaa häiriöitä toisiinsa, saattaa olla tarpeellista, että asiakas asentaa viestinsiirtojärjestelmäänsä sopivan suojauksen tai tekee tarvittavat toimenpiteet signaalijärjestelmänsä korjaamiseksi. [4, s. 24.]

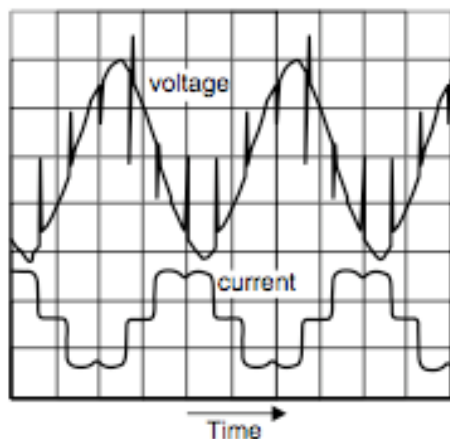
Lisäksi pitää huomioida, että joissakin verkoissa kanto-aaltoyhteyksissä käytetään myös yli 148,5 kHz:n taajuuksia. Suurjänniteverkkojen matalien resonanssitaajuuksien vuoksi signaalijännitteille ei anneta mitään laadullisia suoritusarvoja. [4, s. 24, 44.]

2.10 Yliaallot

Harmonisia yliaalloja aiheuttavat epälineaariset kuormat, joiden ottama virta ei ole suoraan verrannollinen laitteen ottamaan käyttöjännitteeseen. Epälinearisessa kuormassa syntyy perustaajuisesta sinikäyrästä poikkeavia virtoja, jotka aiheuttaa jännitehäviöitä järjestelmän impedansseissa ja synnyttävät säröytynyttä jännitettä kulutuspiisteeseen. Säröytynyt aaltomuoto muodostuu, kun perustaajuiseen siniaaltoon summataan eri taajuiset taajuuskomponentit eli harmoniset yliaallot. Nämä taajuuskomponentit ovat yleensä siniaallon perustaajuuden monikertoja. [1, s. 168, 169.]

Yliaallot voivat olla myös epäharmonisia. Epäharmonisia yliaaltoja esiintyy paljon vähemmän kuin harmonisia yliaaltoja ja niistä aiheutuvat ongelmat jäävät yleensä piekiksi. Tämän takia niille ei ole, ainekaan toistaiseksi, määritelty raja-arvoja kansainvälisiin standardeihin. Tulevaisuudessa tulevat lisääntymään laitteet, kuten taajuusmuuttajat, aktiiviset suodattimet ja pulssinleveysmodulaatioon perustuvat invertterit, jotka pystyvät muodostamaan yliaaltoja koko taajuusalueelta. Tämän takia tietoa ja dataa kerätään nykyisin epäharmonisista yliaalloista tulevaisuuden standardisointeja varten. [1, s. 220; 2, s. 257; 4, s. 22.]

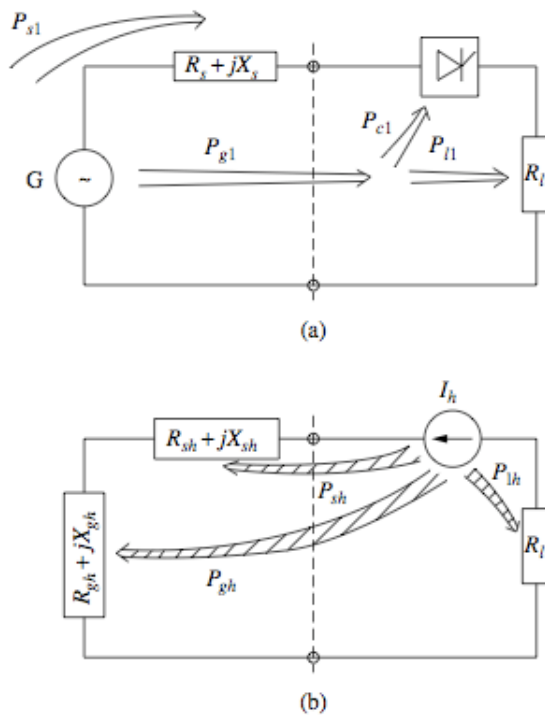
Kuvassa 10 esitetään verkkokommutoivan 6-pulssisen tyristoritasasuuntaajan aiheuttamaa harmonista jännitteen ja virran säröytymistä, vaikka siihen syötetään täysin sinimuotoista jännitettä. Suuntaajan tasajännitevälipiirissä on kuristinkela. Kuvasta näkee myös selkeästi kommutointihäiriöistä aiheutuvat kolot jännitteen aaltomuodossa. [2, s. 204.]



Kuva 10. 6-pulssisen tyristoritasasuuntaajan jännitteen ja virran säröytynyt aaltomuoto [2, s. 206]

Verkossa harmoniset yliaallot muodostuvat kuvan 11 (ks. seur. s.) tavalla. Generaattori G syöttää puhtaasti lineaarista kuormaa R_l johtimen impedanssin ($R_s + jX_s$) ja staattisen konvertterin kautta. Generaattori tuottaa perustaajuista tehoa P_{g1} piiriin, josta suurin osa kuluu lineaarisessa kuormassa (P_{l1}) ja murto-osa eri taajuuksilla epälinearisessa staattisessa konvertterissa (P_{c1}). Lisäksi pieniä I^2R -häviöitä (P_{s1}) syntyy perustaajuudella johtimen ja generaattorin resistansseissa (R_{s1}). Kuvan kohdassa b) generaattorin smv on oikosuljettu ja johdin sekä generaattori on kuvattu harmonisen impedanssin mukaan ($R_{sh} + jX_{sh}$ ja $R_{gh} + jX_{gh}$). Kuvan kohdasta b) nähdään kuinka konvertterin muo-

dostama säröytynyt, harmonisia yliaaltoja sisältävä, virta I_h aiheuttaa tehohäviöitä (P_{sh} , P_{gh} ja P_{lh}) kaikissa piirin impedansseissa. [11, s. 2.]



Kuva 11. Ylemmässä kuvassa a) näkyy perustaajuisen tehon kulku piirissä. Alemmassa kuvassa b) näkyy harmonisen tehon häviöt [11, s. 2]

Yliaaltovirtoja sisältävässä verkossa esiintyy pätö- ja loistehon lisäksi yliaaltojen muodostama säröteho D . Säröteho koostuu harmonisista yliaaltotaajuuksista, joten sitä ei ole mahdollista kompensoida perustaajuudelle mitoitetuilla kompensointilaitteilla. Säröteho voidaan laskea yhtälöllä:

$$D = U \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (5)$$

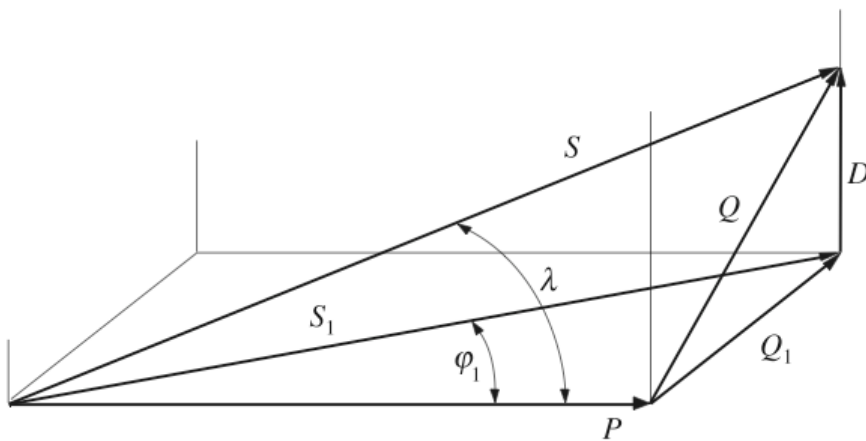
U on (koko) jännitteen tehollisarvo

I_h on $h \cdot f_1$ -taajuisen yliaaltovirran tehollisarvo.

Kuorman ottamaa kokonaisnäennäistehoa laskettaessa on myös edellä mainittu säröteho otettava huomioon (kuva 12):

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (6)$$

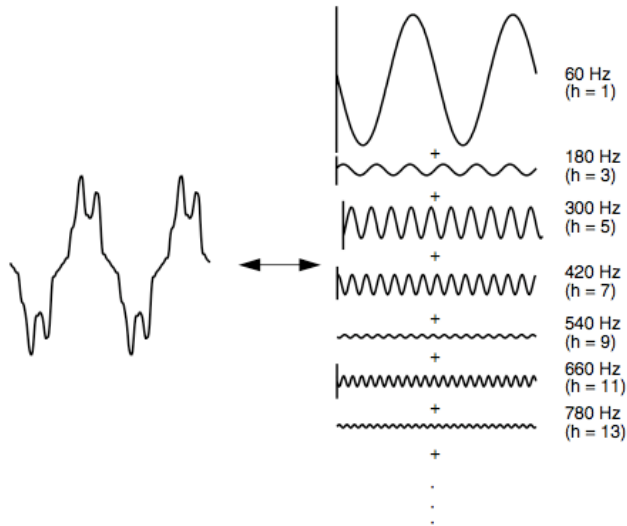
- P on verkon kokonaispätöteho
 Q_1 on verkon perustaajuinen loisteho
 D on verkon säröteho. [12, s. 36; 13, s. 64.]



Kuva 12. Yliaaltopitoisen verkon osoitindiagrammi [13, s. 64]

Harmoniset yliaallot voivat voimistua sarja- ja rinnakkaisresonansseissa ja aiheuttavat ylimääräisiä häviöitä sähkönsiirrossa, sähkön tuottamisessa ja kuormalaitteissa. Yliaallot aiheuttavat myös eristeiden ennenaikaista kulumista ja laskevat komponenttien elinikää. Suuritehoiset yliaallot voivat pahimmassa tapauksessa vaurioittaa herkkiä komponentteja. Lisäksi yliaallot aiheuttavat EMC-häiriötä, värinää ja äänihäiriötä. [11, s. 143.]

Kaikki jaksolliset säröytyneet aaltomuodot pystytään esittämään summaamalla siniaaltojen taajuuden monikertoja perustaajuiseen siniaaltoon. Siniaaltojen summautumiselle on matemaattinen esitys nimeltä Fourier'n sarja (kuva 13, ks. seur. s.).



Kuva 13. Fourier'n sarjan muodostama säröytynyt aaltomuoto [1, s. 170]

Fourier'n sarja jaksollisesta jännitteen funktiosta $u(t)$, voidaan esittää lausekkeella:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \quad (7)$$

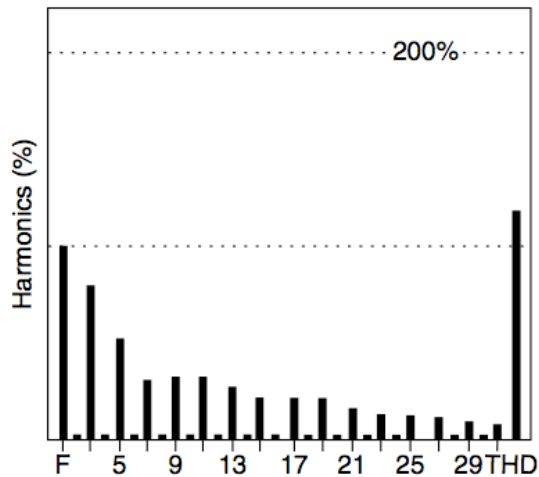
n on kokonaisluku
 T on jaksonpituus
 U_0 on jännitteen tasakomponentti
 A_n ja B_n ovat Fourier'n sarjan kertoimia.

Sarjakehitelmä voidaan myös esittää muodossa, jossa kumpikin taajuuskomponentti muodostetaan amplitudinsa \hat{u}_n ja nollavaihekulmansa a_n avulla.

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{u}_n \sin(n\omega t + a_n) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}U_n \sin(n2f_1t + a_n) \quad (8)$$

Tässä muodossa jaksollinen epäsinimuotoinen funktio voidaan esittää tasakomponentin, perustaajuisen komponentin ja harmonisten yliaaltojen summana. [12, s. 26.]

Harmoninen spektri on yleinen tapa analysoida harmonisten yliaaltojen amplitudeja. Kuvassa 14 on loistelampun virran harmoninen spektri, jossa vaaka-akselilla esitetään perustaajuuden f_1 monikerrat eli harmonisten yliaaltojen amplitudit prosentuaalisesti. Kuvasta voidaan huomata, että virta perustaajuudella f_1 on vain osa kokonaisesta virrasta. [2, s. 190.]



Kuva 14. Loistelampun virran harmoninen spektri. F on perustaajuinen virta [2, s. 190]

Jännitteen säröytymisen määrän voi laskea jännitteen ja virran harmonisella kokonaissärökertoimella THD (*total harmonic distortion*). Harmonisten yliaaltojen määrän voi laskea joko suhteessa perustaajuiseen komponenttiin (THD-F) tai jännitteen tehollisarvoon (THD-R). Standardissa SFS-EN 50160 kerrotaan, että laskentaan otetaan mukaan kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka. [4, s. 22; 12, s. 29.]

$$THD - F = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2}^{h \leq 40} U_h^2}}{U_1} \quad THD - R = \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2}^{h \leq 40} U_h^2}}{U} \quad (9,10)$$

- U on (koko) jännitteen tehollisarvo
- U_1 on perustaajuisen jännitteen tehollisarvo
- U_h on $h \cdot f_1$ -taajuisen yliaaltojännitteen tehollisarvo.

Laskentakaavoilla voidaan myös laskea samalla periaatteella yliaaltovirtojen harmoniset kokonaissärökertoimet. [12, s. 29.]

SFS-EN 50160 -standardissa määritetään sallitut raja-arvot jännitesärölle normaaleissa käyttöolosuhteissa. Standardissa todetaan, että kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 2 annettu arvo. Pitää kuitenkin huomioida, että resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäisille harmonisille. Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.

Taulukko 2. SFS-EN 50160 -standardin rajat jännitesäröille [4, s. 22]

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

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

Standardissa ei ole ilmoitettu raja-arvoja epäharmonisille jännitesärölle niiden vähäisyyden vuoksi. Standardia todennäköisesti päivitetään tulevaisuudessa, jos epäharmoniset jännitesäröt lisääntyvät merkittävästi. [4, s. 22.]

2.11 Verkkotaajuus

Taajuus on yksi tärkeimmistä sähkön laadun ominaisuuksista sähköjärjestelmän toiminnan kannalta. Kaikki verkon osat käyttävät samaa nimellistaajuutta, joten sen kontrolloiminen vaatii tarkkuutta. Sähköverkoissa taajuus on suoraan verrannollinen sitä syöttävän sähkögeneraattorin roottorin pyörimisnopeuteen. Suomessa nimellistaajuus on 50 Hz.

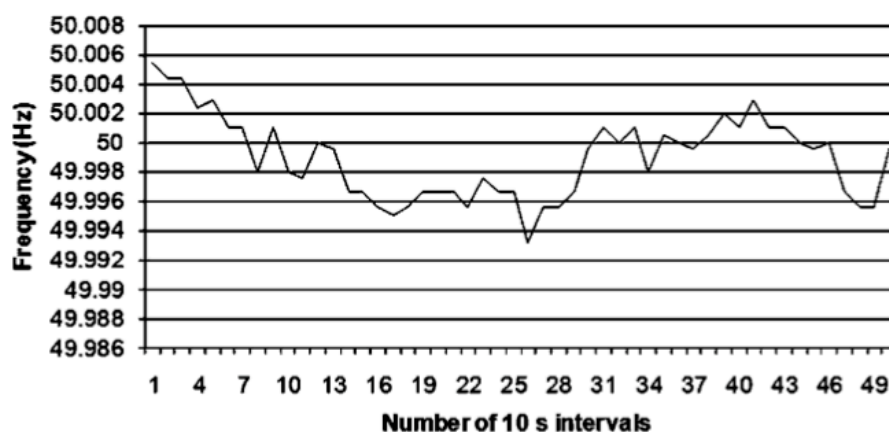
Sähköjärjestelmän taajuudella ja teholla on erityinen suhde, jossa muutos toisessa vaikuttaa toiseen. Sähköjärjestelmä on tasapainossa, kun generaattorin syöttämä teho ja verkon kuormien ottama teho ovat yhtä suuret. Epätasapaino aiheuttaa joko verkon taajuuden kasvua tai laskua eli generaattorin roottorin pyörimisnopeuden muutosta.

Taajuuden muutoksen määrä riippuu järjestelmän epätasapainon suuruudesta ja generaattorin roottorien massojen inertiasta. Taajuus on siis suoraan verrannollinen järjestelmän syöttämän ja käyttämän tehon tasapainoon. Tämän takia kaikki teho, mitä tuotetaan pitää kuluttaa verkon kuormissa, koska tehoa on vaikeaa ja kallista säilöä isossa mittakaavassa. [2, s. 1, 17; 4, s. 30.]

Suomen kaltaisissa isoissa verkoissa (jäykät verkot) merkittävät taajuuspoikkeamat ovat erittäin harvinaisia, koska normaalit kuormanmuutokset ovat suhteessa pieniä koko verkon kuormatilanteeseen. Verkon taajuuden muutokset ovat kuitenkin mahdollisia jäykissä verkoissa, jos esimerkiksi sähkön jakelun tai tuottamisen yhteydessä tapahtuu häiriö. Myös erittäin suuren kuorman kytkeytyminen pois verkosta voi aiheuttaa taajuuden huojuntaa.

Yleensä taajuuspoikkeamat (kuva 15) esiintyvät verkon saarekekäytöissä, varavoimakonekäytöissä ja pienillä jakelualueilla, kuten saarilla. Näissä olosuhteissa taajuuden muutos aiheutuu pääasiallisesti yksittäisten generaattoreiden nopeista kuormitusten muutoksista, huonoista generaattoreiden ohjaus- ja säätölaitteista tai epätasapainoisesta tai ylikuormitetusta maaseutuverkosta. Ongelmia muodostuu, koska kuormien vaihteluihin ei ehditä reagoida tarvittavalla nopeudella. [7, s. 2.]

Taajuuspoikkeamat aiheuttavat ongelmia erityisesti oikosulkumoottoreille, koska taajuus on suoraan verrannollinen roottorin pyörimisnopeuteen. Taajuuden muutos vaikuttaa myös jännitteeseen, pätötehoon ja loistehoon. [2, s. 6, 16.]



Kuva 15. Taajuuden muutos mitattuna 500 s ajalta normaaleissa käyttöolosuhteissa. Kuvan taajuuspoikkeamat pysyvät SFS-EN 50160 -standardin raja-arvojen sisällä [2, s. 4]

Suomessa taajuuspoikkeaman raja-arvot on esitetty SFS-EN 50160 -standardissa. Mittaus tehdään normaaleissa olosuhteissa perustaajuuden 10 s ajanjaksojen keskiarvoista (keskeytyksiä ei huomioida).

- Keskenään synkronisesti toimivassa yleiskäyttöverkoissa:

50 Hz \pm 1 %	(eli 49,5 Hz...50,5 Hz)	99,5 % vuodesta
50 Hz + 4 % / - 6 %	(eli 47 Hz...52 Hz)	100 % ajasta,

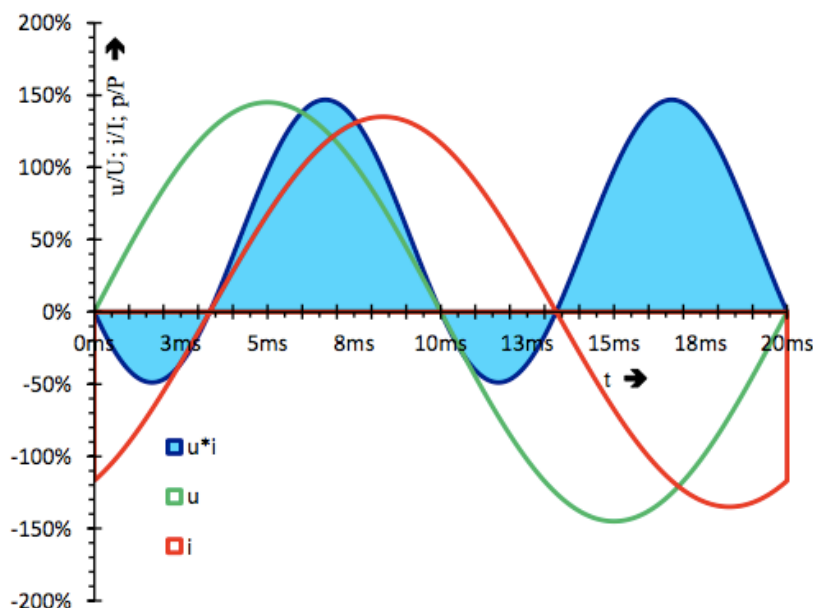
- erillisverkoissa (esim. jakelujärjestelmät joillakin saarilla):

50 Hz \pm 2 %	(eli 49 Hz...51 Hz)	95 % viikosta
50 Hz \pm 15 %	(eli 42,5 Hz...57,5 Hz)	100 % ajasta.

Taajuuden seurannasta pitää huolen yhteiskäyttöalueen verkko-operaattori. [4, s. 20.]

3 Loistehon kompensointi

Kompensaatioparistoja käytetään parantamaan sähkön tehokerrointa ($\cos \varphi$) kompensoimalla loistehoa järjestelmissä, joissa on sekä induktiivisia sekä resistiivisiä kuormia. Kun järjestelmässä on loistehoa (yleensä induktiivista loistehoa) eli magneettikenttiä muodostavia komponentteja, kaikki energia ei siirry verkosta kuormalle. Nämä komponentit pyrkivät vastustamaan virran muutosta, jolloin virran ja jännitteen välille syntyy vaihesiirtokulma. Magneettikenttään varautunut energia värähtelee edestakaisin järjestelmän energialähteiden ja energiaa varastoivien komponenttien (L ja C) välillä taajuudella 100 Hz ($2,0 \cdot f_1$). Induktiokäämin tapauksessa magneettikenttään varautuu energiaa, kun sen läpi kulkeva virta nousee nolasta huippuarvoonsa. Virran pienentyessä takaisin noltaan ja käämin magneettikentän hävitessä tämä energia virtaa takaisin energialähteeseen. Puhtaassa induktiokäämissä ei siis kulu tehoa, vaan loistehoa. (kuva 16, ks. seur. s.). [2, s. 499; 14, s. 232, 233; 15, s. 140.]



Kuva 16. Loistehon muodostuminen [16, s. 7]

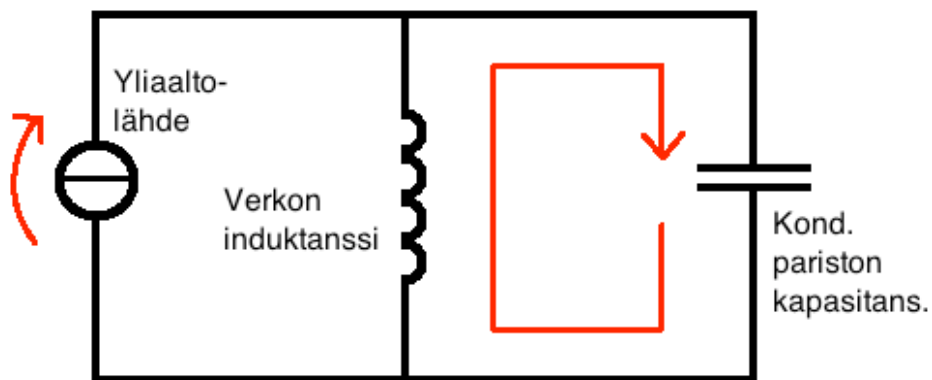
Vaikka loisteho ei ole työtä tekevää tehoa (*wattles current*), aiheuttaa se kuitenkin häviöitä järjestelmässä. Värähtelevän magnetointienergian aiheuttamat virran harmoniset yliaallot kuormittavat kaapeleita sekä muuntajaa aiheuttaen resistiivisiä virtalämpöhäviöitä (I^2R -häviöt) ja laskien kaapeleiden siirtokapasiteettia. Nykyään myös kantaverkko-yhtiöt laskuttavat loistehon siirrosta suhteellisen korkeahintaisella tariffilla. Loistehoa on siis taloudellisista syistä järkevää kompensoida. Tämä tapahtuu yksinkertaisesti lisäämällä kuorman rinnalle kompensointiparistoja. [2, s. 503–505, 506.]

Rinnakkaiskondensaattoriparisto koostuu vaihtelevasta määrästä kondensaattoriyksiköitä sekä kytkin- ja suojauslaitteita. Nykyaikaisissa säädettävissä automatiikkaparistoissa kompensointiteho säädetään portaittain, jolloin loistehonsäätäjä kytkee tarvittavan määrän kondensaattoreita päälle tai pois verkon loistehotilanteen mukaan. Messukeskuksen toimistotalolla on Nokia Kondensaattorit yhtiön valmistama 12-portainen 300 kVar automatiikkaparisto. [12, s. 49, 50.]

Kompensointipariston toiminnan kannalta on tärkeää, että sen kytkimet toimivat oikeaan aikaan. Jos täysin varaukseton kondensaattoriparisto kytketään verkkoon hetkellä, jolloin verkon jännite on huippuarvossaan, syntyy syöksyvirta, joka on suuruudeltaan verrattavissa oikosulkuvirtaan. Väärään aikaan toimivat kytkimet voivat myös aiheuttaa ongelman verkoissa, joissa on suuri määrä tietokoneiden hakkuriteholähteitä. Tässä epäsuotuisassa tilanteessa kondensaattoriparisto purkaa täyden varauksen suoraan

hakkuriteholähteen varauksettomalle kondensaattorille C_1 (kuva 18, ks. s. 27). Varaus purkautuu käytännössä kapasitanssilta kapasitanssille, jolloin verkon impedanssi on lähes nolla. Tämän takia virta kasvaa hetkelliseksi suuremmaksi kuin oikosulkuvirta. [16, s. 11.]

Messukeskuksen toimistotalon automatiikkapariston kompensatioyksikkö on estokelaton kompensointilaite. Tämän takia kompensointilaite aiheuttaa verkkoon rinnakkais- ja sarjaresonanssipiirejä. Kondensaattoriparisto muodostaa syöttävän verkon induktanssin ja kondensaattorin kapasitanssin välille rinnakkaisresonanssipiirin, joka vahvistaa harmonisia yliaaltovirtoja (kuva 17). Resonanssipiiri vahvistaa virtoja pienjänniteverkossa tyypillisesti 1...5 kertaa ja keskijänniteverkossa jopa 10...20 kertaa. Resonanssipiirin vahvistama virta voi aiheuttaa laitevaurioita ja laskea kompensointikondensaattorin elinikää.



Kuva 17. Kompensoinnin sijaiskytkentä [12, s. 65 lähdettä mukailtu]

Vahvistumiskertoimeen vaikuttaa se, miten kaukana resonanssitaajuus on kustakin yliaallosta sekä verkon resistanssi- ja reaktanssisuhteet (resonanssipiirin hyvyysluku Q) ja sähköinen etäisyys. Verkon ja kuristamattoman kondensaattoripariston välinen resonanssitaajuus voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä (ks, seur. s.):

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \cdot f_n \quad (11)$$

f_r	on rinnakkaisresonanssitaajuus [Hz]
S_k	on verkon oikosulkuteho [kVA]
Q_c	on kompensointiteho [kVar]
f_n	on verkon nimellistaajuus [Hz]. [12, s. 65, 66.]

4 Helsingin Messukeskuksen toimistotalo

Helsingin Messukeskuksen toimistotalo on viisikerroksinen toimistokiinteistö, joka sijaitsee Messukeskuksen hallin vieressä. Toimistotaloa syötetään 20,5 kV:n verkosta 800 kVA:n muuntajalla, joka on Dyn11 -kytketty. Verkko on jaettu useaan ryhmä- ja jakelukeskukseen pääkeskuksessa, johon on asennettu loistehon kompensointiparisto. Toimistotalossa on myös Suomen Messut -konsernin palvelimet, jotka kytkeytyvät toimistotalon verkkoon varasyöttötilanteissa.

4.1 Messukeskuksen toimistotalon kuormat

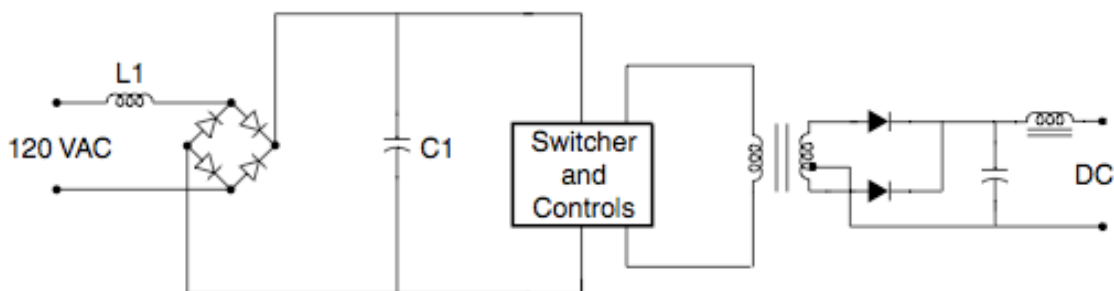
Nykyaikaisissa toimistokomplekseissa on paljon erilaisia kuormia, jotka voivat aiheuttaa ongelmia sähkön laatuun. Messukeskuksen toimistotalolla on paljon modernia tekniikkaa, kuten energiatehokkaita loistelamppuja ja taajuusmuuttajia, jotka hoitavat nopeussäädön ilmastointikoneissa sekä kahdessa hississä, ja suuri määrä elektronisia laitteita, kuten tietokoneita, joita syöttää hakkuriteholähde. Toimistokiinteistöissä nämä kyseiset kuormat ovat erittäin yleisiä, ja ne kaikki aiheuttavat pieniä häiriöitä jännitteeseen. Ongelmia muodostuu, kun suuri määrä näiden laitteiden aiheuttamista pienistä harmonisista yliaaltovirroista summautuu yhteen, jolloin jännite voi säröytyä merkittävästi. Säröytymisen määrä riippuu verkon impedanssista ja harmonisten yliaaltovirtojen määrästä. [1, s. 184.]

4.1.1 Hakkuriteholähde

Merkittävä huolenaihe toimistokiinteistöissä on elektronisten laitteiden yksivaiheiset virtalähteet, jotka voivat aiheuttaa liikaa harmonisia yliaaltoja johtimiin. Nykyaikaisiin elektroniisiin laitteisiin tuotetaan tasavirta kokotasasuuntauksella, johon vaaditaan nel-

jän diodin diodisilta. Nykyään tietokoneissa, printtereissä ja kopiokoneissa yleisin jännitteenmuutosperiaate on hakkuriteholähde (engl. *switched-mode power supply*, SMPS), jolla pystytään muodostamaan tasaista tasavirtaa kompakteilla komponenteilla ja ilman verkkovirran puolen muuntajaa. Suurimmat edut hakkuriteholähteessä ovat pieni koko ja paino sekä korkea hyötysuhde ja matala hukateho. Hakkuriteholähteen toiminta ei ole myöskään herkkä syöttöjännitteen muutoksille.

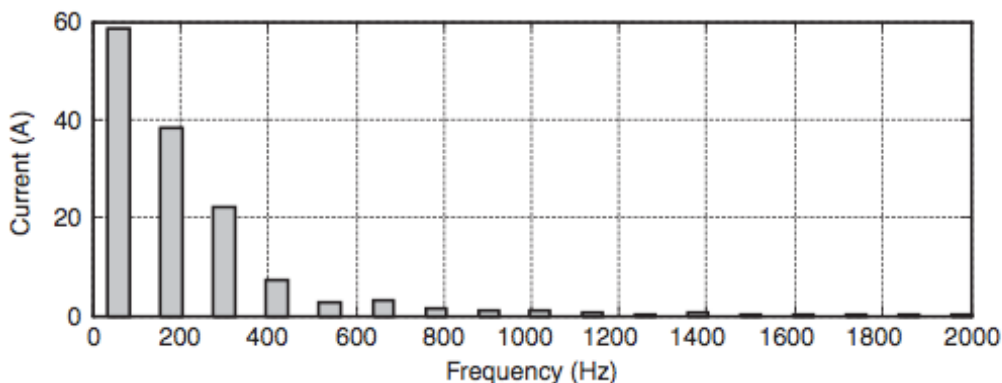
Kuvassa 18 näkyy hakkuriteholähteen toimintaperiaate. Hakkuriteholähteen diodisilta on kytketty suoraan verkkovirtaan ja tasasuuntaa vaihtovirran. Tästä syntyy karkeasti säädetty tasavirta kondensaattorille C_1 . Tämä tasavirta vaihtosuunnataan takaisin erittäin korkea taajuiseksi vaihtovirraksi hakkurin kytkimen sekä suuntaajan avulla. Lopulta korkeataajuinen vaihtovirta tasasuunnataan laitteelle sopivaksi tasavirraksi.



Kuva 18. Hakkuriteholähteen piirikaavio [1, s. 186]

Koska hakkuriteholähde ei vaadi verkkovirran puolen muuntajaa, verkkovirran puolella ei ole suurta induktanssia. Tämän takia syöttövirta tulee virtalähteelle erittäin lyhyissä pulsseissa, kun kondensaattori C_1 lataa varauksensa jokaisella puolijaksolla.

Hakkuriteholähteen huono puoli on sen aiheuttama suuri kolmas harmoninen yliaalto virrassa (kuva 19, ks. seur. s.). Kolmas harmoninen yliaalto on erittäin haitallinen, koska se on nollakomponenttinen yliaalto ja summautuu kolmivaihejärjestelmässä nollajohtimeen (N tai PEN). Tästä voi syntyä nollajohtimen ylikuormitus, varsinkin jos kyseinen kiinteistö on niin vanha, ettei kolmannen yliaallon vaikutuksia vielä tunnettu. Tämän takia kiinteistöön on saatettu asentaa alimitoitettu nollajohdin. Muuntaja voi myös ylikuormeta hakkuriteholähteiden aiheuttamien korkeiden harmonisten yliaaltojen vaikutuksesta. [1, s. 185, 186.]



Kuva 19. Hakkuriteholähteen harmoninen spektri [1, s. 187 lähdettä mukaillen]

4.1.2 Loistelamppu

Valaistus käsittää liiketoimintaa harjoittavien kiinteistöjen kokonaiskuormasta 40...60 %. Valaistuksessa käytetään energiatehokkaita loistelamppuja eli purkauslamppuja, jotka ovat korvanneet hehkulamput. Purkauslamput vaativat toimiakseen korkean jännitepiikin, jotta valokaari voi muodostua loisteputken kahden elektrodin välille. Korkea jännitepiikki saadaan aikaiseksi käyttämällä magneettista kuristinta tai elektronista liitännälaitetta.

Magneettinen kuristin on yksinkertaisesti rautasydäminen muuntaja, jossa kondensaattori on koteloitu eristemateriaaliin. Kuristin toimii verkon nimellistaajuisella (50 Hz Suomessa) jännitteellä ja pystyy syöttämään yhtä tai kahta loistelamppua kerrallaan. Kuristimen rautasydän aiheuttaa virtalämpöhäviöitä (I^2R -häviöt), ja siksi se ei ole yhtä energiatehokas kuin elektroninen liitännälaitte.

Elektroninen liitännälaitte käyttää hakkuriteholähdettä muuttamaan verkon nimellistaajuisen jännitteen korkeataajuiseksi (yleensä 25...40 kHz). Elektronisella liitännälaitteella on hyvän energiatehokkuuden lisäksi muitakin etuja. Se ei vaadi suurta induktanssia rajoittamaan loistelampun valokaaren virtaa. Lisäksi korkeataajuisella jännitteellä ei synny välkyntäilmiötä, mikä on huomattavissa magneettisen kuristimen magneettikentän energia värähtelyn takia kaksinkertaisella nimellistaajuudella (100 Hz).

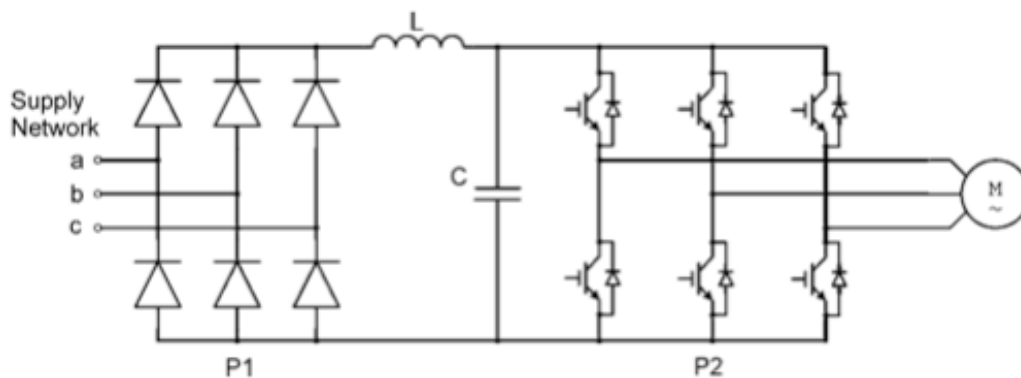
Magneettiset kuristimet muodostavat paljon harmonisia yliaaltoja loistelampun valokaaren lisäksi. Magneettisen kuristimen ja loistelampun virran kokonaissärökerroin on keskimäärin 15 %. Elektroninen liitännälaitte aiheuttaa harmonisia yliaaltoja 2...3 kertaa enemmän. Tämä takia nykyaikaisissa elektronisissa liitännälaitteissa on mukana passiiv-

vinen suodatin, joka laskee virran kokonaissärökertoimen 20 % alapuolelle. [1, s. 186, 187.]

4.1.3 Ilmastoinnin ja hissien nopeussäädetyt käytöt

Nopeussäädettyjä käyttöjä (engl. *adjustable-speed drive*, ADS) on kiinteistöjen hissien ja ilmastointilaitteiden moottoreiden säädöissä. Nopeussäädetty käyttö mahdollistaa induktiomoottorin nopeudensäädön muuntamalla sinimuotoisen jännitteen ja virran taajuutta sekä suuruutta. Etuna nopeussäädetyissä käytöissä on korkea hyötysuhde, matalat kohinatasot, luotettavuus ja vähäinen tilantarve.

Nopeussäädetyissä käytöissä aaltomuodon muuntaminen tapahtuu varustamalla muuntaja vaihtovirta käytöllä. Vaihtovirta käytössä käytetään tasasuuntauspiirinä 6-, 12- tai 24-pulssi diodisiltaa, joista 6-pulssinen diodisilta on yleisin. Tasasuuntauspiirin muodostama tasajännite syötetään tasajännitevälipiiriin kautta vaihtosuuntaajaan (kuva 20). Jos vaihtosuuntaustyyppinä käytetään pulssinleveysmodulaatiota (engl. *pulse-width modulation*, PWM), lisätään tasajännitevälipiiriin kuristinkelan (induktori) ja tasavirtakondensaattorin muodostama alipäästösuodatin. Jos vaihtosuuntaajatyyppeä on virtalähde invertteri (engl. *current source inverter*, CSI), sisältää tasajännitevälipiiri suodatin vain kuristinkelan. Suodattimilla tasoitetaan tasavirta ennen vaihtosuuntausta.



Kuva 20. Vaihtovirta käytön toimintakaavio [2, s. 467]

Pulssinleveysmodulaatiossa käytetään nykyaikaisia tehoelektronikan komponentteja kuten SCR-tyristoreja (engl. *silicon-controlled rectifier*, SCR), GTO-tyristoreja (engl. *gate turn off*, GTO) tai tehotransistoreja. Virtalähde invertterin komponenteiksi valitaan yleensä suuritehoisia IGBT-transistoreja (engl. *insulated gate bipolar transistor*, IGBT).

Vaihtovirtakäytöt muodostavat harmonisia yliaaltoja verkkoon. 6-pulssi tasasuuntaaja muodostaa erityisesti paljon viidettä (250 Hz) ja seitsemättä (350 Hz) harmonista yliaaltoa, jotka ovat muiden matalataajuisten yliaaltokomponenttien kanssa verkolle kaikkein ongelmallisimpia. 12- tai useampipulssisen tasasuuntaajan avulla pystytään karsimaan viides ja seitsemäs harmoninen yliaalto pois käytännössä kokonaan. Kyseiset tasasuuntaajat ovat kuitenkin kalliimpia ja tarvitsevat yleensä toimiakseen kaksi muuntaajaa. Vaihtosuuntaaja syöttää verkkoon tasasuuntaajan tavoin harmonisia yliaaltoja. Yliaaltosärön määrä on verrannollinen syötettävän moottorin nopeuteen ja vääntömomenttiin. Kevyellä kuormalla jännitteen aaltomuoto on paljon säröytyneempi kuin suurella kuormalla, mutta yliaaltokomponenttien suuruus jää kuitenkin suhteellisen pieneksi. Tämän takia raskaiden kuormien yliaaltokomponenttien suuruuteen pitää kiinnittää enemmän huomiota THD-tasojen sijaan. [1, s. 192; 2, s. 466–468; 17, s. 17–20.]

5 Jännitesärön pienentäminen

Helsingin Messukeskuksen toimistotalo sisältää suuren määrän harmonisia yliaaltoja tuottavia kuormia. Tämän takia työn laadunparannusmenetelmät käsittelevät ainoastaan ratkaisuja jännitesärön pienentämiseen toimistotalon kaltaisissa pienjänniteverkoissa.

5.1 Verkon yliaaltoherkkyys

Jännitesärö aiheutuu, kun yliaaltovirrat aiheuttavat jännitehäviöitä verkon impedansseissa. Verkon yliaaltoherkkyteen vaikuttaa siis verkon jäykkyys eli oikosulkuteho suuruus. Verkon impedanssi koostuu käytännössä muuntajasta, mahdollisesta kompensointilaitteesta ja johtimien resistansseista. Tämän takia kohteeseen, johon ennustetaan korkeaa virran THD-tasoa, voidaan suunnitteluvaiheessa ylimitoittaa muuntaja ja kompensointilaite. Suurempitehoisilla komponenteilla on pienempi impedanssi, ja siksi ne muodostavat vähemmän jännitesäröä. [2, s. 252.]

Rinnakkaisresonanssit ovat yleisin syy korkeille THD-tasoille toimistoverkon kaltaisissa pienjänniteverkoissa. Resonanssiipiiri muodostuu tyypillisesti verkon induktanssin ja kompensointilaitteen kondensaattorin kapasitanssin välille. Resonanssiipiirissä vahvistuville yliaalloilta voidaan välttyä lisäämällä reaktori (kuristinkela) kompensointilaitteen kondensaattorin kanssa sarjaan. Tätä kytkentää kutsutaan estokelaparikoksi. Reaktori viritetään eli sen koko (yleensä 5, 7 tai 11 % kondensaattorin tehosta) valitaan siten,

että viritystaajuudella sen induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi ovat yhtä suuret ja kumoavat toisensa. Viritystaajuudella estokelaparisto on siis suodatin ja siitä ylempillä taajuuksilla induktiivinen eli se pyrkii estämään yliaaltoja kulkeutumasta kondensaattorille. Toinen vaihtoehto on kytkeä virittämätön reaktori ja kondensaattori sarjaan, jolloin voidaan siirtää yliaaltoja vahvistava resonanssitaajuus pois yliaaltotaajuuksien kohdalta.

Resistiivisillä kuormilla voidaan myös merkittävästi vaimentaa verkon resonanssiipiirien yliaaltovirtoja. Tämä johtuu siitä, että resonanssiipiiri vahvistaa resonanssitaajuisia yliaaltovirtaa hyvyysluvun Q -arvon verran. Resonanssiipiirin hyvyysluvun Q -arvo on verrannollinen verkon reaktanssin ja värähtelyä vaimentavan resistanssin suhteeseen. [1, s. 199, 204; 2, s. 510, 511; 12, s. 52, 53.]

5.2 Laitevalinnat

Virran yliaaltotasoa voidaan vähentää käyttämällä sähkölaitteita, joka tuottaa vähemmän yliaaltovirtoja. Verkkoihin, joissa on suuri valaistuskuorma, voidaan valita suodatimilla varustettuja elektronisia liitäntälaitteita. Yksi vaihtoehto on käyttää verkon nopeussäädettyjen käyttöjen suuntaajissa suurempaa pulssilukua. Taulukossa 3 esitetään tyypillisiä suuruuksia harmonisille yliaaltovirroille, mitä eri pulssiluvun suuntaajat aiheuttavat. Harmoniset yliaaltovirtojen suuruudet ovat suhteellisia arvoja (pu).

Taulukko 3. Harmonisten yliaaltovirtojen suhteelliset (pu) suuruudet tyypillisen suuntaajan syöttövirrassa [18, s. 22]

Suuntaajan pulssiluku	Harmonisen järjestysluku	5	7	11	13	17	19	23	25
6		0,175	0,110	0,045	0,029	0,015	0,010	0,009	0,008
12		0,026	0,016	0,045	0,029	0,002	0,001	0,009	0,008
18		0,026	0,016	0,007	0,004	0,015	0,010	0,001	0,001
24		0,026	0,016	0,007	0,004	0,002	0,001	0,009	0,008

Nollakomponenttisten yliaaltojen eli kolmannen yliaallon parittomien monikertojen ($h = 3, 9, 15, \dots$) liikkuminen vaihejohtimissa, voidaan estää käyttämällä kolmiokytkentäistä tai hakatähtikytkentäistä muuntajaa. Kolmiokytkennässä nollakomponenttiset yliaallot jäävät kiertämään muuntajan käämityksessä, eivätkä pääse siirtymään verkon puolelle. Tämän kytkennän huonona puolena on korkeammat virtalämpöhäviöt (I^2R -häviöt)

käämien vastuksissa. Hakatähtikytkentä voi suodattaa n. 50 % nollakomponenttisista yliaalloista verkon puolen nollajohtimesta. Tämä tapahtuu ohjaamalla nollakomponenttiset yliaallot pieni-impedanssisen poistumisreitit kautta verkosta pois maahan. [1, s. 187, 251; 2, s. 238, 248.]

5.3 Reaktori (kuristinkela)

Reaktoria voidaan käyttää nopeussäädettyjen käyttöjen THD-tasojen alentamiseen. Tämä ratkaisu on erityisen tehokas käytöissä, joissa vaihtosuuntaustyyppi on pulssinleveysmodulaatio. Ratkaisun toimintaperiaate perustuu reaktorin induktanssin kykyyn vastustaa läpi kulkevan virran muutoksia. Vaihtovirta käytön syötön puolen vaihejohtimiin kytketyt pienet (yleensä 3 % käytön tehosta) reaktorit hidastavat nopeutta millä tasajännitevälipiirin kondensaattoria C voidaan varata (kuva 20, ks. s. 29). Käyttöön syötetty virta on tämän takia suuruudeltaan pienempi ja sisältää vähemmän yliaaltoja, vaikka siirretyn energian määrä pysyykin samana. Kyseisellä ratkaisulla voidaan vähentää nopeussäädetyt käytön virran THD-tasoa jopa 50 %. [1, s. 237, 238; 2. s. 248, 249.]

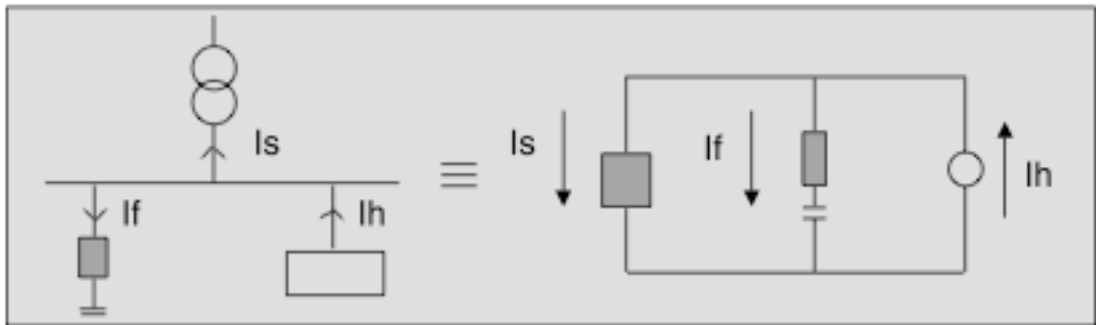
5.4 Yliaaltojen suodatus

Suodatinvaihtoehtoja on monia, joten suodatinta valitessa on hyvä tietää verkossa vallitseva ja verkkoon haluttu sähkön laadun tila ja verkon ominaisuudet. Tämän työn suodatinratkaisut eivät käsittele aktiivisuodattimia, koska ne eivät ole tällä hetkellä korkean hintansa takia taloudellisia vaihtoehtoja toimistoverkkoihin. [1, s. 234.]

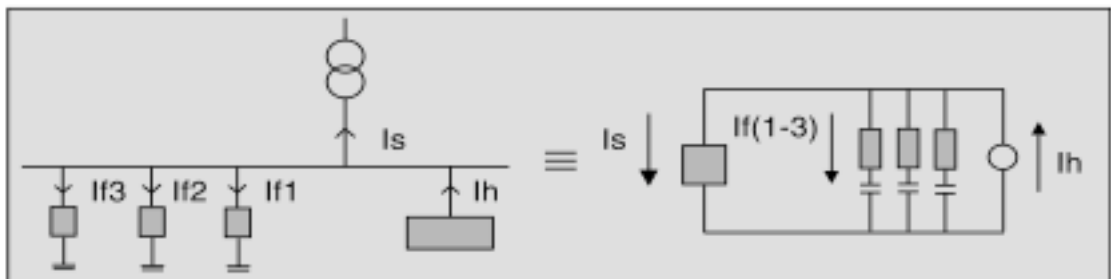
5.4.1 Sarjaresonanssiipiiri

Sarjaresonanssiipiirin toimintaperiaate on oikosulkea yliaaltovirrat pois verkosta mahdollisimman lähelle yliaaltolähdettä. Sarjaresonanssiipiirin toinen ominaisuus on sen kyky kompensoida loistehoa perustajuudella. Sarjaresonanssiipiiri on yleensä yhdelle tai useammalle yksittäiselle taajuudelle viritetty suodatin eli imupiiri. Laajakaistaisella suodattimella voidaan suodattaa kaikkia tiettyä taajuutta suurempia yliaaltovirtoja. Sarjaresonanssiipiirit ohjaavat viritystaajuiset yliaaltovirrat pois verkosta pieni-impedanssisen kulkureitin kautta. Tällöin yliaaltovirrat ei pääse vääristämään jännitettä verkon impedansseissa.

Kuvasta 21 nähdään, että yhdelle taajuudelle viritetty suodatin on yliaallolähteen lähelle rinnankytketty kuristinkela ja kondensaattori. Usealle yksittäiselle taajuudelle viritetty suodatin koostuu tyypillisesti kolmesta suodattimesta, jotka on viritetty yleisimmille yliaaltotaajuuksille (5., 7. ja 11. harmoninen yliaalto) (kuva 22). Laajakaista suodatin on käytännössä ylipäästösuodatin, koska se vähentää kaikkia taajuuksia viritystaajuuden yläpuolelta.

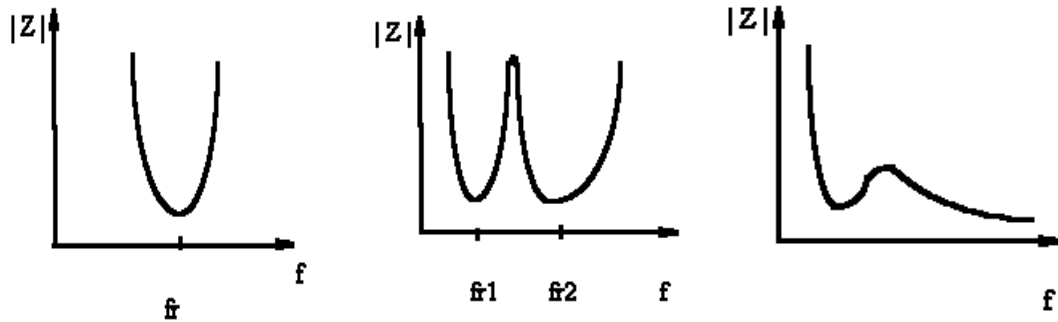


Kuva 21. Yhden taajuuden passiivisuodattimen sijaiskytkentä [17, s. 24]



Kuva 22. Kolmen taajuuden passiivisuodattimen sijaiskytkentä [17, s. 24]

Suodattimen poistumisreitti yliaalloille muodostuu, kun suodattimen kelan induktanssi valitaan siten, että se muodostaa kondensaattorin kanssa pieni-impedanssisen sarjaresonanssiin suodatettavan yliaallon taajuudella (kuva 23, ks. seur. s.). Tämä yliaalto voidaan muuntajan hakatähtikytkennän tavoin ohjata esimerkiksi maahan. Perustaajuudella suodattimen impedanssin pitää olla mahdollisimman suuri, jotta vältetään pätötehohäviöitä. [12, s. 55; 17, s. 24; 19, s. 32, 33.]



Kuva 23. Yhden ja kahden taajuuden suodattimen sekä laajakaistaisen suodattimen impedanssikäyrä [19, s. 32, 33]

5.4.2 Rinnakkaisresonanssiipiiri

Rinnakkaisresonanssiipiirin eli estopiirin toiminta on päinvastainen kuin sarjaresonanssiipiirillä. Estopiiri on kytketty sarjaan yliaaltolähteen kanssa ja se on viritetty saamaan korkea impedanssin arvo yliaaltotaajuudella. Korkea impedanssin arvo estää yliaaltovirtaa kulkemasta estopiirin läpi ja siten eristää sen pois verkosta. Perustaajuudella estopiiri on viritetty saamaan matala impedanssin arvo, jotta vältetään pätötehohäviöitä.

Estopiiri on erinomainen vaihtoehto kolmannen harmonisen yliaallon torjumiseen. Tässä ratkaisussa estopiiri kytketään nollajohtimen kanssa sarjaan ja viritetään saamaan suuri impedanssin arvo 150 Hz:n taajuudella. Tämän seurauksena kolmas harmoninen yliaaltovirta ei pääse kulkemaan enää nollajohtimessa. [1, s. 256; 12, s. 57.]

6 Sähkön laadun mittaukset

Sähkön laadun mittauksissa tutkittiin yleisimpiä sähkömagneettisia häiriömuotoja, jotka on esitetty SFS-EN 50160 -standardissa. Mittaustuloksia kerättiin standardin vaatiman viikon ajan (ti 23.10.2012 – ti 30.10.2012), jotta tulokset olisivat luotettavia ja saataisiin kokonaisvaltainen kuva verkon sähkön laadun tilasta. Mittaus suoritettiin ajankohtana, jolloin verkon kuormitustilanne vastasi normaalia kuormitustilannetta.

Mittauksissa tarkastellaan seuraavia sähkön laadun komponenttien aikavaihtelua:

- jännite- ja virtatasojen vaihtelut
- jännitteen ja virran THD-tasot
- välkynnän häiritsevyyssindeksin P_{it} arvo
- jännitteen epäsymmetria.

Mittausparametreiksi valittiin verkon ominaisuuksien kannalta tärkeimmät sähkön laadun komponentit sekä energian- ja pätötehonkulutus (liite 1).

6.1 Mittalaite

Mittauksissa käytettiin sähkön laadun mittauksiin tarkoitettua HT-Italia PQ824- sähkön laadun mittaria (kuva 24). Mittari kykenee mittamaan kaikkia SFS-EN 50160 -standardissa esiintyviä sähkön laadun komponentteja. Laitteessa on myös keruumittaus toiminto, jota käytettiin tallentamaan mittaustulokset viikon ajalta.

Mittarin virranmittauspuoli sisältää virranmittausmahdollisuuden 3-vaihejärjestelmän jokaisesta vaiheesta sekä nollavaiheesta. Virranmittauksessa käytettiin HT-Italian HTFLEX33D taipuisia virtapihtejä (kuva 24). Jännitemittauspuoleen kuuluu 3-vaihejärjestelmän vaiheiden, nollavaiheen ja maadoituksen mittaus. Mittauskärkinä käytettiin HT-Italian KIT800 -sarjaan kuuluvia hauenleukaliittimiä.



Kuva 24. Sähkön laadun HT-Italia PQ834 -mittari ja taipuisat HDFLEX33D –virtapihdit

6.2 Mittaustulosten tallennus ja analysointi

Keruumittaustulokset pystyttiin siirtämään mittarin muistikortilta tietokoneelle, johon on asennettu HT-Italian oma mittaustulosten käsittelyyn soveltuva ohjelma TopView. Ohjelmalla oli mahdollista analysoida keruumittaustuloksia käyrämuodossa x- ja y-akselilla tai yksittäisinä datapisteinä taulukkomuodossa.

6.3 Mittauskohde ja kytkentä

Mittaus suoritettiin toimistotalon 800 kVA:n muuntajan 1 250 A:n kennokojeistojärjestelmältä. Virtamittaus otettiin kennokojeiston pääsyötöistä ja jännitemittaus kytkemällä mittakärjet suoraan kiskostoon. Mittaus suoritettiin mahdollisimman läheltä tehon liittytäpistettä, jotta saataisiin kokonaisvaltainen kuvan sähkön laadusta. Kompensointilaite oli kytketty päälle mittauksen ajaksi, jotta resonanssiipiireissä vahvistuneet yliaallot näkyisivät mittaustuloksissa. [2, s. 457.]

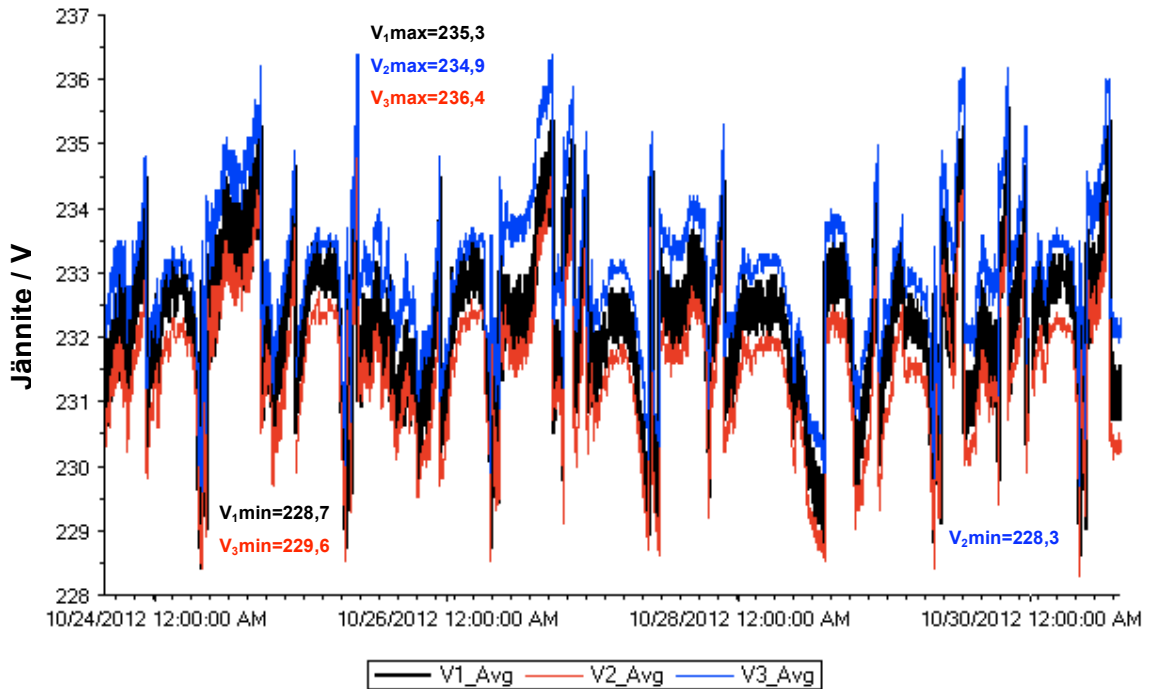
7 Mittaustulokset ja kommentit

Mittaustulokset otettiin 5 minuutin tehollisarvojen keskiarvosta. Tuloksia tarkastellessa pitää siis huomioida, että keruujakson tulokset eivät ole hetkellisarvoja. Mittaustulokset verrattiin standardin SFS-EN 50160 asettamiin laadullisiin raja-arvoihin.

7.1 Jännite- ja virtatasojen vaihtelut

Mittauksen aikana L1-vaiheen jännitteen huippuarvo oli 235,3 V, L2-vaiheen jännitteen huippuarvo oli 234,9 V ja L3-vaiheen jännitteen huippuarvo oli 236,4 V. L1-vaiheen jännitteen minimiarvo oli 228,7 V, L2-vaiheen jännitteen minimiarvo oli 228,9 V ja L3-vaiheen minimiarvo oli 229,6 V (kuva 25, ks. seur. s.). Mittausjakson aikana nimellisiä jännitteiden vaihtelut eri vaiheissa olivat välillä $U_n + 2,1 \dots 2,8 \%$ / $- 0,2 \dots 0,7 \%$.

Standardissa SFS-EN 50160 sanotaan, että pienjänniteverkossa mittaustulosten tulee olla 95 % ajasta välillä 207...253 V ja 100 % ajasta välillä 195,5...253 V. Jännitetason vaihtelut pysyvät siis selkeästi koko mittauksen aikana standardin vaatimissa rajoissa. Jännitetasojen vakauteen vaikuttaa yläjännitepuolen jäykkä verkko ja toimistoverkon reilu mitoitus eli korkea oikosulkuteho.



Kuva 25. Vaihejännitteet mitattuna ajan funktiona

Vaihevirtojen kuormitus pysyi vaiheiden välillä koko mittauksen ajan melko tasaisena, eikä merkittävää jännite-epäsymmetriaa ilmennyt. Tämä tarkoittaa sitä, että kuormat on kytketty symmetrisesti vaiheiden välille. Kuten kuvasta 26 (ks. seur. s.) huomataan, verkon kuormitus on suurimmillaan arkipäivien työaikoina klo 8.00 – 18.00 ja laskee puoleen lauantaina ja sunnuntaina. Kuvasta voidaan myös havaita, että verkon kokonaiskuormitus on suurimmillaan vain noin 20 % muuntajan 800 kVA:n nimellistehosta. Havainto voidaan laskennallisesti esittää yhtälöllä:

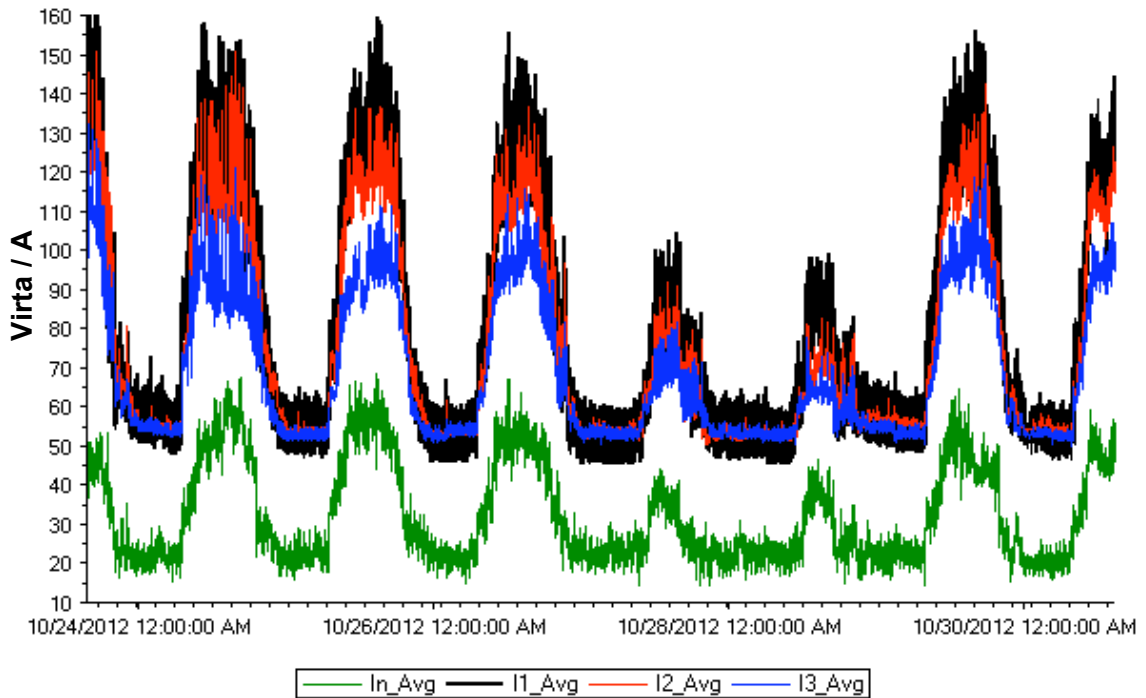
$$\begin{aligned} \frac{S}{S_N} \cdot 100\% &= \frac{S_{L1} + S_{L2} + S_{L3}}{S_N} \cdot 100\% \\ &= \frac{U_{L1}I_{L1} + U_{L2}I_{L2} + U_{L3}I_{L3}}{S_N} \cdot 100\% \end{aligned} \quad (12)$$

S on verkon kokonaisnäennäisteho

S_N on muuntajan nimellisteho

$U_{L1,L2,L3}$ on verkon vaihejännitteen tehollisarvo

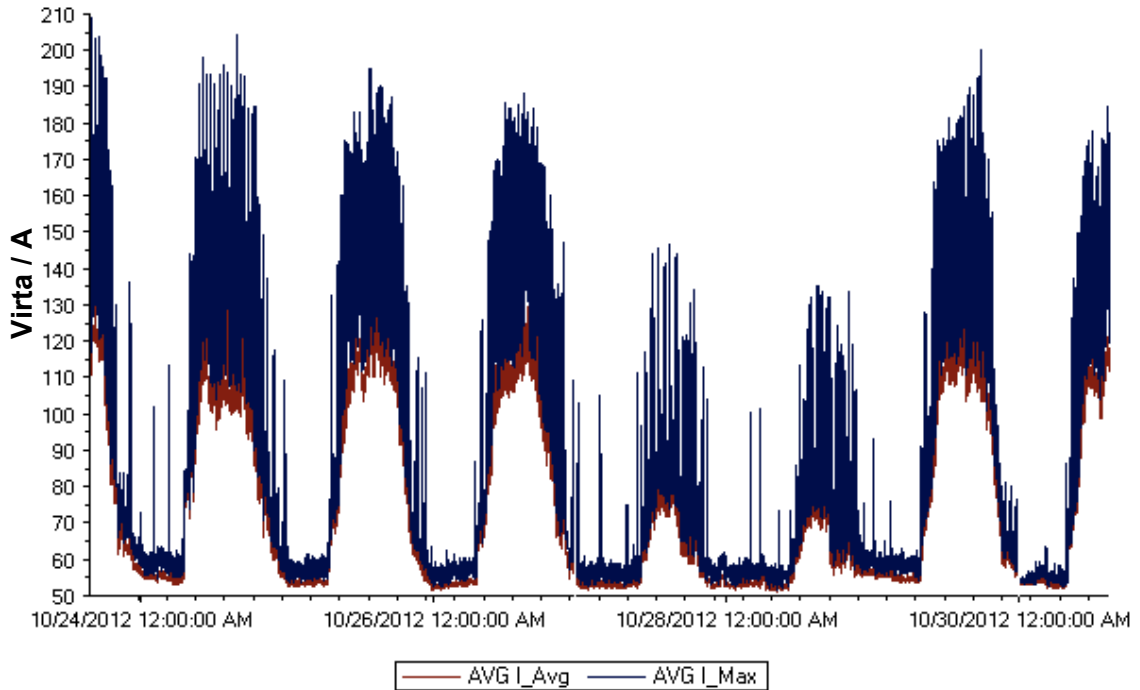
$I_{L1,L2,L3}$ on verkon vaihevirran tehollisarvo. [15, s. 154.]



Kuva 26. Vaihevirrät ja nollavirta mitattuna ajan funktiona

Kuva 26 osoittaa myös, että nollajohdin oli kuormittunut (vihreä käyrä). Tämä johtuu verkon pienen epäsymmetrian lisäksi siitä, että useat verkon komponentit muodostavat kolmatta virran harmonista yliaaltoja ja sen parittomia monikertoja ($h = 3, 9, 15, \dots$). Nämä yliaaltovirrät summautuvat 3-vaihejärjestelmässä nollajohtimeen. Nollajohtimen kuormitustaso on kuitenkin turvallisella tasolla eikä ylikuormittunut.

Mittauksen aikana esiintyneet virtapiikit näkyvät selkeästi kuvassa 27 (ks. seur. s.). Kuvassa on esitetty mittausjaksojen vaihevirtojen keskiarvot ja niiden huippuarvojen keskiarvot ajan funktiona. Kuormitushuippujen aikana yksittäiset virtapiikit ovat suuruudeltaan vain 40...60 A suurempia kuin keskimääräinen virta. Nopeista kuormituksen muutoksista aiheutuvat virtapiikit ovat kuitenkin suhteellisen pieniä, eivätkä ole ongelmallisia.

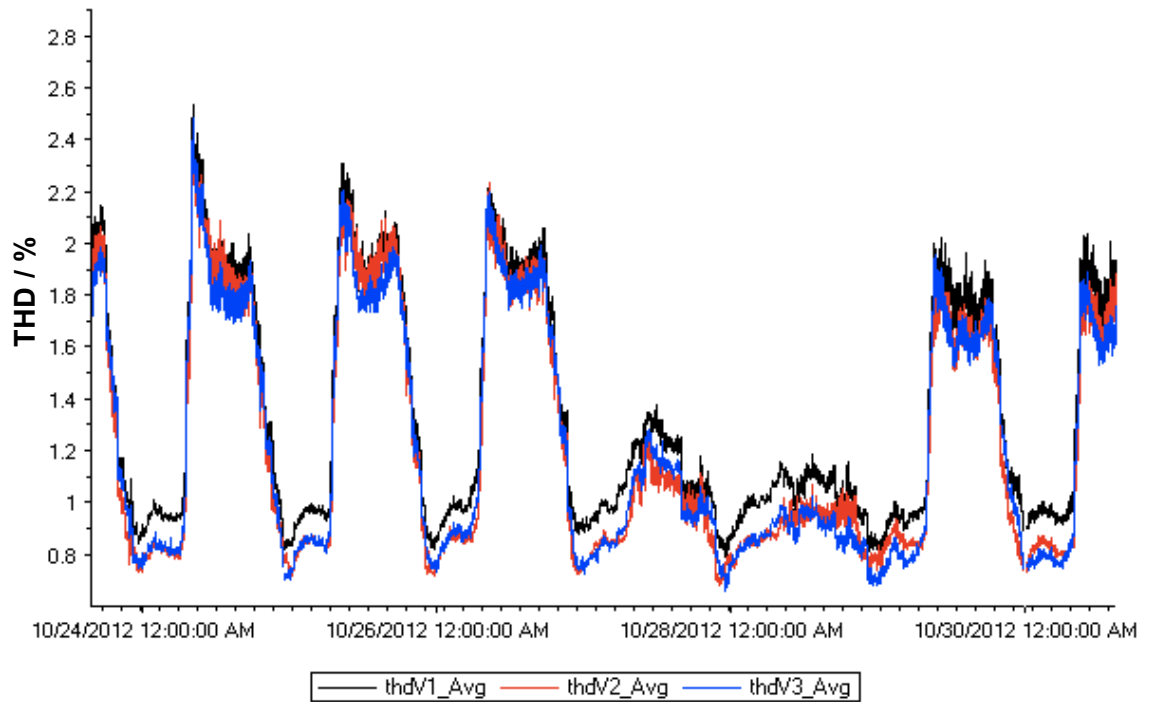


Kuva 27. Vaihevirtojen keskiarvot ja huippuarvot mitattuna ajan funktiona

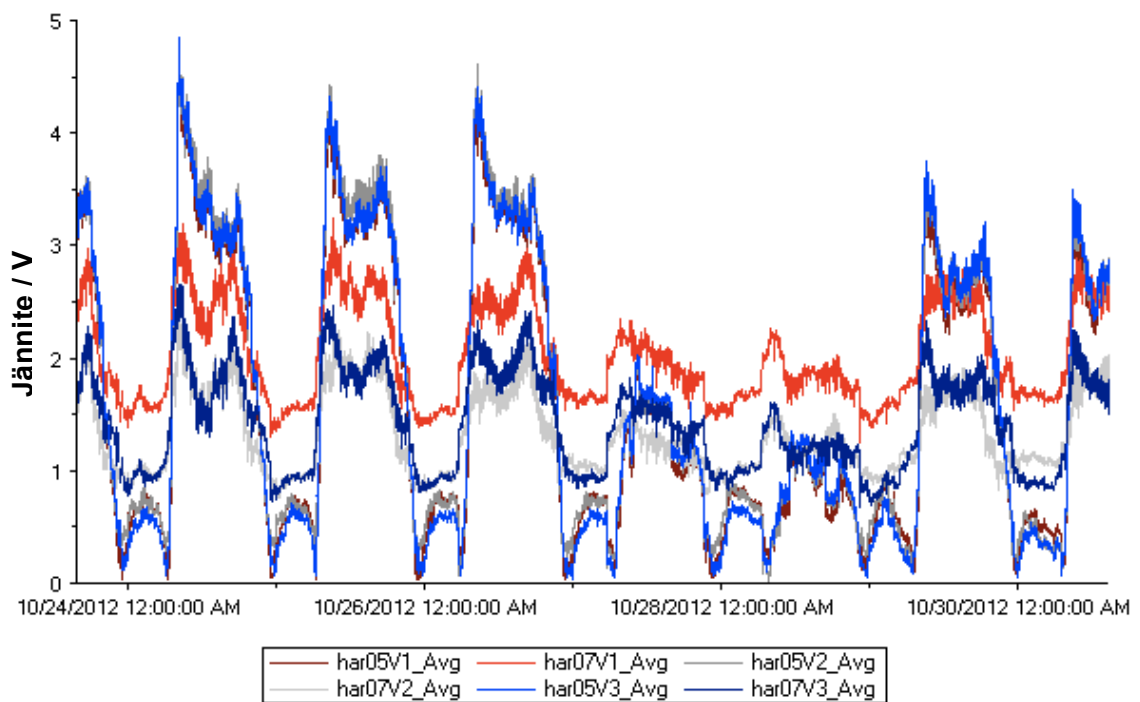
7.2 Jännitteen ja virran THD-tasot

Vaihejännitteiden THD-tasot olivat koko mittauksen aikana alle 3 %, joka on hyvä jännitesärötaso (kuva 28, ks. seur. s.). SFS-EN 50160 -standardin mukaan jännitesärön pitää olla alle 8 % koko mittausjakson aikana. Jännitesärö jää hyvälle tasolle, koska yliaaltovirrat eivät muutu jännitesäröksi verkon impedansseissa. Tämä tarkoittaa, että verkon muuntaja ja kompensointilaite on hyvin mitoitettu.

Kuvasta 29 (ks. seur. s.) voidaan havaita, että merkittävimmät vaiheiden jännitteen harmoniset yliaallot, ovat viides (250 Hz) ja seitsemäs yliaalto (350 Hz). Näitä aiheuttaa verkon elektronisten laitteiden hakkuriteholähteet, nopeussäädetyt käytöt ilmastointilaitteen sisä- ja tuloilman pumpuissa sekä kahdessa hississä. Standardin SFS-EN 50160 asettaa viidennelle ja seitsemännelle yliaallolle rajaksi 6 % ja 5 % nimellisjännitteestä (U_h / U_n). 7:s ja 5:s yliaalto on alle 2 % koko mittauksen ajan eli reilusti alle standardin raja-arvojen. Valaistuksesta ja tietokoneiden hakkuriteholähteistä aiheutuva kolmas jännitteen yliaalto on alle 0,5 % koko mittauksen ajan ja jää alle standardin 5 % rajan. Kolmannen ja muiden nollakomponenttisten yliaaltojen suuruus on vaihejohtimissa pieni, koska ne ovat summautuneet lähes kokonaan nollajohtimeen (kuva 32, ks. s. 43.).

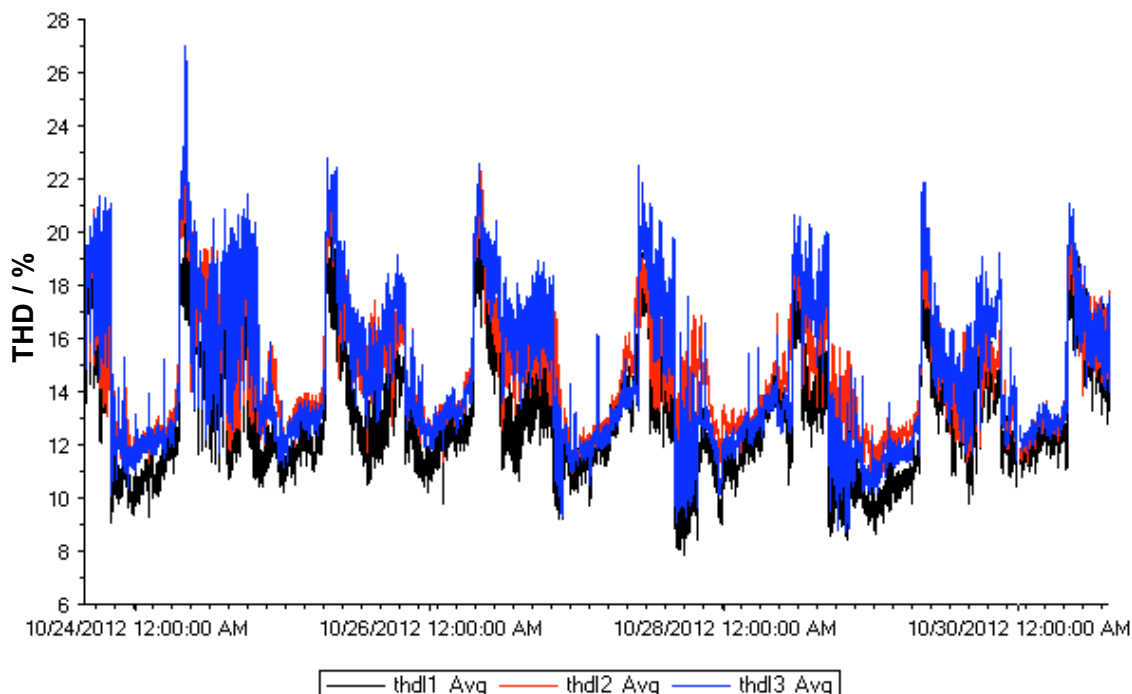


Kuva 28. Vaihejännitteiden THD-tasot mitattuna ajan funktiona



Kuva 29. Vaihejännitteiden 5. ja 7. harmoninen yliaalto mitattuna ajan funktiona

Vaihevirtojen THD-tasojen mittauksessa esiintyi erittäin suuri yliaaltovirtapitoisuus (kuva 30). THD oli koko mittauksen aikana jokaisessa vaiheessa yli 8 % ja maksimissaan 27 % perusaallosta.

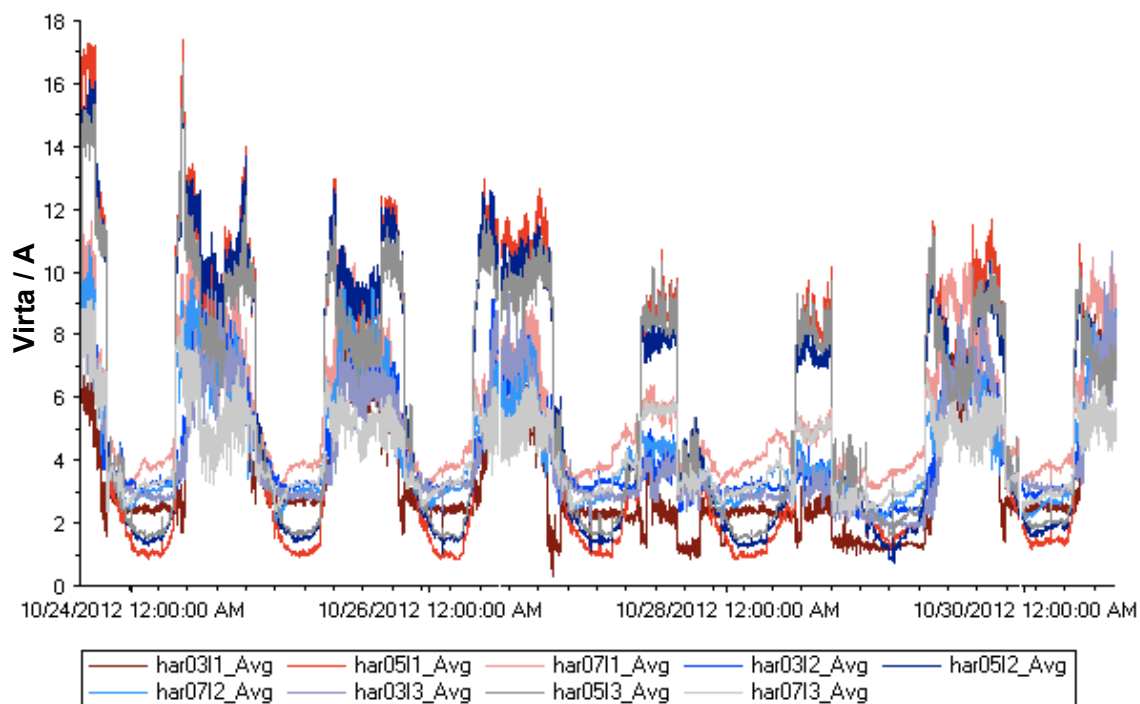


Kuva 30. Vaihevirtojen THD mitattuna ajan funktiona

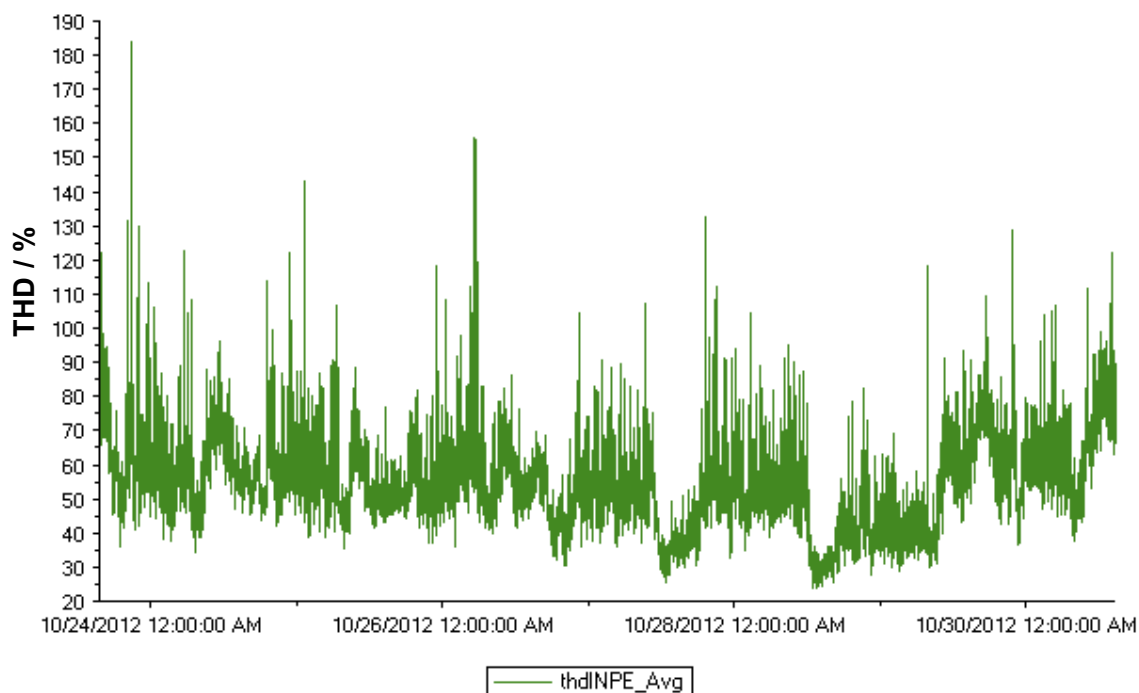
Vaikka vaihevirtojen THD on melko suuri, suuritehoiset yliaaltovirrat eivät ole aiheuttaneet merkittävää jännitteen aaltomuodon säröytymistä. Kuva 31 (ks. seur. s.) osoittaa, että vaiheiden virtasäro koostuu pääosin 3:sta, 5:stä ja 7:stä yliaallosta. Virtasäro sisältää myös muita parittomia matalataajuisia yliaaltoja, mutta niiden vaikutus aaltomuotoon on mitätön.

Nollajohtimen virran THD oli koko mittauksen aikana noin 50...80 % (kuva 32, ks. seur. s.) ja suurimmillaan 184 %. Suurimmat yliaaltovirrat nollajohtimessa olivat odotetusti nollakomponenttisia yliaaltoja eli 3., 9. ja 15. (kuva 33, ks. s. 43). Tämän suuruinen virran THD nollajohtimessa on kuitenkin normaalia toimistoverkoissa.

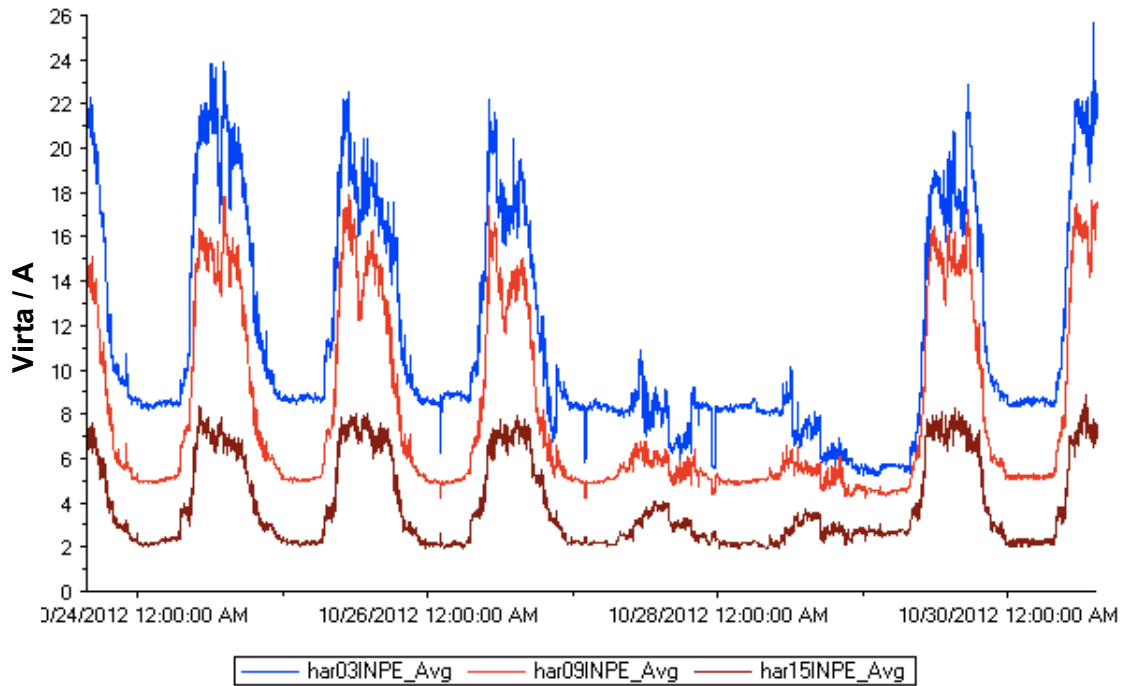
Verkossa kulkevat yliaaltovirrat ovat suuria, mutta niistä ei ole konkreettista haittaa verkon ja siihen kytkettyjen laitteiden toiminnalle. Jännitesäro jää niin alhaiseksi, ettei se aiheuta herkimmillekään laitteistoille ongelmia. Toimistotalon yliaaltotila ei ole siis niin vakava, että esimerkiksi yliaaltosuodatin olisi kannattava investointi.



Kuva 31. Vaihevirtojen 3., 5. ja 7. harmoninen yliaalto mitattuna ajan funktiona



Kuva 32. Nollajohtimen THD mitattuna ajan funktiona



Kuva 33. Nollajohtimen 3., 9. ja 15. harmoninen yliaalto mitattuna ajan funktiona

7.3 Verkon resonanssit

Rinnakkaisresonanssitaajuuksia laskiessa voidaan olettaa syöttävä verkko jäykäksi, jolloin laskennassa voidaan käyttää yhtälöä:

$$f_r = \sqrt{\frac{S_r}{u_k Q_c}} \cdot f_n \quad (13)$$

- f_r on resonanssitaajuus
- S_N on muuntajan nimellisteho
- u_k on muuntajan oikosulkujännite
- Q_c on kompensointiteho
- f_n on nimellistaajuus. [13, s. 69.]

Taulukossa 4 (ks. seur. s.) on esitetty resonanssitaajuudet eri kompensointitehoille 25 kVarin portain.

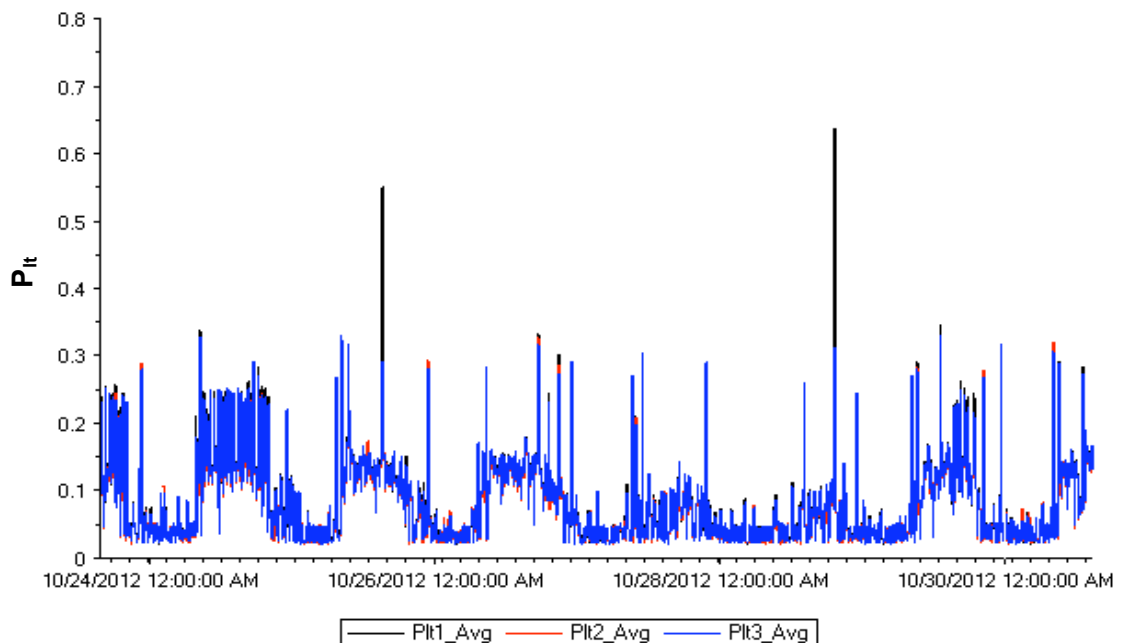
Taulukko 4. Rinnakkaisresonanssitaajuudet eri kompensointitehoille

f_r	1155	816	667	577	516	471	436	408	385	365	348	333
Q_c	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300

Taulukon arvoista nähdään, että seitsemäs yliaalto (350 Hz) on resonanssissa, kun kompensointiteho on 275 kVaria. Verkon loistehon suuruus on kuitenkin niin pieni, että kompensointitehon ei tarvitse koskaan nousta 275 kVarin suuruiseksi.

7.4 Välikynnän häiritsevyyssindeksin P_{it} arvo

Välikynnän P_{it} arvo oli koko mittauksen ajan standardin rajan $P_{it} \leq 1$ sisällä (kuva 34).



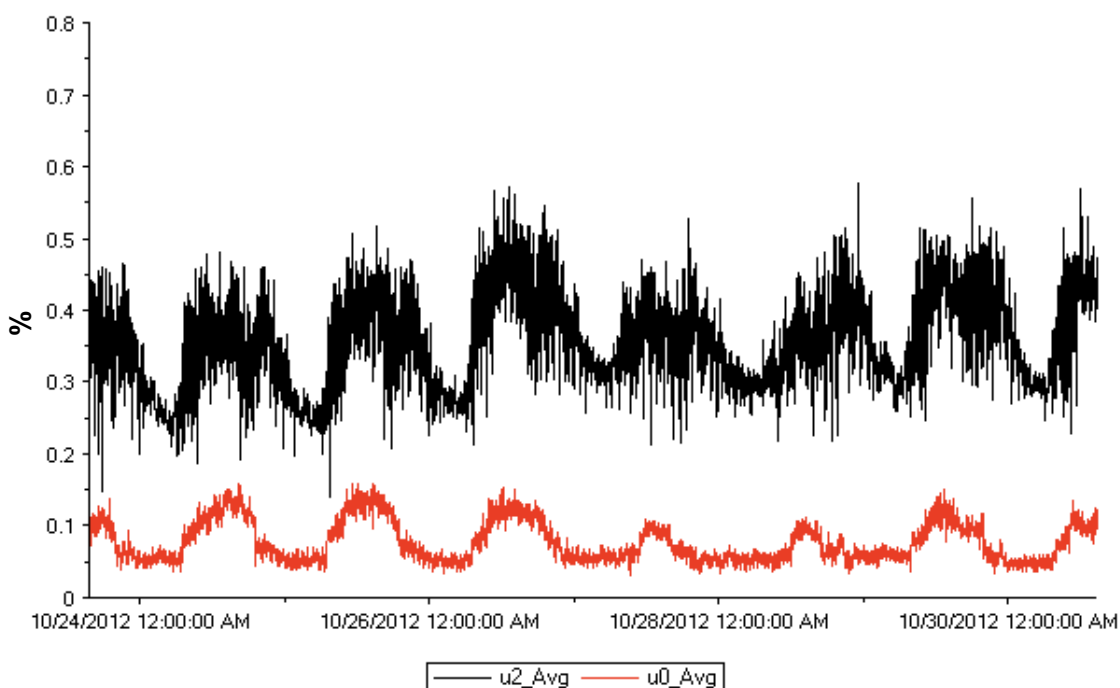
Kuva 34. Vaiheiden välikynnän P_{it} arvot mitattuna ajan funktiona

Kuvasta 34 näkee, että mittauksen aikana L1-vaiheessa esiintyi kaksi normaalista poikkeavaa välikyntäpiikkiä torstaina ja sunnuntaina. Niiden suuruus ei kuitenkaan ylittänyt standardin vaatimaa raja-arvoa.

7.5 Jännitteen epäsymmetria

Jännitteen nolla- ja vastakomponentin suhde myötäkomponenttiin oli koko mittauksen ajan alle 0,6 % (kuva 35, ks. seur. s.). Standardin mukaan nolla- ja vastakomponentin

suhde myötäkomponenttiin pitää välillä on 0...2 %. Mittaustulokset täyttävät siis standardin vaatiman laadun.



Kuva 35. Nolla- ja vastakomponentin suhde myötäkomponenttiin mitattuna ajan funktiona

7.6 Mittaustulosten yhteenveto

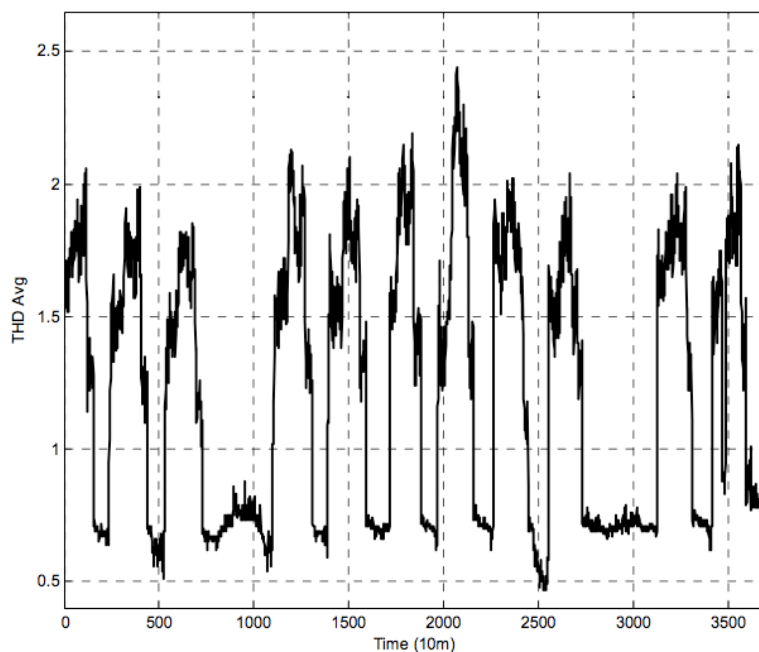
Mittaustulokset osoittavat, että Helsingin Messukeskuksen toimistotalolla ei ilmene sähkön laadullisia ongelmia, eikä lisätutkimuksille ole tällä hetkellä aihetta. Verkko sisältää paljon yliaaltoja tuottavia laitteita ja virran yliaaltopitoisuus nouseekin parhaimmillaan yli 26 % tasolle. Yliaaltovirtojen vaikutus näkyy kuitenkin jännitteessä vain 3 % THD-tasolla. Myöskään mikään yksittäinen jännitteen harmoninen yliaalto ei voimistunut resonanssien takia yli SFS-EN 50160 -standardin asettamien rajojen (taulukko 2, ks. s. 21).

Toimistotalon verkko sietää hyvin harmonisia yliaaltoja, koska verkkoon on suunnitteluvaiheessa valittu suuritehoinen 800 kVA:n muuntaja ja 300 kvar:n kompensointilaitte, jotka lieventävät merkittävästi yliaaltovirtojen aiheuttamaa jännitesäröä. Näillä valinnoilla on pystytty takaamaan hyvä sietokyky sekä harmonisia yliaaltoja että resonansseja vastaan ja samalla jätetty varaa mahdollisille verkon laajennuksille.

Suuritehoisesta muuntajasta ja sitä syöttävästä jäykästä 20,5 kV:n verkosta johtuen toimistotalon verkon jännitetason vaihtelut olivat pieniä ja vaihejännitteet pysyivät välillä $U_n + 2,1...2,8 \%$ / $- 0,2...0,7 \%$. Hyvin mitoitettun verkon ja symmetrisesti kytkettyjen kuormien ansiosta välttyttiin myös välkyntäilmiöltä ja jännite epäsymmetrialta. Välkyntän häiritsevyyssindeksi P_{ft} ja jännitteen epäsymmetrian suhde pysyivätkin koko mittauksen ajan standardin laadun rajojen sisäpuolella.

7.7 Vertailu vastaavaan tutkimukseen

Messukeskuksen toimistotalon yliaaltotasojen mittaustulokset ovat verrattavissa vastaavaan tutkimukseen, mikä toteutettiin Espanjassa Córdoban yliopiston bioteknologian laitoksella vuonna 2004. Tässä mittauskohteessa kuormat olivat Messukeskuksen tavoin elektronisia laitteita, loistelamppu valaistusta, yksi hissi ja ilmastointilaitte. Mittauksessa, joka mitattiin kampusrakennuksen 1000 kVA:n (20 kV / 400 V) Dyn-kytketyltä muuntajalta 13:n päivän aikana löytyi samansuuruisia THD-tasoja, kuin Messukeskuksesta. Kampuksella jännitteen keskimääräinen THD-taso oli n. 2 % työaikana ja THD-huippu oli 2,41 % (kuva 36). Virran THD-huippu oli 27,54 % ja suurimmat harmoniset yliaallot olivat odotetusti 3., 5. ja 7., kuten messukeskuksella. [20, s. 229.]



Kuva 36. Jännitteen THD mitattuna viikon ajalta kampusrakennuksen pienjänniteverkosta [21, s. 330]

8 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin Helsingin Messukeskuksen toimistotalon sähköverkon sähkön laadun tilaa. Työn painopisteenä olivat harmoniset yliaallot, sillä verkko sisältää suuren määrän yliaaltolähteitä. Mittaustuloksista selviää, että verkon yliaaltovirtapitoisuus on suuri. Yliaaltovirrat eivät kuitenkaan säröidy pahasti verkon impedansseissa jännitesäröksi. Selityksenä tähän lienee verkon suhteellisen reilu mitoitus. Mittaustulokset osoittavat lisäksi sen, että verkon jännitetasossa ei esiinny juurikaan vaihtelua. Myöskään häiritsevää välkyntäilmiöitä ei esiintynyt mittauksien aikana.

Mittaustulosten perusteella voidaan siis todeta, että toimistotalon sähkön laadullinen tila on hyvä. Verkko ei nykyisessä tilassaan vaadi lisämittauksia, mutta esimerkiksi kuormien kasvaminen saattaa aiheuttaa tarpeen uusille tarkasteluille.

Lähteet

- 1 Dugan, Roger C. – McGranaghan, Mark F. – Surya, Santoso – Beaty, H. Wayne. Power Systems Quality, Second Edition. United States: McGraw-Hill Professional 2002
- 2 Baggini, Angelo. Handbook of Power Quality. England: John Wiley & Sons Ltd 2008
- 3 Targosz, Roman – Manson, Jonathan. PAN European LPQI Power Quality Survey. Vienna: European Copper Institute 2007.
- 4 Suomen standardisoimisliitto SFS ry, SFS-EN 50160:2010. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet.
- 5 Lakervi, Erkki – Jarmo, Partanen. Sähkönjakelutekniikka, 3. Painos. Helsinki: Otatiето 2012.
- 6 Elovaara, Jarmo – Haarla, Liisa. Sähköverkot 1, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki: Otatiето 2011.
- 7 ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita luku 4. Sähkön laatu [verkkodokumentti, viitattu 11.9.2012]. Saatavissa:
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTTT/04_0_S%84hk%94n%20laatu.pdf
- 8 IEEE Standards Association, IEEE Std 1159-2009. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- 9 Aro, Martti – Elovaara, Jarmo – Karttunen, Matti – Nousiainen, Kirsi – Palva, Veikko. Suurjännitetekniikka. Jyväskylä: Otatiето 2011.
- 10 Fuchs, Ewald F. – Masoum, Mohammad A. S. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. United States: Academic Press 2008.
- 11 Arrigalan, Jos – Watson, Neville R. Power System Harmonics, Second Edition. England: John Wiley & Sons Ltd 2003.
- 12 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo 2006.
- 13 Schlabbach, J. – Blume, D. – Stephanblome, T. Voltage Quality in Electrical Power Systems. London: The Institution of Engineering and Technology 2000.
- 14 Silvonen, Kimmo. Sähköttekniikka ja piiriteoria. Helsinki: Otatiето 2009

- 15 Paavola, Martti – Lehtinen, Pekka. Sähkötekniikan oppikirja, 14. painos. Porvoo: WSOY 1984.
- 16 European Copper Institute, Capacitors in harmonic-rich environment [verkkodokumentti, viitattu 26.10.2012]. Saatavissa: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/Cu0108%20-%20Capacitors%20in%20an%20harmonic%20rich%20environment%20-%20v2.pdf>
- 17 ABB, tekninen opas nro. 6. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas [verkkodokumentti, viitattu 5.11.2012]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/tekninen_opas_nro_6.pdf)
- 18 IEEE Standards Association, ANSI/IEEE Std 519-1981. Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters.
- 19 Korpinen, Leena. Yliaalto-opus [verkkodokumentti, viitattu 14.11.2012]. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
- 20 Moreno-Muñoz, A. – Redel, M. D. – González, M. Power quality in high-tech campus: a case study. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy 2006.
- 21 Moreno-Muñoz, Antonio. Power Quality, Mitigation Technologies in a Distributed Environment. London: Springer 2007.

Energian- ja pätötehonkulutuksen mittaustulokset

Helsingin Messukeskuksen toimistotalolta mitattu energian- ja pätötehonkulutus ajan funktiona.

