



TIETOKONESIMULOINNIN KÄYTTÖ TEOLLISUUSVERKON ANALYSOINTIIN

Opinnäytetyö

Janne Nyysönen

Sähkötekniikan koulutusohjelma
Teollisuuden sähkö- ja automaatiotekniikka

Hyväksytty ____ . ____ . ____ _____

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIikka KUOPIO

Koulutusohjelma

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Tekijä

Janne Nyysönen

Työn nimi

Tietokonesimuloinnin käyttö teollisuusverkon analysointiin

Työn laji

Opinnäytetyö

Päiväys

5.5.2010

Sivumäärä

50 + 10

Työn valvoja

Dipl.ins. Risto Rissanen

Yrityksen yhdyshenkilö

Asiakaspalvelupäällikkö Sasu Rissanen

Yritys

YIT Kiinteistötekniikka Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli simuloida ja mitata erään yrityksen sähköverkkoa, kartoittaa sen nykytila ja kehittää sitä havaintojen pohjalta. Työn teettäjänä toimi YIT kiinteistötekniikka Oy. Itse mittaukset tehtiin yrityksessä, joka ei halunnut nimeään julki. Tästä syystä puhutaan tutkittavasta verkosta.

Mittausten tarkoituksena oli kartoittaa sähköverkon yliaaltojen osuutta, mahdollisia ylijännitetilanteita, maadoitusverkon toimivuutta ja yleisesti sähkön laatua. Mittauslaitteistona käytettiin Gossen Metrawattin valmistamaa Mavowatt 70-yliaaltoanalysointia. Mittausten jälkeen saatuja mittaustuloksia verrattiin standardin SFS EN-50160 antamiin rajoihin. Mittausten lisäksi sähköverkkoa mallinnettiin Digsilent Power Factory -tietokoneohjelmalla ja mittaustuloksia Matlab-ohjelmalla.

Työn tuloksena tutkittavan verkon haltijalle annettiin selvitys sähkön laadun nykytilasta, joka selvitettiin niin mittaustulosten kuin simuloinnin perusteella.

Avainsanat

yliaallot, sähköverkon simulointi

Luottamuksellisuus

julkinen

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme

Electrical Engineering

Author

Janne Nyysönen

Title of Project

Using Computer Simulation in Industrial Network Analysis

Type of Project

Final Project

Date

5 May 2010

Pages

50+10

Academic Supervisor

Mr Risto Rissanen, M.Sc.

Company Supervisor

Mr Sasu Rissanen, Customer Service Manager

Company

YIT Kiinteistötötekniikka Oy

Abstract

This thesis was designed to simulate and measure a company's electricity network, to identify its current state and to develop it on the basis of the findings. The project was commissioned by Kiinteistötötekniikka YIT Oy. The measurements were made in a corporation which did not want its name published. For this reason, only the term network under study is used.

The main purpose of the measurements was to identify the proportion of the harmonics in the electricity network, the potential transient situations, functionality of the grounding and overall power quality. A Mavowatt 70 harmonic's analyzer, manufactured by Gossen Metrawatt, was used as a measuring device,. The results, obtained from the measurements, were compared to the limits of standard EN-50160. In addition to the measurements, the electricity network was modeled with Digsilent Power Factory computer program and the measurement results with Matlab program.

As a result, the owner of the network under study was given an account considering the current state of the power quality which was based on the taken measurements as well as on the simulation.

Keywords

harmonic current, power grid simulation

Confidentiality

public

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty YIT kiinteistötekniikka Oy:lle Kuopioon. Työn ohjaajana on toiminut asiakaspalvelupäällikkö Sasu Rissanen YIT:stä ja ohjaavana opettajana diplomi-insinööri Risto Rissanen Savonia-ammattikorkeakoulusta.

Haluan kiittää Sasu Rissasta ja Risto Rissasta työni aikana saamistani neuvoista ja tuesta.

Leppävirralla 5.5.2010

Janne Nyyssönen

SISÄLLYS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 2 | YLIAALLOT..... | 8 |
| | 2.1. Sähkön laatu..... | 8 |
| | 2.2. Yliaaltojen syntyminen..... | 9 |
| 3 | YLIAALTOJEN TOTEAMINEN..... | 10 |
| | 3.1. Fourier-analyysi..... | 10 |
| | 3.2. Yliaaltojen mittaaminen..... | 11 |
| | 3.3. Yliaaltojen mittauslaite | 11 |
| 4 | YLIAALTOJEN AIHEUTTAMAT ONGELMAT | 13 |
| | 4.1. Kolmas harmoninen yliaalto..... | 13 |
| | 4.2. Suuntaajien yliaallot..... | 14 |
| | 4.3. Muita yliaaltojen haittoja | 16 |
| 5 | YLIAALTOJA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET..... | 18 |
| 6 | YLIAALTOJEN VÄHENTÄMINEN..... | 22 |
| | 6.1. Yliaaltojen huomioiminen suunnittelussa | 22 |
| | 6.2. Yliaaltojen hallinta | 23 |
| | 6.2.1. Sähköverkon ylivoimittaminen ja yliaallot | 23 |
| | 6.2.2. Yliaaltojen syntyminen vähentäminen | 23 |
| | 6.3. Yliaaltojen suodattaminen | 24 |
| | 6.3.1. Passiivisuodattimet ja imupiirit..... | 24 |
| | 6.3.2. Aktiivisuodattimet..... | 26 |
| | 6.3.3. Kolmannen yliaallon suodatin..... | 28 |
| 7 | TUTKITTAVAN VERKON MALLINTAMINEN | 30 |
| | 7.1. Power Factory -simulointiohjelma..... | 30 |

| | |
|--|-----------|
| | 6 |
| 7.2. Simuloinnin suoritus..... | 30 |
| 7.3. Simuloinnin lopputulokset | 37 |
| 8 TUTKITTAVAN VERKON NYKYTILA | 38 |
| 8.1. Sähköverkon laskenta | 38 |
| 8.2. Mittaustulosten arviointi..... | 40 |
| 8.2.1. Sähkön laatu-analyysi | 40 |
| 8.2.2. Maadoitusjärjestelmän mittaus..... | 41 |
| 8.3. Mittaustulosten simulointi | 44 |
| 9 YHTEENVETO | 47 |
| LÄHTEET | 49 |
| LIITTEET | 52 |
| LIITE 1. POWER FACTORY SIMULOINNIN TULOKSET | 52 |
| LIITE 2. MITTAUSTULOKSET | 56 |
| 1. Pääkeskuksen mittaustulokset..... | 56 |
| 2. JK 17, mittaustulokset..... | 57 |
| 3. RK 35, mittaustulokset..... | 58 |
| 4. Estokelapariston (240 kVAr) mittaustulokset | 59 |
| 5. Maadoitusjärjestelmän mittaustulokset | 60 |
| 6. RK 35, lisämittaustulokset | 61 |

1 JOHDANTO

Nykyaikaisiin sähköverkkoihin on kytketty paljon laitteistoja, jotka tuottavat yliaaltoja. Yliaallot huonontavat sähkön laatua, minkä seurauksena laitteistot eivät ehkä toimi halutulla tavalla ja vikaantuvat ennakoimattomasti. Yliaaltoja voidaan mitata tarkoitukseen soveltuvalla yliaaltoanalysaattorilla. Mikäli yliaaltojen osuus kasvaa verkossa liian suureksi, on niitä suodatettava. Yliaaltohaittojen pienentämiseen on nykyisin saatavilla tarkoitukseen soveltuvia suotimia.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on mitata ja tutkia sähkön laatua ja etenkin sen sisältämiä yliaaltoja. Työssä tarkastellaan esimerkiverkkoa, josta käytetään nimitystä tutkittava verkko. Lisäksi työssä tarkastellaan maadoitusjärjestelmän toimivuutta tekemällä siihen virtamittauksia. Lopuksi saatuja mittaustuloksia voidaan verrata standardien antamiin raja-arvoihin. Mittausten lisäksi sähköverkkoa mallinnetaan Digilent Power Factory -tietokoneohjelmalla ja mittaustuloksia Matlab-ohjelmalla.

Työn teetti YIT kiinteistötekniikka Oy, joka on merkittävä eurooppalainen kiinteistö- ja rakennusalan sekä teollisuuden palveluyritys. YIT toimii Suomen lisäksi Venäjällä, Baltian maissa sekä Keski-Euroopassa. Vuonna 2008 YIT:n liikevaihto oli 3,9 miljardia euroa ja henkilöstömäärä noin 25 000. YIT:n osake on noteerattu NASDAQ OMX Helsinki Oy:ssä./1/

2 YLIAALLOT

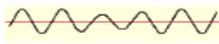
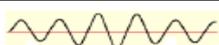
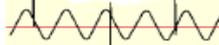
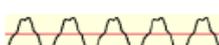
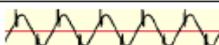
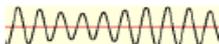
2.1. Sähkön laatu

Yleisesti sähkön laadulla tarkoitetaan mitattavaa sähkön laatua, joka määritellään jakelujännitteeseen liittyvinä ominaisuuksina. Näitä ominaisuuksia ovat taajuus, suuruus, nopeat jännitemuutokset, aaltomuoto, kolmivaiheisen jännitteen symmetria, keskeytykset sekä erilaiset häiriöt.

Sähkön laatu on merkittävin tekijä sähkön toimitusvarmuuden kannalta. Pahimmassa tapauksessa huono sähkön laatu voi aiheuttaa laitteiden rikkoontumisia, häiriöitä tai jopa tulipaloja.

Useimmiten sähkön huono laatu tulee kuluttajalle yllätyksenä ja liian myöhään. Yleensä tilanne huomataan, kun yritykseen hankitaan uusia laitteita. Tällöin verkosta voi löytyä laitteita, jotka eivät kestä häiriötason nousua. IEC on määritellyt kuluttajille toimitettavan sähkön laadun erillisessä standardissa SFS-EN 50160. Taulukkoon 1 on määritelty tavallisimpia sähkön laatuun liittyviä häiriöitä.

Taulukko 1. Sähkön laatuun liittyvät keskeisimmät ongelmat ja niiden syyt. /2/

| Häiriötyyppi | Kuvaus | Mahdolliset syyt |
|--------------------------------------|---|--|
| Sähkön jakelun katkos (> 1min) | | Huoltotoimet, linjaviat, onnettomuudet, sää, tuuli, salamet, jää |
| Pitkäaikainen ylijännite | | Pieni kuormitus, huono säätö |
| Pitkäaikainen alijännite | | Raskas kuorma, voimakkaat kuormitushuiput, ei loistehonsäätöä, huono tehokerroin |
| Hetkelliset katkokset |  | Katkasijoiden laukeaminen, vian selvitystilanne, syötön vaihto |
| Jännitekuopat |  | Suurien kuormien kytkentä, hetkelliset viat, katkaisijoiden toiminta, induktiiviset kuormat |
| Hetkelliset ylijännitteet |  | Piirin kapasitanssi, suurten kuormien poiskytkentä, vaihevika |
| Transienttijännitteet |  | Valaistus, kapasitiivien kytkentä, virtasuojan laukeaminen, epälineaariset kuormat, häiriöt |
| Harmoniset virran yliaallot |  | Epälineaariset komponentit, korkeataajuiset kytkennät, TV, tietokoneet, valaistus, huono tehokerroin, laitteiden aiheuttama signaalihäiriö |
| Jaksolliset häiriöt (t < 0,5 sykliä) |  | Tehoelektronikkalaitteet |
| Välkyntä |  | Eritaajuinen jännitteen vaihtelu, valaistus, loistehon vaihtelu |
| Jännite-epätasapaino | | Epätasainen kuormitus, kompensointikondensaattorit, moottorit |

2.2. Yliaaltojen syntyminen

Sähköverkot on suunniteltu toimimaan vakiotaajuisilla virran ja jännitteen käyrämuodoilla. Kuitenkin jatkuvasti lisääntyvä yliaaltoja tuottavan kuormituksen osuus kokonaiskuormituksesta on aiheuttanut sen, että puhtaasti sinimuotoinen jännite on erittäin epätavallinen. Sähkövoima- ja automaatiotekniikassa tehoelektroniikkaa käytetään yhä enemmän prosessien hallintaan. Virran ja jännitteen suhteen epälineaarisen kuorman kytkentä jollekin jakelujärjestelmän jännitetasolle synnyttää verkkoon värähtelyjä, joita kutsutaan yliaalloiksi. Useimmiten yliaallot ovat harmonisia eli verkko-otaajuuden kokonaisia monikertoja. /3/

Yliaaltojännitteitä syntyy, kun harmoniset yliaaltovirrat kulkevat verkon impedanssien kautta. Harmoniset yliaaltovirrat sekä verkon impedanssit ja siten myös harmoniset yliaaltojännitteet vaihtelevat liittymiskohdassa ajan suhteen. /4/

Suurimpia yliaaltojen tuottajia ovat tasavirta- ja taajuusmuuttajakäytöt sekä valokaa-riuunit. Muita yliaaltojen lähteitä ovat mm. UPS-laitteet, hakkuriteholähteet, purkauslamppuvalaisimet, muuntajat, sähkömoottorit ja hitsauslaitteet. Nykyään suurimpia yliaaltojen aiheuttajia ovat tasasuuntaajissa käytettävät siltakytkennät, kuten 6- ja 12-pulssisillat. Kotitalouksissa useimmin esiintyvä yliaalto on kolmas yliaalto, jonka taajuus on 150 Hz. /5/

Epälineaaristen kuormien synnyttämät yliaallot eivät välttämättä aiheuta ongelmaa laitteelle itselleen, vaan ne leviävät verkkoa pitkin muille laitteille aiheuttaen niille erilaisia ongelmia. Taulukkoon 2 on koottu tavallisimpien yliaaltolähteiden perusominaisuuksia.

Taulukko 2. Tavallisimpia yliaaltolähteiden perusominaisuuksia. /5/

| Kuormitus | Tehokerroin (50 Hz) | Yliaallot | 3. yliaalto | Ohjauskulma |
|----------------------|-----------------------------|--|-------------|---------------|
| Tasavirtakäytöt | 0,4–0,7 ajotilan- teesta | 5., 7., 11., 13., ... | – | Vaihtelee |
| Taajuusmuuttajat | n. 0,98 | 5., 7., 11., 13., ... pulsstiluvun mukaan | – | yleensä vakio |
| UPS-laitteet | tyypillisesti n. 0,8 | 5., 7., 11., 13., ... | – | yleensä vakio |
| PC:t ja 1-v hakkurit | n. 1,0 | 3., 5., 7., 9., ... | 70...80 % | vakio |

3 YLIAALTOJEN TOTEAMINEN

3.1. Fourier-analyysi

Tavallisesti sähköinen signaali on vain harvoin puhtaasti joko tasasähköluonteinen tai yhden taajuuden vaihtosähköä. Yleensä sähköinen signaali koostuu useasta vaihtosähkösignaalista ja mahdollisesti näihin liittyvistä tasasignaaleista. Tällöin virtapiiri sisältää harmonisia ja epäharmonisia komponentteja eli yliaaltoja.

Sähköisen signaalin yliaaltojen selvittämiseksi voidaan tehdä Fourier-analyysi. Fourier-analyysin avulla voidaan laskea kaikki jaksolliset funktiot yhden tai useamman sinifunktion summana. Tuloksena saadaan jännitteelle yhtälö, jonka komponenttien kertoimet antavat ko. taajuuskomponentin suuruuden. Laskennan avulla saatua kokonaissignaalin tehollisarvoon suhteutettua taajuuden pitoisuutta kutsutaan särökertoimeksi. /2/

Fourier-analyysin mukaan saadaan yhtälön 1 mukainen sarjakehitelmä

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

jossa U_0 = jännitteen tasakomponentti, n = yliaallon järjestysluku ja f = perustaajuuden suuruus. Jännitteen tasakomponentti U_0 ja kertoimet a_n ja b_n voidaan laskea yhtälöiden 2, 3 ja 4 avulla

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad (4)$$

jossa T = signaalin jaksonaika. Laskettujen komponenttien avulla voidaan piirtää viivaspektri, jossa ovat esitettyinä kaikkien komponenttien amplitudit taajuuden funktiona.

Nykyisin on olemassa useita ja monipuolisia tietokoneohjelmia, jotka suorittavat laskennan suoraan mittaustulosten signaalin perusteella. Hyviä ohjelmia ovat mm. Maple ja tässäkin opinnäytetyössä käytetty Matlab.

3.2. Yliaaltojen mittaaminen

Sähköverkon yliaaltoanalyysia tehtäessä ei normaalisti Fourier-analyysiä tarvitse tehdä vaan voidaan käyttää mittalaitetta, joka mittaa automaattisesti kaikki merkittävimmät yliaallot. Mittaukset on suoritettava siten, että ne edustavat normaaleja käyttötilanteita sekä verkossa että yksittäisen sähkönkäyttäjän luona. Mittauksen kesto valitaan tarkasteltavan kohteen toiminnan perusteella. Keston tulisi kuitenkin olla vähintään tunnin mittainen. Mikäli kohteessa esiintyy kuormitusvaihteluita, ne on syytä ottaa mittauksissa huomioon. Tällöin mittaukset suoritetaan vähintään neljän päivän mittaisina ja niihin sisältyy myös pienimmän kuormituksen tilanne. /5/ Mittausten jälkeen saatuja mittaustuloksia verrataan standardin SFS-EN 50160 asettamiin rajoihin.

3.3. Yliaaltojen mittauslaite

Nykyaikaisissa mittalaitteissa on runsaasti muitakin ominaisuuksia yliaaltojen analysoinnin lisäksi. Tästä syystä ennen mittausten aloittamista on mielekäästä harkita, mitä muuta sähköverkosta halutaan mitata. Mittauksissa voidaan yliaaltovirtojen ja -jännitteiden lisäksi tutkia mm. mahdolliset ylijännitetilanteet, epäsymmetria ja välkyntä.

Tässä opinnäytetyössä käytettiin Gossen Metrawattin valmistamaa Mavowatt 70-verkkoanalysointilaitetta, joka on esitettyinä kuvassa 1.



Kuva 1. Gossen Metrawattin Mavowatt 70-verkkoanalysointilaitte, jolla voidaan mitata mm. harmonisia yliaaltoja. /6/

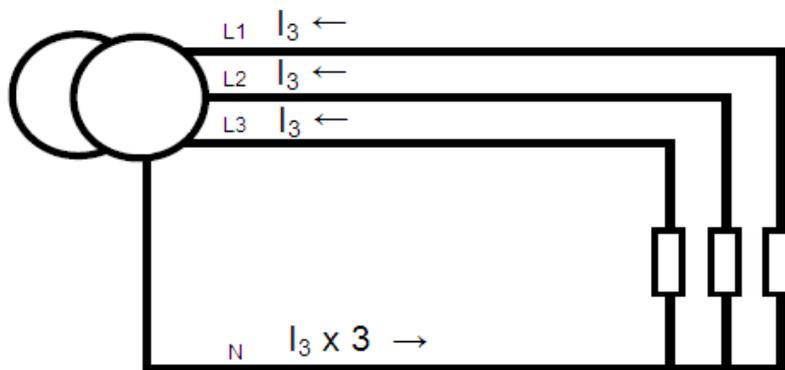
Käytössä Mavowatt 70-analysointilaitte osoittautui suhteellisen helppokäyttöiseksi ja monipuoliseksi. Mittaustulosten tarkasteluun on olemassa oma tietokoneohjelma, jolla mittaustulokset ja niistä havaitut sähkön laaturvirheet löytyvät lähes automaattisesti. Mittariin voidaan ohjelmoida mittausajankohta, ja mitä kaikkea halutaan mitata.

Mittari suorittaa mittauksia 1 MHz:n näytteenottotaajuudella, joka mahdollistaa nopeiden jännite- ja tilamuutosten mittauksen. Yliaaltojen, välkynnän ja yleisesti sähkön laadun mittaustulokset analysointilaitte antaa käyttäen IEC-standardia ja standardin raja-arvoja. Mikäli käyttäjän tai standardien määrittelemät raja-arvot ylittyvät, on tietokoneohjelman avulla mahdollista paikallistaa vian tarkka syntyhetki ja analysoida mahdollinen vikapaikka.

4 YLIAALTOJEN AIHEUTTAMAT ONGELMAT

4.1. Kolmas harmoninen yliaalto

Kolmatta harmonista yliaaltovirtaa syntyy, kun sähköverkkoon liitetään 1- vaiheista epälineaarista kuormitusta. Tästä seuraa, että vaihe- ja nollajohtimen välille syntyy jännitesäröä, joka ei näy vaiheiden välillä, koska kolmella jaollisilla harmonisilla yliaalloilla on sama vaihesiirtokulma vaiheiden kesken /7/. Kolmas harmoninen yliaaltovirta ei summaudu nollassi verkon tähtipisteessä, kuten muut yliaallot summautuvat. Nollajohtimessa alkaa kulkea 150 Hz:n yliaaltovirtaa, kuten kuva 2 havainnollistaa. Tästä voi aiheutua, että nollajohdin ylikuormittuu, vaikka kuormat vaiheiden välillä olisivatkin tasaisia. Tähän tulisikin kiinnittää erityistä huomiota etenkin vanhojen rakennusten syöttökaapeleissa, joissa nollajohtimen poikkipinta-ala on vain puolet äärijohtimen pinta-alasta.



Kuva 2. Kolmannen yliaallon summautuminen nollajohtimeen.

Edellisten lisäksi kolmas harmoninen virta aiheuttaa nollajohtimen kuumenemista sekä eristeiden nopeampaa vanhenemista ja jopa tulipalon vaaran yliaaltojen summavirran ja normaalin noljavirran yhteisvaikutuksesta /8/.

4.2. Suuntaajien yliaallot

Suuntaajalaitteet aiheuttavat yliaaltoja sähköverkkoon, sillä niiden verkosta ottama virta poikkeaa sinimuotoisesta. Yksinkertaistettuna suuntaajan pulssiluku määrää syntyneiden yliaaltojen määrän ja suuruuden. Siltakytkeäntöjen yliaaltojen osuus voidaan helposti laskea. Tunnettaessa suuntaajan pulssiluku voidaan sen aiheuttamien yliaaltojen järjestysluku laskea käyttäen yhtälöä 5

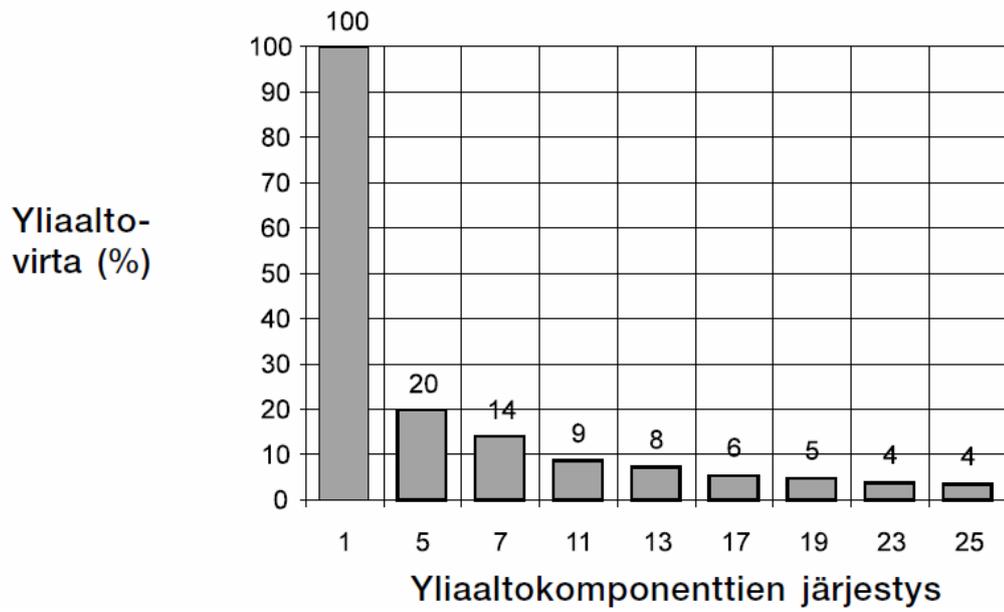
$$n = k \cdot p \pm 1 \quad (5)$$

jossa n = yliaallon järjestysluku, p = pulssiluku ja $k = (1, 2, 3 \dots n) / 9$.

Yleisemmin käytössä olevat 6-pulssisillat syöttävät verkkoon yliaaltoja, joiden järjestysluvut ovat yhtälön 1. mukaan 5., 7., 11., 13. jne. Yliaaltoja voidaan vähentää huomattavasti, kun 6-pulssisillan tilalle vaihdetaan 12-pulssisilta. Tällöin yliaalloista poistuu yhtälön 5 mukaan: 5., 7., 17. ja 19.. Suuntaajan synnyttämien yliaaltovirtojen suuruus on ideaalitapauksessa riippuvainen vain perusaaltoisen virran suuruudesta sekä yliaaltovirran järjestysluvusta, joka voidaan laskea käyttäen yhtälöä 6

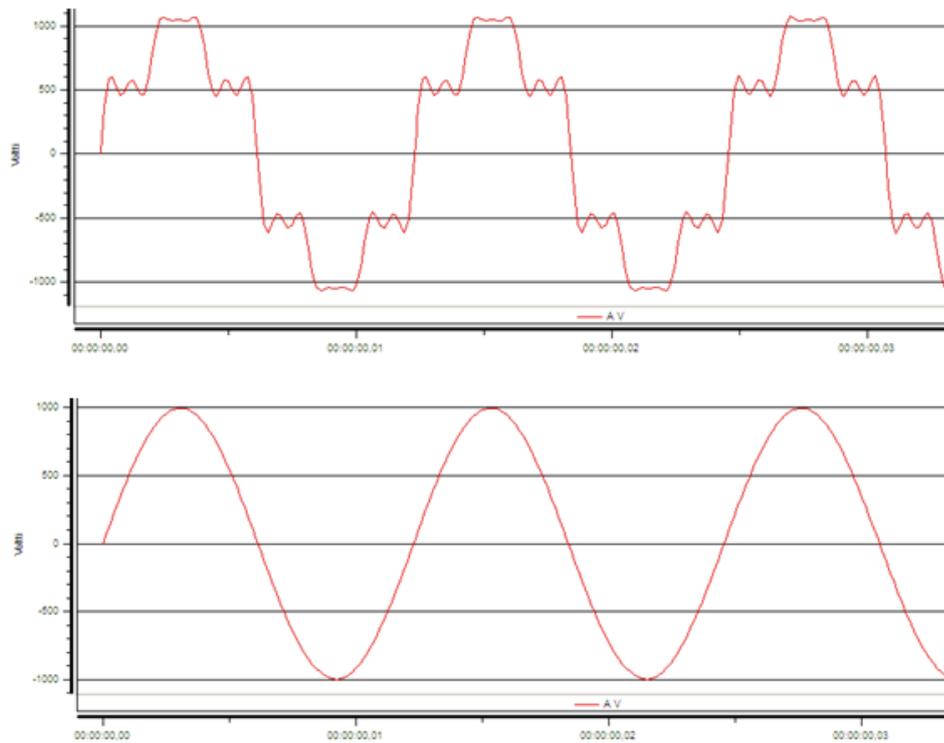
$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (6)$$

jossa I_1 = perusaallon tehollisarvo ja $I_n = n$. yliaaltovirta /10/. Kuvassa 3 on esimerkki 6-pulssisillan viivaspektristä, mihin on laskettu teoreettinen yliaaltosisältö ja suuntaajan tuottamat yliaallot.



Kuva 3. Teoreettinen yliaaltosisältö 6-pulssisen tasasuuntaajan symmetrisessä virrassa. /10/

Kuvassa 4 on esitettyä simuloitu 6-pulssisillan säröytynyt virta, kun se sisältää kuvan 3 mukaisen määrän 5., 7., 11., 13. yliaaltoa.



Kuva 4. Vaihekuvaajat: yllä säröytynyt jännite, alla puhdas siniaalto.

4.3. Muita yliaaltojen haittoja

Yksi yliaaltojen merkittävä haitta on resonanssitilanteet. Resonanssi syntyy, kun jonkin yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta. Resonanssitilanne voi olla joko sarja- tai rinnakkaisresonanssi. Sarja- eli jänniteresonanssi muodostuu, kun yliaallot kulkeutuvat syöttävän verkon puolelta ja resonoivat syöttömuuntajan ja kiskostoon liitetyn kapasitanssin välillä /5/. Rinnakkais- eli virtaresonanssi syntyy, kun verkkoon kytketyt yliaaltolähteiden yliaallot generoituvat ja resonoituvat kiskostoon liitetyn kapasitanssin ja syöttömuuntajan sekä muiden induktanssien välille /5/.

Sarja- ja rinnakkaisresonanssin ehto on, että induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat itseisarvoltaan yhtä suuria. Tällöin piirin impedanssi on reaalinen, eli induktanssin ja kapasitanssin vaikutukset kumoavat toisensa. Tästä syystä resonanssitilanne vaikuttaa etenkin muuntajiin ja kompensointi kondensaattoreihin, koska kondensaattorin kapasitanssi C ja muuntajan induktanssi L muodostavat aina resonanssipiirin yhtälön 7 mukaan resonanssitaajuudella:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (7)$$

Tällöin yliaaltovirratt tai -jännitteet voivat moninkertaistua normaaliin tilanteeseen verrattuna ja näin aiheuttaa laitteiden rikkoutumisia. Yhtälö 7 voidaan esittää myös reaktanssien tai oikosulku- ja kompensointitehon suhteilla yhtälöiden 8 ja 9 mukaan

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_c}{X_k}} \quad (8)$$

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (9)$$

jossa f_1 = verkon nimellistaajuus, X_c = kondensaattorin reaktanssi, X_k = verkon oikosulkureaktanssi, S_k = verkon oikosulkuteho ja Q_c = verkon kompensointiteho. Yh-

tälöistä selviää, että resistiivinen kuormitus ei vaikuta resonanssitaajuuteen ja oikosulkutehon nosto suurentaa resonanssitaajuutta.

Harmoniset yliaallot aiheuttavat myös virheellistä virran ja jännitteen muotoa eli säröä. Signaalin kokonaissärökerroin THD (Total Harmonic Distortion) kertoo perusaaltoa isompien taajuuksien kokonaismäärän, ja se voidaan helposti laskea neliösummana suhteellisista yliaalloista eli särökertoimista [2]. Funktion F särökerroin voidaan laskea yhtälön 10 avulla

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{F_n}{F}\right)^2} \quad (10)$$

jossa F = signaalin perustaajuuden tehollisarvon suuruus ja F_n = signaalin n :nnen yliaallon komponentti. Kokonaissärökerrointa voidaan käyttää yliaaltojen vertailuun ja sitä voidaan myös verrata standardien antamiin arvoihin.

Yliaallot aiheuttavat myös häviöiden kasvua siirtoverkossa ja sähkölaitteissa. Siirtoverkossa häviöt kasvavat hitaasti taajuuden kasvaessa, lähes taajuuden neliöjuureen verrannollisesti. Häviöiden kasvun suurin merkitys on muuntajissa ja pyörivissä koneissa, koska virtayliaallot aiheuttavat pyörrevirtahäviöitä käämityksissä ja muuntajan rakenneosissa ja jänniteyliaallot puolestaan rautahäviöitä muuntajan sydämessä. Näiden vaikutuksesta voi kuormitettavuus alentua ja syntyä ylimääräistä lämpenemistä ja äänekkyyden kasvua. [5]

Yliaallot voivat myös häiritä tele- ja dataverkkoa kytkeytymällä niihin joko induktiivisesti, kapasitiivisesti, johtumalla tai sähkömagneettisen kentän välityksellä. Johtuminen on edellisistä suurin häiriöiden aiheuttaja. Yleensä tämä tapahtuu kaapelihyllyllä, jossa on tele- ja datakaapeleiden lähelle asennettuja voimakkaapeleita. [5]

5 YLIAALTOJA KOSKEVAT MÄÄRÄYKSET

Suomessa, niin kuin monissa muissakin Euroopan maissa, kansalliset standardit ja suositukset määrittelevät sähkön laadun. Standardit pohjautuvat pitkälti EN 50160-standardiin ja sen kansallisiin sovelluksiin. Sähkön laatuhäiriöiden poistamiseksi on kiinnitettävä huomiota myös virran laatuun, kuten ANSI- ja IEEE-standardeissa tehdäänkin. Eri laatutekijöille on annettu laatuluokkia, joita voidaan käyttää mittaustulosten arviointiin. Harmonisille jänniteylialloille, epäsymmetrialle ja nopeille jännitemuutoksille on tilastollisia arvoja, joiden rajoissa on yritettävä pysyä. /11/

Harmonisille yliaaltojännitteille määritellään standardin EN 50160 mukaan taulukkojen 3 ja 4 mukaiset laatuksiteerit ja jännitearvot. Taulukkojen 3 ja 4 arvot pätevät normaaleissa käyttöolosuhteissa siten, että 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräinen tehollisarvo on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 4 annettu arvo. Resonanssitilanteet saattavat aiheuttaa suurempia yliaaltojännitteitä yksittäisille yliaalloille. Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen, ottaen huomioon kaikki harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 saakka, tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. /4/

On kuitenkin syytä muistaa, etteivät kaikki laitteet kestä näin suurta kokonaissäröä. Yleisesti pienjänniteverkossa 5 %:n jännitesäröä voidaan pitää hyvän ja huonon laadun rajana.

Taulukko 3. Harmonisten yliaaltojännitteiden laatuksiteerit. /2/

| Jännitteen ominaisuus | Hyvä laatu (Sener) | Normaali laatu (Sener) | SFS-EN 50160:n mukainen laatu |
|-------------------------------|--|--|--|
| Harmoniset yliaaltojännitteet | $U_n \leq$ Taulukko 4 arvot ja $THD \leq 3 \%$ | $U_n \leq$ Taulukko 4 arvot ja $THD \leq 6 \%$ | $95 \% U_n \leq$ Taulukko 4 arvot ja $THD \leq 8 \%$ |

Taulukko 4. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittymiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina nimellisjännitteestä U_n /4/.

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

Huom! Järjestysluvultaan yli 25 harmoniselle ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

Suurimmat sallitut yliaaltovirrat esitetään suhteessa sähkökäyttäjille varattuun siirtokapasiteettiin referenssivirran I_{ref} perusteella. Pienjänniteverkkoon liittyneen sähkökäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittämiskohdassa ovat esitettynä taulukossa 5. /12/

Sulakepohjaisessa liittymässä referenssivirta on pääsulakkeen nimellisvirta. Liittymän ollessa tehopohjainen referenssivirta on liittymissopimuksen mukainen pätöteho, joka voidaan laskea yhtälön 11 avulla

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (11)$$

jossa P = liittymissopimuksen pätöteho ja U_n = verkon nimellisjännite. Mikäli tilaustehoa ei ole määritelty, käytetään pätötehoana yhtälössä 1,25-kertaista laskutustehoa (kW). Tällöin laskutusteho on keskimäärin noin 80 % liittymän koosta./12/

Taulukko 5. Suurimmat sallitut yliaaltovirtapitoisuudet. /12/

| Referenssivirta | Suositeltava raja | |
|----------------------------------|--|----------------------------------|
| $\leq 25 \text{ A}$ | Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita. | |
| $> 25\text{A} \dots 200\text{A}$ | Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta. | |
| $> 200\text{A}$ | Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta: | |
| | järjestysluku n | sallittu arvo referenssivirrasta |
| | <11 | 7,0 % |
| | 11–16 | 3,5 % |
| | 17–22 | 2,5 % |
| | 23–34 | 1,0 % |
| | >34 | 0,5 % |

Standardi määrittää raja-arvot taajuudelle, jännitteen vaihtelulle ja jakelujännitteen vaihtelun aiheuttamalle välkynnälle taulukkojen 6 - 8 mukaan. Taulukossa 8 P_{st} on lyhyen aikavälin välkyntähäiriökerroin ja P_{lt} on pitkän aikavälin välkyntähäiriökerroin.

Taulukko 6. Taajuuden laatukriteerit. /2/

| Jännitteen ominaisuus | Hyvä laatu (Sener) | Normaali laatu (Sener) | SFS-EN 50160:n mukainen laatu |
|----------------------------|--------------------|------------------------|---|
| Taajuus | 50 Hz \pm 1 % | 50 Hz \pm 1 % | 99,5 % välillä 50 Hz \pm 1 % kaikki välillä 50 Hz + 4 % / -6 % |
| Taajuus (erillisverkoissa) | | | 95 % välillä 50 Hz \pm 2 % kaikki välillä 50 Hz \pm 15 % |

Taulukko 7. Jännitteen laatuksiterit pienjännitteelle. /2/

| Jännitteen ominaisuus | Hyvä laatu (Sener) | Normaali laatu (Sener) | SFS-EN 50160:n mukainen laatu |
|---|---|-------------------------------|---|
| Jännitetason vaihtelu pj-verkko, $U_n = 230 \text{ V}$ | $U_n \pm 4 \%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5 \%$ | $U_n + 6 / -10\%$ | 95 % välillä $U_n \pm 10 \%$ kaikki välillä $U_n + 10 \% / -15 \%$ |

Taulukko 8. Välkynnän häiritsevyyssindeksin laatuksiterit. /2/

| Jännitteen ominaisuus | Hyvä laatu (Sener) | Normaali laatu (Sener) | SFS-EN 50160:n mukainen laatu |
|------------------------------|--|-------------------------------|---|
| Nopeat jännitemuutokset | $P_{st} \leq 1$ ja $P_{lt \text{ max}} \leq 0,74$ | $P_{lt \text{ max}} \leq 1$ | 95 % ajasta $P_{lt \text{ max}} \leq 1$ |

6 YLIAALTOJEN VÄHENTÄMINEN

6.1. Yliaaltojen huomioiminen suunnittelussa

Sähköverkkoa suunniteltaessa on usein hankala ennakoida yliaaltojen suuruutta. Tästä johtuen markkinoille on tullut erilaisia tietokoneohjelmistoja, joilla sähköverkkoa voidaan mallintaa virtuaalisesti. Mallinnuksen tarkoituksena on määrittää jo ennen suunnitelman toteutusta mahdolliset yliaaltojen aiheuttamat ongelmat ja miten niiltä voitaisiin välttyä.

Mallinnus tapahtuu siten, että sähköverkosta luodaan sijaiskytkentä, jossa jokainen verkon komponentti on esitetty virtuaalisessa sähköverkossa riittävällä tarkkuudella. Mallinnuksen jälkeen voidaan ohjelman avulla suorittaa eri kuormitustilanteita ja mm. laskea näiden aiheuttamat yliaaltojen suuruudet. Laskelmien tarkkuus riippuu siitä, miten hyvin analyysin suorittaja on onnistunut mallintamaan tarkasteltavan verkon ja ennen kaikkea komponenttien taajuusriippuvuuden /7/.

Lisäksi suunnittelussa on huomioitava kolmannen yliaallon haitallinen vaikutus nollajohtimeen. Nollajohtimen mitoituksen huolellinen suunnittelu on erityisen tärkeää, jos syöttöön on kytketty paljon kolmannen yliaallon lähteitä, kuten tietokoneita. Nollajohtimen mitoituksen apuna voidaan käyttää standardia SFS 6000, jossa kerrotaan ne poikkeukset, milloin nollajohtimen poikkipinta-ala voi olla pienempi kuin vaihejohtimen:

”Nollajohtimen poikkipinnan on oltava seuraavissa tapauksissa vähintään yhtä suuri kuin vaihejohtimen:

- *yksivaihepiirissä johtimen poikkipinnasta riippumatta*
- *monivaihepiirissä, kun vaihejohtimen poikkipinta on enintään 16 mm² kuparia tai 25 mm² alumiinia.*

Monivaihepiirissä, joissa kaikkien vaihejohtimien poikkipinta on suurempi kuin 16 mm² kuparia tai 25 mm² alumiinia, nollajohtimen poikkipinta saa olla pienempi kuin vaihejohtimen. Seuraavien ehtojen pitää kuitenkin samanaikaisesti täytyä:

- *suurin nollajohtimessa normaalitilanteessa esiintyvä virta (mukaan lukien mahdollisten harmonisten yliaaltojen aiheuttama virta), ei ole suurempi kuin pienennetyin nollajohtimen kuormitettavuus*

- *nollajohdin on ylivirtasuojattu*
- *nollajohtimen poikkipinta on vähintään 16 mm² kuparia tai 25 mm² alumiinia.”*

/13/

6.2. Yliaaltojen hallinta

Yleisesti yliaaltojen hallintaan on olemassa kolme keskeisintä menetelmää, joilla niiden vaikutusta voidaan pienentää:

- ylimitoittamalla verkkoa,
- vähentämällä niiden syntyä ja
- suodattamalla.

6.2.1. Sähköverkon ylimitoittaminen ja yliaallot

Ylimitoittaminen on ollut perinteinen tapa hallita yliaaltoja. Ylimitoitusta voidaan käyttää, mikäli sähköverkossa esiintyy etenkin kolmatta yliaaltoa. Tällöin nollajohdinta voidaan tietyissä tilanteissa suurentaa, jopa suuremmaksi kuin mitä vaihejohdin on. Esimerkkinä voidaan pitää amerikkalaisen CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association) suositusta kolmannen yliaallon aiheuttamien tulipalojen hallintaan. Suosituksessa sanotaan, että nollajohtimen poikkipinnan tulisi olla vähintään 1.73 kertaa vaihejohtimen poikkipinta /14/. Normaalistihan nollajohtimen poikkipinta on vain 50 % vaihejohtimen poikkipinnasta. On kuitenkin muistettava, ettei ylimitoittaminen poista sähköverkosta yliaaltoja, vaan ylimitoitettu osa kestää niitä paremmin. Tästä syystä on ennen verkon ylimitoitusta syytä tarkastella, voitaisiinko yliaalloilta muuten välttyä ja onko se taloudellisesti kannattavaa.

6.2.2. Yliaaltojen syntymisen vähentäminen

Taajuusmuuttajat ja erilaiset suuntaajat tuottavat huomattavasti yliaaltoja. Suuntaajien oikealla valinnalla voi olla yliaaltojen syntyä pienentävä vaikutus. Mikäli suuntaajasta halutaan mahdollisimman vähän yliaaltoja tuottava, tällöin suuntaajan pulssiluvun on oltava mahdollisimman suuri, esim. valitsemalla 12 pulssisuuntaaja 6 pulssisuun-

taajan tilalle. Tämän seurauksena suuntaajan hinta kuitenkin nousee monimutkaisemmasta ja suuremmasta rakenteesta johtuen.

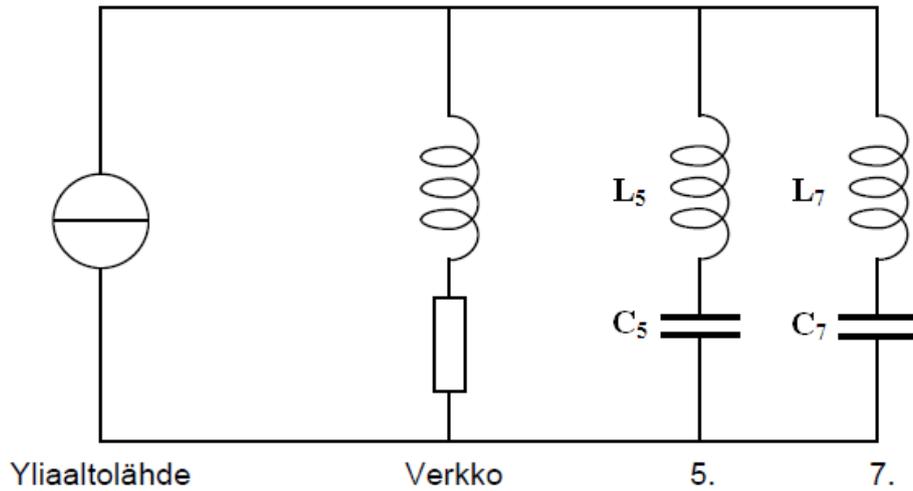
6.3. Yliaaltojen suodattaminen

Yliaaltojen pienentämiseksi on olemassa laitteita, joilla voidaan pienentää yliaaltojen suuruutta. Useimmiten suodatukseen käytetään passiivisuodattimia, mutta aktiivisuodattimet yleistyvät koko ajan. Kolmannen yliaallon suodattamiseen ei ole aikaisemmin ollut mitään järkevää menetelmää, mutta nykyisin tähänkin on saatavilla oma suodattimensa.

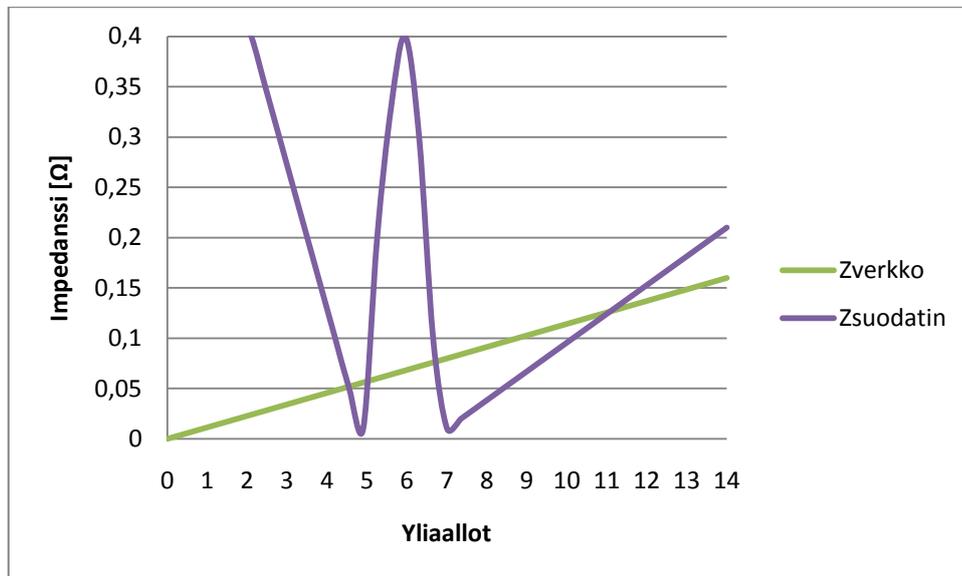
Suodattimet kytketään yliaaltoja syöttävän laitteiston läheisyyteen. Toinen vaihtoehto on asentaa suodatin suoraan keskijänniteverkkoon /15/.

6.3.1. Passiivisuodattimet ja imupiirit

Passiiviset LC-suodattimet ja imupiirit ovat sarjaresonanssiipiirejä, jotka ovat viritettyjä yhdelle tai useammalle yliaaltotaajuudelle. Passiivisuodin koostuu sarjassa olevista LC-suotimista. Passiivisuodin on usein yhdistetty laajakaistaimupiiriin, joka poistaa korkeamman kertaluvun yliaallot. Toimiessaan ne muodostavat viritetylle yliaaltotaajuudelle pieni-impedanssisen sulkeutumisen, mahdollistaen yliaalloille verkon impedanssia pienempi-impedanssisen kulkureitin. Tavallisimpia imupiiritajuuksia ovat 5. ja 7. yliaalto. /5/ Kuvassa 5 on esitettyä 5. ja 7. yliaallon suodattavan kytkennän 1-vaiheinen virtalähdesijaiskytkentä ja kuvassa 6 niiden impedanssikäyrät.



Kuva 5. 5. ja 7. yliaallon suodattimen sijaistykentä.



Kuva 6. 5. ja 7. yliaallon suodattimen impedanssikäyrät.

Yliaaltosuodinta voidaan hyödyntää myös loistehon kompensointiin, koska suotimen impedanssi on perustaaajuudella kapasitiivinen. Tätä voidaankin käyttää osien mitoituksen lähtökohtana siten, että kondensaattorin tuottamalla loisteholla saavutetaan tahdottu kompensointitaso. Kondensaattorin valinnan jälkeen voidaan kuristimen inductanssi laskea helposti yhtälöstä 12

$$L = \frac{1}{(2 \cdot n \cdot \pi \cdot f_1)^2 \cdot C} \quad (12)$$

Yliaallot kohtaavat imupiirin yhtälön 13 mukaisen yliaaltoimpedanssin

$$Z_n = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L - \frac{1}{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot C} \quad (13)$$

Tällöin kondensaattorin kapasitanssi ja kuristimen induktanssi on valittu siten, että niiden muodostaman resonanssipiirin viritystaajuus on sama suodatettavan yliaallon kanssa. Impedanssin Z_n ollessa lähes nolla, ei harmonista jännitesäröä voi syntyä, koska

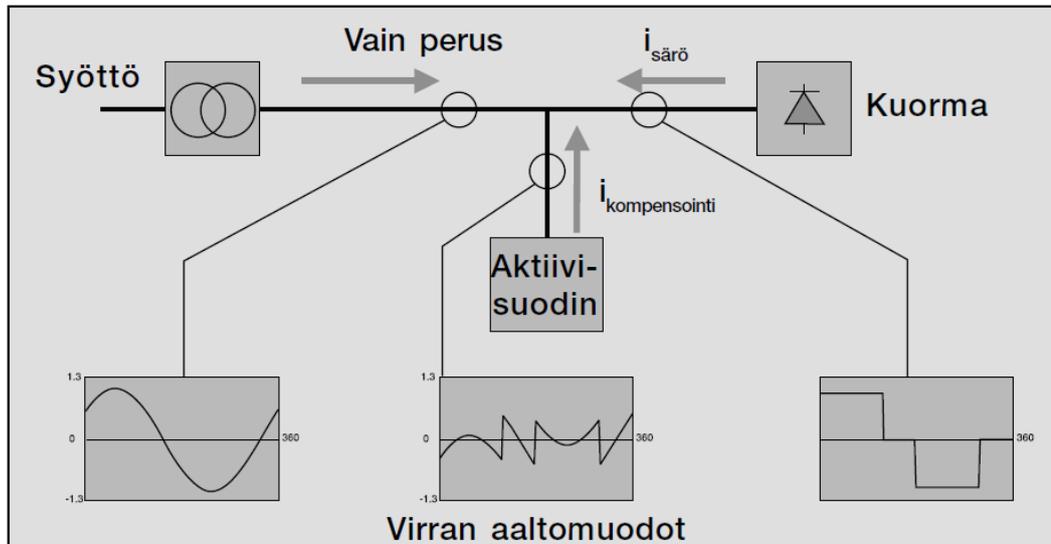
$$U_n = Z_n \cdot I_n = 0 \Omega \cdot I_n \approx 0 V \quad (14)$$

jossa $U_n = n$. yliaaltojännite.

Ennen suodattimen hankintaa tulee huomioida, etteivät ne suodata tehokkaasti taajuukseltaan vaihtelevia yliaaltoja ja, että suodatusominaisuudet ovat riippuvaisia verkon ja komponenttien ominaisuuksista. Lisäksi suodatin muodostaa viritetylle yliaaltotaajuudelle pieni-impedanssisen sulkeutumisen, jonka vuoksi alle 550 Hz:n yliaalloille on jokaiselle viritettävä oma suodattimensa. Tästä aiheutuu, että suodattimen koko kasvaa ja samalla sen tarvitsema tilantarve. Resonanssitilanteessa suodatin voi myös vahvistaa tietyn taajuisia yliaaltoja. Suodattimen tuottaessa enemmän loistehoa kuin mitä se kuluttaa, voi syntyä mahdollisia ylijännitetilanteita. /16/

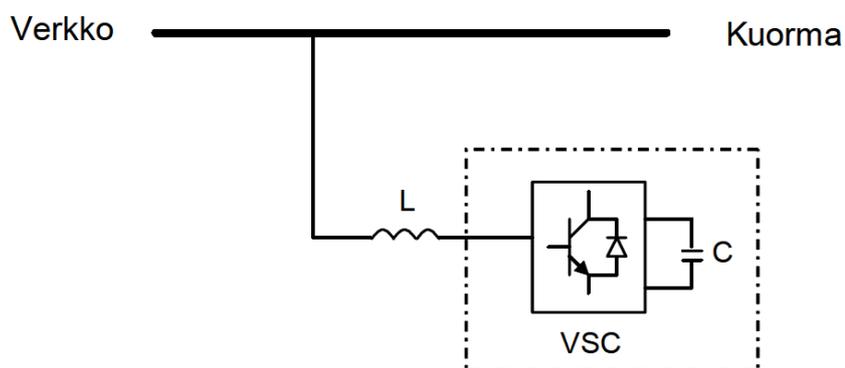
6.3.2. Aktiivisuodattimet

Aktiivisuotimia käytetään pääasiassa suurten epälineaaristen kuormien verkkoon aiheuttamien harmonisten aaltojen ja loistehon kontrollointiin /2/. Ne ovat tehokas, mutta kallis ratkaisu. Toimiessaan aktiivisuodin on virtalähteenä, joka syöttää verkkoon yliaaltojen vaikutuksen kumoavan virran kuvan 7 mukaisesti. Tästä seuraa, että kuormavirran yliaallot kumoutuvat ja verkkovirrasta tulee lähes sinimuotoinen.

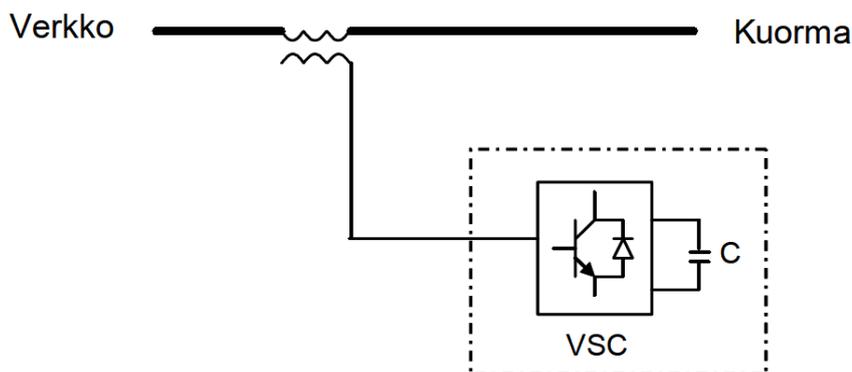


Kuva 7. Aktiivisuodattimen periaatekaavio. /10/

Aktiivisuotimen rakenteeseen ja ohjaukseen on esitetty lukuisia ratkaisuja. Aktiivisuotimena voidaan kolmivaiheverkossa käyttää vaihtosuuntaajaa kondensaattoriyksikön kanssa. Aktiivisuotimet voidaan jakaa DC- ja AC-suotimiin. Rinnankytketyn AC-suotimen tyypillisin versio VSC (Voltage Source Converter) pohjautuu jännitelähdemuuntimeen, joka koostuu DC-piirin kondensaattorista, tehoelektroniiikasta ja kuristimesta, kuten kuvasta 8 selviää. Sarjaan kytketty aktiivisuodin on puolestaan liitetty linjaa syöttävän muuntajan kanssa sarjaan kuvan 9 mukaisesti. /2/



Kuva 8. Rinnankytketyn aktiivisuotimen kokoonpano. /2/



Kuva 9. Sarjaan kytketyn aktiivisuotimen kokoonpano. /2/

6.3.3. Kolmannen yliaallon suodatin

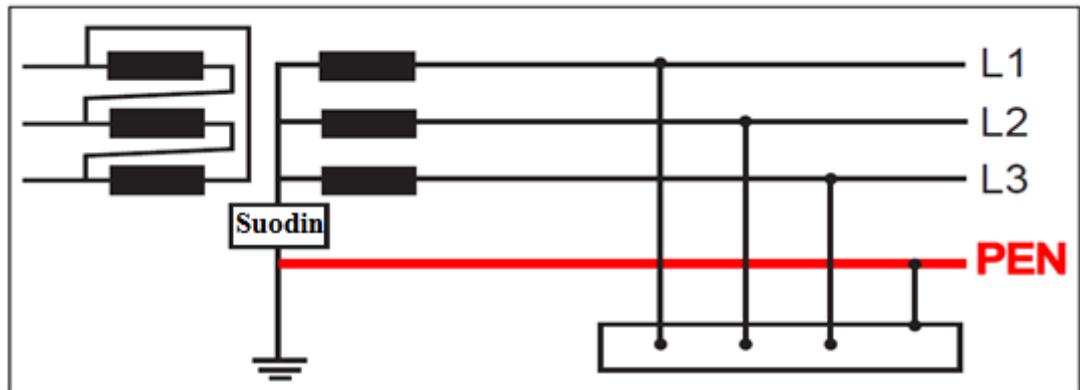
Kolmas yliaalto on suodatuksen kannalta hankalampi, koska sitä ei voida suodattaa tavallisilla imupiireillä, mikä johtuu siitä, että kolmas yliaaltovirta summautuu kolmi-vaihejärjestelmän nollajohtimeen.

Suodatettaessa kolmatta yliaaltoa voidaan suodattamiseen käyttää nollajohtimeen asennettavaa suodatinta. Tällöin suodin on rinnakkaisresonanssiipiiri, mikä estää kolmannen yliaaltovirran kulun nolla- ja vaihejohtimissa. /15/ Tämä saadaan aikaan vi-rittämällä rinnankytketty induktanssi ja kapasitanssi resonanssiin kolmannelle yliaal- lolle, kuten passiivisuodin. Käyttämällä kolmannen yliaallon suodatinta varmistetaan, ettei nollajohtimeen pääse syntymään kolmatta yliaaltovirtaa eikä nollajohdinta näin ollen tarvitse ylimitoittaa.

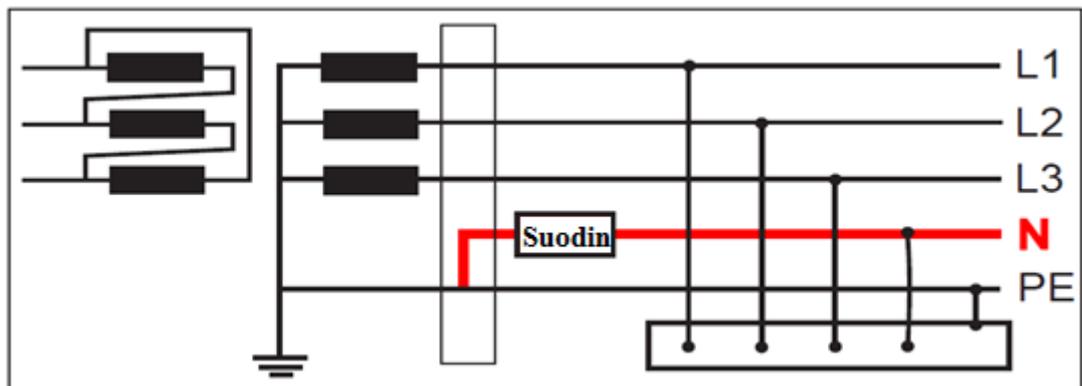
Esimerkkinä voidaan pitää ABB:n kehittämää THF-suodinta, josta ABB lupaa:

- THF suodattaa nollajohtimesta n. 95 % kolmannesta yliaallosta (150 Hz).
- Tulipaloriski pienentyy, kun nollajohdinta häiritsevä kuormitus poistuu.
- Muuntajien lämpötila laskee, jolloin myös elinikä kasvaa.
- Vaihejohtimien 150 Hz:n virta pienenee, jolloin tehonkulutus laskee jopa 4–10 %.
- Häiritsevät magneettikentät pienenevät jopa 80 %.
- Sähkön laatu paranee, kun kolmannen yliaallon aikaansaamat häiriöt poistuvat. /13/

Suodinta asennettaessa on huomioitava maadoitusjärjestelmän tyyppi. Suodatin on asennettava TNC-järjestelmään muuntajan tähtipisteen nollajohtimeen kuvan 10 mukaisesti. Harhavirran vuoksi suodatinta ei voi asentaa PEN-johtimeen TNC-järjestelmässä. TNS-järjestelmään suodin asennetaan suoraan nollajohtimeen kuvan 11 mukaisesti. Tällöin on huomioitava, etteivät suotimen jälkeisissä asennuksissa N ja PE ole yhdessä.



Kuva 10. Kolmannen yliaallon suotimen kytkentä TNC-järjestelmään.



Kuva 11. Kolmannen yliaallon suotimen kytkentä TNS-järjestelmään.

7 TUTKITTAVAN VERKON MALLINTAMINEN

Yksi opinnäytetyön haasteista oli rakentaa toimiva virtuaalinen verkkomalli Digsilent Power Factory -tietokoneohjelmaa käyttäen. Mallinnukseen käytettiin ns. tutkittavan verkon sähköverkkoa, joka pyrittiin mallintamaan mahdollisimman tarkasti lähinnä pääkeskustasolla. Simuloinnin tarkoitus oli pyrkiä selvittämään jännitteen alenemat, yliaallot, oikosulkuvirrat ja suojausten toimivuus.

7.1. Power Factory -simulointiohjelma

Power Factory on Saksassa kehitetty sähköverkkojen simulointi- ja laskentaohjelma. Se soveltuu sähkönsiirron, -jakelun ja -tuotannon simulointiin. Lisäksi sillä voidaan simuloida teollisuus-, rautatie-, tuulivoima- ja ns. älykkäitä sähköverkkoja.

Simuloinnin ensisijainen tarkoitus oli sähköjärjestelmän ongelmien ratkaisu eri kuormitustilanteissa. Ohjelman avulla voidaan simuloida minkä tahansa kolmen, kahden ja yhden vaiheen vaihto- tai tasasähköverkkoa. Simuloinnin avulla voidaan mm. laskea tehonjako, loistehon suuruus, oikosulku käyttäjän määrittelemällä tavalla useiden eri standardien mukaan, virtaharmoniset, verkon taajuusvaste ja moottoreiden käynnistys. /17/

Ohjelma sisältää laajan valikoiman valmiita verkkokomponentteja, joita käyttäjä voi muokata siten, että ne vastaavat haluttua verkkokomponenttia. Sillä voidaan myös mitoittaa kaapeleita ja suodattimia. Suodattimen mitoituksen jälkeen voidaan analysoida sen optimaalinen sijoittamispaikka. Ohjelmassa on myös liitännät paikkatietojärjestelmään (GIS) ja kaukokäyttöjärjestelmään (SCADA).

7.2. Simuloinnin suoritus

Työ alkoi ohjelman asentamisella ja siihen tutustumisella ohjelman sisältämien harjoitusverkkojen avulla. Harjoitusverkkoihin on lähinnä kuvattu suurjänniteverkkoja ja niihin kytkettyjä muuntajia. Tutkittava verkko oli pienjänniteverkko, joten suuren eroavaisuuden vuoksi ei näiden harjoittelu ollut mielekäästä.

Tutkittavan verkon simulointi alkoi verkkotietojen kokoamisella erilaisista kaavioista ja lähteistä. Tärkeimpiä ohjelmaan syötettyjä tietoja olivat syöttävän verkon oikosul-

kuvirta, muuntajan koko, kaapelityypit ja -pituudet ja arvioidut tehot. Kaapelipituudet arvioitiin AUTOCAD:llä arkkitehtikuvien ja aksonometrisen nousujohtokaavion perusteella, koska kaapelipituuksia ei ollut muuten saatavilla. Tästä syystä kaapelipituudet olivat ainoastaan suuntaa antavia. Oikosulkuvirran arvo saatiin Kuopion Energialta ja muut tiedot keskuskaavioiden avulla. Taajuusmuuttajakäyttöjen tehot ja niihin liitettyjen moottorien koot saatiin sähköurakoinnista vastanneelta yritykseltä. Tarvitavien verkkotietojen keräämisen jälkeen sähköverkko oli mahdollista piirtää tutkittavan verkon kaltaiseksi. Kuvassa 12 on esitettyä valikko, jolla voidaan luoda oma tutkittavaan verkkoon soveltuva verkkokomponentti.

Line Type - Equipment Type Library\AMCMK 3X70+35/16.TypLne

ANSI Short-Circuit | IEC 61363 | RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics | Protection

Optimization | State Estimator | Reliability | Description

Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Complete Short-Circuit

Name: AMCMK 3X70+35/16

Rated Voltage: 1 kV

Rated Current: 0,185 kA (in ground) | Rated Current (in air): 0,159 kA

Nominal Frequency: 50 Hz

Cable / OHL: Cable

System Type: AC | Phases: 3 | No. of Neutrals: 1

Parameters per Length 1,2-Sequence

Resistance R': 0,551 Ohm/km

Reactance X': 0,082 Ohm/km

Parameters per Length Zero Sequence

Resistance R0': 1,012 Ohm/km

Reactance X0': 0,2890265 Ohm/km

Parameters per Length, Neutral

Resistance Rn': 1,086 Ohm/km

Reactance Xn': 0,083 Ohm/km

Parameters per Length, Phase-Neutral Coupling

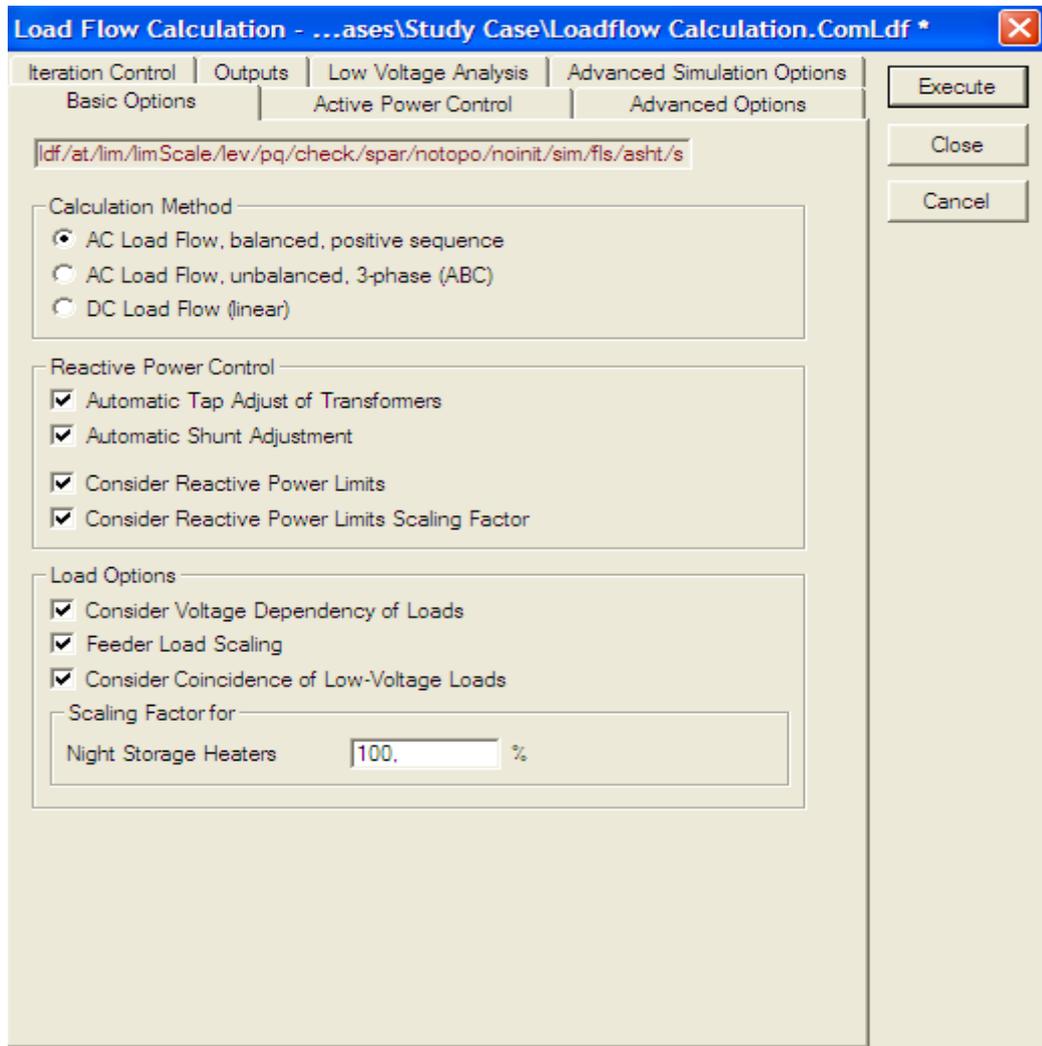
Resistance Rpn': 0 Ohm/km

Reactance Xpn': 0 Ohm/km

OK | Cancel

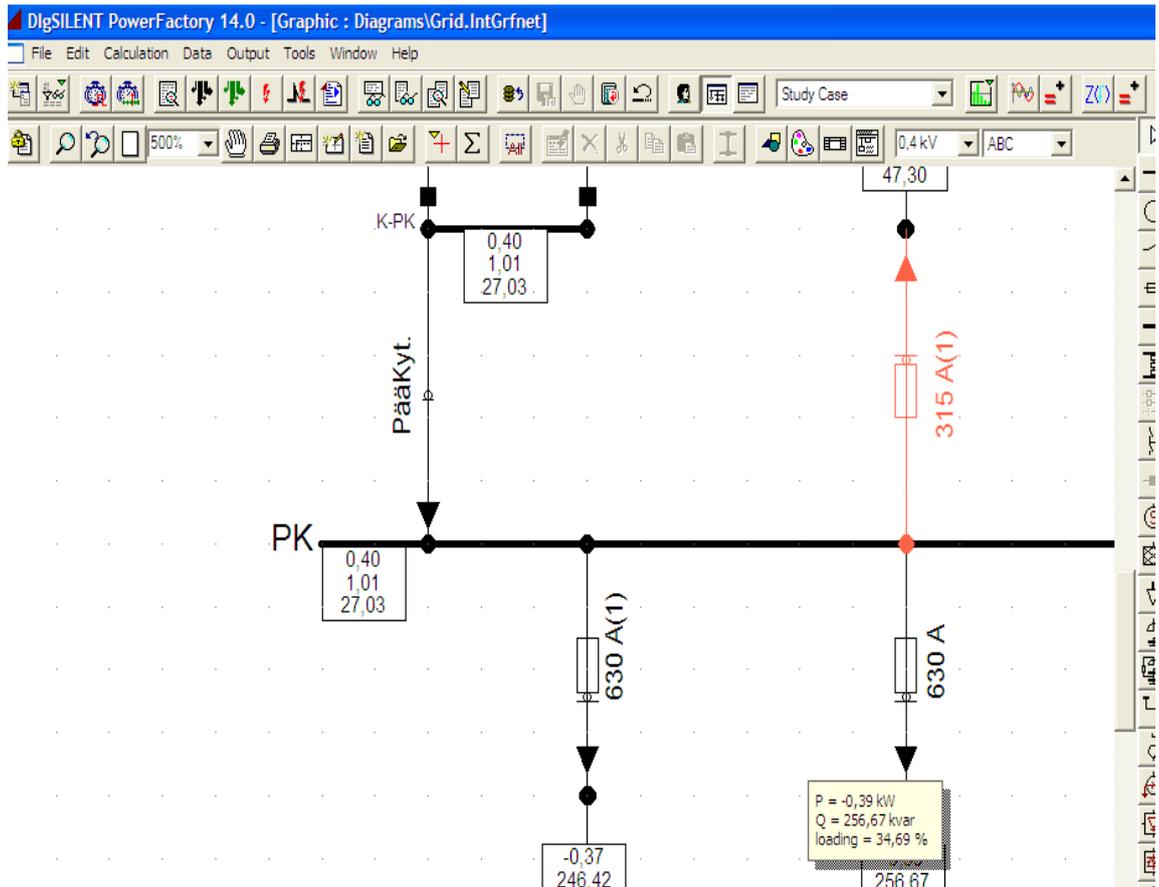
Kuva 12. Kaapelin rakentaminen Power Factory -ohjelmalla.

Virtuaaliverkon luomisen jälkeen laskenta aloitettiin tehonjaon laskennalla. Laskennan tuloksena saatiin tehot, jännitteet ja virrat verkon eri kohdista. Ohjelma laskee tehonjaon käyttäjän haluamalla tavalla kuvan 13 mukaan. Valittavissa on laskentamenetelmä, kuormituksen laatu, automaattisesti säädettävät parametrit yms.



Kuva 13. Tehonjaon laskennan määrittäminen.

Kuva 14 esittää simuloitun verkon estokelaparistojen syöttökaapelia, jossa on esillä päto- ja loisteho sekä kaapelin kuormitusaste. Laskennan tuloksia voidaan käyttää kuormitusten tarkasteluun ja suojausten toimivuuden määrittämiseen.



Kuva 14. Tehonjaon laskennan tuloksien esitys.

Tutkittava verkko sisältää paljon taajuusmuuttajakäyttöjä, minkä vuoksi näiden simulointi oli yksi mielenkiinnon kohteista. Ohjelman avulla taajuusmuuttajia syöttäviltä kiskostoilta oli mahdollista laskea virtayliaallot. Yliaallot voidaan määrittää ohjelmaan automaattisesti, esim. tasasuuntaaja antaa ideaalimäärän virtayliaaltoja. Toinen vaihtoehto on, että käyttäjä määrittää itse yliaaltojen suuruudet. Suuruudet voidaan määrittellä lähdöille ja vaihtosuuntaajille kuvan 15 mukaisella tavalla, jossa kullekin yliaaltokomponentille voidaan määrittellä suuruudet ja vaihekulmat.

Harmonic Sources - Library\Harmonic Sources.TypeHmccur

Name:

Balanced/Unbalanced Sources

Balanced

Unbalanced

OK

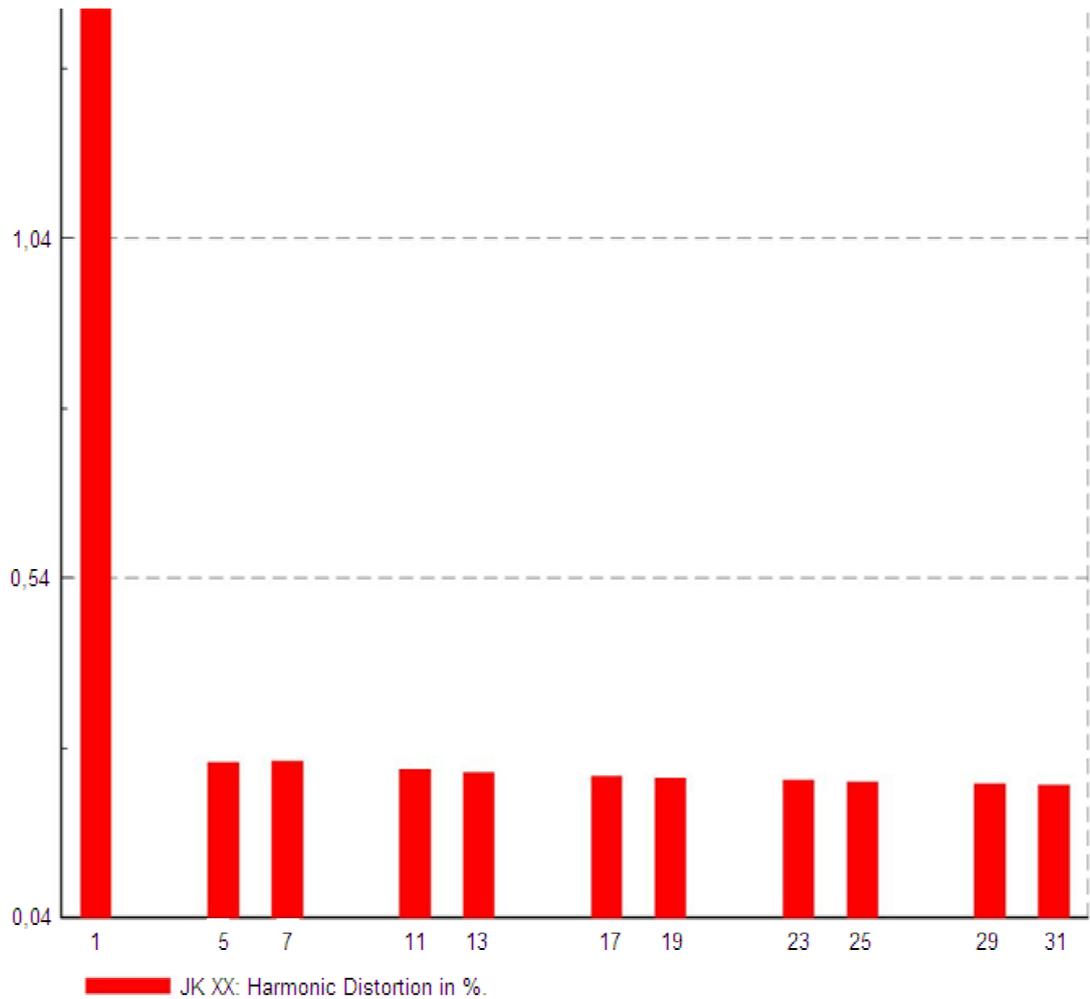
Cancel

Harmonics:

| | Harmonic Order | Ia_h/Ia_1 % | Ib_h/Ib_1 % | Ic_h/Ic_1 % | phiA_h-phiA_1 deg | phiB_h-phiB_1 deg | phiC_h-phiC_1 deg |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ▶ 1 | 1. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| 2 | 3. | 40. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| 3 | 5. | 30. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| 4 | 7. | 20. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |
| 5 | 9. | 10. | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. |

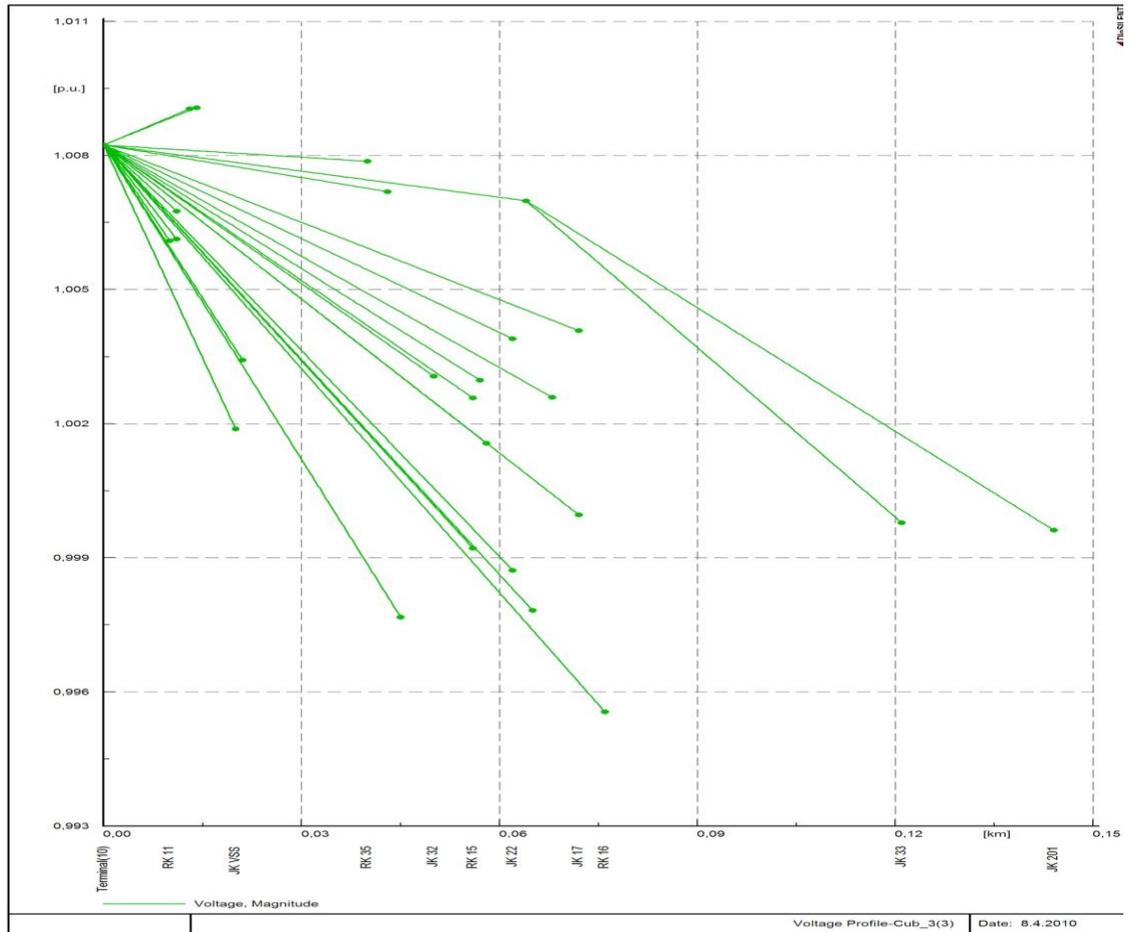
Kuva 15. Yliaaltojen määrittely ohjelmalla.

Yliaallot lasketaan valitsemalla haluttu komponentti, ja avautuvaan valikkoon voidaan määrittellä, mitä halutaan laskea. Taajuusmuuttajakäyttöjen virtayliaaltospektri on esillä kuvassa 16, josta selviää odotetusti, että se sisältää 5., 7. jne. yliaaltoja.



Kuva 16. Taajuusmuuttajakäytön yliaaltospektri.

Oikosulkuvirran arvot verkon eri kohdissa on mahdollista laskea valitsemalla oikosulun tyyppi, kesto ja mahdollisen vikaimpedanssin suuruus. Laskentatulokset saadaan joko yksittäiseen pisteeseen tai koskemaan koko verkkoa. Jännitteenaleneman ohjelma laskee lähtien käyttäjän määrittämästä pisteestä. Kuvassa 17 on esillä kuvaaja jännitteen alenemista pääkeskuksen pääkytkimen ja ryhmä- ja jakokeskusten välillä.



Kuva 17. Jännitteen alenemakuvaaja pääkeskukselta.

Kuvan x-akselilla on kaapelipituus ja y-akselilla jännitteen arvo prosentteina jakelu-jännitteen (400 V) arvosta. Kuvasta selviää, että jännitteen aleneman suurin arvo on RK 16 -keskuksella. Estokelaparistoilla jännite nousee suuremmaksi kuin pääkytkimellä. Jännitteen alenemaan vaikuttaa keskuksen kuormitus, joten tarkan kuvan saamiseksi pitäisivät kuormitukset tietää tarkasti. Tässä simuloinnissa kuormitukset olivat keskuskohtaisia huippukuormituksia eivätkä ne välttämättä edusta normaalia kuormitusta.

7.3. Simuloinnin lopputulokset

Harjoittelun jälkeen Power Factory osoittautui suhteellisen helppokäyttöiseksi ja kattavaksi laskenta- ja simulointiohjelmaksi. Ohjelmasta on mahdollista saada nopeasti tuloksia, mikäli simuloitavasta verkosta on hyvät pohjatiedot olemassa jo alussa.

Ohjelmaa olisi kiinnostavaa kokeilla keski- ja suurjänniteverkkojen laskentaan, koska siihen ohjelmassa on paljon helppokäyttöisiä komentoja. Teollisuusverkkojen simulointi olisi myös mielenkiintoista, koska ne sisältävät paljon moottorikäyttöjä ja oikosulkuvirran arvot ovat suuria. Ohjelman avulla näitä olisi helppo simuloida ja samalla arvioida verkon käyttäytymistä eri kuormitustilanteilla.

Ohjelman haittapuolia on, ettei siinä ei ole taajuusmuuttajia suoraan valittavana, vaan ne on rakennettava erikseen. Lisäksi ohjelma on aluksi hankalakäyttöinen ja mukana olevat käyttöohjeet eivät anna riittävästi tietoa eri tilanteiden simulointimahdollisuuksista.

Tutkittavan verkon simulointiin ohjelman kaikkia mahdollisuuksia ei päästy hyödyntämään, johtuen ohjelman käytön haasteellisuudesta ja hankalasti saatavista verkkotiedoista. Lopputuloksesta olisi saanut paremman, jos kaikista ryhmistä olisi ollut saatavilla tiedot kuormituksista ja näihin kytketyistä laitteistoista.

Tutkittavan verkon simulointi onnistui halutulla tavalla, vaikkakin täydelliseen verkkomalliin ei aivan päästy. Lähimmäksi yhtenäisiä tuloksia päästiin oikosulkuvirtojen laskennassa, jossa tulokset ovat samaa luokkaa simuloinnilla ja käsin laskemalla. Jännitteen alenema laskelmat ovat suuntaa antavia. Simuloitu yliaaltosisältö oli ohjelmalla laskettuna pienempi, kuin mitä mittaamalla saadut tulokset. Tämä johtuu siitä, että ohjelmaan ei huomioitu muita yliaaltojen tuottajia kuin ilmastointikoneikkojen taajuusmuuttajakäytöt.

Liitteessä 1 on esitetty verkkomallin avulla saatuja tuloksia siinä määrin, mitä tutkittavan verkon haltija on antanut niitä esittää. Lopuksi voidaan sanoa, että Power Factory -tietokoneohjelma on riittävän harjoittelun jälkeen todella monipuolinen ja hyvä simulointiohjelma, vaikkakin sen ominaisuudet soveltuvat paremmin suurjänniteverkon laskentaan.

8 TUTKITTAVAN VERKON NYKYTILA

Mittausten tarkoituksena oli selvittää tutkittavan verkon sähkön laatua ja sen sisältämiä yliaaltoja. Yrityksen sähköverkko koostuu yhdestä 800 kVA:n muuntajasta, joka syöttää pääkeskusta. Pääkeskukseen on kytketty kaksi 6-portaista estokelaparistoa (250 kVAr ja 240 kVAr) ja useita ilmastointi- ja prosessikeskuksia.

8.1. Sähköverkon laskenta

Kiinteistön päämuuntaja on Oy Strömberg Ab:n valmistama, jonka kilpitiedot ovat esitettyinä taulukkoon 9.

Taulukko 9. Jakelumuuntajan tekniset arvot.

| Valmistaja | Oy Strömberg Ab |
|----------------|------------------------------|
| Ensiöjännite | 20,5 kV $\pm 2 \times 2,5\%$ |
| Toisiojännite | 0,4 kV $\pm 2 \times 2,5\%$ |
| Kytkentäryhmä | Dyn11 |
| Valmistusvuosi | 1972 |
| S_n | 800 kVA |
| P_o | 1200 W |
| P_k | 8500 W |
| Z_k | 5,5 % |
| Z_o | 5,7 % |
| I_o | 0,5 % |

Päämuuntajan kilpitietojen perusteella voidaan laskea muuntajan oikosulkuteho (S_{km}) käyttäen yhtälöä 15

$$S_{km} = \frac{100}{z_k(\%)} \cdot S_n = \frac{100}{5,5\%} \cdot 800 \cdot 10^3 VA \approx 14,55 MVA$$

(15)

jossa z_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi ja S_n = muuntajan nimellisteho. Seuraavaksi voidaan laskea kiskoston oikosulkuteho, kun tiedetään oikosulkuvirran arvo liittymäpisteessä. Kuopion Energialta saatu liittymäpisteen (20 kV) 3-

vaiheisen oikosulkuvirran arvo on $I_{k3} = 4200$ A. Tällöin liittymän oikosulkuteho (S_{kl}) saadaan yhtälöstä 16

$$S_{kl} = \sqrt{3} \cdot I_{k3} \cdot U_{nl} = \sqrt{3} \cdot 4200 \text{ A} \cdot 20 \cdot 10^3 \text{ V} \approx 145,5 \text{ MVA} \quad (16)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea liittymän kokonaisuikosulkuteho sarjaankytkettyjen oikosulkutehojen avulla yhtälöstä 17

$$S_k = \frac{S_{kl} \cdot S_{km}}{S_{kl} + S_{km}} = \frac{145,5 \cdot 14,55}{145,5 + 14,55} \text{ MVA} \approx 13,2 \text{ MVA} \quad (17)$$

Tästä saadaan tulokseksi, että liittymän oikosulkuteho vaihtelee arvojen $\approx 13 - 15$ MVA välillä. Arvoja vastaavat resonanssitaajuudet voidaan laskea yhtälöllä 9. Mahdollinen resonanssitaajuus on taulukossa 10 laskettuna kompensointiportaiden mukaan.

Taulukko 10. Lasketut mahdolliset resonanssitilanteet, mikäli tutkittavan verkon kompensointiin käytettäisiin pelkkiä kondensaattoreita.

| Q [kVAr] | S_{kmin} | | S_{kmax} | |
|-------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | f_r [Hz] | n [f_r/f_n] | f_r [Hz] | n [f_r/f_n] |
| 40 | 909,1 | 18,2 | 953,5 | 19,1 |
| 80 | 642,8 | 12,9 | 674,2 | 13,5 |
| 120 | 524,9 | 10,5 | 550,5 | 11,0 |
| 160 | 454,6 | 9,1 | 476,7 | 9,5 |
| 200 | 406,6 | 8,1 | 426,4 | 8,5 |
| 240 | 371,1 | 7,4 | 389,2 | 7,8 |
| 282 | 342,6 | 6,9 | 359,3 | 7,2 |
| 323 | 319,8 | 6,4 | 335,4 | 6,7 |
| 365 | 301,0 | 6,0 | 315,6 | 6,3 |
| 407 | 285,1 | 5,7 | 299,0 | 6,0 |
| 448 | 271,5 | 5,4 | 284,8 | 5,7 |
| 490 | 259,7 | 5,2 | 272,4 | 5,4 |

Mahdollinen resonanssitaajuus taulukon 5 mukaan on 11. ja 13. harmoninen, jotka osuvat aivan kompensointiportaiden alkupäähän, mutta myös 7. osuu lähelle reso-

nanssitaajuutta. 13:n ja 11:n yliaallon aiheuttama resonanssi voisi olla mahdollinen, koska kompensointiteho on tällä hetkellä lähes aina 80-120 kVAr kohdalla. Käytössä oleva estokelaparisto kuitenkin estää resonoinnin, koska sen viritystaajuus on 189 Hz. Viritystaajuuden yläpuolella paristo on induktiivinen, joten se ei voi vahvistaa tyypillisimpiä yliaaltotaajuuksia, kuten seitsemättä tai yhdeksäntoista jne. /18/.

8.2. Mittaustulosten arviointi

Tutkittavaan verkkoon suoritettiin seitsemän erilaista mittausta. Mittalaitteistona käytettiin Mavowatt 70-verkkoanalysointia. Mittauksien pääpaino oli yliaaltomittauksilla, mutta koska analysointilaitteella pystyi samaan aikaan mittaamaan paljon muutakin, mitattiin mm. myös välkyntää, ylijännitetilanteita ja yleistä sähkön laatua. Lisäksi erillisenä mittauksena suoritettiin maadoitusjärjestelmän virta- ja virtayliaaltomittaus.

8.2.1. Sähkön laatu-analyysi

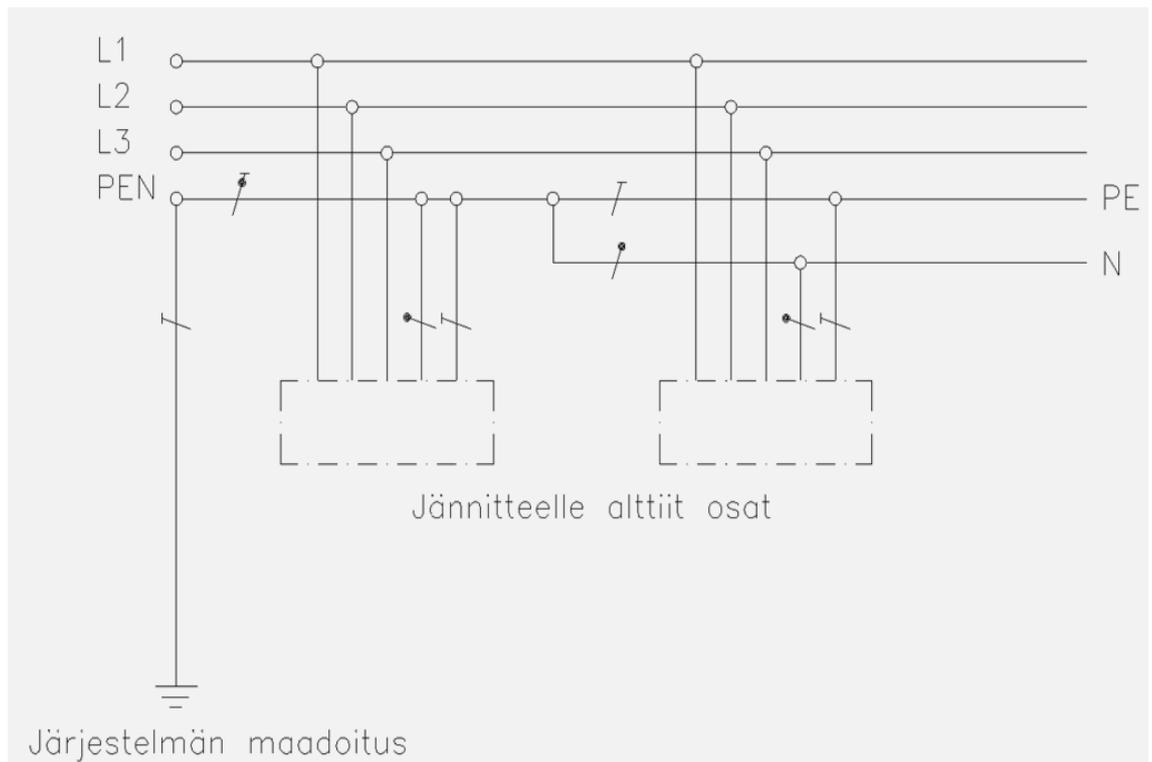
Sähkön laatu-analyysia tehtiin tammi- ja helmikuun (2010) aikana. Mittaukset suoritettiin käyttäen hyväksi syöttökaapeleita pääkeskuksella. Mitattavat kohteet valittiin mahdollisten yliaaltojen tuottajien mukaan siten, että mitattiin lähtöjä, joissa on eniten yliaaltojen tuottajia. Mittaukset aloitettiin pääkeskuksen syötöstä, jonka jälkeen mittauksia suoritettiin estokelaparistoilla, valaistus- ja pistorasialähdöillä ja ilmastointikoneikoilla.

Mittauksilla saadut tiedot osoittavat, että verkko on yliaaltojännitteiden ja muidenkin mitattujen arvojen osalta standardin rajojen sisällä. Mittauksissa löytyi pieniä hetkelisiä ylijännitetilanteita, mutta koska viat eivät olleet suuria, eikä säännöllisiä, ei aiheudu mitään erityistoimenpiteitä. Mittaustuloksissa virta on odotetusti ilmastointikoneikkojen syötöissä säröytynyttä, mutta edelleen raja-arvojen sisällä. Yliaaltopitoisuudet ovat selvästi raja-arvojen hyvän laadun sisällä. Jännitteen kokonaissärökertoimen suurin arvo (THD) oli noin 2,6 % luokkaa, joka sekin on hyvä.

Yhteenvedon voidaan sanoa, että sähkön laatu on standardin SFS-EN 50160 sisällä, eikä aiheuta toimenpiteitä verkon muutoksille. Liitteessä 2 ovat mittaustulokset mitatuista kohteista, sekä tulokset ja selitykset, ovatko mittaustulokset raja-arvojen sisällä.

8.2.2. Maadoitusjärjestelmän mittauss

Viimeisenä mittauksena oli maadoitusjärjestelmän mittauss, joka toteutettiin pääkeskushuoneessa sijainneella pääpotentialintasauskiskostolla. Tutkittavan verkon maadoitusjärjestelmänä on käytössä TN-C-S-järjestelmä. TN-C-S-järjestelmä ei ole puhdas neli- eikä viisijohdinjärjestelmä. TN-C-S-järjestelmässä nolla- ja suojamaadoitusjohdintoiminnot on yhdistetty yhteen osassa järjestelmää kuvan 18 mukaisesti.



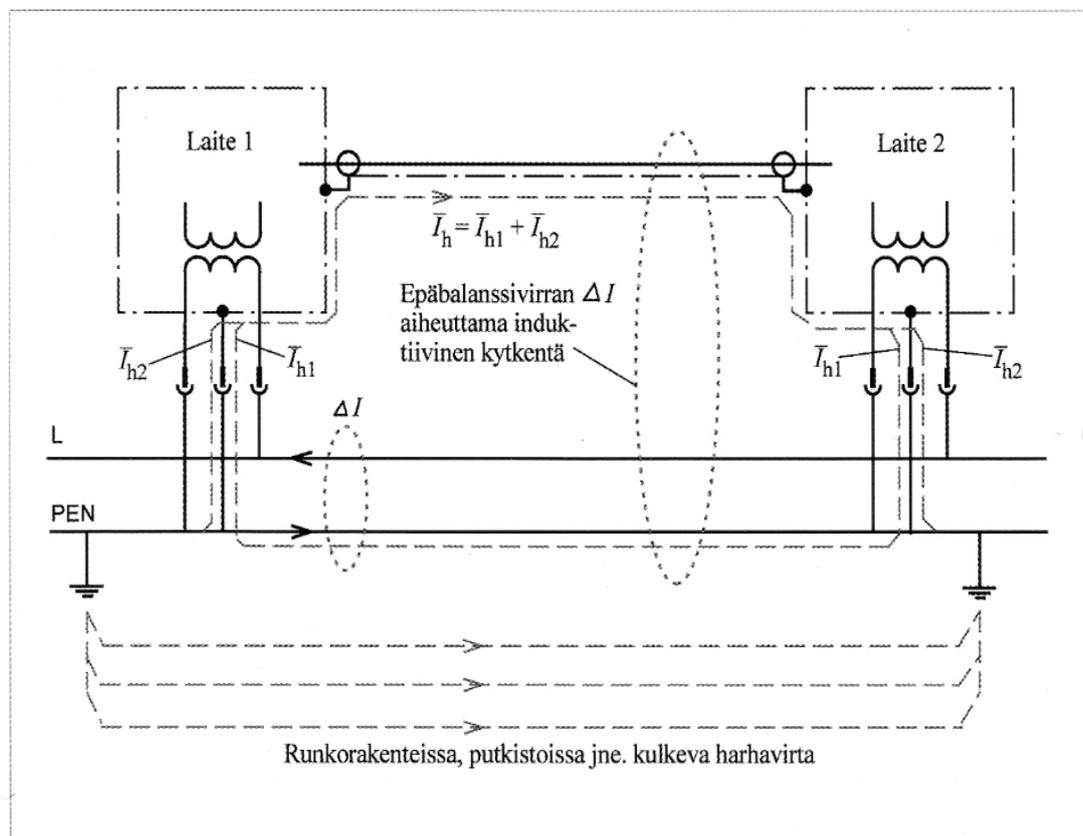
Kuva 18. TN-C-S-järjestelmä.

TN-C-S-järjestelmään kytketyt elektroniikkaa sisältävät laitteistot tuottavat usein häiriöitä, koska niissä käytetään osittain tai kauttaaltaan suojamaadoittamiseen PEN-johtimia. Järjestelmän häiriöt voivat syntyä kahdella tavalla, joko johtumalla (galvaanisesti) tai induktiivisen kytkennän välityksellä.

Johtumalla syntyvä häiriö muodostuu, kun PEN-johtimessa kulkevalle kuormitusvirralle kytketty rinnakkainen virtatie suojamaadoitettujen laitteiden runko-osien ja niihin yhdistettyjen signaalijohtojen välityksellä. Häiriötilanne on pahin, kun signaali-

johtona on käytössä koaksiaalikaapeli, jonka ulkojohdin on yhdistetty laitteen runkoon.

Induktiivinen kytkentä puolestaan muodostuu, kun PEN-johdin on yhdistetty muuntajan tähtipisteessä tehdyn maadoituksen lisäksi useasta kohdasta maahan. Tällöin osa kuormitusvirrasta pääsee kulkemaan putkistojen, kaapelihyllyjen yms. kautta. Tämän vaikutuksena pää- ja ryhmäjohtoihin muodostuu virtojen epäbalanssi, joka indusoi häiriöitä signaalivirtapiireihin. /19/ Kuva 19 esittää häiriön syntymisen periaatteen TN-C-S-järjestelmässä.

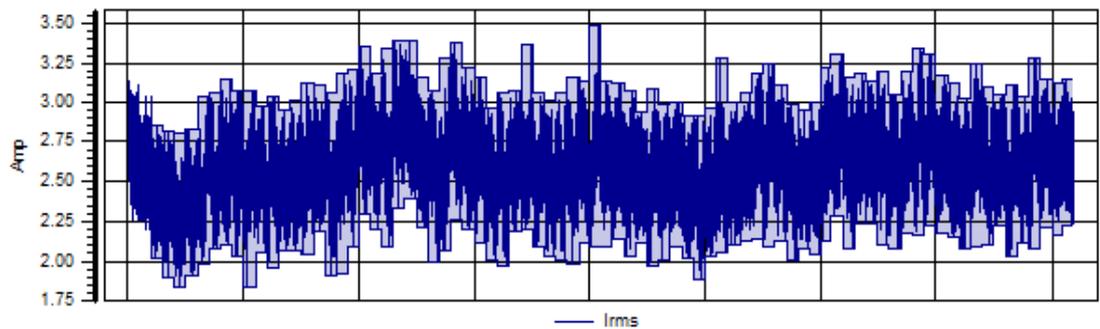


Kuva 19. Häiriön syntyminen TN-C-S-järjestelmään kahden laitteen väliseen koaksiaalikaapeliyhteyteen. I_{h1} on ryhmäjohtoon epäbalanssivirran ΔI indusoima häiriövirta, I_{h2} on johtumalla kytketty osa PEN-johtimessa kulkevasta kuormitusvirrasta. /19/

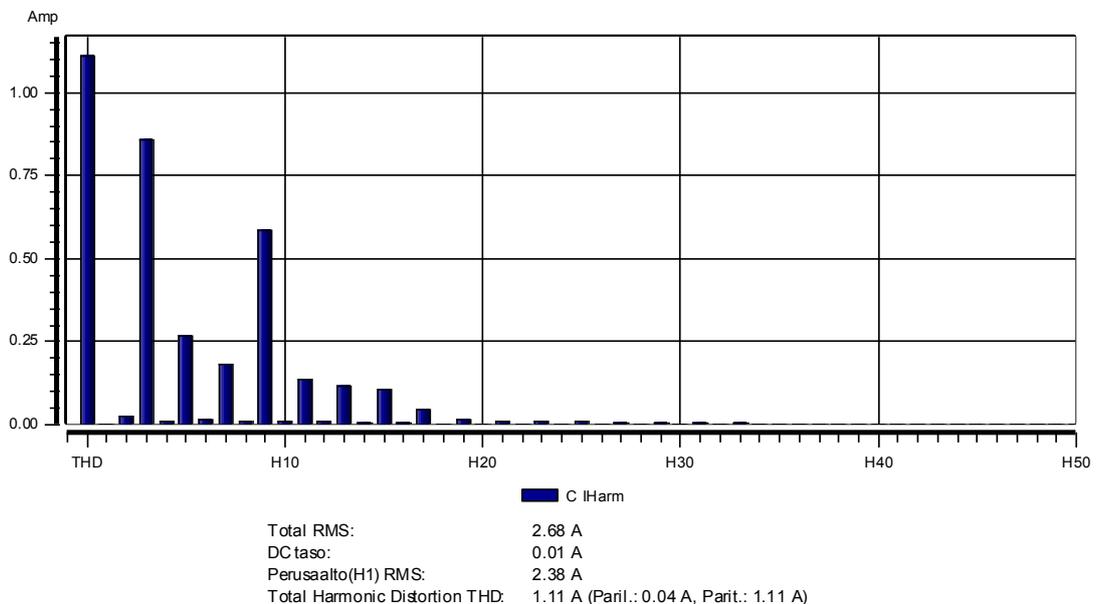
Maadoitusmittauksen kohteet valittiin mittaamalla potentiaalintasauskiskostolta pih-tiampeerimittarilla virrat ja valitsemalla tulosten perusteella johtimet, joissa kulki poikkipinta-alaan nähden suurin virta. Mittalaitteena käytettiin tässäkin mittauksessa Mavowatt 70-verkkoanalysointia. Mittaus suoritettiin yhden päivän mittaisena mit-

tauksena siten, että mittaukseen kuului tutkittavan verkon pienimmän ja suurimman kuormituksen ajankohta.

Mittaustulokset osoittivat, että suurin maadoitusjohtimen virta kulki kaapelihyllyjen maadoitusjohtimessa, joka oli poikkipinnaltaan 16 mm²:n kuparia. Kaapelihyllyjen maadoitusjohtimen virta ja sen harmoniset vaihtelivat mittausten aikana kuvien 20 ja 21 mukaisesti.



Kuva 20. Kaapelihyllyjen maadoitusjohtimen virrankuvaaja.



Kuva 21. Kaapelihyllyjen maadoitusjohtimen mitatut virtaharmonisten suuruudet.

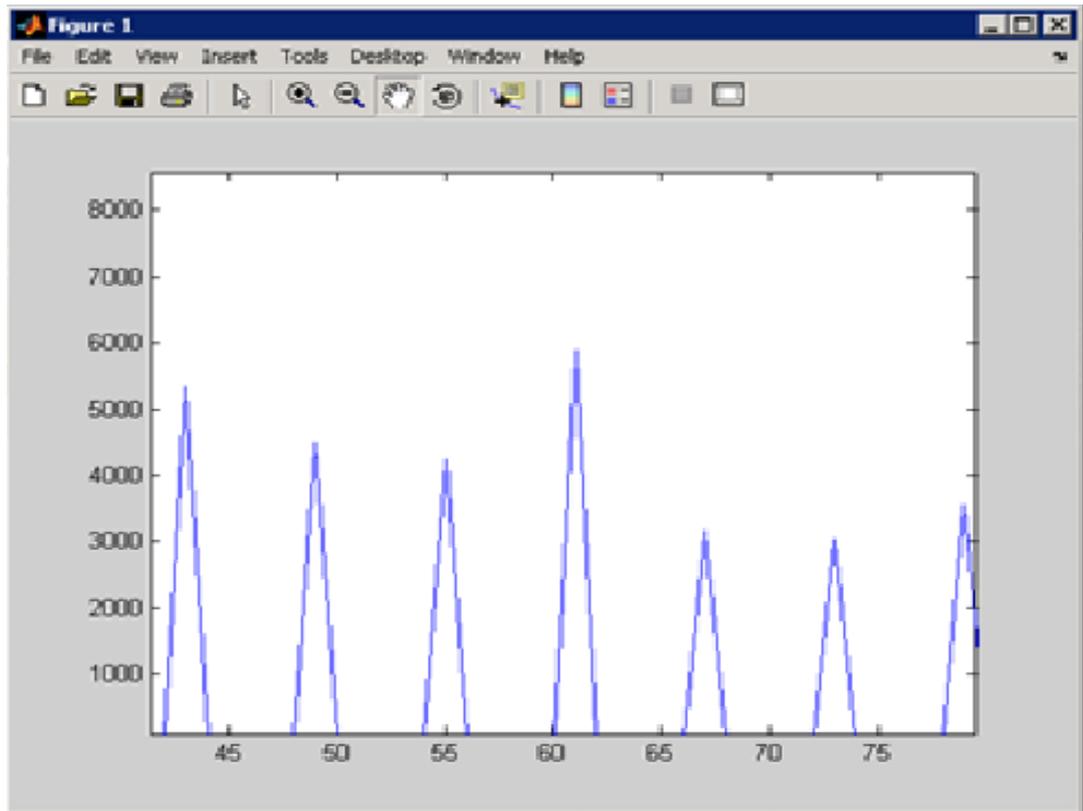
Virran kulkeminen maadoitusjärjestelmässä näyttää muodostuvan TN-C-järjestelmään kytkettyjen laitteiden induktiivisen kytkennän välityksellä. Virrat eivät ole kuitenkaan niin suuria, että näiden perusteella olisi syytä tehdä muutoksia maadoitusverkkoon. Kaapelihyllyillä kulkeva virta voi kuitenkin aiheuttaa niillä kulkeville signaalikaapeleille häiriöitä. Maadoitusjohtimien kuormitettavuus kestää mittauksissa esiintyneen virran, eikä sitä ole syytä suurentaa. Liitteessä 2.5. on esitetty maadoitusverkon mittaustulokset.

8.3. Mittaustulosten simulointi

Mittaustuloksia oli tarkoitus simuloida käyttäen hyväksi Matlab-laskentaohjelmaa. Mittaustulosten simulointi on mahdollista, koska mittauslaitteistona käytetystä sähkön laatu-analyysaattorista on mahdollista saada hetkellistä mittaussignaalia suurella tarkkuudella. Analyysaattorin antamia tuloksia on tarkasteltava kriittisesti, koska analyysaattorin laskentamenetelmää ei tiedetä eikä sitä myöskään ollut saatavilla. Matlabin menetelmä tiedetään.

Simulointi alkoi siirtämällä mittaussignaali Matlab-ohjelmaan. Siirtäminen oli mahdollista käyttämällä hyväksi Dran View -tietokoneohjelmaa, joka on analyysaattorin mittaustulosten käsittelyohjelma. Ohjelma antaa mittausdatan puolestaan Excel-ohjelmaan, josta sen pienillä muutoksilla pystyi siirtämään Matlabiin.

Siirtämisen jälkeen mittaussignaalille oli mahdollista tehdä Fourier-muunnos ja piirtää spektrianalyysi. Spektrianalyysistä, joka on esitetty kuvassa 22, pystyi lukemaan perustaajuuden (50 Hz) suuruuden ja yliaaltotaajuudet sekä näiden suuruudet.



Kuva 22. Matlabilla piirretty spektri.

Spektrianalyysin avulla saadut arvot kerrottiin perustaajuuden suuruudella saadulla suhteella. Lopuksi muunnettujen jännitearvojen avulla voidaan laskea särökerroin yhtälön 10 avulla ja verrata saatua tulosta mittarista saatuun. Taulukossa 11 on esitetty mittarista saatu jänniteharmonisten suuruus sekä Matlabilla saadut arvot ja lasketut arvot.

Taulukko 11. Mittaustulosten simuloinnin tulokset.

| Harmoninen | Matlabin antama jännite [V] | Mittarin antama jännite [V] |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| U ₁ | 234,71 | 234,71 |
| U ₂ | 0,01 | 1,16 |
| U ₃ | 0,10 | 0,98 |
| U ₄ | 3,11 | 0,47 |
| U ₅ | 0,45 | 1,99 |
| U ₆ | 0,18 | 0,38 |
| U ₇ | 0,03 | 0,88 |
| U ₈ | 0,07 | 0,23 |
| U ₉ | 0,60 | 0,18 |
| U ₁₀ | 0,68 | 0,13 |
| U ₁₁ | 0,30 | 0,80 |
| U ₁₂ | 0,19 | 0,16 |
| U ₁₃ | 0,65 | 0,26 |
| U ₁₄ | 0,37 | 0,15 |
| U ₁₅ | 0,12 | 0,41 |
| U ₁₆ | 0,08 | 0,15 |
| U ₁₇ | 0,29 | 0,53 |
| U ₁₈ | 0,24 | 0,10 |
| U ₁₉ | 0,37 | 0,15 |
| U ₂₀ | 0,41 | 0,10 |
| U ₂₁ | 0,21 | 0,32 |
| U ₂₂ | 0,15 | 0,07 |
| U ₂₃ | 0,02 | 0,17 |
| U ₂₄ | 0,02 | 0,05 |
| U ₂₅ | 0,01 | 0,30 |
| THD | 0,01 | 0,01 |
| THD % | 1,25 | 1,28 |
| THD [V] | 2,95 | 3,00 |

Tuloksien perusteella selviää, että mittarin antamat jännitearvot ovat keskiarvoja tietyn yliaaltotaajuuden viereisistä jännitteistä. Matlabilla saatu arvo on tarkka yliaaltotaajuuden kohdalta otettu suuruus ja ei näin ollen ole suuruudeltaan yhtä suuri kuin mitä mittarista saatu. Lopuksi laskettu kokonaissärökerroin on kuitenkin sekä mittarilla että simuloinnilla samansuuruinen.

9 YHTEENVETO

Sähköverkon yliaallot johtuvat kuormittavan laitteen epälineaarista kuormasta. Tällöin virranmuoto on epäsinimuotoinen. Tästä seuraa, että sähköverkkoon syntyy normaalin verkkotaajuuden ns. harmonisia kerrannaisia. Kerrannaisista 3. on ongelmallisin. Muita merkittäviä ovat 5. ja 7.

Useimmiten sähkön huono laatu tulee sen kuluttajalle yllätyksenä ja liian myöhään. Tästä syystä sähkön laatumittauksia olisi hyvä tehdä useammin. Yliaaltojen mittaukseen on nykyisin saatavilla paljon helppokäyttöisiä laitteita, jotka laskevat kokonaissärökertoimen ja kunkin yliaallon osuuden. Saatuja mittaustuloksia verrataan standardien antamiin ohjearvoihin.

Yliaaltoja voidaan suodattaa, mutta ne on syytä ottaa huomioon jo laitteiston suunnittelu- ja hankintavaiheessa. Suodattamiseen voidaan käyttää imupiirejä tai aktiivisuotimia. Suodattimilla kyetään poistamaan 60–90 % yliaalloista.

Työssä tehtyjen Power Factory -simulointien perusteella voidaan sanoa, että ohjelma on toimiva ja monipuolinen simulointiohjelma. Tutkittavan verkon tärkeimmät simuloinnilla saadut tulokset osoittavat, että mahdollisen maksimikuormituksen aikana muuntajan koko on liian pieni ja se ylikuormittuu. Tähän ei kuitenkaan ole tällä hetkellä vaaraa, koska virrat ovat noin neljänneksen pienemmät todellisuudessa kuin maksimikuormituksen aikana. Yksi simuloinnin etu on, että sillä pystyi tarkistamaan oikosulkuvirtojen riittävyyden ja mahdolliset jännitteenalenemat, jotka molemmat olivat tutkittavassa verkossa kunnossa.

Työssä tehtyjen mittausten perusteella tutkittavan verkon sähkön laatu oli mittausten tekohetkellä standardin EN 50160 rajojen sisällä. Mittaustulosten perusteella sähkön laatu on hyvä, eikä verkkoon ole tällä hetkellä järkevää lisätä erillisiä yliaaltosuotimia. Mikäli sähköverkosta haluttaisiin vähemmän yliaaltoja sisältävä, olisi siinä järkevintä käyttää 5. ja 7. yliaallon taajuudelle viritettyä imupiiriä. Tällöin kokonaissärökerroin laskisi noin 2,5 %:sta 1,5 %:iin. Tämä ei kuitenkaan ole mielekäs, koska kokonaissärö on jo nyt hyvä.

Muiden kuin yliaaltojen aiheuttamia sähkön laatuongelmia on vaikea selvittää vielä näin lyhyin mittauksin. Tarkan kuvan mahdollisista sähköverkossa esiintyvistä häiriöistä saisi mittaamalla sitä laajemmin ja pidempään.

Maadoitusjärjestelmän mittaukset osoittivat, että maadoitusjärjestelmä on virtojen ja yliaaltojen osalta kunnossa. Maadoitusjärjestelmässä kulkeva haaravirta voi kuitenkin häiritä herkkiä prosessilaitteistoja. Maadoitusjärjestelmästä saisi toimivamman muuttamalla se järjestelmällisesti kokonaan TN-S-järjestelmäksi. TN-S-järjestelmä ei kuitenkaan poista kaikkea virtaa suojajohtimesta. Suojajohtimen aiheuttama häiriövirta voidaan torjua käyttämällä ns. häiriötöntä maadoitusta (TE). Häiriöttömään maadoituksen voitaisiin kytkeä järjestelmän häiriöherkimmät virtapiirit.

LÄHTEET

- 1 YIT Oyj, *Perustietoa YIT:stä*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 25.2.2010]
Saatavissa: <http://www.yit.fi/palvelut/yritysinformaatio/perustietoa>.
- 2 Alanen, Raili– Hätönen, Hannu, *Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta*. Tutkimusprojekti. VTT. Espoo. 2006.
- 3 Tuomainen, Martti, *Yliaallot, esimerkkejä kompensointiratkaisuista*. INSKO. 1992.
- 4 Suomen standardisoimisliitto, *Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*. Standardi SFS-EN 50160. 2008.
- 5 Vauhkonen, Vesa, *Yliaallot ja kompensointiratkaisut*. Sähkökäyttäjien jatkokurssi, luentomateriaali. Savonia–ammattikorkeakoulu. Kuopio. 2009.
- 6 GMC-I Messtechnik GmbH. *3-Phase Energy and Power Disturbance Analyzer PowerXplorer*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 2.2.2010] Saatavissa: <http://www.gossenmetrawatt.com/english/produkte/mavowatt70.htm>.
- 7 Nokian Capacitors Oy, *Kolmannen yliaallonsuodatin*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 4.2.2010] Saatavissa: http://www.nokiancapacitors.fi/documents/03%20-20products/low%20voltage/FI-LV01-01_2006-kolmannen_yliaallonsuodatin.pdf.
- 8 Sähkötarkastusyhdistys–Turvatekniikan keskus–Sähtöturvallisuuden Edistämiskeskus, *Sähköiset paloriskit ja niiden hallinta*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 2.2.2010] Saatavissa: http://www.tukes.fi/tiedostot/sahko_ ja_hissit/sahkopeto/s%C3%A4hkiset%20paloriskit%20ja%20niiden%20hallinta.pdf.
- 9 Aura, Lauri–Tonteri, Antti, *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet*. WSOY. Porvoo. 1996.

- 10 ABB, Tekninen opas nro 6, *Vaihtovirtakäyttäjien yliaalto-opas*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 8.2.2010] Saatavissa:
[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf).
- 11 ABB, TTT-käsikirja, *Sähkön laatu*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 9.2.2010] Saatavissa:
[http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/\\$FILE/040_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/$FILE/040_0007.pdf).
- 12 Rauman energia OY- Vakka-suomen Voima OY, *Sähköasennusten erityisohjeet*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 2.3.2010] Saatavissa:
www.satavakka.fi/skansio/docs/50200.doc.
- 13 Suomen standardisoimisliitto, Pienjännitesähköasennukset. *Standardi SFS 6000-5-52*. 2008.
- 14 ABB, *Kolmas yliaalto - uusi kasvava sähköverkon ongelma ja sen ratkaisu*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 11.2.2010] Saatavissa:
[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/\\$File/THFOP-FI.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT209.nsf/VerityDisplay/2857AF09DDA38FF8C1256C5500269598/$File/THFOP-FI.pdf).
- 15 ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita käsikirja, *Loistehon kompensointi ja yliaaltosuojaus*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 10.2.2010] Saatavissa:
[http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/090_0007.pdf](http://www.abb.fi/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/090_0007.pdf).
- 16 Virtanen, Tuomas, *Jännitteennostomuuntajan mitoitus sähkökonekorjaamon koe-kentälle*. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. Tampere. 2005.
- 17 DIgSILENT GmbH, *Integrated Power System Analysis Software*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 8.4.2010] Saatavissa:
http://www.digsilent.de/Promotion/Advertising/PowerFactory_Software.pdf.

18 Nokian Capacitors Oy, *Kiinteä estokelaparisto*. [WWW-dokumentti]. [viitattu 16.3.2010] Saatavissa:

<http://www.nokiancapacitors.fi/documents/03%20->

[%20products/low%20voltage/FI-LV13-01_2006-kiinteä_estokelaparisto.pdf](http://www.nokiancapacitors.fi/documents/03%20-%20products/low%20voltage/FI-LV13-01_2006-kiinteä_estokelaparisto.pdf).

19 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto, *Maadoituskirja*. Sähköinfo Oy. Espoo. 2007.

LIIITEET

LIITE 1. POWER FACTORY SIMULOINNIN TULOKSET

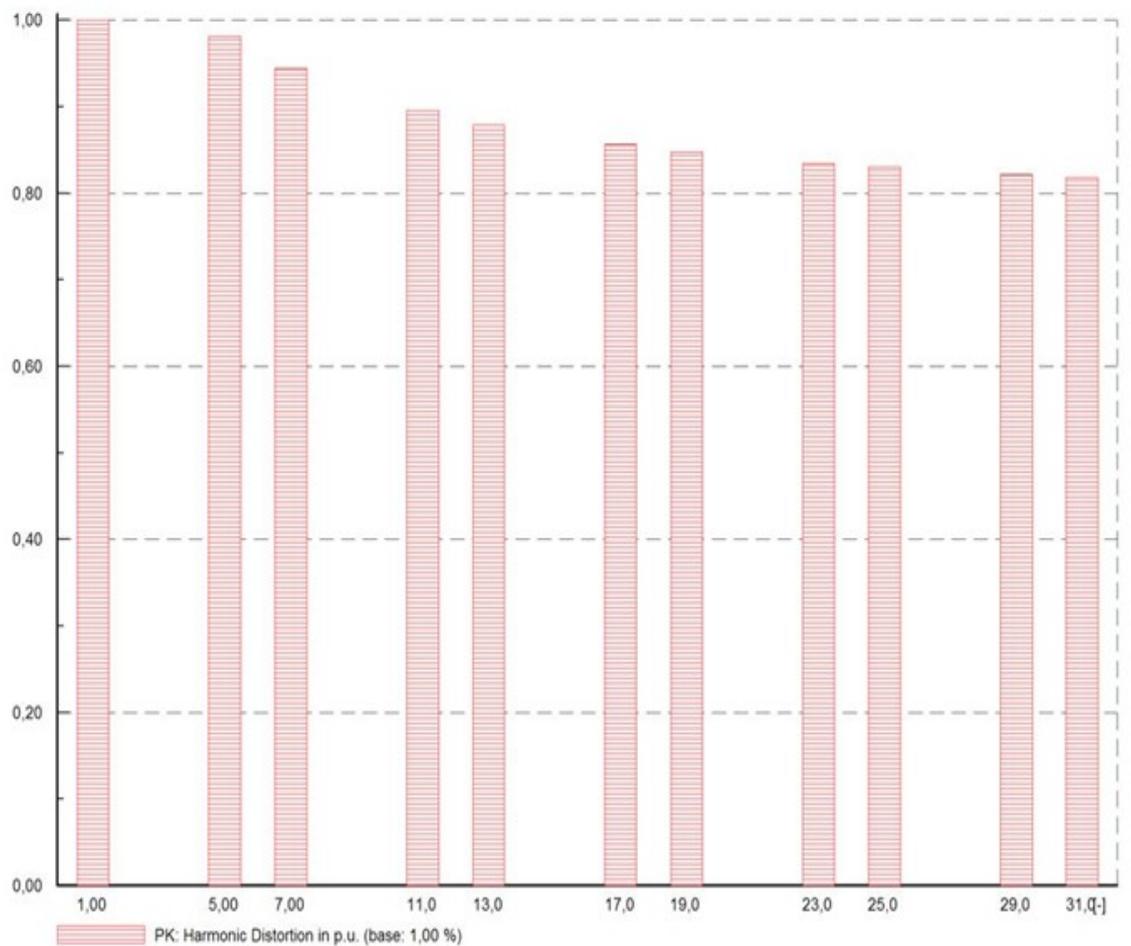
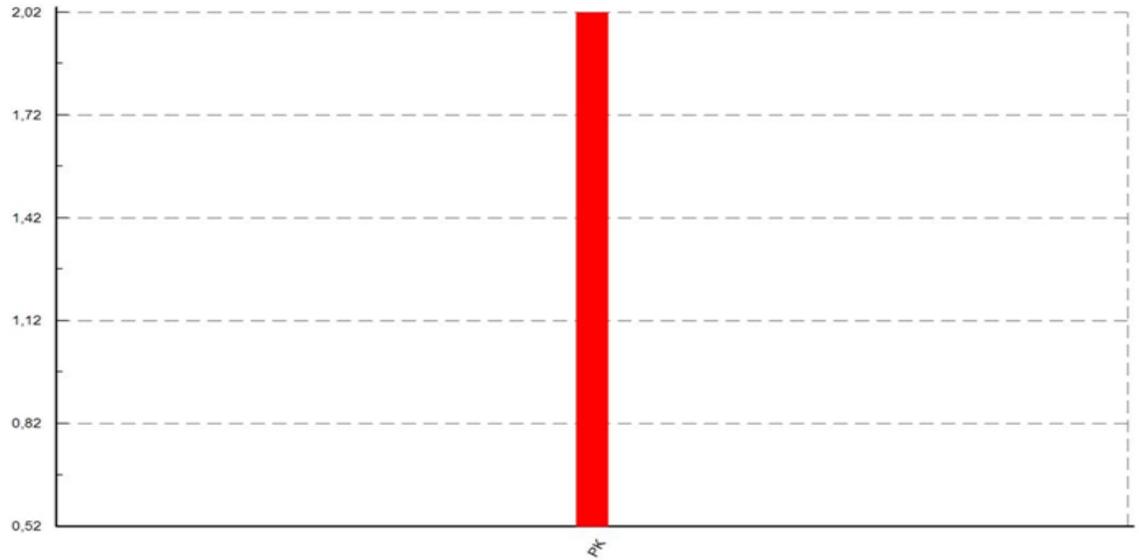
Tärkeimmät Power Factory simuloinnilla saadut simulointitulokset olivat oikosulkuvirtojen laskentatulokset verkon eri kohdissa, jännitteen alenemat, suojausten toimivuuden tarkastelu ja yliaaltojen simulointi. Tulokset osoittavat, verkko on simuloitujen arvojen osalta kunnossa. Oikosulkuvirtojen arvot ovat hyvällä tasolla. Jännitteen alenemat ovat sallittujen arvojen sisällä ja suojaukset toimivat hyvin nykyisillä kuormitustasoilla. Alla tuloksista on esillä 1-vaiheisen oikosulkuvirran laskentatulokset.

| | | DIGSILENT PowerFactory 14.0.516 | | Project: Date: 13.4.2010 | | | | | | | | |
|--|---|---------------------------------------|-----------------|--|------------------|--------------------------|--------------|---------------|------------|------------|------------|------|
| Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation complete | | | | | | Single Phase to Ground / | | | | | | |
| Short-Circuit Duration Break Time | | 0,40 s | | Fault Impedance Resistance, Rf Reactance, Xf | | 0,00 ohm 0,00 ohm | | | | | | |
| Grid: Grid | | System Stage: Grid | | | | Annex: / 1 | | | | | | |
| | | rtd.V. [kv] | Voltage [kv] | c- Factor | Sk" [kVA/MVA] | Ik" [A /kA] | Ik' [deg] | Ip [A /kA] | Ib [A] | ib [A] | EFF [-] | |
| JK 110.1 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 1520,34 kVA | 6583,28 A | -12,7 | 6583,55 | 10031,35 A | 6583,55 | 9310,55 | 0,00 |
| | B | | 0,26 -108,72 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,13 |
| | C | | 0,29 156,95 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,23 |
| RK 13 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 2550,51 kVA | 11044,05 A | -24,5 | 11044,89 | 18559,37 A | 11044,89 | 15619,84 | 0,00 |
| | B | | 0,24 -105,10 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,05 |
| | C | | 0,27 152,55 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,17 |
| JK 201 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 378,21 kVA | 1637,71 A | 14,1 | 1637,72 | 2362,40 A | 1637,72 | 2316,09 | 0,00 |
| | B | | 0,25 -96,38 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,08 |
| | C | | 0,23 151,86 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,01 |
| JK 33 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 386,79 kVA | 1674,86 A | 15,5 | 1674,87 | 2415,98 A | 1674,87 | 2368,62 | 0,00 |
| | B | | 0,24 -90,30 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,03 |
| | C | | 0,22 146,29 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,94 |
| RK35 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 2954,35 kVA | 12792,70 A | -29,5 | 12793,98 | 22546,02 A | 12793,98 | 18093,42 | 0,00 |
| | B | | 0,24 -102,58 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,02 |
| | C | | 0,26 150,78 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,14 |
| RK14 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 839,13 kVA | 3633,55 A | 1,5 | 3633,61 | 5272,75 A | 3633,61 | 5138,71 | 0,00 |
| | B | | 0,28 -110,42 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,19 |
| | C | | 0,29 159,98 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,27 |
| RK12 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 1567,43 kVA | 6787,16 A | -13,1 | 6787,44 | 10380,77 A | 6787,44 | 9598,89 | 0,00 |
| | B | | 0,26 -108,71 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,13 |
| | C | | 0,28 157,03 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,23 |
| JK 26 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 990,44 kVA | 4288,75 A | 6,2 | 4289,00 | 6186,90 A | 4289,00 | 6065,56 | 0,00 |
| | B | | 0,24 -91,36 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,05 |
| | C | | 0,22 148,21 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,94 |
| RK 102 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 397,59 kVA | 1721,62 A | 18,2 | 1721,63 | 2483,43 A | 1721,63 | 2434,75 | 0,00 |
| | B | | 0,22 -79,88 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,96 |
| | C | | 0,20 135,61 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,86 |
| JK VSS | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 837,10 kVA | 3624,75 A | 12,6 | 3625,00 | 5228,69 A | 3625,00 | 5126,52 | 0,00 |
| | B | | 0,23 -80,24 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,98 |
| | C | | 0,19 136,70 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,84 |
| RK 11 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 2401,27 kVA | 10397,80 A | -11,4 | 10398,46 | 15309,82 A | 10398,46 | 14705,64 | 0,00 |
| | B | | 0,24 -93,86 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,03 |
| | C | | 0,23 148,39 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,99 |
| RK 16 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 614,41 kVA | 2660,46 A | 10,9 | 2660,48 | 3837,70 A | 2660,48 | 3762,49 | 0,00 |
| | B | | 0,24 -91,30 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,05 |
| | C | | 0,22 148,48 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,94 |
| RK 34 | A | 0,40 | 0,00 0,00 | 1,00 | 1318,92 kVA | 5711,10 A | -4,3 | 5711,28 | 8428,48 A | 5711,28 | 8076,97 | 0,00 |
| | B | | 0,26 -110,09 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,14 |
| | C | | 0,29 157,77 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,26 |

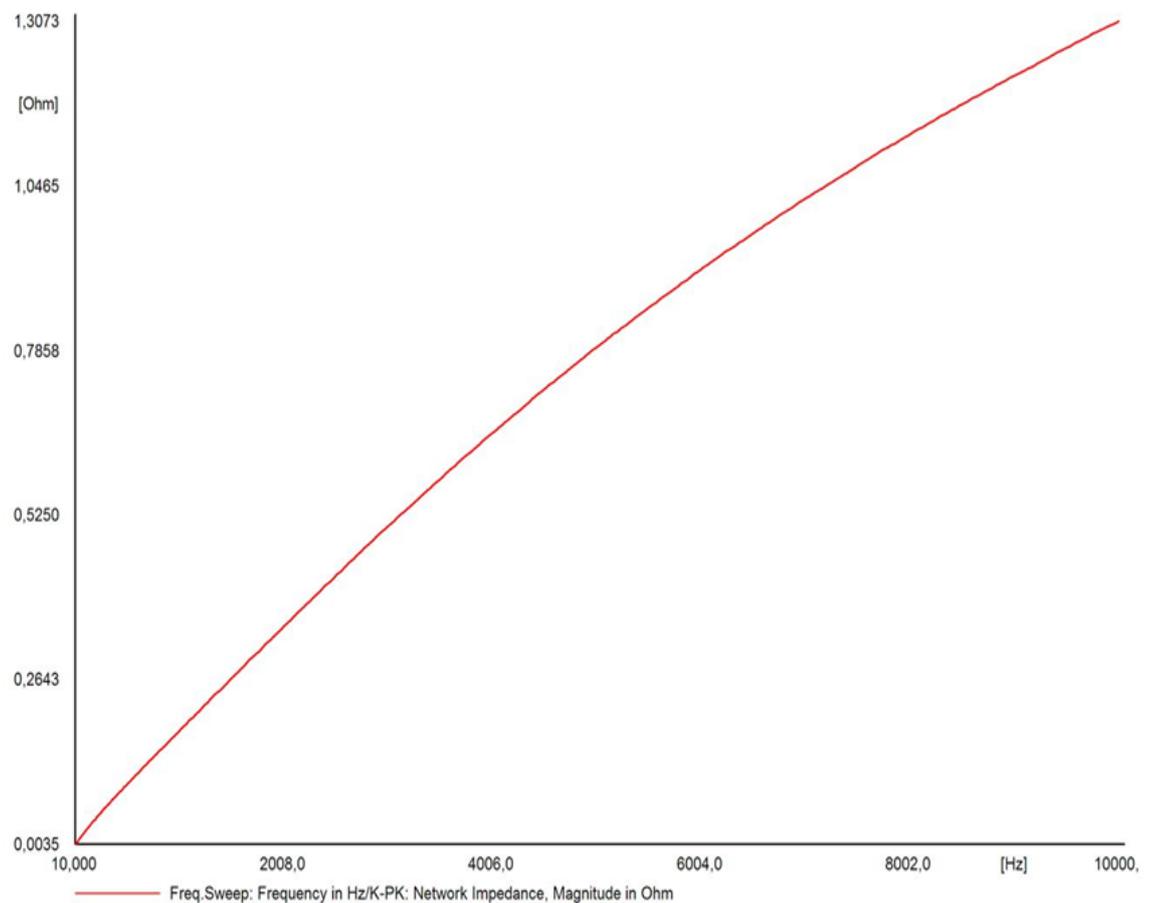
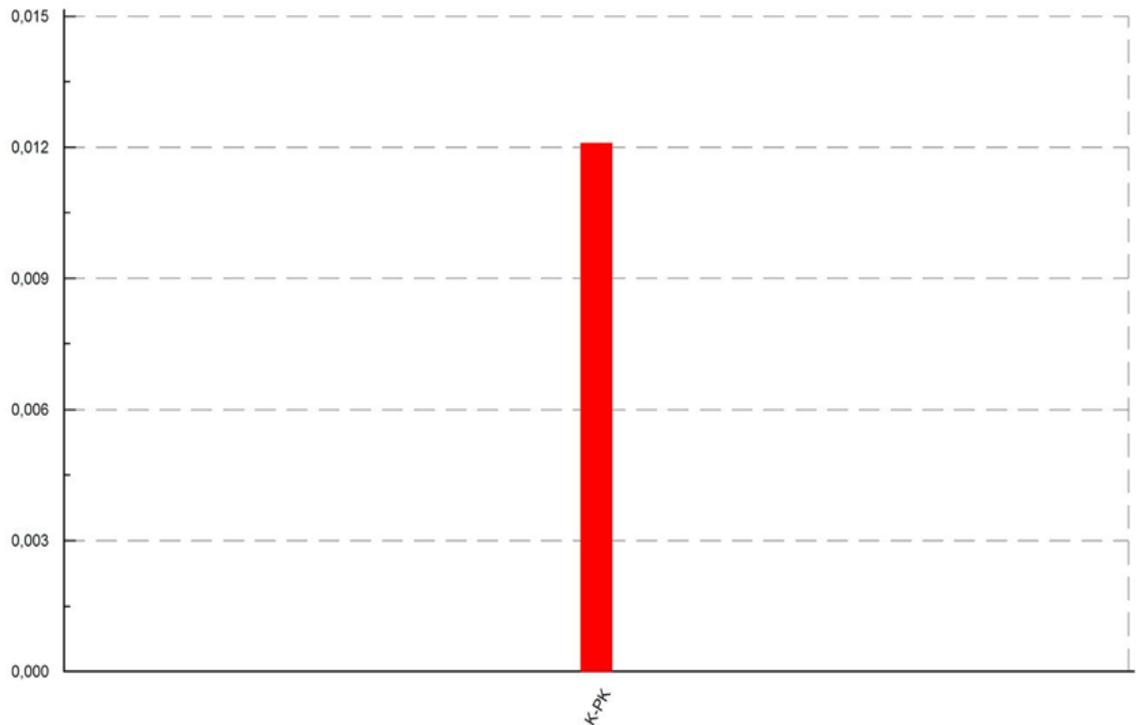
| | | | | | | | | | | DIgSILENT PowerFactory 14.0.516 | | Project: Date: 13.4.2010 | |
|--|---|--------------------|----------------|-------------|-----------------------------------|------------------|------------|--------------|------------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|------------|
| Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation complete | | | | | | | | | | Single Phase to Ground / | | | |
| Short-Circuit Duration Break Time | | | 0,40 s | | Fault Impedance Resistance, Rf | | | 0,00 Ohm | | | | | |
| | | | | | Reactance, Xf | | | 0,00 Ohm | | | | | |
| Grid: Grid | | System Stage: Grid | | | | | Annex: / 1 | | | | | | |
| | | rtd.v. [kv] | Voltag [kv] | c- [deg] | Factor | Sk" [kVA/MVA] | [A /kA] | Ik" [deg] | Ik' [A] | ip [A /kA] | Ib [A] | ib [A] | EFF [-] |
| JP 36 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1116,76 kVA | 4835,73 A | -1,7 | 4835,97 | 7073,25 A | 4835,97 | 6839,09 | 0,00 |
| | B | | 0,27 | -110,10 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,16 |
| | C | | 0,29 | 158,64 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,26 |
| RK 25 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1051,56 kVA | 4553,40 A | 1,8 | 4553,78 | 6579,43 A | 4553,78 | 6440,02 | 0,00 |
| | B | | 0,26 | -101,65 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,11 |
| | C | | 0,25 | 155,64 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,11 |
| RK 19 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 3071,81 kVA | 13301,32 A | -25,4 | 13302,56 | 21722,03 A | 13302,56 | 18812,66 | 0,00 |
| | B | | 0,24 | -98,29 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,02 |
| | C | | 0,25 | 149,36 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,07 |
| JK 22 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1252,84 kVA | 5424,97 A | -3,4 | 5425,13 | 7980,82 A | 5425,13 | 7672,29 | 0,00 |
| | B | | 0,27 | -110,07 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,15 |
| | C | | 0,29 | 158,15 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,26 |
| RK 15 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1356,48 kVA | 5873,73 A | -4,7 | 5873,92 | 8684,34 A | 5873,92 | 8306,98 | 0,00 |
| | B | | 0,26 | -109,97 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,14 |
| | C | | 0,29 | 157,65 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,26 |
| RK 21 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1403,58 kVA | 6077,67 A | -2,5 | 6077,87 | 8822,92 A | 6077,87 | 8595,40 | 0,00 |
| | B | | 0,25 | -102,02 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,09 |
| | C | | 0,26 | 154,46 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,11 |
| JK 32 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 834,52 kVA | 3613,58 A | 9,6 | 3613,63 | 5212,64 A | 3613,63 | 5110,45 | 0,00 |
| | B | | 0,24 | -94,04 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,05 |
| | C | | 0,23 | 149,34 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,99 |
| JK111 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 1447,81 kVA | 6269,18 A | 1,8 | 6269,37 | 9052,22 A | 6269,37 | 8866,23 | 0,00 |
| | B | | 0,24 | -94,02 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,04 |
| | C | | 0,23 | 149,00 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,99 |
| JK17 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 2014,35 kVA | 8722,39 A | -12,9 | 8722,87 | 13494,10 A | 8722,87 | 12336,00 | 0,00 |
| | B | | 0,25 | -108,28 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,07 |
| | C | | 0,29 | 154,50 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,23 |
| JK 23 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 682,58 kVA | 2955,67 A | 11,6 | 2955,85 | 4263,56 A | 2955,85 | 4180,20 | 0,00 |
| | B | | 0,24 | -93,84 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,05 |

| | | | | | | | | | | DIgSILENT PowerFactory 14.0.516 | | Project: Date: 13.4.2010 | |
|--|---|--------------------|----------------|-------------|-----------------------------------|------------------|------------|--------------|------------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------|------------|
| Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation complete | | | | | | | | | | Single Phase to Ground / | | | |
| Short-Circuit Duration Break Time | | | 0,40 s | | Fault Impedance Resistance, Rf | | | 0,00 Ohm | | | | | |
| | | | | | Reactance, Xf | | | 0,00 Ohm | | | | | |
| Grid: Grid | | System Stage: Grid | | | | | Annex: / 1 | | | | | | |
| | | rtd.v. [kv] | Voltag [kv] | c- [deg] | Factor | Sk" [kVA/MVA] | [A /kA] | Ik" [deg] | Ik' [A] | ip [A /kA] | Ib [A] | ib [A] | EFF [-] |
| | C | | 0,23 | 149,57 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,98 |
| RK10 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 2272,53 kVA | 9840,34 A | -9,5 | 9840,91 | 14413,70 A | 9840,91 | 13917,15 | 0,00 |
| | B | | 0,24 | -93,90 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,03 |
| | C | | 0,23 | 148,50 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,99 |
| JK 27 | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 611,71 kVA | 2648,79 A | 12,4 | 2648,81 | 3820,87 A | 2648,81 | 3745,99 | 0,00 |
| | B | | 0,24 | -94,17 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,05 |
| | C | | 0,23 | 149,61 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,98 |
| PK | A | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 4307,26 kVA | 18650,97 A | -49,5 | 18653,61 | 40518,91 A | 18653,61 | 26380,18 | 0,00 |
| | B | | 0,24 | -92,15 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 1,02 |
| | C | | 0,22 | 146,94 | | 0,00 kVA | 0,00 A | 0,0 | 0,00 | 0,00 A | 0,00 | 0,00 | 0,97 |

Verkon yliaaltojen suuruudet pääkeskuksella, ylempi kuva esittää kokonaissäröker-
toimen suuruutta ja alemmassa on esillä yliaaltosisältö prosentteina särön suuruudes-
ta.



Verkon impedanssin taajuusvaste pääkeskuksella, ylempi kuva esittää impedanssin suuruutta perustaajuudella ja alemmassa on esillä impedanssin suuruuden muutos taajuuden funktiona.



LIITE 2. MTTAUSTULOKSET

1. Pääkeskuksen mittaustulokset

Pääkeskuksen mittaukset suoritettiin yhdestä pääkeskuksen syöttökaapelista. Mittaukset osoittivat, että pääkeskuksen osalta tulokset ovat standardin antamien rajojen sisällä. Yliaaltopitoisuudesta ilmoitettava THD on alle 3 %:n hyvän laadun rajan.

EN 50160 mukainen raportti

Kohde: Mittaus1 PK, (Alkoi 08.02.2010 02:24:05,0 Päättyi 10.02.2010 21:35:59,0)
Nimellisjännite (Un) = 230 V

Tehon taajuus

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|---------------|-----------|--------------|---------------|
| 50 Hz +1%/-1% | 99.5% | 100.0% | PASSED |
| 50 Hz +4%/-6% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen vaihtelu

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|-----------------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| 230 V +10%/-10% | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |
| 230 V +10%/-15% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Nopeat jännitemuutokset

Ei saatavilla

Välkyntä

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| <1 | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen epäbalanssi

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|------|-----------|--------------|---------------|
| 0-2% | 95.0% | 100.0% | PASSED |

Harmoniset

Kaikki ovat 95% arvoja

| Raja(% Un) | A | B | C | Status | |
|------------|--------|-------|-------|--------|---------------|
| THD | <8.00% | 2.36% | 2.20% | 2.33% | PASSED |
| H02 | <2.00% | 0.04% | 0.04% | 0.05% | PASSED |
| H03 | <5.00% | 0.39% | 0.63% | 0.60% | PASSED |
| H04 | <1.00% | 0.02% | 0.03% | 0.03% | PASSED |
| H05 | <6.00% | 1.45% | 1.44% | 1.51% | PASSED |
| H06 | <0.50% | 0.02% | 0.03% | 0.03% | PASSED |
| H07 | <5.00% | 1.07% | 0.90% | 1.06% | PASSED |
| H08 | <0.50% | 0.01% | 0.03% | 0.01% | PASSED |
| H09 | <1.50% | 0.64% | 0.60% | 0.60% | PASSED |
| H10 | <0.50% | 0.01% | 0.03% | 0.01% | PASSED |
| H11 | <3.50% | 0.79% | 0.68% | 0.57% | PASSED |
| H12 | <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | PASSED |
| H13 | <3.00% | 1.02% | 0.89% | 1.04% | PASSED |
| H14 | <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H15 | <0.50% | 0.27% | 0.25% | 0.26% | PASSED |
| H16 | <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.00% | PASSED |
| H17 | <2.00% | 0.53% | 0.48% | 0.40% | PASSED |
| H18 | <0.50% | 0.01% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H19 | <1.50% | 0.43% | 0.35% | 0.41% | PASSED |
| H20 | <0.50% | 0.01% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H21 | <0.50% | 0.17% | 0.14% | 0.17% | PASSED |
| H22 | <0.50% | 0.02% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H23 | <1.50% | 0.16% | 0.16% | 0.15% | PASSED |
| H24 | <0.50% | 0.01% | 0.00% | 0.01% | PASSED |
| H25 | <1.50% | 0.15% | 0.15% | 0.17% | PASSED |

2. JK 17, mittaustulokset

Mittauksiin otettiin mukaan myös yksi yksivaiheista kuormitusta sisältävä keskuslähtö, koska loistevalaistus ja tietokoneet tuottavat etenkin kolmatta yliaaltoa. Mittaukset kuitenkin osoittavat, että kolmas yliaalto kestää sallittujen rajojen sisällä, kuten muutkin. Mittauksissa oli vain yksi huomauttamisen arvoinen asia: pieni transientti. Se ei ole kuitenkaan niin suuri, että siitä aiheutuisi mitään suurempaa haittaa.

EN 50160 mukainen raportti

Kohde: mittaus 3 JK 17, (Alkoi 15.02.2010 01:06:05,0 Päättyi 16.02.2010 14:53:59,0)
Nimellisjännite (Un) = 230 V

Tehon taajuus

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|---------------|-----------|--------------|---------------|
| 50 Hz +1%/-1% | 99.5% | 100.0% | PASSED |
| 50 Hz +4%/-6% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen vaihtelu

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|-----------------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| 230 V +10%/-10% | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |
| 230 V +10%/-15% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Nopeat jännitemuutokset

Suurin jännitetransientti: Vaihe B
269.3V, kesto:0.000 Sek., päällä 15.02.2010 08:48:03,48

Välkyntä

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| <1 | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen epäbalanssi

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|------|-----------|--------------|---------------|
| 0-2% | 95.0% | 100.0% | PASSED |

Harmoniset

Kaikki ovat 95% arvoja

| Raja(% Un) | A | B | C | Status |
|------------|-------|-------|-------|---------------|
| THD <8.00% | 2.31% | 2.13% | 2.26% | PASSED |
| H02 <2.00% | 0.04% | 0.03% | 0.04% | PASSED |
| H03 <5.00% | 0.35% | 0.58% | 0.56% | PASSED |
| H04 <1.00% | 0.03% | 0.04% | 0.03% | PASSED |
| H05 <6.00% | 1.37% | 1.39% | 1.43% | PASSED |
| H06 <0.50% | 0.03% | 0.04% | 0.03% | PASSED |
| H07 <5.00% | 1.07% | 0.92% | 1.09% | PASSED |
| H08 <0.50% | 0.02% | 0.03% | 0.02% | PASSED |
| H09 <1.50% | 0.61% | 0.55% | 0.59% | PASSED |
| H10 <0.50% | 0.01% | 0.02% | 0.01% | PASSED |
| H11 <3.50% | 0.77% | 0.64% | 0.54% | PASSED |
| H12 <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | PASSED |
| H13 <3.00% | 0.98% | 0.83% | 0.99% | PASSED |
| H14 <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H15 <0.50% | 0.27% | 0.24% | 0.26% | PASSED |
| H16 <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H17 <2.00% | 0.57% | 0.54% | 0.42% | PASSED |
| H18 <0.50% | 0.01% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H19 <1.50% | 0.46% | 0.39% | 0.43% | PASSED |
| H20 <0.50% | 0.01% | 0.00% | 0.01% | PASSED |
| H21 <0.50% | 0.15% | 0.13% | 0.15% | PASSED |
| H22 <0.50% | 0.02% | 0.01% | 0.02% | PASSED |
| H23 <1.50% | 0.23% | 0.20% | 0.23% | PASSED |
| H24 <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H25 <1.50% | 0.15% | 0.16% | 0.15% | PASSED |

3. RK 35, mittaustulokset

Suurimpana yliaaltojen tuottajana oli oletetusti RK 35:n syöttö. Syöttöön on kytketty paljon ilmastointikoneiden taajuusmuuttajia, jotka tuottavat etenkin 5 ja 7 yliaaltoa. Tulokset ovat kuitenkin standardin rajojen sisällä.

EN 50160 mukainen raportti

Kohde: mittaus 2 RK 35, (Alkoi 11.02.2010 12:07:36,0 Päättyi 12.02.2010 14:21:59,0)
Nimellisjännite (Un) = 230 V

Tehon taajuus

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|---------------|-----------|--------------|---------------|
| 50 Hz +1%/-1% | 99.5% | 100.0% | PASSED |
| 50 Hz +4%/-6% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen vaihtelu

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|-----------------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| 230 V +10%/-10% | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |
| 230 V +10%/-15% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Nopeat jännitemuutokset

Ei saatavilla

Välkyntä

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| <1 | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen epäbalanssi

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|------|-----------|--------------|---------------|
| 0-2% | 95.0% | 100.0% | PASSED |

Harmoniset

Kaikki ovat 95% arvoja

| Raja(% Un) | A | B | C | Status |
|------------|-------|-------|-------|---------------|
| THD <8.00% | 2.25% | 2.08% | 2.23% | PASSED |
| H02 <2.00% | 0.04% | 0.03% | 0.04% | PASSED |
| H03 <5.00% | 0.39% | 0.62% | 0.61% | PASSED |
| H04 <1.00% | 0.01% | 0.03% | 0.03% | PASSED |
| H05 <6.00% | 1.37% | 1.40% | 1.41% | PASSED |
| H06 <0.50% | 0.02% | 0.04% | 0.02% | PASSED |
| H07 <5.00% | 1.06% | 0.88% | 1.06% | PASSED |
| H08 <0.50% | 0.00% | 0.03% | 0.01% | PASSED |
| H09 <1.50% | 0.64% | 0.59% | 0.66% | PASSED |
| H10 <0.50% | 0.01% | 0.03% | 0.01% | PASSED |
| H11 <3.50% | 0.72% | 0.57% | 0.50% | PASSED |
| H12 <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | PASSED |
| H13 <3.00% | 0.95% | 0.77% | 0.93% | PASSED |
| H14 <0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H15 <0.50% | 0.32% | 0.35% | 0.38% | PASSED |
| H16 <0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.01% | PASSED |
| H17 <2.00% | 0.76% | 0.69% | 0.63% | PASSED |
| H18 <0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H19 <1.50% | 0.71% | 0.49% | 0.66% | PASSED |
| H20 <0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.01% | PASSED |
| H21 <0.50% | 0.16% | 0.19% | 0.18% | PASSED |
| H22 <0.50% | 0.02% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H23 <1.50% | 0.43% | 0.43% | 0.32% | PASSED |
| H24 <0.50% | 0.01% | 0.00% | 0.01% | PASSED |
| H25 <1.50% | 0.35% | 0.34% | 0.34% | PASSED |

4. Estokelapariston (240 kVAr) mittaustulokset

Kompensointilaitteistot otettiin mittauksiin mukaan, koska kompensointiportaiden päälle/pois kytkeminen voi aiheuttaa ylijännitetilanteita. Tästäkään sähkölähdöstä ei löytynyt huomautettavaa, eli kaikki kunnossa.

EN 50160 mukainen raportti

Kohde: mittaus 4 kompensointi240kvar, (Alkoi 17.02.2010 10:26:36,0 päättyi 18.02.2010 12:37:24,0)
Nimellisjännite (Un) = 230 V

Tehon taajuus

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|---------------|-----------|--------------|---------------|
| 50 Hz +1%/-1% | 99.5% | 100.0% | PASSED |
| 50 Hz +4%/-6% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen vaihtelu

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|-----------------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| 230 V +10%/-10% | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |
| 230 V +10%/-15% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Nopeat jännitemuutokset

Ei saatavilla

Välkyntä

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv.: | | | |
|------|-----------|---------------|--------|--------|---------------|
| | | CHA | CHB | CHC | |
| <1 | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen epäbalanssi

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|------|-----------|--------------|---------------|
| 0-2% | 95.0% | 100.0% | PASSED |

Harmoniset

Kaikki ovat 95% arvoja

| Raja(% Un) | A | B | C | Status |
|------------|-------|-------|-------|---------------|
| THD<8.00% | 2.21% | 2.04% | 2.16% | PASSED |
| H02<2.00% | 0.04% | 0.04% | 0.04% | PASSED |
| H03<5.00% | 0.40% | 0.59% | 0.60% | PASSED |
| H04<1.00% | 0.02% | 0.02% | 0.03% | PASSED |
| H05<6.00% | 1.38% | 1.36% | 1.42% | PASSED |
| H06<0.50% | 0.02% | 0.03% | 0.03% | PASSED |
| H07<5.00% | 1.06% | 0.91% | 1.04% | PASSED |
| H08<0.50% | 0.01% | 0.02% | 0.01% | PASSED |
| H09<1.50% | 0.63% | 0.59% | 0.56% | PASSED |
| H10<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H11<3.50% | 0.68% | 0.62% | 0.49% | PASSED |
| H12<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.02% | PASSED |
| H13<3.00% | 0.93% | 0.76% | 0.91% | PASSED |
| H14<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H15<0.50% | 0.26% | 0.20% | 0.27% | PASSED |
| H16<0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H17<2.00% | 0.44% | 0.40% | 0.31% | PASSED |
| H18<0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H19<1.50% | 0.37% | 0.31% | 0.34% | PASSED |
| H20<0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H21<0.50% | 0.15% | 0.15% | 0.16% | PASSED |
| H22<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H23<1.50% | 0.15% | 0.16% | 0.12% | PASSED |
| H24<0.50% | 0.01% | 0.00% | 0.01% | PASSED |
| H25<1.50% | 0.11% | 0.12% | 0.10% | PASSED |

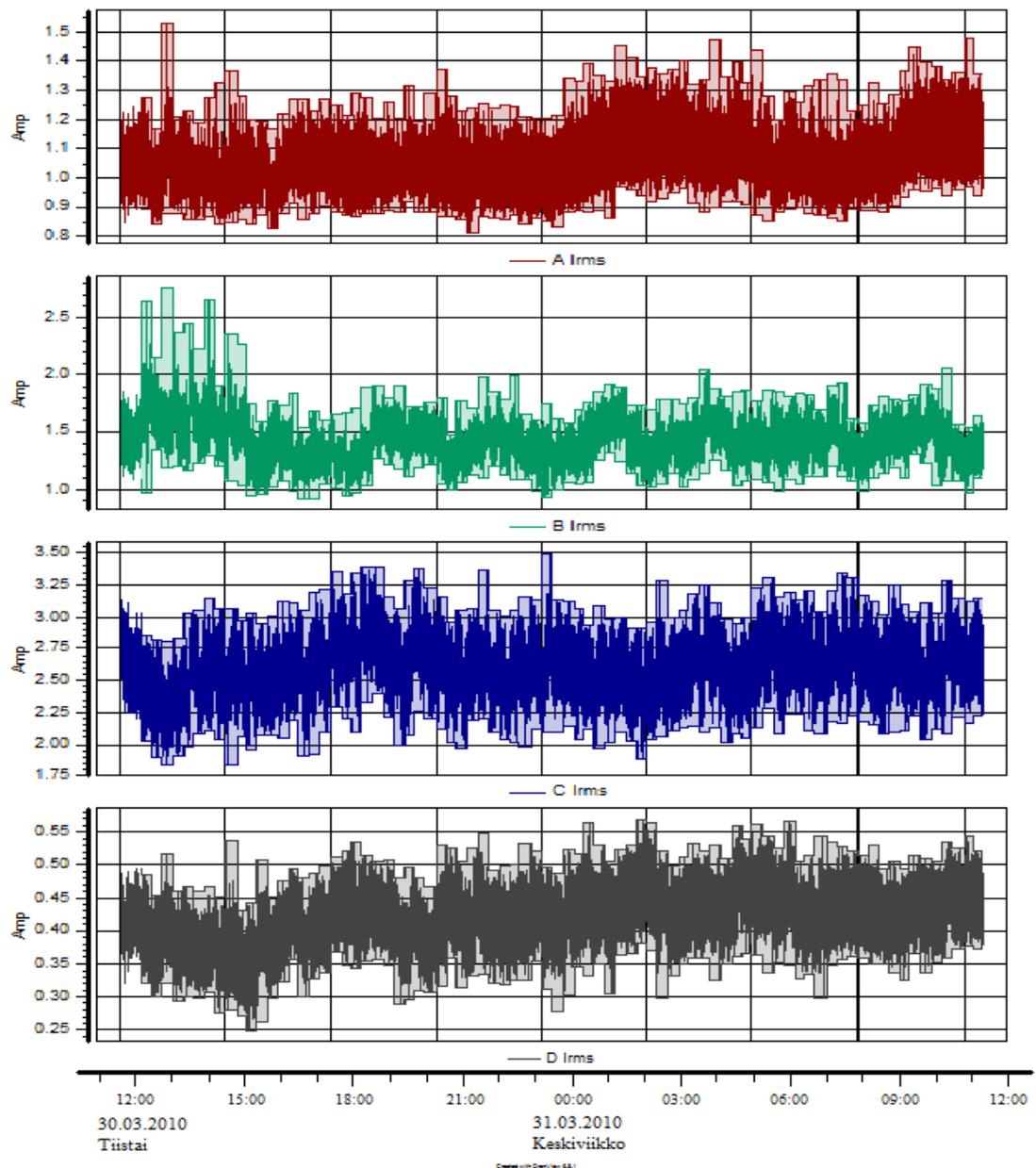
5. Maadoitusjärjestelmän mittaustulokset

Yksi opinnäytetyöhön kuulunut osa oli selvittää maadoitusjärjestelmän toimivuus mittauksin. Mittaukset suoritettiin pääpotentiaalintasauskiskostolla virtamittauksin. Mittauksin saadut tiedot osoittavat, että maadoitusjärjestelmässä kulkee odotetusti haaravirtaa. Virran suuruudet vaihtelivat n. 1 ampeerista aina 3,5 ampeeriin. Suurin haaravirta kulki kaapeliyhlyjen maadoitusjohtimessa. Virrat ovat kuitenkin kaapelin kokoon ja kuormitettavuuteen nähden pieniä, eikä tämäkään mittaus aiheuta erityistoimenpiteitä.

VIRRAN KUVAAJAT

Kohde: mittaus 5 potentiaalintasaus kiskosto, A= Prosessilaitteiden häiriösuojamaadoitus (johdin = MK50), B= JK 22 komero (johdin = MK 50), C= Kaapeliyhlyt (johdin = MK 16), D= Prosessilaitteiden häiriösuojamaadoitus (johdin = MK50).

(Alkoi 30.03.2010 09:58:02,0, Päättyi 31.03.2010 11:00:00,0)



6. RK 35, lisämittaustulokset

RK 35 keskuksella suoritettiin sähkön laatu mittaus uudestaan, nyt eri kohdasta, mitä aiemmin. Mittauksin saadut tulokset osoittavat, että sähkön laatu on kuitenkin edelleen standardin rajojen sisällä, eikä tulosten perusteella löytynyt mitään uutta. Särö (THD) on edelleen hyvän laadun rajoissa, alle 3%:a.

EN 50160 Yhteensopiva raportti

Kohde: mittaus 6 RK 35, keskus, (Alkoi 31.03.2010 09:34:15,0 päättyi 01.04.2010 10:35:45,0)

Nimellisjännite (Un) = 230 V

Tehon taajuus

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|---------------|-----------|--------------|---------------|
| 50 Hz +1%/-1% | 99.5% | 100.0% | PASSED |
| 50 Hz +4%/-6% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen vaihtelu

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | CHA | CHB | CHC | |
|-----------------|-----------|--------------|--------|--------|--------|---------------|
| 230 V +10%/-10% | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |
| 230 V +10%/-15% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Nopeat jännitemuutokset

Ei saatavilla

Välkyntä

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | CHA | CHB | CHC | |
|------|-----------|--------------|--------|--------|--------|---------------|
| <1 | 95.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | 100.0% | PASSED |

Syöttöjännitteen epäbalanssi

| Alue | Raja-arvo | Yhteensopiv. | |
|------|-----------|--------------|---------------|
| 0-2% | 95.0% | 100.0% | PASSED |

Harmoniset

Kaikki ovat 95% arvoja

| Raja(% Un) | A | B | C | Status |
|------------|-------|-------|-------|---------------|
| THD<8.00% | 2.52% | 2.38% | 2.50% | PASSED |
| H02<2.00% | 0.04% | 0.03% | 0.03% | PASSED |
| H03<5.00% | 0.44% | 0.58% | 0.54% | PASSED |
| H04<1.00% | 0.01% | 0.02% | 0.03% | PASSED |
| H05<6.00% | 1.70% | 1.75% | 1.82% | PASSED |
| H06<0.50% | 0.02% | 0.03% | 0.02% | PASSED |
| H07<5.00% | 1.13% | 0.97% | 1.13% | PASSED |
| H08<0.50% | 0.01% | 0.02% | 0.01% | PASSED |
| H09<1.50% | 0.54% | 0.50% | 0.51% | PASSED |
| H10<0.50% | 0.01% | 0.02% | 0.01% | PASSED |
| H11<3.50% | 0.70% | 0.61% | 0.52% | PASSED |
| H12<0.50% | 0.01% | 0.02% | 0.01% | PASSED |
| H13<3.00% | 0.91% | 0.78% | 0.91% | PASSED |
| H14<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H15<0.50% | 0.28% | 0.21% | 0.21% | PASSED |
| H16<0.50% | 0.00% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H17<2.00% | 0.59% | 0.51% | 0.41% | PASSED |
| H18<0.50% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | PASSED |
| H19<1.50% | 0.49% | 0.41% | 0.39% | PASSED |
| H20<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.00% | PASSED |
| H21<0.50% | 0.14% | 0.13% | 0.15% | PASSED |
| H22<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H23<1.50% | 0.22% | 0.21% | 0.22% | PASSED |
| H24<0.50% | 0.01% | 0.01% | 0.01% | PASSED |
| H25<1.50% | 0.19% | 0.19% | 0.15% | PASSED |