

Jesse Asunmaa

Satamanosturin verkkovaikutukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

2.2.2015

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Tekijä Otsikko | Jesse Asunmaa Satamanosturin verkkovaikutukset |
| Sivumäärä Aika | 29 sivua + 2 liitettä 2.2.2015 |
| Tutkinto | Insinööri (AMK) |
| Koulutusohjelma | Sähkötekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | Sähkövoimatekniikka |
| Ohjaajat | Manager Juha Santala, Konecranes Finland Oy Lehtori Eero Kupila |
| <p>Insinööriyössä tutkittiin STS-satamanosturin verkkovaikutuksia standardien näkökulmasta. Alussa on kerrottu yleistä tietoa Konecranes-konsernista sekä käsiteltävästä STS-nosturista. Työssä tarkasteltiin jakeluverkon laatua koskevia EN-SFS- ja IEEE -standardeja sekä mittaamista koskevaa IEC 61000-4-30 -standardia.</p> <p>Työssä määriteltiin harmoniset yliaallot matemaattisesti sekä käytiin niiden syntymekanismi ja haittavaikutukset pintapuolisesti läpi. Pääpaino pidettiin standardien käsittelyssä ja nosturin mittaustulosten analysoinnissa.</p> <p>Työtä varten tutustuttiin Fluken monipuoliseen 435 II -verkkoanalysointilaiteeseen sekä analysointilaiteen mukana tulleeseen <i>Power Log</i> -ohjelmistoon. Lisäksi mittaustulosten käsittelyn sivutuotteena syntyi kätevä mittauspöytäkirjapohja. Excel-pohja näyttää etusivulla verkko-vaikutusten kannalta oleelliset tiedot kootusti ja vertailee niitä standardien vaatimuksiin sekä ilmoittaa liian suurista yliaaltopitoisuuksista.</p> | |
| Avainsanat | yliaallot, satamanosturi, IEEE 519, SFS-EN 50160 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Author Title | Jesse Asunmaa Network Effects of Container Crane |
| Number of Pages Date | 29 pages + 2 appendices 2 February 2015 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Electrical Engineering |
| Specialisation option | Electrical Power Engineering |
| Instructors | Juha Santala, Manager, Konecranes Finland Oy Eero Kupila, Senior Lecturer |
| <p>The objective of this thesis was to research the grid effects of the STS -container crane. In the beginning basic information about Konecranes and STS-cranes is given. The EN-SFS- and IEEE -standards of distribution network are handled with the measuring standard IEC 61000-4-30.</p> <p>Harmonic waves are handled mathematically and it is explained how they are generated and why they are harmful. The main focus is kept on standards and measurements.</p> <p>For this thesis it was necessary to become familiar with Fluke 435 II power quality analyzer and <i>Power Log</i> -software. Also a useful Excel base for measurements was produced. The file shows all the important information at the cover sheet and notifies, if there is too much harmonic components.</p> | |
| Keywords | harmonics, container crane, IEEE 519, SFS-EN 50160 |

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Konecranes-nosturit | 1 |
| 3 | Yliaallot | 3 |
| 3.1 | Yliaaltojen matemaattinen määrittely | 3 |
| 3.2 | Yliaaltojen merkitys verkossa | 4 |
| 4 | Sähkönlaadun standardit | 5 |
| 4.1 | Eurooppalaiset standardit | 5 |
| 4.1.1 | Taajuus | 6 |
| 4.1.2 | Jännite | 6 |
| 4.1.3 | Vaiheiden epäsymmetria | 6 |
| 4.1.4 | Harmoniset yliaallot | 6 |
| 4.1.5 | Signaalijännitteet | 7 |
| 4.1.6 | Tilapäiset jännitehäiriöt | 8 |
| 4.2 | Kansainväliset standardit | 8 |
| 4.2.1 | Suosittelut harmonisten yliaaltojen jänniterajat | 9 |
| 4.2.2 | Suositetut harmonisten yliaaltojen virtarajat | 9 |
| 4.3 | Mittaus tekniikoita ja tarkkuuksia koskevat standardit | 11 |
| 4.3.1 | Mittausajanjaksot | 12 |
| 4.3.2 | Standardin mukaiset mittalaitteet | 13 |
| 5 | Nosturin mittaaminen | 14 |
| 5.1 | Mittausten valmistelu | 14 |
| 5.2 | Mittausten suoritus | 15 |

| | | |
|-----|---------------------------------------------------|----|
| 6 | Mittaustulosten käsittely | 17 |
| 6.1 | Tehonkulutus | 17 |
| 6.2 | Harmoniset yliaaltojännitteet | 18 |
| 6.3 | Harmoniset yliaaltovirrat | 21 |
| 6.4 | Tehokerroin | 22 |
| 6.5 | Muut sähkönlaatuun vaikuttavat tekijät | 22 |
| 6.6 | Mittauspöytäkirjapohja | 25 |
| 7 | Yhteenveto | 26 |
| | Lähteet | 28 |
| | Liitteet | |
| | Liite 1. Mittauspöytäkirjapohjan ensimmäinen sivu | |
| | Liite 2. Mittauspöytäkirjapohjan toinen sivu | |

Lyhenteet

| | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DPF | Displacement Power Factor; perustaajuisen pätötehon ja näennäistehon suhde; käytetään myös nimitystä $\cos \phi$ |
| PCC | Point of Common Coupling; lähellä kuormaa oleva liittymispiste yleiseen sähkönjakeluverkkoon |
| PF | Power Factor; kokonaispätötehon ja -näennäistehon suhde |
| STS | Ship to Shore; laiturikonntinosturi |
| TDD | Total Demand Distortion; täydellä nimellisvirralla esiintyvää harmonista kokonaissäröä |
| THD | Total Harmonic Distortion; harmonisten yliaaltokomponenttien tehollisarvojen suhdetta perustaajuiseseen komponenttiin (THD-F) tai tehollisarvoon (THD-R); kuvaa virran tai jännitteen harmonista kokonaissäröä |

1 Johdanto

Insinööriyössä tutkitaan satamanosturin verkkoon tuottamia häiriöitä ja vertaillaan saatuja mittaustuloksia standardien vaatimuksiin. Mittauksissa keskitytään harmonisiin yliaaltoihin ja tehokertoimeen. Lähtötietojen perusteella Konecranesin nosturit eivät aiheuta syöttöverkkoon merkittäviä haittoja.

Työssä onkin tarkoitus dokumentoida standardoiduilla mittaustekniikoilla sähkönlaatua, jotta nosturin tilaajalle voidaan esittää tarvittaessa konkreettisia mittaustuloksia Konecranes-nostureiden verkkovaikutuksista. Tätä varten olisi hyvä kehittää valmis pöytäkirjapohja, jotta standardien kannalta tärkeät mittaustulokset saataisiin helposti tulos-tettavaan muotoon.

Työssä on tärkeää tuoda esille standardien rajoituksia ja ongelmia sekä mittaustulosten oikeanlaista tulkintaa. Ongelmia saattaa aiheuttaa esimerkiksi standardien vaatimat pitkät mittausajat täydellä kuormalla. Syöttöverkon laatu on myös hyvä tuntee ennen nosturin liittämistä verkkoon, jottei verkon omia häiriöitä pidetä nosturin aiheuttamina. Mittauksissa käytetään Fluken monipuolista 435 II -verkkoanalysointia.

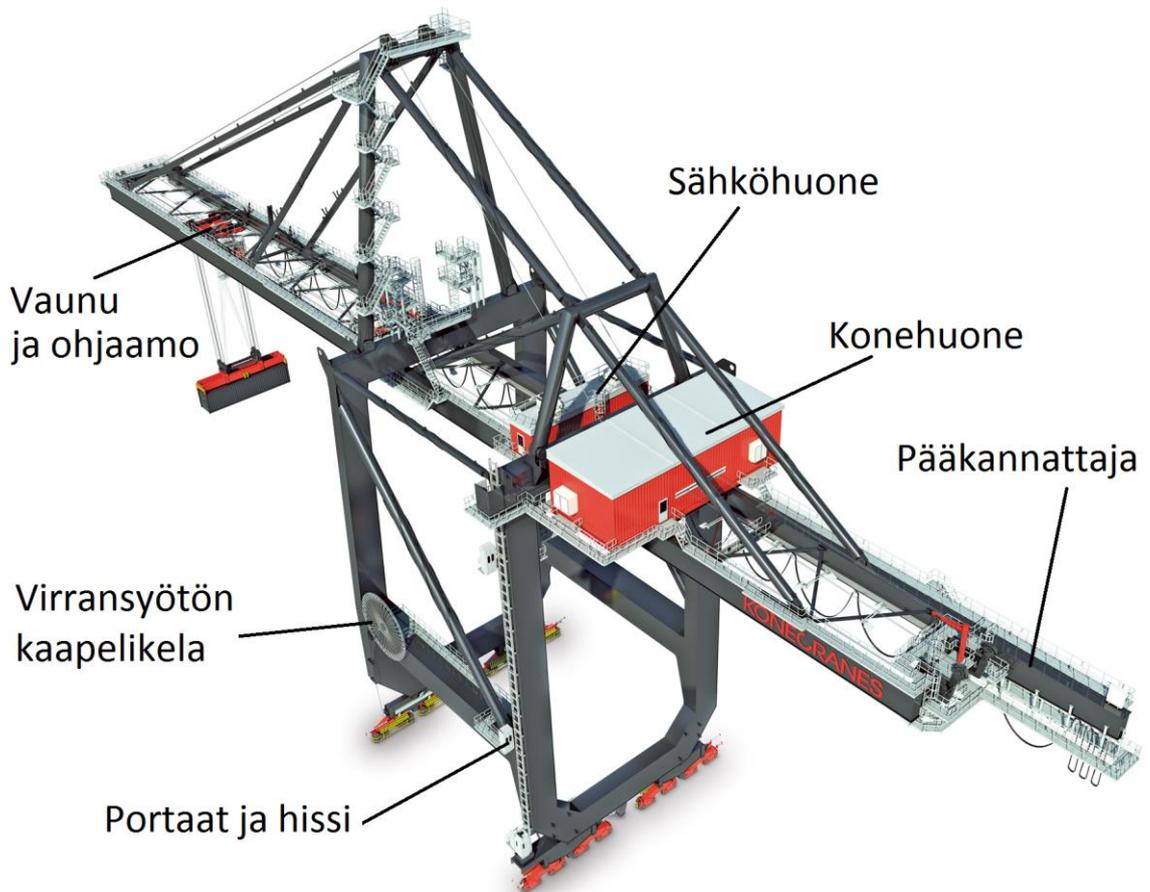
2 Konecranes-nosturit

Työn toimeksiantaja Konecranes on Hyvinkäällä pääkonttoriaan pitävä maailman johtava nostolaitevalmistaja. Nosturitoiminta alkoi vuonna 1933, jolloin Kone alkoi valmistaa teollisuusnostureita. Konecranes itsenäistyi omaksi yhtiöksi 1994.

Konecranesin liiketoiminta koostuu laitteista ja kunnossapidosta. Laittepuolella se on maailmanlaajuinen markkinajohtaja muun muassa teollisuus- ja telakkapukkinostureissa. Konecranes valmistaa myös erilaisia pienempiä nostimia sekä erilaisia trukkeja ja konttikurottajia. Tuotteita myydään myös useiden tytäryhtiöiden tuotenimillä (STAHL CraneSystems, SWF, Verlinde, R&M sekä Sanma Hoists & Cranes). Myös kunnossapitopuolella Konecranes on selvä markkinajohtaja maailmassa. Sen palveluihin kuuluvat huollot ja modernisoinnit erimerkkisille nostureille ja työstökoneille. Yrityksen huoltosopimus kattaa yli 400 000 laitetta, joista 25 % on Konecranesin valmistamia. Konecranesin

tekninen tuki tarjoaa myös TRUECONNECT® -etäpalvelua, jonka avulla saadaan reaaliaikaista tietoa nosturien huoltotarpeesta ja toiminnasta internetin välityksellä. (1.)

Tässä työssä keskitytään Konecranesin satamanosturiin, tarkemmin laiturikonttinosturiin (*STS, Ship To Shore*). STS-nostureilla puretaan ja lastataan kontteja laiturin ja laivan välillä. Kuvassa 1 nähdään tyypillisen Konecranes STS-nosturin rakenne. Muualla satama-alueella kontteja liikutellaan muun muassa pyörillä tai kiskoilla kulkevilla pukkinostureilla sekä konttien käsittelyyn suunnitelluilla trukeilla ja konttikurottajilla. (2.)



Kuva 1. Konecranes STS-nosturi (2)

3 Yliaallot

3.1 Yliaaltojen matemaattinen määrittely

Yliaallot ovat perustaajuisesta siniaallosta poikkeavia virtoja tai jännitteitä. Ne jaotellaan harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuisen siniaallon monikertoja, jotka voidaan esittää matemaattisesti Fourier'n sarjakehitelmänä. Näin esimerkiksi sinimuodosta poikkeava jännitekäyrä voidaan esittää yksiselitteisesti tasakomponentin, perustaajuisen komponentin ja harmonisten yliaaltokomponenttien summana seuraavan Fourier'n kaavasta johdetun yhtälön avulla:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \sin(n2f_1t + \alpha_n) \quad (1)$$

$u(t)$ on jännite ajan suhteen

U_0 on tasakomponentti

f_1 on jännitteen perustaajuus (esim. 50Hz)

α_n on vaihekulma

n on harmonisten yliaaltojen järjestysnumero. (1, s. 26.)

Taajuuksia, jotka eivät ole perustaajuuden monikertoja, kutsutaan epäharmonisiksi yliaalloiksi, eikä niitä voida Fourier'n kaavalla kuvata.

Harmonisia yliaaltoja mitattaessa ja vertailtaessa standardien ohjearvoihin on tärkeää tietää sekä yksittäisten yliaaltojen, että harmonisen kokonaissärön suhteellinen määrä. Kaikkien yliaaltojen suhteellista arvoa kutsutaan harmoniseksi kokonaissäröksi (THD), ja sen laskemiseksi on olemassa kaksi erilaista tapaa. Kokonaissäröä voidaan verrata perustaajuiseen jännitteeseen tai virtaan (THD-F, *Fundamental*), tai yliaallot sisältävään tehollisarvoon (THD-R, *Root Mean Square*). Lisäksi harmonisia yliaaltovirtoja käsiteltäessä on syytä käyttää virta-arvoja, jotka syntyvät täydellä kuormitusvirralla (TDD, *Total Demand Distortion*).

Kokonaissärön suhteellisesta luonteesta johtuen pienillä kuormilla virran THD saattaa olla todella korkea, vaikka yliaalloista ei olisikaan haittaa niiden tehollisarvojen ollessa

merkityksettömiä. Jännitteiden erilaiset kokonaissäröt ja virran kokonaissärö täydellä kuormalla saadaan laskettua yhtälöiden 2 - 4 avulla.

$$THD - F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \quad (2)$$

$$THD - R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U} \quad (3)$$

$$ITDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_L} \quad (4)$$

THD-F on kokonaissärö suhteessa perustaajuiseen jännitteeseen

THD-R on kokonaissärö suhteessa jännitteen tehollisarvoon

I_{TDD} on virran kokonaissärö täydellä kuormalla

h on harmonisen komponentin järjestysluku

I_L on virta suurimmalla käytetyllä kuormituksella. (3, s. 13.)

3.2 Yliaaltojen merkitys verkossa

Sähköverkon yliaallot ovat nykyään kasvava ongelma. Yliaaltoja syntyy epälineaaristen kuormien seurauksena. Epälineaarinen kuorma tarkoittaa esimerkiksi tasasuuntaajan ottamaa vaihtelevaa virtaa, joka on seurausta transistoreiden kytkeytymisestä päälle ja pois. Suurimpia aiheuttajia ovat tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, hakkuriteholähteet, loisteputkivalaisimet, puolijohdekytkimet, tyristorisäätimet, elektroniset laitteet, hitsauslaitteet, valokaariuunit sekä sähkökoneiden vikaantuneet magneettipiirit (3, s. 30).

Merkittäviä ongelmia syntyy usein, kun samassa vaihekulmassa olevat 3 yliaallot summautuvat nollajohtimeen (3, s. 32), tai kun jokin yliaalto alkaa resonoida verkon induktiivisten ja kapasitiivisten komponenttien välillä. Tällöin yliaaltovirrat tai -jännitteet saattavat moninkertaistua. Kuumenevien kaapeleiden lisäksi ongelmia tulee kun verkon komponentit lämpenevät, eristeet heikkenevät tai laitteet eivät toimi odotetulla tavalla (4, s. 22).

Nostureiden tapauksessa merkittävimmät yliaaltojen aiheuttajat ovat taajuusmuuttajien tasasuuntaussillat. Tasasuuntausilta aiheuttaa verkkoon pulssiluvulle tyypillisiä yliaaltoja yhtälön $n=pk\pm 1$ mukaan, jossa esiintyviin yliaaltoihin n vaikuttaa pulssiluku p ja juokseva kokonaisluku k . Yliaaltojen tehollisarvo laskee, mitä suuremmasta monikerrasta on kyse, ja korkeimmat yliaaltotaajuudet on helppo suodattaa pois verkosta kelojen ja kondensaattoreiden avulla. Tyypillisen 6-pulssisen tasasuuntaajan verkkoon aiheuttama virran THD on yleensä yli 30 %, ja se koostuu lähinnä 5., 7., 11 ja 13. yliaalloista. Konecranesin käyttämän aktiivisen tasasuuntaajan manuaali lupaa kuitenkin alle 5 % arvoja hyvin mitoitettun LCL-filtterin kanssa (5, s. 8). Tässä työssä ei ole tarkoituksenmukaista syventyä yliaaltojen syntymekanismiin tämän tarkemmin.

4 Sähkölaadun standardit

Suomesta ja ulkomailta löytyy useita päällekkäisiä sähköalan standardeja. Merkittävimpiä sähköalan standardoimisorganisaatioita Suomessa ovat IEC (International Electrotechnical Commission), Cenelec (European Committee For Electrotechnical Standardization) sekä suomalainen SESKO (Suomen sähköteknillinen standardisoimisyhdistys). SESKO kehittää suomalaisia SFS-standardeja sekä on mukana kehittämässä kansainvälisiä IEC- ja eurooppalaisia EN-standardeja. Lähtökohtaisesti kaikki eurooppalaiset standardit tulee sovittaa suomalaisiksi SFS-EN-standardeiksi. Jos yhteistä eurooppalaista standardia ei ole, se voidaan laatia joko IEC:n pohjalta tai puhtaasti kansallisesta näkökulmasta. (6, s. 2.)

4.1 Eurooppalaiset standardit

SESKOn vahvistama eurooppalainen SFS-EN 50160 -standardi määrittelee rajat, joissa jakeluverkon jännitteen on pysyttävä, jotta sähkön laatu olisi riittävän hyvä. Näihin kuuluu taajuus, jännitteen tehollisarvo ja aaltomuoto sekä vaiheiden välinen symmetrisyys. Tässä työssä keskitytään vain 1 - 36 kV keskijänniteverkon vaatimuksiin, vaikkakin standardi käsittää myös tätä suuremmat ja pienemmät jännitteet. Kaikki mittaukset on suoritettava mittaustekniikoita käsittelevän standardin EN 61000-4-30 mukaan. Mittaustekniikoiden vaatimuksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.3. (7, s. 6.)

4.1.1 Taajuus

Standardin mukaan verkon taajuuden suurin sallittu poikkeama yhteiskäyttöverkossa on yksi prosentti 99,5 % vuodesta, kuitenkin korkeintaan +4 % / -6 %. Omassa erilliskäytössä tai erityisen syrjäisellä seudulla sallitaan suurempi vaihtelu, joka on 2 % 95 % viikosta, kuitenkin korkeintaan 15 %. (7, s. 30.)

4.1.2 Jännite

Jännite saa standardin mukaan normaalioloissa vaihdella ± 10 %. Erilliskäytössä ja syrjäseuduilla jännite saa nousta 10 % ja laskea 15 %. Yksikään jännitteen tehollisarvon mittauksista saatu keskiarvo ei saa kuitenkaan koskaan poiketa yli 15 % verkon nimellisestä jännitteestä.

Mikäli mittauksen aikana esiintyy jännitekatkoja, näitä mittauksia ei voida ottaa huomioon. Mittausjaksoksi suositetaan mittaustekniikoita käsittelevän standardin mukaan viikkoa. (7, s. 30.)

4.1.3 Vaiheiden epäsymmetria

Standardi antaa myös rajat vaiheiden väliselle epäsymmetrialle. Jakelujännitteen perustaajuinen vastakomponentti saa olla korkeintaan 2 % myötäkomponentista 95 % ajasta. Epäsymmetria tarkoittaa käytännössä vaiheiden erisuuruisia jännitteitä ja niiden vaihekulmia. (7, s. 32.)

4.1.4 Harmoniset yliaallot

Tämän työn kannalta oleellista on tutkia harmonisia yliaaltoja verkon liittymispisteessä. Standardi suosittaa mittaamaan yliaaltopitoisuuksia viikon ajan. Kokonaissärö THD saa standardin mukaan olla korkeintaan 8 % (40 ensimmäistä perustaajuuden monikertaa). Harmonisten yliaaltojännitteiden 10 minuutin keskiarvoista 95 % tulee pysyä taulukon 1 (ks. seur. s.) mukaisissa rajoissa. (7, s. 34.)

Taulukko 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden suurimmat sallitut pitoisuudet (7, s. 34)

| Parittomat yliaallot | | | | Parilliset yliaallot | |
|----------------------|----------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Kolmella jaottomat | | Kolmella jaolliset | | | |
| Järjestysluku h | Suhteellinen jännite u_h | Järjestysluku h | Suhteellinen jännite u_h | Järjestysluku h | Suhteellinen jännite u_h |
| 5 | 6,0 % | 3 | 5,0 % ^a | 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 % | | | | |

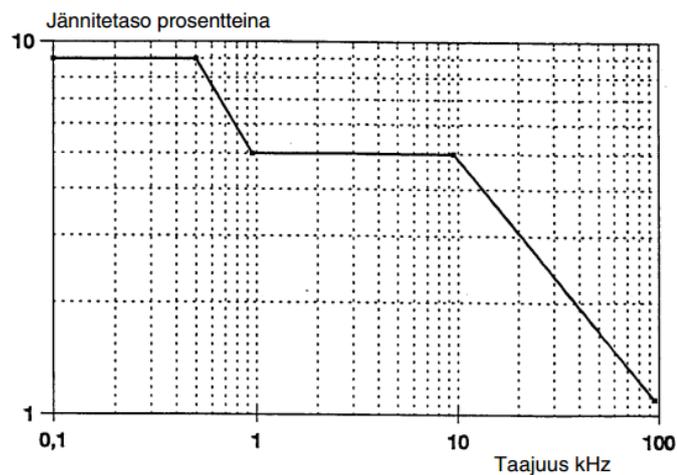
HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

^{a)} Verkon rakenteesta riippuen kolmas yliaalto saattaa olla huomattavasti pienempi.

Standardi ei määrittele tarkkoja rajoja epäharmonisille yliaalloille. Niiden määrä on kasvanut viime aikoina, mm. taajuusmuuttajien ja muiden säätölaitteiden lisääntyä.

4.1.5 Signaalijännitteet

Joissakin maissa verkko-operaattorit käyttävät verkossaan korkeataajuisia signaalijännitteitä viestien siirtoon. Tällöin 99 % päivästä signaalijännitteiden suhde verkon jännitteestä on pysyttävä kuvan 2 esittämän kuvaajan alapuolella. (7, s. 34.)



Kuva 2. Signaalijännitteen suurin sallittu taso eri taajuuksilla (7, s. 36)

4.1.6 Tilapäiset jännitehäiriöt

Verkon jatkuvien ominaisuuksien lisäksi verkossa esiintyy myös erilaisia tilapäisiä jännitehäiriöitä. Verkon käyttökeskeytykset ovat ennalta-arvaamattomia ja vaikeita tilastoida, joten standardi ei määrittele keskeytyksille raja-arvoja. Standardista löytyy kuitenkin luokituksia erisuuruisille ja kestoisille jännitekuopille ja ylijännitteille.

Ylijännitteitä syntyy usein kuorman erotus- tai kytkentähetkellä. Nopeita kytkentöjen tai salamoiden aiheuttamia ylijännitteitä voidaan kutsua myös transienttiylijännitteiksi. Tyypillisiä jännitekuoppien aiheuttajia ovat jakeluverkon viat ja asiakkaiden omat asennukset. Jännitekuoppien keston vaikuttaa myös verkon rakenne ja tähtipisteen maadoitustapa. Jännitevaihteluita tarkastellaan vaiheiden välillä. Mittaustulosten epävarmuutta on aina syytä pohtia.

Lisäksi standardi käsittelee välkynnän aiheuttamaa häiritsevyyssindeksiä, joka riippuu välkynnän amplitudista ja taajuudesta. Välkyntää ei tässä työssä käsitellä tämän laajemmin. (7, s. 36.)

4.2 Kansainväliset standardit

Kansainvälisessä IEEE 519 -standardissa määritellään pelkkää Eurooppaa laajemmin sähkön laadun mittaamistavat ja vaadittavat arvot. Standardissa otetaan huomioon myös amerikkalainen 60 Hz:n järjestelmä. Standardia täydentävät harmonisia yliaaltoja käsittelevä IEC Std 61000-4-7 sekä sähkönlaadun mittausta käsittelevä IEC Std 61000-4-30. Toisin kuin eurooppalaisessa standardissa IEEE 519:ssä annetaan ohjearvot myös harmonisten yliaaltojen virroille. Sekä kansainvälisissä että eurooppalaisissa standardeissa käytetään samoja mittaustekniikoita, joten ne on luontevaa käsitellä erikseen myöhemmin. (8, s. 4.)

4.2.1 Suositellut harmonisten yliaaltojen jänniterajat

95 % viikon aikana mitatuista 10 minuutin mittausjaksoista tulee pysyä taulukon 2 rajoissa. Taulukkoa voidaan soveltaa myös 99 %:lle mitatuista yliaalloista 3 sekunnin mittausjaksoilla, kun arvoihin käytetään kerrointa 1,5. Taulukon mukaan keskijänniteverkon suurimmat sallitut vaihejännitteiden kokonaissäröt ovat 5 %, kuitenkin minkään yksittäisen yliaaltokomponentin ylittämättä 3 prosenttia. Taulukosta voidaan huomata, että keskijänniteverkon jännitteen mukainen määritelmä eroaa eurooppalaisesta standardista. Myös keskijänniteverkolle vaaditut rajat ovat hieman tiukemmat, eikä eri yliaaltokomponenteille ole omia raja-arvoja. (8, s. 6.)

Taulukko 2. IEEE Std 519:n mukainen taulukko harmonisten yliaaltojen suurimmista sallituista jännitearvoista (8, s. 6)

| Bus voltage V at PCC | Individual harmonic (%) | Total harmonic distortion THD (%) |
|-----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| $V \leq 1.0 \text{ kV}$ | 5.0 | 8.0 |
| $1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ | 3.0 | 5.0 |
| $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ | 1.5 | 2.5 |
| $161 \text{ kV} < V$ | 1.0 | 1.5 ^a |

4.2.2 Suositetut harmonisten yliaaltojen virtarajat

Taulukossa 3 (ks. seur. s.) määritetään harmonisten yliaaltovirtojen rajat 120 V - 69 kV liityntäpisteen erilaisilla oikosulkuvirran ja kuormavirran suhteilla. Taulukossa esitetään arvot täydellä kuormalla esiintyville yliaaltovirroille (TDD). Tämä on paljon havainnollisempaa, sillä pelkkä virran kokonaissärö (THD) ilman kuormaa ei suoraan selitä yliaaltojen vaikutuksista riittävästi. Taulukon mukaiset rajat tulisi alittaa 95 % viikosta käyttäen 10 minuutin mittausjaksoja. Viikon aikana suoritettavista 10 minuutin mittauksista 99 % tulisi olla taulukon rajoissa, kun lukuihin käytetään kerrointa 1,5. Päivittäisistä lyhyistä 3 sekunnin mittauksista 99 % tulisi olla taulukon rajoissa kertoimella 2. (8, s. 7.)

Suomessa käytettävässä SFS-EN -standardeissa ei määritellä erikseen yliaaltovirroille raja-arvoja, mutta sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL suosittaa käyttämään IEEE:n taulukon 3 toisen rivin arvoja keskijänniteverkon liittymispisteessä (3, s. 45).

Taulukko 3. Virran säröytymisrajat 120 V - 69 kV liittymispisteessä IEEE Std 519 mukaan (8, s. 7)

| Maximum harmonic current distortion in percent of I_L | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------|
| Individual harmonic order (odd harmonics)^{a, b} | | | | | | |
| I_{sc}/I_L | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | TDD |
| $< 20^c$ | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| $20 < 50$ | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| $50 < 100$ | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| $100 < 1000$ | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| > 1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

^aEven harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

^bCurrent distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

^cAll power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component)
at the PCC under normal load operating conditions

IEEE Std 519:ssa ei anneta tarkkoja ohjearvoja epäharmonisille yliaalloille, mutta todetaan kuluttajalla olevan vastuu rajoittaa yliaaltovirtoja tarpeeksi alas, jotta niistä ei ole häiriötä verkolle ja muille käyttäjille (8, s. 7). Standardi määrittelee myös harmonisten yliaaltojen rajat suurjänniteverkoille, mutta niiden käsittely ei ole oleellista satamanosturien verkkovaikutusten näkökulmasta.

Koska taajuusmuuttajakäytöissä on tyypillisesti tasasuuntaajan pulssiluvulle ominaisia yliaaltoja, standardissa on oma määritelmä näiden vähentämiseksi. Tasasuuntaajan pulssiluvun perusteella lasketaan yhtälön 5 avulla kerroin, jolla voidaan korottaa korkeampien taajuuksien yliaaltovirtojen suurimpia sallittuja arvoja. Taulukosta 4 nähdään kertoimelle perustuvat yliaaltokomponentit, joiden virtoja on tällöin vähennettävä neljännes (8, s. 9).

$$\text{kerroin} = \sqrt{\frac{\text{pulssiluku}}{6}} \quad (5)$$

Taulukko 4. Tasasuuntaimen pulssilukuun perustuvat harmonisten yliaaltokomponenttien korjauskertoimet (8, s. 9)

| Harmonics orders limited to 25% of values given in Table 2, Table 3, and Table 4 | Multiplier |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 5, 7 | 1.4 |
| 5,7,11,13 | 1.7 |
| 5,7,11,13,17,19 | 2.0 |
| 5,7,11,13,17,19,23,25 | 2.2 |
| ↓ | ↓ |

4.3 Mittaustekniikoita ja tarkkuuksia koskevat standardit

Sähkön laatua on tärkeää arvioida, jotta sähkö olisi tarpeeksi häiriötöntä yrityksille ja kuluttajille. Verkon häiriöitä mitattaessa ja analysoitaessa tärkeimpiä muuttujia ovat jännite, virta, taajuus, vaiheiden symmetrisyys, jännitekuopat ja -kohoumat, harmoniset ja epäharmoniset yliaallot, välkyntä sekä hetkelliset transienttiyljännitteet.

Vaikka jännitteen tehollisarvo ja kokonaissärö ovat olleet jo pitkään standardisoituja, sähkön laadun mittaamiselle tuli vasta vuonna 2008 standardit, jotka määrittelevät riittävän tarkasti hyväksyttävät mittausten menetelmät ja -laitteet. Uudistetussa standardissa IEC 61000-4-30 ed. 2.0 otetaan huomioon eri mittauslaitteiden epätarkkuudet. Taulukossa 5 (ks. seur. s.) määritellään mittalaitteiden toleranssit ja mittausalueet. Laitteet kuuluvat standardin määrittelemään A-luokkaan. (9 s. 1.)

Taulukko 5. A-luokan mittalaitteiden vaatimukset; PQ1000 on standardin täyttävä viranomaisen hyväksymä mittalaite (9, s. 1)

| Parameter | Ranges | | Uncertainty Tolerances | |
|-------------------|----------------------------------------|-----------|------------------------|----------|
| | IEC | PQ1000 | IEC | PQ1000 |
| Frequency | 50 Hz \pm 7,5 Hz 60 Hz \pm 9 Hz | | \pm 10 mHz | <2,5 mHz |
| Voltage TrueRMS | 10 ~ 150 % UDIN | 10 ~ 200% | \pm 0,1% | <0,025% |
| Current | Acc. Traducer Range | | \pm 0,1% FS | <0,025% |
| Flicker PST/PLT | 0,2 ~ 10 | 0,2 ~ 20 | \pm 5% | <2,5% |
| Unbalance u2 y u0 | 0 ~ 5% | 0 ~ 100% | \pm 0,15% | <0,05% |
| Voltage Harmonics | 0 ~ 200% | | \pm 5% | <1% |
| Interharm. | $\Delta V/V @$ PST = 2 | | \pm 5% | <1% |

Lisäksi standardissa on maininta luokista S ja B, jotka ovat valmistajien määriteltävissä, toisin kuin virallinen A-luokka.

4.3.1 Mittausajanjaksot

Standardi määrittelee neljä mittauksissa käytettävää aikajaksoa. Lyhyt 10 perusjaksoa käsittävä sarja (60 Hz:n järjestelmässä 12 perusjaksoa) on tarpeellinen, jotta verkkoanalysaattori voi näyttää tasaisempaa tulosta laskemalla keskiarvoja mittaustuloksista. 15 edellä mainittua lyhyttä sarjaa muodostaa yhdessä 3 sekunnin mittausjakson. Lisäksi yleisiä mittausajanjaksoja on näistä muodostetut 10 minuutin ja 2 tunnin mittausjaksot. Näitä mittausjaksoja tulisi käyttää kaikissa mittauksissa mikäli mahdollista.

Mitattaessa on tärkeää, että laitteessa on tarkka aikareferenssi. Mitattaessa 50 Hz:n järjestelmää epätarkkuus saa olla vain 20 ms, ja aika on voitava synkronoida joko etänä (esim. GPS) tai paikallisesti. Synkronoinnin estyessä aika ei saa poiketa yli sekuntia vuorokaudessa. (9, s. 1.)

4.3.2 Standardin mukaiset mittalaitteet

Standardi suosittelee taajuuden määrittämiseksi jännitteen nolakohtien määrän laske- mista 10 s:n ajanjaksolta, mutta myös muita menetelmiä voidaan käyttää, mikäli tarkkuu- det ovat samoja. Nimellisjännitteen ollessa 10 % - 150 %, mittalaitteen epätarkkuus te- hollisjännitettä määritettäessä saa olla korkeintaan 0,1 %. Yliaaltoja mitattaessa yksittäi- set komponentit tulee pystyä määrittelemään 50. komponenttiin asti. Tarkempia määri- tyksiä yliaalloista löytyy niitä käsittelevästä standardista IEC 61000-4-7. (9, s. 2.)

Standardi määrää mittalaitteen kestämiin tietyt arvot ilman, että mittatarkkuus kärsii. Mittalaitteiden hyväksyminen varmistetaan testaamalla sekä laitteistoa että ohjelmistoa. Standardissa on esimerkkilaitteena ECAMECin PQ1000-analysaattori, joka on kalibroitu Fluke 6100A -kalibroitilaitteella USA:n viranomaisten valvomassa laboratoriossa, jotta epätarkkuudet ja laitteiden turvallisuus pystytään vahvistamaan virallisesti (9, s. 2). Mit- talaite on hyvin tarkka ja täyttää standardin tiukimman A-luokan, mutta myös kallis vaa- tivan laitteiston takia. Kuvassa 3 on tässä työssä käytetty Fluken analysaattori, joka täyt- tää myös saman luokan vaatimukset. Standardissa määritellään mittalaitteiden raken- netta ja toimintaa tarkemmin, mutta kaikkea ei käsitellä tässä työssä.



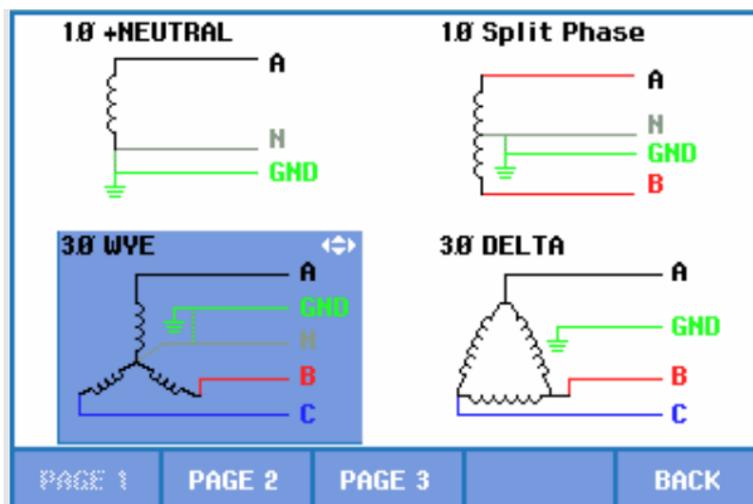
Kuva 3. Vasemmalla PQ1000-analysaattori (10, s. 1); oikealla työssä käytetty Fluke 435 II

5 Nosturin mittaaminen

5.1 Mittausten valmistelu

Yrityksellä oli jo valmiiksi hankittuna Fluke 435 II -analysointilaitteisto, joka sopii hyvin nosturin verkkovaikutusten mittaamiseen. Verkkanalysointilaitteen mukana tulee neljä virta-anturia virtojen mittaamiseen, neljä jännitteen mittaamiseen soveltuvaa johtoa ja hauenleukaa, sekä maadoitusjohdin. Analysointilaitteella voidaan mitata kaikkia vaiheita samanaikaisesti ja valita tallennettavat suureet. Tärkeimmät mitattavat arvot ovat yliaaltopitoisuudet.

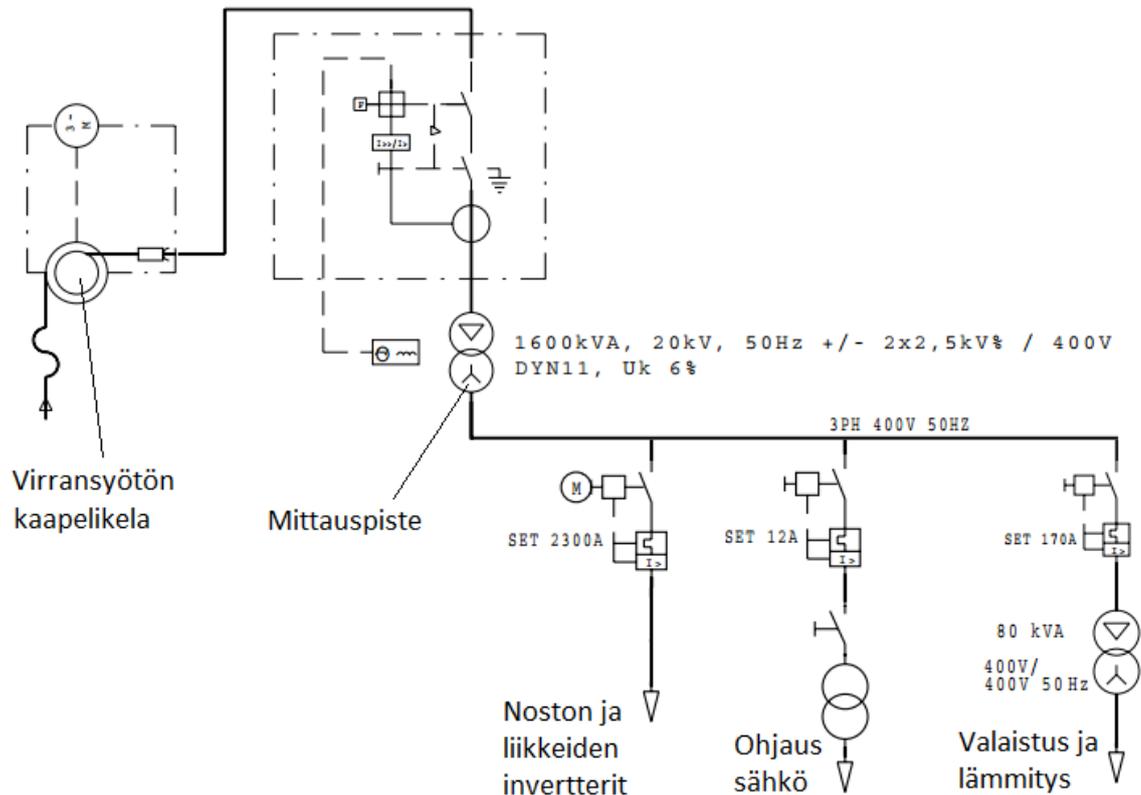
Laitteen kahdeksan gigatavun tallennustilaan mahtuu useita tunteja mittauksia. Analysointilaitteisto on palautettu tehdasasetuksille ennen mittauksia. Mittauksia varten analysointilaitteesta on tärkeää valita oikea taajuus, nimellisjännite, keskiarvoistusaika sekä johdotuskytkentä (kuva 4). Erillisen nolajohtimen puuttuessa jännitteen nolajohtimen kytketään maihin.



Kuva 4. Mittauksissa käytettävä kytkentä (11, s. 128)

Mittauksia varten nosturia pyritään ajamaan mahdollisimman kauan, jotta saataisiin useita standardien mukaisia mittajaksoja kuorman kanssa. Mittauksiin voi sisältyä myös jaksoja, jolloin nosturi on tyhjäkäynnillä. Standardeissa mainittu viikon mittausjakso ei ole nosturin verkkovaikutusten tutkimisen kannalta mielekäs. Nosturin jaksottaisen käytön takia riittää, että nosturia ajetaan esimerkiksi mittausstandardeissa mainittu kaksi tuntia. Tuloksista on tärkeää osata erotella myöhemmin eri ajon vaiheet, jotta voidaan muun muassa määrittellä virran kokonaissärö kuormalla ja ilman kuormaa.

Analysaattorin tehdasasetuksista on syytä vaihtaa keskiarvoistusaika 3 sekuntiin vastaamaan paremmin standardeja. Mittaustiheys on oletuksena 10/12 sykliä eikä sitä tarvitse muuttaa. Harmonisten yliaaltojen mittausasetus kannattaa vaihtaa suhteellisarvosta tehollisarvoon. Näin Fluken ohjelmistolla saadaan suoraan näkyviin virran TDD-arvot. Analysaattorin muut asetukset pyritään pitämään tehdasasetuksilla. Mittauspiste on satamanosturin sähköhuoneessa keskijännitemuuntajan toisiossa (kuva 5).



Kuva 5. Nosturin sähköhuoneessa olevan muuntajan mittauspiste

5.2 Mittausten suoritus

Mittaukset suoritettiin Konecranesin valmistamaan STS-nosturiin. Nosturin nostokapasiteetti on 50 tonnia. Mittauksia varten oli mentävä nosturin hissillä pääkannattajan päällä olevaan sähköhuoneeseen. Analysaattori kiinnitettiin muuntajan toisiossa ja pääkatkaisijan väliin.



Kuva 6. Analysaattorin kytkeminen

Jännitepihdit kytkettiin kosketussuojan taakse kuvassa 6 näkyviin liittimiin. Virta-anturit kiinnitettiin muuntajalta tulevien kaapeleiden ympärille niin, että lenkeissä näkyvät nuolet osoittavat kuorman suuntaan. Maadoituskiskoon kiinnitettiin maadoituspihtien lisäksi nol-lajohtimen virta-anturi ja jännitepihdit.

Muuntajan toision tähtipisteestä ei lähde erillistä nollakaapelia. Sieltä lähtee kuitenkin maadoituskaapeli, joka on ketjutettu sähköhuoneen kaikkien sähkökaappien maadoitus-kiskoihin. Mittaamalla maadoituskaapelia nol-lajohtimena voidaan havaita mahdollisia vuotovirtoja.

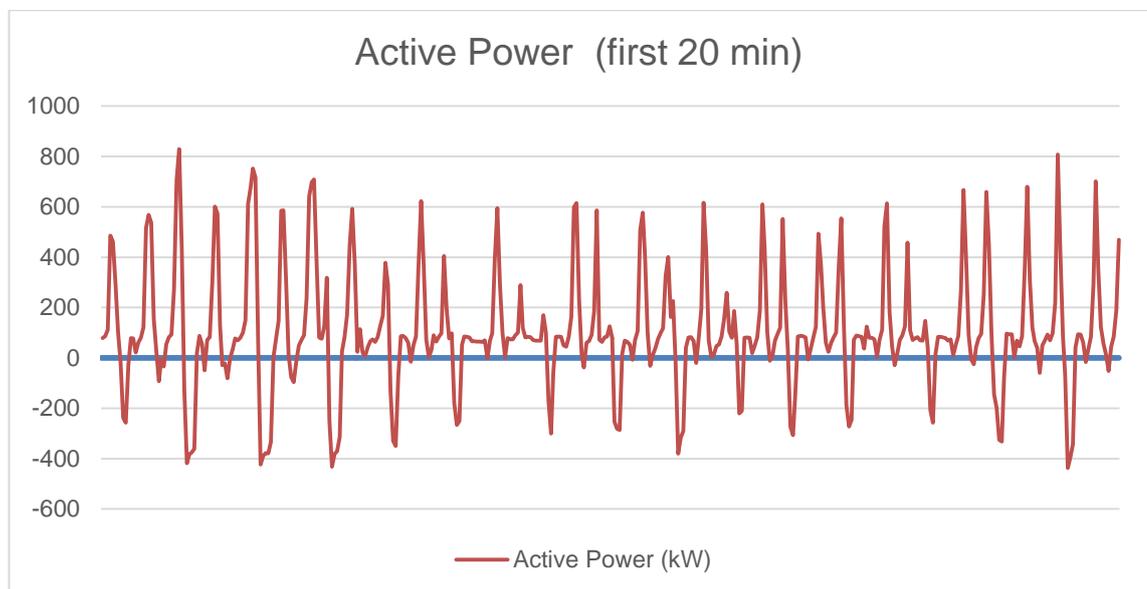
Analysaattorista valittiin *logger*-toiminto, jonka avulla useita eri suureita voidaan valita tallennettavaksi laitteen muistiin. Tässä tapauksessa analysaattorista valittiin jännitteet, virrat, tehot, tehokerroin, energia, virran ja jännitteen harmoniset yliaallot sekä taajuus. Lisäksi analysaattorin asetuksista tarkistettiin oikea kytkentä ja muut asetukset.

Analysaattori jätettiin mittaamaan nosturia hyvissä ajoin ennen sen käyttöä. Sähköhuoneessa oli pistorasioita, joten analysaattori saatiin kytkettyä verkkovirtaan mittausten ajaksi. Kun satamaan tuli laiva purettavaksi, katsottiin kellosta aikaa kaksi tuntia. Nosturilla purettiin kontteja laivasta koko tämä aika, joten mittaustulokset antavat realistisen kuvan nosturin verkkovaikutuksista. Mittausten jälkeen tulokset siirrettiin tietokoneelle ja ne rajattiin tasan kahteen tuntiin.

6 Mittaustulosten käsittely

6.1 Tehonkulutus

Kahden tunnin aikana nosturi kulutti energiaa 212 kWh. Energian kulutusta vähensi taajuusmuuttajien kyky syöttää energiaa verkkoon päin. Vaihto- ja tasasuuntaajat käyttävät yhteistä välipiiriä. Kontin laskun aikana noston moottori toimii generaattorina ja nostaa välipiirin jännitettä, jolloin ylimääräinen teho syötetään takaisin verkkoon. Suurin hetkellinen verkosta otettu teho oli 983 kW. Suurin nosturista verkkoon syötetty teho oli 437 kW. Kuvasta 7 nähdään, että satamanosturin tehonkulutus on hyvin jaksottaista.



Kuva 7. Nosturin kuluttama pätöteho ensimmäisen 20 minuutin aikana

6.2 Harmoniset yliaaltojännitteet

Taulukosta 6 nähdään, ettei yksikään harmonisen komponentin tai kokonaissärön 3 sekunnin keskiarvo ylitä IEEE:n asettamia raja-arvoja. Taulukko on osa mittauksia varten luotua mittauspöytäkirjapohjaa, joka näyttää standardin hyväksymät arvot automaattisesti vihreällä taustavärillä. Raja-arvot on saatu taulukosta 2 käyttäen standardin mukaista korjauskerrointa 1,5.

Taulukko 6. Jännitteen harmoniset komponentit ja kokonaissärö 2 tunnin keskiarvolla sekä suurimmilla yksittäisillä 3 sekunnin keskiarvoilla

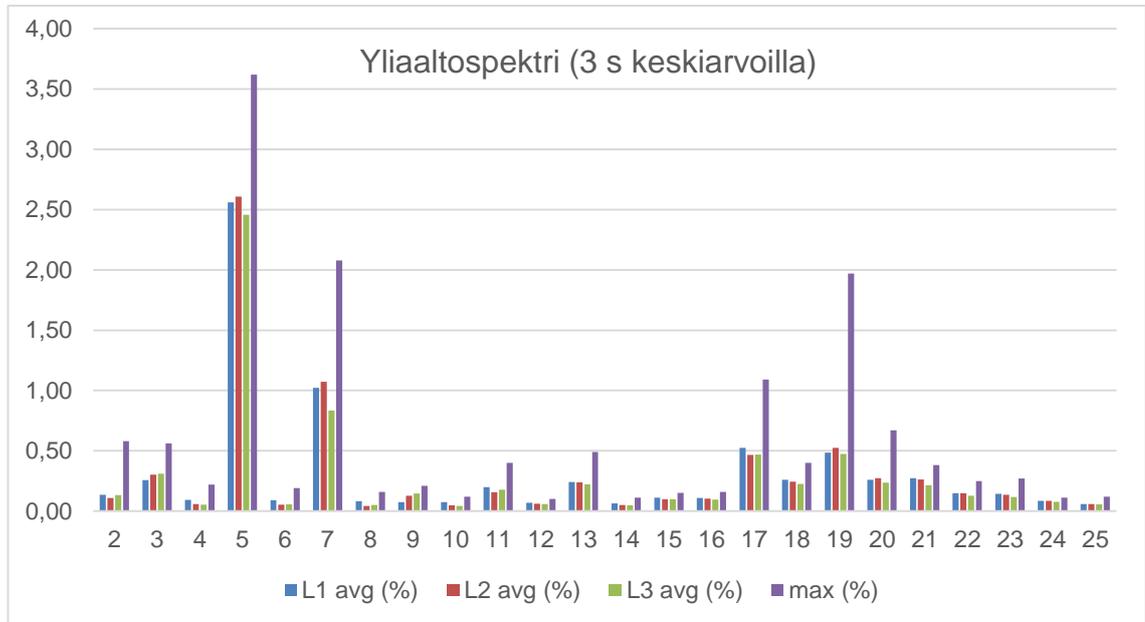
| Harmonic | L1 avg | L2 avg | L3 avg | max | IEEE (3s) |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 1 | 243,67 | 242,9 | 244,5 | 245,61 | - |
| 2 | 0,14 | 0,11 | 0,13 | 0,58 | 4,5 |
| 3 | 0,26 | 0,30 | 0,31 | 0,56 | 4,5 |
| 4 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,22 | 4,5 |
| 5 | 2,56 | 2,61 | 2,46 | 3,62 | 4,5 |
| 6 | 0,09 | 0,05 | 0,06 | 0,19 | 4,5 |
| 7 | 1,02 | 1,07 | 0,83 | 2,08 | 4,5 |
| 8 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,16 | 4,5 |
| 9 | 0,07 | 0,13 | 0,14 | 0,21 | 4,5 |
| 10 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,12 | 4,5 |
| 11 | 0,20 | 0,16 | 0,18 | 0,40 | 4,5 |
| 12 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,10 | 4,5 |
| 13 | 0,24 | 0,24 | 0,22 | 0,49 | 4,5 |
| 14 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,11 | 4,5 |
| 15 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 4,5 |
| 16 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,16 | 4,5 |
| 17 | 0,52 | 0,47 | 0,47 | 1,09 | 4,5 |
| 18 | 0,26 | 0,24 | 0,22 | 0,40 | 4,5 |
| 19 | 0,48 | 0,52 | 0,47 | 1,97 | 4,5 |
| 20 | 0,26 | 0,27 | 0,24 | 0,67 | 4,5 |
| 21 | 0,27 | 0,26 | 0,21 | 0,38 | 4,5 |
| 22 | 0,15 | 0,15 | 0,13 | 0,25 | 4,5 |
| 23 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,27 | 4,5 |
| 24 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,11 | 4,5 |
| 25 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,12 | 4,5 |
| THD | 1,22 | 1,25 | 1,15 | 1,64 | 7,5 |

Suomessa noudatettavassa EN-SFS -standardissa on raja-arvot vain harmonisten yliaaltojen 10 minuutin keskiarvoille. Taulukossa 7 vertaillaan edellisistä 3 sekunnin keskiarvoista laskettuja 10 minuutin keskiarvoja. Taulukkoon on koottu näistä keskiarvoista suurimmat ja vertailtu niitä sekä eurooppalaisiin että amerikkalaisiin standardeihin. Myös kaikki 10 minuutin keskiarvot alittavat standardien asettamat raja-arvot.

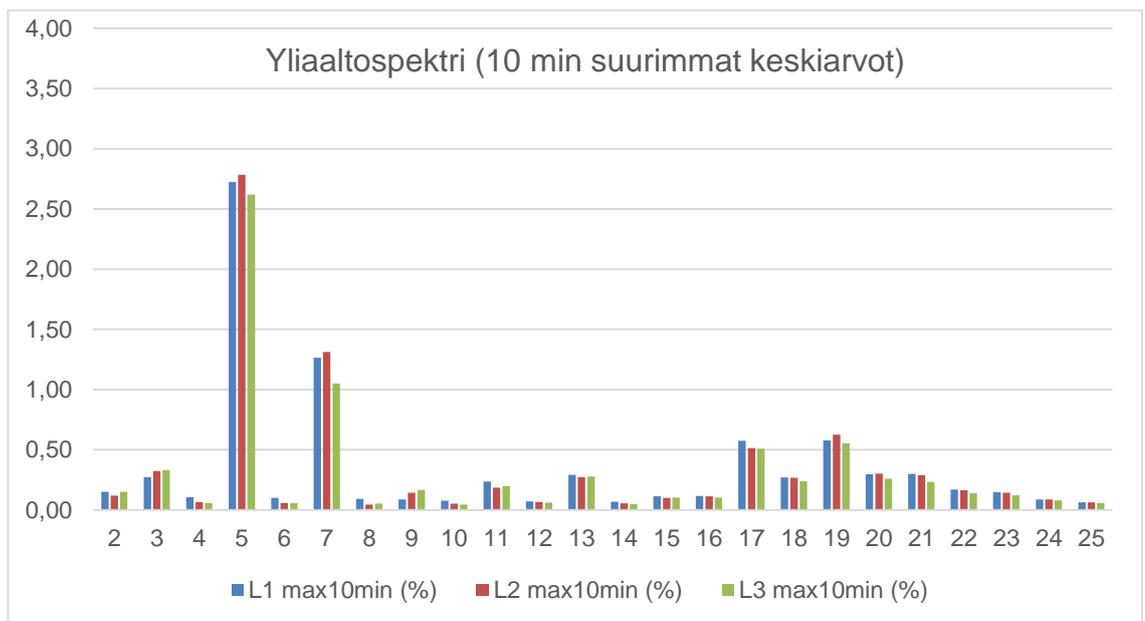
Taulukko 7. Jännitteen harmoniset komponentit ja kokonaissärö suurimmilla 10 minuutin keskiarvoilla

| Harmonic | L1 max10min | L2 max10min | L3 max10min | EN (10min) | IEEE (10min) |
|------------|-------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| 1 | 244,3252 | 243,6298 | 245,0399 | - | - |
| 2 | 0,15 | 0,12 | 0,15 | 2 | 3 |
| 3 | 0,27 | 0,32 | 0,33 | 5 | 3 |
| 4 | 0,11 | 0,07 | 0,06 | 1 | 3 |
| 5 | 2,72 | 2,78 | 2,62 | 6 | 3 |
| 6 | 0,10 | 0,06 | 0,06 | 0,5 | 3 |
| 7 | 1,26 | 1,31 | 1,05 | 5 | 3 |
| 8 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0,5 | 3 |
| 9 | 0,09 | 0,14 | 0,17 | 1,5 | 3 |
| 10 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,5 | 3 |
| 11 | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 3,5 | 3 |
| 12 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,5 | 3 |
| 13 | 0,29 | 0,27 | 0,28 | 3 | 3 |
| 14 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,5 | 3 |
| 15 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,5 | 3 |
| 16 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,5 | 3 |
| 17 | 0,57 | 0,51 | 0,51 | 2 | 3 |
| 18 | 0,27 | 0,27 | 0,24 | 0,5 | 3 |
| 19 | 0,58 | 0,63 | 0,56 | 1,5 | 3 |
| 20 | 0,30 | 0,30 | 0,26 | 0,5 | 3 |
| 21 | 0,30 | 0,29 | 0,23 | 0,5 | 3 |
| 22 | 0,17 | 0,16 | 0,14 | 0,5 | 3 |
| 23 | 0,15 | 0,14 | 0,12 | 1,5 | 3 |
| 24 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,5 | 3 |
| 25 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 1,5 | 3 |
| THD | 1,27 | 1,30 | 1,20 | 8 | 5 |

Yliaallot on usein tapana esittää myös spektrimuodossa. Spektristä nähdään helpommin mitkä yliaaltokomponentit ovat ongelmallisia. Kuvissa 8 - 9 esitetään edellisten taulukoiden 6 - 7 kaikki suhteellisarvot spektrimuodossa. Kuvista korostuu juuri 6-pulssiselle taseasuuntaajakäyttöille tyypillisiä yliaaltokomponentteja, kuten perustaaajuuden 5. ja 7. monikerta.



Kuva 8. Yliaaltospektri jännitteiden 2 tunnin aikana mitatuista keskiarvoista sekä suurimmista yksittäisistä 3 sekunnin keskiarvoista



Kuva 9. Yliaaltospektri jännitteiden suurimmista 10 minuutin keskiarvoista

6.3 Harmoniset yliaaltovirrat

Fluken *Power Log* -ohjelmisto laskee suoraan virran TDD-särön. Ohjelmisto käyttää automaattisesti suurinta yksittäistä virran arvoa, tässä tapauksessa 1 465 ampeeria. Taulukossa 8 esitetään vaiheiden keskimääräiset TDD-säröt sekä suurin yksittäinen 3 sekunnin TDD-arvo verrattuna IEEE:n mukaiseen kertoimella korjattuun raja-arvoon.

Taulukko 8. Virran harmoninen kokonaissärö täydellä kuormalla (TDD) 3 sekunnin keskiarvoilla laskettuna

| L1 avg | L2 avg | L3 avg | max | EN-SFS | IEEE (3s) |
|--------|--------|--------|------|--------|-----------|
| 2,63 | 2,59 | 2,62 | 6,37 | - | 16 |

Taulukossa 9 esitetään suurimmat 10 minuutin keskiarvoilla lasketut TDD-arvot. Näitä 10 minuutin mittauksia mahtui kahteen tuntiin tasan 12 kappaletta. Kaikki 10 minuutin keskiarvot läpäisivät IEEE:n vaatimukset.

Taulukko 9. Virran harmoninen kokonaissärö täydellä kuormalla (TDD) 10 minuutin keskiarvoilla laskettuna

| L1 max10min | L2 max10min | L3 max10min | EN-SFS | IEEE (10 min) |
|-------------|-------------|-------------|--------|---------------|
| 2,72 | 2,68 | 2,70 | - | 8 |

EN-standardit eivät määritelleet suoraan TDD-arvoille rajoja, kuten standardeja käsittelevässä luvussa todettiin. Taulukossa 8 käytetty kolmen sekunnin raja-arvo on otettu suoraan IEEE:n kymmenen minuutin raja-arvosta käyttämällä standardissa esitettyä korjauskerrointa 2.

6.4 Tehokerroin

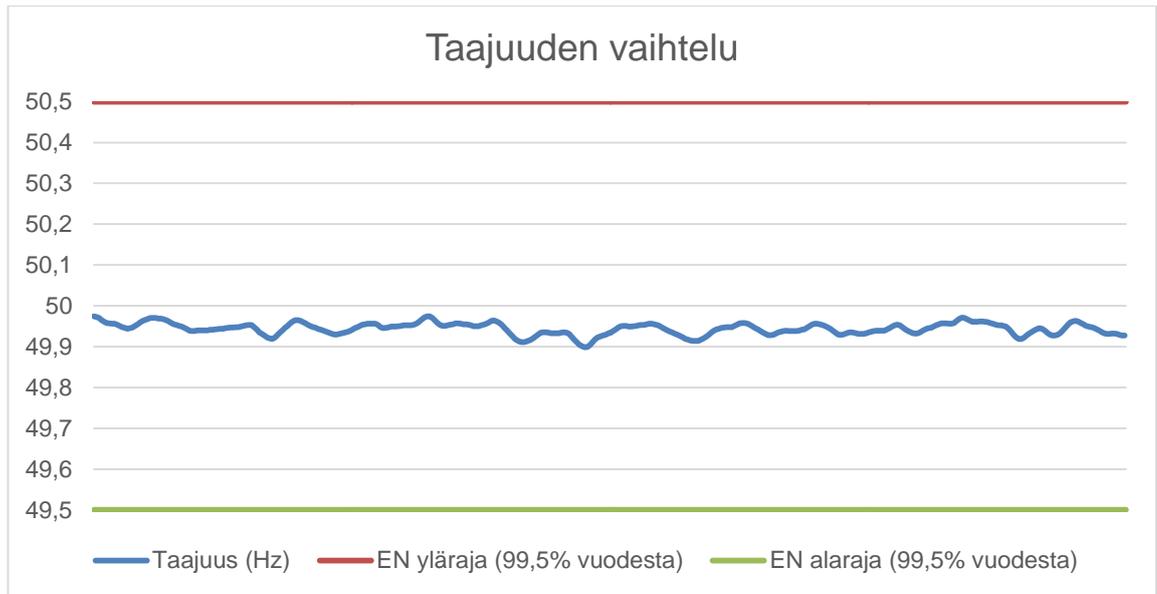
Tehokerroin (PF, Power Factor) tarkoittaa kokonaispätötehon ja -näennäistehon suhdetta. $\cos \phi$ tarkoittaa vain perustaajuisen pätö- ja näennäistehon suhdetta, joka on usein hyvin lähellä tehokerrointa. $\cos \phi$:stä voidaan käyttää myös termiä DPF (Displacement Power Factor).

Tehokertoimet olivat hyviä täydellä kuormituksella. Kun nosturin ottama pätöteho oli vähintään 60 % huippuarvostaan, tehokerroin oli keskimäärin 0,935 ja $\cos \phi$ 0,945. Näin ollen nosturi ei kuluta ajossa ollessaan paljoa loistehoa. Ylimääräinen loisteho aiheuttaisi jännite-, teho- ja energiahäviöitä kaapeleissa ja muuntajissa. Kaapelit ja muuntajat pitäisi myös mitoittaa suuremmiksi. Lisäksi kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj perii jakeluverkkoyhtiöiltä loistehomaksua, mikäli induktiivisen loistehon osuus on yli 16 % tai kapasitiivisen loistehon osuus yli 4 % pätötehosta. Jakeluverkkoyhtiöt taas siirtävät loistehomaksut kuluttajien maksettaviksi ja näin ollen ohjaavat verkon asiakkaita omien kompensointilaitteiden käyttämiseen. (12, s. 5.)

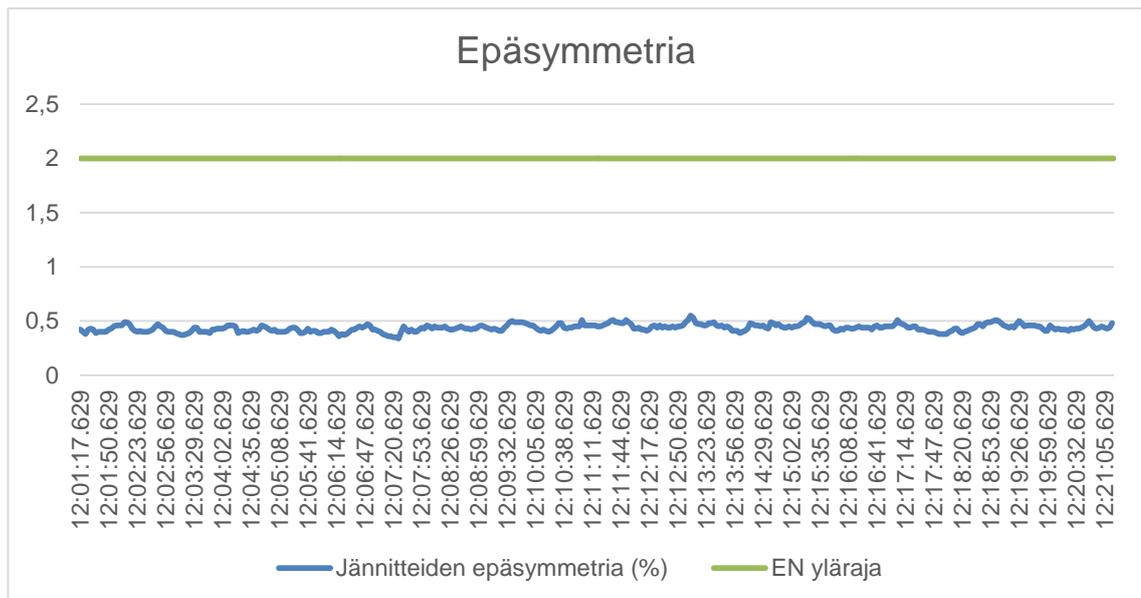
6.5 Muut sähkönlaatuun vaikuttavat tekijät

Myös muut SFS-EN-standardeissa mainitut vaatimukset täyttyivät. Taajuuden vaihteluväli oli 49,90 - 50,04 Hz. Kuvassa 10 (ks. seur. s.) kuvataan taajuuden vaihtelua suhteessa EN-standardin sallimiin rajoihin.

Vaihejännitteissä ei esiintynyt merkittävää epäsymmetriaa, suurimmillaan se oli vain 0,55 % (kuva 11, ks. seur. s.).

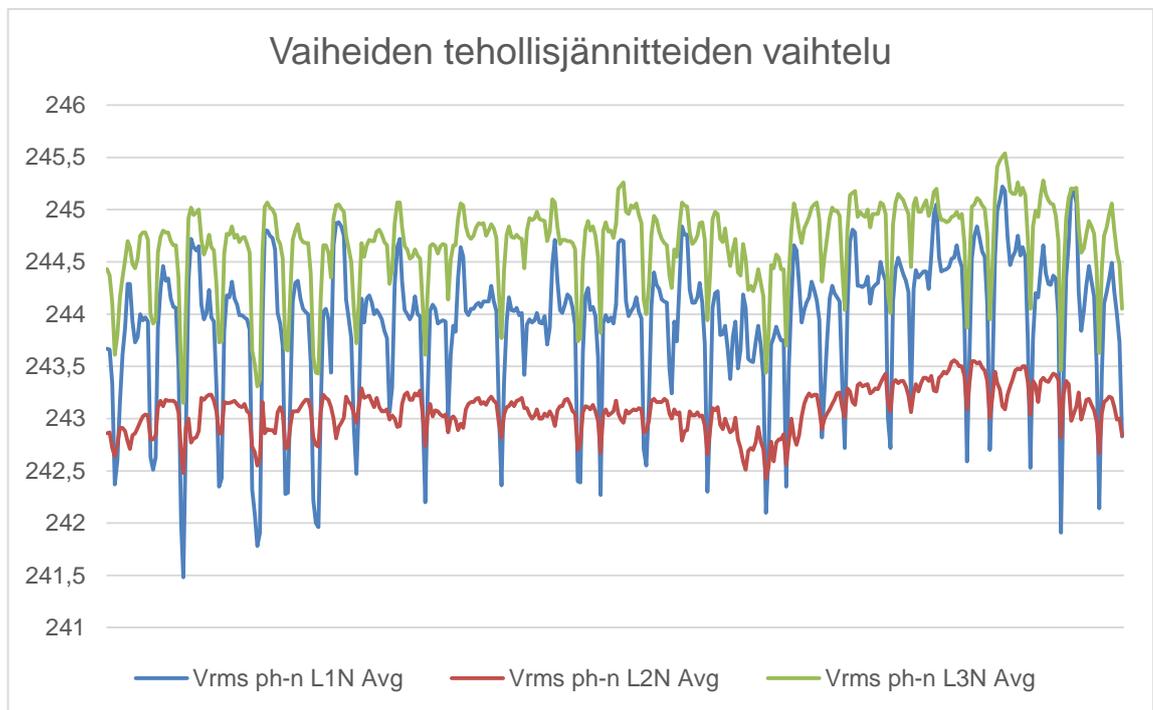


Kuva 10. Taajuuden vaihtelu ensimmäisen 20 minuutin aikana



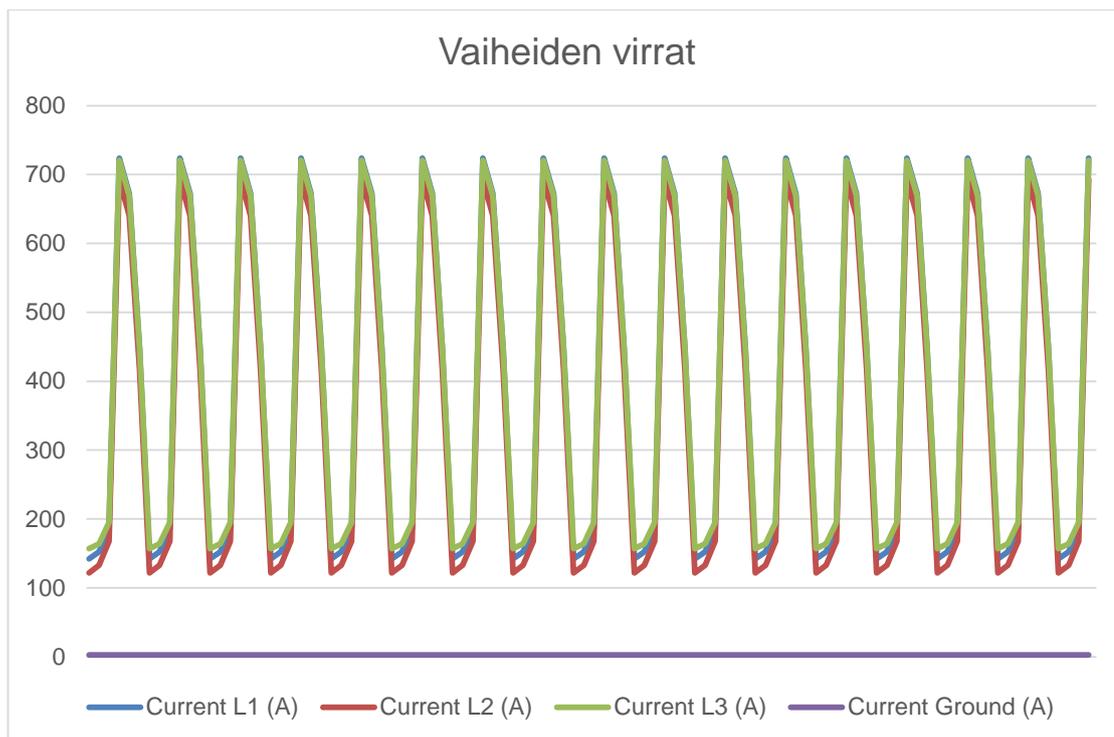
Kuva 11. Jännitteiden suhteellinen epäsymmetria ensimmäisen 20 minuutin aikana

Vaihejännitteet olivat 240,9 - 245,7 V, eivätkä siis kertaakaan ylittäneet standardien asettamia rajoja (kuva 12).



Kuva 12. Vaihejännitteet ensimmäisen 20 minuutin aikana

Analysaattorin kytkentätapa mahdollisti virran seuraamisen myös maadoitusjohtimessa. Kuvassa 13 (ks. seur. s.) esitetään kaikkien vaiheiden virrat sekä maadoituskaapelissa kulkeva virta ensimmäisen viiden minuutin ajalta. Kuten kuvaajasta nähdään, maadoituksessa ei esiinny merkittävää vuotovirtaa.



Kuva 13. Vaiheiden ja maadoituksen virrat ensimmäisen viiden minuutin aikana

6.6 Mittauspöytäkirjapohja

Fluken mukana tulevan *Power Log* -ohjelmiston avulla on mahdollista ajaa ulos kaikki mitatut arvot tekstitiedostona. Tätä ominaisuutta hyödyntämällä tehtiin valmis Excel-pohja, johon tekstitiedoston sisällön voi helposti kopioida. Tätä varten pöytäkirjapohjasta löytyy omat välilehdet harmonisille virroille ja jännitteille, tehoille sekä tehokertoimille. Pöytäkirjan yhdeltä välilehdeeltä löytyy tarkat ohjeet Fluken mittausasetuksista sekä tietojen tuonnista Excelliin.

Pohjan etusivulle (liitteet 1 - 2) tulostuu vaihekohtaisesti harmonisten komponenttien särröt sekä kokonaissärö. Excelin soluille on luotu säännöt, joiden mukaan ne vaihtavat väriä. Jos harmoninen komponentti tai kokonaissärö alittaa sekä SFS-EN että IEEE standardien rajat, solu värjäytyy vihreäksi. Jos arvo täyttää vain toisen standardin ehdot, solu on keltainen. Jos kumpaakaan standardia ei täytetä, solu on punainen. Lisäksi etusivulta nähdään suoraan tehokerroin, jonka laskemisessa on huomioitu vain kuormituksen aikaiset tehokertoimen arvot. Excelissä on myös omat välilehdet, joille tulostuu kaaviot pätö-, lois- ja näennäistehosta ensimmäiseltä 20 minuutilta.

7 Yhteenveto

Työn tarve perustui Konecranesin asiakkaiden kiinnostukseen saada tietoa nosturin verkkovaikutuksista. Työssä oleellisena osana oli selvittää, mitkä verkon ominaisuudet ovat tärkeitä asiakkaan ja verkkoyhtiön näkökulmasta. Kun tarvittavat mittaustulokset on kerran valikoitu ja käsitelty helposti luettavaan muotoon, tulevaisuudessa riittää pelkkä mittaaminen ja arvojen siirtäminen pöytäkirjapohjaan. Käsittelemättömät mittaustulokset saattavat olla myös harhaanjohtavia. Esimerkiksi pelkkä tehokerroin ei sellaisenaan anna järkevää kuvaa nosturin loistehon tarpeesta, ennen kuin sitä verrataan senhetkiseen tehonkulutukseen. Pöytäkirjapohja osaakin ottaa huomioon vain ne tehokertoimen arvot, jotka on mitattu pätötehon ollessa yli 60 % huippuarvostaan.

Pöytäkirjapohja vertailee samaan aikaan mittaustuloksia sekä EN- että IEEE -standardeihin. Koska Konecranes on kansainvälinen yritys, on tärkeää huomioida myös muualla maailmassa käytettävät standardit. Näin esimerkiksi USA:ssa mitatut arvot voidaan tulostaa ulos Excelistä yhtä helposti ja antaa suoraan paikalliselle asiakkaalle.

Insinööriyössä oli selkeä tavoite eli tutustuminen satamanosturin verkkovaikutuksiin standardien näkökulmasta. Tavoite toteutui erinomaisesti, ja lisäksi työn tuloksena syntyi mittauspöytäkirjapohja nostureiden verkkovaikutusten selvittämiseksi. Työssä myös tutustuttiin monipuolisen Fluke 435 II -analysoitsijan käyttöön ja selvitettiin parhaimmat mahdolliset mittaasetukset verkkovaikutusten tutkimisen kannalta. Työn kannalta oli myös hyvä, että nosturi täytti kaikki standardien vaatimukset. Mikäli nosturin verkon laatu ei olisi täyttänyt vaatimuksia, sitä olisi pitänyt tarkastella uudestaan nosturin ollessa poissa käytöstä. Näin pystytään poissulkemaan muiden samassa verkossa olevien laitteiden vaikutus mittaustuloksissa esiintyviin häiriöihin.

Työn alussa oli jo selvää, että jakeluverkkoja koskevia standardeja on syytä tarkastella kriittisesti nostureiden jaksottaisen käytön takia. Standardeissa esimerkiksi kehoitetaan mittaamaan yliaaltoja viikon ajalta 10 minuutin keskiarvoilla. Kahden tunnin jatkuvan konttien purkamisen aikana yksikään standardeissa mainittu lyhyempi kolmen sekunnin arvo ei kuitenkaan ylittänyt sille asetettua maksimiarvoa. Näin voidaan suurella varmuudella todeta, etteivät arvot ylity viikon kestävällä mittauksellakaan. Nosturi on osan viikosta poissa käytöstä, joten se rasittaa verkkoa vain laivan lastaus- ja purkuhetkellä.

Verkkovaikutuksia tutkittaessa olisi mielenkiintoista mitata arvoja myös suoraan muuntajan ensiöstä ja verrata tuloksia toisista saatuihin tuloksiin. Jos teollisuuslaitos omistaa oman keskijännitemuuntajan, IEEE:n mukaan mittauspisteenä käytetään usein muuntajan yläjännitepuolta (8, s. 10). Tämä vaatisi kuitenkin mittamuuntajan asentamista ensiöön, sillä työssä käytetty analysaattori kestää vain 1 000 voltin jännitettä. Arvoissa saataisi olla pientä eroavaisuutta, mutta työn onnistumisen kannalta tällä ei ollut kuitenkaan merkitystä. Taulukko 2 määrittää harmonisille yliaaltojännitteille eri raja-arvot riippuen kummalla puolella päämuuntajaa mittauspiste (PCC) sijaitsee. Mittauspöytäkirjassa on kuitenkin käytetty varmuuden vuoksi keskijännitepuolelle tarkoitettuja hieman tiukempia arvoja.

Lähteet

- 1 Konecranes Suomi. Liiketoiminta-alueet. Verkkosivu.
<<http://www.konecranes.fi/tietoa-konecranesista/business-areas>>
Luettu: 5.11.2014
- 2 Konecranes Suomi. Laiturikonttinosurit. Verkkosivu.
<<http://www.konecranes.fi/laitteet/konttienkasittelynosturit/laiturikonttinosurit>>
Luettu: 5.11.2014
- 3 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL Oy: Männistö, Matti – Hietalahti, Lauri – Seesvuori, Reino – Seesvuori, Vesa – Wilén, Tarmo. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 4 Korpinen, Leena – Mikkola, Marko – Keikko, Tommi – Falck, Emil. Yliaalto-opus. Verkkodokumentti.
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
Luettu: 6.11.2014
- 5 Konecranesin sisäinen verkko. Service manual for Dynareg vector II.
- 6 Sesko. Ajankohtaista sähkö- ja elektroniikka-alan standardoinnista. Verkkodokumentti.
<http://www.sesko.fi/attachments/standardivuosi luettelo_2010web.pdf>
Luettu: 6.11.2014
- 7 Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS-EN 50160. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Verkkodokumentti.
<<http://sales.sfs.fi/sfs/servlets/ProductServlet?action=productInfo&productID=241486>>. Luettu 24.10.2014.
- 8 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE. Revisions to IEEE Standard 519-1992. Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Verkkodokumentti.
<<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.metropolia.fi/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1668665&queryText%3DIEEE+Std+519-1992+revision>>
Luettu 24.10.2014
- 9 Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE. An IEC 61000-4-30 class a. Power quality monitor: Development and performance analysis. Verkkodokumentti.
<<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.metropolia.fi/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6128813&queryText%3Diec+61000-4-30>>
Luettu: 24.10.2014
- 10 Ecomec Tecnologia. PQ1000-V Power quality analyzer. Verkkodokumentti
<<http://www.ecamec.com.ar/pdf/PQ1000-V%20Brochure.pdf>>
Luettu: 6.11.2014

- 11 Fluke 434^{II}/435^{II}/437^{II} käyttöohje. Verkkodokumentti.
<http://www.tme.eu/de/Document/b8d8bd29c366f30ceb964a7e8ac5d4e2/F430-II_umfin0100.pdf>
Luettu: 7.11.2014

- 12 Loistehon hinnoittelu- ja kompensointiohje. Verkkodokumentti.
<https://www.tampereensahkolaitos.fi/sahkoverkkopalvelut/sahkoverkkoonliittyminen/TSV-urakoitsijalle/Documents/Loistehon%20hinnoittelu-%20ja%20kompensointiohje%20TSV_01-12-2012_internet.pdf>
Luettu: 30.1.2015

Mittauspöytäkirjapohjan ensimmäinen sivu

2.2.2015

Table
Version: 1
Author: Jesse Asunmaa

KONECRANES®
Lifting Businesses™

| Voltage THD 3s avg | Harmonic | L1 avg | L2 avg | L3 avg | max | IEEE (3s) |
|-----------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | 1 | 243,67 | 242,9 | 244,48 | 245,61 | - |
| | 2 | 0,14 | 0,11 | 0,13 | 0,58 | 4,5 |
| | 3 | 0,26 | 0,30 | 0,31 | 0,56 | 4,5 |
| | 4 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,22 | 4,5 |
| | 5 | 2,56 | 2,61 | 2,46 | 3,62 | 4,5 |
| | 6 | 0,09 | 0,05 | 0,06 | 0,19 | 4,5 |
| | 7 | 1,02 | 1,07 | 0,83 | 2,08 | 4,5 |
| | 8 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0,16 | 4,5 |
| | 9 | 0,07 | 0,13 | 0,14 | 0,21 | 4,5 |
| | 10 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | 0,12 | 4,5 |
| | 11 | 0,20 | 0,16 | 0,18 | 0,40 | 4,5 |
| | 12 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,10 | 4,5 |
| | 13 | 0,24 | 0,24 | 0,22 | 0,49 | 4,5 |
| | 14 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,11 | 4,5 |
| | 15 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 4,5 |
| | 16 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,16 | 4,5 |
| | 17 | 0,52 | 0,47 | 0,47 | 1,09 | 4,5 |
| | 18 | 0,26 | 0,24 | 0,22 | 0,40 | 4,5 |
| | 19 | 0,48 | 0,52 | 0,47 | 1,97 | 4,5 |
| | 20 | 0,26 | 0,27 | 0,24 | 0,67 | 4,5 |
| | 21 | 0,27 | 0,26 | 0,21 | 0,38 | 4,5 |
| | 22 | 0,15 | 0,15 | 0,13 | 0,25 | 4,5 |
| | 23 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,27 | 4,5 |
| | 24 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,11 | 4,5 |
| | 25 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,12 | 4,5 |
| | THD | 1,22 | 1,25 | 1,15 | 1,64 | 7,5 |

| Current TDD 3s avg | L1 avg | L2 avg | L3 avg | max | EN-SFS | IEEE (3s) |
|-----------------------|--------|--------|--------|------|--------|-----------|
| | 2,42 | 2,39 | 2,41 | 6,37 | - | 16 |

Power Factor: 0,935
Average when
 $P > 0,6 * P_{max}$

Mittauspöytäkirjapohjan toinen sivu

2.2.2015

Table
Version: 1
Author: Jesse Asunmaa

KONECRANES®
Lifting Businesses™

Voltage THD

10min avg

| Harmonic | L1 max10min | L2 max10min | L3 max10min | EN (10min) | IEEE (10min) |
|------------|-------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| 1 | 244,3252 | 243,6298 | 245,0399 | - | - |
| 2 | 0,15 | 0,12 | 0,15 | 2 | 3 |
| 3 | 0,27 | 0,32 | 0,33 | 5 | 3 |
| 4 | 0,11 | 0,07 | 0,06 | 1 | 3 |
| 5 | 2,72 | 2,78 | 2,62 | 6 | 3 |
| 6 | 0,10 | 0,06 | 0,06 | 0,5 | 3 |
| 7 | 1,26 | 1,31 | 1,05 | 5 | 3 |
| 8 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0,5 | 3 |
| 9 | 0,09 | 0,14 | 0,17 | 1,5 | 3 |
| 10 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,5 | 3 |
| 11 | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 3,5 | 3 |
| 12 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,5 | 3 |
| 13 | 0,29 | 0,27 | 0,28 | 3 | 3 |
| 14 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,5 | 3 |
| 15 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,5 | 3 |
| 16 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,5 | 3 |
| 17 | 0,57 | 0,51 | 0,51 | 2 | 3 |
| 18 | 0,27 | 0,27 | 0,24 | 0,5 | 3 |
| 19 | 0,58 | 0,63 | 0,56 | 1,5 | 3 |
| 20 | 0,30 | 0,30 | 0,26 | 0,5 | 3 |
| 21 | 0,30 | 0,29 | 0,23 | 0,5 | 3 |
| 22 | 0,17 | 0,16 | 0,14 | 0,5 | 3 |
| 23 | 0,15 | 0,14 | 0,12 | 1,5 | 3 |
| 24 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,5 | 3 |
| 25 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 1,5 | 3 |
| THD | 1,27 | 1,30 | 1,20 | 8 | 5 |

Current TDD

10min avg

| L1 max10min | L2 max10min | L3 max10min | EN-SFS | IEEE (10min) |
|-------------|-------------|-------------|--------|--------------|
| 2,72 | 2,68 | 2,70 | - | 8 |