

Muuntajan alajännitepuolella syntyvät häiriöt ja niiden eteneminen verkkoon

Rikhard Karlsson

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkötekniikka
Insinööri (AMK)

2016

Tekniikan ja liikenteen ala
Sähkötekniikka
Insinööri AMK

Tekijä	Rikhard Karlsson	Vuosi	2016
Ohjaaja	Ins. (AMK), Aila Petäjäjärvi		
Toimeksiantaja	Lapin AMK		
Työn nimi	Muuntajan alajännitepuolella syntyvät häiriöt ja niiden eteneminen verkkoon		
Sivu- ja liitemäärä	86 + 42		

Tämä opinnäytetyö oli tehty Lapin Ammattikorkeakoululle Kemin toimipisteen sähkövoimalaboratoriolle. Työn aiheena oli muuntajan alajännitepuolella syntyvät häiriöt ja niiden eteneminen verkkoon. Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa muuntajan alajännitepuolelle häiriötä ja tutkia, miten häiriöt etenevät verkkoon ja samalla tehdä Zimmer LMG500 sähkön laatuanalysointilaite pikaopas.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään häiriöitä SFS-EN 50160 -standardin avulla. Työssä esitellään laiteympäristöä, jossa opinnäytetyö tehtiin. Opinnäytetyössä laskettiin verkon vastusarvot ja muuntajien vastusarvot. Lähdemateriaaleina käytettiin alan kirjallisuutta ja Internetistä saatuja alan materiaaleja.

Työssä mitattiin muuntajien yläjännitepuolet sähkön laatuanalysointilaitteilla laboratorio-olosuhteissa. Työssä käytettyjä muuntajia kuormitettiin resistiivisillä, kapasitiivisilla, induktiivisilla, suoramoottorihjatulla, pehmökäynnistetyllä ja taajuusmuuttajakuormilla.

Työssä asetetut tavoitteet täyttyivät ja tulokset näkyivät mittalaitteen antamissa kuvioissa ja taulukoissa. Mittauksissa ilmeni, miten sähköverkkoon syntyvä häiriö etenee verkossa.

Industry and Natural Resources
Electrical engineering

Author	Rikhard Karlsson	Year	2016
Supervisor	Aila Petäjäjärvi B.Sc. Eng		
Commissioned by	Lapin AMK		
Subject of thesis	Disruptions arising from a transformer's low voltage side and their progression to the network		
Number of pages	86 + 42		

This bachelor's thesis was done at Lapland University of Applied Sciences in Kemi at its electrical power laboratory. The subject of the study were disruptions created on the low-voltage side and their progress to the network. The aim of this thesis was to produce disruptions on a transformer's low-voltage side, and to examine how the disturbances progress to the network and at the same time create a quick guide for the Zimmer LMG500 power quality analyzer.

The theoretical part of the thesis deals with disruptions according to the guide lines of SFS-EN 50160 standard. The thesis presents the device environment in which the thesis was done. Network's and transformer's resistive values were calculated. The source material used was the literature in the field and materials found on the internet.

In this work, transformer's high-voltage sides were measured with a power quality analyzer in laboratory conditions. The transformers were loaded with resistive, capacitive, inductive, direct-motor, soft-started-motor and frequency-converted motor loads.

The aim set for this work was fulfilled, and the results could be demonstrated on figures and tables made with the help of a measuring device. The measurements revealed how electric disruptions progress to the network.

Key words harmonics, transformer, analysis and measure

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
2	SÄHKÖN LAATU	10
2.1	Jännitevaihtelu	10
2.1.1	Jännitekuoppa	11
2.1.2	Nopea jännitteen nousu	11
2.1.3	Keskeytykset	12
2.2	Jännitteen epäsymmetria	12
2.3	Teho ja tehokerroin	13
2.4	Yliaallot	14
2.4.1	Yliaaltolähteen ja yliaaltojen summautuminen	15
2.4.2	Yliaaltojen vaikutus	16
2.5	Resonanssi	17
2.6	Taajuuspoikkeamat	17
2.7	Transienttijännitteet	18
2.8	Särökerroin ja säröteho	19
3	MUUNTAJA	20
3.1	Sijaiskytkentä	20
3.2	Kytkenät	21
3.3	Yliaallot muuntajan kytkennöissä	22
3.4	Muuntajan vastusarvot	22
3.5	Muuntajan kytkentäsysäysvirta	24
3.6	Muuntajahäviöt	25
4	TOIMINTAYMPÄRISTÖ	27
4.1	Muuntajat	27
4.2	Kuormat	28
5	MITTAUKSET	32
5.1	Mittausjärjestelyt ja kytkentä	32
5.2	Zimmer LMG500: Sähkön laatuanalysointori	35
6	MUUNTAJIEN JA VERKON VASTUSARVOT	37
6.1	Verkko	37
6.2	LT3-muuntaja, Dy-muuntaja	39
6.3	LT2-muuntaja, Yy-muuntaja	40
7	TULOSTEN ANALYSOINTI	42

7.1	Tyhjäkäynnin vaikutus.....	42
7.1.1	Dy11-muuntajan tyhjäkäynnin vaikutus.....	42
7.1.2	Yy0-muuntaja tyhjäkäynnin vaikutus	45
7.2	Resistiivisen kuorman vaikutus.....	48
7.2.1	Symmetrinen kuormitus.....	48
7.2.2	Epäsymmetrinen kuormitus.....	52
7.3	Induktiivisen kuorman vaikutus.....	54
7.3.1	Symmetrinen kuormitus.....	54
7.3.2	Epäsymmetrinen kuormitus.....	57
7.4	Kapasiivisen kuorman vaikutus.....	59
7.4.1	Symmetrinen kuormitus.....	60
7.4.2	Epäsymmetrinen kuormitus.....	62
7.5	Suoraohjatun oikosulkumoottorikuorman vaikutus.....	65
7.5.1	Kuorma.....	65
7.5.2	Yy0-muuntajan ensiö.....	67
7.5.3	Dy11-muuntajan ensiö	69
7.6	Pehmokäynnistetyn moottorikuorman vaikutus.....	72
7.6.1	Kuorma.....	72
7.6.2	Yy0-muuntajan ensiö.....	73
7.6.3	Dy11-muuntajan ensiö	74
7.7	Taajuusmuuttajaohjatun moottorikuorman vaikutus.....	75
7.7.1	Kuorma.....	75
7.7.2	Yy0-muuntajan ensiö.....	77
7.7.3	Dy11-muuntajan ensiö	79
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	82
	LÄHTEET.....	84
	LIITTEET	86

ALKUSANAT

Haluan kiittää opinnäytetyöohjaajaani Aila Petäjäjärveä ohjauksesta ja laboratorioinsinööri Jouko Alanivaa laboratorion laboratoriossa tehtyjen mittausten järjestelyistä.

Kemi 29.3.2016

Rikhard Karlsson

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

B_R	remanenssivuo [H]
B_S	kyllästetyn ytimen vuon tiheys, josta vuo ei voi enää kasvaa [H]
B_N	ytimen nimellinen magneettivuon tiheys [H]
C	kondensaattori [F]
$\cos\varphi$	tehokerroin
D	säröteho [Var]
f	taajuus [Hz]
f_1	verkon taajuus[Hz]
f_{res}	resonanssitaajuus [Hz]
HIDH	Zimmer LMG500-mittalaitteen lyhenne THD _i virtasärölle
HUHD	Zimmer LMG500-mittalaitteen lyhenne THD _u jännitesärölle
I_{pk}	sysäysvirta
I	koko virran tehollisarvo [A]
I_h	harmonisen yliaaltovirran tehollisarvo [A]
J_x	Johto
k	kerroin ja särökerroin [%]
l	pituus
L	induktanssi [H]
n	yliaallon järjestysluku
P	pätöteho [W]
P_{harm}	yliaaltoja tuottava kuorma keskuksessa [W]
P_{tot}	keskuksen kokonaiskuorma [W]
P_0	tyhjäkäyntihäviö
P_1	perustajuinen pättöteho [W]
P_{kn}	kuormitushäviöt nimellisellä kuormalla [W]
Q_1	perustajuinen loisteho [Var]
Q	loisteho [Var]
Q_c	kompensointiteho/kondensaattoriteho [Var]
Q-arvo	resonanssipiirin hyvyysluku

R	resistanssi [Ω]
S	näennäisteho [VA]
S_k	näennäisoikosulkuteho [VA]
S_N	muuntajan nimellisteho [VA]
S_{SCT}	verkon oikosulkuteho [kVA]
THD	särö (Total Harmonic Distortion)
U	jännite
U_{rms}	koko jännitteen tehollisarvo [V]
U_h	harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvo [V]
Z_k	suhteellinen oikosulkuimpedanssi [%]
Z_n	nimellisimpedanssi [Ω]
Z_k	oikosulkuimpedanssi [Ω]
X	reaktanssi [Ω]
Z	impedanssi [Ω]

1 JOHDANTO

Epälineaariset kuormat tuottavat verkkoon häiriötä ja häiritsevät verkkoon asennettuja laitteita, kuten verkon muuntajia, katkaisijoita, kuormia ja verkon muita komponentteja. Taajuusmuuttajakuormat ovat usein energiatehokkaampia, mutta tuottavat kuitenkin yliaaltohäiriötä verkkoon.

Työn tavoitteena on selvittää, millaisia häiriötä resistiivinen, kapasitiivinen ja induktiivinen kuorma sekä suoraohjattu, pehmokäynnistetty ja taajuusmuuttajaohjattu moottori aiheuttavat.

Teoriaosuudessa tarkastellaan häiriötä, joita sähköverkossa tapahtuu, ja sitä miten verkon siniaaltoinen teho eroaa epäsiniaaltomuotoisesta tehosta, eli särötehosta. Säröteho muodostuu kuormien aiheuttamien yliaaltojen takia. Siniaaltoselle ja epäsiniaaltoselle teholle on olemassa myös omat tehokertoimet.

Mittauksissa tarkastellaan Dy- ja Yy-kytkettyjä muuntajia, joita kuormitetaan määrittelyjen mukaisilla kuormituksilla. Oletuksena on, että resistiivinen, induktiivinen ja kapasitiivinen kuorma muuttaa muuntajan tehokerrointa $\cos\phi$ ja moottorikuormat tuottavat särötehoa ja yliaaltoja kuorman epälineaarisuuden takia.

2 SÄHKÖN LAATU

Eurooppalainen standardi SFS-EN 50160 määrittelee jakeluverkon jännitteen ominaisuudet normaaleissa käyttöolosuhteissa. ”Standardi määrittelee rajat tai arvot, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa liittymiskohdan jännitteen ominaisuuksien pysyvän eurooppalaisen yleisen jakeluverkon alueella. Standardi ei kuvaa yleisesti tavallisen jakeluverkon kuluttajan keskimääräistä tilannetta.” (SFS-EN 50160, 4.)

Standardin SFS-EN 50160 tarkoitus on määrittää jakelujännitteen ominaisuuksille taajuus, suuruus, aaltomuoto ja kolmivaiheisen jännitteen epäsymmetrisyys. Standardi antaa näille jännitteen ominaisuuksille raja-arvot, joita asiakas voi olettaa saavansa liittämiskohdalla. (SFS-EN 50160, 5.)

Standardia ei sovelleta epänormaaleissa käyttöolosuhteissa. Tällaisia ovat tilapäiset syöttöjärjestelyt ja poikkeukselliset ulkopuoliset häiriöt (poliittiset tai luonnolliset) asennuksille tai laitteille, jotka eivät täytä asetettuja vaatimuksia. (SFS-EN 50160, 4.)

2.1 Jännitevaihdtelu

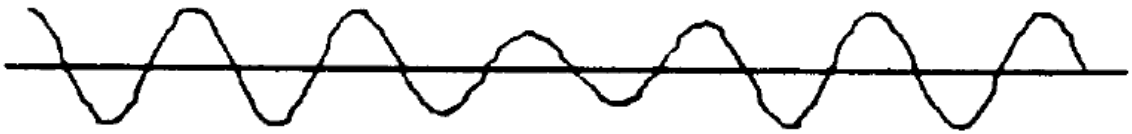
Nimellisestä arvosta poikkeava nimellisjännite on haitallinen verkon laitteille ja asiakkaalle. SFS-EN 50160 määrittää, ettei vaihtelu saisi ylittää $\pm 10\%$ nimellisjännitteestä U_n . Myös syrjäseudulla asuvien jännitteen vaihtelu ei saisi ylittää $\pm 10 - 15\%$ nimellisjännitteestä U_n . (SFS-EN 50160, 11.)

Jännitteen vaihtelu voidaan todeta normaaleissa käyttöolosuhteissa mittaamalla:

- ”kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista 95 % tulee olla välillä $U_n \pm 10\%$
- ja kaikkien jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvojen tulee olla välillä $U_n + 10 \pm / - 15\%$.” (SFS-EN 50160, 11).

2.1.1 Jännitekuoppa

Jännitekuopat (Kuvio 1) aiheuttavat verkkoon tilapäisiä jännitteen alenemia ja aiheuttavat sähköverkossa välkyntää. Jännitekuoppien tavallinen kesto on noin 1ms ... 1min, mikä johtuu kuormituksen kytkennästä tai vikatapauksista. (SFS-EN 50160, 9.)



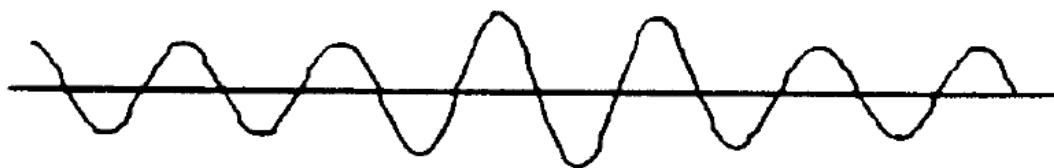
Kuvio 1. Jännitekuoppa (ABB-TTT 2000, 4.3)

Jännitekuopat jakeluverkossa aiheutuvat suurien kulutuskuormien äkillisen kytketymisten takia tai johdinkatkeamisten seurauksena. Jännitekuoppia esiintyy satunnaisesti ja ne ovat siten huonosti ennakoitavissa. Standardin SFS-EN 50160 mukaan jännitekuoppaa sovelletaan, kun jännite on 90 % vertailujännitteestä. (SFS-EN 50160, 25.)

2.1.2 Nopea jännitteen nousu

Jännitteen nousu saattaa esiintyä johtimen ja maan välillä tai jännitteisten johtimien välillä. Verkon ylijännitteen tavanomainen havahtumisjännite on 110 % nimellisjännitteestä, joka mitataan jännitteenä sekä aikana (kesto aika). (SFS-EN 50160, 9)

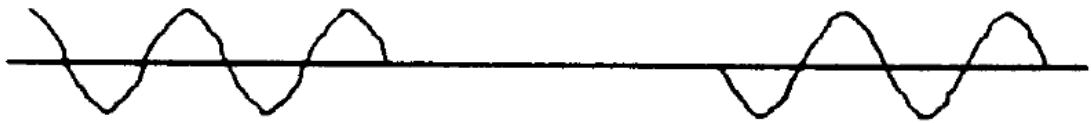
Jännitteiden nousut ovat satunnaisia kuten jännitekuopatkin. Nopeita jännitteiden nousuja saattaa tapahtua samoista syistä kuin jännitekuoppiakin. (Kuvio 2)



Kuvio 2. Nopea jännitteen nousu (ABB-TTT 2000, 3.19)

2.1.3 Keskeytykset

Keskeytys on yksi yleisimmistä häiriöistä sähköverkossa, (Kuvio 3). Keskeytykset vaikuttavat eniten teollisuuteen. Jopa 1 minuutin sähköjakelun keskeytys voi tuottaa tehtaalle jopa tunnin tuotantokatkoksen, puhumattakaan tuotantomene-tyksistä. Käyttökeskeytys on tilanne, jossa vertailujännite on 0 V tai jännite on tippunut 95 % vertailujännitteestä. (Kuvio 3). (SFS-EN 50160, 8)



Kuvio 3. Keskeytys (ABB-TTT 2000, 4.3)

Tavallisimpia keskeytysten syitä ovat ilmastolliset syyt tai jakeluverkon tekniset vikatilanteet, jotka johtavat suojalaitteen toimintaan. Keskeytyksien toimintaan voidaan panostaa paremmalla sähkösuunnittelulla ja sattumanvaraisten häiriöiden ennaltaehkäisyllä. Sattumanvaraiset häiriöt ovat kuitenkin erittäin satunnaisia ja vaikeasti ennaltaehkäistävissä. Häiriökeskeytykset luokitellaan kahteen luokkaan: 1) pitkä keskeytys (yli 3 minuuttia) ja 2) lyhyt keskeytys (alle 3 minuuttia). (SFS-EN 50160, 8)

2.2 Jännitteen epäsymmetria

SFS-EN 50160 määrittää jakelujännitteen epäsymmetrialle rajan: ”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, viikon pituisen mittausjakson aikana, jokaisen, jakelujännitteen (perustaajuisen) vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvon keskiarvoista 95 % tulee olla välillä 0...2 % (perustaajuisesta) myötäkomponentista.” (SFS-EN 50160, 17).

Jännitteen epäsymmetria vaikuttaa olennaisesti laitteiden kuormitettavuuteen. Epäsymmetrisessä kuormituksessa vähiten kuormitetun vaiheen jännite pyrkii nousemaan eniten. Nollajohtimellinen verkko on erityisen herkkä jännitteen epäsymmetrialle. Tällaisessa verkossa vaihejännite voi nousta pääjännitteen tasolle.

2.3 Teho ja tehokerroin

Tekniikan kaavastokirjasta saatavilla kaavoilla voidaan laskea näennäisteho S , loisteho Q , pätöteho P ja $\cos\varphi$. (Tekniikan kaavasto, 126)

Näennäisteho S kertoo sähköverkon kokonaistehon, joka saadaan jännitteellä U ja virralla I , mikä lasketaan kaavalla:

$$S = U * I \quad (1)$$

Loistehoa tarvitaan magneettikentän tuottamiseen, ja voidaan laskea geometrisen summan kaavalla:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2)$$

Pätöteho P lasketaan näennäistehollisarvolla S ja tehokertoimella $\cos\varphi$ kaavalla (3). Pätöteho on laitteen resistiivistä tehoa ja se ilmaisee työsuorituksen määrää.

$$P = S \cos\varphi \quad (3)$$

Virran ja jännitteen välinen vaihekulma saadaan jakamalla pätöteho P näennäisteho S :llä kaavalla:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Jos verkon jännite on riittävän sinimuotoista $THD_u \leq 2\%$, käytetään kaavaa (4). Jos kuormitusvirta on erittäin epäsinimuotoinen, niin kaavaa (4) ei voida käyttää. Jos jännite on sinimuotoista ja virta epäsinimuotoista määritetään tehokerroin kaavalla (5) ja (8). (Hietalahti 2013, 234.)

$$PF = \frac{U_{rms} * I_{1,rms} * \cos\varphi}{U_{rms} * I_{rms}} = \frac{I_{1,rms} * \cos\varphi}{I_{rms}} = K_p \cos\varphi \quad (5)$$

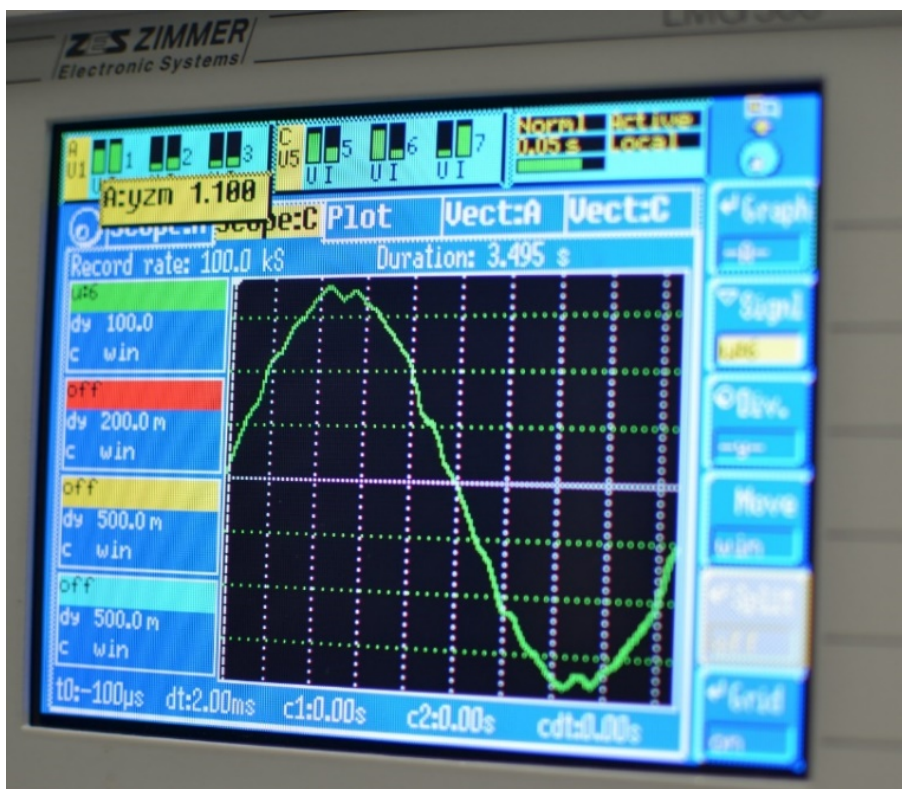
$$K_p = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}, K_p \in [0,1] \quad (6)$$

2.4 Yliaallot

Yliaallot ovat niitä jännitteitä ja virtoja, joiden taajuus on yli verkkotaajuuden. Yliaallot ovat verkon jännitteen perustaajuuden kerrannaistaajuuksia. Yliaallot tulevat sivutuotteena monista laitteista, joiden virran kulutus ei ole samanlainen kuin syöttävän virran lähteen. Esimerkiksi tietokoneet, moottorit, lämpöpumput ja ledilamput ovat epälineaarisia kuormia ja tuottavat yliaaltoja. Yliaallot ovat usein harmonisia eli moninkertaisia verkontaajuuteen nähden ja summautuvat geometrisesti jokaisesta yliaaltotaajuudesta. (Korpinen, Mikkola, Keikko & Flack 2008.)

Yliaallot aiheuttavat monia haittoja verkkoon, kuten nollajohdon virrallisuuden symmetrisessä kuormassa, mikä pienentää johtojen kuormitettavuutta ja kasvattaa verkon häviötä.

Yliaallot aiheuttavat myös syöttöjännitteen säröytymistä (Kuva 1), mikä häiritsee yliaalloille herkkiä laitteita ja aiheuttaa häirintää verkko- ja telekaapeleille.



Kuva 1. Säröytynyt siniaaltojännite

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee sähkönlaadulle rajat laadun takaamiseksi. Sähköjakelupisteessä yliaallot eivät saa ylittää standardin mukaisia arvoja. Standardissa määritellään sallitut rajat yliaaltokomponenteille. Raja-arvot on esitetty taulukossa 1.

”Normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana, 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 1 annettu arvo. Resonanssit voivat aiheuttaa suurempia jännitteitä yksittäiselle harmoniselle.

Lisäksi jakelujännitteelle kokonaissärökertoimen, THD (mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40 saakka) tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.” (SFS-EN 50160, 12.).

Taulukko 1. SFS-EN 50160:ssä määritetyt rajat yliaaltokomponenteille. (SFS-EN 50160, 12).

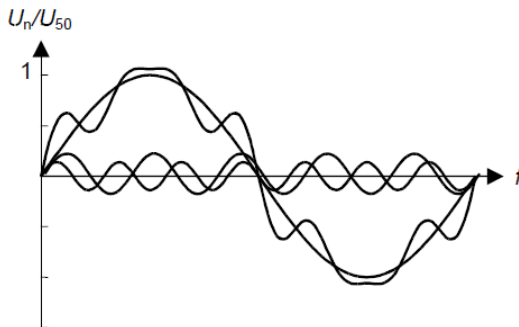
Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset		järjestysluku n	suhteellinen jännite
järjestysluku n	suhteellinen jännite	järjestysluku n	suhteellinen jännite		
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6-24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5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

2.4.1 Yliaaltolähteen ja yliaaltojen summutuminen

Epälineaariset kuormat aiheuttavat verkkoon yliaaltovirtaa, joka johtaa jännitesäron THD (U) (kuvio 4). Epälineaarisiiin kuormiin kuuluvat kaikki puolijohteilla toimivat laitteet ja kuormitetut moottorit, jotka eivät pyöri verkon 50 Hz taajuuden mukaan.

Eri yliaaltolähteiden summan arvioiminen on erittäin vaikeaa, koska jokainen yliaaltotaajuus pitää laskea geometrisesti. Kaikilla taajuuksilla on siis eri vaihekulmat ja amplitudit.

”Kolmivaiheiset kuormitukset aiheuttavat yliaaltotaajuuksia; 5., 8., 11. ja 13. jne. Yksivaiheiset kuormitukset aiheuttavat lisäksi 3. yliaaltoa ja sen kerrannaisia.” (ABB-TTT 2000, 9.4.2).



Kuvio 4. Yliaaltojen summautuminen perustaajuuteen. (ABB-TTT 2000, 9.4.2)

2.4.2 Yliaaltojen vaikutus

Yliaallot aiheuttavat ylimääräistä lämpenemistä esimerkiksi johtimissa, muuntajien käämeissä, moottorien käämeissä, keloissa ja kondensaattoreissa. Yliaallot vaikuttavat voimakkaimmin lähellä perustaajuuden monikertoja. Kolmannella ja viidennellä yliaallolla syntyy suuremmat lämpöhäviöt kuin esimerkiksi 19. tai 21. yliaallolla. (The Fire Protection Research Foundation 2011, 42 – 47.)

Yliaallot aiheuttavat sähköverkkoon monenlaisia ongelmia, kuten lisähäviöitä, suoja- ja mittalaitteiden virhetoimintoja, ATK- ja automaatiojärjestelmien häiriöitä ja vaurioita, televerkon häiriöitä, nollajohtimen ylikuormitusta 3. ylivirrassa ja resonansseja kompensointikondensaattoreiden ja verkon välillä. (ABB-TTT 2000, 9.4.1.)

Sähköverkon kompensointikondensaattorit pitää myös suojata estokeloilla jos verkossa esiintyy yliaaltoja. Estokelat estävät sen, että rinnakkaisresonanssia ei synny verkon kanssa. Kelat siis suojaavat kondensaattoreita yliaalloilta, mutta eivät suodata yliaaltoja pois. (ABB-TTT 2000, 9.3.)

2.5 Resonanssi

Resonanssitaajuus f_{res} tarkoittaa, kun C kapasitanssi ja L induktanssi ovat yhtä suuria tai ovat lähellä toisiaan. L ja C muodostavat verkon kanssa resonanssipiirin, joka vahvistaa yliaaltojen vahvistumista. Resonanssitaajuus f_{res} lasketaan kaavalla (7), kun verkon induktanssi ja kapasitanssi ovat tiedossa. (Korpinen ym. 2008.)

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

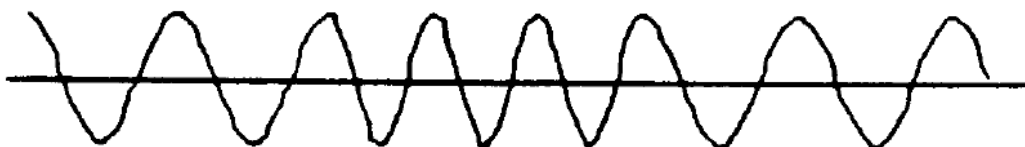
Kun kompensointikondensaattorin kapasitanssi ja verkon syöttämä induktanssi muodostavat resonanssipiirin, voidaan käyttää kaavaa (7), jolloin kyseisellä taajuudella n yliaaltojen yliaaltovirrat vahvistuvat moninkertaisiksi. Rinnakkaispiirin resonanssitaajuuden järjestysluku lasketaan kaavalla 8. (ABB-TTT 2000, 9.3.)

$$n = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (8)$$

2.6 Taajuuspoikkeamat

Jakelujännitteen nimellistaajuus on Suomessa 50 Hz. Perustaajuuden keskiarvo mitataan 10 sekunnin ajalta, jota seuraa yleensä yhteiskäyttöalueen verkko-operaattori. (SFS-EN 50160, 16.)

Jakelujännitteen nimellistaajuuden muuttuminen aiheuttaa esimerkiksi sähkömoottorien pyörimisnopeuden muutoksia ja aiheuttaa reaktiivisissa kuormissa kuorman tehomuutoksia. (Kuvio 5)



Kuvio 5. Taajuuspoikkeama (ABB-TTT 2000, 4.3)

Yhteiskäyttöverkkoon ja erillisverkoissa on SFS-EN 50160 omat suositukset 10 sekunnin mittausväleiltä:

”

- yhteiskäyttöverkoissa:

50 Hz \pm 1 % (eli 49,5 Hz... 50,5 Hz) 99,5 % vuodesta

50 Hz \pm 4 % / - 6 % (eli 47 Hz... 52 Hz) 100 % ajasta

- erillisverkoissa (esim. jakelujärjestelmät tietyillä saarilla):

50 Hz \pm 2 % (eli 49 Hz... 51 Hz) 95 % viikosta

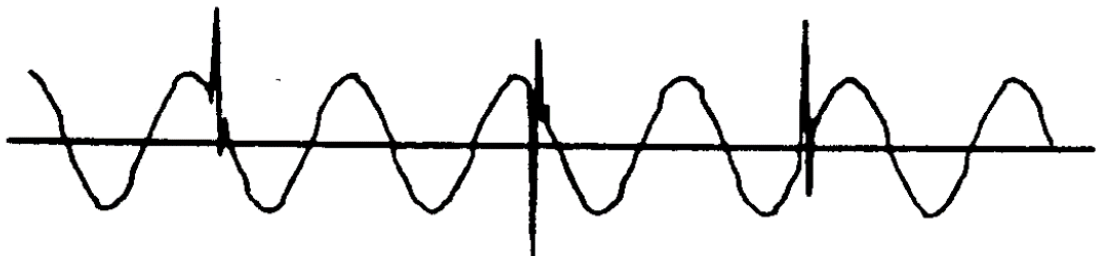
50 Hz \pm 15 % (eli 42,5 Hz... 57,5 Hz) 100 % ajasta

”(SFS-EN 50160, 11.)

2.7 Transienttijännitteet

Usein salamaniskuista tai kytkentätoimenpiteistä järjestelmään tulee jännitepulssi, joka on lyhempi kuin verkkojännitteen pulssin taajuus. Nämä pulssit ovat erittäin lyhyitä aallossa näkyviä mikrosekunnin piikkejä. (Kuvio 6). (ABB-TTT 2000, 4.3.)

Tavallisesti transienttiylijännitteiden huippuarvo ei ylitä 6 kV arvoa, mutta suurempiakin arvoja joskus esiintyy. Aika vaihtelee millisekunneista alle mikrosekuntiin. (SFS-EN 50160, 15.)



Kuvio 6. Transienttiylijännite (ABB-TTT 2000, 4.3)

Transienttijännite on siis nopea jännitteen muutos sähköpiirissä. Se voi tehdä alitai ylijännitettä.

2.8 Särökerroin ja säröteho

Särökerroin on suhdeluku, joka ilmoitetaan prosentteina tai kertoimena. Suhdeluvussa määritetään särökerroin yliaaltovirtojen ja piirin kokonaisen virran suhteena kaavassa (9). (Ruppa 2001, 8.)

$$k = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2}}{I_L} \quad (9)$$

Särötehon määrittelyssä käytetään yleisimmin kahta eri kaavaa (kaava 10 ja 11). Kaava 10 määrittää D särötehon: S näennäistehosta, P pätötehosta ja Q_1 perustaajuuden loistehosta. (Ruppa 2001, 10.)

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (10)$$

Särötehon määrittämiseen voidaan käyttää myös särökerrointa ja näennäistehoa käyttäen kaavaa 10. (Ruppa. 2001, 11)

$$D = k * S \quad (11)$$

3 MUUNTAJA

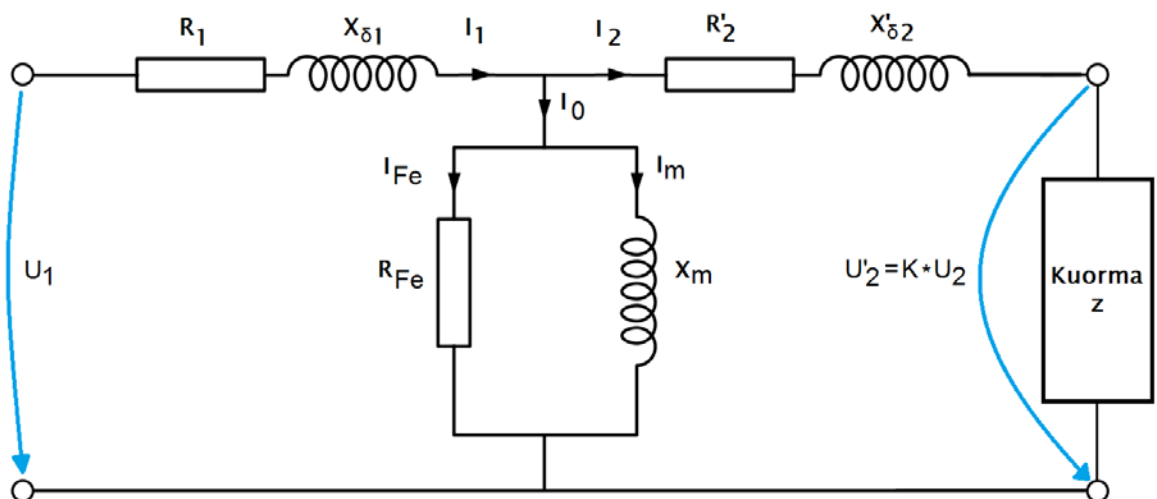
Muuntajaa käytetään muuntamaan jännitettä suuremmaksi tai pienemmäksi, muuntosuhteen mukaisesti. Muuntosuhde valitaan aina tarpeen mukaisesti ja se riippuu täysin tarpeesta.

Muuntaja erottaa yläjännitepuolen ja alajännitepuolen täysin toisistaan, eli puo- lissa on galvaaninen erotus, eivätkä tasakomponentit pääse kulkemaan. Sähkö- energia kulkeutuu sähkömagneettisen kentän välityksellä.

3.1 Sijaiskytkentä

Kuviossa 7 on muuntajan yhden vaiheen sijaiskytkentä. Sijaiskytkennässä kuva- taan muuntajan komponentteja, jotka vaikuttavat häviöihin ja jännitealeniemiin.

Kuviossa 7 R_1 ja $X_{\delta 1}$ ovat ensiön resistanssi ja hajareaktanssi. Ensiöön redusoi- dut R'_2 ja $X'_{\delta 2}$ ovat toision resistanssi ja hajareaktanssi. Rautahäviöresistanssi on R_{Fe} ja muuntajan magnetointiresistanssi on X_m . R_{Fe} ja X_m vaikuttavat tyhjäkäynti- virtaan I_0 . (Korpinen 1998.)



Kuvio 7. Muuntajan yhden vaiheen kuormitettu sijaiskytkentään redusoituna

3.2 Kytkenät

Kolmivaihemuuntajan ensiö- ja toisiovaihekäämit voidaan kytkeä kuvion 8 mukaisiin kytkentöihin. Kuviossa 8 iso kirjain tarkoittaa muuntajan ensiön kytkentää ja pienikirjain muuntajan toisiota. Y tarkoittaa tähtikytkentää, D kolmiokytkentää ja Z hakatähtikytkentää. Kirjainta N ei ole kuviossa 8, mutta se tarkoittaisi, että kytkennässä olisi nollapiste, joka voi olla vain haka- ja tähtikytkennässä. (Korpinen 1998.)

Kytcentöjen numerot tarkoittavat vaihesiirtoa, 0:ssa ei ole vaihesiirtoa, mutta numerossa 5 on 150° vaihesiirto. Vaihesiirto osoitetaan visuaalisesti osoitinkuvan toisiopuolella, kellotaulukon mukaisesti, eli $0 = 0^\circ$, $5 = 150^\circ$, $6 = 180^\circ$ tai $11 = 330^\circ$. (Korpinen 1998.)

Tunnusluku	Kytcentä	Osoitinkuvat		Kytcentät	
		YJ	AJ	YJ	AJ
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Kuvio 8. Kolmivaihemuuntajan kytkentäryhmät (Korpinen 1998)

3.3 Yliaallot muuntajan kytkennöissä

Muuntajan kytkentä vaikuttaa muuntajan magnetointivirran kulkuun muuntajassa. Jotta muuntajaa voidaan kuormittaa nimellisvirralla, edellytetään virran sinimuotoisuutta. Epälineaariset kuormat kuitenkin vääristävät virran sinimuotoisuutta, mikä johtaa muuntajan suurempaan tyhjäkäyntihäviöön. (Hietalahti 2011, 30.)

Dy-kytkentä

Kolmella jaolliset yliaaltovirrat pääsevät kiertämään Dy-kytkennän käämeissä, mutta puuttuvat verkkovirrasta, koska kytkennässä ei ole nollajohtoa. Kolmioon kytketyssä muuntajassa kolmella jaolliset yliaaltovirrat kiertävät suljetussa piirissä, mikä aiheuttaa ylimääräistä häviötä muuntajan käämeihin. (Hietalahti 2011, 31.)

Yy-kytkentä

Kolmella jaolliset yliaallot eivät kulje Yy-kytkennässä, mikä johtuu siitä, että kytkennässä ei ole nollajohdinta. YNy-kytkennässä kaikki kolmella jaolliset yliaallot pystyvät kulkemaan ensiön nollajohdossa, mutta nollajohdottomassa Yy-kytkennässä kolmannet yliaallot sulkeutuvat muuntajan vaipan (kotelon) kautta. (Hietalahti 2011, 31.)

3.4 Muuntajan vastusarvot

Muuntajien vastusarvot lasketaan muuntajan nimellisarvoista, jotka lukevat muuntajan nimikyltissä. Vastusarvoilla voidaan määrittää, minkälainen kuorma muuntajaan voidaan laittaa ja mitä muuntaja kestää. (Aura & Tonteri 1996, 36.)

Kolmivaihemuuntajan nimellisimpedanssin lasketaan kaavalla:

$$Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (12)$$

Muuntajan nimellisvirta lasketaan kaavalla:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (13)$$

Muuntajan oikosulkuimpedanssi ja suhteellinen oikosulkuimpedanssi

Tehomuuntajat ovat muuntajastandardien mukaisesti standardisoitu eritehoisille muuntajille $\pm 10 \%$ vaihtelurajalle. Muuntajat mitataan tehtaassa ja niiden arvo esitetään prosentteina, suhteellisena arvona z_k . Muuntajan suhteellinen nimellisimpedanssi lasketaan kaavalla 14 ja nimellisimpedanssi kaavalla 16. (Aura & Tonteri 1996, 36.)

$$z_k = 100 \frac{Z_k}{Z_n} \% \quad (14)$$

Oikosulkuimpedanssi lasketaan kaavalla:

$$Z_k = \frac{(U_n/kV)^2}{S_n/MVA} * \frac{z_k/\%}{100} \quad (15)$$

Muuntajan oikosulkuresistanssi ja suhteellinen oikosulkuresistanssi

Valmistaja ei välttämättä ilmoita oikosulkuresistanssin arvoa, joten se pitää laskea. Ennen muuntajan oikosulkuresistanssin laskemista pitää ottaa selville nimelliskuormitushäviö P_{kn} ja nimellisteho S_n . Näistä saadaan tietoon suhteellinen oikosulkuresistanssi r_k kaavalla 16. (Aura & Tonteri 1996, 36.)

$$r_k = 100 \frac{P_{kn}}{S_n} \% \quad (16)$$

Oikosulkuresistanssi lasketaan kaavalla:

$$R_k = \frac{r_k/\%}{100} Z_n \quad (17)$$

Muuntajan oikosulkureaktanssi ja suhteellinen oikosulkureaktanssi

Suhteellinen oikosulkureaktanssi ja oikosulkureaktanssi voidaan laskea oikosulkuimpedanssin ja -resistanssin avulla käyttäen Pythagoraan kaavaa (18) ja (19). (Aura & Tonteri 1996, 37)

$$X_k = \frac{\sqrt{z_k^2 - r_k^2}}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (18)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (19)$$

3.5 Muuntajan kytkentäsysäysvirta

Muuntaja ottaa magnetoimisvirran, kun muuntaja kytketään jännitteiseksi. Magnetoitumisvirran suuruus riippuu muuntajan rautasydämessä olevasta jäännösvoosta eli remanenssivuon ja jännitteen kytkemishetkestä. Suurin virta syntyy, kun kytkentäkohta on jännitteen nollakohdassa, jolloin muuntaja saavuttaa magneettivuon huippuarvon. Muuntajan kytkentähetkellä tapahtuu kytkentäsysäysvirta, joka tuottaa häiriötä sähköverkkoon. (Elovaara & Haarla 2011, 153.)

Kytkentäsysäysvirta I_{pk} ylittää muuntajan mitoitusvirran moninkertaisesti. Kytkentäsysäysvirta voi olla 8 – 10 kertaa suurempi kuin mitoitusvirta. Verkon oikosulkuimpedanssi ei juurikaan vaikuta kytkentäsysäysvirtaan, ellei verkon oikosulku-teho ole erittäin pieni. (Elovaara & Haarla, 2011, 153.)

Muuntajan kytkentäsysäysvirta voidaan laskea yksinkertaistetulla kaavalla 20, jossa B_R on remanenssivuo, B_S kyllästetyn ytimen vuon tiheys, josta vuo ei voi enää kasvaa ja B_N on ytimen nimellinen magneettivuon tiheys. (ABB 2010, 1.)

$$I_{pk} = \frac{\sqrt{2} * U}{\sqrt{(\omega * L)^2 + R^2}} \left(\frac{2 * B_N + B_R - B_S}{B_N} \right) \quad (20)$$

Todellisuudessa kaava 17 ei anna riittävää tarkkuutta, koska on muitakin muuttujia, jotka vaikuttavat sysäysvirran suuruuteen. Sysäysvirtaan vaikuttaa verkon impedanssi, muuntajan ytimen geometria, kytkennät ja se, onko muuntajan

magnetisoiva induktanssi säädetty transienttisille kytkentäsysäsvirtailmiöille. (ABB 2010, 2.)

3.6 Muuntajahäviöt

Tyypillisimmät muuntajahäviöt ovat tyhjäkäyntihäviö, kuormitushäviö sekä jännitehäviö. Tyhjäkäyntihäviö saadaan kuormittamattomasta muuntajasta. Kuormitushäviö on kuormituksen aikana syntyvä häviö. Jännitehäviö on kuormitusvirran aiheuttama jännitehäviö, joka ei ole sama asia kuin jännitealenema.

Tyhjäkäyntihäviö

Tyhjäkäyntihäviö saadaan, kun muuntajan toisiopuoleen ei ole kytketty kuormaa ja ensiöpuoleen on kytketty jännite. Tyhjäkäyntihäviö P_0 edustaa muuntajan rauhahäviötä, hystereesiä sekä pyörrevirtoja. (Korpinen, 1998.)

Kuormitushäviö

Muuntajan kuormitushäviö P_K johtuu muuntajan käämien resistiivisyydestä. Kun muuntajan virta suurenee muuntajan käämeissä, kuormitushäviöt muuttuvat neliöllisesti kerrottuna nimellisellä kuormitushäviöllä P_{kn} kaavan 21 mukaan. (Korpinen, 1998.)

$$P_K = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 P_{kn} \quad (21)$$

Jännitealenema ja jännitehäviö

Muuntajan jännitealenema U_a saadaan laskettua, kun tiedetään kuorman näennäisvirta, kuorman tehokerroin, R_k oikosulkuresistanssi ja X_k oikosulkureaktanssi kaavan 22 mukaan. (Korpinen, 1998)

$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

Jännitealenema ja jännitehäviö eivät kuitenkaan ole sama asia. Kuormitusvirta I:n aiheuttama jännitehäviö voidaan laskea ohmin lain mukaan kaavalla 23. (Korpinen, 1998.)

$$\bar{U} = \bar{I}\bar{Z} = \bar{I}R_k + j\bar{I}X_k = \bar{U}_1 - \bar{U}_2 \quad (23)$$

4 TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Tämän opinnäytetyön toimintaympäristö on Lapin AMK:n Kosmoksen sähkövoimalaboratoriossa. Työnaikaiseen työympäristöön kuuluvat muuntajat, kuormat sekä mittalaitteet.

Työssä käytettiin kahta muuntajaan, Dy-muuntajaa ja Yy-muuntajaa. Kuormina käytettiin kuutta erilaista kuormaa, joilla on tarkoitus tehdä muuntajien yläjännitepuolelle häiriötä.

Mittalaitteena käytettiin sähkön laatuanalysointia, jolla mitattiin kahden muuntajan yläjännitepuolet. Moottoriohjatissa kuormissa mitattiin sähkösuureet muuntajien yläjännitepuolelta ja kuormaa syöttävän muuntajan alajännitepuolelta.

4.1 Muuntajat

Työn LT3 päämuuntajana (Kuva 2) käytetään nimellisteholtaan 16 kVA muuntajaa, jonka ensiö on kytketty D-kytkentään ja toisiossa pystyy kytkemään d-, y- tai yz-kytkentään. LT3 päämuuntajan toisiossa on myös 330° vaiheensiirto, mikä johtuu Dy11-kytkennästä. Työssä muuntajaa käytetään vain Dy11-kytkennässä. LT3-muuntajan valmistajan tiedot löytyvät liitteestä 9.



Kuva 2. LT3-muuntaja

Työn toisena muuntajana käytetään nimellisteholtaan 30 kVA muuntajaa (Kuva 3), jonka ensiö on kytketty YN-kytkentään ja toisio on kytketty yn-kytkentään. Työssä muuntajaa käytetään vain Yy-kytkennässä. LT2-muuntajan valmistajan tiedot löytyvät liitteestä 8.



Kuva 3. LT2 muuntaja

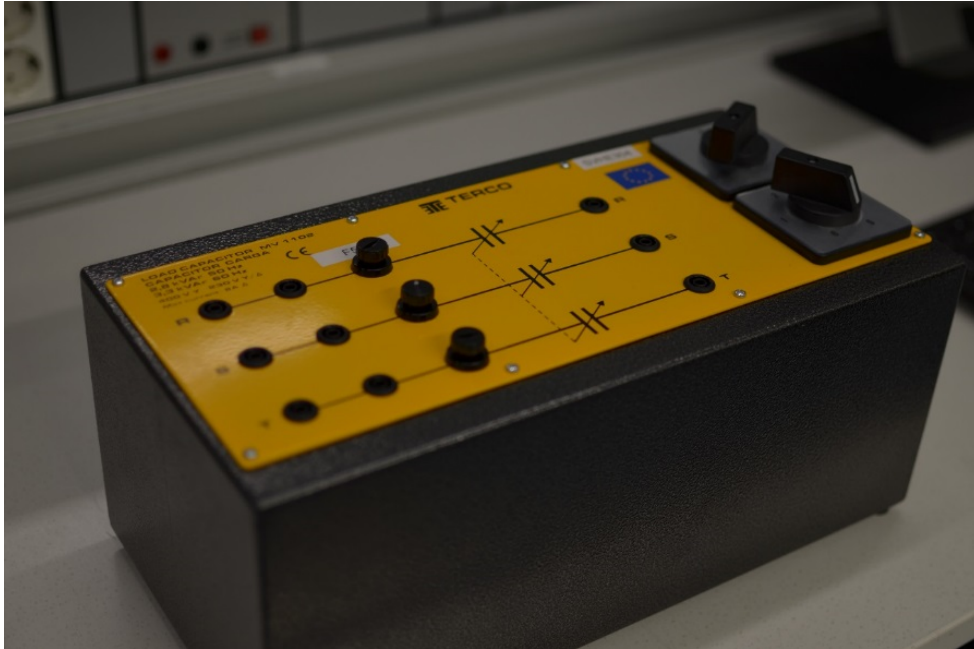
4.2 Kuormat

Resistiivisenä kuormana käytetään kahta kolmivaiheista vastusvaunua (Kuva 4). Muuntajaa jokaista vaihetta kuormitettiin 8 A virralla.



Kuva 4. Kolmivaiheinen vastusvaunu

Kapasitiivisena kuormana käytetään kahta kolmivaiheista kondensaattoria. Muuntajan kutakin vaihetta kuormitettiin 8 A virralla. (Kuva 5).



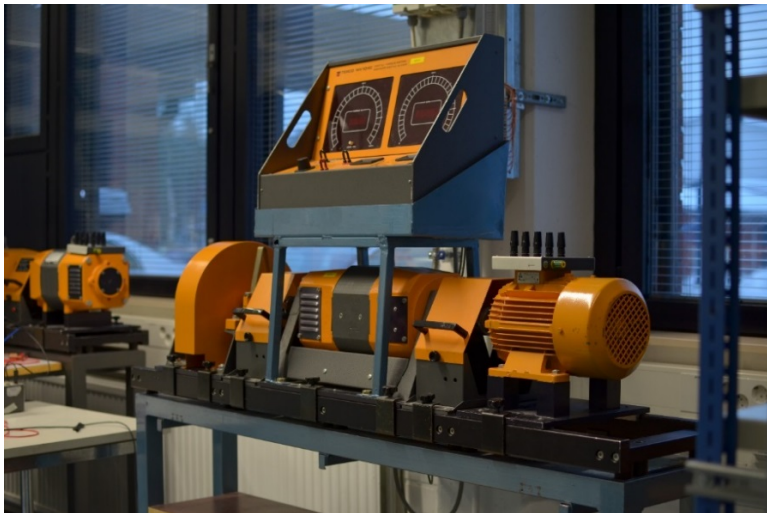
Kuva 5. Kolmivaiheinen kondensaattori

Induktiivisella kuormana käytetään kahta kolmivaiheista kela. Muuntajan kutakin vaihetta kuormitettiin 8 A virralla. (Kuva 6)



Kuva 6. Kolmivaiheinen kela

Moottorina käytetään ELIN-merkkistä moottoria (Kuva 7), joka on asennettu momenttivaakaan. Kaikissa moottorikuormituskokeissa käytetään ELIN-merkkistä moottoria, jonka roottorin päähän on asennettu 40 kg vastuskiekko. Moottorin kytkentänä käytetään tähtikytkentää. Moottori on 1,5 kW, $\cos\phi = 0,79$ ja $\text{rpm} = 1415$.



Kuva 7. Momenttivaaka

Taajuusmuuttajana käytetään Vaconin NXS 1,1/1,5kW 3,3/4,3A taajuusmuuttajaa (Kuva 8), johon on asetettu 10 sekunnin kiihdytysaika moottorin nimelliseen pyörimisnopeuteen. Taajuusmuuttajalla voidaan muuttaa moottorin pyörimisnopeutta ja parantaa sen hyötysuhdetta erilaisissa kuormituksissa.



Kuva 8. Vacon NX taajuusmuuttaja

Pehmökäynnistimenä käytetään ABB:n pehmökäynnistintä (Kuva 9), joka on asetettu 10 sekunnin kiihdytysaikaan. Pehmökäynnistimen tarkoitus on rajoittaa moottorin käynnistysvirtaa, ettei verkkoon tulisi liian suuria jännitteen alenemia tai liian suurta käynnistyskuormitusta.



Kuva 9. ABB:n pehmökäynnistin (PSR3-600-70)

5 MITTAUKSET

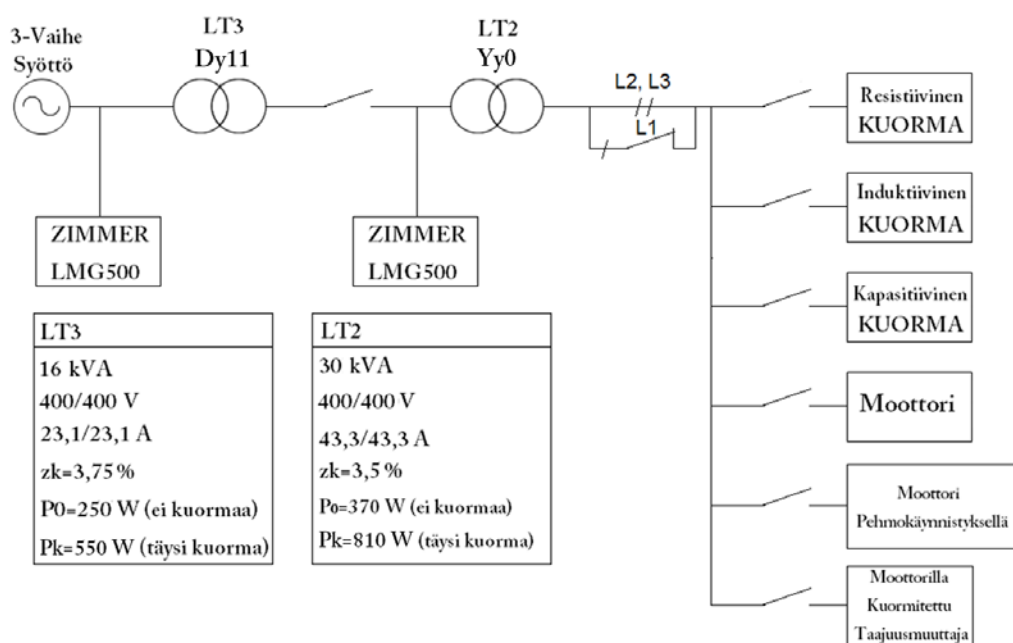
Mittauksen tavoitteena on selvittää, miten erilaiset kuormat ja niiden aiheuttamat häiriöt vaikuttavat muuntajan ensiossa. Mittauksissa kuormitetaan LT2-muuntajan toisiota kuvion 9 mittauskaaviossa olevilla kuormilla.

Tavoitteena on tarkkailla yliaaltojen ja muiden sähkösuureiden kulkeutumista LT2- ja LT3-muuntajan ensiöön.

5.1 Mittausjärjestelyt ja kytkentä

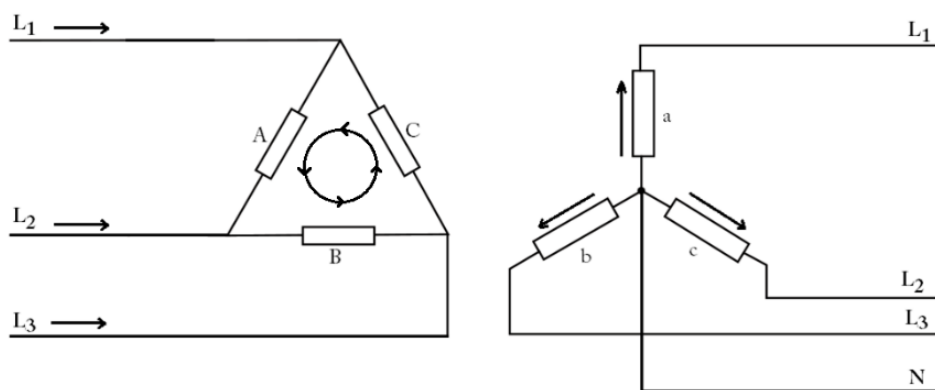
Mittaukset tehdään Lapin AMK:n Kosmoksen sähkövoimalaboratoriossa. Muuntajia syötetään 400 V pääjännitteellä, jonka suuruus mittaushetkellä näkyy liitteiden taulukoissa.

Mittauksissa käytetään sähkövoimalaboratorion muuntajia, kuvio 9:n mukaisessa kytkennässä. LT3-muuntajassa käytetään Dy-kytkentää. LT2-muuntajassa käytetään Yy-kytkentää. LT2-muuntajan jälkeen L2 ja L3 ovat suoraan kytketty kuormien kytkimille ja L1-vaiheen kytkimellä on tarkoitus tehdä epäsymmetrinen kuormitus vain resistiivisen, induktiivisen ja kapasitiivisen kuormituksen yhteydessä.



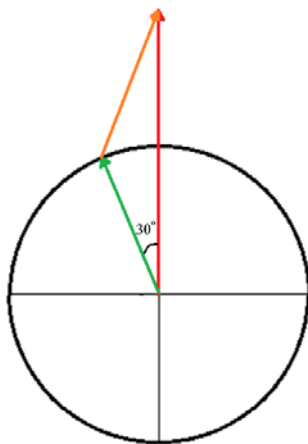
Kuvio 9. Mittauskaavio

Virran mittapääät asetetaan LT3-muuntajan ensiöön ja toisioon kuvion 10 nuolien osoittaman suunnan mukaisesti, paitsi kolmiokytkennän sisällä olevat nuolet ilmaisevat vain käämien virran pyörimissuunnan. Työn mittaustaulukoista pitää huomioida, että ensiön L_1 virta ei ole muuntajan vaiheen ensiön virta. LT3-muuntajan ensiö on kytketty kolmioon, joten käämin virta on päävirta jaettuna neliönjuuri kolmella. Käämivirta on myös Dyn11-kytkennässä kuvion 8 mukaan 30° edellä päävirtaa.



Kuvio 10. Dy11-muuntajan virran mittaus

Kuvion 10 punainen viiva on päävirta ja vihreä sekä oranssi ovat vaihevirtoja. Kuvion 10 nähdään, kuinka kaksi vaihevirtaa vaikuttavat päävirran suuruuteen. Kaavassa (24) todetaan päävirran suuruus vaihevirtojen erotuksella ja kuvion 8 saadaan Dy11 käämin virtavektori, joka on 30° päävirtaa edellä kello 11 asennossa.



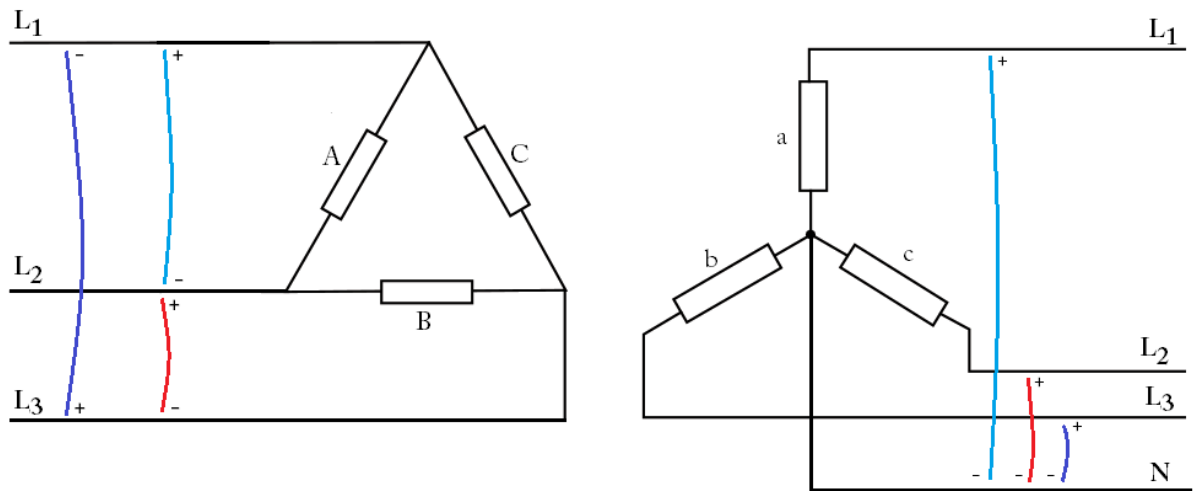
Kuvio 10. Vaihe- ja päävirran vektorit

$$I_{L1} = I_{\phi A} - I_{\phi C} \quad (24)$$

$$I_{L2} = I_{\phi B} - I_{\phi A}$$

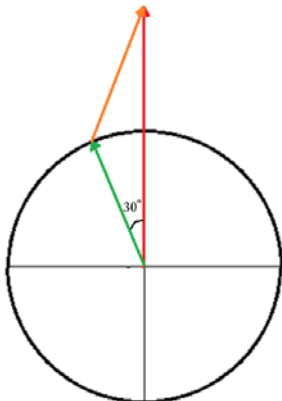
$$I_{L3} = I_{\phi C} - I_{\phi B}$$

LT3-muuntajan ensiön ja toision jännitteet mitataan kuvion 11 mukaisella tavalla. Mittauksissa pitää ottaa huomioon mittapäiden oikea potentiaalinen suunta. Kuviossa 11 mitataan muuntajan ensiöpuolella ja toisiopuolella vain vaiheiden jännitteen suuruutta. Käämijännite on myös Dyn11-kytkennässä kuvion 8 mukaan 30° edellä pääjännitettä.



Kuvio 11. Dy11-muuntajan jännitteiden mittaus

Kuviosta 12 nähdään, kuinka kaksi vaihejännitettä vaikuttavat pääjännitteen suuruuteen. Kuviosta 8 saadaan Dy11 käämin jännitevektorit, jotka ovat 30° päävirtaa edellä kello 11 asennossa.



Kuvio 12. Pää- ja vaihejännitteiden vektorit

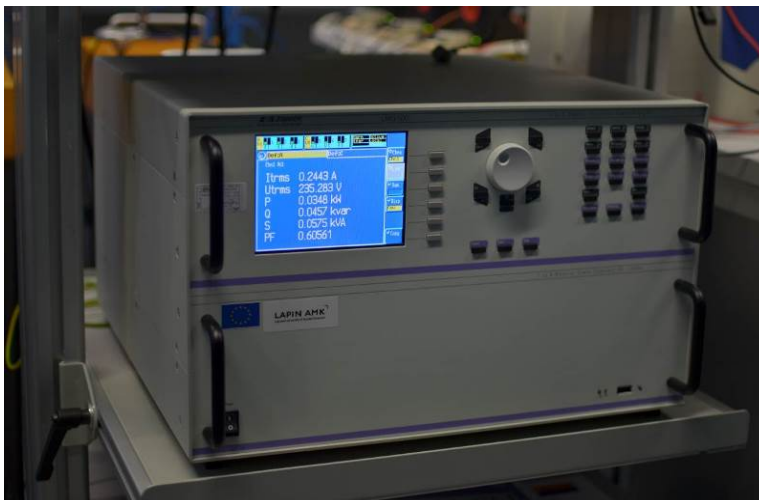
5.2 Zimmer LMG500: Sähkön laatuanalysointilaite

Kuvassa 10 on Zimmer LMG500, joka on 1-8 kanavainen sähkön laadun analysointilaite. Analysointilaite voidaan saada selville jännitteen ja virran yliaallot 0-99 väliltä. Mittalaitteen paras tarkkuus on 0,03 %; DC, 0,1 Hz...10 MHz. (Zimmer LMG500.)

Tärkeimmät LMG500:n piirteet:

- ryhmä viive U- ja I- mittapäissä <3 ns, joka varmistaa tarkan mittauksen alhaisilla cosini arvoilla tai suurilla taajuuksilla
- korkea dynamiikan tason säädön ohjaus, alkaen 3V:sta 1000 V / 3200 V huippuun, 20 mA:sta 32 A / 120 A huippuun suorassa mittauksessa yhdestä liitin parista
- 3 M Näyte/s, joka mahdollistaa aukottoman näytteenoton, jossa arvioidaan kaikkia näytearvojen lukemia
- transienttien taltiointi ja nopeiden signaalien muutoksien taltiointia triggeroinnin avulla, joka toimii laitteen normaalissa mittaustilassa.
- harmonisten ja epäharmonisten 1,5 MHz asti
- välkyntämittaus (Verkon ja kuorman vuorovaikutukset)
- 1 - 8 mittauskanavaa.

(Zimmer LMG500.)



Kuva 10. Zimmer LMG500

Opinnäytetyössä tehdään Zimmer LMG500 mittalaitteelle pikakäyttöopas (Liite 10). Oppaan tarkoitus on opastaa uutta käyttäjää alkuasetuksissa. Oppaassa ei opasteta, että miten suureita mitataan, vaan opastetaan katsomaan mittalaitteen omasta käyttöoppaasta.

6 MUUNTAJIEN JA VERKON VASTUSARVOT

Verkon ja muuntajien vastusarvot lasketaan, koska taustaverkko vaikuttaa jännitealenemiin.

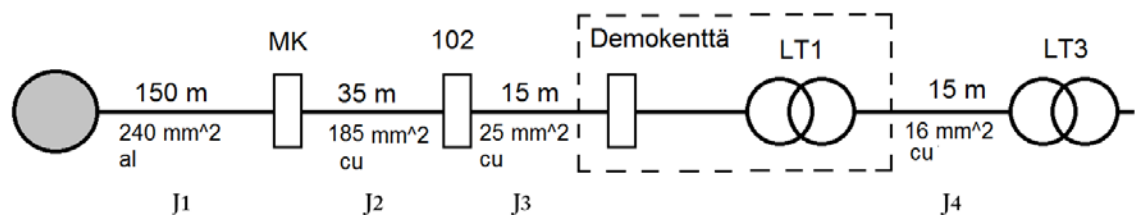
Muuntosuhde pitää ottaa huomioon laskettaessa verkon oikosulkuarvoja, mutta tässä opinnäytetyössä ei tarvittu käyttää muuntosuhdetta, koska muuntajat olivat saman suhteisia ylä- ja alajännitepuolella.

6.1 Verkko

Verkon oikosulkuimpedanssi, -reaktanssi ja -resistanssi LT3-muuntajan ensiössä lasketaan summaamalla syöttävän verkon vastusarvot, johtojen vastusarvot ja LT1-muuntajan oikosulkuvastusarvot. Verkon LT1-muuntajan ensiö- ja toisiojännite on sama, joten redusointia ei tehdä.

Kuvion 13 harmaa ympyrä kuvaa liittymää, jonka vastusarvot saatiin paikalliselta energiayhtiöltä: $I_{k1min} = 8769 \text{ A}$, jännitekerroin 0,95; $R_k = 0,01790 \ \Omega$; $X_k = 0,01733 \ \Omega$ ja $Z_k = 0,02491 \ \Omega$.

Kuvion 13 liittymästä lähtee 150 metrin mittainen J₁ johto, joka liittyy mittakeskukseen MK. MK-keskuksesta lähtee 35 m J₂ johto 102-ryhmäkeskukseen, josta lähtee 15 m J₃ johto demokenttään. Demokentässä on LT1-muuntaja, jonka vastusarvot ovat samat kuin LT2-muuntajassa. Demokentästä lähtee 15 m J₄ johto LT3-muuntajalle.



Kuvio 13. Lapin AMK:n Kosmos-rakennuksen johdotus LT3-muuntajalle

Kuvion 13 kaikissa johdoissa J_{1-4} on neljä johdinta. Maadoitusjohdinta ei merkitty kuvioon, koska mittauksen kannalta se ei ole olennaisia.

Syöttävän verkon oikosulkuarvot ovat LT3-muuntajan ensiötä syöttävät vastusarvot. Johtojen vastusarvot saatiin D1-2012 kirjan taulukosta 41.6. (D1-2012, 96)

Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi LT3-muuntajan ensiössä lasketaan summaamalla verkon impedanssit yhteen:

$$Z_k = 0.02491 \Omega + J_{1Z} * 2 * l + J_{2Z} * 2 * l + J_{3Z} * 2 * l + J_{4Z} * 2 * l + Z_{kLT1}$$

$$Z_k = 0.02491 \Omega + 0.180 \Omega * 2 * 0.15 \text{ km} + 0.148 \Omega * 2 * 0.035 \text{ km} + 0.902 * 2 * 0.015 \text{ km} + 1.418 \Omega * 2 * 0.015 \text{ km} + 0.186667 \Omega$$

$$Z_k = 0.345 \Omega$$

Syöttävän verkon oikosulkureaktanssi LT3-muuntajan ensiössä lasketaan summaamalla verkon reaktanssit yhteen:

$$X_k = 0.01733 \Omega + J_{1X} * 2 * l + J_{2X} * 2 * l + J_{3X} * 2 * l + J_{4X} * 2 * l + X_{kLT1}$$

$$X_k = 0.01733 \Omega + 0.079 \Omega * 2 * 0.15 \text{ km} + 0.08 \Omega * 2 * 0.035 \text{ km} + 0.086 \Omega * 2 * 0.015 \text{ km} + 0.09 \Omega * 2 * 0.015 \text{ km} + 0.119 \Omega$$

$$X_k = 0.171 \Omega$$

Syöttävän verkon oikosulkuresistanssi LT3-muuntajan ensiössä lasketaan summaamalla verkon resistanssit yhteen:

$$R_k = 0.0179 \Omega + J_{1R} * 2 * l + J_{2R} * 2 * l + J_{3R} * 2 * l + J_{4R} * 2 * l + R_{kLT1}$$

$$R_k = 0.0179 \Omega + 0.162 \Omega * 2 * 0.15 \text{ km} + 0.125 \Omega * 2 * 0.035 \text{ km} + 0.898 \Omega * 2 * 0.015 \text{ km} + 1.415 \Omega * 2 * 0.015 \text{ km} + 0.144 \Omega$$

$$R_k = 0.289 \Omega$$

6.2 LT3-muuntaja, Dy11-muuntaja

LT3-muuntajan vastusarvot saadaan liitteestä 9. Verkon nimellisimpedanssi lasketaan kaavalla (12), josta voidaan määrittää verkon oikosulkuimpedanssi kaavalla (15).

$$Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} * I_n} \quad (12)$$

$$Z_n = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} * 23.1 \text{ A}}$$

$$Z_n = 10 \Omega$$

$$Z_k = \frac{(U_n/kV)^2}{S_n/MVA} * \frac{z_k/\%}{100} \quad (15)$$

$$Z_k = \frac{(0.4/kV)^2}{0.016/MVA} * \frac{3.75/\%}{100}$$

$$Z_k = 0.375 \Omega$$

Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi lasketaan kaavalla:

$$r_k = 100 \frac{P_{kn}}{S_n} \% \quad (16)$$

$$r_k = 100 \frac{550 \text{ W}}{16\,000 \text{ VA}} \%$$

$$r_k = 3.43 \%$$

Muuntajan oikosulkuresistanssi lasketaan kaavalla:

$$R_k = \frac{r_k/\%}{100} Z_n \quad (17)$$

$$R_k = \frac{3.43/\%}{100} 10 \Omega$$

$$R_k = 0.343 \Omega$$

Muuntajan oikosulkureaktanssi lasketaan kaavalla:

$$X_k = \frac{\sqrt{z_k^2 - r_k^2}}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (18)$$

$$X_k = \frac{\sqrt{3.75 \%^2 - 3.43 \%^2}}{100} * \frac{400 V^2}{16\,000 VA}$$

$$X_k = 0.1516 \Omega$$

6.3 LT2-muuntaja, Yy0-muuntaja

LT2-muuntajan vastusarvot saadaan liitteestä 8. Verkon nimellisimpedanssi lasketaan kaavalla (12), josta voidaan määrittää verkon oikosulkuimpedanssi kaavalla (15).

$$Z_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} * I_n} \quad (12)$$

$$Z_n = \frac{400 V}{\sqrt{3} * 43.3 A}$$

$$Z_n = 5.33 \Omega$$

$$Z_k = \frac{(U_n/kV)^2}{S_n/MVA} * \frac{z_k/\%}{100} \quad (15)$$

$$Z_k = \frac{(0.4/kV)^2}{0.03/MVA} * \frac{3.5/\%}{100}$$

$$Z_k = 0.186667 \Omega$$

Muuntajan suhteellinen oikosulkuresistanssi lasketaan kaavalla:

$$r_k = 100 \frac{P_{kn}}{S_n} \% \quad (16)$$

$$r_k = 100 \frac{810 W}{30\,000 VA} \%$$

$$r_k = 2.7 \%$$

Muuntajan oikosulkuresistanssi lasketaan kaavalla:

$$R_k = \frac{r_k/\%}{100} Z_n \quad (17)$$

$$R_k = \frac{2.7/\%}{100} 5.33 \Omega$$

$$R_k = 0.144 \Omega$$

Muuntajan oikosulkureaktanssi lasketaan kaavalla:

$$X_k = \frac{\sqrt{z_k^2 - r_k^2}}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (18)$$
$$X_k = \frac{\sqrt{3.5\%^2 - 2.7\%^2}}{100} * \frac{400 V^2}{30\,000 VA}$$
$$X_k = 0.119 \Omega$$

7 TULOSTEN ANALYSOINTI

Tulokset ovat kahden muuntajan ensiöiden mittaustuloksia. Tulosten analysoinnissa keskitytään vain L1-vaiheeseen, ja sen muutoksiin. Tulokset analysoitiin mittausseläitteellä mitatuista tuloksista. Tulokset ovat kuvio- ja taulukkomuodossa.

Moottorikuormissa mitattiin poikkeuksellisesti muuntajien ensiöt sekä syöttävän muuntajan toisio.

7.1 Tyhjäkäynnin vaikutus

Mittauksessa mitattiin Yy0- ja Dy11-muuntajien tyhjäkäyntivaikutukset. Mittauksessa mitattiin vain muuntajien ensiöpuolta, muuntajan toisio oli mittauksien aikana avoin. Tyhjäkäynnin mittaustulokset löytyvät liitteestä 4.

Muuntajan kytkentäsysäsvirran teorian mukaan virtapiikki voi olla jopa 8 – 10 kertainen verrattuna mitoitusvirtaan. Käynnistyksen aikana on oletettavaa, että tehokerroin muuttuu muuntajan käämien magnetoitumisen takia ja jännite alenee kuormituksen yhteydessä.

7.1.1 Dy11-muuntajan tyhjäkäynnin vaikutus

Muuntajan käynnistyksen yhteydessä päävirrasta saatiin 174 A:n virtapiikki. Kuviossa 14 nähdään, että käynnistyshetkellä tehokerroin PF, näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho (S) nousevat käynnistyksen takia. 174 A:n virtapiikkiä ei näy kuviossa 14, koska se mitattiin erillisellä mittauksella.

Tehokertoimen PF nousu johtuu siitä, että muuntaja käyttäytyy kuin oikosulku käynnistyshetkellä. Suuri näennäistehon nousu käynnistyshetkellä johtuu suuresta virrasta. Muuntajan käämin magnetoitumisen jälkeen muuntaja tasoittuu reaktiivisempaan tilaan, jossa resistiivinen osa on tyhjäkäyntitehoa P_0 .

Dy11-muuntajan liitteessä 9 kerrotaan sysäysvirran olevan 340 A. Mittauksista saatu tulos on kuitenkin vain 174 A. Virran alhaisuus johtuu siitä, että Dy11-muuntajaa syöttää 30 kVA muuntaja. Dy11-muuntajan ensiön verkon teho on sen ver-
 ran alhainen, ettei suurta virtasysäystä saada aikaiseksi. Liitteen 9 arvot ovat myös täysin teoreettisia, joten 340 A:n kytkentäsysäysvirta on muuntajan teoreet-
 tisesti suurin arvo.

Muuntajan tyhjäkäyntitehoa laskiessa pitää ottaa huomioon I_{rms} päävirta, joka pi-
 tää jakaa $\sqrt{3}$:lla, jolloin saadaan muuntajan käämiin virta. Dyn11-muuntajan D-
 kytkennän vaihevirta on myös 30° päävirtaa edellä, joten $\cos\phi$ muuttuu. Muunta-
 jan kelaan virtaavasta virrasta ja pääjännitteestä U_{rms} saadaan kaavalla (1)
 muuntajan käämin näennäisteho S , josta voidaan laskea muuntajan yhden kää-
 min tuottama tehohäviö P_0 kertomalla se $\cos\phi$ tehokertoimella. Sama laskuperi-
 aate tehdään muuntajan kaikille käämeille, mistä saadaan muuntajan kokonainen
 tehohäviö P_0 . Päävirrat ja vaihejännitteet saadaan taulukosta 2.

$$S = U_{käämi} * \frac{I_{päävirta}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$S_{1-käämi} = 933.25 \text{ VA}$$

$$S_{2-käämi} = 851.38 \text{ VA}$$

$$S_{3-käämi} = 1200.23 \text{ VA}$$

Tehokertoimesta PF pitää ottaa huomioon, että pääjännitteen vaihekulma on eri
 kuin vaihevirran kulma. Vaihevirran kulma on 30° edellä. 0,49 tehokertoimeen
 lisätään 30° , joka on $90,66^\circ$, 0,45 kerroin on $93,2^\circ$ ja 0,39 kerroin on 97° .

$$P_{käämi} = S_{käämi} * \cos\phi_{käämi} \quad (3)$$

$$P_{1-käämi} = 10.7 \text{ W}$$

$$P_{2-käämi} = 47.5 \text{ W}$$

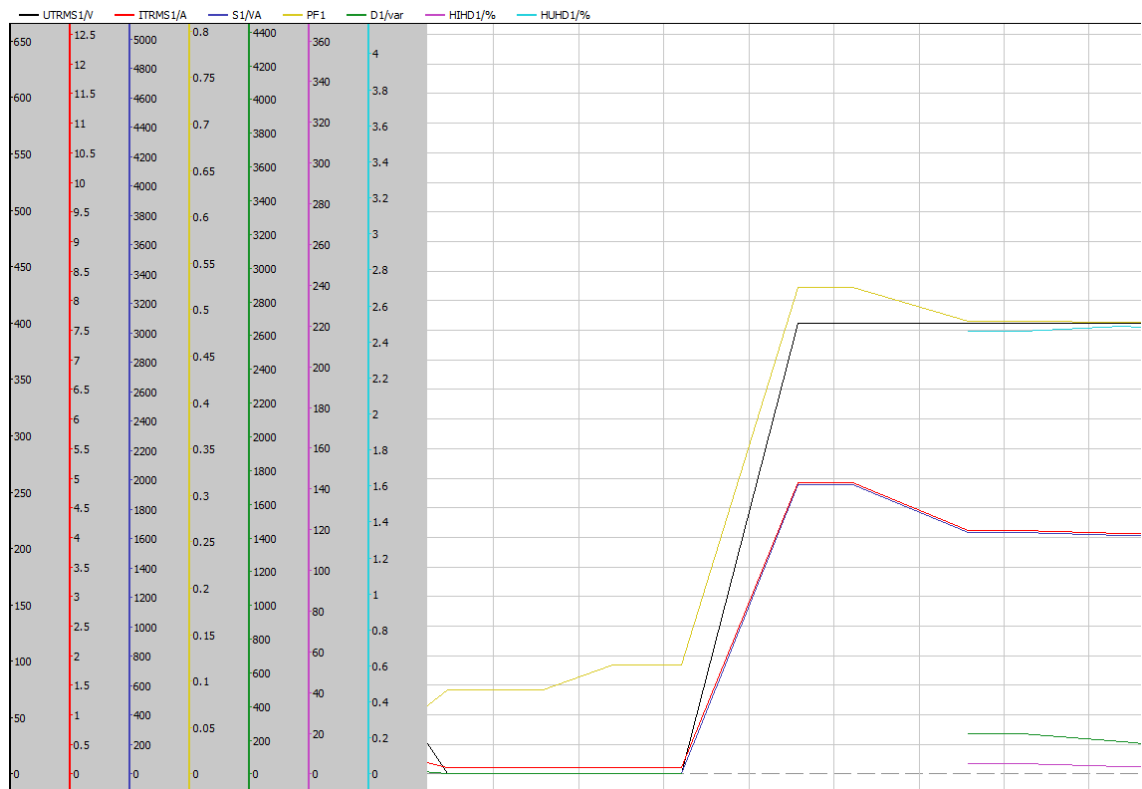
$$P_{3-käämi} = 146.2 \text{ W}$$

$$P_0 = P_{1-käämi} + P_{2-käämi} + P_{3-käämi}$$

$$P_0 = 204.4 \text{ W}$$

Dy11-muuntajan tehohäviö on 204,4 W ilman kuormitusta. Valmistajan mukaan liitteessä 9 tehohäviöt olisivat 250 W, jotka ovat vain teoreettisesti laskettuja arvoja $\pm 15 \%$ IEC standardista.

Dy11-muuntajan jännitealenemaa ei tutkittu, mutta muuntaja aiheutti käynnistymisen yhteydessä virtapiikin ja tyhjäkäyntihäviön, jotka näkyvät liitteessä 4. Virtapiikki vaikuttaisi jännitteeseen, joka näkyisi transienttisena jännitteen alenemana.



Kuvio 14. LT3-muuntajan käynnistys tyhjäkäyntiin (Liite 4)

Taulukko 2. LT3-muuntajan tyhjäkäynti (Liite 4)

	Tyhjäkäynti		
	ENSIÖ		
Dy11	L1	L2	L3
Urms [V]	400.11	404.01	402.88
Irms [A]	4.04	3.65	5.16
S [VA]	1615.26	1474.59	2077.31
PF	0.49	0.45	0.39
D [%]	0.00	0.00	0.00
THDi [%]	3.48	3.65	3.59
THDv [%]	2.51	2.34	2.17
THDv [V] 3	0.61	0.41	0.35
THDv [V] 5	3.62	4.61	4.35
THDv [V] 7	3.81	2.76	4.10
THDv [V] 9	0.44	0.50	0.91
THDv [V] 11	4.44	4.29	4.23
THDi [A] 3	0.0413	0.0717	0.1059
THDi [A] 5	0.1213	0.1006	0.1349
THDi [A] 7	0.0451	0.0370	0.0476
THDi [A] 9	0.0006	0.0028	0.0171
THDi [A] 11	0.0106	0.0114	0.0125

7.1.2 Yy0-muuntaja tyhjäkäynnin vaikutus

Muuntajan käynnistyksen yhteydessä päävirrassa tapahtui 141 A:n virtapiikki. Kuviossa 15 nähdään, että käynnistyshetkellä tehokerroin PF, näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousevat käynnistyksen takia. 174 A:n virtapiikkiä ei näy kuviossa 15, vaan se mitattiin erillisellä mittauksella.

Tehokertoimen PF nousu johtuu siitä, että muuntaja käyttäytyy käynnistyshetkellä kuin oikosulku. Suuri näennäistehon nousu käynnistyshetkellä johtuu taas suuresta virrasta. Muuntajan käämin magnetoitumisen jälkeen muuntaja tasoittuu reaktiivisempaan tilaan, jossa resistiivinen osa on tyhjäkäyntitehoa P_0 . (Kuvio 15.)

Yy0-muuntajan liitteessä 8 kerrotaan sysäysvirran olevan 1,1 kA, mutta mittauksista saatu tulos on vain 141 A. Virran alhaisuus johtuu siitä, että Yy0-muuntaja syöttää 16 kVA Dy0-muuntaja. Yy0-muuntajan ensiön verkon teho on sen verran alhainen, ettei suurta virtasysäystä saada aikaiseksi. Muuntajan datalehdessä annettu sysäysvirta-arvo on täysin teoreettinen.

Muuntajan kelaan läpi kulkevasta virrasta ja vaihejännitteestä saadaan kaavalla (1) muuntajan käämin näennäisteho S , josta voidaan laskea muuntajan yhden käämin tuottama tehohäviö P_0 kertomalla näennäisteho S tehokertoimella $\cos\varphi$. Sama laskuperiaate tehdään muuntajan kaikille käämeille, josta saadaan muuntajan kokonainen tehohäviö P_0 . Päävirrat ja vaihejännitteet saadaan taulukosta 3.

$$S = U * I \quad (1)$$

$$S_{1-käämi} = 837.6 \text{ VA}$$

$$S_{2-käämi} = 803.85 \text{ VA}$$

$$S_{3-käämi} = 863.76 \text{ VA}$$

$$S_0 = 2505.21 \text{ VA}$$

$$P = S_{käämi} * \cos\varphi \quad (3)$$

$$P_{1-käämi} = 58.3 \text{ W}$$

$$P_{2-käämi} = 67 \text{ W}$$

$$P_{3-käämi} = 92.4 \text{ W}$$

$$P_0 = P_{1-käämi} + P_{2-käämi} + P_{3-käämi}$$

$$P_0 = 217.7 \text{ W}$$

Yy-muuntaja aiheutti 217,7 W tehohäviön ilman kuormitusta. Valmistajan mukaan tehohäviö on 370 W.

Yy0-muuntaja aiheutti jännitealenemaa U_a Yy0-muuntajan ensiöön. Jännitealeneman ratkaisuun voidaan käyttää jännitealeneman kaavaa (22), jossa käytetään taustaverkon oikosulkuresistanssia ja -reaktanssia, Yy0-muuntajan oikosulku-resistanssia ja -reaktanssia, sekä kuorman virtaa ja kuorman tehokerrointa. Tehokerroin ja virta saadaan taulukosta 3, verkon vastusarvot luvusta 6.1 ja muuntajien vastusarvot luvuista 6.2 ja 6.3.

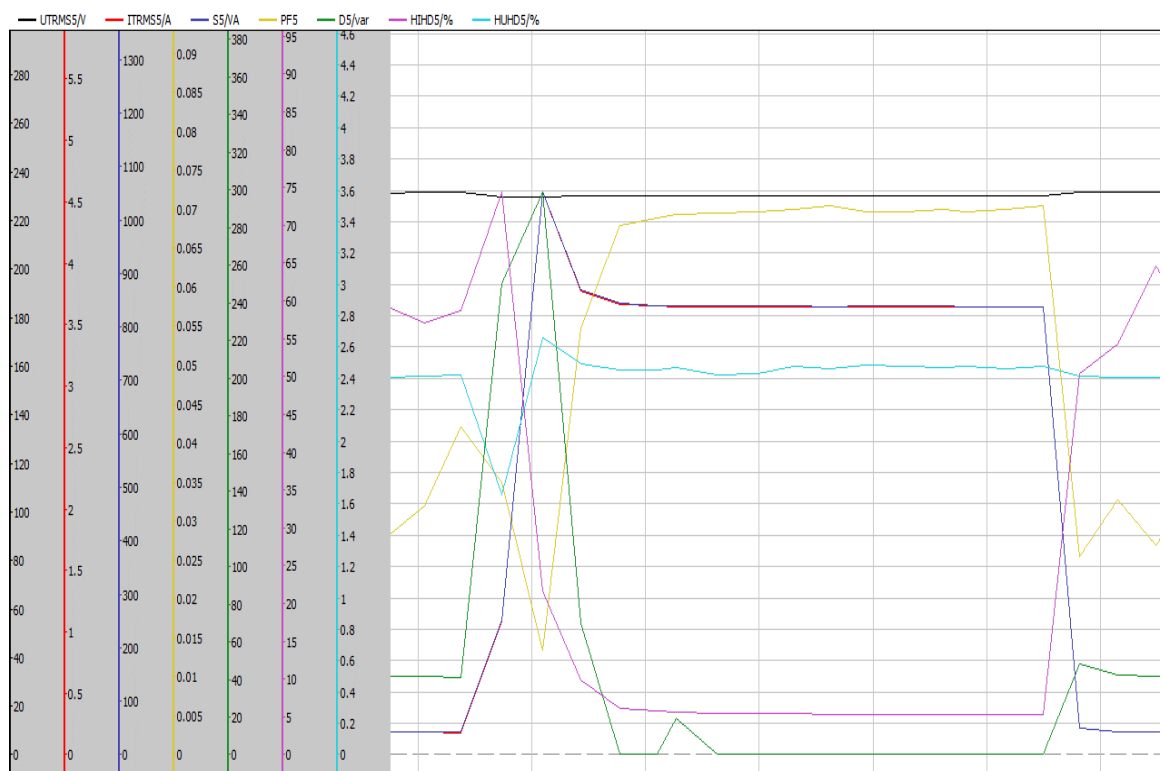
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 3.646 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega) * \cos(86^\circ) + 3.646 \text{ A} * (0.171\Omega + 0.1516 \Omega) * \sin(86^\circ)$$

$$U_a = 1.33 \text{ V}$$

Jännitealenemaksi saatiin 1,33 V, joka näkyy pienenä jännitteen alenemana kuviossa 14.

Kytkeähetkellä havaittiin säröä D. Särötehon kaavasta (11) voidaan todeta, kun Q_1 perustaajuuden loisteho ei ole summassa muiden tehojen kanssa, niin syntyy säröä. Tässä tapauksessa muuntaja tuotti säröä kytkeähetkellä, koska muuntaja ei ollut kytkeähetkellä lineaarinen.



Kuvio 15. LT2-muuntajan käynnistys tyhjäkäyntiin (Liite 4)

Taulukko 3. LT2-muuntajan tyhjäkäynti (Liite 4)

	Tyhjäkäynti		
	ENSIÖ		
Yy0	L1	L2	L3
Urms [V]	230.102	231.274	231.315
Irms [A]	3.64604	3.47577	3.73412
S [VA]	838.963	803.853	863.758
PF	6.96E-02	8.33E-02	1.07E-01
D [%]	0	0	0
THDi [%]	5.39122	6.92672	6.6129
THDv [%]	2.42447	2.40026	2.30494
THDv [V] 3	3.76E-01	3.43E-01	4.29E-01
THDv [V] 5	3.05744	3.44003	3.38037
THDv [V] 7	2.18705	1.45095	2.21153
THDv [V] 9	2.82E-01	2.43E-01	4.35E-01
THDv [V] 11	3.03365	2.7795	2.81825
THDi [A] 3	5.03E-02	1.74E-01	1.34E-01
THDi [A] 5	1.67E-01	1.37E-01	1.84E-01
THDi [A] 7	4.82E-02	4.14E-02	5.60E-02
THDi [A] 9	3.86E-03	8.43E-03	3.96E-03
THDi [A] 11	1.24E-02	9.69E-03	1.43E-02

7.2 Resistiivisen kuorman vaikutus

Kuormitus on asetettu 8 A:iin/vaihe ja kuormitusta ei muutettu mittauksien aikana. Symmetrisessä kuormituksessa kaikki kolme vaihetta kulutti noin 8 A ja epäsymmetrisessä käytettiin samaa kuormaa, mutta L1-vaihe avattiin. Mittauksissa tutkitaan vain L1-arvoja, jotka löytyvät liitteestä 1.

Tarkoituksena on tutkia, miten resistiivinen kuormitus vaikuttaa muuntajien ensiöissä. Kuorman sähkösuureita ei mitattu ollenkaan.

7.2.1 Symmetrinen kuormitus

Symmetrisessä kuormituksessa kuorman vaiheiden arvot ovat lähestulkoon samat. Taulukosta 4 nähdään Dy11-muuntajan ensiön ja toision mittaustulokset. Dy11-muuntajan toision mittaustulokset ovat Yy0-muuntajan ensiön mittaustulokset.

Taulukko 4. Symmetrisen kuormituksen vaikutukset resistiivisessä kuormassa (Liite 1)

Symmetrinen kuorma tähdessä						
	ENSIÖ			TOISIO		
Dy11 – Yy0	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	396.55	400.56	398.93	225.32	227.28	226.35
Irms [A]	11.33	10.93	12.89	8.55	9.33	9.37
S [VA]	4492.81	4379.20	5142.21	1925.68	2120.77	2119.96
PF	0.30	0.38	0.35	0.92	0.93	0.91
D [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
THDi [%]	3.04	2.76	2.95	2.61	2.65	2.86
THDv [%]	2.33	2.17	2.08	2.30	2.15	2.10
THDv [V] 3	0.63	0.72	0.27	0.55	0.41	0.34
THDv [V] 5	3.69	4.62	4.58	2.31	2.81	2.82
THDv [V] 7	3.70	2.60	3.98	2.08	1.45	2.20
THDv [V] 9	0.48	0.53	0.97	0.29	0.29	0.55
THDv [V] 11	4.39	4.18	4.01	2.40	2.30	2.22
THDi [A] 3	0.08	0.15	0.22	0.03	0.13	0.10
THDi [A] 5	0.26	0.17	0.25	0.13	0.14	0.18
THDi [A] 7	0.17	0.12	0.15	0.11	0.09	0.12
THDi [A] 9	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02
THDi [A] 11	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08

Yy0-muuntaja

Jännite UTRMS laski kuorman vaikutuksesta Yy0-muuntajan ensiössä. Jännitealenema U_a voidaan laskea kaavalla (22). Tehokerroin ja virta saadaan taulukosta 4, verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1 ja Dy11-muuntajan vastusarvot luvusta 6.2.

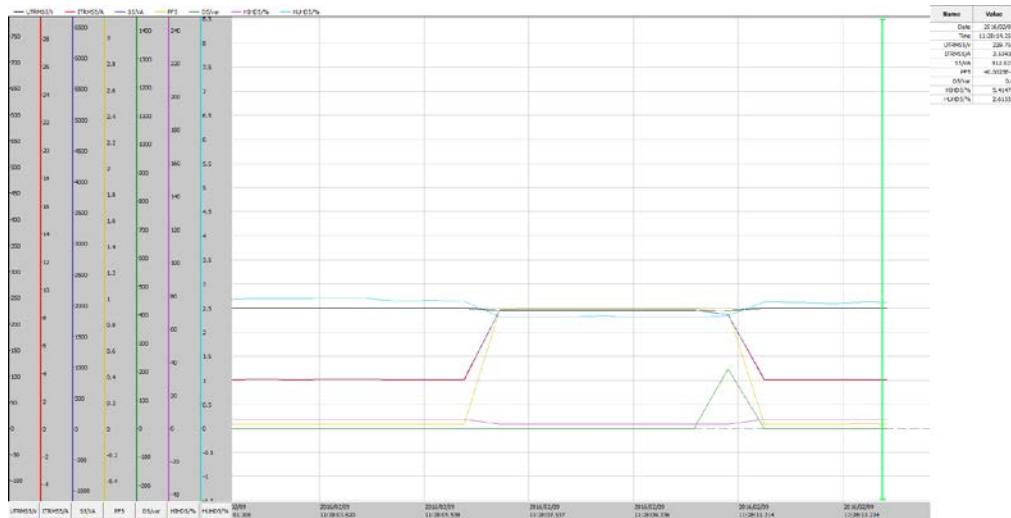
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 8.55 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega) * \cos(23^\circ) + 8.55 \text{ A} * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega) * \sin(23^\circ)$$

$$U_a = 6.05 \text{ V}$$

Taulukoiden 3 ja 4 mukaan Yy0-muuntaja on 230,1 V tyhjäkäynnillä ja kuormituksen aikana jännite tippuu 225,32 V:iin, eli jännitteessä on 4,78 V jännitealenema. Teoreettisesti muuntajassa olisi 6,05 V jännitealenema, mutta reaktanssi- ja resistanssiarvot ovat täysin teoreettisia arvoja. (Kuvio 16.)

Tehokerroin PF, näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousivat Yy0-muuntajan toisiossa olevan 8 A resistiivisen kuorman takia. Särötehoa D havaittiin vain kuorman katkaisuhetkellä. On kuitenkin varmaa, että pientä säröä tapahtuu käynnistyksen ja katkaisun hetkellä, johtuen muuntajan epälineaarista ominaisuudesta. Yliaaltovirta HIDH ja yliaaltojännite HUHD vähentyi kuormituksen takia. (Kuvio 16.)



Kuvio 16. Yy0-muuntajan L1 ensiö symmetrisessä kuormituksessa (Liite 1)

Dy11-muuntaja

Jännite UTRMS laski kuorman vaikutuksesta muuntajan ensiössä. Jänniteale-nema U_a voidaan laskea kaavalla (22), jossa taulukon 4 L1 ensiön virta on jaettu $\sqrt{3}$:lla jolloin saadaan vaihevirta, jonka tehokertoimeen lisätään 30° . Tehokerroin ja virta saadaan taulukosta 4, verkon vastusarvot kappaleesta 6.1.

$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 6.54 \text{ A} * 0.289 \Omega * \cos(72.5^\circ + 30^\circ) + 6.54 \text{ A} * 0.171 \Omega * \sin(72.5^\circ + 30^\circ)$$

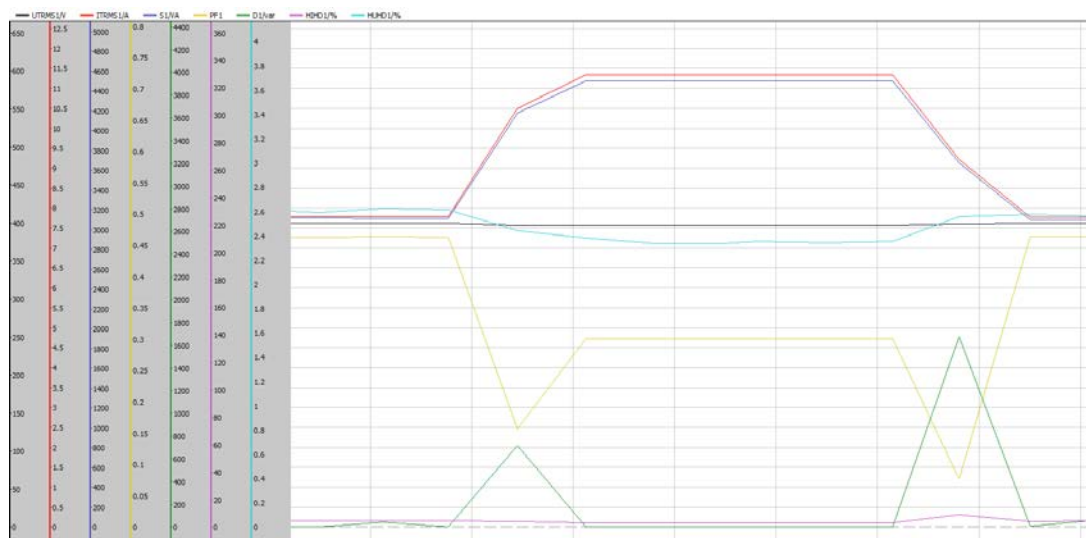
$$U_a = 0.68 \text{ V}$$

Taulukoiden 2 ja 4 mukaan Dy11-muuntaja on 400,11 V tyhjäkäynnillä ja kuormituksen aikana jännite tippuu 396,55 V:iin, eli jännitteessä on mittaustaulukkojen mukaan 3,56 V:n jännitealenema. Teoreettisesti muuntajassa olisi 0,68 V:n jännitealenema, mutta reaktanssi- ja resistanssiarvot ovat täysin teoreettisia arvoja.

Tehokerroin PF kuvion 17 mukaan tekee polynomin mallisen funktion, joka näyttää kuviossa 17 kuopalta. Tämä erikoinen muoto johtuu siitä, että taulukossa ei näy negatiivisia lukemia. PF tehokerroin ohittaa kuormituksen aikana virran 0° kulman, joka saa aikaiseksi kuviossa 17 polynomin mallisen funktion tehokertoimesta PF. (Kuvio 17.)

Säröteho D nousee kytkentähetkillä, jolloin muuntaja toimii epälineaarisesti ja aiheuttaa verkkoon säröä. Säröteho D on myös paljon suurempi Dy11-muuntajan ensiössä kuin Yy0-muuntajan ensiössä. Kuvioista 17 pitää huomioida, että säröteho D on oikeasti $\sqrt{3}^{-1}$ kertaa pienempi. Kuvioista 16 ja 17 voidaan verrata, että Dy11-muuntajaan kohdistuu enemmän särötehoa kuorman kytkentä- ja katkaisuhetkellä.

Yliaaltojännite HUHD alenee vähän tyhjäkäyntitilasta ja yliaaltovirta HIDH ei muutu mitenkään. (Kuvio 17.)



Kuvio 17. Dy11-muuntajan L1 ensiö symmetrisessä kuormituksessa (Liite 1)

7.2.2 Epäsymmetrinen kuormitus

Epäsymmetrisessä kuormituksessa kuorman L1-vaihe aukaistiin. Testin tarkoituksena on nähdä, miten epäsymmetrisen kuorman vaikutukset näkyvät muuntajien ensiöissä.

Taulukossa 5 on Dy-muuntajan ensiön ja toision mittauslukemat. Dy11-toision mittauslukemat ovat myös Yy0-muuntajan ensiön lukemat.

Taulukko 5. Epäsymmetrisen kuormituksen vaikutukset resistiivisessä kuormassa (Liite 1)

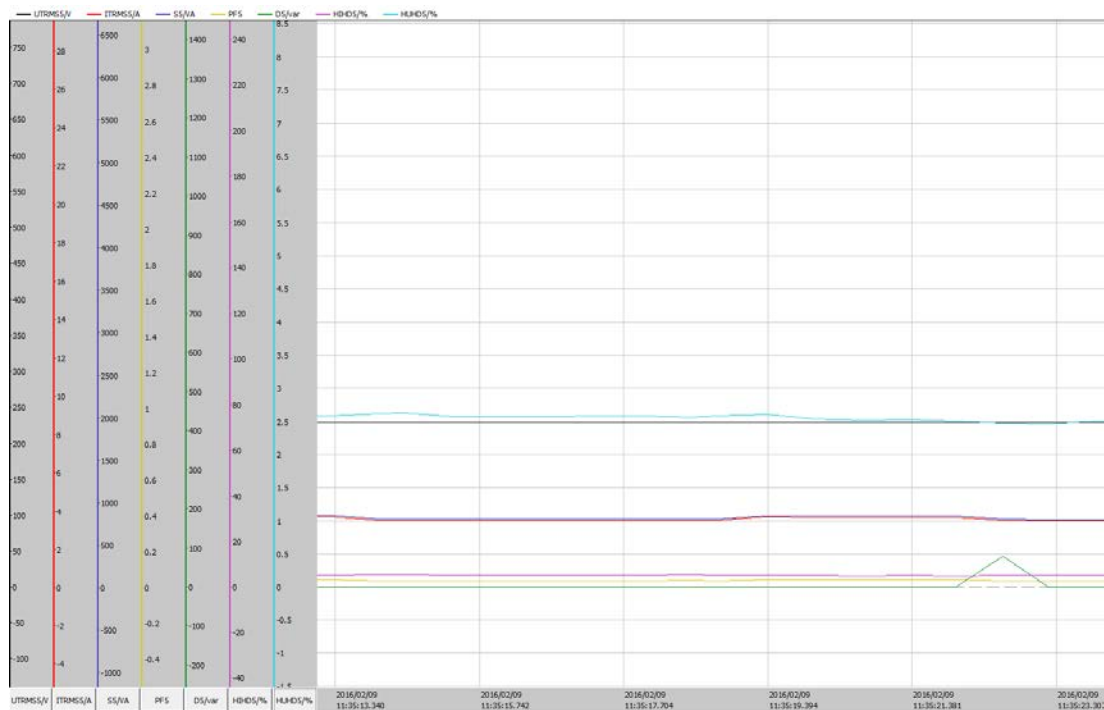
	L1 auki					
	ENSIÖ			TOISIO		
Dy11 – Yy0	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	399.23	401.66	397.73	229.57	229.30	225.60
Irms [A]	11.64	4.26	13.10	3.72	6.80	10.06
S [VA]	4648.72	1711.17	5211.35	853.08	1558.41	2270.45
PF	0.30	0.15	0.35	0.05	1.00	0.67
D [%]	0.00	98.35	34.79	0.00	49.97	0.00
THDi [%]	2.99	7.20	2.87	5.30	3.26	2.63
THDv [%]	2.45	2.16	2.13	2.51	2.13	2.20
THDv [V] 3	0.76	0.81	0.37	0.63	0.39	0.34
THDv [V] 5	3.87	4.55	4.57	2.46	2.74	2.85
THDv [V] 7	3.75	2.87	3.98	2.13	1.64	2.20
THDv [V] 9	0.37	0.47	0.82	0.23	0.24	0.46
THDv [V] 11	4.50	3.85	4.23	2.58	2.08	2.42
THDi [A] 3	0.06	0.21	0.19	0.10	0.15	0.06
THDi [A] 5	0.32	0.18	0.25	0.16	0.09	0.22
THDi [A] 7	0.11	0.10	0.16	0.05	0.10	0.10
THDi [A] 9	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
THDi [A] 11	0.03	0.06	0.09	0.01	0.07	0.06

Yy0-muuntaja

Yy-muuntajassa tapahtui pientä säröytymistä katkaisuhetkellä. On myös mahdollista, että kytkentähetkelläkin tapahtui säröytymistä, mutta mittalaite ei kyennyt näkemään sitä harmonisen mittauksen hitauden takia. (Kuvio 18.)

Taulukossa 5 Yy0-muuntajan ensiön virrat ovat erittäin epäsymmetriset toisiinsa nähden ja L1-vaiheessa ei ollut kuormitusta, koska Yy0-muuntajan toisiossa ei ollut kuormaa. L2- ja L3-vaiheissa on virta- ja tehokerroin eroa, joka johtuu mitauksesta. Kun kuorman L1-vaihe katkaistiin, kuormaa syötti vain kaksi vaihetta ja virtojen kulmat näyttivät väärää lukemaa.

Kuviosta 18 voidaan päätellä, että Yy0-muuntajan muut kelat vaikuttavat muuntajan kaikkiin keloihin magnetoitumisen takia.



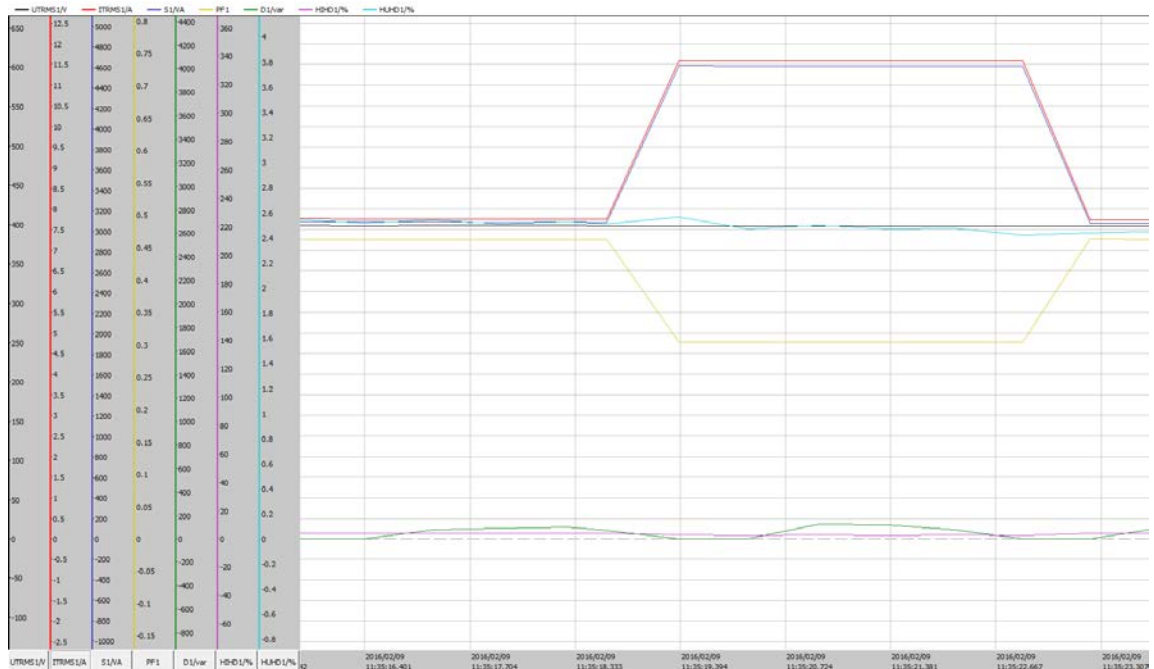
Kuvio 18. Dy11-muuntajan L1 toisio epäsymmetrisessä kuormituksessa (Liite 1)

Dy11-muuntaja

Jännite UTRMS laski erittäin vähän, koska Dy11-muuntajan toision L1 – L2 vaiheiden välillä ei ollut muuttuvaa kuormaa. (Kuvio 19)

Näennäisvirta ITRMS nousi toisen vaiheen kuorman muutoksen takia ja nosti tehon kulutusta. A-käämiin ei kuitenkaan kohdistunut kuormaa, joten jännite pysyi lähes samassa tasossa. (Kuvio 19.)

Tehokerroin PF laski lähes resistiiviselle tasolle ja säröteho D, yliaaltovirta HIDH ja yliaaltojännite HUHD pysyivät muuttumattomana. (Kuvio 19.)



Kuvio 19. Dy11-muuntajan L1 ensiö epäsymmetrisessä kuormituksessa (Liite 1)

7.3 Induktiivisen kuorman vaikutus

Kuormitus on asetettu 8 A:iin/vaihe ja kuormitusta ei muutettu mittauksien aikana. Symmetrisessä kuormituksessa kaikki kolme vaihetta kulutti noin 8 A ja epäsymmetrisessä käytettiin samaa kuormaa, mutta L1-vaihe avattiin. Mittauksissa tutkitaan vain L1-arvoja, jotka löytyvät liitteestä 2.

Tarkoituksena on tutkia, miten induktiivinen kuormitus vaikuttaa muuntajien ensiöissä. Kuorman sähkösuureita ei mitattu ollenkaan.

7.3.1 Symmetrisen kuormitus

Symmetrisessä kuormituksessa kuorman vaiheiden arvot ovat lähestulkoon samat. Taulukosta 6 nähdään Dy11-muuntajan ensiön ja toision mittaustulokset. Dy11-muuntajan toision mittaustulokset ovat Yy0-muuntajan ensiön mittaustulokset.

Taulukko 6. Symmetrisen kuormituksen vaikutukset induktiivisessa kuormassa (Liite 2)

Symmetrinen kuorma tähdessä						
Dy11 – Yy0	ENSIÖ			TOISIO		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	396.71	399.76	399.11	226.37	228.05	227.57
Irms [A]	15.75	15.14	17.00	11.30	11.52	11.67
S [VA]	6249.27	6050.71	6786.12	2558.48	2626.91	2655.25
PF	0.44	0.44	0.38	0.05	0.04	0.07
D [%]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
THDi [%]	1.92	1.99	2.38	1.51	1.96	1.95
THDv [%]	2.50	2.39	2.29	2.55	2.43	2.35
THDv [V] 3	0.34	0.56	0.37	0.38	0.32	0.41
THDv [V] 5	4.04	4.86	4.82	2.55	2.98	3.00
THDv [V] 7	4.09	3.21	4.39	2.33	1.82	2.49
THDv [V] 9	0.35	0.47	0.76	0.20	0.27	0.44
THDv [V] 11	4.52	4.18	4.23	2.56	2.36	2.38
THDi [A] 3	0.09	0.20	0.29	0.06	0.18	0.14
THDi [A] 5	0.27	0.21	0.26	0.15	0.12	0.16
THDi [A] 7	0.09	0.07	0.09	0.05	0.04	0.05
THDi [A] 9	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
THDi [A] 11	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02

Yy0-muuntaja

Jännite UTRMS laski kuorman vaikutuksesta Yy0-muuntajan ensiössä. Jännitealenema U_a voidaan laskea kaavalla (22). Tehokerroin ja virta saadaan taulukosta 6, verkon vastusarvot luvusta 6.1 ja Dy11-muuntajan vastusarvot luvusta 6.2.

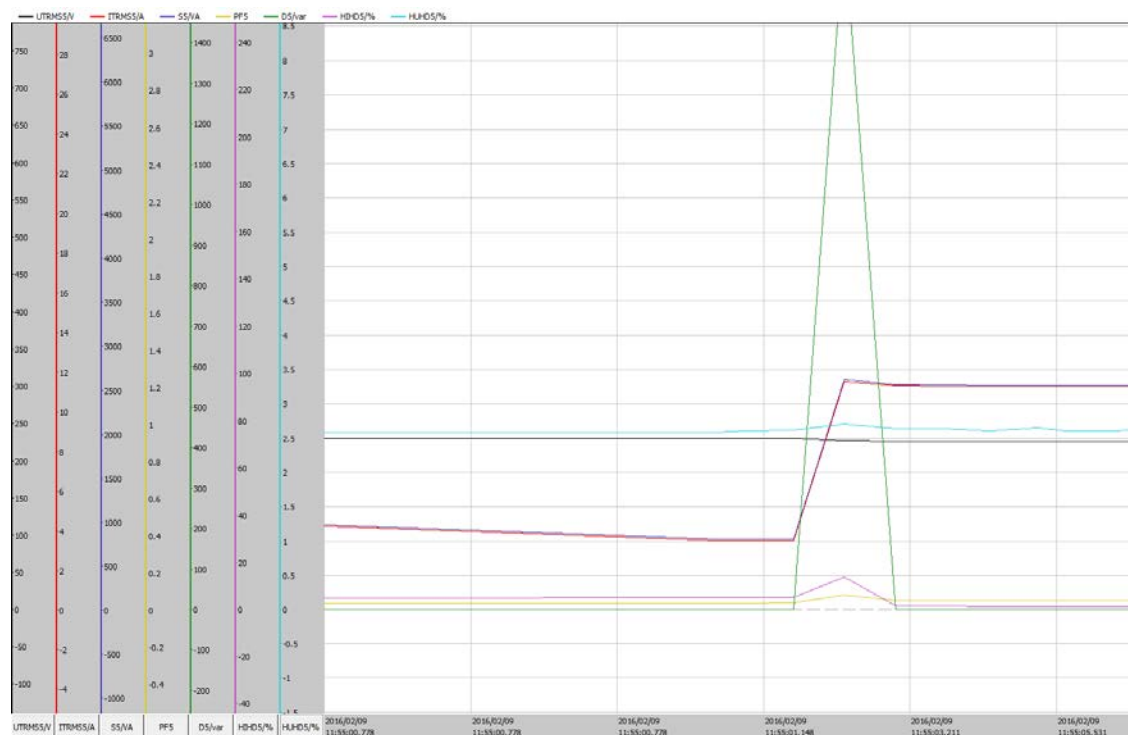
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 11.3 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega) * \cos(87^\circ) + 11.3 \text{ A} * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega) * \sin(87^\circ)$$

$$U_a = 4.01 \text{ V}$$

Taulukoiden 3 ja 6 mukaan Yy0-muuntaja on 230,1 V tyhjäkäynnillä ja kuormituksen aikana jännite tippuu 226,37 V:iin, eli jännitteessä on 3,37 V:n jännitealenema. Teoreettisesti muuntajassa olisi 4,01 V:n jännitealenema, mutta reaktanssi- ja resistanssiarvot ovat täysin teoreettisia arvoja. (Kuvio 20.)

Tehokerroin PF nousi kuorman takia erittäin vähän, koska induktiivinen kuorma ei vaikuta dramaattisesti jo induktiiviseen piiriin tehokertoimeen PF. Näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousivat suhteessa toisiinsa. Virta ITRMS teki käynnistyshetkellä pienen huipun. Säröteho D teki erittäin korkean huippulukeman käynnistytksen yhteydessä, joka ylittää yli 1600 Var arvon. Yliaaltovirta HIDH ja yliaaltojännite HUHD nousivat kytkentähetkellä erittäin vähän. (Kuvio 20.)



Kuvio 20. Yy0-muuntajan ensiön mittauskuvaaaja (Liite 2)

Dy11-muuntaja

Jännite UTRMS laski muuntajan yläjännitepuolella kuorman vaikutuksesta. Jännitealenema U_a voidaan laskea kaavalla (22). Tehokerroin ja virta saadaan taulukosta 6 ja verkon vastusarvot luvusta 6.1.

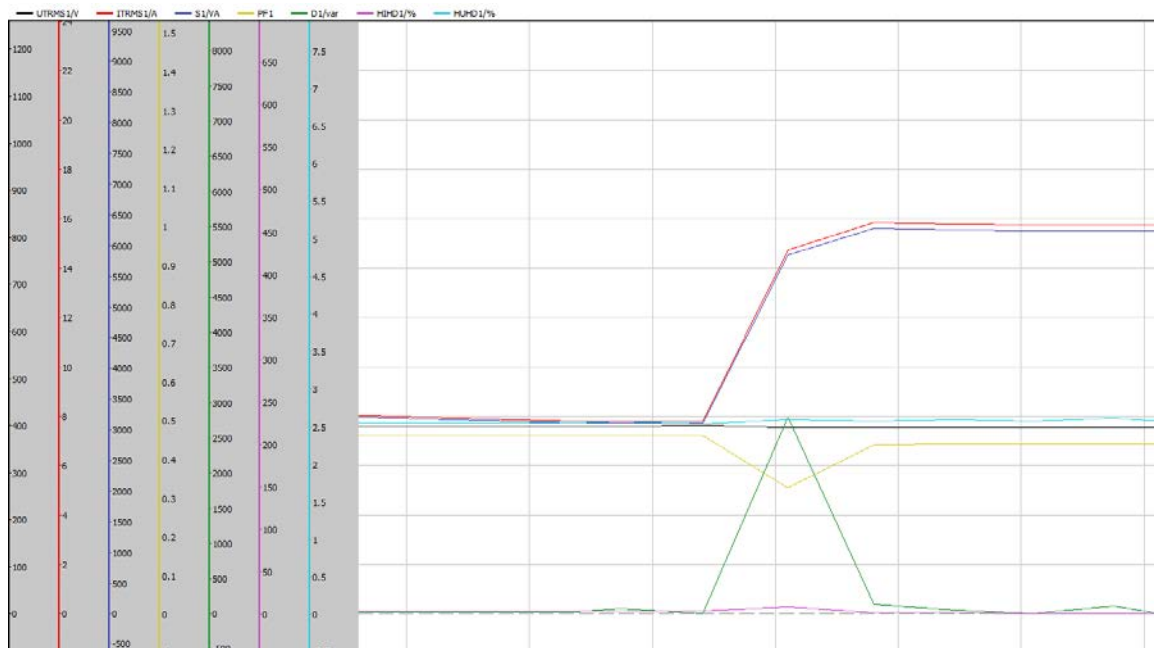
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 9.1 \text{ A} * 0.289 \text{ } \Omega * \cos(63.9^\circ + 30^\circ) + 9.1 \text{ A} * 0.171 \text{ } \Omega * \sin(63.9^\circ + 30^\circ)$$

$$U_a = 1.37 \text{ V}$$

Taulukoiden 2 ja 6 mukaan Dy11-muuntaja on 400,11 V tyhjäkäynnillä ja kuormituksen aikana jännite tippuu 396,71 V:iin, eli jännitteessä on mittaustaulukkojen mukaan 3,4 V:n jännitealenema. Teoreettisesti muuntajassa olisi 1,37 V:n jännitealenema, mutta reaktanssi- ja resistanssiarvot ovat täysin teoreettisia arvoja.

Tehokerroin PF aleni käynnistyksen yhteydessä, mutta palautui lähelle tyhjäkäyntiarvoa. Säröteho D nousi saman verran Dy11-muuntajan ensiössä kuin Yy0-muuntajassa. Näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousivat molemmat suhteessa toisiinsa, mutta kuvion 20 Yy0-muuntajan pientä virtahuippua ei havaita Dy11-muuntajassa. Yliaaltovirta HIDH ja yliaaltojännite HUHD eivät muuttuneet kuorman käynnistymisen tai kuormituksen aikana. (Kuvio 21.)



Kuvio 21. Dy11-muuntajan ensiön mittauskuvaja (Liite 2)

7.3.2 Epäsymmetrinen kuormitus

Epäsymmetrisessä kuormituksessa kuorman L1-vaihe aukaistiin. Testin tarkoituksena on nähdä, miten epäsymmetrisen kuorman vaikutukset näkyvät muuntajien ensiöissä.

Taulukossa 7 on Dy11-muuntajan ensiön ja toision mittaustulokset. Dy11-toision mittaustulokset ovat myös Yy0-muuntajan ensiön tulokset.

Taulukko 7. Epäsymmetrisen kuormituksen vaikutukset induktiivisessa kuormassa (Liite 2)

	L1 auki					
	ENSIÖ			TOISIO		
Dy11 – Yy0	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	399.42	399.37	400.63	229.73	227.06	230.10
Irms [A]	10.44	9.64	17.04	3.53	10.08	10.26
S [VA]	4170.50	3851.83	6825.20	810.87	2288.33	2359.98
PF	0.7226	0.0903	0.3823	0.0175	0.4047	0.2748
D [%]	58.1163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
THDi [%]	2.9892	3.5821	2.5519	5.1861	2.5137	2.2297
THDv [%]	2.5233	2.3342	2.1882	2.5309	2.3866	2.2327
THDv [V] 3	0.5661	0.5947	0.2948	0.5340	0.3780	0.3530
THDv [V] 5	3.9929	4.7311	4.5966	2.5432	2.9012	2.8762
THDv [V] 7	3.9402	2.9877	4.1636	2.2570	1.6966	2.3771
THDv [V] 9	0.3270	0.4184	0.7292	0.1918	0.2355	0.4133
THDv [V] 11	4.3196	4.0064	4.0316	2.4619	2.2693	2.2766
THDi [A] 3	0.0782	0.2398	0.3353	0.0593	0.2181	0.1525
THDi [A] 5	0.2813	0.2334	0.2594	0.1630	0.1171	0.1585
THDi [A] 7	0.0975	0.0784	0.0836	0.0486	0.0399	0.0469
THDi [A] 9	0.0034	0.0072	0.0241	0.0039	0.0068	0.0095
THDi [A] 11	0.0232	0.0235	0.0324	0.0101	0.0180	0.0201

Yy0-muuntaja

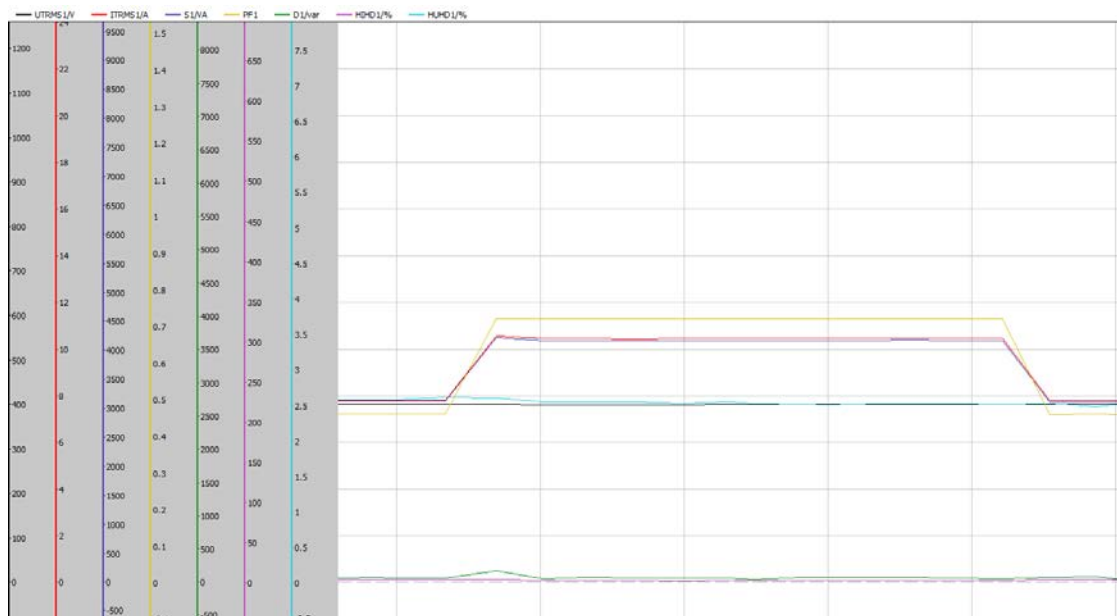
Muuntajan yläjännitepuolella ei tapahtunut minkäänlaista muutosta, joten siitä ei otettu kuviota.

Dy11-muuntaja

Jännite UTRMS laski erittäin vähän, koska Dy11-muuntajan vaiheessa ei ollut kuormaa. Pääjännite laski kuitenkin vähän, koska muuntajan kaksi muuta vaihetta kuormittuivat. (Kuvio 22.)

Näennäisvirta ITRMS nousi toisen vaiheen kuorman muutoksen takia ja nosti tehon kulutusta, myös yhden vaiheen virran huippu näkyy Dy11-muuntajassa jota ei symmetrisessä induktiivisessa kuormituksessa havaittu. (Kuvio 22.)

Tehokerroin PF nousi resistiivisemmälle tasolle. Tämä nousu johtuu siitä, että muuntajan yksi vaihe ei vaihtanut kulmaa. Yliaaltovirrassa HIDH ja -jännitteessä HUHD ei näy muutoksia, mikä nähdään myös symmetrisessä kuormituksessa. D säröteho ei myöskään muuttunut. (Kuvio 22.)



Kuvio 22. Dy11-muuntajan ensiön mittauskuvaaja (Liite 2)

7.4 Kapasitiivisen kuorman vaikutus

Kuormitus on asetettu 8 A:iin/vaihe ja kuormitusta ei muutettu mittauksien aikana. Symmetrisessä kuormituksessa kaikki kolme vaihetta kulutti noin 8 A ja epäsymmetrisessä käytettiin samaa kuormaa, mutta L1-vaihe avattiin. Mittauksissa tutkitaan vain L1-arvoja, jotka löytyvät liitteestä 3.

Tarkoituksena on tutkia, miten kapasitiivinen kuormitus vaikuttaa muuntajien ensiöissä. Kuorman sähkösuureita ei mitattu ollenkaan.

7.4.1 Symmetrinen kuormitus

Symmetrisessä kuormituksessa kuorman vaiheiden arvot ovat lähestulkoon samat. Taulukosta 8 nähdään Dy11-muuntajan ensiön ja toision mittaustulokset. LT3-muuntajan toision mittaustulokset ovat Yy-muuntajan ensiön mittaustulokset.

Taulukko 8. Symmetrisen kuormituksen vaikutukset kapasitiivisessa kuormassa (Liite 3)

Symmetrinen kuorma tähdessä						
	ENSIÖ			TOISIO		
Dy11 – Yy0	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	401.10	404.18	403.35	232.05	233.78	233.14
Irms [A]	2.32	1.88	2.65	3.57	4.41	4.30
S [VA]	929.92	760.64	1069.97	829.23	1029.89	1003.18
PF	0.05	0.02	0.09	0.03	0.01	0.15
D [%]	842.83	758.55	911.82	402.50	430.03	476.01
THDi [%]	225.18	1672.63	169.95	59.95	50.46	58.87
THDv [%]	2.23	2.24	2.37	3.07	3.07	3.38
THDv [V] 3	0.45	0.70	0.42	0.51	0.53	0.54
THDv [V] 5	5.27	6.32	6.31	3.98	4.59	4.73
THDv [V] 7	6.43	5.74	6.79	5.64	5.36	6.15
THDv [V] 9	0.12	0.26	0.36	0.18	0.47	0.62
THDv [V] 11	1.09	1.18	1.08	1.10	0.96	1.00
THDi [A] 3	0.09	0.24	0.34	0.07	0.24	0.16
THDi [A] 5	1.04	0.94	1.22	0.81	0.98	1.05
THDi [A] 7	1.66	1.40	1.73	1.43	1.53	1.75
THDi [A] 9	0.18	0.07	0.25	0.07	0.20	0.27
THDi [A] 11	0.69	0.66	0.68	0.66	0.66	0.67

Yy0-muuntaja

Jännite U_TRMS nousi kuorman vaikutuksen takia Yy0-muuntajan ensiössä. Jännitteen nousu U_a voidaan laskea kaavalla (22). Tehokerroin ja virta saadaan taulukosta 8, verkon vastusarvot luvusta 6.1 ja Dy11-muuntajan vastusarvot luvusta 6.2.

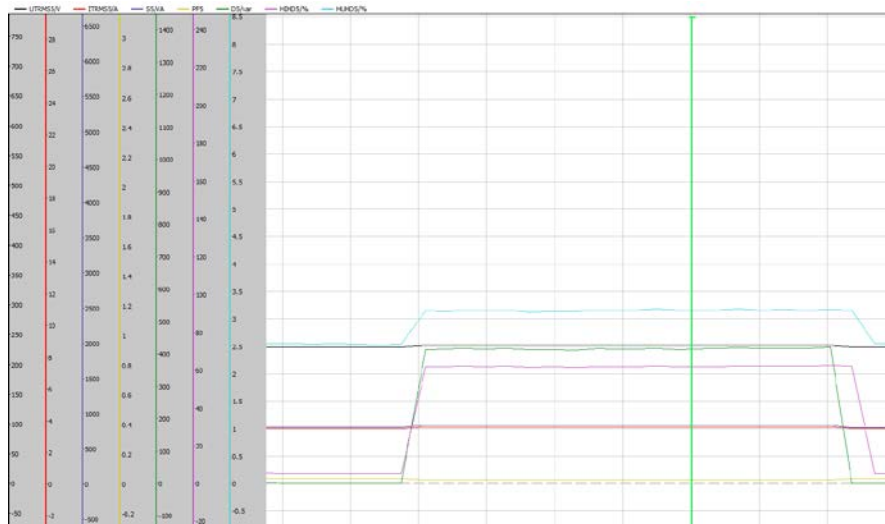
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 3.57 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega) * \cos(-88.2^\circ) + 3.57 \text{ A} * (0.171\Omega + 0.1516 \Omega) * \sin(-88.2^\circ)$$

$$U_a = -1.08 \text{ V}$$

Taulukoiden 3 ja 8 mukaan Yy0-muuntaja on 230,1 V tyhjäkäynnillä ja kuormituksen aikana jännite nousee 232,05 V:iin, eli jännitteessä on 2,04 V:n jännitenousu. Teoreettisesti muuntajassa olisi 1,08 V:n jännitenousu, mutta reaktanssi- ja resistanssiarvot ovat täysin teoreettisia arvoja. (Kuvio 23.)

Tehokerroin PF aleni melkein täysin nolnaan, eli kapasitiivinen kuorma teki verkkoon resonanssipiirin, joka resonoi induktiivisen virran kanssa. Näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousi vähän resonanssipiirin takia. Säröteho D nousi 400 Var ja yliaaltovirta ja yliaaltojännite nousivat kuormituksen noustessa. (Kuvio 23.)



Kuvio 23. Yy0-muuntajan ensiön mittauskuvaaja (Liite 3)

Dy11-muuntaja

Jännite UTRMS nousi muuntajan yläjännitepuolella kuorman vaikutuksesta. Jännitteen nousu U_a voidaan laskea kaavalla (22). Tehokerroin ja virta saadaan taulukosta 6 ja verkon vastusarvot luvusta 6.1.

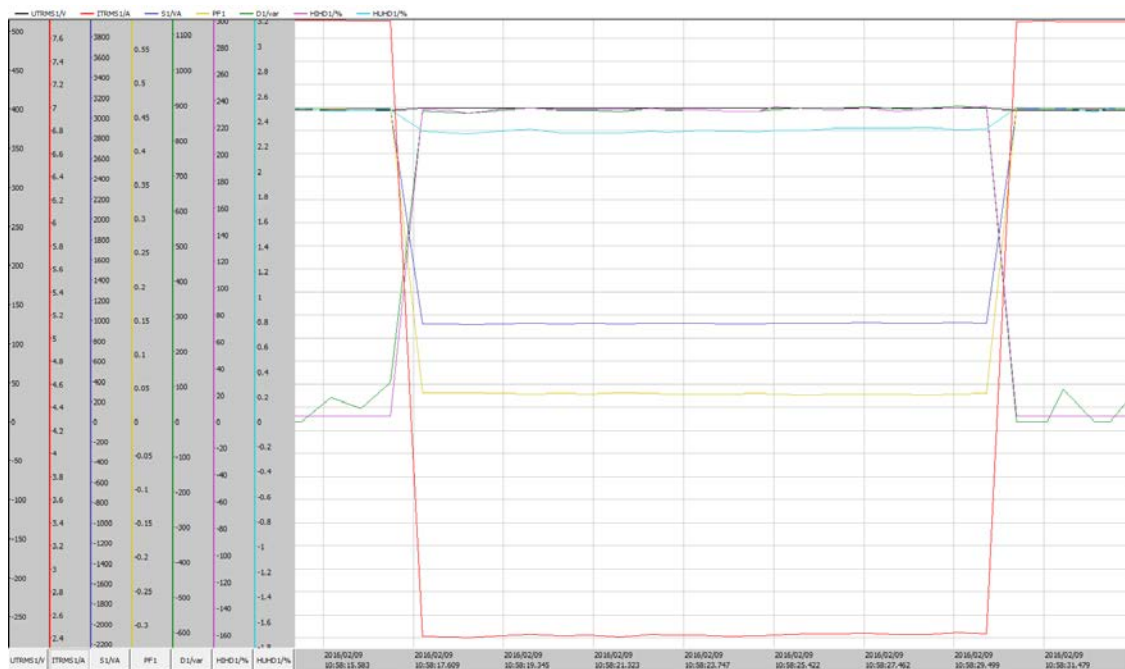
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 1.34 \text{ A} * 0.289 \text{ } \Omega * \cos(-87.1^\circ + 30^\circ) + 1.34 \text{ A} * 0.171 \text{ } \Omega * \sin(-87.1^\circ + 30^\circ)$$

$$U_a = -0.02 \text{ V}$$

Taulukoiden 2 ja 8 mukaan Dy11-muuntaja on 400,11 V tyhjäkäynnillä ja kuormituksena aikana jännite nousi 401,10 V:iin, eli jännitteessä on mittaustaulukkojen mukaan 1,01 V:n jännitenousu. Teoreettisesti muuntajassa olisi 0,02 V:n jännitenousu, mutta reaktanssi- ja resistanssiarvot ovat täysin teoreettisia arvoja.

Tehokerroin PF, näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S laskivat kapasitiivisen kuormituksen takia, koska tyhjäkäynnissä oleva virta oli erittäin induktiivinen. Kapasitiivinen kuorma teki sähköverkossa resonanssipiirin, joten teho ja virta pienentyivät. Säröteho D nousi 880 Var, joka pitää kertoa $\sqrt{3}^{-1}$:lla, jotta saadaan oikea säröteho. Yliaaltovirta HIDH, joka myös pitää kertoa $\sqrt{3}^{-1}$:lla, nousi yli kaksinkertaiseksi verrattuna Yy0-muuntajan ensiöön. Yliaaltojännite HUHD laski kuormituksen kanssa. (Kuvio 24.)



Kuvio 24. Dy11-muuntajan ensiön mittauskuvaja (Liite 3)

7.4.2 Epäsymmetrinen kuormitus

Epäsymmetrisessä kuormituksessa kuorman L1-vaihe aukaistiin. Testin tarkoituksena on nähdä, miten epäsymmetrisen kuorman vaikutukset näkyvät muuntajien ensiöissä.

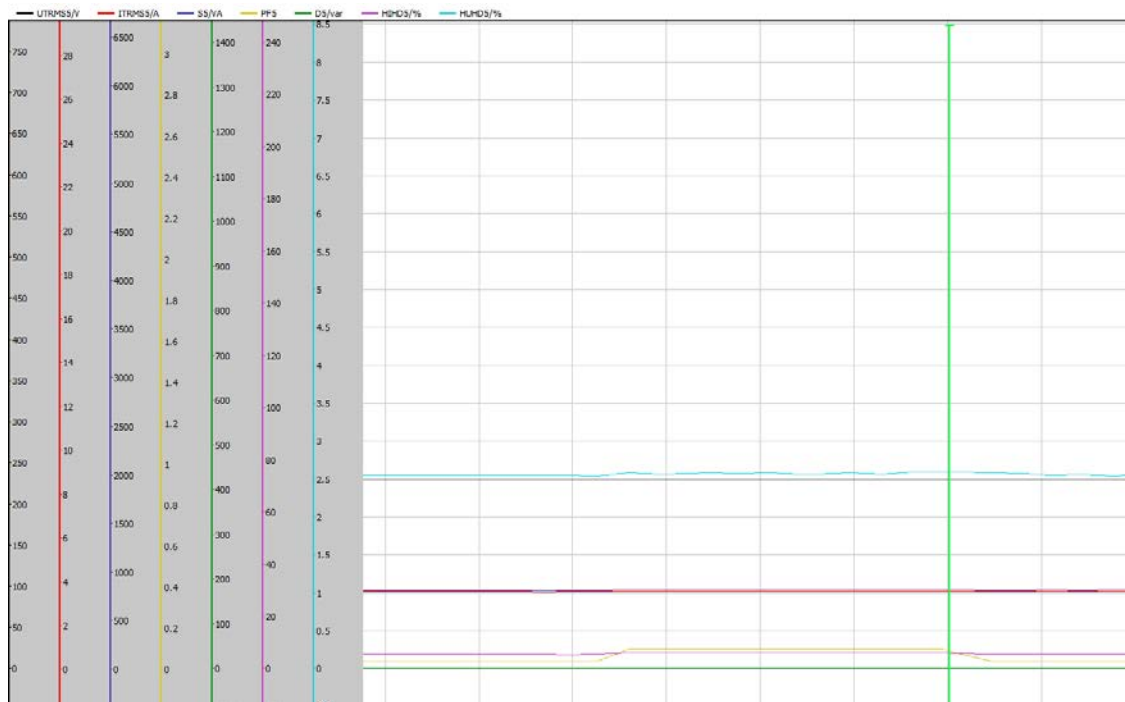
Taulukossa 9 on Dy11-muuntajan ensiön ja toision mittaustulokset. Dy11-toision mittaustulokset ovat myös Yy0-muuntajan ensiön tulokset.

Taulukko 9. Epäsymmetrisen kuormituksen vaikutukset kapasitiivisessa kuormassa (Liite 3)

	L1 auki					
	ENSIÖ			TOISIO		
Dy11 – Yy0	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	399.62	405.88	402.26	229.58	235.27	231.09
Irms [A]	6.99	6.11	2.73	3.56	4.13	4.60
S [VA]	2794.52	2480.48	1099.81	816.92	971.39	1062.07
PF	0.02	0.84	0.11	0.10	0.72	0.80
D [%]	453.64	412.98	935.52	0.00	421.94	428.40
THDi [%]	17.93	17.98	168.89	6.08	50.92	46.40
THDv [%]	2.53	2.54	2.33	2.56	3.25	3.13
THDv [V] 3	0.57	0.74	0.31	0.51	0.41	0.45
THDv [V] 5	4.24	5.97	6.34	2.72	4.24	4.72
THDv [V] 7	4.00	6.71	5.39	2.34	5.94	4.75
THDv [V] 9	0.35	0.32	0.41	0.22	0.61	0.51
THDv [V] 11	4.55	2.12	2.78	2.59	1.10	1.85
THDi [A] 3	0.14	0.17	0.28	0.07	0.16	0.16
THDi [A] 5	0.71	0.53	1.21	0.19	0.89	0.96
THDi [A] 7	0.94	0.84	1.83	0.08	1.50	1.53
THDi [A] 9	0.13	0.14	0.27	0.01	0.23	0.23
THDi [A] 11	0.31	0.34	0.67	0.01	0.56	0.55

Yy0-muuntaja

Muuntajassa ei havaita muuta kuin pientä tehokertoimen nousua, mikä johtuu muuntajan muiden käämien häirinnän takia, ja myös Dy11-muuntajan suureiden muutoksen takia. (Kuvio 25.)



Kuvio 25. Yy0-muuntajan ensiön mittauskuvaaja (Liite 3)

Dy11-muuntaja

Jännite UTRMS:ssä ei näy muutosta, koska muuntajan vaihetta ei kuormitettu. Näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S laski. Tämä nähdään myös symmetrisessä kuormituksessa, mutta epäsymmetrisessä kuormituksessa se on pienempi. Tämä johtuu siitä, kun muuntajan muita vaiheita kuormitetaan, mitkä muuttavat tehokerrointa PF.

Tehokerroin PF laski lähes resistiiviselle tasolle, mikä johtuu kuorman aiheuttamasta resonanssipiiristä. Säröteho D nousi yhden vaiheen särön verran kuormituksen aikana ja aiheutti kuorman katkaisuhetkellä särötehopiikin. Yliaaltovirta HIDH nousi kuormituksen aikana ja yliaaltojännite HUHD pysyi häiritsemättömänä.



Kuvio 26. Dy11-muuntajan ensiön mittauskuvaaja (Liite 3)

7.5 Suoraohjatun oikosulkumoottorikuorman vaikutus

Moottoria kuormitetaan kuormakiekolla, joka on kiinnitetty moottorin roottoriin. Kiekon paino on 40 kg. Mittauksissa ei kuormiteta moottoria epäsymmetrisesti, koska se voisi rikkoa moottorin. Mittauksissa tutkitaan vain L1-arvoja, jotka löytyvät liitteestä 5.

7.5.1 Kuorma

Kuorman kytkentä aiheutti transienttisen jännitealeneman. Jännitealenema arvo U_a voidaan laskea kaavalla 22. Kaavassa 22 päätellään, mikä on kuormituksen 28,97 A huipun suurin jännitealenema, jossa virtahuipun $\cos\varphi = 0,79$ eli $\varphi = 37,8^\circ$, jotka saadaan kuviosta 27. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1 ja muuntajien vastusarvot luvuista 6.2 – 6.3.

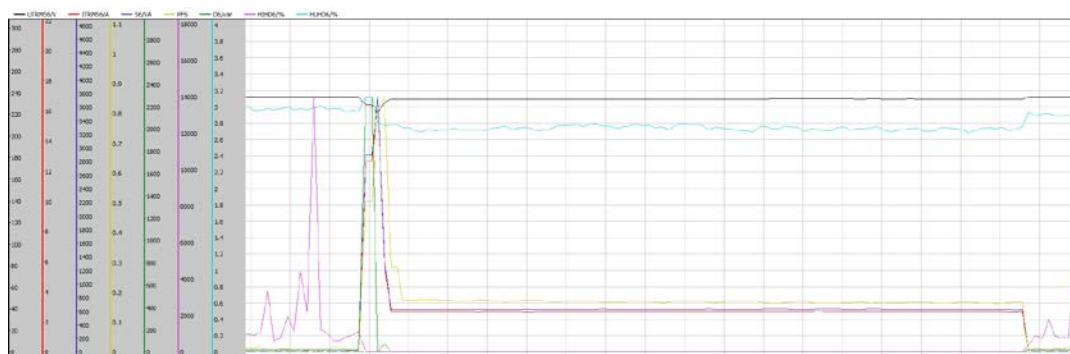
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 28.97 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega + 0.144 \Omega) * \cos(37.8^\circ) + \\ 28.97 \text{ A} * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega + 0.119 \Omega) * \sin(37.8^\circ)$$

$$U_a = 25.6 \text{ V}$$

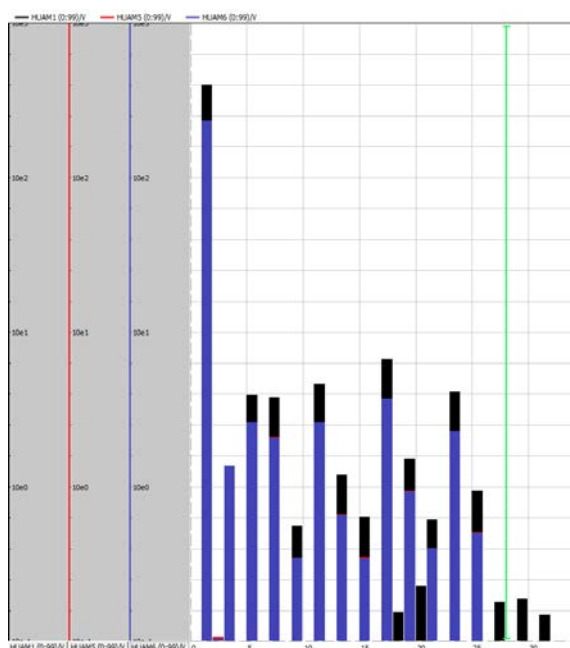
Tehokerroin PF, näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousivat käynnistyksen yhteydessä. Säröteho D nousi vain kytkentähetkellä. Särötehon nousu johtuu moottorin käynnistyksen epälineaarisuudesta.

Yliaaltovirta HIDH ja yliaaltojännite HUHD laskivat kuorman kytkentähetkellä. Yliaaltojännite nousi vähän kytkentähetkellä, mikä johtuu käynnistyksen erittäin epälinearisesta kuormasta.



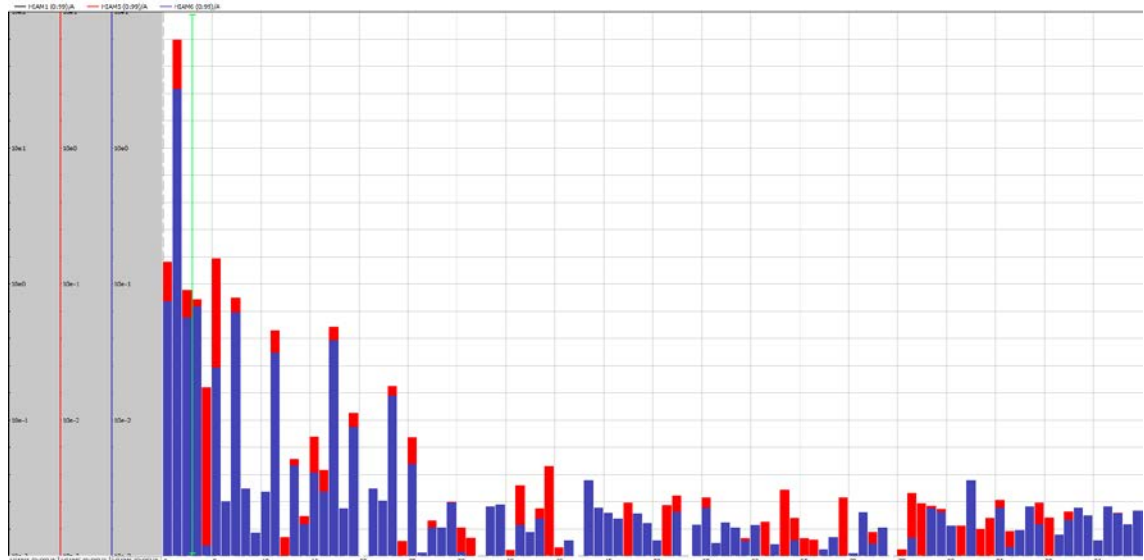
Kuvio 27. Suoraohjatun moottorin vaikutus Yy0-muuntajan toisioon, kytkentäsäysvirta 28,97 A (Liite 5)

Kuviot 28 ja 29 ovat kuvaaja yliaalloista, kun moottorikuorma on tasaisessa kuormituksessa. Kuorman yliaaltojännitteet ovat kuviossa 28 sinisellä värillä.



Kuvio 28. Kuorman yliaaltojännitteet (Liite 5)

Kuviossa 29 nähdään kuorman aiheuttamat yliaaltovirrat sinisellä värillä. Yliaaltovirrat ovat kuitenkin erittäin vähäisiä ja samoilla tasoilla kuin tyhjäkäynnin yliaaltovirrat.



Kuva 29. Kuorman yliaaltovirrat (Liite 5)

7.5.2 Yy0-muuntajan ensiö

Kuorman kytkentä aiheutti transienttisen jännitealeneman. Jännitealenema alhaisimman arvo U_a voidaan laskea kaavalla (22). Kaavassa (22) päätellään, mikä on kuormituksen 32,26 A huipun suurin jännitealenema, jossa virtahuipun $\cos\varphi = 0,75$ eli $\varphi = 41,4^\circ$, jotka saadaan kuviosta 30. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1 ja Dy11-muuntajan vastusarvot luvusta 6.2.

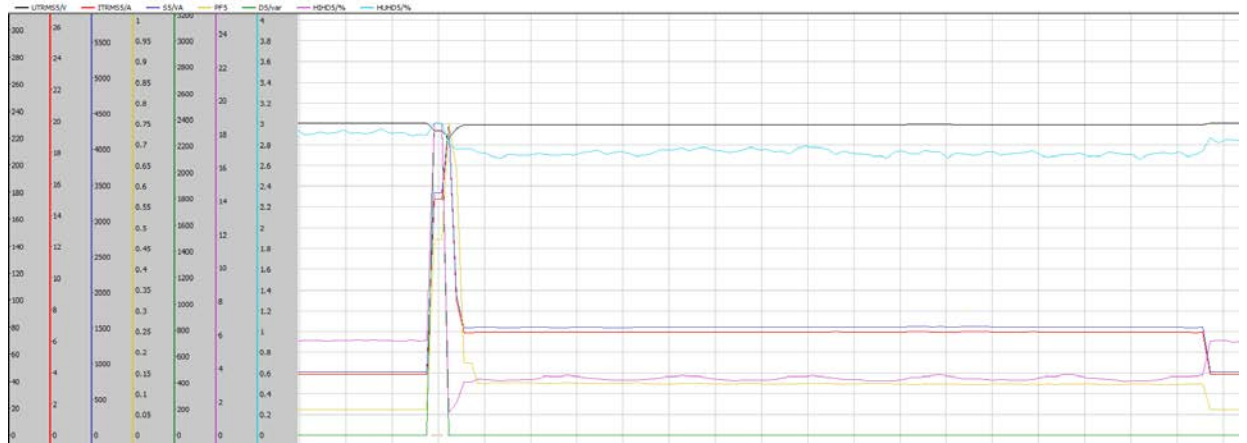
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 32.26 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega) * \cos(41.4^\circ) + 32.26 \text{ A} * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega) * \sin(41.4^\circ)$$

$$U_a = 22.17 \text{ V}$$

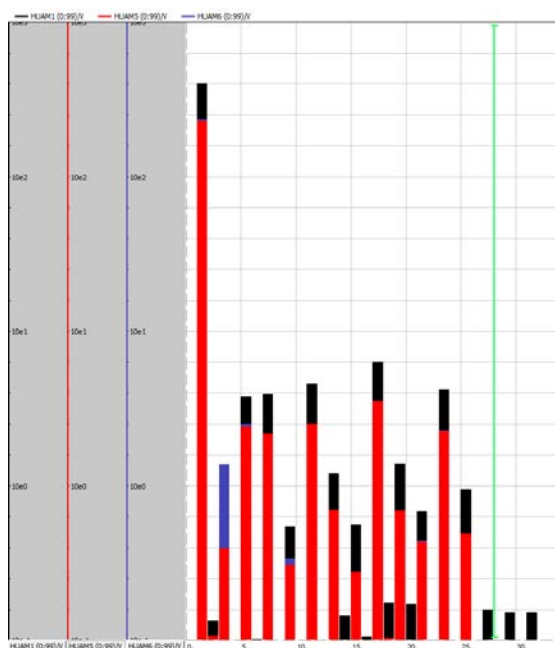
Tehokerroin PF, näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousivat käynnistyksen yhteydessä. Nousu johtui suuresta käynnistysvirrasta, joka on suurempi kuin kuormassa. Säröteho D nousi kuorman kytkentähetkellä saman verran kuin muuntajan toisiossa.

Yliaaltovirta HIDH nousi kuorman kytkentähetkellä, mutta laski kuorman kytkentä hetken jälkeen matalammaksi. Muuntajan ensiössä ei havaittu yliaaltovirtojen nousua. Yliaaltojännite HUHD laski samassa suhteessa kuin kuormassa.



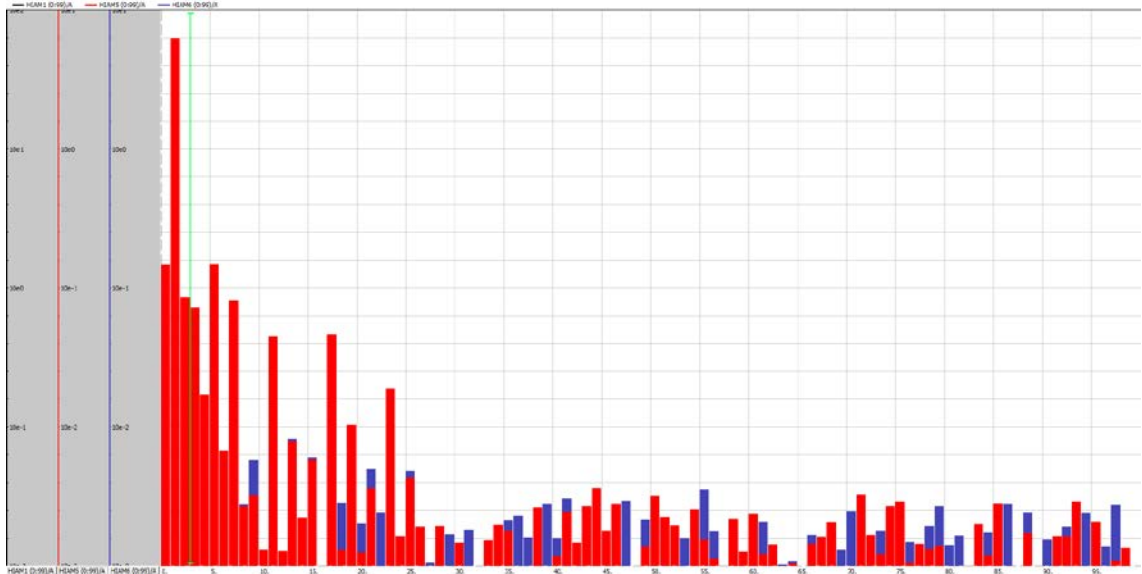
Kuvio 30. Suoraohjatun moottorin vaikutus Dy11-muuntajan toisioon, kytkentäsäysovirta 32,36 A (Liite 5)

Kuviot 31 ja 32 ovat kuvaajia yliaalloista, kun moottorikuorma on tasaisessa kuormituksessa. Yy0-muuntajan ensiön yliaaltojännitteet ovat kuviossa 31 punaisella värillä. Kuviossa 31 nähdään, että kolmas yliaaltojännite on vaimentunut kuorman arvosta.



Kuvio 31. Yy0-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltojännitteet (Liite 5)

Kuviosta 32 nähdään, että koko kuormituksen ajan Yy0-muuntajan yliaaltovirrat olivat korkeimmillaan. Yliaaltovirrat ovat kuitenkin erittäin vähäisiä ja samoilla tasoilla, kuin tyhjäkäynnin yliaaltovirrat.



Kuvio 32. Yy0-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltovirrat (Liite 5)

7.5.3 Dy11-muuntajan ensiö

Kuorman kytkentä aiheutti transienttisen jännitealeneman. Kaavassa (22) päätellään transienttinen jännitealenema. Kuormituksen 21,06 A huippu pitää jakaa $\sqrt{3}$:lla, josta saadaan vaihevirran suuruus. Virtahuipun $\cos\varphi = 0,17$; eli $\varphi = 79,6^\circ$, jotka saadaan kuviosta 33. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1. Vaihevirta on myös 30° edellä, joka näkyy laskussa:

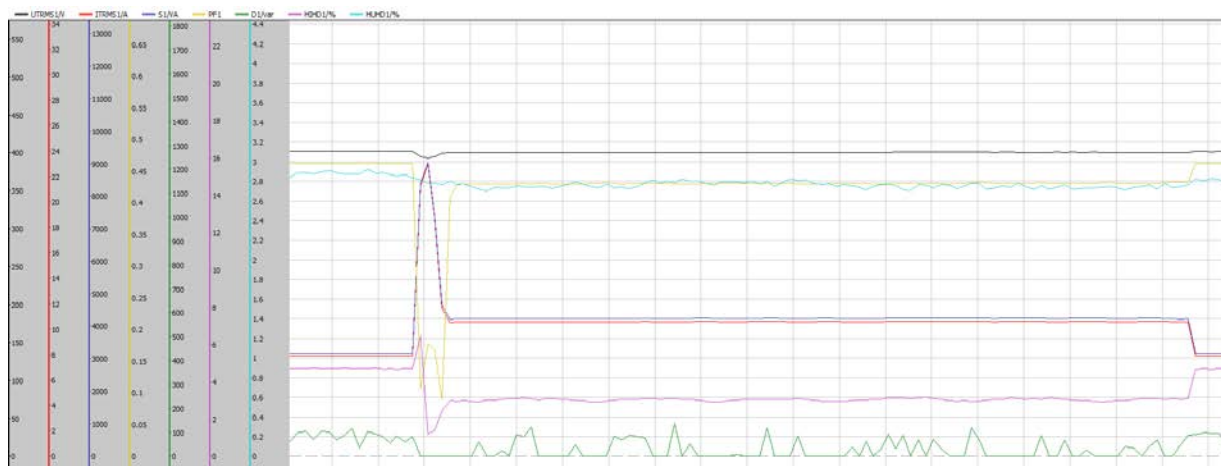
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 21.06 \text{ A} * 0.289 \Omega * \cos(79.6^\circ + 30^\circ) + 21.06 \text{ A} * 0.171 \Omega * \sin(79.6^\circ + 30^\circ)$$

$$U_a = 1.35 \text{ V}$$

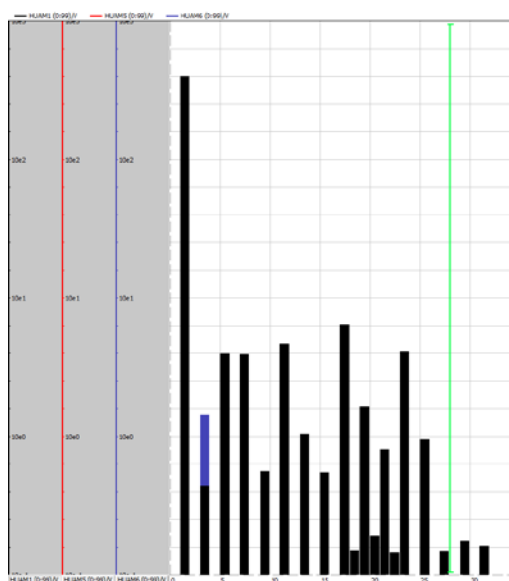
Tehokerroin PF laski reaktiivisen kuorman takia ja näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousi kuormituksen myötä. Säröteho D ei ollut muuntajan ensiossa, vaikka säröä oli muuntajan toisiossa. (Kuvio 33.)

Yliaaltovirta HIDH nousi kuorman kytkentähetkellä, mutta laski samaan tasoon kuin Dy11-muuntajan toisiossa. Yliaaltojännite HUHD laski kytkentähetkellä ja pysyi vähän korkeampana kuin muuntajan toisiossa. (Kuvio 33.)



Kuvio 33. Suoraohjatun moottorin vaikutus Dy11-muuntajan ensiöön, kytkentäsäysvirta 36.48 A (Liite 5)

Kuviot 34 ja 35 ovat kuvaaja yliaalloista, kun moottorikuorma on tasaisessa kuormituksessa. Dy11-muuntajan ensiön yliaaltojännitteet ovat kuviossa 34 mustalla värillä. Kuviossa 34 nähdään, että kolmas yliaaltojännite on samassa tasossa kuin Yy0-muuntajan kolmas yliaalto. 18., 20. ja 22. yliaaltojännitteet olivat nousseet erittäin vähän.



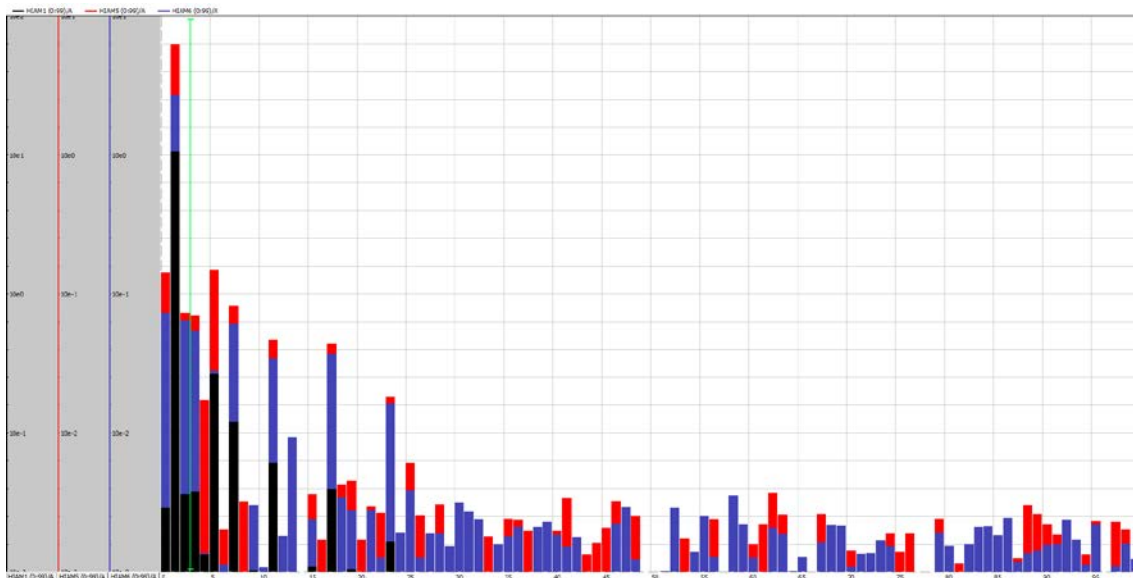
Kuvio 34. Dy11-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltojännitteet (Liite 5)

Taulukon 10 mukaan yliaaltojännitteet olivat vaimentuneet verkon muuntajiin, mutta taulukon mukaan Dy11-muuntajan ensiössä 5., 7., 9. ja 11. yliaaltojännitteet ovat suurempia kuin Yy0-muuntajassa ja kuormassa. Dy11-muuntajassa pitää kuitenkin ottaa huomioon, että yliaaltojännitteet ovat oikeasti matalampia. Dy11-muuntajan jännitteet jaetaan $\sqrt{3}$:lla, jolloin saadaan sama suhde kuormaan ja Yy0-muuntajaan. Suhteen laskun jälkeen voidaan todeta, että 5., 7., 9. ja 11. yliaaltojännitteet ovat samassa suhteessa Yy0-muuntajan ensiön yliaaltojännitteeseen. 3. yliaalto on kuitenkin jäänyt Dy11-muuntajan kolmiokytkentään, mikä tarkoittaa lisähäviötä muuntajalle.

Taulukko 10. Verkon yliaaltojännitteet

Yliaaltojännitteet	Kuorma [V]	Yy0 [V]	Dy11 [V]
3	1.402	0.416	0.371
5	2.379	2.302	3.611
7	2.043	2.056	3.768
9	0.287	0.251	0.440
11	2.561	2.563	4.603

Kuviosta 35 nähdään, että koko kuormituksen ajan Dy11-muuntajan yliaaltovirrat olivat kaikkein alhaisimmat Dy11-muuntajan ensiössä. Yliaaltovirrat ovat kuitenkin erittäin vähäisiä ja samoilla tasoilla kuin tyhjäkäynnin yliaaltovirrat.



Kuvio 35. Dy11-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltovirrat (Liite 5)

7.6 Pehmökäynnistetyn moottorikuorman vaikutus

Moottoria kuormitetaan kuormakiekolla, joka on kiinnitetty moottorin roottoriin. Kiekon paino on 40 kg. Mittauksissa ei kuormiteta moottoria epäsymmetrisesti, koska se voisi rikkoa moottorin. Pehmökäynnistetyllä kuormalla on samat yliaaltovaikutukset kuin suoraohjatulla. Vain käynnistyshetki eroaa suorakäynnisteyttä moottorista. Mittauksissa tutkitaan vain L1-arvoja, jotka löytyvät liitteestä 6.

7.6.1 Kuorma

Kuorman kytkentä aiheutti jännitealenemaa. Jännite nousi takaisin suurimmasta jännitealenemasta käynnistyksen jälkeen. Jännitealenema U_a voidaan laskea kaavalla (22). Kaavassa 23 päätellään, mikä on kuormituksen huipun suurin jännitealenema. Virtahuippu on 11 A ja $\cos\varphi = 0,35$; eli $\varphi = 69,5^\circ$; arvot saadaan kuviosta 36. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1 ja muuntajien vastusarvot luvuista 6.2 ja 6.3.

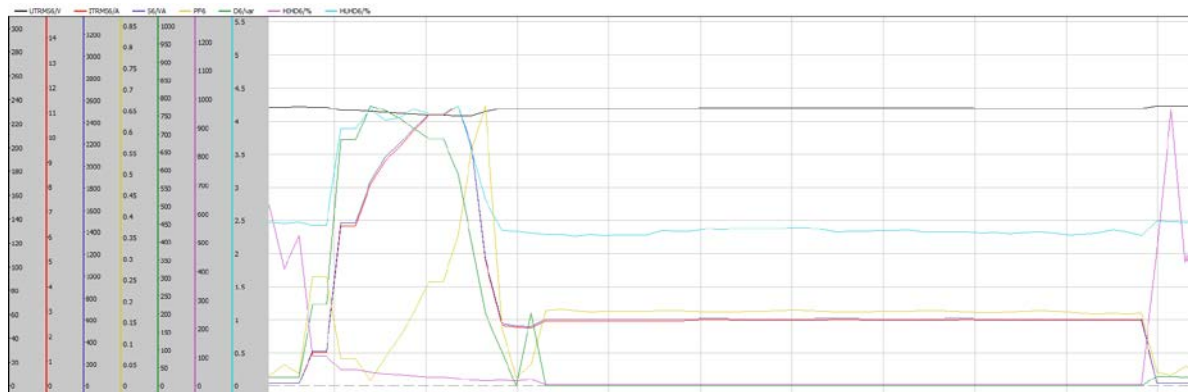
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 11 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega + 0.144 \Omega) * \cos(69.5^\circ) + 11 \text{ A} * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega + 0.119 \Omega) * \sin(69.5^\circ)$$

$$U_a = 7.54 \text{ V}$$

Tehokerroin PF nousi ja laski käynnistyksen aikana. Näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousivat samoissa suhteissa koko kuormituksen ajan. Kuormituksen aikana virta oli maksimissaan 11 A, joka on paljon vähemmän kuin suoraohjatun moottorin 28,97 A:n käynnistymisvirta.

Säröteho D nousi käynnistyksen aikana, joka johtuu kuormituksen epälineaarisuudesta ja väärästi siniaallon muotoa. Yliaaltovirta HIDH laski kuormituksen aikana. Yliaaltojännite HUHD nousi käynnistyksen aikana. Moottorin käyntitila on sama kuin suoraohjatun moottorin käyntitila.



Kuvio 36. Pehmokäynnistetyn moottorin vaikutus Yy0-muuntajan toisioon (Liite 6)

7.6.2 Yy0-muuntajan ensiö

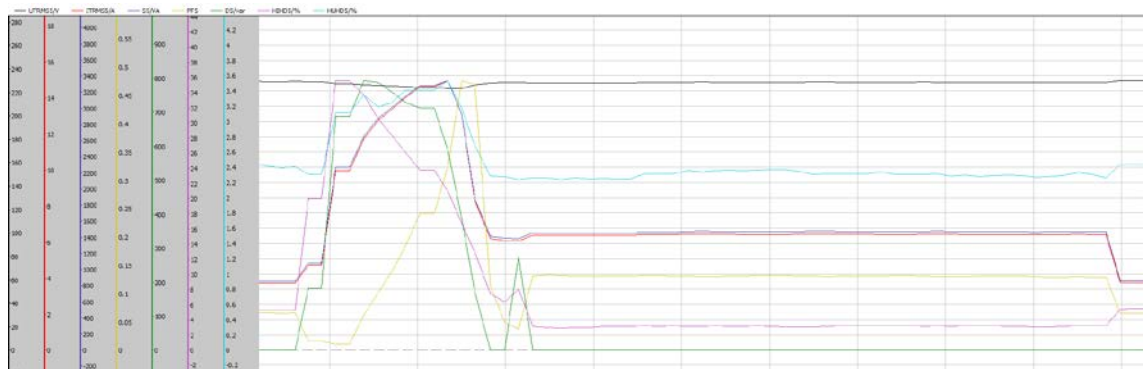
Kuorman kytkentä aiheutti jännitealenemaa. Jännitealeneman alhaisin arvo U_a voidaan laskea kaavalla 22. Kaavassa 22 päätellään, mikä on kuormituksen suurin jännitealenema. Virtahuippu on 15 A, jossa $\cos\varphi = 0,35$; eli $\varphi = 69,5^\circ$; arvot saadaan kuvioista 37. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1 ja Dy11-muuntajan vastusarvot luvusta 6.2.

$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 15 A * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega) * \cos(69.5^\circ) + 15 A * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega) * \sin(69.5^\circ)$$

$$U_a = 7.85 V$$

Kuormitus teki Yy0-muuntajan ensiöön samoja vaikutuksia, joita näkyy kuorman suureissa kuvioissa 36 – 37. Mutta yliaaltovirta (HIHD) nousi kuormituksen aikana Yy0-muuntajan ensiössä, jota ei kuormassa havaittu ollenkaan.



Kuvio 37. Pehmokäynnistetyn moottorin vaikutus Dy11-muuntajan toisioon (Liite 6)

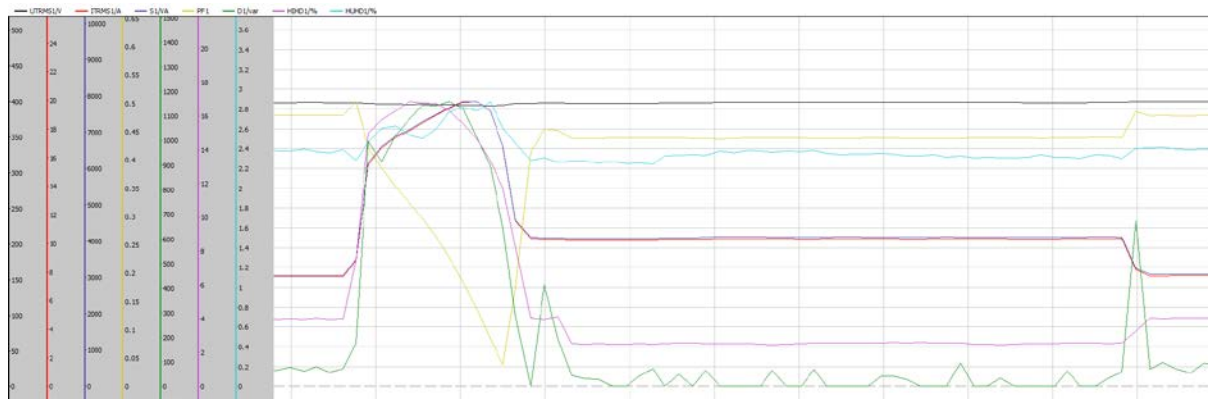
7.6.3 Dy11-muuntajan ensiö

Kuorman kytkentä aiheutti jännitteen alenemaa. Jännitteen alenema jännitealenema U_a voidaan laskea kaavalla (22). Kaavassa 22 päätellään jännitealenema kuormituksen 20 A huipusta, joka pitää jakaa $\sqrt{3}$:lla, josta saadaan vaihevirran suuruus. Virtahuipun $\cos\varphi = 0,17$; eli $\varphi = 80^\circ$; arvot saadaan kuviosta 38. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1. Vaihevirta on myös 30° edellä, joka näkyy laskussa:

$$\begin{aligned}
 U_a &= IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi & (22) \\
 U_a &= 11.5 \text{ A} * 0.289 \Omega * \cos(80^\circ + 30^\circ) + 11.5 \text{ A} * 0.171 \Omega * \\
 &\quad \sin(80^\circ + 30^\circ) \\
 U_a &= 0.71 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Tehokerroin PF laski käynnistyksen yhteydessä. Näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousivat käynnistyksen aikana tasaisesti. Säröteho D nousi 1150 Var:iin asti, joka johtuu kahden käämin yhteenlasketusta särötehosta. Yhden käämin säröteho on, 1150 Var jaettuna $\sqrt{3}$:lla, joka on 664 Var. Säröteho on siis laskenut.

Yliaaltovirta HIDH nousi kuormituksen aikana, mutta vähemmän kuin Yy0-muuntajassa. Yliaaltajännite HUHD aleni myös kuormituksen aikana.



Kuvio 38. Pehmokäynnistetyin moottorin vaikutus Dy11-muuntajan ensiöön (Liite 6)

7.7 Taajuusmuuttajaohjatun moottorikuorman vaikutus

Mittauksessa käytetään Vacon-merkkistä taajuusmuuttajaa, ja samaa moottoria käytetään kaikissa moottorikuormituksissa. Moottoria kuormitetaan kuormakiekkolla, joka on kiinnitetty moottorin roottoriin. Kiekon paino on 40 kg. Mittauksissa ei kuormiteta moottoria epäsymmetrisesti, koska se voisi rikkoa moottorin. Mittauksissa tutkitaan vain L1-arvoja, jotka löytyvät liitteestä 7.

7.7.1 Kuorma

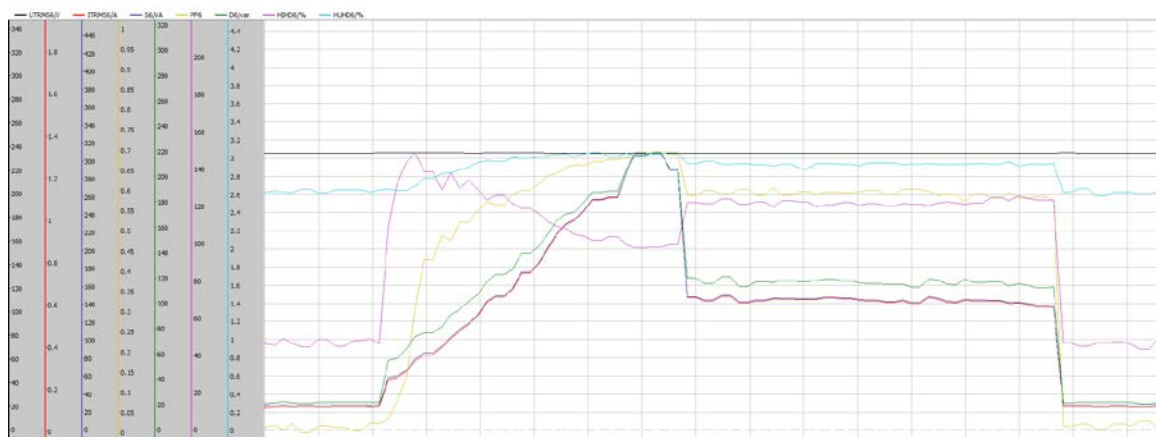
Jännite (UTRMS) ei alentunut paljon moottorin suurimman virtahuipun aikana, jännitealenema voidaan laskea kaavalla 22. Kaavassa 23 päätellään, mikä on kuormituksen 1.3 A huipun suurin jännitealenema, jossa virtahuipun $\cos\varphi = 0,7$; eli $\varphi = 45^\circ$; arvot saadaan kuviosta 39. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1 ja muuntajien vastusarvot luvuista 6.2 ja 6.3.

$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 1.3 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega + 0.144 \Omega) * \cos(45^\circ) + 1.3 \text{ A} * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega + 0.119 \Omega) * \sin(45^\circ)$$

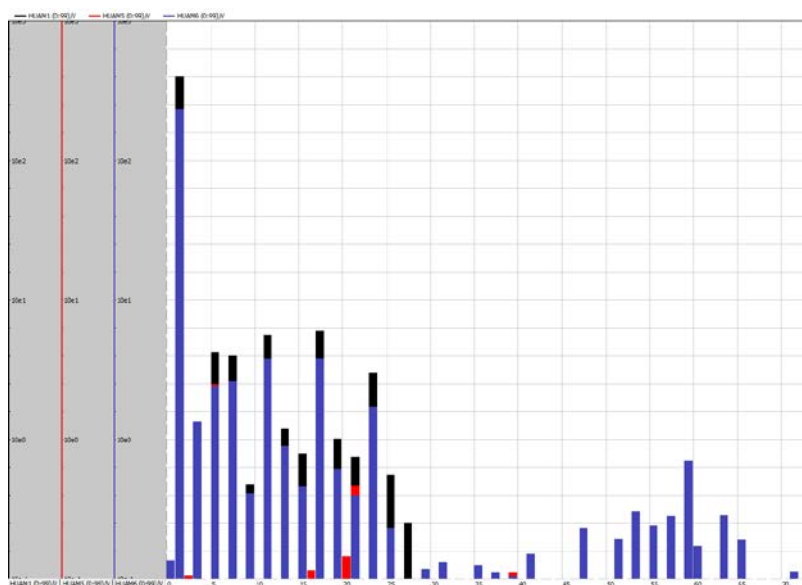
$$U_a = 1.12 \text{ V}$$

Tehokerroin PF, näennäisvirta ITRMS, näennäisteho S ja säröteho D nousi kuormituksen aikana suhteessa toisiinsa. Taajuusmuuttajalla kuormitettu moottori kullutti myös nimellisnopeudessaan vähemmän tehoa kuin suoraohjattu moottori. Yliaaltovirta (HIDH) nousi heti käynnistyksen yhteydessä.



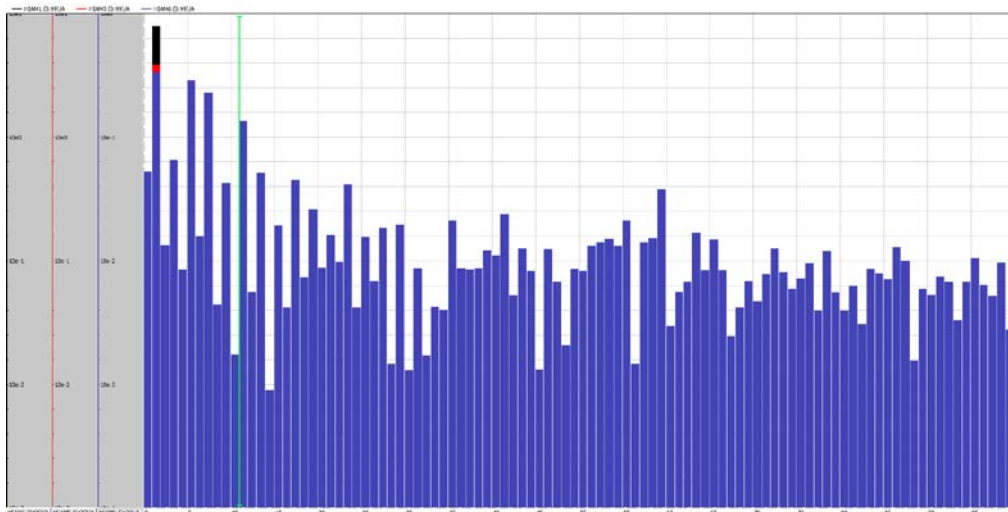
Kuvio 39. Taajuusmuuttajakäytetyn moottorin vaikutus Yy0-muuntajan toisioon (Liite 7)

Kuviot 40 ja 41 ovat kuvaaja yliaalloista, kun moottorikuorma taajuusmuuttajalla on tasaisessa kuormituksessa. Kuorman yliaaltojännitteet ovat kuviossa 40 sini-sellä värillä.



Kuvio 40. Kuorman yliaaltojännitteet (Liite 7)

Kuviossa 41 nähdään kuorman aiheuttamat yliaaltovirrat sinisellä värillä. Muuntajan ollessa tyhjäkäynnillä havaittiin yliaaltovirtoja kaikilla taajuuksissa. Yliaaltovirrat ovat kuitenkin erittäin vähäisiä ja samoilla tasoilla mutta kaksi kertaa suurempina kuin suoraohjatun moottorin yliaaltovirrat.



Kuvio 41. Kuorman yliaaltovirrat (Liite 7)

7.7.2 Yy0-muuntajan ensiö

Kuorman kytkentä aiheutti jännitealenemaa. Jännitealenema alhaisimman arvo U_a voidaan laskea kaavalla 22. Kaavassa 22 päätellään, mikä on kuormituksen 4.2 A huipun suurin jännitealenema, jossa virtahuipun $\cos\varphi = 0,28$; eli $\varphi = 73,7^\circ$; arvot saadaan kuviosta 42. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1 ja Dy11-muuntajan vastusarvot luvusta 6.2.

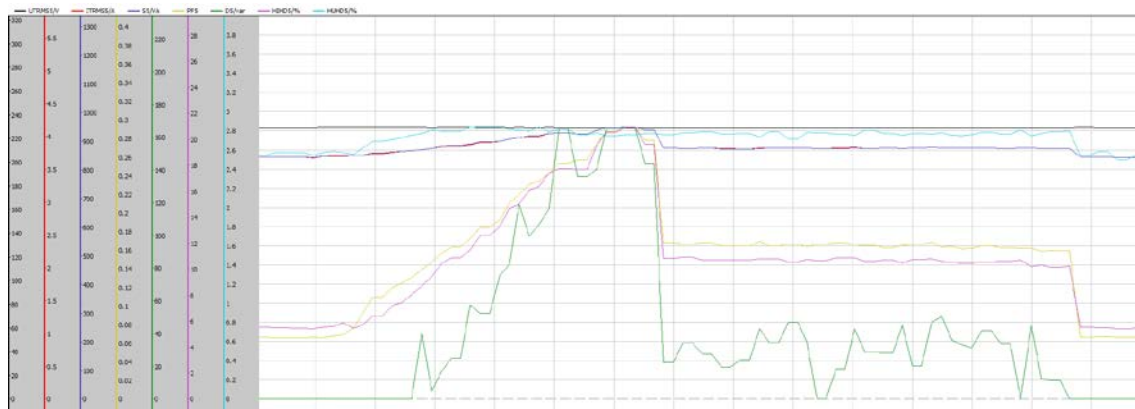
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 4.2 \text{ A} * (0.289 \Omega + 0.343 \Omega) * \cos(73.7^\circ) + 4.2 \text{ A} * (0.171 \Omega + 0.1516 \Omega) * \sin(73.7^\circ)$$

$$U_a = 2.04 \text{ V}$$

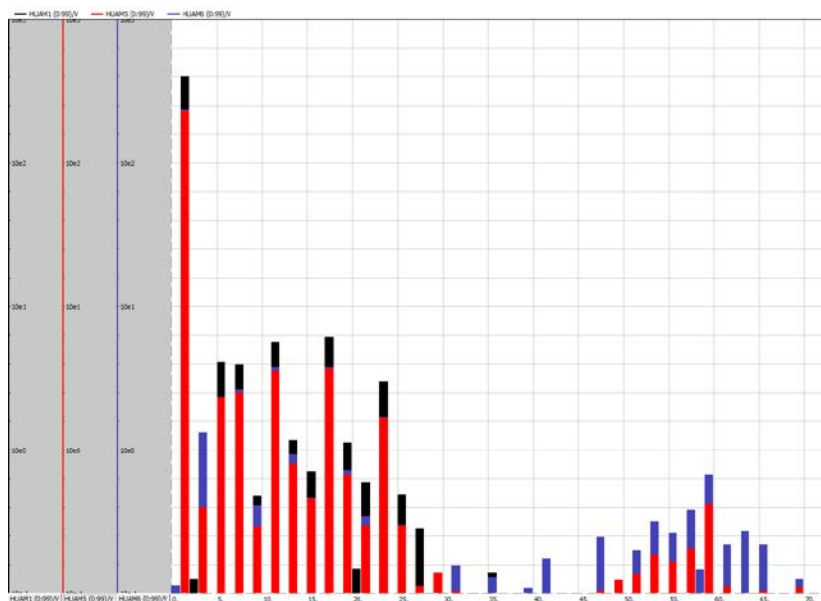
Tehokerroin PF, säröteho D, näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousi suhteessa toisiinsa koko käynnistyksen ajan. (Kuvio 41.)

Yliaaltojännite HUHD nousi käynnistyksen aikana 0.2 % ja pysyi samana koko kuormituksen ajan. Yliaaltovirta HIDH laski 20 %:sta 6 %:iin. Yliaaltovirta nousi suhteessa särötehoon koko kuormituksen ajan.



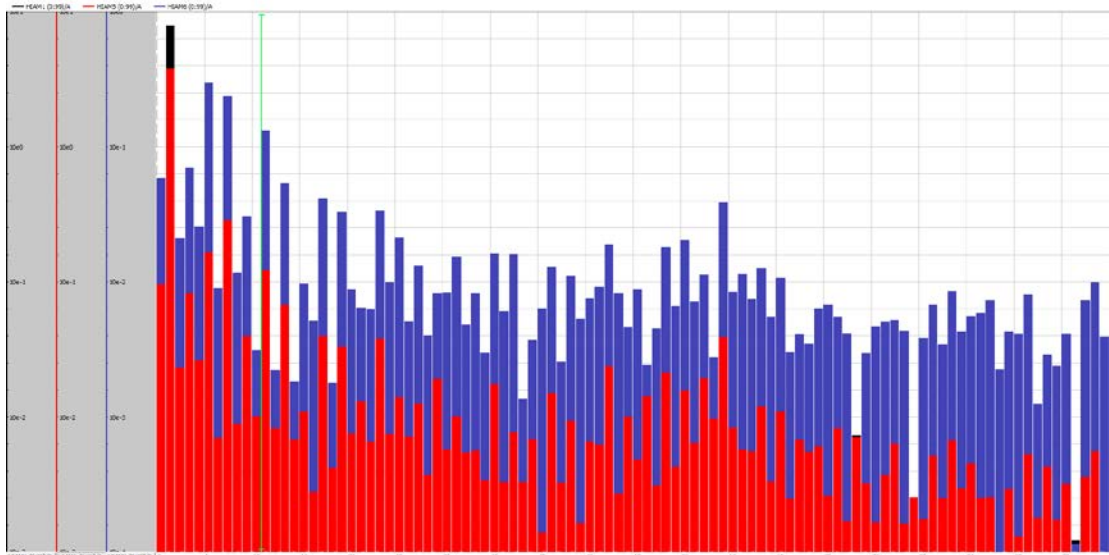
Kuvio 42. Taajuusmuuttajakäytetyn moottorin vaikutus Dy11-muuntajan toisioon (Liite 7)

Kuviot 43 ja 44 ovat kuvaajia yliaalloista, kun moottorikuorma on tasaisessa kuormituksessa. Yy0-muuntajan ensiön yliaaltojännitteet ovat kuviossa 43 punaisella värillä. Kuviossa 43 nähdään, että kolmas yliaaltojännite on vaimentunut kuorman arvosta.



Kuvio 43. Yy-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltojännitteet (Liite 7)

Kuviosta 44 nähdään, että koko kuormituksen ajan, että Yy0-muuntajan yliaaltovirrat ovat vaimentuneet kuorman yliaaltovirroista. Yliaaltovirrat ovat kuitenkin erittäin vähäisiä ja samoilla tasoilla kuin tyhjäkäynnin yliaaltovirrat.



Kuvio 44. Yy0-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltovirrat (Liite 7)

7.7.3 Dy11-muuntajan ensiö

Kuorman kytkentä aiheutti jännitteen alenemaa. Jännitteen alenema jännitealenema U_a voidaan laskea kaavalla (22). Kaavassa 22 päätellään jännitealenema kuormituksen 8 A:n huipusta, joka pitää jakaa $\sqrt{3}$:lla, josta saadaan vaihevirran suuruus, jossa virtahuipun $\cos\varphi = 0,34$; eli $\varphi = 70^\circ$; arvot saadaan kuviosta 45. Verkon vastusarvot saadaan luvusta 6.1. Vaihevirta on myös 30° edellä, mikä näkyy laskussa:

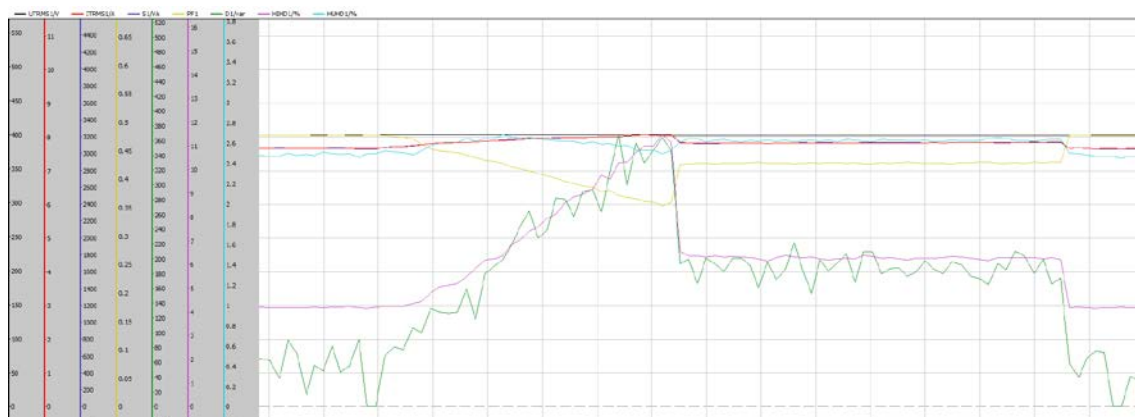
$$U_a = IR_k \cos\varphi + IX_k \sin\varphi \quad (22)$$

$$U_a = 4.6 \text{ A} * 0.289 \Omega * \cos(70^\circ + 30^\circ) + 4.6 \text{ A} * 0.171 \Omega * \sin(70^\circ + 30^\circ)$$

$$U_a = 0.54 \text{ V}$$

Tehokerroin PF laski kuormituksen takia. Näennäisvirta ITRMS ja näennäisteho S nousi kuormituksen aikana. Säröteho D pysyi samana kuin kuormituksen säröteho.

Yliaaltojännite HUHD nousi saman verran, kuin LT2-muuntajassa, mutta laski kuorman huippukohdassa ja palautui takaisin 0,2 % nousseeseen arvoon. yliaal-
tovirta HIDH nousi 4 %:sta 11 %:iin.



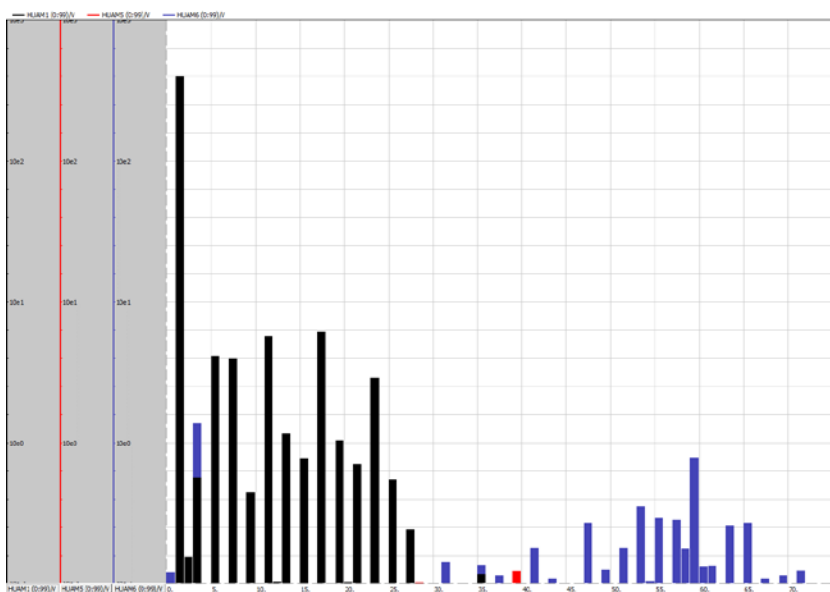
Kuvio 45. Taajuusmuuttajakäytetyn moottorin vaikutus Dy11-muuntajan ensiöön (Liite 7)

Kuviot 46 ja 47 ovat kuvaajia yliaalloista, kun moottorikuorma on tasaisessa kuormituksessa. Dy11-muuntajan ensiön yliaaltojännitteet ovat kuviossa 46 mustalla värillä. Kuviosta 46 nähdään, että kolmas yliaalto on alentunut.

Taulukon 11 mukaan yliaaltojännitteet olivat vaimentuneet verkon muuntajiin, mutta taulukon mukaan Dy11-muuntajan ensiössä 5., 7., 9. ja 11. yliaaltojännitteet ovat suurempia kuin Yy-muuntajassa ja kuormassa. Dy11-muuntajassa pitää kuitenkin ottaa huomioon, että yliaaltojännitteet ovat oikeasti matalampia. Dy11-muuntajan jännitteet jaetaan $\sqrt{3}$:lla, jolloin saadaan sama suhde kuormaan ja Yy0-muuntajaan. Suhteen laskun jälkeen voidaan todeta, että 5., 7., 9. ja 11. yliaaltojännitteet ovat samassa suhteessa Yy0-muuntajan ensiön yliaaltojännitteeseen. 3. yliaalto on kuitenkin jäänyt Dy11-muuntajan kolmiokytkentään, mikä tarkoittaa lisähäviötä muuntajalle.

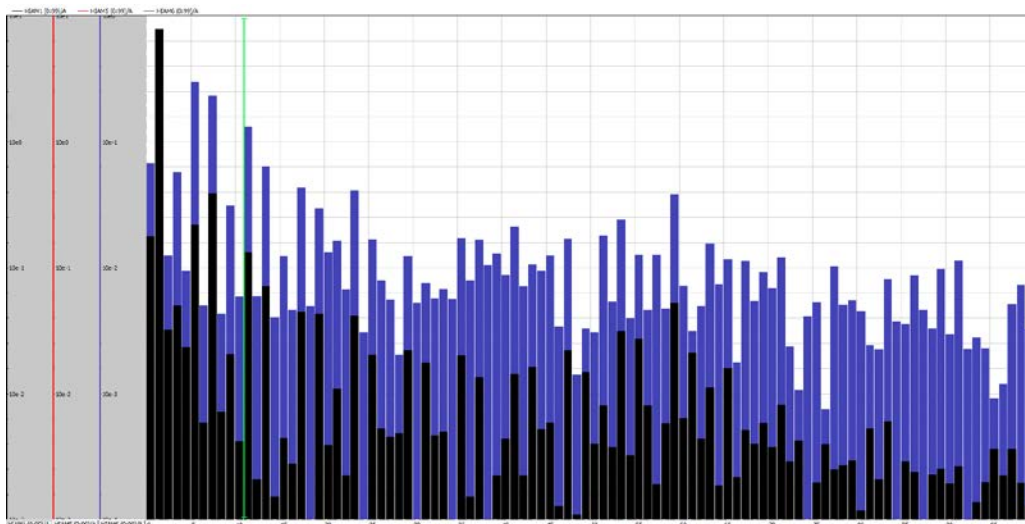
Taulukko 11. Verkon yliaaltojännitteet

Yliaaltojännitteet	Kuorma [V]	Yy0 [V]	Dy11 [V]
3	1.284	0.392	0.388
5	2.247	2.319	4.032
7	2.636	2.374	3.836
9	0.481	0.364	0.672
11	3.654	3.350	5.577



Kuvio 46. Dy11-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltojännitteet (Liite 7)

Kuviosta 47 nähdään, että kuormituksen ajan Dy11-muuntajan yliaaltovirrat olivat kaikkein alhaisimmat Dy11-muuntajassa. Yliaaltovirrat ovat kuitenkin erittäin vähäisiä ja samoilla tasoilla kuin tyhjäkäynnin yliaaltovirrat.



Kuvio 47. Dy11-muuntajan yläjännitepuolen yliaaltovirrat (Liite 7)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä oli tarkoitus tutkia laboratorio-olosuhteissa, miten erilaiset kuormat vaikuttavat muuntajien yläjännitepuolella. Tavoitteena oli oppia käyttämään sähkön laatuanalysointilaitetta Zimmer LMG500 ja oppia tulkitsemaan sen tuottamia tuloksia. Työssä keskityttiin vain häiriöiden mittaamiseen muuntajien alajännitepuolelta yläjännitepuolelle eli verkkoon. Johdot olivat työssä erittäin lyhyitä ja niitä ei huomioitu laskuissa mitenkään.

Työssä huomattiin, että suoraohjattumoottori oli kaikkein lineaarisin tapa pyörittää moottoria mutta käynnistyshetkellä se tuotti suurimman transienttisen jännitealeneman. Pehmokäynnistetty moottori teki käynnistyshetkellä pienemmän jännitealeneman verrattuna suoraohjatun moottorin käynnistykseen, mutta pehmokäynnistys tuotti säröä ja yliaaltoa käynnistyshetkellä muuntajien alajännitepuolelle. Taajuusmuuttaja, jota kuormitettiin moottorilla, kulutti kaikkein vähiten sähköä mutta tuotti eniten yliaaltoja ja särötehoa.

Tuloksista voidaan myös päätellä, että verkon resistanssi ja reaktanssi ovat suoraan vaikutuksessa kuorman aiheuttamaan jännitealenemaan ja transienttisiin jännitealenemiin. Tuloksissa myös havaittiin, että yliaallot vaimentuvat verkon muuntajiin, mikä on ylimääräistä rasitusta muuntajalle.

Työn mittaukset ovat selkeitä kuvioita ja taulukoita kuormien käynnistymisestä sekä katkaisusta. Työn Dy11-muuntajan tuloksien esittäminen koitui tehtävän vaikeammaksi osaksi. Tulosten analysoinnissa piti jokaisessa kohdassa huomauttaa, että tehokerroin ja tehot ovat matalammat kuin kuvioiden ja taulukoiden tuloksissa.

Kaiken kaikkiaan työn teoria heijastuu työssä tehtyjen mittausten tuloksissa. Tuloksista saadaan visuaalinen käsitys miten kuorma käyttäytyy Dy11- ja Yy0-muuntajaympäristössä. Erilaiset kuormat tuottivat erilaisia häiriöitä ja taajuusmuuttaja oli selkeästi eniten häiriöitä tuottava kuorma, mutta kulutti vähiten

sähköä. Taajuusmuuttajatekniikka kehittyy jatkuvasti parempaan suuntaan ja työssä käytetty Vaconin taajuusmuuttaja ei ollut uusimmasta päästä.

Työssä ei puututtu siihen, että kuinka paljon yliaallot ja kuorman epäsymmetrisyydet tuottavat ylimääräistä rasitusta muuntajalle. Mittauksissa tuli esille, että yliaallot häviävät muuntajaan, mutta niiden tuottamia lämpöhäviöitä ei mitattu. Nämä rasitukset lyhentävät muuntajan toimintaikää, mikä voi johtaa ennakoitun kunnossapidon epäonnistumiseen.

LÄHTEET

ABB Oy 2000. ABB TTT-käsikirja.

ABB Oy 2010. Characteristics of Inrush Current of Present Designs of Power Transformers. Viitattu 29.3.2016.

https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Characteristics_of_inrush_current_of_present_designs_of_power_transformers%5B1%5D.pdf

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.

Dugan, R. C. & McGranhan, M. F. & Beaty, W. B. 1996. Electrical Power System Quality. Yhdysvallat: McGraw-Hill

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Helsinki: Otatieto.

The Fire Protection Research Foundation 2011. Evaluation of the Impact on Non-Linear Power On Wiring Requirements for Commercial Buildings. Viitattu 16.3.2016.

<http://www.nfpa.org/~media/files/research/research-foundation/research-foundation-reports/electrical/rfevaluationofnonlinearpowerwiringrequirements.pdf?la=en>

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere: Tammertekniikka

Korpinen, L. 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. Viitattu 17.2.2016.

http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/9muuntajat_ja_sahkolaitteet.pdf

Korpinen, L. & Mikkola, M. & Keikko, T. & Falck, E. 2008. Yliaalto-opus. Viitattu 17.2.2016.

<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

Ruppa, E. 2001. Yliaallot 17. SAMK/TEKPO/Erkki Ruppa /16.9.2001. Viitattu 17.2.2016.

tp.samk.fi/er/siirto/yliaallot.doc

SFS-EN 50160 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2014. D1-2012 käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 22. painos. Helsinki: Painokurki Oy.

Tammertekniikka Oy 2012. Tekniikan kaavasto. Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 10. painos. Hämeenlinna: Tammertekniikka/AMK-kustannus Oy.

Zimmer 2016. Zimmer LMG500 1 to 8 Channel Power Analyzer. Viitattu 19.2.2016.

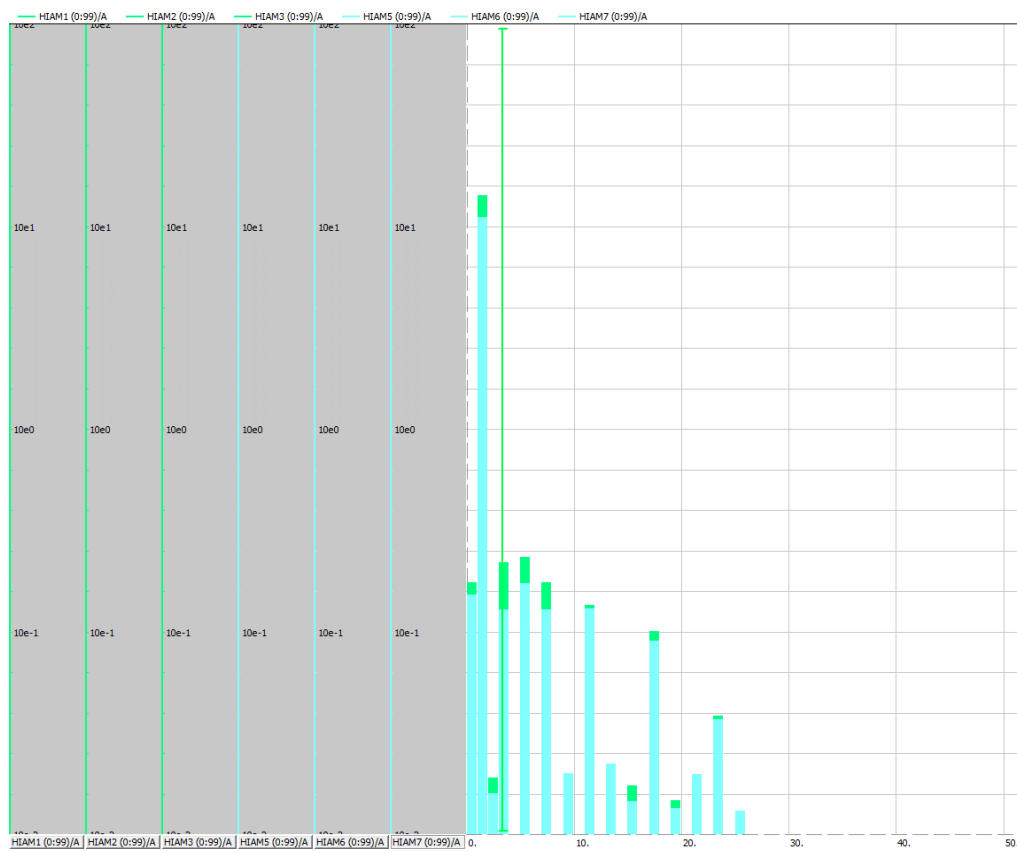
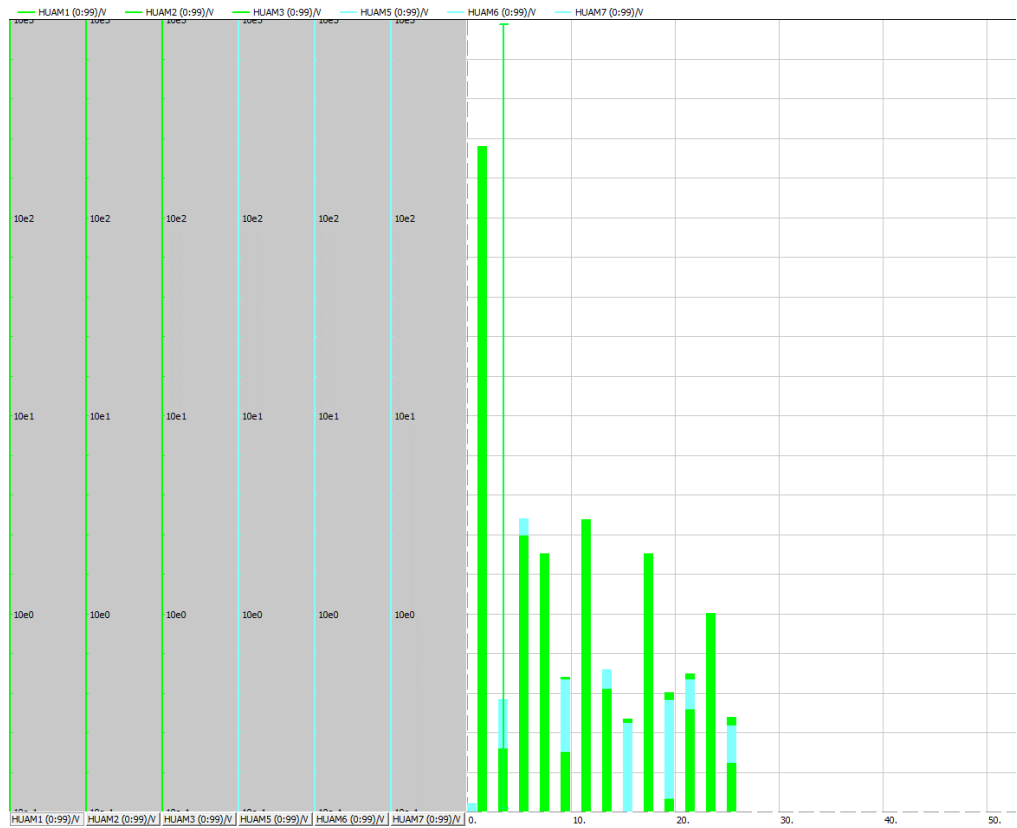
<http://www.zes.com/en/Products/Precision-Power-Analyzer/LMG500>

LIITTEET

- Liite 1. Resisttiivinen kuorma
- Liite 2. Induktiivinen kuorma
- Liite 3. Kapasitiivinen kuorma
- Liite 4. Tyhjäkäynnin vaikutukset muuntajiin
- Liite 5. Suoraohjatun oikosulkumoottorikuorman vaikutus
- Liite 6. Pehmokäynnistetyyn moottorin vaikutus
- Liite 7. Taajuusmuuttajaohjatun moottorikuorman vaikutus
- Liite 8. LT2 Muuntajan datalehdet
- Liite 9. LT3 Muuntajan datalehdet
- Liite 10. ZIMMER LMG500 Pikaohje

Liite 1.

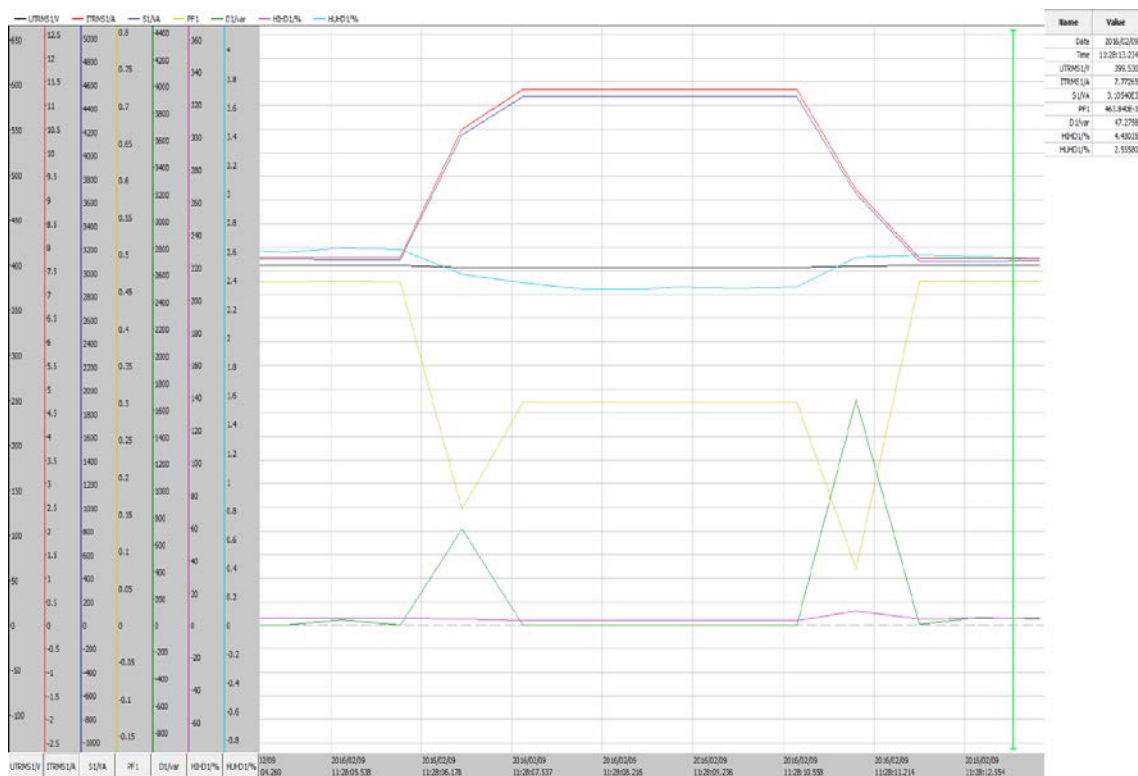
Resistiivinen kuorma 1(4)



Liite 1.

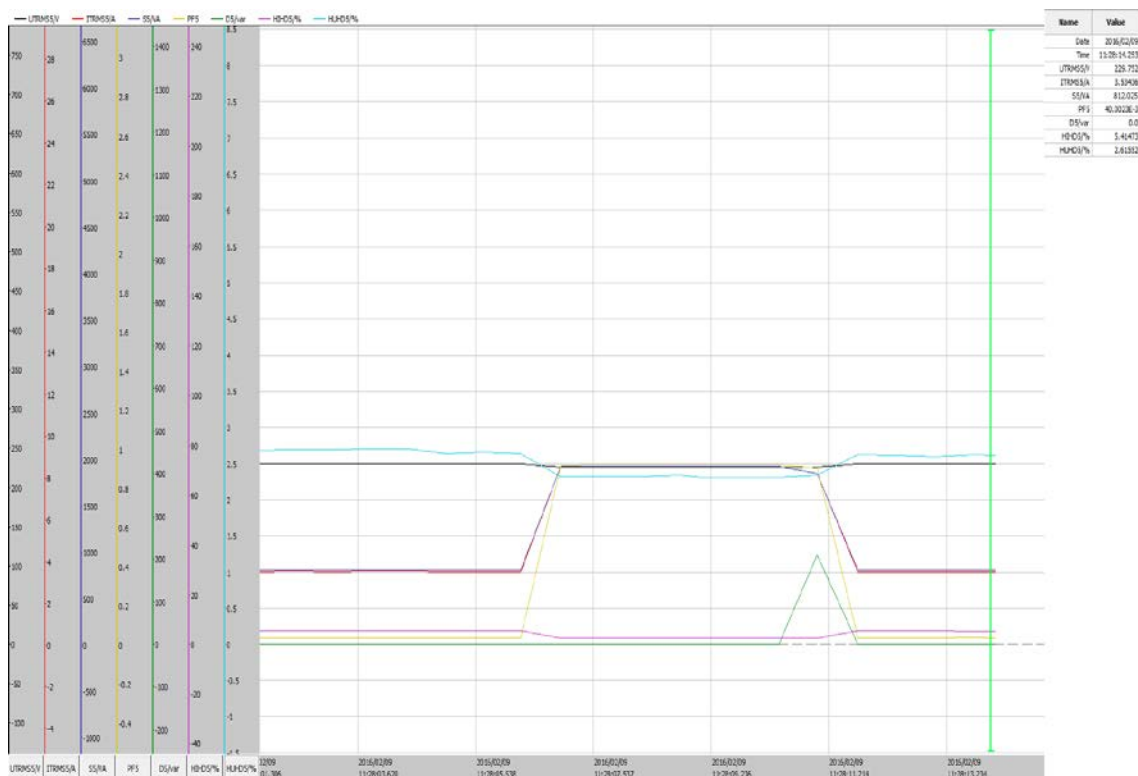
Resistiivinen kuorma 2(4)

Symmetrinen kuorma tähdessä						
Dy – Yy	ENSIÖ			TOISIO		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	396.55200	400.55600	398.92500	225.31900	227.27700	226.350000
Irms [A]	11.32970	10.93280	12.89020	8.54644	9.33122	9.365870
S [VA]	4492.81000	4379.20000	5142.21000	1925.68000	2120.77000	2119.960000
PF	0.29958	0.37832	0.34863	0.92082	0.93088	0.914180
D [%]	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.000000
THDi [%]	3.04094	2.76288	2.94775	2.60606	2.65465	2.859330
THDv [%]	2.32728	2.16539	2.08333	2.30326	2.15221	2.10
THDv [V] 3	0.63189	0.72015	0.26967	0.54895	0.40904	0.34449
THDv [V] 5	3.69146	4.61856	4.57605	2.31467	2.80569	2.82159
THDv [V] 7	3.70353	2.59585	3.97942	2.07531	1.45291	2.20068
THDv [V] 9	0.48335	0.53225	0.97070	0.29141	0.29248	0.54602
THDv [V] 11	4.39214	4.18195	4.00521	2.40117	2.29927	2.21934
THDi [A] 3	0.08265	0.15164	0.21503	0.03282	0.13143	0.10038
THDi [A] 5	0.25713	0.17305	0.24730	0.13206	0.13731	0.18221
THDi [A] 7	0.16745	0.12421	0.14902	0.11051	0.08875	0.12415
THDi [A] 9	0.01805	0.00485	0.01024	0.01179	0.00820	0.01897
THDi [A] 11	0.08239	0.09093	0.08398	0.08020	0.08204	0.07747



Liite 1.

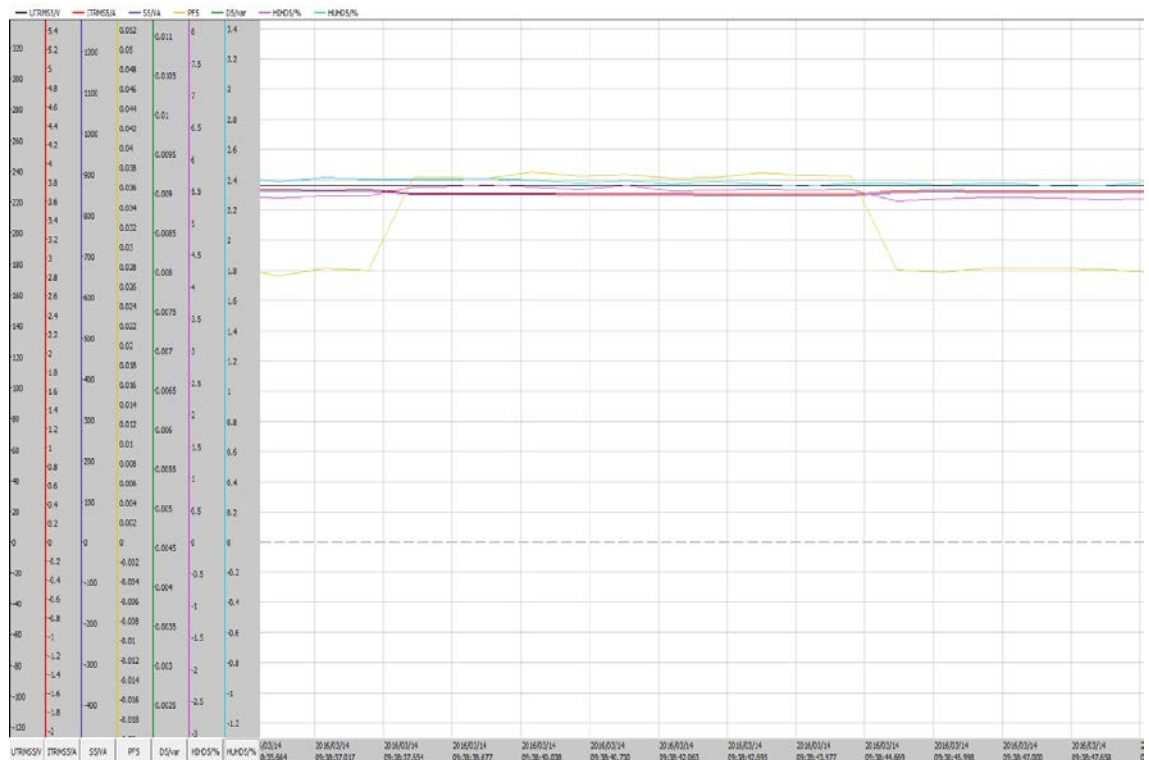
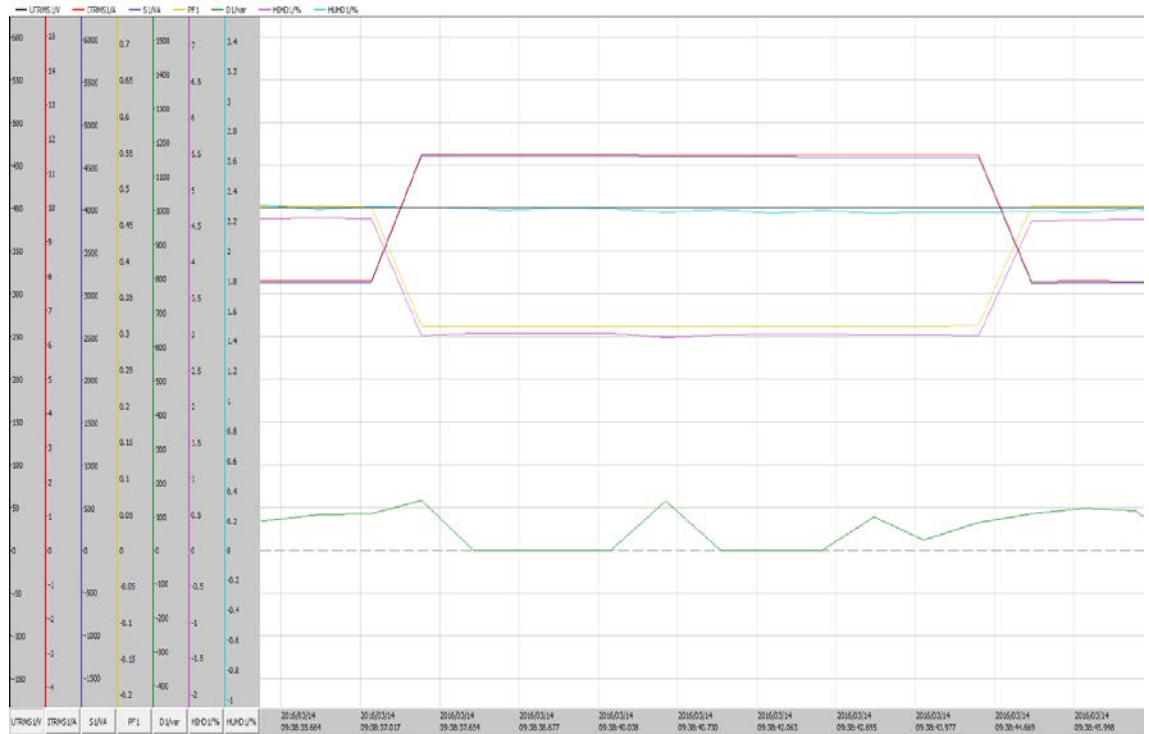
Resistiivinen kuorma 3(4)



	L1 auki					
	ENSIÖ			TOISIO		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Dy – Yy						
Urms [V]	399.23	401.66	397.73	229.57	229.30	225.60
Irms [A]	11.64	4.26	13.10	3.72	6.80	10.06
S [VA]	4648.72	1711.17	5211.35	853.08	1558.41	2270.45
PF	0.30	0.15	0.35	0.05	1.00	0.67
D [%]	0.00	98.35	34.79	0.00	49.97	0.00
THDi [%]	2.99	7.20	2.87	5.30	3.26	2.63
THDv [%]	2.45	2.16	2.13	2.51	2.13	2.20
THDv [V] 3	0.76	0.81	0.37	0.63	0.39	0.34
THDv [V] 5	3.87	4.55	4.57	2.46	2.74	2.85
THDv [V] 7	3.75	2.87	3.98	2.13	1.64	2.20
THDv [V] 9	0.37	0.47	0.82	0.23	0.24	0.46
THDv [V] 11	4.50	3.85	4.23	2.58	2.08	2.42
THDi [A] 3	0.06	0.21	0.19	0.10	0.15	0.06
THDi [A] 5	0.32	0.18	0.25	0.16	0.09	0.22
THDi [A] 7	0.11	0.10	0.16	0.05	0.10	0.10
THDi [A] 9	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
THDi [A] 11	0.03	0.06	0.09	0.01	0.07	0.06

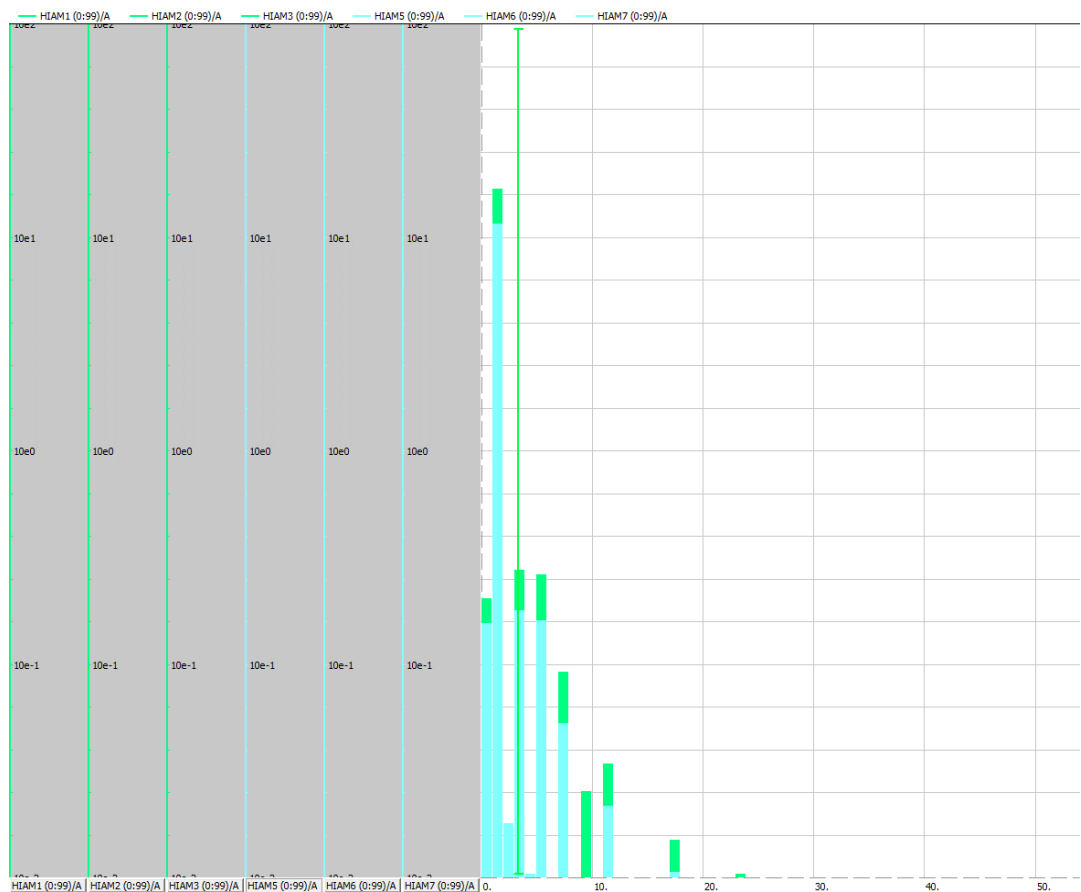
Liite 1.

Resistiivinen kuorma 4(4)



Liite 2.

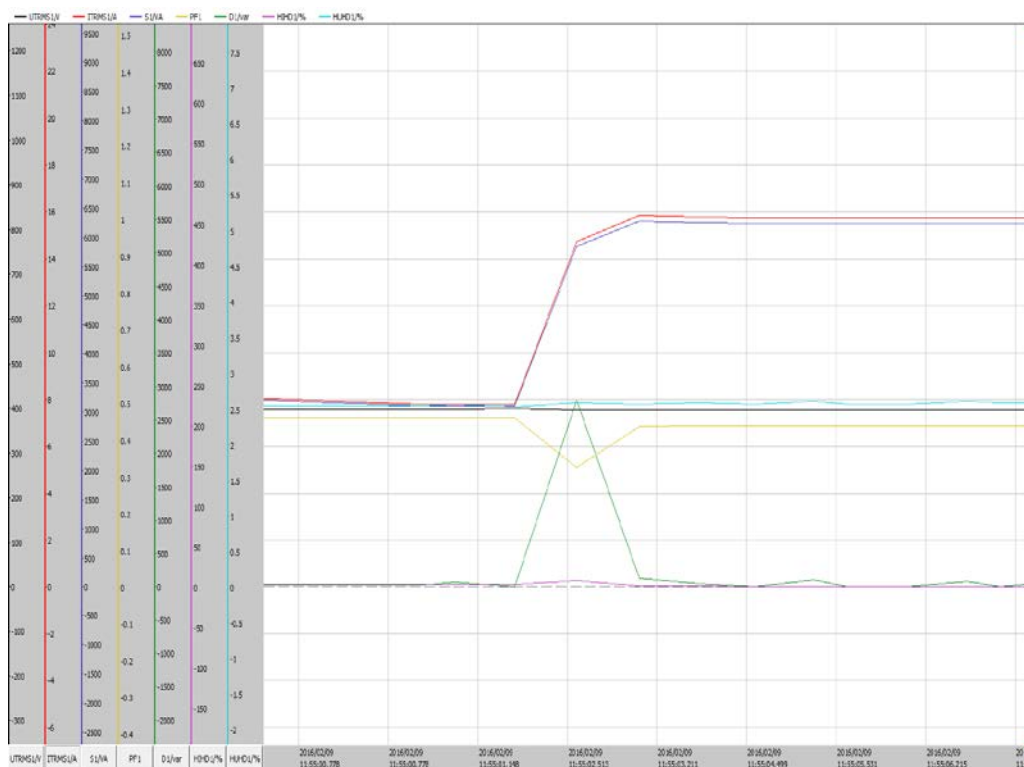
Induktiivinen kuorma 1(4)



Liite 2.

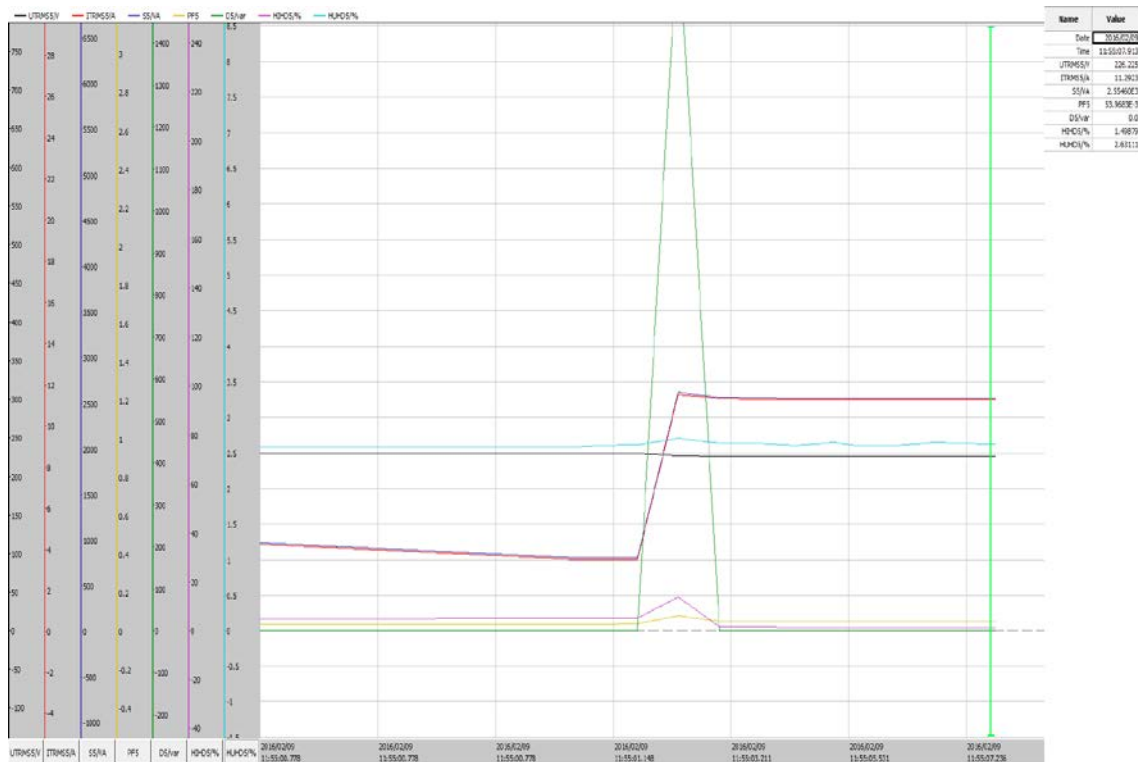
Induktiivinen kuorma 2(4)

Symmetrinen kuorma tähdessä						
	ENSIÖ			TOISIO		
Dy – Yy	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	396.7060	399.7580	399.1050	226.3680	228.0490	227.5670
Irms [A]	15.7529	15.1359	17.0033	11.3023	11.5191	11.6680
S [VA]	6249.2700	6050.7100	6786.1200	2558.4800	2626.9100	2655.2500
PF	0.4408	0.4370	0.3756	0.0537	0.0442	0.0727
D [%]	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
THDi [%]	1.9178	1.9943	2.3776	1.5091	1.9585	1.9531
THDv [%]	2.4961	2.3874	2.2858	2.5486	2.4326	2.3468
THDv [V] 3	0.34	0.56	0.37	0.38	0.32	0.41
THDv [V] 5	4.04	4.86	4.82	2.55	2.98	3.00
THDv [V] 7	4.09	3.21	4.39	2.33	1.82	2.49
THDv [V] 9	0.35	0.47	0.76	0.20	0.27	0.44
THDv [V] 11	4.52	4.18	4.23	2.56	2.36	2.38
THDi [A] 3	0.09	0.20	0.29	0.06	0.18	0.14
THDi [A] 5	0.27	0.21	0.26	0.15	0.12	0.16
THDi [A] 7	0.09	0.07	0.09	0.05	0.04	0.05
THDi [A] 9	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
THDi [A] 11	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02



Liite 2.

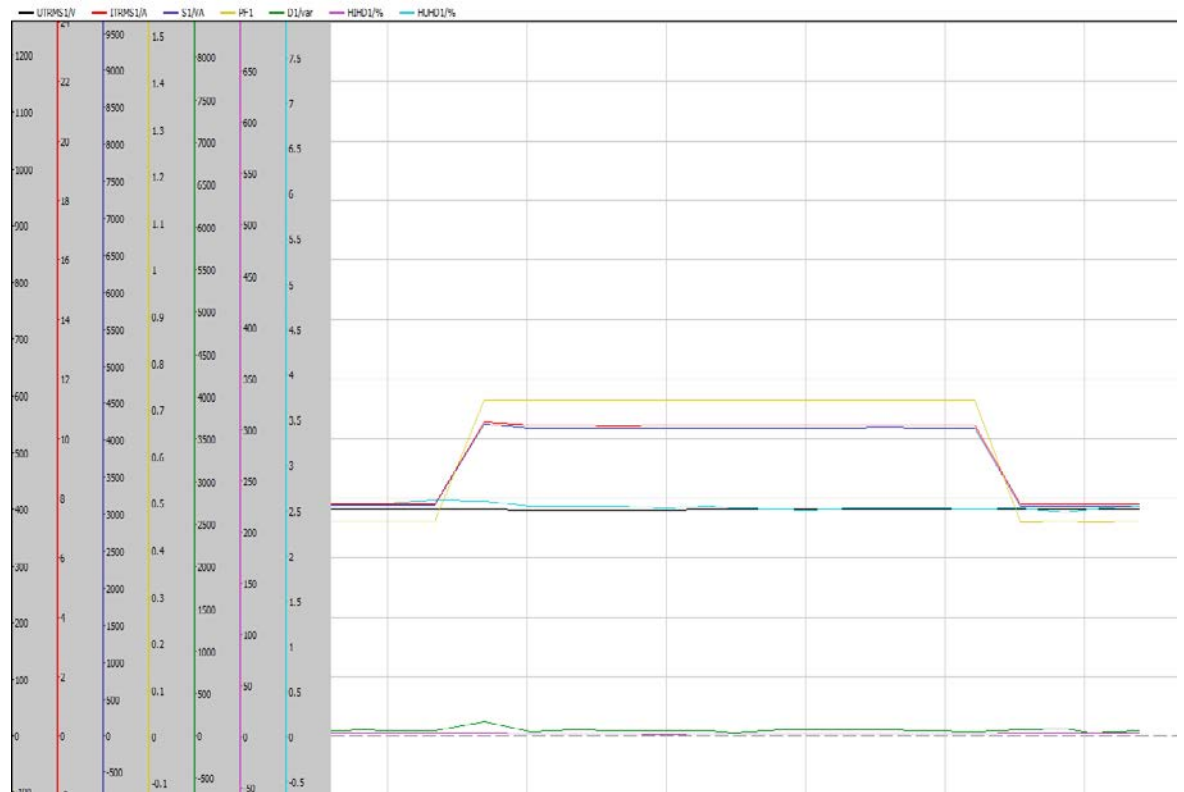
Induktiivinen kuorma 3(4)



Dy – Yy	L1 auki					
	ENSIÖ			TOISIO		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	399.42	399.37	400.63	229.73	227.06	230.10
Irms [A]	10.44	9.64	17.04	3.53	10.08	10.26
S [VA]	4170.50	3851.83	6825.20	810.87	2288.33	2359.98
PF	0.7226	0.0903	0.3823	0.0175	0.4047	0.2748
D [%]	58.1163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
THDi [%]	2.9892	3.5821	2.5519	5.1861	2.5137	2.2297
THDv [%]	2.5233	2.3342	2.1882	2.5309	2.3866	2.2327
THDv [V] 3	0.5661	0.5947	0.2948	0.5340	0.3780	0.3530
THDv [V] 5	3.9929	4.7311	4.5966	2.5432	2.9012	2.8762
THDv [V] 7	3.9402	2.9877	4.1636	2.2570	1.6966	2.3771
THDv [V] 9	0.3270	0.4184	0.7292	0.1918	0.2355	0.4133
THDv [V] 11	4.3196	4.0064	4.0316	2.4619	2.2693	2.2766
THDi [A] 3	0.0782	0.2398	0.3353	0.0593	0.2181	0.1525
THDi [A] 5	0.2813	0.2334	0.2594	0.1630	0.1171	0.1585
THDi [A] 7	0.0975	0.0784	0.0836	0.0486	0.0399	0.0469
THDi [A] 9	0.0034	0.0072	0.0241	0.0039	0.0068	0.0095
THDi [A] 11	0.0232	0.0235	0.0324	0.0101	0.0180	0.0201

Liite 2.

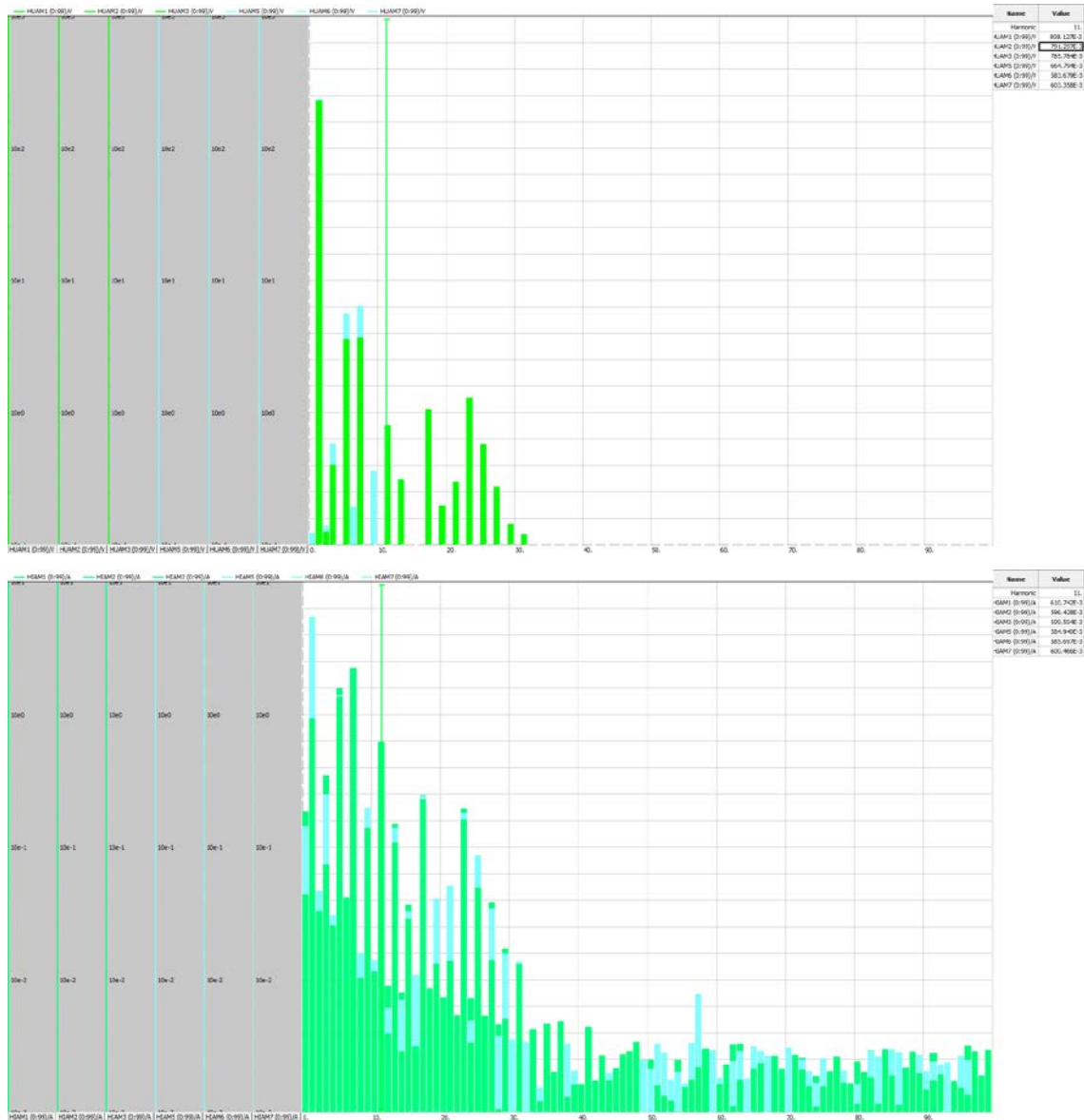
Induktiivinen kuorma 4(4)



LT2-muuntajan (Yy) ensiössä ei tapahtunut muutoksia.

Liite 3.

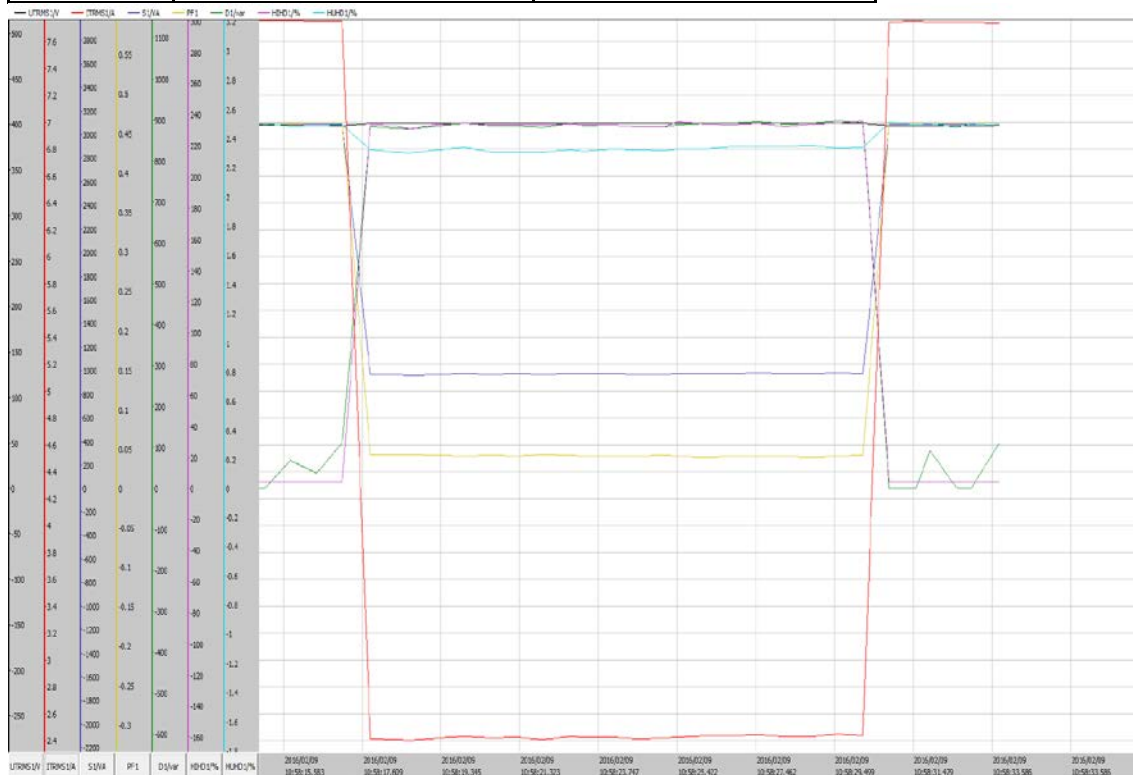
Kapasiivinen kuorma 1(4)



Liite 3.

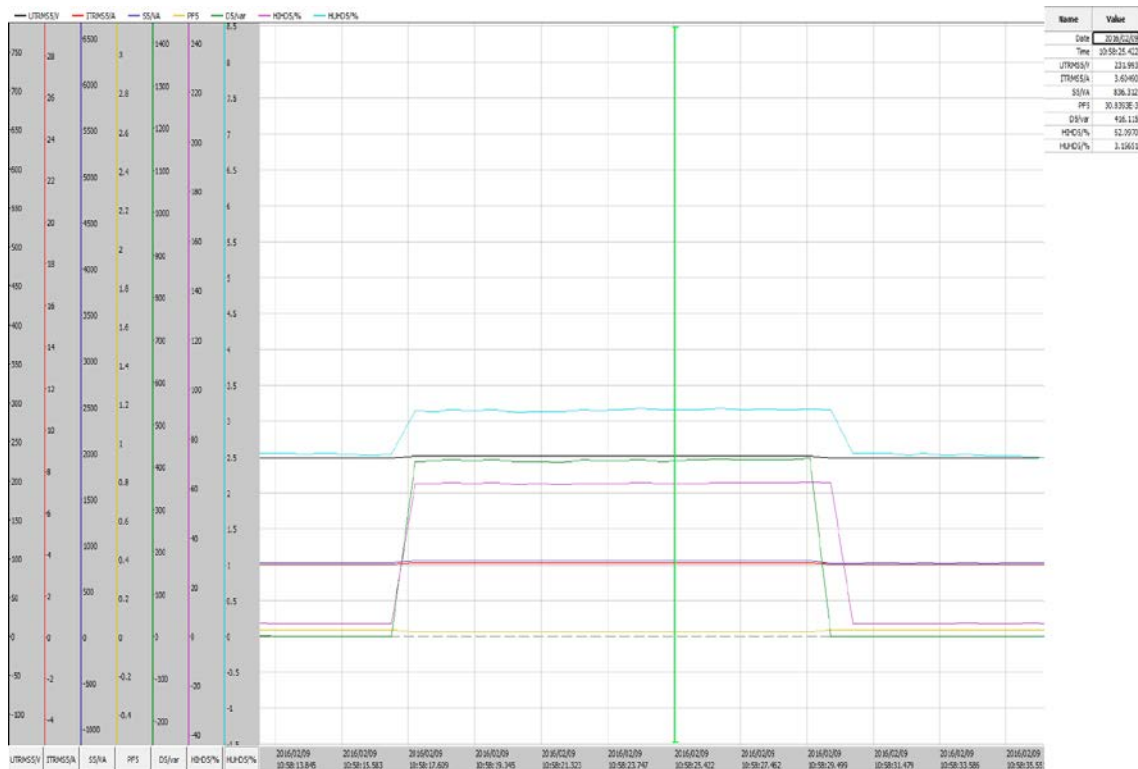
Kapasiivinen kuorma 2(4)

Symmetrinen kuorma tähdessä						
Dy – Yy	ENSIÖ			TOISIO		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	401.10	404.18	403.35	232.05	233.78	233.14
Irms [A]	2.32	1.88	2.65	3.57	4.41	4.30
S [VA]	929.92	760.64	1069.97	829.23	1029.89	1003.18
PF	0.05	0.02	0.09	0.03	0.01	0.15
D [%]	842.83	758.55	911.82	402.50	430.03	476.01
THDi [%]	225.18	1672.63	169.95	59.95	50.46	58.87
THDv [%]	2.23	2.24	2.37	3.07	3.07	3.38
THDv [V] 3	0.45	0.70	0.42	0.51	0.53	0.54
THDv [V] 5	5.27	6.32	6.31	3.98	4.59	4.73
THDv [V] 7	6.43	5.74	6.79	5.64	5.36	6.15
THDv [V] 9	0.12	0.26	0.36	0.18	0.47	0.62
THDv [V] 11	1.09	1.18	1.08	1.10	0.96	1.00
THDi [A] 3	0.09	0.24	0.34	0.07	0.24	0.16
THDi [A] 5	1.04	0.94	1.22	0.81	0.98	1.05
THDi [A] 7	1.66	1.40	1.73	1.43	1.53	1.75
THDi [A] 9	0.18	0.07	0.25	0.07	0.20	0.27
THDi [A] 11	0.69	0.66	0.68	0.66	0.66	0.67



Liite 3.

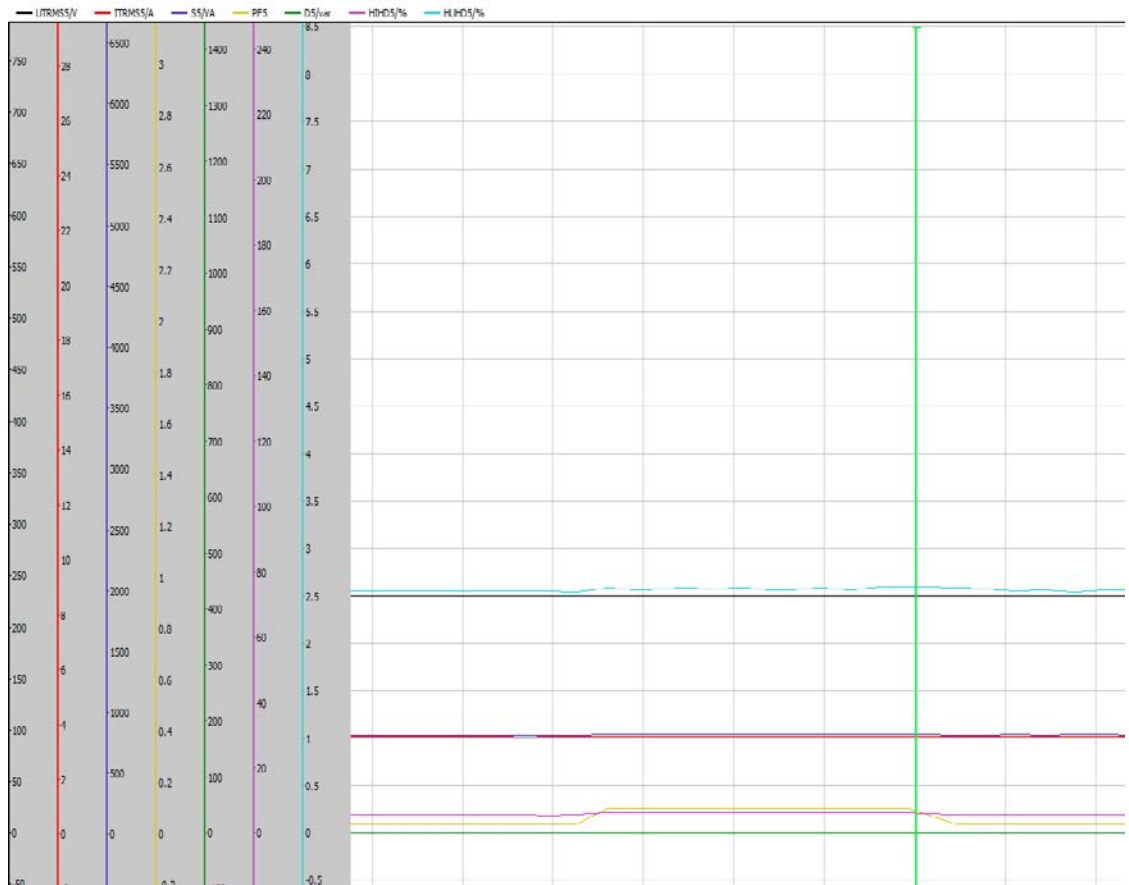
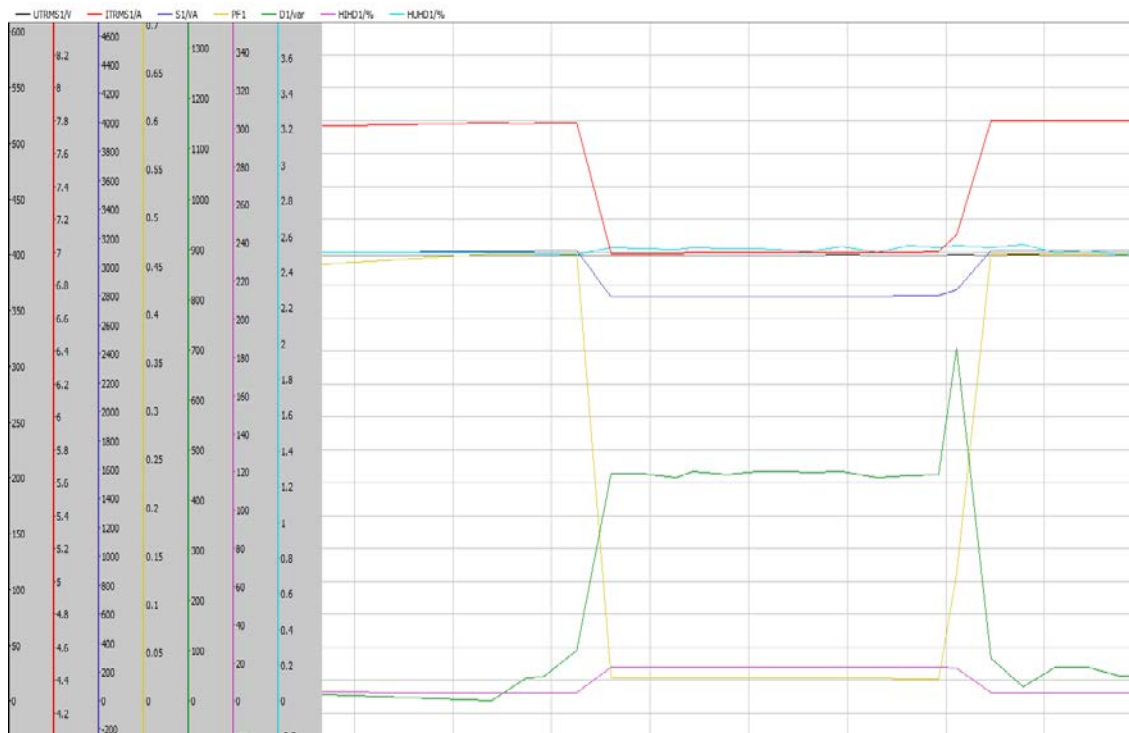
Kapasiivinen kuorma 3(4)



L1 auki						
Dy – Yy	ENSIÖ			TOISIO		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Urms [V]	399.62	405.88	402.26	229.58	235.27	231.09
Irms [A]	6.99	6.11	2.73	3.56	4.13	4.60
S [VA]	2794.52	2480.48	1099.81	816.92	971.39	1062.07
PF	0.02	0.84	0.11	0.10	0.72	0.80
D [%]	453.64	412.98	935.52	0.00	421.94	428.40
THDi [%]	17.93	17.98	168.89	6.08	50.92	46.40
THDv [%]	2.53	2.54	2.33	2.56	3.25	3.13
THDv [V] 3	0.57	0.74	0.31	0.51	0.41	0.45
THDv [V] 5	4.24	5.97	6.34	2.72	4.24	4.72
THDv [V] 7	4.00	6.71	5.39	2.34	5.94	4.75
THDv [V] 9	0.35	0.32	0.41	0.22	0.61	0.51
THDv [V] 11	4.55	2.12	2.78	2.59	1.10	1.85
THDi [A] 3	0.14	0.17	0.28	0.07	0.16	0.16
THDi [A] 5	0.71	0.53	1.21	0.19	0.89	0.96
THDi [A] 7	0.94	0.84	1.83	0.08	1.50	1.53
THDi [A] 9	0.13	0.14	0.27	0.01	0.23	0.23
THDi [A] 11	0.31	0.34	0.67	0.01	0.56	0.55

Liite 3.

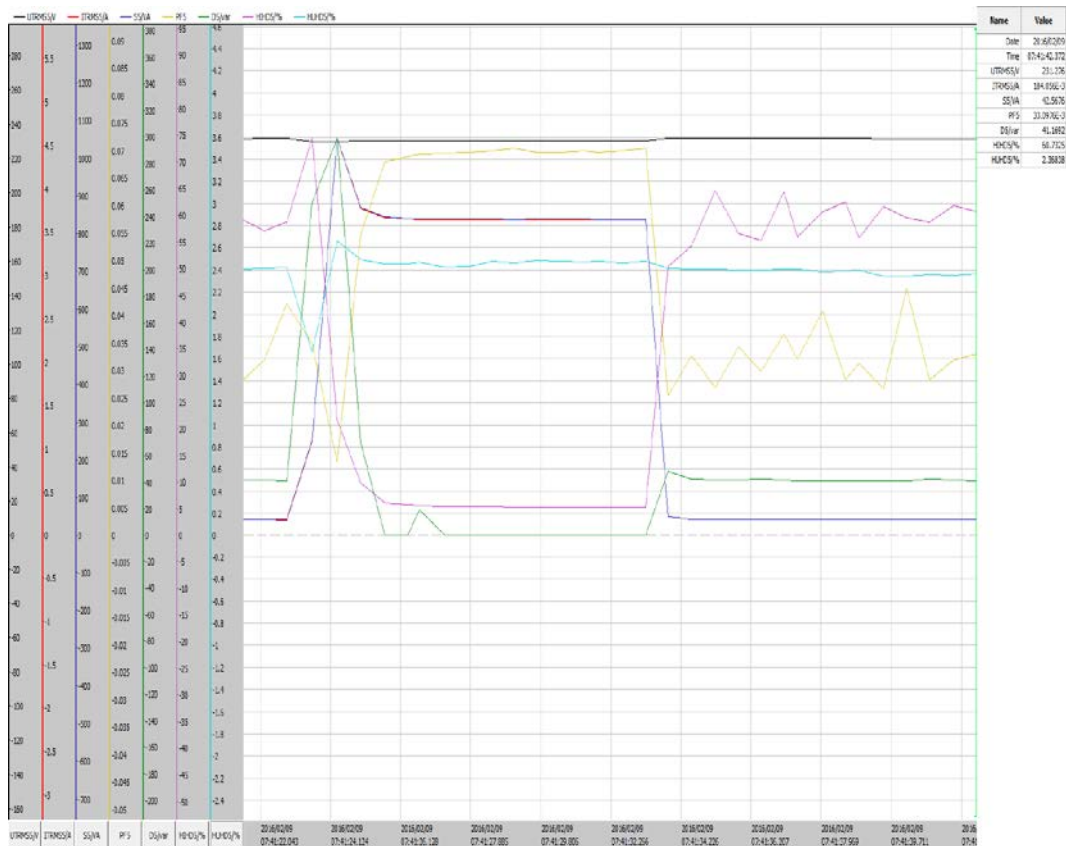
Kapasiivinen kuorma 4(4)



Liite 4.

Tyhjäkäynnin vaikutukset

1(2)



Virtapiikin huippuarvo 141 A

Yy	Tyhjäkäynti		
	ENSIÖ		
	L1	L2	L3
Urms [V]	230.102	231.274	231.315
Irms [A]	3.64604	3.47577	3.73412
S [VA]	838.963	803.853	863.758
PF	6.96E-02	8.33E-02	1.07E-01
D [%]	0	0	0
THDi [%]	5.39122	6.92672	6.6129
THDv [%]	2.42447	2.40026	2.30494
THDv [V] 3	3.76E-01	3.43E-01	4.29E-01
THDv [V] 5	3.05744	3.44003	3.38037
THDv [V] 7	2.18705	1.45095	2.21153
THDv [V] 9	2.82E-01	2.43E-01	4.35E-01
THDv [V] 11	3.03365	2.7795	2.81825
THDi [A] 3	5.03E-02	1.74E-01	1.34E-01
THDi [A] 5	1.67E-01	1.37E-01	1.84E-01
THDi [A] 7	4.82E-02	4.14E-02	5.60E-02
THDi [A] 9	3.86E-03	8.43E-03	3.96E-03
THDi [A] 11	1.24E-02	9.69E-03	1.43E-02

Liite 4.

Tyhjäkäynnin vaikutukset

2(2)



Virtapiikin huippuarvo 174 A

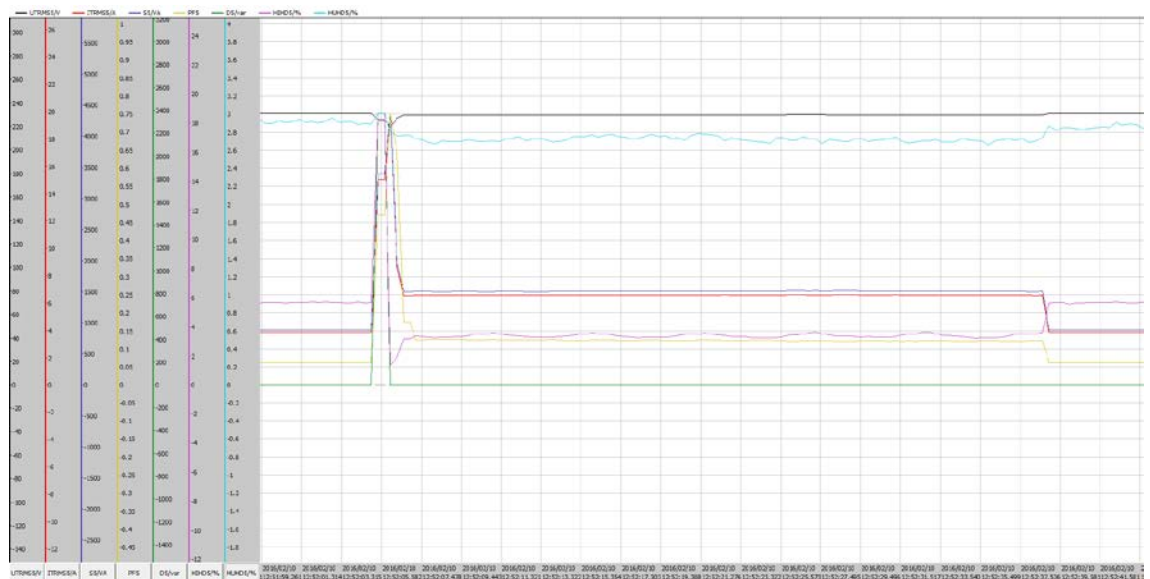
Dy	Tyhjäkäynti		
	L1	L2	L3
Urms [V]	400.11	404.01	402.88
Irms [A]	4.04	3.65	5.16
S [VA]	1615.26	1474.59	2077.31
PF	0.49	0.45	0.39
D [%]	0.00	0.00	0.00
THDi [%]	3.48	3.65	3.59
THDv [%]	2.51	2.34	2.17
THDv [V] 3	0.61	0.41	0.35
THDv [V] 5	3.62	4.61	4.35
THDv [V] 7	3.81	2.76	4.10
THDv [V] 9	4.38E-01	4.99E-01	9.14E-01
THDv [V] 11	4.44261	4.29E+00	4.23E+00
THDi [A] 3	0.0413	0.0717	0.1059
THDi [A] 5	0.1213	0.1006	0.1349
THDi [A] 7	0.0451	0.0370	0.0476
THDi [A] 9	0.0006	0.0028	0.0171
THDi [A] 11	0.0106	0.0114	0.0125

Liite 5. Suoraohjatun oikosulkumoottorikuorman vaikutus

1(4)



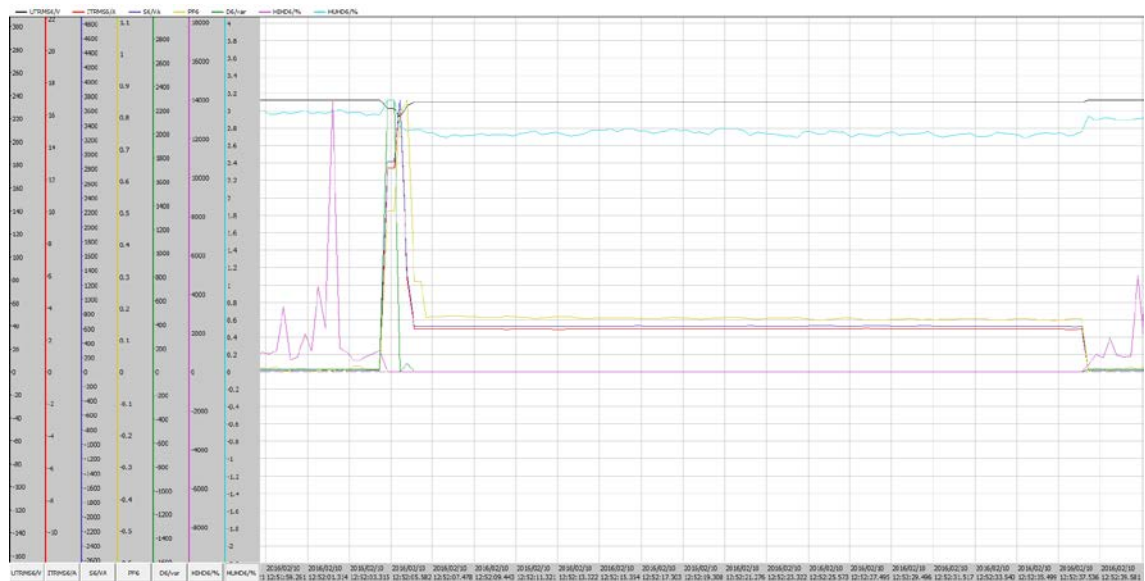
Virtapiikin huippuarvo 36.48 A



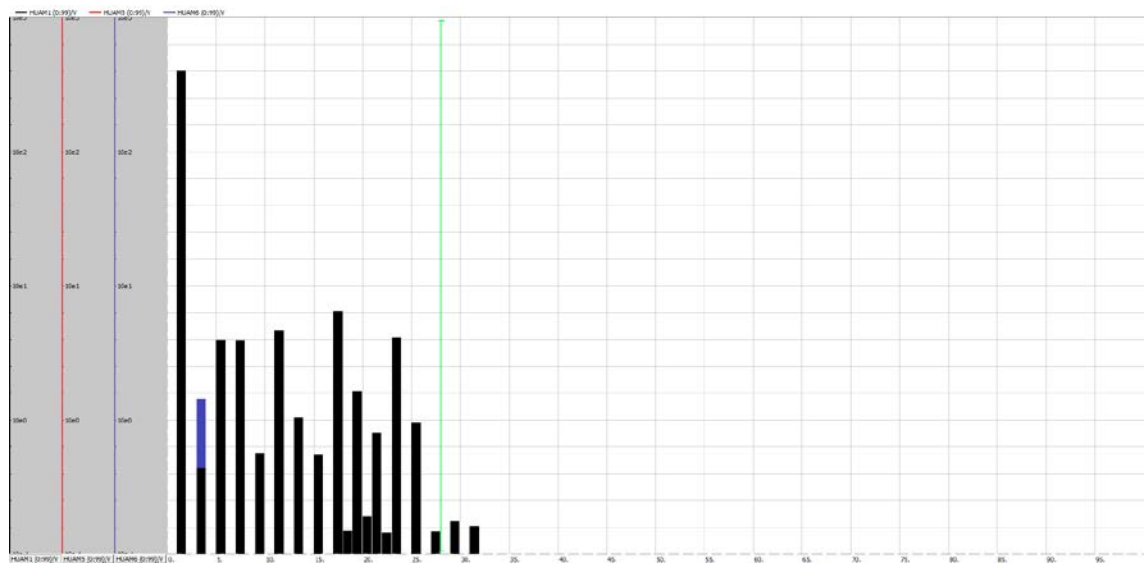
Virtapiikin huippuarvo 32.36 A

Liite 5. Suoraohjatun oikosulkumoottorikuorman vaikutus

2(4)

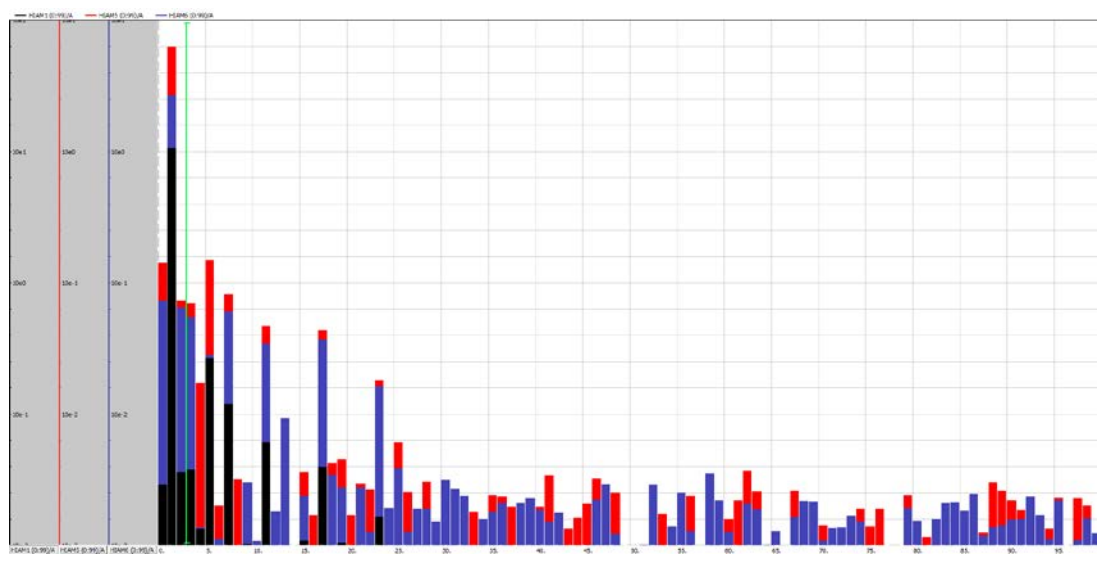
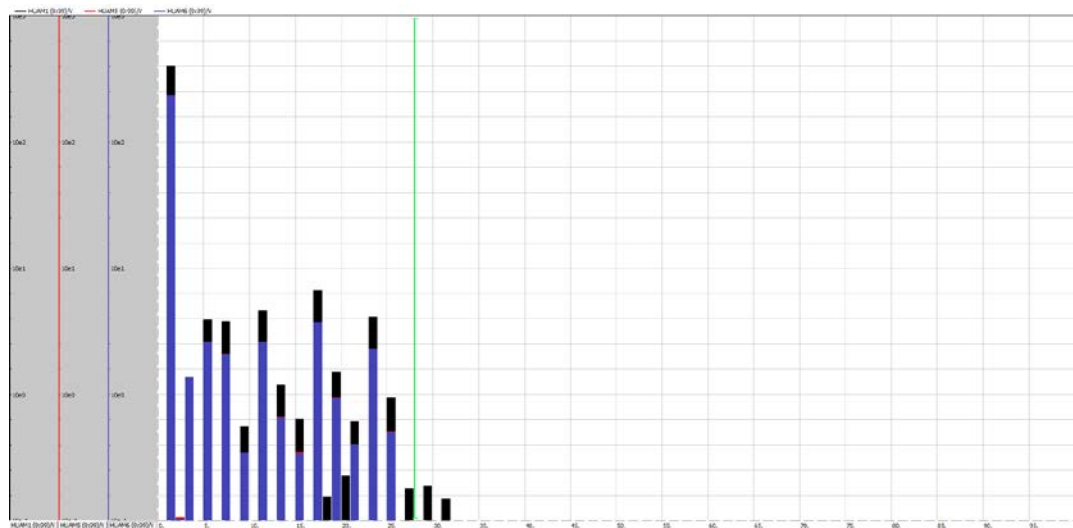
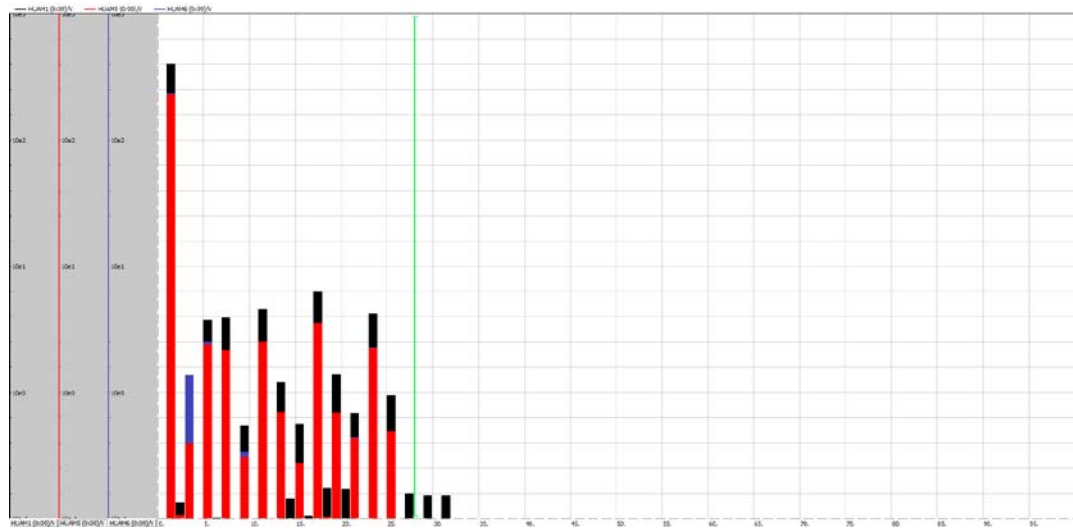


Virtapiikin huippuarvo 28.97 A



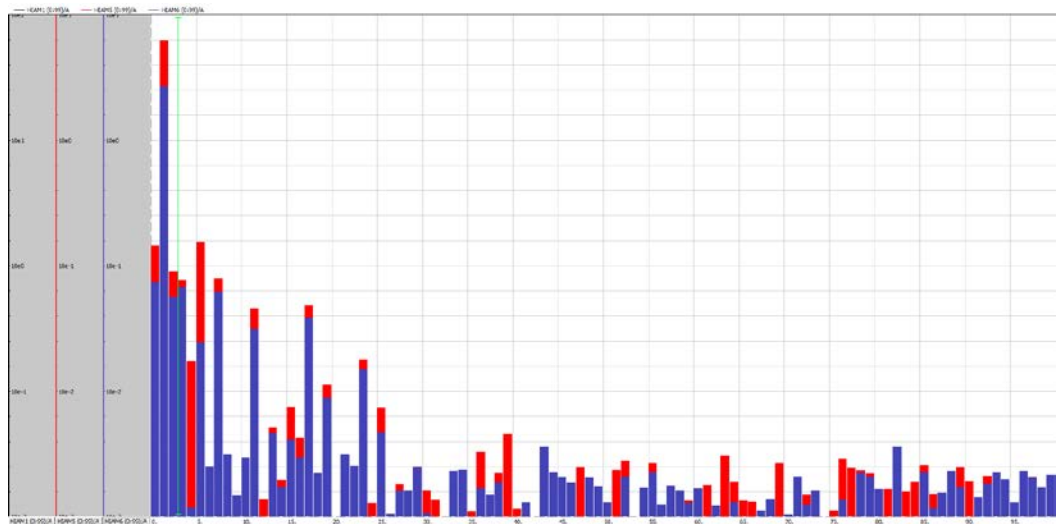
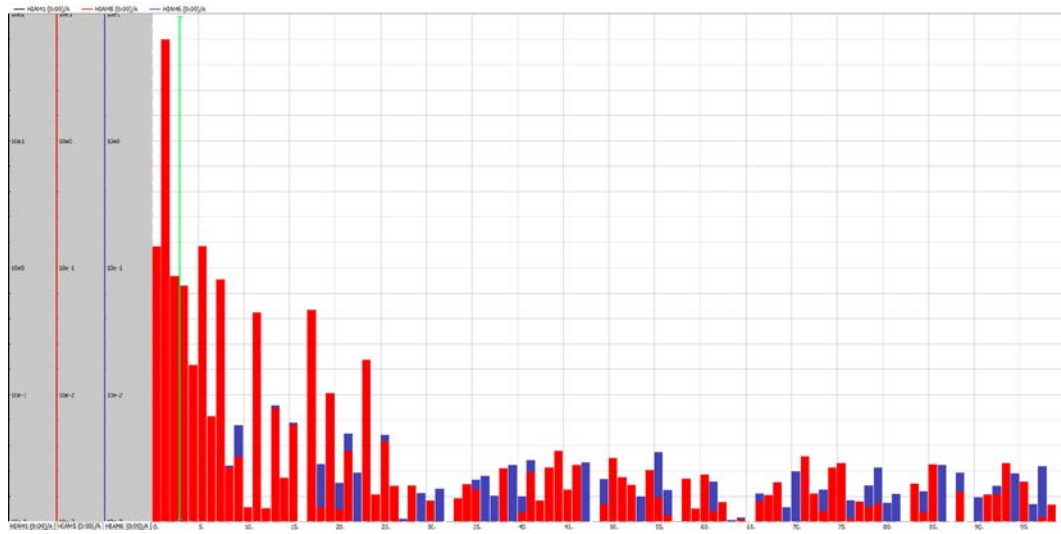
Liite 5. Suoraohjatun oikosulkumoottorikuorman vaikutus

3(4)



Liite 5. Suoraohjatun oikosulkumoottorikuorman vaikutus

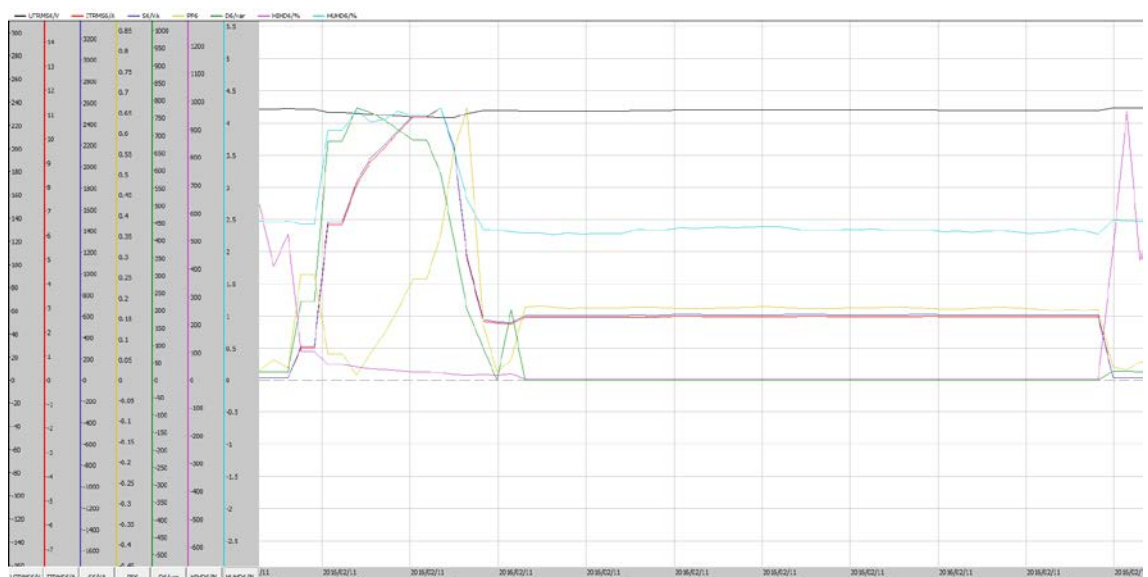
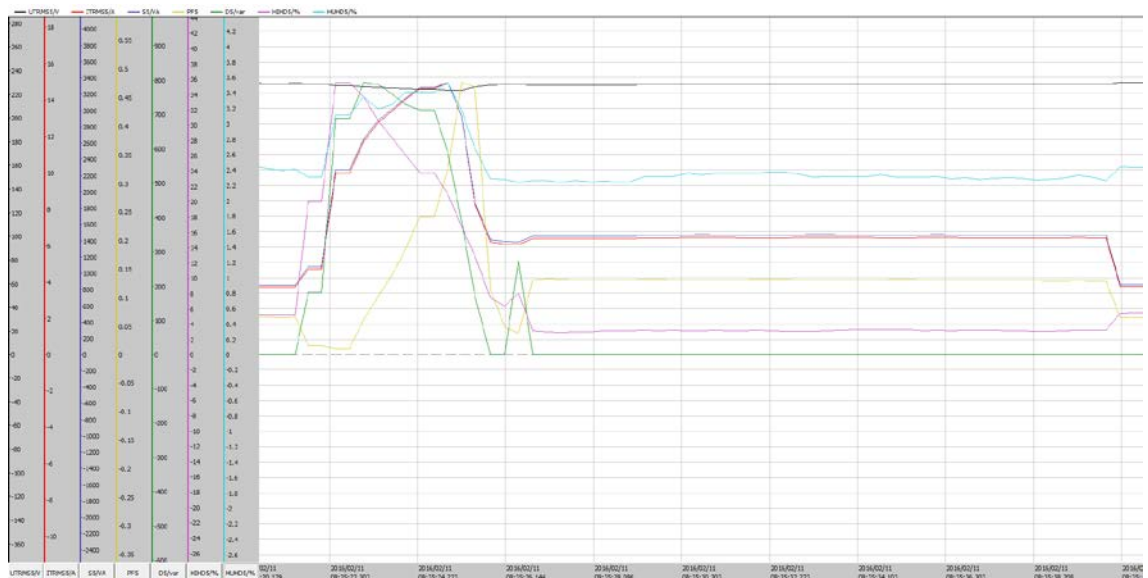
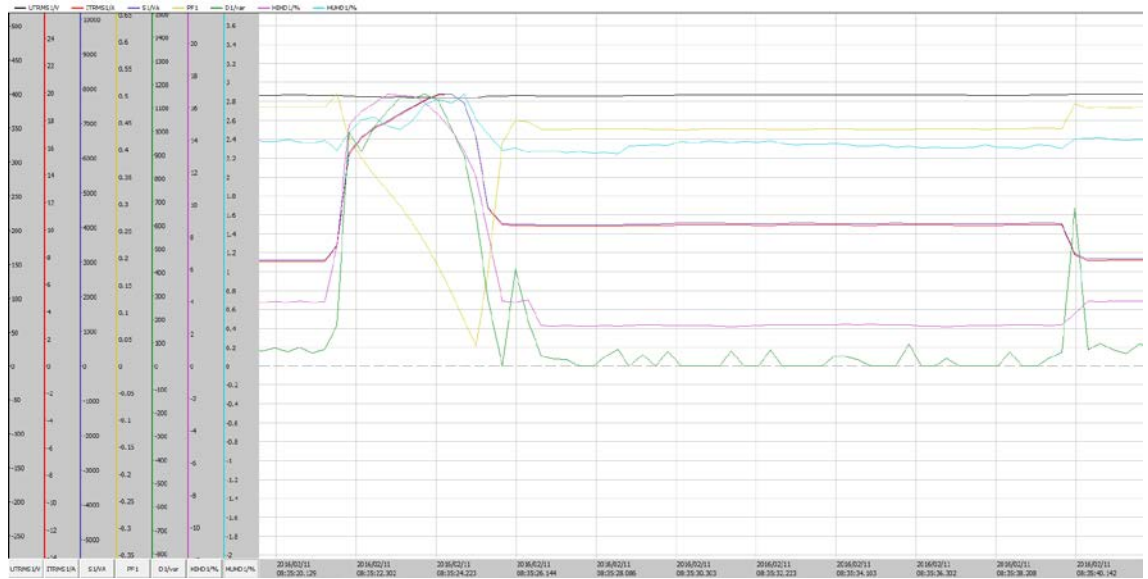
4(4)



Liite 6.

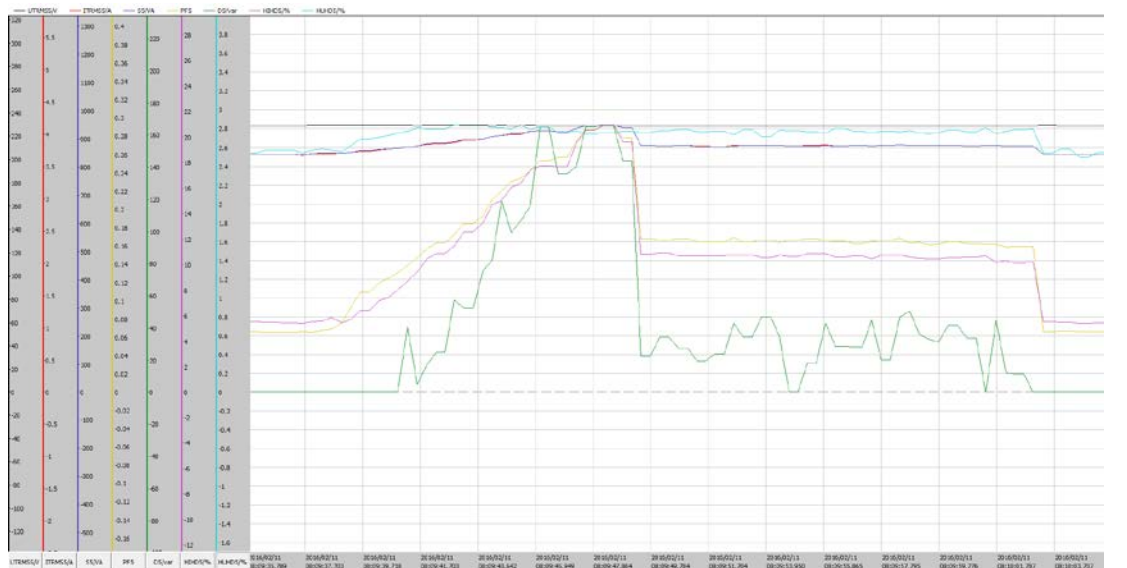
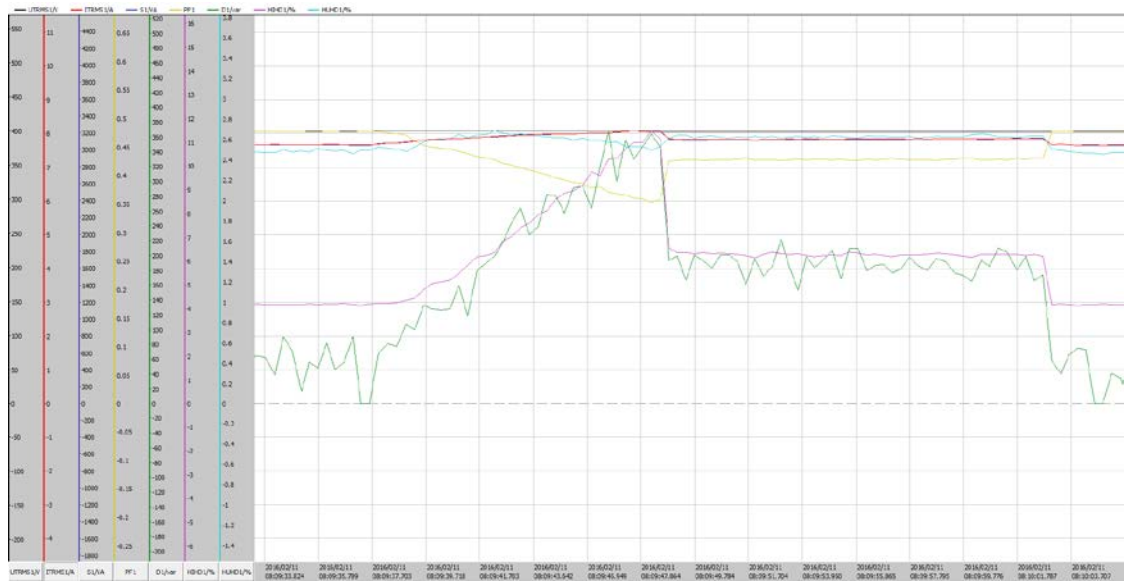
Pehmokäynnistetyin moottorin vaikutus

1(1)



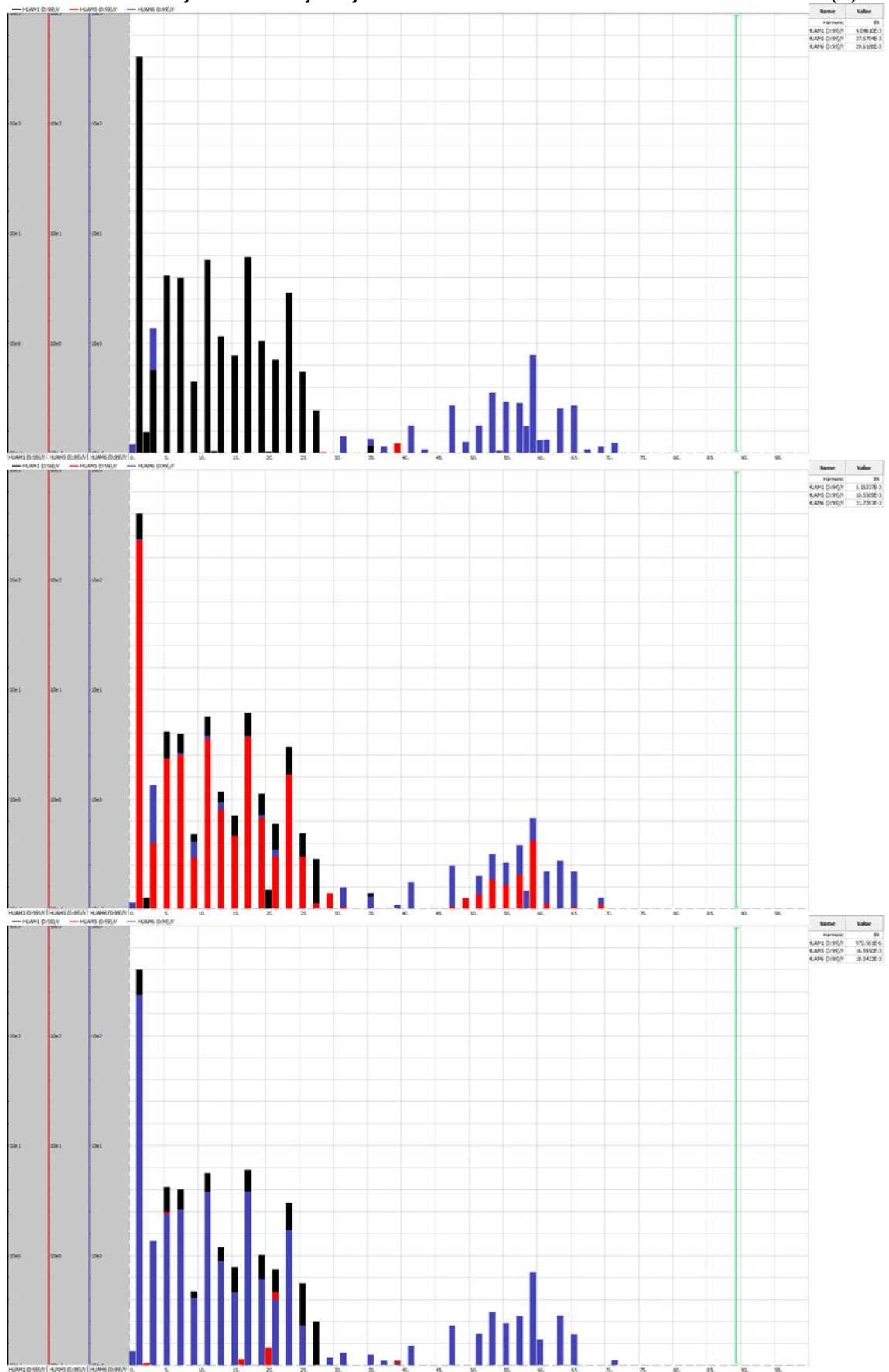
Liite 7. Taajuusmuuttajaohjatun moottorikuorman vaikutus

1(3)



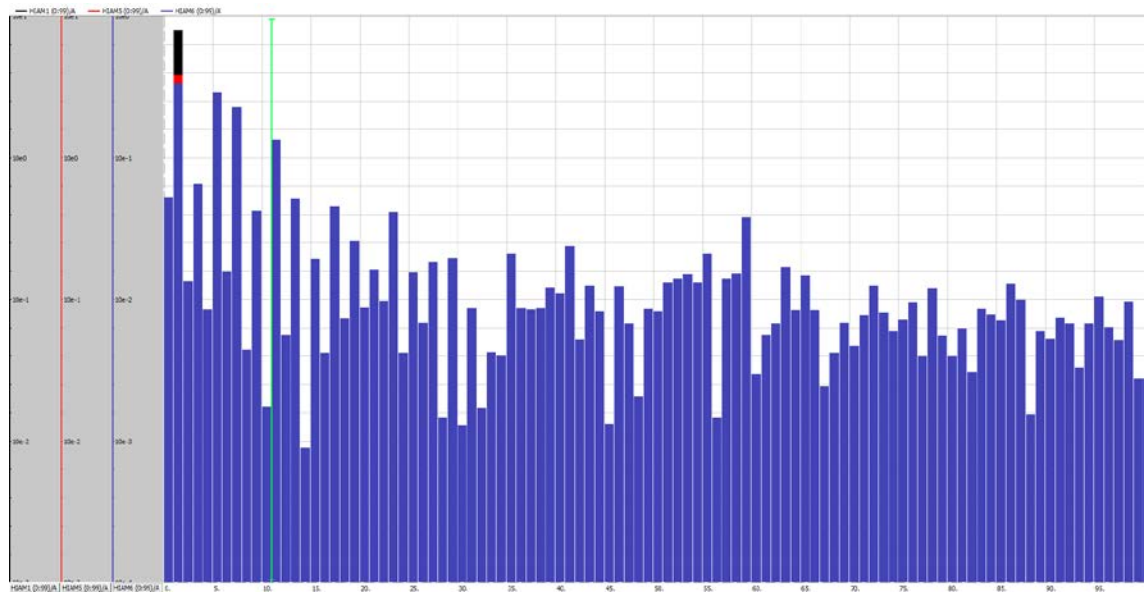
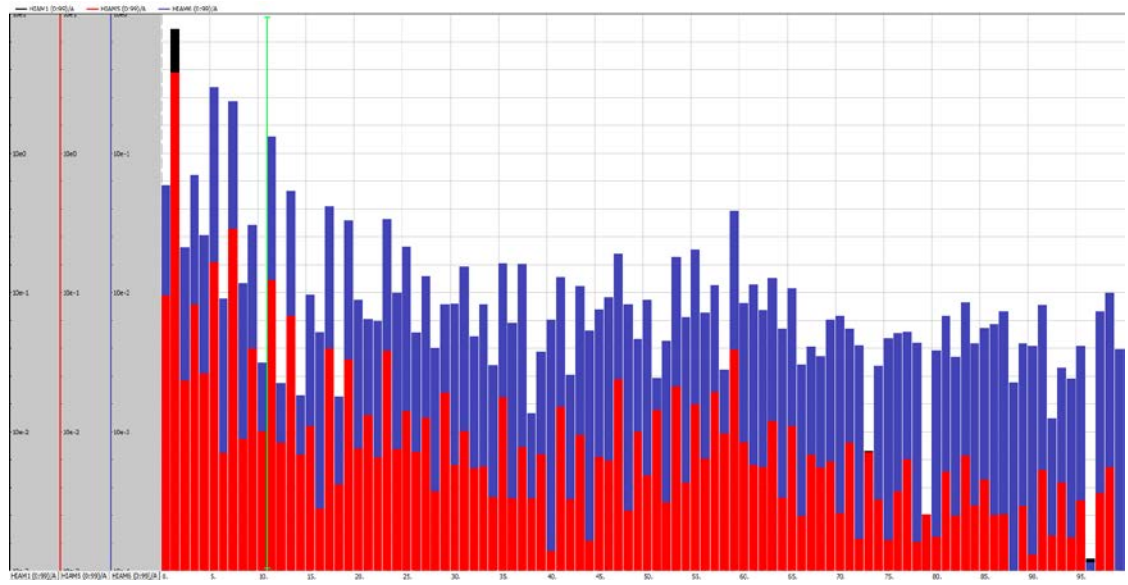
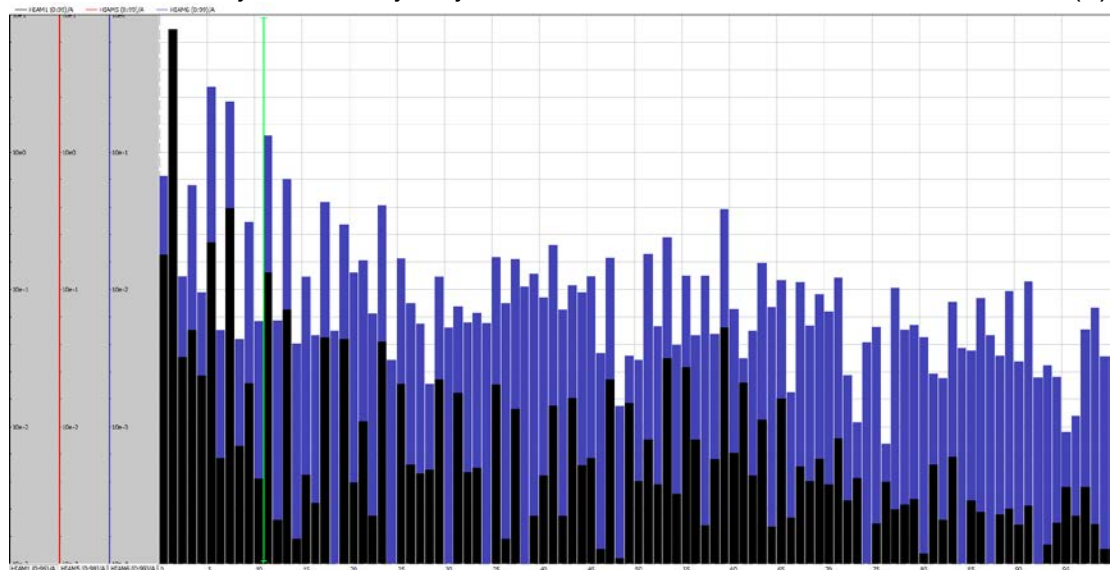
Liite 7. Taajuusmuuttajaohjatun moottorikuorman vaikutus

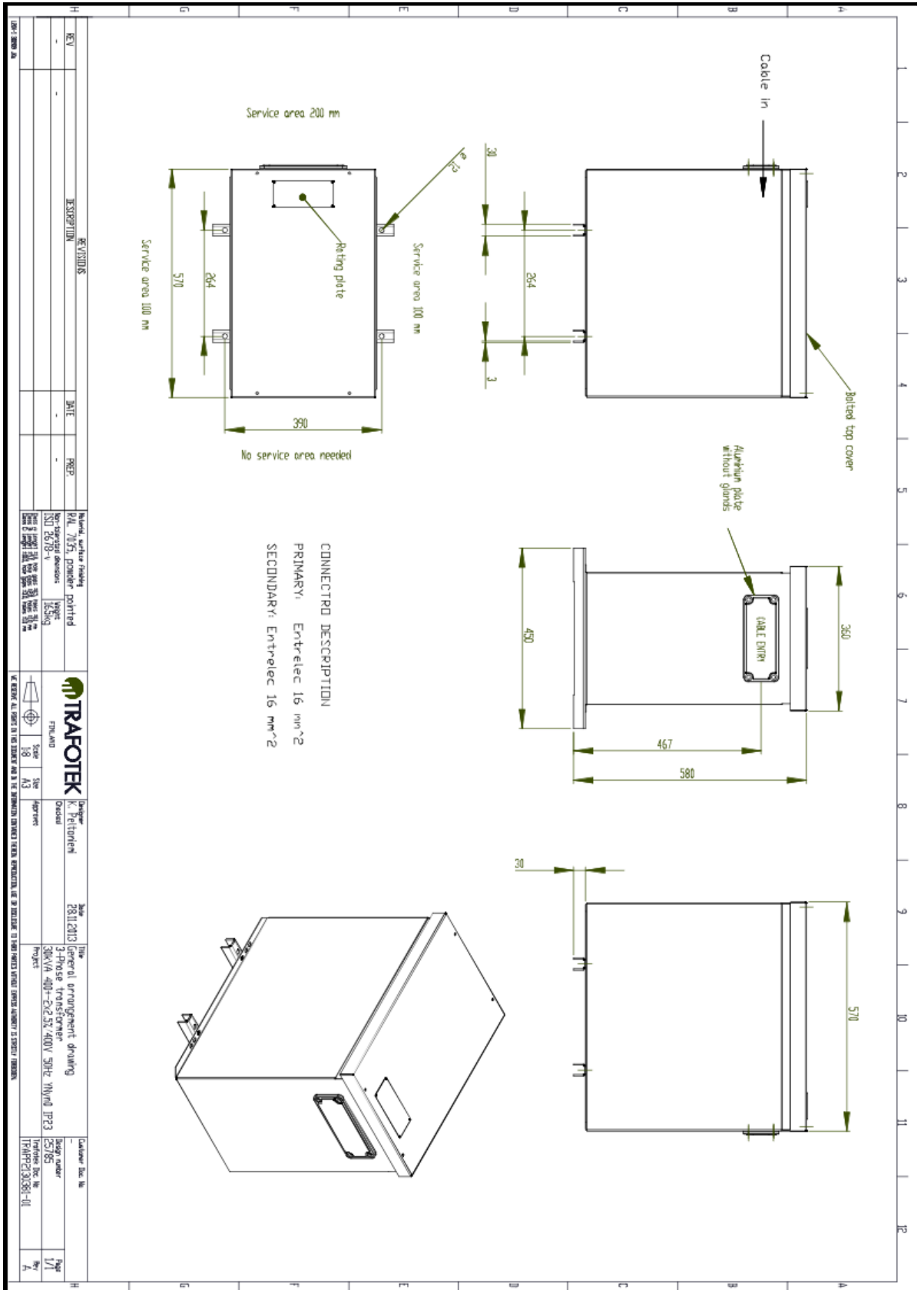
2(3)



Liite 7. Taajuusmuuttajaohjatus moottorikuorman vaikutus

3(3)







TECHNICAL DATA SHEET

Description		Date	Prepared by
Rev. A	For product	03.07.2013	KP
Rev. B	-	-	-
Rev. C	-	-	-

GENERAL DATA

P1010	Document number	TRAPP2130197-01
P1020	Transformer design number (-s)	26852
P1030	Project	-
P1031	Customer reference	-
P1040	Application	2-winding transformer
P1050	Transformer type	Vacuum Pressure Impregnated (VPI) Dry Type Transformer
P1060	Cooling method	AN (Convection cooled)
P1070	Final location of the transformer	< 1000 m above sea-level
P1080	Standards	IEC 61558
P1090	Certification	-

WINDING DATA

	PRIMARY	SECONDARY
P2010	Rated power	30 kVA
P2020	Service factor	S1
P2030	Connection symbol	YN
P2040	Rated voltage	400 V
P2041	Voltage (on no-load)	409 V
P2050	Tappings	-
P2060	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,95	1,000x Un
P2070	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,80	1,000x Un
P2080	Rated current	43,3 A
P2090	Material	Copper
P2100	Temperature rise class	F / 100 K
P2110	Insulation class	F / 155°C
P2120	Insulation level	AC3
P2130	Impedance	-
P2140	Impregnation	Vacuum Press.

*) at 30 kVA

ADDITIONAL TECHNICAL DATA

P3010	Rated frequency	50 / 60 Hz
P3020	Max ambient temperature	40°C
P3030	Inrush current	Ip= 1,1 kA, half-life 0,20 s.
P3040	Noise pressure level	56 dB(A) / 1 m
P3050	No-load losses	370 W +15% IEC tol.
P3060	Load losses	810 W +15% IEC tol. (at 120°C, rated power, rated voltage ratio, sine wave)
P3061	Load losses under distorted current (IEC 61378)	-
P3070	Total losses	1180 W +10% IEC tol.
P3080	Losses to environment	1180 W
P3090	Efficiency (at power factor 1,00)	96,22 % (at 4/4 load) 96,46 % (at 3/4 load) 96,32 % (at 2/4 load) 94,69 % (at 1/4 load)
P3091	Efficiency (at power factor 0,80)	95,31 % (at 4/4 load) 95,61 % (at 3/4 load) 95,45 % (at 2/4 load) 93,45 % (at 1/4 load)
P3100	Weight	145 kg

ENCLOSURE

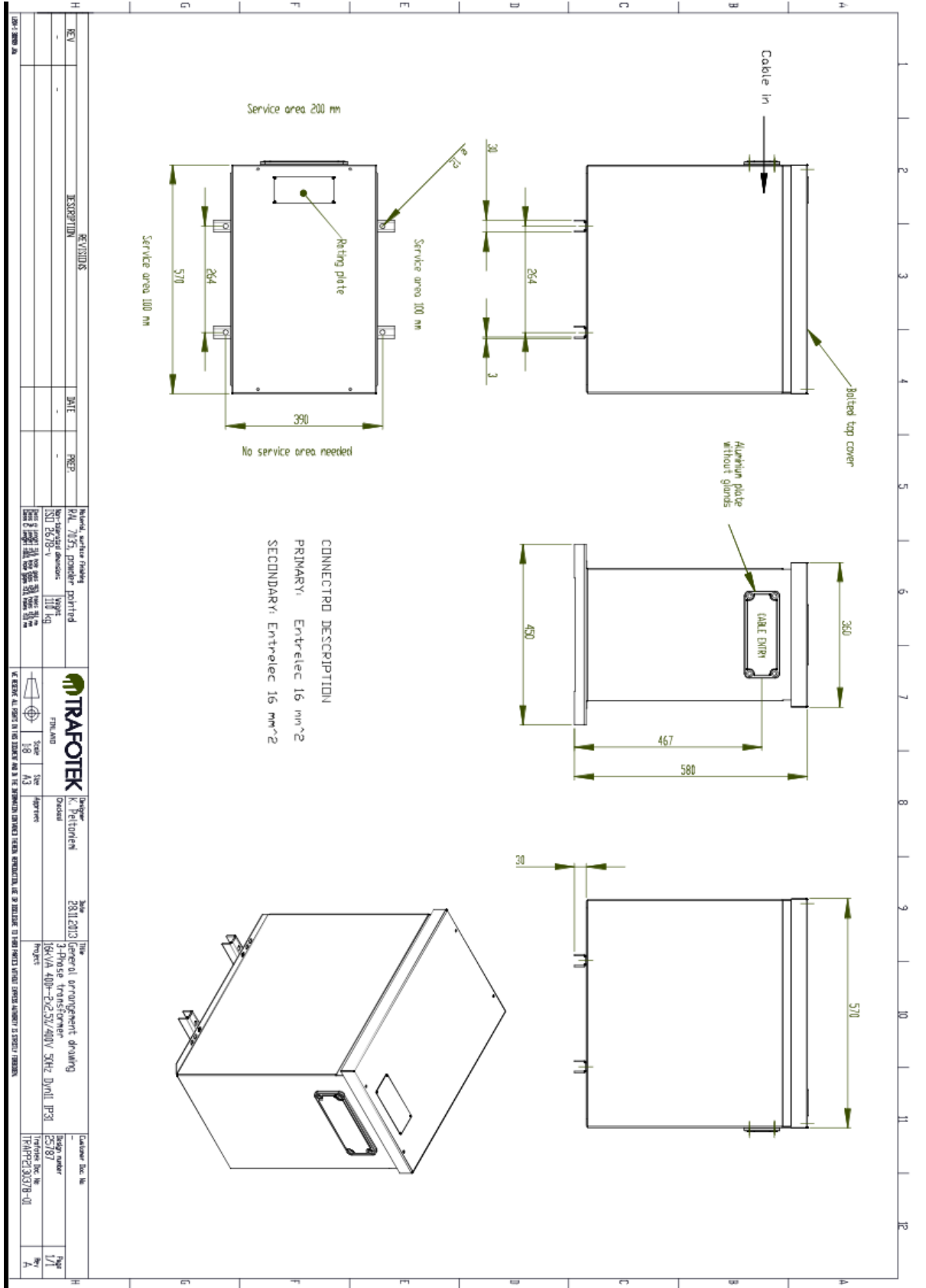
P4010	Protection degree	IP00 for indoor use.
P4020	Construction	-
P4030	Surface finishing	-
P4040	General arrangement drawing	-
P4050	Overall dimensions [WxDxH]	490 x 280 x 530 mm.
P4060	Cable direction	-
P4070	Cable entry, primary	From the above (long side) of the transformer.
P4071	Cable entry, secondary	From the above (long side) of the transformer.
P4080	Cable gland, primary	-
P4081	Cable gland, secondary	-

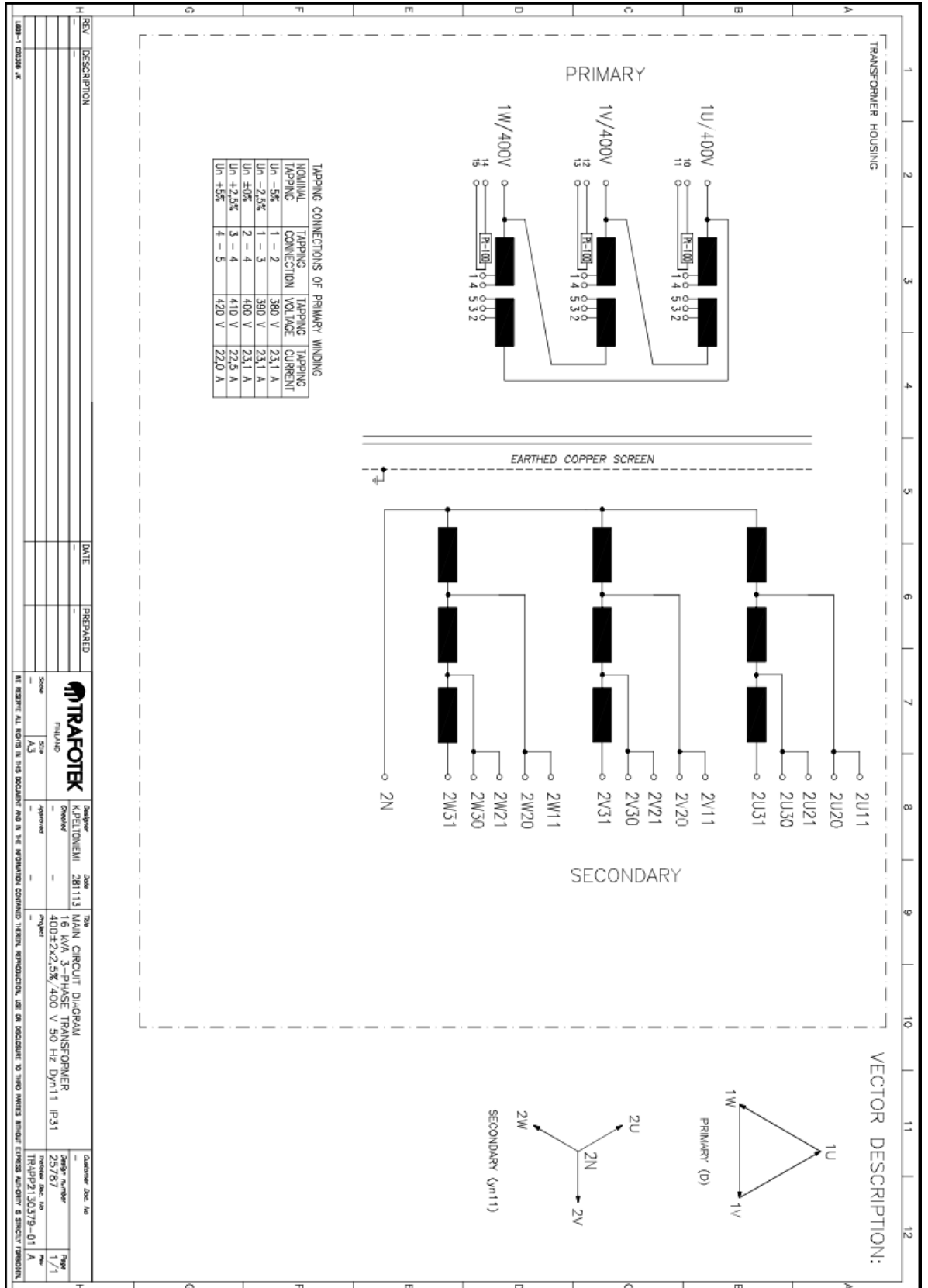
ACCESSORIES

P5010	Earthed screen between windings	Not included.
P5020	Temperature control for windings	Pt-100 (2-wire) / secondary winding, total 3 pcs, wired to the terminals.
P5021	Temperature control for core	Not included.
P5022	Vibration dampers	Not included.
P5023	Stand still heaters	Not included.

NOTES

P9010 -





REV	DESCRIPTION	DATE	PREPARED
001	001016_X		

Designer	281113	DATE	
Checked			
Scale	A3		
Approved			

TRAFOTEK
FINLAND

MAIN CIRCUIT DIAGRAM
16 kVA 3-PHASE TRANSFORMER
400/230/230/400 V 50 Hz Dyn11 IP31

Customer Doc. No
Design number
ZS787
Rev. No.
15/07/2013/29-011 A
Page
1/1

BE CAREFUL! RIGHTS IN THIS DOCUMENT AND IN THE INFORMATION CONTAINED THEREIN, REPRODUCTION, USE OR DISSEMINATION TO THIRD PARTIES WITHOUT EXPRESS AUTHORIZATION IS STRICTLY PROHIBITED.



TECHNICAL DATA SHEET

Description		Date	Prepared by
Rev. A	For product	28.11.2013	KP
Rev. B	-	-	-
Rev. C	-	-	-

GENERAL DATA			
P1010	Document number	TRAPP2130377-01	
P1020	Transformer design number (-s)	25787	
P1030	Project / customer reference	-	
P1040	Application	2-winding transformer	
P1050	Transformer type	Vacuum Pressure Impregnated (VPI) Dry Type Transformer	
P1060	Cooling method	AN (Convection cooled)	
P1070	Final location of the transformer	< 1000 m above sea-level	
P1080	Standards	IEC 60076, IEC 60726	
P1090	Certification	-	

WINDING DATA		PRIMARY	SECONDARY
P2010	Rated power	16,0 kVA	16,0 kVA
P2020	Service factor	S1	S1
P2030	Connection symbol	D	yn11
P2040	Rated voltage	400 V	400 V
P2041	Exact voltage (on no-load)	400 V	401 V
P2050	Tappings	+2x2,5%	-
P2060	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,95	1,000x Un	387 V
P2070	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,80	1,000x Un	387 V
P2080	Rated current	23,1 A	23,1 A
P2090	Material	Copper	Copper
P2100	Temperature rise class	F / 100	F / 100
P2110	Insulation class	H / 180°C	H / 180°C
P2120	Insulation level	AC3	AC3
P2130	Impedance	-	3,75 %*
P2140	Impregnation	Vacuum Press.	Vacuum Press. *) at 16 kVA

ADDITIONAL TECHNICAL DATA			
P3010	Rated frequency	50 Hz	
P3020	Max ambient temperature	40°C	
P3030	Inrush current	Ip= 0,34 kA, half-life 0,20 s.	
P3040	Noise pressure level	58 dB(A) / 1 m	
P3050	No-load losses	250 W	+15% IEC tol.
P3060	Load losses	550 W	+15% IEC tol. (at 120°C, rated power, rated voltage ratio, sine wave)
P3070	Total losses	800 W	+10% IEC tol.
P3080	Weight	110 kg	

ENCLOSURE		
P4010	Protection degree	IP31 for indoor use.
P4020	Construction	Fixed sheet steel enclosure. Bolted top cover.
P4030	Surface finishing	RAL 7035, powder painted.
P4040	General arrangement drawing	GAD_TRAPP2130378-01
P4050	Overall dimensions [WxDxH]	585 x 450 x 580 mm.
P4060	Cable direction	HV and LV on same side of the transformer.
P4070	Cable entry, primary	From the upper part (short side) of the enclosure.
P4071	Cable entry, secondary	From the upper part (short side) of the enclosure.
P4080	Cable gland, primary	Bolted aluminium plate without glands.
P4081	Cable gland, secondary	Bolted aluminium plate without glands.

ACCESSORIES		
P5010	Earthed screen between windings	Not included.
P5020	Temperature control for windings	1x PT-100 (2-wire) / primary winding, total 3 pcs, wired to the terminals.
P5030	Temperature control for windings (PTC)	Not included.
P5040	Vibration dampers	Not included.
P5050	Stand still heaters	Not included.

NOTES	
P9010	-

Lapin AMK

LIITE 10

ZES Zimmer LMG500 - Pikaohje

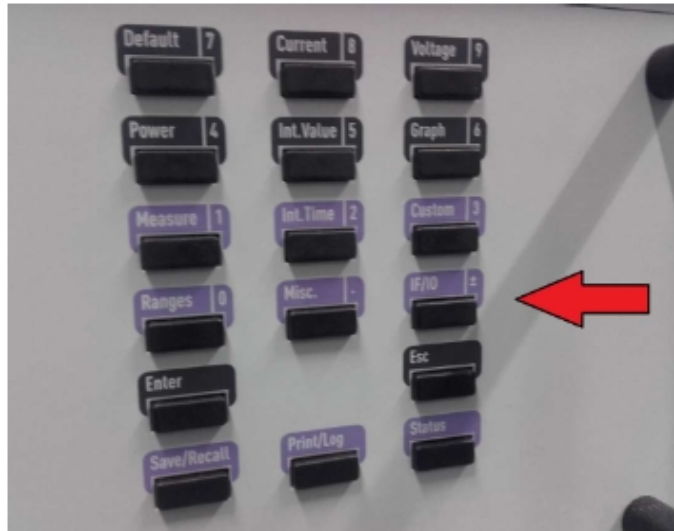


Lapin AMK

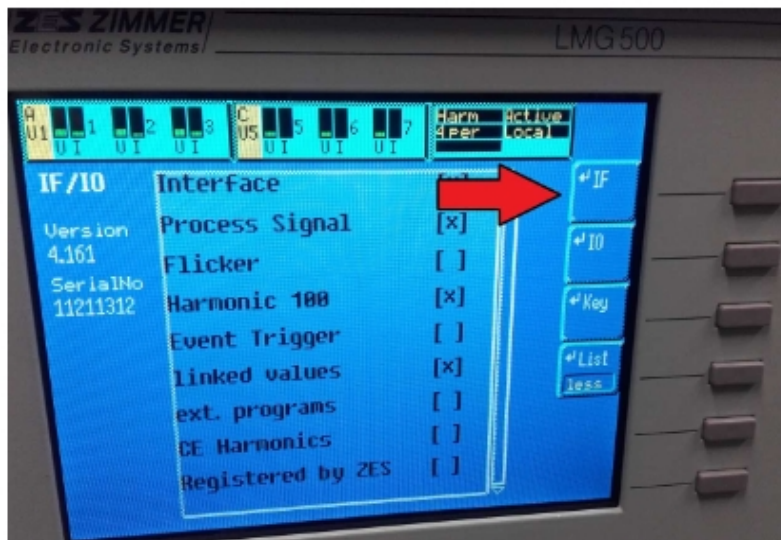
LIITE 10

USB-yhteyden muodostaminen PC:hen

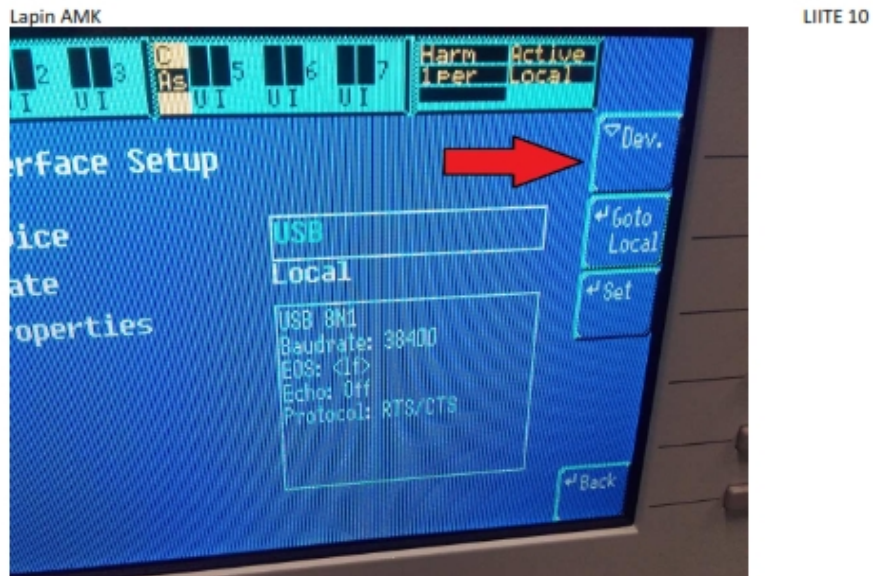
1. Varmista mittalaitteesta, että SERIAL-kaapeli kytketty mittalaitteeseen ja tietokoneeseen.
2. Varmista, että mittalaite on päällä.
3. Paina mittalaitteen **IF/IO**-näppäintä.



4. Paina IF-näppäintä valikon näppäimistä



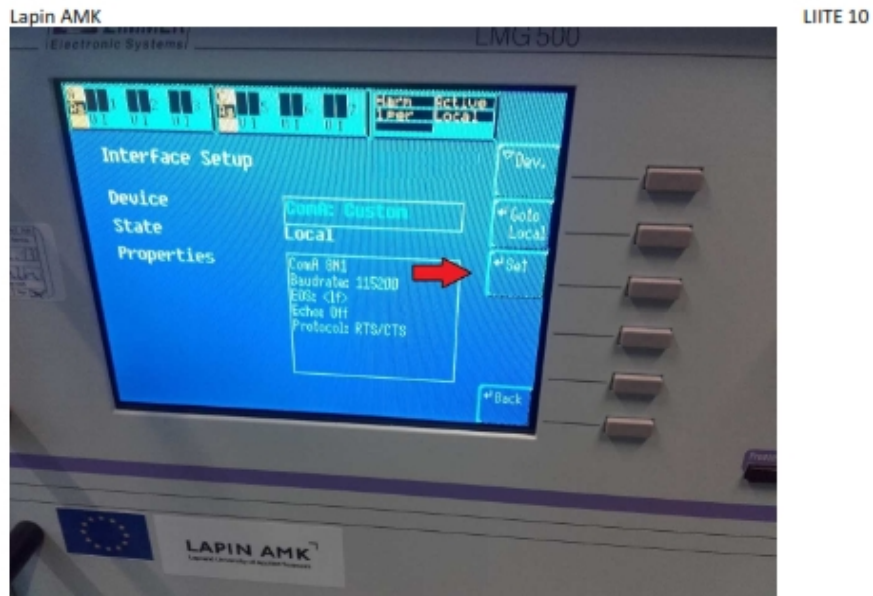
5. Paina näyttöpaneelin **DEV**-näppäintä näytön valikon näppäimistä



6. Valitse yhteyslaitteeksi ComA: Custom pyörittämällä rullaa ja Enter kun ComA: Custom on valikoitu.



7. Valitse näytön valikon näppäimistä Set



8. Valitse Set-valikosta kuvan mukaiset asetukset. Baudrate **115200**. Painamalla **ESC**-näppäintä pääset pois valikosta.



9. Käynnistä LMG-sovellus ja valitse ylävalikosta Options ja Preferences.

Liite 10.

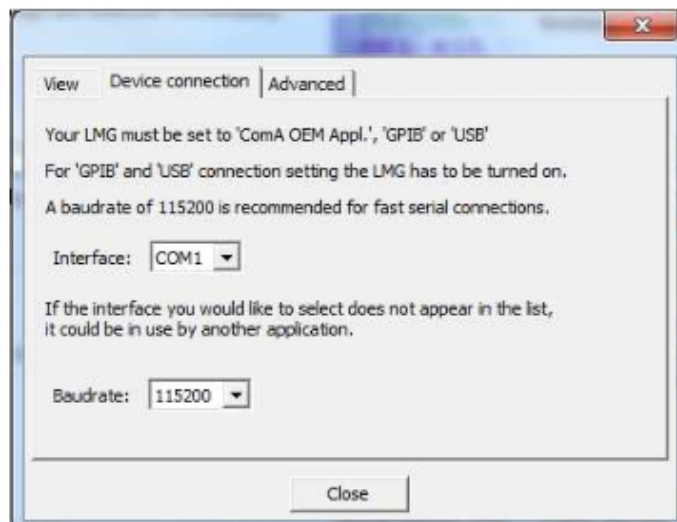
ZIMMER LMG500 Pikaohje

5(14)

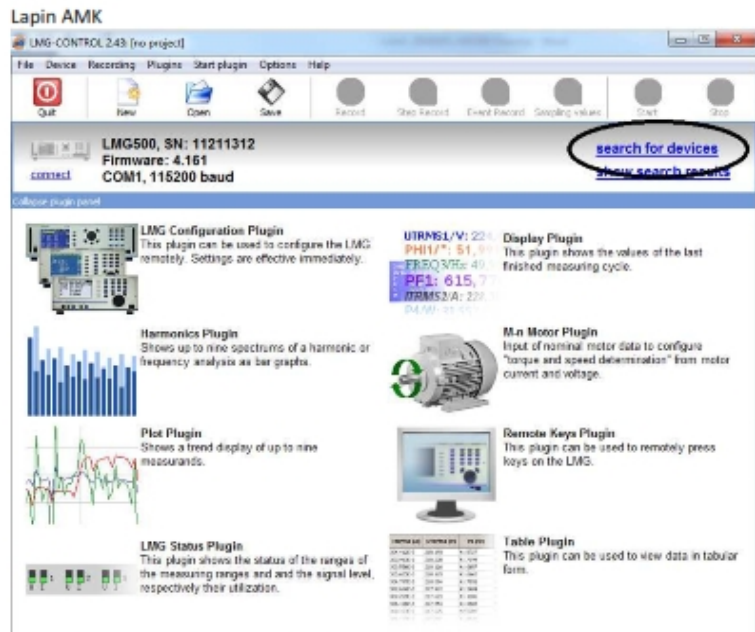


LIITE 10

10. Valitse Device connection interfaceksi **COM1**. Oikean portin osoitteen saa tietoon laitehallinnasta. Valitse sama Baudrate, joka syötettiin mittalaitteelle (**115200**) ja paina Close.



11. Paina search for devices.



LIITE 10

12. Kun search devices-painiketta on painettu, niin sovellus ottaa yhteyden automaattisesti ja pystyt käyttämään laitetta PC:ltä, kun se näkyy vihreällä pohjalla.



Huom: Laitetta on turha käyttää USB-yhteydellä. USB-yhteys toimii epäluotettavasti ja sulkee sovelluksen ohjelmia. Myös datan keruu patkii USB-yhteydellä. Joten käytä tietokonetta jossa on SERIAL-portti.

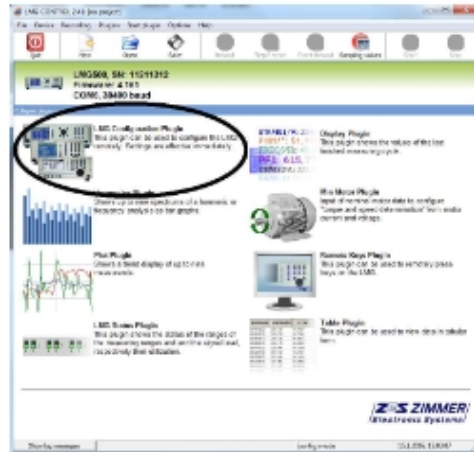
Mittapäiden konfigurointi PC:llä

Mittapäiden konfigurointi on liian vaivalloista mittalaitteella, joten tässä kerrotaan vain miten PC:llä tehdään mittapäiden konfigurointi.

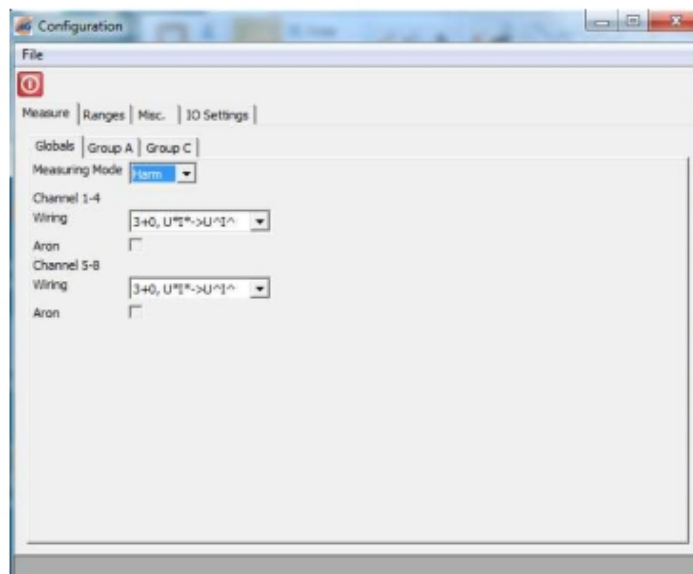
Lapin AMK

1. Paina LMG configure pluginia

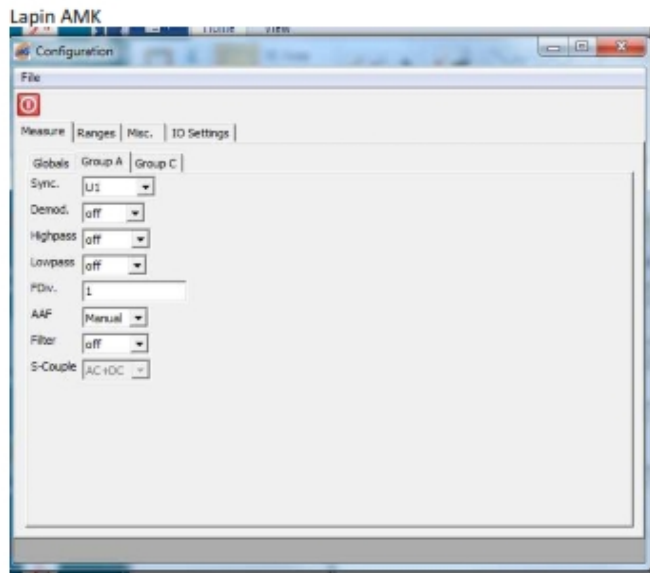
LIITE 10



2. Valitse oikea measuring mode ja johdotustyyppi. Oikean johdotustyyppin saat tietoon laitteen ohjekirjasta. Jos käytät mittalaitetta 3-vaiheen mittaamiseen, niin voit käyttää 3+0 johdotusta, ja valitse Harm-mode jos haluat mitata myös harmonisia aaltoja.

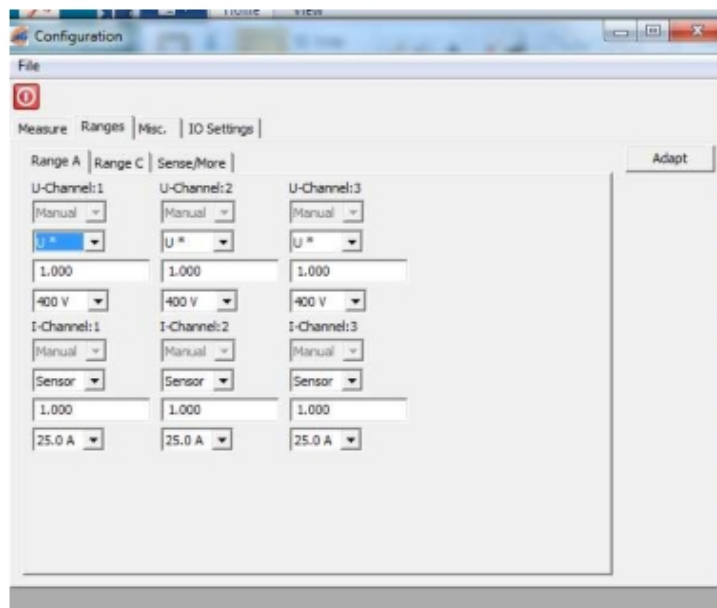


3. Valitse measuresta A ja C-kanavalle haluamasi signaalia filteröivät asetukset



LIITE 10

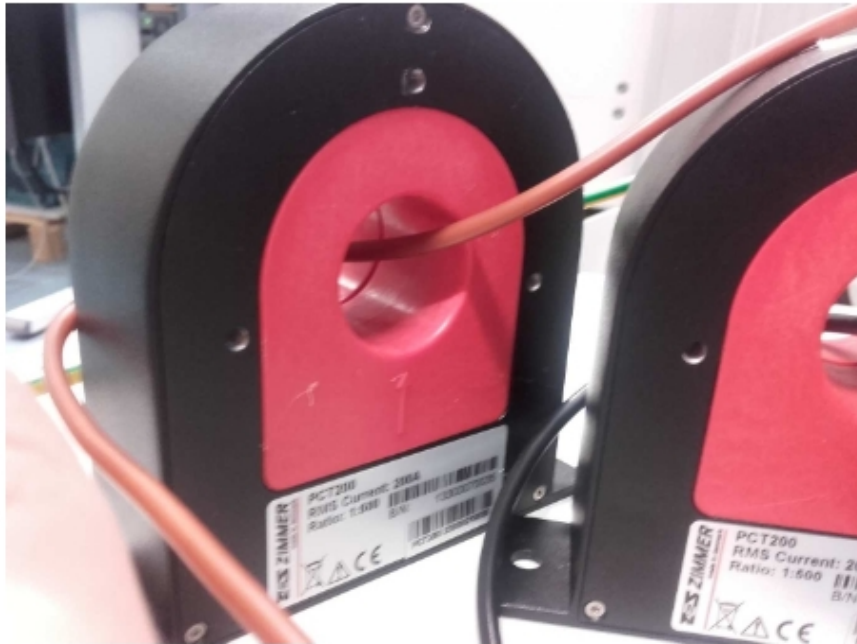
4. Valitse Ranges menusta mittauksen maksimi jännitteet ja virrat. Sensorien asetukset pitävät olla manuaalisesti kuvan mukaan, koska automatiikka ei aina toimi asianmukaisesti.



Lapin AMK
Virtasensorien käyttö

LIITE 10

1. Laita johdin mittapään läpi ja kytke mittapää mittalaitteeseen.
2. Laita johdin oikeinpäin mittapähän, jotteivat tehot eivät olisi negatiivisia.



Lapin AMK

LIITE 10

Mittaustuloksien saaminen PC-käyttö

1. Mittauksien saaminen taulukkoon valitse table plugin



2. Paina Add-painiketta



Liite 10.

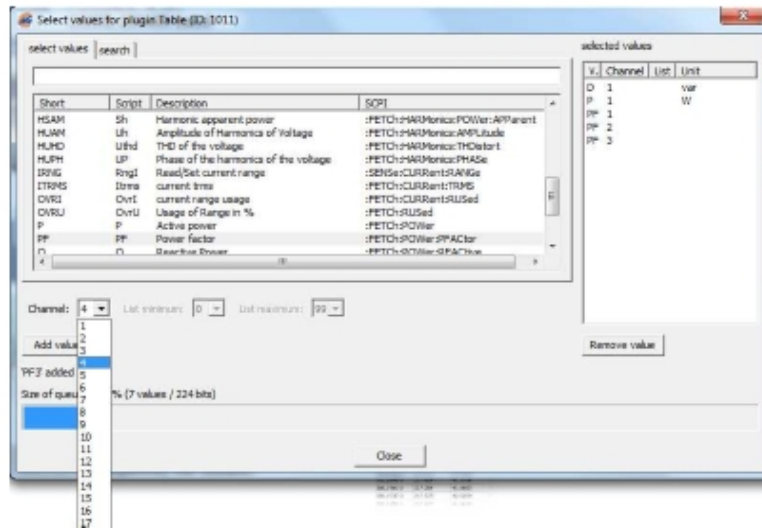
ZIMMER LMG500 Pikaohje

11(14)

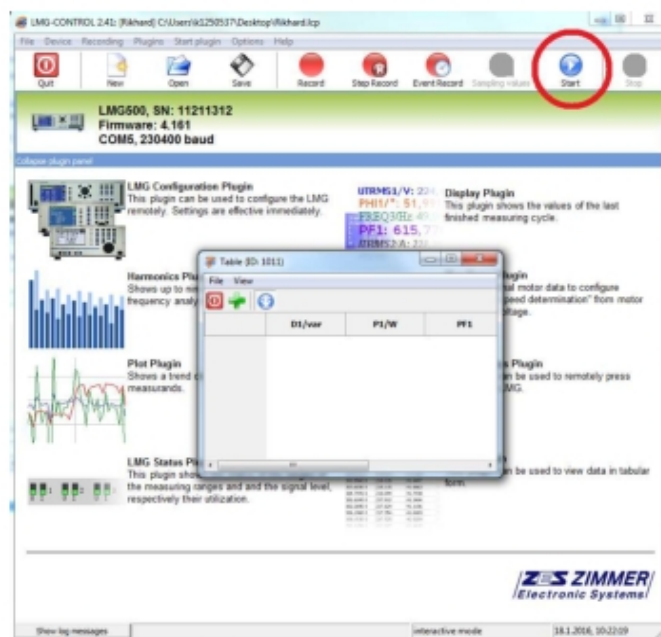
Lapin AMK

LIITE 10

3. Valitse haluamasi mitattava suure ja suureen mittapään kanava ja paina **Add value** ja suureiden lisäämisen jälkeen **Close**. Kanavien määrä riippuu valitsemasta johdotuksesta. Jos haluat tässä johdotuksessa A-kanavan summan, niin valitse kanava 15 ja C-kanavalle 17.



4. Paina Start

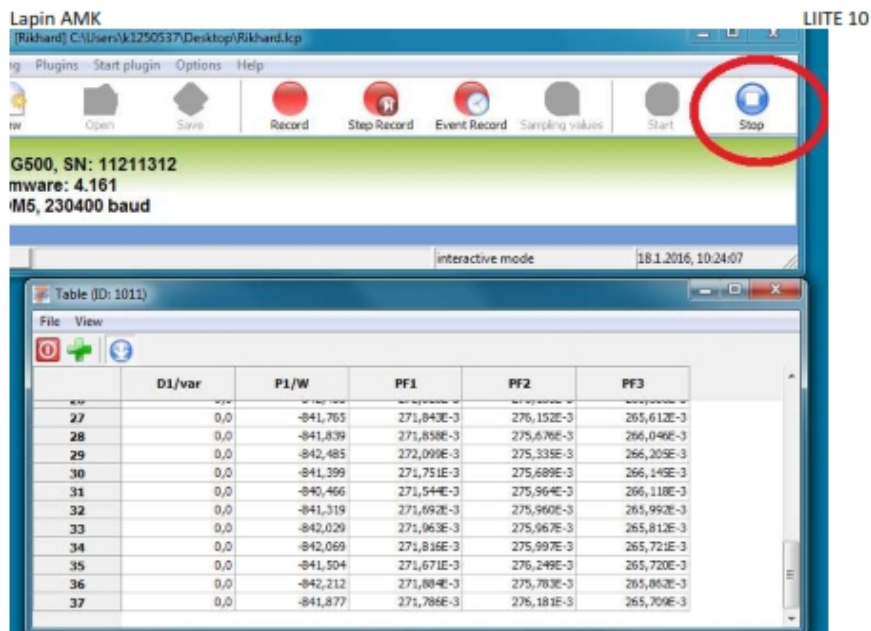


5. Kun olet saanut tarpeeksi mittaustuloksia, niin paina **Stop**.

Liite 10.

ZIMMER LMG500 Pikaohje

12(14)



6. Nyt voit katsella mittaustuloksia, mutta et voi kopioida niitä Exceliin. Vain PrtScreen toimii.

Table (ID: 1011)

	D1/var	P1/W	PF1	PF2	PF3
1	0,0	-843,319	271,767E-3	274,928E-3	266,846E-3
2	0,0	-841,907	271,292E-3	275,226E-3	266,927E-3
3	0,0	-842,867	271,605E-3	275,168E-3	266,793E-3
4	0,0	-843,401	271,753E-3	275,285E-3	266,570E-3
5	0,0	-843,363	271,683E-3	275,233E-3	266,585E-3
6	0,0	-843,431	271,682E-3	275,429E-3	266,366E-3
7	0,0	-843,500	271,710E-3	275,404E-3	266,401E-3
8	0,0	-843,937	271,839E-3	275,172E-3	266,487E-3
9	0,0	-843,451	271,654E-3	275,425E-3	266,381E-3
10	0,0	-842,846	271,556E-3	275,403E-3	266,621E-3
11	0,0	-841,377	271,686E-3	276,252E-3	265,583E-3
12	0,0	-842,562	272,023E-3	275,947E-3	265,496E-3
13	0,0	-841,632	271,794E-3	276,221E-3	265,450E-3
14	0,0	-842,885	272,019E-3	275,831E-3	265,407E-3
15	0,0	-842,184	271,834E-3	276,171E-3	265,389E-3
16	0,0	-841,766	271,803E-3	276,306E-3	265,400E-3
17	0,0	-842,443	271,989E-3	276,207E-3	265,272E-3
18	0,0	-842,689	272,014E-3	276,105E-3	265,298E-3
19	0,0	-842,708	271,978E-3	276,062E-3	265,320E-3

7. **Harmonics** ja **plot** pluginien käytössä pitää muistaa, että saat vain 9 eri mittaustulosta samaan kaavioon. Voit kuitenkin avata monta pluginia mittauksen ajaksi. Harmonics ja Plot pluginissa lisätään arvoja samalla tavalla kuin tablet pluginissa.

Liite 10.

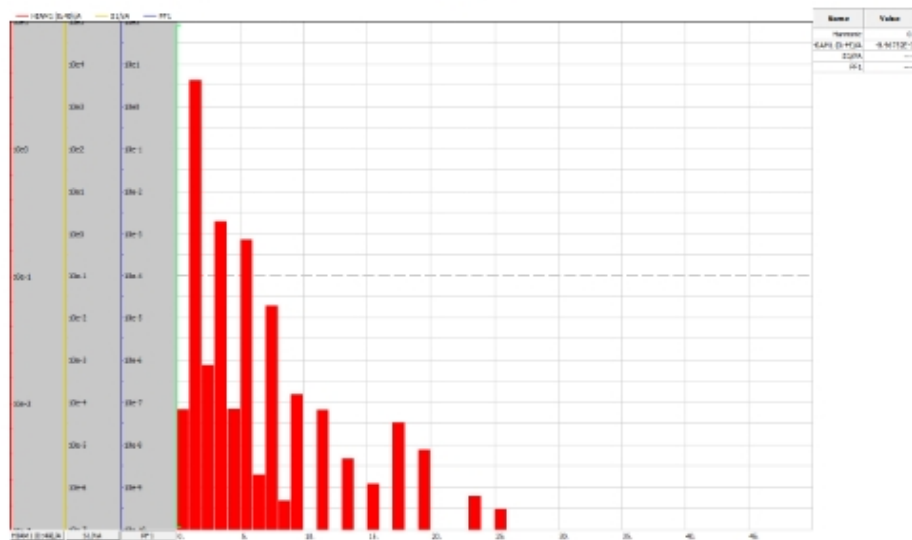
ZIMMER LMG500 Pikaohje

13(14)



LIITE 10

8. Harmonics pluginin käytössä ei voida tarkastella jännitteitä tai muita sen kaltaisia yksinumeroisia arvoja. Kuvan saa kaapattua ylämenusta EXTRAS ja Copy screenshot of plot to clipboard.

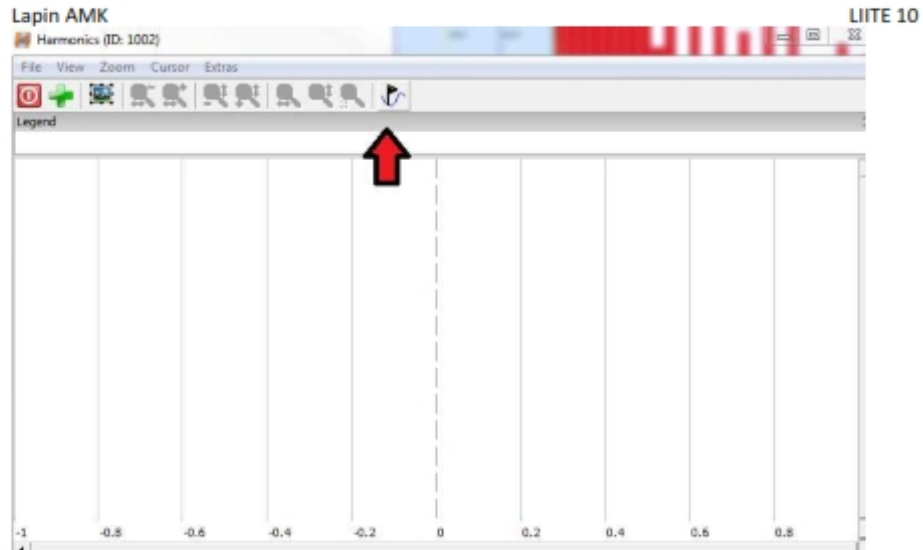


9. Kuvaajan arvoja pääset tarkastelemaan painamalla **Display a marker painiketta**. Painamisen jälkeen kuvaajan yläoikealle ilmestyy mittaustuloksia ja pystyt tarkastella mittaustuloksia liikuttamalla vihreää pystysuoraa kursoria kuvaajan päällä. Mittaustulokset voi copy + paste toiminnolla siirtää Excel-taulukkoon.

Liite 10.

ZIMMER LMG500 Pikaohje

14(14)



10. **Plot** pluginissa voi myös tarkastella harmonisia suurreita, mutta vain jos ne asetetaan yhteen harmoniseen taajuuteen. Plot pluginissa suuret saadaan samaan tasoon painamalla ylämenusta **ZOOM** ja **Fit graph to window**. Myös kuvaajan tarkastelu tehdään samalla tavalla kuin harmonisessa pluginissa.

